

서비스로봇 기술개발

Development of Service Robot Technology

서비스로봇 기술개발 사업단

Management for Development of Service Robot Technology

이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

Development of a Mobile Manipulation Technology

지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

수직 철골 용접 로봇 시스템 개발

Development of Welding Robot System for Vertical Steel Beam

(제 1 권)

연구기관

한국과학기술연구원

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “서비스로봇 기술 개발”과제 (세부과제 “서비스로봇 기술 개발 사업단, 이동 기능을 갖는 로봇 조작기술 개발, 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발, 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발”) 의 보고서로 제출합니다

2002. 8 .

■ 서비스로봇 기술개발 사업단

단장 / 총괄연구책임자 : 이 종 원

■ 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발 (제1세부과제)

주관연구기관명 : 한국과학기술연구원

주관연구책임자 : 김 문 상

연 구 원 : 이 종 원

” : 황 요 하

” : 강 성 철

” : 정 우 진

연 구 원	: 박 성 기
"	: 최 종 석
"	: 김 건 희
"	: 김 승 종
"	: 송 낙 윤
"	: 배 희 종
"	: 이 태 근
"	: 조 창 현
"	: 이 재 형
"	: 이 형 진
"	: 오 종 민
"	: 김 영 기
"	: 남 미 희
"	: 박 순 용
"	: 이 동 희
"	: 이 창 주
"	: 한 명 수
"	: 여 인 택
"	: 허 종 성
"	: 이 찬 호
"	: 조 용 중
"	: 김 영 환
"	: 이 상 훈
"	: 박 창 범
"	: 오 종 규
"	: 김 경 기
"	: 임 정 찬
"	: 신 경 철
"	: 유 호 상
"	: 김 석 환
"	: 백 대 원

협동연구기관명 : 현대중공업(주)

협동연구책임자 : 이 충 동

■ 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발 (제2세부과제)

주관연구기관명 : 한국과학기술원

주관연구책임자 : 변 중 남

연 구 원 : 정 명 진
" : 장 평 훈
" : 권 동 수
" : 김 대 진
" : 한 정 수
" : 이 형 욱
" : 김 민 중
" : 박 해 리
" : 이 영 진
" : 김 재 헌
" : 유 동 현
" : 이 방 래
" : 박 형 순
" : 서 명 진
" : 김 성 태
" : 강 상 훈
" : 김 종 현
" : 안 진 응
" : 이 규 빈

연 구 원 : 민 재 응
" : 임 수 철
" : 김 동 윤
" : 이 영 목
" : 노 경 식
" : 권 응
" : 백 상 은

협동연구기관명 : 삼성전자(주) 종합기술원

협동연구책임자 : 이 석 한

■ 수직 철판 용접로봇 시스템 개발 (제3세부과제)

주관연구기관명 : 생산기술연구원

주관연구책임자 : 이 호 길

연 구 원 : 손 응 희
" : 황 성 호
" : 김 진 영
" : 이 선
" : 원 대 희
" : 김 종 형
" : 최 원
" : 홍 성 진
" : 양 승 원
" : 손 태 규
" : 김 성 진
" : 이 창 주

협동연구기관명 : 삼성전자(주)

협동연구책임자 : 오 연 택

여 백

보고서 초록

과제관리번호	M1-0017-01 -0001	해당단계 연구기간	2년	단계 구분	2/3
연구사업명	중 사업명	중점국가연구개발사업			
	세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	서비스로봇 기술개발 사업단			
연구책임자	이종원	해당단계 참여연구원수	총 : 2 명 내부 : 2 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 94,000 천원 기업: 천원 계: 94,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<p>서비스로봇 2단계사업은 1단계의 개념설정단계를 기반으로 서비스 로봇개발에 필요한 핵심기술을 완성하고 이를 바탕으로 시제품을 제작하는 단계이다.</p> <p>서비스로봇 사업단은 2단계 사업이 원활히 수행되도록 세부과제의 총괄 관리와 추진관리를 주도하여 왔으며 국내외 기술현황을 바탕으로 서비스로봇 기술개발 방향을 조향하여 왔다.</p> <p>이를 위하여 서비스로봇 사업단에서는 국내외 기술 현황을 조사보고서를 작성하였고 2단계에서 개발된 핵심기술들을 각 세부 연구팀간에 공유하기 위하여 서비스로봇 워크숍과 핵심기술 분야별 기술 연구를 위하여 기술별 Special Interest Group(SIG)를 형성하여 기술을 촉진시키고 Special Interest Group 워크숍을 추진하여 기술별 연구결과를 연구팀간에 파급토록 하였으며 서비스 로봇 기술의 핵심인 Dependable Robot에 대한 IARP/IEEE-RAS의 국제 워크숍을 국내에 유치, 개최함으로써 핵심기술에 대한 국제 기술교류를 추진하였다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	서비스로봇, 사업단, 사업총괄관리			
	영 어	service robot, project management, system management			

보고서 초록

과제관리번호	M1-0017-01 -0002	해당단계 연구기간	2년	단계 구분	2/3
연구사업명	중 사업명	중점국가연구개발사업			
	세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발			
연구책임자	김문상	해당단계 참여연구원수	총 : 59 명 내부 : 9 명 외부 : 50 명	해당단계 연구비	정부: 1,976,000천원 기업: 1,022,000천원 계: 2,998,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국과학기술연구원 (KIST) 휴먼로봇연구센터		참여기업명	현대중공업, 현대자동차, 유진로보틱스	
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<p>1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 로봇손과 팔, 전방향 이동부로 구성되는 PSR (Public Service Robot) 1 플랫폼을 개발하여 실내환경에서 주행, 조작 시험. - 자율주행, 조작을 위한 알고리즘과 다양한 센서 및 제어기 등을 통합하기 위한 제어구조를 정의하여 통합 시스템 구현. - 분산형 제어기, passive compliant joint를 탑재한 PSR 2 플랫폼 시제작 완성. <p>2. 이동형 정보서비스로봇 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 가정에서 활용할 수 있는 이동형 정보서비스 로봇의 platform 개발 - Visual navigation을 수행할 수 있는 robot system 개발 - 인간과의 visual and voice interface가 가능한 시스템 개발 - Internet에 의한 robot system의 원격제어가 가능한 시스템 개발 <p>3. 형상적응형 universal hand 개발</p> <p>8개의 진공컵을 가지고 금형 교환 시에 미리 입력된 프로그램에 따라 다음 대상물의 크기와 형상에 맞도록 진공컵의 위치가 자동으로 조절되는 형상 적응이 가능한 작업물 이송용 유연 그리퍼 장치를 개발한다. 무게, 크기, 작업 영역 등의 현장의 제한조건을 만족하는 다양한 형상을 연구 제작하여 시험하였으며 현재 최종안을 제작 완료하였고 이의 성능을 시험중이다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한글	서비스로봇, 자율주행, 다관절로봇, 휴먼인터페이스, 유연 그리퍼			
	영어	service robot, autonomous navigation, manipulator, human interface, universal hand			

보고서 초록

과제관리번호	M1-0017-01 -0003	해당단계 연구기간	2년	단계 구분	2/3
연구사업명	중 사업명	중점국가연구개발사업			
	세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	지능형 인간-로봇 상호작용 기술개발			
연구책임자	변증남	해당단계 참여연구원수	총 : 35 명 내부 : 35 명 외부 : 0 명	해당단계 연구비	정부: 890,000 천원 기업: 426,000 천원 계: 1,316,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학전공		참여기업명	삼성전자(주) 종합기술원	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<ul style="list-style-type: none"> • 환자 및 장애인을 위한 휠체어 로봇 시스템의 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 목표 지향 설계를 통한 12가지 작업이 가능한 로봇 설계 기법 제안, 텐션 조절이 가능한 back-drivable하고 백 래쉬 없는 동력 전달 메카니즘 구현, 별도의 힘 센서 없는 강인한 compliance 제어 기법 제안. - 지능형 비주얼 서보잉을 위한 인간 시각 시스템에 기반한 새로운 영상 처리 기법, 얼굴 표정 인식을 통한 사용자 의도 파악 기능 구현. 소형/경량의 스테레오 카메라 헤드 및 제어기 개발. 인간-로봇 공동작업 기술의 구현. 로봇 팔 제어를 위한 생체신호 분류 알고리즘. - 자기센서와 이미지 처리 알고리즘을 통해 장착형 Eye-mouse 시스템을 구현했고 적외선 LED와 기하학적 특성을 이용하여 비장착형 Eye-mouse 시스템을 구현하였다. 아울러 이러한 시스템을 활용하는 인터페이스 프로그램 및 전체 시스템의 성능을 향상시키는 3차원 위치 추출 시스템을 개발. - Body Motion을 측정하여 장애인이 보조 시스템을 구동할 수 있도록 머리 인터페이스, 의복 형태 조종기, 반능동 힘반향 수동 조종기를 개발하고 로봇과 사용자 사이의 원활한 협조가 가능하도록 지능형 인터페이스 알고리즘 개발. - 저가, 경량형으로 사용이 편리한 Hand-held Master의 개발 및 그를 위한 제어 알고리즘의 개발. 다양한 센서를 이용한 master의 6차원 자세를 실시간 획득하고, 가상 또는 실제의 로봇과 물체의 운동을 지시함으로써 힘의 피드백정보를 master의 진동으로 나타내어 사용하기 편리하고 직관적인 제어알고리즘 개발. 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	인간-로봇 상호작용, 재활공학 시스템, 서비스 로봇			
	영 어	Human-robot interaction, Rehabilitation engineering system, Service robot			

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	1년	단계 구분	2/3
연구사업명	중 사업명	중점국가연구개발사업			
	세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	수직 철골 용접 로봇 시스템 개발			
연구책임자	이 호 길	해당단계 참여연구원수	총 : 17 명 내부 : 1 명 외부 : 1 명	해당단계 연구비	정부: 240,000천원 기업: 120,000천원 계: 360,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국생산기술연구원 자본재센터		참여기업명	삼성전자(주)	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 : 세종대학교		연구책임자 : 문 승 빈		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
<p>■ Single arm type 용접 로봇 시스템 proto-type 개발 (H/W 설계 제작)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 5축 소형 수직 다관절 로봇을 6축으로 개조 및 적용, 전용 end-effector 설계/제작 - 방진, 방수, 방폭 구조의 옥외용 로봇 제어기 개발, 적용 (진단기능, 제어기능, feedback 기능 추가) - 원치 시스템을 이용한 로봇 고정 지지부 메커니즘 설계/제작 - 로봇 additional accessory 기구부 설계/제작 - 슬라이딩 주행에 따른 슬립 억제를 위한 Contact Roller부 설계 변경/제작 - 3방향 모멘트 지지구조로 주행 캐리어 시스템을 설계하여 주행 안정성 및 자기 위치 복원성 향상 - 설치 용이성을 고려한 클립레버 타입의 집철식 레일 설계, 제작 - 현장 적용의 용이성을 고려한 로봇 주행대차 메커니즘 설계 - 주행부 동시 제어를 위한 Cable/Harness 일체화 <p>■ 기능 구현 S/W 개발 (시스템 제어 및 용접 기술 개발)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 매니플레이터 작업 기능 Library - Sample host program을 통한 System 제어 - Laser sensor tracking (Serial communication) 구현 - Touch sensor tracking 기능 구현 - 내장형 Arc sensor tracking proto 개발 적용 - Multi-pass 용접 기능 구현 - 용접 전용 Display 구성 (Control Monitoring 적용) - 전압 전류 Tuning algorithm 개발 - 특수 용접 Motion algorithm 개발 - 용접 조건 따른 로봇 경로 제어 - uncertainty가 있는 지지대에 대한 로봇의 제어 알고리즘 개발 - 장애물 회피 알고리즘 개발 - 원격 PC를 통한 user I/F system 구현 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	용접, 다관절 로봇, 시스템, 제어, 레일			
	영 어	welding, manipulator, system, control, rail			

요 약 문

I. 제 목 서비스로봇 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

1.1 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

연구개발의 최종 목표 : 대형건물내에서 사용되는 빌딩용 도우미로봇의 개발

연구개발의 필요성:

가 . 기술적 측면

서비스로봇 기술은 전자, 전기, 기계, 정보통신, 전산, 센서, 재료, 산업공학 등 복합적인 기술의 집합체로서 앞으로 다가올 Technology Round 시대를 대비하기 위하여는 이와 같은 대표적 미래 복합 기술 분야에 대한 거시적 기술 목표 설정 및 국제화 전략 기술 개발이 절대적으로 필요하다.

나. 경제, 산업적 측면

- (1) 해저, 지하, 우주공간 등 앞으로 인간의 생활공간이 될 미지 세계에서 인간 작업 대체를 통한 경제성 향상
- (2) 공공 복지형 서비스 로봇 자체 및 관련 미래 복합기술과 연계된 신산업 창출
- (3) 관련 원천요소기술의 타 산업에의 파급을 통한 신산업 기반 구축

다. 사회, 문화적 측면

환경이 좋지 않은 곳에서의 작업 (악환경, 위험한 환경, 야간 작업 등), 중노동과 같이 부담이 큰 작업 및 단순 반복 작업 분야 등의 인력 부족이 예상되는

분야의 문제해결을 위한 서비스 로봇의 개발은 필수 불가결함

1.2 이동형 정보서비스로봇 개발

인간의 미래사회는 robot을 더욱 적극적으로 이용하는 사회가 될 것이며, 이는 가정 생활에서도 하나의 지능형 가전제품처럼 robot이 활용되리라고 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 집안 내에서 사람과 더불어 생활하는 mobile robot system을 개발하는데 그 목적이 있다.

1.3 형상적응형 universal hand 개발

자동차 공장의 대량 생산용 프레스 작업에 있어서, 대상물을 loading 또는 unloading하기 위해 진공컵을 이용하여 파지하는 장치를 attachment라 한다. 종래의 attachment들은 사슴뿔과 같은 복잡한 형상을 가지며 다양한 크기와 형태의 작업물에 따라 각기 다른 모양으로 제작되어, 금형 교환 시에 함께 교환되어야 하는 실정이며, 프레스당 수십 개에 이르는 attachment의 유지, 보수와 적재 공간의 확보가 생산 효율을 떨어뜨리고 있다. 본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 8개의 진공컵을 가지는, 금형 교환 시에 미리 입력된 프로그램에 따라 다음 대상물의 크기와 형상에 맞도록 진공컵의 위치가 자동으로 조절되는, 소위 형상 적응이 가능한 작업물 이송용 유연 그립퍼 장치를 개발한다.

2. 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

2.1 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현

본 연구에서는 로봇 팔의 설계와 제어를 위해 크게 세 가지 측면에서 연구를 행한다. 첫째, 주어진 작업을 잘 수행할 수 있도록 하는 목표 지향 설계 방식의 로봇 설계 기술과 둘째, 텐션 조절이 가능한 back-drivable한 케이블 메커니즘의 구현, 셋째 구현된 케이블 메커니즘을 이용한 센서 없는 강인한 compliance 제어 기술이다. 목표 지향 설계 방식은 로봇의 설계과정에서 수행해야 할 작업을 명확히 하여서, 설계된 로봇이 정해진 작업을 잘 수행할 수 있도록 하는 연구로서 로봇 설계에 있어서 매우 중요한 기술이다. 또한 텐션 조절이 가능한 케이블 메커니즘은 케이블 메커니즘의 우수한 back-drivability와 작은 마찰을 유지하면서 케이블 사용한 동력 전달 체계의 난점인 장력 조절을 가능하게 하는 중요한 연구이다. 또한 센서 없는 강인한 compliance 제어 기술은 재활 로봇에 있어서 중요하게 생각되는 로봇의 가격을 낮출 수 있으며, 장애인과 접촉 시에 안전을 보장할 수 있는 중요 기술이다.

2.2 Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

본 연구에서는 로봇팔 제어를 위해 크게 두 가지 측면에서의 연구를 행한다. 첫째, 비전 정보 기반 로봇팔 제어 기술의 하나인 비주얼 서보잉 기술과 둘째, 사용자의 다양한 생체신호 중에서 근육 혹은 운동 신경에서 발생하는 근전도 (Electromyography; EMG) 신호를 기반으로 한 로봇팔 제어 기술이다. 비주얼 서보잉 기술은 로봇팔의 자율성을 증가시키고, 근전도 신호 기반 제어 기술은 인간 친화적이고 사용하기 편리한 인간-로봇 상호작용 기술을 개발한다는 측면에서 매우 중요한 연구이다.

2.3 눈동자 추적에 의한 대상물체 지직(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발

척수 손상자와 같이 손과 발을 마음대로 움직이지 못하는 장애인들의 경우 보조용 전동 휠체어나 로봇 팔을 직접 손으로 조작하는 것이 어려운 작업이고 장애의 정도에 따라서는 불가능한 작업이기도 하다. 이러한 경우 보조 장치를 작동시키기 위해서는 장애인의 의도를 손과 발이 아닌 다른 방법으로 전달해야 한다. 본 연구에서는 눈의 움직임과 머리의 움직임을 이용하여 전동 휠체어나 로봇 팔을 구동시킬 수 있는 시스템을 제시한다.

2.4 Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발

Body motion을 이용한 원격제어장치 기술은 환자 및 노약자를 위해 필요한 요구 사항을 만족시킬 수 있는 기술 중 가장 기본이 되며 국내는 물론이며 세계적으로도 연구가 미흡한 기술이다. 본 연구의 대상인 척수 손상 장애인은 장애 정도에 따라 머리만 움직일 수 있는 장애인, 어깨까지 움직일 수 있는 장애인, 손도 움직일 수 있는 장애인으로 매우 다양하게 나뉘어진다. 본 연구에서는 장애인의 장애 정도에 따라 머리 움직임을 이용하는 머리 인터페이스, 어깨 움직임을 이용하는 의복 형태의 조종기, 손의 움직임을 이용하는 반능동 힘반향 수동 조종기를 개발하고자 하며 이들 인터페이스를 이용하여 목이나 어깨, 손의 움직임을 측정하여 보조장치를 움직이고 보조장치에서 생기는 힘 정보 등을 되먹임하는 기술을 개발하고자 한다.

2.5 Hand-held Master의 개발

원격조종작업 및 master-slave 작업을 위하여 기존의 많은 master들이 개발되었으나 이러한 master들은 텔레로봇제어의 특성상 복잡한 mechanism을 요구하는 등 저가, 경량형의 master와는 거리가 멀었다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하고 저가, 경량형으로 사용이 편리한 Hand-held Master의 개발

및 그를 위한 제어 알고리즘의 개발을 목표로 한다.

3. 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발

3.1 토목 건설 로봇의 개발 동향 및 시장 전망

- 고층 건물의 철골 구조화 - 용접 작업이 주종
- 선진 국가의 철골 용접 로봇을 개발 진행 및 일부 현장 적용
- 국내 건설시장 규모: 국민총생산에 대한 점유율 약 20% - 노동 집약 산업
- 국내 아크 용접 로봇 시장의 절대적 약세 - 외산 도입 중심
- 일본의 비제조업 서비스 로봇 분류 중 토목/건설 로봇의 수요 예측 규모: 450 억엔(2000년) ~ 1000억엔(2005년) 예상 (일본 전체 비제조업 산업의 20% 해당)

3.2 수직철골 용접로봇 시스템 개발의 필요성

- 국내 적용 사례가 없는 건설용 로봇 적용 (신기술 개발 적용 및 신수요 창출)
- 선진국 이상의 기술 수준 확보 (주행부 설계 및 건설 용접 전용 기능)
- 난이도 높은 용접 로봇의 확장 개발을 통한 로봇 기술의 세계 일류 수준 진입
- 건설용 로봇 제어 핵심기술 응용 및 현장 적용
- 고기능 건설 철골 용접로봇의 국산화 개발로 세계 건설용 용접로봇 시장 선점
- 기타 산업용 용접 로봇 시장 국산화 촉진
- 건설 공사에서 용접 품질 안정 및 용접 공정 시간 단축
- 용접 현장 공법 반영, 실용화된 용접 로봇 기능 개발 및 적용
- 전체 공정 최적화를 통한 작업 효율 향상
- 수직 철골 용접 전용 기능 및 상위 제어를 통한 MMI 구현

3.3 수직철골 용접로봇 시스템의 개발목표

본 과제는 건설 자동화 분야 우선 순위 설문 조사에서 업계들로부터 그 필요성이 가장 높은 것으로 조사된 수직 철골 용접 로봇을 개발하는 것으로서, 이것을 토대로 건설용 로봇기술을 국가적인 전략적 산업분야로서 중점 육성하여 국제경쟁력을 높이고, 나아가 관련기술의 파급으로 자동화기술의 선진화를 유도하고자 한다.

◎ 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발 사양

- 적용 범위 : 각주, 환주, H빔 [기둥치수(각주의 경우): 550 ~ 1000 mm]
- 로봇 이동 방식 : 레일 주행 방식
- 중량 : 로봇 50Kg이내, 주행장치 50Kg이내
- 용접품질 향상 기능 : 센서를 통한 용접선 검출 및 보정
- 토치 위치제어 및 검사기능 : 위치 정밀도 $\pm 0.5\text{mm}$
- 작업 편이성 : 설치, 이동의 간편성 (설치시간 5분 이내)
- 로봇 제어장치 및 용접장치 운반 기능

4. 서비스로봇 기술 개발 사업단

본 연구사업은 21세기 컴퓨터를 비롯한 관련기술의 급속한 발전과 사회의 정보화, 다양화 추세에 따라 서비스 로봇 시장 및 활용도가 급격히 증가하리라는 예측을 바탕으로 서비스 로봇의 핵심기술을 국가적 차원에서 개발하여 서비스 로봇을 세계 시장에 조기 진입하고 또한 장애인이나 노약자 등에게 생산적 복지 차원에서 활용할 수 있는 서비스 로봇을 개발하려는 것을 목적으로 한다.

서비스로봇 기술개발사업은 이러한 목적을 달성하기 위하여 서비스로봇의 핵심기술과 서비스로봇의 제품기술을 매트릭스로 개발하는 전략으로 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발과 지능형 인간-로봇 상호작용 기술개발의 두 세부과제를 수행한다. 본 사업을 성공적으로 수행하기 위하여서는 각 연구팀이 보유한 개발기술과 연구자원의 공유, 급속히 발전하는 국내외 서비스로봇 기술환경 변화에 따른 연구방향의 조향(navigation) 및 서비스로봇의 상업화를 위한 연구 전략 등을 종합 조정하는 사업단의 역할이 필요하다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

1. 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

1.1 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

가. 이동기술 : 사람과 공존하는 실내에서 자율적으로 주행할 수 있는 전방향 이동 메커니즘 개발. 로봇의 자기위치 인식, 경로계획, 작업 지시 등을 수행하기 위한 환경 지도 작성. 움직이는 장애물을 피하기 위한 오차 및 상황 대처 행동 개발. 환경을 감지하기 위한 센서 기술. 필요에 따라 시스템을 재구성 할 수 있는 트레이일러 시스템.

나. 조작 기술 : 대상 물체의 위치를 인식하기 위한 비전 센서. 측정된 정보를 바탕으로 대상 물체를 파지, 조작하기 위한 운동 제어 기술. 다양한 물체를 파지하기 위한 인간형 로봇손 개발. 환경과 접촉시에 안전성을 보장하기 위한 수동 컴플라이언스 관절 개발.

다. 시스템 기술 : 간단한 사용자의 작업지시로부터 구체적 세부 작업을 계획하는 상위레벨 행동 계획 기술. 제어기, 센서, 기구학 알고리즘 등을 효율적으로 통합 운영하기 위한 반응층 구현 기술. 다양한 센서, 제어기, 알고리즘을 통합 운영하기 위한 제어구조 개발 및 시스템 통합 기술.

1.2 이동형 정보서비스로봇 개발

집안 내에서 사람과 더불어 생활하며 internet 을 통한 외부 원격 제어 기법을 이용하여 무인 경비, 화상 통신 기법을 이용한 집안 내의 사람들과의 쌍방향 통신 등이 가능한 지능형 mobile robot system을 개발한다. 주요 연구 개발 내용은 다음과 같다.

(1) 가정에서 사용 가능한 mobile platform의 개발

- 200x400x200mm 내외의 Platform, bi-directional wheel mechanism, 문턱극복이 가능한 wheel mechanism, 최대 0.5 m/sec 이동속도, 3시간 이상의 batterie 구동

(2) 소형의 mobile manipulator 개발

- compliance 기법 개발, 문 열기 기술 개발

(2) stereo vision에 의한 visual navigation 기술 개발

- 염가형의 stereo camera의 개발

- stereo vision을 이용한 map building 및 localization 기법 개발

(3) 음성인식 및 graphic user interface에 의한 간편한 작업지시 기능 개발

(4) internet에 기반한 robot system의 원격제어 기술 개발

1.3 형상적응형 universal hand 개발

본 연구에서는 자동차 프레스 공장의 loader 및 unloader에 부착되는, 8개의 진공컵에 대하여 미리 프로그램되어 있는 적절한 파지 위치로의 자동 조정이 가능한 유연 그립퍼를 제작한다. 그를 위하여 현장에서 요구되는 주요 조건으로는 높이의 최소화, 300mm 이상의 수직 방향 stroke, 50kg이하의 총중량, 충분한 강도 및 내구성, 3분이내의 위치 조정 시간, 충분한 넓이, 진공컵의 각도 조절 가능, 제작비 절감, 유지 보수의 용이성 등이 있으며, 이들을 모두 만족하는 시스템의 개발에는 많은 노력과 연구가 필요하다. 먼저 그러한 시스템의 구조를 다양한 방법으로 접근하여 설계하고, 실제 시작품의 제작을 통해서 성능을 확인한 후, 현장에 투입할 수 있도록 기업체에 기술 이전을 실시하는 것까지를 본 연구의 범위로 한다.

2. 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

2.1 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현

1단계에서 목표 지향 설계 방식으로 설계된 로봇 팔의 1차 버전에 최소 측정 가능한 토크를 낮추기 위하여 마찰력이 큰 모터를 교체하고 장력 조절이 가능한 케이블 메커니즘을 구현한다. 이를 이용하여 로봇 팔의 2차 버전이 제작되었으며, 기어의 우수한 감속 성능과 케이블 메커니즘이 갖는 작은 백래쉬 특성을 이용한 손목 축이 제작되었으며 이는 현재 특허 출원 예정이다. 장애인의 안전을 위하여 별도의 힘 센서 없는 능동 컴플라이언스 제어 알고리즘이 제안되었으며, 장애인들을 대상으로 한 임상 실험을 통하여 장애인이 원하는 컴플라이언스를 얻어내었다. 또한 12가지 작업을 하위 작업에 의한 분류를 통하여 작업간의 연관 관계를 밝혀내었으며, 이를 토대로 하여 가장 많은 하위 작업을 포함하는 물 마시기 작업에 대한 통합 구현을 하였다.

2.2 Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

본 연구에서 로봇팔의 비주얼 서보잉과 관련하여 연구하고자 하는 내용은 다음과 같다. (1) 기존에 제안된 로그-폴라 영상을 이용한 비주얼 서보잉 개념이 가진 한계점(가까운 물체, 움직임이 있는 물체 등)을 극복하기 위한 개선된 로그-폴라 영상의 제안과 피지 논리를 이용한 효과적인 비주얼 서보잉 구조. (2) 로봇팔의 비주얼 서보잉을 위한 소형/경량의 스테레오 카메라 헤드의 개선.

(3) **센서 융합 및 인간-로봇 공동작업 기술** 연구를 통한 작업 성능 향상. (4) **사용자 표정 인식을 위한 체계 마련과 사용자-로봇 상호작용에의 응용.** (5) 개발된 비주얼 서보잉 모듈에 대한 **임상 실험 수행과 평가 결과 반영.**

생체신호를 이용한 로봇 팔 제어와 관련하여 연구하고자 하는 내용은 다음과 같다. (1) 로봇 팔 제어를 위한 근전도 신호에 기반한 **인간 친화적인 6자유도 분류 알고리즘 개발** (2) **비례 제어를 위해 근전도 신호로부터 힘 정보 추출 알고리즘 개발** (3) **저가, 소형, 고성능의 무선 생체신호 증폭기의 개발** (4) **중증 척수 장애인을 위한 소형화된 휠체어 인터페이스의 개발** (5) **임상 실험을 통한 근전도 휠체어 인터페이스에 대한 평가 및 성능 보완**

2.3 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발

본 연구에서는 **시선의 방향을 이용하여 컴퓨터화면의 마우스 포인터를 움직여서 전동 휠체어나 로봇 팔을 구동시키는 시스템**을 제시한다. 또한 **작업 대상에 대한 위치 정보를 추출하여 작업 수행 능력을 향상시키기 위한 스테레오 카메라 시스템과 편리한 인터페이스 구성 방법**을 제시한다. 아울러 **실제 장애인을 대상으로 한 임상실험을 통해 시스템을 검증**하였다.

2.4 Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발

다양한 장애 정도를 가지고 있는 장애인들이 본 시스템을 사용할 수 있도록 **머리 인터페이스, 어깨 인터페이스로서의 의복 형태 조종기, 수동 조종기**를 개발한다. 머리 인터페이스를 위해 **기움각 측정 센서**를 개발하고 휠체어 시스템을 구동하는데 필요한 **인간과 로봇이 상호 작용할 수 있는 장애물 회피 알고리즘**을 개발한다. 의복 형태 조종기를 위해 2차 시작품을 제작하고 이를 바탕으로 제품화할 수 있도록 개선한다. 수동 조종기를 위해 **MR을 이용한 반능동형 수동 조종기의 기본 기술**을 개발하고 시제품을 개발한다.

2.5 Hand-held Master의 개발

본 연구는 1) **가속도계, 자이로, 마그네틱 센서, 초음파센서 또는 카메라**를 이용하여 **master의 6차원 자세를 실시간으로 획득**하고 이를 이용하여 2) **가상 또는 실제의 로봇과 물체의 운동을 지시**하고 그로부터 얻어지는 3) **힘의 피드백 정보를 master의 진동으로 나타내어 사용하기 편리하고 직관적인 제어알고리즘** 등에 관한 연구이다.

3. 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발

연구 범위	연구수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
용접 로봇 시스템 개념 정립/기초설 계	현장 답사 및 현장 작업자 인 터뷰	철골 건설 현장 답사 및 작업환경 조사 시공법 분석(시공법 변경없는 로봇 도입 방법연 구)
	정기 meeting을 통한 brain storming	용접로봇 시스템 개념 설계 및 기초 설계 작업 조건, 운영방안, 기초설계안 도출
Single arm type 용접 로봇 시스템 proto-type 설계 및 제작	소형 로봇의 개조, 적용	5축 수직다관절 로봇(1차)을 6축으로 개조적용 Link 구조 최적화, Accessory 고정 Jig부 최적설계, Torch부 설계 연계
	3D시뮬레이션을 통한 간섭제 거	전용 end-effector 설계 및 제작
	주행 부하 계산을 통한 주행 rail 및 구동부 설계	Rolling Guide/ 원통형 Rail/ Corner 감지 Sensor/ 전동Motor Elevation
	하중계산을 통한 지지부 설계 3방향 모멘트 지지구조 실현	주행 캐리어 및 지지부 메커니즘 설계/제작 곡선부 주행시 자기위치 복원메커니즘 채택
	현장 적용성을 고려한 레일 조립 방법의 실현	설치 용이성을 위해 클립레버 타입의 접철식 레 일 설계, 제작
	방진, 방수, 방폭 구조의 옥외 용 설계	용접용 작업에 적합한 Middle size 로봇 시스템 전장부 설계 및 제작
	고성능 로봇 제어기 개발	Pentium급 로봇 제어기 H/W, S/W 개발 적용 용접 Interface Board upgrade 개발 적용
	로봇 시스템 제어부 개발	원거리 교시 제어 PC Emulation PC를 통한 user I/F system 구현

연구 범위	연구수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
기능 구현 S/W 개발	일반화, 편리성 고려	매니플레이터 작업 기능의 Library화
	상위 PC Communication	Communication Protocol Sample Emulator 구동
	환경조건 설정기능 보완	용접 전압 및 전류 데이터베이스 적용 전압 전류 Feedback Monitoring 및 Display 전압 전류 Tuning Algorithm 기능 구현
	주행 매니플레이터 연동	로봇 및 주행부 - Master Slave 제어 기능 구현 주행장치 구동 및 경로계획 3 Roller Damper 적용을 통한 고정 및 Tilting
	지지부에 uncertainty가 있는 로봇의 제어 방법 개발	지지부의 nonholonomic 구속조건을 가상로봇 개념으로 해석 (holonomic계로 전환) 자코비안 연산자 도출 및 외계센서 위치 귀환 제어 알고리즘 개발
	장애물 회피 알고리즘 개발	근접 센서를 로봇 팔에 장착시켜 장애물 회피 동작과 동시에 목표 용접선 추적을 실현 (부분 자코비안을 이용한 potential법)
	용접 작업 및 용접 품질 향상 기능 구현	용접특성 Monitoring, 전압/전류- 개별제어, 디지털/아날로그 제어 센서를 통한 용접선 검출 및 보정
	Laser seam tracking 알고리즘 개발	제어기 내장형 S/W 개발 적용 Serial 통신을 통한 Laser Vision 실시간 추적
	Touch sensor tracking 구현	High voltage generator 이용 Touch sensing을 통해 작업 대상물 joint 형태 및 공간상의 위치 인식
	Arc sensor tracking 구현	Arc sensor tracking으로 위치 자동 보정후 보정된 용접 구간을 Multi-pass로 용접
	Multi-pass 용접 기능 구현	용접 대상물의 두께와 개선각에 따라 자동 Multi-pass 생성 기능 구현 Root path로부터 각 layer를 상대적인 offset으로 설정하여 기능 구현
	시스템 Monitoring 기능	용접 데이터 및 로봇 경로 계획 적용 Special Register를 통한 Data Upload/Download
	용접 로봇 전용기능 추가	특수 용접 Motion (Trapezoidal, Saw-Shaped, Pendulum Oscillating Motion 추가 개발) Welding Condition Display 화면 구성 (실시간 제어 및 Monitoring)
성능 시험 평가	KS 규격품 사용	demo용 test bed 설계 및 제작
	메커니즘 신뢰성 기초 시험	모듈별 성능 시험 및 연속 방법 시험
	전체 메커니즘 Test	실 부재와 유사한 간이 부재 제작 실 용접 Test Vertical 용접에 맞는 용접 조건 Tuning 로봇 CP Motion 및 주행부 Mechanism 성능 Host PC와의 통신을 통한 Download/Upload
	제어 Test	전압 전류 가변, Touch Sensor Tracking Arc Sensor Tracking, Laser Vision Tracking Teaching 화면을 통한 Welding Sequence 제어
	시험 시편의 검사 평가	한밭대학교 용접공학센터를 통한 시험 시편의 용접 상태 검사 평가 우수한 용접품질이 나올수 있도록 용접조건 도출

4. 서비스로봇 기술 개발 사업단

서비스 로봇 사업단의 연구수행 내용과 범위는 기술개발 사업의 원활한 수행을 위하여 사업의 계획을 세우고 이의 수행과정을 관리하며, 국내외 기술현황을 조사하여 지속적으로 연구수행 방향을 조향하고 연구팀간의 정보공유와 연구자원 활용을 극대화 시키는 것이다.

사업총괄 수행관리는 연구사업이 유기적으로 수행 될 수 있도록 사업 총괄과 세부과제 수행을 관리하는 것이고 연구의 총괄 계획수립 세부과제 수행관리가 포함된다.

국내외 현황과악 및 연구계획 update는 국내외 서비스로봇 기술현황을 파악하여 연구사업의 지속적 update하는 것으로 국내외 기술 현황 조사가 주된 내용이고 연구정보의 교류는 세부과제별로 개발된 기술을 공유하고 교류는 것으로 국제 워크숍 개최, 공동세미나 및 website를 통한 정보 자원 공유가 포함된다.

IV. 연구개발결과

1. 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

1.1 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

가. 이동기술

초음파, 적외선, 광화이버 자이로, 구동륜 엔코더, 레이저 거리센서 등을 이용하여 로봇의 자기 위치를 추정할 수 있는 기술을 개발하였다. grid map을 이용한 환경 모델과 자율주행시에 측정한 센서 정보를 비교하여 자기 위치를 대역적, 또는 주행시의 위치 추중에 의한 로봇의 자기 위치 인식 알고리즘을 개발하여 실험적으로 실증하였다.

전방향 이동 메커니즘을 개발하여 실내환경에서 임의의 선속도와 각속도를 동시에 구현할 수 있음을 실험을 통하여 검증하였다. 또한, 서보제어기의 실시간성을 바탕으로 센서정보로부터 행동 기반 제어를 구현하였다.

정적 또는 동적 장애물이 존재할 경우, 환경 정보를 업데이트하고, 경로 재생성을 통하여 장애물 회피가 가능함을 실증하였다.

나. 조작기술

힘센서를 장착한 3 손가락 인간형 로봇손을 개발하여 접촉력을 제어하며 대상물체를 안정적으로 파지할 수 있음을 검증하였다. 또한, 대상 물체의 형상에 따라 파지 형상을 변화시키기 위한 수동 페링크 구조의 설계를 수행하였다.

6축 매니플레이터를 실시간 운동제어하여 집기, 놓기 작업을 수행하기 위한 조작 기술을 개발하였다.

자기유사 표식을 설계하고, 손목에 장착한 비전 센서를 이용하여 대상물체의 위치를 측정, 파지가 가능함을 확인하였다.

다. 시스템기술

layered functionality diagram, class diagram과 PetriNet based configuration diagram의 3가지 전략을 바탕으로 하는 시스템 통합을 위한 제어구조를 정의, 성공적으로 플랫폼을 구축하였다. 다양한 센서정보와 경로계획기, configuration에 다른 behaviour를 성공적으로 통합하였다.

1.2 이동형 정보서비스로봇 개발

(1) 가정에서 사용 가능한 mobile platform의 개발

- 1차 및 2차 시제품을 설계 및 제작하였다. 시스템은 200x400x200mm 내외의 Platform과 bi-directional wheel mechanism을 가지며, 문턱극복이 가능하고 최대 0.5 m/sec 이동속도 및 4시간 이상의 batterie 구동이 가능하다. 또한 구동부를 위한 소형의 CAN-based motor controller도 개발하였다.

(2) 소형의 mobile manipulator 개발

- 5kg의 소형 manipulator를 설계 제작하였다.
- torque sensing 장치를 제작하고 passive compliance 기법을 개발하였다.

(3) stereo vision에 의한 visual navigation 기술 개발

- CMOS 및 IEEE-1394를 이용한 염가형의 stereo camera를 개발하였다.
- stereo depth를 이용한 map building 및 localization 기법을 새로이 개발하였다.

(3) 음성인식 및 graphic user interface에 의한 간편한 작업지시 기능 개발

- 음원방향 검지장치를 개발하고 음성 인식이 가능한 시스템을 구축하였다.

(4) internet에 기반한 robot system의 원격제어 기술 개발

- ActiveX에 기반한 영상 및 data 통신이 가능한 client-server 방식의 원격제어 시스템을 개발하였다.

1.3 형상적응형 universal hand 개발

본 연구에서는 자동차 프레스 공장에서 요구되는 다양한 제한 조건들을 만족하는 최선의 유연 그립퍼 시스템을 제안하였고, 실제 시작품으로 구현하여 실험을 수행하였다. 8개의 진공컵에 대해서는 각 병진 3자유도와 회전 2자유도 거동에 대한 위치 제어가 가능하며, 이를 위하여 수평방향 프레임과 수직방향 조절장치, 그리고 컵 회전 구동 장치를 별도로 설계하여 조합하였다. 수평 프레임에는 각나사와 소형 고속 모터를 이용하여 구동하고 중공 연마봉 또는 알루미늄 프로파일용을 이용하여 가이드 겸 지지가 이루어지도록 하였다. 수직방향 조절 장치는 유연 나사와 소형 모터를 이용하여 최대/최소 높이비를 극대화하여 요구조건을 만족시켰고, 가이드 및 지지 요소로는 가위손 형태, 안테나식 다단 파이프 형태, 다단 삼발이 형태 등이 제안되고 실제 제작되어 성능 비교 실험이 수행되었다. 컵 회전 구동 장치는 중공 볼조인트 또는 중공 구면 베어링을 이용한 passive 조인트 요소와 모터 1개를 이용하여 회전 2 자유도의 위치 조절이 가능하도록 개발된 능동 조절 요소를 병용하도록 하였다. 모터 1개를 이용하는 회전 2자유도 조절 장치는 기존에 소개된 바 없는 독창적인 아이디어로서 그 응용분야가 넓을 것으로 기대된다. 이 시스템에 필요한 총 24개의 모터와 25개의 limit switch, 4개의 solenoid 제어기 등을 연결하기 위해서는 CAN 모듈을 이용한 제어 방법이 이용되었다. 그럼으로써, 배선 처리가 획기적으로 간단하여지고 모터 및 배선들의 유지, 보수가 개선되었으며, 별도의 모터용 앰프의 필요성이 사라졌다. 제작된 최종 시작품에 대해서는 간단한 구동 시험과 특성 시험이 수행되었고, 현재도 강도 시험, 내구 시험, 위치 조절 시험 등을 반복되고 있다.

2. 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

2.1 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현

장력 조절이 가능한 케이블 메커니즘이 개발되었으며, 이는 기존의 케이블 메커니즘이 가지고 있는 장력 조절 문제를 해결한 것이다. 이 메커니즘에는 기존의 상용 worm기어를 사용함으로써 제작 단가를 낮추는데 성공하였다. 개발된 메커니즘과 기어의 우수한 감속 성능의 장점을 살린 3자유도 로봇 손목 축 부분이 개발되었다. 또한 케이블 메커니즘의 장점을 살린 **별도의 힘 센서 없는 능동 컴플라이언스 제어 알고리즘**이 개발되어 **장애인과의 임상 실험을 통한 장애인 의견 반영**이 이루어졌다. 장애인의 안전성을 고려하기 위하여 접촉 센서의 부착 위치 및 센서 종류의 선정이 이루어졌다. 12가지 작업에 대한 로봇 팔의 안정적인 동작 성능 테스트가 이루어졌으며, **12가지 작업중 가장 많은 하위 작업을 포함하는 물마시기 작업에 대하여 성공적인 통합 실험이 이루어졌다.**

2.2 Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

(1) 개선된 로그-폴라 변환 기법을 제안하고 기존의 로그-폴라 변환과의 혼용을 위해 퍼지 의사 결정자 개념을 도입, 사용자 얼굴 추적의 **실시간 수행(평균 15 frame/sec 이상) 및 고정밀도(평균 $\pm 10\text{mm}$ 오차)**를 달성하였다.

(2) 텐던 구동 장치에 관한 특허를 출원하였으며(출원번호: 2000-85816), 모터 및 텐던 구동 장치의 효율적 배치를 통해 소형($110\times 110\times 35$ (mm)), 경량(177g)의 비주얼 서보잉을 위한 스테레오 카메라 헤드를 제작하였다.

(3) 센서 융합 및 인간-로봇 공동 작업의 적용 및 퍼지 순응 제어 기법을 통하여 사용자 안전성을 확보하면서도 물체잡기에서 초기 조건 오차 및 주변 상황의 변화에 대해서도 90%이상의 작업 성공률을 얻었다.

(4) 실제 적용 가능한 표정 인식 시스템 구성을 위해 얼굴 영상 추출에서 요소 추출, 특징 추출 등에 이르는 통합 체계를 제안하고, 신경망, 퍼지 논리 등을 사용한 표정 인식 실험을 통해 **7가지 표정(행복, 슬픔, 공포, 화남, 놀람, 역겨움, 무표정)에 대하여 92.7%에 이르는 인식률을 달성**하였다. 또한, 사용자-로봇 상호작용에 이 개념을 응용하여 사용자 안전성(Safety)을 확보하였다.

(5) 실사용 대상자인 척수 손상 장애인과의 임상 실험을 통하여 **비주얼 서보잉 모듈에 대한 긍정적 견해를 확보**하고 (4),(6)의 과정을 통해 평가 결과를 반영하였다.

(6) 인간 친화적 외형과 아이-인-핸드 타입 비주얼 서보잉에 적합한 새로운 형태의 그리퍼를 제작하였다. 이것은 **1자유도로 경량(300g이하)이면서 텐던 구조와 기어를 조합하여 수동축의 동작을 통하여 기존의 평판 그리퍼의 문제점을 해결**하고 동작 형태가 다르며 비주얼 서보잉 기술과의 연동도 효과적으로 수행할 수 있음이 판명되었다.

(7) 근전도 신호를 이용한 **6자유도 로봇 팔 제어 알고리즘을 개발**, 분류 성공률을 **85% 이상 획득**함으로써 기존의 입력 장치가 갖는 저자유도로 인한 사용상의 불편함을 해소하였다.

(8) 비례 제어를 위한 힘 정보 추출을 위해 blind seperation 분야에서 최근에 각광받고 있는 ICA (independent component algorithm)을 이용하여 기존 방법들보다 **정확하게 근전도신호로부터 힘 정보를 추출**하였다.

(9) 소형($110\times 110\times 20$ (mm)), 저가, 고성능의 무선 근전도 측정 장치를 개발하여 상품화의 가능성을 확보하였다.

(10) 중증 척수 손상 장애인을 위해 목이나 어깨에서 측정된 근전도 신호를 이용하여 **전동 휠체어를 제어**할 수 있는 인터페이스를 개발하고 임상실험을 통해 성능을 검증하였다.

2.3 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술

개발

(1) 장착형 Eye-mouse 시스템

동공과 홍채 사이의 경계를 찾아내어 눈동자의 움직임을 검출하는 IR LED와 비전 시스템 기반의 방법을 구현하였고 자기 센서와의 통합을 통한 응시방향의 검출과 마우스 포인터의 구동이 가능하였다. 또한 장착형 Eye-mouse시스템의 제품화를 위한 인간 친화적인 디자인 및 안정성 확보와 실제장애인을 대상으로 한 임상실험을 수행하였다

(2) 비장착형 Eye-mouse 시스템

각막 반사와 동공 반사의 상대적인 위치에 따라 눈의 응시 방향을 추정하는 새로운 방법을 제시하여 구현하였고 머리의 움직임을 보상할 수 있는 눈 위치 추적 시스템의 설계 및 구동부를 구현하였다. 비 장착형 Eye-mouse 시스템의 제품화를 위한 전체 시스템의 간략화 및 인간 친화적인 디자인과 안정성을 확보하였다.

(3) Eye-mouse 시스템을 위한 인터페이스 기술

척수 장애인 대상의 전체 로봇 시스템에 적합한 Eye-mouse용의 인터페이스 환경을 구현하여 로봇팔 및 이동로봇에게 원하는 작업을 지시할 수 있었고 Eye-mouse 시스템을 위한 인터페이스의 안정성 확보, 편리성 개선과 더불어 로봇 팔, 휠체어 그리고 주변기기와의 통합을 이루었다.

(4) 스테레오 비전을 이용한 3차원 정보 추출 시스템

스테레오 대응점 알고리즘의 개선을 통한 3차원 정보 추출 시스템의 성공률 향상을 통한 안정성 보완

2.4 Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발

1단계에서 개발된 의복 형태 조종기의 2차 시작품을 개발하였으며 이를 제품화하기 위하여 개선하였다. 개발된 독립 제어기는 마이크로 프로세서를 가지고 있어서 별도의 컴퓨터 없이 센서 및 휠체어를 구동할 수 있다. 새로운 구조의 어깨 움직임 측정용 센서는 기존의 센서에 비하여 보다 강건하고 우수한 성능을 보인다. 기울각 측정 센서의 개발을 통하여 머리 인터페이스를 개발하였으며 장애물 회피 알고리즘과 인간의 의도를 지능적으로 융합할 수 있는 알고리즘을 개발하여 다양한 환경에서 쉽게 적응 가능하고 사용자의 피로도를 최소화할 수 있도록 하였다. MR 유체를 이용한 반능동 Haptic Master를 개발하여 수동 조종기의 기본 기술을 개발하였고 이를 통하여 소형의 반능동 수동 조종기를 개발하였다.

2.5 Hand-held master의 개발

본 연구에서 개발된 master는 실시간으로 6 자유도 운동의 데이터를 획득하

고 이를 운동 입력명령으로 이용하였다. 입력운동 신호의 적절한 Filtering을 구현하여 안정적인 명령을 제공한다. 본 연구에서는 또한 **Hand-held Master를 실제 응용하기 위한 적응(adaptive) 제어기법을 개발하였다.** Referece 적응 제어는 환경 정보가 정확하게 주어지지 않은 상태에서, **로봇과 대상체의 안전성을 최우선적으로 고려하기 위한 매스터-슬레이브 제어기법**이다. 또한, 로봇 등 운동대상체로부터 얻어지는 힘과 접촉 피드백 정보를 진동과 음향으로 바꾸어 입력장치에 전달한다.

3. 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발

연구 내용	연구 결과
Single arm type 용접 로봇 시스템 proto-type 개발 (H/W 설계 제작)	<ul style="list-style-type: none"> - 5축 소형 수직 다관절 로봇을 6축으로 개조, 적용 - 전용 end-effector 설계/제작 - 방진, 방수, 방폭 구조의 옥외용 로봇 제어기 개발, 적용 (진단기능, 제어기능, feedback 기능 추가) - 원치 시스템을 이용한 로봇 고정 지지부 메커니즘 설계/제작 - 로봇 additional accessory 기구부 설계/제작 - 슬라이딩 주행에 따른 슬립 억제를 위한 Contact Roller부 설계 변경/제작 - 3방향 모멘트 지지구조로 주행 캐리어 시스템을 설계함으로써 주행 안정성 및 자기 위치 복원성 향상 - 설치 용이성을 고려한 클립레버 타입의 접철식 레일 설계, 제작 - 현장 적용의 용이성을 고려한 로봇 주행대차 메커니즘 설계 - 주행부 동시 제어를 위한 Cable/Harness 일체화
기능 구현 S/W 개발 (시스템 제어 및 용접 기술 개발)	<ul style="list-style-type: none"> - 용접 보드 H/W 및 S/W 보완 - 매니플레이터 작업 기능 Library - Sample host program을 통한 System 제어 - Laser sensor tracking (Serial communication) 구현 - Touch sensor tracking 기능 구현 - 내장형 Arc sensor tracking proto 개발 적용 - Multi-pass 용접 기능 구현 - 용접 전용 Display 구성 (Control 및 Monitoring 적용) - 전압 전류 Tuning algorithm 개발 - 특수 용접 Motion algorithm 개발 - 용접 조건 따른 로봇 경로 제어 - uncertainty가 있는 지지대에 대한 로봇의 제어 알고리즘 개발 - 장애물 회피 알고리즘 개발 - 원격 PC를 통한 user I/F system 구현 - 상위 제어용 PC를 통한 로봇 시스템의 제어 및 관리 기능 구현
성능 평가	<ul style="list-style-type: none"> - demo용 test bed (H-beam type) 제작 - 개발된 주행 메커니즘의 모듈별 및 연속 성능 시험 수행 - 실 부재와 유사한 대상을 통한 실 용접 Test - 각 S/W 개발 내용 실제 적용 Test - Multi-pass 용접 시편의 용접 품질 검사
특 허	등록: 1건, 출원: 5건, 출원예정: 2건
논문	논문집: 3건, 국내학술대회: 2건, 국제학술대회: 1건, workshop: 4건
기술 이전	IRAM(주)와 G.E.T.에 용접용 로봇 시스템 및 제어기 통신 기술 이전

◎ 목표 대비 연구결과 비교표

항목	목표 사양	연구 결과	비고
적용 범위	각주, 환주, H빔 [기동치수: 550~1000mm]	가장 난이도가 어려운 H빔을 대상으로 수행 분할식 레일 구성으로 다양한 치수의 철골주 용접 가능	KS 규격품 이용 [600×300mm]
로봇 이동 방식	레일 주행 방식	Single arm type 레일 주행 방식 구현 주행 캐리어 메커니즘 제작	3방향지지 메커니즘, 안정성 향상
중량	로봇: 50kg이내 주행장치: 50kg이내	로봇: 37kg, 주행장치: 47kg, 용접부가장치: 10kg	제어장치 및 용접기, 가스 등은 별도로 설치
용접품질 향상 기능	센서를 통한 용접선 검출 및 보정	Laser seam tracking Arc sensor tracking Touch sensor tracking	Multi-pass 용접 기능 구현
토치 위치제어 및 검사 기능	위치 정밀도: ±0.5mm	로봇 자체 정밀도: ±0.04mm	Laser Tracker를 이용한 위치 정밀도 측정 준비중
작업 편이성	설치 시간 5분 이내		주행대차 이용 접철식 레일 방식
운반 기능	로봇 제어 장치 및 운반장치 이동 기능	운반용 주행 대차 설계, 제작	수동식 높낮이 조절 기능

4. 서비스로봇 기술 개발 사업단

서비스 로봇 사업단의 사업 내용 중 가장 비중이 큰 부분은 사업의 총괄관리 및 세부과제 수행관리에 대한 부분으로 사업의 총체적 성공을 위하여 세부 과제 연구팀의 연구수행 애로점에 대한 지속적인 모니터링과 연구진행 수준에 대한 모니터링이 이루어지며 국내외 기술환경에 따라 연구 방향을 조향(navigation)하며 연구계획을 수정해 나아가는 것이다. 이러한 사업의 수행결과는 차기년도 연구계획서에 반영되어 차기년도 연구 목표와 내용을 결정하게 된다.

서비스로봇 분야의 국내외 연구동향분석은 우선 국내 서비스로봇분야의 연구기관에 대한 조사와 연구결과에 대한 모니터링이 이루어 졌으며 새로이 출시되는 국내 서비스로봇 제품에 대한 분석과 모니터링이 이루어졌다. 해외 연구동향

분석은 서비스로봇분야에 앞서있는 미국, 일본 및 EU에 대한 국가 차원의 연구 정책을 분석하고 아울러 연구기관 차원에서 연구되고있는 서비스로봇 연구 결과를 분석하였다.

서비스로봇의 연구정보 공유와 연구자원의 효율적 활용을 위하여서는 일년 일회 서비스로봇 사업결과에 대한 연구사업단 전체 공동 워크숍을 개최하였으며 2001년 공동 워크숍 결과인 Proceeding은 본 연구보고서 제2권에 포함되었다. 또한 서비스로봇 기술분야 중 핵심적이며 활용도가 많은 기술분야 3 분야를 선정하여 사업단 중 관련되는 연구팀들이 기술분야별로 Special Interest Group(SIG)을 구성하여 각 기술분야별로 기술을 정리하고 공유하는 팀을 형성하였으며 2001년에는 System Architecture, Vision 및 Compliance Control에 대한 SIG를 형성하여 워크숍을 개최하였다. SIG 워크숍의 결과는 본 연구보고서 제2권에 포함되었다. 또한 서비스로봇 분야에 세계적으로 관심이 있는 핵심기술인 로봇의 안전성, 신뢰성 등에 대한 Dependability 주제에 관하여 세계적인 첨단로봇 학회인 IARP(International Advanced Robotics Programme) 및 IEEE산하 Robotics and Automation(RAS)학회를 한국에 유치하여 관련분야에 관한 국제 워크숍을 추진하였으며 그 결과는 별책으로 출판하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

1. 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

1.1 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

PSR 1과 PSR 2 플랫폼을 활용하여 대형 건물내에서 물건 나르기, 청소, 경비, 안내 및 홍보 등의 기능을 수행할 수 있다. 과제 수행의 최종년도인 3단계 1차년도에는 개발된 알고리즘의 보완, 현장 시험을 수행하여 자율이동 및 조작 기능을 완성하고, 기능을 더욱 풍부하게 함과 동시에 실제로 물건 나르기, 안내는 현장에서 기본 기능을 수행함을 확인한다. 향후에는 개발된 기반 기술과 통합시스템에 여러 가지 부가기능을 추가하여 일산생활에 실질적인 도움을 줄 수 있는 로봇 시스템화하여 사업화 전략을 수립한다.

1.2 이동형 정보서비스로봇 개발

본 연구에서 개발한 robot system은 집안 내에서 사용 가능하도록 Hardware

및 Software가 구성되었다. 이러한 연구를 바탕으로 현재 개발된 robot system을 본 과제의 참여기업인 유진로보틱스와 공동으로 상용화를 추진해 나갈 예정이다.

1.3 형상적응형 universal hand 개발

우선 참여 기업인 현대 자동차로의 기술 이전을 추진할 예정이다. 이를 위하여, 본 연구팀의 기술 지원과 감독 하에 현대 자동차 측에서 별도로 현장 적용을 위한 시스템을 개발하게 될 것이며 추석 연휴를 이용하여 현장 시험을 실시할 예정이다. 그 밖에도 해외에 우수 자동차 회사로의 홍보를 통하여 선진국으로의 기술 수출을 시도할 계획이다.

2. 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

2.1 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현

개발된 케이블 메커니즘은 **backdrivability**가 요구되거나, **무시할만한 백 레쉬가 요구되는 동력 전달 체계**에 사용할 수 있다. 이는 특히 출원을 통하여 기술을 보호할 예정이다. **별도의 힘 센서가 요구되지 않는 능동 컴플라이언스 제어 방법**은 힘 센서를 사용하기에는 저가의 제품에 응용이 가능하다.

2.2 Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

본 연구에서 얻어진 결과는 크게 하드웨어적인 부분과 소프트웨어적인 부분으로 대별된다. 하드웨어적인 부분에서는 **텐던 구동 구조를 갖는 구동 장치의 다양한 장점**을 이용하여 기존의 각종 기구부에 대한 구동부 설계에 있어 많은 가능성을 가져올 수 있으며, 소프트웨어적인 부분에서는 **실시간 영상처리, 인간-로봇 상호작용을 위한 기반 기술들**을 바탕으로 재활로봇 이외의 공공 서비스 로봇에의 응용 등이 대표적인 활용 예가 될 것이다. 또한, 실사용 대상자에 의한 임상 실험 및 그 평가 결과는 본 연구의 결과물의 **상품성 및 실용성 판단을 위한 가치**로 중요하게 작용할 것으로 예상된다.

생체신호를 이용한 로봇 팔 제어 부분 역시 크게 하드웨어적인 부분과 소프트웨어적인 부분으로 연구결과를 정리할 수 있다. 하드웨어적인 부분은 **무선 근전도 증폭기를 개발한 것**이다. 개발된 증폭기는 근전도 신호를 필요한 레벨로 충분히 증폭할 뿐만 아니라 주위 잡음의 영향에도 둔감할 수 있도록 설계되었다. 또한 중증 척수 손상 장애인을 위한 근전도 신호 기반 전동 휠체어 조종기를 개발하였다. 소프트웨어적인 측면에서는 근전도 신호로부터 측정된 사용자의 움직임을 분류하는 **패턴 분류기**를 설계하였다. 이러한 연구 결과를 이용하여 전동 휠체어 인터페이스, wearable computer의 마우스 포인터 제어를

위한 장치, 생체 신호를 이용한 가전기기 제어 장치의 입력부에 충분히 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

2.3 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발

본 연구에서 개발하고 있는 eye-mouse 시스템은 **사용자의 머리와 눈동자의 움직임으로부터 컴퓨터와 주변 장치를 제어할 수 있도록 해 주는 인터페이스 장치**로서, 척수 장애인이나 노약자뿐만 아니라 일반인에게도 편리한 입력 도구로서의 상품화 가능성이 높다. 다양한 인터페이스 시스템의 개발과 이의 활용에 대한 연구가 활발한 현 시점에 비추어볼 때, Eye-mouse 시스템과 같은 **편리하고 직관적인 인터페이스 시스템**은 컴퓨터나 게임 분야에서 일반인이 쉽게 사용할 수 있는 인터페이스 장치의 요구를 만족시켜 주는 상품으로의 개발이 가능하다.

2.4 Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발

본 연구에서 개발된 머리 인터페이스, 의복형태 조종기 및 수동 조종기는 게임 산업, 의료 산업 등 활용 범위가 매우 넓어 그 파급 효과가 매우 크다. 앞으로 개발된 기술을 이용한 장애인에게 직접 적용 가능한 시스템과 그에 따라 파생될 각 산업 분야에 적용 가능한 Human Interface 장치들은 여러 산업 발전에 크게 기여할 수 있을 것이다. 또한 개발된 인터페이스들은 제품화가 가능한 수준에 있으며 특허 출원을 통하여 기술 보호의 기반을 마련하고자 한다.

2.5 Hand-held master의 개발

개발된 master를 이용하면 원격조종수술, 미세조립작업, 극한환경 작업 등 원격조종 시스템의 master 또는 각종 홈네트워크, 게임 등에서의 입력장치를 **사용하기 편리하고 직관적이고 페루프 제어가 가능한 경량형, 저가형 master 및 입력장치**로 대치할 수 있다. 본 연구의 개발결과로 이러한 다양한 분야에 대한 적용을 추구할 것이다.

3. 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발

- 개발된 소형 용접 로봇 사업화 추진 (삼성전자)
- 먼저 삼성 건설의 건설 현장에 시범 적용 (약 1년)
- 시범 적용에서 성능이 인정되면 국내 중소기업에 OEM 생산

- 국내 판매 추이에 따라 생산량을 늘리고 수출 개시

4. 서비스로봇 기술 개발 사업단

서비스로봇 기술개발 사업단의 연구결과는 서비스로봇 연구개발 사업의 원활하고 성공적인 수행을 위하여 활용되며 이는 기술개발 사업의 총괄 수행관리와 차기 년도 연구계획의 작성에 직접적으로 활용된다.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

1. Development of a robotic manipulation technology with the navigation capability

1.1 Development of the high speed navigation and manipulation technology

: The aim of this project is to develop an autonomous mobile manipulator which carry out various indoor service robotic applications. The PSR (Public Service Robot) platform is equipped with a 3 fingered robotic hand, a 6 DOF robot manipulator, a holonomic omni-directional mobile robot, various sensors, and trailer systems. Major research scope are classified into three issues: 1) Autonomous navigation 2) Dexterous manipulation 3) System integration.

The PSR's navigation strategy includes map building process using the grid map, real time path generator, robust map-matching localization algorithm and behaviour coordination modules. The manipulation task of the PSR is based on the eye-in-hand visual information. Once the location of the target object is identified, visual servoing manipulation algorithm enables pick and place manipulation tasks. In order to efficient carry out successful system integration, three schemes are developed : 1) Layered functionality diagram 2) Class diagram 3) PetriNet based configuration diagram.

The developed algorithms, hardware and software components were successfully integrated and experimentally tested on the platform.

1.2 Mobile information service robot

We expect that human will actively use intelligent robot system as one of electric home appliances and communicate with it in the future. Therefore, in this research we are aiming at developing the mobile robot system that can communicate with human in home.

We are to develop the intelligent mobile robot system that can communicate with human in home, execute home-surveillance and be moved by remote control through internet. The main results are as follows:

(1) Developed two robot systems that can use in home

- We designed and developed 2 robot systems for home service. The size of robot systems is within 300x400x300 mm, and its navigation speed is maximum 0.5 m/sec. Also, we developed a compact CAN-based motor controller.

(2) Developed a mobile manipulator

- It has the weight of 5 kg and passive compliance using joint torque sensor.

(3) Developed visual navigation technology with stereo camera

- Developed a CMOS stereo camera with IEEE-1394 interface

- By using stereo depth, we developed a hybrid map-representation and localization technology.

(4) Developed a simple task command system with voice communication and GUI

- Voice location and recognition system

(5) Developed an internet-based remote control technology about robot system

- By using ActiveX and TCP/IP, we could control and monitor the robot system.

In this project, we developed the intelligent robot system that is pertinent to the use in home. On the basis of this practical research, we are to make an effort to commercialize this robot system with Yujin Robotics Inc., which are participating in this project.

1.3 Development of flexible type universal gripper

In automotive plant press lines, automatic loader and unloader are used to feed workpiece to and from each press. Each attachment, which has many vacuum cups, is installed at the end of loader and unloader and has to be replaced with another attachment every time the

die is changed to press different part. Because each press has to produce many different parts, the total number of attachments are huge and maintenance and storage of that are big problem and a serious bottleneck in improving productivity. In this research, a flexible gripper which can automatically adjust each vacuum cup position thereby replacing all attachments with one flexible gripper has been developed. A very nice system conforming field requirements like weight, minimum height, strength, etc., has been developed through many improvements over initial design developed in last year. The system is under final machining and assembly and will be thoroughly tested.

2. Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

To develop a wheelchair-based rehabilitation robotic system KARES(KAIST Rehabilitation Engineering Service system) II, we have been developing various kinds of intelligent human-robot interaction system during 2nd period (2000.9 - 2002.8) as follows;

① Soft Robotic Arm

In this research, we focus on three aspects as follows; First, target oriented design method which can makes given task does well. Second, realization of tension adjustable cable mechanism which has good backdrivability. And third, sensorless compliance control based on realized cable mechanism. Target oriented design(TOD) is a important research about robot design method. Desinged by this method, robot can do the pre-defined well. And tension adjustable cable mechanism makes cable mechanism more reliable technology. And sensorless compliance control technique which can make robot more safely operating contact tasks is also important one.

The results of this research is as follow. (1) Tension adjustable cable mechanism is realized. (2) Using the developed cable mechanism, wrist part of robot is designed and Manufactured. (3) Sensorless active compliance control algorithm for the safety of the user is developed and implemented. And by the clinical evaluation, preference of compliance of the disabled is acquired. (4) Execution of 12 pre-defined tasks using designed robot arm is done. (5) Task analysis based on sub-task is performed. By the analysis, the relation of the tasks is established. System integration experiment was performed about 'Serving a beverage' task which includes all of the subtasks.

② Robotic Arm Control using Visual Servoing and Biosignal-based Control Scheme

In this research, we focus on two aspects as follows; First, Visual servoing

technology which is one of the vision-based control for robotic arm. Second, robotic arm control using electromyography(EMG) signal caused by muscular movement. Visual servoing technology is for enhancement of autonomy of the robotic arm, and EMG signal-based control technology is for realizing human-friendly and easy-to-use human-robot interaction.

(1) Visual Servoing technology

A. Modified log-polar mapping and efficient visual servoing structure using fuzzy logic to overcome the limitation of conventional log-polar image-based visual servoing. B. Refinement of small-sized/light-weighted stereo camera head for visual servoing. C. Enhancement of performance for tasks based on 'sensor fusion' and 'human-robot cooperation' technology. D. Systematic approach for user's facial expression recognition and its application to human-robot interaction. E. Clinical evaluation of visual servoing technology and reflection of evaluation results. F. Based on the feedback from clinical results, we designed a novel human-friendly eye-in-hand type stereo camera head with 1 DOF gripper system(flat finger with passively coupled joint based on tendon mechanism and gear).

The results from this research is categorized as two parts such as hardware part and software part. In hardware part, tendon-driven mechanism has so many advantages and it can be applied to various kinds of mechanical driving part. Software part also can be applied to various human-robot interaction technology, real-time image processing and public service robots including rehabilitation robotics. Furthermore, results from clinical evaluation affects the value of final products in view of commodity and utility.

(2) EMG signal-based control technology

A. Development of the 6 DOF Pattern Classification algorithm based on EMG signals, B. Development of the force extraction algorithm from EMG signals based on ICA (independent component algorithm), C. Development of the wireless EMG AMP, D. Development of an EMG-based Powered Wheelchair Interface for Users with High-level Spinal Cord Injury, E. Clinical Evaluation of Biosignal Pattern Classification Technology and Further Works

We summarized our biosignal classification results as hardware and software components. In hardware part, small size, low cost, and high performance wireless EMG AMP is developed. This EMG AMP gives us high S/N and is robust to other environmental noises. An EMG-based powered wheelchair interface for high-level spinal cord injury was successfully evaluated. We designed EMG pattern classifier based on soft computing techniques. We expect that the developed techniques will be used not only rehabilitation robot but also mouse pointer control of a wearable computer, and input device of home appliances, and so on.

③ Eye-mouse System

In this research, we develop the system that allows the disabled who cannot use their limbs for themselves to control a robot and an electrical wheelchair. Since the

persons with C4-spinal lesion can only move their head and eye to interface with an assistant robot, it is very difficult to transfer the commands that meet variable users demand to the robot. Consequently, for the people with severe motor disability, it must be useful input device to move a mouse pointer, which is the most general input device for a computer, by using their eye-gaze direction. The developing system in this research are intrusive Eye-mouse system and Non-intrusive Eye-mouse system. Intrusive Eye-mouse system, which is a wearable system, uses a IR LED, eye image and magnetic position sensor. Non-intrusive Eye-mouse system, which is a non-contact system, uses 5 IR LEDs and eye images. Using the proposed system, the user moves the mouse pointer on the computer monitor to select a menu or a button on an interface program. As the results, the user can transfer commands to the robot and the electrical wheelchair. Also, we develop a user friendly interface program suitable for this eye-mouse system and a stereo camera system that extracts the depth information of the target object to improve the performance of the robot. The eye-mouse system that is developed in this research is an convenient interface technique not only for the disabled and the old and the weak but also for the people who is not disabled.

④ Body motion-based Interface (or Haptic Suit)

To aid handicapped persons for the basic tasks of their daily life, a user-friendly human-robot interface is the most important thing. Diversity of injury level of spinal cord injured persons causes the requirement of developing several different human-robot interfaces. The object of this research is to provide an actual aid to increase mobility of severely spinal injured people by means of developing head interface(for C4 injured persons), shoulder interface(for C5 injured persons), and hand master(for hand available persons).

Head interface consists of a tilt sensor. A force sensitive register(FSR) in the tilt sensor is a robust and cheap device for measure of 1 dimensional force. A new design of tilt sensor using FSR is proposed. Tilt sensor measures the motion of 2 DOF human's head movement. A supervisory control scheme is proposed for mutual cooperation naturally between human and robot. Supervisory control was embodied with using fuzzy algorithm to determine the supervisor level of human. Also vibro-tactile actuator plays an important role in the supervisory control to notify robot(wheelchair)'s intension of next motion. The second prototype of the wearable master is developed and modified. A PCB has been developed as an stand-alone control unit. A new design of the sensor of the wearable master is more robust. The suit of wearable master became more convenient to put on and off. A small compact force feedback joystick with 2 DOF is developed. It has two brakes as passive actuator and a independent control unit that communicate with computer by serial protocol. New control algorithm for active-passive combined haptic device is developed.

⑤ Hand-held Master Device

We propose a cordless hand-held master and a tele-operation based shared control method for the hand-held master.

The hand-held master is a means which converts the human intention into a command so that the command is used for the controller of the slave robot or VR object. Conventional master arm whose joints are geared or tendon-driven, can give an intuitive input command, and can reflect force and/or tactile feedback. Many master arms are put into the market, particularly in surgical robot and VR. We developed hand-held type masters to increase intuitiveness and to easily make input commands. The sensors equipped are inertial sensors (accelerometers, gyros), ultrasonic sensors, magnetic sensors and camera.

The key factors of the masters are the intuitiveness, cost, and the applicability to various fields. The portability of a master is also very important in that the mobile internet technology is very rapidly spreading into wider areas. Considering the key factors, we propose a hand-held portable master which can be grasped like a pen by an operator's hand to increase the intuitiveness. The proposed master has a very simple structure and can be produced at very low cost. The proposed master can be applied in various fields such as VR, hazardous environment, micro surgery, wearable computing, 3D calibration, and so on.

We also propose a shared control method, called Force Accommodation Based Adaptive Reference (FABAR) Controller, to control the tele-operation system with the hand-held master. We employ the force accommodation and combine it with the adaptive reference control. The controller enables the hand-held master to be used human-friendly in master-slave tele-operation and virtual reality environment. The controller combines force accommodation with reference adaptation to achieve mode switching and contact transition of the hand-held master. With the FABAR control implemented in the tele-operation controller, the tele-operation system can be operated by allowing the operator to naturally switch mode based on the adaptive reference control, while the required contact transition and impedance control is implemented by force accommodation based control.

3. Development of Welding Robot System for Vertical Steel Beam

3.1 Development Needs for Welding Robot System for Vertical Steel Beam

- First application to construction robot(Application of new technology and Creation of new demands)

- Development of advanced technologies(Novel Design of Traversal Unit and Dedicated welding for construction)
- Acquisition of first class robot technologies by development of welding robot
- Application of control technologies to construction robot and its usage in construction sites
- Worldwide market acquisitions in construction robot field by new development of arc welding robot for construction purpose
- Promotion of domestic brands of industrial robots
- Quality stabilization for arc welding and shortening of processing period at construction sites
- Development and application of welding robot considering construction sites
- Improvement of work efficiency by optimizing overall process
- MMI for customized welding functions and upper-level control

3.2 Objectives for developing welding robot for vertical steel beam

The main purpose of this study is to develop the arc welding robot for steel beam, which was selected after extended survey with people in construction field. We believe that construction robot field will grow as one of strategical industries in Korea, so that it not only enhances national competitiveness but also achieves high level of automation technologies.

3.3 Main results of this R&D

items	Results
Development of Single arm type robot system proto-type (Hardware Part)	<ul style="list-style-type: none"> - Design/Manufacturing of Dedicated end-effector - Design/Manufacturing of Traversal Units - Design/Manufacturing of Supporting Units employing winch system - Design/Manufacturing of additional accessory mechanism for robots - Design/Revamping/Manufacturing of Contact Roller restraining slipping motion - Design of Guided vehicle mechanism for convenient application at construction sites - Integration of Cable/Harness for simultaneous control - Design of Laser Sensor Camera fastening unit
Development of Software (System Control and Welding Technologies)	<ul style="list-style-type: none"> - Improvement of controller for outside usage, dust-proof, water-proof(Addition of Diagnosis, Control, Feedback Functions) - Improvement of hardware and firmware for welding board - Development of module library for manipulator operations - System control by Sample Host Program - Laser Sensor Tracking (Serial Communication) - Embedded Arc Sensor Tracking Proto development - Construction of dedicated welding Display(Control/Monitoring) - Development of Voltage/Current Tuning Algorithm - Development of Special Welding Motion Algorithm - Robot path control for welding condition - Development of control algorithm with uncertainty in supporting units - Development of obstacle avoidance algorithm
Performance Evaluation	<ul style="list-style-type: none"> - Manufacturing of test bed (H-beam type) for demonstration - Welding test with simplified welding material - Test of softwares for their operation
Patents	Registration: 1, Pending: 5, To be applied: 2
Papers	Journal:3, Domestic proceedings:2, International Conference:1, Workshop:4

3.4 Application of our R&D results

Promotion of small-sized welding robot business (Samsung Electronics, Co.)

Application to construction sites at Samsung Construction, Co. as an example (About 1 years)

OEM Manufacturing by a medium-sized company after successful application at sample sites

Increase of production and Start of export as domestic demands increases

여 백

C O N T E N T S

(영 문 목 차)

Chapter 1. Introduction	63
Section 1. Management for Development of the Service Robot Technology	63
Section 2. Development of a Robotic Manipulation Technology with the Navigation Capability	63
1. Development of the high speed navigation and manipulation technology	63
2. Mobile information service robot	64
3. Development of flexible type universal gripper	64
Section 3. Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology	67
0. Overview of Intelligent Human-Robot Interaction Technology	67
A. Research Motivation	67
B. Research Objective	68
C. Objective for each phase	68
D. Inter-relationship among 12 predefined tasks	68
1. Realization of Human-friendly Soft Robotic Arm	72
2. Robotic Arm Control using Visual Servoing and Biosignal	73
A. Integration of Visual Servoing Technology with Human-friendliness and Adaptation for Environmental Change	73
B. Biosignal Pattern Classification Technology for Robotic Arm Control	73
3. Development of an Interface Technique using the Eye-mouse System	74
4. Development of Robot Interface using Body Motion	75
5. The development of Hand-held Masters	76
Section 4. Development of Welding Robot System for Vertical Steel Beam	78
Chapter 2. Worldwide Survey on Technology Development	81
Section 1. Management for Development of the Service Robot Technology	81
Section 2. Development of a Robotic Manipulation Technology with the Navigation Capability	81
1. Development of the high speed navigation and manipulation technology	81

A. navigation technology	81
B. manipulation technology	84
C. system technology	88
2. Mobile information service robot	90
A. Robot system technology	90
B. Visual navigation	92
C. Visual interface	92
D. Voice direction detection and voice recognition	94
3. Development of flexible type universal gripper	95
Section 3. Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology	96
0. Comparison of target functions between previous rehabilitation robots and KARES II	96
1 Realization of Human-friendly Soft Robotic Arm	97
A. Developed Rehabilitation Robots	97
B. Active Compliance Control : Joint Torque Measure	99
2. Robotic Arm Control using Visual Servoing and Biosignal	100
A. Integration of Visual Servoing Technology with Human-friendliness and Adaptation for Environmental Change	100
B. Biosignal Pattern Classification Technology for Robotic Arm Control	101
3. Development of an Interface Technique using the Eye-mouse System	102
4. Development of Robot Interface using Body Motion	103
A. Development of Robot Interface	103
B. Development of Intelligent Algorithm for Robot Interface	105
5. The development of Hand-held Masters	106
Section 4. Development of Welding Robot System for Vertical Steel Beam	111
1. Market Prospect for Construction Robot	111
A. Development Status of Construction Robots	112
B. Trends of Domestic Construction Companies	112
C. Priorities in Developing Construction Robots	114
2. Manufacturing Procedure for Steel-Beam Structure	114
A. Introduction of Steel Beam Building Construction	114
B. Construction by Steel Beam	115
3. Domestic Steel-Beam Manufacturing Sites and their Operation Conditions	118
4. Development Examples of Welding Robots for Vertical Steel Beam	122

Chapter 3. Contents and Results of R&D	125
Section 1. Management for development of the service robot technology	125
Section 2. Development of a Robotic Manipulation Technology with the Navigation Capability	148
1. Development of the high speed navigation and manipulation technology	148
1.1 Navigation technology	148
A. Mobile robot motion control	148
B. Localization	153
C. Experimental result	174
D. Development of a passive trailer system	190
E. Mobile robot calibration	197
1.2 Manipulation technology	212
A. PSR 1 manipulator	212
B. PSR 2 arm	218
C. Control of the PSR 1 manipulator	229
D. Visual estimation of the target object for manipulation	245
E. Development of a robot hand	253
1.3 System technology	284
A. PSR platform development	284
B. Control architecture of the PSR	293
2. Mobile information service robot	313
A. Robot system technology	313
B. Visual navigation	319
C. Visual interface	335
D. Voice direction detection and voice recognition	345
E. Internet-based remote control technology	357
F. Robot system software	358
3. Development of flexible type universal gripper	362
A. Two axes position control mechanism in horizontal plane	363
B. Position control mechanism in vertical axis	364
C. Two rotational axes mechanism controlling vacuum cup	366
D. Motor and solenoid valve control using CAN	368
Section 3. Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology	369
0. Realization and Clinical Evaluation of KARES II	369

A.	H/W and S/W Control Architecture for KARES II	369
B.	Communication Protocol for KARES II	377
C.	Realization of KARES II in forms of Robotic System and User Interface	383
D.	Clinical Evaluation of KARES II with the Physically Disabled	399
1.	Realization of Human-friendly Soft Robotic Arm	401
A.	Active compliance control for the safety of user	401
(1)	Compliance Control Algorithm	403
(2)	Basic Experimental Results	413
(3)	Field Evaluation of Proposed Algorithm	425
B.	Development of robotic arm for the user safety	430
(1)	Design and Manufacturing of 2nd Version Soft Robot Arm	430
(2)	Visual Design for user comfort	467
(3)	Reduction of joint friction for enhancement of Backdrivability	469
(4)	Touch sensor for user safety	470
(5)	Analysis of Design Requirements for the Design of Enhanced Gripper	489
C.	Execution of 12 pre-defined tasks	490
(1)	Task analysis based on kinds of sub task	492
(2)	Task details based on the disabled persons opinion	497
(3)	Enhancement of 1st robotic arm control performance	498
(4)	Task Execution Experiment	502
(5)	User Evaluation of Executed Task	508
(6)	Investigation of Additional Realizable Tasks Based on Development Technology	509
2.	Robotic Arm Control using Visual Servoing and Biosignal	513
A.	Integration of Visual Servoing Technology with Human-friendliness and Adaptation for Environmental Change	513
(1)	Human-friendly Intelligent Visual Servoing using Space Variant Vision and Fuzzy Decision Maker	513
(2)	Realization of small-sized/light-weighted Stereo Camera Head	522
(3)	Realization/Experiment of Adaptation for changing environment based on 'Sensor Fusion' and 'Human-Robot Cooperation'	536
(4)	Enhancement of User's Intention Reading Techniques through Facial Expression Recognition	570

(5) Clinical Evaluation of Visual Servoing Technology and Further Works	588
(6) Development of Noble type Gripper for Eye-in-Hand configured Visual Servoing	592
B. Biosignal Pattern Classification Technology for Robotic Arm Control	616
(1) Development of the 6 DOF Pattern Classification algorithm based on EMG signals	616
(2) Development of the force extraction algorithm from EMG signals based on ICA (independent component algorithm)	626
(3) Development of the wireless EMG AMP	636
(4) Development of an EMG-based Powered Wheelchair Interface for Users with High-level Spinal Cord Injury	644
(5) Clinical Evaluation of Biosignal Pattern Classification Technology and Further Works	651
3. Development of an Interface Technique using the Eye-mouse System	653
A. Intrusive Eye-mouse System	653
(1) Structure of the System	653
(2) Safety of IR LED and Magnetic Sensor	656
(3) Eye-gaze Tracking Algorithm	658
(4) Experimental Results	672
B. Non-intrusive Eye-mouse System	677
(1) Eye-gaze Tracking Algorithm for Non-intrusive Eye-mouse System	677
(2) Eye-tracking Mechanism	688
C. Interface Technique for the Eye-mouse System	692
D. 3D Position Extraction System using Stereo Vision	695
(1) Structure of the System	695
(2) Image Comparison for Extraction of Corresponding Point	696
(3) Reduction of Search Region using Epipolar Constraint	697
(4) Reduction of Search Region using Depth Constraint	699
(5) Experimental Results	700
4. Development of Robot Interface using Body Motion	707
A. Development of Robot Interface	707
(1) Modification of Sensor for Wearable Master Device	707
(2) Development of the Second Prototype of Wearable Master Device	709

(3) Experiment of the Second Prototype of Wearable Master Device	710
(4) Research on Control of Multi-DOF Motion using the Wearable Master Device	711
(5) Modification of Calibration and Mapping of the Wearable Master Device	711
(6) Integration of the Wearable Master Device to Other Systems	715
(7) Improvement of Wearable Master Device	717
(8) Development of Head Interface	726
(9) Control of 1 DOF Haptic Master	736
(10) Friction Compensation of Experimental Setup composing Brake and Motor	737
(11) Haptic Modeling for real Objects	738
(12) Force Reflecting Range of MR Brake for 2DOF Slanted Wall	742
(13) Force Reflecting Range of Motor to Brake for 2DOF Frictionless Slanted Wall	745
(14) Development of a 2-DOF Passive Force Reflection Joystick	746
B. Development of Intelligent Algorithm for Robot Interface	748
(1) Autonomous Navigation	751
(2) Determination of Supervisor Mode using Fuzzy Algorithm	757
C. Experiment of the Interfaces and the Intelligent Algorithm	765
(1) Experimental Setup	765
(2) Clinical Test of Head Interface and Wearable Master Device	769
(3) Obstacle Avoidance of Smart wheelchair using the Intelligent Algorithm	773
5. The development of Hand-held Masters	783
A. The development of prototype of Hand-held Masters	783
(1) The Concept on Hand-held Master	783
(2) The 1st Prototype	786
(3) The 2nd Prototype	788
(4) The 3rd Prototype	796
(5) The 4th Prototype	801
(6) The 5th Prototype	812
B. Master-Slave Control Algorithm	818
C. Hand-held Master Application Area	821

Section 4. Development of Welding Robot System for Vertical Steel Beam	823
1. Objectives for developing welding robot for vertical steel beam	825
2. Concept and Basic Design	828
3. Manufacturing and Hardware Design of Welding Robot System for Vertical Steel Beam	828
A. System Structure and Design of Rail Traversal Mechanism	828
B. Small-Sized Welding Robot and Controller Structure	839
C. Design of Welding Mechanism	843
D. Moving Lift System for setting welding robots	844
4. Software Design of Welding Robot System for Vertical Steel Beam	846
A. Development of Function Softwares	846
B. Welding Line Tracking Algorithm with Uncertainty in Supporting Units	858
C. Feedback Control of Multi-axis robot with Vibrational Supporting Units	866
D. Development of Obstacle Avoidance Algorithm	878
5. Automatic Welding of Robot System	885
A. Automatic welding employing laser sensor tracking	885
B. Automatic welding employing arc sensor tracking	892
C. Multi-pass welding	897
D. Evaluation of welding quality	901
6. R&D Results	905
Chapter 4. Degree of Achievement and Contribution of R&D	907
Section 1. Management for Development of the Service Robot Technology	907
Section 2. Development of a Robotic Manipulation Technology with the Navigation Capability	908
1. Development of the high speed navigation and manipulation technology	908
2. Mobile information service robot	909
3. Development of flexible type universal gripper	910
Section 3. Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology	911
1. Realization of Human-friendly Soft Robotic Arm	911
2. Robotic Arm Control using Visual Servoing and Biosignal	912
A. Integration of Visual Servoing Technology with Human-friendliness and Adaptation for Environmental Change	912
B. Biosignal Pattern Classification Technology for Robotic Arm Control	914

3. Development of an Interface Technique using the Eye-mouse System	915
4. Development of Robot Interface using Body Motion	917
5. The development of Hand-held Masters	918
Section 4. Development of Welding Robot System for Vertical Steel Beam	919
1. Degree of Achievement of R&D	919
2. Contribution of R&D	920
3. Contribution & Future Work	921
Chapter 5. Future Application of R&D Results	923
Section 1. Management for Development of the Service Robot Technology	923
Section 2. Development of a Robotic Manipulation Technology with the Navigation Capability	924
1. Development of the high speed navigation and manipulation technology	924
2. Mobile information service robo	926
3. Development of flexible type universal gripper	926
Section 3. Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology	927
1. Realization of Human-friendly Soft Robotic Arm	927
2. Robotic Arm Control using Visual Servoing and Biosignal	928
A. Integration of Visual Servoing Technology with Human-friendliness and Adaptation for Environmental Change	928
B. Biosignal Pattern Classification Technology for Robotic Arm Control	929
3. Development of an Interface Technique using the Eye-mouse System	929
4. Development of Robot Interface using Body Motion	930
5. The development of Hand-held Masters	930
Section 4. Development of Welding Robot System for Vertical Steel Beam	931
Chapter 6. Information about Foreign Science and Technology Acquired from R&D Process	935
Section 1. Management for Development of the Service Robot Technology	935
Section 2. Development of a Robotic Manipulation Technology with the Navigation Capability	935
1. Development of the high speed navigation and manipulation technology	935
Section 3. Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology	937
1. Realization of Human-friendly Soft Robotic Arm	937

2. Robotic Arm Control using Visual Servoing and Biosignal	937
3. Development of an Interface Technique using the Eye-mouse System	942
4. Development of Robot Interface using Body Motion	943
5. The development of Hand-held Masters	943
제 7 장 참고문헌	945
Section 1. Management for Development of the Service Robot Technology	945
Section 2. Development of a Robotic Manipulation Technology with the Navigation Capability	945
1. Development of the high speed navigation and manipulation technology	945
2. Mobile information service robot	953
Section 3. Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology	956
1. Realization of Human-friendly Soft Robotic Arm	956
2. Robotic Arm Control using Visual Servoing and Biosignal	957
3. Development of an Interface Technique using the Eye-mouse System	960
4. Development of Robot Interface using Body Motion	963
5. The development of Hand-held Masters	965
Section 4. Development of Welding Robot System for Vertical Steel Beam	966

여 백

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	63
제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단	63
제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발	63
1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발	63
2. 이동형 정보서비스로봇 개발	64
3. 형상적응형 universal hand 개발	64
제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발	67
0. 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술의 개요	67
가. 연구 배경 및 필요성	67
나. 연구개발 목표 및 내용	68
다. 단계별 목표	68
라. 12가지 기본 정의 작업의 상호 관련성	68
1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현	72
2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어	73
가. 주위환경에 적응하며 인간 친화적인 Visual Servoing 기술	73
나. 로봇 팔 제어 알고리즘을 위한 생체 신호(EMG) 분류 기술	73
3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발	74
4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발	75
5. Hand-held Master의 개발	76
제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발	78
제 2 장 국내외 기술개발 현황	81
제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단	81
제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발	81
1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발	81
1.1 이동기술	81
1.2 조작기술	84
1.3 시스템기술	88
2. 이동형 정보서비스로봇 개발	90

가. Robot 시스템 기술	90
나. Visual navigation	82
다. Visual interface	82
라. 음원 방향검출 및 음성인식 시스템	94
3. 형상적응형 universal hand 개발	95
제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발	96
0. 기존의 재활로봇 시스템과 KARES II 시스템의 목표 기능	96
1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현	97
가. 기존의 장애인 보조 로봇들	97
나. 능동 컴플라이언스 제어기법: 관절토크 측정기법	99
2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어	100
가. 주위환경에 적응하며 인간 친화적인 Visual Servoing 기술	100
나. 로봇 팔 제어 알고리즘을 위한 생체 신호(EMG) 분류 기술	101
3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발	102
4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발	103
가. 로봇 인터페이스의 개발	103
나. 로봇 인터페이스를 위한 지능형 알고리즘의 개발	105
5. Hand-held Master의 개발	106
제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발	111
1. 건설 토목용 로봇의 시장 전망	111
가. 건설 토목용 로봇의 개발현황	112
나. 국내건설업계 동향	112
다. 건설로봇개발 우선순위	114
2. 철골 구조물 시공법	114
가. 철골 빌딩공사의 개요	114
나. 철골 시공	115
3. 수직철골의 현장용접과 작업조건	118
4. 수직철골 용접로봇 개발사례	122
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	125
제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단	125
제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발	148
1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발	148

1.1 이동기술	148
가. 서비스로봇의 경로계획 및 운동제어 기술	148
나. localization	153
다. 주행시험결과	174
라. 트레일러 시스템 개발	190
마. 이동로봇의 calibration	197
1.2 조작기술	212
가. PSR 1 매니플레이터 개발	212
나. PSR 2 암 개발	218
다. PSR 1 매니플레이터의 제어 기술	229
라. 조작을 위한 대상물체 측정	245
마. 로봇손 개발	253
1.3 시스템기술	284
가. PSR 플랫폼 개발	284
나. PSR의 제어구조	293
2. 이동형 정보서비스로봇 개발	313
가. 시스템 기술	313
나. Visual navigation	319
다. Visual interface	335
라. 음원 방향검출 및 음성인식 시스템	345
마. internet 기반 원격제어 기술 개발	357
바. system architecture	358
3. 형상적응형 universal hand 개발	362
가. 수평 2방향 위치 조절 장치	363
나. 수직 방향 위치 조절 장치	364
다. 진공컵의 2방향 회전각도 조절 장치	366
라. CAN을 이용한 모터 및 공압 개폐용 solenoid 밸브 제어	368
제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발	369
0. KARES II 시스템 통합 및 실제 장애인을 대상으로 한 임상 실험	369
가. KARES II 시스템 통합을 위한 하드웨어/소프트웨어 기반 제어 구조	369
나. KARES II 시스템 통합을 위한 통신 구조	377
다. KARES II 시스템의 Robotic System 및 User Interface 부분의 구현	383
라. KARES II 시스템을 이용한 장애인 대상 임상 실험	399
1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현	401

가. 사용자의 안전성 개선을 위한 능동 컴플라이언스 제어	401
(1) 컴플라이언스 제어 알고리즘	403
(2) 기초 실험 결과	413
(3) 장애인 대상 임상 실험	425
나. 사용자의 안전성을 고려한 로봇 팔의 개발	430
(1) 소프트 로봇팔의 2차 시제품 제작	430
(2) 사용자가 편하게 느끼는 시각적 디자인	467
(3) Backdrivability 개선을 위한 관절 마찰력 감소	469
(4) 안전성을 위한 접촉 센서 부착	470
(5) 개선된 그립퍼(Gripper) 설계시 요구되는 조건 분석	489
다. 정의된 12가지 작업 수행	490
(1) 작업(task)들의 하위 작업(sub task) 종류에 따른 분석	492
(2) 장애인을 대상으로 한 작업 세부 내용 설문 조사	497
(3) 1차 시제품의 제어 성능 개선	498
(4) 작업 수행 실험	502
(5) 장애인들의 작업에 대한 평가	508
(6) 현재의 기술로 추가로 수행 가능한 작업 조사	509
2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어	513
가. 주위환경에 적응하며 인간 친화적인 Visual Servoing 기술	513
(1) Space Variant Vision과 Fuzzy Decision Maker을 이용한 인간 친화적인 Intelligent Visual Servoing 구현	513
(2) 상품성 있는 소형/경량의 스테레오 카메라 헤드 구현	522
(3) ‘센서 융합’ 및 ‘인간-로봇 공동작업’에 의한 주변상황 대처기능 구현 및 실험	536
(4) 표정 인식을 통한 사용자 의도 파악 기술 향상	570
(5) 임상 실험에 의해 얻어진 비주얼 서보잉에 대한 평가 및 개선 방안	588
(6) Eye-in-Hand type Visual Servoing에 적합한 새로운 형태의 그리퍼 개발.	592
나. 로봇 팔 제어 알고리즘을 위한 생체 신호 (EMG) 분류 기술	616
(1) 로봇 팔 제어를 위한 근전도 신호에 기반한 인간친화적인 6자유도616 분류 알고리즘 개발	616
(2) 비례 제어를 위한 근전도 신호로부터 힘 정보 추출 알고리즘 개발	626
(3) 무선 생체 신호 증폭기의 개발	632
(4) 중증 척수 장애인을 위한 소형화된 휠체어 인터페이스의 개발	644

(5) 임상 실험을 통한 근전도 휠체어 인터페이스에 대한 평가 및 성능 보완	651
3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발	653
가. 장착형 Eye-mouse 시스템	653
(1) 전체 시스템 구조	653
(2) 적외선과 자기센서의 안전성	656
(3) 시선 방향 추적 알고리즘	658
(4) 실험 결과	672
나. 비장착형 Eye-mouse 시스템	677
(1) 비장착형 Eye-mouse 시스템의 시선추출 알고리즘	677
(2) 눈 추적 기구부	688
다. Eye-mouse 시스템을 위한 인터페이스 기술 개발	692
라. 스테레오 비전을 이용한 3차원 위치 정보 추출 시스템	695
(1) 개요	695
(2) 대응점 추출을 위한 영상 비교	696
(3) Epipolar 제한 조건을 이용한 검색 영역 축소	697
(4) Depth 제한 조건을 이용한 검색 영역 축소	699
(5) 실험 결과	700
4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발	707
가. 로봇 인터페이스의 개발	707
(1) 어깨 움직임 측정용 센서 2차 보완	707
(2) 의복 형태 조종기의 2차 시작품 제작	709
(3) 제작된 의복형태의 조종기를 이용한 Mobile robot 조종 실험	710
(4) 조종 가능한 자유도 증가 방법 연구	711
(5) Calibration 및 사상 함수 알고리즘 보완	711
(6) 2차 시작품 완성 및 다른 장치와의 통합	715
(7) 의복 형태 조종기의 개선	717
(8) 머리를 이용한 입력장치	726
(9) 1자유도 실험장치의 햅틱 제어 기법	736
(10) 브레이크를 포함한 실험장치의 마찰 보상	737
(11) 실제 대상물의 힘-속도 프로파일 측정 및 햅틱 모델링	738
(12) 2자유도 경사진 벽에 대한 MR Brake의 힘 반향 적용 범위	742
(13) 2자유도 무마찰 경사면을 구현할 수 있는 MR Brake에 대한 Motor의 힘 반향 적용 범위	745

(14) 휠체어 장애인용 2자유도 수동형 조이스틱 설계 및 제작	746
나. 로봇 인터페이스를 위한 지능형 알고리즘의 개발	748
(1) 자율주행	751
(2) 퍼지알고리즘을 이용한 관리자 휠체어 모드결정 방법	757
다. 개발된 로봇 인터페이스 및 알고리즘 실험 및 결과	765
(1) 실험 장치	765
(2) 머리 및 어깨 입력장치를 이용한 임상실험	769
(3) Smart wheelchair 의 다양한 장애물 회피 실험	773
5. Hand-held Master의 개발	783
가. Hand-held Master의 시제품 개발	783
(1) Hand-held Master의 개념	783
(2) Hand-held Master 1차시제품	786
(3) Hand-held Master 2차시제품	788
(4) Hand-held Master 3차시제품	796
(5) Hand-held Master 4차시제품	801
(6) Hand-held Master 5차시제품	812
나. Master-Slave 제어알고리즘 개발	818
다. Hand-held Master 적용방안 도출	821
제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발	823
1 수직철골 용접로봇 시스템의 개발목표	823
2. 개념 정립 및 기본 설계	825
3. 수직철골 용접 로봇 시스템의 H/W 설계 및 시제품 제작	828
가. 시스템 구성 및 주행 메커니즘 설계	828
나. 소형 용접 로봇 및 제어기 개발	839
다. 용접 기구부 설계	843
라. 용접로봇 장탈착을 위한 이동리프트 시스템	844
4. 수직철골 용접 로봇 시스템의 S/W 설계	846
가. 기능 구현 S/W 개발	846
나. 지지부의 Uncertainty가 존재할 때 용접로봇의 용접선 추종 제어법	858
다. 탄성지지를 갖는 다축 Robot의 외계피드백 제어	866
라. 장애물 회피 알고리즘 개발	878
5. 용접로봇 시스템의 용접 작업 구현	885
가. 레이저 센서를 이용한 로봇 자동 용접	885
나. 아크센서를 이용한 용접선 추적 기법	892

다. Multi-pass 용접 기능 구현	897
라. 용접 품질 시험	901
6. 연구 성과	905
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	907
제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단	907
제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발	908
1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발	908
2. 이동형 정보서비스로봇 개발	909
3. 형상적응형 universal hand 개발	910
제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발	911
1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현	911
2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어	912
가. 주위환경에 적응하며 인간 친화적인 Visual Servoing 기술	912
나. 로봇 팔 제어 알고리즘을 위한 생체 신호(EMG) 분류 기술	914
3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발	915
4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발	917
5. Hand-held Master의 개발	918
제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발	919
1. 연구개발 목표 달성도	919
2. 대외 기여도	920
3. 파급 효과 및 향후 전망	921
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	923
제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단	923
제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발	924
1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발	924
2. 이동형 정보서비스로봇 개발	926
3. 형상적응형 universal hand 개발	926
제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발	927
1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현	927
2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어	928
가. 주위환경에 적응하며 인간 친화적인 Visual Servoing 기술	928

나. 로봇 팔 제어 알고리즘을 위한 생체 신호(EMG) 분류 기술	929
3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발	929
4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발	930
5. Hand-held master의 개발	931
제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발	931
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	935
제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단	935
제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발	935
1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발	935
제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발	937
1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현	937
2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어	937
3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발	942
4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발	943
5. Hand-held master의 개발	943
제 7 장 참고문헌	945
제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단	945
제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발	945
1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발	945
2. 이동형 정보서비스로봇 개발	953
제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발	956
1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현	956
2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어	957
3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발	960
4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발	963
5. Hand-held master의 개발	965
제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발	966
위탁과제	1063

1. 이동로봇을 위한 자동 지도작성 및 위치측정 알고리즘의 개발 (고려대학교, 송재복)	1065
2. 이중 능동 유니버설 관절을 이용한 로봇 손가락 메카니즘 개발 (성균관대학교, 최혁렬)	1079
3. 서비스로봇 제어를 위한 시스템개발 및 그 기반 환경 구축 (경희대학교, 이순걸)	1089
4. 비전 시스템을 이용한 사람 인식 및 추적 (서울대학교, 박종우)	1113
5. Stand alone type의 vision board를 이용한 Human Robot Interaction (한국과학기술원 전자전산학과, 김종환)	1127

여 백

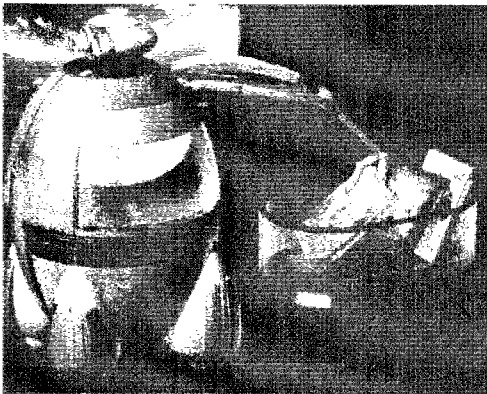
제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단

제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

연구개발의 최종목표 : 대형건물내에서 사용되는 빌딩용 도우미로봇의 개발



빌딩용 도우미 로봇의 개념 design

인간과 공존하는 빌딩내 환경에서 사용자의 요청에 따라 물건을 원하는 곳으로 배달하는 로봇시스템을 개발한다. 주요한 기능적 목표사항은 다음과 같다.

- navigation의 효율화 및 mobile manipulation을 효과적으로 수행하기 위한 omni-directional mobile base(최고속도 0.5m/sec) 및 손가락 힘 감지센서를 장착한 3손가락 인간형 로봇손 개발 (자중 2kg이하. 조작하중 1kg 이상. 파지력 감지센서 장착): . manipulator (축별 각속도 60deg/sec 이상. 조작하중 3kg이상. 자중40kg이하
- 인간이 공존하는 환경에서의 주위환경의 실시간 인식에 따른 dynamic navigation 기술 (인간과 같은 동적 장애물 감지 및 충돌회피 주행 실현함으로서 인간의 주행 상황에 근접한 자연적인 navigation 기술)
- stereo vision 기술을 이용한 문 손잡이의 recognition 과 로봇 manipulator를 이용한 문여닫기 기능 구현

구체적인 적용 Scenario는 다음과 같다.

5차년도가 종료하는 시점에서의 개발된 기술의 실제 적용 목표 및 수준을 우편물 배급을 통해 실현한다.

- GUI system에 의한 작업 지시를 통한 물류 정보 입력 (우편물 도착 장소 및 대상인 입력)
- 사람이 오가는 복도에서의 동적 충돌을 지능적인 회피 기능 : 둔덕을 포함하지 않는 복도내의 화분과 같은 정적 방해물을 고려한 새로운 path의 형성 및 보행중인 인간의 움직임을 고려한 경로 수정 기법의 실현
- On board 또는 fixed vision system을 이용한 지능적인 localization 기법 : 복도의 지정된 위치에 설치된 인공적인 landmark 나 자연적인 물체를 이용한 자기 위치 인식 기법과 저가의 CMOS camera등을 이용한 robot localization 기법을 통한 지능적 자기 위치 인식 방법을 통한 navigation
- 설치된 manipulator system을 이용하여 편지를 전달하기 위하여 거쳐야할 방문의 손잡이 부분의 vision system을 이용한 인식 및 문 여닫이 기능
- 편지가 전달되어질 대상자와의 GUI를 이용한 작업 종료

2. 이동형 정보서비스로봇 개발

인간의 미래사회는 robot을 더욱 적극적으로 이용하는 사회가 될 것이며, 이는 가정 생활에서도 하나의 지능형 가전제품처럼 robot이 활용되리라고 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 집안 내에서 사람과 더불어 생활하는 mobile robot system을 개발하는데 그 목적이 있다.

본 연구에서 개발 목표를 요약적으로 표현하자면, 집안 내에서 사람과 더불어 생활하고 사람과 시각 및 음성 interface를 통하여 명령을 받고 인식할 수 있으며, 스스로의 정보에 의하여 자율 주행을 수행하며, 또한 internet을 통하여 외부에서 원격 제어가 가능한 system을 개발함을 기본 목표로 하고 있다.

3. 형상적응형 universal hand 개발

현재 자동차 공장에서 사용되는 대량 생산용 프레스 작업의 경우, 일반적으로 끝에 여러 개의 진공컵이 부착된 attachment를 갖는 loader가 프레스 외부에서 대상물을 파지한 다음, 프레스의 상하 금형사이로 대상물을 이동시킨 후 작업물을 올려놓고 원래의 위치로 복귀한다. 그리고 프레스 작업 이후에는 비슷한 형상을 갖는 unloader가 반대쪽에서 작업물을 빼내어 다음 작업을 위한 대기 장소로 이동시킨다. 여기에서 쓰이는 attachment는

다양한 크기의 3차원 형상을 갖는 작업 대상물을 적절히 파지하기 위하여 사슴뿔과 같은 복잡한 형상을 가지며 작업물의 형태와 크기에 따라 각각 달라져야 한다. 다품종 다량 생산을 하는 자동차 회사에서의 프레스 작업에는 일반적으로 5~6대의 프레스가 직렬 배치되며, 각 프레스마다 loader/unloader가 설치되는데, 작업 대상물의 종류가 다양하여 작업 중 자주 금형을 교환할 경우, 각각의 금형에 맞는 attachment도 함께 교환해야한다. 작업 대상물이 30 가지라 가정하면, 필요한 attachment는 300~360 개에 이른다. 이러한 attachment를 교환하거나 유지, 보수하는 작업은 생산 효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 많은 제작비용이 필요하고, 또한 신속한 교환을 위하여 프레스 주변에 이들을 보관하여야 하므로 많은 적재 공간을 확보해야 한다.

본 연구는 위의 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 다수의 진공컵을 가지며 각 컵을 독립적으로 또는 일부 연동하여 3차원 작업 대상물 상의 파지가 적합한 지점에 위치시킬 수 있는 작업물 이송용 유연 그립퍼(flexible gripper) 장치를 개발하는 데에 목적을 두고 있다. 유연 그립퍼란 금형 교환 시 미리 입력된 프로그램에 따라 다음 대상물의 크기와 형상에 맞도록 진공컵의 위치가 자동으로 조절되는, 소위 형상 적응이 가능한 그립퍼를 뜻한다. 본 연구에서는 기존의 loader 및 unloader에 attachment 대신 부착이 가능하며, 현장 적용을 위해 요구되는 크기, 중량, 강도, 형상 적응 속도, 제작비, 보전성 등의 까다로운 제한 조건을 만족하는 유연 그립퍼를 제안하고 시제품을 제작하여 그 탁월한 성능과 적용 가능성을 확인하였다.

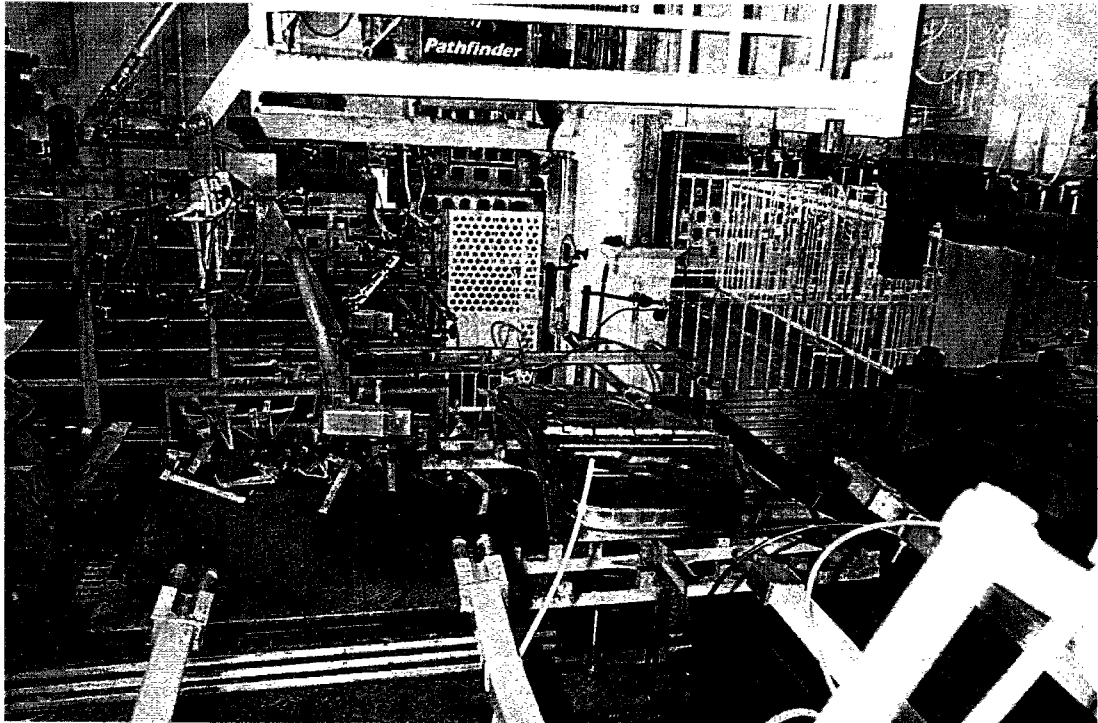


그림 1.2.3.1 4개의 진공컵을 갖는 attachment와 loader

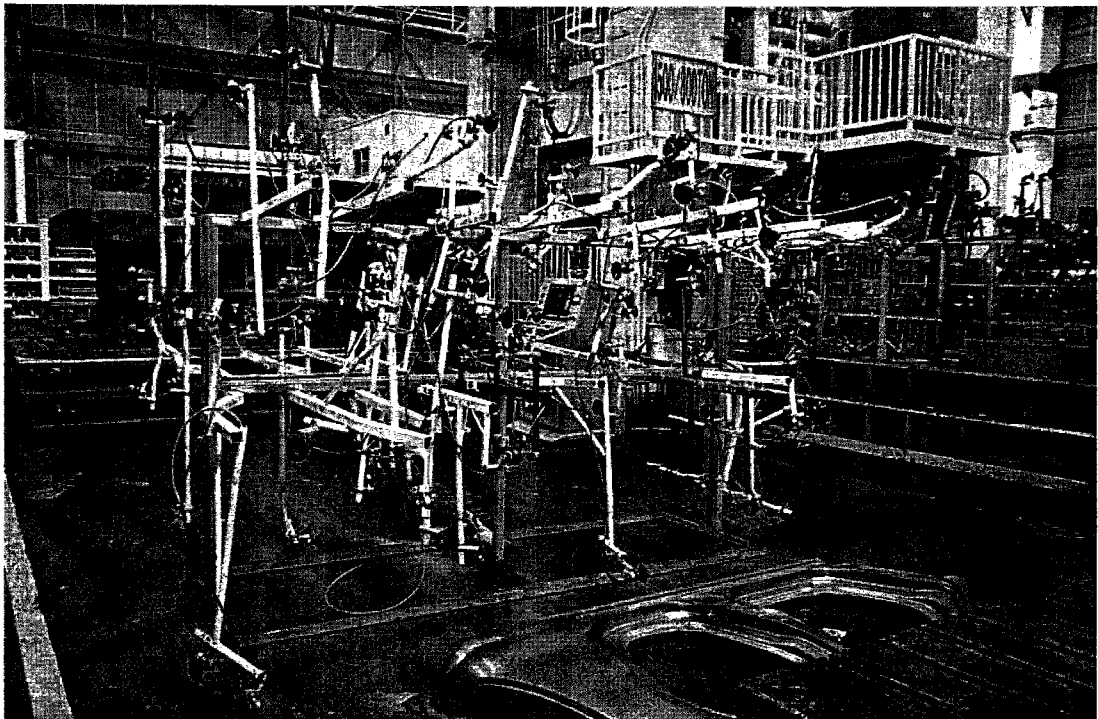


그림 1.2.3.2 작업대기 중인 loader 1개를 위한 attachment들

제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

0. 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술의 개요

가. 연구 배경 및 필요성

기술적 측면: 차세대 로봇의 핵심 기술인 인간-로봇 상호작용 기술 개발하여 재활 로봇 시스템에 대한 적용.

경제/산업적 측면: 인간-로봇 상호작용과 관련된 첨단 기술 선점을 통한 서비스 로봇 및 다운사이징을 통한 관련 장치 제품화 필요.

사회/문화적 측면: 고유의 식생활 및 주생활에 근거한 인간 친화적 기술 개발하여 과학 기술의 혜택을 받지 못하고 있는 장애인의 삶의 질의 향상.

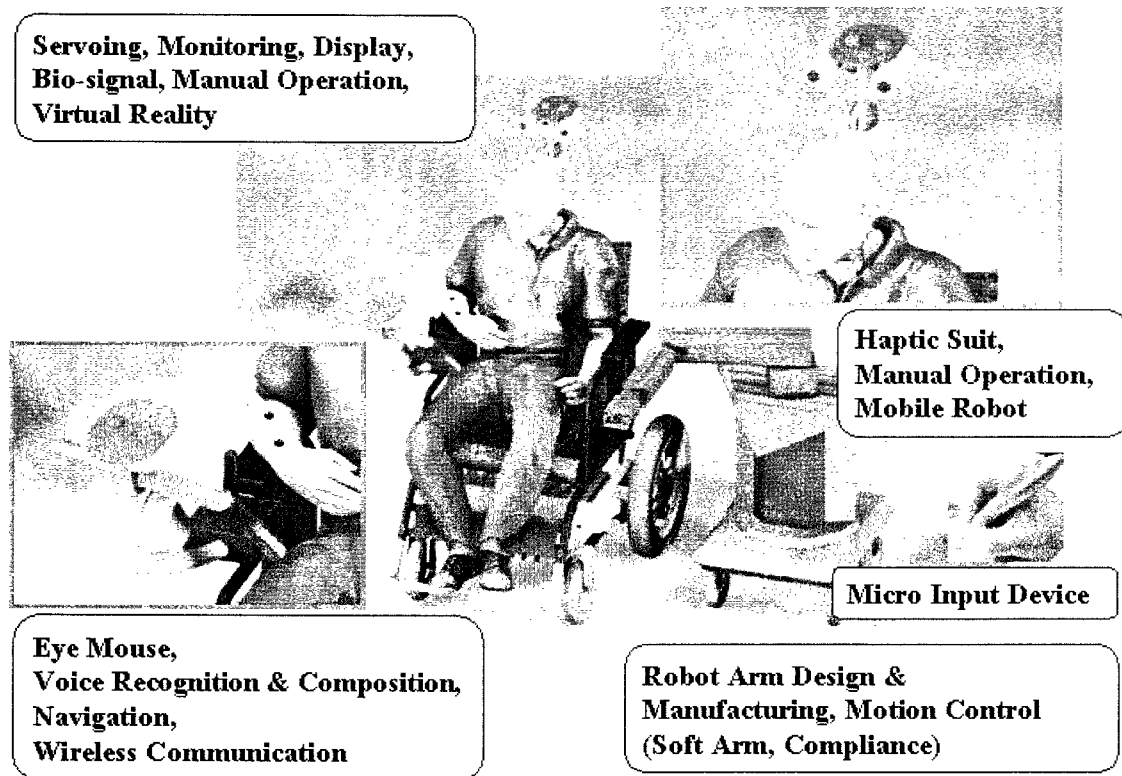


그림 1.3.0.1 장애인을 위한 재활로봇 시스템.

나. 연구개발 목표 및 내용

- 최종목표: **환자 및 장애인을 위한 휠체어 로봇 시스템의 개발** (그림 1.3.0.1 참조).
 - 디자인이 향상된 인간 친밀형 한국인 표준 체형을 고려한 소프트 로봇 팔 개발.
 - 서비스 로봇에 핵심이 되는 각종 인간-로봇 상호작용기술 개발.

다. 단계별 목표

표 1.3.0.1. 인간-로봇 상호 작용 기술 개발의 단계별 목표

단계	단계별 목표
제1단계 (1998.12~ 2000.8)	-국내외 관련 연구 조사. -장애인과 접촉작업이 가능한 소프트 로봇팔의 개발. -Visual Servoing 기술 개발 및 생체 신호 해석 기술 연구. -눈동자 추적에 의한 대상 물체 지적 기술 연구. -의복 형태 조종기 및 MR 유체를 이용한 수동 조종기 기본 기술 연구.
제2단계 (2000.9~ 2002.8)	-외부 환경 적응능력 연구 및 구현. -장애인의 일상생활을 돕는 구체적인 작업 구현 및 소프트 로봇팔의 2차 Version개발. -생체신호 및 Visual Servoing에 의한 로봇 구동 적용. -Eye-mouse 인터페이스 시스템의 개발과 음성인식 기술의 적용. -의복 형태 조종기 및 MR 유체를 이용한 수동 조종기 적용. -소프트 로봇 팔을 이용한 파생제품 연구. -서비스 로봇에서 고속의 영상, 음성, 시스템 데이터, 제어신호 통신기술 연구. -현장 시험 및 시연.
제3단계 (2002.9~ 2003.8)	-연구된 기술을 이용한 2차 파생제품 사업화. -모듈화를 통한 제품 개발 및 사업화. -사용자 친숙성을 가진 GUI의 개발. -각종 Intention Reading 장치의 구현.

라. 12가지 기본 정의 작업의 상호 관련성

1단계에서 수개월에 걸쳐 실제 사용 대상자인 척수 손상 장애인 및 전문의와의 협의 결과, 본 연구에서 개발될 재활로봇 시스템이 일상 생활 보조를 목적으로 수행해야 할 12가

지 작업¹⁾은 다음과 같이 정의되었다[1].

표 1.3.0.2. 12가지 기본 정의 작업

작업 번호	작업 이름	사용자와의 거리
T1	식사 보조	가까움
T2	물 마시기	가까움
T3	얼굴 닦기(굽기)	가까움
T4	면도하기	가까움
T5	물건 집기	멈
T6	스위치 켜고 끄기	멈
T7	문 여닫기	멈
T8	차 만들기	멈
T9	서랍 열기	멈
T10	게임하기(chess)	가까움/멈
T11	CD/Tape 바꾸기	가까움/멈
T12	프린터/팩스 용지 제거하기	가까움/멈

상기 12가지 작업의 상호 연관성을 정의하기 위하여 각 작업에 대한 하위 작업을 분류한 결과, 표 1.3.0.3과 같은 하위작업(Subtask)들을 정리하였다.

표 1.3.0.3. 12가지 기본 작업을 위한 하위작업

작업 번호	하위 작업 이름
S1	현재 위치에서 지정된 위치로 이동
S2	물체 근처로 접근
S3	물체 잡기/놓기
S4	물체 인식
S5	얼굴(입) 인식
S6	얼굴(입) 근처로 이동
S7	얼굴(입) 근처로 접근
S8	얼굴(입) 과 접촉
S9	사용자 이외의 것과 접촉
S10	초기 자세로 복귀

이러한 하위작업 분류를 통해 주어진 12가지 정의된 작업을 분류하고 시간적 순서에 따라 나열한 결과는 표 1.3.0.4와 같다.

1) 1단계 연구에 의하면, 실사용 대상자 및 전문의에 의한 설문 조사, 각종 문헌 조사를 통해 총 13가지의 작업이 필요한 것으로 보고되었으나, 2001년에 수행한 새로운 조사에 의하면, '배두드리기' 작업은 방광 내에 압력을 높이기 때문에 현재는 '배두드리기'는 사용하지 않고, 도뇨관을 직접 요도에 꽂아서 사용하는 방법을 사용한다. 본 연구에서 개발된 재활로봇 시스템은 장애인의 일상 생활을 도와주는 health care를 목적으로 하는 것이며, medical care를 목적으로 하는 것이 아니므로 '배두드리기' 작업은 불필요한 것으로 확정되어 최종적으로는 12가지 작업으로 결정됨.

표 1.3.0.4. 12가지 미리 정의된 작업들과 하위 작업들에 근거한 작업 분석

T1. 식사 보조
S1(수저 근처 이동)→S3(수저 집기)→S2(반찬 근처)→S4(반찬 인식)→S9(반찬 집기)→S6(얼굴 근처)→S7(입으로 접근)→S8(사람 입과 접촉)→S1(수저 자리로 복귀)→S3(수저 놓기)→S10(초기자세 복귀)
T2. 물 마시기
S1(식판으로 이동)→S2(컵 근처)→S4(컵 인식)→S3(컵 집기)→S6(입 근처 이동)→S5(입 인식)→S7(입으로 접근)→S8(사람 입과 접촉)→S1(식판으로 이동)→S9(컵 놓기)→S10(초기자세 복귀)
T3. 세안
S1(수건 근처 이동)→S3(수건 집기)→S6(얼굴 근처 이동)→S7(얼굴로 접근)→S8(얼굴과 접촉)→S1(수건 원래 있던 자리로)→S3(수건 놓기)→S10(초기자세 복귀)
T4. 면도
S1(면도기 근처 이동)→S3(면도기 집기)→S6(얼굴 근처 이동)→S7(얼굴로 접근)→S8(얼굴과 접촉)→S1(면도기 원래 있던 자리로)→S3(면도기 놓기)→S10(초기자세 복귀)
T5. 물건 집기
S1(물건 근처 이동)→S4(물건 인식)→S2(물건 근처 접근)→S3(물건 집기)→S1(식판 등 물건 놓을 장소로 이동)→S3(물건 놓기)→S10(초기자세 복귀)
T6. 스위치 켜고 끄기
S1(스위치 근처 이동)→S4(스위치 인식)→S2(스위치 접근)→S9(스위치 누르기)→S10(초기자세로 복귀)
T7. 문 여닫기
S1(손잡이 근처로 이동)→S4(손잡이 인식)→S2(손잡이 접근)→S3(손잡이 잡기)→S9(문 밀기)→S3(손잡이 놓기)→S10(초기자세로 복귀)
T8. 차 만들기
S1(주전자 위치로 이동)→S4(주전자 인식)→S2(주전자로 접근)→S3(주전자 잡기)→S1(컵 근처 이동, 물 붓기)→S1(주전자 제자리로 이동)→S3(주전자 놓기)→S1(술가락 위치로 이동)→S3(술가락 집기)→S1(컵으로 이동 하여 찻기)→S10(초기 자세로 복귀)
T9. 서랍 열기
S1(서랍 위치로 이동)→S4(서랍 손잡이 인식)→S2(서랍 손잡이로 근접)→S3(서랍손잡이 잡기)→S1(서랍 손잡이 지정된 위치까지 움직이기)→S3(서랍 손잡이 놓기)→S10(초기자세로 복귀)
T10. 게임 하기(Chess)
S1(체스판 위치로 이동)→S4(체스 말 인식)→S2(체스 말로 접근)→S3(체스 말 잡기)→S1(체스 말 위치 옮기기)→S3(체스 말 놓기)→S10(초기 자세로 복귀)
T11. CD/Tape 바꾸기
S1(CD/Tape 근처 이동)→S4(CD/Tape 인식)→S2(CD/Tape에 접근)→S3(CD/Tape 잡기)→S1(CD/Tape 수납장으로 이동)→S9(CD/Tape 놓기)→S4(CD/Tape 인식)→S2(CD/Tape에 접근)→S3(CD/Tape 잡기)→S1(CD/Tape player로 이동)→S3(CD/Tape 넣기)→S10(초기 자세로 복귀)
T12. 프린터/팩스 용지 제거하기
S1(프린터/팩스 근처 이동)→S4(용지 인식)→S2(프린터/팩스에 접근)→S3(용지 잡기)→S1(용지를 지정된 장소에 놓기)→S10(초기 자세로 복귀)

최종적으로 12가지 기본 작업간의 상호 연관성은 표 1.3.0.5과 같은 12가지 기본 작업과 하위작업 간의 관계 행렬을 통해 도시된다.

표 1.3.0.5. 12가지 기본 작업과 하위작업 간의 관계 행렬

작업	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
S1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S2	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S3	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
S4	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S5	✓	✓	✓	✓								
S6	✓	✓	✓	✓								
S7	✓	✓	✓	✓								
S8	✓	✓	✓	✓								
S9	✓	✓				✓	✓					
S10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

따라서, 물마시기(T2) 작업은 모든 하위작업들을 필요로 하며, 이 작업이 성공적으로 수행된다는 것은 다른 어떤 작업도 가능하다는 것을 의미한다. 실제로 T1(식사보조)의 경우에는 물마시기 작업의 반복이라고 할 수 있으며, 세안(T3)이나 면도(T4) 작업의 경우에는 장애인 얼굴과의 접촉이 좀 더 자주 일어난다는 점을 제외하면 물마시기 작업과 별 다를 것이 없다. 또한 T5-T12 작업의 경우에는 T1-T4 작업들이 가능하다면, 별 문제 없이 가능한 작업들임을 알 수 있다. 즉 T5-T12의 작업들의 경우에는 장애인과의 직접적인 접촉이 없기 때문에 다른 작업들 보다 간단한 작업임을 알 수 있다.

이러한 작업간의 상호연관성에 기반하여 본 연구에서는 ‘물마시기’ 작업의 구현을 최우선적으로 고려하였으며, ‘물마시기’ 작업 이외에도 여타 작업 중에서 비교적 많은 기능을 필요로 하는 T1-T7 작업을 대상으로 각종 실험을 수행하였다.

1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현

21세기에 들어서면서 과학기술이 급속도로 발달함에 따라서 로봇분야에서도 변화가 일어나고 있다. 과거에 산업용 로봇 위주로 개발되던 로봇들이 점차 **인간 개개인의 삶을 윤택하게 하는 용도로 개발되고** 있는 것이다. 이러한 세계적인 추세에 부응하고자 본 연구에서는 **장애인과 노약자들의 일상생활을 도와주는 인간친화형 소프트 로봇 팔을 개발**하고자 한다.

이러한 로봇을 개발하기 위해서 목표 지향 설계에 따른 13가지 보조 작업이 선정되었다. 이들 작업들을 잘 수행 할 수 있는 로봇을 설계하기 위하여 13가지 작업에서 꼭 지나야 하는 경로점들을 선정하여 로봇의 기구학적인 구조를 선정하였다. 선정된 기구학적인 구조를 가지고 동역학 시뮬레이션을 통한 모터의 선정이 이루어 졌다.

실제로 로봇을 구동하기 위해서는 구동기(actuator)의 선정도 중요하지만, **동력 전달 체계의 설계 역시 무시하지 못할 기술**이다. 본 연구에서는 우수한 backdrivability와 무시할 만한 백래쉬(back-lash), 작은 마찰 특성을 가지는 케이블 메커니즘을 동력 전달 체계로서 선정하였다. 그러나 **기존의 케이블 메커니즘은 여러 가지 장점이 있음에도 불구하고, 한번 설치한 이후에는 장력조절이 용이하지 못한 문제를 가지고 있다.** 따라서 이러한 장력 조절의 문제점을 해결하기 위하여 **저렴한 상용 worm기어를 사용한 장력 조절이 가능한 케이블 메커니즘이 개발되었다.** 이 메커니즘은 기존의 케이블 메커니즘의 모든 장점을 가지면서도 간단한 조작으로 케이블의 장력을 조절할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 케이블 메커니즘의 최대 난관인 케이블을 감는 작업 또한 이 메커니즘을 사용할 경우 쉽게 할 수 있다.

본 연구에서 목표로 하고 있는 13가지 작업 중에는 **면도 작업이나 얼굴 닦기 작업과 같은 장애인과의 접촉이 있는 고난이도의 작업이 존재한다.** 이런 작업을 잘 수행하기 위해서는 **로봇이 장애인과 접촉 작업을 수행할 수 있도록 능동 컴플라이언스 제어(Active Compliance Control)의 구현이 가능하여야** 한다는 것이 요구되었다. 또한 보다 실용적인 로봇이 되기 위해서는 **로봇이 가격 경쟁력이 있어야 하므로 별도의 토크 센서가 없이도 접촉 힘을 감지 할 수 있을 것이** 요구되었다. 이에 따라서 별도의 토크 센서가 없이도 외력의 측정이 가능한 접촉 힘 측정 방법이 개발되었으며, 장애인과의 접촉시에 민감하게 반응할 수 있도록 **1N이하의 접촉 힘을 감지 할 수 있음이** 실험을 통하여 확인되었다. 또한 이를 이용한 **강인한 능동 컴플라이언스 제어 기법(TDC based Impedance Control)이 개발되어서** 로봇이 장애인과의 접촉 작업 시에 원활한 작업 수행이 가능하게 되었다. 개발된 제어 알고리즘과 힘 측정 방법은 **국립 재활원에서의 임상 실험을 통하여 장애인들에게 검증을 받았으며, 장애인들이 선호하는 컴플라이언스의 크기를 얻을 수** 있었다.

2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

가. 주위환경에 적응하며 인간 친화적인 Visual Servoing 기술

비주얼 서보잉(Visual Servoing)은 영상으로부터 얻어진 시각 정보를 이용하여 로봇의 말단부(End-Effector)의 자세(3차원 위치와 방위)를 제어하여 작업 대상과 상호작용을 하면서 원하는 작업을 정확히 수행하도록 한다. 최근 관심을 끌고 있는 서비스 로봇(Service Robot)과 필드 로봇(Field Robot)은 반구조화된 환경(Semi-structured Environment) 또는 비구조화된 환경(Unstructured Environment)에서 사용되며, 로봇과 목표물 사이의 정확한 자세정보는 알려져 있지 않고 측정하기도 어렵다. 실례로 재활로봇이 팔, 다리가 불편한 장애인을 위하여 컵을 집어서 입 근처로 가져가는 작업[2]을 비롯하여 로봇에 의한 과일 따기(Robot Fruit Picking) 작업[3]과 같은 경우에 컵과 과일의 정확한 자세 정보는 얻기가 매우 힘들다. 시각정보의 궤환(Feedback)을 이용한 폐 루프(Closed Loop)시스템은 로봇 및 카메라의 보정 오차(Calibration Errors)와 비선형성 및 불확실성 등에 상대적으로 둔감하여 좋은 효과를 얻을 수 있다. 그 외에도 비전 센서는 비접촉 방식의 센서로서 사용자에게 사용의 거부감을 줄일 수 있는 장점을 가진다. 서비스 로봇에서는 인간과 로봇이 동일한 공간에서 공존한다는 특징을 가지며, 비접촉 방식을 포함한 다양한 상호작용이 필요하다. 본 연구는 이러한 상호작용을 보다 “편리하고”, “쉽게” 할 수 있도록 하는 인간 친화적인 Visual Servoing 기술을 구현/적용하고, 핵심적인 장치에 대하여 시제품 제작을 완료하는 데 목적이 있다.

현재까지 진행된 Visual Servoing 기술에 대한 주요 연구 범위는 다음과 같다.

- 공간변화비전 및 개선된 공간변화비전을 이용한 새로운 영상 처리 기술의 제안 및 이를 응용한 Visual Servoing 기술을 실제 로봇에 구현하여 정의된 작업을 수행.
- Visual Servoing 기술의 지능화를 위한 사용자 의도 파악 기능 및 얼굴 인식/표정 인식 기능의 구현.
- 소형 스테레오 카메라 헤드의 제어를 위한 시리얼 포트를 통한 제어가 가능한 소형 제어기의 모듈화 구현.
- Visual Servoing 기술의 작업 성공률 향상을 위한 센서 융합 및 인간-로봇 공동 작업 기술에 대한 기본 연구 및 작업 구현.

나. 로봇 팔 제어 알고리즘을 위한 생체 신호(EMG) 분류 기술

생체신호를 이용하여 로봇을 제어하는 방식은 인간의 생체로부터 측정 가능한 여러 생체

신호중 인간의 의지로 조절 가능한 생체 신호를 이용하여 로봇을 자신의 의도대로 제어하는 것을 말한다. 측정 가능한 여러 생체 신호 중 근전도(EMG; Electromyogram) 신호는 각종 산업 재해나 교통 사고 등으로 인해 팔이나 다리 등이 절단된 후천적 장애인을 위한 의수나 의족의 제어원으로 최근에 각광을 받고 있다. 생체신호를 이용하는 방식은 다른 인간-로봇 상호작용 기술에 비해 사용하기에 자연스럽다는 점, 시스템 명령어에 대한 부가적인 학습이 필요 없다는 점, 비 구조화된 환경에서 사용 가능한 조이스틱, 키패드, 3차원 입력기 등을 사용할 수 없는 중증 장애인에게도 적용 가능하다는 점의 여러 장점[4]을 가진다. 본 연구는 생체신호를 이용하여 인간-로봇(기계)간의 상호작용을 보다 “편리하고”, “쉽게” 할 수 있도록 하는 인간 친화적인 생체 신호 분류 알고리즘 기술을 개발하고, 핵심적인 장치에 대하여 시제품 제작을 완료하는 데 목적이 있다.

현재까지 진행된 생체 신호 처리 기술에 대한 주요 연구 범위는 다음과 같다.

- 로봇 팔 제어를 위한 근전도 신호에 기반한 인간친화적인 6자유도 분류 알고리즘 개발.
- 비례 제어를 위해 근전도 신호로부터 힘 정보 추출 알고리즘 개발.
- 저가, 소형, 고성능의 무선 생체 신호 증폭기의 개발.
- 중증 척수 장애인을 위한 소형화된 휠체어 인터페이스의 개발.

3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발

손과 발을 자기의 의지대로 움직일 수 없는 장애인들을 위한 컴퓨터 및 로봇 등과의 인터페이스기술을 개발하려고 한다. 척수 손상자와 같이 손과 발을 마음대로 움직이지 못하는 장애인들의 경우 보조용 전동 휠체어나 로봇 팔을 직접 손으로 조작하는 것이 어려운 작업이고 장애의 정도에 따라서는 불가능한 작업이기도 하다. 이러한 경우 보조 장치를 작동시키기 위해서는 장애인의 의도를 손과 발이 아닌 다른 방법으로 전달해야 한다. 이러한 방법 중 하나로 신체 부위의 움직임을 외부에서 시각적으로 판단하여 전달하고자 하는 내용을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 방법을 적용하여 작업 의도를 파악하기 위한 수단으로서 눈의 움직임과 머리의 움직임을 이용한다. 즉, 손과 발의 움직임이 자유롭지 못한 장애인의 작업 의도를 파악하기 위한 수단으로서 눈의 움직임과 머리의 움직임을 이용하여 전동 휠체어나 로봇 팔을 구동시킬 수 있는 시스템을 제시한다. 또한 작업 대상에 대한 위치 정보를 추출하여 작업 수행 능력을 향상시키기 위한 스테레오 카메라 시스템과 장애인 조작자가 피로를 느끼지 않고 사용하기 편리한 인터페이스 구성 방법을 제시한다. 이러한 연구는 다음과 같은 범위로 요약될 수 있다.

- 장착형 Eye-mouse 시스템 개발

- 이미지를 통한 정밀한 눈동자 추적 시스템 개발을 위한 이미지 처리 알고리즘 개발

및 시스템 구현

- 자기 센서를 통한 머리 추적 시스템과 눈동자 추적 시스템의 통합으로 시선 방향 검출
- 비장착형 Eye-mouse 시스템 개발
 - 이미지와 적외선을 이용한 비장착 시선 추출 알고리즘 개발 및 시스템 구현
- Eye-mouse 시스템을 위한 인터페이스 기술 개발
 - 장애인을 위한 사용자 지향의 편리한 Eye-mouse용의 인터페이스 기술 개발
- 대상 물체의 3차원 위치 정보 추출 시스템 구현
 - 대상 물체의 위치 정보를 추출하기 위한 스테레오 카메라 시스템의 구동 및 보정의 자동화 그리고 대응점 추출의 강인성 확보

4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발

약 20여 년 전부터 재활공학(Rehabilitation Engineering) 분야에서는 재활 로봇, 전동 휠체어, 컴퓨터 입력 장치 등 수족이 자유롭지 못한 장애인을 위한 보조 장치들이 개발되어 왔다. 장애인을 위한 보조 장치들은 작업의 효율성에 우선하여 장애자가 원하는 작업을 수행할 수 있어야 하기 때문에 장애인과 보조장치 사이의 상호작용기술(Human-machine Interface)에 대한 연구가 절실히 필요한 상황이다.

Body Motion을 이용한 원격제어장치 기술은 위에서 서술한 필요를 만족시킬 수 있는 기술 중 가장 기본이 되며 국내는 물론이며 세계적으로도 연구가 미흡한 기술이다. 척추 손상 장애인의 일상 생활을 돕는 장치를 개발하는 데 있어서 본 연구는 다음과 같은 내용을 목표로 한다. 척추 손상 장애인의 경우 손상된 척추 번호에 따라 움직일 수 있는 몸의 부위가 눈, 목, 어깨, 팔의 일부 등으로 제한이 되게 되며, 이 중 대부분의 척추 손상 장애인이 목과 어깨만을 자유로이 움직일 수 있다.

본 연구에서는 기존에 연구되고 있는 장치와 차별화 된 좀더 저렴하고 인간 친화적인 디자인으로 설계된 머리의 기울어지는 각을 대상으로 하는 입력장치를 개발하고자 하였다. 이와 더불어 기존의 광섬유를 사용하여 신체의 움직임을 측정하였던 장치인 의복형 힘반향제어기(Haptic Suit)[13]를 실용적으로 발전시켜 사용자 입장에서 고려하여 좀 더 개선된 장치를 만들고자 하였다. 먼저 대상이 되는 신체 일부분밖에 사용하지 못하는 경수 손상 장애인들의 특징에 대해서 알아보고 이들의 머리 및 어깨의 움직임 영역에 대해서 문헌조사 및 실험을 수행을 하여 가능한 영역을 얻도록 하였다. 머리 및 어깨의 움직임

측정을 위한 센서는 FSR(Force Sensitive Resistor)센서로 동작원리 및 사양에 대해서 간단히 설명한 뒤 새롭게 만든 입력장치의 원리에 대해서 언급하고 실험결과를 보인다. 실질적으로 장애인들에게 유용하게 사용될 수 있는지를 확인해보기 위해 임상실험을 통해 그들에게 실질적으로 얼마나 도움이 되는지를 검증 받고자 하였다. 또한 이러한 인터페이스를 이용하여 휠체어 로봇 시스템을 구동하는데 있어서 장애인에게 보다 편리함과 안전성을 보장하기 위하여 지능적 알고리즘을 개발하고자 한다. 구체적으로, 머리 인터페이스를 이용하여 휠체어를 구동하는데 있어서 장애인의 상황 판단 능력과 자동 회피 알고리즘의 안전성을 모두 만족시키며 보다 나은 성능을 갖는 주행 알고리즘을 개발하여 인터페이스 시스템에 지능을 부여하도록 한다. 마지막으로 미약하게나마 손을 사용할 수 있는, 비교적 양호한 장애인을 위해 안정성이 보장되는 힘 반향 조종기를 개발하기 위하여 본 연구에서는 MR 유체를 이용하여 장애인이 보조 장치를 원격 조종을 하는데 있어서 어떠한 상황에서도 안정성을 보장할 수 있도록 하는 힘반향 수동 조종기를 개발하고자 하며, MR 유체를 이용한 1자유도 수동 조종기를 제작하여 실용화 가능성을 검증하고 그 기본 기술을 개발하고 이를 토대로 소형의 2자유도 반능동 힘반향 수동 조종기를 개발하고자 한다.

5. Hand-held Master의 개발

원격조종수술, 미세조립작업, 극한환경 작업 등은 필수적으로 원격조종작업 즉 master-slave 작업을 필요로 한다. 또한, 3차원 게임, 홈네트워크의 제어, Hand-held PC 등에서도 master-slave 제어를 이용한 제어방식이 점차 각광을 받고 있다. 이러한 원격조종작업을 위하여 기존의 많은 master들이 개발되었으나 이러한 master들은 텔레로봇제어의 특성상 복잡한 mechanism을 요구하는 등 저가, 경량형의 master와는 거리가 멀었다. 본 연구는 이러한 단점을 극복하고, master-slave 작업에 있어서 1) 가속도계, 자이로, 마그네틱 센서, 초음파센서 또는 카메라를 이용하여 master의 6차원 자세를 실시간으로 획득하고 이를 이용하여 2) 가상 또는 실제의 로봇과 물체의 운동을 지시하고 그로부터 얻어지는 3) 힘의 피드백정보를 master의 진동으로 나타내어 사용하기 편리하고 직관적인, 달힌 루프 제어를 가능하게 하는 방법 및 장치에 관한 연구이다. 이 master를 이용하면 원격조종수술, 미세조립작업, 극한환경 작업 등 원격조종 시스템의 master 또는 각종 홈네트워크, 게임 등에서의 입력장치를 사용하기 편리하고 직관적이고 달힌 루프 제어가 가능한 경량형, 저가형 master 및 입력장치로 대체할 수 있다.

본 연구에서 개발된 master는 실시간으로 6 자유도운동의 데이터를 획득하고 이를 운동 입력명령으로 이용한다. 또한, Tele-operation 모드와 Teach 모드, Idle 모드 등 여러 가지 모드변환을 하여 입력명령의 양상을 바꿀 수 있다. 모드변환은 보조 버튼을 이용하여 구

현한다. 입력운동의 Low Pass Filtering을 구현하여 안정적인 명령을 제공한다. 본 연구에서는 또한 Hand-held Master를 실제 응용하기 위한 Master-Slave 제어기법을 연구 개발하였다. Master-Slave 제어에서 가장 중요하게 고려되어야 할 안전성을 추구하기 위하여 본 연구에서는 Reference 적응(adaptive) 제어기법을 개발하였다. Reference 적응제어는 환경 정보가 정확하게 주어지지 않은 상태에서 로봇과 대상체의 안전성을 최우선적으로 고려하기 위한 매스터-슬레이브 제어기법이다. 또한, 로봇 등 운동대상체로부터 얻어지는 힘과 접촉 피드백 정보를 진동과 음향으로 바꾸어 입력장치에 전달한다. 무선 또는 유선으로 입력명령과 피드백 정보를 전달하며 작업공간의 제한을 감소시킨다. 입력명령은 최대한 직관적으로 슬레이브로봇단과 같은 운동을 하게끔 내릴 수도 있고, gesture인식으로 약속된 다른 명령을 내릴 수도 있다.

제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발

21세기에는 로봇이 산업분야뿐만 아니라 비산업 분야 즉, 가정, 오락분야까지도 파급되어 그 수요가 폭발적으로 확대될 것으로 예상된다. 특히, 산업분야에서의 건설부문은 로봇화의 기대가 높은 분야로, 선진국에서는 현재 로봇개발과 함께 일부는 현장투입도 이루어지고 있는 실정이다[1, 2].

국내 건설업계는 IMF이후 경기침체로 건설 자동화 설비의 도입이 주춤하고 있는 상황이지만, 경기 회복 후에는 새로운 국면의 건설 기기 도입이 예상된다. 국내 건설산업은 국민총생산의 약 20%가 되는 주력 산업분야로서, 국가적으로도 국제 경쟁력에 대한 배양이 필요한 분야이다. 일본의 경우 2000년에는 전체 비제조업 산업의 16%가 건설/토목 분야에서 차지하고 있으며 2005년에 20%이상으로 확대될 전망이다. 현재 국내의 경우는 일부 플랜트 산업에 외산 로봇 시스템의 한정된 적용만이 있으므로 향후, 적용될 로봇 시스템 중에서도 가장 적용 영역이 큰 철골용접 로봇 분야에 관심을 가져야 할 것이다.

건설 분야의 로봇 자동화에 대한 수요 조사에 의하면 철골 구조물에 대한 자동 용접 로봇의 필요성이 가장 크게 나타났다[1, 3]. 이 결과는 업계의 주요 관심사가 유자격 기능공의 절대 부족과 더불어 가혹한 3D 노동조건의 해소임을 반증하는 것으로 보여지며, 국내에서도 조만간 이에 대한 수요가 발생되리라 예상이 된다. 최근, 건축 구조물이 대형화, 고층화되면서 기존의 철근 콘크리트 구조에서 철골 구조의 공법이 대부분 사용되고 있으며, 따라서 후판에 대한 철골 용접 작업이 늘어나 이에 따른 용접 시공의 고능률화, 용접 품질의 안정화 및 숙련 작업자의 부족 대처 방안으로서 용접 로봇의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 일본 등 선진 국가들의 중공업 부분에서는 철골 용접 로봇 시스템 개발이 활성화되어 있고 부분적으로는 현장 적용을 실시하고 있어 곧 상용화가 예상된다. 그러나 국내의 경우는 건설, 토목 분야에 로봇을 적용한 사례가 전무한 상황이며 그 외 산업용 용접 로봇의 경우도 외국산 로봇의 적용이 대부분이므로 장기적인 로봇 산업의 국산화 적용 확대가 필요한 시점이다.

숙련된 용접사가 절대적으로 부족하고 작업 효율의 저하, 안전 사고 등에 대한 대비책으로써 Arc 용접로봇 시스템의 개발 적용 응용은 이 부분에서 가장 선행되어야 할 부분이다. 특히, MMI (Man Machine Interface), 용접 전용 제어 그리고 특수 제어 기능 등 수직 철골 용접 전용 기능과 시스템 응용 능력을 갖추으로써 21C 생산기술의 핵심이 될 수 있도록 실용화 단계까지 조기 개발 및 적용까지 이루어져야 한다. 한편, 국내 산업용 로봇의 응용 측면에 있어서도 다관절 로봇을 이용한 특수 로봇 제어 부분의 경우 용접 로봇(Arc Spot 용접 로봇)이 주류를 차지하고 있다. 따라서 가장 대표적인 Arc 용접 로봇 시스템의 개발/확장이 시급하며 시스템 특성이 가장 난해한 건설, 토목 분야에서의 로봇 자동화에 대한 개발 및 응용 기술 확보가 가장 절실하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 국내 실정에 맞는 수직철골 용접로봇 시스템을 개발하기 위하여 먼저 로봇산업의 관점

에서 건설토목 분야의 관련시장과 로봇개발 현황을 개괄적으로 고찰하고, 현재 수작업으로 진행되고 있는 철골 구조물 시공방법에 대하여 살펴보았다. 국내에서 시공되고 있는 건설 현장을 답사하고 기술자와의 인터뷰를 통하여 기존의 시공법을 크게 바꾸지 않는 범위에서의 로봇 시스템 개념 설계를 수행하였다. 이를 토대로 1차 년도에서는 개념 설계를 거쳐 1차 시제품을 개발하였으며, 2차 년도에서는 이에 대한 보완 및 기능 구현(로봇 이동 주행 및 용접 기능)에 중점을 두고 연구를 수행하였다. 최종 연도인 3차 년도에서는 1단계에서 개발된 철골용접 로봇 시스템의 시제품에 대하여 안정성, 편리성 및 신뢰성에 대한 기능적인 면에서의 보완을 수행하고 용접 기능 구현을 위한 연구를 수행하였다. 향후, 상용화에 대한 연구를 보다 중점적으로 수행한다면 점차 확대되고 있는 건설 토목 분야의 자동화/로봇화에 대한 국가경쟁력을 높이고, 나아가 관련기술의 파급으로 자동화기술의 선진화를 유도할 수 있을 것이다.

여 백

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단

제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

1.1 이동기술

일반적으로 Navigation이라 함은 원하는 목표 지점에 도달하기 위해 적절히 중간 목표점들을 계획하고 결합해 나가는 일련의 과정이라 할 수 있다[1]. Navigation은 몇 가지 필수적인 단계로 나눌 있는데, 주어진 작업을 수행하기 위해 정보를 얻고 이들 중 적절한 정보를 결정하는 인식(Active perception) 단계, 인식된 데이터로부터 유용한 환경 모델을 세우는 모델링(Modeling)단계, 환경 모델에서 로봇 자신과 목표 지점의 위치를 결정하는 위치 측정(Localization) 단계, 그리고 추종해야할 경로를 정하고 이 작업을 수행하기 위해 선행되어야 할 여러 조건들을 정의하는 운동 계획(Motion planning)단계, 센서 피드백을 통해 예상치 못한 환경 변화를 적절히 고려하면서 운동 계획에 의해 주어진 명령을 수행(Execution)하는 단계로 구분 지을 수 있다.

이와 같은 Navigation의 기초적인 작업들 중에서 경로 계획은 그 중요성으로 인해 여러 연구가 진행되어 왔는데 그중 포텐셜 필드 방법(Potential field method)은 가장 널리 사용되는 방법 중 하나이다[1][2][3][4]. 이 방법에서는 로봇을 가상의 포텐셜 필드(Artificial potential field)에 존재하는 하나의 입자로 간주한다. 여기서 포텐셜 필드는 목표점에는 인력(attractive potential)을, 장애물에는 반발력(repulsive potential)을 부여으로써 구현된다. 이 방법은 처음에 Khatib에 의해 온라인 충돌 회피 방법으로 제시된 것으로서 수학적으로 쉽게 표현되어 알고리즘이 간단하고 모든 종류의 센서에 사용 가능하며 빠르게 최적 경로를 찾을 수 장점을 가지고 있다. 그러나 장애물과 목표점의 관계에 따라 local minima에 빠져 목표점에 도달을 보장할 수 없다는 치명적인 단점도 아울러 가지고 있다.

Krogh는 Khatib가 제안한 전통적인 방법을 개선하여 일반화된 포텐셜 필드(Generalized potential field) 방법을 제안하였다[5]. 이 방법은 포텐셜 함수를 구할 때 로봇의 위치 뿐 만이 아니라 장애물과의 상대 속도까지 고려하였다. 쉽게 말해, 로봇은 장애물로부터 가까이 있고 그 속도 방향이 장애물을 향하고 있을 때만 반발력을 느끼게 된다.

만일 로봇이 장애물과 평행하게 움직인다면 반발력은 작용하지 않는다.

Borenstein은 포텐셜 필드 방법과는 조금 다른 VFH(Vector field histogram)이라는 장애물을 회피하면서 동시에 목표지점을 향해 이동하는 방법을 제시하였다 [6]. 이 방법은 센서 측정을 통해 장애물의 존재를 확률 값으로 나타내는 격자 지도를 만들고 이로부터 polar histogram을 유도하여 목표점에 가장 근접하면서 장애물이 없는 경로를 계획하게 된다. 그러나 이 방법 역시 local minima문제를 해결하지 못했고 계획된 경로가 진동할 여지가 있으며 큰 환경에서는 적용이 힘들고 Cycle time이 상대적으로 길다는 단점을 가지고 있다.

앞서 밝혔다시피 포텐셜 필드 방법은 여러 가지 장점을 가지고 있음에도 불구하고 local minima문제로 인해 실제 적용이 어려웠다. 이를 위해 여러 연구가 진행되었는데 이들은 크게 local minima를 가지지 않는 포텐셜 함수를 정의하는 방법과 local minima에 빠졌을 때 잘 회피할 수 있는 방법, 이 두 가지 접근 방향으로 진행되었다. 그 중에서 Latomb이 제시한 Wavefront 알고리즘은 계산 부하를 많이 줄이면서 local minima문제를 해결한 대표적인 방법이다[7]. 이 방법은 분석적인(Analytic) 접근 방식이 아닌 산술적인(Numerical) 방식으로 local minima를 가지지 않는 Navigation 함수를 구하고 이로부터 목표점에 도달할 수 있는 최적의 경로를 구하는 방식이다.

Konolige는 Wavefront 알고리즘을 좀 더 개선한 gradient 방법을 제시하였다[8]. 이 방법은 목표점으로부터 얼마나 멀리 떨어져 있느냐에 따른 가격(Adjacency cost)과 장애물에 얼마나 가깝게 위치하는 지에 대한 가격(Intrinsic cost)을 더하여 경로 가격(path cost)을 구하고 이를 최소화하는 방향으로 경로를 계획하는 방법이다. Wavefront 알고리즘은 목표점과의 맨하튼 거리(Manhattan distance)를 측정하여 경로 계획은 한 반면, gradient 방법에서는 실제 거리를 사용해 성능을 높였다. 또한 장애물에 대한 가격을 고려하여 계산함으로써 장애물과 어느 정도 안전 거리를 유지하면서 경로 계획을 할 수 있다는 장점을 가진다. 이 방법은 최적 경로를 제공한다는 점에서 상당히 유용한 방법이나 경로 추적 제어에 대한 언급이 없고 아직 실제 로봇에 적용된 예는 없다.

이동 로봇의 navigation문제에서 가장 기본이 되는 것이 localization 문제이다. Localization 문제는 크게 local position tracking problem, 초기 위치 정보가 주어지지 않는 global localization problem, and 갑자기 로봇위치를 옮긴다거나 localization 실패에서 발생하는 kidnapping problem으로 나누어진다.

Odometry는 localization에서 가장 일반적이고 기본적으로 쓰이는 방법으로서 짧은 거리에서는 가격에 비해 좋은 정확도를 제시하지만 근본적으로 odometry가 가지는 incremental motion 정보에 의한 계산이라는 측면 때문에 누적되어지는 positioning 오차를 극복할 수가 없다. 따라서 이를 보상하기 위한 여러 방법들이 시도되고 있는데 wheel 설계상의 노력, 절대 위치 측정시스템과의 연계, landmark를 이용한 position의 보정 방법,

landmark를 이용하지 않는 position의 보정 방법들이 있다.

능동 beacon navigation system은 선박이나 항공기에서 쓰이는 가장 일반적인 방법으로서 매우 빠른 처리속도와 높은 신뢰성을 가진다. 빛이나 radio frequency를 발사하는 3개 이상의 고정된 beacon들은 아주 잘 알려진 장소에 위치하여야 한다.

landmark를 이용한 localization 방법은 artificial landmark, natural landmark등의 feature point를 이용한다. artificial landmark이란 로봇이 감지하기에 최적인 표식을 말하고 natural landmark이란 빌딩내의 경우 복도의 형상이나 문 형상, 전기 등, 벽의 코너 등 이미 존재하고 있는 형상이다. 이런 landmark를 인식하는 데 vision이 많이 쓰이고 있다. 첫 번째의 feature point를 사용하는 방법은 그 특징 점들을 미리 map상에 register한다. Range scan data로부터 일정한 템플릿을 이용하여 feature points를 extraction하는 process를 거쳐 상응하는 점들을 matching하여 로봇의 pose를 구한다.

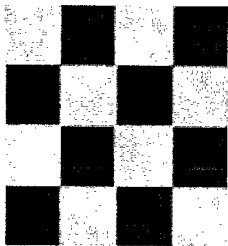


그림 2.2.1.1.1

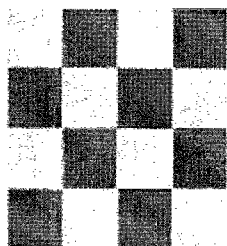


그림 2.2.1.1.2

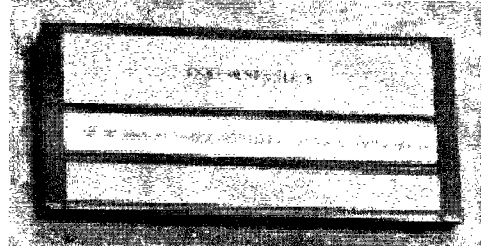


그림 2.2.1.1.3

landmark를 이용하지 않는 localization 방법은 feature point extraction process를 거치지 않고 Range Scan Data를 그대로 Image Matching 하거나 hough transform을 이용하여 환경의 geometry 정보를 사용하는 scheme인 Line to Line Matching 또는 Point to Point Matching 방법들과 그 밖의 방법이 있다

localization을 수행하기 위해 쓰이는 센서들로는 vision, laser range finder, 적외선 센서, 초음파 센서, GPS 등 이 있다. 현재 가장 많이 쓰이고 있는 것이 바로 vision과 laser range 센서이다. vision은 조도에 상당히 민감하고 calibration 역시 까다롭지만 거리와 color 정보까지 얻을 수 있어 가장 많이 쓰이고 있다. Laser 센서는 가격 면에서 비싸나 가장 정확한 거리 데이터를 주어 실내 이동로봇에서 많이 쓰이고 있다. Infrared sensor와 초음파 센서는 저렴하나 정확도가 레이저에 비해 떨어지며 navigation에서 유용하게 사용하기 위해서는 아주 많은 실험을 통해 센서모델을 만들어야만 가능하다. GPS는 outdoor mobile robot에서 요즘 많이 사용되고 있다.

실내 환경에서 가구의 재배치, 이동하는 사람들로 인한 환경의 변화, 거리 센서와 odometry를 포함한 센서정보의 불확실성으로 인해 로봇이 가지는 많은 정보들이 불확실

하다는 점에 착안하여 1900년대 중반부터 Kalman Filter, Markov Localization and Monte Carlo Localization 등 많은 확률론적인 연구들이 수행되어져 왔다. Kalman Filter는 정확하고 robust한 방법이지만, global localization를 수행할 수 없다. 이에 비해, Markov Localization은 multi modal 표현이 가능하여 global localization 문제를 해결하였으나, 이 방법의 단점은 map상의 모든 grid를 대상으로 계산을 해야 하여 계산시간이 오래 걸리고 많은 메모리 양이 필요하다. Monte Carlo Localization (Condensation Method)는 sampling based 방법으로 Global Localization 문제를 해결하고 메모리 양을 줄이고 계산시간을 단축할 수 있다.[3]

그 외 최근에는 computing power의 발달로 3D map의 matching에 의한 방법도 연구되고 있다.

1.2 조작기술

가. PSR 1 매니플레이터의 제어 기술

일반적으로 매니플레이터의 공간 상에서의 동작 제어는 엔드 이펙터가 시간에 따라 주어진 경로를 이동하도록 하는 목적을 갖는 경우가 대부분이다. 궁극적으로 기구의 동작 제어는 엔드 이펙터가 공간 상에서 정해진 위치와 자세를 가질 수 있도록 매니플레이터에 부착된 작동기(Actuator)를 제어하는 것을 의미한다. 이 경우, 각 작동기의 제어를 위한 기준 입력 신호의 종류에 따라 기구학적 제어(Kinematic Control)와 동역학적 제어(Dynamic Control)로 구분할 수 있다. 엔드 이펙터의 초기 위치에서 목표 위치까지의 이동을 고려할 때 이에 대해 작업 공간 상에서의 경로, 또는 조인트 공간 상에서의 경로를 생성하게 되고 이것이 직접적으로 제어 기준 입력 신호로 사용되는 경우를 기구학적 제어, 이와는 달리 이러한 경로를 추종하기 위한 작동기의 힘/토크를 제어 기준 입력 신호로 사용하는 것을 동역학적 제어로 분류할 수 있다. 즉, 기구학적 제어는 작동기가 주어진 변위 및 속도를 만족하는 것을 목표로 하며 동역학적 제어에서는 작동기가 정해진 힘/토크를 출력하도록 하는 것을 목표로 한다.

기구학적 제어에서는 목표 변위, 속도와 같은 기구학적 정보만을 이용하기 때문에 제어 대상 시스템-매니플레이터에 대한 동역학 모델을 필요로 하지 않는다. 따라서, 제어 시스템 구축이 간단하게 이루어질 수 있다. 그러나, 매니플레이터의 실시간 동작에 따라 작동기에 전달되는 시변 부하(Time-Varying Load)를 고려하지 않게 되고 결과적으로 매니플레이터의 작동 영역 및 작동 속도에 따라 제어 성능이 변화하는 단점을 나타낸다. 또한 전체 시스템의 안정성(Stability)을 예측할 수 있는 수학적 모델이 존재하지 않으므로 제어기 상수 설계에 있어서 경험 및 시행 착오(Trial and Error)에 의존해야 한다.

동역학적 제어는 기구의 동역학적 운동 상태에 따라 요구되는 힘/토크를 작동기로부터

터 받음으로써 전체적인 관점에서 볼 때, 매니플레이터의 작동 영역 및 작동 속도에 따라 일관적인 추종 성능을 나타낼 수 있는 제어기 설계가 가능하다. 그러나, 이 경우에는 작동기의 힘/토크 제어가 용이해야 한다는 것을 전제로 하고 있으며, 또한 작동기에 존재하는 많은 비선형적(Nonlinear) 또는 비보존적(Nonconservative) 요소들이 전체 시스템 거동에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 실제 시스템 구현 및 동작 시에 만족할 만한 성능을 얻기 위해서는 이에 대한 보상(Compensation)이 고려되어야 한다. 결론적으로 어떠한 제어 전략을 수립할 것인가는 매니플레이터의 작동 범위 및 속도, 작동기의 특성 등에 따라 적절한 해를 찾아야 하는 문제로 귀결된다.

나. 비전(Vision)을 이용한 매니플레이터의 제어

비전을 이용한 매니플레이터의 제어 방법은 크게 비주얼 개루프 제어(Visual Open Loop Control) 방식과 비주얼 서보잉(Visual Servoing) 방식으로 구분할 수 있다. 비주얼 개루프 제어 방식은 초기에 비전 시스템을 이용해 대상 물체의 위치 및 자세를 인식하고 이로부터 매니플레이터의 기구학 해석 모델을 이용하여 조인트 공간에서의 목표 변위를 계산한 다음, 이후 매니플레이터 제어 시스템이 구동되는 형태의 제어 방식이다. 여기서의 비주얼 개루프는 비전 시스템이 매니플레이터 제어를 위한 폐루프(Closed Loop)의 외부에 위치하는 것, 다시 말하면 전체 매니플레이터의 제어 알고리즘에서 비전 시스템과 매니플레이터 제어 시스템이 분리되어 있음을 의미한다. 이러한 제어 방식은 비교적 구축이 용이하고, 또한 폐루프 제어 구조 외부에 비전 시스템이 위치함으로써 대상 물체의 위치 및 자세 추정 시간이 제어 샘플링 시간에 영향을 주지 않게 된다. 그러나, 어느 정도 비전 시스템을 활용하는 목적을 달성한다고 하더라도, 비전 시스템의 추정 오차와 매니플레이터 기구학적 오차가 최종적으로 대상 물체를 파지하는 데 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 전체적인 성능은 카메라-매니플레이터 오차 보정 작업(Calibration)의 정확성 여부에 의존하게 된다.

비주얼 서보잉(Visual Servoing)은 개루프 제어방식과는 달리, 매니플레이터 제어의 한 서보 루프(Servo Loop) 내에 비전 시스템이 존재하는 방식이며, 이는 컴퓨터의 연산 성능이 발전하면서 이미지 정보 획득 및 처리에 소요되는 시간이 획기적으로 감소된 결과로 가능해졌다. 비주얼 서보잉은 매 샘플링 시간마다 카메라로부터 얻어진 영상을 분석하여 매니플레이터의 제어 오차(Control Error)를 계산하고 이를 보상하는 목적의 제어 입력을 실시간으로 인가하는 방법이므로, 작업 시작 단계에서의 대상 물체에 대한 위치 및 자세 추정 시에 발생한 오차가 매니플레이터 작업 수행에 큰 영향을 미치지 않게 되는 장점이 있다. 비주얼 서보잉은 크게 동적 관측-이동 시스템(Dynamic Look-and- Move System)과 직접 서보잉 시스템(Direct Visual Servoing System)으로 구분할 수 있다. 동적 관측-이동 시스템은 서보 루프의 시작 단계에서 매니플레이터 제어 시스템의 기준 입력을 생성함에 있어서 비전 시스템으로부터의 정보를 사용하는 방법이며, 이를 위해 비전 시스템은 매 순

간 대상 물체를 관측하고, 이에 대한 정보를 매니플레이터 제어 시스템에 전달한다. 제어 시스템은 이로부터 매니플레이터의 엔드 이펙터의 목표 속도 및 각속도를 계산하고, 기구학적 자코비안(Kinematic Jacobian)을 이용하여 각 조인트의 목표 속도를 산출한다. 이 때 제어 오차는 작업 공간 또는 조인트 공간 상에서 정의된다. 이러한 방법 이외에, 대상 물체로 접근했을 때의 카메라의 영상을 목표 이미지(Target Image)로 하여, 제어 오차를 이미지 평면(Image Plane) 상에서 정의하고 이로부터 매니플레이터 각 조인트의 제어를 위한 기준 입력을 산출해 내는 형태의 시스템을 직접 서보잉 시스템이라 정의한다.

동적 관측-이동 시스템의 제어 방식의 경우에는 제어 오차가 기구학적 공간 상에서 정의되기 때문에, 카메라를 통해 얻은 이미지로부터 물체의 3차원 상의 위치 및 자세를 추정해 내는 작업을 수행하게 된다. 이를 위치 기반 비주얼 서보 시스템(Position-Based Visual Servo System)이라 정의하는데. 이는 비주얼 개루프 제어에 비해 대상 물체의 위치 추종 성능에 있어서 정확성을 향상시킬 수 있으나, 여전히 이미지 정보로부터 3차원 공간 상에서의 위치 및 자세를 추정하는 부분과, 기구학적 자코비안을 이용하는 부분에 있어서의 오차가 성능에 영향을 미치게 된다. 그러나 직접 서보잉 방식은 이미지로부터 직접 조인트 공간에서의 목표값을 산출해내기 때문에 카메라의 오차와 기구학적 모델링 오차에 의한 영향을 최소화 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이를 영상 기반 비주얼 서보잉(Image-Based Visual Servoing)이라 하는데, 이 경우 영상 오차로부터 조인트 공간에서의 목표값과의 관계인 영상 자코비안(Image Jacobian)을 구성하는 작업에 있어서 많은 시간과 노력, 설계자의 경험을 필요로 한다.

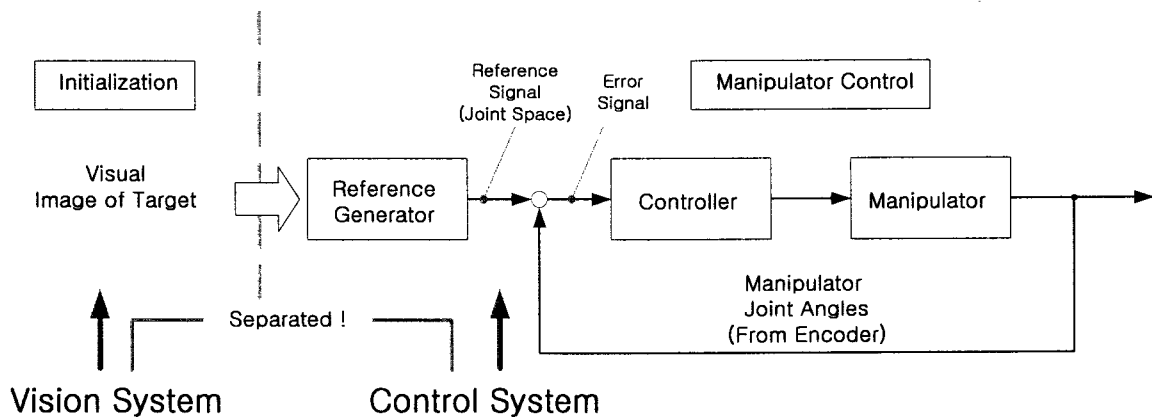


그림 2.2.1.2.1. . 비주얼 개루프 제어 방식의 매니플레이터 제어

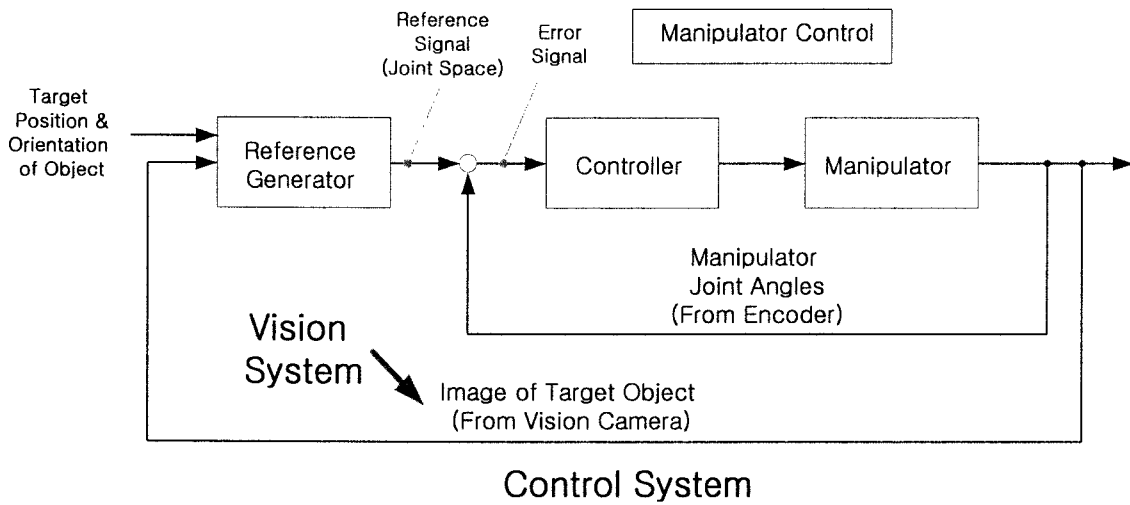


그림 2.2.1.2.2. 동적 관측-이동 비주얼 서보잉 방식의 매니플레이터 제어

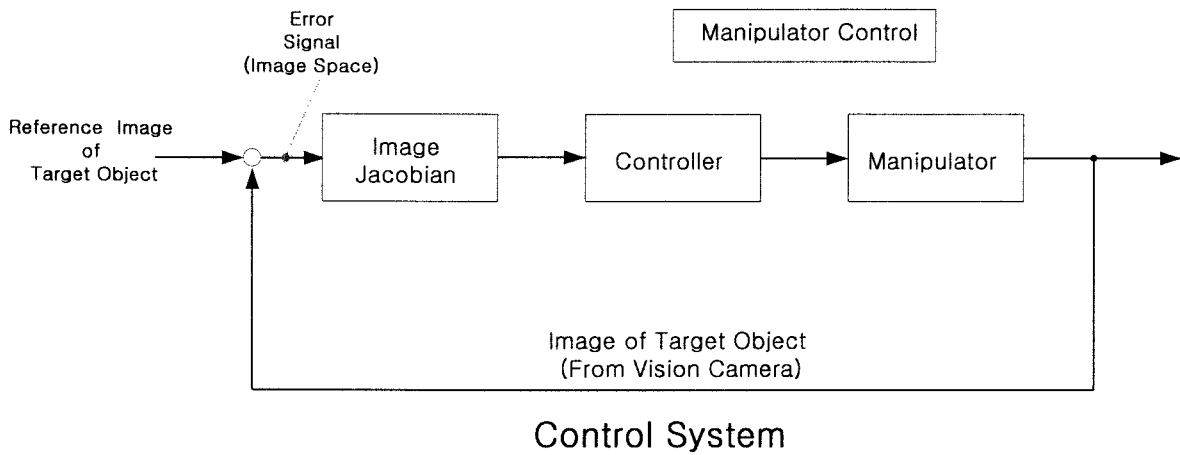


그림 2.2.1.2.3 . 직접 비주얼 서보잉 방식의 매니플레이터 제어

전통적인 산업용 로봇과는 달리, 최근에는 다양한 서비스 로봇들이 인간과 공존하는 환경에 투입되어 직접적으로 인간에게 서비스를 제공할 것으로 기대된다. 따라서 이와 같은 서비스 로봇의 조종을 담당하는 로봇 암은 고속, 고정도의 작업성능 보다는, 안전 및 원활한 interaction 성능이 더욱더 중요하다. 안전과 interaction 문제를 풀기 위해 로봇에게 컴플라는 것은 하나의 좋은 방안이라고 할 수 있다. 일반적으로 로봇의 컴플라이언스를 실

현하는 방법에는 능동적인 방법과 수동적인 방법이 있다. 능동 컴플라이언스 방법은 대개 로봇 암의 말단이나 각 조인트에 부착된 F/T 센서로부터 힘 정보를 얻어 적절한 제어 신호를 발생시키게 된다. 반면에 수동 컴플라이언스 방법은 로봇의 조인트에 수동 메커니즘을 적용하여, 외부 힘에 대해 신속한 응답 특성을 낼 수 있다.

능동 컴플라이언스 방법은 일반적으로 샘플링 타임에 맞추어 제어 신호를 지연해서 내보내기 때문에 근본적으로 응답이 느린 한계점을 가지고 있게 된다. 이로 인해 충돌과 같은 급작스런 상황에 대해 신속히 대처하지 못하여 인간에게는 상처를 줄 수 있고, 로봇 측에서는 감속기가 갑작스런 큰 임펄스에 의해 파괴될 수도 있는 단점을 갖는다. 그 동안의 수동 컴플라이언스 접근 방법들을 나열하면 다음과 같다. 전자기브레이크를 이용한 의사 (pseudo) 댐퍼와 가변 스프링을 갖는 mechanical impedance adjuster [1], 여러 개의 스프링으로 구성되는 series elastic actuators [2], 가변 스프링을 갖는 programmable passive compliance (PPC) shoulder mechanism [3], 커버 부착을 이용해 충격력을 감쇠 시키는 방법 [4], 이동체와 암 사이에 직선 운동형의 스프링과 댐퍼를 채용한 방법 [5], mechanical impedance adjuster를 이용한 조인트와 visco-elastic cover를 한 암 [6] 등이 있다. 기존의 방법들을 종합해보면 커버를 사용하지 않아 갑작스런 충돌시 발생하는 충격력을 감쇠하지 못하는 경우가 있고, passive compliant joint를 구성하는데 있어서 댐퍼를 채용하지 않아 스프링의 진동을 감쇠 시키지 못하거나, 댐퍼가 있더라도 상당히 복잡한 구조를 가지고 있어 구현이 어려운 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 단점들을 고려하여 조인트를 구성하는데 있어서 상대적으로 compact하게 구성할 수 있고 발생 토크도 큰 자기가변유체 (magneto-rheological fluid)를 이용한 댐퍼와 회전 스프링을 채용하여 조인트를 구성하고 암의 표면에는 visco-elastic cover를 씌우는 형태의 암을 설계 제작함으로써 서비스 로봇 암의 안전성과 interaction 성능을 향상시키고자 한다.

1.3 시스템기술

로봇 제어 구조

통합된 로봇 시스템을 구현하는데 있어 잘 정의된 제어 구조는 필수적이다. 이동형 로봇 시스템의 경우 원하는 기능을 얻기 위해서는 수많은 하드웨어와 소프트웨어 모듈을 필요로 하는데, 이들을 통일성 있게 구현할 수 있게 하는 것이 제어 구조이기 때문이다. 따라서 효율적인 제어 구조를 설계하기 위한 연구가 지금까지 활발히 진행되어 왔는데 발전 과정을 시간 순서 별로 살펴보면 다음과 같다[1].

80년대 초반의 지배적인 접근 방식은 SPA(Sense-plan-Act)였다[2]. 이 구조의 주된 특징은 시스템을 센서부(Sensing system), 계획부(Planning system), 수행부(Execution

system) 세 부분으로 나누고, 이들 사이의 제어 흐름은 센서부부터 수행부까지 단방향으로 진행된다는 점이였다. 이 접근 방식에서는 계획부를 어떻게 설계해야 하는가와 로봇 주변의 환경을 어떻게 모델링할 것인가가 주된 관심사였다. 그러나 80년대 중반까지 이에 대한 많은 연구가 진행되면서 여러 가지 단점들이 발견되었다. 그 중 대표적인 것으로는 안정적인 계획부를 설계하기 위해서는 사전에 작업 환경에 대해 많은 지식을 가지고 있어야 한다는 점과 센서부에서 수행부까지의 단방향 제어 방식으로는 환경의 불확실성과 비예측성에 효과적으로 대처할 수 없다는 점 등이 있다.

이에 대한 대안으로써 80년대 중반 Brooks는 Subsumption Architecture를 제안하였다[3]. 이 제어 방법의 기본 철학은 복잡한 거동은 고도의 복잡한 계획에 의해서 이루어지는 것이 아니라, 그저 환경이 복잡해서 나타나는 현상이라는 것이다. 따라서 이 구조는 기능(function)별로 분해한 기존의 제어 방법과 달리 능력(competence)별로 구성 요소를 나누었다. 이를 통해 로봇 분야에서 널리 사용되는 용어인 behavior라는 개념이 처음으로 도출되었고, 이 개념이 확대되어 행위 기반 제어(Behavior based architecture)가 탄생하게 되었다. 그러나 이 제어 구조 역시 많은 문제점을 내포하고 있었는데, 계층이 점점 많아질수록 이를 효율적으로 처리할 수 있는 매카니즘을 제시하지 못했다는 점과 주변 환경을 체계적으로 표현하지 않았으므로 고차원적인 작업을 수행하기 힘들고 고장 진단 및 회복이 어렵다는 점을 들 수 있다.

이에 대한 해결책으로 90년대 초반에 제시된 것이 Deliberative 계층과 Reactive 계층을 동시에 가진 혼합 구조(hybrid architecture)이다[4][5][6][7]. 이 접근 방식은 거의 동시에 여러 연구자로부터 동시에 발표된 개념으로 연구자에 따라 조금씩 차이가 있긴 하지만 근래들어 제시된 방법의 대다수는 이 패러다임에 수렴하는 경향을 보이고 있다.

Arkin이 제안한 AuRA(Autonomous Robot Architecture)는 혼합 구조를 처음으로 선보인 것으로 대표적인 특징으로는 behavior와 이를 수행하기 위해 필요한 매개변수들을 묶어 configuration으로 정의를 하고 planner가 다수의 configuration중 현재 수행되어야 할 configuration을 적절히 선택함으로써 제어가 진행된다는 점이다[4]. 이 제어 구조는 생산 시스템, 실내외 Navigation, 청소 작업 등 여러 분야에 적용되어 좋은 성과를 보이고 있다.

Gat은 deliberator, sequencer, reactive controller 3개의 제어 층으로 구성된 비동기적이고 분산제어 가능한 Atlantis라는 제어 구조를 제안하였다[5]. 이 구조는 Bonasso의 Three-tier 구조와 함께 혼합 구조 중 가장 많이 사용되는 3층 (Three-layer) 구조의 전형적인 예로 유명하다[6]. 이 구조는 시간이 많이 걸리는 계산이나 여러 가지 작업 계획, 사용자 인터페이스를 담당하는 deliberator, 짧은 계산을 반복적으로 계산하며 환경에 기민하게 반응하면서 원하는 최소의 작업을 담당하는 reactive controller, 그리고 이 둘 사이의 원활한 동작을 위해 인터페이스를 담당하는 sequencer로 나뉘어진다. 이 방법은 화성 탐사 로

봇(mars rovoer called Robby)에 적용되어 성공적으로 작업을 수행할 수 있음을 보여 주었다.

Connell의 SSS(Symbolic, Subsumption, Servo)는 Subsumption 구조를 처음으로 제안한 Brooks와 같은 연구 그룹에서 개발된 것으로 Navigation을 효과적으로 수행하기 위해 제안되었다[7]. Navigation은 상위의 planner와 하위의 reactor를 동시에 필요로 하는 대표적인 작업으로써 장애물 회피와 같은 작업은 응답 속도가 빠른 reactor가 유리하고 사전 지식이 많이 필요하고 긴 계산 시간을 요하는 지도 작성이나 localization 작업은 planner가 유리하다. 이 구조도 역시 시간과 상태를 이산화한 정도에 따라 3개의 제어 층으로 나뉜다. 가장 하위층인 Servo 층은 연속적인 시간과 상태 영역에서 동작을 하고, Subsumption 층은 이 상태를 작업에 따라 분류하여 behavior로써 가지고 있으면 최상위의 Symbolic 층은 시간을 몇 개의 의미있는 이벤트로 이산화하여 여러 behavior중 적절한 것을 선택하는 역할을 한다.

Simmon이 제안한 TCA(Task Control Architecture)는 혼합 구조의 접근 방향을 취하고는 있으나 다른 구조와는 달리 층으로 구별되어 있지는 않고, 중앙 제어기와 그 외의 여러 가지 모듈로 구성되어 있다[8]. 따라서 각종 센서, 경로 계획기, 사용자 인터페이스 등 여러 종류의 모듈을 통일성있게 구현하고 이들 사이에 효과적으로 통신할 수 있는 방법에 대해서 잘 정의가 되어 있다. 또한 작업 순서를 순차적으로 나타낸 task tree를 이용하여 모니터링과 예외 처리 기능을 수행하였다.

카네기 멜론대학에서 개발된 박물관 안내 로봇인 MINERVA의 제어 구조는 상위 레벨 제어 및 학습을 담당하는 층, 휴먼 인터페이스 층, Navigation 층, 하드웨어 인터페이스 층 등, 총 4개의 층으로 구성되어 있다[9]. 이 방법도 역시 혼합 접근 방식을 따르는 것으로 다른 구조들과 다른 점은 특별히 강조된 기능인 사람과의 인터페이스와 Navigation에 관련된 모듈을 모아 개별적인 제어 층으로 설계하였다는 점이다.

스웨덴의 왕립기술원(Royal Institute of Technology)에서는 서비스 로봇을 위한 제어 구조로 BERRA(BEhavior -based Robot Research Architecture)를 제안하였다[10]. 이 구조는 재사용성(reusability)과 유연성(flexibility), 간단한 디버깅을 목표로 개발되었으며 이를 위해 표준화된 프로그래밍 언어인 C++을 이용하여 구현되었다. 그러나 이 구조는 Localizer가 추가되었다는 점 이외에는 기존의 3층 구조와 크게 다르지 않고 서비스 로봇을 목적으로 개발되었다고 하나 이를 위해 특별히 제시된 점은 없다.

2. 이동형 정보서비스로봇 개발

가. Robot 시스템 기술

현재 가정에서 동작하는 robot system은 정보 서비스 및 청소 robot을 중심으로 시장을

형성해 나가는 진입기에 들어서고 있다고 할 수 있다. 국외에서는 소수의 robot system이 정보 서비스로봇과 관련하여 시연 수준에서 출시된 상태이며, 집안 및 사무실 청소 로봇 역시 극소수의 로봇이 상품화된 실정이다. 그렇더라도, 시장의 요구에 만족하는 sensing, intelligence 및 actuating 기능에서 해결해야 할 기술들이 산적해 있는 것이 현실이다. 본 과제에서는 대표적인 정보 서비스로봇과 관련하여 현황표를 제시한다.

항목	R100	iRobot-LE	Cye
			
dimension	280×280×440, 7.9kg	575×425, 6.5kg	400×250×125, 4kg
자율이동	2wheel, 60 cm/sec 단순한 장애물 회피 기능	2 wheel, 장애물 회피,,계단이동	2 wheel, 90cm/s
센서들	2 CCD, 3Mike, 6 Sonar, 온도, 광, 터치 센서들	1 CCD, 1Mike, 2speaker, 온도, 범퍼, 소나, 광, Tilt	엔코더, 전류 센서
가전기기 제어	TV, VCR, 등	없음	없음
인터넷 접속	E-mail 전송 기능	Wireless LAN 외부 제어	경로 설정 제어, Move-to-point
모니터링	영상/음성 녹음 전송	영상/음성 전송	카메라 장착 가능
Autonomy/자동충전	1.5 ~ 2 hour / 없음	1 hour/자동접촉가능	2hour / 없음
음성/화자 인식	300 단어, 100개 명령인식 화자 인식 가능	없음	없음
화상 인식	얼굴 인식 가능	없음	없음
보안/감시	영상 녹음 E-mail 전송 기능	모니터링	카메라 장착 가능
Tray 장착	불가	불가	모듈 장착 가능
학습기능	감정 모델	없음	없음
확장성	없음	없음	모듈 장착 가능
Manipulator	없음	카메라를 위한 구조	없음
서비스 기능	영상/음성 메시지 녹음	없음	없음

표 2.2.2.1 기존의 robot system survey

나. Visual navigation

인간 친화형 센서로서 vision sensor를 이용하여 visual navigation을 수행하고자 하는 연구는 약 20여전 전부터 미국을 중심으로 활발히 수행되어져 왔다. 그러나 아직까지는 그 기술이 상용화 단계까지는 이르지 못하고 있는데, 그 가장 큰 원인은 현재까지의 vision sensor가 여러 변화하는 환경에 적용 가능할 정도로 dynamic range 크지 못하다는 hardware 특성과, 또한 다양한 환경에 적용 가능한 visual navigation algorithm이 아직도 강인성을 확보하지 못하고 있다는 데에 그 원인이 있다고 하겠다. 지금까지의 선진 연구에 해당하는 visual navigation 방법은 다음과 같다.

특징 추출에 기초한 방법으로서 Line feature를 활용하는 방법을 Kriegman[1]이 제시했으며, stereo depth를 이용하여 vertical edge를 활용하는 방법을 Binford[2]는 제안했으며, 최근에는 stereo depth와 grid map을 결합하는 방법을 Little[3]이 제시하기도 했다. Landmark를 이용하는 방법은 기존에는 artificial landmark를 이용했으나, 최근에는 natural landmark를 이용하는 방법이 연구의 중심을 이룬다. 이의 대표적인 연구에는 Hager[4]에 의한 방법을 들 수 있다. 최근에는 또한 영상에서 특징요소들을 추출하지 아니하고 영상 자체에 기초한 방법들도 제시되어지는데 Thrun[5]에 의한 방법은 그 대표적인 경우라고 할 수 있겠다.

국내의 연구로써 vision을 이용한 robot navigation에 대한 연구는 map building, localization 및 path following의 주제를 통합적으로 다루는 연구는 아직까지는 미흡한 실정이다.

센서를 통해 외부 장애물 검지는 이동로봇의 핵심 기술 중에 하나이다. 대부분 초음파 센서를 이용하여 외부 환경의 정보를 얻고 있다. 현재 국내외 적으로 레이저 슬릿 빔과 카메라를 이용한 이동로봇 장애물 검지 방안에 대한 연구는 미미한 실정이다. 국내외에서 연구된 사례는 1991년에 일본 Tsukuba 대학에서 AGV가 Laser Slit과 CCD 카메라를 이용한 실시간 장애물 회피와 자동 네비게이션 연구가 있었으며[8], 국내에서 아직 적용 사례가 없다.

다. Visual interface

(1) Face detection and face recognition

얼굴 검출 및 인식 시스템은 인간과 컴퓨터간의 인터페이스 분야 (HCI, human-computer interface) 에 있어서 핵심적 기술로 인간과 로봇(또는 컴퓨터)의 관계 정의에 있어 주로 현재의 계산작업 및 인간의 행동 업무를 보조하는 역할에서 머무르는 것이 아닌 인간의 의사 및 감정을 이해하여 인간의 생활에 도움을 줄 수 있는 측면에서 의미를 가진다.

현재 얼굴 인식 기술이 많이 필요로 하고 적용되는 분야는 정보 보호 및 보안 관련이다.

이는 가장 편리하게 사용자의 최소한의 협조로서 개인 식별이 가능한 기술이기 때문이며 현재 원거리에서 신뢰성 있고 높은 완성도의 개인 식별 기술의 실용화를 위해 국내외의 연구가 활발히 진행되고 있다.

먼저 얼굴 검출 기술의 연구 현황을 살펴보면, 얼굴 인식 부분과 결합되지 않거나 독자적으로 의미를 갖는 얼굴 검출 연구는 주로 임의의 통제되지 않은 주변 상황 영상에서 대강의 얼굴 위치 검출을 주목적으로 한다.

대표적인 방안으로서는 1) 영상 내에 얼굴 특징 요소들이 미리 작성된 얼굴 형 정보에 부합하는 지를 고려하여 찾는 연구가 많이 소개되었다. 저차원 수준의 비전 알고리즘을 이용하여 얼굴 기하학적 위치를 고려하며 실시간 얼굴 검출 측면에서 유리한 방법이다.(Brunelli, Poggio, PAMI 1993, Cox, et al., CVPR 1996)

또 다른 연구 방향으로는 2) 템플릿 정합(template matching)을 이용하는 방안으로 얼굴 영상을 2차원 행렬로 변환, 영상 벡터 명도 값과 표준 얼굴 템플릿과의 상관관계를 계산하여 얼굴 위치를 얻는 방법이다. 차원 감소를 통한 KL 변환을 이용하는 PCA 분석(Yang, Huang, Pattern recognition, 1994)과 이를 발전시킨 LDA(Zhao, Chellappa, CVPR 1998)분석이 있으며 한편, 3) 표준 모델을 사용하지 않고 신경망 이론을 얼굴 검출에 적용하는 연구(Rowley, Baluja, Kanade, PAMI, 1998)등에서 많은 결과를 내놓고 있다.

이러한 템플릿 정합 방안이나 신경망 이론은 비교적 높은 정확도에 비해 계산 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 얼굴 검출은 동영상 데이터에서 사람 영상의 편집, IMT-2000에서 동영상의 압축기술에 이르기까지 다양한 응용범위를 갖는 기술이다.

얼굴 인식(Face recognition)은 최근 활발히 연구 결과를 내놓고 있는 분야로서 연구논문 및 제품화된 결과로서 소개되고 있다.

대표적 연구로는 1) 얼굴 영상의 고유 벡터를 이용하는 통계적 접근 방안(PCA, LDA, subspace PCA, ...)이 있으며 최근까지 많은 연구 논문이 발표되었다. 또 다른 연구 계열로는 2) 신경망을 이용한 인식 시스템으로 HyperBF 네트워크, 동적 링크 구조 신경망(DLA), 유연 그래프 신경망(Elastic Bunch Graph Matching) 등 다양한 접근이 시도되어 좋은 결과를 보였다. 기타 3) 동영상 정보를 이용한 경험적 인식률 향상 방안, 적외선 정보, 음성 정보와 결합된 다중 인식 연구 등의 시도가 소개되고 있다.

최근의 선진국의 얼굴 검출 및 인식 기술 동향은 보안시스템에 단독으로 적용할 경우 인식률이 만족스러운 수준에 이르지 못하기 때문에 기타 사람의 생체특성정보(biometric)를 이용한 시스템과 결합하여 Multi-modal Biometric 보안 시스템을 제공하는 추세로 진행되고 있다. (미국 Viisage Technology, Miros, Visionics 등) 또한 얼굴 검출 및 추적의 경우에는 그 응용분야의 다양함과 인식만큼의 고정밀도 필요성이 적어 현재에도 다양한 보안시스템에 사용되고 있다.

본 이동로봇 시스템의 경우에는 주로 정지영상 DB를 기반으로 한 기존 연구에 비해 움직이는 대상 사람 얼굴을 인식해야 하므로 현 시점에서는 가변 얼굴 자세가 아닌 정면 얼굴로 인식이 가능한 시스템을 구축하도록 제한을 두어 얼굴인식을 수행하도록 한다.

(2) Human detection

: 위탁연구 과제 참조 (서울대)

(3) Stereo camera 개발

: 위탁연구 과제 참조 (KAIST)

라. 음원 방향검출 및 음성인식 시스템

이동형 정보서비스로봇의 음성모듈 시스템 개발을 위해 최근 가장 진보된 연구를 수행하고 있는 일본의 Japan Science and Technology Corp.의 Kazuhiro Nakadai 와 Science University of Tokyo의 Hiroshi G.Okuno가 공동 개발한 humanoid robot SIG 시스템을 분석해 보았다 [3, 4, 5].

(1) Active Audition System

여러 가지 음원을 분리해 내어 인식하는 system 이며 SIG가 구현한 기술 수준은 다음과 같다. 3가지 음원에 대하여 분리하는 기능이 있으며 한사람 이상의 말소리를 분리하여 각각 인식이 가능할 뿐만 아니라 말소리에 섞이는 불필요한 소음(예를 들어 문 여닫는 소리, 자동차 소리, 진공 청소기 소리 등등...)을 분리 제거하여 노이즈가 mix 된 상태에서 음성을 분리한다.

(2) Internal Noise Cancellation

로봇에 사용되는 active audition system은 필연적으로 로봇을 구동하기 위한 모터의 소음과 같은 내부 노이즈에 영향을 받게 되어있다. 따라서 로봇이 동작하는 상태에서 신뢰성 있는 음성인식을 위해서는 불필요한 noise를 제거하는 기술이 필요하다. SIG에서는 내부 모터의 소음에 영향을 받지 않기 위해서 인식 후 motion 구동을 실시하게 된다. 또한 cover를 덮어 내부의 모터 소음이 빠져 나오는 것을 막는다.

(3) Information Fusion / Integration

현재 음성인식 system은 독립으로 사용되기보다는 vision 또는 각종 인식 시스템과 서로 정보교환을 할 수 있도록 잘 조합을 시켜 효과적인 시스템 구현여부가 주요한 현안이다.

마. Internet 기반 원격제어 기술 개발

: 위탁연구과제 참조 (경희대)

3. 형상적응형 universal hand 개발

종래 국내외 대규모 자동차 회사의 프레스 공장에서는 금형 대상물을 프레스 사이에 loading 또는 unloading하기 위해 거의 예외없이 유사한 구조의 loader 및 unloader를 이용한다. 즉, 끝단에 진공컵이 달린 사슴뿔 형태의 attachment를 각 loader 및 unloader에 부착하며, 각 프레스마다 그리고 각 금형 대상물마다 전용 attachment가 있어 이들을 금형 교환 시에 작업자가 교환하여 준다. 이를 위하여 각 회사들은, 교환 시의 작업자의 불편은 물론, 생산 효율의 저하, 다량의 attachment를 제작, 보수, 관리하기 위한 비용과 노력, 그리고 적재 공간 확보를 위한 어려움과 손해를 그대로 감수하고 있는 실정이다. 본 연구에서 개발하는 형상적응형 유연 그립퍼는 작업 대상물이 변경될 때마다 attachment를 교환할 필요 없이 6개 이상의 진공컵의 위치를 미리 입력된 프로그램에 따라 3차원 상에서 적절히 변경하여 다양한 대상물을 파지할 수 있는 획기적인 시스템이라 할 수 있다.

현재까지 본 연구와 같은 시스템은 자동차 회사의 프레스 공장에서 소개된 바 없으며, 이는 현장에서 요구되는 크기, 중량, 강도, 형상 적응 속도, 제작비, 보전성 등의 까다로운 제한 조건을 만족하는 유연 그립퍼의 개발이 쉽지 않았기 때문으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서 제작하여 시험을 거친 시작품과 같은 시스템이 세계 최초로 현장 적용에 성공할 경우, 국내외에서의 경제적, 기술적 파급 효과는 막대할 것으로 기대되며 상징적인 효과도 있어서 국내 기술의 선양에도 기여하는 바 클 것으로 사료된다.

제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

0. 기존의 재활로봇 시스템과 KARES II 시스템의 목표 기능

다양한 문헌에 의한 자료 조사 결과, 기존의 다양한 재활 로봇 시스템은 크게 3가지 분류로 나뉘어 짐을 알 수 있었다. Workstation fixed system, Mobile platform system, Wheelchair-based system이 그것이며, 각 분류는 이동성과 로봇팔의 고정된 위치를 기준으로 분류된다[5].

표 2.3.0.1은 제 1장 표 1.3.0.1에서 소개한 KARES II 시스템의 목표 작업 12가지 관점에서 기존의 재활로봇과의 비교 결과이다. 본 연구에서 개발될 KARES II 시스템은 기존의 다양한 재활로봇에 비해 그 연구방향 설정에서부터 실 사용자와 전문의의 의견이 반영되어, 실제 필요한 기능을 수행하는데 어려움이 없다. 특기할 만한 사항은 사용자와의 접촉이 가장 빈번한 얼굴 닦기(긁기) 및 면도하기 작업의 경우, 기존 시스템에서는 이에 대한 고려가 전혀 되어 있지 않은 반면 KARES II에서는 기본 작업으로 포함되어 있다.

이러한 재활로봇 시스템에 대한 연구 추세에 근거하여 볼 때, **KARES II 시스템은 사용자가 필요로 하는 기능을 고려함으로써 매우 실용적인 시스템임을 알 수 있다.**

표 2.3.0.1. 기존의 재활로봇 시스템에서 목표로 하는 작업과 KARES II 시스템과의 비교

시스템 작업 이름	Workstation fixed				Mobile platform			Wheelchair-based				
	DeVAR	RAID	ISAC	AFMASTER	Walky	MoVAR	Helpmate	Wessex & Weston Robot	KARES I	FRIEND	Raptor	KARES II
식사 보조	×	×	○	○	×	×	△	×	△	×	△	○
물 마시기	×	×	○	○	×	×	×	○	○	○	×	○
얼굴 닦기(긁기)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
면도하기	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
물건 집기	○	△	×	△	○	○	×	○	○	○	○	○
스위치 켜고 끄기	○	△	×	○	×	×	×	×	○	×	○	○
문 여닫기	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○
차 만들기	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
서랍 열기	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○
게임하기(chess)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○
CD/Tape 바꾸기	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
프린터/팩스 용지 제거하기	○	○	×	○	×	×	×	○	×	×	×	○

1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현

가. 기존의 장애인 보조 로봇들

기존의 장애인을 돕는 로봇으로는 MANUS[장 18], MOVAID[장 19], ISAC[장 20]등이 있다. MANUS와 MOVAID는 7자유도를 가지며, 각기 수행할 수 있는 작업이 비슷하다. ISAC은 5자유도인 대신 수행작업을 테이블 위에서만 한다는 제한점을 갖는다. 이 로봇들의 설계 사양과 수행 가능한 작업의 종류가 표 2.3.1.1, 표 2.3.1.2에 나타나 있다. 이러한 로봇들은 모두 장애인을 위하여 만들어졌지만, **사용자의 친근감을 위하여 접촉작업을 수행하고자 하는 노력은 이루어져 있지 않다.** (그림 2.3.1.1-2.3.1.3)

표 2.3.1.1 MANUS, MOVAID, ISAC의 설계 사양

	로봇 팔 사양	주변 장치 및 제어
MANUS	<ul style="list-style-type: none"> • 견딜 수 있는 최대 하중 : 2 kg • 총 팔 길이 : 80 cm • Gripper 최대 속도 : 0.5 m/s • 로봇 팔의 무게 : 13 kg 	<ul style="list-style-type: none"> • 전원 : 24V DC • 통신 : CAN-Bus • 3차원 공간, 관절 공간 모두에서 제어 가능
MOVAID	<ul style="list-style-type: none"> • 4륜 이동부 	<ul style="list-style-type: none"> • 무선 통신 사용 • 레이저 빔을 이용한 절대 위치 선정
ISAC	<ul style="list-style-type: none"> • Pneumatic rubertuator 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 음성 제어 • 머리 위치를 찾기 위한 컴퓨터 영상 시스템 이용

표 2.3.1.2 MANUS, MOVAID, ISAC의 수행 가능한 작업 종류

MANUS	MOVAID	ISAC
<ul style="list-style-type: none"> • 식사(Eat) • 물 따르고 마시기 • 코풀기, 몸 굽기, 면도 • 차 끓이기 • 게임 (체스 등) • 테이프, 비디오카세트, 플로피 디스크 등을 바꾸기 • 신문 넘기기 • 물건 집기 • 프린터, 팩스에서 종이 꺼내기 • 스위치 ON/OFF동작 • 서랍 열고 물건 꺼내기 • 문 열기 	<ul style="list-style-type: none"> • 음식을 오븐에 데우고 침대로 가져가기 • 부엌 청소 • 침대의 더러운 옷 치우기 	<ul style="list-style-type: none"> • 식사 • 부엌으로 이동 • 음식 집기



그림 2.3.1.13 MANUS

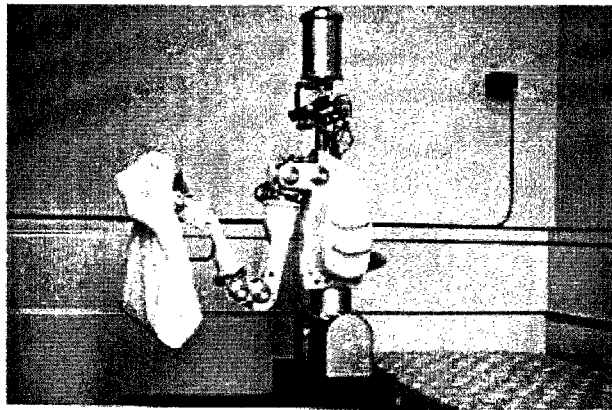


그림 14.3.1.2 MOVAID



그림 2.3.1.3 ISAC

나. 능동 컴플라이언스 제어기법: 관절토크 측정기법

대부분의 로봇들은 관절토크를 측정할 수 없기 때문에 접촉작업을 수행하기 힘들다. 따라서, 능동 컴플라이언스 제어기법을 구현하기 위해, 관절에 토크센서를 부착하는 방법들이 많이 개발되어 왔다. 그러나 이러한 방법들을 사용하면, 센서부의 설계 및 제작에 따른 비용이 추가되어 전체 시스템의 가격이 증가할 뿐만 아니라, 센서의 신호가 흐르는 선이 관절을 통과해야하기 때문에 설계 상에 난점이 존재하게 된다. 한편, Barrett사에서 개발된 WAM(Whole Arm Manipulator)[8]은 케이블로 구동되는 구조를 가짐으로써, 전체 로봇의 기계적 특성이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 즉, 마찰이나 Backlash같은 방해요소들이 작은 로봇으로 알려져 있다. 따라서, 이러한 로봇의 경우에는 관절토크 센서 없이 관절토

크를 측정하여 팔 전체로 작업을 할 수 있다는 장점을 갖는다.

2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

가. 주위환경에 적응하며 인간 친화적인 Visual Servoing 기술

Visual Servoing기술의 실제 적용은 매우 중요하며, 제조업을 포함하여 원격제어, 미사일 추적카메라, 과일 따기 등의 다양한 응용분야에 대한 적용이 연구되어져 왔다[6]. Hybrid Control for Visual Servoing and Force Servoing, Robotic Motion Planning and Manipulation 등에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이러한 기술을 바탕으로 CAD-Driven Microassembly, Lamp Filament Alignment, Plasma Spraying Operation, Mining Automation, Diagnostic Ultrasound에 관련된 시스템에 적용이 시도되고 있다 [7][8]. **최근에, "재활로봇"을 포함한 "서비스로봇"에서의 Visual Servoing은 핵심 기술로 나타나고 있다.** 대표적인 예로 ISAC²⁾ [9], MUSIIC³⁾ [10], PLAYBOT⁴⁾ [11]을 들 수 있으며, 대개 작업장 기반 시스템(Workstation-based System)에 관련하여 연구 개발되고 있는 실정이므로 본 연구에서 다루고 있는 휠체어 기반 시스템과는 차이가 있다.

공간변화비전(Space-variant Vision)을 이용한 영상 처리는 최근 많은 각광을 받고 있다. Nattel 등은 공간변화영상(Space-variant Image)에서의 효율적인 영상 처리 기법에 대한 연구 결과를 발표한 바 있고[12], Chien 등은 공간변화영상을 이용한 얼굴 인식 문제 등을 다루었다[13]. 인간의 시각 시스템 구조를 모방한 공간변화비전은 다방면에서 사용되지만, Visual Servoing과 같이 인간-로봇 협동 작업이라든가, 본 연구에서 대상으로 하는 재활 로봇과 같이 다양한 시스템들이 유기적으로 구성된 경우 비전 처리에 있어서의 효율성 및 수행 시간 등 여러 가지 면에서 장점을 갖는다. 본 연구에서도 이러한 세계적인 연구개발 추세에 발맞추어 다음과 같은 부분에 대한 연구를 중점적으로 수행하였다.

- 인간 시각 시스템에 근거한 개선된 공간변화비전 개념 제안
- 공간변화비전/개선된 공간변화비전을 이용한 가까운 물체 및 움직이는 물체를 위한 효과적인 Visual Servoing 개념 제안

2) ISAC (Intelligent Soft Arm Control)은 탄력 있는 공압 구동기를 이용하는 로봇 팔 시스템으로 기구적으로 유연성을 가지므로 사용자의 안전성(Safety)이 증가되기는 하지만, 로봇 팔이 움직임에 따라서 흔들리므로 로봇 팔의 위치 제어가 상당히 힘들다. 이에 대한 해결책으로, CCD 카메라의 시각정보를 피드백을 받아 로봇 팔을 제어하는 구조로 채택하였다.

3) MUSIIC (Multimodal User Supervised Interface and Intelligent Control)의 주요 목적은 각종 센서를 채용하여 비구조화된 환경에서 지능보조로봇(Intelligent Assistive Robot)을 Multimodal하게 제어하고자 하는 것으로, 칼라 카메라를 기반으로 하는 제어 방식 등을 적용하고 있다.

4) PLAYBOT은 지체 장애 어린이들이 장난감을 가지고 놀 수 있도록 하기 위하여, 비전을 기반으로 한 로봇 팔 시스템이다.

비전 기술을 이용한 사용자-로봇 간의 상호작용은 매우 중요한 기술이며, 국내외 다양한 기관에서 굉장히 활발한 연구가 이루어지고 있는 실정이다. 특히, **사용자 얼굴에 대한 인식/추적 및 표정 인식 등은 자연스럽게 편안한 사용자-로봇 간의 상호작용을 위해 핵심적인 것으로 인식되어져 왔다**[14]. 일부 재활로봇에서 사용자 얼굴 인식 기능 등을 도입한 바 있으나[9], 실제 상황에서 적용하기에는 많은 문제점이 있는 것으로 드러났다. 이것은 **얼굴 영상 취득 단계에서 상위 레벨의 인식 단계까지의 연결 고리에 대한 체계적인 연구가 부족한 것**에 기인한다. 최근 보고된 바에 의하면, 일부 연구자들에 의해 이러한 통합된 얼굴 인식 시스템에 대한 언급이 있었으나 카메라 구성의 제한이라든가[15], 사용자 얼굴이 위치한 배경의 제한[16] 등의 단점을 지니고 있는 것을 밝혀졌다. 본 연구에서 대상으로 한 사용자-로봇 상호작용 기술은 다음과 같은 부분에 중점을 두고 있다.

- 사용자 얼굴에 대한 인식 기술을 위한 얼굴 영상 취득, 요소 추출 및 의도 파악 기능의 각 단계에 따른 효과적인 방법 제안
- 최근 다양하게 관심을 얻고 있는 인간 시각 시스템 및 인간의 비전 프로세스에 기반한 처리 방법에 따른 구현

나. 로봇 팔 제어 알고리즘을 위한 생체 신호(EMG) 분류 기술

여러 생체신호 중 근전도 신호를 이용하여 팔 동작 분리를 한 연구는 의수의 제어가 그 주된 응용 대상이다. 즉, 수족의 기능이 상실되거나 절단된 환자를 위해 인공 팔이나 다리를 만들고, 이의 제어 신호원으로 근전도 신호를 이용하는 것이다[17][18][19]. 인간의 상실된 수족의 기능을 대신하는 보철 장치에 관한 연구중에서 가장 핵심이 되는 부분은 보철 장치에 가해주는 제어 신호를 인공이 아닌 생체에서 나온 신호를 직접 이용하여 인간의 자유의지대로 제어하려는 것으로 근전도 신호는 근육 수축과 관련된 전기적 신호이며 이를 이용하면 사용자의 자유의지대로 보철 장치를 제어할 수 있다. 근전도 신호는 표면 전극에 의해 원하는 근육의 표면에서 쉽고 안전하게 얻을 수 있다[20]. 또한 수족이 절단된 사람들의 손상되지 않은 근육에서도 신호를 측정할 수 있다는 사실에 근거[18]하여 보철 제어에 있어 인간의 의지에 따른 동작 명령의 인식에 근전도 신호의 이용이 제안되어져 왔다. 그러나 근전도 신호에 포함된 극도의 복잡성 및 비선형성 때문에 운동 명령과 관련된 근전도 신호의 정확한 수학적 모델링이 어렵다[21].

근전도 신호처리에 관한 연구를 시대별로 간략히 살펴보면 다음과 같다. 1970년대 초반에 근전도 신호의 크기를 이용해서 기능분리를 하려는 시도[22]가 있었다. 1975년에 Graupe 등은 자귀회귀 모델링을 이용하여 근전도 신호에 따른 동작 분류를 제안하였고 [18], 1982년에 Saridis[17][19] 등은 영교차율과 분산 등을 이용한 확률 모델을 이용한 방법을 제안

하였다. 최근에는 신호처리 기술 및 각종 신기술의 등장으로 신경회로망을 이용해 다양한 손동작에 대한 근전도 신호의 패턴 분류를 하려는 시도[23], 퍼지방법을 사용한 근전도 신호의 패턴 분류 방법이 제안[24]되고 있다.

선행 연구의 패턴 분류의 사용자 의존성을 해결하기 위해 최근에 각광받고 있는 soft computing 기법에 기반한 특징 집합 추출 알고리즘을 개발하였다. 신호처리 기술의 발달로 인해 비선형적인 근전도 신호로부터 힘 정보를 추출하려는 기존의 연구 [25][26][27]를 분석하여 ICA 기법을 이용한 새로운 형태의 힘 정보 추출 방법을 제안하였다. 또한 소형, 저가, 고성능의 무선 근전도 증폭기를 개발하여 추후 상용화의 가능성을 확인하였다. 중증 척수 손상 장애인을 위한 휠체어 인터페이스도 개발하여 사용자로 하여금 이동의 독립성을 갖도록 하였다.

3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발

눈 응시의 방향을 측정하는 방법에는 여러 가지가 존재한다. 1936년에 Mowrer는 머리에서 눈의 회전 정보와 응시 방향을 자동으로 기록하는 장치를 만드는데 성공한 이후 20세기 동안 이러한 기술들은 점차적으로 향상되어 왔다. 하지만 이러한 기술들 중 일반적이면서 모든 요구 사항을 만족시키는 기술은 아직 없다.

먼저, 눈의 움직임에 의해서 피부에서 검출되는 전기적 신호를 측정하여 눈의 응시 방향을 추정하는 방법(electro-oculography)이 있다. 눈 주위 피부에 전극을 부착해야 하므로 오래 사용하거나 매일 사용하고자 하는 사용자에게는 부적합하고, 피부에서 발생하는 땀이나 노폐물에 영향을 받을 수 있다는 단점이 있다. 다음은 특수한 콘택트 렌즈를 이용하는 방법이다. 이는 렌즈 제작시 매우 작은 유도 코일을 첨가하여 눈의 움직임에 따른 전자장의 변화를 측정하는 방법이다. 눈의 망막에 직접적인 접촉으로 인한 부담감과 확실하게 밝혀지지 않은 전자장의 인체에 대한 영향 등이 문제점으로 지적되고 있다. 눈의 응시 방향을 측정하기 위한 최근 기술들은 대부분 카메라를 이용한 비전 기술을 사용한다. 눈동자를 바라보는 카메라에서 얻은 영상을 이용하여 홍채나 동공의 경계를 추출하여 눈의 응시 방향을 측정하는 기술과 눈에 인체에 해롭지 않을 정도의 적외선을 비추고 눈의 응시 방향에 따라 그 반사 각도와 반사 정도가 달라진다는 점을 이용하는 기술이 있다.

위에 언급한 눈의 응시 방향 측정 기술은 인간과 기계장치, 특히 컴퓨터와의 인터페이스에 유용하게 사용될 수 있으며 최근 이러한 연구들이 국외뿐만 아니라 국내에서도 진행되고 있다. 응용 분야로는 장애인을 위한 컴퓨터 인터페이스, 로봇이나 휠체어 제어, 가상 현실 컴퓨터 게임 등이 대표적이다.

비전을 기반으로 한 최신의 기술들은 연구가 시작된 이래 최근 몇 년간 많은 상용화의 시도가 있었다⁵⁾. 하지만 최근까지의 연구 결과는 모두 제한된 범위에서의 사용만이 가능

한 상태이고 장애인과 컴퓨터 그리고 주변 기계 및 로봇과의 인터페이스용으로의 개발은 수행되지 않고 있다. 국내에서는 EOG를 이용한 시선방향 검출 및 인터페이스 개발이 서울대의 연구팀에 의해 시도되어 상용화 단계까지 갔다.

4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발

가. 로봇 인터페이스의 개발

인간은 고대로부터 도구를 사용하여 왔다. 손으로만 할 수 없는 일 따위에 인간은 나무, 돌, 철 등을 이용하여 도구로 이용하게 된 것이다. 인류문명의 발전은 오늘날까지 도구의 변천이라 하여도 과언이 아닐 것이다. 따라서 오늘날 장애인들이 컴퓨터 및 그 외 다른 것들과 상호작용을 할 수 있게 하는 장치는 필수품이라 할 수 있다. 일부 상반신만을 사용할 수 있는 C4 경수손상 이상의 척수 장애인의 이동성을 보조하기 위해 많은 장치들이 개발되어 왔고 지금도 많은 연구가 진행중이다. 신체 움직임의 대상은 눈의 움직임, 머리의 움직임, 목소리, 어깨의 움직임, 근육자체의 움직임, 얼굴 표정의 인식 등이 있는데 움직임을 통하여 만들어진 동작신호를 받아 교시신호를 발생하도록 하는 방법들이 다양하게 연구되고 있다. 다양한 입력 장치들에 대해서 살펴보게 되면 가장 대표적인 입력장치 형태가 조이스틱의 변형 형태이다. 일반적으로 손으로 구동시키는 조이스틱을 변형하여 턱 앞에 두고 턱의 움직임으로 사용할 수 있도록 한 상용화 된 장치(그림2.3.4.1(a))나 머리 받침대에 조이스틱을 두어 머리의 움직임을 stick의 움직임으로 변환시키는 장치도 있다.

5) 비전 기반으로 상용화된 제품은 모두 외국제품이며 그 제품 정보는 아래와 같다.

Assistive Technology, Inc.(<http://www.assistivetech.com>)

LC Technologies, Inc. (<http://www.eyegaze.com>)

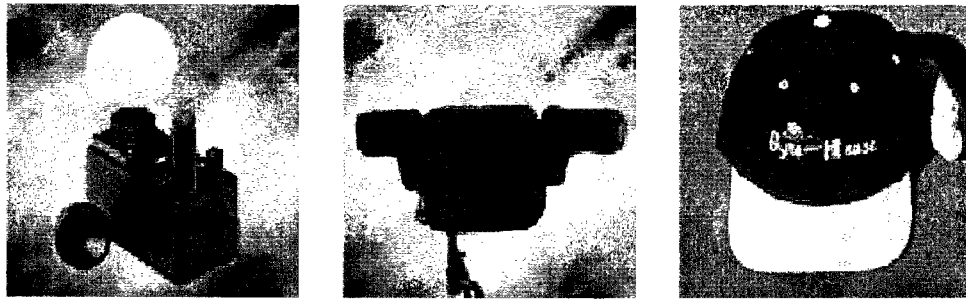
EyeTech Digital systems (<http://eyetechds.com>)

Applied Science Laboratories (<http://www.a-s-l.com>)

Skalar Medical (<http://www.wirehub.nl/~skalar>)

SensoMotoric Instruments (<http://www.smi.de>)

Arrington Research, Inc. (<http://arringtonresearch.com>)



(a) 텍 조이스틱 (b) 머리 스위치 배열 (c) 자이로스코프 모자

그림 2.3.4.1 상용화되어 있는 다양한 입력 장치.

조이스틱의 형태가 아닌 장치는 휠체어 머리 받침대에 스위치들의 배열을 두어 스위치의 ON/OFF 신호로써 원하는 방향으로 이동할 수 있는 장치(그림2.3.4.1(b)),모자에 자이로스코프를 달아서 머리의 움직임을 읽어 들이는 장치(그림2.3.4.1(c)), 그리고 들숨과 날숨을 이용해서 ON/OFF할 수 있는 sip and puff 장치 등이 있다.

상용화되어 있는 입력 장치들 뿐만 아니라 수없이 많은 새로운 입력장치가 연구되고 있다. 그 중 몇 가지 소개를 하자면 우선 머리의 움직임을 이용하는 입력장치로는 CCD카메라를 이용하여 휠체어에 앉아있는 사람이 바라보고 있는 방향을 퍼지 알고리즘을 사용하여 그 방향으로 휠체어가 회전을 하도록 하는 장치가 있고[1], 머리의 움직임을 CCD카메라를 이용해 추출하여 원하는 의도를 파악하고자 하는 방법[2]등 근래에 시각 기술의 응용이 많이 이뤄지고 있는 상황이다. 일본 나가사키 대학의 Ishimatsu 등은 팔과 손을 쓸 수 없는 장애자가 마우스 포인터를 움직일 수 있도록 라이트펜(light pen)의 원리를 이용하여 머리띠 형태의 인터페이스 장치를 고안했다[3]. 이 장치를 이용하여 장애자는 머리를 움직여 모니터에서 원하는 곳을 지정하고 잠시 기다림으로써 활성화가 되도록 했다. 고안된 장치는 60Hz로 입력을 받을 수 있고 7mm의 절대 정밀도(absolute accuracy)와 2.3mm의 반복 정밀도(repeatability accuracy)를 갖는다. 또한 이 장치를 이용하여 모니터 상에 나타나 있는 알파벳 자판을 선택하여 "BOYS_BE_AMBITION"의 문장을 완성하는데 다섯 명의 사람이 각각 55, 68, 60, 53, 70 초가 걸렸다. 머리의 움직임 외에 일본 오사카 대학의 Fujisawa 등은 C4 척추 장애자들이 마우스 포인터를 움직일 수 있도록 목과 어깨를 이용한 인터페이스 장치를 고안했다[4]. 이 장치는 마우스와 같이 평면상의 2자유도의 움직임을 목을 굽힘으로서 입력을 받아들일 수 있고 어깨의 움직임으로 마우스 클릭의 입력을 받도록 했다. 마이크로소프트사의 윈도우3.1의 계산기 프로그램을 동작하는 데 걸린 시간을 측정하였는데 마우스를 이용한 작업 시간보다 약 4배 정도의 시간이 걸렸다. 그 외에도 휠체어 방식에 압력센서를 부착하여 엉덩이에 미치는 힘의 배분을 파악하여 원하는 신호를 추출하는 기술도 연구되고 있다[5]. 또한 장애 정도가 양호한 장애인은 미약하게나마

팔이나 손을 움직일 수 있다. 이런 경우 목이나 어깨의 움직임을 이용하여 보조장치를 움직이는 것 보다 수동 조종기를 이용하도록 해 주는 것이 더욱 효과적일 수 있다. 이와 같이 원격 장치를 인간이 직접 조작하는 것을 Teleoperation이라고 위치 제어뿐만 아니라 힘 제어를 통하여 원격 제어의 효율을 극대화하려는 연구가 세계적으로 활발히 연구되고 있다. 그러나 장애인의 경우 정상인보다 수동 조종기를 다루는 데 어려움이 많이 따르게 되므로 Teleoperation의 안정성을 보장할 수 있는 원격 조종장치의 개발이 시급한 실정이다.

나. 로봇 인터페이스를 위한 지능형 알고리즘의 개발

지난 2000년 프랑스에서 경수 손상자 200명을 대상으로 하여 하나의 통계조사를 실시하였는데 다음 표 2.3.4.1에 그 결과자료를 인용하였다[6].

전체 200명의 조사 대상자 가운데 사용 가능한 인터페이스 장치를 이용하여 조종기 교육 훈련을 받은 뒤 하루 일과(Active Daily Living)를 독립적으로 수행함에 있어 전체의 10%가 전동휠체어를 사용하기 힘들다 이거나 불가능하다고 대답을 해왔고 회전에 대해서는 전체의 40%가 원하는 회전을 수행하기 힘들다 및 불가능하다고 응답을 하였다. 여기서 회전이라 함은 장애물을 피해가거나 복도, 문 통로를 통과하거나 엘리베이터를 타고 내리거나 하는 것 등이다. 따라서 회전이나 특수한 작업을 수행할 수 없는 심각한 경수 손상 장애인들에겐 인터페이스 장치 하나만으로는 완전한 독립주행을 할 수 없음을 알 수 있다. 이를 보완하기 위해 외부 위치정보에 따라 지능적으로 자신의 경로를 만들어 나가는 자율주행의 기능을 갖춘 smart wheelchair system 은 그들에게 많은 도움을 줄 수 있는 장치라 생각되고 이로 인해 많은 연구들이 진행되고 있는 상황이다.

표 2.3.4.1. 200명의 척수장애인을 대상으로 한 설문 조사 결과

Measure	Average
Extreme difficulty using a power wheelchair for ADL	6
Impossible to use a power wheelchair for ADL	4
Total percentage	10
Difficulty with steering tasks	32
Steering tasks are impossible without assistance	9
Total percentage	41

SMART 전동휠체어에 관한 연구는 장애인이 휠체어 제어에 얼마나 참여하느냐에 따라 다음과 같이 크게 두 가지로 분류할 수 있다.

(1) 첫 번째로 장애인이 단순히 원하는 도달지점을 설정해 주기만 하면 휠체어가 알아서 목적지까지 가는 완전한 자율 주행 형태이다. 이는 장애인이 경로계획 및 목적지 설정에

대한 상황판단에 어려움이 많고 또한 대부분의 시간을 한정된 공간 내에서 생활하는 경우에 적합한 완전한 자동 주행 방법으로써 주변 환경에 대한 지도 정보를 미리 가지고 있거나 가지기 위해서 다양한 표시장치(landmark)를 공간 곳곳에 부쳐서 현재 휠체어의 전역적 위치와 더불어 거리 센서에 의한 국지적 위치정보를 가져야만 된다[7][8].

(2) 두 번째는 주행 시 그 경로계획의 수행을 상황에 따라 우선 순위에 의해 사용자에게 맡기기도 하고 자율주행을 하기도 하는 반 자율주행 방법이 있다. 예로써 현재 유럽 TIDE 프로젝트에서 진행중인 VAHM Project의 경우 다양한 환경에 따라 3가지의 자동모드로 변경이 되도록 하고자 하는 것이 그 특징이다[9]. NavChair assistive wheelchair navigation system[10]은 shared control 방법을 통해 다양한 환경 변화에 따라 벽면 추종 모드, 문 통과모드, 일반 장애물 회피의 3가지 모드가 자동적으로 변경이 가능하도록 하였고 Hephaestus smart 휠체어[11]나 SIAMO 휠체어[12]는 다양한 입력 장치들 예를 들어 음성인식, 카메라 이용한 머리움직임 분석, 생체신호, 호흡 등 이들의 효과적 활용성을 강조하여 다양한 장애인의 상태에 따라 적용할 수 있도록 모듈화에 주안점을 둔 시스템이다. 이들 대부분이 자율주행의 방법으로써 주변환경에 따라 최적화된 경로를 설정하고자 하는데 그 목적이 있다. 상기에 열거한 연구들은 자율주행을 수행함에 있어 거리측정을 위해 대부분 초음파센서를 사용하였지만 그 외에도 카메라 및 레이저가 사용되기도 한다.

5. Hand-held Master의 개발

로봇과 물체의 운동을 지시하고 제어하는 master 등의 입력장치로는 여러 가지 제품 및 기술이 개발되어 사용되고 있다. 이 중 상용화되어 많이 쓰이는 입력장치로는 Teach pendant, Joystick, Track ball, Master Arm, Glove Master 등이 있다. 다음에 설명할 여러 가지 입력장치의 종류 및 장단점은 그림 2.3.5.1에 요약되어 있다.

	특징	적용분야	단점 및 한계
	간단한 구조	산업용 로봇	명령의 직관성 부족 안전성에 문제 있음
	간단한 명령 입력가능 사용 편리함	가상현실, 게임기	3차원이상 복잡한 운동의 입력불가 피드백정보 미응용
	Geared joint, tendon joint를 사용한 다관절 manipulator 힘, 접촉 피드백정보제공	텔레로봇, 가상현실	작업공간 제한 복잡한 구조 고가격 시스템 안전성에 문제 있음
	명령의 직관성 높음 조종 쉬움, 경량형	텔레로봇, 가상현실, 산업용 로봇	작업공간 제한 교정석 복잡한 구조
	명령의 직관성 높음 작업공간의 제한 적음 진동, Exoskeleton 구조 이용한 힘, 접촉 피드백가능	가상현실	로봇운동명령 어려움 고가격 시스템 피드백을 위한 복잡한 구조
	가속도계, 자이로 이용하여 입력명령 산출 명령의 직관성 높음	텔레로봇, 가상현실, 서비스로봇	피드백정보 없음 센서오차로 인한 오작동 가능성

그림 2.3.5.1 기준 Master 장단점 비교

Teach pendant는 로봇의 제어에 필요한 keypad를 가진 입력장치로서 산업용로봇에 가장 많이 쓰이고 있으나 로봇 운동의 직관적인 지시가 어려워서 안전성에 문제가 있다. Joystick과 Track ball 은 가상현실 게임기 등에 많이 쓰이는 입력장치이나 3차원 이상의 명령을 입력하기 어려우므로 역시 직관적인 지시를 만드는것에 한계가 있다. 또한 이러한 입력장치들은 힘 및 접촉(tactile) 피드백 정보를 이용하는것이 불가능하므로 시각정보 등을 이용한 간접적인 피드백정보를 이용할 수밖에 없다.

이에 반해 Master Arm은 geared joint, tendon joint 등을 사용한 다관절 Manipulator의 형태를 가지므로 3차원 이상의 직관적인 명령의 입력이 가능하고 힘 및 접촉 피드백정보를 얻을 수 있으므로 원격조종 로봇, 텔레로봇 및 가상현실에서 많이 사용된다. 상용화된 범용 Master arm으로는 그림 2.3.5.2에 있는 MIT의 Spin-off사인 Sensable 사의 Phantom robot (USPatent 5587937)이 있고 상용화된 의료용 로봇시스템의 전용 Master arm으로는 Intuitive Surgical 사의 da Vinci[1] (USPatent 5807377), Computermotion사의 ZEUS[2] (USPatent 5855583)의 전용 Master arm 등이 있다. ZEUS의 Master는 피봇(pivot)점을 중심으로 2개의 회전축과 하나의 선형축, 핸들을 중심으로 한 주회전축과 수술도구의 개폐 등 총 5개의 자유도를 가지고 있다. 이외에도 NASA JPL에서는 1994년에 그림 2.3.5.3과 같이 미세수술용 로봇시스템인 RAMS (Robot Assisted Micro Surgery)에 6자유도 마스터

를 적용시킨 바 있고[3], Berkeley 대에서는 원격조종 수술용시스템에 7자유도 매스터(그림 2.3.5.4)를 사용하였다[4]. 그러나 Master arm은 대부분 조이스틱과 같은 고정형의 형태이므로 완전한 궤적의 교시가 어렵고 조작도에서 한계를 가지고 있다. 또한, 작업공간이 제한되고, 구조가 복잡하고, 고가의 시스템을 필요로 하여 고비용 저효율의 문제점을 지니며, 직접 매니플레이터를 움직이는 방식에 있어 안전성에 문제가 있는 등의 단점을 가진다.



그림 18.3.5.2
Phantom Master
(Sensable Tech.)

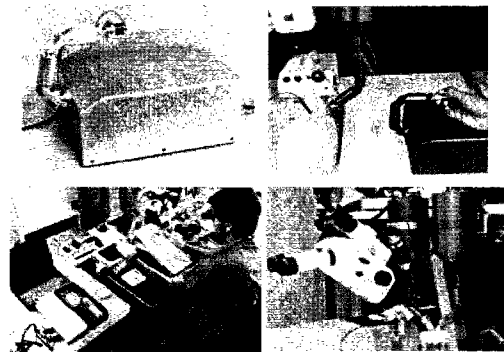


그림 2.19.5.3 JPL의 Master (RAMS)



그림 2.3.5.20 Berkeley의 Master

명령의 직관성을 높이고 조종하기 쉬운 입력장치로 Pen의 형태를 가진 입력장치도 개발되었다. Tokyo대 (IEEE Control System Mag. Feb, 1995), Tsukuba대 (1993 IEEE VR Annual Symposium, 1995), Washington대(USPatent 5642469)에서 각각 Pen형 입력장치를 제안하였으며, Toyoda사는 입력장치의 위치 및 각도를 이용하여 로봇을 교시하는 Pen형 Robot teaching machine (USPatent 6019606)을 제안하였다. 그러나 이와 같은 Pen형 입력장치는 테이블에 고정되어야 하므로 제한된 작업공간을 가지며 Pen을 지지하기 위한 복잡한 기계적 구조를 필요로 하여 실용화되지 않았다.

Glove형 입력장치는 명령의 입력이 편리하고, 작업공간에 제한이 적으므로 가상현실에서 많이 사용된다. Virtual Technology사에서 상용화된 Glove형 입력장치는 힘 및 접촉 피드백의 형식에 따라, 피드백이 없는 Cyber glove, 진동형 피드백을 사용하는 Cyber Touch

(USPatent 6088017), 손가락과 비슷한 관절구조를 glove에 부착하여 힘을 피드백하는 Cyber Grasp (USPatent 6042555)로 나누어진다. 미국 Rutgers대에서도 손가락 및 손바닥에 부착된 pneumatic cylinder를 이용하여 힘을 피드백하는 glove를 개발하였다 (USPatent 5354162). 그러나 Glove형 입력장치는 직선운동 명령의 입력이 힘들고 가격이 비싸다. 또한 힘의 피드백을 위해 복잡한 구조를 필요로 한다.

위와 같은 기존의 방식과는 달리 가속도계 또는 자이로 등의 관성센서를 이용하여 얻어지는 정보를 이용하는 입력장치가 제안되고 있다. 여러개의 가속도계를 사용하여 물체의 선형가속도와 회전가속도를 구하고 이로부터 물체의 위치를 구해 입력장치로 쓰는 방법이 1989년 제안되었다 (USPatent 4839838). 자이로를 이용하여 지시하는 입력장치로는 1997년 미국 Dynetics사에서 제안한 3자유도 제어봉이 있다(USPatent 5617515). 이 장치는 3개의 자이로를 각각 수직으로 장착한 제어봉과 보조버튼을 이용하여 직선운동과 회전운동의 명령을 입력해서 로봇을 제어한다(그림 2.3.5.5). 또한 제어봉의 방향과 로봇의 운동방향을 최대한 일치시켜 직관적인 입력이 가능하게 하였고 안전성을 확보하기 위해 입력장치의 운동을 필터링하고 제한하였다. 그러나 이 입력장치는 힘 피드백정보를 제공할 수 없으므로 충돌을 방지하거나 원격조종작업 등에 사용하는데에 한계가 있으며 자이로만을 이용하므로 자이로센서의 오차로 인한 오작동을 방지하기 어렵다.

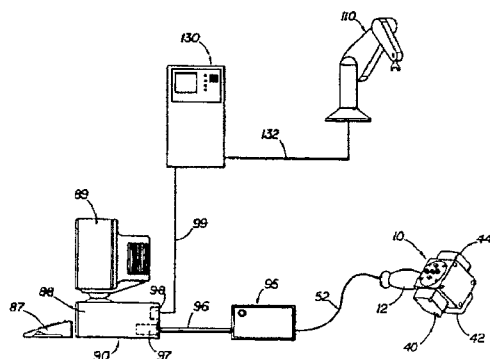


그림 2.3.5.21 Dynetics 특허

최근에는 카메라를 이용한 입력장치가 개발되어 이것이 로봇을 위한 master로 사용될 수 있을지에 대한 관심이 높아지고 있다. 스웨덴의 Anoto사에서 개발한 Anoto Pen(그림 2.3.5.6, 그림 2.3.5.7)은 카메라와 관성센서를 이용하여 Pen의 2차원 평면에서의 위치를 측정하고 이를 PDA의 문자 입력장치로 사용한다. 가속도계를 이용한 위치 측정은 항상 오차를 포함하고 있으나 이와 같이 카메라를 이용하면 이를 보정할 수 있게 된다. 그러나 현재 개발된 대부분의 카메라 Pen은 Anoto Pen과 같이 2차원평면에서의 입력만을 받을 수

있다.

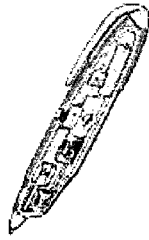


그림 2.3.5.22
Aoto Pen의
개념도

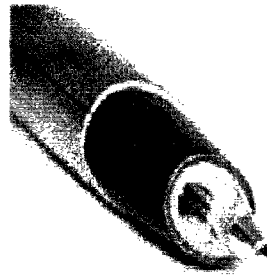


그림 2.3.5.23 Aoto
Pen

본 연구의 Hand-held Master는 이러한 단점을 대부분 해결한다. 6차원 운동명령을 직접 내릴 수 있으므로 로봇운동의 직관적인 지시가 용이하고, 구조가 매우 간단하고, 작업공간의 제한이 없고, 저가형으로 만들 수 있고, 안전성을 확보할 수 있고, 힘 및 접촉피드백 정보를 사용할 수 있다. 이는 원격조종 수술작업에서의 매스터의 움직임과 슬레이브의 움직임을 최대한으로 일치시켜 의사의 피로감을 감소시키고 원격조종수술작업과 수술로봇시스템의 확산을 가져올 것으로 예측된다.

제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발

1. 건설 토목용 로봇의 시장 전망

최근 일본에서는 로봇을 크게 산업용, 비산업용으로 구분하고, 산업용에는 제조업용 그리고 비제조업용으로 분류하며, 비산업용에는 가정, 오락용 등을 포함시키는 분류체계를 도입하고 있다.

일본로봇협회에서는 비제조업 분야의 수요가 2005년에는 전체수요의 약 30%에 달할 것으로 예측하고 있다. 특히 토목 건설용 로봇은 표 2.4.1.1에서 볼 수 있듯이 1000억엔 규모로서, 로봇시장의 10% 정도를 점유하고 있는 주목되는 시장이라는 것을 알 수 있다[1].

표 2.4.1.1 비제조업 분야의 로봇시장 예상 (일본) (단위: 억엔)

	2000년			2005년		
	하한치	상한치	평균치	하한치	상한치	평균치
농업, 축산업	83.0	85.4	84.2	287.2	316.4	301.8
임업	5.7	6.3	6.0	8.6	13.8	11.2
수산업	59.3	60.4	59.9	132.6	161.3	147.0
해양개발	104.7	118.9	111.8	193.4	257.2	225.3
건설	152.3	152.7	152.5	199.8	307.0	253.4
토목	389.5	196.1	292.8	756.0	835.6	795.8
광업	7.7	11.6	9.7	16.1	37.0	26.6
운수, 창고	268.5	270.0	269.3	662.6	674.2	668.4
상업, 유통	58.5	58.7	58.6	170.0	170.3	170.2
가스	42.6	42.9	42.8	113.6	117.7	115.7
상하수도	47.7	48.9	48.3	131.6	139.3	135.5
전력(화력, 수력, 송전)	41.6	47.0	44.3	89.0	114.2	101.6
원자력	350.6	399.0	374.8	551.5	798.2	674.9
통신	102.1	102.7	102.4	184.7	189.2	187.0
우주	0.0	50.8	25.4	0.0	145.1	72.6
의료, 복지	159.4	164.8	162.1	386.4	461.5	424.0
쓰레기, 청소	77.8	77.8	77.8	282.7	282.7	282.7
소방, 방재	29.0	33.0	31.0	82.0	110.0	96.0
교육	9.4	9.7	9.6	38.2	72.9	55.6
연구개발	28.6	29.4	29.0	79.1	84.3	81.7
서비스	164.4	178.4	171.4	464.2	554.1	509.2
합계	2182.0	2344.0	2,263.0	4959.0	5827.0	5393.0

자료: 일본로봇공업회, 1997년

국내의 건설시장은 38조 6천억 원(1990년)을 차지하는 거대시장이지만, 아직 노동 집약적인 형태를 벗어나지 못하고 있다. 그러나 건설시장개방과 맞물려 건설품질, 생산성향상 등 당면문제를 안고 있는 건설업계는 건설자동화가 경쟁력확보 차원에서 주요 이슈로 등장하고 있다. 건설용 로봇은 아직 국내 시장이 채 형성되지 않은 신규분야이지만 건설업계의 수요가 점진적으로 형성되리라 예상된다. 일본의 경우 기존 메이커는 물론, 이러한 신규시장을 대비하기 위해 건설업체, 벤처 기업 등 수많은 업체가 적극적으로 연구개발에 투자하고 있다. 또한 국가적인 차원에서 로봇도입을 적극 유도하기 위해 세금면제제도, 로봇임대제도, 로봇에 의한 사고시의 보험제도 도입 등 제도적인 지원을 하고 있다. 이외에도, 핀란드 등 EU국가, 대만, 싱가포르 등 NICS국가에서도 소규모이지만, 연구 개발에 착수하고 있다.

가. 건설 토목용 로봇의 개발현황

1991년에는 국제 건설용 로봇 학회가 설립되어 건설용 로봇연구개발에 중심적 역할을 수행하고 있다. 일본에서는 다양한 건설용 로봇이 개발되고 있으며, 이 가운데 상당수가 실용화 단계까지 와 있기도 하다[2]. 표 2.4.1.2는 현재 시제품이 개발되어 있거나 실용화된 로봇제품을 건설현장작업에 따라 분류해본 것이다. 실용화단계의 주요기술은 산업용 로봇기술을 기본으로 현장에 적용한 것이 대다수를 차지하고 있으나, 작업특성에 맞는 획기적인 신규 메커니즘 즉, 벽체 이동 등과 같은 기술은 아직 실험실 수준이라고 볼 수 있다.

나. 국내건설업계 동향

건설 시장의 확대와 건설기술의 축적에 따라 건설 기계는 18만대(1992년)에 이르는 수준에 도달하였다. 그러나, 1980년대부터 대두되기 시작한 인건비 상승, 만성적 노동력 부족에 대응하기 위하여 건설 자동화에 관심이 높아져 있으며, 극히 일부이지만 건설로봇에 의한 시공 기술도 선보이기 시작하였다. 레이저 센서로 정지 면의 높이를 측량하여 작업하는 자동 불도우저 및 콘크리트 분사로봇이 개발되어 있으며, 국내에서도 콘크리트 바닥 미장용 로봇이 개발 중에 있다[3]. 대형 건설업계는 일본제 바닥면 미장로봇 등을 도입, 성능 시험과 아울러 로봇을 활용한 시공법 연구에 착수하는 등 건설 자동화에 적극성을 보여 왔으나 IMF이후 로봇도입 의욕이 상실된 상태이다. 대부분의 중소 건설 업체는 건설로봇은 물론, 자동화에 관한 정보조차 어둡고, 건설 자동화 전담 부서조차 없는 형편이며, 대체적으로 국내의 건설 업체는 건설 장비의 사용자 입장이고, 자체 시공 방법에 맞는 장비를 개발하고자 하는 노력이 결여되어 있다. 일본의 건설 자동화의 도입이 장비 업체보다 건설 업체가 주도적인 것과 비교하면

큰 차이를 보이고 있다.

표 2.4.1.2 외국의 건설로봇 개발 현황

적용 분야	건설용 로봇명	개발 회사	비고
조립, 접합, 운반	1. 철골 자동조립(보,기둥) 2. 철골 용접로봇 3. 중량철근 조립로봇 4. 자동철근조립 로봇 5. 벽체조립 매니플레이터 6. 외벽부착 로봇 7. 천정보드 조립 로봇 8. 원격조정 하중운반기	오바야시구미,스미즈,다이세이(일) 후지타(일) 가지마, 다케나카, 스미즈(일) 다이세이(일) 다이세이,스미즈(일) 가지마(일) 스미즈,다이세이,도큐(일) Svets,Mekano AB(스웨덴)	높은장소에서 작업 800kg계단이동
콘크리트 공사	1. 콘크리트 디스트리뷰터 2. 타설 매니플레이터 3. 지브(JIB) 크레인 4. Former Device 5. 형틀 수직이동 시스템	다케나카,가지마,오바야시,다이세이(일) Putzmeister(독) 도다,다케나카, 오바야시(일) Putzmeister(독) 후지타,가지마(일)	중량트럭에 탑재 22m길이,체르노빌에서 사용
조사 점검 보수	1. 타일벽면 검사로봇 2. 철근콘크리트 벽면검사 3. 클린룸 검사 로봇 4. 지반다짐도 검사 로봇 5. 수중검사 로봇 6. 지중탐사 로봇	다이세이,다케나카,가지마(일) 오바야시(일) 도다,오바야시(일) 미쯔이(일) EUREKA(영국,이태리) 도큐(일)	
도장 미장 청소	1. 벽면도장 로봇 2. 천장도장 로봇 3. 내화 피복 로봇 4. 콘크리트바닥 미장로봇 5. 숯크리트 로봇 6. 청소 로봇	다케나카,다이세이,구마타니,스미즈(일) CBC, CEA(프),SM(영) CSTB(프) 스미즈(일) 가지마,다케나카,오바야시,스미즈, 다이세이(일) 가지마,오바야시,다이세이(일) Electrolux AB(스웨덴), 스미즈, 다케나카(일)	유럽 최초의 건설로봇 가장 활발한 분야
기타	1. 구조물용 현장용접로봇 2. 해체공사용 로봇 3. 교각형틀 승강 로봇 4. 돌쌓기 로봇	후지타(일) Altas Copco, Diamantex AB(스웨덴) 후지타(일) 도큐(일)	

다. 건설로봇개발 우선순위

표 2.4.1.3은 1997년 한국생산기술연구원에서 국내 건설 관련 업계를 중심으로 한 설문조사 결과로서, 상위 5위까지의 로봇화 필요성에 대한 우선 순위를 알 수 있다[1].

이 결과는 업계의 주요 관심사가 유자격 기능공의 절대 부족과 더불어 가혹한 3D 노동조건의 해소임을 반증하는 것으로 보여지며, 조만간 이에 대한 수요가 발생되리라 예상이 된다. 1991년 한국건설 기술연구원도 별도의 설문조사를 실시하였는데[3], 순위에서만 약간의 차이가 있을 뿐 비슷한 경향을 보이고 있다.

표 2.4.1.3 필요한 건설로봇의 순서

(KITECH, 1997)

로봇명	설문조사 순위 (총 29 건설로봇 중)
철골 용접 로봇	1
바닥 미장 로봇	2
벽면 도장 로봇	3
지중 탐사 로봇	4
중량 철근 조립 로봇	5
철근 자동 조립 로봇	6
내화피복 로봇	7
거푸집 공사 로봇	8
타설 매니플레이터	9
형틀 수직 이동 로봇	10

2. 철골 구조물 시공법

가. 철골 빌딩공사의 개요

철골용접의 로봇화를 위해서는 시공법과 현장의 작업조건에 대한 이해가 중요하다. 최근에는 빌딩건

축 공법이 철근 콘크리트 대신 철골 구조의 공법으로 변화되고 있고, - 1994년 일본 통계자료에 따르면, 2억 4천만 m³의 건축 착공물 중 8천만 m³로 약 33%를 차지 - 철골 구조물은 볼트 너트 체결 방식에서 용접 방식으로 전환되고 있다[4]. 특히, 빌딩의 수직 column 조립작업은 현장용접이 필수적인데, 현재 수작업으로 용접이 이루어지고 있다. 영종도의 공항터미널공사의 예를 들면 철골기둥 1개소의 용접에 1명의 용접기능공이 24시간에서 48시간 정도의 작업시간이 소요되며, 또 용접품질이 작업자에 따라 상이하여 전수검사가 필수적인 것으로 조사되었다.

나. 철골 시공

철골빌딩 건축에 대한 시공은 설계부터 시작하여 기초공사를 거쳐, 철골공사, 본체공사(바닥시공, 계단시공), 외장 마감, 내장마감, 외부구조공사의 순으로 진행된다. 설계단계에서는 공법선택 및 공정도, 시공계획도가 작성되고, 가설건물, 기중기, 동력, 급수설비 등의 준비가 이루어진다. 기초공사에 들어가면, 파일공사, 토목공사, 기초 콘크리트 타설, 앵커볼트의 설치가 이루어지고, 한편에서는 철골공사를 위한 철골제작을 전문공장에 의뢰하게 된다.

기둥에 해당되는 철골의 형태는 그림 2.4.2.1과 같이 작은 기둥은 규격화된 I-beam, H-beam (KS또는 JIS규격품) 또는 규격 형강을 조합한 Truss 구조를 이용하게 되고, 큰 하중을 견뎌야 하는 고층빌딩 등의 기둥은 주문 제작된 원형 기둥, 사각기둥, H-beam을 이용하게 된다. 공장에서 제작되는 기둥은 보 또는 기둥과 연결될 수 있는 형태로 그림 2.42..2와 같이 가공되어 현장에 공급된다. 현장에서 기둥을 연결하도록 임시의 조립용 Erection plate가 부품으로 제작 공급되고, 현장에서 조립과 미세 위치조정이 끝나면 접합부를 용접한 후, 이 Erection plate를 제거하게 된다. 기둥의 길이는 대체로 건물의 3층 정도 높이가 되도록 제작하게 되며, 접합부가 그 층의 바닥에서 인간이 작업할 수 있는 높이에 오도록 하나, 물론 예외적인 경우도 있다. 한 건축물이라도 기둥이 지지해야 할 하중의 강도에 의해 기둥 종류와 크기가 결정되기 때문에 기둥은 여러 종류의 형태와 치수를 사용하는 것이 일반적이다.

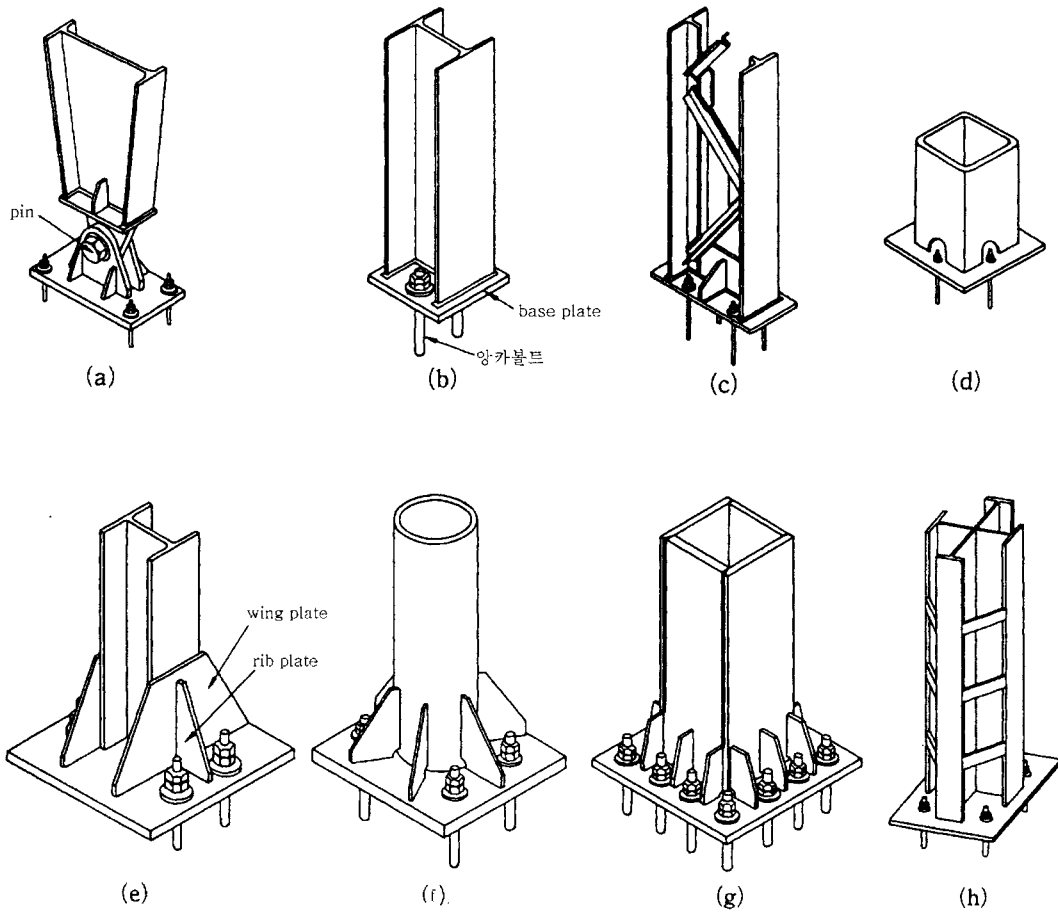


그림 2.4.2.1 수직철골

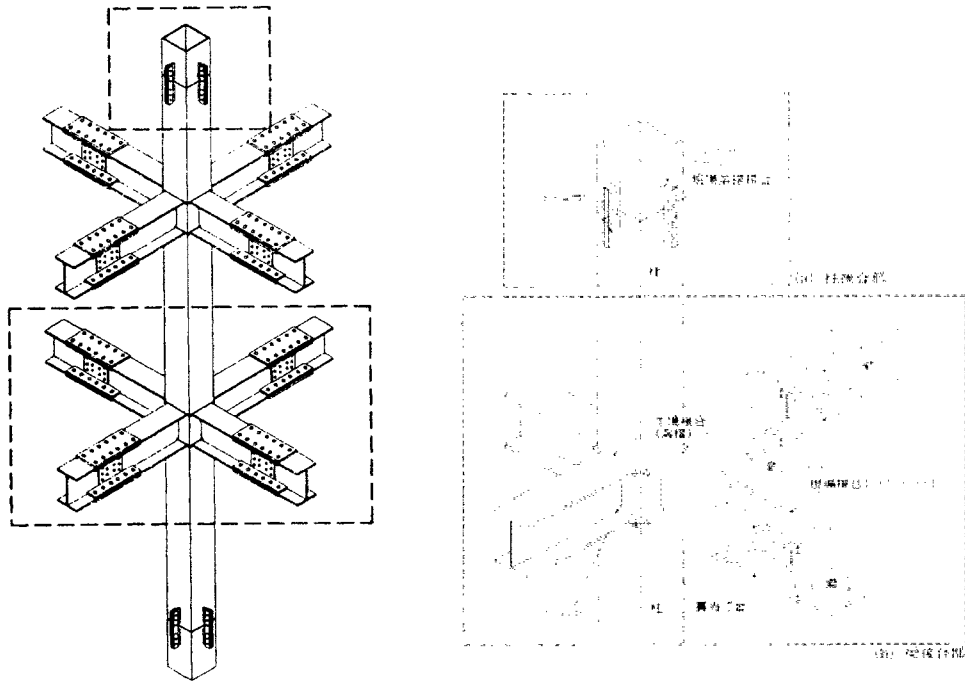


그림 2.4.2.2 수직철골의 결합부

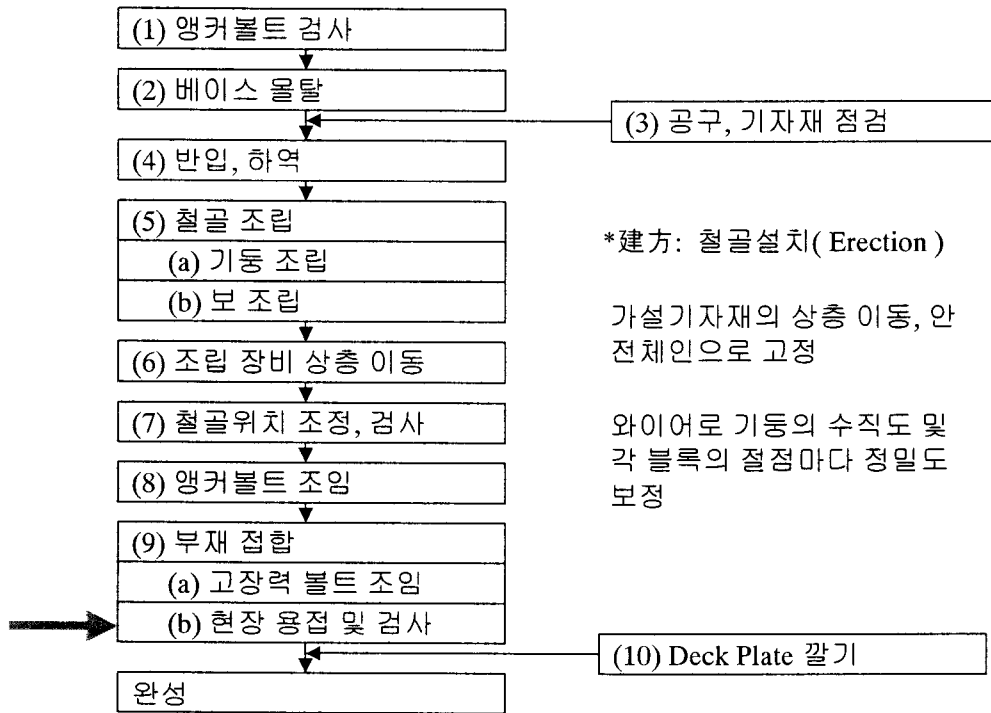


그림 2.4.2.3 수직 철골 용접의 세부공정

현장의 철골공사는 그림 2.4.2.3과 같은 세부공정으로 이루어진다. 부재조립에는 크레인을 이용하고, 안전을 위해 각 부재는 와이어로 임시 고정하여 놓는다. 철골구조물이 조립되고 위치조정이 끝나면 부재의 현장용접이 이루어진다. 기둥용접은 Deck plate 설치 및 바닥면 타설이 완료된 후 즉, 본체공사 완료 후 작업에 들어가는 것이 일반적이다.

3. 수직철골의 현장용접과 작업조건

앞 절에서 언급한 것처럼 기둥의 형태는 다양하지만 로봇용접 대상으로는 대형 H-beam, 사각주, 원형주가 주종이다. 각 용접 접합부는 후판 옆보기 용접자세로 다른 용접자세에 비해 용접이 까다로우며, 용접접합부의 경로를 따라 용접 비드를 다층 적층시켜 후판의 두께만큼 쌓아올린다.

그림 2.4.3.1은 H-beam 800w×1000h×80t의 형상으로 접합부의 개선각도가 약 40deg, 철골조립 미세조정이 완료되어 root간격이 1~2mm정도로 고정된 용접작업 전 상태를 나타내며, 그림 2.4.3.2는 용

접작업완료시의 상태이다. 수작업으로 약 48시간 용접한 것으로 영종도 신공항현장에서 촬영하였다.

용접 작업 시는 Erection plate가 붙어있는 상태에서 작업이 시작되지만, 위치고정이 되었다고 판단 되면, 작업도중에라도 해체시킨다. 이 보조판이 용접 작업 시는 장애물이 되어 작업자에게 불편함을 주며, 이는 로봇 용접 시에도 장애물 회피 알고리즘 등을 통하여 극복해야 할 과제이다.



그림 2.4.3.1 수직 철골의 용접부 (영종도)

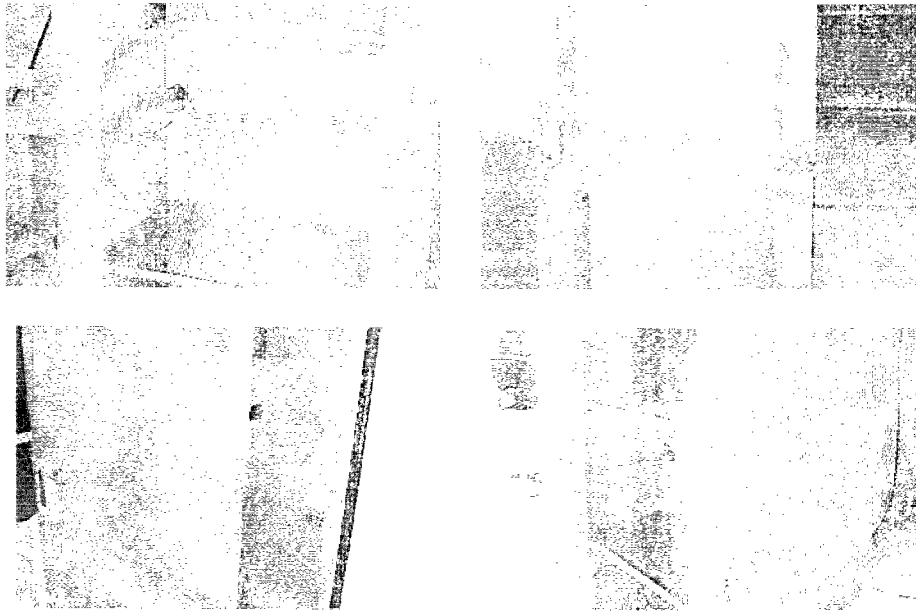


그림 2.4.3.2 용접된 수직 철골(영종도)

그림 2.4.3.3은 도곡동 삼성물산 타워팰리스 건설현장에서 촬영한 사진이다. 위의 2개의 사진은 용접 완료상태이고 밑의 2개의 그림은 용접 전에 조립만 되어 있는 상태이다. 모재의 두께는 80t로서, 작업 시간은 2인이 1조로 작업하여 약 4시간이 걸린다.

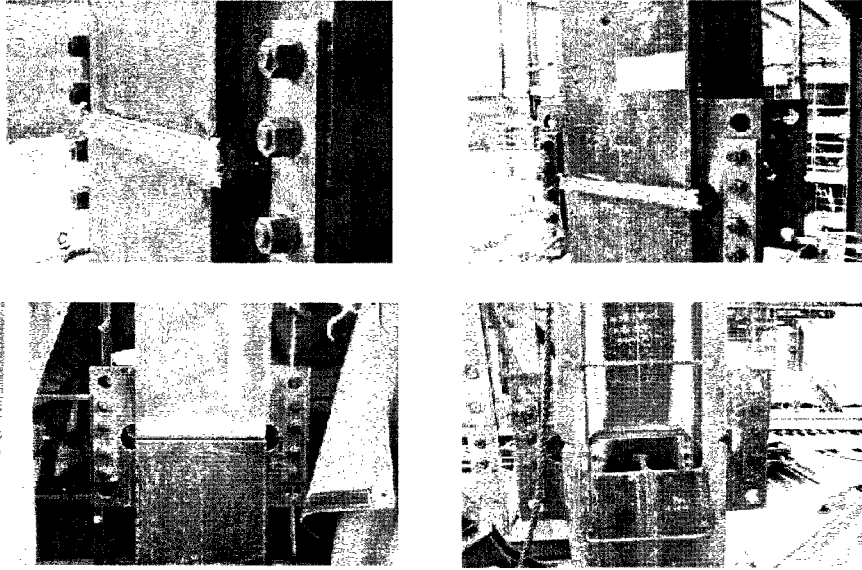


그림 2.4.3.3 수직 철골의 용접부와 용접 비드(도곡동)

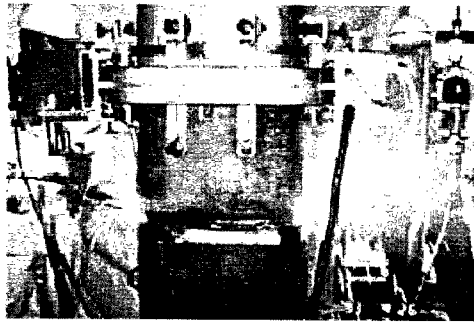
이때, 용접작업의 순서와 작업조건은 아래와 같다.

- 용접작업 전 접합부 개선면의 청결상태를 검사하고, 적절치 못한 경우는 disk sander로 수정한다.
- 용접 시는 가능한 한 몸을 정지시키고, 일정한 속도를 유지한다.
- 모재의 온도가 낮으면 용접균열이 발생하기 쉬우므로, 기온이 낮을 때는 작업을 중지한다.
- 비, 눈 등으로 수분이 있을 경우는 용접부에 중대한 결함이 생길 우려가 크다. 또한 강풍에 대한 방풍 대책을 수립한다.
- 용접 후는 목측에 의한 균열, 언더컷 등을 검사하며, 초음파 탐상 검사를 실시한다.
- 불량한 경우는 grinder 등으로 갈아내고 재용접한다.

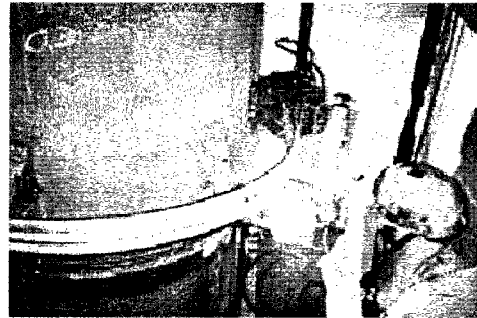
4. 수직철골 용접로봇 개발사례

일본에서는 1985년경 건축 철골 용접 로봇이 처음 도입되었는데, 초기에는 로봇의 기동성·조작성 등에 대한 연구와 용접 품질 문제 해결을 위한 연구가 주를 이루었다. 1988년~1990년경에는 보급기로서 용접로봇의 H/W와 S/W 개발에 대한 연구를 수행해왔다. 그 후, 1990년대 중반부터는 용접부의 외관 형상, 내부품질 및 용접 금속의 기계적 성질 향상을 위한 노력이 이루어졌다. 그 결과 용접 로봇의 적용 범위도 공장내의 용접에서부터 철골주 용접, 철골보의 용접에까지 그 응용범위가 확대되었다. 철골주의 경우, 초기에는 원형주 및 각주에 대한 적용만이 이루어졌으며, 최근 들어서 H-형강에 대한 용접 로봇 적용 사례가 발표되기도 하였다.

그림 2.4.4.1은 일본 竹中工務店 技術研究所에서 개발한 용접 로봇 시스템[5]를 보여주며, 용접공을 사용하였을 때보다 약 40%의 향상을 가져왔다고 보고된 바 있다.



Automated welding of a square steel columns



Automated welding of steel pipe columns

그림 2.4.4.1 Takenaka에서 개발한 철골 용접 로봇

그림 2.4.4.2은 일본 三菱重工業에서 개발 보급한 용접로봇 시스템[6]의 사각주 용접 작업 모습을 보여주고 있으며, 숙련작업자와 동등이상의 품질을 확보할 수 있고 종래 작업에 비하여 작업효율이 2~3 배 향상되었다고 보고하고 있다.

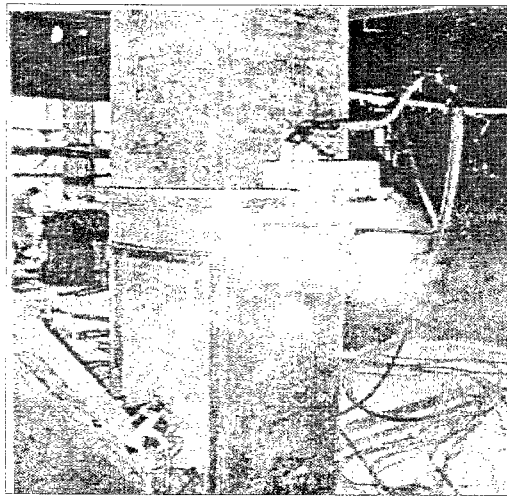


그림 2.4.4.2 Mitsubishi에서 개발한 철골 용접 로봇

사각주나 원형주의 경우에는 용접선이 단순하고 철골자체가 장애물이 되지 않아 3자유도의 직교형 로

봇만으로도 첩끌기등주위에 설치 고정된 레일을 따라 이동하면서, 이음새를 용접할 수 있다. 그러나, H-형강의 경우에는 로봇의 용접 자세각이 다양하게 요구되어 더 많은 자세각을 필요로 하게 된다.

수직첩끌 용접로봇 시스템의 설치에는 로봇전용 지게차를 이용한 방식과 가설대 설치방식 등이 있으며, 보다 신속한 설치 및 이동을 위한 시스템 개발에 중점을 두고 연구를 수행하고 있다[7].

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단

가. 국내외 기술개발 현황 조사

국내외 기술개발 현황을 조사하기 위하여서는 정부, 학계 및 연구소, 민간 부문에서 각각 어떻게 이루어지는가를 파악하는 것이 필요하다. 정부, 학계 및 민간 부문의 기술개발 역할과 결과가 각각 다르나 국가적 차원에서 로봇에 대한 연구개발이 얼마의 비중을 가지고 추진되는가를 알아보기 위하여는 국가의 연구개발을 Class1, Class2 및 Class3의 3 단계로 나누어 살펴보는 것이 필요하다.

Class 1은 범 국가적 또는 부처적 프로젝트(Multi-national or ministerial Projects)로 European Union처럼 여러 국가가 공동으로 수행하는 프로젝트나 단일 국가에서 여러 부처에 걸쳐 운영되는 프로젝트 또는 프로그램이다. 예를 들어 미국의 경우 대통령 자문 기구인 Office of Science and Technology Policy (OSTP)가 국가 전략차원에서 국가적으로 개발하여야 할 기술에 대한 범부처적 Class 1급 프로젝트를 기획하고 있다

Class 2은 정부 단일 부처의 프로젝트 (Ministerial Projects)로 정부부처의 고유업무와 관련된 기술을 개발하는 프로젝트이다.

Class 3은 기관차원의 프로젝트 (Institutional Projects)로 전문 연구기관, 기업 연구소 또는 대학부설 연구기관이 고유 연구분야에 따라 정부지원 예산 또는 민간 투자에 의하여 수행하는 연구개발 프로젝트이다.

(1). 국내 기술개발 현황 조사

국내 산업용 로봇의 설치 및 활용은 생산직 종사자 대비 로봇설치대수 면에서 일본, 싱가포르 다음으로 밀도가 높으며 총 설치대수 면에서도 일본, 미국, 독일 다음으로 이태리와 같은 수준으로 많이 되어있다. 이는 산업용 로봇분야에서는 국내 활용기술이 성숙기에 들어갔음을 나타낸다

국가의 연구개발 지원을 살펴보면 로봇과 관련하여 진행되고 있는 Class 2의 연구개발 프로젝트는 다음과 같다.

과학기술부 중점 연구사업

서비스로봇 기술개발 사업

휴먼 인터페이스 기술개발 사업

첨단 항만 핵심 기술
뇌 과학 연구
민.군 겸용 기술사업
위험작업을 위한 원격 조종용 로봇
무인 잠수정 운항제어 및 매니플레이터 기술개발
21세기 뉴 프론티어 사업
지능형 마이크로 시스템 사업
창의적 지원사업
인공시각 연구단
휴먼 애니메이션 연구단

보건복지부

선도기술 사업
인공지능 대퇴의지 개발
수술용 내시경 및 수술 훈련시스템 개발
3D 디지털 내시경 수술시스템 개발
노약자 및 장애인 재활을 위한 지능형 보행 훈련사 로봇 개발

연구기관차원에서 진행된 Class 3의 연구개발 프로젝트로는
한국과학기술연구원의 휴먼로봇 시스템 개발연구,
원자력 연구소의 원자력 발전소용 로봇, 하수구 수리용 로봇개발
한국과학기술원의 자율형 로봇 개발
농업진흥청 산하 농업기계화연구소의 농업용 로봇
중소기업의 교육용 및 장난감 로봇개발
서울대학교 및 한국과학기술원의 마이크로 로봇 경연대회 및 로봇 축구
등이 있다.

2000년 이후 기업차원에서 진행된 Class 3의 연구개발 및 상품화 프로젝트는 급속하게
진행되고 있다. 기업차원의 연구개발을 기술의 난이도가 크지는 않으나 쉽게 상품화를
할 수 있는 분야에 집중되고 있으며 주로 Home Service, Entertainment, Education, Life
Support, Public Welfare 분야에 집중되어있다.

조이메카의 Home Robot Joy는 Personal Robot이며 청소, Home security,
internet web surfing, education and game function이 있으며 internet
remote control 이 특징이다.

한울로보틱스의 연구용 이동로봇은 각종 센서가 장착된 이동형 로봇

Platform으로 연구자가 필요에 소프트웨어로 제어하도록 되어있으며 3 Wheel Synchronous Drive가 특징이다.

한울 로보틱스의 Interactive Emotonal Robot: RAI는 로봇과 인간의 감성을 다루는 로봇 Platform으로 인간의 감성을 손목시계나 목소리 또는 표정으로 측정하고 로봇이 감정을 표현하여 Interactive communication이 이루어지도록 되어있다.

한울 로보틱스의 로봇 청소기는 비전 카메라와 초음파 센서를 장착하고 청소 이동 경로를 생성하여 청소가 어려운 구석도 청소를 할 수 있는 구조를 가지고 있다.

우리기술의 Home Robot: ISSAC은 초음파 센서, PSD센서, PIR센서 등과 USB 비전 카메라를 장착하여 가정에서 감시와 청소, Information Server역할을 하도록 되어있다.

우리기술의 Public Guide Robot은 비전 카메라, 초음파 센서, PSD센서, 적외선 센서 등과 음성인식 기능을 장착하고 공공장소에서 이동하며 안내하는 기능을 수행한다.

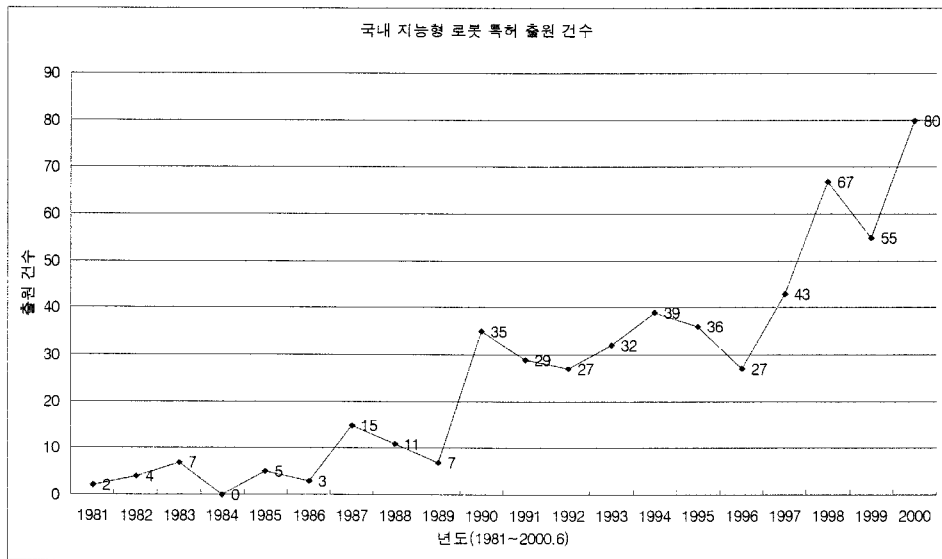
삼성전자의 Personal Robot: ICOMAR는 초음파 센서, 적외선 센서, 범프 센서, PIR 센서, 위치 센서 및 비전 센서를 장착하고 음성 인식기능과 TFT LCD 스크린을 가지고 있다. ICOMAR의 주요기능은 Information Service를 위하여 날씨정보 등을 Web에서 찾아 제공하고 일정관리, 어린이 동화, e-mail 서비스 등을 할 수 있으며 가정의 안전감시와 가정 자동화 기능을 수행할 수 있다.

유진로보틱스는 Tutor Robot을 개발하였으며 이는 가정에서 내장된 PC나 인터넷의 콘텐츠를 이용하여 학습기능을 하는 로봇으로 음성인식을 하여 반응토록 되어 있으며 어린이 동화이야기, 상호작용 교육, 영어 자유 대화, 계획된 교육 시행기능 등을 갖추고 있다

유진로보틱스는 학습용 로봇을 개발 상용화하고 있는데 이 중에는 Soccer Robot인 MicroSot: VICTO, Robosot Robot, Micro-mouse: AIRAT2, Programmable Mobile Robot: HexAavoider, Microrobot의 일종인 Block Robot: Inch-Worm 등이 포함되어있다.

이러한 국내 산업계의 적극적인 기술 및 제품개발 노력에 따라 지능로봇 분야의 국내 특허 출원도 80년대 까지 매년 평균 10여건에서 90년대에 드려 매년 평균 30여건 이상으로 증가하였다.

아래 그림은 특허청에 출원된 총 특허 출원건수의 연도별 증가세를 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 출원건수는 1997년 IMF이후 오히려 급속한 증가세를 보여주고 있으며 특히 2000년 이후 지능 로봇의 특허 건수가 급증한 것을 알 수 있다



국내 지능형 로봇 특허출원 건수 (특허청)

	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	2000.6.	합계
총	5	3	15	11	7	35	29	27	32	39	36	27	43	67	55	80	511
한국	1	1	1	0	3	13	20	15	23	21	27	25	28	47	50	46	321
일본	4	2	5	10	2	20	7	6	8	16	6	2	8	8	2	25	131
미국	0	0	3	1	2	2	2	4	1	1	2	0	4	6	2	4	34
유럽	0	0	6	0	0	0	0	2	0	1	1	0	3	3	1	4	21
기타	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	4

특허청에 출원된 국가별 특허 출원 현황

위의 표는 특허청에 출원된 국내외 출원현황의 연도별 추이를 보여준다. 전체적인 출원 건수는 국내 출원이 많으나 인간의 동작이나 표정 감정, 의도를 인식하는 첨단 기술 등은 모두가 일본, 미국 등 외국 기업에 의해 이루어진 것이며 국내의 경우는 정보기술과 결합된 로봇의 원격제어 기술 분야에서 우세를 보이고 있다.

(2) 국제 서비스로봇 기술 현황 조사

로봇에 대한 선진국의 연구개발과 투자는 다양한 정책적 도구에 의하여 이루어진다. 이는 크게 나누어

연구개발: 국가 차원에서의 연구개발 프로그램 또는 프로젝트

기술과급: 국가에서 개발한 연구개발 결과를 기업으로 파급

기술진흥: 각종 로봇 경진대회, 국가 연구기관의 청소년 프로그램

등의 형태로 이루어진다.

연구개발의 경우 국가는 목표 지향적인 연구와 기반 조성형의 연구로 구분하여 지원하고 있다. 목표 지향적인 연구의 경우는 프로젝트(Project) 형태로 미국의 경우 NASA나 DARPA 등 전문 국가 연구부서 또는 산하 연구기관을 통하여 자체 연구나 외부 수탁 연구가 수행되며 기반 조성형 연구의 경우 기술개발이 필요한 분야를 공고함으로써 폭 넓게 연구 참여를 유도하여 우수한 연구팀에 연구비를 지원하는 프로그램(Program 또는 Programme) 형태를 취하고 있다. 일본의 경우는 과거 大型 PROJECT라는 국가 차원의 프로젝트 지원형태를 취하였고 유럽의 경우는 EUREKA 또는 ESPRIT와 같은 유럽연합국가 차원의 프로그램을 운영하고 있으며 미국의 경우는 NASA, DARPA등의 프로젝트와 NSF 등의 프로그램 형태가 병행하고 있다.

기술 파급의 경우는 국가주도로 개발한 기술을 민간에게 파급하는 정책들을 말하며

90년대 이후 정부의 연구개발투자가 국가의 부로 연결되지 못한다는 비판에 따라 정부 또는 국가 연구기관에서는 기술과급 및 기술이전을 적극적으로 추진되고 있다. 기술과급의 수단을 살펴보면

기술이전센터: 국가나 전문 연구기관이 개발한 기술을 유료 또는 무료로 민간 기업에게 이전하는 것을 전담하는 기관

중소기업지원: 국가가 개발한 기술을 바탕으로 중소기업을 창출하는 경우 기술 및 자금을 지원하거나 중소기업에 필요한 기술을 기술개발자가 지원하는 제도

Spin-off 기술의 공고: 우주개발 등의 목적으로 개발된 특정기술을 Spin-off하여 산업에 필요한 기술을 개발하여 이를 과급하는 제도

민관 공동개발제도: 국가 개발 프로젝트에 초기부터 기업 또는 기업의 연합체가 공동으로 참여하여 민. 관이 같이 기술을 개발하고 그 결과를 기업이 활용하는 제도

프로젝트형 연구소설립: 국가 대형 프로젝트를 성공적으로 수행하기 위하여 국가 연구기관 연구원과 민간 기업 연구원이 한시적으로 연구기관을 설립하여 연구를 수행하고 연구종료 후 연구기관을 해체하고 그 자산을 분배하는 제도

연구결과 공개제도: 국가가 개발한 연구결과를 정보 공개법에 의하여 민간에게 공개하는 제도

연구입찰제도: 국가의 프로젝트중 외부 수주부분을 미리 공고하여 민간기업 또는 대학 연구기관이 경쟁 입찰하여 연구에 참여하는 제도

등 다양한 형태로 이루어지고 있다.

기술진흥은 로봇에 대한 국민들의 의식을 고취하고 특히 청소년들의 로봇에 대한 인식을 높이기 위한 제도로

로봇 Festival: 각종 로봇의 전시와 여러 가지 형태의 로봇 데모

로봇 경연대회: 마이크로 마우스, 로봇 축구 등 규칙을 만들고 경연대회를 운영 등의 형태로 이루어지고 있다.

(가) 미국

① 연구개발 추진체계

미국의 방대하고 다양한 연구개발체제를 이해하기 위하여서는 연구개발과 관련된 미국의 정부부처와 그 역할 및 정책을 검토하는 것이 필요하다.

미국의 과학기술과 연구개발에 대한 종합정책은 지금까지 대통령 보좌 기구인 OSTP와 NSTC에서 Class 1의 정책을 수립하여 왔다.

Office of Science and Technology (OSTP)

National Science and Technology Council (NSTC)

과학기술 예산을 비롯한 각 부처에서 신청한 예산은

Office of Budget Management(OBM)

에서 조정하여 왔다.

그러나 미국은 2001년 새로운 행정부가 들어선 후 과학기술정책의 틀이 아직 확립되지 않은 상태이며 과학기술에 관련된 백악관의 조직의 변화 가능성도 있어 지금까지 대통령을 보좌하여 국가 과학기술정책을 총괄하던 OSTP와 NSTC의 책임자가 임명되지 않은 상태이다. 따라서 미국의 과학기술정책은 지금까지 클린턴 행정부가 계획하고 추진하여 왔던 자료에 기초하여 서술하였다.

로봇의 연구개발 정책과 관련된 미국의 정부부처는 에너지성, 국방성, 상업성, 과학재단, 항공우주국, 국방첨단기술개발국 등을 들 수 있다. 이들 정부부처는 Class 2의 연구개발정책을 수립하고 이를 시행하고 있다.

Department of Energy(DoE),
Department of Defense(DoD),
Department of Commerce (DoC)
National Science Foundation (NSF),
NASA,
Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)

정부 각 부처에서 수립된 정책은 정부내 관련 부서와 산하 국립 연구기관이 직접 수행하거나 프로그램을 공고하여 민간으로부터 기술개발 계획서를 모집하여 수탁하는 형태를 취하고 있다.

Class 3 연구개발사업은 각 정부부처 산하 연구기관 들과 대학 부설 연구기관, 기업 부설연구기관 등이 있으며 정부산하 연구기관으로는

DoC 산하에는 NIST가 생산 표준화와 관련하여 로봇의 연구를 하고 있으며
DoD의 국방관련 로봇연구는 DARPA를 통하여 이루어지며

DoE 산하에는 17개의 주요 연구기관 중 로봇과 관련하여 Sandia National Laboratory의 연구활동이 활발하며

NASA 산하에는 Jet Propulsion Laboratory(JPL)이 우주 개발과 관련하여 로봇에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다

대학부설 연구기관으로서는

MIT
Stanford University
Carnegie Mellon University (CMU)

등이 로봇에 관한 연구를 폭 넓게 진행하고 있다.

로봇 연구개발을 주도하는 정부 부처로는 상업성(DoC), 국방성(DoD), 에너지성(DoE),

항공우주국(NASA)의 산하 연구 기관들과 국방첨단기술개발국(DARPA) 및 과학재단(NSF)의 기술개발 관련 부서들이 있다.

미국의 기술개발 확산정책은 다양한 형태로 이루어지고 있다. 그 중에서도 국립연구기관과 정부에 가장 영향력을 미치고 있는 정책이 국민의 기회균등을 위하여 법으로 제정된 중소기업과 소수민족에 대한 지원정책 이다. 국회는 1982년 Small Business Innovation Research (SBIR) Program에 대한 법적 근거를 마련하였으며 1992년 국회에서 (SBIR)에 대한 법을 재 인정(reauthorized)하였고 동시에 Small Business Technology Transfer (STTR)에 대한 프로그램도 설치하였다. 현재 SBIR 프로그램을 채택하고 있는 정부부처는

Department of Agriculture

Department of Commerce

Department of Defense (Office of the Secretary of Defense, Army, Navy, Air Force DARPA, Ballistic Missile Defense Organization, Special Operations Command)

Department of Education

Department of Energy

Department of Health and Human Services

Department of Transportation

Environmental Protection Agency

NASA

NSF

Nuclear Regulatory Commission

등이 있다.

② 주요 정부 연구개발 프로그램

미국은 현재 Class1으로 추진되는 로봇 연구개발 정책은 없으며 다양한 로봇의 연구개발이 Class2 및 Class3차원에서 이루어지고 있다. 대표적인 것이 미국 과학재단(NSF)을 통하여 지원되고 있는 연구개발 지원자금, 국방첨단기술개발국(DARPA)를 통하여 개발되고 있는 미래 전투시스템으로서의 로봇전투장비 개발, 항공우주국(NASA)에서 추진 중인 우주개발과 관련된 우주탐사 로봇연구, 상업성(DoC)산하 표준연구소(NIST)에서 로봇의 표준화와 관련되어 기술 개발되고있는 야외 및 구조용 로봇의 표준화 연구, 에너지성(DoE)산하 샌디아 국립연구소에서 추진되고 있는 첨단로봇의 연구 등이 그 대표적인 예이다.

㉠ 과학재단(NSF)의 로봇 기술개발 지원

과학재단의 로봇에 대한 연구개발 지원정책은 전국의 대학으로부터 연구계획서를 모집하여 가장 우수한 연구과제를 선택하여 연구비를 수여하는 Grants 제도가 주축을

이루며 이외에도 계약(Contract) 협력협정(Cooperative agreement)에 의한 연구지원이 있다.

로봇에 대한 연구지원은 과학재단 부서 중 주로 CISE(Computer and Information Science and Engineering)부서에서 담당하고 있으며 그 중에서도 IIS(Information and Intelligent Systems)와 EIA(Experimental and Integrative Activities) 과(Division)에서 관리하고 있다.

과학재단이 지원하는 로봇의 연구개발 지원정책은 대부분 1,000,000불 이하의 다양한 프로젝트로 폭 넓은 대학의 기초연구를 지원하는 형태이다. 최근 들어 과학재단이 지원한 1,000,000불 이상의 프로젝트는

Parallel Laboratory for Real Time Vision and Robotics
High Performance Computing for Simulation, Planning and Execution of
Robot-Assisted Surgery
Rapid Prototyping of Parallel Robot Vision Systems Using Virtual Reality and
Systems Simulation

ITR: Personal Robotic Assistants for the Elderly
의 4건으로 국한되었다. 이들의 사업내용은 다음과 같다.

Parallel Laboratory for Real Time Vision and Robots 프로젝트는 NSF EIA에서 관리하고

연구기간이 1989년 7월부터 1994년 12월까지 5년 5개월이며 총 연구비 1,542,973불로 로체스터 대학(University of Rochester)의 Christopher M. Brown 교수가 총괄 연구책임자가 되어 추진하는 프로젝트로 연구내용은 로체스터 대학 연구팀이 수행하고 있는 실시간 능동 비전(Real-time Active Vision)연구를 지원하는 것이다. 연구팀은 범용 또는 전용 장비를 써서 병렬 비전 알고리즘(parallel vision algorithm)을 연구하고 있는데 다음 단계는 개별 문제의 병렬 해법을 종합하는 방식에서 단일 복잡 문제의 통일화 된 해법을 추구하는 것이다. 이 연구개발 지원은 이러한 목적이 달성될 수 있도록 실시간 비전 병렬 실험실을 구축하는 것이다. 실험실은 4가지 구성요소로 되어 있는데 머리에 해당하는 카메라, 로봇 팔이나 목으로 머리를 움직이는 부분, 하위 비전 처리를 위한 전용 병렬 프로세서, 상위 비전과 작업계획을 담당하는 범용 병렬 프로세서로 되어 있다. 연구범위는 이기종 병렬처리기술(Heterogeneous parallelism), 감각-운동시스템의 계층적응제어(Hierarchical adaptive control for sensory-motor systems), 실세계 행동과 기호에 의한 계획기법의 상호 협조(Cooperation of symbolic planning with real-world action), 병렬 구조용 운영체제(Operating system for sealable MIMD architecture), 병렬 프로그램 환경 등이 포함되어 있다.

High Performance Computing for Simulation, Planning and Execution of Robot-Assisted Surgery 프로젝트는 NSF의 CISE부서와 ENG부서가 공동으로 추진하며 IIS에서 관리하고

연구기간이 1994년 10월부터 1997년 9월까지 3년간이며

총 연구비 1,800,000달러로 Carnegie Mellon University(CMU)의 Takeo Kanade 교수가 총괄 책임자가 되어 추진하는 프로젝트로 연구내용은 CMU의 로봇 공학자, 전산학자, 생체공학자, 외과의사 및 Shadyside병원이 공동으로 의료용 로봇의 첨단기술을 발전시키는 프로젝트이다. 서비스 로봇은 병원의 수술 특히 정형외과의 수술을 도와주는 역할을 수행할 수 있다. 이를 효율적으로 수행하기 위하여서는 인체의 생체역학적, 생물학적 시스템을 고려한 수술 시뮬레이션, 수술 현장에서 실제로 사용할 수 있는 절개 및 위치결정 기술, 수술전과 수술 중 수술 팀과 로봇의 효율적 상호 작용 등이 해결되어야 한다. 연구팀은 이를 위하여 첨단 수치 시뮬레이션 기법, 인체 표면을 기준으로 수술부위를 결정하는 로봇 기술, 3차원 센싱, 수술 중 생체역학적 정보를 효율적으로 제공하는 수술 팀과 컴퓨터간의 정보교환 등을 수행한다.

Rapid Prototyping of Parallel Robot Vision Systems Using Virtual Reality and Systems Simulation 프로젝트는 NSF EIA에서 관리하고

연구기간이 1994년 8월부터 1999년 7월까지 5년이며

총 연구비가 1,501,000달러로 로체스터 대학(University of Rochester)의 Thomas J. LeBlanc교수가 총괄 책임자가 되어 추진하는 프로젝트로 연구내용은 시각적으로 조정되는 로봇 시스템을 대상으로 두 가지 시뮬레이션 기술을 연구할 수 있는 연구실을 설립하는 것이다. 두 가지 시뮬레이션이란 첫째 실제 환경과 감각작용을 교환하는 가상현실(Virtual Reality)의 시뮬레이션과 상호작용을 시뮬레이션 하기 위하여 필요한 메시지와 메모리 조작에서 쓰이는 복잡한 병렬 알고리즘의 시뮬레이션이다. 이를 위하여 구성될 연구실 장비로는 장면생성(Scene generation) 용으로 Silicon Graphics (SGI) Reality Engine, 가상세계 시뮬레이션을 위한 SGI Challenge multiprocessor의 개량, 중급 및 고급 시각장치의 실시간 처리용 계산용 컴퓨터, 실시간 작업을 위한 유압 로봇 팔, 일반용 워크스테이션 등이다. 연구분야는 복잡한 실제 자율 시스템 구축의 원리, 가상현실의 새로운 방법, 로봇제어 알고리즘의 시뮬레이션과 실현화 등이 포함된다.

ITR: Personal Robotic Assistants for the Elderly는 NSF IIS에서 관리하고

연구기간이 2000년 1월부터 2004년 8월까지 4년 8개월간이며

총 연구비가 1,434,692달러로 피츠버그 대학교(University of Pittsburgh)의 Jacqueline Dunbar-Jacob 교수가 총괄 책임자가 되어 추진하는 프로젝트로 연구내용은 미국에서 앞으로 급증할 노인 인구의 문제를 정보 기술을 이용하여 해결함으로써 가능하면 노인이 특별 요양소에 가지 않더라도 가정에서 편히 생활할 수 있는 수단을 마련하려는 것으로 구체적으로 노인들의 일상생활을 관찰하고 인도하는 노인용 보조 개인 로봇을

설계, 제작하려는 것이다. 이를 위하여 기술적으로 해결하여야 할 과제들에는 노인 행동의 모니터링과 유연한 추론, 사람 일상 행동의 학습을 위한 통계적 알고리즘, 노인이 보조용 로봇과 쉽게 교류할 수 있는 스스로 조정되는 다 형태 경계영역 기술, 이동로봇이 노인 거주지에서 작동하는 데 필요한 새로운 센서형태 등이 포함되어 있다. 이 프로젝트는 세 가지 차원에서 평가되는데 첫째는 구성 요소의 이론과 시뮬레이션 평가에 의한 방법, 둘째는 특정한 사용자에게 적용하여 평가하는 방법 셋째는 주기적으로 노인이 거주하는 주택들에서 현장 실험하는 방법들이다. 프로젝트팀은 전산학, 로봇공학, 인간-컴퓨터 상호작용(HCI: Human-Computer Interaction), 간호학의 전문가들로 구성되어 있다. 이 프로젝트는 기술 개발의 목적이외에도 학부와 대학원 학생들에게 정보공학을 통한 노인의 복지에 관한 교육효과도 추구하고 있다.

1.2.2 국방첨단연구프로젝트국(DARPA)

DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)는 국방성 산하 기관으로 1958년 ARPA라는 부서로 발족하여 1972년 DARPA로 독립하였고 1993년 ARPA, 1996년 DARPA 등 명칭변화를 거쳐 현재에 이르렀다. 그 임무는 상상적이고 혁신적이며 위험성이 크면서도 성공하면 정상적인 기술개발단계를 뛰어넘는 중대한 연구개념을 개발하고 이를 기술 가능성 실증단계에서 시 제작 단계까지 수행하는 것 (The DARPA mission is to develop imaginative, innovative and often high risk research ideas offering a significant technological impact that will go well beyond the normal evolutionary developmental approaches; and, to pursue these ideas from the demonstration of technical feasibility through the development of prototype systems)으로 되어 있다.

DARPA의 연구개발 예산은 1999년 18억8800만불, 2000년 18억 7600만불 규모이며 표-12에 표시된 DARPA의 7개 기술 개발실(Technical Office)에서 관리한다.

기술 개발실 중 TTO(Tactical Technology Office)는 위험도가 크면서도 성공 시 큰 효과가 기대되는 육, 해, 공군의 시스템 및 하위 시스템에 대한 연구를 관리하고 있다. TTO에서 관리하는 프로젝트 중 로봇과 관련된 프로젝트를 살펴보면

Micro Air Vehicles (MAV)

Future Combat Systems (FCS)

등이 있으며 MTO에서 관리하는 프로젝트로

Distributed Robotics

등이 있다.

Micro Air Vehicles (MAV)프로젝트는 가로, 세로, 높이가 모두 15 Cm보다 작은 미세 항공기를 개발하고 실증 실험하는 것이다. MAV가 수행할 임무는 작은 유닛으로 다양하게 적을 정찰하고 관찰하고, 도시에서 군사작전을 지원하고, 적진에 있는 주요 적 시설물과 목표물에 대해 목표를 지정하고 표시하고 화학무기와 생화학무기를 찾아내고

그 성분을 분석하는 것이다. 이 임무는 지형과 환경이 복잡한 도시와 건물 내, 그리고 민간인이 모여있는 장소에서 효력을 발생해야 한다. 이 프로젝트는 작은 크기로 비행하는 기술, 특히 항공제어, 추진기, 엔진, 항법 및 통신 등의 기술을 개발하는데 중점을 두며 이를 위하여 DARPA의 다른 부서와 공동으로 첨단 통신, 정보 시스템, 고성능 컴퓨터 기술, MEMS 기술, 첨단 센서, 초경량, 고 효율 에너지원, 첨단 전자 포장기술 등을 개발한다.

1999년에는 MAV시스템을 개발 제조하고, MAV 부양기술을 실증하며

2000년에는 MAV의 부양기술을 완성하고 제작을 끝내며

2001년에는 MAV시스템과 하부 시스템을 완성하고 항공실험을 끝내는 계획으로 추진하고 있다.

Future Combat Systems (FCS)프로젝트는 통신망 중심의 다 임무 전투시스템(network centric concepts for a multi-mission combat system)을 개발할 목적이며 개발될 시스템은 적에게 큰 타격을 줄 수 있고, 전략적 배치가 가능하며 전투 중 자체 유지기능과 높은 생존능력을 가지고 있으며 모든 전투 상황에서 각종 명령을 이해하고 수행할 수 있는 종합 명령, 통제 능력을 사용 할 수 있도록 되어 있다. 이 시스템은 2012년까지 미 육군에 실전 배치한다는 목표를 가지고 개발되어 있다. 시스템은 그림-1에 표시되어 있는 바와 같이 로봇 센서, 로봇 자동화기, 수동 화기, MAV 정찰기, 인공위성 등으로 구성되어 센서들로부터 통신망을 통하여 정보를 입수하고 작전지시를 내려 자동 혹은 수동화기를 적정배치하고 전략적 전투를 할 수 있도록 한다. 따라서 시스템은 다기능, 다 임무, 형상변환을 수행할 수 있으며 상호 작전수행능력을 최대화하고 전략적 수송능력, 직,간접 화력, 전투기 지원, 정찰, 부대 이동, 적 진격방해 작전을 공동으로 수행하는 능력이 있어야 한다. DARPA가 FCS의 핵심기술로 도출한 분야는

통신망에 의한 C4IST(Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Targeting)

로봇(Robotics)

정밀 간접 화력(precision indirect fires)

BLOS(Beyond Line Of Sight: 보이지 않는 부분) 계측 센서

전천후 정밀 정찰 및 목표 표시 시스템

등이며 이를 위하여

2000년에는 초기개념의 개발

2001년에는 개념설계의 완성, 모델과 시뮬레이션을 확인하기 위한 실험, 관련 로봇기술의 평가 등이 이루어진다.

Distributed Robotics는 MTO(Microsystems Technology Office)에서 관리하는

프로젝트로 마이크로 로봇과 미니로봇에 대한 대학의 연구개발을 지원하는 프로젝트이다. DARPA가 마이크로와 미니 로봇에 관하여 지원하는 이유는 이들 로봇이 군사작전 중 정찰, 첩보, 항법, 화력지원 유도, 물건 운반, 작은 규모의 액츄에이션이 가능하고 미세센서를 장착한 도약로봇 등을 통하여 지뢰탐지에도 쓰이고 다 작업 기능의 로봇, 도시 하수도를 통한 정보수집 로봇, 많은 작은 로봇을 이용한 적의 유인, 매우 작은 로봇을 이용한 주사 또는 자물쇠의 해제 등으로 많은 용도로 쓸 수 있기 때문이다.

DARPA는 Distributed Robotics 프로젝트를 통하여 11개 연구기관을 지원하고 있는데 그 현황은 다음과 같다

Distributed Control of Collaborating Robot System (Carnegie Mellon University)

Biologically Inspired Micro-Robots (Case Western Reserve University)

MicroHunters (Duke University)

Re-configurable Adaptable Micro-Robots (Michigan State University)

Planar Processed Robots (North Carolina State University)

Shared Semantic Presentations for Coordinating Distributed Robot Teams (Northwestern University)

Integrated Wireless Micropower Communications Subsystem for Micro-Robots (University of California LA)

Micromachied Acoustic Ejector Arrays for Propulsion, Actuation and Control (University of Michigan)

Distributed Robotics Using Re-configurable Robots (University of Minnesota)

CONRO: Configurable Robots (University of Southern California-ISI)

Massively Distributed Modular Re-configurable Robots (Xerox PARC)

DARPA는 연구개발 정책 이외에도 여러 가지 기술개발지원제도를 시행하고 있는데 그 중에는 기술을 파급하고 중소기업을 지원하기 위한 정책도 포함되어 있다. 이들은 다음과 같다.

SBIR (Small Business Innovation Research)

STTR (Small Business Technology Transfer)

SADBU (Small and Disadvantaged Business Utilization)

HBCU/MI (Historically Black Colleges and Universities / Minority Institutions)

(나) 일본

① 연구개발 추진체계

일본은 세계에서 로봇을 제일 많이 설치 운영하고 있는 나라이며 사회적으로도 로봇에 대한 수용이 다른 나라에 비하여 월등히 두드러진 나라이다. 이는 국민 정서가 기술을

중시하고 새로운 기술에 대한 호기심과 수용태세가 잘 되어있는 이유도 있지만 국가적으로도 이러한 국민적 요구에 부응하여 조직적인 연구개발 투자를 하여왔기 때문이기도 하다..

일본의 연구개발체제는 총리가 제출하는 총리답신에서 큰 틀이 정하여지고 이를 실행하기 위하여 정부 각 부처가 세부계획을 세우는 형태로 되어있다. 일본의 로봇에 대한 연구개발을 담당하는 부처로는 2001년 1월 정부조직이 바뀌기 전에는 통상산업성(통산성)에서 담당하여 왔으며 외청인 공업기술원이 大型PROJECT라는 이름으로 프로젝트를 관리하여왔고

文部省에서 中核的 據点形成 프로그램 일환으로 대학의 로봇관련 연구 연구를 지원하여왔다.

과학기술성은 우리 나라와는 달리 산업기술에 대한 연구개발 프로젝트를 수행하지 않고 원자력 개발과 우주 개발 연구에 한정하고 있었다.

大型 PROJECT의 로봇관련 프로젝트는 통상산업성이 외청인 공업기술원을 통하여 관리하여 왔으며 프로젝트는 정부산하 연구소로서는

기계기술연구소

전자기술총합연구소

이 주축이 되어 산업계와 공동으로 추진하였다.

문부성의 중핵적 거점형성 프로그램 중 로봇에 관한 프로젝트는 여러 대학이 참여하여 폭 넓게 수행되었다 이러한 대학 및 부설 연구소 중 로봇에 대한 연구가 앞선 대학으로서는

東京大學校

東京工業大學教

와세다大學校

나고야大學校

오사카大學校

등을 들 수 있다.

최근 들어 첨단로봇에 대한 연구개발과 연구투자는 민간기업이 정부 부문을 앞서고있다 특히 1996년 딸 혼다 사가 인간형 로봇 P2를 발표한 후 민간 기업들은 앞 다투어 장난감 로봇, 노인 보조용 로봇 등 서비스 로봇과 인간형 로봇에 대한 연구를 개발하고 있다. 특히

소니사의 강아지robot, 인간형 로봇

혼다사의 인간형 로봇

오므론사의 노인 상태측정, 관찰용 장난감 로봇

히다치사의 노인 보조용 로봇
마츠시다사의 장난감 로봇
등이 주목된다.

일본정부는 2001년 1월을 기하여 '작은 정부를 지향한다는 목표아래 정부부처와 산하기관을 과감히 재편하였다. 로봇과 관련한 정부부처의 변화를 살펴보면

通商産業省이 經濟産業省으로 전환되었고

외청인 工業技術院의 경우 정부기능을 하던 부서를 국(局)으로 독립시키고 나머지 부서를 연구기관 화하여 産業技術總合研究所로 발족시키고 과거 독립 연구소들을 통합하여 단일 연구소 내 연구 유닛 또는 연구거점으로 폐합하였다.

이에 따라 과거 機械技術研究所와 電子技術總合研究所에서 독립적으로 운영되던 로봇 연구 부서도 통합된 産業技術總合研究所의 단일 연구 유닛으로 통합되어 로봇에 대한 연구를 유기적으로 추진하고 있다..

科學技術廳은 文部省과 통합되어 文部科學省로 개편되었으며 대표적인 사업으로 로봇기술의 보급을 위한 ROBOT創造 國際競技大會를 조직하여 추진하고 있다.

② 주요 정부 연구개발 프로그램

일본은 1970년대에 들어 국가 연구역량을 집중하여 첨단 기술을 개발하여 선진국과의 기술경쟁에서 비교우위를 차지한다는 목적으로 대형 프로젝트를 수행하여 왔다.

통상산업성이 주도가 되어 추진한 국가 프로젝트는 산업분야의 大型PROJECT와 에너지분야의 SUNSHINE'프로젝트가 대표적이었다.

대형 프로젝트는 산업 각 분야를 대상으로 이루어 졌으며 로봇에 대한 연구는 기계, 항공, 우주분야에 속하여 이루어 졌다. 일본 대형 프로젝트 중 기계, 항공, 우주분야 종료된 프로젝트들의 개요와 성과를 나타내고 있다. 지원된 분야 중 기계분야와 관련된 프로젝트로는 자동 봉제시스템, 극한작업 로봇 및 초 첨단 가공시스템이 포함되어 있어 로봇에 대한 연구가 이에 속한다.

통상산업성은 1980년대 말부터 연구개발 정책을 다양화시키고 1970년대 수행해 왔던 대형 프로젝트 식의 정부 주도형태에서 벗어나 민간과 학계가 주도가 되는 여러 정책을 개발하였다. 1993년 통상산업성은 그 동안 추진되어오던 大型PROJECT (대형 공업기술 연구개발 제도)와 次世代 PROJECT(차세대 산업기반기술 연구개발 제도)을 통합하여 産業科學技術研究開發制度로 발족시켰고 1998년 새로운 산업기술 응용연구개발 PROJECT와 대학 연계형 산업과학기술 연구개발 PROJECT를 추가하여 신규 산업창출형 산업과학기술 연구개발제도를 실시하고 있다

産業技術基盤 研究開發 PROJECT (舊 산업과학기술연구개발제도)

産業技術應用 研究開發 PROJECT

大學 連携型 産業科學技術 研究開發 PROJECT

이중 로봇에 대한 연구는 산업기술응용 연구개발 프로젝트의 일환으로 인간 협조, 공존형 로봇시스템개발 프로젝트가 추진되고 있다.

㉔ 극한작업 로봇

극한작업 로봇은 1983년부터 1990년까지 8년간 추진되었던 大型 프로젝트로 총 연구비는 정부투자 약 155억엔 이었으며 연구목적은 인간에게 있어서 지극히 위험한 환경이나 험한 환경 하에서 복잡한 작업을 인간을 대신하여 실행할 수 있는 고도의 작업 시스템인 "극한작업로봇"과 그에 필요한 기초기술을 개발하는 것으로 되어있다. 연구목표는 환경적응성이 높고 이동하며 작업할 수 있는 능력을 가지며 안전한 원격장소에서 신속하고 확실히 원격 제어할 수 있는 인간. 로봇시스템을 개발하는 것이다. 이를 위하여 프로젝트는

공통기반기술

실용 원자력 발전시설 작업 로봇 (원자력 로봇)

해저 석유생산지원 로봇 (해양 로봇)

석유 생산시설 방재 로봇 (방재 로봇)

의 4개의 세부과제로 구성하였다. 각 세부 프로젝트의 목표를 살펴보면

공통기반기술은 원자력 로봇, 해양 로봇, 방재로봇에 공통으로 필요한 기반 기술들을 개발하는 것이다.

원자력 로봇은 원자력발전소 등 원자력관련시설에 대하여 작업환경을 이동하며 원격지에 있는 작업자의 지원을 받아 원자력 발전소의 기기, 시설 등을 점검, 보수 등 고난도 작업을 수행하는 로봇을 개발하는 것이다.

해양 로봇은 해저 석유개발 관련시설에 대하여 물 속에서 3차원으로 이동하며 작업위치와 작업자세를 유지하고 원격지에 있는 작업자의 지원을 받아 보수, 점검, 수리 등 고난도 기술을 수행하는 로봇을 개발하는 것이다

방재 로봇은 석유 생산시설 등에 대하여 발생하는 재해 시에 원격지에 있는 작업자의 지원을 받아 재해 현장으로 이동하여 재해상황을 파악하고 재해가 확대하는 것을 방지하고 사람을 구하는 등 고난도 기술을 수행할 수 있는 로봇을 개발하는 것이다.

각 세부과제의 연구 항목들을 살펴보면 기반기술은

기계기술

제어기술

지원기술

을 포함하고, 원자력 로봇의 고유기술은

고 신뢰성 기술

내 방사선 기술

이동 기술

Manipulation 기술
시각, 정보처리 기술
원격조작 기술/ 긴급 시 대응기술/ Total System

으로 나뉘었으며, 해양 로봇의 고유기술은

해중 주행위치 유지기술

해중 시각 기술

해중 Manipulator 기술

관리, 제어 기술

로 되었으며, 방재 로봇의 고유기술은

내열 기술

중거리시각 센서 기술

근거리 시각 센서 기술

Manipulation 기술

이동 기술

Total System

으로 되어 있다. 표-15는 이러한 세부 연구 항목별 참여한 연구기관을 보여주고 있다. 특징적인 것은 국립 연구 기관인 기계기술연구소와 전자기술총합연구소는 기반기술에 참여된 반면 원자력 로봇, 해양 로봇, 방재 로봇의 고유기술 개발은 민간 기업들이 담당하여 개발하였던 것이다. 이렇게 국가 연구 프로젝트에 민간 기업들이 적극적으로 참여함으로써 개발된 기술들이 산업계에 직접 활용되는 결과를 얻을 수 있었다.

1983년부터 1990년까지 8년간 수행되었던 극한작업 로봇 프로젝트는 1987년 중간 평가를 기점으로 1 단계와 2 단계로 나뉘어 수행되었다. 표-14에 표시되어있는 바와 같이 1 단계에서는 요소기술과 원자력, 해양, 방재 3분야의 고유기술, 공통기술, 전용기술 및 개념설계를 위주로 개발되었으며 1987년 평가를 거쳐 선택된 원자력 로봇과 해양 로봇에 한하여 Total System의 설계와 제작이 수행되었고 1990년 실증실험을 통하여 최종평가를 하였다. 최종 평가결과 요소기술로서는 종래에 비하여 출력/무게 비율이 약 10배 향상된 액츄에이터, 로봇의 손가락 끝에 장착하는 고밀도 접촉촉각센서, 네비게이션용 소형경량 광섬유 자이로스코프, 고온 환경 하에서 로봇의 기능을 유지시키는 트랜스피레이션 냉각내열기술 등의 고도의 기술이 개발이 된 것으로 평가되었고. 이 요소기술을 이용하여 원자력 플랜트기기 정비 등을 점검, 보수작업을 원격으로 제어하여 행하는 원자력용 로봇, 해양석유시설의 보수, 점검, 수리를 행하는 해안 로봇 등이 시작되어 그 유용성이 확인되었다고 홍보 되고있다.

㉔ 인간 협조, 공존형 로봇

인간 협조, 공존형 로봇은 통상산업성의 산업과학기술 응용연구개발제도에 근거하여 추진되는 프로젝트로 통상산업성의 연구개발을 담당하는 공업기술원이 新ENERGY

産業技術総合開発機構(NEDO: new energy and Industrial Technology Development Organization)를 통하여 (재) 제조과학기술CENTER에 기탁하여 추진하고 있으며 1998년부터 2002년까지 5년간 총 50억엔의 정부투자가 지원되도록 계획되어 있다 (그림-2). 이 프로젝트는 본 프로젝트가 시작되기 전 2년간 Friendly Network Robotics Project라는 선도 연구를 통하여 기술의 가능성과 본 프로젝트의 연구계획을 수립하였으며 연구의 추진도 2 단계로 나누어 추진되고 있다.1 단계인 1998년과 1999년에는 산업계, 학계, 정부 산하 연구기관이 보유한 요소기술을 통합할 수 있는 플랫폼의 개발에 집중하고 2 단계인 2000년, 2001년 및 2002년에는 인간 협조. 공존형 로봇이 활용 가능한 분야의 요구도를 감안하여 실용화에 필요한 각종 요소기술을 개량하고 추가하는 연구를 하도록 되어 있다.

프로젝트 1 단계에 수행하는 내용은

- 하드웨어 플랫폼의 제작, 개발: 로봇 플랫폼의 제작, 고성능 로봇 손의 연구개발
- 원적조작 플랫폼의 개발:
- 가상로봇 플랫폼의 개발

이 포함되어 있으며 프로젝트 2 단계에는 인간 협조. 공존형 로봇의 응용을 대상으로 하는

- 플랜트 보수분야
- 대인 서비스 분야
- 건설, 재해 분야
- Entertainment 분야
- 기반 휴머노이드 기술 분야

등을 후보과제로 하였으나 구체적인 사항을 2단계 시작 시까지 결정할 예정으로 되어 있다.

현재까지 진행중인 프로젝트의 결과를 보면 로봇 플랫폼의 경우는 Honda 사의 P2 로봇을 기준으로

신장 160 cm, 폭 60 cm, 배터리를 제외한 본체 무게 99kg
2족 보행으로 직선보행, 선회, 횡보, 후진이 가능하며 요철이 2cm 정도인 평지를 2 km/h로 걸을 수 있고

한 단 높이 20 cm정도인 계단을 한 단에 1.5초 속도로 올라갈 수 있고
두 팔을 보유하여 중량 2 Kg 물체를 손으로 잡을 수 있고, 중량 10 Kg 물체를 팔로 들 수 있으며

3차원 시각정보와 음성 전달 기능을 보유하고

배터리로 30분 이상 연속 가동할 수 있는 플랫폼을 제작하였다

고성능 로봇 손의 개발의 경우는

손 길이 185 mm, 폭 95mm, 손가락 길이 87 ~ 127 mm 중량 910 g 이며

총 자유도가 12인 로봇 손을 완성하였으며 손에는

DC 모터와 유성 치차 감속기

정전용량 형 3축 힘 센서

압력감지 형 촉각 센서

Power PC 705 300MHz CPU

가 장착되어 있다.

원격조작 플랫폼은 로봇에 대하여 각 부위나 동작별 지시가 가능하고 음성 전달이 가능하며 근거리는 무선조작, 원거리는 통보 망을 통한 원격조작이 가능하며 작업자에 대해서는 실시간 3차원 시각정보와 촉각정보를 받을 수 있는 원격조작 플랫폼을 개발하는 것이다 개발된 시스템은

포위형 디스플레이: 수평시각 150도, 수직시각 117도 9개의 스크린으로 구성된 디스플레이

Head Tracking형 HMD(Head Mount Display): 시간지연 2 ms, 측정정도 0.5 cm

스피커 8대를 사용한 입체음향, 고속 무선통신시스템, 8대의 CCD카메라를 사용한 조작 지원용 시각정보 시스템

신체 감각 표시시스템; 로봇의 이동 중 느끼는 허리 부의 가속도, 기준 상태에서의 움직임이 조작자가 알 수 있게 하는 표시장치 등을 포함하여 개발되었다.

가상 로봇 플랫폼의 연구에서는 휴머노이드 로봇의 가상 플랫폼을 소프트웨어로 작성하고 이를 실제 로봇의 움직임을 시뮬레이션 할 수 있게 하는 연구로

동력학 시뮬레이션: 개 링크, 폐 링크, 동적 변화, 간섭, 충돌 등의 문제 해결

센서 시뮬레이션: 힘, 자세, 가속도, 시각 센서에 대한 시뮬레이션

기본 동작 Library: 직진, 회전, 계단 오르내리기, 경사면 등에 대한 보행 라이브러리와 팔의 움직임에 따른 밸런스 라이브러리

등이 개발되었다. 1 단계에서 개발된 플랫폼은 2 단계의 응용연구에 활용되어 2002년 연구개발 종료 시 그 성능과 유용성을 평가받게 된다.

(다) EU

① 연구개발 추진체계

유럽연합 연구개발 프로그램은 유럽연합의 연구, 기술개발 및 데모 (RTD: Research, Technological development and Demonstration)활동의 우선 순위를 결정하는 Framework Programme(FP)과 1985년에 시작되어 29개 회원국이 산업기술을 공동

개발하는 EUREKA 프로그램이 주축을 이루고 이 외에도 IMS(Intelligent Manufacturing System)과 같은 유럽연합과 다른 나라들이 공동으로 수행하는 국제공동연구 등이 포함된다.

유럽연합은 1994년부터 1998년까지 제 4차 RTD Framework Programme (FP4)를 거쳐 1998년에서 2002년까지 수행하는 제 5차 RTD Framework Programme (FP5)를 수행 중에 있다. 총 예산 132억 1500만 ECU로 추진되었던 FR4는 EC(European Commission)이 118억 7900만 ECU Euratom이 13억 3600만 ECU를 출자하였다.

FP4에서 추진되었던 프로젝트를 살펴보면

Information and Communications Technology 중 ESPRIT라고 명명 지어진 Information Technology 프로젝트

Industrial Technologies 중 BRITE/EURAM이라 명명 지어진 Industrial and Materials Technologies 프로젝트

제 3국 및 국제기구와의 협력 프로그램 중 INCO(International Cooperation) 프로젝트 등이 로봇에 관한 연구와 연관이 있다.

FP5는 총 예산 149억 6000만 유로(euro)중 European Community가 137억 유로 Euratom이 12억 6000만 유로를 투자하여 추진되고 있으며 연구개발 프로그램은

Quality of life and management of living resources

User-friendly information society (IST)

Competative and sustainable growth (GROWTH)

Energy, environment and sustainable development (EESD)

등 4개의 테마별 연구개발 프로그램과 Horizontal Programme인

Confirming the international role of Community research (INCO II)

Promotion of innovation and encouragement of SME participation

Improving human research potential and the socio-economic knowledge base

Joint Research Center

를 운영하고 있다.

EUREKA프로그램은 유럽 산업 경쟁력을 강화하기 위하여 1985년 발족하였으며 현재 29개 유럽 국가와 유럽연합이 참여하고 있다. EUREKA 프로젝트들을 참여하기 위하여서는 적어도 다른 2개의 EUREKA 회원으로 된 파트너를 포함시켜야 하는데 그 중 하나는 그 분야에서 기술 혁신적이고 제품개발에서 기술적 진보를 목표로 하고 시장을 대상으로 하고, 연구 자금 투입을 하는 산업체가 포함되어야 한다. 각 국가는 국별 기준에 따라 파트너에 matching fund를 지원할 수 있다. EUREKA프로젝트의 특징은 시장성을 중시하고 Bottom Up형태의 프로젝트 신청 방식이다. EUREKA은 프로그램을 9개의 기술분야로 분류하고 있으나 이는 통계 목적일 뿐 프로젝트 신청과는 상관없으며 신청자는 시한이나 분야에 관계없이 프로젝트 지원을 신청할 수 있다.

1999년 기준으로 총 646개의 프로젝트가 진행 중이며 123억 9481만 유로가 지원되었고 3,000개의 기관이 참여하였다.

로봇과 자동화분야는 그 중 86개의 프로젝트에 3억 1581만 유로가 지원되었으며 종료된 프로젝트는 총 180개에 10억 8579만 유로가 지원되었다.

② 주요 연구개발 프로그램

유럽연합이 추진하고 있는 로봇에 관한 연구 프로젝트는 RTD(Research, Technological Development and Demonstration) activity의 우선 순위를 정하여 집행하는 Framework Programme에 의하여 지원되고 그 이외에 INCO(International Cooperation), IMS(Intelligent Manufacturing System) 등의 국제협력과 EUREKA 프로그램의 일환으로 지원되고 있다.

㉞ 유럽연합 FP-4의 로봇 연구개발 프로그램

FP-4 프로그램 중 로봇에 관한 연구는 주로 ESPRIT (Information Technology) 프로그램의 일환으로 지원되고 있고 IMT 국제 협력 프로그램과 관련된 연구는 BRITE/EURAM 3의 카테고리 지원되고 있다. ESPRIT 프로그램의 연구 도메인 중 로봇과 관련된 연구는

Domain 1: Software Technology (ST)

Domain 4: Long Term Research (LTR)

Domain 6: High Performance Computing and Networking (HPCN)

Domain 8: Integration in Manufacturing (IIM)

에 집중되어 있다. 프로젝트의 성격을 알아보기 위하여 몇 개의 프로젝트 내용을 소개하면

ADVOCATE (Domain 1)은 수중로봇의 가격과 활용도를 높이기 위하여 진단과 제어 시스템에 지능을 부여하는 연구로 구체적으로 무인 잠수정 2 기(STN과 IFREMER)에 필요한 새로운 소프트웨어 시스템을 CORBA구조와 AI기법인 Belief Networks and Hybrid Neuro-Symbolic기법을 써서 개발하는 것이다.

NARVAL (Domain 4)은 이동형 로봇이 인간의 도움을 받지 않고 자연 환경을 목표 삼아 운행할 수 있는 시스템을 개발하려는 것으로 로봇과 환경사이 그리고 로봇의 위치와 방향에 대한 불확실성을 계속 제어함으로써 신뢰성을 확보하려는 것이다. 불확실성을 제거하기 위하여 로봇은 수동형 환경 모니터링 대신 능동형으로 주위환경을 탐사하고 목표를 정하고 위치를 기억하여 불확실성의 정도를 임무수행에 지장을 주지 않는 수준으로 줄이는 것이다

MINIMAN(Domain 4)은 크기가 수 cm이내인 초소형 마이크로 로봇시스템을 개발하고 센서 시스템과 제어기법을 활용하여 초 정밀 작업을 수행하려는 것이다. 작업은 CCD카메라를 장착한 현미경 하에서 이루어지게 되며 10 nm수준의 작업이 가능케 된다 이 프로젝트를 위하여 매우 작고 정밀한 액츄에이터, 특수 로봇 손(바늘형, 피펫형, 접착제 살포형, 전기식 탐침형, 바이오 센서 장착 손 등 다양한 형태)가 개발되어

생명과학, 유전자 과학에 사용될 것이다.

LOTUS (Domain 6)은 원격 조정되는 로봇 자동차에 여러 센서를 장착하여 지뢰를 탐사하는 시스템을 개발하려는 것으로 센서는 GPR(Ground Penetrating Radar), 적외선 센서, 금속 탐지기 등 다양한 센서가 사용되고 실시간 작업을 위하여 데이터 융합과 컴퓨터 구조에 대한 연구도 병행된다.

㉔ EUREKA

EUREKA 프로그램은 이미 기술하였듯이 산업계로부터 제출 받은 연구계획서를 Bottom Up 방식으로 지원하는 형태이다. 따라서 이 프로그램은 특성상 거대 프로젝트보다는 산업화에 밀접한 작은 프로젝트의 모임인 성격이 강하다. EUREKA 프로젝트 중 Robotics/Production Automation으로 분류된 프로젝트 가운데 로봇과 관련 있는 프로젝트들에 관하여 프로젝트 성격을 검토하기 위하여 몇 개의 프로젝트를 구체적으로 설명하면

ACR (E!1763)은 1996년에서 1999년까지 42개월간 수행된 프로젝트로 총 연구비는 2,600,000 유로이다. 이 프로젝트는 기존 수동 청소기계에 항법기능을 추가하여 슈퍼마켓이나 다른 동적 환경에서 자율적으로 바닥을 청소하는 청소용 로봇을 개발하려는 것이다. 이를 위하여 프로젝트에서는 신뢰성이 높은 초음파센서 항법시스템, 지도에 의한 자동 운행경로 계획, 자연물 표시를 이용한 자체 학습, 안전 연구, 근거리 장애물 검출을 위한 VarioTech Wing의 통합, 자동 도킹 기능 등이 연구된다.

EUROBONET (E!1750)은 1997년부터 2001년까지 40개월 동안 2,500,000 유로를 지원 받아 수행되는 프로젝트로 EUROBONET이라는 연구기관과 가상연구기관이 참여하는 범 유럽 인터넷망을 구성하여 목재산업의 로봇 활용을 지원하려는 것이다. 지원할 서비스는 목재회사의 로봇 셀 설계, 로봇 프로그래밍, 로봇 셀 배치, 공정한 로봇 성능실험, 훈련 등이다.

MITHRA (E!110)은 1986년부터 1993년까지 84개월 동안 26,800,000 유로의 자금을 지원 받아 수행되었던 연구 프로젝트로 원격 감시와 위급 시 활용할 이동형 로봇을 개발하려는 것이다. 로봇은 3 단계로 구분되어 쓰여지는데 초보자들을 위하여서는 사무실이나 공공장소의 침입, 화재, 누수, 단전 등을 감시하는 용도로 사용하고 중급자들에게는 산업환경에서 정보 수집을 위하여 사용되고 고급자들에게는 화재, 화학 오염, 방사능 오염 등 위급상황 시 환경에 대처할 수 있는 기능을 제공한다.

AMP (E!18)은 1987년부터 1992년까지 68개월 동안 48,000,000 유로를 지원 받아 수행된 연구 프로젝트로 국가적 재난이나 테러 시 일반인들의 안전확보에 사용할 수 있는 3세대 고속 이동 로봇을 개발하려는 것이다. 이 프로젝트를 통하여 2 종류의 로봇이 개발되도록 되었는데 AMR 1은 위험상황 주변에서 고속으로 이동하며 물건을 나를 수 있는 로봇이며, AMR 2는 위험지구 내에서 계단이나 경사로, 협로 등을 다니며 관찰이나 구조 작업을 할 수 있는 로봇이다. 이 프로젝트를 통하여 이동, 탑재형 동력, 항법, 센서, 인공시각, 통신 등 다양한 기술의 개발을 추구하고 있다.

CITRUS-ROBOT(E1176)은 1987년부터 1999년까지 135개월간 12,500,000 유로의 연구비를 지원 받아 수행되어온 프로젝트로 로봇에 특수 손을 장착하고 비전시스템을 이용하여 감귤을 인식하고 손으로 따듯이 상처를 주지 않고 따는 농업용 로봇을 개발하는 것이다. 이를 위하여 프로젝트에서는 비전시스템을 사용하여 과일을 인식하는 기술, 감귤을 하나씩 따서 운반하는 기술, 과일의 품질을 구분하고 선별하는 기술, 수확기계를 자동으로 운전하는 기술, 수확 프로세스를 효율화하는 기술의 개발을 추구하고 있다.

나. 2001 서비스로봇 워크숍 (본 보고서 제 2권에 수록)

2001년도 서비스로봇 3차년도 연구결과를 발표하고 서비스로봇의 개발된 기술을 공유하기 위한 2001년도 서비스 로봇 워크숍이 2001년 11월 30일부터 12월 1일까지 보광 휘닉스 파크에서 열렸다. 워크숍의 주제는 서비스로봇 기술의 신뢰성이었으며 제1세션은 공공 서비스용 로봇, 제2주제는 재활/복지용 서비스 로봇, 제3주제는 토목 건설용 서비스로봇으로 진행되었다. 워크숍의 Proceeding은 본 보고서 제2권에 수록되었다.

다. 2002 서비스로봇 SIG(Special Interest Group) 워크숍 (본 보고서 제2권에 수록)

서비스로봇의 핵심 공통 기술분야 중 세 분야를 선정하여 Special Interest Group을 형성하였다. 선정된 분야는 Control Architecture, Vision 및 Compliance Control분야로 각 분야마다 과학기술연구원과 과학기술원 연구팀들이 함께 참여하여 대상분야에 대한 연구토론을 하고 서비스로봇 기술개발 사업에 용이하게 쓸 수 있도록 기술의 표준화를 시도하였으며 나아가 유관 연구기관에서 활용할 수 있도록 연구회 보고서를 발간하는 것이 목적이다. 2002 서비스로봇 SIG 워크숍은 2002년 6월 24일과 25일 양일간 용평 리조트에서 개최되었으며 국가 과제중 서비스로봇 기술개발 사업과 가장 관련이 많은 뇌 신경정보학 사업단과 연석으로 기술을 교류하고 연구협력하는 기회를 가졌다. 본 워크숍에 대한 Proceeding은 본 보고서 제2권에 수록되어 있으며 SIG의 연구발표에 대한 논평과 서비스 로봇 기술개발 사업단과 뇌신경정보학 사업단간의 연구협력방안도 같이 수록되어있다.

제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

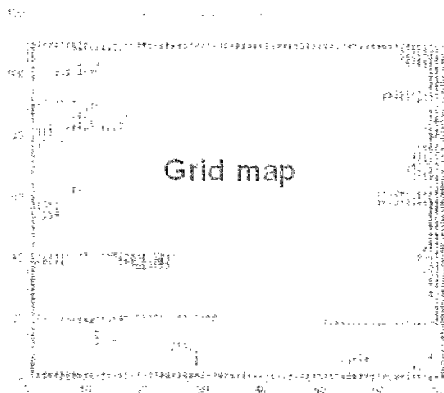
1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

1.1 이동기술

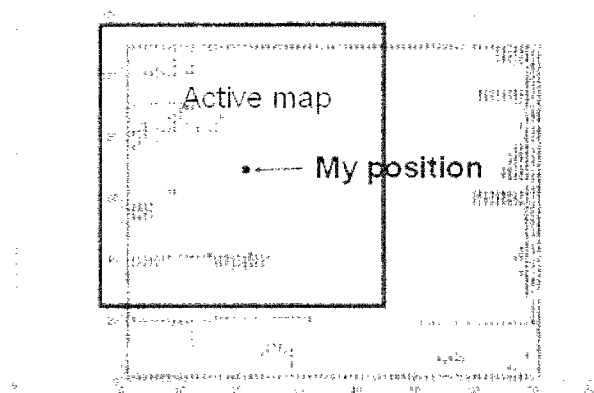
가. 서비스로봇의 경로계획 및 운동제어 기술

(1) 개요

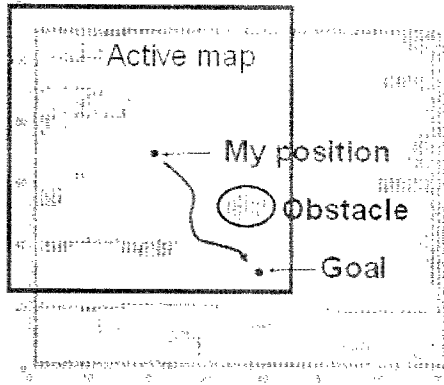
본 연구에서 다루는 운동 계획 및 제어 기술을 순서대로 나타내면 그림 3.2.1.1.1과 같다. 이동해야 할 목표점이 주어지면 이미 생성되어 로봇에 입력된 여러 격자 지도 중 현재 위치를 포함하는 지도를 선택한다. 이 격자 지도는 Localization에 사용되고 계산 속도를 빠르게 하기 위해 크기가 작은 지역적 경로 계획을 목적으로 하는 Active map을 정의한다. 이 상태에서 센서에서 새롭게 얻어진 데이터를 이용하여 Active map을 갱신하면서 경로 계획을 수행한다. 계획된 경로를 통해 속도 정보를 포함한 여러 점들로 구성된 궤적을 만들고, Localization을 계속 수행해 나가면서 이 궤적을 추종할 수 있는 제어를 수행한다.



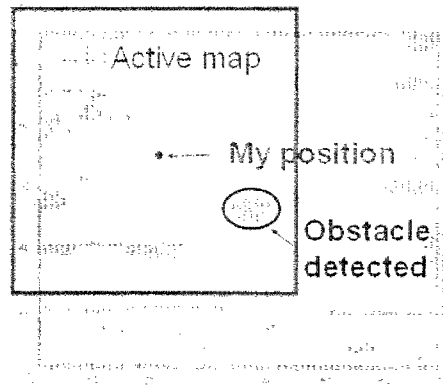
(a) 격자 지도 불러오기



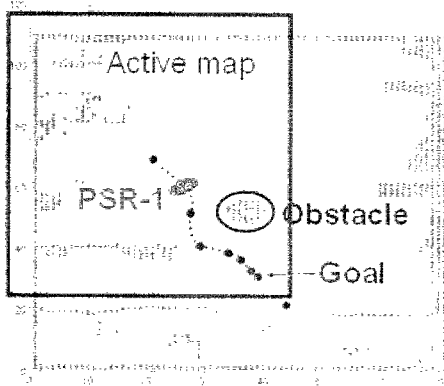
(b) Active map 생성



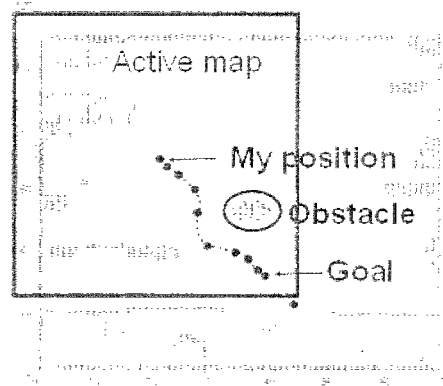
(c) Active map 갱신



(d) 경로 계획



(e) 궤적 생성



(f) Localization 및 궤적 추종

그림 3.2.1.1.1 운동 계획 및 제어 순서

(2) 궤적 추종 기술

(가) 병진 운동

PSR의 경우 홀로노믹(Holonomic) 전방향 구동 메카니즘을 가지므로 별다른 어려움 없이 계획된 궤적을 추종할 수 있다. 단지, 경로 계획이 steepest descent 방식으로 계획되므로 경로가 진동할 수 있다. 따라서 이를 해결하기 위해서 P gain과 더불어 I gain을 이용한다.

경로 계획기로부터 온 경로 점 집합을 한 sampling time에 하나씩 순차적으로 목표점으로 해서 현재 위치와의 차이를 통해 제어를 수행한다. 현재 속도 $u(k)$ 는 다음 식에 의해

서 구해진다.

$$\begin{aligned}
 u(k) &= K_p \cdot e(k) + K_I \cdot T \cdot \sum_i e(k-1) \\
 &= u(k-1) + K_p + (K_I \cdot T) \cdot e(k) - K_p \cdot T \cdot \sum_i e(k-1)
 \end{aligned}$$

여기서 $e(k)$ 는 k 번째 시간에 목표점과 현재 위치와의 오차이며, K_p , K_I 는 각각 P gain, I gain값으로 현재 K_p 는 4.3778, K_I 는 0.5970의 값을 가진다. 그리고 T 는 sampling time이다.

또한 급격한 속도 변화를 피하고 과도한 속도로 진행하는 것을 막기 위해서 속도와 가속도에 적절한 Saturation을 주도록 한다. 실제로 Localization이 수행되었을 때와 새로운 경로가 계획되었을 경우에는 위치의 불연속성이 존재하므로 부드럽게 로봇이 움직이기 위해서는 적절한 Saturation이 필요하게 된다.

(나) 회전 운동

경로 계획기는 2차원 상에서의 목표 좌표점을 주므로 x방향 속도와 y방향 속도밖에 제어 하지 못한다. 따라서 회전 운동을 위해서는 별도의 제어 로직을 두어야 한다. 그림 3.2.1.1.2은 회전 운동에 대한 순서를 보여 주고 있다.

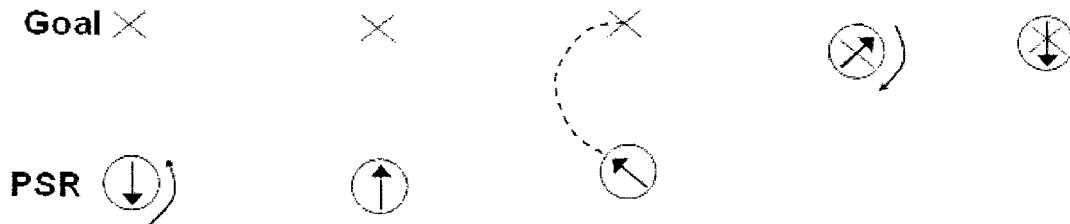


그림 3.2.1.1.2 회전 운동 순서

우선 목표 지점을 등지고 있는 경우에는 센서의 시야를 확보하기 위해 목표점이 위치하는 방향으로 회전을 한다. 그리고 목표점을 향해 진행하는 도중에는 속도 방향으로 회전을 하는데, 이는 트레일러를 끌고 진행할 수 있게 하기 위해서이다. 목표점과 더불어 목표 방향까지 지정되어 있다면, 목표점에 도착하여 제자리 회전을 통해 수행한다. 회전 운동은 가감속을 통해 이루어져야 안전하지만 트레일러의 이동 궤적을 로봇 궤적과 같게 하기 위

해서는 최대한 빨리 원하는 방향으로 회전을 하는 것이 중요하다. 따라서 이 둘 사이의 적절한 설정이 필요하다.

(4) 운동 계획 및 제어 모듈의 통합

그림 3.2.1.1.3은 지금까지 설명한 운동 계획 및 제어 모듈의 통합된 모습을 보여주고 있다. 여기서 Navigation module이라는 것은 각종 Navigation관련 구성 요소들을 효율적으로 통합하고 다른 요소들과의 인터페이스를 하는 역할을 한다. Behavior는 경로 계획기로부터 경로 집합을 받아서 궤적 추종 제어를 담당한다. 그림 상의 화살표들은 구성 요소들 사이에 이동하는 정보들을 보여주고 있고, 표 3.2.1.1.4에는 입력 정보와 출력 정보를 중심으로 더 자세히 설명되어 있다.

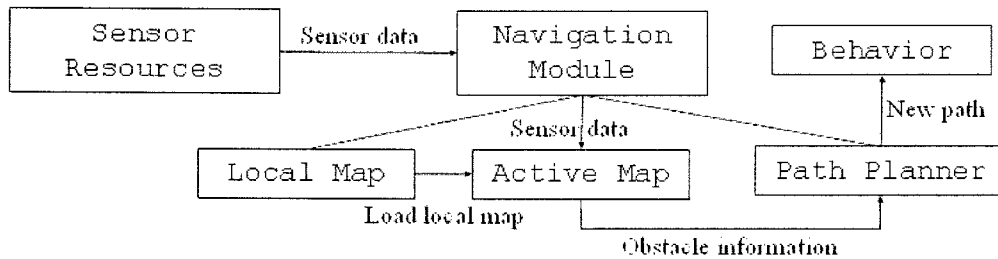


그림 3.2.1.1.3 운동 계획 및 제어 모듈의 통합

표 3.2.1.1.4 각 요소별 입력 출력 정보

	Input	Output
Local Map	-사용자에 의해 File로 입력 받음.	- 특정 영역의 Grid map (to Active Map & Localizer)
Active Map	-Laser scan data (from Resource) -현재 위치 (from Localizer) -특정 영역의 Grid map (from Local Map)	- Grid map (to Path planner)
Path Planner	-Goal position (from behavior) -Grid Map (from Active map)	- Path Set (to behavior)
Behavior	- Path Set (from Path planner)	- Velocity command (to Motion board)

(4) 기타 이동 기술

여기서는 일반적인 Navigation 기술이 아닌 특정 목적을 위해 구현된 로봇의 이동 기술에 대해서 설명을 한다. 사용자가 이미 지정한 속도 프로파일을 그대로 주행하는 방법과 조이스틱 등으로 사용자가 로봇을 직접 제어하는 방법, 트레일러 도킹을 위해 이동하는 방법 등, 크게 이 세 가지 종류로 구분된다. 이들은 각각 하나의 Process로써 구현이 되었다.

(가) 속도 프로파일로 주행하기

이는 사용자가 오프라인으로 속도 프로파일을 만든 후, 이를 로봇에 입력하여 주행하는 방식이다. 따라서 센서 입력을 받거나 로봇 스스로 작업 계획을 하는 일은 완전히 배제된 것이다. 이는 주로 로봇의 테스트를 위해서 구현된 것으로 기본적인 주행 실험, 제어부의 Gain 설정, 로봇 이동부의 Calibration 등에서 사용되었다.

현재 구현된 것은 다음과 같은 세 가지 종류로써 1,2번과 3번의 주된 차이점은 로봇 이동부의 역기구학을 로봇 스스로가 푸는지 아니면 사용자가 풀어서 그 결과 값을 직접 넣어 주는지의 차이이다.

- ① 로봇 속도 프로파일 (V_x, V_y, Ω)을 만들어 Global 좌표 상에서 구동하기.
- ② 로봇 속도 프로파일 (V_x, V_y, Ω)을 만들어 Local 좌표 상에서 구동하기.
- ③ 로봇의 모터 속도 프로파일 구동하기.

(나) 조이스틱으로 직접 제어하기

현재 이 방법으로는 원격지의 컴퓨터에 연결된 조이스틱을 통해 제어하는 방법과 로봇의 컴퓨터에 직접 연결된 조이스틱으로 제어하는 방법, 이 두 가지가 구현되어 있다. 원격지의 컴퓨터와는 TCP/IP 프로토콜로 통신을 하며 이 차이를 제외하고, 나머지는 서로 동일하게 구현되었다. 실제로 많이 사용되는 기능으로 로봇은 손쉽게 원하는 곳으로 옮기거나 각종 요소들의 성능 시험 등에서 사용된다.

(다) 트레일러 도킹하기

일반적으로 PSR은 트레일러를 끌고 이동하다 방과 같은 좁은 공간에 들어가야 할 때 트레일러를 풀고 작업을 한 후 다시 나와서 결합하는 방식으로 작업을 진행한다. 따라서 로봇은 트레일러 위치를 어느 정도 알고 있으며, 상황에 따라서는 센서를 이용해서 트레일러의 위치를 알게 된다. 트레일러 도킹 과정은 어느 정도 트레일러에 가까운 위치에 온 이후에 진행되며 두리번 거리며 찾기와 정확히 결합하기 이 두 과정으로 나뉜다.

두리번 거리며 찾기 작업 중에는 로봇은 왼쪽, 오른쪽 약 45도씩 회전하면서 서서히 진행

하는데, 이 과정은 트레일러의 결합부가 로봇 후미에 있는 비전 시스템에 감지될 때까지 계속된다. 정확히 결합하기는 이 이후의 작업으로 트레일러와 도킹하기 위한 정확한 위치로 로봇을 미세하게 이동시키는 작업이다. 비전 시스템으로부터 트레일러 결합부의 위치를 정확히 측정하여 수행하는데, 로봇이 어느 정도 정확한 위치로 이동할 수 있는가는 비전 시스템의 캘리브레이션이 얼마나 정확히 되었는지에 따라 달라진다.

나. localization

(1) landmark를 이용한 localization method

artificial landmark가 존재하는 공간상에서의 robot의 localization을 구현하였다.

방법 : forward kinematics로부터 이동로봇의 예상되는 위치를 구한다. laser scanner data 중 특정한 template를 만족하는 local 좌표 계의 landmark를 detect한다. 그 detect 되어진 표식과 global 좌표 계의 landmark를 Point-to-Point Matching Algorithm을 사용하여 200msec 마다 로봇의 위치를 보정한다. 실험에서 Artificial landmark로는 3개의 연속된 작은 기둥을 사용하였다.

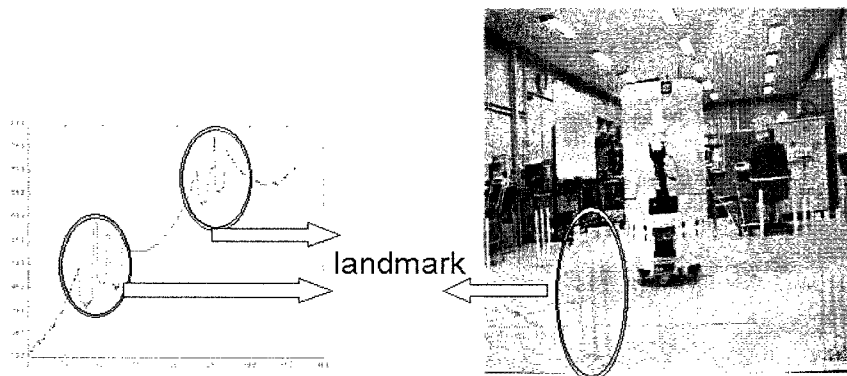


그림 3.2.1.1.5

- 정적인 환경에서의 localization 실험 : robot position : (1500, 30) 0 degree을 정확하게 구한다.

-폭 1.4 m정도의 복도 주행 실험 : 로봇의 직경이 약 0.95 m이다. 폭이 약 1.4 m인 복도를 성공적으로 주행하였다.



그림 3.2.1.1.6

- 표식이 장애물에 의해 가려졌을 경우 실험 : landmark가 동적인 장애물에 의해 가려졌을 경우에도 localization 가능, 로봇위치 오차는 5cm 이내. 각도 오차는 3도 이내이다.

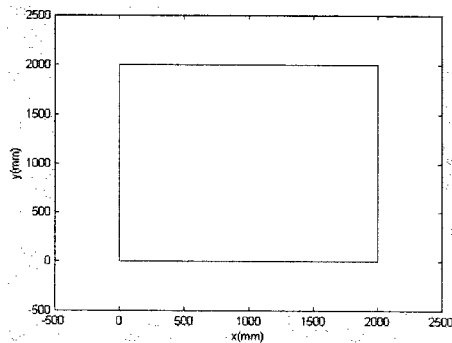


그림 3.2.1.1.7 실제 주행경로

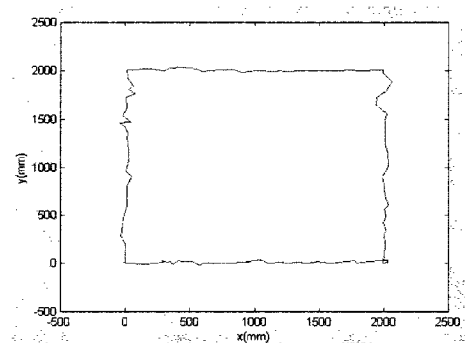


그림 3.2.1.1.8 표식을 사용한 localization 결과 (오차정도: 5cm 이내)

(2) probabilistic localization method

확률론적 localization method를 사용하는 이유는 주로 네 가지의 불확실성(stochastic and unpredictable Environment, stochastic Robot, limited and noisy sensor, inaccurate models) 때문이다.

따라서 이러한 probabilistic localization method의 장점은 다음과 같다.

- Can accommodate inaccurate models

- Can accommodate imperfect sensors
- Robust in real-world applications
- Best known approach to many hard robotics problems

확률론적 자기 위치 추정 알고리즘은 크게 Prediction Phase와 Update Phase의 두 단계로 나누어진다. 흔히 motion model이라고 불리는 Prediction Phase에서는 다음의 상태(s_{t-1})를 오직 그 전 단계의 상태(s_t) (Markov) 와 그 때에 control input(m)에 의해 예상한다. Measurement model 또는 sensor model이라고 불리는 Update Phase는 센서 정보(o_t)로부터 Bayes theorem를 이용하여 현재 위치에 있는 확률을 구한다.

$$b(s_t | m) = \eta p(o_t | s_t, m) \int p(s_t | s_{t-1}, a_{t-1}, m) b(s_{t-1} | m) ds_{t-1}$$

-본 localization scheme의 타당성 : [1], [2]에서 여러 localization methods를 비교 분석하였다. Sensor Data가 충분할 경우에는 Scan matching and Kalman Filtering은 훨씬 accurate하고 efficient한 결과 값을 얻을 수 있지만, model이 부정확한 실제 환경에서는 오히려 Markov Localization이 robust함을 보여주었다. [2]에서 Matching Methods에서는 point-to-line matching 방법과 point-to-point matching 방법을 비교하였다. point-to-line matching 방법은 line extraction 할 수 있는 polygonal environment에서만 사용될 수 있으나 비교적 정확하다. 반면에 point-to-point matching 방법은 polygonal하지 않은 환경에서도 사용할 수 있으나 잘못된 matching할 경우가 있다. 이로부터 본 localization method는 Monte Carlo Frame을 가지므로 Markov처럼 robust하며 Markov보다 계산상 효율적이다. 또한 Similarity Measure Function에서 Matching Algorithm을 사용하여 accurate한 결과 값을 얻을 수 있다. 두 개의 Similarity Measure Function중 point-to-point matching과 line-to-line matching방법을 가짐으로써 환경에 따라 적절하게 사용할 수 있다.

(가) Motion Model

Motion Model은 이동로봇이 전 단계에서부터 현재 단계까지 이동한 motion을 odometry 정보를 바탕으로 하여 motion model을 gaussian distribution을 갖는 model로 만든 것이다. 이 motion model에서 odometry에 대한 신뢰도(불확실성)를 나타낸다.

$$b(s_{t+1}) \leftarrow \int p(s_{t+1} | a_t, s_t, m) b(s_t) ds_t$$

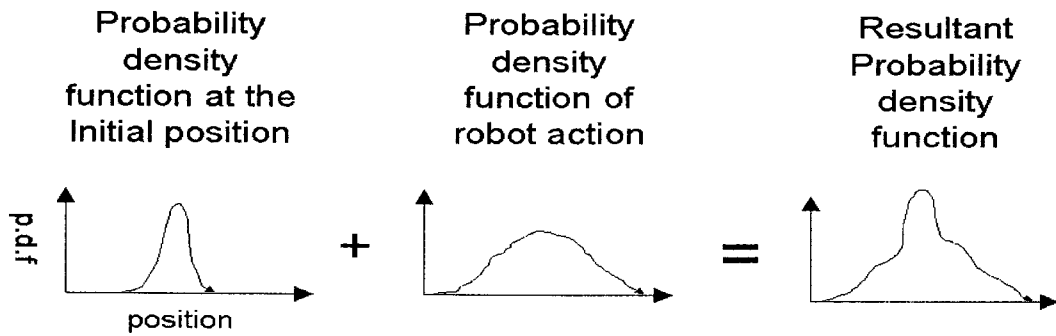


그림 3.2.1.1.9

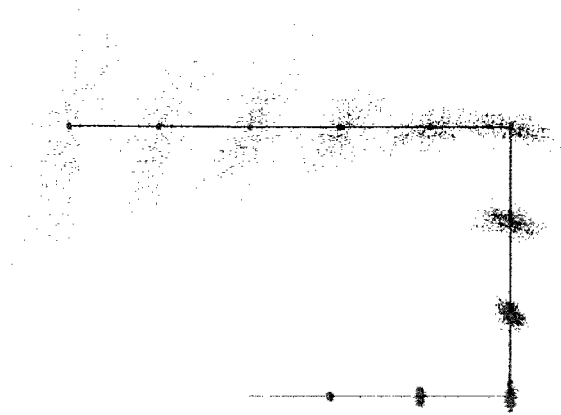


그림 3.2.1.1.10

PSR1은 어느 임의의 시간에 임의의 방향으로 이동 가능한 omni-directional, holonomic robot이므로 실내에서 서비스로봇으로 역할을 수행하는데 장점을 가지지만 two wheel differential robot과 비교하였을 때 상당히 나쁜 odometry 정보를 갖는다. 따라서 motion model이 더욱 중요하다. 실제 PSR1의 motion model은 여러 번의 실제 실험을 통하여 구하였다. reference position과 odometry position과 real position을 비교하여 구한다.

(나) Sensor model

Laser Scanner와 같은 2D Range Sensor와 Gyro를 사용하였고 이들의 센서정보에 불확실성을 주고 센서정보와 map정보로부터 예상되는 정보를 비교하는 similarity measure function을 Unmodified Environment에서 사용한다는 가정 아래 구현하였다. 첫 번째 similarity function은 단순한 image based function이다. 각 각도 resolution에 해당하는 distance의 차이정도에 따라 similarity를 준다. 두 번째의 함수는 Hough Transform을 이용하여 환경에 존재하는 벽과 같은 직선들을 구하여 그 상응하는 직선들의 ρ , θ 값을 비교하여 similarity를 준다. 이는 특히 로봇의 orientation을 위한 강력한 도구이다.

$$b(s_{t+1}) \leftarrow \eta p(o_{t+1} | s_{t+1}, m) b(s_{t+1})$$

-Image based Similarity Measure Function : 각 sample point의 위치와 map정보로부터 예상되어지는 361개의 Reference Distance와 실제 laser scan distance 361개를 비교하여 그 차이의 합으로서 similarity를 측정하는 함수이다.

measure Functions에 대한 타당성을 증명하기 위해서 static Environment에서의 실험을 가정한다. 따라서 한 sample point의 Reference Distance를 Scan Distance로 대체한다. 그 Scan Distance와 모든 sample point의 Reference Distance와 비교하여 그 차이 값으로 Measure를 구한다. 첫째, sample point의 각도는 그대로 위치(x, y)만 변화시킨다.(10cm) (Figure 3 (A)) 둘째, sample point의 위치는 그대로, 각도만 변화시킨다. (0. 5도) (Figure 3 (B)) 아래 결과로부터 우리는 충분한 sample들이 있다면 이는 타당한 similarity measure를 제시함을 알 수 있다.

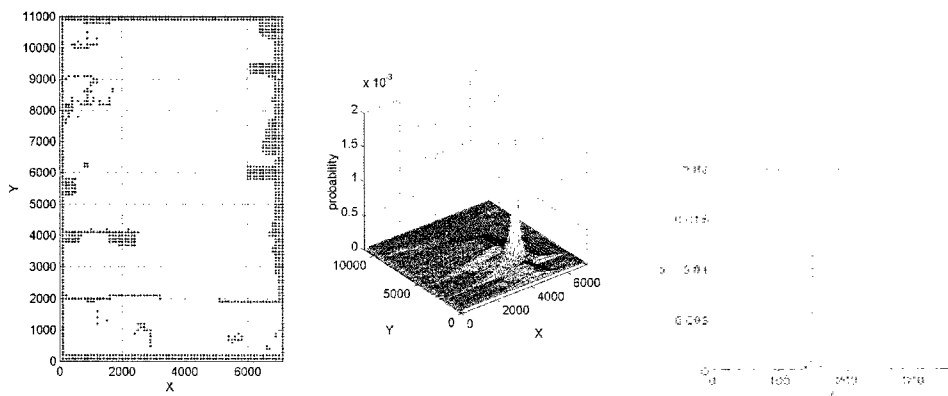


그림 3.2.1.1.11

-Angular Similarity Measure Function : Map은 벽과 같은 직선의 정보를 미리 갖고 있다. sample point의 position을 알고 있으므로 global coordinate에서의 직선들의 ρ , θ 값을 sample point local coordinate에서의 직선(ρ , θ 값)으로 conversion 할 수 있다. 절대 좌표계에서 ($X_0, Y_0, \theta_0=0$)에서 본 ρ , θ 를 샘플 위치 좌표계 (X_1, Y_1, θ_1)에서 본 ρ' , θ' 로 전환하는 식은 다음과 같다.

$$\rho' = \rho + \cos\theta (X_0 - X_1) + \sin\theta (Y_0 - Y_1)$$

$$\theta' = \theta - \theta_1$$

실제 센서정보로부터 Hough Transform을 이용하여 직선들을 구할 수 있다. Scan Data로부터 얻은 추출해낸 line들과 그 상응하는 Reference Line들의 ρ , θ 값을 비교하여 similarity를 구한다. 즉, 이는 line to line matching method이다. 이는 특히 ploygonal한 office환경에서 로봇의 정확한 orientation을 위한 강력한 도구이다. 아래 그림은 Laser Scan Data로부터 hough Transform 한 결과를 ρ , θ , voting number의 축으로 나타낸 것이다. 두 개의 main line이 있는 환경임을 알 수 있다.

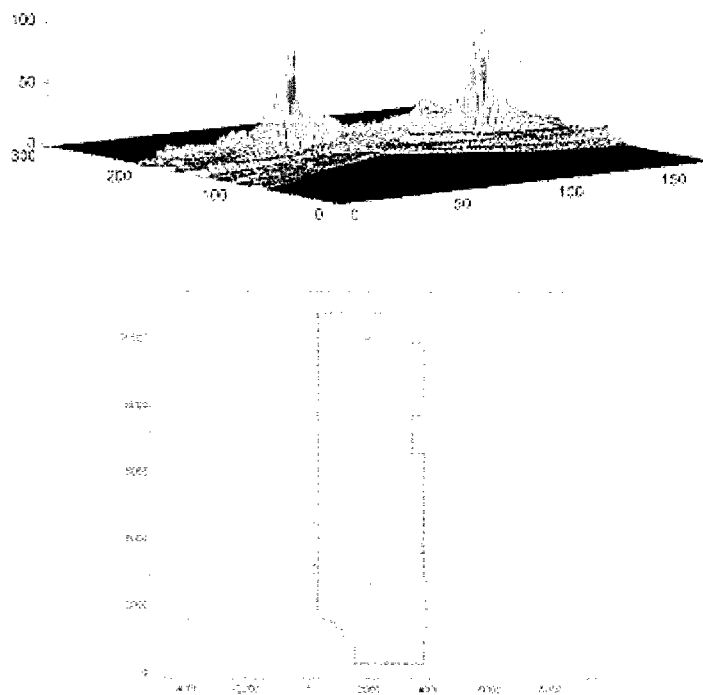


그림 3.2.1.1.12

-Reference Distance 구하는 알고리즘: sample point와 grid map으로부터 그 sample point가 0.5도 마다 가지는 예상되는 reference Distance를 구하는 알고리즘이다. 레이저가 최대로 감지할 수 있는 거리를 8m으로 간주하여 open space로 생기는 unlimited range는 8m으로 놓음으로써 무한대의 값을 갖지 않도록 하였다. 알고리즘과 결과는 아래와 같다.

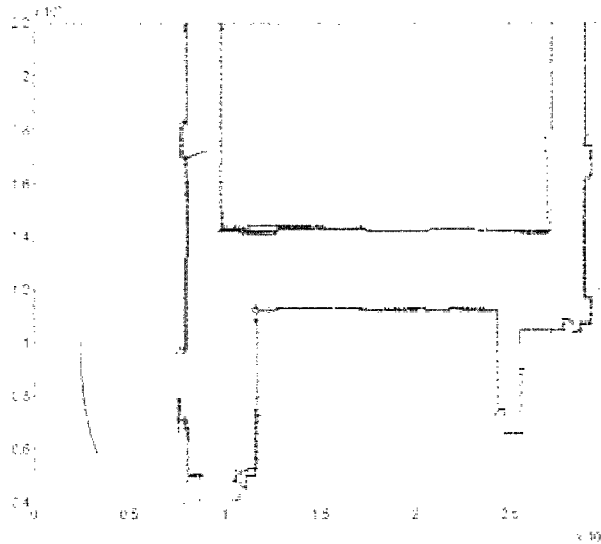


그림 3.2.1.1.13 Set Reference Dist 구한 알고리즘 결과

-Sensor Model 실험 결과 : Similarity Measure Function에 의해 구해진 non-uniform한 확률을 갖는 samples를 구한다. Normalizing Algorithm에 의해 non_uniform한 확률밀도함수를 uniform한 sample로 바꾸어 준다.

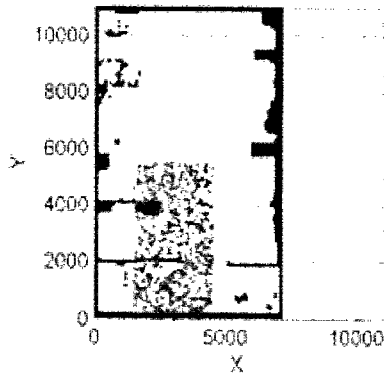


그림 3.2.1.1.14 sensor model 전

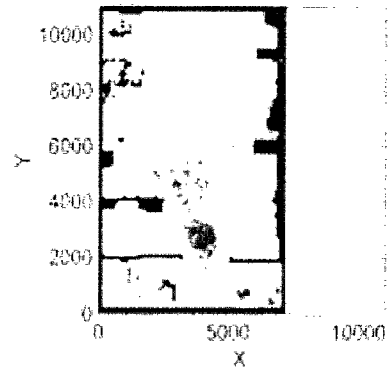
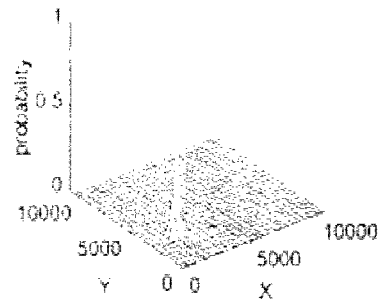
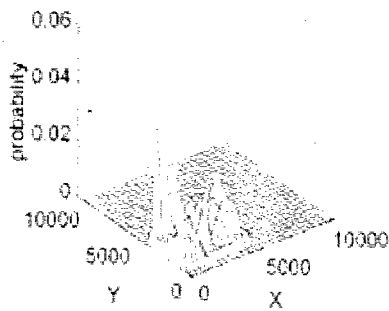


그림 3.2.1.1.15 sensor model 후



	Environment	Accuracy	비고	결론
Measure1	Unstructured Environ	Angular 만 어느 정도 범위에만 들어오면 정확	Feature Extraction 필요 없음	
Measure2	Only structured Environ	Angular accuracy good	Matching Problem과 visibility problem 여전히 존재	다른 연구를 survey하여 계속 보완

(다) Localization in dynamic Environment

동적 환경에서의 localization을 수행하기 위해서는 Filter를 사용한다. Filter의 일반적인 특징으로 다음 세 가지가 있다.

첫째, Local Tracking Problem에서 이용할 수 있다.(global Localization에서 사용 힘들)

둘째, 기본 Markov Localization의 가정에 위배한다.

셋째, Localization Failure로부터 벗어나는데 많은 시간이 소요된다.

Filter란 Scan Sensor Data가 Map과 상이한 센서정보를 가지는 부분을 similarity 비교를 함에 있어 제외할 수 있도록 한다. 두 가지의 Filter를 설명하고 그 실험결과를 보인다.

-Entropy Filter

The entropy $H(l)$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$H(l) = - \sum_l Bel(l) \log Bel(l)$$

Entropy는 임의의 변수의 결과에 대한 불확실성에 대한 측정 measure이다. 그 상태값의 Entropy가 클수록, 로봇이 그 위치에 있을 불확실성은 더 높아진다. Entropy filter는 $Bel(l)$ 이라는 확률에서 센서 데이터로부터 그 상대적인 Entropy의 변화를 측정한다. 그 Entropy 변화는 다음과 같이 정의되어진다.

$$\Delta H(l|s) := H(l) - H(l|s)$$

$H(l|s)$ 는 $Bel(l|s)$ 라는 확률의 Entropy이다. 센서 정보(s)를 통합한 후 Entropy 변화량이 음수이면 로봇은 자신의 위치에 대해 불확실하다는 것이고 변화량이 양수이면 확실성이 높아진다. 따라서 Entropy Filter는 $\Delta H(l|s) < 0$ 이 되는 센서 정보 s를 similarity measure 하는데 있어 제외시킨다.

-Novelty Filter

$$P_n(d_i | l) = 1.0 - \sum_{j \neq i} p(d_j | l)$$

$$P_n(d_i) = \sum_l p_n(d_i | l) Bel(l)$$

Novelty Filter exclude all measurements d
with $P_n(d) > \theta (\theta = 0.99)$

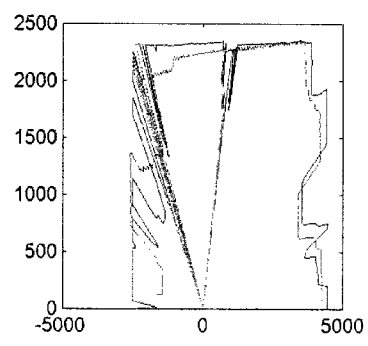
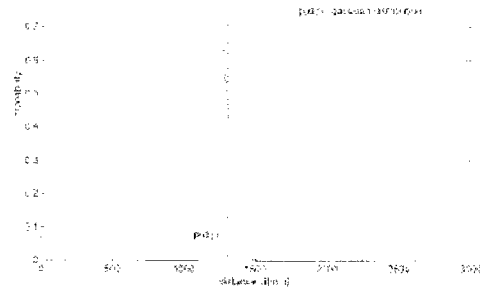


그림 3.2.1.1.16 Entropy Filter

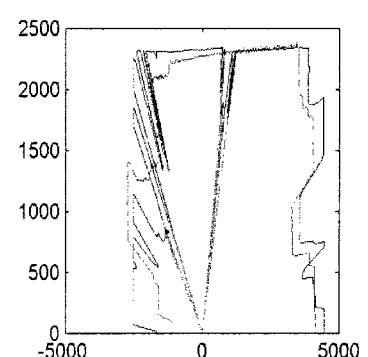


그림 3.2.1.1.17 Novelty Filter

동적 환경에서 Entropy Filter 또는 Novelty Filter를 사용하였을 때 사용하지 않은 경우에 비해 localization 실패의 확률이 적고, 훨씬 정확한 Robot position을 구할 수 있다. 하지만, 일단 localization fail이 되었을 경우 failure recovery 능력에서 두 filter가 차이를 갖는다. Entropy Filter는 Failure Recovery하는 데 오랜 시간이 걸리나 Novelty Filter는 단 시간 내에 이루어지는 장점을 가진다.

-Localization Estimated Position Updated 판단 알고리즘 : Localization 결과 또한 Error값을 가지고 있고 단거리 이동시에는 odometry보다도 더 큰 Error를 가질 수 있기에 꼭 필요한 경우에만 하는 것으로 한다. 꼭 필요한 경우란 robot의 motion model를 기준으로 하여 그 ellipse boundary가 장애물에 부딪히는 경우로 정의하였다.

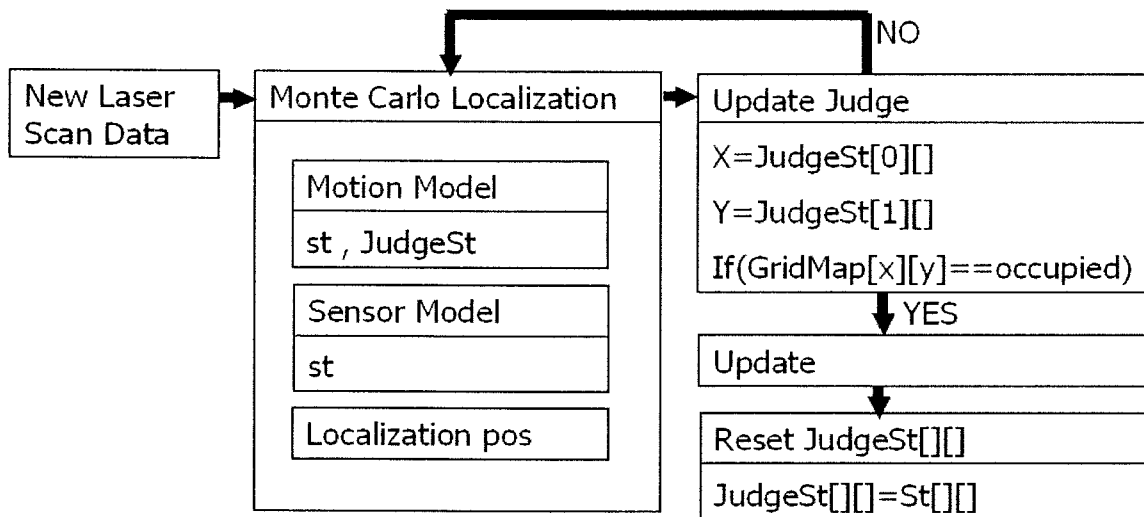


그림 3.2.1.1.18

-Occupied Grid Extension : 실제 로봇은 occupied grid 주변으로부터 로봇의 반지름이내에는 존재할 수 없다. 따라서 실제의 grid map으로부터 occupied grid로부터 로봇 반지름만큼 occupied grid를 확장시키고 그 확장된 occupied grid내에 존재하는 sample point에 대해서는 그 곳에 존재할 수 있는 확률을 0으로 놓는다.

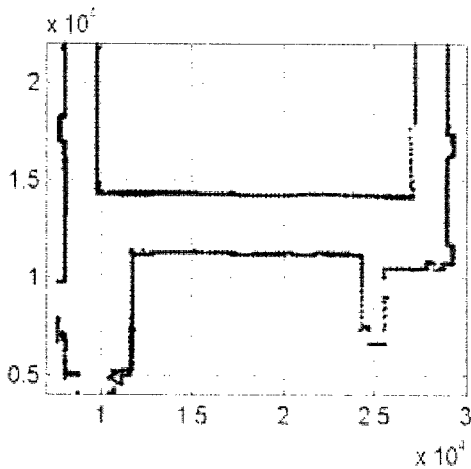


그림 3.2.1.1.19

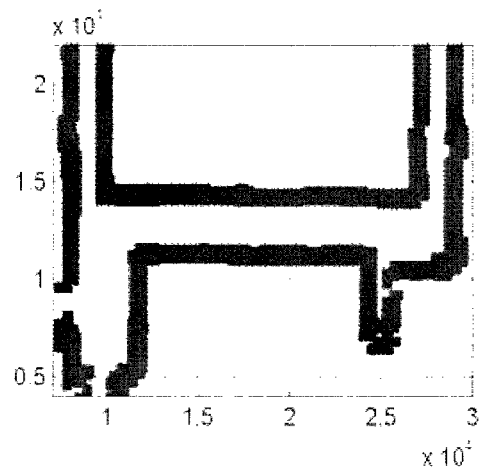


그림 3.2.1.1.20

-Monitoring Window : 실제 navigation 테스트를 할 때, navigation 관련된 변수들을 모니터링 하기 위한 윈도우.

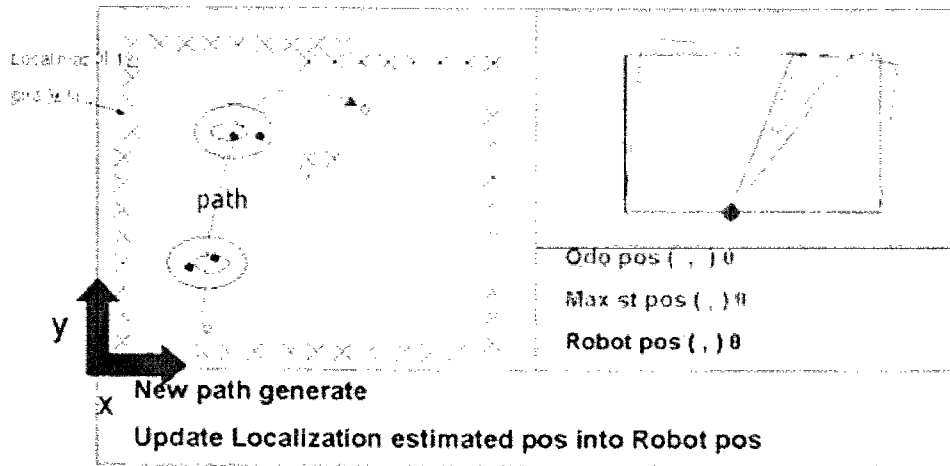


그림 3.2.1.1.21

Local localization 실험 결과

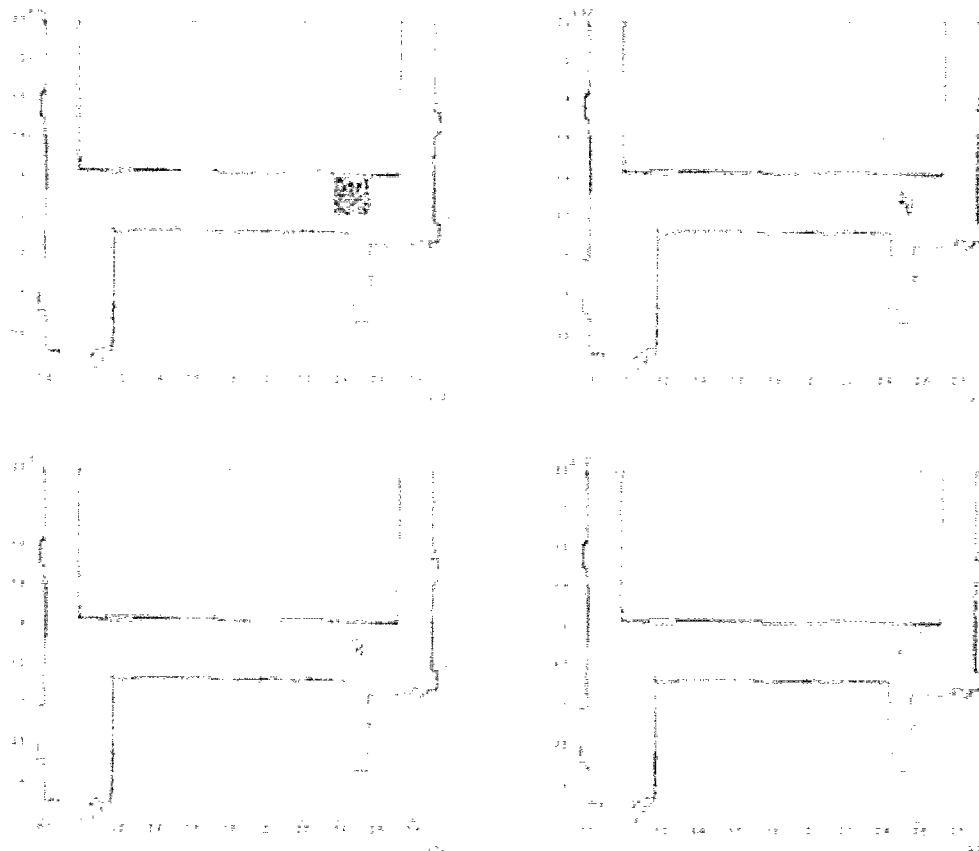
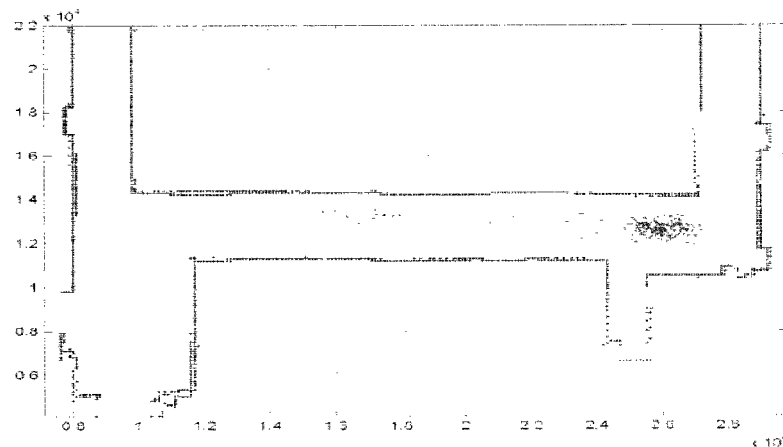
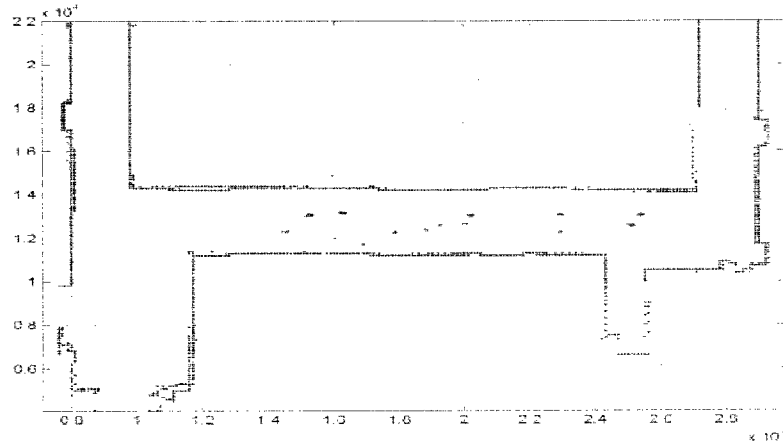
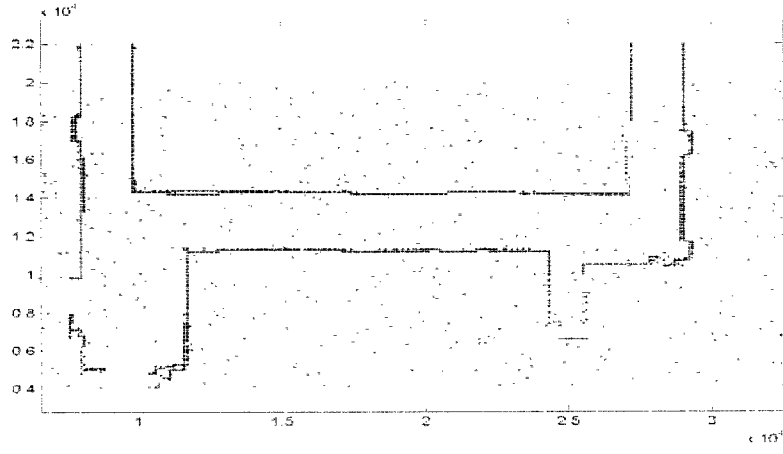


그림 3.2.1.1.22

Global localization 실험 결과



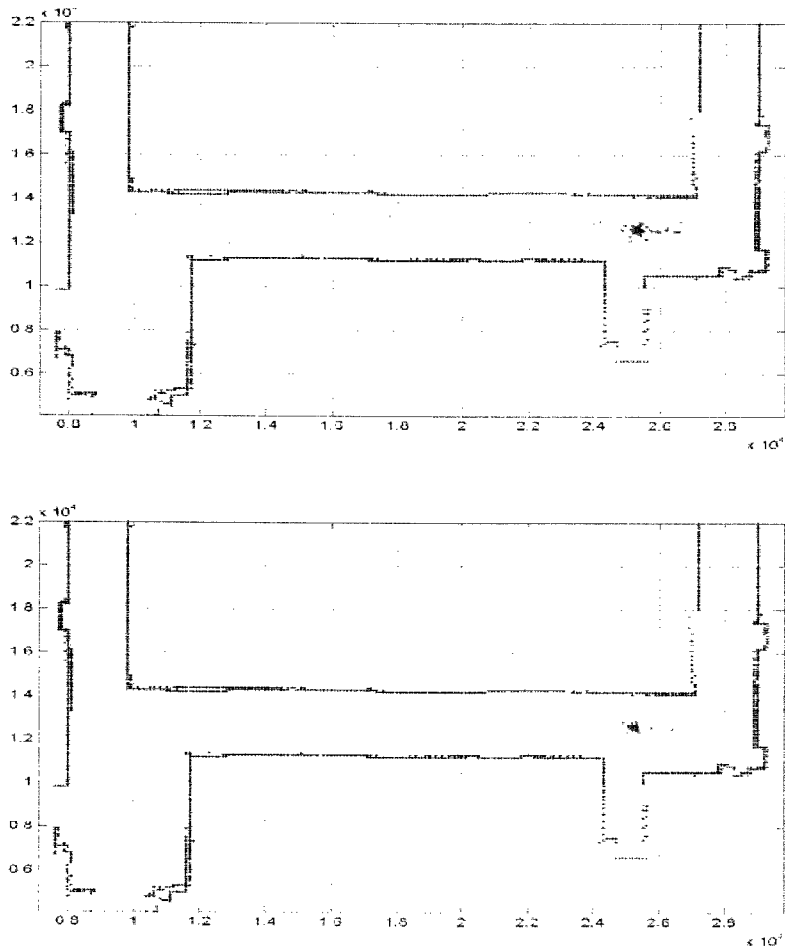


그림 3.2.1.1.23

(3) 초음파 센서 인터페이스

초음파는 거리 정보를 주는 저가의 센서이다. 초음파 센서의 장점으로 저가인 반면, 레이저가 감지하지 못 하는 유리를 감지할 수 있어 유리가 많은 환경에서 요긴하게 사용할 수 있다. 이에 반해, 센서 정보는 각도에 아주 민감하며 noisy한 거리 값을 주는 경향이 있다. 초음파를 사용하는 이유는 로봇 주행 시 collision avoidance/ obstacle detection 하는 목적과 wall following과 같은 behavior를 위한 수행하기 위해서이다. 특히 레이저로 감지할 수 없는 obstacle detection을 할 수 있다.

기존 Nomadic 사의 초음파 센서 인터페이스는 16 sensor에 대한 scan time이 0.7 초 이상이고 40cm이내의 물체에 대한 거리 측정 안 된다. 따라서 이동 로봇의 고속주행 (1m/sec이상)시 부적절하다.

- 서비스로봇 초음파 센서 테스트 결과

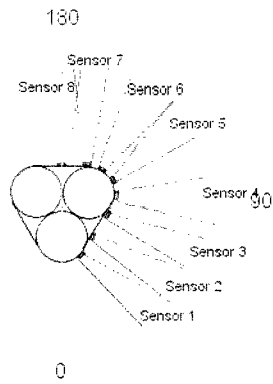


그림 3.2.1.1.24

	min (°)	max (°)
1	35	47
2	47	64
3	62	75
4	87	110
5	110	123
6	128	145
7	148	163
8	172	

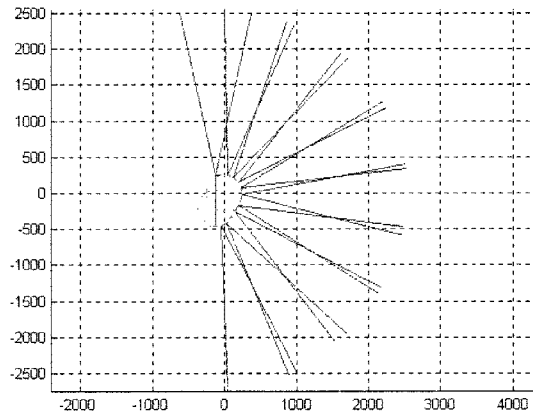
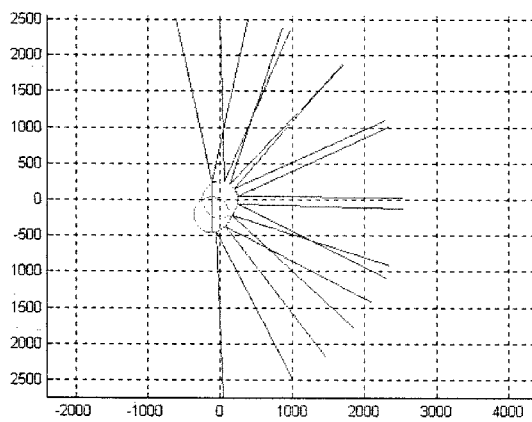
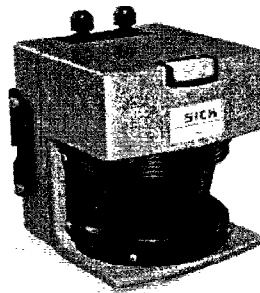


그림 3.2.1.1.25

(4) Laser Range Finder

레이저 스캐너는 Map Building, Path Planning을 위한 주행 중 Map Upgrade, Localization 등의 Navigation을 하는 데 있어서 가장 큰 몫을 차지하는 거리 측정을 위한 고가형 센서이다. 레이저는 투명 아크릴을 포함한 거의 모든 재질에 대해 신뢰할 만한 거리정보를 제공한다. (단, 유리 인식 불가능하다.) 아래의 센서는 SICK사의 LMS 200이라는 모델로 실내 이동 로봇에서 가장 많이 쓰이고 있는 센서중의 하나이다. 이는 별도의 sensor calibration이 필요 없으며 제공되어지는 MST Software가 있어 MFC로의 구현이 비교적 쉽다.



Use SICK MST Software drivers
Scanning Range angle : 180/ 100deg
Angular resolution : 0.25/ 0.5/ 1 deg
Scanning time : 200ms
Baud rate : 9600/ 19200/ 38400/ 500000
InterFace : RS232 또는 RS422
Power Supply : 24V
그림 3.2.1.1.27

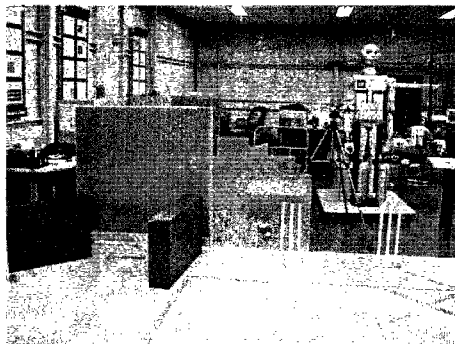


그림 3.2.1.1.28

(5) IR 센서

IR 센서는 navigation을 위한 저가형 거리 측정 센서이다.

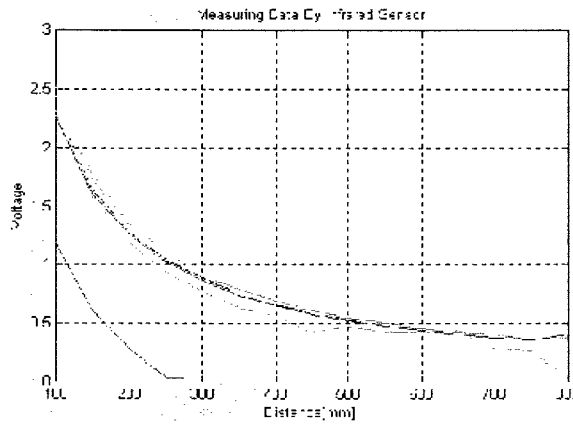
- Sony GP2D12

Type	Output	Max. Dist	Min. Dist
GP2D12	Voltage	80 cm	10 cm

calibration 방법 : 이 센서의 측정 가능 구간, 10cm에서 80cm 구간에서 5cm마다 구간 (15개의 구간)을 나누어 실험을 하여 실제 거리 값에 대해 센서 측정 거리가 어떻게 나오는지 알고 calibration을 한다. 또한 샘플은 흰색 종이, 검은 색 종이, 아크릴, 스티로폼(4개)을 사용하였고, 정면과 45도 기울어진 상황(2가지 case)에 대해 실험함으로써 IR 센서의 특징을 알아보았다.

얻어진 데이터로 calibration을 하기 위해 실제 거리와 측정 거리 관계를 알아보았다. 직선으로 표현하는 방법 보다 더 error가 적은 함수를 알아내고자 3차, 4차 다항식을 이용하였다. 얻어진 데이터로부터 다항식의 계수들을 구하였다.

실측 값



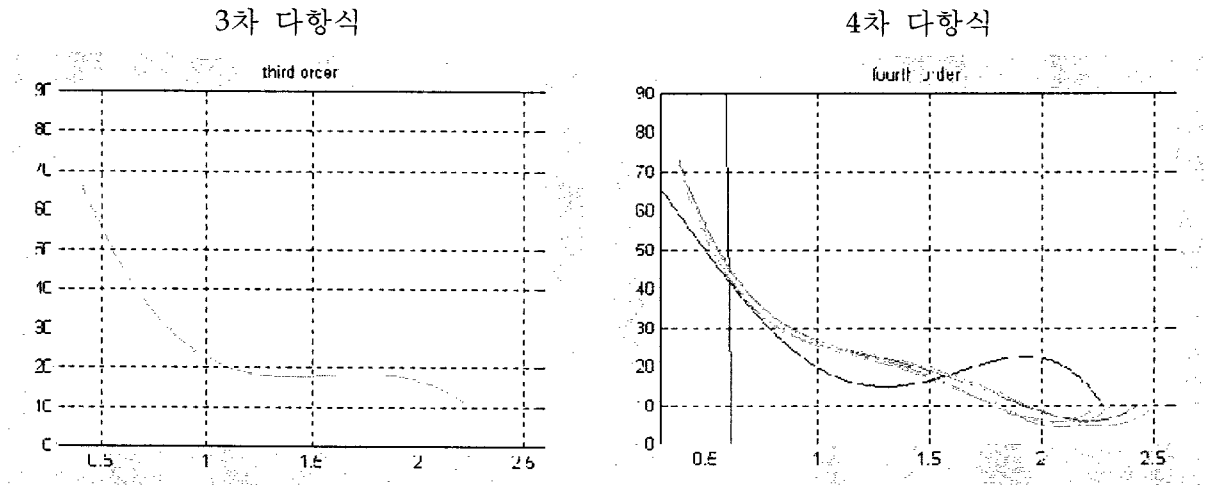


그림 3.2.1.1.29

실험 결과 : 두 샘플 모두 60cm 이후의 거리의 값의 에러가(error > 2.**) 크고 특히 10 - 15cm 사이의 측정거리 값이 에러 값이 크게 나왔다. 그 이외의 거리는 정확하게 나온다.

아크릴을 제외한 나머지 3개의 경우에 대한 계수 값들의 평균에 의한 거리 측정값의 에러가 크게 나온다.

3차 식의 계수들을 적용하여 계산한 결과 4차 식에 의한 결과에 비해 에러가 크고 유효적용거리의 범위가 더 좁았다.

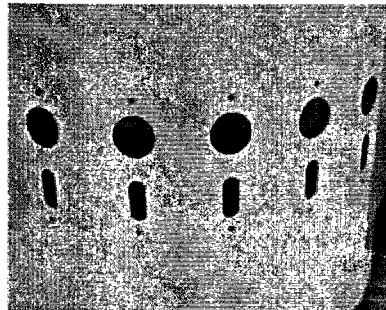


그림 3.2.1.1.30

- SEIKO Z128

Calibration 방법 : 18개의 각각의 IR 센서에 대해서 측정가능구간인 0.5m에서 3.0m 사이의 구간을 10cm마다 다시 구간을 나누어 센서 값을 측정한다. 각 센서마다 구한 센서 값을 분석해 본 결과 실제 거리에 대한 센서 측정 거리가 기울기 1인 직선이 아닌 포물선

의 형태를 띄는 것을 알 수 있었다. 이 포물선의 형태의 센서 값을 두 구간으로 나누어 서로 다른 기울기를 갖는 2개의 직선으로 표현하여 calibration을 하였다.

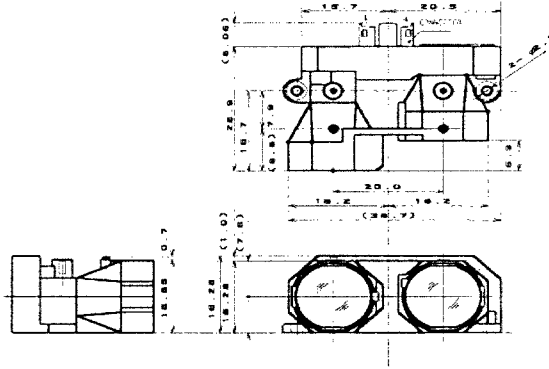
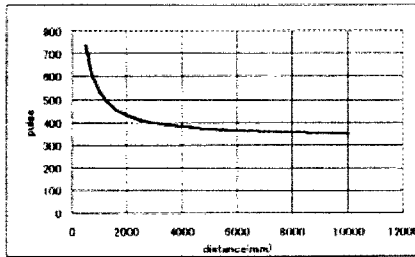


그림 3.2.1.1.31

Output pulse to distance conversion
pulse to distance



distance(mm) to pulse conversion formula
 $\text{pulse} = \alpha_0 + \alpha_1 / \text{distance}(\text{mm})$
 $\alpha_0 = 333 \quad \alpha_1 = 200000$

그림 3.2.1.1.32

- IR sensor Module Interfacing Card

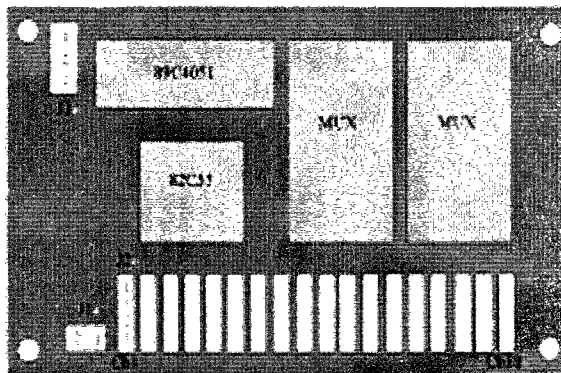


그림 3.2.1.1.33

자이로 센서 시험

Optical-Fiber gyro scope(이하 FOG)는 robot의 localization에 필요한 로봇의 orientation을 알아내기 위한 sensor이다. FOG는 하나의 closed loop로 형성된 동일한 optical path를 방향이 반대인 두 개의 light beam이 통과하게 되면, 순간적인 경로차에 의해 두 빛에 시간차가 존재하게 된다. 이 시간차에 의해서 측정하고자하는 물체의 1축에 대한 각속도 값을 알 수 있다.

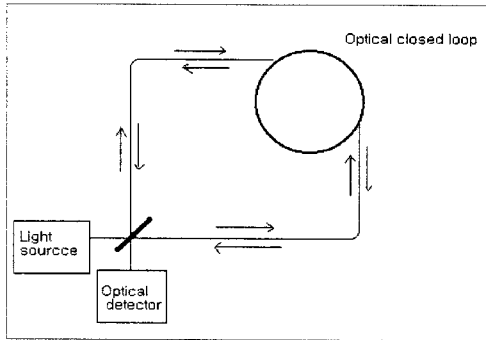


그림 3.2.1.1.34 FOG의 작동 원리

표 24 specification (Tamakawa TA7319)

Input Rate (max)	±100 deg/sec
Resolution	0.001 deg/sec
Scale factor	0.05 V/(deg/s)
Bias	0.1 deg/sec
Power supply	+5V, ±15V 2W
Active Temperature	-30 ~ 71 °C

(가) 실험 장치

Tamagawa의 1축 각속도 센서는 +5v, +15v, -15v, GND의 전원을 사용하고, 출력은 analog 신호이다. PC 환경에서 analog 신호를 처리할 수 없기 때문에 Advantech 사의 A/D converter를 사용하였다. 아래 그림에서 개략적인 hardware setup을 알 수 있다.

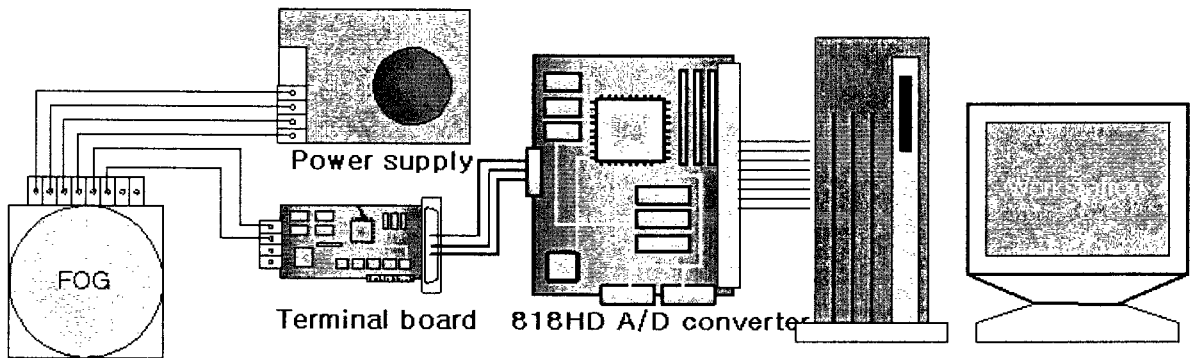


그림 3.2.1.1.35 Device setting

FOG의 일반적인 error는 static bias drift, scale factor의 비선형성, 온도의 변화이다.

온도 변화에 따른 영향은 bias drift error보다 작고, FOG에 전원을 가하고 약 5분 정도 시간이 경과되면 FOG의 온도는 정상 상태에 도달하게 된다. 때문에 온도에 대한 영향은 무시하도록 한다.

bias drift에 대한 보정을 위해서는 FOG를 정지시킨 상태에서 얼마간 Data를 입력받아 분석한다. FOG로부터 각속도를 얻기 위해서는 다음과 같은 수식이 적용된다.

$$\theta = (V - C2) \cdot C1 \quad (1)$$

위에서 V = FOG로부터 입력되는 전압 값, C1=Scale factor, C2= error 이다. error 값을 찾기 위해 FOG를 단진자 운동을 하도록 장치를 제작하여 실험하였다.

(나) 실험 결과 데이터

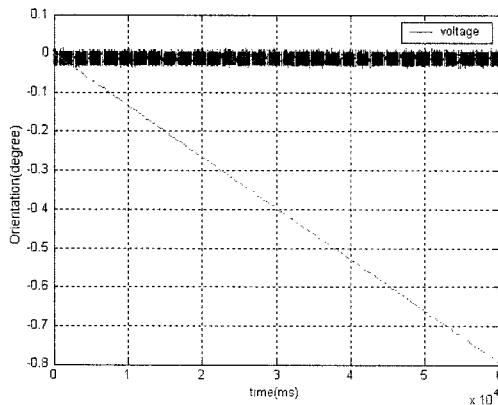


그림 3.2.1.1.36

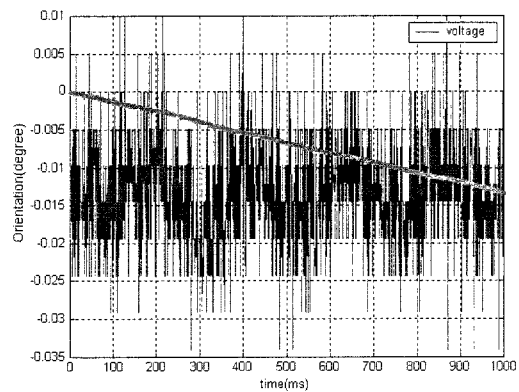


그림 3.2.1.1.37

Data plot에서 파랑색 선이 FOG로부터 입력되는 전압값이고, 빨간색 선이 연산을 통해서 얻은 각도 값이다. 정지 상태임에도 전압값은 전체적으로 (-)값을 보내고 있다. 위와 같은 실험을 몇 회에 걸쳐 적절한 error 보정값을 찾는다.

$\Delta\theta e/\text{sec}$ 에 관한 data는 단위 시간(second)당 orientation error이고, $\Delta\theta e/\Delta \int_{\theta}$ 는 각도 변위당 orientation error이다. 결과에서 알 수 있듯이 orientation의 error는 시간에 따라서 error가 누적된다. 위의 실험은 FOG를 움직이지 않은 상태에서 측정한 결과이기 때문에 (1)식에서 각속도 값은 '0'이어야한다. FOG의 출력으로부터 얻어지는 각속도 값을 '0'으로 보정해주는 C2값을 위의 표에서 보여준다. C2값이 적용되어야하는 Bias error 값이다. 그림 3.2.1.1.38는 error를 보정하지 않고 FOG를 단진동 시켰을 때 FOG의 orientation의 drift를 보여주는 결과치이고, 그림 3.2.1.1.39은 error를 보상해주는 C2값을 적용시켜 얻은 결과치이다.

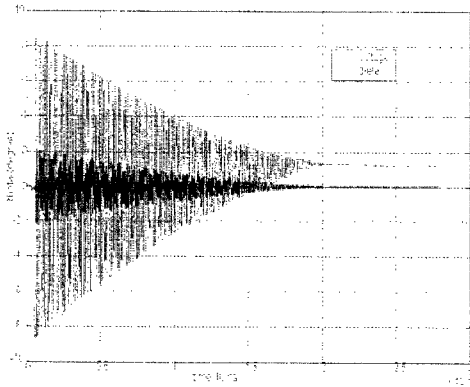


그림 3.2.1.1.38

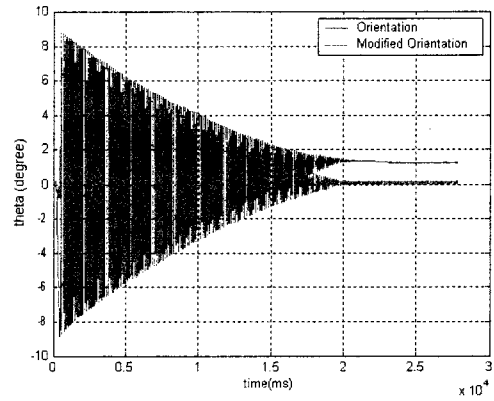


그림 3.2.1.1.39

다. 주행시험결과

주행 시험은 칸막이를 이용하여 실험 공간을 만들고, 정적인 장애물이 있는 환경과 동적인 장애물이 있는 환경 이 두 상황으로 나누어서 진행되었다.

(1) 정적인 장애물이 존재하는 환경

(가) 실험 환경

실험 환경은 다음과 같이 그림 3.2.1.1.40과 구성되었으며, 그림상의 X축과 Y축의 단위는 10cm로 약 $4m \times 11m$ 의 공간이다. 아래는 실제 Localizer에 사용되는 지역 맵(Local map)으로 레이저 스캐너를 이용해 작성되었다. 위의 환경에 3개의 장애물을 (12,15), (32, 40), (12,45) 부근에 두고 실험을 하였다.

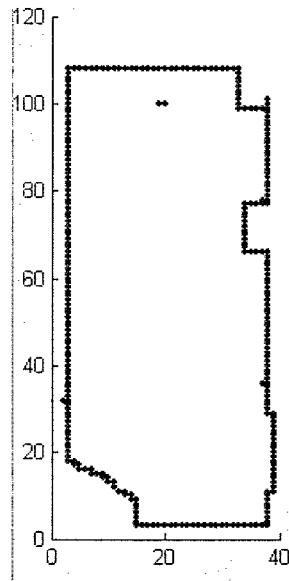


그림 3.2.1.1.40 실험 환경

(나) 경로 계획 및 추종 제어

로봇의 초기 위치는 (12, 24) 부근으로 하고 목표 위치는 (15,70) 정도로 하였다. 장애물에 대한 정보는 전혀 주어지지 않고 그림 3.2.1.1.40과 같은 지역 지도만 주어진 상태에서 로봇은 센서 정보를 해석하여 지도를 갱신하면서 목표점에 도달하게 된다. 이 때 물론 장애물의 회피가 완벽히 이루어진 경로를 따라서 이동하게 된다.

그림 3.2.1.1.41는 경로 계획을 위해 정의된 Active map의 시간에 따른 변화 순서를 보여 주고 있다. Active map과 그림 3.2.1.1.40의 지역 지도와는 좌표가 일치하지 않는다. 그 이유는 앞서 설명하였다시피 Process가 시작되는 초기 위치가 Active map의 중심이 되기 때문이다. 따라서 로봇 초기 위치인 지역 지도상의 (12, 24)가 Active map의 (50,50)이 된다. 장애물 3 부근에 있는 장애물은 그림 3.2.1.1.41.(b), (c), (d)에서 볼 수 있듯이 처음에는 발견되지 않다가 진행 도중 발견되는 것을 보여주고 있다. 이 때 만일 새로 발견된 장애물이 그전에 계획된 경로를 방해하게 된다면 장애물이 발견된 순간 새로 경로를 계획하게 된다.

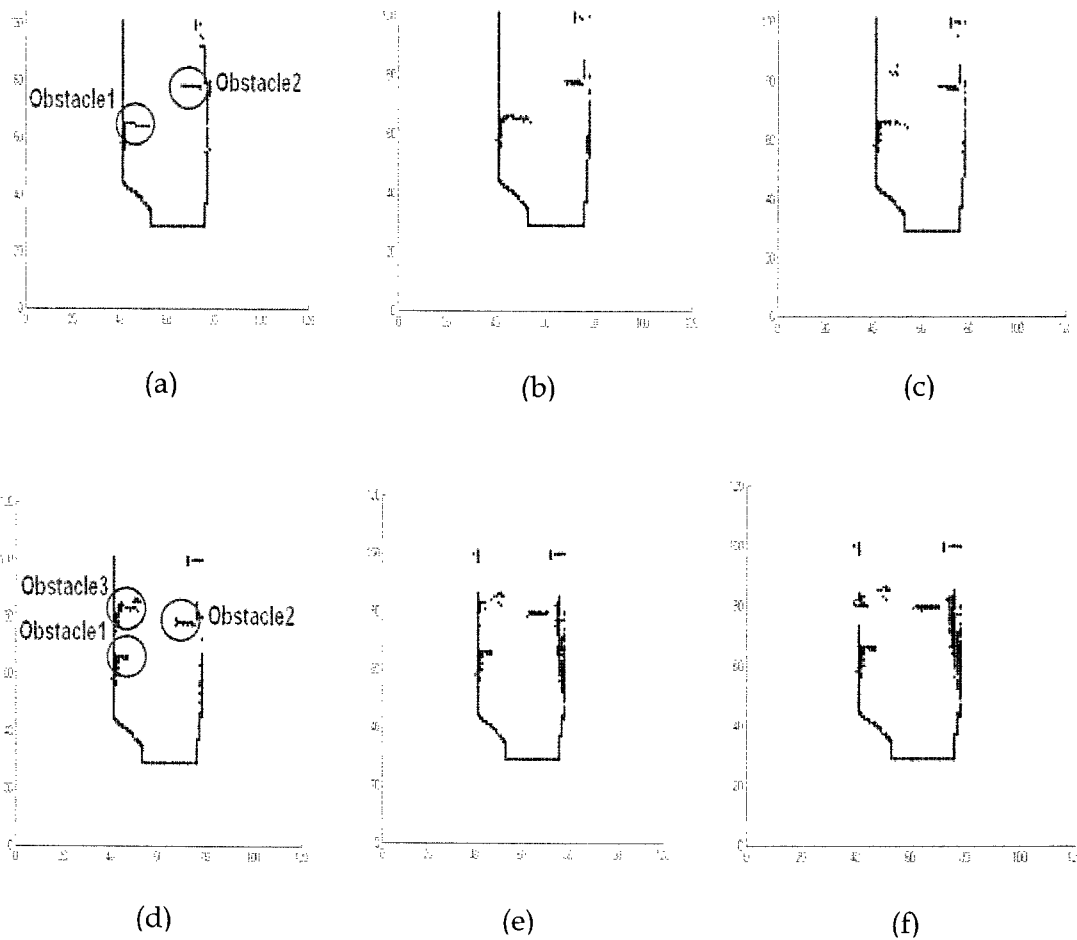


그림 3.2.1.1.41

그림 3.2.1.1.41은 계획된 경로를 보여준다. 실제로는 몇 cm 단위의 매우 짧은 거리의 점들의 집합이다. 센서 정보에 의해 장애물이 확인이 되면 이를 회피하면서 목표점까지 도달할 수 있는 최적 경로가 생성된다. 이 때, 1번 장애물과 2번 장애물을 최단 거리로 동시에 회피하는 경로가 계획되고 그 이후에는 직선 구간이 나타난다. 나중에 발견된 3번 장애물은 경로에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 경로 계획은 Active map상에서 이루어지므로 역시 (50,50)을 로봇의 초기 위치로 하여 계획된다.

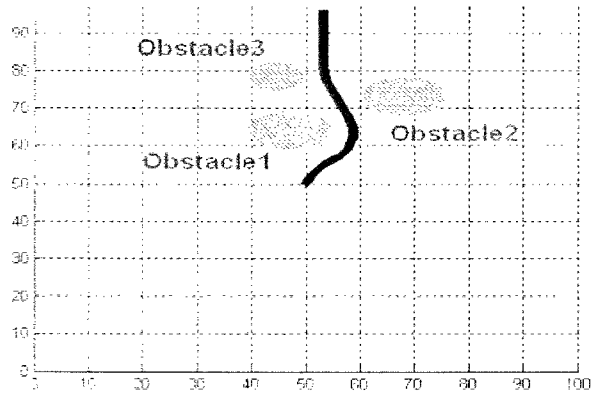
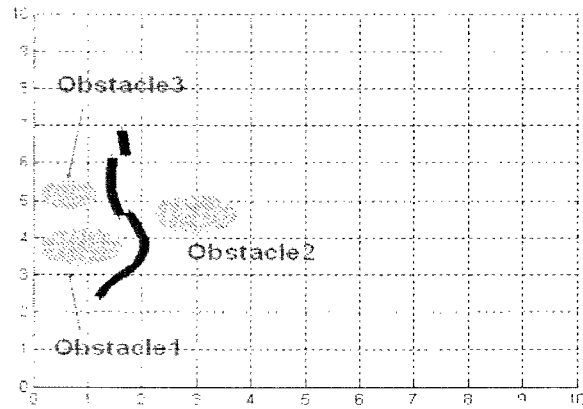
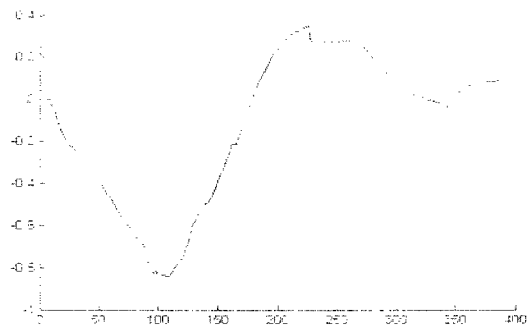


그림 3.2.1.1.42 계획된 경로



(a) X,Y 평면상의 궤적



(b) 로봇의 각도(Ω)의 변화

그림 3.2.1.1.43 로봇의 실제 궤적

그림 3.2.1.1.43는 목표점까지 도달할 때까지의 로봇의 실제 궤적을 나타내고 있다. 그림 3.2.1.1.43.(a)는 XY 평면상의 궤적으로 계획된 경로를 추적 제어를 통해 원하는 위치로 가고 있음을 보여준다. 로봇의 경로가 불연속적으로 나타나는 이유는 Localization에 의한 결과이다. 주행 기록기를 통해 진행할 때는 연속적인 궤적을 보이다 Localizer가 새로운 로봇 위치를 주면 순간적으로 로봇의 위치가 변경됨을 의미하므로 위와 같은 모습을 보인다. 그림 3.2.1.1.43.(b)는 목표지점까지 진행하면서 로봇 각도 Ω 의 변화를 나타낸 것으로 로봇의 속도 방향으로 회전이 이루어졌음을 확인할 수 있다. X축은 각도를 나타내는 radian이며 Y축의 단위는 시간을 의미하는 것으로 한 sampling time(=0.067초)가 몇 번이나 반복되는지를 나타낸다. 그림 3.2.1.1.44는 진행 도중의 로봇의 속도 변화를 보여준다.

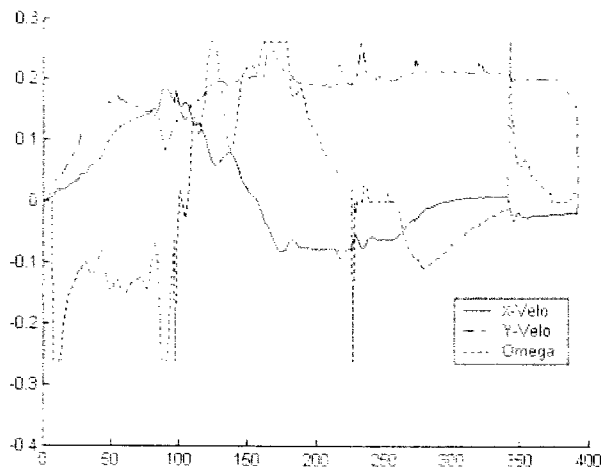


그림 3.2.1.1.44 로봇의 속도

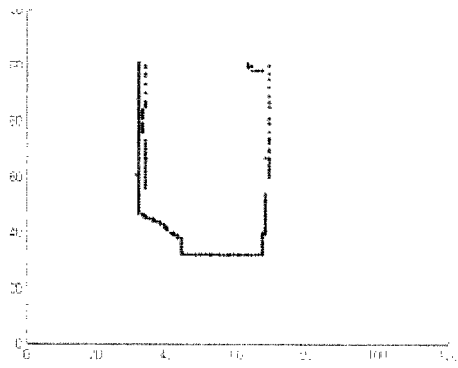
(2) 동적인 장애물이 존재하는 환경

(가) 실험 환경

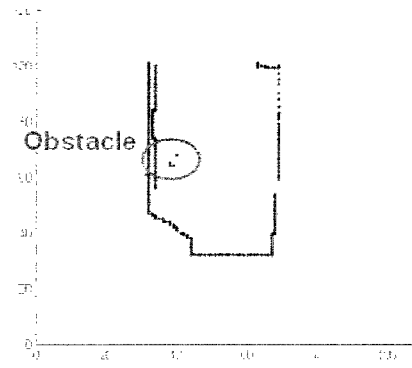
실험 환경은 정적인 장애물에 대한 실험과 동일하며, 장애물을 모두 치운 상태에서 진행되었다. 여기서 움직이는 장애물은 사람을 말하며, 로봇의 경로를 적극적으로 막아서 로봇이 강건하게 원하는 위치까지 도달하는지를 확인하였다.

(나) 경로 계획 및 추종 제어

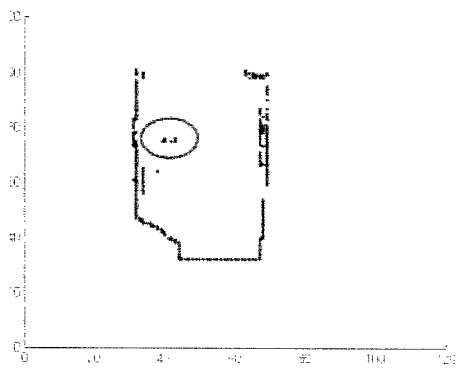
로봇의 초기 위치는 (21, 21) 부근으로 하고 목표 위치는 (21, 67) 정도로 하였다. 그림 3.2.1.1.44은 이전의 경우와 마찬가지로 Active map의 시간에 따른 변화 모습을 보여주고 있다. 이 실험에서는 움직이는 장애물이 로봇의 뒤에서부터 다가와 로봇의 경로를 막으면서 이동하고 있음을 알 수 있다.



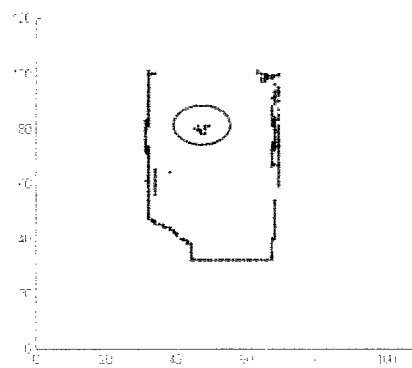
(a)



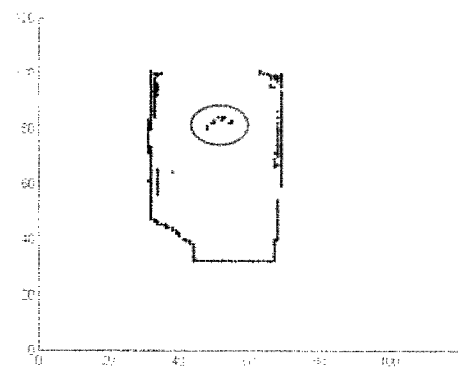
(b)



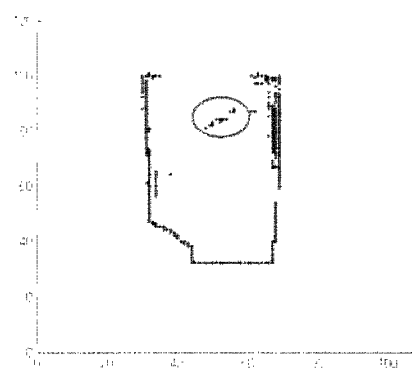
(c)



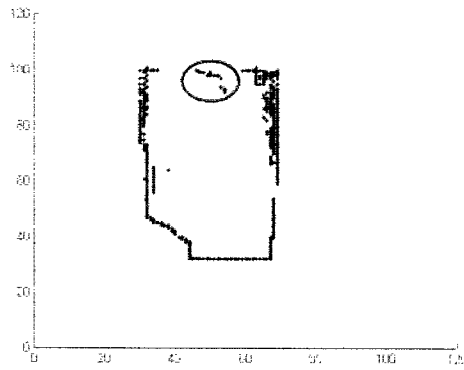
(d)



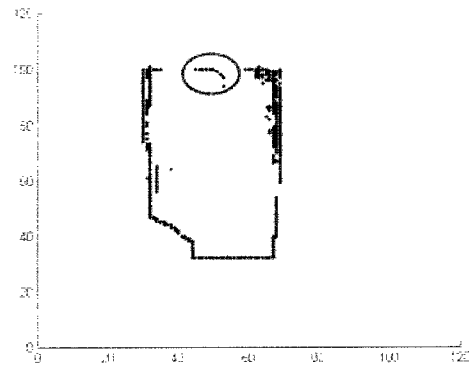
(e)



(f)



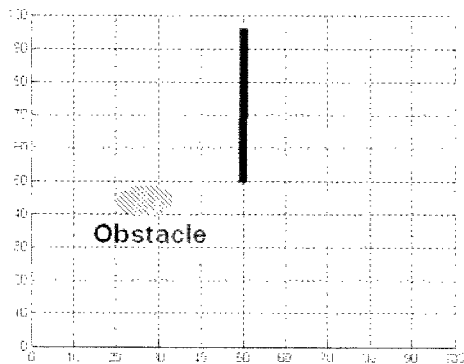
(g)



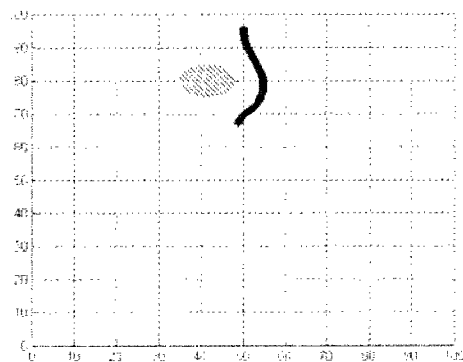
(h)

그림 3.2.1.1.44 Active map의 시간에 따른 변화 과정

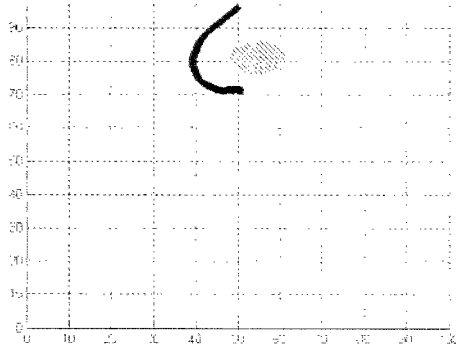
그림 3.2.1.1.44은 주행 도중 계획된 경로들을 보여주고 있다. 장애물이 경로 상에 놓이게 되면 새로운 경로를 계획하게 되는데, 장애물이 움직임에 따라 경로도 계속 바뀌는 것을 알 수 있다. 그림 3.2.1.1.44.(f)는 경로의 시작점이 Active map의 중심인 (50, 50)이다. 이것은 그림 3.2.1.1.44.(f)가 진행되는 순간은 이전과 다른 새로운 Process로 진행됨을 의미한다. 즉, 장애물이 계속적으로 이동하면서 목표 위치로 지정된 (21, 67) 지점을 꽤 오랫동안 점유하게 되면, 로봇은 장애물이 없는 새로운 위치에 임시 목표점을 지정하게 된다. 이 임시 목표점에 도달하면 Process를 종료하게 되는데 상위 Planner에서는 원래 의도한 목표점에 도달하지 못했으므로 새로운 Process를 만들어 완결하지 못한 작업을 수행하도록 한다. 이 과정에서 새로운 Process로 인한 새로운 Active map이 생성되어서 기존의 것과 다른 좌표점을 가지는 Active map이 존재하게 된다.



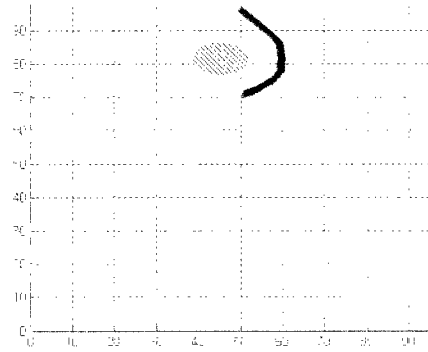
(a)



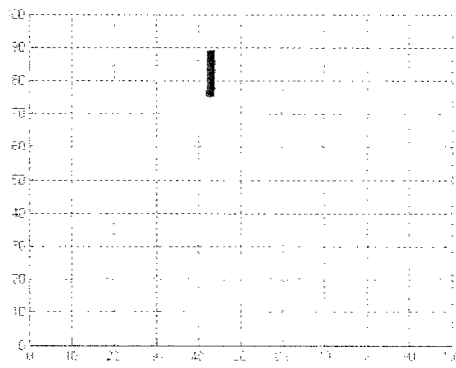
(b)



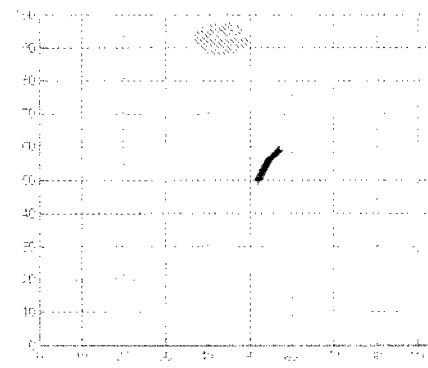
(c)



(d)

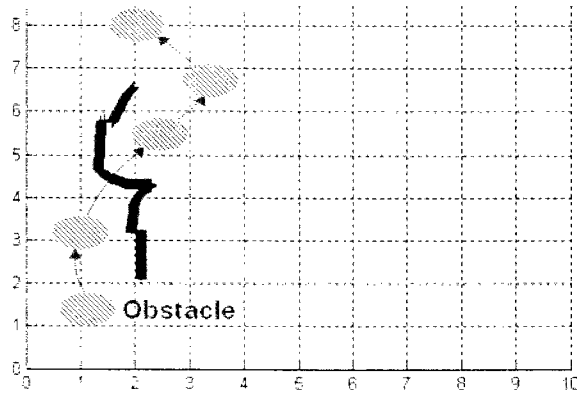


(e)

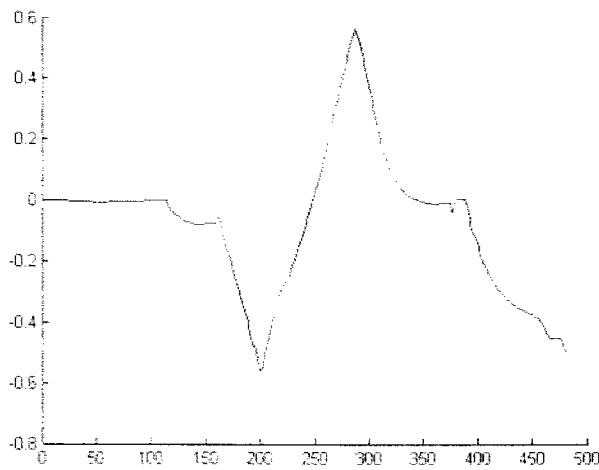


(f)

그림 3.2.1.1.45 계획된 경로



(a) X,Y 평면상의 궤적



(b) 로봇의 각도(Ω)의 변화

그림 3.2.1.1.46 로봇의 실제 궤적

그림 3.2.1.1.46은 로봇의 실제 궤적을 보여준다. 그림 3.2.1.1.46.(a)에는 장애물의 이동에 따라 변화하는 로봇의 궤적을 자세히 설명하고 있다. 이 실험에서도 불연속적인 점은 Localizer에 의한 것으로 점이 많이 튀지 않는 것을 볼 때, Localization이 상당히 안정적으로 진행되고 있음을 알 수 있다.

그림 3.2.1.1.47는 이전의 실험과 마찬가지로 경로 추종 시 로봇의 속도 변화를 보여주고 있다.

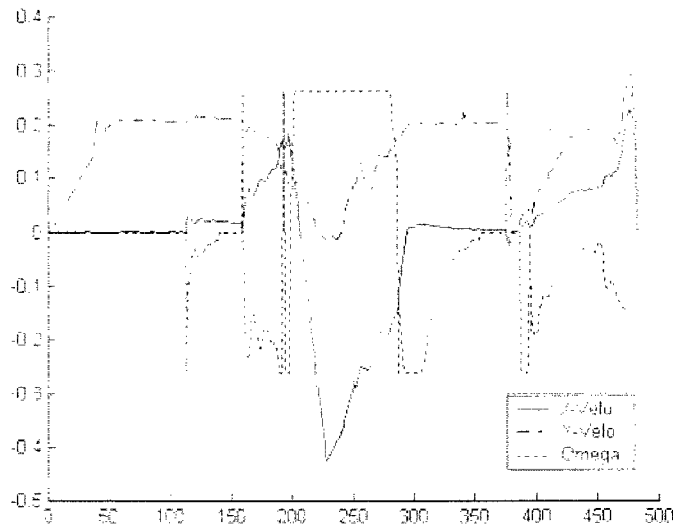


그림 3.2.1.1.47 로봇의 속도

(1) 정적인 장애물이 존재하는 환경

(다) Localization

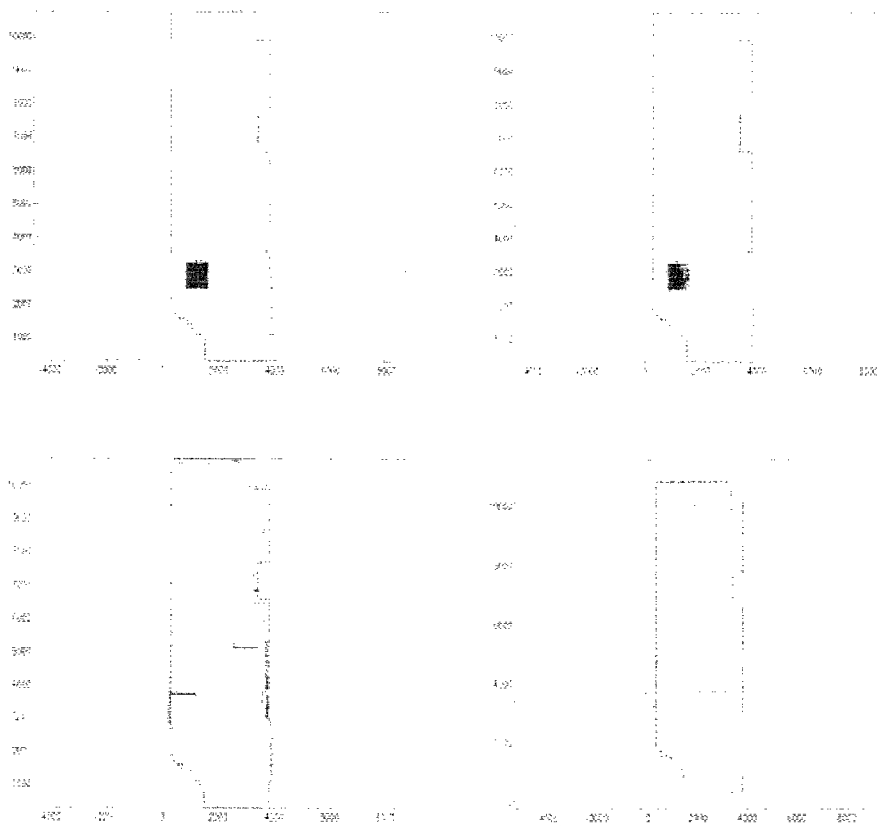
Advanced Robotics Research Center Laboratory, KIST에서 실험한 결과이다. 이 실험은 Auto Move라는 behavior와 함께 수행하였다. 실제 환경이 map과는 다른 환경, 특히 map에 존재하지 않는 정적인 장애물이 존재하는 환경에서의 localization 결과를 보인다. map 크기는 4m * 11m이고 초기의 sample 위치는 실제 로봇 초기 위치를 포함한 x, y 방향으로 2m*2m 범위 내, orientation은 30도 범위이내에 존재하도록 주었다. 각 Step에서 4개의 그림을 보였다. 각 Step에서의 (A)는 Motion model후의 sample, (B)는 Sensor Model후의 sample을 나타내었다. 또한 localization의 결과가 어느 정도 accurate한지 알아보기 위해 각 step에서의 (C) 최대의 확률을 갖는 sample의 위치를 동그라미로 나타내었고 laser scan distance와 최대의 확률을 갖는 그 sample의 reference distance를 비교하는 그림(Red-Scan Distance, cyan-Reference Distance)과 (D) Hough Transform으로 구한 Line-To-Line Matching 그림(Red-Scan Hough Transform Line, cyan-Reference Hough Transform Line)을 나타내었다.

1번째 step에서 (A)는 초기 샘플의 motion model 후의 sample이고 (B)는 sensor model에 의해 sample들의 위치가 약간 shrinking 되었음을 볼 수 있다. (C)는 최대의 확률을 갖는 샘플의 위치와 그 샘플의 reference distance와 scan distance를 비교하였는데 빨간색의 scan distance를 보면 map에 존재하지 않는 장애물이 존재함을 볼 수 있다. (D)는 Scan hough Transform한 line과 Reference Hough Transform Line를 비교하였는데 이

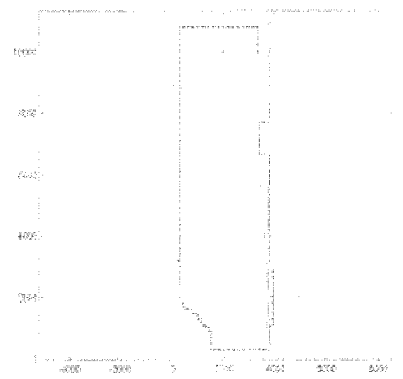
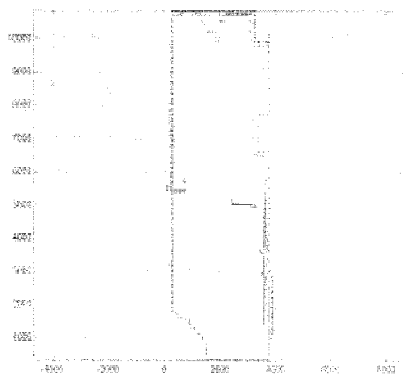
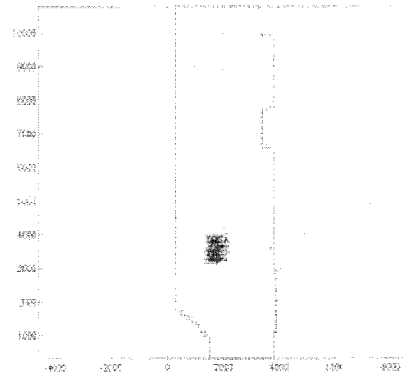
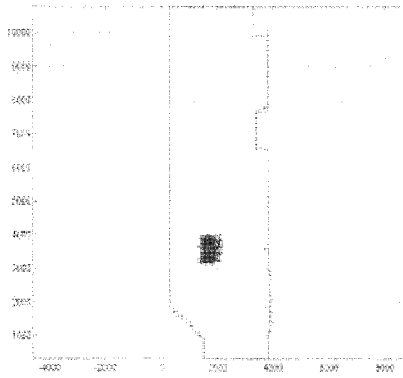
로 장애물로 인해 원하지 않았던 Scan Hough Transform Line이 나타남을 알 수 있다. 그럼에도 (C)와 (D)로부터 localization이 어느 정도 reasonable한 결과를 가짐을 알 수 있다.

2번째 step의 (A)는 그 전 단계의 샘플에서 로봇이 실제 운동에 해당하는 motion이 반영된 샘플들임을 볼 수 있다. (B)는 sensor model 후 약간 수렴한 것이고 (C)의 빨간색으로 표현된 실제 레이저 scan distance를 보면 1번째 step에서 보였던 같은 장애물이 있음을 볼 수 있다. 정적인 장애물임을 알 수 있다. 그 이 후의 step도 같은 방법으로 나타내었다.

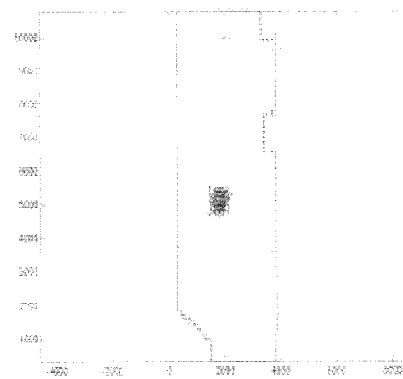
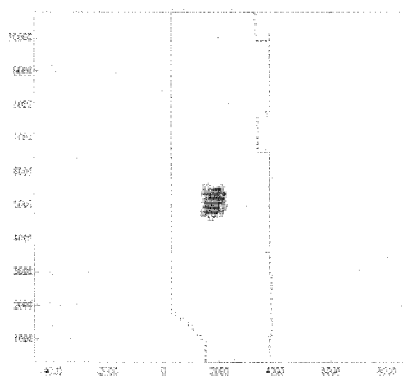
step 1

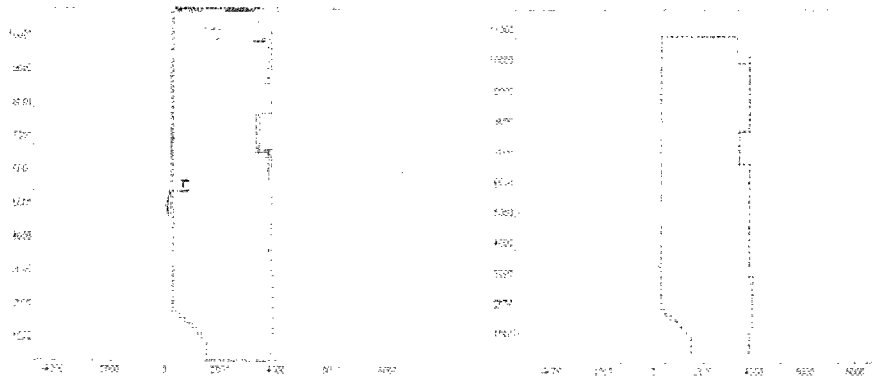


step 2



step 3





step 4

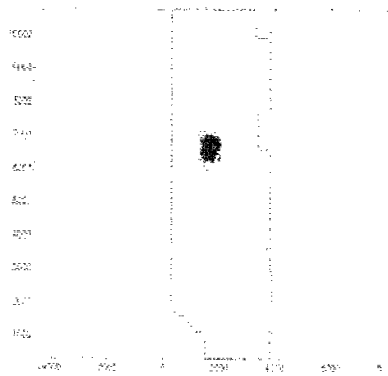


그림 3.2.1.1.48

(2) 동적인 장애물이 존재하는 환경

(다) Localization

Advanced Robotics Research Center Laboratory, KIST에서 실험한 결과이다. 이 실험은 Auto Move라는 behavior와 함께 수행하였다. 이 때 움직이는 사람이라는 동적 장애물이 로봇의 주행을 방해 할 때 localization의 결과를 알아보았다. map 크기는 4m * 11m이고 초기의 sample 위치는 실제 로봇 초기 위치를 포함한 x, y 방향으로 2m*2m 범위 내, orientation은 30도 범위이내에 존재하도록 주었다. 각 Step에서 4개의 그림을 보였다. 각 Step에서의 (A) Motion model후의 sample, (B) Sensor Model후의 sample을 나타내었다. 또한 localization의 결과가 어느 정도 accurate한지 알아보기 위해 그 step에서의 (C)최대의 확률을 갖는 sample의 위치를 동그라미로 나타내었고 laser scan distance와 그 샘플의 reference distance를 비교하는 그림(Red-Scan Distance, cyan-Reference Distance)과 (D)

Hough Transform으로 구한 Line-To-Line Matching 그림(Red-Scan Hough Transform Line, cyan-Reference Hough Transform Line)을 나타내었다.

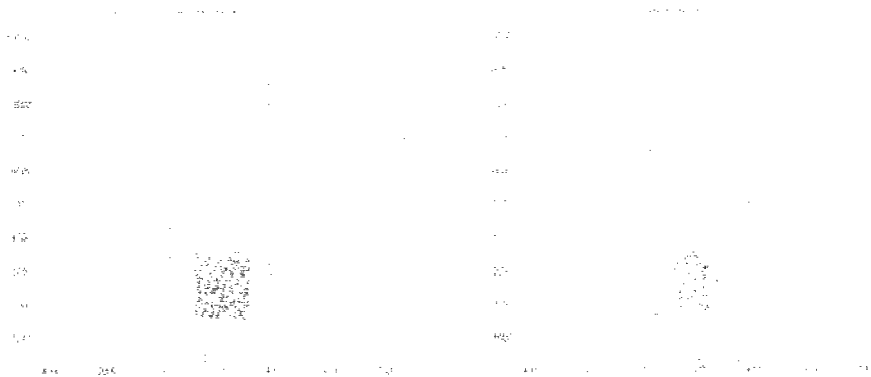
1의 위치가 약간 shrinking 되었음을 볼 수 있다. (C)와 (D)는 최대의 확률을 갖는 샘플의 위치와 그 샘플의 reference distance와 scan distance를 비교 scan hough Transform한 line과 Reference Hough Transform Line를 비교하였다. 이로부터 localization 이 reasonable한 결과를 가짐을 알 수 있다.

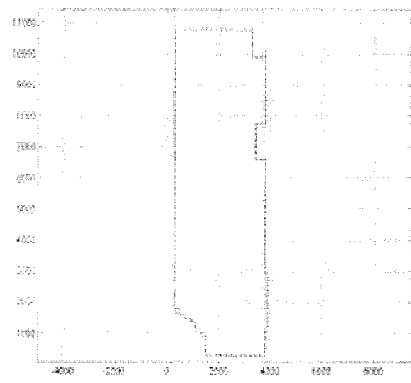
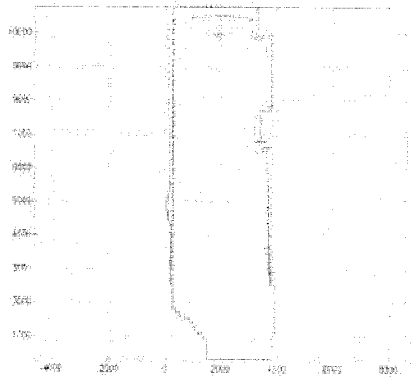
2번째 step의 (A)는 그 전 단계의 샘플에서 로봇이 실제 운동에 해당하는 motion이 반영된 샘플들임을 볼 수 있다. (B)는 sensor model 후 약간 수렴한 것이고 (C)의 빨간색으로 표현된 실제 레이저 scan distance를 보면 map에 존재하지 않는 장애물이 있고 환경도 map과는 약간 다르다는 것을 알 수 있다.

3번째 step 역시 그 전과 같은 방법으로 나타내었고 (C)를 보면 장애물이 계속 움직이는 것을 확인 할 수 있다.

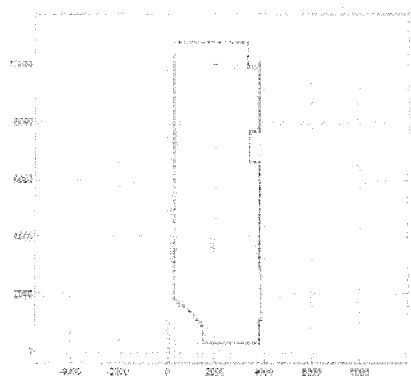
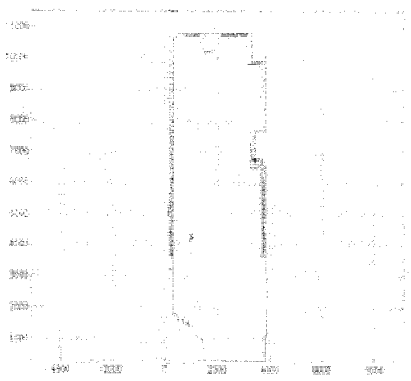
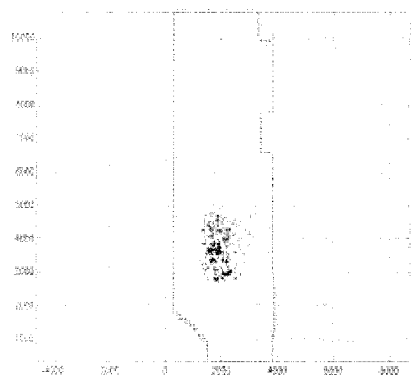
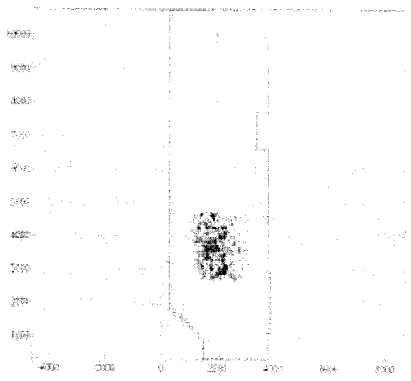
4번째 step에서 (A)를 보고 왜 전 단계의 샘플에서 motion model만 된 것이 아님을 볼 수 있다. 이는 localization이 처음부터 다시 시작하여 sample이 x, y방향으로 2m 씩 뿌려진 것이다. 이유는 움직이는 장애물이 robot이 가려고 목표했던 goal에 자리하여 goal이 occupied 되었기 때문에 기존의 process를 죽이고 새로운 process를 생성하여서 localization program을 새로 시작하였기 때문이다. 이 부분은 goal이 occupied 되어도 localization process는 끝나지 않고 계속 되도록 곧 수정할 것이다.

step 1

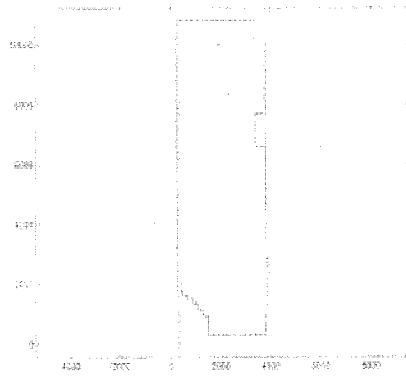
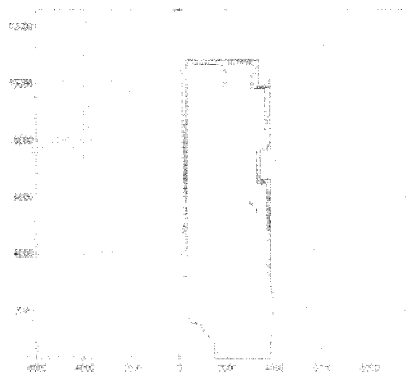
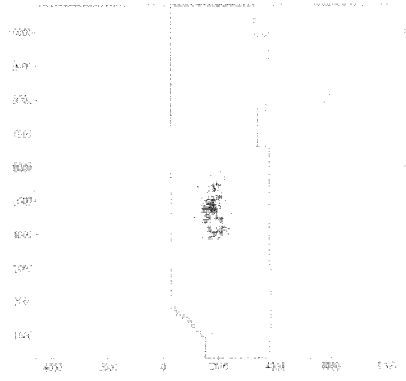
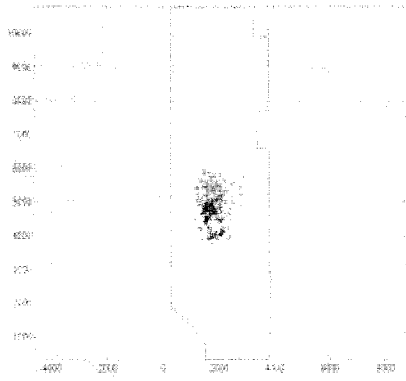




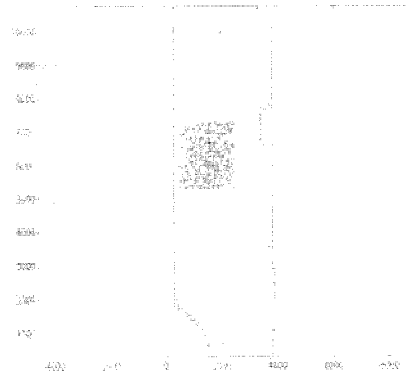
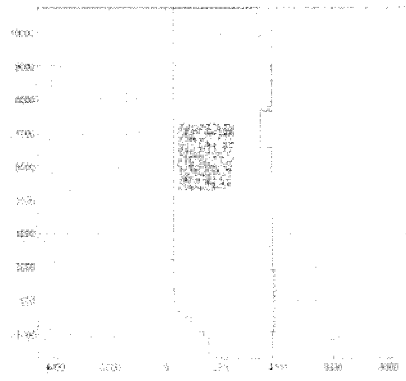
step 2

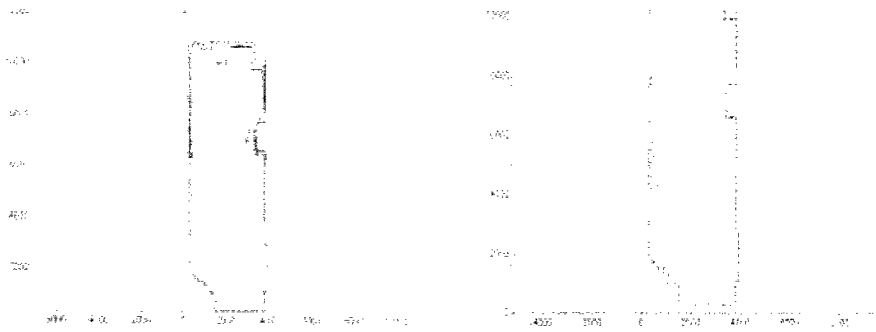


step3



step 4





step 5

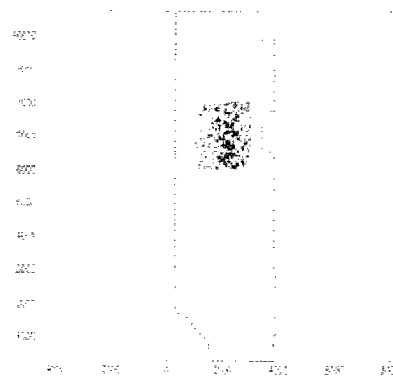


그림 3.2.1.1.49

라. 트레일러 시스템 개발

바퀴식 이동로봇은 이동성이 뛰어나며 설계 및 제어가 비교적 쉽기 때문에 이동이 필요한 여러 분야에서 적용되고 있다. 그러나 이동로봇이 전원, 각 기능별 장치, 그리고 물류의 적재함 등을 수용하기에는 그 크기와 견딜 수 있는 하중에 한계가 있으므로 물류의 이송이나 수행할 수 있는 기능의 수에 제한이 있게 마련이다. 따라서 여러 가지 작업이 필요한 공간에서는 필요한 작업의 수에 해당하는 로봇이 필요하며, 동시에 다량의 물류를 이동하기 위해서는 여러 대의 로봇이 필요하다. 트레일러 시스템은 이동성에 있어 다소 제약을 받지만 이동로봇의 위와 같은 한계를 극복하는데 적합하다. 즉 전원을 분리하여 견인함으로써 장시간의 작업을 수행할 수 있고, 각각 기능별 장치를 요동에 따라 로봇이 견인하여 작업을 수행함으로써 로봇의 기능을 확장시킬 수 있으며, 여러 대의 적재함을 동시에 로봇이 견인함으로써 다량의 물류 이송이 가능하다. 트레일러 시스템의 활용 목적은 이동로봇

의 기능을 확장시키며 분담하는 것이다. 반면 트레일러 시스템은 이동로봇의 이동성에 제약을 가져온다. 즉 각 트레일러의 동작을 고려한 이동로봇의 motion 제어가 필요하며 그 적용 환경의 범위가 줄어든다. 따라서 트레일러 시스템의 적용은 이러한 이동성에 대한 제약의 극복을 전제 조건으로 한다. 트레일러시스템의 적용에 따른 제약을 최소화하는 방법으로는 이동로봇의 이동 궤적에 대한 각 trailer 추종 성능을 극대화시킴으로써 트레일러 시스템의 이동성을 향상시키는 것이다. 즉 이동로봇의 동작 계획에 있어 trailer에 대한 고려를 최소화시키는 트레일러 시스템의 개발이 필요하다. 기존의 trailer는 Direct-axle의 passive한 형태로 이동로봇의 궤적에 대해 큰 오차를 가지고 이동을 한다. 즉 각 vehicle의 병진 운동만이 두에 따르는 vehicle에 전달되기 때문에 전후의 vehicle의 동작은 많은 차이를 보이게 된다. 개발하는 트레일러 시스템은 Off-axle의 passive한 trailer로 이동로봇의 선·각속도가 일정할 때는 완벽한 궤도 추종성을 가진다. 반면 Off-axle trailer는 병진 운동뿐만 아니라 회전운동도 전달하기 때문에 그 기구학이 복잡하고 해석 또한 어렵다. 따라서 효과적인 활용을 위해서는 system에 대한 해석적인 분석 및 실제 system에 대한 고찰이 필요하다.

Trailer system의 연구는 주로 비선형 시스템의 해석 및 제어의 관점에서 이루어지고 있다. Laumond에 의해 임의의 대수의 trailer를 견인하는 이동 로봇의 controllability가 증명되었다. 특별한 조건을 만족하는 trailer system에 대하여 Murray와 Sastry는 canonical chained form을 제안하였고, Sordalen은 이를 임의의 대수 trailer system에 대하여 일반화하였다. Chained form을 이용한 제어 방법은 대상이 chained form으로 변환이 가능해야 하기 때문에 표준형 trailer system이나 이의 변형이나 trailer에 조향 장치가 있는 경우로 제한된다. 따라서 trailer의 설계 시 연결 joint는 앞 trailer(또는 로봇)의 wheel axis 상에 있도록 해야하기 때문에 trailer link의 구조가 제한된다. Off hooked trailer system은 설계가 비교적 간단하지만 chained form으로 변환이 불가능하고 기구학 식이 복잡하여 해석적인 여구는 거의 없으며 Bolzern은 auxiliary vehicle을 이용하여 제어의 관점에서 접근을 시도했으며, Desantis는 dynamic feedback을 이용한 제어기를 구현하였다. 이 밖에 특별한 경우로 Svestka는 모든 궤적은 원과 직선으로 표현되며 선·각속도가 일정하다는 가정 하에 기구학 식의 정확한 해를 구했으며, Canudas de Wit 등은 two-wheel driven cart로 구성된 train-like vehicle(TLV)을 virtual cart를 이용한 feedback 제어기를 구현하였다. Altafini는 후진하는 vehicle에 연결된 trailer의 간단한 경로(직선, 일정 곡률의 곡선)를 제어하는 feedback control scheme을 모형을 통해 실험하였다.

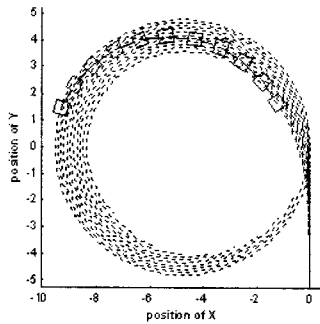


그림 3.2.1.1.50 Direct-axle trailer system

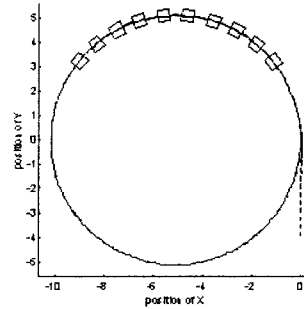


그림 3.2.1.1.51 Off-axle trailer system

그림 3.2.1.1.50와 그림 3.2.1.1.51는 2차 년도 보고서에 보고되었던 Direct-axle trailer system과 Off-axle trailer system의 trajectory tracking error를 보여주는 simulation 결과이다. 결과에서 증명되었듯 Off-axle trailer system은 실제적인 설계가 용이하고, 뛰어난 궤적 추종성능을 가지고 있다.

(1)Trailer 설계

공공 서비스 로봇은 대형건물과 같은 실내환경에서 최적화 되도록 설계되어졌다. omni-directional wheel로 구성된 mobile platform을 이루고 있기 때문에 서비스 로봇 자체만 주행 시에는 장애물이나 벽면에 대한 충돌 회피는 용이하다. 그러나 로봇이 트레일러를 장착하고 주행하게 되면 충돌 회피에 대한 제약조건이 형성되어진다. 이를 보정하기 위해서는 로봇의 경로를 trailer를 고려하여 계획하는 방법이 있겠지만, 그에 앞서 트레일러의 적합한 크기를 결정하는 것이 우선이다.

(가)Simulation

trailer의 적합한 size를 얻기 위하여 simulation을 수행하였다. 고정된 parameter들은 트레일러 링크의 길이와 연속적으로 연결되는 트레일러의 숫자이다. Off-axle트레일러 시스템에서 링크의 길이는 D_0 , L_1 , D_1 (그림 165)이 모두 같을 때 가장 좋은 추종 성능을 가지게 된다. 그런데 PSR1의 D_0 는 약 390mm이다. 이 길이와 동일하게 L_1 과 D_1 을 설정하게 되면 트레일러의 전체길이는 약 780mm이고, 로봇이 작은 반경으로 회전할 경우 트레일러와의 접촉을 방지하기 위해서 적재부의 크기를 줄일 경우 물건을 적재할 수 있는 부분의 크기는 크게 작아진다. 트레일러의 크기가 작아지면 그 만큼의 효율이 감소하므로 L_1 과 D_1 은 약 520mm로 고정하였다.

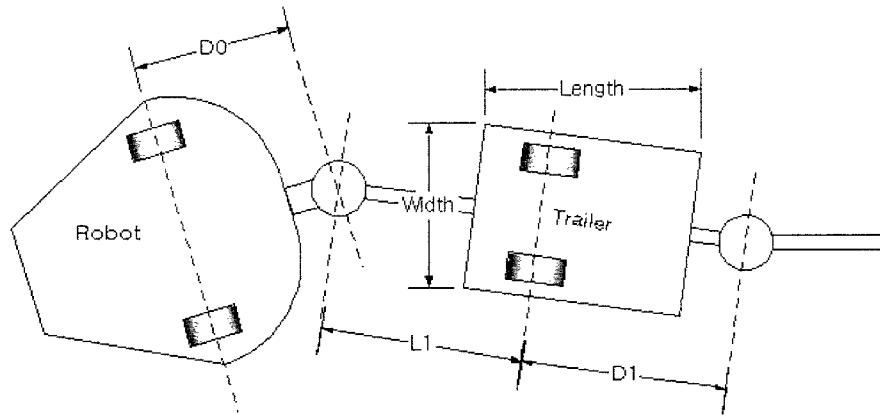


그림 3.2.1.1.52 Trailer parameter

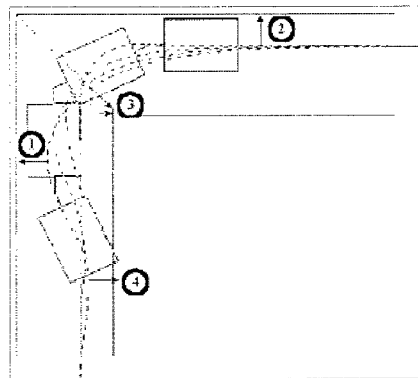


그림 3.2.1.1.53

Simulation은 trailer수를 4대로 하고, robot이 회전하는 반경을 0.1m에서 최적의 복도 폭이 얻어질 때까지 수행하였다. 최적의 복도 폭을 구하는 과정은 그림3.2.1.1.53와 같다. 즉 ①과 ④는 robot의 회전 시 마지막 trailer의 지그재그 현상으로부터 얻어지는데 마지막 trailer가 corner를 돌기 전 robot 궤적 중심으로부터 각각 좌우 폭을 결정한다. 한편 ②는 robot의 회전 후 이동 궤적으로 좌측 폭을 결정한다. ③은 ①과 ②로 결정되는 선을 이등분하는 선이 마지막 trailer의 궤적과 만나는 점으로 마지막 trailer가 회전 가능한 최소 폭을 결정한다. ③과 ④에서 결정된 우측 폭 중 큰 값을 선택한다. 그림 3.2.1.1.54는 trailer의 폭을 각각 800, 600, 400mm로 simulation한 결과이다. 충돌없이 주행 가능한 복도의 폭은 가장 후방에서 주행되는 trailer에 의해서 결정되어진다. 마지막 trailer는 누적되는 tracking error가 가장 크기 때문이다.

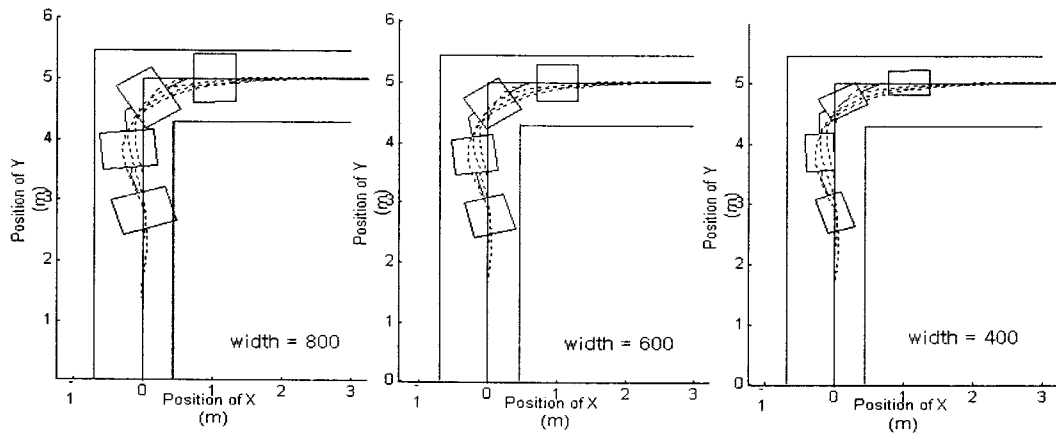


그림 3.2.1.1.54 복도 주행 simulation

위의 simulation 결과로 적재부의 길이=600mm, 폭=400mm 이면 약 1.2m의 복도를 충돌 없이 주행 할 수 있다. 대형건물의 일반적인 복도의 폭은 약 1.5m이므로 로봇이 3개의 트레일러와 함께 안전하게 주행할 수 있다.

(나)design

① 전체

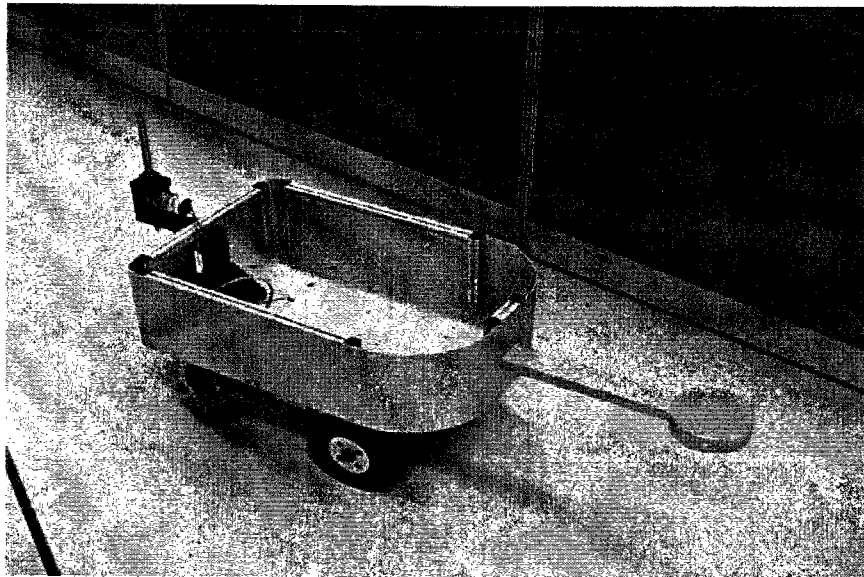


그림 3.2.1.1.55 Trailer 외관

② Brake system

trailer의 brake system은 PSR1과 분리될 경우에 자중이나 외부 충격에 의해 자신의 위치가 변경되지 않기 위하여 사용된다. 일반적으로 brake disk가 사용되나, bake disk의 경우에 brake를 작동시키기 위해 전류를 계속 공급해주어야 하는 단점이 있다. trailer의 경우에는 속도를 감속하는 brake가 필요한 것이 아니고 PSR1과 분리되었을 때에 그 위치를 유지하면 되므로 간단한 기구학적인 설계로 소비 전력을 감소할 수 있다.

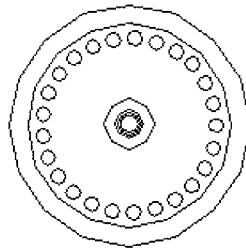


그림 3.2.1.1.56
Wheel stopper disk

그림3.2.1.1.56은 본 trailer에 적용된 brake system으로 solenoid와 spring을 이용하여 구현된 mechanism을 보여준다. trailer의 wheel에는 wheel stopper disk가 고정되어있고, 이 disk에는 좌측 그림과 같이 여러 개의 stop hole이 형성되어있다.

그림3.2.1.1.56에서 보듯이 1개의 brake system은 2개의 solenoid로 구성되어있다. stopper는 solenoid2가 S1(spring)과 J1(revolution joint)에 의해 회전운동을 하게되어 stop hole에 삽입되어 wheel의 회전운동을 구속시키게 된다. brake를 on 시키기 위해서는 Solenoid 2에 24v 전압을 가하게된다. 그러면 stopper가 stopper disk hole에 들어가게 되고, stopper에 부착된 자석과 hall effect sensor가 반응하여 solenoid 2에 공급되는 전원을 차단한다. off 할 경우에는 solenoid 1에 전압을 가하게 되고, 마찬가지로 hall sensor의 신호가 들어오면 전류를 차단한다. 이러한 방식은 solenoid에 계속적인 전원공급이 필요하지 않으므로 효과적으로 trailer의 상태를 제어할 수 있다.

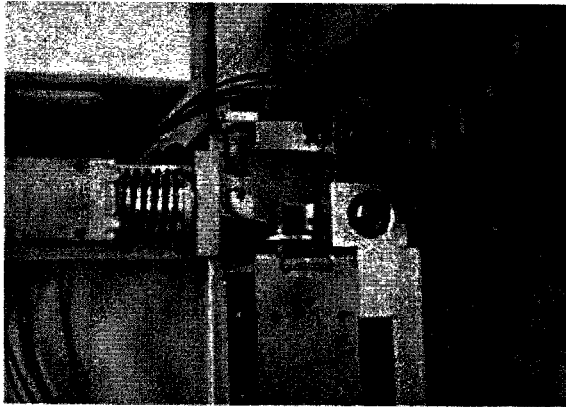


그림 3.2.1.1.57 Brake

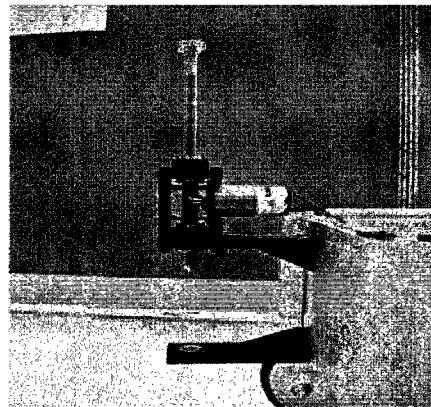


그림 3.2.1.1.58 Docking system

③ Docking system

PSR1과 trailer, trailer와 다른 trailer와는 king pin을 이용하여 수직 결합을 한다. Link bar에서 king pin과 연결되어지는 connecting block의 구멍의 크기는 robot의 king pin의 크기와 robot의 오차를 고려하여 직경 60mm로 제작되었으며 docking의 용이함을 위하여 tapping 되었다. motor와 king pin과는 rack&pinion gear로 구성되어 motor 회전운동을 king pin의 병진운동으로 변환한다. motor의 회전 방향은 로봇에서 결정되어 전압을 가한다. king pin에 두 개의 자석을 상하에 부착하여 docking 장치에 부착된 hall-effect sensor로 king pin의 높낮이를 제한한다.

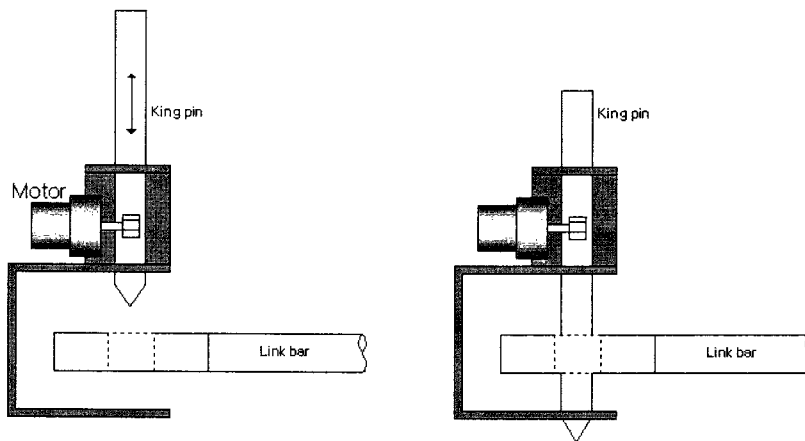


그림 3.2.1.1.59 Brake 작동 원리

④ RF(radio frequency) 송수신 module

Trailer는 로봇의 목적에 따라서 docking 또는 undocking을 반복한다. RF module은 trailer의 brake와 docking 장치를 제어하기 위하여 사용된다. 송수신 module은 Analog사의 6 channel RF 송수신기가 사용되었고, microchip은 PIC16c73b를 사용하였다.

마. 이동로봇의 calibration

(1) 개요

(가) 연구목적

본 연구는 현재 개발된 Omni-Directional Mobile Robot인 PSR-1과 같이 Two wheel differential-drive mobile robot의 두 가지 주요한 에러의 원인이 되는 odometry error를 측정하고 감소시키기 위한 실제적인 방법[1]과 이와는 대조적으로 로봇이 운영 중에 자동적으로 로봇이 사용하는 센서를 이용하여 온라인 상에서 기구학적인 변수들을 적절히 변화시키는 통계적인 방법을[2] 가지고서 실험에 적용하고자 하였다.

실제로 환경이 바뀌게 되면 이동로봇의 기구학적인 변수들이 변하게 된다. 이동로봇이 사용되어지는 환경에 따라 온라인 상에서 최종 사용자가 간단한 조작으로 Calibration을 통해 로봇의 현재의 자신의 위치를 추정하는데 필요한 최소한의 변수들을 쉽게 재정의 할 수 있는 알고리즘 개발하는데 목표를 둔다.

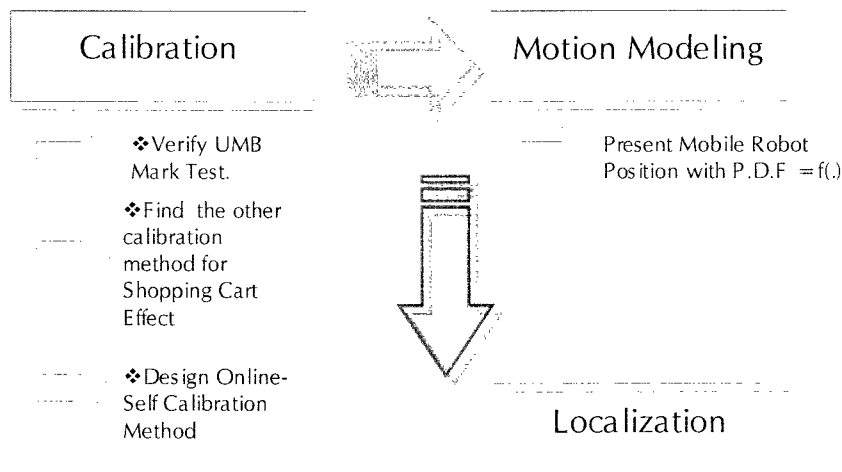


그림3.2.1.1.60 Calibration Objective and Overview

PSR-1 과 같이 전 방향 구동 방식의 자유로운 이동을 하는 장점과 현 진행 방향에서 반대방향으로 전환 시 발생하는 Shopping Cart Effect와 같은 단점을 가지고 있기에 이동 중에 위치 오차를 수반하게 된다. PSR-1에 적합한 Calibration 방법을 개발하고자 한다.

Robot calibration is not a novel idea.[2] 하지만, 극소수의 이동로봇을 위한 calibration 기술이 적용되어져 왔다. 주된 원인은 로봇이 항상 움직여 다닌다는 것이다. 이는 기구학적인 변수들이 끊임없이 변한다는 것을 의미한다. 그림 3.2.1.1.60에서처럼 이동로봇이 이동 중에 필연적으로 발생하게 되는 위치 오차의 보정 정도(resolution)가 이동로봇의 Localization 에 지배적인 영향을 미치게 된다. 이는 로봇의 움직임을 어떻게 Modelling 하느냐가 중요하다.

(나) Definition Odometry Error Properties for Calibration Mobile Robots

일반적으로 선형 이동 중에 엔코더가 읽는 값에 부정확성을 수반하게 되는 주된 원인들을 아래의 그림처럼 두 가지 형태로 분류되어진다. 즉, systematic 에러와 non-systematic 에러로 분류하게 된다.[1]

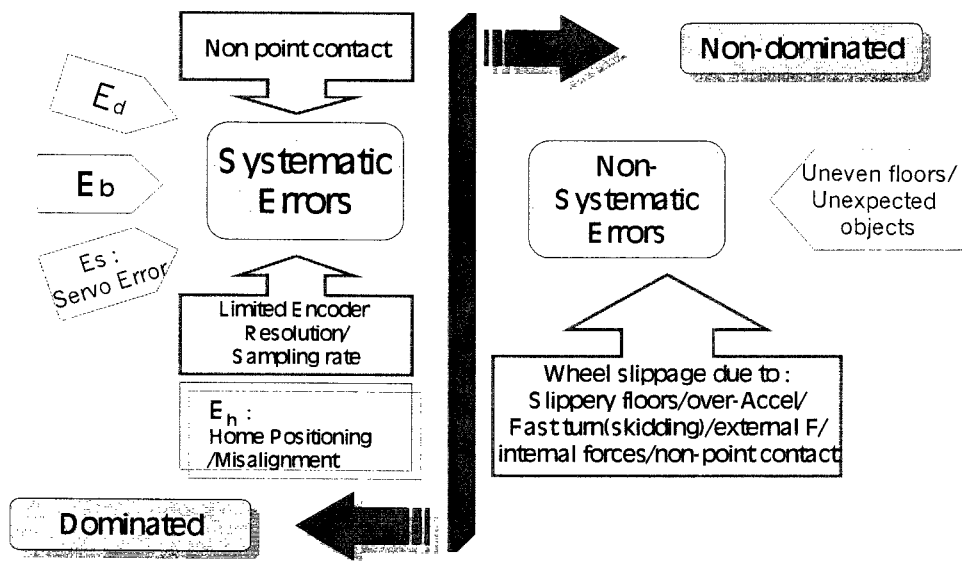


그림3.2.1.1.61 Odometry Errors Properties

① systematic error

㉠ Unequal wheel diameters;

㉡ average of both wheel diameters differs from nominal diameter;

㉢ misalignment of wheels;

㉣ Uncertainty about the effective wheelbase(due to non-point wheel contact with the floor)

㉤ limited encoder resolution;

㉥ limited encoder sampling rate;

② non-systematic error

㉠ travel over uneven floors;

㉡ travel over unexpected objects on the floor

㉢ wheel-slippage due to;

slippery floors/over-acceleration/fast turning(skidding)/external forces (interaction with external bodies)/internal forces(caster wheels)/nonpoint wheel contact with the floor

㉣ shopping cart effect

(다) Interesting systematic Errors Vs. non-systematic errors

불규칙적으로 심한 거친 환경에선 non-systematic error들이 주된 원인이 되지만 서비스 로봇의 주된 활동 영역인 공간에서의 주된 영향을 미치는 에러들은 아래의 그림에 설명이 되어져 있다.

(나) 알고리즘

위에서 언급했던 것처럼 bidirectional square path 실험은 두 가지 중요한 정보를 준다. 시계방향과 반 시계방향으로 실험 후의 로봇의 위치 결과들이 어떠한 군을 이룬다는 것이고 그러한 특성이 바로 non-systematic 한 에러들의 특성으로 인해 기인한 것이다.

UMBMark 실험을 수행 한 후,

1) A set of return position errors

$$\varepsilon_x = x_{abs} - x_{calc}$$

$$\varepsilon_y = y_{abs} - y_{calc}$$

$$\varepsilon_\theta = \theta_{abs} - \theta_{calc}$$

2) The center of gravity

$$x_{c.g.,cw/ccw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{xi,cw/ccw}$$

$$y_{c.g.,cw/ccw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{yi,cw/ccw}$$

odometric accuracy를 표현 할 수 있는 하나의 수치값을 얻을 수가 있다. non-systematic error 값을 효과적으로 줄이기 위해 형성되는 로봇의 위치들이 이루는 군들(set)의 도심을 적용하였다.

3) The absolute offsets from the origin

$$r_{c.g.,cw/ccw} = \sqrt{(x_{c.g.,cw/ccw})^2 + (y_{c.g.,cw/ccw})^2}$$

4) The measure of odometric accuracy for systematic errors

$$E_{max,sys} = \max(r_{c.g.,cw}; r_{c.g.,ccw})$$

위의 식에서 보여주듯이 평균 값을 취하지 않고 최대 값을 취하는 이유는 실제적인 적용에 있어서 최악의 상황에 까지도 고려해야할 필요가 있기 때문이다.

- One interesting aspect
 - *non-systematic errors* → *non-reproducible* → *random* → *no correction factors*
- Define Two New Error Characteristics
 - TYPE A
 - *non-reproducible* → *non-dilatation error that reduces (or increases) the error in one direction* → *non-reproducible* → *non-dilatation* → *both CW and CCW/dilatation*
 - $|\theta_{total,CW}| < |\theta_{nominal}|$ and $|\theta_{total,CCW}| < |\theta_{nominal}|$
 - TYPE B
 - *non-reproducible* → *dilatation error that reduces (or increases) the error in one direction* → *non-reproducible* → *dilatation* → *one direction, but increases (or reduces) the error in the other direction*
 - $|\theta_{total,CW}| > |\theta_{nominal}|$ and $|\theta_{total,CCW}| > |\theta_{nominal}|$
- How to distinguish and compute TYPE A and TYPE B errors from the measured final position errors -> Simplified Model Approach !!

UMBMark Test 방법은 [1]의 과정을 충실히 따랐다. 이러한 실험을 통해 에러의 분포 형태의 경향을 관심을 가짐으로써 분석적으로 보정할 수 있는 factors 이끌어 낼 수 있다는 것이다. 아래의 그림에 두 가지 타입의 특성을 정의하고 어떻게 구별하여 적용할지에 관한 근거를 제시되어 있다.

위의 A, B 타입의 에러들을 분석에 보면 아래의 식들로 정리 될 수 있다.
 매 90도 회전을 할 때마다 미지의 회전 에러양의 값을 아래의 평균 식으로 구하고

$$\alpha = average \left(\frac{x_{c.g.,cw} + x_{c.g.,ccw}}{-4D} \left(\frac{180}{\pi} \right), \frac{y_{c.g.,cw} - y_{c.g.,ccw}}{-4D} \left(\frac{180}{\pi} \right) \right) \quad (1)$$

곡선 주행으로 인해 로봇이 회전 에러 양이 증가하게 될텐데 이는 아래의 평균 식으로 구한다.

$$\beta = average \left(\frac{x_{c.g.,cw} - x_{c.g.,ccw}}{-4D} \left(\frac{180}{\pi} \right), \frac{y_{c.g.,cw} + y_{c.g.,ccw}}{-4D} \left(\frac{180}{\pi} \right) \right) \quad (2)$$

이렇게 구해진 알파와 베타를 가지고서 휠의 직경과 베이스의 에러를 아래의 식으로 구한다.

$$E_d = \frac{D_R}{D_L} = \frac{D + B \sin(\beta/2)}{D - B \sin(\beta/2)} \quad (3)$$

위 식(3)은 B 타입의 에러를 보정할 수가 있다.

$$E_b = \frac{90}{90 - \alpha} \quad (4)$$

위 식(4)는 A 타입의 에러를 보정할 수가 있다.

휠 직경의 에러의 경우는 소프트웨어적으로 보상하는데 다소 복잡하다. 이를 해결하기 위해 휠 직경의 평균은 변하지 않는다는 것을 이용하여 아래의 식들을 가지고서 양쪽의 휠 직경에 각각의 factor들을 적용하여 보상한다.

$$\begin{aligned} D_a &= (D_R + D_L)/2 \\ D_L &= \frac{2}{E_d + 1} D_a & C_R &= E_d C_L \\ D_R &= \frac{2}{(1/E_d) + 1} D_a & C_L &= \frac{2}{(E_d + 1)} \Delta U_{L/R,i} = C_{L/R} C_m N_{L/R,i} \end{aligned}$$

(2) Calibration 실험

아래의 그림처럼 실험은 on-board Intel celeron 586/500Mhz 컴퓨터를 장착한 PSR-1 서비스 로봇을 가지고 수행하였다. 최소한의 바닥과 휠의 미끄러짐을 방지하기 위해 가능한 직진과 회전 주행 시 속도를 낮추었다. 실제로 주행한 이동로봇의 사각주행은 2×2m 주행 할 수 있도록 이미 프로그램 되어 만든 reference velocity를 이용해 주행을 시켰다. 또한 전 방향 구동방식의 휠 구조로 인해 steering wheel 은 고정을 시키고 two wheel differential 형식으로 바뀌서 실험을 수행하였다. Calibrator로서 SICK-Laser를 사용하였고 RS-232를 통해 200ms 마다 측정된 로봇의 실제 위치의 레이저 자료를 업데이트 시켰다.

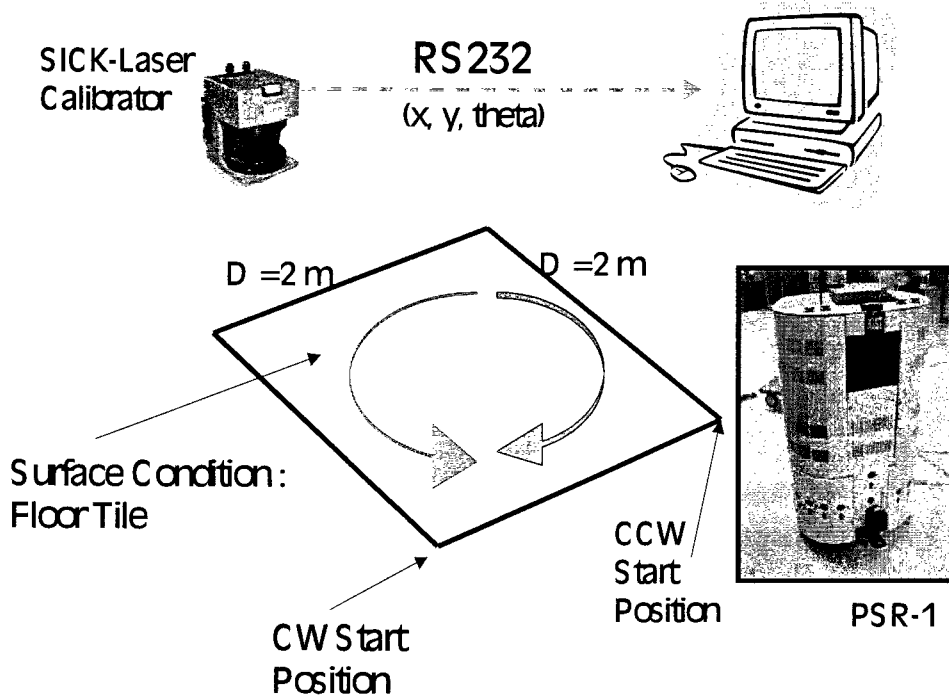
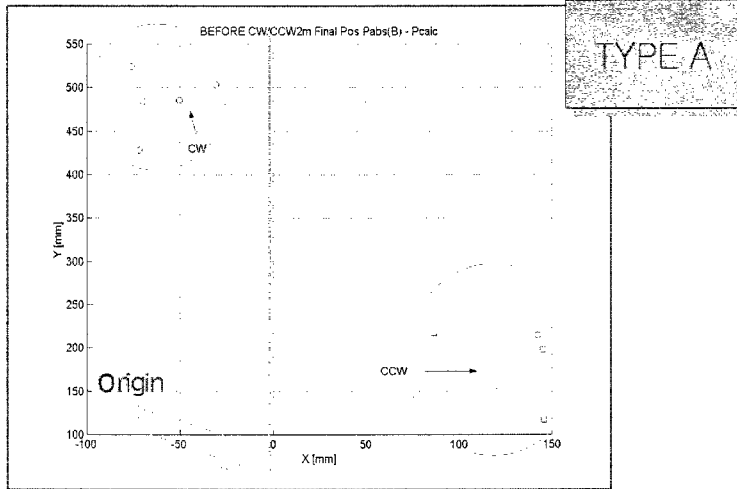


그림 3.2.1.1.62 실험 환경

로봇을 사각주행을 CW 방향으로 5번 CCW 방향으로 5번을 수행 한 후 이미 예상한 결과를 얻게 된다.

Return Position Errors의 군들의 결과들은 아래의 그림에 나타나듯이 뚜렷한 각 방향에 군을 형성하게 된다. center of gravity를 계산하고 로봇의 위치를 (1)~(4)식을 적용하여 보상할 factor들을 계산해 낸다. 이 값들을 이용하여 실제 UMBMark 실험을 검증하기 위

한 2차 시도를 하여 얻은 결과는 아래의 그림과 각 과정들의 식들의 적용위치를 설명한 내용들이다. 보상 후의 결과가 원점으로 모이는 경향을 보였다.



위에서 언급한 내용처럼 두 가지의 뚜렷한 군을 형성하는 데 실험 결과 PSR-1의 경우는 Type A가 나왔다. 이는 Wheel base 에러가 주된 요인으로 작용하고 있음을 알 수 있고 아래의 식들을 이용하여 계산한 Calibration Factor들을 이동로봇의 기구학적인 변수들을 소프트웨어적으로 업데이트 시켰다.

Result of Calculation

The center of gravity

$$x_{cg_cw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{x_cw} \varepsilon_{y_cw}$$

$$y_{cg_cw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{x_cw} \varepsilon_{y_cw}$$

where, n=5 is the number of runs in each direction

Ed = 1.0678
Eb = 0.8383
Cl = 0.9672
Cr = 1.0328

$$C_s = E_s C_t$$

$$C_t = \frac{2}{(E_s + 1)}$$

x_cg_cw = -59.727
y_cg_cw = 485.0877
x_cg_ccw = 127.9625
y_cg_ccw = 179.4356
E_Max_syst = 488.731

$$C_s = (E_s + E_t) \cdot 2$$

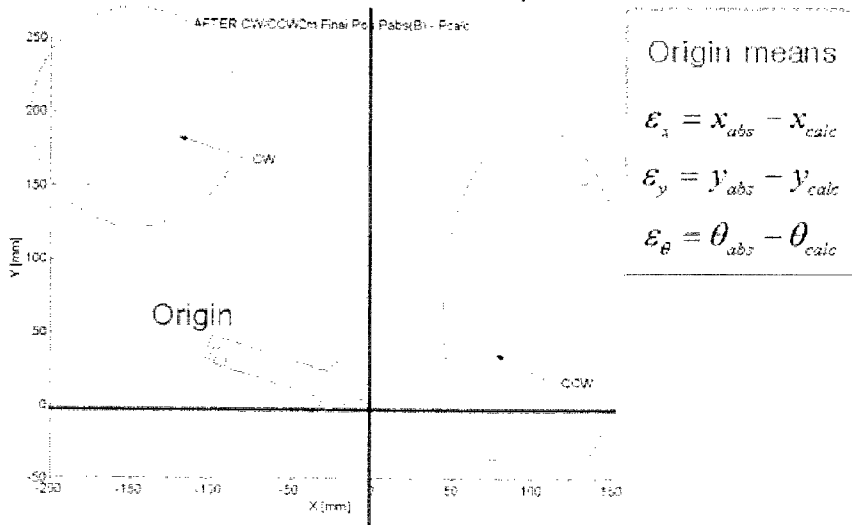
$$E_s = \frac{2}{E_t + 1} E_t$$

$$E_t = \frac{2}{(1 + E_s) + 1} E_s$$

x_cg_cw = -141.6357
y_cg_cw = 198.0007
x_cg_ccw = 112.7426
y_cg_ccw = 64.3361
E_Max_syst = 243.4439

위에 식들을 이용하여 계산하여 얻어진 calibration factor 들은 위와 같다. 보정된 이 값들을 이용하여 다시 한번 실험을 통하여 최종의 Return Position Errors를 살펴보았다. 그 결과는 아래의 그림과 같다.

Result of Correction Odometry Errors

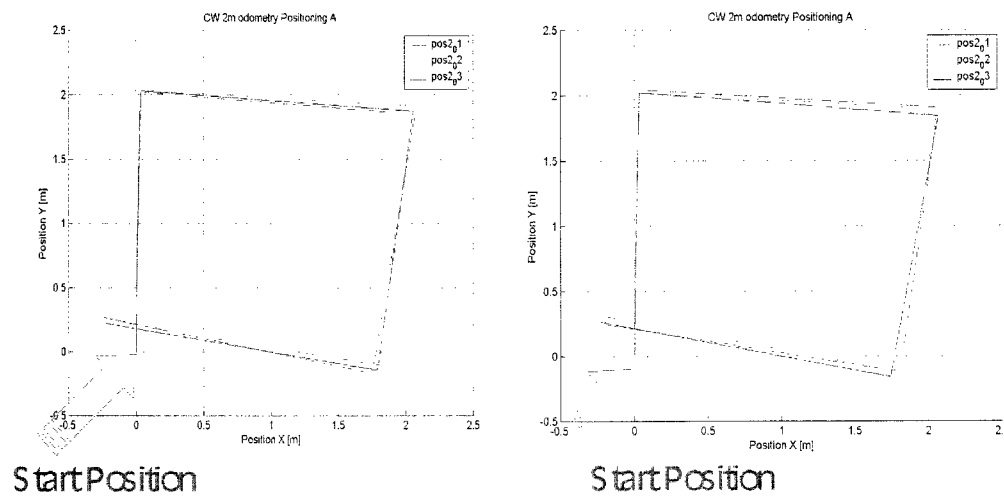


아래의 그림은 실제 PSR-1에 사용되는 모션보드를 이용해 휠의 엔코더 값을 읽어 plot한 자료이다. 엔코더의 odometry 위치 에러들을 plot 해보았다. 이는 실제 레퍼런스 로봇에 던져주는 값과 엔코더의 값을 적분한 결과와 실제 동작을 한 레퍼런스의 값과의 차이를 분석하고자 함이다.

위에서 언급한 non-systematic errors 들 중에 slippery floors/over-acceleration/fast turning(skidding)/external forces(interaction with external bodies)/internal forces(caster wheels)/nonpoint wheel contact with the floor 등으로 인해 기인한 에러들이 얼마나 영향을 미칠 지에 대한 자료로서 분석하기 위한 자료들이다.

결과는 레퍼런스대로 어느 정도 따라감을 보여주고 있다.

CW 2m Odometry Positioning Data



CCW 2m Odometry Positioning Data

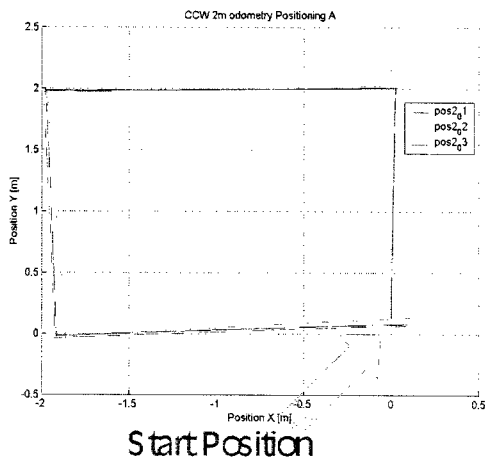


그림. Before Calibration

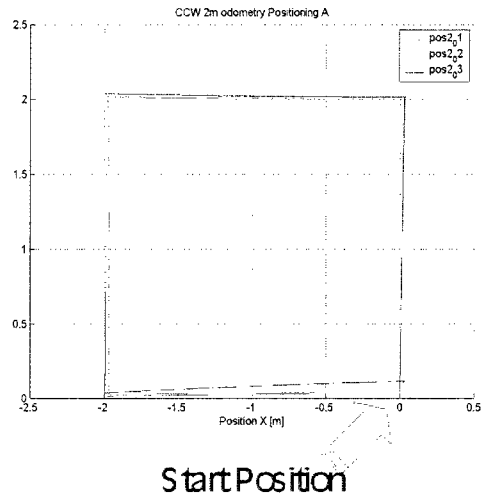
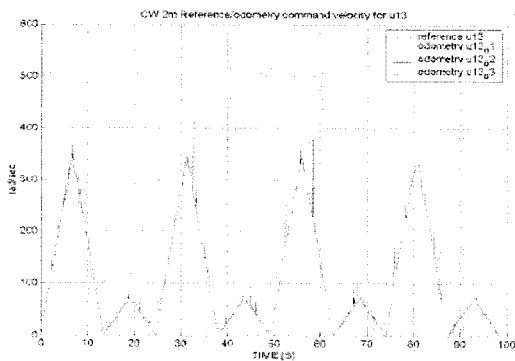


그림. After Calibration

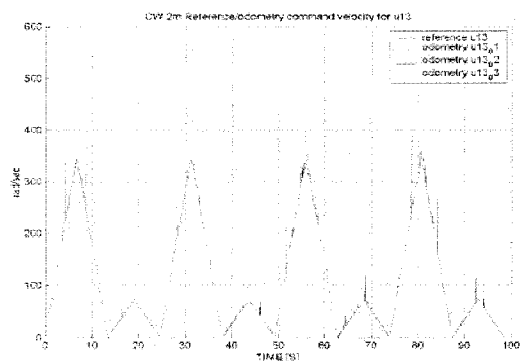
아래의 그림들은 실제 PSR-1에 사용되는 모션보드를 이용해 각 휠 모터에 레퍼런스 command velocity로 지령된 값과 실제 모션보드(PMAC)에서 통해 확인 할 수 있는 휠의 속도를 plot한 자료이다.

이는 데이터를 통해 레퍼런스 velocity와 servo velocity 와를 비교하여 servo control error를 보고자 함이다. 조금 튀는 것을 제외하곤 0.1~0.2 %이내의 에러율을 보이고 있다. 이는 서보제어 성능에 영향을 미치지 않는 수치임을 알 수가 있다.

CW 2m Reference Odometry Command velocity For #13 Motor

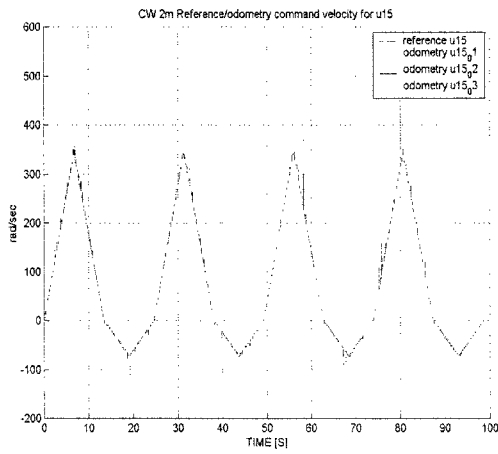


Before Calibration

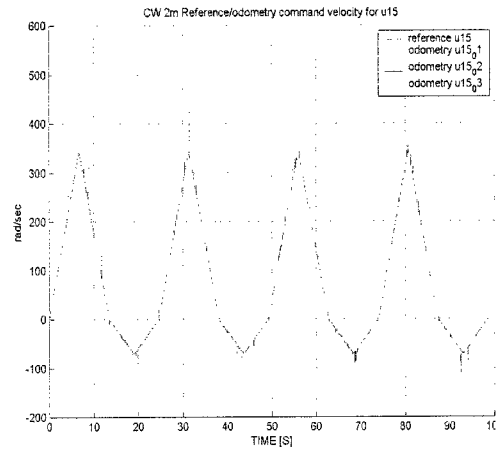


After Calibration

CW 2m Reference Odometry Command velocity For #15 Motor

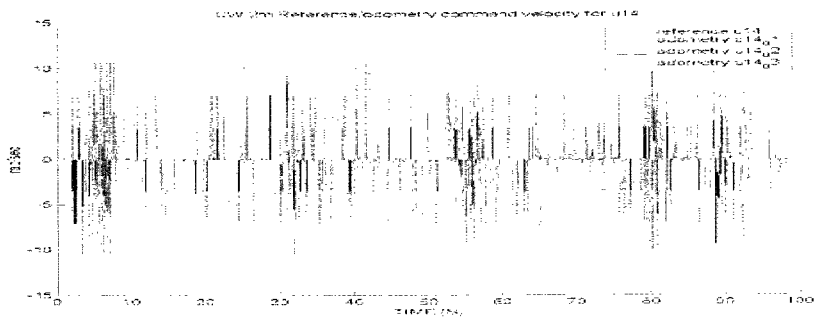


Before Calibration

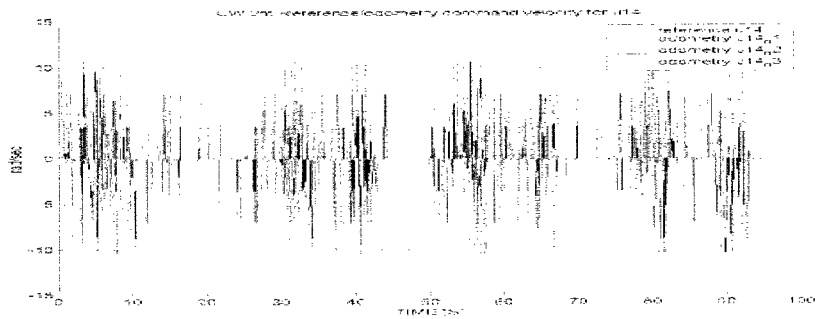


After Calibration

CW 2m Reference Odometry Command velocity For #14 Motor

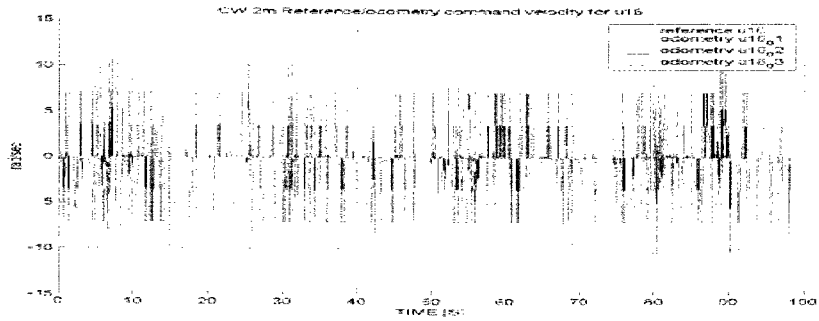


Before Calibration

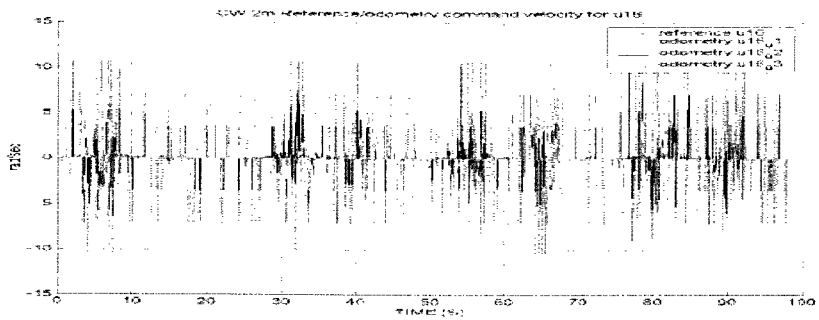


After Calibration

CW 2m Reference Odometry Command velocity For #16 Motor

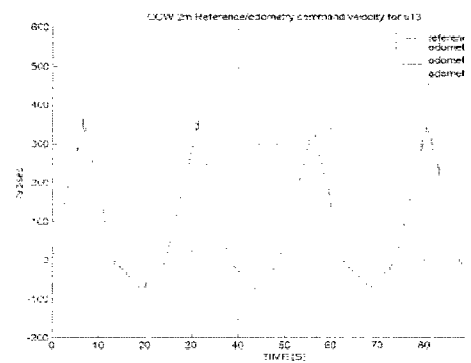
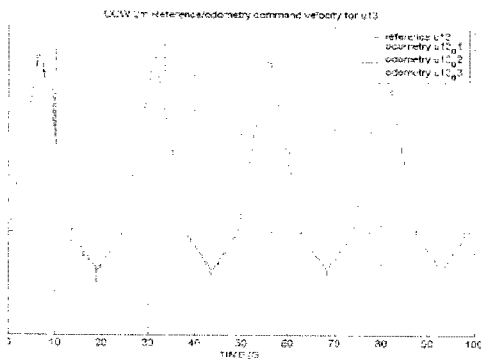


Before Calibration

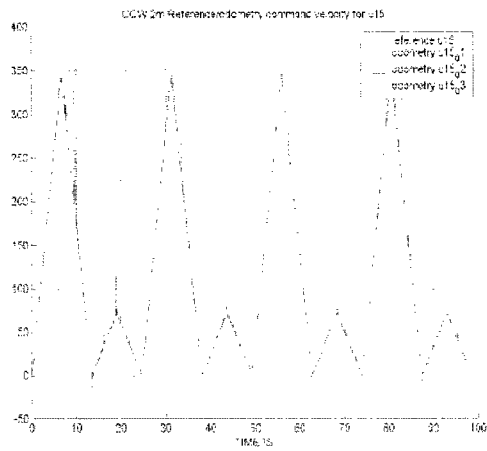


After Calibration

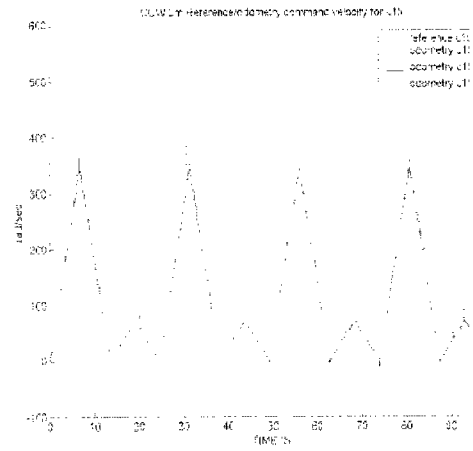
CCW 2m Reference Odometry Command velocity For #13 Motor



CCW 2m Reference Odometry Command velocity For #15 Motor

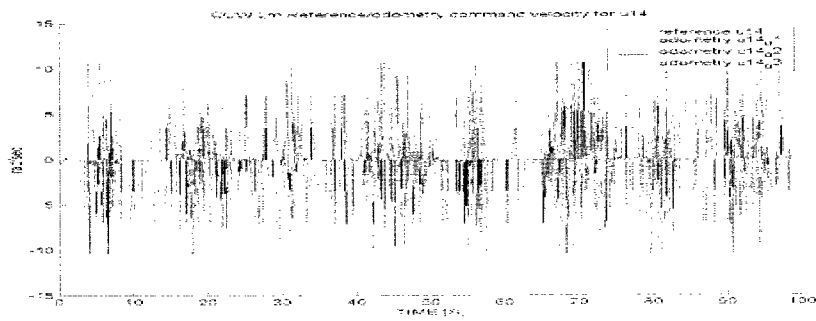


Before Calibration

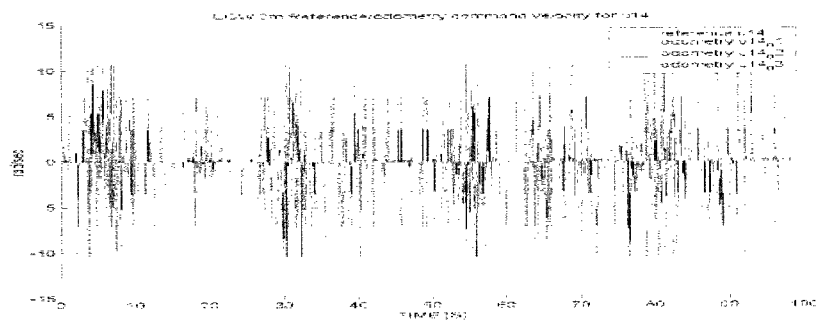


After Calibration

CCW 2m Reference Odometry Command velocity For #14 Motor

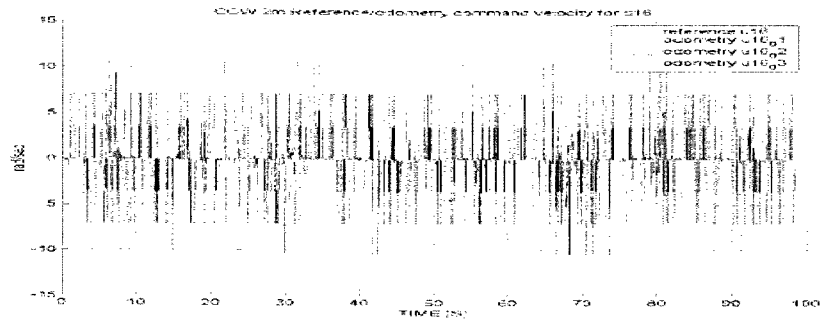


Before Calibration

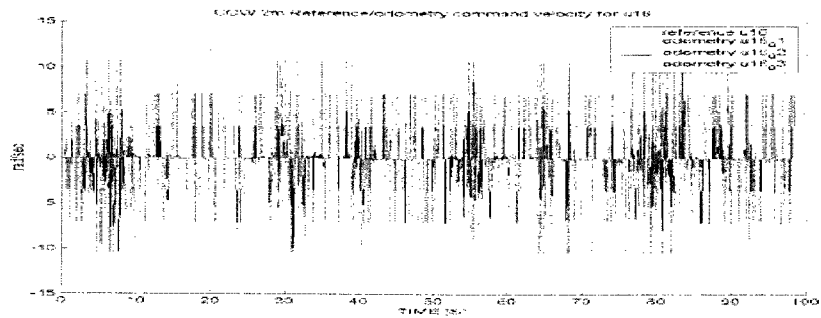


After Calibration

CCW 2m Reference Odometry Command velocity For #16 Motor



Before Calibration

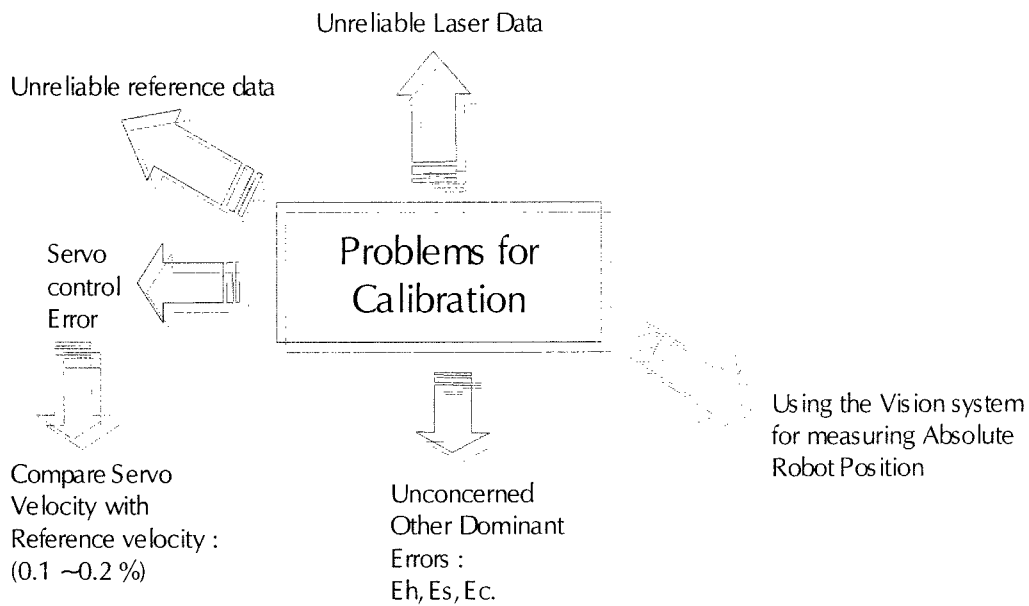


After Calibration

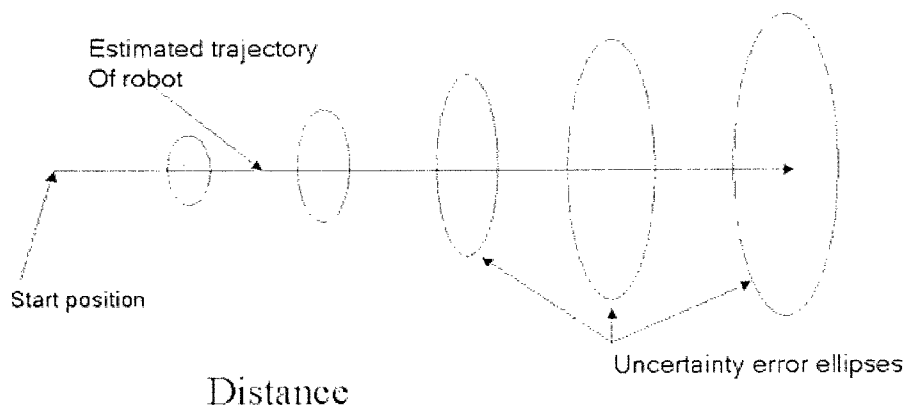
(3) Currently, Our Problems for Calibration

본 연구의 실험 결과의 내용들을 볼 때 기존의 위치 오차를 수정하기 위해 알고리즘 [1]을 적용하여 계산하여 각 factor들의 보상 결과들을 보였고 그 결과들을 plot 해 보았다.

레퍼런스로 던져주는 파일이 로봇 사각주행에 적절하게 실제 로봇이 움직인 레이저 데이터를 정확하게 산출하는데 많은 시간과 계산이 소요가 되었다. 실제로 서보 제어의 샘플링 시간은 63ms 이고 레이저의 데이터 업데이트 샘플링 시간은 200 msec 이다. 이러한 서로 다른 샘플링 오차로 인해 발생하는 문제가 남아있다. 이동 로봇의 홈밍 작업 시 홈 센서의 위치가 휠 베이스 에러의 영향을 미친다. 이는 정확한 센서의 위치에 적용하는 것이 아직은 어려움이다. 하지만, 기존의 제안된 이동로봇 calibration 방법은 현재 PSR-1 메커니즘의 단점으로 지적되는 Shopping cart Effect 의 효과로 발생하는 위치오차 및 서보 오차 등을 바로잡기엔 역부족이다.



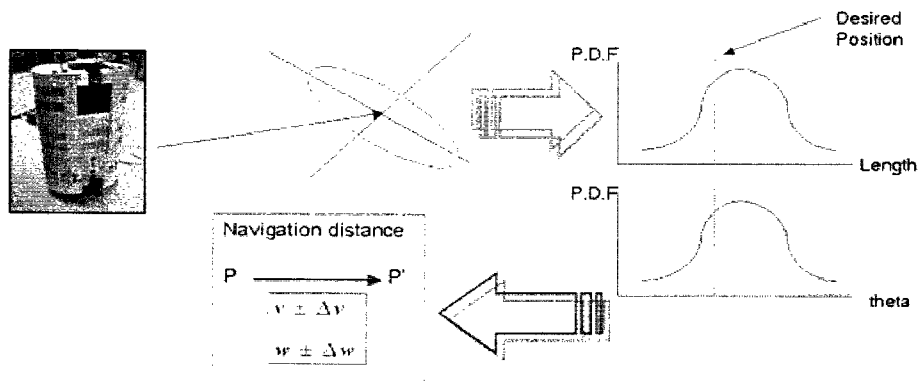
(4) Further Works



$$St(n)_t = ASt(n)_{t-1} + Bw(n)_t$$

이동 로봇의 직진 주행 실험 및 사각주행을 통해 로봇의 주행 거리에 따른 위치에 대한 확산 분포를 나타낸 그림이다. $St(n)$ 은 샘플링 시간에 따른 로봇의 상태(Status)이다. 행렬 A 는 이동로봇의 기구학적인 변수들이다. 이는 지금까지의 실험 결과 등을 이용하여 도출해 낼 수 있는 행렬이며 이동로봇의 Calibration을 통해 얻어진 기구학적인 행렬 값 (A)을 소프트웨어적으로 변화를 줄 수가 있다. 그리고, $w(n)$ 은 로봇에 목표 위치로 이동

을 위해 주어지는 desired velocity이다. 이 값은 행렬 B의 영향으로 인해 다음 상태에서의 로봇 위치에 불확실성을 유발하게 된다. 이는 주행 시에는 초기의 로봇의 위치와 desired velocity 값의 적분의 합이 로봇의 최종 위치가 되는데, 1/n 씩 균일하게 자른 sample set 을 random 하게 골라서 1/n 의 확률을 부여해 감으로써 주행거리를 계산해 내는 B 매트릭스의 모델링에 대한 연계 연구로 이어지게 된다. 아래의 그림은 이러한 과정을 설명한 것이다.



1.2 조작기술

가. PSR 1 매니플레이터 개발

(1) 개요

서비스 로봇에서의 매니플레이터의 성능은 실제 로봇에 부여된 작업의 성공적인 수행 여부를 직접적으로 결정하는 중요한 사양이 된다. 따라서, 로봇이 등장한 이후 다양한 환경에서 각각의 환경 조건 하에서 최적의 성능을 발휘할 수 있는 메커니즘이 끊임없이 연구되어 왔다.

기존의 산업 현장에서 비교적 고정된 상황에서의 단순한 과정만을 반복적으로 수행하는 로봇과 달리, 서비스 로봇은 그 특성 상 인간과 동일한 환경에서 불규칙적으로 변화하는 상황에 대해 견실하고 유연하게 대처할 수 있는 기능을 갖추어야 한다. 또한 최근에는 이러한 사양에서 더 나아가 기능을 수행하는 과정에 있어서 인간에게 피해를 주지 않는 안전성을 요구하고 있다.

본 연구에서는 공공 장소에서의 서비스 기능을 수행하는 데 적합한 로봇 매니플레이터를 개발하였다. 개발된 시스템은 6자유도의 직렬 연결 기구 형태를 갖추고 있으며 이동체에 결합되어 물류 이송 등과 같은 작업을 원활히 수행하기 위한 작업 영역을 보유하도록 설계되었다.

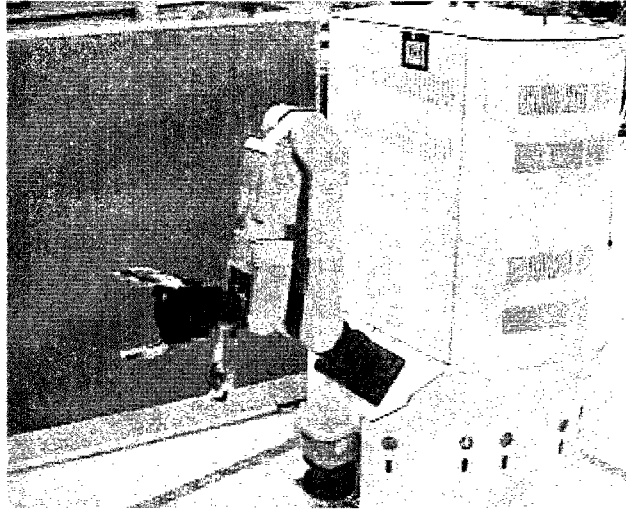


그림 3.2.1.2.1 이동체에 결합된 매니플레이터

(2) 운동 영역의 설정

개발된 매니플레이터는 베이스를 포함한 7개의 링크가 6개의 1자유도 회전 조인트로 연결되어 엔트 이펙터(End Effector)에 공간 상에서의 6자유도를 부여하고 있다. 또한 매니플레이터의 최 하단 링크가 45도 경사면에 부착됨으로써 전방위에 보다 넓은 작업 공간을 확보할 수 있도록 구성되었다. 홈 위치에서의 조인트의 변위를 원점으로 하는 경우의 회전 범위는 다음과 같이 설정하였다.

표 3.2.1.2.2 개발된 매니플레이터의 각 조인트의 회전 이동 범위

Joint	최소 회전 범위	최대 회전 범위
1	-180 °	+180 °
2	-135 °	+135 °
3	-100 °	+90 °
4	-180 °	+180 °
5	-120 °	+120 °
6	-180 °	+180 °

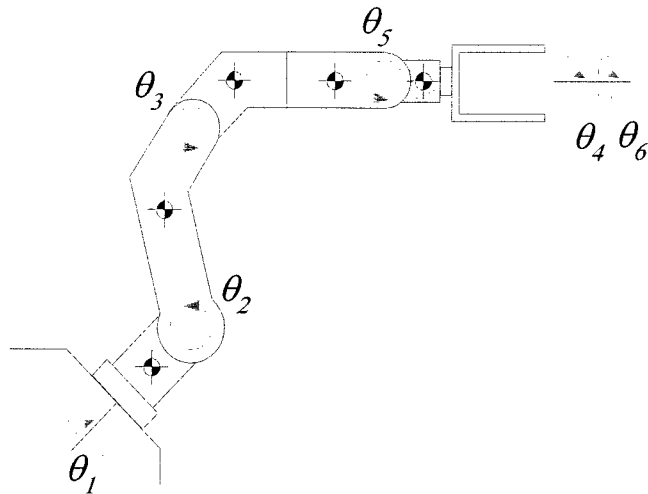


그림 3.2.1.2.3 매니플레이터의 홈 위치(Home Position)

위의 표에 제시된 조인트의 회전 영역에 대해서, 1번, 2번과 3번 조인트의 경우는 각 최대, 최소 회전 변위가 독립적으로 결정되지 않는다. 즉, 작동 중에 이동체와 매니플레이터, 매니플레이터와 바닥 면 사이에 충돌이 발생하지 않도록 하기 위한 각 조인트의 작업 영역은 조인트 1의 변위에 따른 함수로 결정되며, 이는 역기구학을 통해 주어진 엔드 이펙터의 위치 및 자세에 따른 각 조인트의 목표 변위를 계산하는 경우에 구속조건 (Constraint)으로서 작용하게 된다.

(3) 제어 시스템의 구성

일반적으로 매니플레이터의 제어 목표는 엔드 이펙터가 고정 좌표계에 대해 6자유도 공간 상에서 정해진 위치 및 자세를 갖도록 하는 것이다. 이 경우에 엔드 이펙터의 중심의 위치 및 자세로 결정되는 벡터 공간을 작업 공간(Work Space)이라 정의하며 각 조인트의 변위로 구성되는 벡터 공간을 조인트 공간(Joint Space)이라 정의한다.

매니플레이터의 엔드 이펙터를 현재의 초기 위치 및 자세에서 원하는 위치 및 자세로 이동시키기 위한 방법은, 어떠한 공간 상에서 경로를 생성하는가에 따라 구분된다. 즉, 초기 상태와 목표 상태 간의 이동 경로를 작업 공간 상에서 생성하고 이를 추종하도록 제어하는 방법을 작업 공간 경로 추종 모드(Work Space Trajectory Tracking Mode)라 하고, 이와는 반대로 조인트 공간에서 생성된 경로를 추종하도록 제어하는 것을 이산 경로 추종 모드(Joint Space Trajectory Tracking Mode)라 한다. 조인트 공간 경로 추종 모드는 이동 중에 매번 역기구학 해를 구할 필요가 없으므로 제어의 샘플링 시간(Sampling Time)을 단축할 수 있으며, 제어 시스템 구조가 단순해지고, 또한 이동 중에 매니플레이터의 특이점(Singular Position)과 같은 역기구학 해가 존재하지 않는 상황이 발생하지 않는다. 그러나,

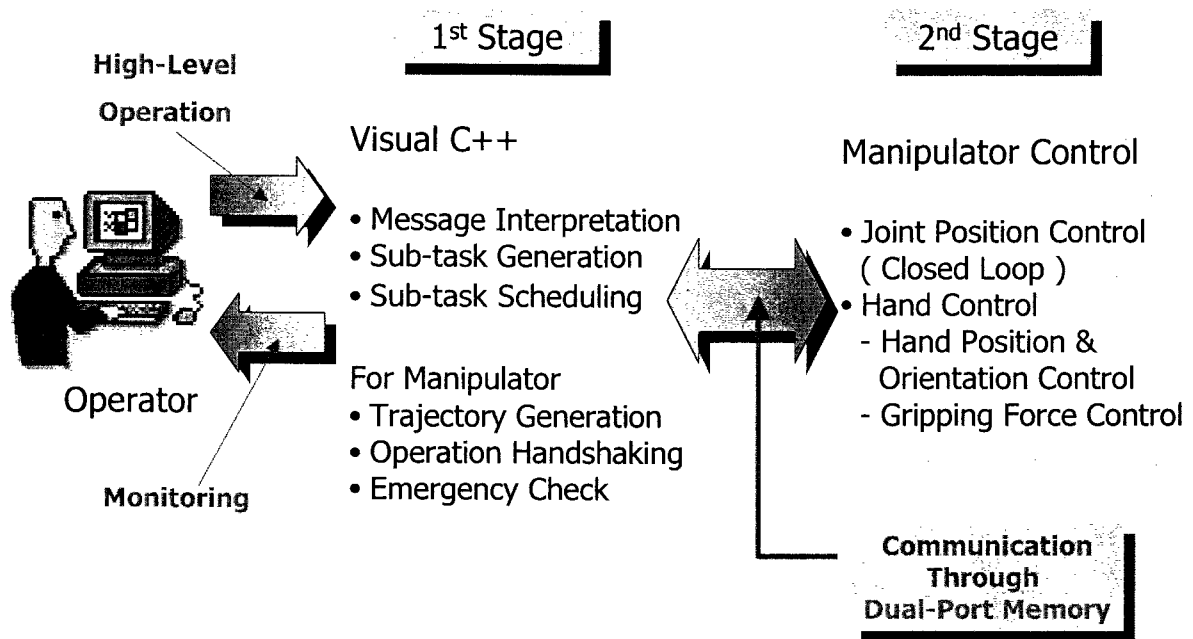
이동 중간의 엔드 이펙터 및 매니플레이터의 자세 예측이 어려우며 이에 따라, 매니플레이터 및 엔드 이펙터가 이동 경로 상에 있는 장애물이나 이동체 본체에 충돌할 가능성이 크다. 이에 대해, 작업 공간 경로 추종 모드에서의 제어는 사전에 충분히 예측할 수 있는 작업 공간 상에서의 엔드 이펙터의 위치 및 자세를 제어 기준 신호로 제공하기 때문에, 사전에 충돌 회피를 위한 경로 계획이 용이하게 되고, 또한 문 열기(Opening Door)와 같은 정밀한 동작을 요구하는 작업 수행이 가능하게 된다. 그러나, 전술한 바와 같이 이 경우에는 이동 중에 발생할 수 있는 특이점 문제를 예측할 수 있고 또 이에 대해 적절히 대응할 수 있는 제어 전략이 필요하게 된다.

(가) 제어 시스템 하드웨어

매니플레이터의 폐루프 제어 시스템(Closed Loop Control System)의 성능은 서보 샘플링 시간(Servo Sampling Time)에 반비례한다. 즉, 샘플링 시간이 짧을수록 성능이 향상되고 이에 따라 고속의 동작 제어가 가능하게 되는데, 이에 대한 한계는 제어 시스템 하드웨어의 성능에 의해 좌우된다. 또한 일반적으로 제어 시스템으로서 PC를 사용하게 되는 경우, 고속 샘플링에서의 실시간(Real Time) 보장 가능성이 낮아진다. 이러한 문제를 극복하기 위한 방안으로서 일반적으로 적용하는 방법이 2단 제어 시스템(2 Stage Control System)이다. 상위 제어 시스템에서는 비교적 저속의 샘플링 속도로 매니플레이터의 제어 기준 입력을 하위 제어 시스템에 전송하며, 하위 제어 시스템에서는 이에 대한 정보를 토대로 2차 경로 계획을 수립하고, 이에 대해 고속의 샘플링 속도로 각 조인트의 구동 시스템을 직접 제어하는 방식이다. 이러한 방법은 특히 비교적 저속 동작만으로도 충분한 성능을 발휘할 수 있는 경우에 대한 최적의 해법을 제시한다.

2단 제어 시스템은 다축 제어를 지원하는 PMAC 모션 제어기 및 이와 관련한 부속 모듈(Accessary Module)로서 구성되어 있다. PMAC(Programmable Multi-Axis Controller)은 Motorola 56300 계열의 고속 DSP를 탑재하여 최대 45 μ sec 의 샘플링 시간으로 동시에 8축의 모터를 제어할 수 있으며 확장 보드를 통해 32개의 축으로의 확장이 가능하다.

Control System Architecture



3.2.1.2.4 매니플레이터 제어 시스템의 하드웨어 구성도

또한 다양한 형태의 입출력을 제공하며 호스트 컴퓨터와 듀얼 포트 메모리(Dual Port Memory)를 통한 고속의 데이터 통신이 이루어진다. 그 특징을 요약하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 동시에 32축 제어 가능 및 이를 위한 256개의 Motion Program 운용 가능.
- 완벽한 Stand-Alone Operation 제공
- 다양한 적용 분야를 위한 기능 제공. (역기구학 모듈, G-Code 생성 모듈,...)

PSR 서비스 로봇에서는 Turbo PMAC2 모션 제어기에 ACC-24P 옵션 보드를 채택하여 모두 14축(매니플레이터 6축, 핸드 4축, 이동로봇 휠 구동 및 조향 4축)을 제어한다. 매니플레이터는 호스트 컴퓨터로부터 전송된 각 6축의 제어 기준 입력이 내부의 모션 프로그램에 입력되고, 이에 대해 각 축당 약 400 μ sec 의 서보 샘플링 시간으로 안정적인 제어를 수행한다. 본 시스템에서는 채널 확장을 위한 ACC-24P 옵션보드 외에 핸드부에 장착된 스트레인 게이지 신호 입력을 위한 ACC 28A 4 Channel A/D Converter 및 ACC 8DK, ACC 8E와 같은 입출력 연결을 위한 악세사리 보드 등으로 구성되어 있다.

(나) 제어 시스템 소프트웨어

(1) 운동 제어기

이동체에 결합되었을 경우의 통합 운용 소프트웨어 외에 매니플레이터 단독 동작을 위한 제어 프로그램을 개발하였다. 이는 전체 소프트웨어에 이식하기 이전에 매니플레이터의 작업 수행을 위한 다양한 알고리즘의 검증 작업을 수행한다.

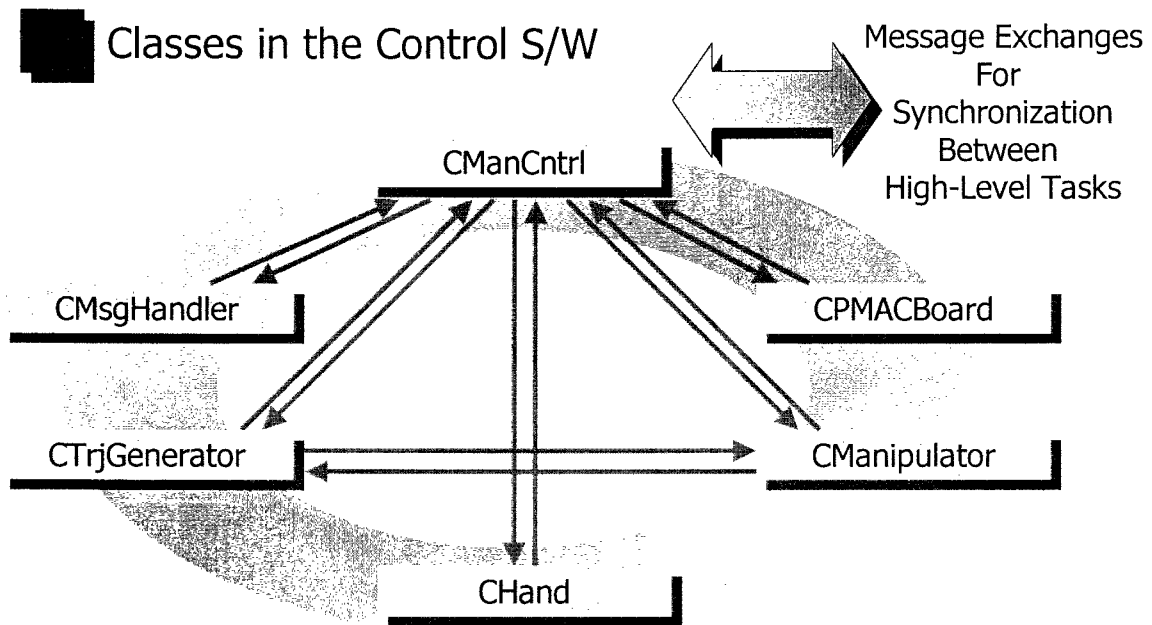


그림 3.2.1.2.5 매니플레이터 제어 소프트웨어의 주요 클래스 구성도

[CManCntrl class]

본 클래스는 매니플레이터 제어에 관한 전반적인 프로세스를 관리한다. 즉, 이벤트 핸들러 및 매니플레이터 경로 생성기를 호출하며 PMAC 보드와의 인터페이스를 통해 매니플레이터와 핸드를 직접 제어하는 역할을 수행한다.

[CMsgHandler class]

매니플레이터 운용 시에 발생할 수 있는 이벤트(오동작, 특이점 존재, 등등)에 대한 처리 및 이와 관련한 다른 객체의 멤버 함수를 호출한다.

[CTrjGenerator class]

작업 정보 파일로부터 읽어들이는 각 작업에 대한 프로세스 시퀀스(Sequence)에 따라 적절한 프로세스를 생성하고, 이를 위해 필요한 매니플레이터의 작업 공간 또는 조인트 공간에서의 경로를 생성하여 매니플레이터 제어 클래스의 객체로 넘겨 준다.

[CPMACBoard class]

매니플레이터 제어 클래스의 객체와 PMAC 보드 사이의 데이터 입출력 및 명령어 전송을 위한 멤버 함수를 제공한다.

[CManipulator class]

매니플레이터의 기구학적, 동역학적 파라미터 정보를 관리하며, 순기구학, 역기구학 해석 및 매니플레이터 자코비안(Manipulator Jacobian)등을 계산할 수 있는 멤버 함수들을 제공한다.

[CHand]

CManipulator 클래스와 유사한 역할을 수행한다. 즉, 매니플레이터에 장착된 핸드에 대한 구동 제어, 스트레인 게이지 측정 신호 처리 등을 수행한다.

나. PSR 2 암 개발

PSR 2의 개발 목적은 사람과 passive compliant joint (PCJ)와 visco-elastic 커버를 갖는 암을 설계, 제작함으로써 compliance 발생의 신뢰도를 높이고, 이를 통해 서비스 로봇 암의 안전성과 interaction 성능을 높이는 것이다. 이를 그림으로 표현하면 다음과 같다

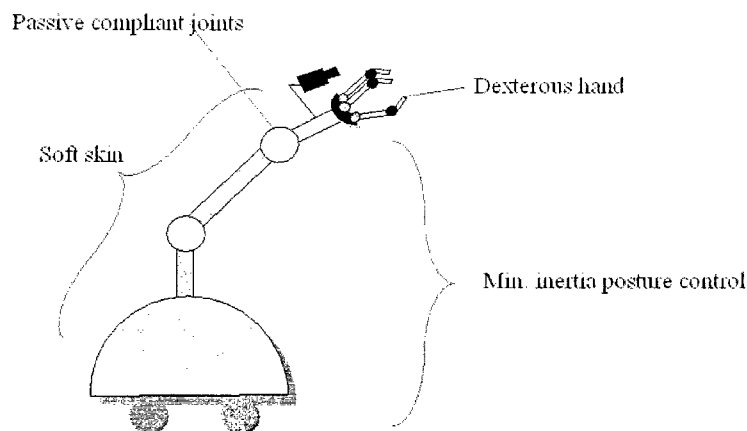


그림. PSR 3.2.1.2.6 암의 개발 목표 개념도

여기서, PCJ는 회전 스프링과 MR (magneto-rheological) 유체를 사용한 댐퍼를 갖도록 구현한다. 다음 소절들에서는 PSR 2 암의 개발을 위한 기준들을 제시하고, 이를 바탕으로 한 설계 결과 및 시험 평가방안에 관해 논한다.

(1) 안정 지수 및 방안

본 절에서는 안전 지수를 세우고 이를 바탕으로 암의 설계 방안을 제시한다. 암의 설계 및 평가를 위한 안전 지수를 사람과 로봇간에 충돌이 발생했을 때 사람에게 전달되는 힘의 크기로 설정한다. 이를 위해 [4]에서의 실험 결과를 근거로 하여 다음과 같은 조건을 만족하면 안전하다라고 평가한다:

$$F \leq 80 N.$$

이를 만족하기 위한 암 설계 방안을 도출하기 위해 충돌시 짧은 시간동안의 로봇 암의 동특성을 고려하자 [7]:

$$H\Delta\theta + T = J^T F\Delta t$$

여기서, H 는 시스템의 조인트 공간 관성 행렬, θ 는 암의 조인트 각도 벡터, T 는 조인트 토크와 마찰에 기인한 항이고 J 는 자코비안 행렬이다. 이를 cartesian 공간으로 변환하면 다음과 같이 정리된다:

$$M_e \Delta v + J^T T = F\Delta t$$

여기서 M_e 는 cartesian 공간 관성 행렬이고 Δv 는 충돌 전후의 cartesian 공간 좌표 변수의 속도차이다. 이 식으로부터 충격 힘의 크기에 주로 암의 질량, 충돌 전후의 속도 차, 조인트 토크가 영향을 줄 수 파악할 수 있다. 그러므로 충격 힘을 줄이기 위해서는 암을 최대한 가볍게 제작하거나, 암의 조인트와 몸체에 컴플라이언스 특성을 주는 방안을 고려할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 안전 방안 및 시나리오를 사용한다. 충돌 직후의 짧은 시간 동안은 다음과 같은 메커니즘에 의해 충격 힘을 감소 시킨다.

표. 안전 방안

충격 힘 F 요인	안전 대책	예상 결과
$M_e \Delta v$	Viscoelastic 커버를 암의 표면에 부착	50% 흡수
	암의 자세에 따른 속도 계획	50% 흡수
T	PCJ	대부분 흡수

그러나 어느 정도 시간이 지난 후에는 PCJ (passive compliant joint) 스프링의 작동 각도 범위를 초과하게 되어, 스프링이 역할을 못하는 상황이 발생하므로 이를 위한 대처 방안으로, PCJ의 스프링 변화를 관찰하여 충돌이 이루어졌음을 감지하고, 이를 바탕으로 암의 동작을 멈추거나 경로 변경을 하여 안전을 보장하도록 한다.

(2) PSR 2 암의 설계

(가) 개발 목표 사양

조인트에 MR 댐퍼와 스프링이 추가되면 각 조인트 별로 무게가 증가하게 된다. 이러한 무게 증가를 고려하고, θ , x , y 의 3자유도로 컴플라이언스 효과가 나타나도록 베이스 3축에만 PCJ를 채택하여 다음과 같은 암을 구성한다.

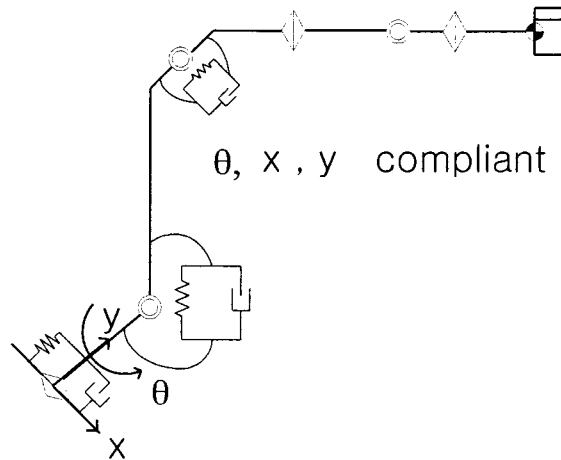


그림. PSR 3.2.1.2.7 암 간략도

암의 길이 사양은 다음과 같다.

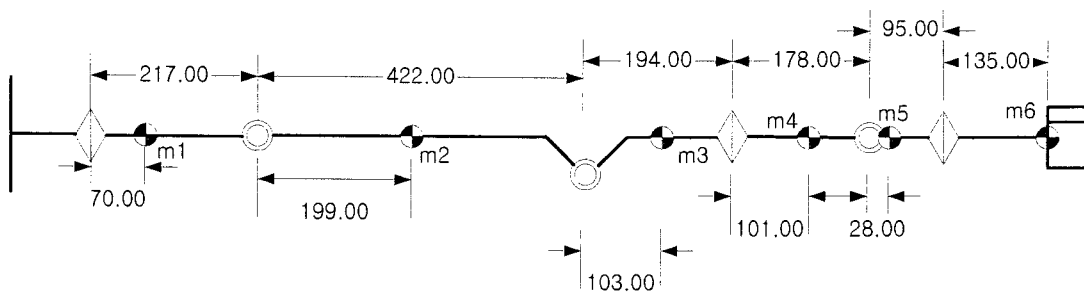


그림. PSR 3.2.1.2.8 암의 길이 사양

조인트에 MR 댐퍼와 스프링이 추가되는 메커니즘임에도 불구하고, PSR 1 암과 유사한 무게를 갖도록 암을 경량화 하여 다음과 같은 무게 특성을 갖도록 설계 제작한다.

표. PSR 2 암의 무게 사양

	Base	m1	m2	m3	m4	m5	total	m6(Load)
PSR-2	3.0	4.7	8.0	2.0	1.7	0.6	20.0	3.0

(나) 커버의 선정

본 절에서는 충격력을 효과적으로 감소 시키는 커버의 재질과 두께를 선정하기 위하여 접촉 모델을 세우고, 간단한 모의 실험을 한다. 폼은 다음과 같이 간략하게 스프링과 댐퍼로 나타낼 수 있다.

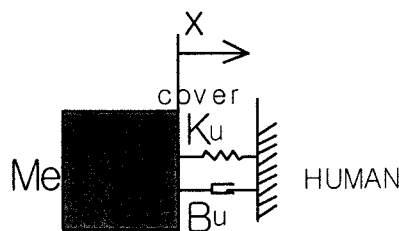


그림.3.2.1.2.9 접촉 모델을 세우기 위한 간략도

로봇 암을 간단한 질량체로 표현하고, 사람과 접촉했을 때의 모델을 세우면 다음과 같다:

$$M_e \ddot{x} = F_{human}$$

$$F_{human} = -B_u \dot{x} - K_u x$$

$$B_u = \frac{A \eta_m}{Z_m}, \quad K_u = \frac{A G_m}{Z_m}$$

여기서, M_e 는 질량, x 는 사람과 충돌시 압축되는 커버의 두께 변화, A 는 접촉 단면적, Z_m 은 커버의 두께, η_m 은 점성 계수로서 단위는 Pascal이고, G_m 은 탄성계수로서 단위는 Pascal*sec이다. 이 모델을 사용하여 일본 INOAC사에서 판매하는 여러 개의 우레탄 폼 (urethan foam)을 5mm 두께 조건하에 시뮬레이션을 통하여 평가한 결과 가장 흡수 성능이 뛰어난 SR-L-20 모델을 선정한다. 여기서 암의 외관측면에서 암이 커버가 없을 때에 비해서 너무 두꺼워지지 않도록 하기 위해 5mm 두께의 조건을 설정하였다.

(다) PCJ (passive compliant joint)의 설계

① 1축 PCJ를 갖는 암의 개발 및 실험

본 절에서는 다축에 PCJ를 채용하는 암의 개발을 위한 기초 단계로서, 1축 PCJ를 갖는 암의 개발 및 실험 결과에 대해 논한다. 개발을 위한 목표 사양은 다음의 표와 같다.

표. 1축 PCJ의 개발 목표 사양

목표사양	
항목	사양
Pay Load	3 kg
최고속도	1.5 rad/sec
가속시간	0.2 sec
최대진폭	0.12 rad
Settling Time	Max. 1.0 sec

개발을 위한 PCJ의 개념도는 다음과 같다.

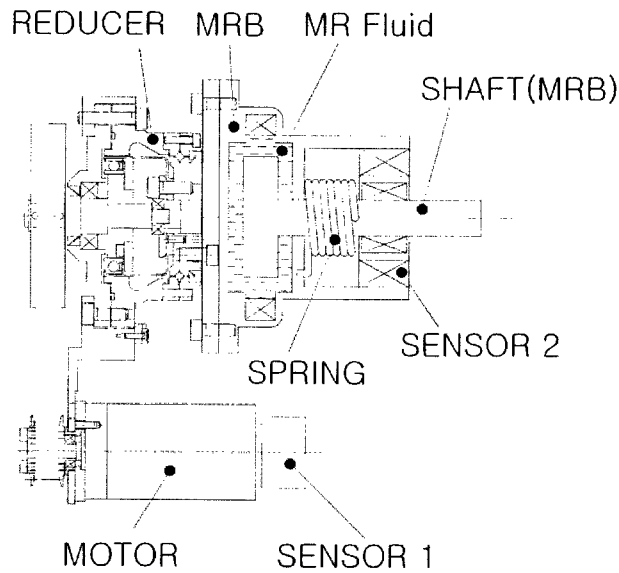
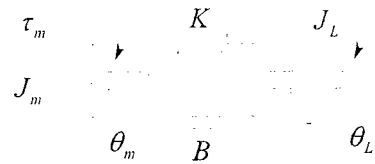


그림.3.2.1.2.10 1축 PCJ의 개념도

여기서 MRB (magneto-rheological brake)는 이후에 전류제어를 통해 댐퍼로서의 역할을 하게되고, SENSOR1은 모터의 회전각을 SENSOR2는 감속기 이후와 링크 사이의 상대각을 측정하는 장치이다. 이를 수학적으로 모델링 하면 다음과 같다.



$$\tau_m = J_m \ddot{\theta}_m + B(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_L) + K(\theta_m - \theta_L)$$

$$B(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_L) + K(\theta_m - \theta_L) = J_L \ddot{\theta}_L$$

그림.3.2.1.2.11 1축 PCJ 모델

여기서, τ_m 은 모터 토크, J_m 은 모터의 관성 모멘트, B 는 viscous coefficient, K 는 스프링 상수, J_L 은 링크의 관성 모멘트, θ_m 은 모터의 회전각, θ_L 은 링크의 회전각을 나타낸다. 회전 스프링은 다음과 같은 스프링 메커니즘을 사용한다.

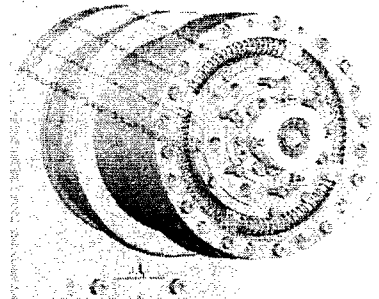


그림.3.2.1.2.12 3D 모델의 스프링 메커니즘

이 스프링 메커니즘의 개념도는 다음과 같다.

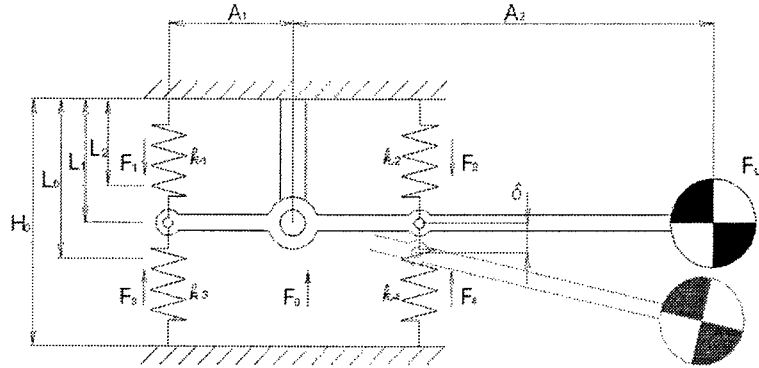


그림.3.2.1.2.13 스프링 메커니즘의 개념도

이 메커니즘의 탄성 계수를 계산하는 식은 $K=4k_1A_1^2 [Nm/rad]$ 이고 $k_1 \sim k_4$ 는 같다. 댐퍼는 LORD사의 MRB (magneto-rheological brake)와 전류 조절을 통해 구현하다. 원래 MRB는 다음과 같은 coulomb friction 특성을 갖는다.

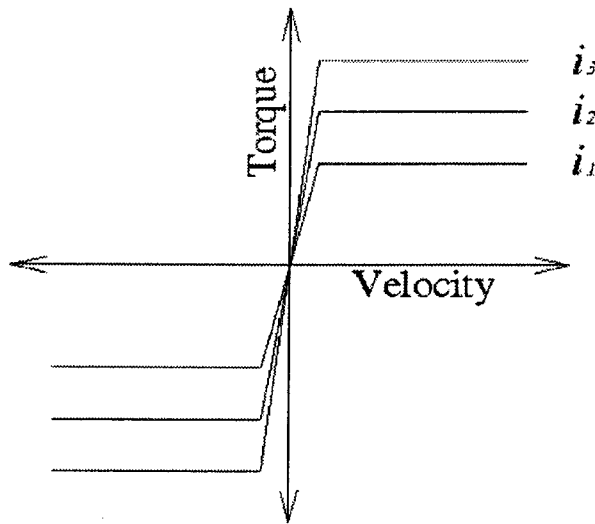
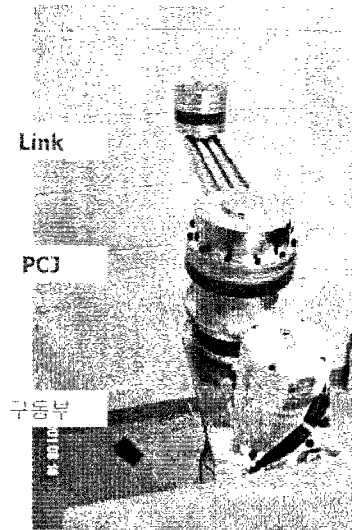


그림.3.2.1.2.14 MRB의 coulomb friction 특성

이때의 토크는 $\tau = 13.5i$ 의 관계식을 통해 전류에 비례하게 된다. 이때의 전류를 $i = \frac{B}{13.5} \theta$ 의 관계식을 만족하도록 각속도에 비례하게 인가하게 되면 결국에 $\tau = B\dot{\theta}$ 라는 식을 만족하는 viscous damping 특성을 갖는 댐퍼가 구현되게 된다. 스프링과 댐퍼를 갖도록 제작된 PCJ를 갖는 1축암의 외관은 다음과 같다.



제작된 PCJ 외관

그림.3.2.1.2.15 제작된 PCJ를 갖는 1축암의 외관

이 PCJ 암에 대해 임펄스 입력 실험을 한다. 25Nm, 0.2sec의 임펄스에 대해 댐핑 계수는 0 ~ 3로 변화시키며 실험을 수행하여 다음의 결과를 얻었다.

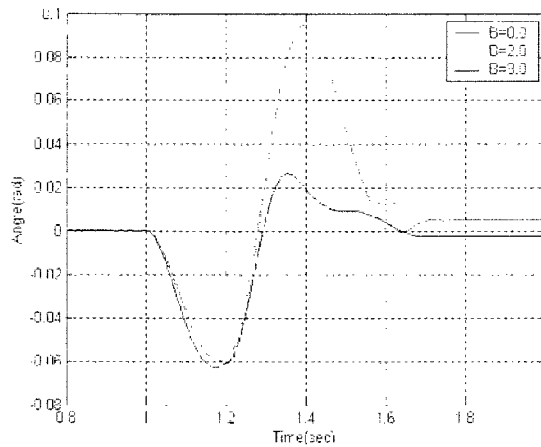


그림.3.2.1.2.16 임펄스 입력 실험 결과

설정된 댐핑 계수의 값이 변함에 따라 진폭과 settling time이 변화함을 확인할 수 있다. B=0인 경우에도 진폭이 감소하는 이유는 전류가 0이 되더라도 MR 유체의 기본 점성이 존재하기 때문이다. 전류를 1[A]까지로 제한하였을 때, 얻을 수 있는 viscous damping 계수의 최대치는 $B_{max} = 6.0$ 이었다. 이를 감쇠비로 환산하면 $\zeta_{max} = 0.42$ 이다. 또한 링크의 말단을 밀어서 interaction 성능을 확인해본 결과 진동과 interaction 성능 면에서 우수한 특성을 나타낸 것을 확인할 수 있었다. 지금까지의 실험 결과를 바탕으로 얻은 PCJ의 특성치를 정리하면 다음과 같다.

표. 1축 PCJ의 특성치 결과

항목	심볼	결과
관성모멘트	J_L	0.85 [Kgm ²]
탄성계수	K	60.3 [Nm/rad]
점성댐핑계수	B	0.39~6 [Nms/rad]
감쇠비	ζ_{max}	0.42

② PSR2의 PCJ 설계

본 절에서는 베이스 3축에 PCJ를 채택하기 위해 각 축의 주요 특성치인 viscous damping coefficient B와 torsional spring constant K의 선정 기준과 결과에 대해 논한다. 먼저 스프링의 파라미터 K의 선정은 일반적으로 암 설계시 1.5배 정도의 안전율을 주어 모터와 기어를 선정하는 것과 유사한 방법을 취한다. 스프링이 탄성 특성을 유지하면서 압축될 수 있는 조인트 각도를 조인트 구성시의 공간적 한계를 고려하여 최대 15 [deg]로 설정한다. 이 각도 범위 중에 중력 효과에 의해 처지는 각도가 10 [deg]가 되도록 스프링의 탄성 계수 K를 설정하며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다:

$$K = 1.5 T_g / \theta_{max}$$

여기서, T_g 는 그 조인트에 중력에 의해 작용하는 토크, $\theta_{max} = 15$ [deg]를 radian으로 변환한 값이다. 각도 5 [deg]를 여유로 설정한 이유는 과도상태에서의 진동으로 인한 스프링의 추가적 각도 변화량과, 충돌이나 사람과의 interaction시 추가적으로 움직여줄 것을 고려한 것이다. MR 댐퍼가 programmable하므로 B를 결정하는 문제는 다음과 같은 식으로 표현되는 viscous coefficient의 최대 값인 B_{max} 를 어떻게 선정하느냐는 문제로 바뀌어 표현할 수 있다:

$$\tau_{max} = B_{max} \theta_{max}$$

여기서, τ_{\max} 는 MR 댐퍼가 낼 수 있는 최대의 braking 토크이고 θ_{\max} 는 최대 각속도이다. 1축 PCJ 암을 실험해본 결과, 암의 2차 특성 방정식

$$s^2 + 2\zeta w_n s + w_n = 0$$

의 감쇠계수의 최대 값을 $\zeta_{\max} = 0.42$ 로 선정한 경우 이 범위 안에서 진동과 interaction 성능 면에서 우수한 특성을 나타낸 것을 알 수 있었다. 이를 바탕으로, 암의 파라미터로 표현되는 특성 방정식

$$s^2 + Bs + K$$

과 계수 비교하여 B_{\max} 를 설정하는 다음 공식을 유도하였다:

$$B_{\max} = 2\zeta_{\max} \sqrt{JK}$$

여기서 J 는 관성 모멘트이다. 이상의 선정 기준을 바탕으로 파라미터 BK 및 계산에 사용된 변수들의 값을 표로 정리하면 다음과 같다.

표. 각 축의 B, K 파라미터 선정

파라미터	조인트 1	조인트 2	조인트 3
중력 토크 T_g [Nm]	51.5	72.7	26.9
$K = 1.5T_g / \theta_{\max}$ [Nm/rad]	295	417	155
J [Kgm^2]	4.33	4.32	1.16
$B_{\max} = 2\zeta_{\max} \sqrt{JK}$ [Nm*sec/rad]	30.0	35.7	11.3
$\tau_{\max} = B_{\max} \theta_{\max}$ [Nm]	15.7	18.6	5.88

여기서, $\theta_{\max} = 0.262$ [rad], $\dot{\theta}_{\max} = 0.523$ [rad/sec], $\zeta_{\max} = 0.42$ 이다. 이 수치들을 반영한 PSR 2암의 설계 조립도는 다음과 같다.

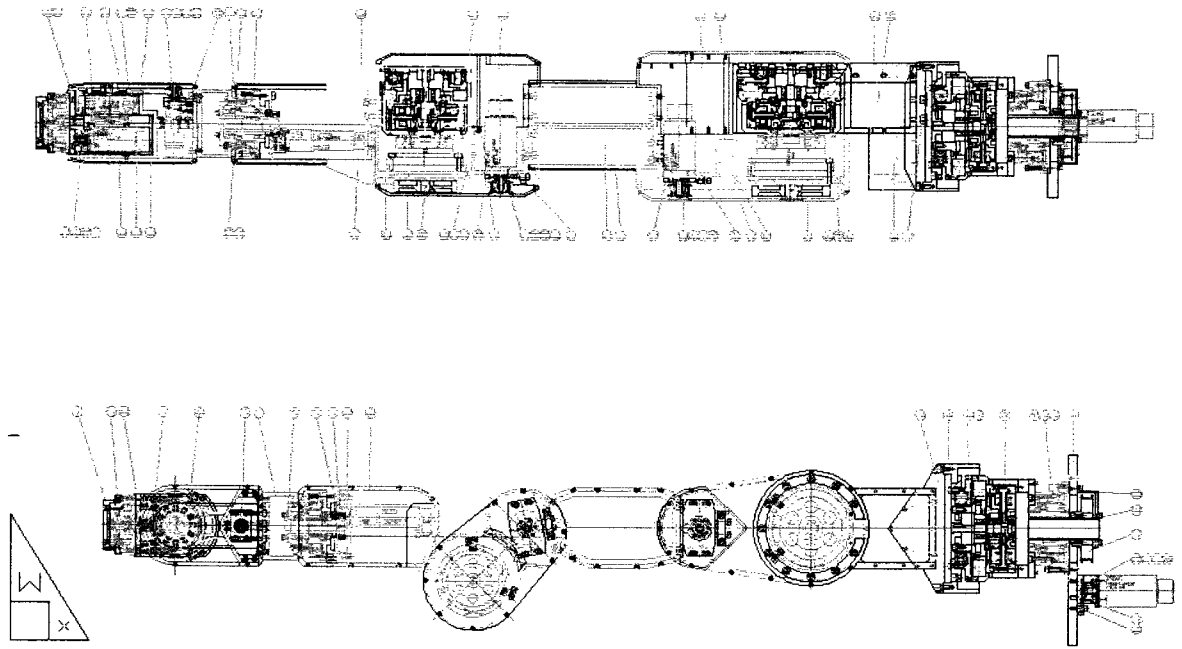


그림.3.2.1.2.17 PSR 2암의 조립도

(3) 시험 평가 방안

본 절에서는 앞서 서술한 안전 기준을 바탕으로 제작된 PSR 2암의 시험 평가 방안에 대해 논한다. 시험 조건으로는 설계한대로 θ , x, y 방향의 효과가 나타나면서 다음 그림과 같이 open-door 자세 및 pick & place 자세에서의 충격력 감쇠 정도를 F/T 센서를 이용해 측정한다. 그림에서 간략화를 위해 1,2,3축의 스프링과 댐퍼를 표시하지 않았다.

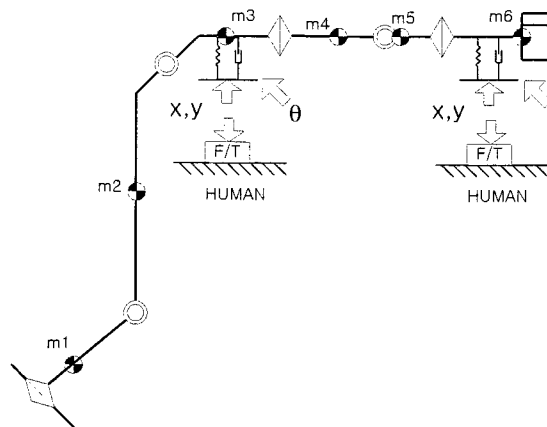


그림.3.2.1.2.18 Open-door 자세

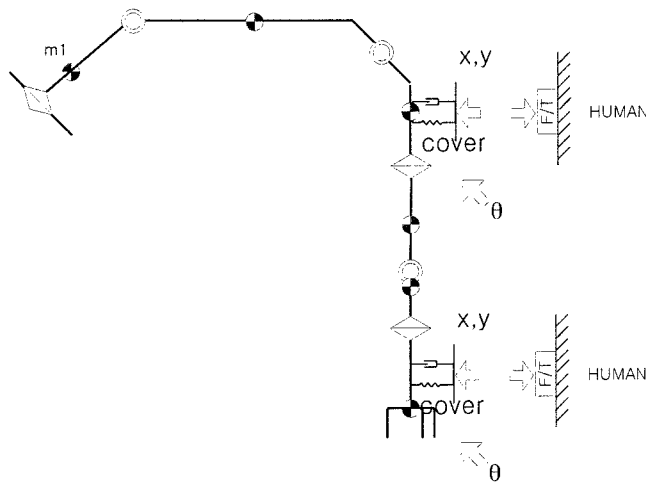


그림.3.2.1.2.19 Pick & place 자세

첫째로, 그림에 표시된 화살표 방향으로 충돌 실험을 하여 충격 힘 감쇠 성능을 평가한다. 실험 결과와 다음과 같은 예상치와 비교한다.



이를 바탕으로 커버의 두께와 재질을 재검토하고, 댐퍼의 적절한 viscous damping coefficient 값을 찾는다.

둘째로, 사람과의 interaction 성능 시험을 위해 MRB의 viscous damping coefficient를 변화시켜 가며 사람의 손으로 암의 말단을 밀거나 흔드는 경우, 각 조인트의 각도 변화와 F/T 센서의 힘을 기록하고, interaction 성능이 우수한 viscous damping coefficient값을 찾는다.

다. PSR 1 매니퓰레이터의 제어 기술

본 연구에서 개발된 매니퓰레이터의 제어는 다음과 같은 이유에 근거하여 기구학적 제어 방법을 채택하였다. 동역학적 제어는 서보 제어 루프 한 사이클 동안의 계산량이 상당하며 또한 빠른 속도로 계산이 이루어져야 실시간 제어에서 그 성능을 발휘할 수 있다.

그러나, 윈도우즈를 운영체제로 갖는 호스트 컴퓨터의 경우에는 운영 체제의 특성 상 많은 양의 계산을 실시간으로 연속 처리하는데 많은 어려움이 있으며, 이를 PMAC의 모션 프로그램으로 구현하기 위해서는 그 작업량과 작업 시간이 상당하며 또한 구성된 프로그램의 디버깅(Debugging)이 용이하지 않다는 단점이 있다. 또한 PMAC을 채택한 2단계의 제어 시스템은 그 특성 상 작동기의 변위 제어에 적합한 기능 등을 제공하고 있으므로 이러한 시스템의 장점을 활용하기 위해서는 작동기의 토크 제어보다는 변위제어가 유리하다고 판단된다. 그러나 가장 중요한 점은 서비스 로봇의 정해진 임무 수행에 있어서 동역학적 제어를 고려할 정도의 고속 동작은 중요한 요소가 되지 않는다는 데 있다.

(1) 순기구학(Forward Kinematics)의 해석

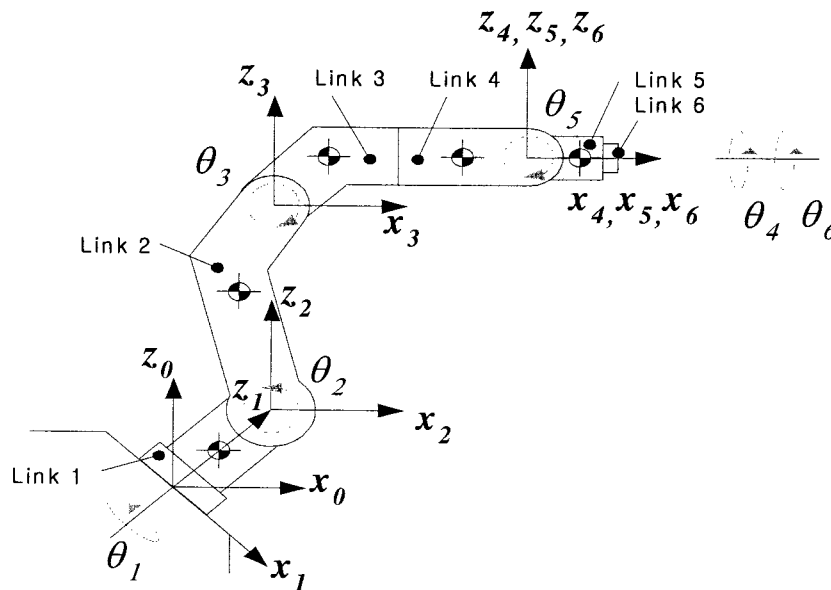


그림 3.2.1.2120. 매니플레이터의 일반화된 좌표계 및 좌표축의 선정

기구학 해석에 있어서의 첫 번째 단계는 매니플레이터에 대한 일반화된 좌표계 (Generalized Coordinates)와 이에 따른 좌표축을 설정하는 데 있다. 본 시스템은 일반화된 좌표계와 각 조인트의 변위를 일대일로 대응시킬 수 있다. 링크 i 에 부착된 좌표계를 i 좌표계라 정의한다. 링크 4,5,6에 대해서, 각 링크에 연결된 조인트의 회전축은 매니플레이터의 모든 자세에 대해서 항상 한 점에서 교차하게 되며 이 교차점을 손목 중심점(Wrist Center)라 정의한다. 손목 중심점은 매니플레이터의 역기구학 해석 시 기구학적 분리 (Kinematic Decoupling)가 가능한 지점이 되며, 이를 이용하여 역기구학 해석 과정을 단순화 할 수 있게 된다. 따라서, 각 링크에 부착된 좌표계 4,5,6의 원점이 모두 손목 중심점에

위치하도록 선정하였으며, 좌표계 4와 5의 상대 변위는 y_4 축에 대한 회전 θ_5 가 되며, 좌표계 5와 6의 상대 변위는 $\overline{y_5}$ 축에 대한 회전 θ_6 이 된다. 이 때 각 좌표계 간의 변환 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2.1.1.1)$$

로 정의할 때,

$${}^0_1R = R_y(-\frac{\pi}{4}) \cdot R_z(\theta_1), \quad {}^1_2R = R_y(\theta_2 - \frac{\pi}{4}), \quad {}^2_3R = R_y(\theta_3)$$

$${}^3_4R = R_x(\theta_4), \quad {}^4_5R = R_y(\theta_5), \quad {}^5_6R = R_x(\theta_6) \quad (3.2.1.1.2)$$

$${}^n_mR = {}^n_{n+1}R \cdot {}^{n+1}_{n+2}R \cdots {}^{m-2}_{m-1}R \cdot {}^{m-1}_mR \quad (m > n, m = 1, \dots, 6)$$

$${}^n_mR = {}^m_nR^{-1} \quad (3.2.1.1.3)$$

따라서, 엔드 이펙터 중심의 고정 좌표계에 대한 위치는 다음과 같다.

$${}^0p_e = \sum_{i=1}^6 {}^0_iR \cdot {}^ip_{c_i, c_{i+1}} \quad (3.2.1.1.4)$$

where, ${}^ip_{c_i, c_{i+1}}$: i 좌표계로 표현된 i 좌표계 중심에서 i+1 좌표계 중심을 향하는 벡터

(2) 역기구학의 해석

위의 기구학 해석에서 알 수 있듯이 직렬 기구로 구성된 매니퓰레이터의 기구학적 제어에 있어서 작업 공간에서 정의된 좌표와 조인트 공간에서의 좌표 사이에는 변환을 위한 관계식이 존재하는 데, 이 때 조인트 공간에서의 작동기의 위치 제어를 위해서는 주어진 작업 공간에서의 엔드 이펙터의 목표 위치 및 자세를 이에 해당하는 조인트 공간에서의 목표 변위로 변환해야 한다. 이러한 작업 공간에서 조인트 공간으로의 매핑(Mapping)을 역기구학(Inverse Kinematics) 이라 한다. 그러나 일반적으로 주어진 엔드 이펙터의 위치와 자세에 대응하는 조인트 공간에서의 위치 벡터는 유일하게 결정되지 않는다. 따라서, 역기구학의 유일한 해를 얻기 위해서는 수식화(Formulation)에 추가하여 다중 해로부터 최적의 해를 선택하기 위한 구속 조건(Constraints), 또는 평가 함수(Evaluation Function)가 구축

되어야 한다.

전술한 순기구학 관계식으로부터 알 수 있듯이 역기구학 관계식은 닫힌 형태(Closed Form)로 기술되지 않는다. 따라서, 해를 구하는 과정이 순기구학과는 달리 난이도는 링크가 복잡해질수록 기하 급수적으로 증가한다. 본 연구에서 개발된 매니플레이터는 손목 중심점 위치에 대해 기구학적으로 분리가 가능한 시스템이며, 이러한 특성으로 인해 역기구학 해를 구하는 문제를 3개의 독립적인 부분 문제(Subproblems)로 나누어 접근한다. 그 과정을 요약 기술하면 다음과 같다.

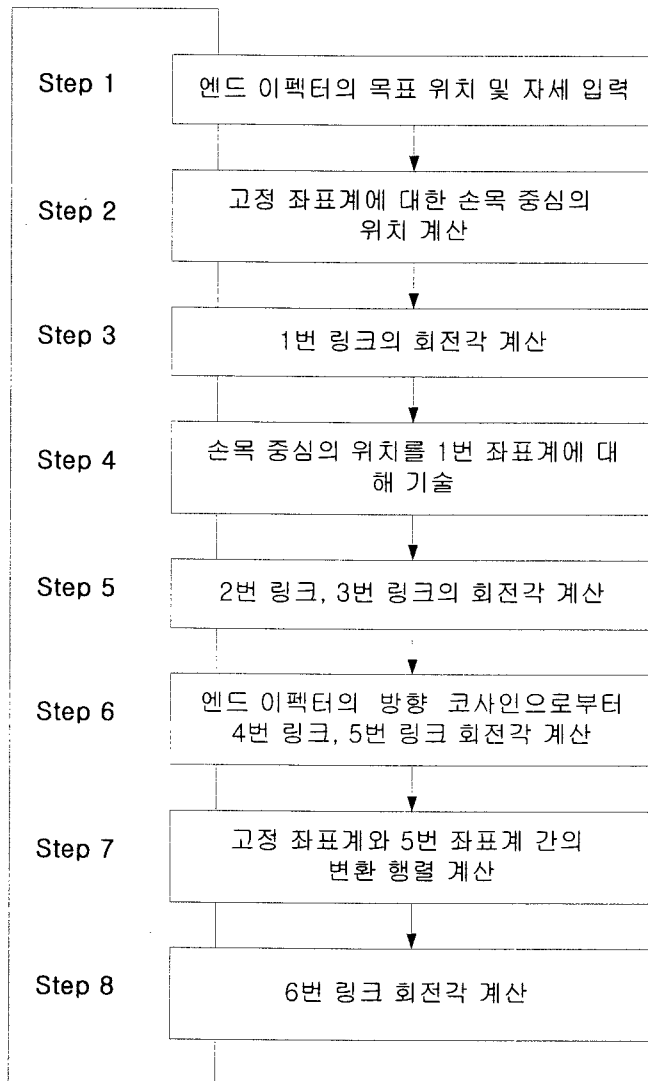


그림 3.2.1.2.21 매니플레이터 역기구학 해석 절차

위의 과정에 있어서 일반적으로 Step 3에 있어서 기구학적 특이점이 발생할 가능성이 존재한다. 즉, 손목 중심의 위치가 1번 회전축 상에 존재하게 되는 경우가 기구학적 특이

점이 되는데, 이를 방지하기 위해 2번 조인트의 회전축과 1번, 2번 좌표계의 z 축이 한점에서 교차하지 않고 조인트 축 상에서 일정한 오프셋(offset)이 존재하도록 매니플레이터를 설계한다. 이에 대한 구체적인 내용은 각 스텝에 대한 상세 설명에서 언급한다.

또한 Step 5를 계산하는 과정에서 손목 중심이 링크 2,3의 도달 범위를 벗어나는 경우는 해가 존재하지 않는 경우가 된다. 이 경우를 제외하면 위의 과정을 거쳐 최종적으로 4개의 성분을 갖는 해 집합(Solution Set)이 구해지게 된다. 이 때, 각 조인트의 목표치가 해당 동작 영역을 초과하지 않고 엔코더 값을 통해 얻은 현재 각 조인트의 변위와의 오차 노름(Norm)이 최소인 해가 최종 역기구학의 해가 된다.

(가) 역기구학 입력의 결정

일반적인 역기구학 관계식에서의 입력은 엔드 이펙터의 중심의 위치와 엔드 이펙터 좌표계의 오일러 각도로 주어진다. 그러나, 원하는 엔드 이펙터의 공간 상에서의 자세로부터 이에 대한 오일러 각도를 직관적으로 유추해 내는 것이 용이하지 않다. 따라서, 사용자의 관점에서 엔드 이펙터의 목표 위치 및 자세 기준 값을 직관적으로 생성해 내기 위해서, 역기구학의 입력을 엔드 이펙터가 향하는 방향에 대한 방향 코사인, 즉, 6번 좌표계의 x 축 단위 벡터의 고정 좌표계를 기준으로 하는 성분과 6번 조인트의 홈 위치에 대한 변위를 입력으로 설정하는 것이 목표값을 설정하는 데 있어서 보다 효율적이라 판단된다.

(나) 손목 중심점의 계산

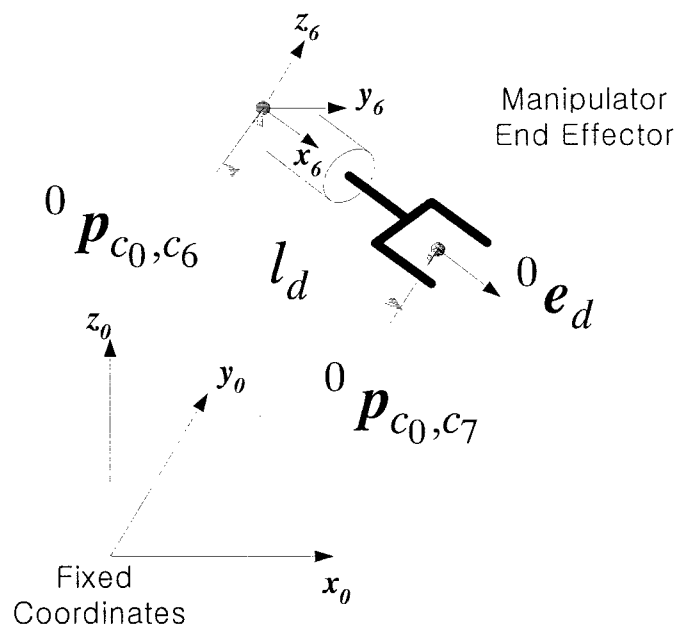


그림 3.2.1.2.22 매니플레이터의 손목 중심점의 계산

전술한 두 가지 형태의 입력 방법에 대해 엔드 이펙터의 방향 코사인 0e_d 를 구한 후, 이를 이용하여 손목 중심점 ${}^0p_{c_0,c_6}$ 을 구한다.

① 엔드 이펙터의 오일러 각도 α, β, γ 와 중심점의 위치 벡터 ${}^0p_{c_0,c_7}$ 가 주어지는 경우.

· 고정 좌표계와 6번 좌표계 간의 변환 행렬 계산.

$${}^0R = R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma) \quad (3.2.1.2.1)$$

· 엔드 이펙터 방향 코사인 계산

$${}^0e_d(i) = {}^0R(i, 1) \quad (3.2.1.2.2)$$

▶ 변환 행렬의 첫 번째 열이 엔드 이펙터 방향 코사인의 x 축 단위벡터를 의미.

② 엔드 이펙터의 방향 코사인과 중심점의 위치 벡터 ${}^0p_{c_0,c_7}$ 가 주어지는 경우.

▶ 입력값이 그대로 0e_d 를 의미.

위와 같은 과정을 거쳐 0e_d 를 계산하게 되면, 이로부터 손목 중심점의 고정좌표계 관점에서 기술된 좌표값은 다음과 같이 얻어진다.

$${}^0p_{c_0,c_6} = {}^0p_{c_0,c_7} - l_d \cdot {}^0e_d \quad (3.2.1.2.3)$$

(다) 1번 조인트의 회전 변위 계산

얻어진 손목 중심점의 좌표를 기준으로 하여 링크 1,2,3 의 구조는 3차원 공간상에서 회전하는 2-Link Bar 메커니즘으로 간주할 수 있다. 따라서, 이 때 2-Link Bar 메커니즘의 z1 축 방향의 회전 변위는 고정 좌표계 원점을 지나고 z1 축에 수직인 평면을 a라 정의하고, 이 평면에 대한 정사영(Projection)을 이용하여 계산한다. 이 때, 고정 좌표계의 원점과 동일한 원점을 갖고 고정 좌표계 y축에 대해 $\frac{\pi}{4}$ 만큼 회전하여 얻어진 좌표계를 B' 좌표계로 정의할 때,

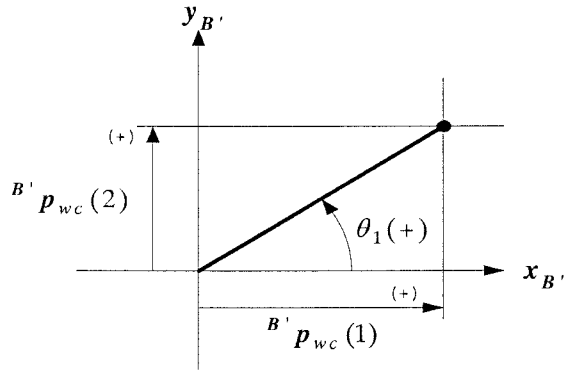


그림 3.2.1.2.23 투영을 통한 조인트 1의 회전 변위 계산

· 손목 중심 좌표를 B'좌표계 관점에서 표현하였을 경우의 성분

$${}^B \mathbf{p}_{c_0, c_6} = {}^B \mathbf{p}_{wc} = R_y\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot {}^0 \mathbf{p}_{c_0, c_6} \quad (3.2.1.2.4)$$

· 조인트 1의 회전 변위 계산

${}^B \mathbf{p}_{wc}(1) \neq 0$ 인 경우,

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{{}^B \mathbf{p}_{wc}(2)}{{}^B \mathbf{p}_{wc}(1)}\right), \quad -\frac{\pi}{2} < \phi_1 < \frac{\pi}{2} \quad (3.2.1.2.5)$$

${}^B \mathbf{p}_{wc}(1) = 0$ 인 경우,

$${}^B \mathbf{p}_{wc}(2) > 0 \text{ 이면, } \phi_1 = \frac{\pi}{2}$$

$${}^B \mathbf{p}_{wc}(2) < 0 \text{ 이면, } \phi_1 = -\frac{\pi}{2}$$

${}^B \mathbf{p}_{wc}(2) = 0$ 이면, 기구학적 특이점이므로 해가 존재하지 않음.

$$(3.2.1.2.6)$$

그러나, 조인트 1의 동작 범위가 $-\pi \leq \theta_1 \leq \pi$ 이므로, 위의 투영 상태를 만족하는 다른 형태의 자세(Configuration)가 존재할 수 있다. 즉, 다음 그림에서 표시된 시각으로 링크 메커니즘을 바라보았을 때, 원점을 지나고 시각 방향에 직각인 평면에 투영된 상에 대해 고찰해 보면, 그림에 제시된 두가지 형태의 자세가 가능함을 알 수 있다. 이때, Case 1의 자세와 Case 2의 자세를 비교하여 볼 때, 식 3.2.1.2.5에서 구한 ϕ_1 의 값으로 조인트 1의 회전 변위를 고정하였을 경우, Case 2의 자세에서는 조인트 3의 회전 변위가 한계값을 초과하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 조인트 2와 조인트 3의 변위가 한계값을 초과하지 않는 영역 내에서 조인트 1의 변위를 ϕ_1 과 π 만큼 차이가 나도록 설정함으로써 Case 2의

자세를 형성할 수 있다.

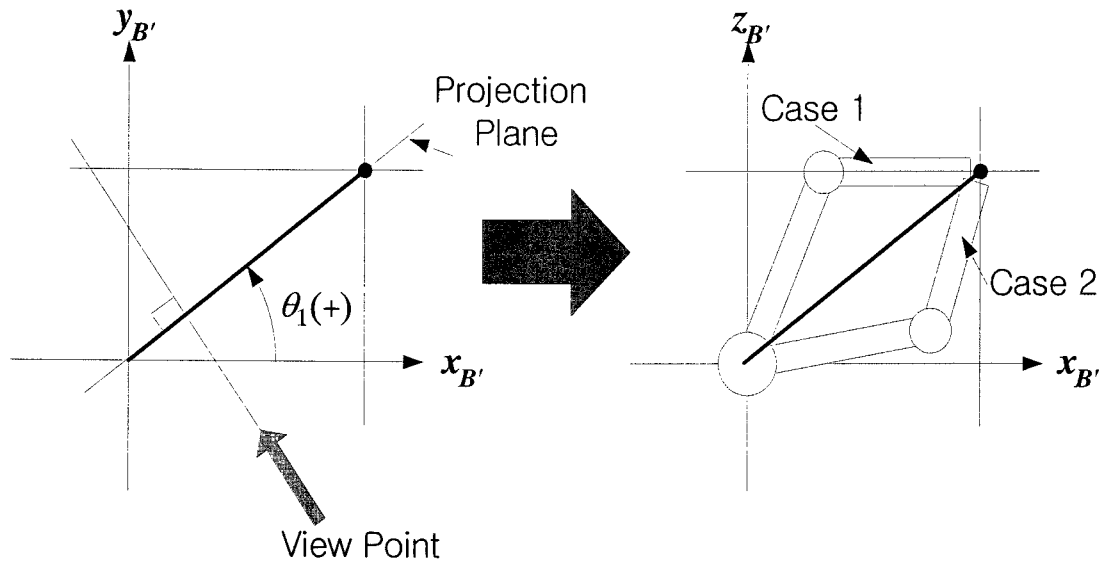


그림 3.2.1.2.24 조인트 1의 변위에 대한 2-Link 메커니즘의 자세(Configuration Set)

결론적으로, 주어진 조건 하에서의 조인트 1의 변위는 다음과 같은 두 가지의 해가 존재함을 알 수 있다.

· 조인트 1의 회전 변위의 계산

$$\phi_2 = \begin{cases} \phi_1 - \pi & (\phi_1 > 0) \\ \phi_1 + \pi & (\phi_1 \leq 0) \end{cases} \quad (3.2.1.2.7)$$

$$\therefore \theta_1 = \phi_1, \phi_2 \quad (3.2.1.2.8)$$

(라) 2, 3번 조인트의 회전 변위 계산

2-Link 메커니즘의 기하학적 관계식을 이용하여 2, 3번 조인트의 변위를 계산하기 위해서는, 고정좌표계로 표현된 손목 중심의 위치 벡터를 1번 좌표계에 의해 기술된 좌표 값으로 변환해 주어야 한다.

$${}^1 p_{c_0, c_6} = R_y\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot R_z(\theta_1) \cdot {}^0 p_{c_0, c_6} \quad (3.2.1.2.9)$$

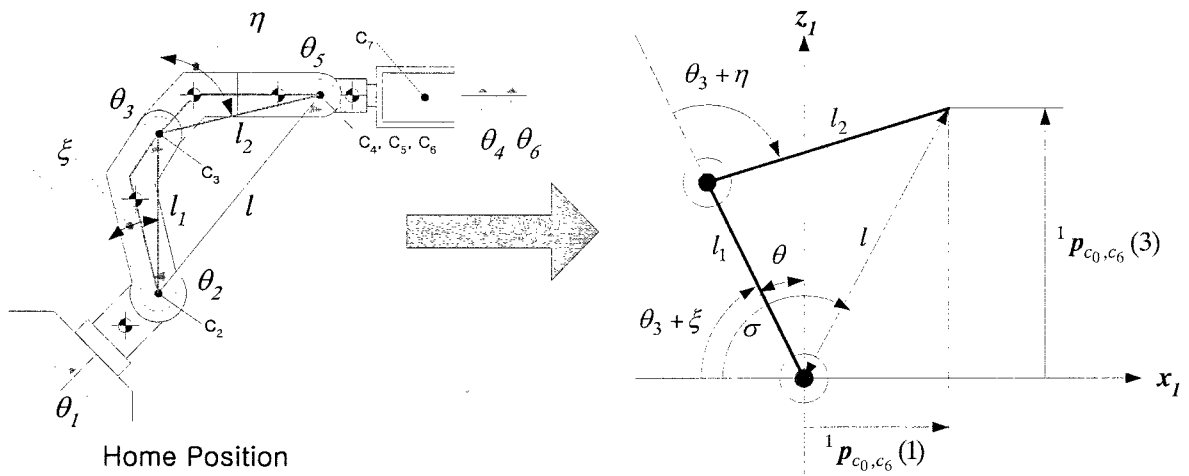


그림 3.2.1.2.25 조인트 2, 3 변위의 계산

이 때, 좌표계 중심에서 손목 중심까지의 거리는 다음과 같이 계산된다.

$$l = \sqrt{({}^1P_{c_0,c_6}(1))^2 + ({}^1P_{c_0,c_6}(3))^2} \quad (3.2.1.2.10)$$

따라서, 조인트 3의 변위부터 구하면,

$$\theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{l^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) - \eta \quad (3.2.1.2.11)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{l_2}{l} \cdot \sin(\theta_3 + \eta)\right) \quad (3.2.1.2.12)$$

$$l_d = \sqrt{({}^1P_{c_0,c_6}(1))^2 + ({}^1P_{c_0,c_6}(2))^2} \quad (3.2.1.2.13)$$

$$\psi = \cos^{-1}\left(\frac{l_d}{l}\right) \quad (3.2.1.2.14)$$

위의 그림에서 조인트 2의 변위는 다음의 식에 의해 결정되며,

$$\theta_2 = \sigma - \theta - \zeta \quad (3.2.1.2.15)$$

이 때, σ 는 조인트 1의 변위에 따라 다음의 관계식에 의해 결정된다. arccos 함수의

출력은 $y \in [0, \pi]$ 인 점을 고려하면,

- ${}^1d_{c_0, c_6}(1) \geq 0$, ${}^1d_{c_0, c_6}(3) \geq 0$ 인 경우.
 $\sigma = \pi - \psi$
 - ${}^1d_{c_0, c_6}(1) < 0$, ${}^1d_{c_0, c_6}(3) \geq 0$ 인 경우.
 $\sigma = \psi$
 - ${}^1d_{c_0, c_6}(1) < 0$, ${}^1d_{c_0, c_6}(3) < 0$ 인 경우.
out-of-Workspace
 - ${}^1d_{c_0, c_6}(1) \geq 0$, ${}^1d_{c_0, c_6}(3) < 0$ 인 경우.
 $\sigma = \pi + \psi$
- (3.2.1.2.16)

(마) 4,5,6번 조인트의 회전 변위 계산

지금까지의 결과를 이용하여 3번 좌표계로 표현된 벡터의 성분을 고정 좌표계로 표현하기 위한 변환 행렬을 계산할 수 있다. 이 변환 행렬의 역행렬은 위와는 반대로 고정 좌표계로 표현된 벡터의 성분을 3번 좌표계로 표현된 성분으로 변환하는 행렬이 된다. 따라서, 고정 좌표계 관점에서 기술된 엔드 이펙터의 방향 코사인을 3번 좌표계로 표현된 성분으로 변환하면 다음과 같다.

$${}^3e_d = {}^3_0R \cdot {}^0e_d \quad (3.2.1.2.17)$$

이때, 3e_d 은 변환 행렬의 특성을 고려할 때, 3_0R 행렬의 첫 번째 열과 동일하다. 따라서, 각 성분을 비교하여 해를 구하면 조인트 4와 조인트 5의 회전 변위를 구할 수 있다.

$$\xi = \cos^{-1}({}^3e_d(1)) \quad (3.2.1.2.18)$$

- $\theta_5 = \xi$ 인 경우,
$$\theta_4 = \tan^{-1}\left(\frac{{}^3e_d(2)}{\sin(\theta_5)}, -\frac{{}^3e_d(3)}{\sin(\theta_5)}\right)$$
- $\theta_5 = -\xi$ 인 경우,

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{{}^3 e_d(2)}{\sin(\theta_5)}, -\frac{{}^3 e_d(3)}{\sin(\theta_5)} \right) \quad (3.2.1.2.19)$$

▶ 단, $\sin(\theta_5) \neq 0$

이에 근거하여, θ_6 는 쉽게 구할 수 있다. 즉, 오일러 각도로 주어지는 입력에 대해서는, ${}^5_6 R = ({}^0_5 R)^{-1} \cdot {}^0_6 R$ 로부터 구할 수 있다.

따라서, 주어진 입력에 대해 모두 4 종류의 해가 얻어질 수 있다. 이로부터 각 변위가 해당 조인트의 작동 영역 내에 존재하고 현재 조인트 값으로부터 가장 변화의 폭이 작은 해가 최적 해로서 선택되어진다.

(바) 매니플레이터 제어 실험 결과

본 실험 결과는 매니플레이터의 물체 파지 동작 수행에 있어서의 물체 접근(Approach-to-Target) 동작과 홈 위치 복귀(Return-To-Home) 동작을 연속적으로 수행하는 경우의 각 조인트의 목표 값 및 실제 변위를 출력한 결과이다.

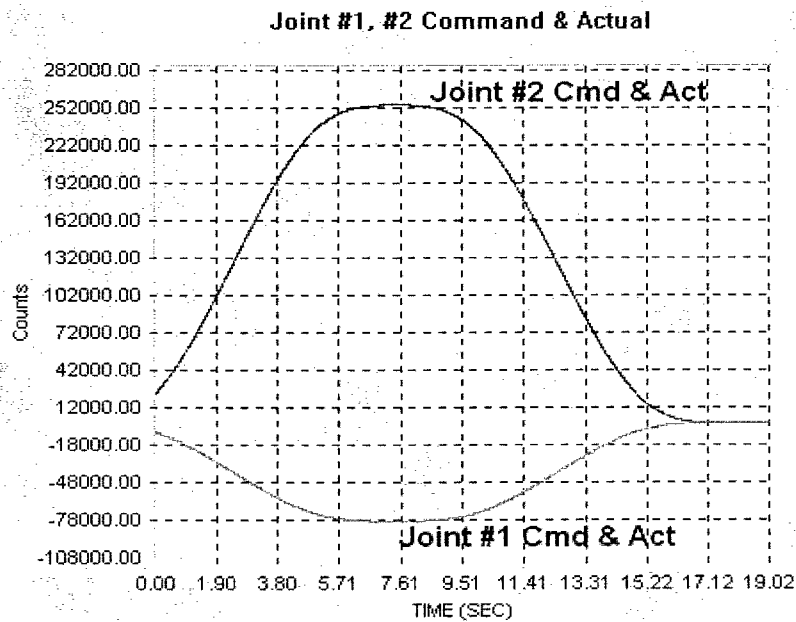


그림 3.2.1.2.26 조인트 1,2의 추종 실험 결과

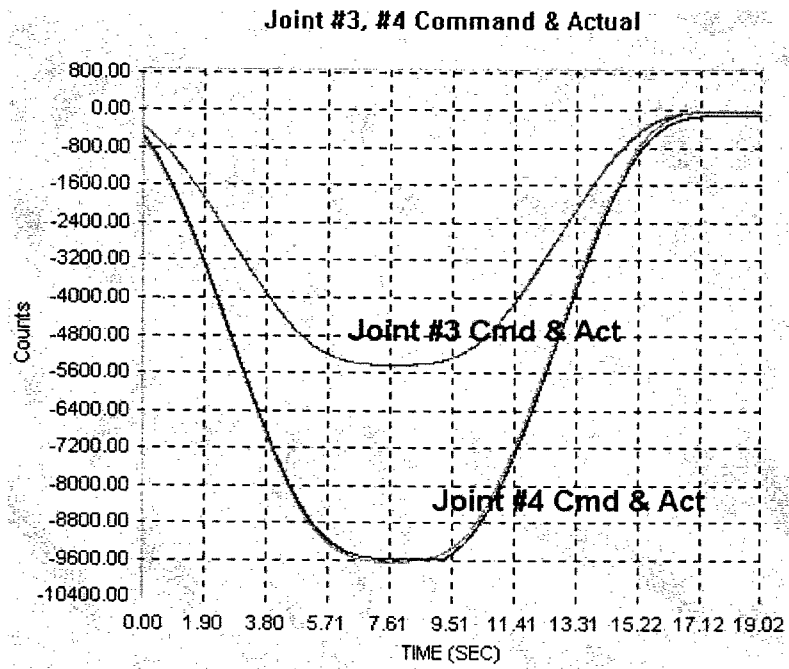


그림 3.2.1.2.27 조인트 3,4의 추종 실험 결과

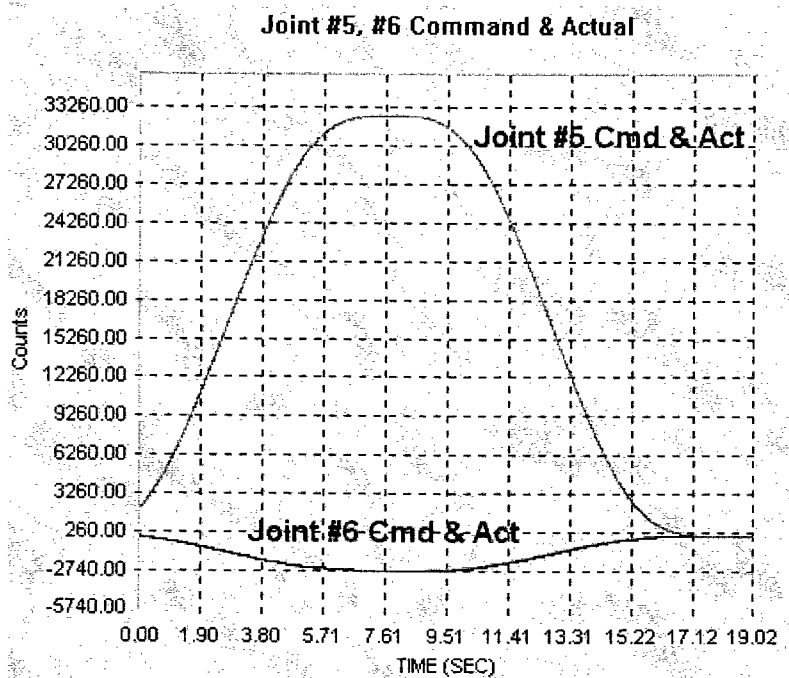


그림 3.2.1.2.28 조인트 5,6의 추종 실험 결과

(3) 비전을 이용한 매니플레이터의 제어

서비스 로봇은 산업 현장과 같은 고정된 환경에서의 작업이 아닌, 시간에 따라 불규칙적으로 변화하는 환경 하에서 주어진 임무를 완수해 내야 한다. 예를 들어 특정 물건을 다른 장소로 옮기는 과정을 반복적으로 수행함에 있어서 물체 위치의 불확실성, 이동 경로 상에 사람이나 기타 다른 장애물의 발생 가능성 등에 대해 유연하게 대처할 수 있는 기능을 갖추는 것이 필수적인 요소라 할 수 있다.

로봇에게 이러한 기능을 부여하기 위해 가장 선결되어야 할 과제는, 어떠한 방법을 사용하여 시시각각 변화하는 주위 환경에 대한 정보를 효율적으로 획득하고 이를 처리하여 로봇의 제어에 활용하는가에 대한 문제이다. 이에 대한 하나의 방법론으로서, 카메라를 통한 영상정보를 획득하고 이로부터 적절한 처리를 하여 필요한 정보를 추출해내는 비전 시스템(Vision System)을 적용하는 방안이 제안되었으며 현재도 이 방법의 실제 응용 및 성능 개선을 위한 많은 연구가 수행되고 있다.

로봇 제어에 있어서 비전 시스템의 활용 분야는 상당히 광범위한 분야에 걸쳐 있다고 할 수 있다. 영상 정보로부터 적절한 처리 기법을 통한 물체 인식 및 식별, 사람의 얼굴 및 표정 식별 등이 있으나 최근 가장 많은 관심을 유발하고 있는 분야는 로봇 매니플레이터 및 이동체 제어 루프(Control Loop)에 있어서의 센서 시스템(Sensor System)으로 활용하는 분야이다. 비전 시스템을 통해 측정된 이미지는, 다른 센서와는 달리 적절한 처리를 통해서 많은 정보를 추출해 낼 수 있다. 즉, 카메라를 기준으로 한 대상 물체의 3차원 상에서의 거리, 자세, 색, 형상, 그밖에 적절한 표식을 통한 물체의 종류 등을 실시간으로 측정하고 인식할 수 있다는 장점을 지닌다.

본 연구에서는 로봇 엔드 이펙터에 부착된 카메라를 통해 대상 물체의 위치와 자세를 인식하고 이를 근거로 하여 매니플레이터의 조인트 공간에서의 적절한 목표 변위를 생성함으로써 최종적으로 엔드 이펙터가 대상 물체에 접근한 후 파지할 수 있는 시스템을 구축하였다. 로봇 엔드 이펙터에 카메라를 부착함으로써 카메라의 뷰 앵글(View Angle)의 자유도를 최대한 확보하도록 하였으며, 또한 단일 카메라의 이미지 정보를 이용한 거리 측정 알고리즘을 적용하여, 기존의 스테레오 방식의 카메라를 적용하는 방법에 비해 비교적 저가의 시스템으로 만족할 만한 실험 결과를 얻었다.

(나) 적용된 알고리즘

본 연구에서는 서비스 로봇의 비전을 통한 매니플레이터 작업 모듈 개발의 시작 단계로서 비주얼 개루프 제어 방법을 통해 대상 물체의 파지 작업을 구현하였다. 그러나, 위에서 언급한 비주얼 개루프 제어 방식의 단점을 극복하기 위해, 비전 정보를 이용하여 대상 물체로부터 일정한 거리 만큼 1차적으로 접근한 후, 재차 이미지를 획득한 후 물체의 위치 및 자세를 보정한 다음 최종적으로 접근하는 방법을 적용하였다. 물체 파지 까지의 알고리

증을 다음 그림에 제시하였다.

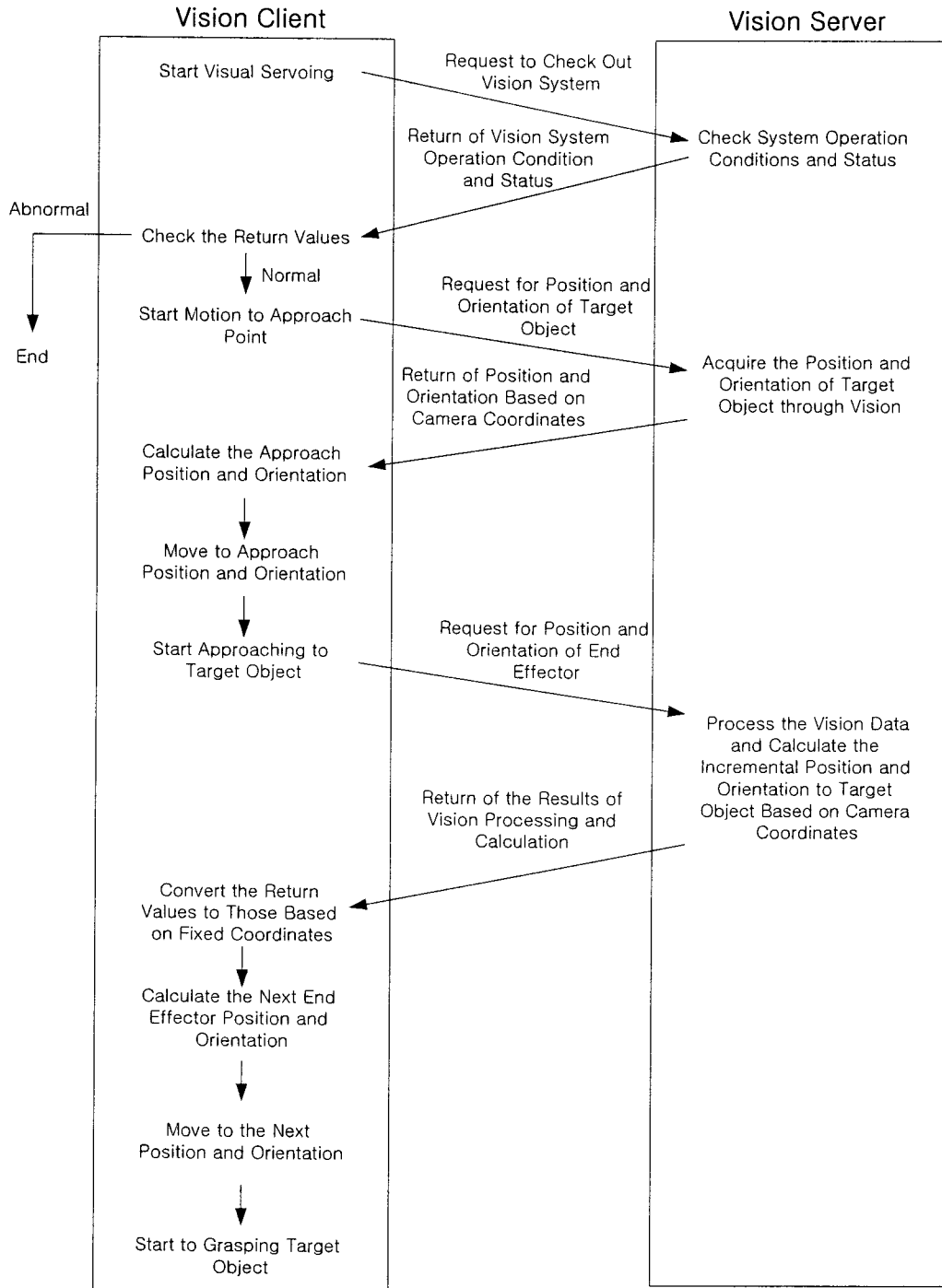


그림 3.2.1.2.29 비전을 이용한 물체 파지 동작 알고리즘

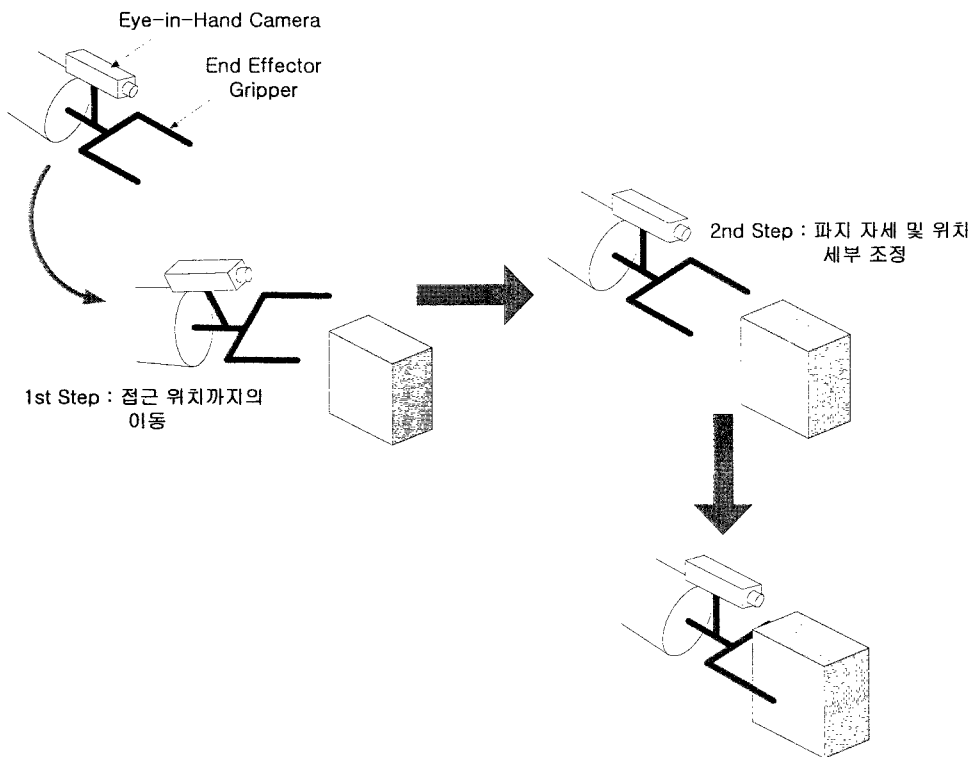


그림 3.2.1.2.30 비전을 이용한 물체 파지 과정

표 3.2.1.2.31 비전용 카메라 사양

부품 종류	사양	Value
Fire-i400 Industrial Camera	Interface	IEEE-1394a 400Mbps, 2 Ports
	Camera Type	IIDC-1394 Digital Camera V1.04 Specification Compliant
	Sensor Type	Sony Wfine 1/4" CCD
	Resolution	VGA 640×480
	Optics	C-Mount
	Frame Rates	30,15,7.5 and 3.75 per second
	Dimension	44.5×32.5×92 mm
	Housing and Weight	Metal, 200 g
	Power Supply	8 ~ 30 VDC by 1394 bus 1W max

(다) 실험 결과

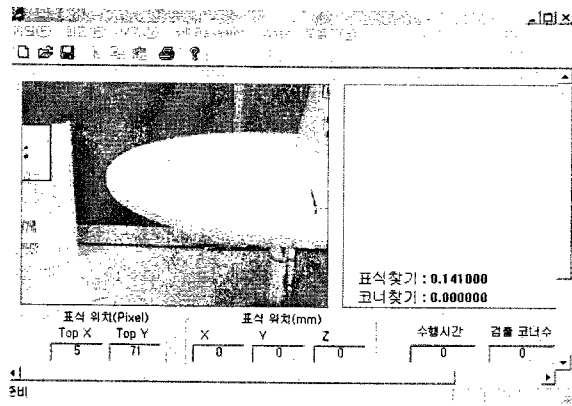


그림 3.2.1. 비주얼 서보잉 1st Step : 물체 탐색

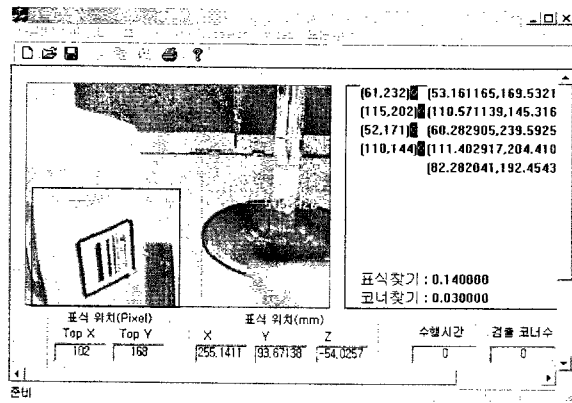


그림 3.2.1. 비주얼 서보잉 2nd Step : 표식을 통한 물체 탐색 및 접근 위치 및 각도 계산

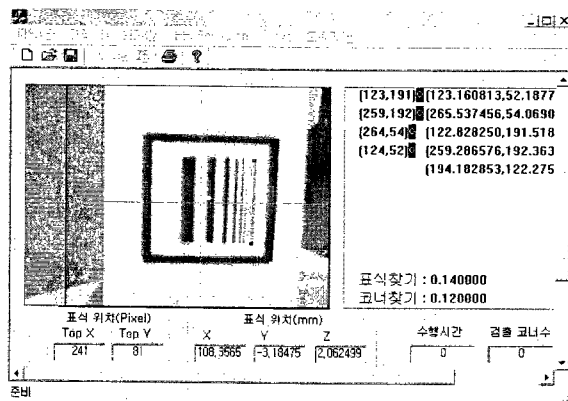


그림 3.2.1. 비주얼 서보잉 3rd Step : 최종 파지 위치 접근을 위한 세부 위치 및 자세 조정

라. 조작을 위한 대상물체 측정

(1) 개요

본 연구에서는 단일 카메라기반 비주얼 서보잉을 위하여 인공으로 제작된 표식을 제어 대상 물체(target object)에 부착하고, 이를 인식함으로써, 대상 물체의 존재 유·무 및 3차원 위치/자세 정보를 측정하는 알고리즘을 구현하였다.

(2) 시스템 구성

비주얼 서보잉을 위한 비전 시스템은 매니플레이터의 손목부에 부착될 IEEE 1394 카메라와 제어 대상 물체에 부착되는 인공 표식으로 구성된다.

(가) IEEE 1394 카메라

프레임 그라버 없이 초당 30 프레임의 영상을 획득하기 위하여 IEEE 1394 카메라를 사용했으며, 표 1은 시스템 사양 및 개발 환경이다.

표 31. 개발 환경

H/W	사양
카메라	IEEE 1394 카드, Fire-i400 카메라
렌즈	AVENIR 6mm 렌즈
영상 크기	320×240
PC	P III-550MHz, Ram 64MB

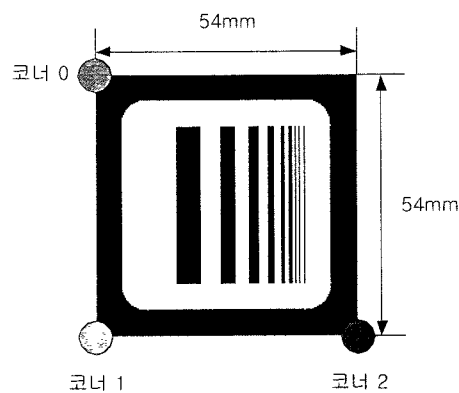


그림 3.2.1.2.32 표식과 3차원 위치/자세 측정을 위한 특징점

(나) 표식

본 연구에서, 시각 서보잉을 위한 대상 물체는 그림 3.2.1.2.32의 표식을 이용하여 인식한다. 표식은 대상 물체 인식을 위한 시밀러 패턴과 3차원 위치/자세 측정을 위한 외곽 테두리 영역으로 나누어 구성되는데, 시밀러 패턴은 Daniel Scharstein이 제안한 Self-Similar Landmark[1]를 사용하고, 3차원 위치/자세 측정을 위한 특징점은 외곽 테두리의 3 코너점을 검출하여 사용한다.

(3) 표식 인식 및 특징 추출 알고리즘.

그림 3.2.1.2.33는 비주얼 서보잉을 위한 대상 물체 인식 및 특징 추출 알고리즘의 전체적인 과정을 보여주는 흐름도로서, 각 단계별 수행 작업 및 내용은 다음과 같다.

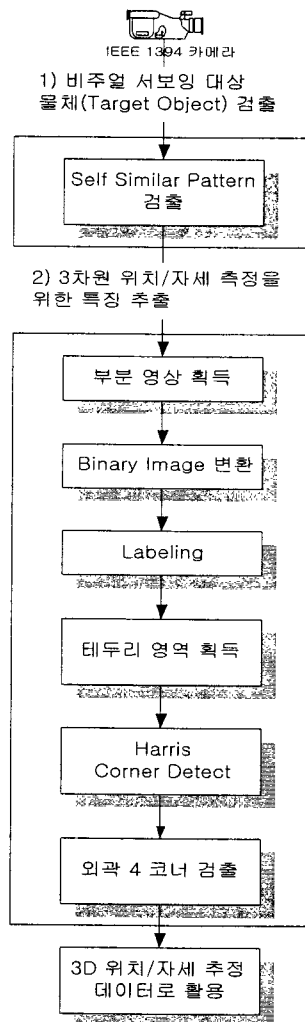


그림 3.2.1.2.33 표식 인식 및 특징 추출 알고리즘 순서도.

(가) 영상 획득

IEEE 1394 카메라로 획득된 컬러 영상을 흑백 영상으로 변환한다. 그림 3.2.1.2.34은 흑백 영상으로 변환한 입력 영상이다.

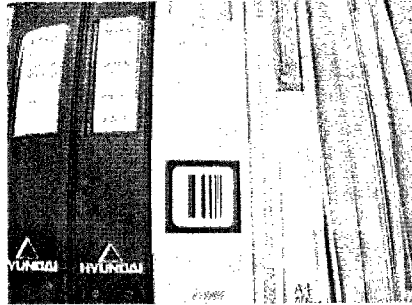


그림 3.2.1.2.34 입력 영상

(나) 표식 검출

본 연구에서 사용한 셀프 시밀러 패턴은 D. Scharstein의 「Real-time Recognition of Self-Similar Landmarks」를 사용한다. 시밀러 패턴 인식 알고리즘[1]은 입력된 영상의 스캔 라인 별 밝기 분포와 스케일 된 밝기의 분포를 비교하여 표식의 존재 유무를 판단한다. 그림 3.2.1.2.35는 셀프 시밀러 패턴 인식 알고리즘을 이용하여 그림 3.2.1.2.34의 입력영상에서 시밀러 패턴의 위치를 추정한 결과로서, 적색 점이 시밀러 패턴의 상단을 나타내고, 청색 점이 시밀러 패턴의 하단을 나타낸다.

(다) 부분 영상 획득

특징점 추출을 위한 영상처리 시간을 줄이기 위하여, 셀프 시밀러 패턴을 포함하는 부분영상을 획득한다.

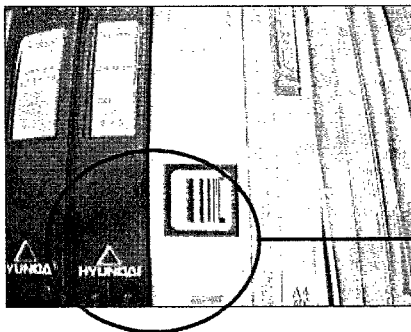


그림 3.2.1.2.35 셀프 시밀러 패턴 검출

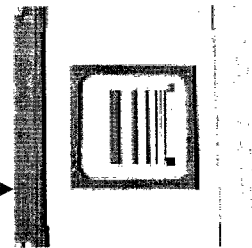


그림 3.2.1.2.36 부분 영상 획득

(라) Labeling

테두리 영역을 검출하기 위하여 그림 3.2.1.2.36의 부분 영상을 그림 3.2.1.2.37의 a)와 같은 이진 영상으로 변환시키고, 획득된 이진 영상을 동일한 영역별로 구분하는 labeling 알고리즘을 이용하여 그림 3.2.1.2.37의 b)와 같이 각각의 영역으로 구분한다.



a) 이진 영상

b) Labeling

그림 3.2.1.2.37 이치화 영상 처리

(마) 테두리 영역 검출

구분된 각각의 영역 중, 면적이 최대가 되고, 중심이 부분 영상의 중앙에 분포하는 영역을 테두리 영역으로 인식한다. 그림 3.2.1.2.38은 그림 3.2.1.2.37의 b)영상에서 추출한 테두리 영역이다.



그림 3.2.1.2.38 테두리 영역 검출

(바) 해리스 코너 검출기를 사용한 외곽 4코너점 추출.

검출된 테두리 영역의 실제 그레이(gray) 데이터로 해리스 코너 검출기[2]를 수행하여 테두리 영역의 외곽 코너점을 획득한다. 그림 3.2.1.2.39의 녹색점이 해리스 코너 검출기로 검출된 코너점이다.

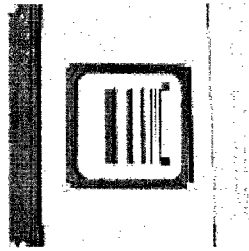


그림 3.2.1.2.39 외곽 4 코너점 추출

(사) 3차원 위치 추정을 위한 3코너 및 표식의 중심점 획득.

검출된 외곽 코너점을 이용하여 표식의 중심점을 구하고, 3차원 위치/자세 측정을 위한 3 코너점의 위치를 이동 로봇에 전송한다. 그림 3.2.1.2.40는 표식의 중심점을 포함한 특징점을 나타내고, 표 2는 그림 3의 입력영상에 대하여 제안된 알고리즘을 적용했을 경우, 이동로봇에 전송되는 코너점의 영상 좌표를 나타낸다.

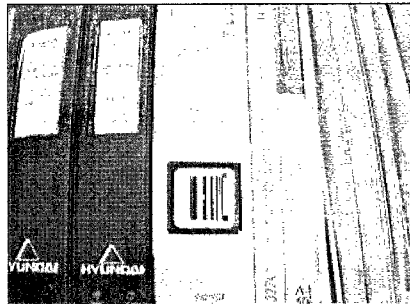


그림 3.2.1.2.40. 3코너 및 표식의 중심점 추출

표 32. 3차원 위치/자세 추정을 위한 3 코너점

	영상 좌표 (픽셀 단위)
코너 0	(123.502385, 183.420209)
코너 1	(182.462576, 183.467550)
코너 2	(123.511449, 125.511449)

(4) 표식 검출 및 특징 추출 실험 결과

제안된 표식 인식 및 특징 추출 알고리즘을 다양한 환경에 적용한 결과, 카메라와 표식과의 거리가 800mm 이내에서는 표식의 크기 변화 및 회전에 대해서도 강인하게 인식

가능함을 확인하였다. 그림 3.2.1.2.41은 카메라의 각도 변화 및 표식의 회전에 대해서도 강인하게 동작하는 알고리즘의 성능을 보여주며, 그림 3.2.1.2.42은 표식의 크기 변화에 대한 인식 성능을 보여준다. 알고리즘 수행 시간을 분석해보면, 표 1과 같은 개발 환경에서, 표식 인식 수행 시간은 약 50 ~ 100 ms 정도, 특징 추출 수행 시간은 50ms 정도 걸린다.

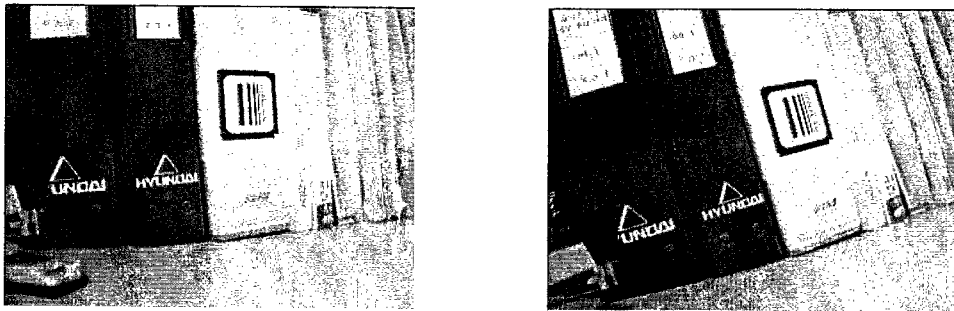


그림 3.2.1.2.41 카메라 각도 변화와 표식의 회전에 따른 인식 성능

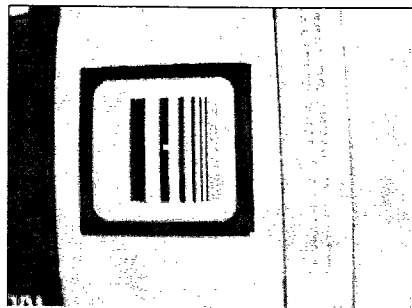


그림 3.2.1.2.42 크기 변화에 대한 표식 인식 성능

(5) 단일 카메라 기반 3차원 위치/자세 추정 알고리즘

본 연구에서 적용한 단일 카메라 기반 위치추정방법은 인공 표식 코너점간의 픽셀거리와 mm거리와의 비율에 의하여, 카메라 중심에서 표식까지의 거리(Depth)를 추정하며, 카메라 광축에서 표식 중심점까지의 거리정보를 계측하여 좌우위치를 추정하게 된다.[3], [4]

본 연구에서 정의한 좌표축은 그림 3.2.1.2.43와 같이 카메라 중심에서 표식을 지향하는 방향을 월드좌표 X축으로 하고, 표식중심점의 좌측 방향과 상단방향을 월드좌표 Y축과 Z축으로 설정하였다.

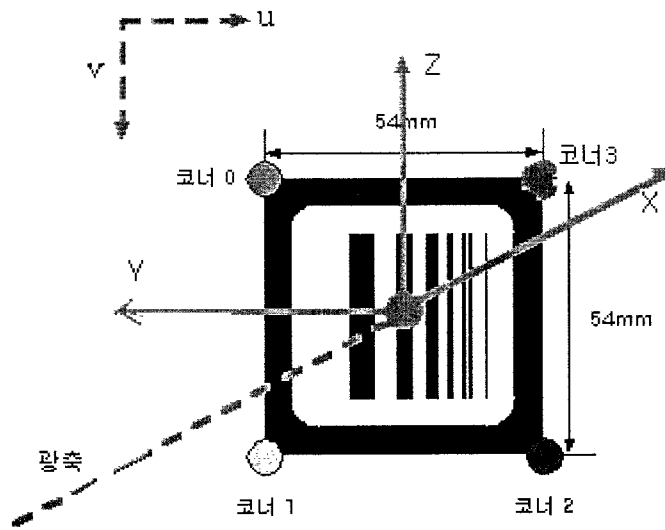


그림 3.2.1.2.43 좌표축 설정

$$X = \frac{(\text{초점거리} * (\text{코너0와 코너1간의 } v\text{축 mm거리}))}{(\text{코너0와 코너1간의 } v\text{축 픽셀거리})}$$

$$Y = Y_Scale * (\text{표식중심점의 } u\text{축 영상좌표} - \text{카메라 중심점의 } u\text{축 영상좌표})$$

$$Z = Z_Scale * (\text{표식중심점의 } v\text{축 영상좌표} - \text{카메라 중심점의 } v\text{축 영상좌표})$$

$$(\text{여기서, } Y_Scale = \frac{(\text{코너1과 코너2간의 } u\text{축 mm 거리})}{(\text{코너1과 코너2간의 } u\text{축 픽셀 거리})}$$

$$Z_Scale = \frac{(\text{코너1과 코너2간의 } v\text{축 mm 거리})}{(\text{코너1과 코너2간의 } v\text{축 픽셀 거리})})$$

또한, 자세추정을 위하여, X축을 기준으로 회전하는 방향을 롤(Roll), Y축을 기준으로 회전하는 방향을 피치(Pitch), Z축을 중심으로 회전하는 방향을 요(Yaw)방향으로 설정하였다.

Roll = 코너0과 코너3의 중심위치와 코너1과 코너2의 중심위치간의 경사각

Pitch = (코너0과 코너3의 u축 픽셀거리 / 코너1과 코너2의 u축 픽셀거리) - 1.0

Yaw = 코너1과 코너2와의 경사각

(6) 3차원 위치/자세 추정 실험 결과

카메라와 표식과의 거리에 따른 3차원 거리(depth) 측정 오차는 표식의 특징점을 정확하게 찾았을 경우, 50mm 이내의 오차를 보인다.

표1. 거리별 Depth 측정 오차

거리(mm)	추정거리0	오차0	추정거리1	오차1	추정거리2	오차2
800	818.541	18.541	789.032	10.968	789.032	10.968
700	760.71	60.71	739.21	39.21	739.21	39.21
600	621.292	21.292	646.037	46.037	609.331	9.331
500	519.53	19.53	545.467	45.467	516.125	16.125
400	400.775	0.775	427.412	27.412	404.559	4.559
300	208.124	91.876	313.548	13.548	306.283	6.283
200	175.88	24.12	203.034	3.034	203.034	3.034

3차원 자세 추정 오차는 거리별 회전 각도가 ±20°정도까지 5°이내의 오차를 가진다.

표 2 . 거리별 YAW 측정 오차

거리 (mm)	튜닝후 Yaw 측정 오차						
	-30	-20	-10	0	10	20	30
800	7.7	4.854	6.052	4.294	1.346	5.502	9.81
700	4.95	2.716	2.84	2.624	0.57	4.904	3.276
600	1.042	2.086	0.88	0.1792	2.384	0.428	1.338
500	8.426	6.438	5.1	3.324	3.342	0.312	3.83
400	6.876	2.92	5.058	1.158	0.614	1.804	3.968
300	3.144	1.012	0.47	0.54	0.296	0.734	0.31
200	4.452	1.164	0.378	0.934	0.002	0.374	7.73

표 3. 거리에 따른 Roll 측정 오차

거리 (mm)	거리에 따른 Roll 측정 오차						
	-30	-20	-10	0	10	20	30
800	1.151	1.23	1.606	3.584	3.991	0.845	2.141
700	1.726	4.766	2.675	1.364	0.205	1.695	1.92
600	8.467	4.105	1.867	0.0539	5.513	7.967	4.851
500	7.623	1.832	3.221	0.0645	4.442	4.295	3.82
400	7.782	6.753	1.286	1.646	3.745	3.768	4.764
300	3.564	11.776	7.701	2.49	7.744	1.404	0.157
200			0.019	2.11	2.69		

마. 로봇손 개발

본 연구에서 개발하는 핸드시스템은 인간과 공존하는 빌딩내 환경에서 사용자의 요청에 따라 물건을 원하는 곳으로 배달하는 로봇시스템에 적용하는 것을 목적으로 한다. 서비스 로봇은 공항, 병원, 대형빌딩, 박물관 등과 같은 공공의 장소에서 안내, 청소, 물류이송, 경비 등의 다양한 서비스를 제공하기 위하여 각 부분별로 모듈화 되고 재구성이 가능한 시스템으로 구성한다. 따라서 서비스 로봇은 이동로봇 플랫폼에 매니플레이터, 핸드, 트레일러, 청소기, 비전 등과 같은 모듈화 된 시스템을 통하여 상황에 맞는 서비스를 제공한다 [26].

본 연구에서의 로봇핸드 연구는 서비스 로봇 매니플레이터 말단에 장착되어 서비스 로봇이 외부환경과 접촉 작업시 다양한 작업을 효율적으로 수행하는데 초점을 두고 있다. 따라서 작고 파지력이 크며 기구부가 간단한 하나의 모듈로써의 핸드를 개발하는 것에 주안점을 두었다.

기존에 개발된 핸드들은 모듈화 되고 재구성이 가능한 서비스 로봇핸드로써 적합하지 않다. 위와 같은 이유로 서비스 로봇에 장착할 범용 로봇핸드의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구는 서비스 로봇에 장착할 수 있는 가볍고 부가적 장치 없이 손모듈로 움직이며 파지력이 크고 일정한 힘으로 물체를 파지 할 수 있는 핸드개발과 다양한 물체를 안정적으로 파지하기 위한 제어방법의 연구를 목표로 한다.

개발된 핸드는 세 손가락과 두 개의 관절로 한 개의 손가락을 구성할 수 있게 하였다.

서비스 로봇이 갖는 특수성 때문에 연구될 핸드는 다음과 같은 세부 목표를 만족해야 한다.

1. 핸드의 무게가 경량일 것. (1.5kg 이내)
2. 파지력이 높을 것. (20N 이상)
3. 적절한 힘으로 물체를 파지 할 수 있도록 하기 위하여 힘센서를 장착할 것.

4. 기구부의 구조적 신뢰성을 높이기 위해 구동메커니즘을 단순화 할 것.
5. 핸드 안에 모든 부가장치를 구비하고 크기를 소형화 할 것.
6. 손가락을 3개로, 1개 손가락은 2개의 관절로 구성할 것.
7. 다양한 물체를 파지하기 위하여 인지, 중지 간의 횡운동이 가능할 것.

위의 사항을 만족시키기 위하여 핸드를 설계하고 물체 파지의 안정성을 높이기 위하여 다양한 제어알고리즘을 개발하여 실험결과를 통한 설계의 타당성 및 제어법칙의 유효성을 검증하였다.

파지물체가 움직이지 않을 때와 움직일 때로 나누어 일정한 힘으로 물체를 파지하는 실험을 수행하였다. 또 안정적인 파지를 위한 알고리즘을 논하고 마지막으로 핸드의 횡운동을 이용하여 물체를 시험적으로 파지함으로써 파지물체의 형상을 인식하는 형상측정에 대한 설명과 실험 및 유효성을 검증한다.

위의 설계사양을 바탕으로 설계된 핸드는 그림3.2.1.2.44과 같다.

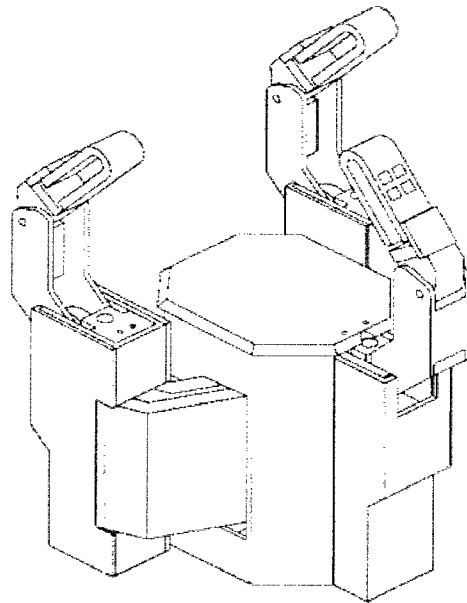


그림.3.2.1.2.44 Three-fingered robot hand design.

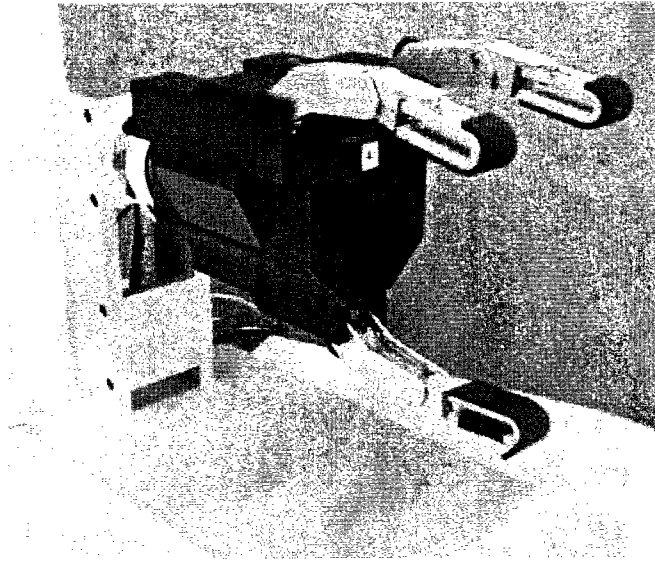


그림 3.2.1.2.45 Prototype of the three-fingered robot hand.

Table 3. Specifications of robot hand.

무게	1.2Kg
손가락 수	3개
손바닥 크기	70mm * 80 mm * 110mm
손가락 모듈 구성	1개 능동관절, 1개 수동관절
힘센서 사양	스트레인 게이지
재질	두랄루민(A7075), 알루미늄 합금(A6061)
액츄에이터 수	Maxon DC motor (2,5W) 4 개
자유도	4 DOF

- (1) 로봇핸드의 제어
- (가) 하드웨어 구성도

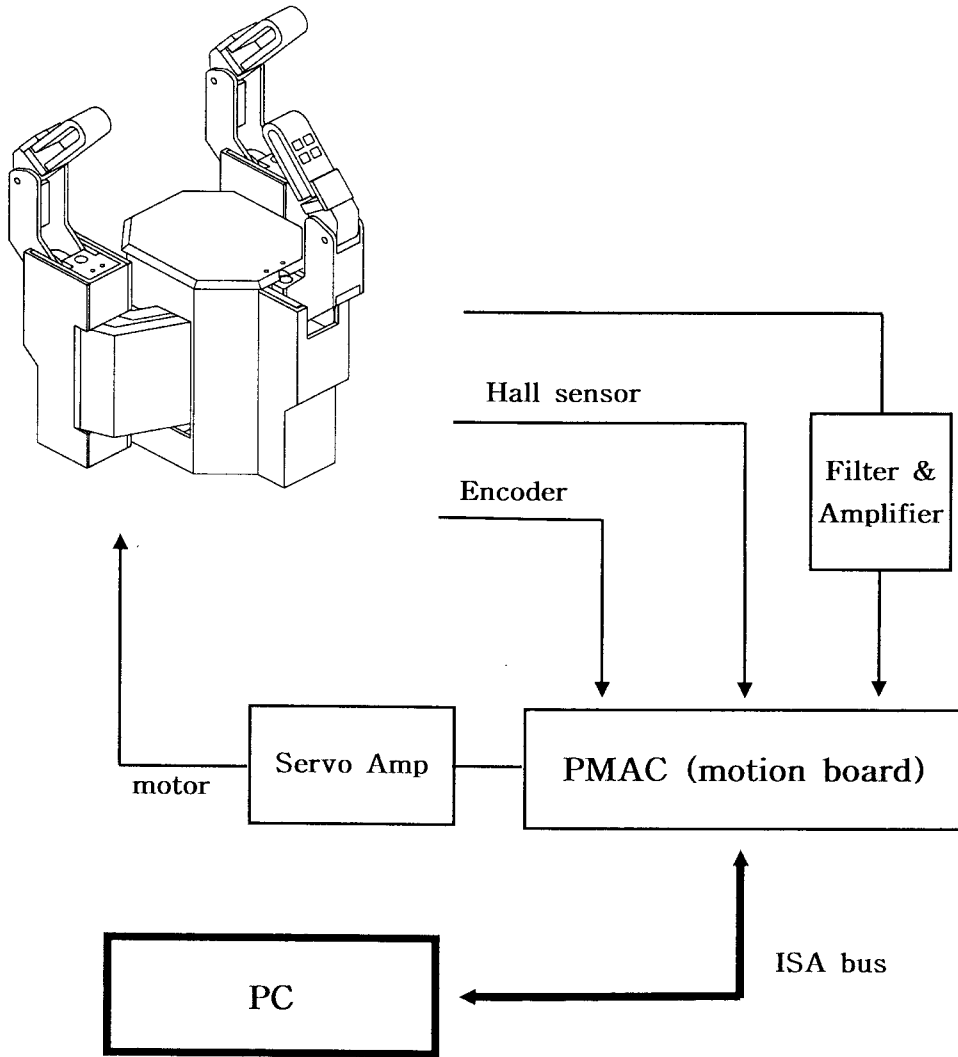


그림 3.2.1.2.46 Hardware configuration of hand system.

그림 3.2.1.2.46은 핸드 시스템 하드웨어 구성도이다. 상용 모션 보드인 PMAC 은 4축의 모터를 제어하고 센서의 정보들을 PC 로 전송한다. 그 기능을 자세히 살펴보면 다음과 같다. 각축의 운동 경계 영역을 찾는 홀센서 신호는 PMAC 의 디지털 포트에 연결된다. 또 각 축의 위치를 측정하기 위한 엔코더 신호는 PMAC 의 카운터 포트에 연결된다. 힘

센서를 통해 나오는 신호는 매우 작고 노이즈도 타기 쉽기 때문에 필터와 앰프를 거쳐 PMAC 의 AD 포트에 연결된다. 마지막으로 PMAC 을 통해 나오는 제어입력 신호는 서보 앰프를 거쳐 PWM 방식으로 모터로 전송된다. 21.216 msec 의 sampling time으로 PC 와 PMAC 은 위에 연결된 포트를 이용하여 데이터를 주고 받는다. PMAC 은 사용자에게 다양한 형태의 제어 환경을 제공하고 이는 PC 를 통해서 변환될 수 있다. 또한 사용자의 편의를 위해 PMAC 과 PC 는 C++ 환경으로 구성하였다. PC 의 OS 는 WINDOWS 이며, PMAC 과는 Dual Port Ram 을 통하여 통신을 한다. 이때 제어의 실시간성을 PMAC 에서 보장한다.

(나) 손가락의 기구학적 해석

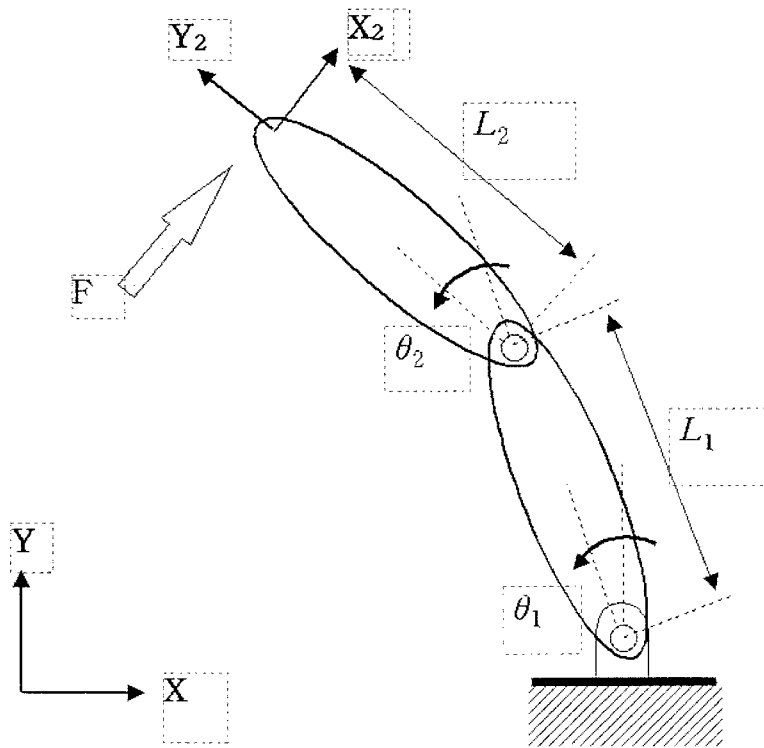


그림 3.2.1.2.47

현재의 로봇핸드는 스트레인 게이지를 수동관절 끝단에 장착함으로써 힘을 피드백 받아 제어를 하게 된다. 이때 과지력을 느끼는 힘의 방향은 그림 3.2.1.2.46의 F 방향과 같다. 그러나 이를 제어하는 제어입력은 능동관절각(θ_1)에 주어지므로 핸드를 제어하기 위하여

손끝 미세 변위(Δx_2)와 제어관절각의 변화량($\Delta \theta_1$) 사이의 자코비안(jacobian)을 도출한다.

그림 3.2.1.2.47에 설정된 좌표대로 절대 좌표계와 손끝단의 상대좌표계를 관계를 나타내기 위하여 손가락을 기구학적으로 해석한다.

제일 관절각 θ_1 과 제이 관절각 θ_2 는 4절링크로 연결되어 있으며 다음과 같은 관계식으로 근사된다.

$$\theta_2 = 2\theta_1 + 45^\circ \quad (1)$$

직각 좌표계와 손끝 좌표계는 기하학적으로 다음과 같은 관계식을 이룬다. 이때 관절각 θ_1 에 대하여 미세 변위 Δx 와 Δx_2 는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\Delta x_2 \cos(3\theta_1 + 45^\circ) = \Delta x \quad (2)$$

여기서 손가락 끝단의 x 좌표는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} x &= -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ &= -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(3\theta_1 + 45^\circ) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (8) 로 부터 θ_1 의 미세 변위 $\Delta \theta_1$ 과 Δx 의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta x = [-l_1 \cos \theta_1 - 3 l_2 \cos(3\theta_1 + 45^\circ)] \Delta \theta_1 \quad (4)$$

구해진 식 (9) 를 식 (7) 에 대입하면 다음과 같은 식이 주어진다.

$$\Delta x_2 \cos(3\theta_1 + 45^\circ) = [-l_1 \cos \theta_1 - 3 l_2 \cos(3\theta_1 + 45^\circ)] \Delta \theta_1 \quad (5)$$

식 (10) 는 제어입력각의 변화량 $\Delta \theta_1$ 과 손끝좌표계의 변화량 Δx_2 와의 관계를 나타낸 것이다.

이를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \theta_1 &= - \left[\frac{\cos(3\theta_1 + 45^\circ)}{l_1 \cos \theta_1 + 3 l_2 \cos(3\theta_1 + 45^\circ)} \right] \Delta x_2 \\ &= J(\theta_{i,1}) \end{aligned} \quad (6)$$



식 (11) 은 손끝 좌표의 미세 변위(Δx_2)와 제어관절각의 변화량($\Delta \theta_1$)과의 자코비안을 의미한다. 위 식을 이용하여 손가락의 파지력을 제어할 수 있다.

(다) 파지시의 힘과 거리측정

① 개요

힘센서에 의해 핸드가 물체를 파지시 접촉력과 접촉거리를 측정할 수 있다. 이를 이용

하여 핸드와 물체 파지시 힘센서에 의해 힘과 거리측정이 가능함을 실험적으로 보인다. Fig. 3.4 은 핸드와 손끝 링크를 나타낸 것이다. 아래 그림은 물체를 파지할 때 일정한 지점으로부터의 거리를 해석하기 위해 좌표축을 설정해 놓은 것이다. 여기서 핸드와 손끝 링크는 40mm 이고 힘센서 사이의 거리는 10mm 이다. 좌표축 X를 기준으로 거리를 측정한다.

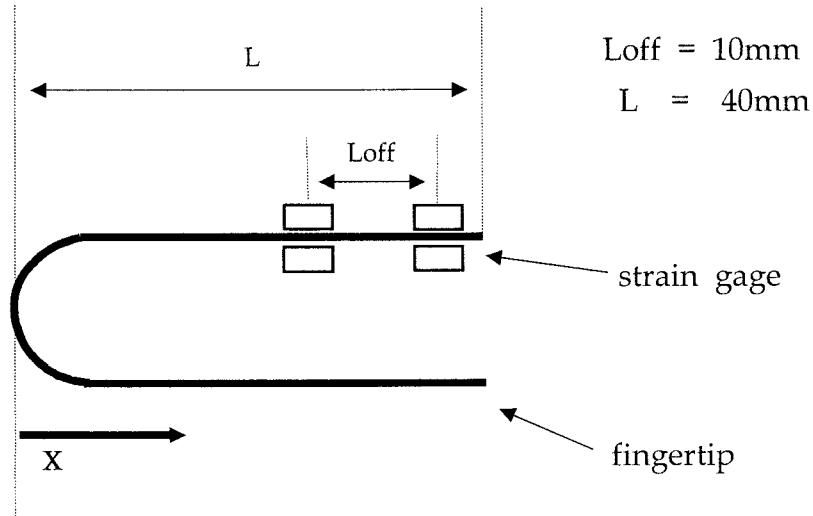


그림 3.2.1.2.48 Kinematic configuration for measuring contact distance.

② 실험

핸드가 물체를 파지시 접촉력과 접촉거리를 측정하기 위해서 실린더 형상의 물체를 파지한다. 이때 물체에 외력을 가하여 거리를 변화시킨다. 이와 같은 방법으로 힘과 거리를 측정한다.

아래의 그림 3.2.1.2.49는 각 손가락에서의 접촉력과 접촉거리를 측정한 것이다. 아래 그림 3.2.1.2.49에서 각 손가락당 작용하는 힘이 측정된 것을 볼 수 있다. 또 접촉거리가 변화되는 것을 볼 수 있다. 손가락의 접촉거리가 변화된 것을 통해서 초기에 물체를 손 안에서 파지했다가 손가락 끝으로 이동시킨 후 다시 손 안쪽으로 움직인 것을 알 수 있다. 이때 물체에 힘을 주고 움직였으므로 각 손가락의 파지력의 변화가 Fig. 3.5에 잘 나타나 있다. 이로써 장착한 힘센서로 파지력과 파지거리를 동시에 측정할 수 있음을 알 수 있다.

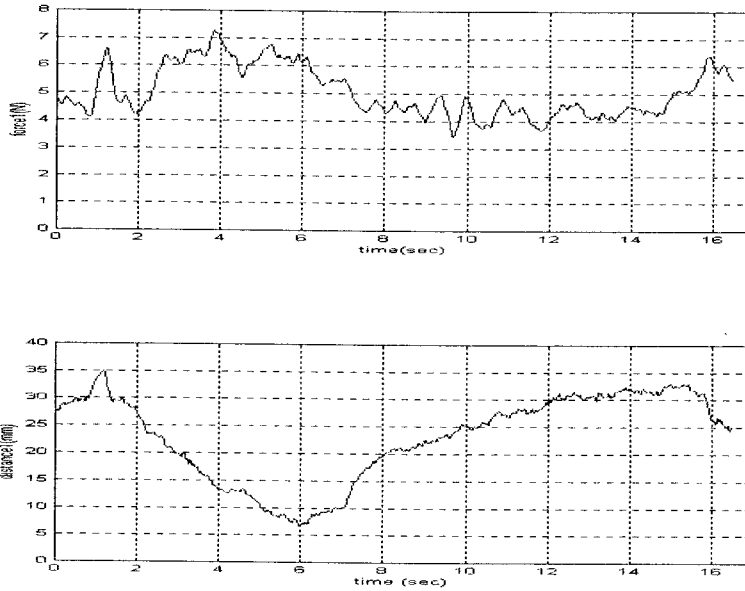


그림.3.2.1.2.49 Fingertip force & position of finger1.

(라) 파지실험(1)

① 개요

텐돈을 이용한 로봇핸드[12][13][14][15][16][17]의 대부분은 텐돈에 걸리는 장력을 측정함으로써 손가락 마디의 회전축에 걸리는 토크를 측정한다. 이 경우, 관절에는 일정한 토크가 작용하도록 제어하더라도 손가락 마디와 물체가 접촉하는 지점이 달라지게 되면 파지력이 다를 수 있다. 즉, 파지력을 정확히 측정하는 것이 불가능하므로 파지점의 위치가 변화할 경우에는 물체를 적절한 힘으로 파지하기 어렵다. 따라서 3.4 절에서 검증된 새로운 힘센서를 이용하여 접촉부분이 달라지더라도 일정한 파지력으로 물체를 파지함을 보인다.

② 제어기의 설계

그림 3.2.1.2.50은 로봇핸드를 제어하기 위한 블록다이어그램이다. 핸드에서 나오는 힘정보는 사용자가 원하는 기준 힘과의 차이로 식 (7) 처럼 컨트롤러에 입력이 된다. 여기서 제어입력은 컨트롤러에 의해 위치제어입력으로 바뀌고 이는 다시 실제 관절각과의 차이를 이용하여 PMAC 자체 내의 PID 제어기로 제어를 하게 된다. 이때 컨트롤러를 구성하는 제어기를 간단히 쓰면 다음과 같다.

$$\Delta x_{i,2} = k_{i,1} (F_{i,desired} - F_{i,estimated})$$

$k_{i,1}$: gain

i : i^{th} finger

(7)

식 (7) 의 $\Delta x_{i,2}$ 는 식 (6) 에 의하여 관절각의 제어입력으로 바뀌게 된다. (7) 식을 통해 나오는 제어입력은 PMAC의 PID 컨트롤러에 의해 위치제어를 함으로써 힘제어를 수행한다.

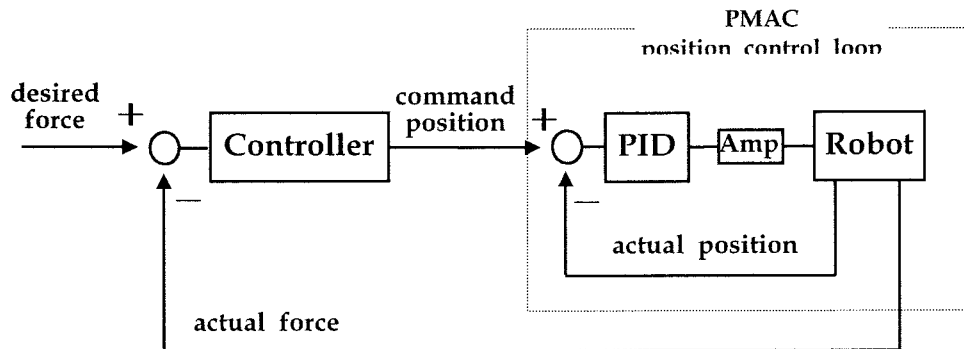


그림 3.2.1.250 Force control block diagram of robot hand system.

이 실험은 두 가지 방법으로 나누어서 한다.

- ㉔ 물체를 파지한 후 외부에서 파지물체에 힘이 주어지지 않는 경우.
- ㉕ 물체를 파지한 후 외부에서 파지물체에 힘이 주어지는 경우.

위의 두 가지 실험을 함으로써 외란에 상관없이 손끝에서 일정한 힘으로 물체를 파지함을 알아보고자 한다.

Table 5. Force gain

$k_{1,1}$	0.3
$k_{2,1}$	0.28
$k_{3,1}$	0.28

Table 6. PID gain of the PMAC

	finger1	finger2	finger3
P	8706	37582	39998
I	20	200	100
D	3500	4000	2000

③외란이 있을 경우

핸드가 물체를 파지할 때, 물체에 외란이 주어짐에도 불구하고 일정한 접촉력을 유지하며 물체를 파지하는 실험을 수행한다. 파지할 물체는 블록형, 구형, 실린더형의 물체이

다. 또 파지력도 각각 다르게 설정한다.

그림 3.2.1.2.51를 보면 손가락1, 손가락2, 손가락3 각각 측정된 관절각이 바뀌는 것을 알 수 있다. 이로써 파지된 물체에 외란이 존재하는 것을 알 수 있다. 파지물체에 따라서 조금씩의 차이는 있지만 각각의 손가락은 기준 파지력을 유지하는 것을 볼 수 있다.

블록형 물체를 파지할 경우,
기준 파지력 : 손가락1 (10N), 손가락2 (5N), 손가락3 (5N)

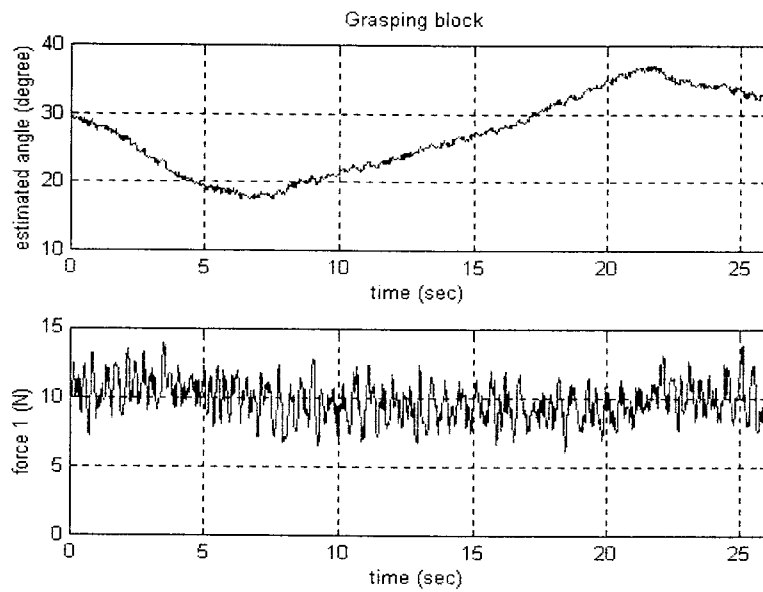


그림 3.2.1.2.51 Grasping block type object of finger1.

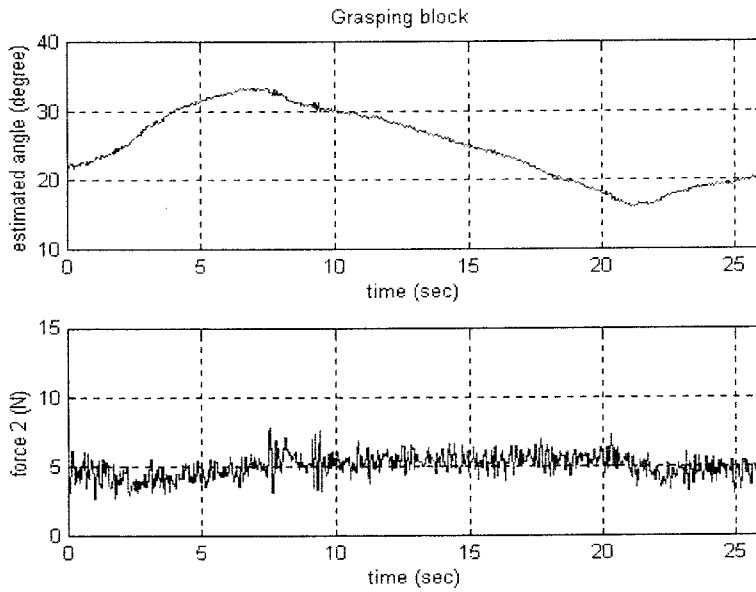


그림 3.2.1.2.52 Grasping block type object of finger2.

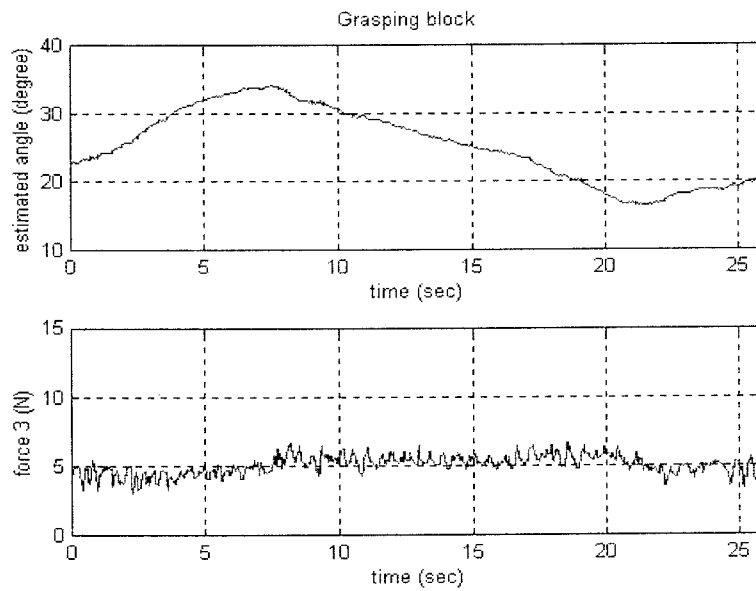


그림 3.2.1.2.53 Grasping block type object of finger3.

(마) 파지실험(2)

① 개요

(라)의 파지실험(1)은 외란에 대해서도 로봇핸드가 물체를 안정적으로 파지 할 수 있음을 보여준다. 그러나 (라)의 파지실험(1)은 손가락에 주어진 접촉력만 유지하면 손가락의 형상에 관계없이 물체를 안정적으로 파지한 것으로 인식한다.

그림 3.2.1.254 Illustration of various stable grasp configuration.

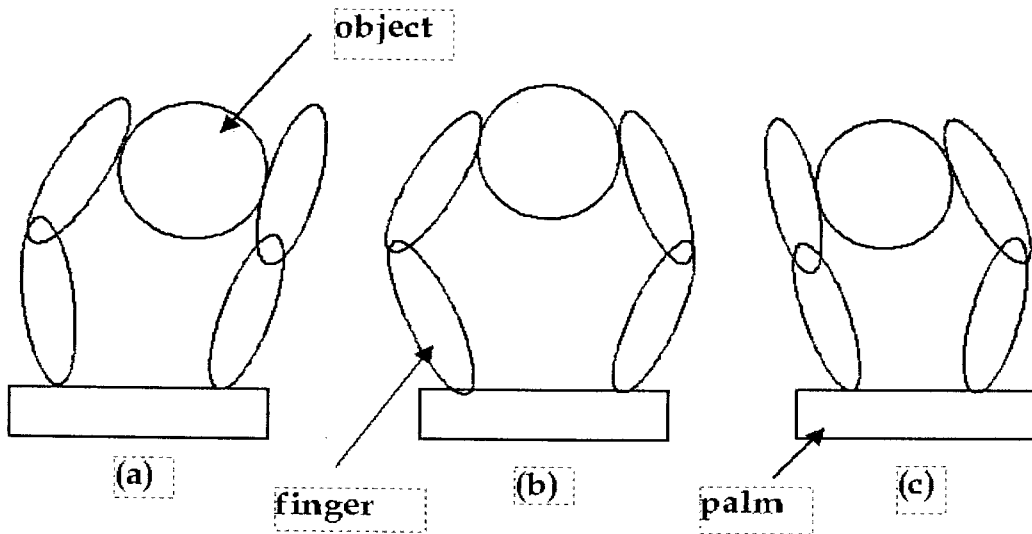


그림 3.2.1.254은 (라)의 파지실험(1)에서 물체를 파지했을 때, 손가락형상의 대표적인 경우를 나타낸 것이다. 손가락에 기준 파지력이 측정되면 (a), (b), (c) 각 경우 다 안정적인 파지로 인식한다.

현재 핸드 시스템에서 파지하고 있는 물체에 외력이 주어지면 파지력을 유지하기 위하여 손가락의 파지형태가 새로운 위치로 바뀌게 된다. 이때 (a)와 (c)의 경우는 손가락의 관절각이 조금만 변형이 되어도 물체를 쉽게 놓치게 된다. 따라서 외력에 대해 물체를 안정적으로 파지하기 위해서는 (b)와 같은 형상이 관절각의 여유가 많기 때문에 바람직한 파지모습으로 볼 수 있다.

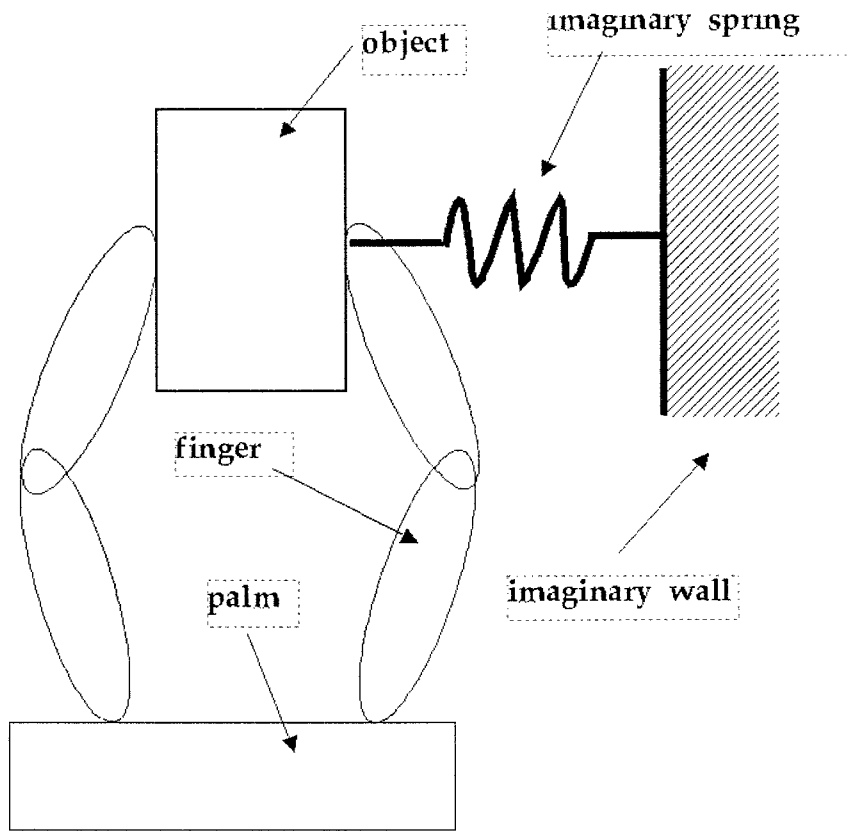


그림 3.2.1.2.55 Stable grasping object using imaginary spring.

따라서 임의의 위치에서 물체를 파지하더라도 (b) 와 같은 형상으로 물체를 파지를 유지하기 위하여 그림 3.2.1.2.55과 같은 시스템을 설계한다.

손가락이 물체를 파지했을 때 이 물체를 가상의 벽에 연결된 가상의 스프링을 이용하여 질량-스프링 시스템을 구성한다. 위와 같이 구성된 시스템은 핸드가 그림 3.2.1.2.54 의 (a), (c) 와 같은 모습으로 물체를 파지하더라도 물체를 (b) 에 위치시킴으로써 각 손가락의 관절각의 여유를 크게하기 때문에 물체를 안정적으로 파지할 수 있다.

② 제어기의 설계

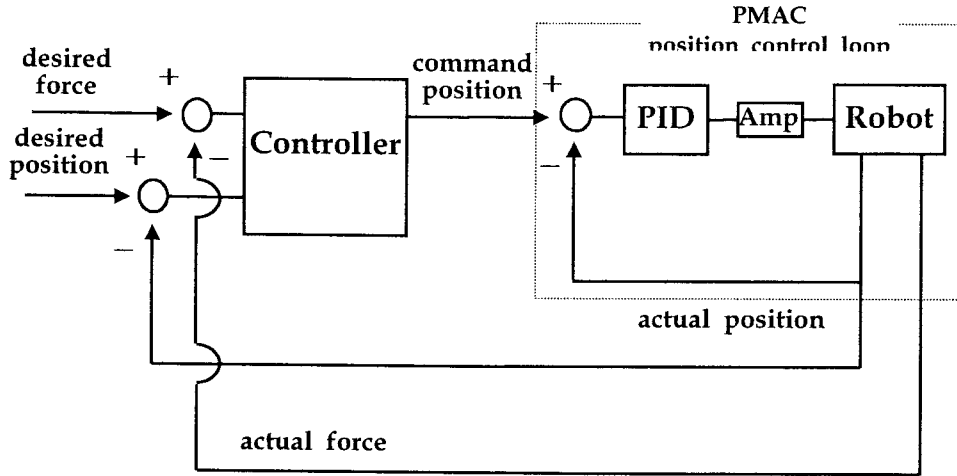


그림 3.2.1.2.56 Force & position block diagram of robot hand system.

식 (6), (7) 를 이용하여 콘트롤러를 다음과 같이 구성한다.

$$\Delta \theta_{i,1} = k_{i,1} J(\theta_{i,1}) (F_{i,desired} - F_{i,estimated}) + k_{i,2} (\theta_{i,1,desired} - \theta_{i,1,estimated})$$

$J(\theta_{i,1})$: jacobian

$k_{i,1}, k_{i,2}$: gain

i : i^{th} finger

(8)

위의 콘트롤러는 (라).②에서 설계된 제어기에 위치제어 부분을 첨가한 것으로 구성된다. 각 손가락의 자유도가 1 이므로 이론적으로는 힘과 위치를 동시에 제어하는 것은 불가능하며, 위와 같은 제어기는 불안정해질 수 있다. 그러나 실제로는 계의 거동을 식 (8) 의 첫째 항이 지배하며, 두 번째 항의 제어입력은 계의 안정성에 영향을 끼치지 않는 범위 내에서 설정하여 제한적으로 힘,위치 제어를 동시에 수행하는 효과를 기대할 수 있다. 그림 3.2.1.2.56 에서 보는 바와 같이 로봇에서 피드백 받는 힘 정보와 기준힘 그리고 위치 정보와 기준위치, 각각의 차이를 콘트롤러에 입력한다. 입력된 신호는 콘트롤러에 의해 제어입력으로 PMAC 에 전달된다. 이것은 PMAC 의 자체 PID 콘트롤러에 의해 위치제어를 수행하게 된다. 이때 계인은 (라).②와 같이 Table 5., Table 6.과 같고 위치 제어 부분의 계인은 다음과 같다.

Table 7. Position gain

$k_{1,2}$	0.1
$k_{2,2}$	0.1
$k_{3,2}$	0.1

③ 실험

핸드가 물체를 파지했을 때 물체에 외란을 주고 이때 핸드가 기준 파지력을 유지하며 손바닥 가운데 물체를 위치시키는지 알아본다.

블록 형태의 물체(지름 73mm)를 파지할 경우,
 기준 파지력 : 손가락1 (8N), 손가락2 (4N), 손가락3 (4N)

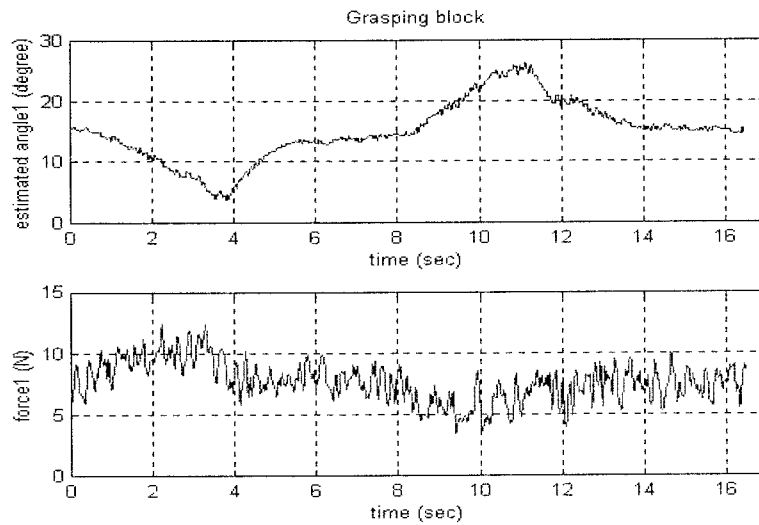


그림 3.2.1.2.57 Grasping block type object of finger1.

4초까지 손가락1이 기준 파지력 보다 크고 남은 두 손가락이 기준 파지력 보다 작은 것을 보아 파지물체가 손가락1 쪽으로 힘을 받고 있음을 알 수 있다. 그리고 4 ~ 8초 사이에는 기준 파지력을 유지하는 것을 통해서 4초 정도까지 손가락1 쪽으로 힘이 가해졌다가 4 ~ 8초 사이에는 외력이 가해지지 않았음을 알 수 있다. 또 11초까지 손가락1이 기준 파지력 보다 작고 남은 두 손가락이 기준 파지력 보다 큰 것을 보아 물체가 손가락2, 손가락3 쪽으로 힘을 받고 있음을 알 수 있다. 11초 이후에 각 손가락들이 기준 파지력을 유지

하는 것을 보아 이때부터 외력이 존재하지 않음을 알 수 있다. 이 실험에서 외력을 가해도 그 외력이 제거되면 관절각의 여유가 많은 형상으로 손가락의 관절각이 바뀌어지는 것을 알 수 있다. 이때 기준 파지력을 유지하고 있음을 알 수 있다.

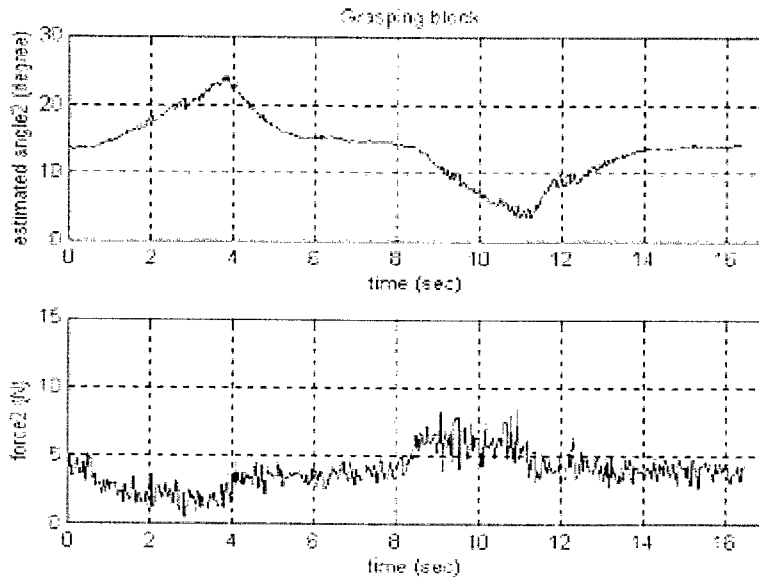


그림 3.2.1.2.58 Grasping block type object of finger2.

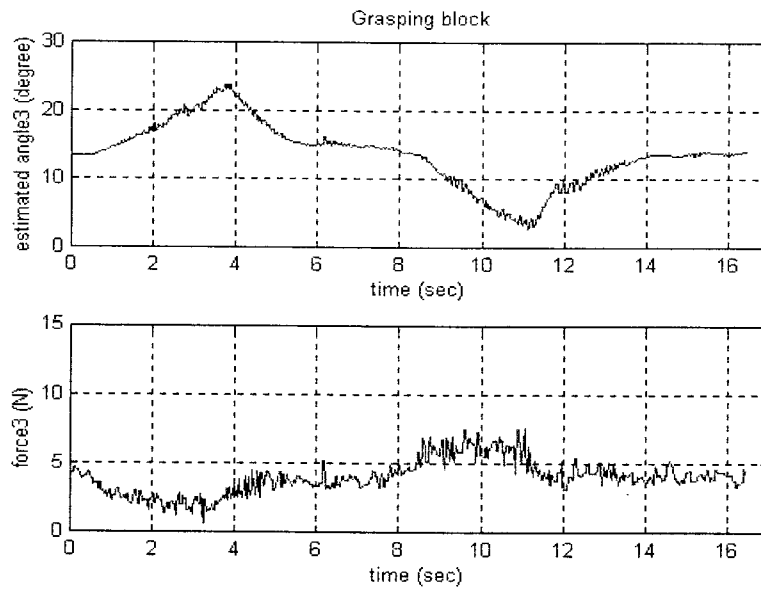


그림 3.2.1.2.59 Grasping block type object of finger3.

(바) 형상측정

① 개요

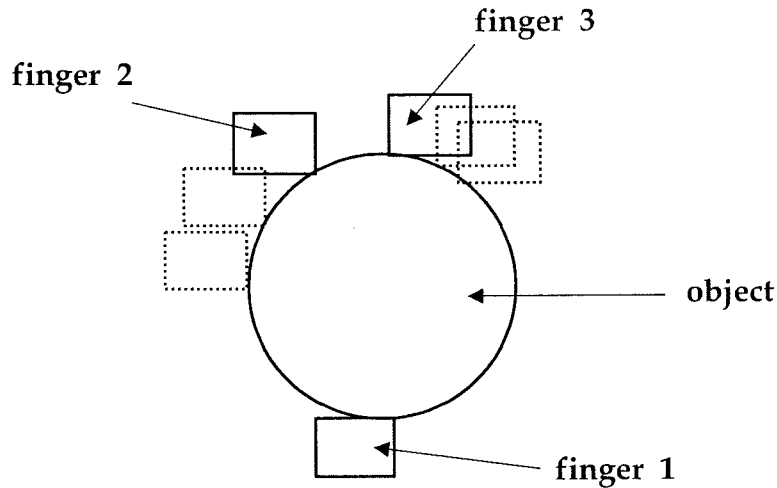


그림 3.2.1.2.60 Shape detection of object using lateral motion.

로봇핸드가 매니플레이터에 결합되어 문손잡이와 같이 환경에 고정된 물체를 조작하는 작업을 고려한다. 이때 비전 등의 센서정보를 이용하여 로봇은 파지가 가능한 목표위치를 가지는 형상으로 매니플레이터의 위치제어를 수행하게 된다. 실제 통합된 시스템으로 이와 같은 작업을 수행할 경우, 비전에 의한 위치측정오차와 매니플레이터의 절대 위치 오차에 의하여 핸드의 최적 파지 위치로의 운동제어가 충분한 정밀도로 이루어지지 못할 가능성이 높다. 이러한 경우에 마치 사람이 어두운 방안에서 문손잡이 위치를 더듬어서 파악하는 것과 같이 로봇핸드가 대상물체에 접촉하여 형상을 측정한 후에 적절한 위치로 보정하여 작업의 정밀도를 극대화 시킬 수 있다. 이와 같은 경우 물체를 안정적으로 파지하기 위하여 그림 3.2.1.2.60과 같은 방법으로 물체를 파지한다. 그림 3.2.1.2.60 는 물체의 형상 인식 모습을 보여준다. 이것은 핸드의 횡운동을 이용하여 물체를 시험적으로 파지함으로써 수행된다. 인식된 정보를 통해 물체의 중심을 구하고 핸드의 손바닥 중심을 물체의 중심에 위치시킨다. 위와 같은 방법으로 매니플레이터의 위치정밀도 한계를 극복하고 물체를 파지할 수 있다. 이때 로봇은 파지할 물체를 알고 있는 경우로 제한한다.

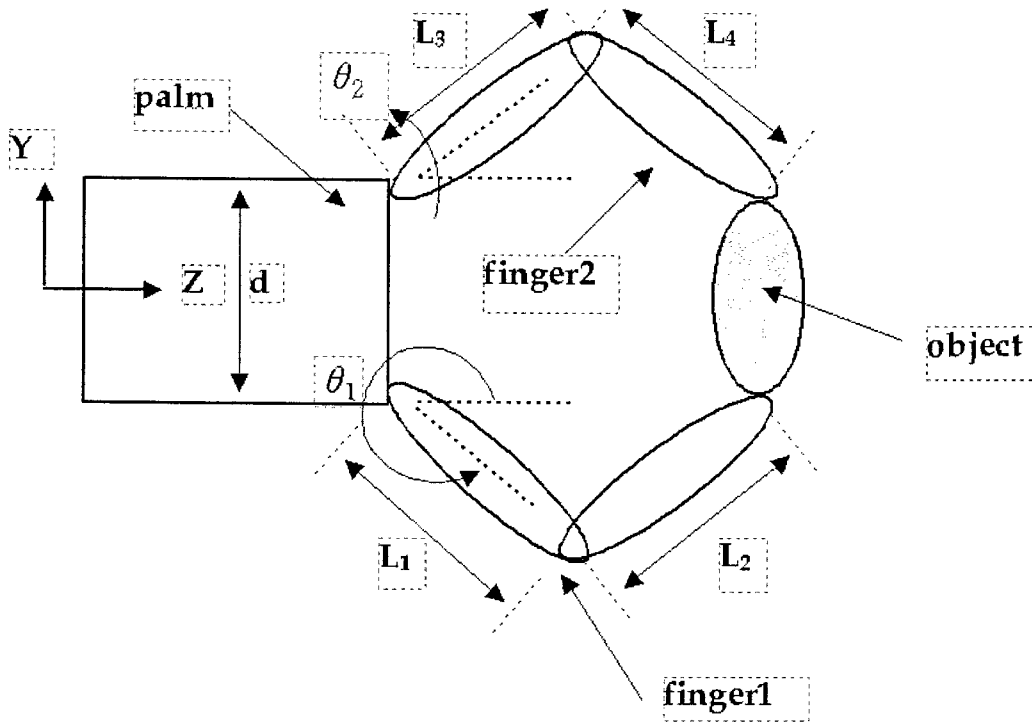


그림 3.2.1.2.61 Kinematic configuration for the shape detection.

그림 3.2.1.2.61은 형상측정을 위하여 물체를 파지했을 때 손가락의 좌표를 설정한 것이다. 손가락1과 손가락2가 물체와 접촉하는 점을 y_1, y_2 라 하면 수식 (1), (3) 을 이용하여 y_1, y_2 을 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 y_1 &= -\frac{d}{2} - L_1 \sin \theta_1 - L_2 \cos(3\theta_1 + 45^\circ) \\
 y_2 &= \frac{d}{2} + L_3 \sin \theta_2 + L_4 \cos(3\theta_2 + 45^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

손가락3의 y_3 도 위와 같은 방법으로 구한다. 이렇게 구해진 y_1, y_2, y_3 를 이용하여 물체를 파지 했을 때 2차원 도면상에 그 위치를 표시함으로써 물체의 형상을 인식할 수 있다.

② 실험

㉠ 물체를 형상측정하여 2차원 도면상에 찍는 경우

i) 구 형상 물체를 파지할 경우 - 반지름 46.5mm

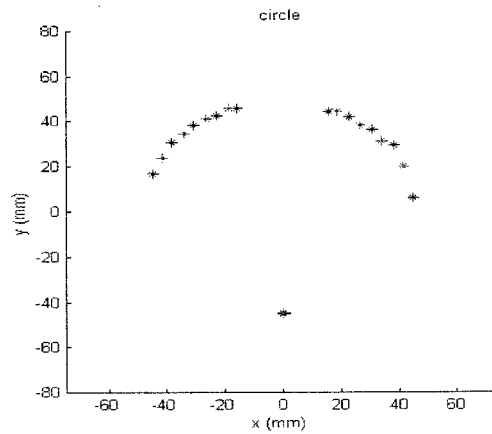


그림 3.2.1.2.62 Experimental result of circular shaped object detection

ii) 블록 형상 물체를 파지할 경우 - 높이 62.5mm, 폭 90mm

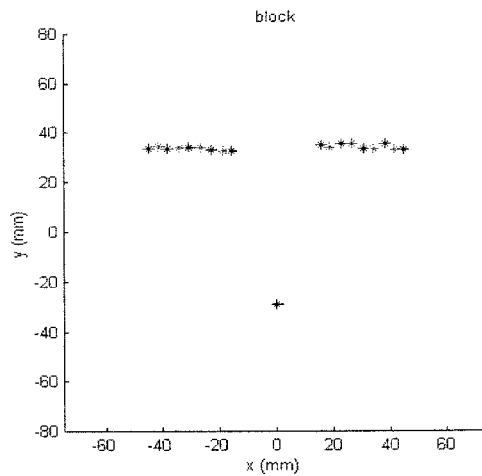


그림 3.2.1.2.63 Experimental result of block type object detection.

㊤ 측정된 좌표를 통해 물체의 중심을 인식

i) 구 형상 물체를 파지 할 경우

- Gradient method를 사용. 중심 (-1.0320 , 2.2057), 반지름 47.0927mm

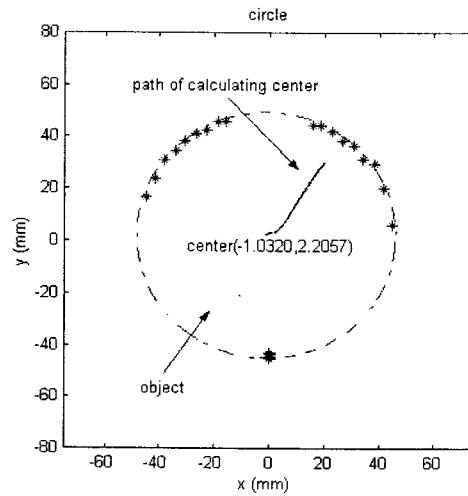


그림 3.2.1.2.64 Obtaining center point of circular shaped object

ii) 블록 형상의 물체를 파지 할 경우

- Least square method를 이용하여 측정된 형상의 중심을 구하는 경우
중심 (0 , 2.8818), 높이 62.0850 mm, 폭 89.5014 mm

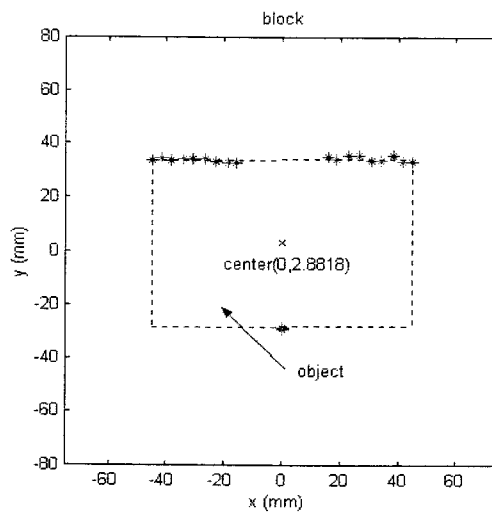


그림 3.2.1.2.65 Obtaining center point of block type object.

본 연구는 인간과 커뮤니케이션 하는 빌딩 내부나 병원 등의 사무실 내부의 환경에서 사용자의 필요에 따라 물건을 집는다거나 사무실간에 이동을 할 때 문고리 등을 잡아 여는 기능을 수행하며 원하는 곳에 배달하는 기능을 가진 로봇 시스템의 한 모듈로서 재구성 가능한 범용핸드를 개발함에 있다. 대상물의 형태나 재질에 관계없이 물체를 안정하게 파지하기 위한 로봇 핸드의 구동 메커니즘 설계를 한다. Prototype을 제작하기 위한 설계 변수들을 얻기 위해 시뮬레이션 작업을 수행한다. 실험 환경을 구성하고 다양한 물체를 안정적으로 물체를 파지하기 위한 기구학 및 동역학적 해석 및 제어방법을 연구하는 것이 본 연구의 목표이다.

개요

산업용 로봇에서 사용되어져 왔던 매니플레이터 끝단에 붙여서 사용되어져 왔던 단순한 Gripper가 인간의 손과 유사한 동작과 정밀도를 갖기 위해 더 많은 자유도와 경량화가 요구되어지기 시작하였고 이에 필요한 구동부의 설계는 곧 로봇의 설계에 있어서 중요한 요인으로 작용을 하게 되었다. 로봇 핸드의 연구 분야 중에 구동 메커니즘의 전달 부분에 대한 부분에 있어서의 과거의 연구 동향은 아래의 표와 같다.

우선, Link mechanism을 사용하여 개발되어 지는 핸드와 gripper로서 아주 큰 파지력을 가진다. 하지만, 구동부의 구조는 곧 핸드의 전체 크기와 직결된다. 또 하나는 Tendon 방식의 구동 mechanism을 예로 들을 수가 있다. 로봇을 충분히 집약된 형태로의 제작이 용이하고 정밀한 작업의 제어에 용이하다. 큰 파지력은 전자의 구동메커니즘에 비해 다소 떨어지지만 텐돈 방식을 구동하기 위한 컨트롤러가 필요함이 문제점으로 지적되고 있다.

Under-actuated Mechanical Hands		
Link	Tendon	Others
Crowder et al. S.J. Bartholet Schulz C.M. Gosselin KIST-UH2	S. Hirose, J.D. Crisman J.F. Mullen, Graham, Ulrich, Skinner, Barrett, Centaur, RTRII	Lee. S
Large grasping forces	Minimize transmission dimensions	
Bulky	Limitation small grasping forces	

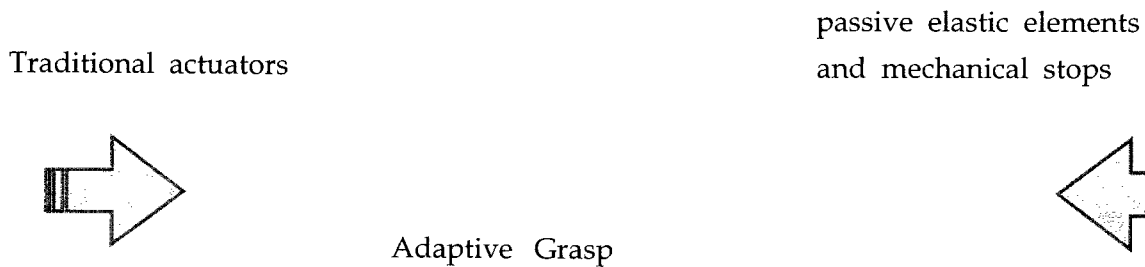
Table 1 Under-actuated Robot hand and Gripper

이번 연구는 위와 같은 연구 동향에 비추어 기존의 제작된 KIST에서 제작된 Cetaur Hand 와 KIST-1 Hand 의 경험을 바탕으로 지적된 문제점인 다양한 물체를 추가 구동부가 필요하지 않아도 인간의 손의 동작을 모사 한 형식으로의 작업이 가능한 메커니즘을 설계하는데 있다. 이러한 연구는 이미 Under-actuated mechanism 이라는 분야로 나뉘어져서 연구가 이뤄져 왔다.[5][7][8]

Under-actuation in Robotic Hands [8]

A mechanism is said to be Under-actuated when it has less actuators than degrees of freedom; [C.M. Gosselin]

위에서 정의된 내용처럼 일반적으로 지금까지 전통적인 방식으로 사용되어진 모터 등이 기계적인 요소들(스프링, STOPPER 등)을 이용하여 수동적으로 구동에 참여하는 방식으로 이는 좀 더 실제적으로 인간의 파지 형태를 만들어 낼 수 있는 파지를 가능하게 한다.



아래의 그림은 Under-Actuation mechanism 인 핑거 모듈의 물체를 파지 할 때의 과정을 설명한 것이다.

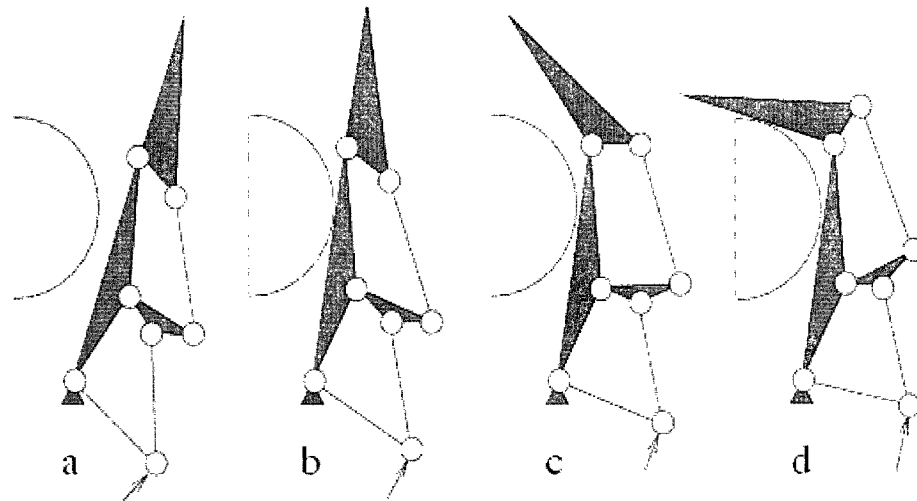


그림.3.2.1.2.66 참조[8]

화살표의 방향으로 힘이 전달이 되어지고 안쪽 부분의 링크가 물체에 접촉을 하게 되면 접촉점에서의 반 작용력이 구동부의 힘과 같아지게 될 때까지 증가하게 된다. 바깥쪽 부분의 연결된 링크는 스프링으로 연결이 되어져 있어서 반작용 토크와 비례하게 증가를 하게 되고 구동 토크는 더 작용하게 되어 스프링의 변화함으로써 바깥쪽 링크가 물체를 완전히 포개는 형식으로 파지를 하게 된다.

Design & Simulation

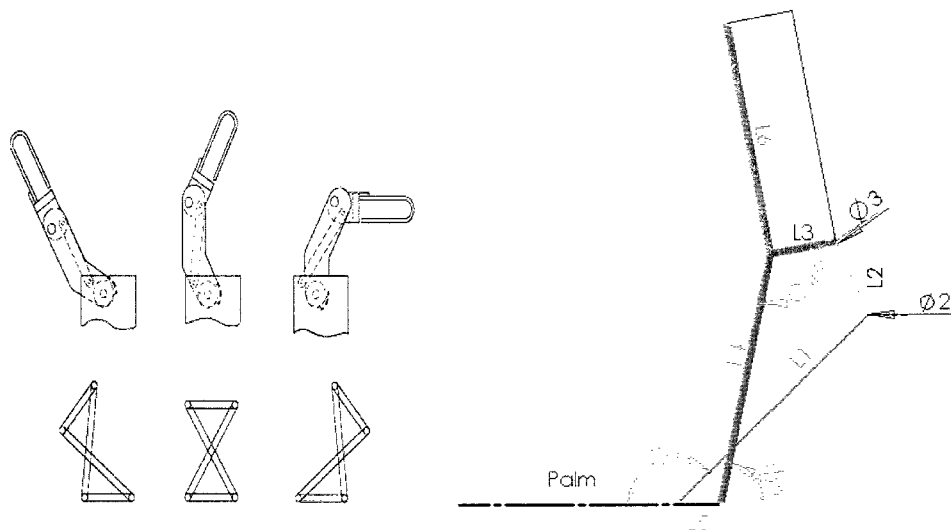
본 연구에서는 사람의 손으로 잡을 수 있는 한도 내의 다양한 모양과 크기를 갖는 즉, 블록, 실린더, 얇은 종이나 강성이 높은 또는 적은 물체 등을 안정적으로 파지 할 수 있는 기능을 가진 다지 로봇 손을 제작하고자 한다. 설계의 요구 사항들은 아래와 같다.

1. 핸드의 무게가 경량이어야 할 것.
2. 파지력이 높을 것.
3. 파지 한 물체를 안정적으로 파지하기 위해 적절한 힘을 유지하도록 힘 센서를 장착할 것.
4. 구동메커니즘을 단순화 할 것.
5. 핸드 안에 모든 부가장치를 구비하고 크기를 소형화 할 것.

이러한 요구사항 들을 만족하는 구동메커니즘의 prototype 을 제작하기 위해선 Shape adaptation이 가능하도록 하는 구동메커니즘의 설계가 바람직하다. 그래서, 아래의 그림과 같이 Closed Chain 형태의 5절 링크 구조를 가지며 구동부의 하나의 모터로 2 관절의 시스템을 제어할 수 있는 손가락 모듈을 제작하려 한다. 다양한 물체를 파지하기 위해서 구동메커니즘을 구성하는 링크들의 적절한 설계 변수들을 찾기 위한 시뮬레이션을 수행한다. 특히 상태해석, 파지 안정성 해석을 수행하여 링크길이 및 관절각도, 동작범위 등을 결정한다.

Prototype 제작을 위한 설계변수에서도 알 수 있듯이 fingertip과 inner link 사이의 수동 관절 각(O4)에 위치한 mechanical element 인 스프링의 적합한 강성을 결정하는 문제는 물체를 안정적으로 파지 할 수 있도록 지배적인 영향력을 미친다. 수동 관절 각(O4)에 위치한 강성을 결정하기 위해 모델링을 제시하고 적합한 k를 결정한 후의 시뮬레이션 수행 후의 다양한 물체를 안정적으로 파지 함을 실험적으로 검증한다.

아래의 그림은 제작하고자 하는 로봇 핸드의 손가락의 2관절 5절 링크로 구성된 구동 메커니즘의 개략도이다. 이전 KIST-1 차 버전의 핸드와 비교하여 그림을 보자.



DesignVariables :

$L_1, L_2, L_3, L_5, Palm$

$O_4 : Stopper, TorsionSpring$

DependantVariable : L_4, L_6

$O_1 : Active Joint Angle$

$O_2, O_3, O_5 : Passive Joint Angle$

$L_1 : DrivenLink$

$L_2 : connection from L_1 to L_3$

$L_3 : fingerTip_Short$

$L_4 : innerlink(firstbody)$

$L_5 : Base$

$L_6 : fingerTip_Long$

그림 3.2.1.2.67 4절 및 5절 링크 구동 메커니즘 개략도

4절 및 5절 링크 모두 1자유도로 2관절을 움직일 수 있는 메커니즘이다. 차이점이라고 한다면 5절 링크의 경우 O_4 에 stopper와 torsion spring 이 부착되어 있다는 것이다. 이는 inner link에 물체가 접촉하여도 바깥쪽의 fingertip이 계속해서 운동을 할 수 있다는 것이다.

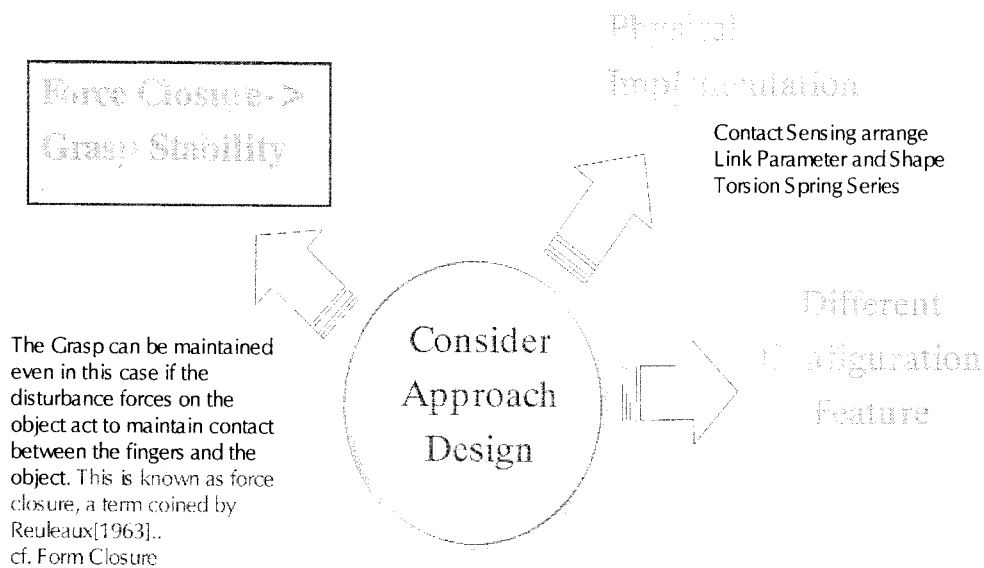
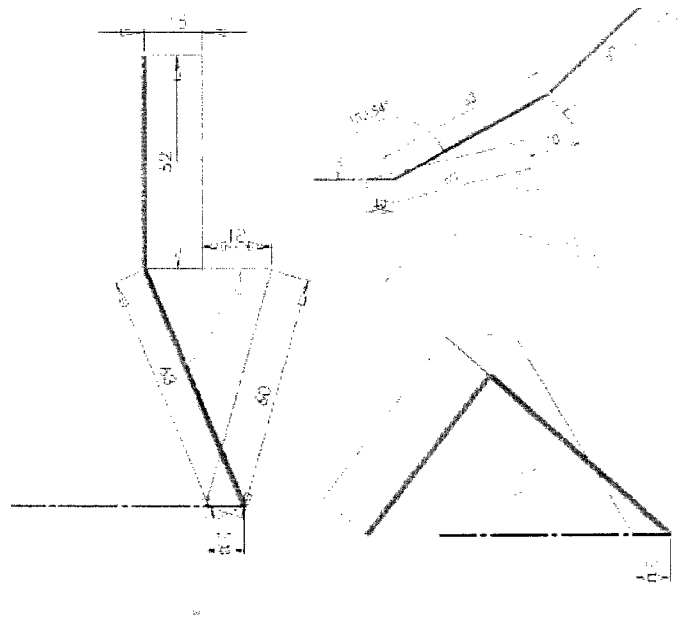


그림3.2.1.2.68 Approach Design Robot Hand

본 연구의 설계의 접근은 위의 그림과 같다. 우선, 구조적으로 다른 메커니즘이기에 서비스로봇에 적합한 작업을 수행하며 인간과 친화적인 분위기를 만들어 낼 수 있는 외관 디자인과 점점 더 경량화로 매니플레이터의 하중에 무리를 주지 않을 정도로 로봇 핸드 자체의 하중을 줄이는 방향으로의 연구와 실제로 물체의 접촉을 알아내기 위한 finger tip 주위에 센서들을 적절히 사용할 수 있는 방안과 다양한 물체를 파지하고 파지한 물체들을 안정하게 유지하면 원활한 작업을 수행할 수 있도록 다지 로봇 핸드를 어떻게 제어할 지에 대한 연구방향으로 접근하고자 한다.

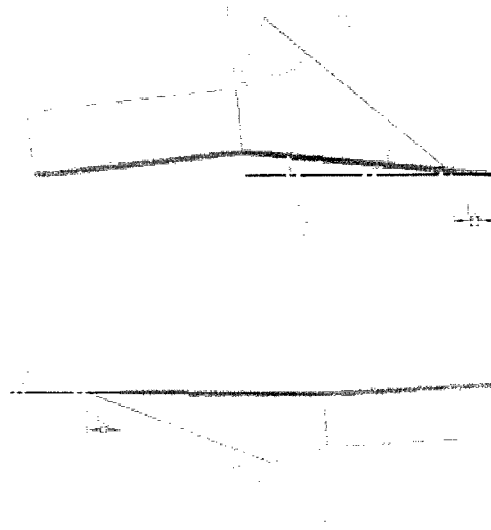
Singularity analysis of Kinematic Chains

아래의 연구 내용은 실제로 각 링크 파라미터들을 설계를 할 때 고려 되어져야할 메커니즘의 Singular 한 특성들을 먼저 도식적으로 알아보고자 함이다. 아래의 형태로 두 링크가 서로 평행한 경우에 Singular를 발생함을 쉽게 알 수가 있다. 이러한 구조를 만들어 내는 운동을 피할 수 있도록 설계를 해야할 것이다.



Limitation analysis of Kinematic Chains

아래 그림의 연구 내용은 실제로 하나의 손가락 모듈 하나가 만들어 내는 Work space를 알아보기 위함이다. 기계적인 제약 조건을 고려하였다.



Grasp Approach analysis for simulation

아래 그림의 연구 내용은 손가락이 물체를 파지 할 때 의 모습을 통해 두 가지 모드로 나누어 해석하자 한다. 첫 번째 모드는 물체에 접근하는 모드이다. 입력은 구동축의 입

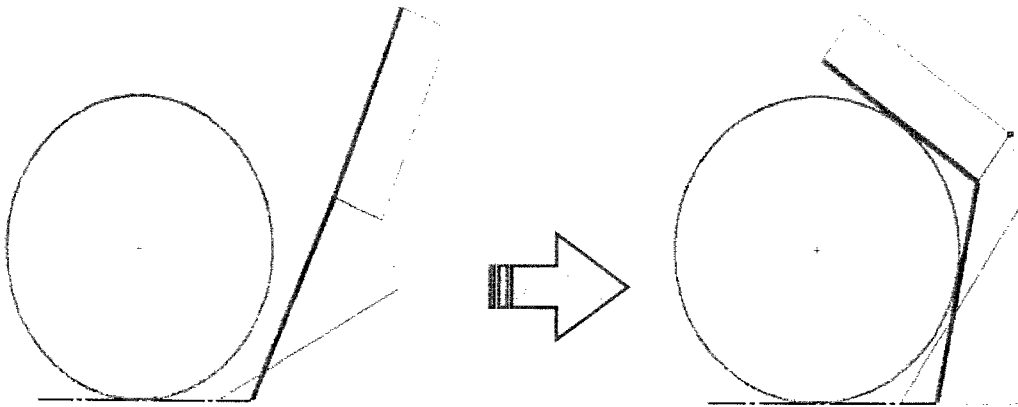
력 각이고 출력은 inner link의 회전각이다. 여기에서 stopper가 위치한 O4는 고정되어 있다. 두 번째 모드는 inner link 가 물체에 접촉한 후 fingertip이 물체에 접근하는 모드이다. 이때 입력은 구동축의 입력 각이고 출력은 stopper가 위치한 O4의 관절 각이다. 이때 inner link의 회전각은 inner link에 물체와 접촉한 위치에서 고정이 된다. 이러한 두 가지 모드를 통해 다양한 물체를 singular 조건에 빠지지 않는지 또한 충분히 다양한 물체를 두 관절이 모두 접촉이 이뤄지는지 알아보기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

$$Mode1 = \frac{output}{input} = \frac{\theta_5}{\theta_1}$$

where, $\phi \approx fixed$

$$Mode2 = \frac{output}{input} = \frac{\phi}{\theta_1}$$

where, $\theta_5 \approx fixed$



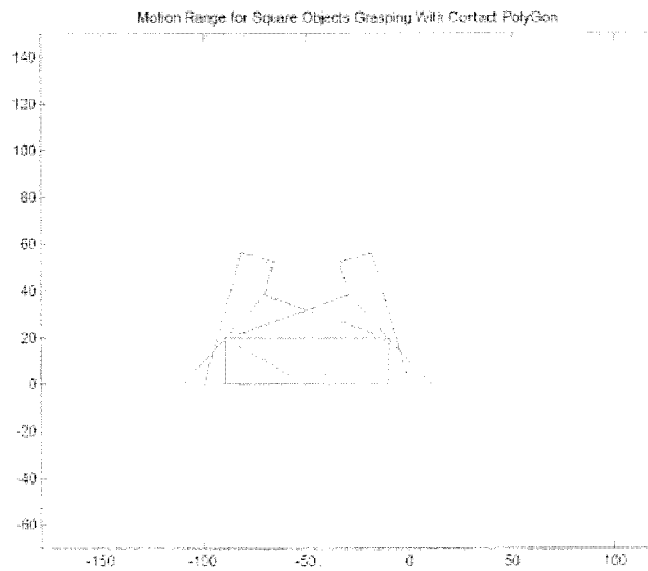
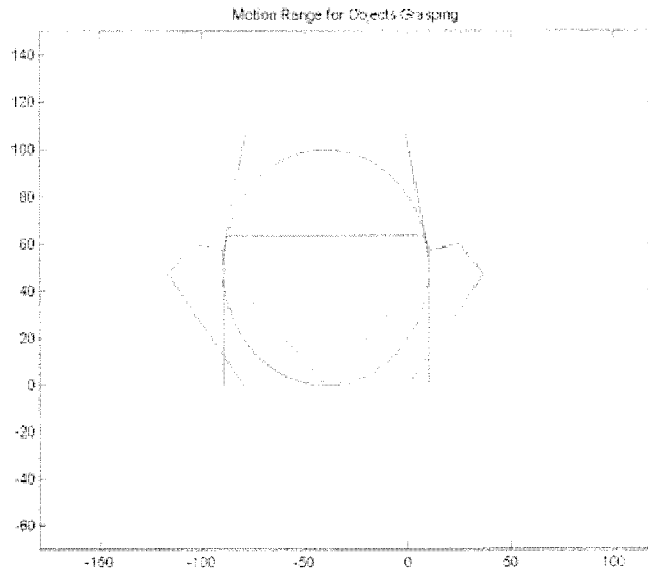
시뮬레이션 결과는 아래 그림에 나타나 있다. 하지만, 모든 물체에 대해 파지를 할 수 있는지는 않다. 그래서 미리 정의된 크기의 물체들을 파지 할 수 있는지에 대한 검토를 하였다.

circle : $30 \leq \phi_{obj} \leq 130$

$80 \leq Palm_size \leq 120$

$20 \leq a_{obj_x} \leq Palm_size$

square : $20 \leq b_{obj_y} \leq 60$ 단위는 mm 이다.

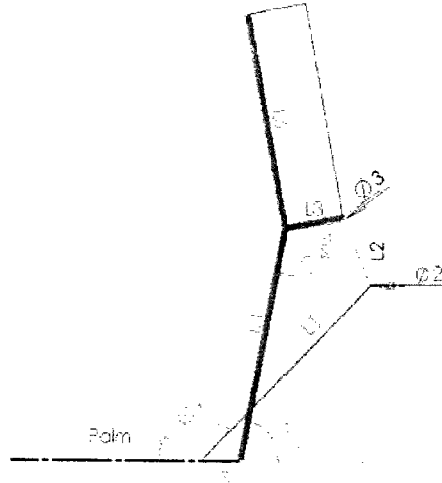


Simulation results according to the various types

Palm 과 두 관절이 모두 접촉을 이뤄 파지 한 형태를 취한다. 물체 안에 그려진 다각형은 두 관절과 Palm에 접촉한 점들을 이어 만든 다각형이다.

Address link parameters

시뮬레이션을 통해 도출한 각 링크의 설계 파라미터들은 다음과 같다.



L = [60.00 18.00 15.00 57.00 10.00 52.00]

L = [59.00 17.00 15.00 57.00 8.00 55.00]

L = [59.00 15.00 15.00 57.00 10.00 52.00]

L = [59.00 18.00 15.00 55.00 7.00 56.00]

L = [59.00 16.00 15.00 55.00 10.00 56.00]

주된 설계 변수로서 L1/L2/Finger Tip은 실제로 로봇핸드의 크기를 결정하는데 필요한 변수들이다. L2는 외관상 핸드의 투박한 외관을 가지지 않도록 조절이 필요한 변수이다. L3/L5는 고정되어 설계를 해도 무방할 듯 하다. Palm의 크기는 실제로 다양한 물체를 파지 하는데 또한 필요한 변수이다. 일반적으로 인간의 손도 Palm의 크기가 물체를 파지할 때 마다 변하게 된다. 기존의 KIST-Hand 역시 손가락이 횡운동 가능하여 좀 더 다양한 물체를 파지할 수 있게 되었다. 이에 어느 정도 까지 Palm이 줄어들어도 무리가 없을 지에 대해 연구 중이다.

L1/L4/Tip

L2

L3/L5(Fixed)

Palm

Grasping Stability Analysis

본 연구는 물체의 안정적 파지에 대한 해석에 관한 연구를 수행하려 한다. 로봇 손가락이 물체를 안정적으로 파지하기 위해서는 Object and Contact Stability 가 고려되어야 한다. 이에 대한 과거 연구가 있어 왔다.[3] 실제로 서비스 로봇과 같이 이동 중에 물건을 파지하며 이동 할 때에 로봇 손이 물체를 조작하는 경우가 아니더라도 안정적으로 파지하기 위한 필요가 따르게 된다.

제작된 로봇 손의 메커니즘은 다양한 물체를 Shape adaptation이 이뤄지도록 구성되어져 있다. 세 손가락 로봇 핸드가 물체를 안정적으로 파지하기 위해서 Palm과 각 관절을 이용하여 물체와의 접촉 점이 7개일 경우 Force Closure 형태를 만족하므로 안정적임을 검증할 수 있다. 또한 로봇 손과 파지 한 물체의 동역학적인 해석을 통해 물체의 안정성과 Contact의 안정성을 해석하기 위해 기존의 다양한 전략들을 취합하여 제작된 로봇 손의 유효성을 검증하고자 한다.

Control

다지 로봇 손의 제어에 관한 연구를 수행하려 한다. 물체를 안정적으로 파지하기 위한 전략으로 기존의 연구는 최대한 큰 힘을 이용하여 물체를 잡고 있을 때 물체가 안정적으로 유지될 수 있음을 어렵지 않게 직관적으로 알 수 가 있었다. 물체를 파지 한 채 이동을 하는 경우나 작은 외력에 의해 물체에 가해지는 가속도에 의해 발생하는 힘에 위한 파지의 불안정성을 극복하기 위한 다양한 연구가 수행되어져 있다. 기본적으로 안정적 파지에 대한 해석의 연구동향을 바탕으로 제작된 다지 로봇 손의 Position, Force, stiffness, and compliance control 등을 실험적인 결과를 도출하고 물체의 동역학적 해석을 통한 협조제어 등에 관한 연구를 수행하려 한다.

연구방법

실험을 위해 로봇핸드의 하드웨어 구성이 KIST 휴먼로봇연구센터에서 자체로 제작된 CAMA 보드를 이용한 실험장치를 구성한다.

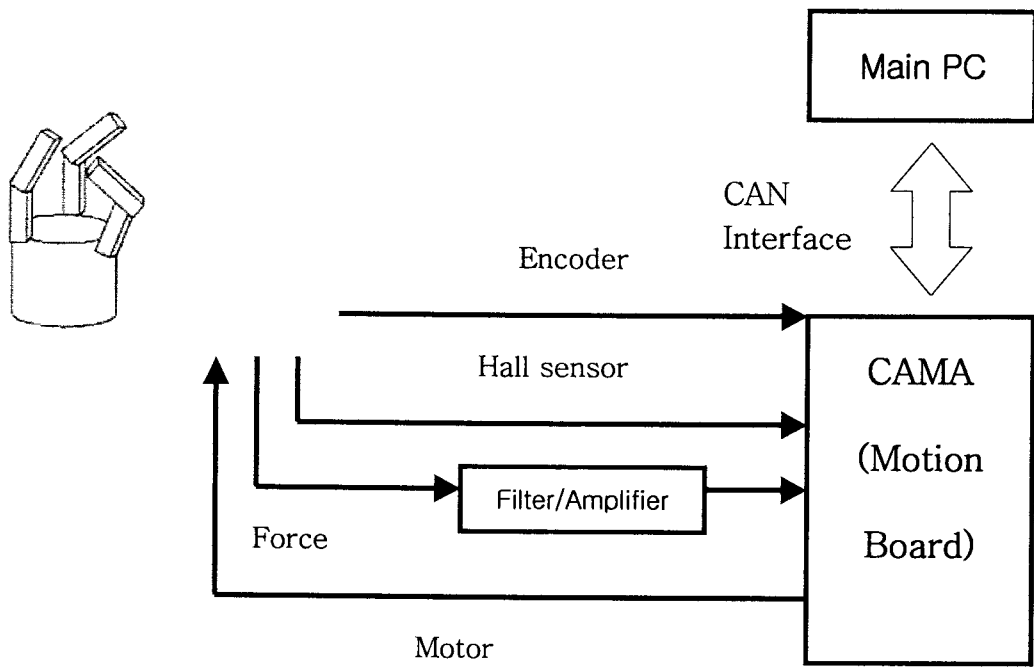


그림 3.2.1.2.69 실험장치 구성도

다양한 물체를 가지고 파지 하는 실험을 통해 Shape adaptation 이 이뤄지는 실험을 수행하고자 한다.

로봇핸드의 기구학 및 동역학적 해석을 수행하고 안정적인 파지를 위한 다양한 전략을 세운 알고리즘을 적용하여 물체 파지 실험을 통해 외란에 강건한 안정적인 파지 실험을 수행하고자 한다.

1.3 시스템기술

가. PSR 플랫폼 개발

(1) PSR 2 의 특성

PSR 2 이동 로봇은 기 제작된 PSR 1 이동 로봇이 갖는 기능 및 외형 상의 단점을 극복하고 보다 인간 친화적인 특성을 갖출 수 있도록 설계하는 데 초점을 맞추어 제작되었다. 특히 로봇 구동 부의 배선을 줄이고 전반적인 플랫폼의 무게와 크기를 감소시킴으로써 유지 보수 및 운용에 있어서의 편의성을 추구하였다. PSR 2의 특징을 정리하여 기술하면 다음과 같다.

- 인간 친화적인 외관 설계

PSR 1에 비해 전체 크기를 20% 감소시켰으며, 금속 프레임 위에 FRP를 소재로 한 커버로 외관을 장식함으로써 전반적으로 부드러운 이미지를 줄 수 있도록 설계하였다.

- 안전성을 고려한 설계

매니퓰레이터의 1,2,3축에 기존의 조인트 대신 토션 스프링(Torsion Spring)과 MR 유체로 구성된 댐퍼(Damper)를 갖는 수동 컴플라이언스 (Passive Compliance) 조인트를 장착하였으며 또한 금속성 소재로 길 부분을 덮어버렸던 PSR 1에 비해 이 부분을 소프트 커버(Soft Cover)로 처리함으로써 매니퓰레이터 운용 시 발생할 수 있는 사람이나 외부 장애물과의 충돌에 대해 사람과 로봇 자체를 보호할 수 있도록 하였다.

- 배선의 단순화

기존의 PSR 1의 매니퓰레이터의 경우, 모터 앰프(Amplifier)와 제어보드를 이동체 내부에 장착하였으며, 이로 인해 매니퓰레이터 6축, 핸드부 4축에 대한 모터 구동 라인, 엔코더 라인, 리미트 스위치 신호 및 전원 라인, 스트레인 게이지 신호 라인 및 스트레인 앰프 신호 및 전원 라인이 모두 매니퓰레이터 내부를 관통하여 이동체로 연결되기 때문에 배선이 복잡해지고 매니퓰레이터 동작 시에 손상을 입을 가능성이 크며, 이로 인해 시스템 유지 보수 및 관리에 많은 어려움이 있었다. 그러나, PSR 2에서는 매니퓰레이터 제어 시스템으로서 CAn(CAn-based Motor controller with Amplifier)를 적용하였다. CAn은 제어기에 자체 앰프를 내장하고 있으며 크기를 대폭 감소시켰으므로 4,5,6축 및 핸드 부의 제어 보드를 매니퓰레이터 내부에 장착하는 것이 가능하게 되었다. 또한 CAN Protocol을 채용하여 호스트 컴퓨터로부터 모든 보드를 CAN Network을 통해 직렬형(Cascade)으로 연결함으로써 각 조인트의 구동 시스템을 연결하는 배선을 획기적으로 단순화하였다.

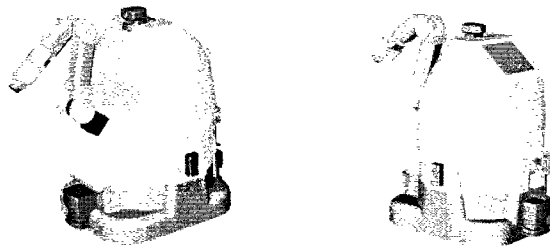


그림 3.2.1.3.1 PSR-2 의 외관

표 3.2.1.3.1 PSR 2 이동체 개발 사양

사양	Descriptions
최고 속도	0.8 m/sec
가속 성능	최고속도 도달 소요시간 3초 이내
자중	40 kg(매니플레이터, 배터리 자중 제외)
Driving Wheel	66 Radius Wheel - 50 Main Offset, 33 Secondary Offset - Wheel간 거리 : 60 mm
Motor Type	BLDC 250W
Battery	14Ah (battery 구동) lead acid 방식. 실제 1시간 정도는 운전 가능.
주행 방식	Holonomic Omnidirectional Type
최종단 감속비	최종단 Wheel 감속기의 감속비 : 1/2 중간 기어단의 감속비 : 1/2.5

(가) CAMA Motion Controller

CAMA(CAN-based Motor controller with Amp)는 2축 동시 제어용 모터 제어기이며 호스트 컴퓨터와 CAN Network을 통해 명령어와 데이터 교환이 이루어진다. 자체 앰프를 내장하고 있어서 기존의 제어기와 앰프를 분리하여 사용하는 경우에 비해 시스템의 크기가 현격히 감소하였으며 이 결과로 제어기 설치 위치에 대한 제약 조건이 개선되면서 모터와 제어기 간의 배선의 길이를 단축할 수 있다.

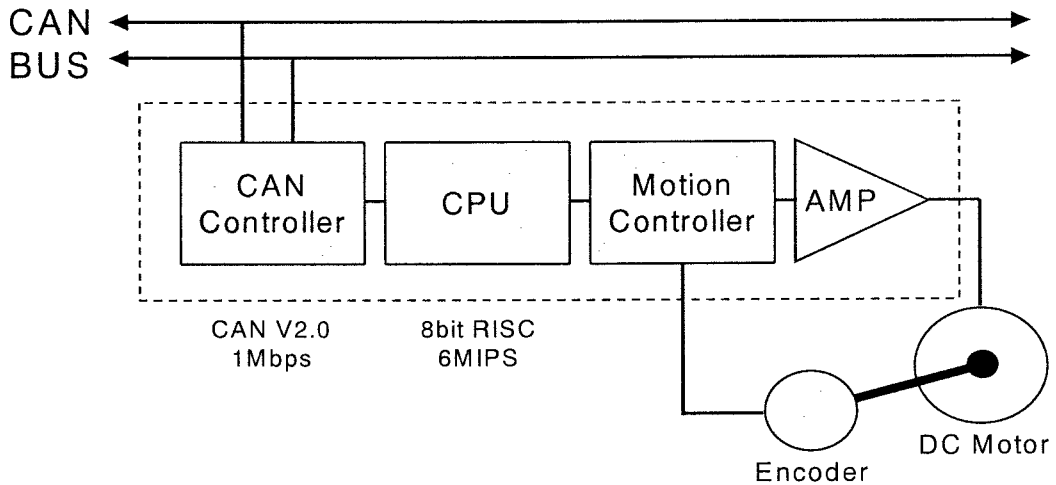
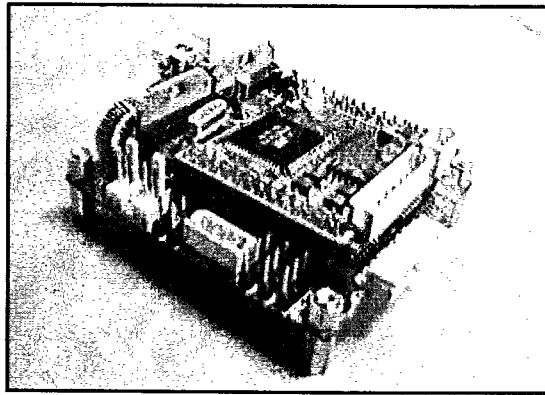


그림 3.2.1.3.2 CAMA의 플랫폼 구조

CAMA는 모터 구동 신호로서 PWM(Pulse Width Modulation) 방식을 사용한다. 그러나, 앰프 내장형으로 설계된 관계로 큰 소비전력을 요구하는 80W 이상의 모터에 대해서는 직접 구동 시 용량을 초과하게 된다. 따라서, 모터를 직접 구동하는 기능 이외에, 대용량 모터에 연결된 앰프에 기준 신호 전압을 인가할 수 있는 DAC 채널을 장착한 범용 CAMA(Universal CAMA)가 개발되었으며, PSR 2에서는 매니플레이터 1,2,3 축과 이동체의 구동 및 조향 시스템 제어에 이를 사용한다. CAMA의 사양을 요약 정리하면 다음과 같다.

[CAMA Ver.1.1]

- CPU : 8 bit AVR RISC Chip, 6MIPS 의 처리 속도
- Motion Contoller : LM629 Controller
- CAN : CAM v2.0A/B 구현, 1Mbps 의 전송 속도
- Accessories : 4 채널의 Digital I/O, 6 채널의 ADC 및 UART
2 채널의 DAC(Universal CAMA의 경우)
- Motor : 5~24V, 3A 모터 2대 동시 제어



CAMA Ver.1.0

그림 3.2.1.3.3 CAMA 외관

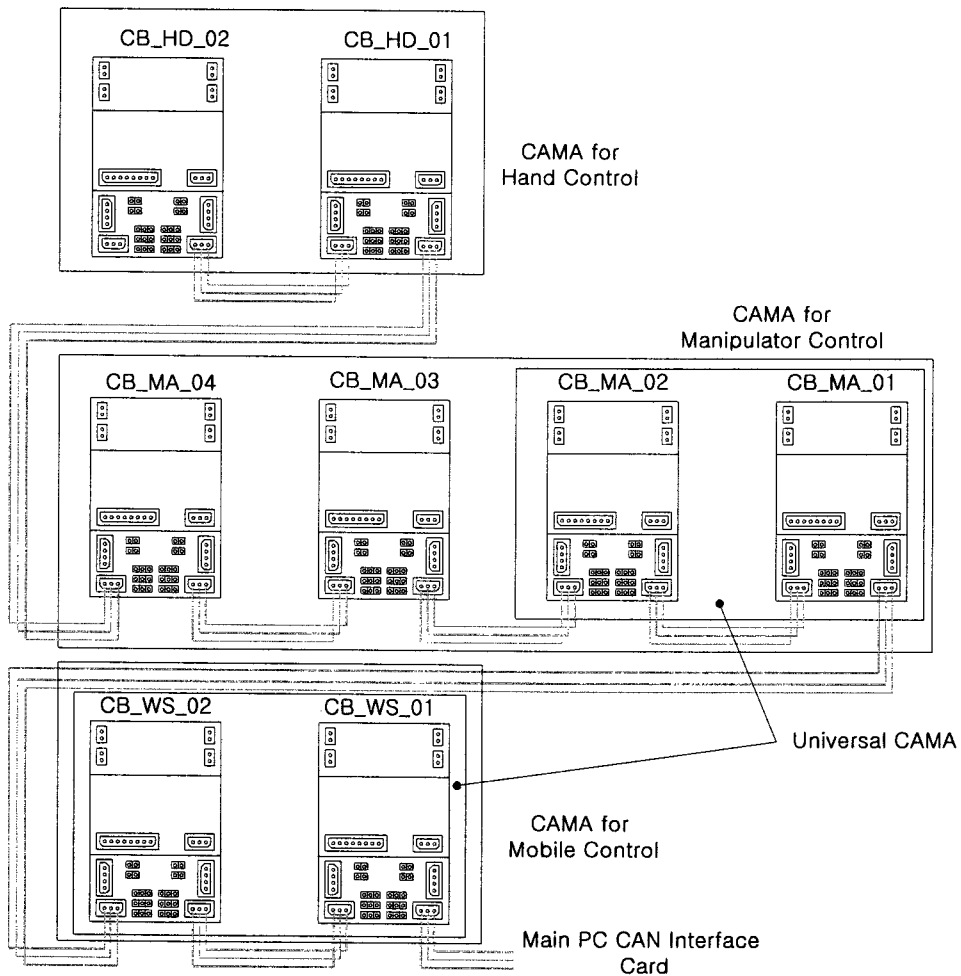


그림 3.2.1.3.4 CAMA의 연결

(나) 매니플레이터 구동 및 제어 시스템

전술한 바와 같이 매니플레이터의 경우는 제어 시스템으로서 CAMA를 채택하였으며, 1,2,3 축의 경우는 Universal CAMA의 앰프를 사용하지 않고 전용 앰프로서 Titech Robot Driver를 사용한다. 주요 구성 요소에 대한 사양은 다음과 같다.

표 3.2.1.3.2 매니플레이터 구동 및 제어 시스템 구성 부품 사양

부품 종류	적용	사양	Value
Maxon DC RE40	매니플레이터 1,2,3축	정격출력	150 W
		공칭전압	24.0 V
		토크상수	30.2 mN · m/A
		최대효율	91 %
		무게	130 g
Maxon DC RE25	매니플레이터 4,5,6축	정격출력	20 W
		공칭전압	24.0 V
		토크상수	23.2 mN · m/A
		최대효율	85 %
		무게	480 g
Titech Robot Driver	매니플레이터 1,2,3축	정격출력전압	±38 V
		정격출력전류	±5 A
		최대출력	450 W
		공급전압	DC7 ~ 48 V
		입력명령전압	±10 V
		크기	60 × 47 × 30
		무게	90 g

(다) 이동체 구동 및 제어 시스템

이동체는 2개의 구동 휠과 2개의 조향 장치를 위한 모터 4대가 장착된다. 이동체의 구동 및 조향 모터는 시스템에서 가장 큰 출력을 요구하는 부분이므로, 고풍력에서 우수한 성능을 낼 수 있는 브러시리스 직류 모터(BLDC Motor: Brushless DC Motor)와 이에 대한 전용 앰프를 채택하였다. 또한, 앰프로부터 인가되는 모터 구동 신호의 리플 현상 제거 및 신호 안정화를 위한 쇼크 모듈을 각 모터-앰프 단에 2대 씩 장착하였다.

표 3.2.1.3.3 이동체 구동 및 조향 장치 제어 시스템 구성 부품 사양

부품 종류	적용	사양	Value
Maxon EC EC45	이동체 구동 및 조향 부	정격출력	250 W
		공칭전압	24.0 V
		토크상수	43.3 mN · m/A
		최대효율	83 %
		무게	1150 g
Choke Module	이동체 구동 및 조향 부	정격전류	10 A
		직류저항	24 mΩ
		최대전류리플	정격 전류의 20%
		사용 온도	-25 ~ 70 °C
		크기	90 × 70 × 49
		무게	250 g
Maxon 4-Q-EC Servo Amplifier DES 70/10	이동체 구동 및 조향 부	최대출력전압	공급전압의 90%
		최대출력전류	±30 A
		최대출력	450 W
		공급전압	DC24 ~ 70 V
		입력명령전압	±10 V
		크기	103 × 180 × 26
		무게	410 g

(라) 이동 제어를 위한 센서 시스템

이동체 주행 시의 자율 주행(Automove)과 위치 인식(Localization)을 위한 센서 시스템은 레이저 스캐너 2대, 속도 자이로스코프 1대 및 적외선 센서 2대로 구성되어 있다. 레이저 스캐너는 전방위에만 장착하였던 PSR 1과는 달리, 전방위, 후방위 각각 1대 씩 장착하였으며 두 대의 레이저 스캐너가 인식하지 못하는 양 측방위는 보조 센서로서 적외선 센서를 사용한다. 적외선 센서는 인식 각도 및 반경이 PSR 1에서 사용하였던 초음파 센서에 비해 크고, 측정 데이터도 비교적 정확하게 얻을 수 있으나 주위에 적외선을 발산하는 장치(전열기 등)등이 영향을 미칠 때, 측정 데이터를 신뢰할 수 없는 단점을 가지고 있다. 이동체의 자율 주행 시에는 레이저와 IR 센서 정보를 사용하며, 위치 인식 시에는 여기에 추가하여 자이로스코프로부터 측정되는 각속도를 적분한 이동체의 1축 회전 변위를 사용한다. 각각의 센서에 대한 사양을 정리하면 다음과 같다.

표 3.2.1.3.4 레이저 스캐너 사양

부품 종류	사양	Value
Laser Scanner LMS 200 이동체 자율주행 및 위치 인식용	Angular Resolution	100° scan : 0.25°/0.5°/1° 180° scan : 0.5°/1°
	Response Time	13 ~ 52 msec
	Supply Voltage	30.2 mN · m/A
	Operating Temperature	-30 ~ 70℃
	Weight	4.5 kg
	Range	max. 150 m (Theoretical)
	Range for Minimum Reflectivity of 1.8%	4 m
	Resolution	10 mm
	Systematic Error	±15 mm : Range 1 ~ 8 m refl. 10 ~ 10000% ±40 mm : Range 8 ~ 20 m refl. 10 ~ 10000%
	Statistical Error (1 Sigma Standard Diver.)	±5 mm : Range < 8 m refl. ≥ 10 % Illumination ≤ 5 kLux

표 3.2.1.3.5 자이로스코프 사양

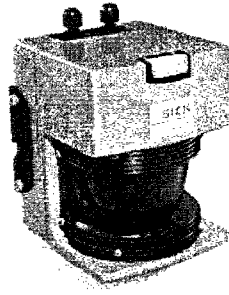
부품 종류	사양	Value
Optical Fiber Gyro TA7319 이동체 위치 인식용	Measuring Scope	±100°/s
	Scale Factor	50mV/(°/s)
	Scale Factor Error	1.5%
	Scale Factor Linearity	1% FS
	Resolution	0.001
	Operating Temperature	-30 ~ 71℃
	Draft	100°/h
	Bias	0.1°/s
	Supply Voltage	+5V, ±15V, 2W
	Weight	100g

표 3.2.1.3.6 적외선 센서 사양

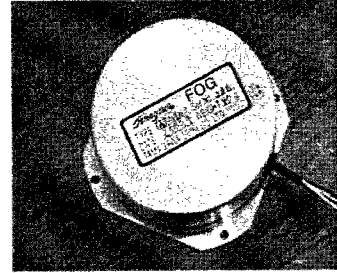
부품 종류	사양	Value
Optical Fiber Gyro TA7319 이동체 위치 인식용	Supply Voltage	+24 VDC(18V ~ 30V)
	Maximun Current	250mA
	Detectable Range	0.2 ~ 5 m : White Paper with 400mm×400mm
	Response Time	160 msec
	Operating Temperature	-10 ~ 50℃
	Weight	500g



(a) 적외선 센서



(b) 레이저 스캐너



(c) 자이로스코프

그림 3.2.1.3.4 이동체에 장착된 센서

나. PSR의 제어구조

(1) 개요

여러 가지 종류의 하드웨어 및 소프트웨어 구성 요소를 통합하기 위해서는 잘 정의된 제어 구조가 필요하다. 현재 개발 중인 PSR의 경우에는 전방향 이동부와 로봇 팔, 여러 개의 손가락은 가진 로봇 손, 트레일러 시스템 등 여러 요소들로 구성되어 있으므로 이들을 효과적으로 통합하는 것은 매우 어려운 일이다. 제어 구조를 개발하기 위해 다음과 같은 몇 개의 설계 목표를 가지고 접근하였다.

① 혼합 구조로서 Deliberator와 Reactive controller를 동시에 가지는 제어 구조
공공 장소와 같은 가변적인 환경에서 로봇이 동작하기 위해서는 빠른 응답 특성을 가진 Reactive controller가 필요하다. 또한 사람과의 인터페이스나 작업의 계획, 수많은 예외 상황에 대한 해결책 등을 계획하기 위해서는 Deliberator가 역시 필요하다.

② 자율성(Autonomy)을 가진 제어 구조
공공 장소의 서비스 로봇이 수행해야 할 작업들은 대다수가 사람의 도움 없이 진행되어야 한다. 물류 이송의 경우, 사용자가 시작점과 종착점만을 정해주면 아무리 넓은 건물 내에서라도 로봇 스스로가 원하는 곳까지 찾아갈 수 있어야 한다. 안내의 경우에도 방문자의 의도를 적절히 파악해가면서 작업을 수행해야 하므로 역시 매우 높은 수준의 자율성을 필요로 한다. 따라서 여러 세부 작업들에 대한 계획이나 오류 상황에 대한 대처 등은 제어 구조 자체가 직접적인 도움을 줄 수 있어야 한다.

③ Navigation과 Manipulation을 효과적으로 지원할 수 있는 제어 구조
제어 구조를 개발하기 위해서 이론적인 관점보다는 실제적인 관점에서 진행되었다. 따라서 서비스 로봇 기능의 근간을 이루는 Navigation과 Manipulation을 잘 지원해줄 수 있는 제어 구조를 개발하였다.

(2) 제어 구조의 개괄적 설명

PSR을 위해 개발된 제어 구조를 설명하기 위해서는 다음의 세 가지 종류의 도식이 필요하다. 새로운 요소가 더해지거나 아니면 기존 요소를 제거할 경우, 이 세 가지 도식을 이용하면 쉽게 적용이 가능하다.

① Layered Functionality Diagram

이 그림은 구성 요소들의 개념적인 관계를 보여주는 것으로 핵심 구성 요소들을 세 층에 나누어 배치한다. 아울러 이들 사이의 연결 관계와 정보들의 흐름을 한 눈에 파악할 수 있다.

② Class Diagram

이 그림은 구성 요소들을 프로그램 상에 어떻게 구현되었는지를 보여준다. 객체 지향 언어인 C++을 사용하여 확장성(scalability)과 재사용성(reusability)를 고려하여 설계한다. 이 그림들을 통해 각 요소의 생성 관계나 계층 관계를 알 수 있다.

③ Configuration Diagram

이 그림은 로봇이 세운 계획이나 오류 대처 방안 등을 보여준다. PSR의 경우 사용자로부터 작업 명령이 들어오면(Task) 이를 순차적으로 세부적인 내부 Process들로 계획을 하고 이를 다시 가장 기본적인 행동 단위인 Behavior의 조합으로 변경하여 작업을 수행한다. 이 그림은 Task, Process, Behavior 사이의 관계를 보여준다.

지금부터는 이 세 가지 밑그림에 대한 자세한 설명을 하도록 한다.

(가) Layered Functionality Diagram

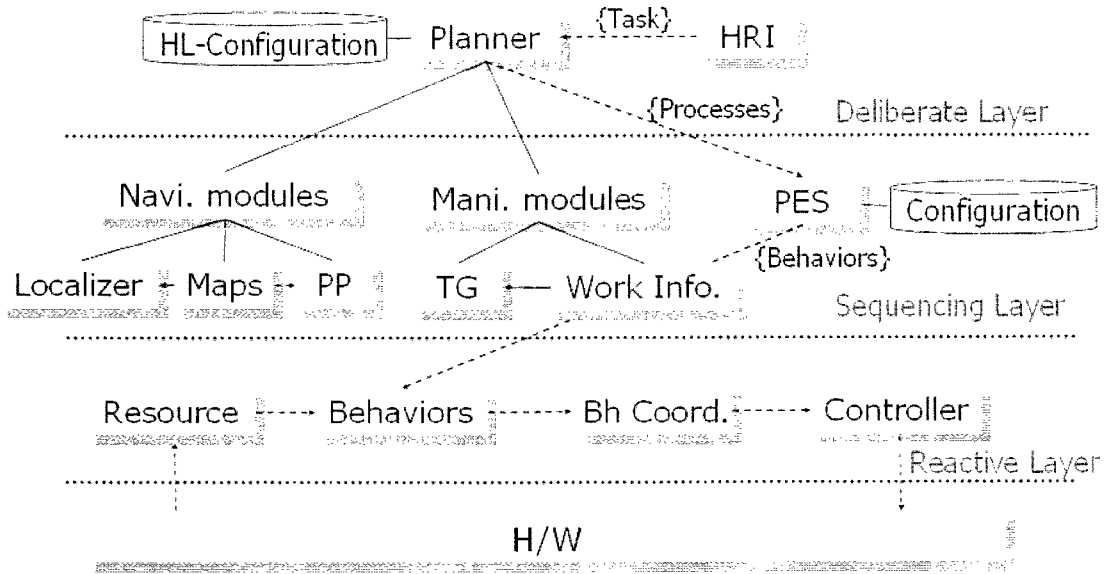


그림 3.2.1.3.5 Layered Functionality Diagram

앞서 설명하였듯이 이 그림을 통해 핵심 요소들의 연결 관계와 정보의 흐름 등을 알 수 있다. 그림 3.2.1.3.5에서 보듯이 PSR의 구조는 혼합 구조의 접근 방식에 따라 Deliberate layer, Sequencing layer, Reactive layer 이 세 가지로 구성되어 있다.

최상의 수준인 Deliberate layer에는 기본적으로 전체 작업 계획을 담당하는 Planner와 사용자와의 인터페이스를 담당하는 HRI (Human Robot Interface), 그리고 실제 작업 계획에 대한 정보를 가지고 있는 High-level Configuration으로 구성되어 있다. Planner는 사용자 작업 명령(Task)를 HRI를 통해 받게 되면 Configuration을 참조하여 여러 Process들로 변환한다. Planner는 이들을 순차적으로 Sequencing layer에 넘겨주고 그에 대한 결과가 나오면 또 다른 Process를 제공하는 방식이다.

두 번째 수준인 Sequencing layer는 크게 Reactive layer를 관장하고 Process 수행을 직접적으로 책임지는 PES(Process Execution Supervisor), Configuration 부분과 장기적인 정보를 가지고 있으면서 Behavior에 수행에 관련된 알고리즘을 수행하는 Navigation modules, Manipulation modules로 나눌 수 있다. Navigation modules는 Navigation에 필요한 요소들을 모아 놓은 것으로 경로 계획기(Path Planner)와 다양한 지도 작성 알고리즘, Localization 알고리즘 등을 가지고 있다. 또한 Manipulator module 역시 경로 생성기

(Trajectory Generator)와 작업 정보 등을 가지고 있다.

가장 최하위에 위치한 Reactive layer는 매우 짧은 시간동안 반복적으로 수행하며 실제 로봇의 움직임을 제어한다. 센서의 모임인 Resource로부터 정보를 받은 Behavior들은 단시간 내에 제어 명령을 생성하고 이는 Behavior Coordinator를 통해 취합된다. 취합된 제어 명령은 Controller를 통해 하드웨어로 전달되고 실제 로봇을 구동시키게 된다.

(나) Class Diagram

PSR 제어 구조를 구현하기 위해서 대표적인 객체 지향 언어인 C++를 사용하였다. C++은 표준화된 언어로써 사용하기가 쉽고, 유연성(Flexibility)과 재사용성(Reusability)이 높다는 장점을 가지고 있어 널리 사용되고 있다.

그림 3.2.1.3.6와 그림 3.2.1.3.7은 Layered Functionality Diagram의 각 구성 요소들을 class로 정의하여 구현된 모습을 보여주고 있다. 그림 1.1.1.2는 Navigation 관련 class들 위주로 나타내고 있고, 그림 1.1.1.3은 Manipulator 관련 class 중심으로 보여준다. 각 그림에서 선의 의미는 class들간의 생성관계를 보여주고 있는데, 예를 들면 그림 1.1.1.2에서, CPlanner는 CConfigurationHL, CMobile, CNavModules과 CManiModules, CPES 등을 생성한다.

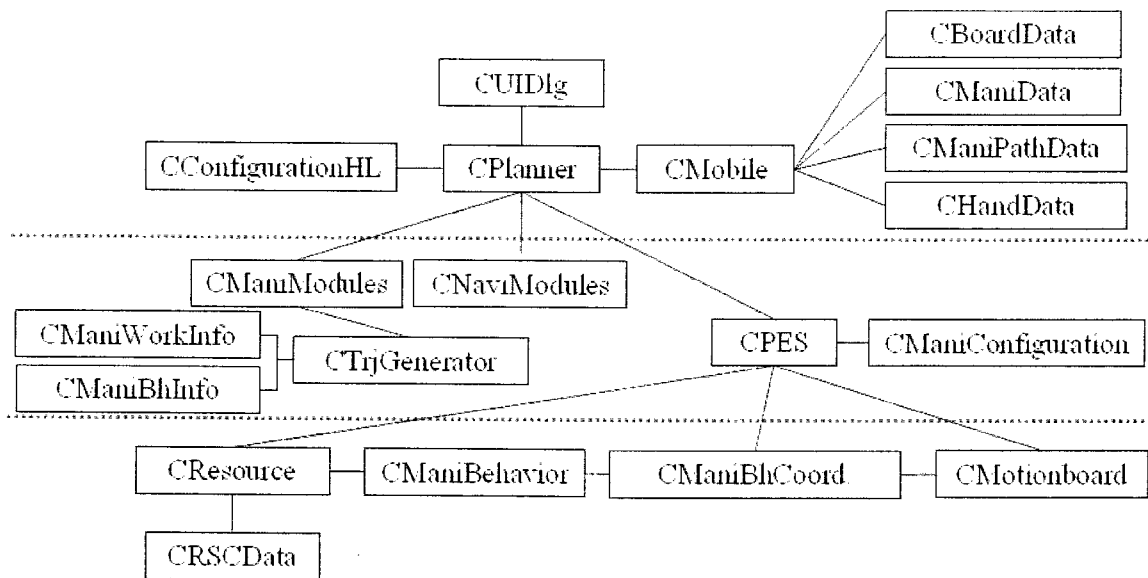


그림 3.2.1.3.7 Navigation modules 위주의 Class Diagram

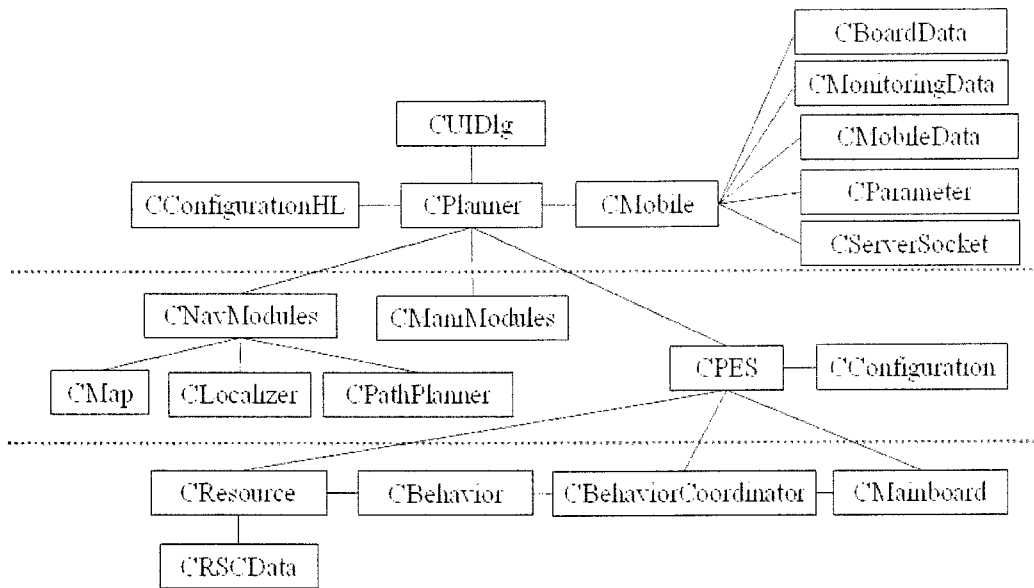


그림 3.2.1.3.7 Manipulator modules 위주의 Class Diagram

또한 새로운 요소를 쉽게 더하기 위해 몇 개의 Base class들도 아울러 정의되었는데, Base class들과 거기서 파생된 class들의 관계는 표 3.2.1.3.6와 표 3.2.1.3.7에 설명되어 있다. 구성 요소 뿐만 아니라 각 Process와 Behavior도 class로 정의되었다. 이 class들에는 작업을 수행하는데 필요한 각종 정보들과 그 밖의 중요 함수들도 캡슐화되어 있다.

Base class	Derived class
CProcess	{ CPrAutoMove, CPrCalibration, CPrDocking, CPrRemoteControl, CPrFilePlay }
CBehavior	{ CBhAutoMove, CBhCalibration, CBhFilePlay, CBhObAvoidance, CBhRemoteControl, CBhTrExactPosition, CBhTrLookAround }
CResource	{ CRscEncoder, CRscGyro, CRscIR, CRscJoyStick, CRscLaserScanner, CRscTrailerVision, CRscUltraSonic }
CLocalizer	{ CMonteCarlo, CMatchingLM }
CMap	{ CGlobalMap, CLocalMap }
CMotionBoard	{ CPMACBoard }
CPathPlanner	{ CPPLocal }
CMonitor	{ CMonitorMain, CMonitorRemote }

표 3.2.1.3.7 Navigation 관련 Class의 계층 구조

Base class	Derived class
CProcess	{ CPrPickObjFrmTable, CPrPickObjInTrailer, CPrPlaceObjInTrailer, CPrPlaceObjInTable }
CManiBehavior	{ CBhManiMoveToHome, CBhManiMoveToTarget, CBhManiSearchObject, CBhManiGraspObject, CBhManiReleaseObject, CBhManiMoveWithVision }
CResource	{ CRscManiEncoder, CRscManiVision, CRscHandEncoder, CRscHandSGage }
CMotionBoard	{ CManiPMACBoard }
CObject	{ CManiWorkInfo, CManiBehaviorInfo }
CMotionBoard	{ CManiPMACBoard }
CTrjGenerator	{ CManiTrjPlanner }

표 3.2.1.3.8 Manipulator 관련 Class의 계층 구조

표 3.2.1.3.9은 현재 구현된 Process들을 보여주고 있다. 그리고 표 3.2.1.3.10 표 3.2.1.3.11에는 Navigation과 Manipulation의 Behavior 관련 클래스들 소개하며, 아울러 각각 어떠한 기능을 수행하는지도 설명하고 있다.

Process Class	Descriptions
CPrAutoMove	자율 주행으로 원하는 위치로 이동하기
CPrDocking	트레일러와 결합하거나 분리하기
CPrRemoteControl	원거리의 컴퓨터 혹은 로봇에 직접 연결된 조이스틱을 이용해 로봇을 직접 구동하기
CPrFilePlay	구동부의 속도 프로파일을 오프라인으로 만들어 Global 혹은 Local 좌표 상에서 구동하기
CPrManiPickObjFrmTable	Table 위의 물체 잡기
CPrManiPickObjFrmTrailer	Trailer 내부에 놓여있는 물체 잡기
CPrManiPlaceObjOnTable	Hand로 잡은 물체를 Table위에 올려 놓기
CPrManiPlaceObjInTrailer	Hand로 잡은 물체를 Trailer 내부에 놓기
CPrCalibration	구동부 제어기의 명령 프로파일을 오프라인으로 만들어 구동하기

표 3.2.1.3.9 Process Class 설명

Behavior Class	Descriptions
CBhAutoMove	자율 주행으로 원하는 위치로 이동하기
CBhCalibration	구동부 제어기의 명령 프로파일을 오프라인으로 만들어 구동하기
CBhFilePlay	구동부의 속도 프로파일을 오프라인으로 만들어 Global 혹은 Local 좌표 상에서 구동하기
CBhRemoteControl	원거리의 컴퓨터 혹은 로봇에 직접 연결된 조이스틱을 이용해 로봇을 직접 구동하기
CBhTrLookAround	두리번 거리면서 트레일러는 찾기
CBhTrExactPosition	비전 정보를 이용하여 정확히 트레일러와 도킹하기

표 3.2.1.3.10 Navigation 관련 Behavior Class의 계층 구조

Behavior Class	Descriptions
CBhManiMoveToHome	Manipulator Home위치로 이동.
CBhManiMoveToTarget	Manipulator End Effector의 목표 위치 및 자세로 이동.
CBhManiSearchObject	Vision을 통해 작업 대상 물체 인식.
CBhManiMoveToGraspPosition	Vision을 통해 대상 물체 파지 위치로 이동.
CBhManiGraspObject	Manipulator End Effector의 대상 물체 파지.
CBhManiReleaseObject	Manipulator End Effector의 대상 물체 놓기.
CBhManiMoveToIncTarget	Manipulator End Effector의 현재 위치에서 정해진 증분만큼의 위치 및 자세로 이동.

표 3.2.1.3.11 Manipulator 관련 Behavior Class의 계층 구조

(다) Configuration Diagram

사용자가 어떤 작업(Task)을 로봇에게 명령하면 deliberate layer에 있는 Planner는 몇 개의 순차적인 내부 Process들로 나눈다. 여기서 Process란 하나의 의미 있는 세부 작업을 하기 위한 Behavior들의 집합과 그에 필요한 여러 매개변수들을 한 데 묶은 것으로 정의한다. Task와 Process와의 관계, Process와 Behavior의 관계는 각각 상위, 하위 Configuration이란 데이터 베이스 형태로 구현되었고, 이를 통해 Planner는 오류 대처법까지 포함한 작업 계획을 수행한다. Configuration의 개념은 최초로 Arkin의 Aura라는 제어 구조를 통해 제안되었다[2].

Configuration을 설계하기 위해서 Petri nets이라는 이산이벤트 시스템 모델링 언어를 사용하였다. 그 이유는 Configuration에서 발생하는 행위라는 것이 몇 개의 이산적인 상태들로 나눌 수 있고 이벤트에 의해 발생하는(Event driven) 성질을 가지고 있기 때문이다.

Petri nets는 시각적인 동시에 수학적인 수단이다. 따라서 Petri nets을 사용하면 Configuration의 제어 로직을 시각화 할 수 있으며 현재 로봇의 상태를 쉽게 판별할 수 있다. 또한 그 자체로써 수학적인 모델이 되므로 제어 로직은 분석하는데도 유용하다. PRS의 제어 구조를 이해하기 위해서는 Petri nets에 대해 기본적인 몇 가지 사항에 대해 언급할 필요가 있다.

① Petri nets의 정의 [3]

Petri nets의 정의는 그림 3.2.1.3.8과 같다.

A Petri net is a 5-tuple, $PN=(P, T, F, W, M_0)$ where:

$P=\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ is a finite set of places,

$T=\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ is a finite set of transitions,

$F\subseteq (P\times T)\cup (T\times P)$ is a set of arcs (flow relation),

$W: F\rightarrow\{1,2,3, \dots\}$ is a weight function

$M_0: P\rightarrow\{0,1,2,3, \dots\}$ is the initial marking

$P\cap T=\emptyset$ and $P\cup T\neq\emptyset$

Marking assigns to each place a nonnegative integer. m-vector

(m : the total number of places)

A Petri net structure $N=(P, T, F, W)$ without any specific initial marking is denoted by N

A Petri net with the given initial marking is denoted by (N, M_0)

그림 3.2.1.3.8 Petri Nets의 정의

② 점화 법칙(Firing rule) [3]

Transition t의 입력 Place의 집합과 출력 Place의 집합을 각각 $\cdot t=\{p \mid (p, t)\in F\}$, $t\cdot=\{p \mid (t, p)\in F\}$ 이라 하고 Place p의 입력 Transition 집합과 출력 Transition 집합을 각각 $\cdot p=\{t \mid (t, p)\in F\}$, $p\cdot=\{t \mid (p, t)\in F\}$ 라 할 때 다음 두 조건을 만족하면 Transition t Marking m에서 활성화 되었다고 한다. 이 때 활성화 된 Transition은 실제로 점화될 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 이는 실제로 그 사건이 일어났는지에 따라 다르다.

- 1) Every place $p \in \cdot t$ satisfies $m(p) \geq w(p, t)$
- 2) Every place $p \in t \cdot$ satisfies $m(p) + w(p, t) \leq k(s)$

만일 Transition t 가 점화가 되면 Marking의 변화는 다음 식을 따른다.

$$\begin{aligned}
 m'(p) &= m(p) && \text{if } p \notin \cdot t \text{ and } p \notin t \cdot \\
 m'(p) &= m(p) - w(p, t) && \text{if } p \in \cdot t \text{ and } p \notin t \cdot \\
 m'(p) &= m(p) + w(t, p) && \text{if } p \notin \cdot t \text{ and } p \in t \cdot \\
 m'(p) &= m(p) - w(p, t) + w(t, p) && \text{if } p \in \cdot t \text{ and } p \in t \cdot
 \end{aligned}$$

그림 3.2.1.3.9는 수소와 산소가 만나 물이 되는 화학식을 Petri nets로 모델링한 모습으로 점화 법칙에 대한 예를 보여준다. 그림 3.2.1.3.9(a)에서 $m(H_2) = 2 \geq 2$ $m(O_2) = 2 \geq 1$ 이므로 Transition t 는 활성화된 상태이다. Transition t 가 점화되면 Marking 변화식에 의해 그림 3.2.1.3.9(b)처럼 됨을 알 수 있다.

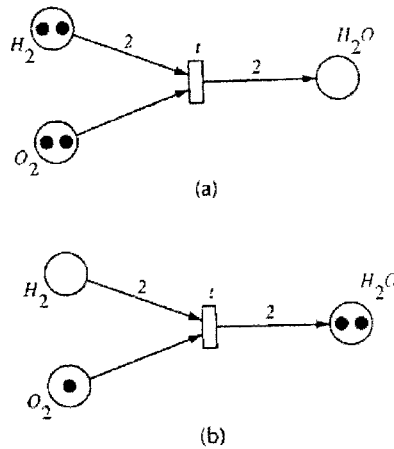


그림 3.2.1.3.9 점화 법칙의 예

③ Coverability Tree [3]

Petri nets 모델을 수학적으로 표현하는 것은 여러 가지 방법이 있는데 그 중 대표적인 것으로는 Incidence Matrix를 구해서 상태 방정식을 세우는 방법과 Coverability tree를 작성하는 방법 등이 있다. Coverability tree는 Petri nets의 Marking을 tree형태로 나타낸 것으로, 여기서 Node는 Petri nets 모델의 Marking이 되고 Arc는 점화된 Transition이 된다. 이 Petri nets 모델로부터 Coverability tree를 유도하는 알고리즘은 그림 3.2.1.3.10에 소개되어 있다.

- Step1) Label the initial marking M_0 as the root and tag it “new”
- Step2) While “new” markings exist, do the following:
 - Step2.1) Select a new marking M
 - Step2.2) If M is identical to a marking on the path from the root to M , then tag M “old” and go to another new marking.
 - Step2.3) If no transitions are enabled at M , tag M “dead-end”
 - Step2.4) While there exist enabled transitions at M , do the following for each enabled transitions t at M :
 - Step2.4.1) Obtain the marking M' that results from firing t at M
 - Step2.4.2) On the path from the root to M if there exists a marking M'' such that M'' is coverable, then replace $M''(p)$ by ω for each p such that $M''(p) > M'(p)$
 - Step2.4.3) Introduce M' as a node, draw an arc with label t form M to M' , and tag M' “new”

그림 3.2.1.3.10 Coverability Tree 변환 알고리즘

PSR의 상위와 하위 Configuration 설계는 다음 순서수서를 따른다. 일단 제어 로직을 Petri nets 모델로 만든다. 이 모델을 그림 3.2.1.3.10에서 설명한 Coverability Tree로 변환하여 C++로 작성하여 구현한다. 구현 방법에 있어서는 동일하다 할 수 있으나 Configuration 특성이 서로 다르므로 약간의 차이점을 가진다. 상위 Configuration의 경우에는 로봇 스스로 작업 계획을 수행해야 하므로 이와 같은

Configuration이 자동적으로 생성될 수 있는 메카니즘이 중요하다. 또한 계획된 Process를 성공적으로 마치지 못했을 경우에도 이에 대한 대처 방법을 상황에 따라 적절히 생각해 낼 수 있어야 하며 이에 따라 Configuration의 첨가 및 삭제 등이 자유로워야 한다. 이를 해결하기 위해서 Petri nets 모델의 모듈화가 중요하다. 로봇이 작업을 수행하면서 닳칠 수 있는 다양한 상황에 대해서 각각 모듈화된 모듈을 가지고 있으면서 Planner는 상황에 따라 이들을 더하고 뺄으로써 Configuration을 작성한다. 또한 Planner는 단순히 모듈을 첨삭하는 것이 아니라 그 모듈을 수행하는데 필요한 정보들까지도 함께 캡슐화된다.

그림 3.2.1.3.11은 현재 구현된 상위 Configuration중 대표적인 것을 소개한 것이다. 매우 먼 곳의 목표 위치까지 이동해야 될 경우에는 하나의 Process로 주어진 작업을 수행할 수 없다. 이 때는 광역 경로 계획기에 의해 여러 Process AutoMove의 연속으로 계획되는데, 그림 3.2.1.3.11은 이 때 하나의 Process AutoMove를 위한 Petri nets 모델 모듈이다. 따라서 상위 Configuration은 이 모듈이 여러 번 반복되는 형태로 구현될 것이다. 표 3.2.1.3.10에서 볼 수 있듯이 이 모듈은 Process 수행에 대한 상태도 가지고 있을뿐더러 P_4 와 같은 예외 상황에 대한 정보도 포함되어 있다.

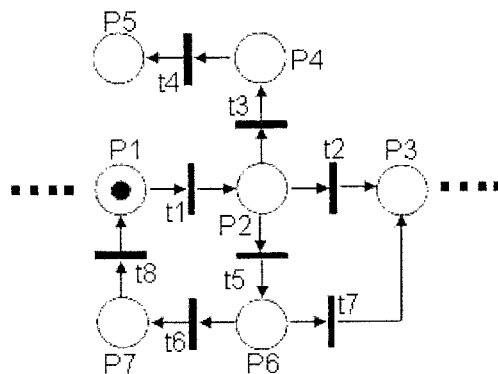


그림 3.2.1.3.11 High-lever Configuration의 Petri nets 모델 예제

표 3.2.1.3.12 예제 Petri nets 모델의 Place, Transition 설명

PL / TR	Description
PL_HL_AUTO_INIT (P1)	Standby
PL_HL_AUTO_RUN (P2)	Execute process PrAutomove
PL_HL_AUTO_END (P3)	process PrAutomove Complete successfully.
PL_HL_AUTO_FLT_NOPATH (P4)	Fault : No path to goal exists
PL_HL_AUTO_REPLANPATH (P5)	Re-planning global path
PL_HL_AUTO_FLT_GOALOC (P6)	Fault : Goal is occupied
PL_HL_AUTO_SETANOTHER (P7)	Set another intermediate goal
TR_HL_AUTO_START (t1)	Start
TR_HL_AUTO_TRUE (t2)	Process PrAutomove completed successfully.
TR_HL_AUTO_FLT_NOPATH (t3)	The Process Returns error message "No path to goal"
TR_HL_AUTO_REPLANPATH (t4)	Re-planning global path
TR_HL_AUTO_FLT_GOALOC (t5)	The Process Returns error message "goal occupied"
TR_HL_AUTO_NO_NEXTNODE (t6)	It is NOT possible to reach next node by one process
TR_HL_AUTO_NEXTNODE (t7)	It is possible to reach next node by one process
TR_HL_AUTO_SETANOTHER (t8)	Set another intermediate goal

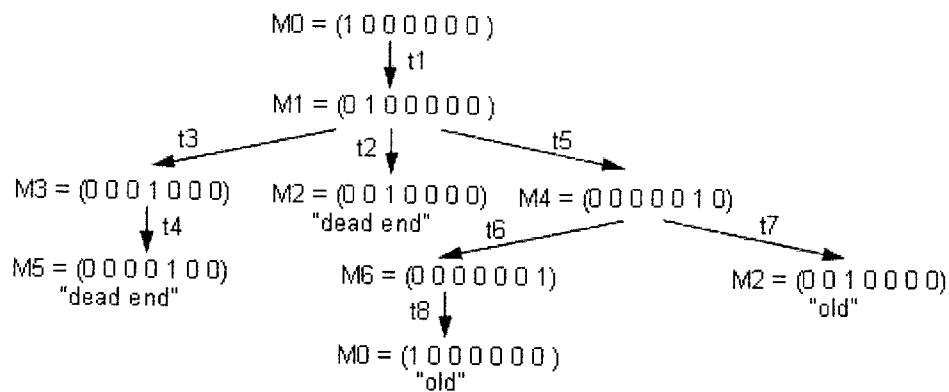


그림 3.2.1.3.12 예제 Petri nets 모델의 Coverability Tree

표 3.2.1.3.13 예제 Petri nets 모델의 Marking 설명

Symbol	Name	Symbol	
M0	MK_HL_AUTO_INIT	M4	MK_HL_AUTO_FLT_GOALOC
M1	MK_HL_AUTO_RUN	M5	MK_HL_AUTO_REPLANPATH
M2	MK_HL_AUTO_END	M6	MK_HL_AUTO_SETANOTHER
M3	MK_HL_AUTO_FLT_NOPATH		

그림3.2.1.3.12은 앞의 예제에 대한 Coverability Tree를 보여준다. 변환하는 알고리즘은 앞에 소개한 방법을 따른다. 실제 구현된 Configuration은 Coverability Tree의 형태로 되어 있으면 표 3.2.1.3.13에 보인 각 Marking에 따라 로봇이 실제 동작해야 할 로직들을 구현한다. 즉, 특정 상태에서 특정 사건이 발생하면 Coverability Tree에 따라 이에 상응하는 Marking으로 로봇의 상태는 바뀌고 그에 따라 로봇의 행동은 변화하게 된다.

하위 Configuration과 상위와의 차이는 상위는 Task와 Process의 변환 관계지만 하위는 Process와 Behavior와의 변환 관계의 정보를 가지고 있다는 점이다. 또한 Process가 주어지면 그에 대한 Configuration은 정해지므로 상위와 같이 자동 생성을 고려해 줄 필요는 없다. 단 하위 Configuration에는 상위에는 없는 Resource에 대한 정보나 어떤 지역 지도를 사용해야 하는지 등의 정보도 함께 가지고 있다.

그림 3.2.1.3.13는 Process AutoMove에 대한 하위 Configuration 예제이다. 표 3.2.1.3.14에서 보듯이 수행해야 할 Behavior 정보와 다양한 오류 상황에 대한 정보를 가지고 있다. 모델에서 볼 수 있듯이 하위 영역에서는 Process가 성공적으로 실행될 수 있도록 최대한 노력을 하지만 도저히 성공이 불가능한 경우에 대해서는 실패를 상위 Planner에 알릴 수 있는 상태에 대해서 모델링이 되어 있다.

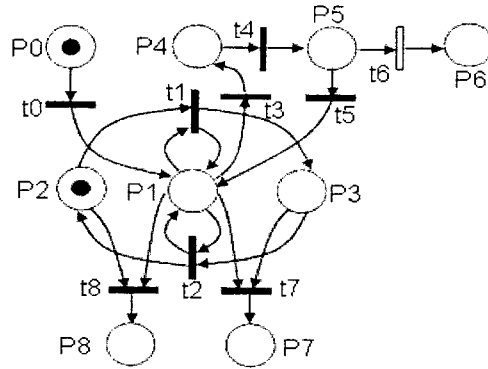


그림 3.2.1.3.13 Low-lever Configuration의 Petri nets 모델 예제

PL / TR	Description
PL_AUTO_INIT (P0)	Standby
PL_AUTO_BH_AUTO (P1)	Execute behavior BhAutomove
PL_AUTO_NOGOALCHANGED (P2)	State : Goal has NOT been changed.
PL_AUTO_GOALCHANGED (P3)	State : Goal has been changed.
PL_AUTO_ERR_NOPATH (P4)	Error : No path to goal exists
PL_AUTO_EMERSTOP (P5)	Stop behavior BhAutomove in emergency
PL_AUTO_FLT_NOPATH (P6)	Fault : No path to goal exists
PL_AUTO_FLT_GOALOC (P7)	Fault : Fail to reach Original goal
PL_AUTO_END (P8)	Completion of given Process without Failure
TR_AUTO_START (t0)	Start
TR_AUTO_RETRAYOC (t1)	Change original goal, then Re-try path planning.
TR_AUTO_OBSTREMOVED (t2)	The obstacle in original goal removed , and the goal is restored.
TR_AUTO_ERR_NOPATH (t3)	Detect No path to goal.
TR_AUTO_EMER_STOP (t4)	Robot stopped moving because of fault.
TR_AUTO_REC_PATH (t5)	Detect Path to goal.
TR_AUTO_FLT_NOPATH (t6)	Conclude No path to goal exists.
TR_AUTO_FLT_GOALOC (t7)	Conclude Reaching original goal is failed.
TR_AUTO_BH_AUTO_TRUE (t8)	Behavior BhAutomove completed successfully.

표 3.2.1.3.14 예제 Petri nets 모델의 Place, Transition 설명

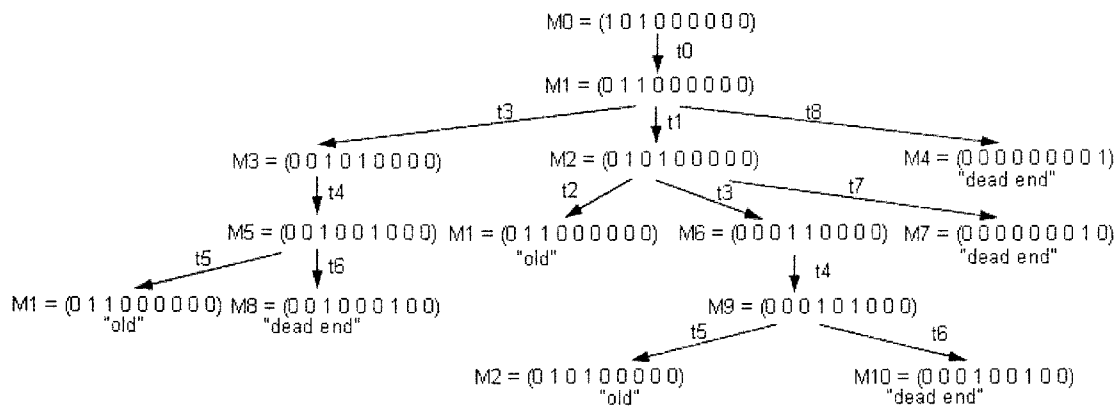


그림 3.2.1.3.14 예제 Petri nets 모델의 Coverability Tree

Symbol	Name	Symbol	Name
M0	MK_AUTO_INIT	M6	MK_AUTO_OCC_ERR_NOPATH
M1	MK_AUTO_BH_AUTO	M7	MK_AUTO_FLT_GOALOC
M2	MK_AUTO_OCC_BH_AUTO	M8	MK_AUTO_FLT_NOPATH
M3	MK_AUTO_ERR_NOPATH	M9	MK_AUTO_OCC_EMER_STOP
M4	MK_AUTO_END	M10	MK_AUTO_OCC_FLT_NOPATH
M5	MK_AUTO_EMER_STOP		

표 3.2.1.3.15 예제 Petri nets 모델의 Marking 설명

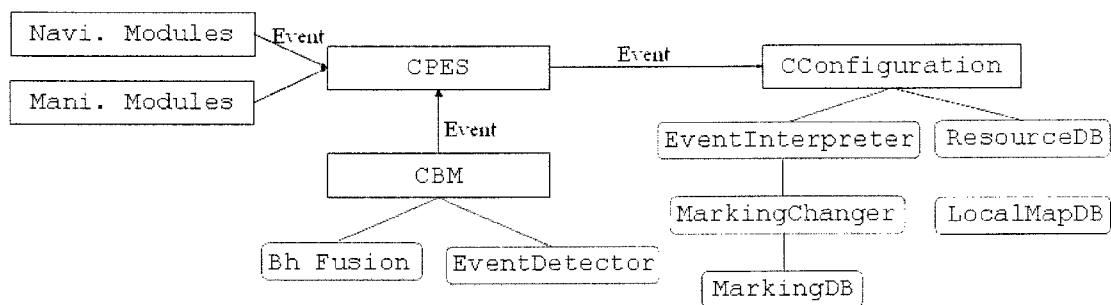


그림 3.2.1.3.15 하위 Configuration의 구현 모습

그림 3.2.1.3.15은 하위 Configuration의 구현된 모습을 보여주고 있다. Behavior Coordinator는 Reactive layer에서 발생한 이벤트들을 감지하여 PES에 보내주고 Navigation modules나 Manipulator modules에서도 이벤트가 발생하여 PES로 가기도 한다. Configuration에서는 우선 이 이벤트가 Petri net 모델 상의 어떤 Transition인지를 이벤트 해석기(Event Interpreter)로 해석한다. 그 후 Marking 변환기는 Coverability Tree가 구현된 Marking 데이터 베이스를 참조하여 이 이벤트로 인해 현재 Marking이 어떤 Marking으로 변화하는지를 결정한다. 그 후 새 Marking을 위해서 어떤 작업을 해야 하는지를 판단하여 그 결과를 PES에 넘겨주게 된다.

이 뿐만 아니라 Configuration에는 Resource와 지역 지도(Local map)에 관련된 데이터 베이스를 가지고 있어 어떤 Process가 주어지면 어떤 Resource들을 활성화 하고 어떤 지역 지도를 불러와야 하는지를 결정할 수 있다.

(3) 제어 구조의 요소별 설명

(가) Deliberate layer

Deliberate layer의 역할은 크게 사용자와의 인터페이스를 담당하는 HRI와 작업 계획을 담당하는 Planner로 나뉜다. 그림 3.2.1.3.16은 이 층에 존재하는 모든 요소들과 이들의 Class diagram을 보여주고 있다. HRI와 Planner는 세부 작업에 따라 부가적인 구성 요소를 가진다.

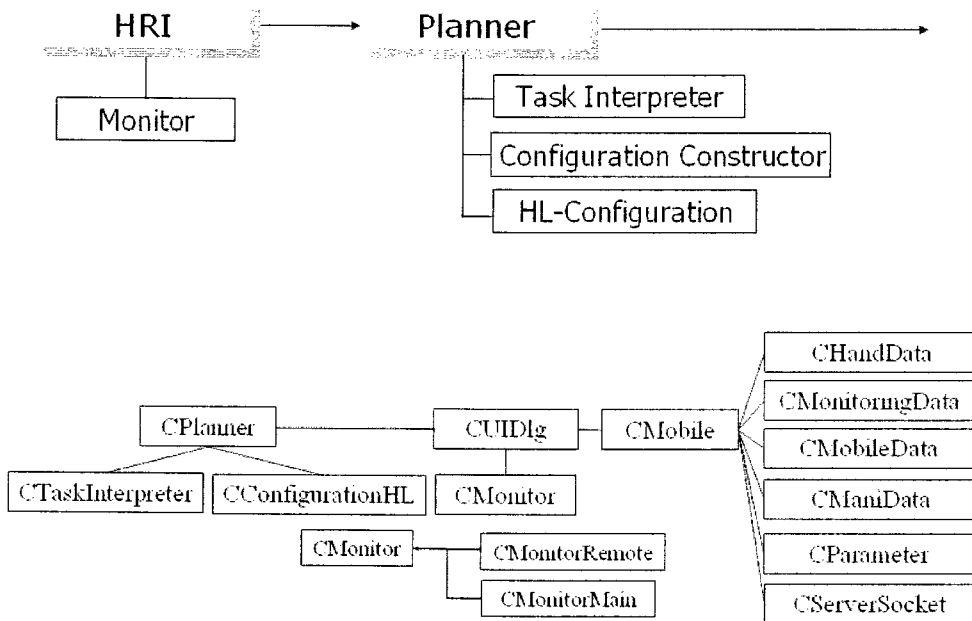


그림 3.2.1.3.16 Deliberate layer의 구성 요소들

작업 명령은 HRI를 통해 주어지므로 HRI는 최대한 사용자에게 익숙한 형태로 구성된다. 예를 들면 물체 이송을 위해서 HRI는 정보 지도(Information map)를 보여준다. 정보 지도란 인간의 관점에서 작성된 지도로 예를 들면 실제 도면과 유사하게 구현되어 화장실, 3211호 등의 설명과 함께 표시된 지도를 말한다. 여기서 사용자는 단순히 시작 방과 목표 방을 지정하여 작업 명령을 내릴 수 있다. 아울러 모니터링 관련 요소를 가지고 있어 로봇의 현재 상태나 작업 진행 상황 등을 로봇 자체의 화면이나 원격지의 컴퓨터에 표시할 수 있다.

Planner의 작업 해석기(Task Interpreter)는 주어진 작업과 그에 수반된 데이터들을 여러 개의 Internal Process와 그들의 매개 변수들로 변환한다. 이 정보를 통해 상위 Configuration을 작성하게 된다. Configuration은 앞서 설명하였다시피 주어진 task에 대하여 변환된 process들의 정보를 가진 데이터 베이스로 Process들의 순서 관계나 예외 처리 로직들을 포함하고 있으며 Peti-nets 모델 형태로 구현되어 있다.

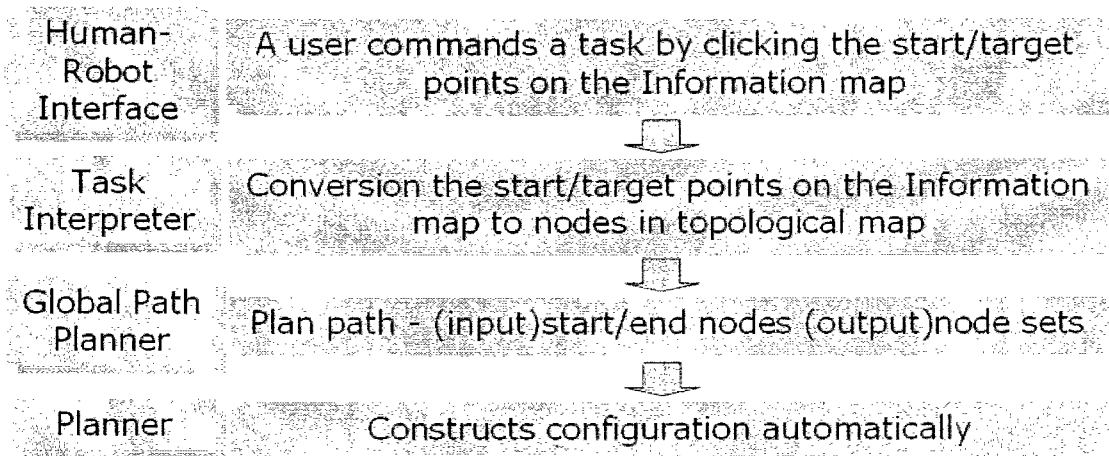


그림 3.2.1.3.17 작업 계획 과정의 예

그림 3.2.1.3.17는 물체 이송 작업이 주어졌을 때 이에 대한 작업 계획의 예를 보여 주고 있다. 사용자가 정보 지도상에서 시작점과 목표점을 지정함으로써 작업이 주어지면 작업 해석기는 이 정보를 로봇이 해석할 수 있는 Topological 지도상의 데이터를 변환한다. 이에 대해서 광역 경로가 계획되어 Node집합이 planner로 넘겨지면 상위 Configuration을 생성하게 된다.

(나) Sequencing layer

Sequencing layer는 Reactive layer를 관리하며 주어진 Process를 수행하는 PES(Process Execution Supervisor)와 PES를 돕는 Configuration, 센서들로부터 온 정보를 가공하여 장기적이고 고차원의 정보를 생성해내는 Navigation modules, Manipulation modules로 구성 있다.

PES는 Planer로부터 계획된 process를 수행하기 위한 하위 수준의 제어를 맡고 있으며 Reactive layer를 관리한다. 따라서 Behaviors 및 resource 생성, 관리, 소멸 등을 책임진다.

Navigation modules는 글자 그대로 Navigation에 관련된 정보와 알고리즘들을 통합적으로 관리하는 부분이다. 주요 관리 대상은 지도 갱신 알고리즘과 Localization 알고리즘, 그리고 경로 계획 알고리즘 등이다. Navigation module이 Sequencing layer에 위치하는 이유는 여기서 이루어지는 작업들이 빠른 응답 특성을 가진 것이 아니라 장기적이고 고차원 적인 정보를 대상으로 하기 때문이다. 또한 다양한 수준의 정보를 가지고 있어 모든 층의 구성 요소들과 상호 관계를 맺고 있기 때문에 중간에 있는 Sequencing layer에 위치하는 것이 유리하기 때문이다.

본 제어 구조에서는 다음 세 가지 종류의 지도를 가지고 있다.

- ① 정보 지도(Information map) : 사용자가 인지할 수 있는 형태의 지도로 사용자로부터 작업 명령을 받는데 사용된다.
- ② 위상 지도(Topological map) : Node상의 연결 관계를 가진 지도로써 광역 경로 계획에 사용된다.
- ③ 격자 지도(Grid map) : 주변 환경을 격자로 나눠 격자에 장애물이 존재하는지 아닌지에 따라 나타낸다. 지역 격자 지도와 Active 격자 지도로 나뉘는데 전자는 지역적 Localization에 사용되고 후자는 지역적 경로 계획에 사용된다.

Localization 알고리즘은 주어진 지도 수준에 따라 개별적으로 존재해야 하는데, 그 중 지역적 Localization은 주행 거리계와 더불어 확률론적 위치 추정 방법인 Monte Carlo Localization 알고리즘을 사용한다.

경로 계획 방법도 역시 지도 수준에 따라 각각의 알고리즘을 필요로 한다. 위상 지도상에서 이루어지는 광역 경로 계획 결과는 Deliberate layer의 Planner로 전달이 되고 격자 지도상에서 이루어지는 지역 경로 계획 결과는 Reactive layer의 Behavior로 전달이 되어 실제 원하는 지점으로 이동할 수 있게 된다.

Manipulator modules는 Manipulator와 로봇 손에 관련된 Behavior를 수행하기 위해 필요한 각종 정보와 알고리즘들을 통합적으로 관리하는 부분이다. 궤적 계획기(Trajectory Planner)는 Manipulator의 Point-to-Point 궤적이나 연속(Continuous) 이동 궤적을 계획한

다. 정보 관리 부분은 크게 작업 정보를 관리하는 부분(Work Information)과 Behavior의 정보를 관리하는 부분으로 나눌 수 있다. 작업 정보는 각 Manipulator Behavior 수행에 필요한 내용들을 포함하며 Behavior 정보는 Manipulator 이동 위치, 이동 속도, Trajectory 생성 알고리즘 정보 등을 가지고 있다.

(다) Reactive layer

그림 3.2.1.3.18은 Reactive layer의 정보 흐름을 보여준다. 현재 구현된 시스템은 아래 그림에서 한 Cycle에 걸리는 시간이 약 0.067초로 정해져 있다. 각 센서들은 Resource에 새로운 정보를 독립적으로 계속 갱신한다. Behavior는 이 정보를 이용해 구현된 계산을 수행하여 제어 입력을 만들고 Behavior Coordinator는 이 정보를 취합하여 Controller에 보내며 Controller는 하드웨어를 직접 제어하게 된다.

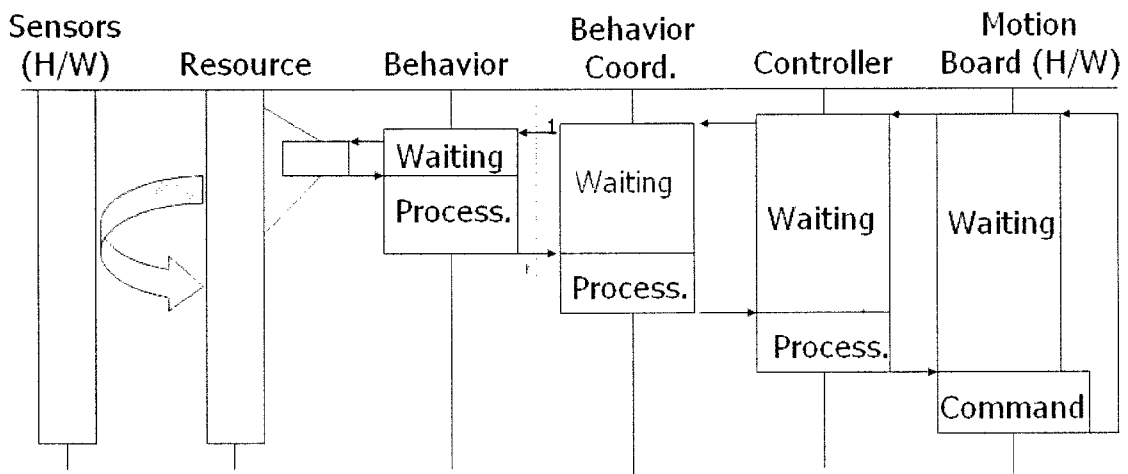


그림 3.2.1.3.18 Reactive layer 의 정보의 흐름.

Reactive layer의 핵심 요소는 Behavior이다. Behavior는 최소의 특정 기능을 구현한 로직으로써 Resource와 Controller와 강하게 연결되어 있다. 이 Behavior는 PES에 의해 생성되며 자신이 종료 조건을 가지고 있어서 수행 된 결과, 즉 성공인지 실패인지를 PES에 알린다. 이 결과를 토대로 PES는 Configuration을 참조하여 다음 일을 결정하게 된다. Behavior coordinator는 두 가지 역할을 가지고 있다. 하나는 다수의 Behavior로부터 오는 복수의 제어 명령을 효과적으로 통합하여 Controller에 전달해주는 역할이고 다른 하나는 Reactive layer상에서 발생하는 이벤트 등을 감지하여 PES에 알려주는 역할이다. Resource는 여러 다른 종류의 센서 정보를 통일성 있게 처리하는 골격을 이룬다. 경우에 따라서 센

서 정보를 통합하여 새로운 정보를 만들어 낼 수 있으며, 현재 구현된 Resource들은 레이저 스캐너, Visual servoing용 비전 및 트레일러 결합용 비전, 적외선, 초음파 센서와 자이로스코프 센서, 조이스틱 등이다.

Controller는 Behavior coordinator로부터 오는 제어 명령을 받아 로봇의 actuator에 전달하는 역할을 맡는다. Controller 종류로는 이동부, Manipulator, 로봇 손등을 위한 것들이 있다.

2. 이동형 정보서비스로봇 개발

가. 시스템 기술

(1) 전체적인 robot system 개발 사양

본 과제에서 개발한 정보서비스로봇의 한 전체적인 기술적 사양은 다음과 같다.

- 핵심 기술적 목표 사항

- : Stereo vision에 의한 robot navigation, Human detection and recognition
- : 음원 방향검출 개발 장착 및 음성인식 시스템 장착
- : Compact mobile manipulator
- : internet에 의한 원격제어에 의한 경비, 자동 Mode에 의한 경비 system

- Hardware Specification

- : 200x400x200 mm 접은 상태, 자중 20 Kg 내외
- : 6축 mobile manipulator 부착
- : Manipulator : 실내 문 손잡이를 열 수 있는 최소 높이 확보
- : 2 D.O.F. Mobile base, 문턱 극복 Bi-directional wheel
- : 최대 0.5 m/sec 내외
- : At least 3 hour operating time
- : Stereo vision (CMOS camera), laser slit beam, 적외선 센서

이러한 기술적 목표에 맞추어 본 단계 평가 기간동안 2차 버전의 robot system을 개발했으며, 이에 대한 시스템은 아래의 그림과 같다.

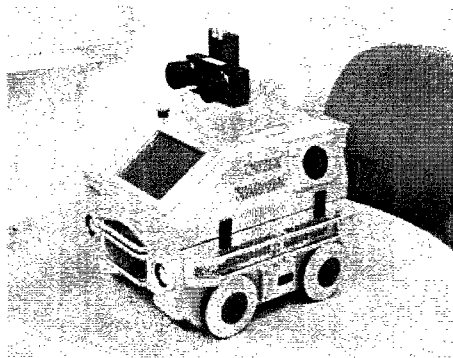


그림 3.2.2.341 1차 버전의 개발 로봇

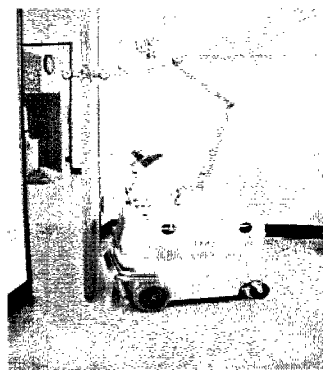


그림 3.2.2.342 2차 버전의
개발 로봇

(2) Mobile manipulator 개발

(가) 암의 주요 기능적 요구조건

- 물체 그리핑 및 이송 기능
- 가정에서 비교적 높은 위치의 물건을 보고 핸들링 할 수 있어야 함.
- Door opening/closing 기능
- 테이블의 물건 보고, 집기/놓기
- 핸드부에 장착된 카메라의 위치/방향 가이드 기능

(나) 암 설계의 주안점

- 인간 친화적인 디자인 :
- compact 하고 slim 해야한다
- 곡선형 외관, 충돌 안전 보장 기능
- 경량이어야 한다 : 경량의 비금속 재료 검토
- 이동부와의 기구적, 전기적 결합, 해체가 용이한 모듈라 구조 설계
- 이동부와 연동하여 문을 여닫을 수 있는 토크 및 compliant control 기능이 있어야 한다

(다) 세부 사양안

- 축 수 : 6축
- Pay load : 1.5 kg
- 중량 : 5kg (미정)
- 각 축 최대 속도 : 50 deg/seg
- 말단부 반복위치 정도 : 0.5 mm (미정)
- 구동 모터 : DC 서보 모터, 엔코더 피드백
- 구동방식 : 감속기 및 각종 기어/벨트 이용

(라) 기본 dimension

아래의 그림은 전체 구성도의 기본 Dimension을 보여주고 있으며, 우측은 실제 제작된 manipulator의 실물을 보여주고 있다.

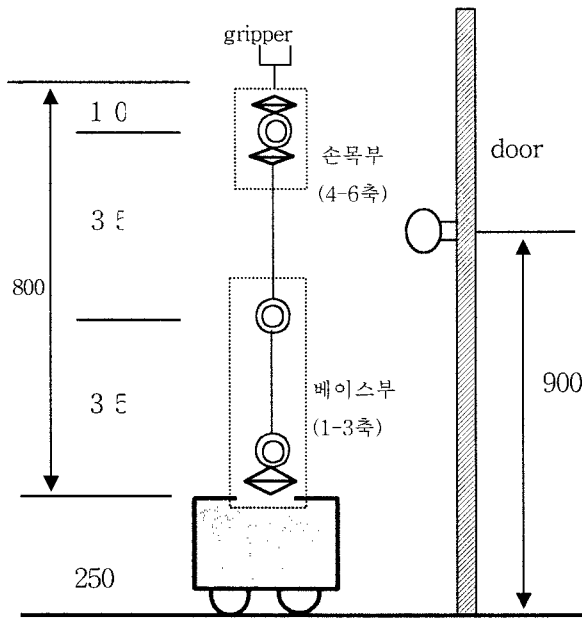


그림 3.2.2.3. manipulator 기본 치수

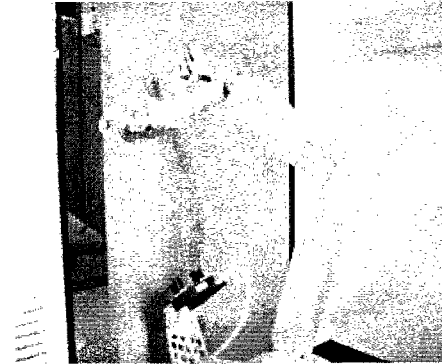


그림 3.2.2.344 제작된 manipulator

축번호	1	2	3	4	5	6
하한	-180	-90	-10	-45	-5	-180
상한	+180	+90	+180	+45	+85	+180

표 3.2.2.1 각 축의 동작 범위 (각도)

(3) 이동형 정보서비스로봇 시스템의 전체 하드웨어 구조

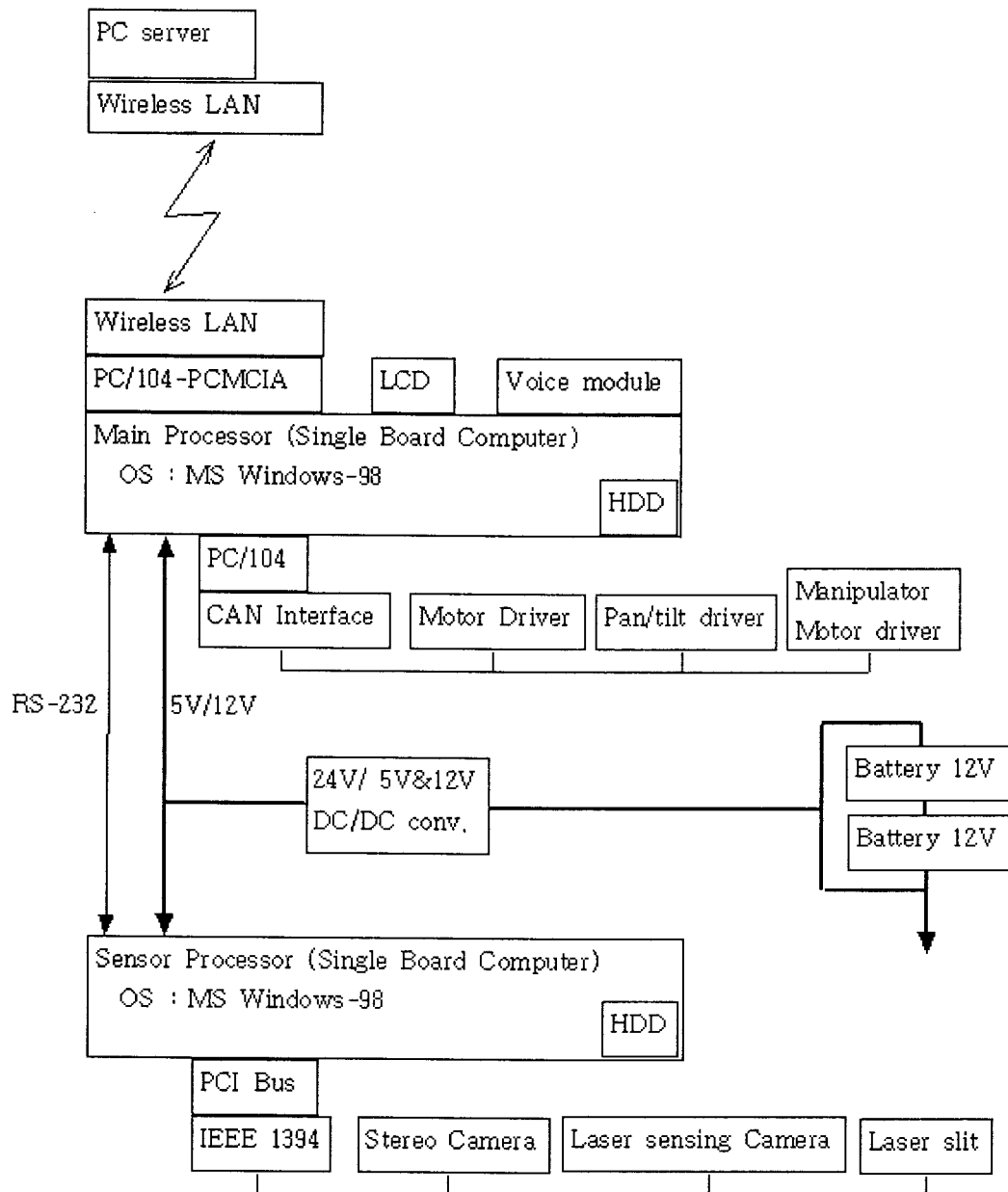


그림 3.2.2.345 시스템 하드웨어 구조

(4) 전원부 및 모션제어기(CAMA)

연구 내용	연구 결과
<p>Power Module 개발</p>	<div data-bbox="702 405 1188 772" data-label="Image"> </div> <p>input : 24VDC X2(외부전원) or 12VDC X8(배터리)</p> <p>output :24VDC 2A(Amp 전원) 12VDC 4.2A, 5VDC 20A(PC 전원)</p>
<p>CAN-based motor driver 개발</p>	<p>- Specifications CAMA1.0</p> <p>CPU - 8bit AVR RISC, up to 6MIPS CAN - CAN V2.0A/B 구현. 1Mbps Motor - 5~24V 3A, 2축 동시 제어 IO - 6채널 ADC, 4채널 디지털IO, UART</p> <div data-bbox="708 1312 1141 1621" data-label="Image"> </div> <p><CAMA1.0의 구현 예></p>

표 3.2.2.2 전원부 및 모션제어기(CAMA)

1)5) 전체배선도

Title HOMEBOT Power Flow Diagram

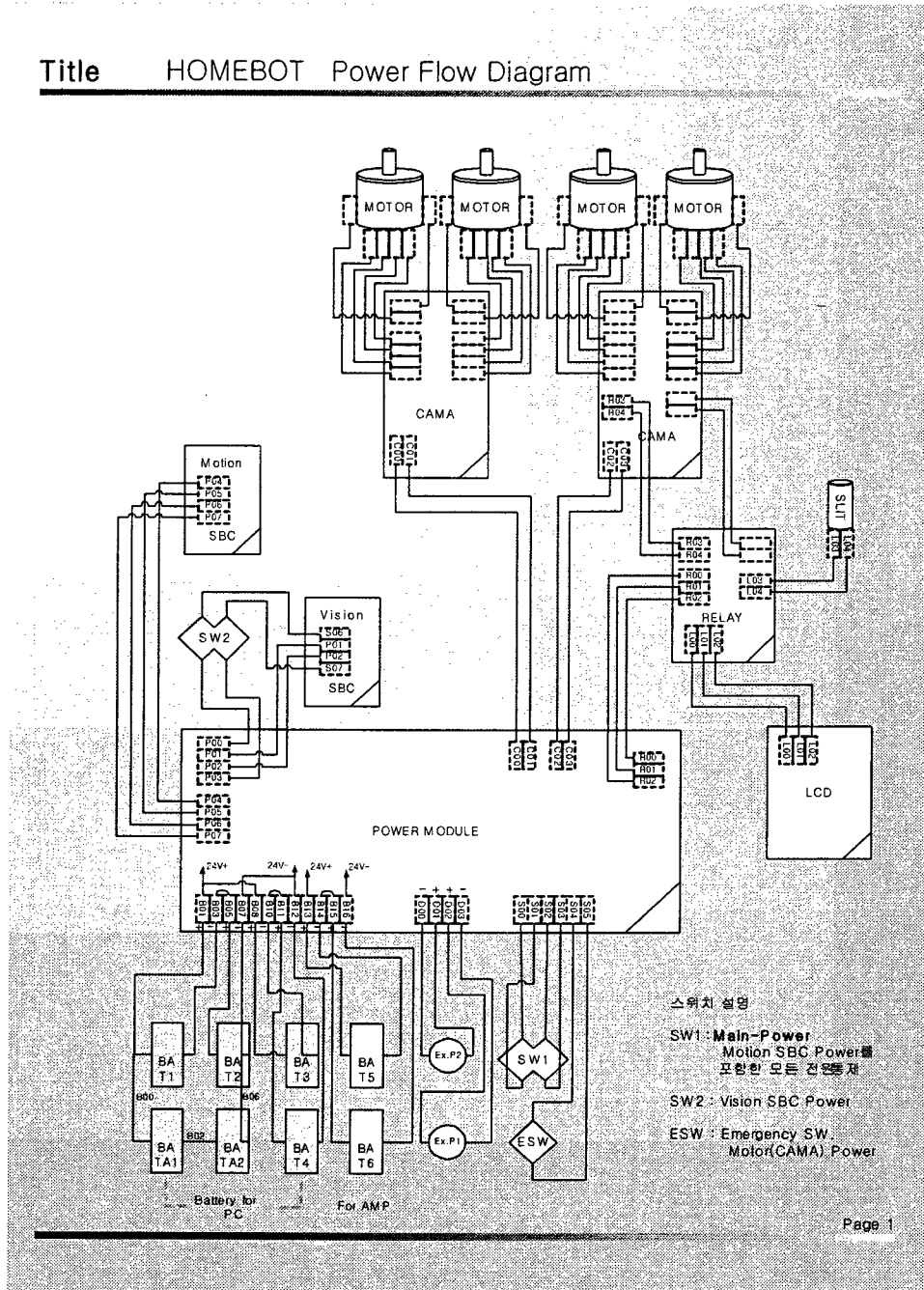


그림 3.2.2.5 전체 배선도

나. Visual navigation

본 과제에서는 visual navigation을 크게 map building, localization 및 path following 문제를 다룬다.

(1) Map building

이동형 정보 서비스 로봇은 가정 환경 내에서 동작하며, vision에 의한 map을 구성하기 위하여 다음과 같은 representation을 이용하여 본 연구에서는 map을 구성하고자 한다.

- stereo camera를 이용한 depth 정보, 그 중에서도 image의 center 수평 line의 모든 방향의 depth 정보만을 이용한다. 이는 horizontal focal plane에 놓여있는 환경 정보는 camera가 이동하여 depth가 변하더라도 항상 horizontal focal plane에 놓여지므로 invariant한 정보를 추출할 수 있게 해 준다. 또한, 이는 map의 data 양 및 localization time을 줄일 수 있는 장점이 있다.

- stereo camera로부터 얻는 해당 depth pixel의 color 값을 이용한다. 이는 기타 laser sensor나 초음파 센서와 비교하여 camera가 가질 수 있는 장점이다.

이러한 내용을 그림으로 나타내면 아래와 같으며 map의 기본을 이루는 node는 전 방향의 depth, color 및 필요한 information data를 갖는다.

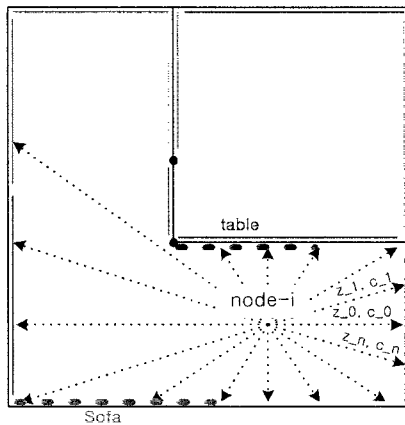


그림 3.2.2.350 환경의 node 정보

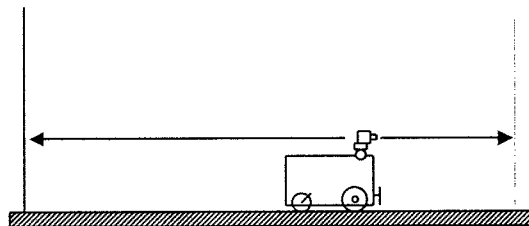


그림 3.2.2.351 환경의 수평정보

이러한 환경 정보를 바탕으로 본 연구에서는 다음과 같이 map을 구성하고자 한다.

- Map은 node를 기본으로 하는 topological map을 기본으로 하며, 각 node는 graph structure를 이룬다.

- Map은 전체를 포괄하는 global coordinate system을 갖지 아니하며, 따라서 topological

map의 각 node는 각자 local coordinate system을 가지며 또한 그 주위에 대한 Euclidean information을 갖는다. 그리고 이들 인접 node들 사이의 좌표 변환 행렬 R, T는 map을 구성하는 과정에서 추정되어 저장되어 진다.

이러한 방법으로 구현된 map의 도식적인 표현이 아래의 그림과 같으며, map의 graph는 그림과 같이 adjacent matrix를 이용하여 표현한다.

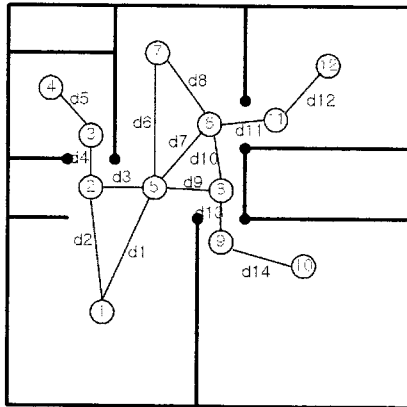


그림 3.2.2.352 환경의 node graph의 예

node	1	2	3	4	5
1	0	d2	M	M	d1
2	d2	0	d4	M	d3
3	M	d4	0	d5	M
4					

M : Maximum value

그림 3.2.2.353 Node graph에 대한 Adjacent matrix 표현

위와 같이 map을 구성할 때에 필요한 가정은 각 node가 cover할 수 있는 Euclidean space는 인접 node를 포함해야 하는 점이다. 이는 인접 node 사이의 R, T가 계산되어질 수 있는 근거이며, 또한 localization시에 주변의 여러 node를 참조할 수 있는 장점을 제공한다. 이를 그림으로 나타내면 아래와 같다.

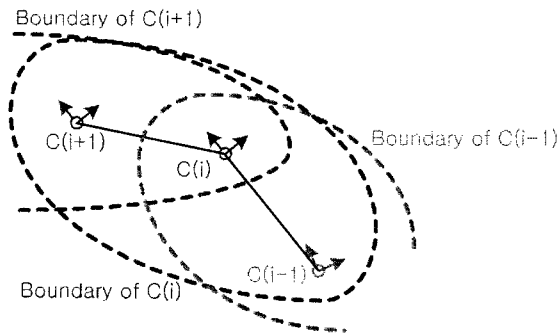


그림 3.2.2.354 Node간의 제약 조건

이러한 map representation을 바탕으로 사람과 interactive하게 map을 구성하는 방법은 다음과 같다.

step-1 : 적절한 위치에 robot을 위치시킨다.

step-2 : stereo camera를 panning 시켜가면서 첫 번째 node data를 얻는다.

step-3 : 1) 인접 node에서 robot을 볼 수 있는 범위 내로 robot을 이동 정지시킨다.

2) step-2를 수행한다.

step-4 : 가정 내 환경을 잘 정의 할 수 있을 정도로 step-3을 수행한다.

step-5 : 각 node들 사이의 adjacency를 interactive하게 부여하며, 각 인접 node사이의 변환 행렬 R, T를 추정하여 저장한다.

(2) Localization

본 연구에서는 localization을 위하여 기본적으로 Condensation algorithm[6]을 이용한다. 이는 localization을 수행하는 과정에서 local minimum이 다수 존재하고 또한 현실적으로 statistical error modeling이 불가능한 경우에 유용한 방법으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서 선택한 visual feature에 맞게 condensation algorithm을 수정하여 적용한다.

Robot이 처음 동작할 때 자신의 위치를 파악해야 하는데 이때의 localization 문제를 통상 Initial or global localization 문제라고 한다. 이는 주행 중의 local localization 문제와 분리하여 고려해 주어야 하는데, 그러한 이유는 local localization에서는 바로 이전 step의 정보와 odometry 정보를 이용하여 훨씬 쉽게 localization을 수행할 수 있으며, 또한 estimation time을 줄이기 위해 condensation algorithm에서 random sample의 수를 작게 사용할 수 있다. 그러나, global localization에서는 그러한 정보를 이용할 수 없으므로 localization에서 local minimum에 빠지기 쉽다. 본 연구에서는 global localization을 위한 개략적인 위치는 human interface에 의해 주어지는 것으로 한다(본 연구에서 개발하는 robot은 음성인식 기능을 보유하고 있음).

Local localization은 Global localization과 유사하며, 차이점은 계산시간의 단축을 위해 random sampling의 수를 작게 할 수 있으며, Condensation algorithm의 Predict 과정에서 robot의 dynamics 정보를 활용할 수 있게 된다.

본 연구에 사용하는 알고리즘을 개략적으로 표현하면 다음과 같다.

step-1 : making random sample position

$$s_t'^{(n)} = (x', y', \theta')^{(n)}$$

step-2 : predict the motion of random sample position

$$s_t^{(n)} = A s_t'^{(n)} + B w_t^{(n)}$$

여기서, A 는 robot dynamics이며 B 는 noise model 이다.

step-3 : measure and weighting new position

$$\pi_t^{(n)} = p(z_t | \mathbf{x}_t = \mathbf{s}_t^{(n)})$$

여기서, π 는 pdf라고 할 수 있으며 z 는 similarity measure 값이다.

step-4 : estimate the location

$$\epsilon[\mathbf{x}_t] = \sum_{n=0}^N (\pi_t^{(n)} \times \mathbf{s}_t^{(n)})$$

step-3와 관련하여 이를 도식적으로 표현하면 다음의 그림과 같다.

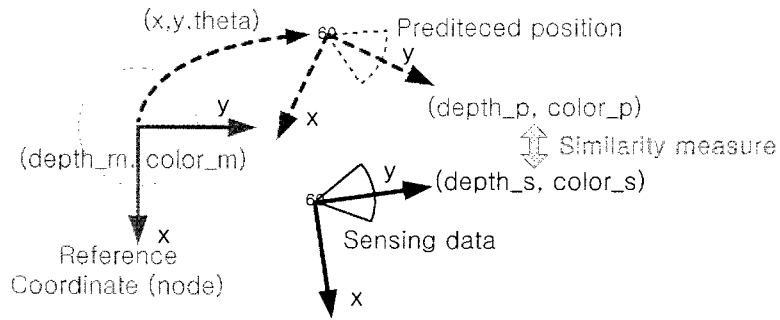


그림 3.2.2.355 Similarity measure의 도식적 표현

아래의 그림은 이러한 방법에 의해 실제로 localization이 수행되어 과정을 GUI로서 보여준다.

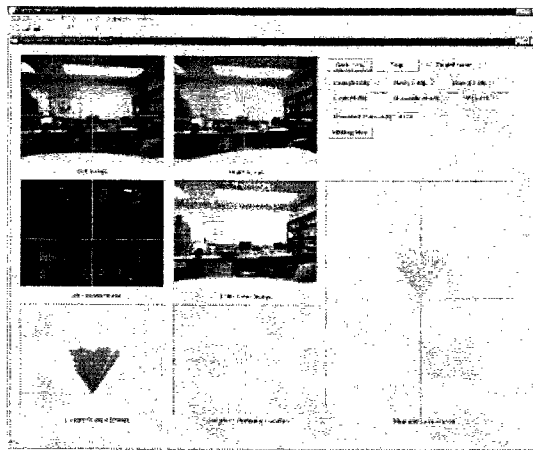


그림 3.2.2.356 Localization의 예

(3) path planning

본 연구의 navigation 방법의 가장 큰 특징중의 하나는 path planning 방법이다. topological path와 euclidean space를 동시에 이용하는 hybrid method라고 할 수 있다. global path는 topological map을 통하여 계산되어지며, local path는 euclidean space에서 얻어진다. local path는 Bezier curve를 이용한다.

(가) global path generation

global path planning이라 함은 이미 구성되어진 topological map상에서 topological path를 결정하는 일이다. 이러한 과정을 나타내는 그림은 아래와 같으며, 이를 위해서 추가적으로 요구되는 정보는 현재의 위치(start) 정보와 목표점(target)의 위치 정보를 파악하는 일이다. starting point는 localization process에 의해 얻을 수 있으며, target point는 human interaction (voice information or GUI)에 의해 주어질 수 있다. 아래의 그림은 이러한 이를 도식적으로 보여주며, 전체적인 global path planning과정은 다음의 step을 따라 진행된다.

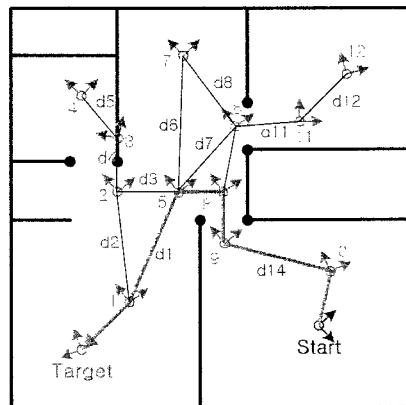


그림 3.2.2.357 Global path planning의 예

Step-1 : Estimate start and target points by localization method.

Step-2 : Find the closest nodes for two given points by step-1.

Step-3 : Find the minimum distance topological path by A* algorithm.

Step-4 : Make full topological path.

(나) local path planning

robot의 원활한 운동을 구현하기 위해서는 곡선을 이용한 path generation이 필수적이

며, 이를 위해 본 연구에서는 Bezier curve를 이용한 local path generation 방법을 제시한다. Bezier curve는 parametric curve type으로서 tracking points의 생성이 용이할 수 있는 장점을 지니며, 또한 topological node가 euclidean information을 지니므로 이를 Bezier curve의 control points로 활용할 수 있는 장점이 있다. 이러한 방법에 대한 예가 아래의 그림과 같으며, Path를 구성하는 절차는 다음과 같다.

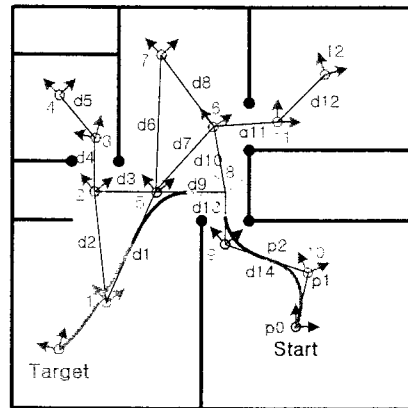


그림 3.2.2.358 Local path planning의 예

Step-1 : global topological path가 주어진다.

Step-2 : 인접 node사이의 line segment에 대한 이등분 점들을 구한다. 이는 Bezier curve를 구성하는데 활용된다.

Step-3 : 현재의 node point를 euclidean space에서 P1이라 하고 인접한 두 node와의 이등분점 (step-2의 과정)을 P0 및 P2라 할 때, 다음과 같이 Bezier curve를 이용한 path를 구성한다.

이렇게 curved path가 얻어지면 그 선상에서 discrete control path point들을 얻을 수 있으며, kinematic control 기법들을[7] robot을 움직일 수 있다.

(4) 실험 결과

본 과제에서 제안된 방법으로 기본적인 visual navigation 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 robot은 본 과제에서 제작한 2차 버전 system을 이용하였다. 아래의 그림은 실험 공간을 보여주고 있다.

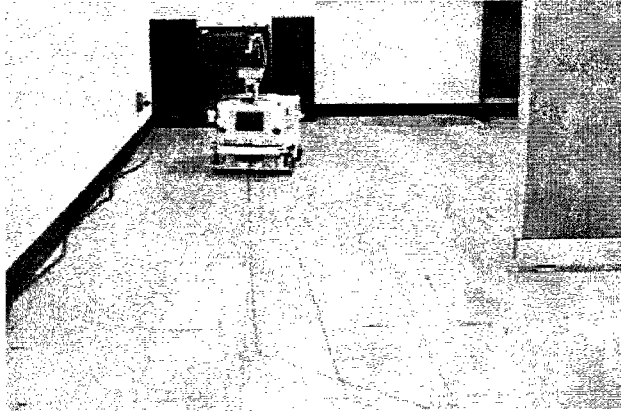


그림 3.2.2.359 로봇 Navigation test 환경

그림에서 알 수 있듯이 vision sensor를 위하여 특별히 환경을 가공하지 아니하고 있는 그대로의 환경을 바탕으로 하여 실험을 수행하였다. 따라서, texture가 없는 곳에서는 passive한 vision sensor로서는 map feature를 취득할 수 없게 된다. 따라서 odometry 정보와 visual information을 선택적으로 적용하는 방식으로 알고리즘은 동작하며, 이러한 방법이 실제적인 경우에 있어서는 가장 적절한 방법이라 할 수 있다. 본 연구에 사용되어진 vision sensor의 주요 사양은 다음과 같다.

- Stereo camera (color) 1대
 model : Videre Design사, STH-MD1-C, IEEE-1394
 Lens : RAINBOW사, f=6.0mm

아래의 그림들은 실제 실내 공간(그림 3.2.2.17 ~ 3.2.2.20)에서 수행된 실험 결과를 보여주고 있다. 그림 3.2.2.17 에서의 (a~ j) 점들은 map에서의 node location을 나타낸다. 그림 3.2.2.17과 그림 3.2.2.18은 odometry에 의한 robot navigation을 보여주고 있다. 그러나 odometry에 의한 location 정보는 실제의 robot 위치와는 일정하게 오차가 있음을 알 수 있는데, 이는 본 robot system이 2 wheel differential type의 운동을 하는 관계로 각도에 대한 오차가 쉽게 반영될 수 있음을 실험적으로 보여주고 있다. 따라서, odometry로 얻는 location 정보와 실제의 robot 위치는 다를 수 있음을 알 수 있다. 이에 비하여 그림 3.2.2.19와 그림 3.2.2.20은 visual information에 의한 robot motion을 보여주고 있다. 그림 3.2.2.19에서 robot의 위치가 급격히 변하는 점이 vision 정보에 의하여 robot의 위치가 새롭게 추정되어지는 것을 보여주며, 이에 따라 kinematic control 기법[7]에 의해 robot의 위치를 제어하여 결과적으로는 robot의 path error를 작게끔 할 수 있게 된다. 그림

3.2.2.20은 실제적으로 odometry에 의한 방법보다 최종적인 위치 오차가 작아짐을 알 수 있으며, 이에 대한 5회의 실험에 대한 정량적인 오차 분석이 표 3.2.2.3과 같다. 따라서, odometry만을 이용하여 localization을 수행하는 경우에 발생하는 누적 위치 오차를 visual navigation에 의해 줄일 수 있음을 실험을 통하여 알 수 있었다.

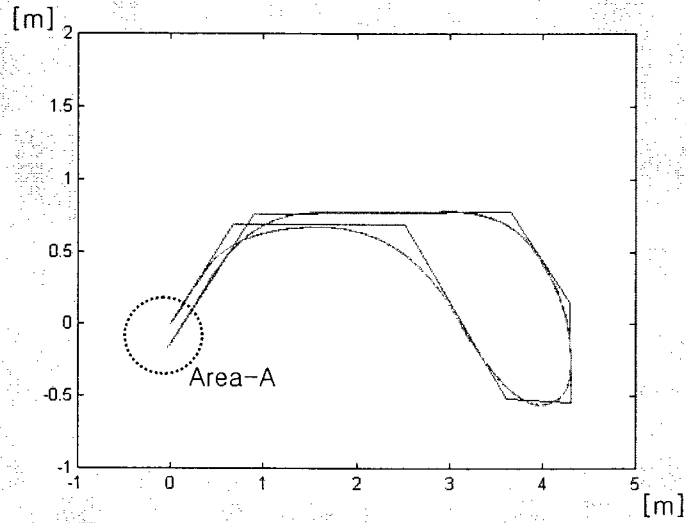


그림 3.2.2.360

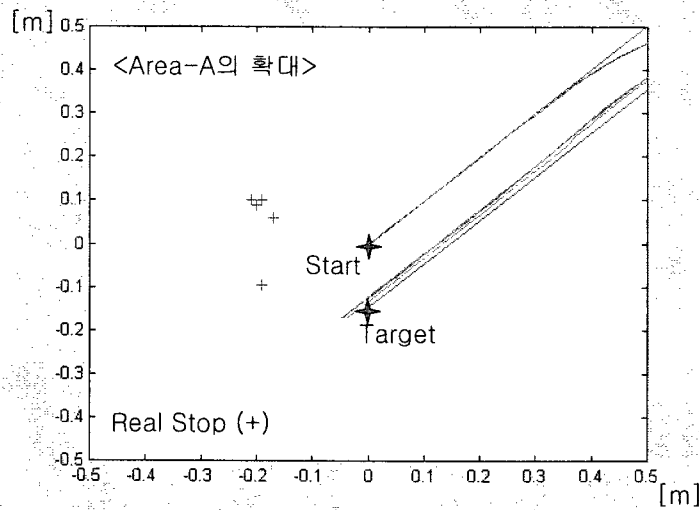


그림 3.2.2.361

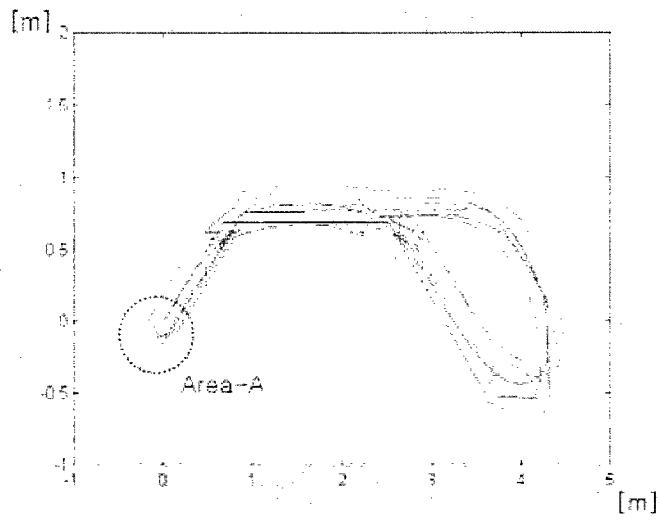


그림 3.2.2.362

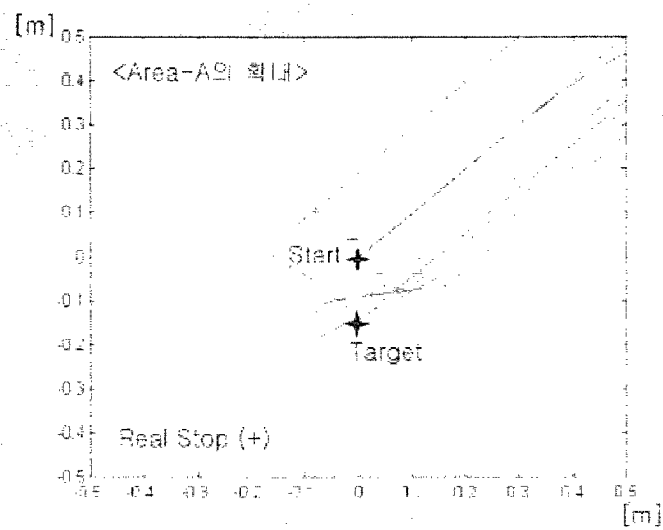


그림 3.2.2.363

	mean error[m]	max error[m]	min error[m]
Odometry	0.281	0.189	0.325
Vision	0.175	0.118	0.265

표 3.2.2.3 Location에 대한 error analysis

(5) 컬러 영상에서 레이저 슬릿 빔 추출 알고리즘

레이저 슬릿 빔은 일반 실내의 조도 조건에서 매우 두드러진 밝기를 가지는 적색광으로 이를 이용하여 컬러 영상에서 레이저 빔이 맺혀진 위치를 추출하는 알고리즘을 사용한다. 컬러 영상에서 적색광의 위치를 추출하는데 빛의 밝기에 많은 영향을 받는다. 즉 조도가 상당히 낮은 (100lux 이하)의 경우에 간단한 문턱치 값(Threshold)만으로도 적색광을 추출하는 것이 가능하지만, 반대로 조도가 너무 높다면 적색광을 추출하기 어렵다. 따라서 여기에서는 조명에 보다 둔감한 영상 변환과 적색 레이저 광으로 잘못 인식될 수 있는 몇 가지 상황을 정의하고 이를 극복하기 위한 알고리즘을 사용한다.

먼저, 입력된 영상에서 픽셀의 R, G, B 3성분(절대 명도)과 표준화(Normalized)시킨 R, G, B 3성분(상대 명도)을 계산하여 전체 영상에 대해 최소한의 적색으로 인식되기 위한 R 성분의 최소 문턱치와 다른 G, B 성분과의 상대명도 차가 최소 문턱치 이상 되도록 하는 threshold값을 Tuning하여 레이저 빔으로 예상되는 픽셀을 추출한다.

$$R_i > \min_{th} \quad , \quad r_i - \max(g_i, b_i) > \min \Delta_{th}$$

다음으로 레이저 슬릿 빔이 아닌 픽셀 영역을 슬릿 빔이 반사된 부분으로 오인하는 경우이다.

- ① 매우 밝은 흰색 부분(white brightness)
- ② 넓게 위치한 적색 장애물 물체(wide red object)
- ③ 노이즈화 된 빨간 픽셀(red-peak noise)

이러한 요인들을 배제하기 위하여 영상의 R, G, B 성분 이외에 영상 중심선에서부터 픽셀의 위치(y)와 전체 명도 값(total intensity, I)를 고려하여 white brightness를 제거한 적색광 영역을 얻는다.

$$r[i]_{\max} > \alpha \max(g[i], b[i])$$

영상의 하단부로 갈수록 물체에 맺히는 레이저 빛은 강해지는 특성을 가진다. 또한 하단부에서 발생하는 비교적 약한 적색 밝기의 노이즈는 상대적으로 표준화된 R 성분을 줄이도록 가중치를 부여한다. 전체적으로 적색 장애물이 위치한 경우 영상 하단부로 갈수록 레이저 빔의 강도가 적색 장애물의 R 성분 보다 커져야 하므로 가중치를 늘린다. 따라서 적색광 위치를 추정하는 식을 다음과 같이 만들 수 있다.

$$\hat{r}[i]_{\max} \Leftarrow r[i]_{\max} + \beta \cdot f(y) + \gamma \cdot g(I)$$

이와 같이 영상에 얻은 픽셀을 각 열에 최대 R 성분을 갖는 위치를 슬릿 추정 위치로 얻는다.

(가) 로봇에 장착된 1394카메라와 레이저 슬릿의 위치 관계

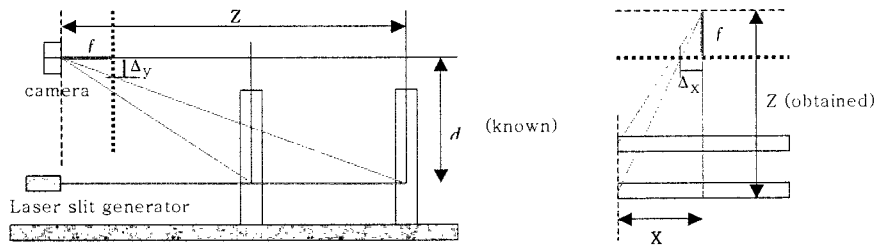


그림 3.2.2.21 카메라와 레이저 슬릿의 위치관계

위 그림은 로봇에 장착되는 1394카메라와 레이저 슬릿의 위치를 나타낸다. 물체에 맺히는 적색광은 로봇과 거리가 가까워 질 수록 수직방향의 아래쪽이다. 거리가 멀어질수록 영상의 중앙 수평선에 가깝게 맺힌다. 따라서 로봇과 물체간의 거리는 다음과 같이 얻어진다.

$$Z = \frac{f}{\Delta y} d = \frac{f}{c_y \cdot n_y} d$$

(c_y 는 이미지 셀의 화소간격, n_y 는 y방향 픽셀값, d 는 카메라와 슬릿간의 거리/설계값 =70mm)

위의 식에서 얻어진 공간상의 Z거리를 이용하여 X값도 얻을 수 있다.

$$X = \frac{\Delta x}{f} Z = \frac{c_x \cdot n_x}{f} Z$$

($c_x = c_y$ 는 이미지 셀의 화소간격, n_x 는 x방향 픽셀값, Z는 위에서 얻어진 물체까지의 Z방향 거리)

(나) 공간상의 카메라와 레이저 슬릿 위치 보정

로봇에서는 공간상의 카메라와 레이저 슬릿의 위치 보정을 위해 Lens Distortion Calibration과 Hand-eye Calibration 동시에 수행한다.

구조상 로봇에 장착된 레이저슬릿 빔 발생기의 슬릿광이 맺히는 빨간빛 빔 라인이 정확하게 수평라인 되도록 맞출 수는 없다. 대신에 미리 알고 있는 물체까지의 거리를 기준으로 여러 개를 선정하고 해당 기준 거리에 놓인 물체에 맺히는 적색광의 성분을 이용하여 물체까지의 거리를 비선형 함수로 정의하고, 여러 개의 기준 거리에 따라 비선형 함수를 fitting 시켜 최적화된 거리 함수를 얻는다.

이때 수평 방향의 슬릿 빔을 사용하여 수평방향의 모든 이미지 픽셀을 계수 값이 다른 비선형의 함수를 구하여 렌즈왜곡과 카메라의 위치오차를보정하는 정확한 물체까지의 거리를 얻는다. 사용하는 함수는 거리에 따른 비선형적 변위이동 특성을 적합한 hyperbolic function을 선정하여 기준 위치 값 6포인트를 기준으로 한 거리함수 Curve fitting을 수행하였다.

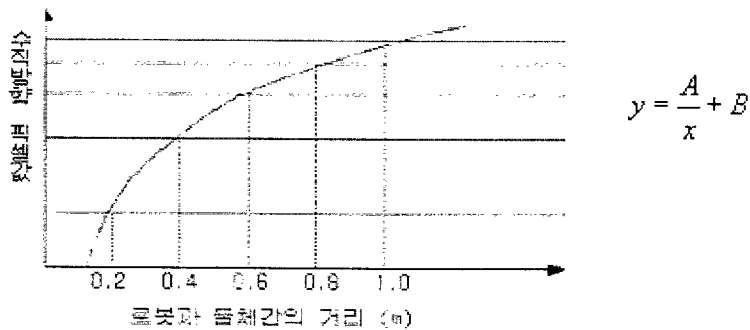


그림 3.2.2.22 로봇과 물체간의 거리

(다) 동작 수행 단계

- ① 레이저 슬릿의 적색광을 컬러영상에서 분리하여 RGB, Normalized RGB, Threshold 값을 이용하여 Red성분 추출.
- ② 수평방향에 픽셀에 대해 슬릿 빔을 중심으로 결정.
- ③ 미리 Calibration 한 결과 값을 이용하여 실제 장애물의 위치의 공간 정보 및 계수 추출.
- ④ 보정 계수를 이용하여, 각 수평 픽셀에서 공간거리 산출.

(라) 테스트

테스트시 고려한 두 가지 중요한 요소는 조명 조건과 주변 물체의 색깔이다.

그림 3.2.2.23~25는 파랑색과 바다색의 주변 물체에 조도 변화를 준 것이다

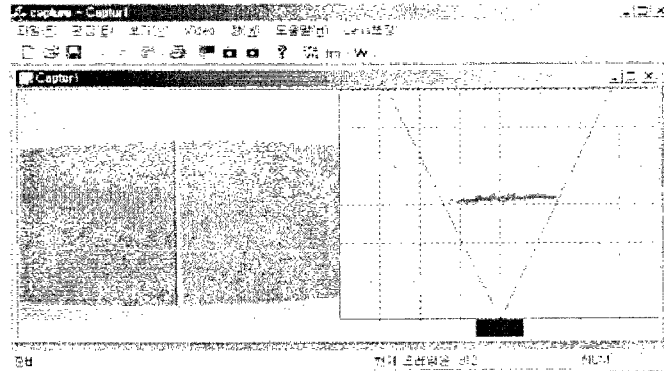


그림 3.2.2.23 조도: 120(lux)

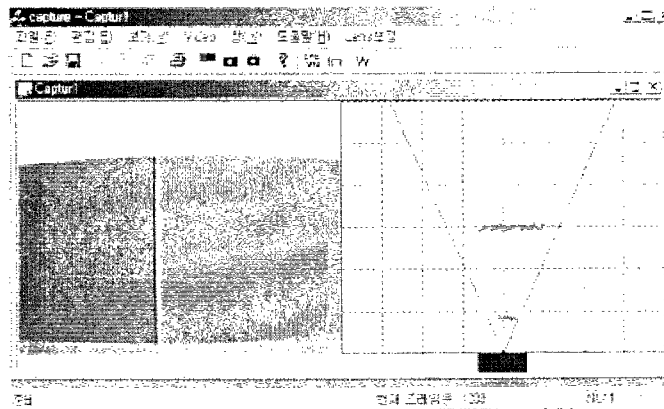


그림 3.2.2.24 조도: 370(lux)

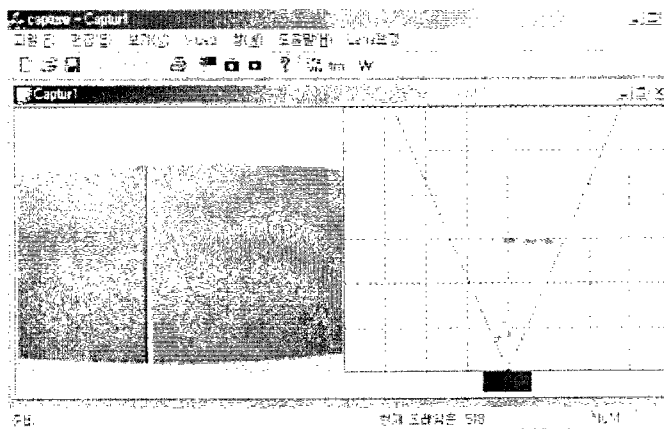


그림 3.2.2.25 조도: 760(lux)

그림 3.2.2.26~27은 검정색 의자 다리의 조도 변화에 따른 변화이다.

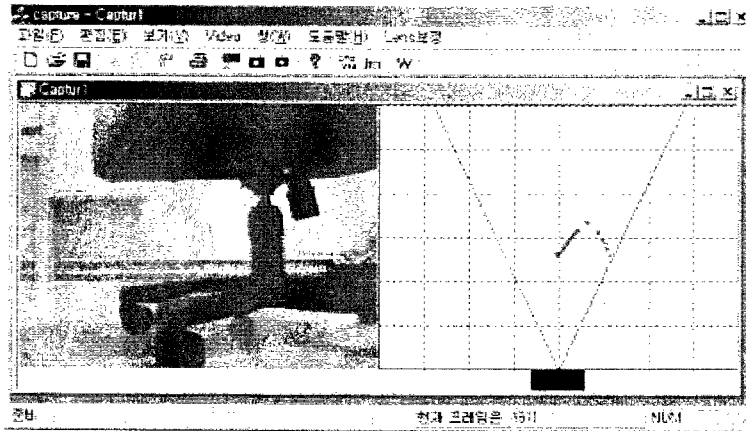


그림 3.2.2.26 조도: 120 (lux)

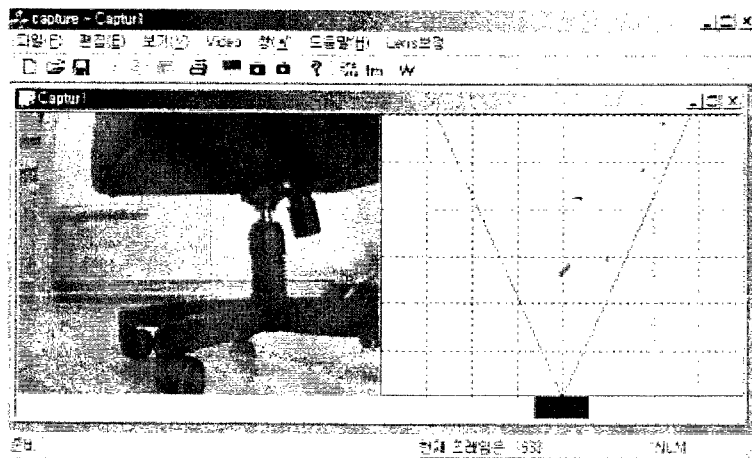


그림 3.2.2.27 조도: 760 (lux)

(마) 결 과

위의 테스트는 detecting 하는 물체의 색깔과 조도에 의해서 민감하게 반응을 한다. 특히 파란색 계열과 검정색은 조도가 밝을수록 빨간 레이저 빛이 희미해져 감지가 안 되는 경우가 많이 발생한다. 좀더 감지가 잘 되기 위해서는 카메라에서 제공하는 Color Control 파라미터 값의 튜닝이 필요하다.

아래의 그림3.2.2.28~32는 1394카메라 Color Control 파라미터 값을 Tuning한 후 결과 값이다.

- 01: Brightness: 511 (0~511)
- 02: Exposure: 511 (0~511)
- 03: Sharpness: 255 or 160 (0~255)
- 04: White balance (U,V 2가지) : 69, 69 (0~255)
- 05: Hue (사용 안함)
- 06: Saturation: 181 or 170 (0~255)
- 07: Gamma: 1 (0~1)
- 08: Shutter: 2 (0~6)
- 09: Gain: 175 (0~255)
- 10: Iris: 0

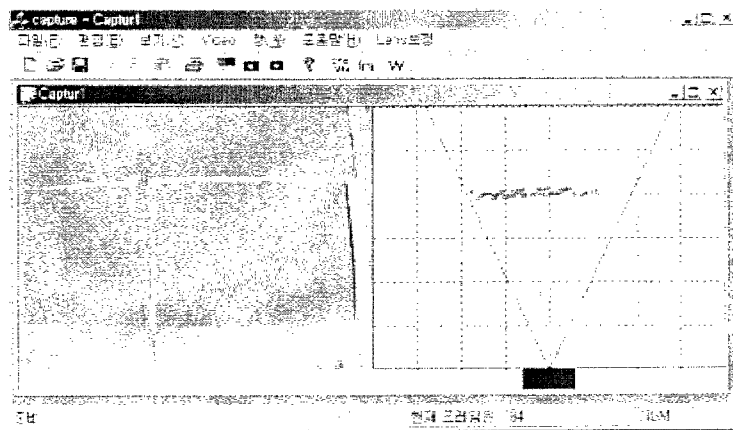


그림 3.2.2.28

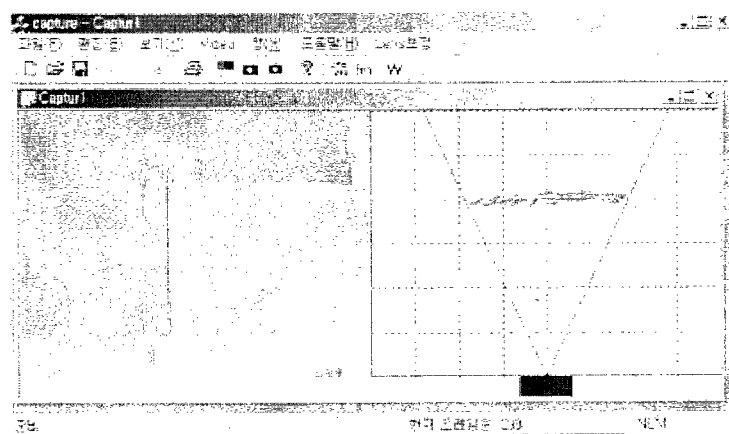


그림 3.2.2.29

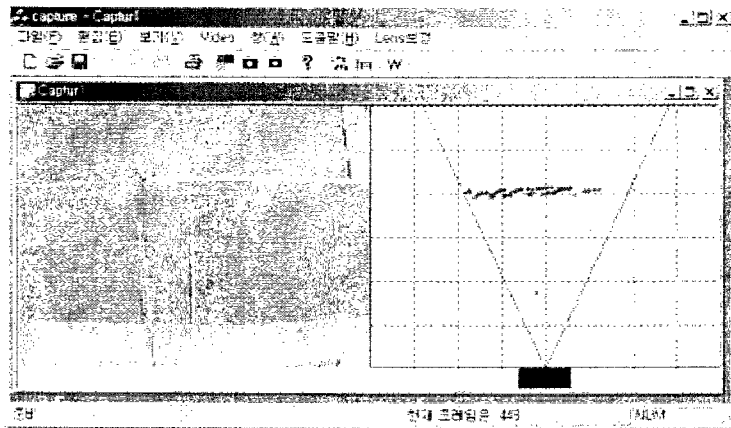


그림 3.2.2.30

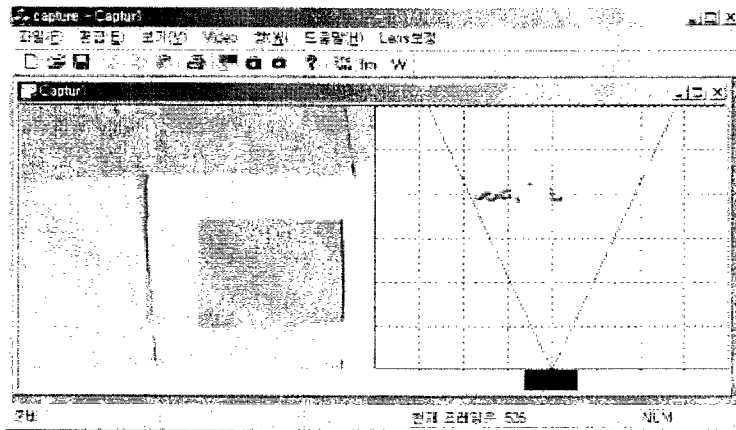


그림 3.2.2.31

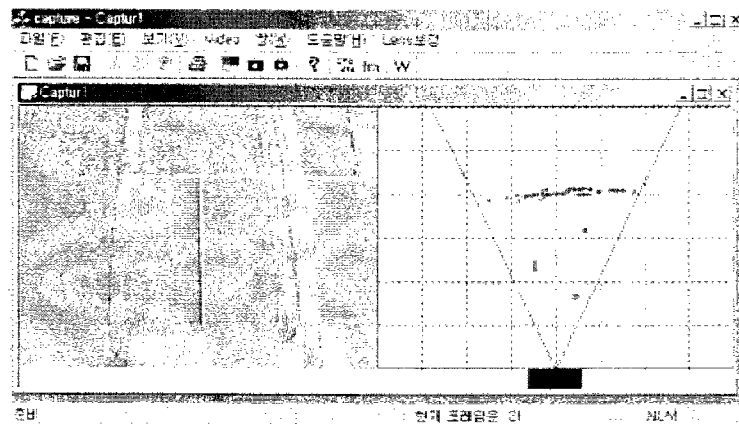


그림 3.2.2.32

홈서비스 로봇 레이저 슬릿 시스템에서 사용하는 카메라는 TI사의 PYRO WebCam API-200 모델이다. 주요 카메라 사양은 다음과 같다.

CCD image sensor	- Sony, 1/4-inch format
Number of effective pixels	- 659(h) x 494(v)
Interface formats	- 640 x 480, 320 x 240, 160 x 120
Video modes	- YUV 4:1:1, 4:2:2, 4:4:4, RGB 24-bit
Frame rate	- 30 frames/sec. at 640 x 480 format
Brightness	- Automatic or manual controlled
White balance	- Manual adjust, or automatic
Focal length	- 4.00 mm
Back focal length	- 3.50 mm
F #	- 2.0
Focus area	- 1.0 cm to infinity
Angle of view	- 62 degree, diagonal
Distortion	< -12.0 %
image Controls	-Brightness, Contrast, Saturation, Sharpness, Gamma, Exposure, White Balance and Backlight compensation

다. Visual interface

(1) Face detection and face recognition

현 2차년도 연구 목표 사양은 10인 얼굴 인식(단수 얼굴 검출시) 및 복수 사람 얼굴 검출, 인식성공률은 90 % 와 그 얼굴 형태는 정면 얼굴 중심으로 차후에 반 정면 얼굴 (semi-frontal) 까지 인식하는 것을 목표로 삼는다. 얼굴 검출 이론 및 선택 배경은 얼굴색이 잘 얻어지는 컬러특성 갖는 카메라를 가정하고, 영상의 부대역 변환(subband transform) 방법의 일종인 웨이블렛 변환(Wavelet, multi-scale analysis) 또는 피라미드 영상(pyramid image) 스케일 변환을 통해 실시간 얼굴 검출이 가능하도록 한다. 특히, 인간의 시각 시스템이 대상을 보다 자세히 관찰하려고 할 때 위와 같은 다중 스케일 방식으로 작용한다고 알려져 있기도 하다.

다음으로 얼굴 인식의 이론 선택 배경은 동영상 환경에서 얻어지는 정면 얼굴의 2차원 영상에 적용한 기존 연구내용 조사에서 작은 얼굴 크기 영상에서 인식률이 높고 비교적

검증된 이론인 Probabilistic subspace PCA [B.Moghaddam, A.Pentland, 1997, PAMI]을 중심으로 인식 알고리즘을 구성하였다.

(가) 얼굴 검출 알고리즘

본 연구의 얼굴 검출 방안은 두 단계(대강-세부 찾기 과정, coarse and fine detection of face)을 통해 차후 과정으로 얼굴 인식을 위한 정확한 얼굴의 크기 및 위치를 얻도록 한다.

먼저 컬러 카메라에서 얻어진 얼굴 컬러영상에 대하여 얼굴색 clustering을 통해 얼굴색 이진화 영상과 흑백영상을 각각 생성한다. 먼저 얼굴색 이진영상에 대해 살펴보면 사람의 얼굴색은 조명 조건, 인종, 개개인의 특성에 따라 다양한 분포를 가진다. 그러나, 적당한 컬러 공간 변환을 통해 얼굴색이 특정 공간에 집중되도록 한다. 본 연구에서는 보다 다양한 얼굴색 특성을 포함하면서 컴팩트하게 집중되는 얼굴색 정보 추출을 위해 얼굴색 컬러 영상을 RGB 컬러공간에서 YCbCr 컬러 공간으로 변환하여 이진화 영상을 만들어 낸다. 아래는 변환된 다양한 얼굴 컬러의 분포 특성이다.

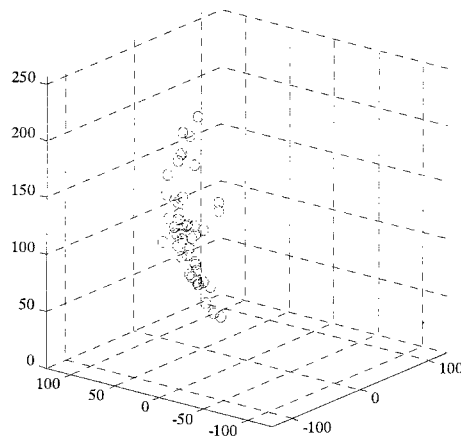


그림 3.2.2.33 YCbCr 컬러영역으로 변환된 얼굴색 특성

다음 단계로는 대강의 얼굴위치를 추정(coarse detection)하는 과정이다. 먼저 피라미드 이미지(또는 multiscale transformed image)를 이용하여 검색영역을 축소하여 실시간 얼굴검출이 가능한 방법을 채택한다. 특히, 피라미드 영상의 한 범주인 웨이블릿 변환을 통해 얻어진 저주파 영상은 실험 결과 위에서 얻은 얼굴색 영역이 집중되는 특성인 이진 영상이 입력값일 경우 축소 변환에 대해 얼굴영역의 위치 및 크기 정밀도가 변

하지 않고 잘 보존되는 강인한 결과 영상을 나타낸다.

이러한 스케일된 이진 영상에 대해 이중 타원으로 구성된 템플릿을 적용하여 대강의 얼굴 위치를 찾도록 한다.

얼굴 검출이 가능한 크기를 포함하는 스케일에 따라 복수개의 타원 템플릿 크기를 미리 정하고 아래 그림과 같이 안쪽 타원은 얼굴색 값을 갖는 영역 비율이 임계값 이상이 되도록, 바깥쪽 타원은 비 얼굴색값 갖는 영역 비율이 임계값 이상이 되도록 하는 이중 타원 템플릿을 작성한다. 이를 얼굴 영상 전체적으로 스캔하여 조건을 만족하는 이중 타원 템플릿의 중심위치 순서쌍을 복수개로 산출한다. 여기에 다시 모든 타원 스케일 비율을 통해 가장 잘 만족하는 10개의 중심위치 순서쌍을 얻어내어, 여기에서 평균 얼굴 위치 및 템플릿의 크기를 계산한다. 얻어진 값들을 이용하여 최종적인 검출 영역을 직사각형 형태의 부분 영상으로 잘라내어 다음의 세부 얼굴 검출 단계로 넘겨주도록 한다.

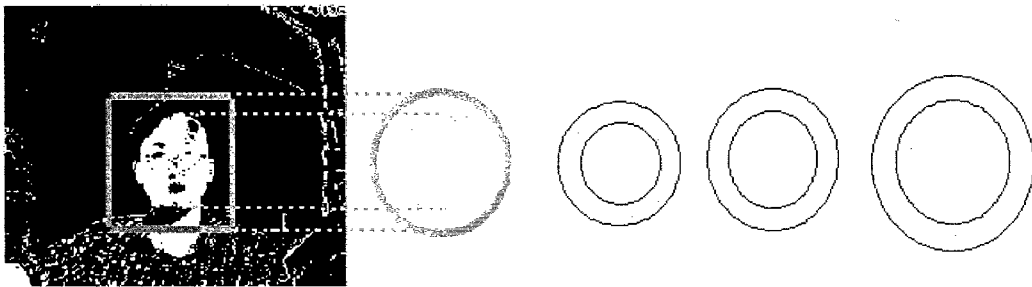


그림 3.2.2.34 스케일 별 이중 타원 템플릿 적용 (얼굴 검출-coarse detection)

세부 얼굴 위치 추정(fine detection)에서는 앞 단계에서 얻어진 대강의 얼굴 영역에 대해 카메라로부터 사람을 바라보는 관측 거리를 감안하여 다시 각각의 스케일 별로 세밀하게 검색해 가면서 얼굴 유사도를 추정할수 있는 특성정도를 계산하는 함수를 정의한다. 즉, 해당 크기 영역의 세부적인 얼굴 유사도 특징치를 계산하는 데 얼굴 특징 요소를 이용하게 된다. 얼굴내의 특징요소에는 밝은 명도를 가지는 부분(이마, 볼, 코 등)과 어두운 명도를 갖는 부분(두 눈, 눈썹, 코 밑, 입 등)이 개개인 마다 정확한 위치는 다르나 일정한 기하학적 크기 및 위치 관계를 가지고 놓이게 된다. 이 특성함수에서는 특히 얼굴내 특징 요소 중 가장 인식하기 쉽고 정확한 추정이 가능한 두 눈(eye)을 기준위치에 놓일 때 최대의 가중치를 부여하고 기타 코 밑, 입, 이마 등에 위치 및 크기에 따라 명도 기준을 만족하는 픽셀값을 누적하여 계산하는 방법으로 해당 스케일 별 최대 유사도를 나타내는 얼굴 위치를 찾게된다.

아래 그림과 같이 두 눈이 인식에 필요한 표준화된 위치를 가지도록 하며 최종 얼굴 영

역은 정사각형 형태로 얻게 된다. 또한 기준이 되는 영상 명도를 맞추기 위해 히스토그램 평활화(histogram equalization)를 통해 표준 밝기 얼굴 검출 영상을 얻는다. 최종적으로 스케일 별 계산된 유사도 추정치가 최대인 비율의 정사각형 영역을 얼굴 영역으로 결정한다.

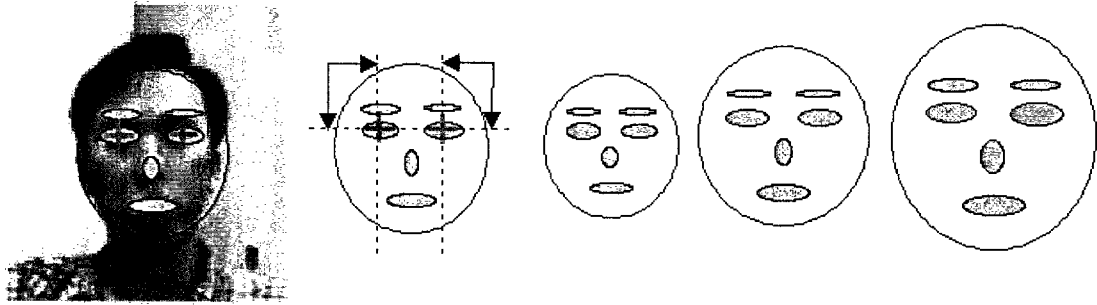


그림 3.2.2.35 스케일 별 얼굴 특성도 계산 및 두 눈 위치 검출 (얼굴 검출 - Fine detection)

(나) 얼굴 인식 이론

본 연구의 얼굴 인식은 표준적 기법으로 널리 사용되는 PCA(principal component analysis) 이론을 바탕으로 개선된 방법을 사용하며, ML(Maximum-likelihood)관점에서 해당 얼굴 영상에 대한 확률분포를 추정하여 인식을 수행한 방안을 채택하였다.

대상 물체의 외관(appearance)영상을 이미지 공간에 대한 고유벡터 분해(eigenvector decomposition)를 통해 그 확률분포를 추정하는 PCA의 일반적인 방안은 주 성분(principal component)이 포함된 부분 공간(principal subspace)에서 영상 인식을 수행한다. 본 연구에서는 계산 복잡성 때문에 사용되지 않던 직교 여분 성분(orthogonal complement)이 얼굴 인식에 중요한 역할을 한다는 데에 착안, 직교 여분 성분의 주요 부분만을 빠르게 계산하는 방법을 고안하여 사용하였다.

2차원 입력 패턴 영상의 확률 분포는 기존 트레이닝 데이터와의 평균과 역 공분산등으로 다음과 같은 관계를 가진다.

$$P(\mathbf{x} | \Omega) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})\right]}{(2\pi)^{N/2} |\Sigma|^{1/2}}$$

여기에 분자항에 해당하는 PCA component를 공분산의 고유값을 이용하여 분해하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d(\mathbf{x}) &= \bar{\mathbf{x}}^T \Sigma^{-1} \bar{\mathbf{x}} \\ &= \bar{\mathbf{x}}^T \left[\Phi \Lambda^{-1} \Phi^T \right] \bar{\mathbf{x}} \\ &= \mathbf{y}^T \Lambda^{-1} \mathbf{y} \end{aligned}$$

얻어진 식은 decoupled되어 다음과 같이 주 성분 과 직교 여분 성분으로 구분하여 표현이 가능하다.

$$d(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^M \frac{y_i^2}{\lambda_i} + \sum_{i=M+1}^N \frac{y_i^2}{\lambda_i}$$

위 두 성분 중 계산이 복잡한 여분 성분은 전체 범위중 고유값이 최소 기준치 이상 되는 성분이 전체 성분의 대부분을 차지한다는 점에 착안 주요 부분만을 임계치를 설정, 계산하도록 한다. 아래 그림에서 전체 고유값 중 1부터 M까지(F)가 주 성분 선택 범위이고 \bar{F} 는 여분 성분에서 의미있는 임계값 이상의 고유값 영역이다.

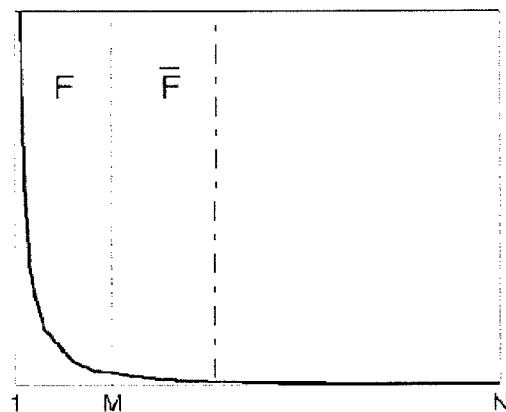


그림 3.2.2.36 주성분 및 직교 여분성분 선택

이 두가지 성분의 합성으로 해당 얼굴 유사성을 추정하면 얼굴 영상의 확률 분포를 보다 최적화하여 추정할 수 있어 기존 방법보다 인식률이 향상됨을 보인다.

한편, 기존의 얼굴인식에서 기준이 되는 트레이닝 영상은 가우시안 확률 분포를 가진다

고 가정한다. 이 경우 얼굴영상이 유사한 크기 및 위치에 놓이고 또한 같은 카메라 관측 방향에서 얻은 결과일 때에는 의미가 있으나 만약 트레이닝 영상이 다른 각도에서 얻은 얼굴영상들이거나 조명조건이 달라질 경우에 위에서 언급한 주 성분 부분공간 값들이 더 이상 단일 모드 가우시안 분포라고 가정할 수 없게 된다.

따라서, 이러한 다중 모드(multimodal) 트레이닝 세트를 해석하기 위해서 다중 뷰 모드를 기반으로 한 혼합 파라미터 모델(parametric mixture model)을 세우고 이를 추정하여 확률 분포를 얻는 방안을 채택하였다.

다음 식은 혼합 모드 가우시안 분포를 나타내는 식이며 이러한 분포를 추정하는 알고리즘으로는 기대값 최대화 기법(EM, Expectation-Maximization)을 사용한다. 아래 식은 혼합 모드에서 PCA의 주 성분을 나타낸다.

$$P\{y|\Theta\} = \sum_{i=1}^{N_r} \pi_i g(y; \mu_i, \Sigma_i)$$

다음 식은 혼합 모드에서의 파라미터 모델과 그 추정식이다.

$$\Theta = \{\pi_i, \mu_i, \Sigma_i\}_{i=1}^{N_r}, \quad \Theta^* = \arg \max \left[\prod_{t=1}^{N_r} P\{y^t|\Theta\} \right]$$

이러한 EM 파라미터 모델을 구성하는 확률값, 혼합비율, 평균 및 공분산 값은 각각 아래의 식과 같이 구해진다.

$$h_i^k(t) = \frac{\pi_i^k g(y^t; \mu_i^k, \Sigma_i^k)}{\sum_{j=1}^{N_r} \pi_j^k g(y^t; \mu_j^k, \Sigma_j^k)} \quad \pi_i^{k+1} = \frac{\sum_{t=1}^{N_r} h_i^k(t)}{\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{t=1}^{N_r} h_i^k(t)} \quad \mu_i^{k+1} = \frac{\sum_{t=1}^{N_r} h_i^k(t) y^t}{\sum_{t=1}^{N_r} h_i^k(t)}$$

$$\Sigma_i^{k+1} = \frac{\sum_{t=1}^{N_r} h_i^k(t) (y^t - \mu_i^{k+1})(y^t - \mu_i^{k+1})^T}{\sum_{t=1}^{N_r} h_i^k(t)}$$

위의 구성값들을 임의의 초기치에서 임계값이상 변화가 없을 때까지 루프 반복(iteration)

하여 얻어진 혼합 파라미터를 PCA 주성분으로 대치한 최종 확률 모델은 다음과 같다.

$$\hat{P}(x|\Omega) = P(y|\Theta) \hat{P}_P(x|\Omega)$$

(다) 현재까지 수행 결과 (Face detection & recognition)

① 얼굴 검출 테스트

카메라 320*240 해상도 기준으로 단일 얼굴 및 복수 얼굴 테스트를 수행하였고 주변 환경의 유사한 얼굴색 영역에서도 실시간으로 얼굴 검출이 수행되는 결과를 나타낸다.

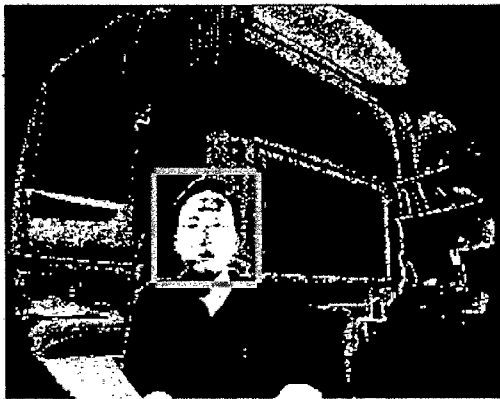


그림 3.2.2.37 얼굴검출 예-1

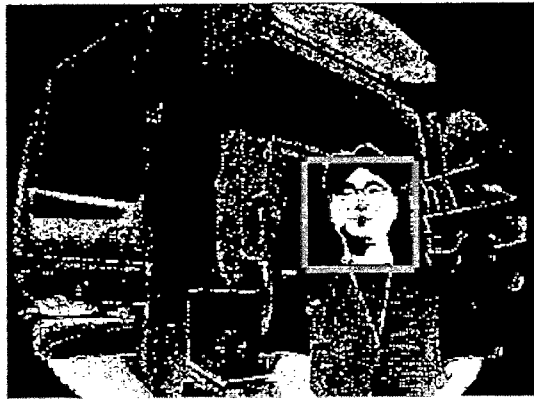


그림 3.2.2.38 얼굴 검출 예-2



그림 3.2.2.39 입력 컬러영상 (유사 얼굴색)



그림 3.2.2.40 유사 영역 존재시 검출 결과



그림 3.2.2.41 얼굴색 영역 간섭시 검출 결과

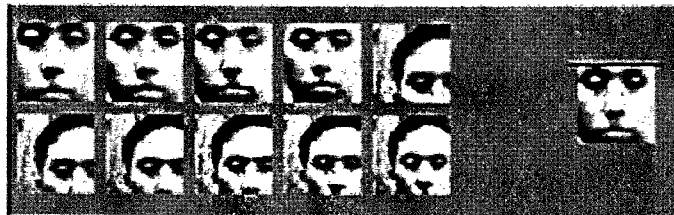


그림 3.2.2.42 스케일 별 얼굴 검출 및 최종 결과영상

② 얼굴 인식 테스트

얼굴 인식을 위한 기본 데이터가 되는 얼굴 영상 트레이닝 세트는 얼굴 검출단계에서 얻어진 결과 영상을 이용한다.



그림 3.2.2.44-48 얼굴인식 트레이닝 모델의 예

10명의 트레이닝 대상 얼굴을 선정하고 조명과 스케일을 고려한 각 사람마다 20장의 30*30 픽셀 크기의 트레이닝 영상을 얻는다. 실시간 검출 및 인식 모드로 들어가기 전에 트레이닝 영상들의 다중 모드(multimodal) 파라미터와 평균, 공분산 값 등을 오프라인 상에서 계산, 데이터 파일화 하여 실시간 얼굴 인식의 기본 데이터베이스로 사용한다. 실시간 검출 및 인식을 동시에 수행 시 계산속도는 약 1분30초 소요된다. (P4-1.6Ghz)

다음은 다양한 거리에서 얼굴 인식을 수행한 결과이다.

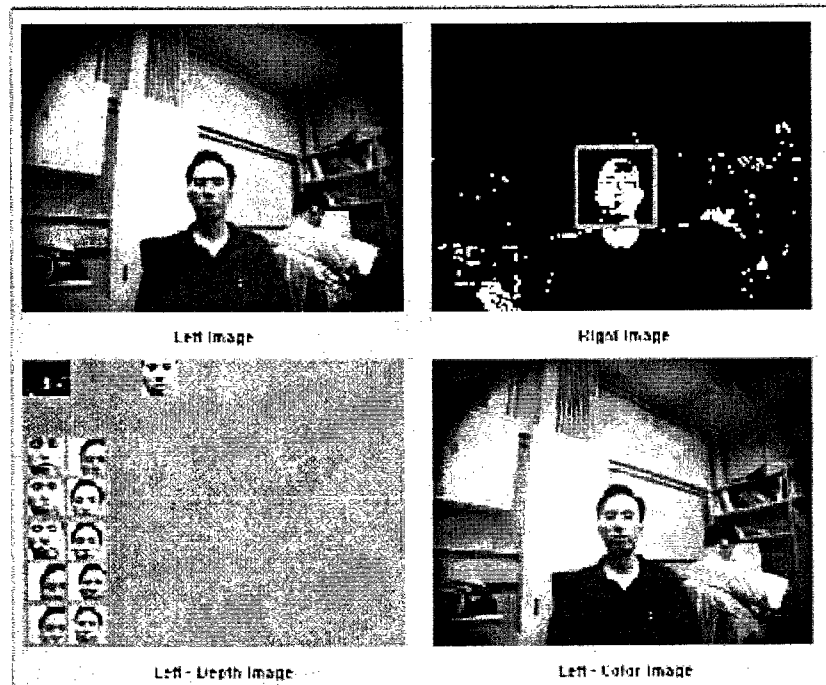


그림 3.2.2.49 실시간 얼굴 인식 결과 (판측 거리 : 1.1m)

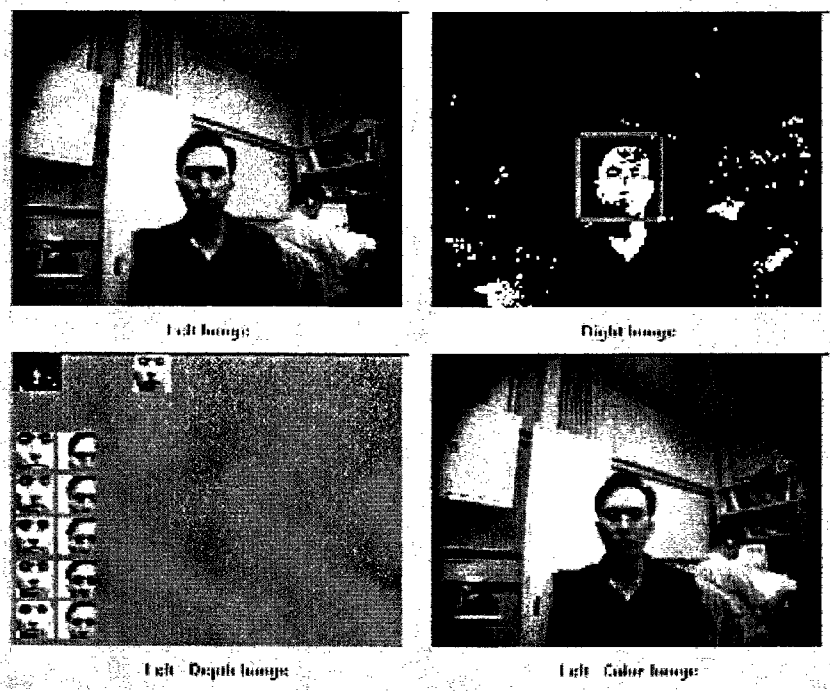


그림 3.2.2.50 실시간 얼굴 인식 결과 (관측 거리 : 0.8m)



그림 3.2.2.51 실시간 얼굴 인식 결과 (관측 거리 : 0.6m)

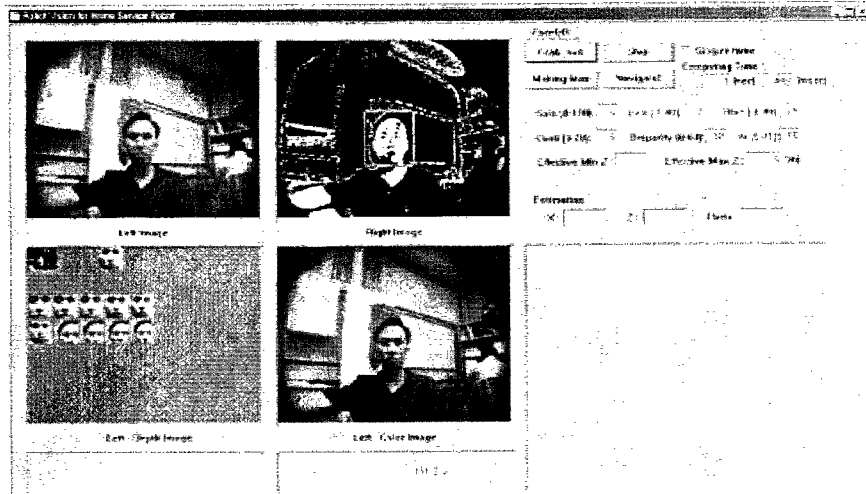


그림 3.2.2.52 전체 얼굴 검출 및 인식 과정 계산 소요 시간 (1min 480msec)

라. 음원 방향검출 및 음성인식 시스템

(1) 음원 방향검출

(가) 방향검출의 개요

소리나는(화자) 위치를 판별하기 위해서 3개의 microphone이 필요하며 각 mic에서 들어오는 신호를 A/D converter로 입력받아 상관계수를 이용하여 화자의 위치를 판별하게 된다.

(나) 방향검출모듈 하드웨어 사양

- 33kHz 이상의 sample speed를 가지는 A/D converter 필요 (각 마이크 당 11kHz 이상)
- High speed sampling을 위해서 interrupt 및 DMA를 지원하는 A/D converter 필요
- 음성인식 전처리 보드

음성인식을 위해서는 (방향검출 포함) 작은 신호를 크게 증폭하는 증폭기(amplifier)가 필요하다. 그러나 멀리서 나는 작은 소리는 크게 증폭하고 가까이서 나는 큰 소리는 작게 증폭할 수 있도록 증폭기를 설계하여 좀더 먼 거리의 신호를 신뢰성 있게 처리할 수 있도록 한다.

(다) 방향검출 알고리즘 원리

음원의 방향을 검출하는 원리는 각 마이크에 도달하는 소리의 시간차를 이용하는 것이다. 앞으로

세부적인 원리를 알아보도록 하자.

① 상관계수 원리

아래 그림에서 보듯이 화자의 위치에 따라서 신호의 delay가 가장 많이 이루어지는 거리는 기준 mic c를 기준으로 mic a 혹은 b를 대각선으로 연결한 거리이다. 따라서 상관계수를 구하기 위한 최대 delay sampling 값은 $-nac \sim +nac$ 및 $-nbc \sim +nbc$ 가 된다.

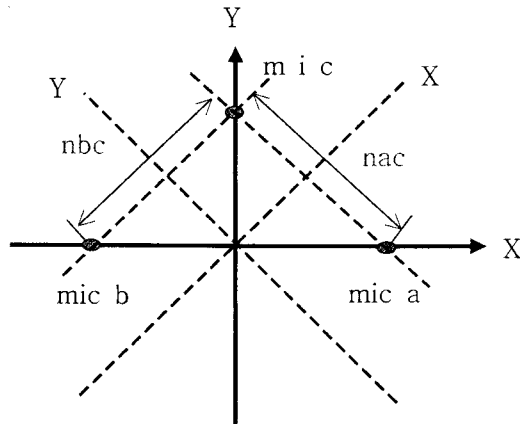
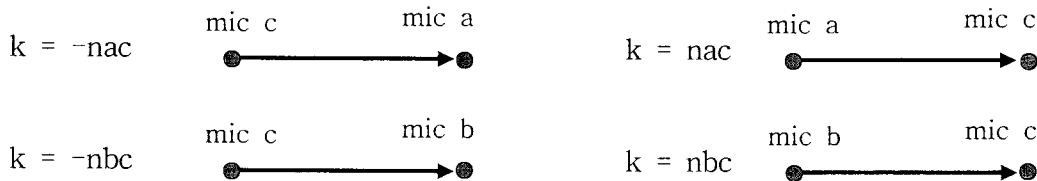


그림 3.2.2.53 3개의 mic 위치

$$nac = \frac{l_{ac}}{v} Fs \quad nbc = \frac{l_{bc}}{v} Fs$$

l : 각 마이크간의 거리 / v : 음속 / Fs : sampling frequency

마이크에 들어오는 음성방향에 따라서 delay sampling 값 k 는 다음과 같이 정의된다.



위의 수식을 이용 최대 delay 값 nac 및 nbc 를 구하고 다음과 같이 상관계수를 구할수 있다.

mic c 와 a 의 상관계수 $Rac(k)$ 는 (단, $k = -nac, \dots, 0, \dots, nac$)

$$Rac(k) = \frac{\sum_{g=0} A(tg-k)C(tg)}{\sqrt{\sum_{g=0} A(tg-k)^2} \sqrt{\sum_{g=0} C(tg)^2}}$$

mic c 와 b 의 상관계수 Rbc(k) 는 (단, k = -nbc,...,0,...,nbc)

$$Rbc(k) = \frac{\sum_{g=0} B(tg-k)C(tg)}{\sqrt{\sum_{g=0} B(tg-k)^2} \sqrt{\sum_{g=0} C(tg)^2}}$$

② 위치검출 원리

이제 구해진 상관계수를 이용하여 최종적으로 화자의 위치좌표를 구해낼수 있다. k 범위를 포함하는 가상 matrix를 만들고 각 위치마다 음원이 들어온다고 가정 했을 때, 각 mic에서 실제로 delay 되는 sampling 개수(kac 및 kbc)를 구하여 각 위치마다 상관계수를 구할수 있다. 따라서 아래와 같이 구해진 r matrix 값에 threshold 값을 설정해주어 일정이상의 값만 뽑아낸 후 정규화 하여 위치를 판별할 수 있다. (아래식 참조)

$$r(x_i, y_j) = Rac(kac)Rbc(kbc)$$

각 음원에 따른 실제 delay sampling 개수값 kac 및 kbc 는 다음과 같이 구할수 있다.

$$kac = \frac{Fs l_{ac} \sin \tan^{-1}\left(\frac{y_j - y_c}{x_i - x_c}\right) - \theta_{ac}}{v}$$

$$kbc = \frac{Fs l_{bc} \sin \tan^{-1}\left(\frac{y_j - y_c}{x_i - x_c}\right) - \theta_{bc}}{v}$$

(x_c, y_c) 는 mic c 의 좌표

(x_i, y_j) 는 실제 음원의 좌표

θ_{ac} 는 mic a 와 mic c를 잇는선에 수직인 선과 x 축과의 각

θ_{bc} 는 mic b 와 mic c를 잇는선에 수직인 선과 x 축과의 각

위의 수식을 부가 설명하면 다음과 같다.

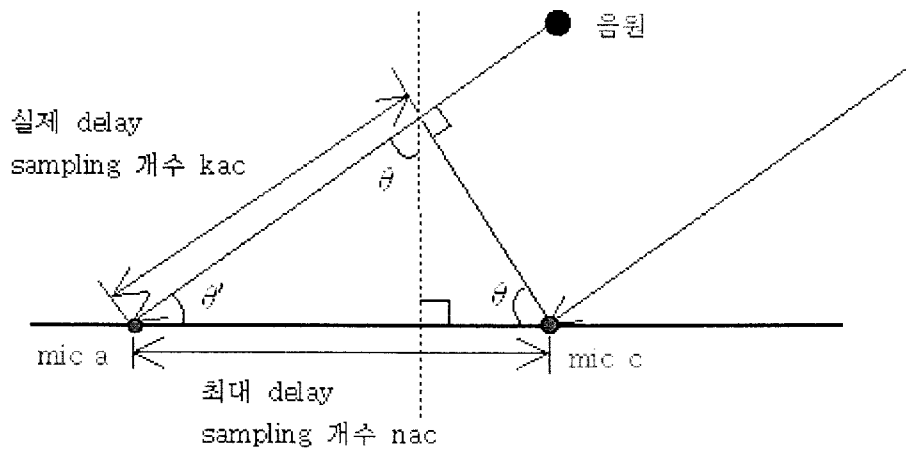


그림 3.2.2.54 delay sampling 개수

그림 3.2.2.54처럼 음원에서 mic 까지 수평으로 들어온다고 가정하면 실제로 delay 되는 sampling 개수는 kac 가 되며 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$kac = nac * \cos \theta' \quad \text{따라서} \quad kac = nac * \sin \theta \quad \text{가 된다.}$$

실제 mic c 와 a 과의 kac값을 구하면 아래와 같고, 따라서 $kac = nac * \sin \theta$ 이며 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y_j - y_c}{x_i - x_c}\right) - \theta_{ac}$ 가 된다.

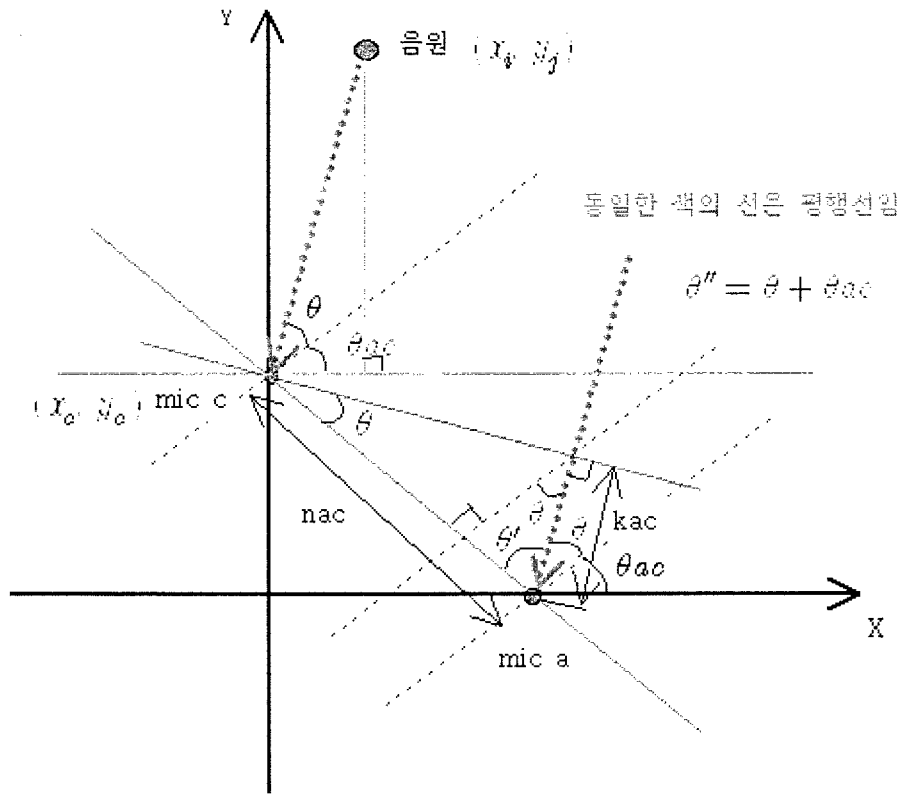


그림 3.2.2.55 kac를 위한 θ 의 계산

(라) 방향검출 적용

로봇에 방향 검출을 적용할 때 음성신호가 아닌 노이즈에도 반응하는 문제점과 반향신호 때문에 전혀 엉뚱한 값을 검출해 내는 문제점이 있으며 이를 해결하기 위해서 다음과 같이 적용하였다.

① 방향검출 개선작업

- 기준 : 일정한 noise threshold 이상의 신호를 감지하면 방향출력
- 변경 : 일정한 noise threshold 이상의 신호를 반향신호 제거를 위해 연속 두 번 비교하여 오차가 ± 20 이내일 때만 방향출력 - 3회 이상 연속 비교시 음성에 대한 반응률이 급속히 떨어지는 단점이 있으므로 고려하지 않음

② 방향검출 실험조건 및 실험결과

성능 확인 시 실험조건은 다음과 같다.

- 1m 떨어진 곳에서 “흠뻑” 이라고 불렀을 때 검출각도를 반영함
- 0°~315° 까지 45° 단위로 총 8방향 각도 반영함
- 처음 “흠뻑” 이라고 말했을 때 각도검출이 되지 않았을 경우 반응할 때까지 반복호출
- 아무 음성이 입력되지 않았는데도 반응했을 경우 잡음에 오차회수 반영함

방향검출 실험결과는 다음과 같다.

각도 회수	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	비교 (평균오차)
1 회	336°	167°	77°	102°	167°	283°	270°	233°	8번 음성모두 처음에 반응했으나 잡음에 의해 총 11번 반응함
2 회									
3 회									
오차각도	24°	122°	13°	23°	13°	58°	0°	82°	(41.9°)

표 3.2.2.4 개선작업이 이루어지지 않은 상태에서의 방향검출

각도 회수	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	비교 (평균오차)
1 회	×	×	×	×	193°	×	261°	×	8번 음성에 8번 반응했으나 처음에 반응은 2번 뿐임
2 회	348°	×	97°	173°		230°		283°	
3 회		45°							
오차각도	12°	0°	7°	38°	13°	5°	9°	32°	(14.5°)

표 3.2.2.5 개선작업 후 방향검출

③ 최종 방향검출 개선결과

- 평균 방향오차는 27.4° 개선됨 (41.9° → 14.5°)
- 방향오차는 범위는 84° 개선됨 (122° → 38°)
- 음성에 대한 반응률은 40.6% 줄었으나 (100% → 59.4%),
잡음에 대한 반응률은 27% 개선됨 (27% → 0%)
- 신뢰도 측면에서 검출단위인 45° 이상 오차난 횟수는 없어짐 (3회 → 0회)

(2) 음성인식 시스템

홈봇 2 의 음성인식은 상용 음성인식엔진을 사용한다.

(가) 음성인식 적용

홈봇 2에 음성인식을 적용할 때 몇 가지 문제점을 발견되었고 이에 대하여 적절히 대응하여 적용한 방법 및 상용 음성인식 시스템의 인식률에 대한 내용들을 정리하였다.

① 음성인식 엔진 문제점

음성인식 엔진 자체의 문제점으로 인식률을 떨어뜨리는 원인을 제공하고 있으나 여기서 제기되는 문제점들은 다른 음성인식 엔진에서도 대부분 동일하게 제기되는 문제점들이다.

- 아무 음성이 입력이 되지 않아도 계속해서 기 등록된 단어집합 중 아무단어나 출력해 냄.

■ 약간의 노이즈가 입력 되어도 음성으로 인식되어 등록된 단어 중 가장 근사하다고 판단되는 단어를 무작위로 추출해 내는 특징이 있음

- 글자는 전혀 달라도 음성인식 함수 내에서 처리패턴이 비슷한 경우에는 입력과 다른 값을 출력하는 경우가 발생됨

■ 예를 들어 “거실” 은 “불”로, “지갑” 은 “시작”으로 인식함

- 음절이 한단어로 이루어진 경우 변별력이 떨어짐

■ 가, 와, 봐, 나... 등등 한 단어의 명령어 및 기능어는 변별력이 떨어짐

- 인식이 실패한 단어일 경우 연속해서 호출하면 오인식률이 높아짐

■ 예를 들어 “아버지” 라고 말했을 때 “에어콘” 이라고 오인식 했을 경우 연속해서 “아버지”를 말하면 계속해서 “에어콘”이라고 인식되는 경향이 있음

② 음성인식 개선작업

위의 문제점을 최대한으로 보완하고 인식률을 높이기 위하여 개선작업을 수행함

- 음성인식률이 저조한 단어를 제외하거나 변경하여 인식률을 높임

- “가/와/봐“ 등 유사 단음절로 이루어져 인식률이 떨어지는 명령어를 변경함

■ 와 → 여기로 와 / 봐 → 나를 봐 (lookup table에 의해서 해당 기능어와 통합함)

■ 집 → 우리집 (집이 책으로 오인식 되는 문제점 해결)

- 외부에 노이즈가 적은 환경에서 음성인식을 수행하며 음성인식을 내리는 화자도 발음을 명확히 하고 일정한 속도로 명령을 내려야 함.

③ 음성명령 인식을

음성명령 인식을 측정에 대한 실험조건 및 실험결과는 다음과 같다.

㉠ 인식을 측정 시 실험조건

- 무선 마이크를 이용한 명령어 인식테스트 (주변 잡음이 적은 실험실내에서 테스트 실시)
- 명령어 종류별로 10번씩 3회를 반복 수행함
- 지금까지 lookup table에 정의되어 있는 명령어(36개 단어)에 대한 음성인식 테스트
- 제작된 음성인식 수행함수 SRdo() 를 사용하여 음성모듈 초기화후 음성인식 테스트

㉡ 인식을 실험결과

음성명령 종류	테스트 회수			비 교 (평균 인식을)
	1	2	3	
여기로 와	100%	70%	80%	
나를 봐	100%	90%	90%	
정지해	100%	100%	100%	
인 식 른	100%	87%	90%	(92%)

표 3.2.2.6 단문 음성명령 인식을 결과

음성명령 종류	테스트 회수			비 교 (평균 인식률)
	1	2	3	
거실로 가	90%	100%	70%	
오른쪽으로 회전해	100%	80%	80%	
신문을 가져와	100%	100%	100%	
책을 집어	100%	100%	90%	
우리집을 순찰해	80%	80%	60%	
맵을 구성해	80%	90%	90%	
원격으로 제어해	70%	90%	60%	
쉬어모드로 전환해	100%	100%	100%	
인식률	90%	93%	81%		(88%)

표 3.2.2.7 2 문장 조합된 음성명령 인식률 결과

음성명령 종류	테스트 회수			비 교 (평균 인식률)
	1	2	3	
테이블 위에 컵을 가져와	60%	90%	70%	
쇼파 앞에 책을 집어	40%	60%	100%	
인식률	50%	75%	85%	(72%)

표 3.2.2.8 3 문장이상(4 문장) 조합된 음성명령 인식률 결과

테스트 회수 \ 단어종류	테스트 회수			테스트 회수 \ 단어종류	테스트 회수			비 고 (평균인식률)
	1	2	3		1	2	3	
훔봇	100%	90%	90%	뒤	100%	100%	90%	인식률이 낮은단어 및 오인식 대응단어 종류정리 ∥ ▽ 앞↔컵 안방↔쇼파 다시↔거실 왼쪽↔왼쪽 위↔뒤 아래↔그래
가	90%	90%	90%	위	60%	80%	70%	
회전해	100%	90%	90%	아래	50%	50%	90%	
가져와	100%	100%	100%	신문	100%	100%	90%	
집어	90%	100%	90%	컵	100%	90%	100%	
순찰해	90%	100%	90%	책	100%	90%	90%	
구성해	100%	100%	100%	우리집	100%	90%	100%	
제어해	80%	70%	80%	맵	100%	100%	80%	
전환해	90%	100%	100%	쉬어	80%	70%	80%	
안방	90%	60%	40%	끝내	100%	100%	100%	
작은방	100%	100%	100%	왼쪽	30%	80%	50%	
거실	100%	100%	100%	키보드	100%	100%	100%	
쇼파	100%	100%	100%	그래	100%	100%	100%	
테이블	100%	100%	100%	틀렸어	100%	100%	100%	
오른쪽	100%	90%	100%	중지	100%	100%	100%	
왼쪽	100%	100%	100%	다시	50%	40%	50%	
앞	20%	0%	60%	인식률	88%	87%	87%	(87%)

표 3.2.2.9 각 단어 음성인식률 결과

④ 최종 음성인식 인식률 결과

- 평균 음성명령 인식률은 단문 92%, 2 문장 조합 88%, 4 문장 조합 72% 임
- 문장의 조합이 복잡해 질수록 인식률도 낮아짐
- 단문 : 92% → 2 문장 조합 : 88% → 4 문장 조합 : 72%
- 동일문장 내에서 회수에 따른 인식률 최대 변화폭은 단문 30%, 2 문장 30%, 4 문장 60%로 변화 폭이 넓음

■ 음성인식 엔진의 인식률이 항상 일정하지는 않다는 것을 알 수 있으며 음성명령을 내리는 화자의 음성패턴 및 발음의 명확성도 영향을 받음

(나) 음성인식 Look-up Table

홈봇 2에 음성인식 명령은 다음에 나오는 look-up table 규칙에 따라 조합되고 적용된다.

① 음성인식 명령 형태

- [attention], [절대위치/방향/상태/물체어] { 조사 } [동작어].

■ [홈봇], [거실] {로} [가].

- 하나의 음성인식 명령형태에서 동작어는 반드시 존재해야 되면, 맨 나중에 위치시켜야 함

- []는 반드시 음성 인식시켜야 할 단어 혹은 조건에 따라 음성인식이 생략 가능한 단어, {}는 음성 인식 생략이 가능한 단어

- 절대위치/방향/상태/물체어 단어는 같은 종류의 내용어를 중복하여 하나의 음성인식 명령어에 사용할 수 없음

② 음성인식 명령어 set 정의

음성인식 명령형태는 작업 시나리오에 근거하여 총 4개 작업기능과 2개의 상태 전환 기능으로 구성되어 있음

- 명령에 따라 움직이는 기능(Go Direction)

- 명령에 따라 특정 물건 가져오기 기능(Pick and Carry)

- 집안 감시 기능(Patrol Home)

- 지도 작성 기능(Build Map)

- 로봇 상태 전환 기능(Cnvert Robot Mode)

- 로봇의 원격제어 전환 기능(Cnvert Remote Control Mode)

③ Look-up table 구성조건

Look-up table은 명령인식의 편리성, 명령 set의 업데이트 편리성, 명령단어의 간소화

(Compactness)를 고려하여 확장성 있게 구성되어야 한다.

㉠ 음성명령 전달형태

음성인식을 통하여 최종적으로 명령이 인식되면 메인 프로그램에 명령어를 넘겨주게 되고 이때의 전달형태를 다음과 같이 정의한다.

- 각 명령어마다 2바이트(65536개)의 저장공간을 확보
- 동작어(2바이트) : 절대위치(2바이트) : 방향(2바이트) : 물체(2바이트) : 상태(2바이트)의 규격과 순서로 구성

■ 흠뻑, 소파로 가 -> 가 : 1, 소파 : 4 이므로 "14000"이 전달됨

- 향후 추가적인 작업이나 다른 명령어는 행열의 데이터를 추가하므로 저장 및 확장 할 수 있음

④ Look-up table의 내용

여기의 lookup table은 간단한 예를 나타낸 것으로 명령어가 추가되면 계속적으로 확장 가능하다.

ID	작업분류	동작어	절대위치	방향	물체	상태
1	Go Direction Task	가	거실	오른쪽	신문	원격(제어)
2		여기로와!	안방	왼쪽	책	키보드
3		회전해	작은방	앞	컵	쉬어
4		나를봐!	소파	뒤	(나)	끝내
5		정지	테이블	위	맵	reserved
...		reserved	reserved	아래	우리집!	.
100	Pick and Carry Task	가져와	.	reserved	reserved	.
101		집어	.	.	.	.
200	Patrol Task	순찰해	.	.	.	.
300	Build Task	구성해	.	.	.	.
400	Remote Task	제어해	.	.	.	.
500	Convert Task	전환해	.	.	.	.

표 3.2.2.10 Look-up table의 내용

(3) 음성모듈 순서도

위와 같이 개발된 음성방향 검출 및 음성인식 부분을 다음과 같은 순서도에 맞게 통합하여 음성모

들을 완성하고 이를 로봇에 적용한다.

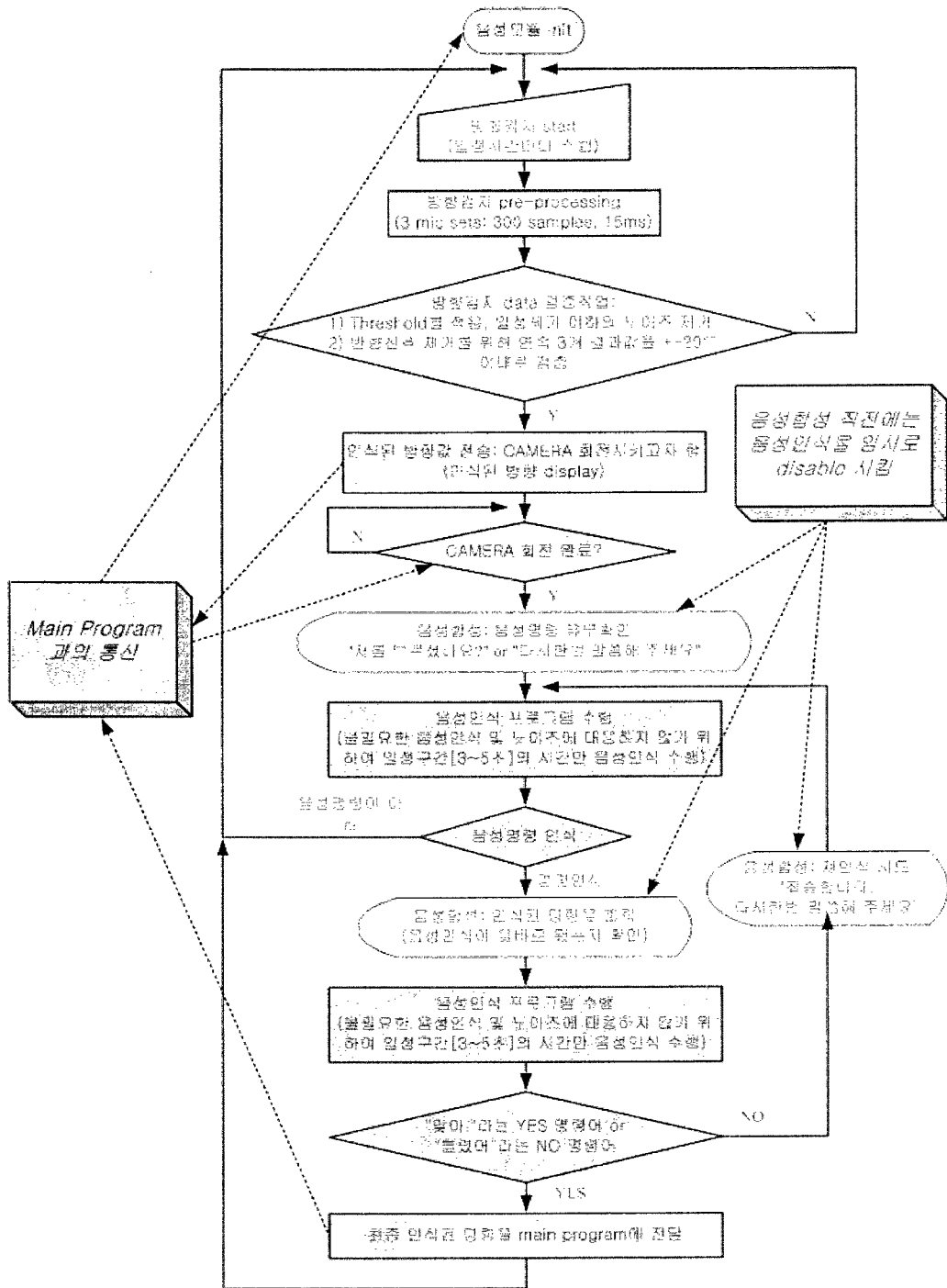


그림 3.2.2.56 음성모듈 순서도

마. internet 기반 원격제어 기술 개발

: 위탁연구 과제 참조 (경희대)

마. system architecture

(1) 3계층 소프트웨어 구조

서비스 로봇의 소프트웨어 구조는 다음의 조건을 고려하여 3계층 소프트웨어 구조로 구성한다.

- 재사용 가능한 개념적인 구조
- 계층간 권한의 명백한 구별
- 새로운 구성요소와 장치들의 간단한 통합
- 유연성
- 효율적인 실행시간
- 간단한 디버깅

3계층 소프트웨어는 위의 조건들을 만족하며 그 구성은 그림 3.2.2.57과 표 3.2.2.10와 같다.

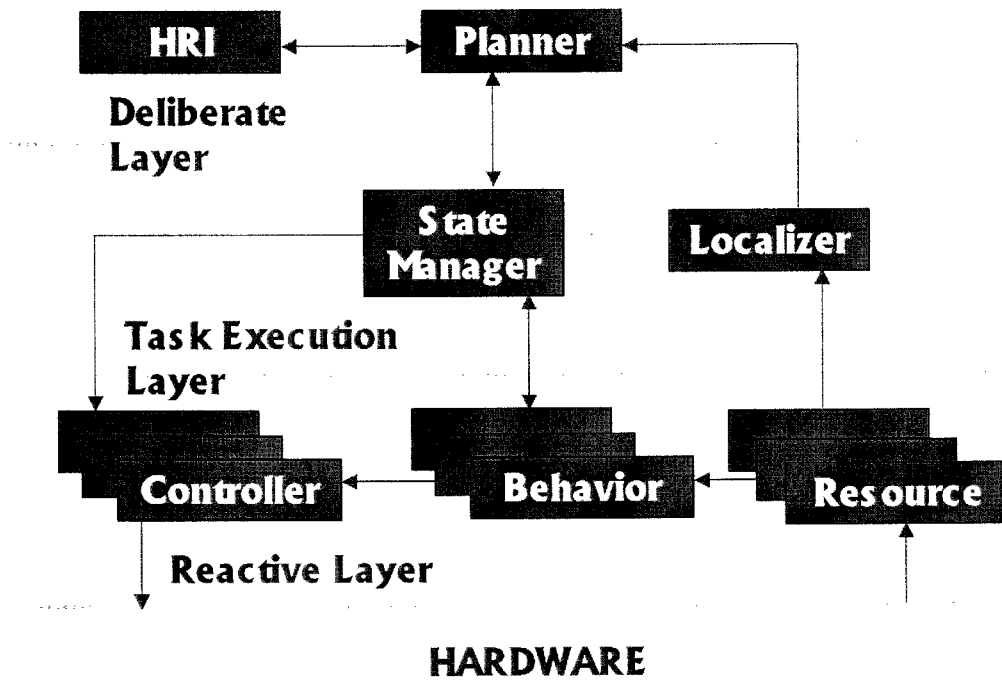


그림 3.2.2.57 3계층 소프트웨어 구조

Layer	Member	Description
Deliberate Layer	HRI	Human Robot Interface (Voice, Face...)
	Planner	Path Planing
Task Execution Layer	State Manager	Task Execution Supervisor
	Localizer	Map Building
Reactive Layer	Controller	Position, Velocity
	Behavior	GoPoint, Local Motion Plan...
	Resource	Encoder, Sonar, Camera, Mic, Speaker...

표 3.2.2.10 3계층 소프트웨어 구조

3계층 소프트웨어 구조를 실제 구현하기 위해 기본이 되는 모듈이 필요하며 그림 3.2.2.58은 기본 모듈로 사용하는 CModule의 멤버 함수들을 나타내는 그림이다.

- Independent Thread


```

      void AcceptSocket();
      void ConnectSocket(CS string strIP, UINT nPort);
      void CreateSocket(UINT nPort);
      void CloseSocket();
      void DisconnectSocket();
      void SendMsg(CModule* pModule);
      
```
- Server or Client for Socket


```

      int Run();
      void RunWork() {m_evtWork->SetEvent();}
      void Work();
      
```

그림 3.2.2.58 기본 모듈(CModule)의 소개

위의 3계층 소프트웨어 구조를 실제 모듈별로 나타내어 기본모듈로부터의 상속관계를 그리면 다음과 같다.

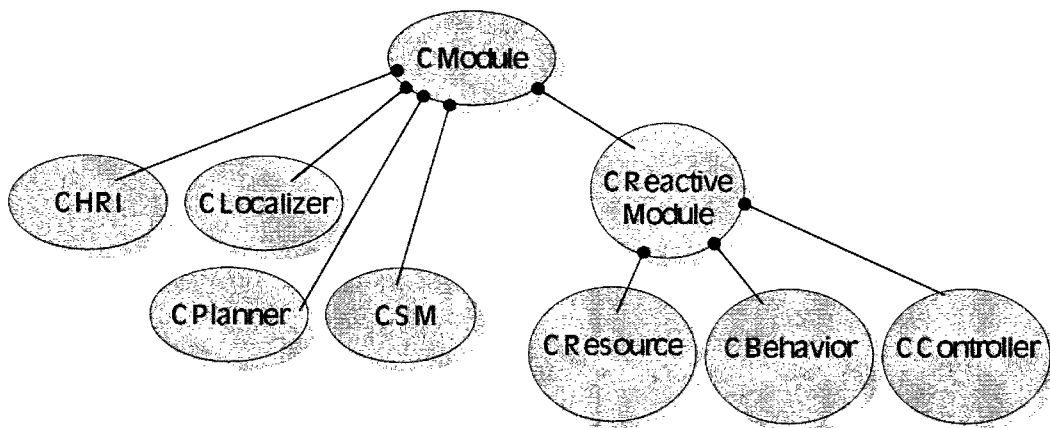


그림 3.2.2.59 소프트웨어 모듈의 계층적 구조

이동형 정보서비스 로봇은 현재 2개의 single board computer로 구성되어 있으며 각각 비전(vision)을 위한 컴퓨터 및 모션(motion)을 위한 컴퓨터로서 그림 3.2.2.60와 같이 모듈을 클래스(class)로 세분화하여 소켓(socket)을 통해 통신을 하게된다.

그림 3.2.2.61은 'GoPoint' 라는 작업(task)을 수행함에 있어서 동작되는 클래스들과 각 클래스간의 주고받는 데이터를 나타낸 예제를 나타내고 그림 3.2.2.62 는 실제 작업을 수행시켰을 때 모션용 컴퓨터 화면에 나타난 실험결과이다.

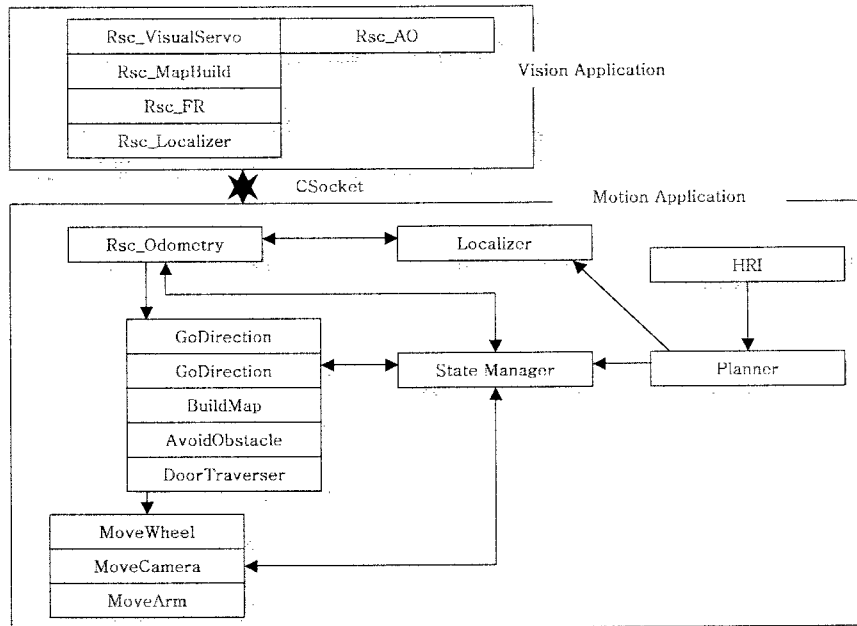


그림 3.2.2.60 소켓을 이용한 2대의 컴퓨터간의 통신 및 클래스(class) 구성

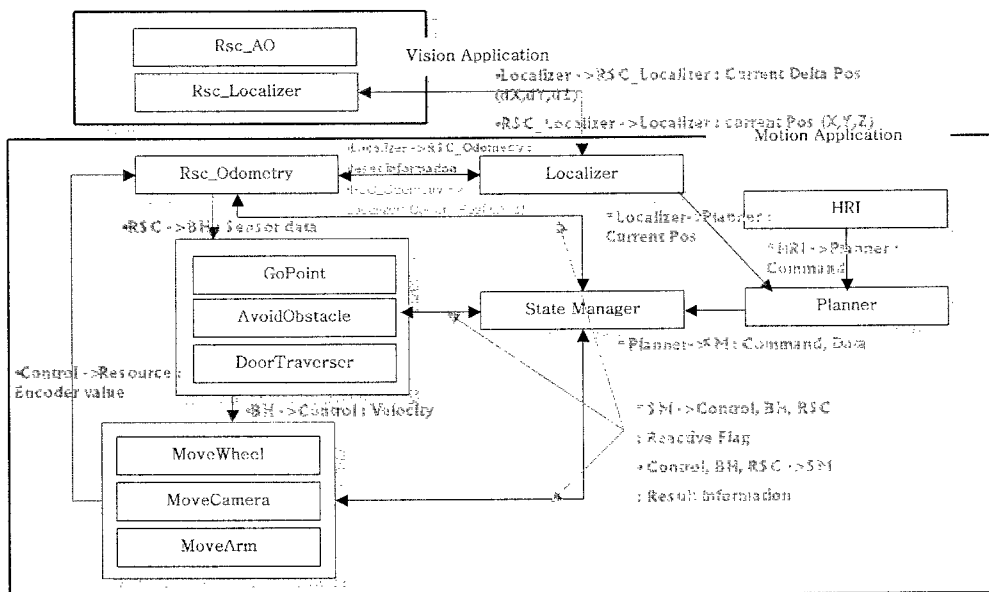


그림 3.2.2.61 GoPoint Task의 동작 예

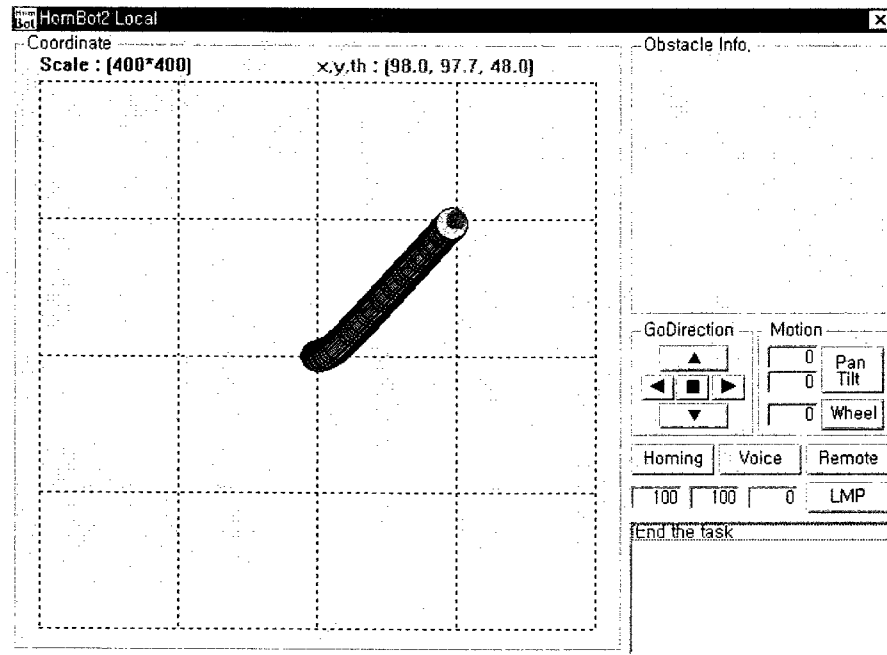


그림 3.2.2.62 GoPoint Task 실험(Motion SBC GUI)

3. 형상적응형 universal hand 개발

본 연구에서는 개발 목적에 부합하는 구조와 성능을 얻기 위하여 다양한 기술적 접근을 시도하였다. 그 예로써 자기 유변(magnetic-rheological) 유체를 이용한 구조를 고려한 바 있으나 별도의 능동 제어가 가능한 구동 요소가 필요하다는 단점과 과도한 중량으로 인하여 포기되었으며, 볼나사(ball screw)를 이용한 구조는 과도한 제작비와 함께 역시 중량 문제를 극복하기가 어려웠다. 최종적으로 채택된 구조는 높은 기어비를 갖는 소형 DC 모터로 구동되는 각나사와 강도 유지를 위한 가이드(guide)를 조합하는 개념으로 추진되었으며, 이를 시작품을 통하여 시험한 결과, 표 3.2.3.1에 나타낸 바와 같이 현장에서 요구되는 크기, 중량, 강도 등의 제한 조건을 만족시킬 수 있는 것으로 판명되었다. 한편, 수직 방향에 있어서는 최대/최소 높이비를 극대화할 수 있는 독창적인 구조가 제안되었고, 진공컵의 2방향 회전 구동부에서는 모터의 개수를 1개로 줄이기 위한 아이디어가 도출되었다. 본 절에서는 개발된 유연 그립퍼를 각 구동 방향에 따라 분리하여 설계 시의 접근 방법과 연구 결과를 자세히 설명한다.

표 3.2.3.1 현대 자동차 프레스 2공장 A1 라인 적용을 위한 유연 그립퍼 요구 사양

요구 사항	요구 수준	비고
Presetting 방식	금형 교환 시 3분 이내	작업 중 재조정 불가
attachment 최대 허용중량	50 kg 이하	현재 최대 약 30kg
진공컵 개수, 크기	8개, 직경 100 mm	현재 최대 13개
진공컵 제어 자유도	병진 3 + 회전 2 자유도	회전 2 자유도는 모터 1개로 연동되어 구동
최대 파지 대상체 크기	3.6×1.5×0.4 m ³	SM-SIDE OTR
최대 버팀 토크	3G 이상	급가감속 고려 (각나사 사용 시 3G 이상)

가. 수평 2방향 위치 조절 장치

유연 그립퍼 수평 2방향 구동을 위한 프레임은 크게 그림 3.2.3.1에 나타낸 바와 같이 대칭 구조를 이루는 2개의 프레임으로 구성되고, 각 프레임은 2개의 진공컵이 달린 프레임 2개가 중심 프레임을 따라 이동되는 구조를 갖는다. 이는 큰 대상물을 파지하는 경우 힘을 분산하는 효과가 있고 파지 위치를 설정하기 용이하며, 구동 모터의 개수를 4개 줄일 수 있는 장점이 있다. 각 프레임에서의 구동 요소로는 각나사와 높은 기어비로 연결된 소형 고속 DC 모터가 사용되었다. 각나사는 가장 간단한 선형 구동 요소이고 저렴하며 외부 하중에 의해 모터에 역으로 부하가 걸리는 것을 막아주는 탁월한 장점이 있다. 따라서 별도의 브레이크 장치가 없어도 무방하다. DC 모터는 총 26개가 소요되므로 우선 그 무게가 총중량에 미치는 영향이 작지 않다. 그리하여 본 연구에서는 소형 경량 고속 모터를 높은 기어비로 연결하여 필요한 토크를 얻으면서도 총중량을 줄일 수 있는 개념을 채택하였다. 이 때, 물론 구동 속도는 상당히 느려지게 되나 본 시스템에 요구되는 위치 변경 소요 시간은 최대 3분이므로 큰 문제는 없다. 또한, 모터에는 엔코더도 내장되어 있어 limit switch가 있는 원점으로부터 사전에 설정된 위치까지 정확하게 이동시키는 것이 가능하다. 한 편, 프레임의 강성을 유지하기 위한 가이드로는 두 가지 방법이 시도되었는데, 첫째는 중공 연마봉을 쓰는 방법이다. 이 경우는 뒤틀림 방지를 위하여 반드시 2개가 쌍을 이루어야 하는데, 중심 프레임의 경우는 굽힘 강성 보강을 위하여 3개의 연마봉을 삼각 구조로 배치하였다. 이 방법은 상대적으로 제작이 쉽고 간편하지만, 가는 연마봉을 쓰면 프레임의 출렁임과 판넬 파지시의 처짐이 커지고 굽은 것은 무게가 많이 나가는 단점이 있다. 그림 3.2.3.2는 연마봉을 사용한 프레임을 simulator를 이용하여 시험하는 장면이다. 두 번째 방

법으로는 무게에 비하여 굽힘 강성이 매우 높은 알루미늄 프로파일을 이용하는 방법이다. 이 경우는 뒤틀림 방지 효과도 있으므로 더욱 무게를 줄일 수 있다. 현재 이 방법으로 시 작품을 제작 중에 있다.

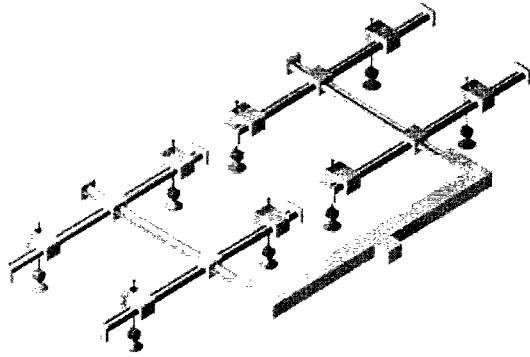


그림 435.2.3.1 유연 그립퍼의 수평 프레임 구조 개념도

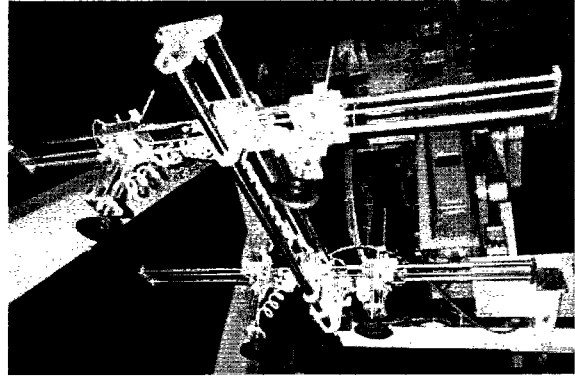


그림 3.2.3.2 중공 연마봉을 사용한 수평 프레임

나. 수직 방향 위치 조절 장치

수직 방향 위치 조절 장치에 있어서 가장 중요한 요구 조건은 최소 높이이다. 프레스에서 상형 금형과 하형 금형 사이의 최대 간격은 500~800 mm이지만, 생산성을 높이기 위해서 현재 공장에서는 프레스 작업이 끝난 후 상형 금형이 올라가는 도중에 이미 unloader가 들어가도록 설계된 경우가 많으므로 같은 조건이면 attachment의 최소 높이를 더욱 줄이는 것, 즉, attachment의 최대/최소 높이비를 극대화할 필요가 있다. 특히, 수축시 상부로 일부분이 돌출하는 것은 허용되지 않으므로 수평 프레임과 같은 각나사 등을 사용할 수 없다. 한편, stroke는 금형 대상물 중에서 파지점 간의 최대 높이차를 감당해야 한다는 조건으로부터 300 mm로 설정되었다. 이와 같은 요구 조건을 만족하는 구조로서 몇 가지 안을 검토하였고 제작, 시험을 수행하였다. 첫 번째는 그림 3.2.3.3에 나타난 것과 같은 가위손 구조이다. 이 방법은 단수가 적을 때는 높은 조절 정밀도와 설계가 용이한 구조가 장점이 되지만 최대 조절 높이를 증가시키기 위하여 다단으로 설계될 경우에는 각 링크에서의 유격이 누적되어 정밀성과 횡 방향 지지 안정성이 감소할 뿐만 아니라 최소 높이도 함께 증가하므로 적용이 곤란하다. 또한 높이에 따라 모터에 요구되는 구동 토크가 달라지는 단점도 있다. 두 번째는 그림 3.2.3.4에 나타난 바와 같은 유연 나사와 안테나 모양의 다단 가이드를 채용하는 방법이다. 유연 나사란 구부러짐이 자유로운 나사로서 본 연

구에서는 초장력이 큰 스프링을 사용하였다. 이러한 구조에서 가이드를 다단으로 구성할수록 최대/최소 높이 비율이 증가하고, 각 단 사이의 유격을 최소화하면 진행방향과 수직 방향에서의 지지 강도 및 안정성이 확보되는 장점이 있다. 또한, 모터와 너트를 이용하여 구동하는 원리는 각나사의 경우와 같으나, 수축 시 반대쪽으로 돌출되는 나사 부를 옆으로 구부려 수축 높이가 최소가 되도록 구현할 수 있으며, 원통 가이드 내부에 모터 및 기어부를 장착하므로 외관이 깔끔하다. 단점으로는 원통 파이프끼리 회전이 자유로운 경우는 상하 방향 구동이 거의 불가능하므로 파이프 내부에 별도의 회전 방지 설계가 고려되어야 하고, 단 수가 많아지거나 큰 직경이 요구되는 경우는 파이프를 얇은 두께로 제작하는 것이 어려우므로 결국 중량이 증가하게 되며, 경량화를 위하여 알루미늄 등으로 제작하는 경우는 마찰이나 굽힘으로 인한 내구성 문제가 발생하므로 표면 경질 처리가 요구되는데 이 경우 제품 변형이 유발되므로 정밀 가공이 어렵게 된다. 이러한 단점들을 해결하고자 세 번째 가이드의 구조를 제안하여 제작하여 성능시험 중이다. 기본 구조는 유연 나사를 사용하며, 도넛 형태의 원판에 3개의 봉을 원판에 수직 방향으로 등 간격으로 고정된 삼발이 구조가 여러 층을 이루고 있다. 이러한 다단 삼발이형 가이드 구조는 안테나식 다단 파이프 구조에 비하여 구조는 다소 복잡하나 제작은 오히려 용이하고 경량화에 유리한 장점이 있는 반면, 봉의 재질이 강철이므로 무게가 약간 증가하고, 단의 개수를 늘이기 위해서는 구멍 개수가 많아져야하므로 전체 직경이 함께 커지게 되며 원판 두께만큼 최소 수축 높이도 증가하는 제한점도 있다. 최종적으로는 5단으로 구성된 세 번째 구조가 채택되었다.

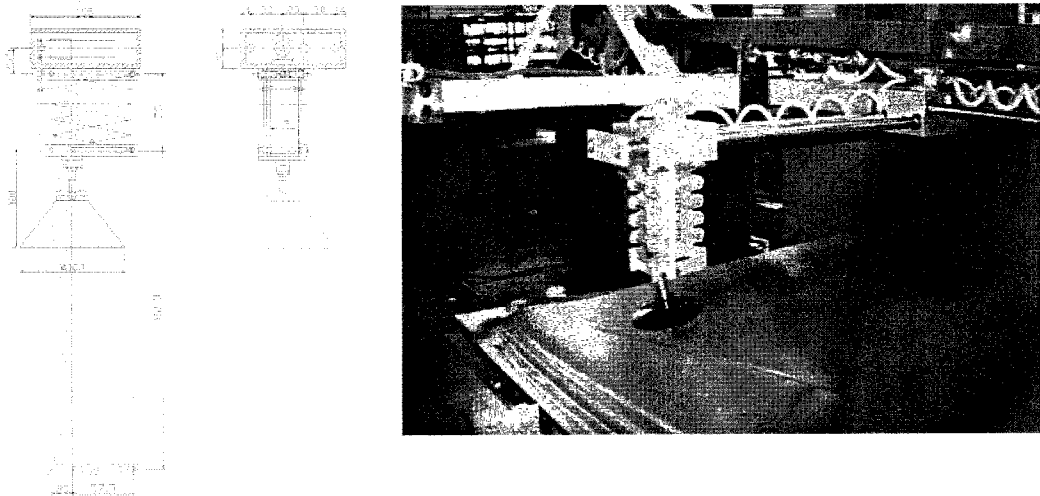


그림 3.2.3.3 다단 가위손 형태의 높이 조절 장치

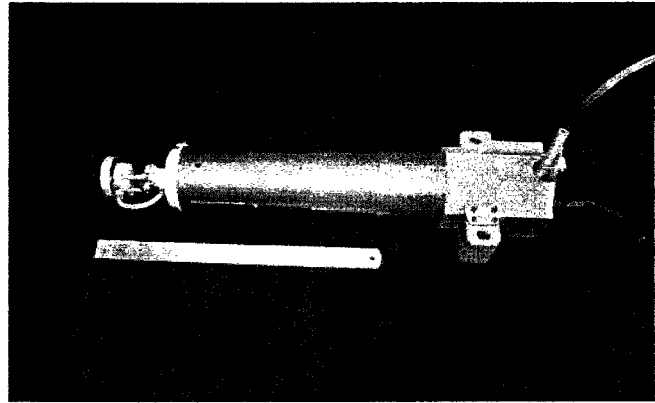


그림 3.2.3.4 안테나식 다단 가이드와 유연 나사를 이용한 높이 조절 장치

다. 진공컵의 2방향 회전각도 조절 장치

파지 대상면이 수평이 아닐 경우 파지가 가능하기 위해서는 진공컵 부분의 회전 거동이 허용되어야 한다. 이 때 진공컵의 자전을 제외한 두 방향의 회전 각도를 조절하기 위한 가장 일반적인 방법으로는 모터를 별도로 2개 사용하는 방법이다. 그러나 이를 위해서는 모터가 추가로 16개가 필요하므로 그 비용 증가뿐만 아니라 제어를 위한 채널 증가로 인하여 시스템이 복잡하여지고, 그만큼 보전성이 나빠지게 된다.

본 연구에서 고려된 컵의 회전 운동 조절 장치로는 첫째로 모터를 사용하지 않는 passive한 형태로서 볼조인트 또는 구면 베어링을 이용하는 방법이 있다. 이는 간단한 구조와 저렴한 가격이 장점이고, 수직 방향으로만 눌러주면 파지 대상면을 따라 진공컵이 기울어지게 되는 원리로서 약 20°의 경사면까지는 사용 가능하므로 사실상 8개의 진공컵 중 4개 정도는, 또는 단순한 프레스 작업만이 이루어지는 앞쪽 프레스용 loader/ unloader에서는 적용이 가능하다. 단점은 볼조인트 또는 구면 베어링 내부로 공압 통로가 형성되어야 하므로 그를 위한 seal이 필요하고 여기서 발생하는 공압 손실은 피할 수 없다는 점과 작업 대상물의 loading 및 unloading 작업이 빠른 주기로 이루어질 때 진공컵 끝단의 말림 현상 등으로 인한 파지 실패의 가능성이 있다는 점이다.

두 번째로는 모터 1개와 기어 트레인을 이용하여 진공컵을 나선형 궤적을 따라 선회시키는 방법으로 2방향의 회전운동을 구현한 독창적인 방법이다. 그 작동 원리를 그림 3.2.3.5를 참조하면서 설명한다. 서보 모터(11)가 작동하면, 서보 모터(11)와 결합된 제 1구동 기어(12) 및 그와 이물림된 중심 기어(13)가 회전하고, 그에 연결되어 있는 주 베어링

(14)과 그 이하 워름(24) 및 워름 휠(25), 진공컵(30) 등이 그림에서 점선으로 나타낸 중심축을 중심으로 회전하게 된다. 한편, 주 베어링(14)의 중심축과 편심된 위치에서 베어링(15)으로 결합된 공전축(15) 및 공전 기어(22)는 주 베어링의 회전에 의해 중심축 주위를 공전하게 되는데, 서보 모터(11)에 의해 회전하는 제2구동 기어(31)와 그에 이물림된 자유 기어(32)는 주 베어링의 회전 속도와는 관계없이 상대 회전운동을 하게 된다. 따라서, 공전 기어(22)는 상기와 같은 공전운동과 동시에, 자유 기어(32)와 이물림됨으로써 자전을 하게 된다. 이러한 공전 기어(22)의 자전운동은 공전축(23)이 베어링(15)에 의해 지지되기 때문에 가능하다. 공전축(23)의 자전운동은 워름 휠(25)로 전달되어 결국 진공컵이 중심축과 이루는 각도를 변화시키게 되어 점선으로 나타낸 진공컵과 같이 된다. 결론적으로

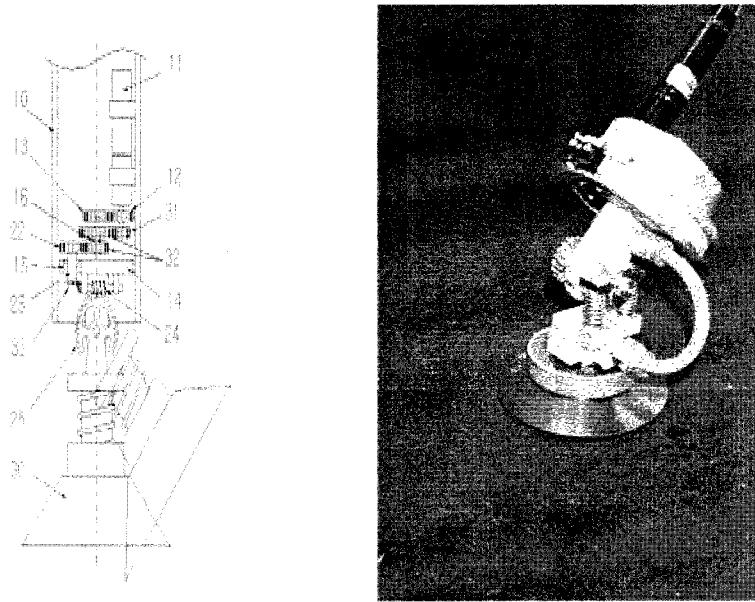


그림 3.2.3.5 한 개의 모터를 이용한 회전 2 자유도 조절 장치

진공컵(30)은 중심축의 회전에 의한 자전운동과 워름 휠(25)의 회전에 의한 선회운동이 조합되어 실제로는 나선형의 궤적을 그리며 승강 이동하게 된다. 이 때, 서보 모터에서 워름 휠까지 연결된 기어들의 기어비를 적절히 설계함으로써 중심축의 1회전당 진공컵의 상승 및 하강 각도를 최소화시켜 위치 조정정밀도를 높일 수 있다. 예를 들어, 중심 샤프트의 회전 속도와 워름 휠의 회전속도의 비가 360:1이 되도록 기어비를 설정하면, 진공컵은 중심 샤프트의 1회전당 1°의 각도씩 상승 또는 하강하게 된다. 프레스 공장의 판넬 파지용으로 사용

되는 경우 정밀한 각도 조절이 요구되지는 않으므로, 1회전당 2~3°정도가 적당하다. 한편, 공압 호스를 외부에 직접 연결할 경우 호스의 꼬임이 발생하므로, 본 시스템에서는 중심축을 중공으로 하여 내부를 공압 통로로 활용하였으며 상대 회전 운동이 발생하는 부분에는 seal이 되는 베어링을 장착하였다.

라. CAN을 이용한 모터 및 공압 개폐용 solenoid 밸브 제어

총 24 개의 모터를 위한 전선(6가닥)과 8개의 solenoid 밸브를 위한 전원선 및 신호선, 그리고 총 26개 limit switch에 필요한 전선(2 또는 3가닥)이 일반적인 방법으로 유연 그립퍼 프레임에 연결될 경우 대단히 복잡한 배선 처리가 불가피하며 각각의 모터를 제어하기 위해서는 같은 수의 앰프와 입력 채널이 필요하게 되며, 한편으로는 전선의 무게도 무시하지 못할 정도가 된다. 이와 같은 문제를 해결하고자 본 연구에서는 KIST 휴먼로봇센터에서 기개발된 CAN module을 이용하였다. 이로써 각 모터들을 직렬로 연결함이 가능해졌을 뿐 아니라 solenoid 밸브를 위한 신호선, limit switch로부터 나오는 신호선을 CAN module에 실어서 처리할 수 있어서 배선 처리가 획기적으로 간단하여지고 따라서 모터 및 배선들의 유지, 보수가 개선되었으며, 별도의 앰프의 필요성이 사라졌다.

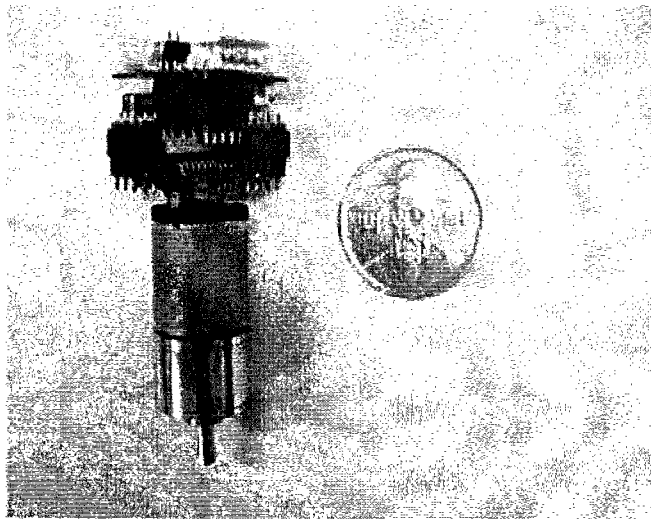


그림 3.2.3.6 일체화된 DC 모터와 모터 제어용 CAN 모듈: CAMA3.0

제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

0. KARES II 시스템 통합 및 실제 장애인을 대상으로 한 임상 실험

가. KARES II 시스템 통합을 위한 하드웨어/소프트웨어 기반 제어 구조

본 연구에서는 2단계(2000.9.-2002.8)에서의 연구 목표인 개발된 기술의 시스템 관점에서의 통합을 위해 하드웨어/소프트웨어 기반 제어 구조에 관한 기본 개념과 통합 및 작업에의 적용을 수행하였다. 그림 3.3.0.1은 현재 개발된 기술을 중심으로 한 KARES II 시스템의 하드웨어 구조를 도시한 것이다.

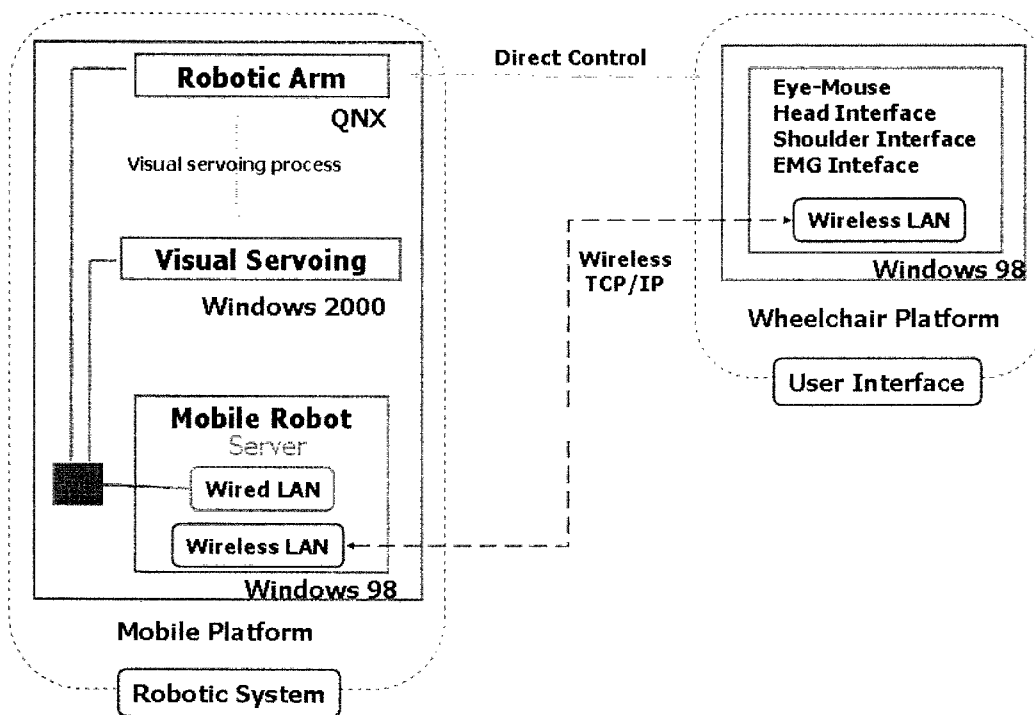


그림 3.3.0.1. KARES II 시스템의 하드웨어 구조 개념도

KARES II 시스템은 그림 1.3.0.1에 도시한 개념도의 구체적인 하드웨어 구현을 위해 그림 3.3.0.1에 도시된 바와 같이 크게 두 부분으로 나뉘어 있다.

'Robotic System'은 이동로봇 플랫폼을 기반으로 하여 이동성을 겸비한 비주얼 서보잉 기능이 통합된 로봇팔로 구성되며, 모두 3대의 PC를 기반으로 구성되어 있다. 우선 로봇

팔의 실시간 제어를 위해서는 실시간 운영체제로 잘 알려진 QNX를, 비주얼 서보잉 기능의 안정적인 동작을 위해서는 Windows NT 계열의 운영체제인 Windows 2000을 사용하고 있다. 이동로봇의 제어 및 휠체어 모듈('User Interface')과의 통신을 위해서 Windows 98을 탑재한 Biscuit PC를 채용하고 있다. 현재 이동로봇의 제어를 위해서는 한울로보틱스에서 개발한 USB 타입 2축 제어기 HWR-USB-DMC2를 사용하고 있다[28]. 3대의 PC는 소형 HUB를 통하여 유선 TCP/IP 통신 방식으로 연결되어 있으며, 구체적인 통신 방법에 관한 사항은 '나'에서 상세히 기술한다.

'User Interface'는 휠체어 플랫폼을 기반으로 하여 각종 인간-로봇 상호작용 장치를 복합적으로 탑재하고 있으며 'Robotic System'과의 정보 교환을 위해서는 무선 TCP/IP 기술이 사용되고 있다. 사용자는 장애 정도 및 사용 가능한 기능에 따라 다양한 인간-로봇 상호작용 장치를 효과적으로 사용할 수 있으며, 로봇팔의 직접적인 제어 혹은 작업 선정에 의해 기존에 정의된 12가지 작업을 효과적으로 수행할 수 있다(그림 3.3.0.2).

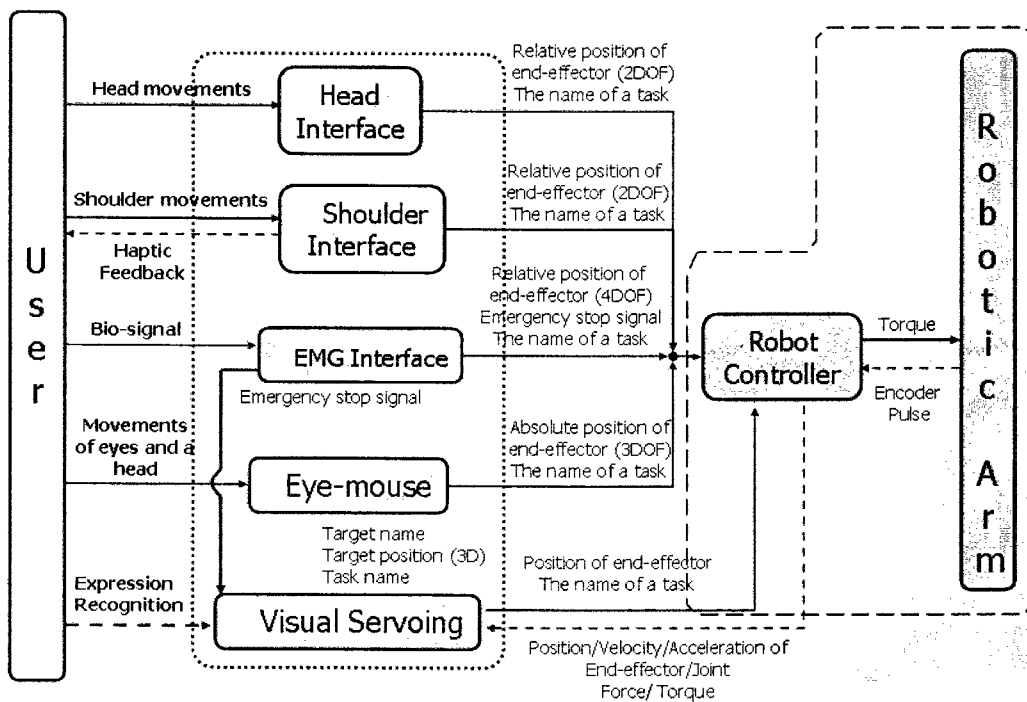


그림 3.3.0.2. KARES II 시스템과 사용자 간의 상호작용 기술 연관도

현재 KARES II 시스템의 소프트웨어적인 제어 구조는 그림 3.3.0.3과 같으며, 사용자는 GUI를 통하여 입력 인터페이스의 선정, 작업에 대한 선정을 통해 기존에 정의된 12가지 작업을 수행하거나 필요에 따라서는 로봇팔 혹은 휠체어의 직접적 제어가 가능하다.

‘OTS(Overall Task Sequencer)’는 입력 인터페이스의 선정 및 입력 인터페이스와 연관된 세부적인 ‘STS(Sub-module Task Sequencer)’와 연관되어 로봇팔의 비주얼 서보잉 기능 및 휠체어 조종을 담당한다[1].

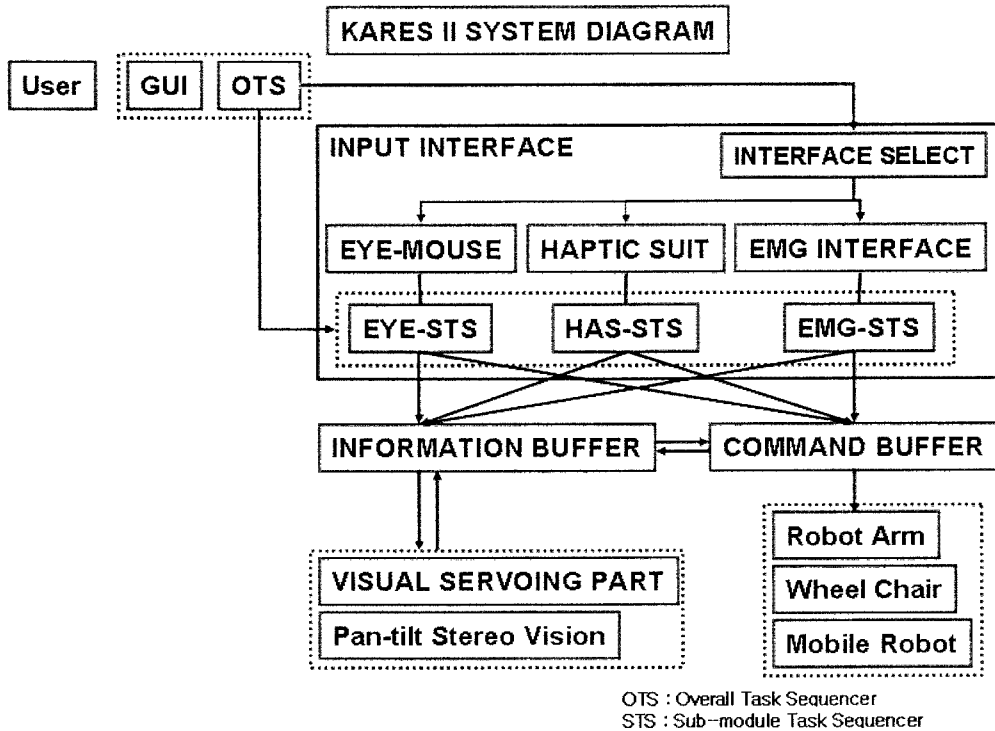


그림 3.3.0.3. KARES II 시스템의 소프트웨어 기반 제어 구조

상기 제어 구조에 의하면, KARES II 시스템은 기존에 정의된 12가지 작업을 기반으로 하여 사용자와의 상호작용을 담당하는 각종 인간-로봇 상호작용 장치 부분과 주어진 작업을 수행하기 위한 로봇팔, 비주얼 서보잉 기능을 담당하는 부분으로 크게 대별될 수 있다. 비주얼 서보잉 기능은 로봇팔과 폐루프(Closed-loop) 형태로 결합되어 영상 기반 로봇팔 제어의 근간을 이루고 있으며, 사용자는 필요한 경우 기존의 작업 시퀀스를 참조하지 않고 사용자의 의도에 따라 로봇팔을 제어하는 공유 개념의 제어 방식을 취할 수 있다(그림 3.3.0.4 참조)[29].

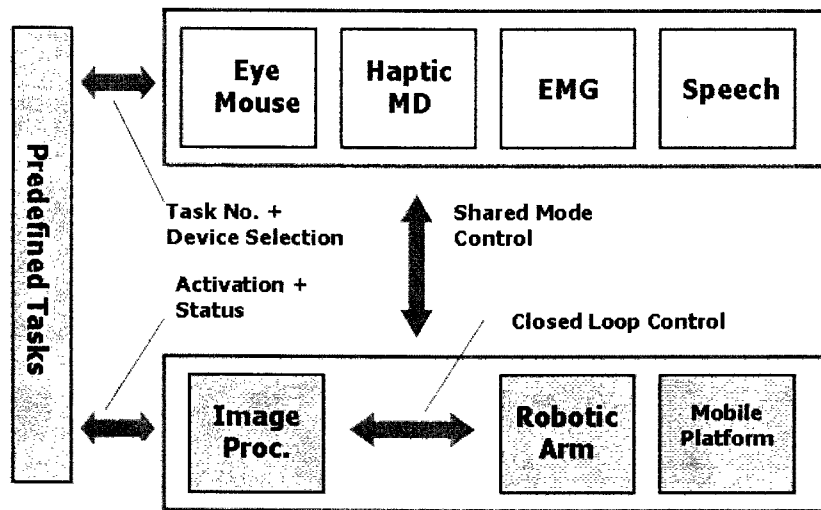


그림 3.3.0.4. KARES II 시스템의 소프트웨어 제어 구조에 대한 논리적 개념도

이러한 구조는 각 세부 연구기술(각종 인간-로봇 상호작용 장치 및 로봇팔, 비주얼 서보잉 기능 등)의 통합을 위한 바텀업(Bottom-Up) 접근 방식의 일반적인 형태로서, 작업 수의 확장이나 작업에 대한 오류 분석 등에 있어서 많은 어려움을 겪는다. 시스템 개발자의 입장에서는 작업에 대한 오류 분석의 편이성과 분석된 오류를 쉽게 수정하고 필요한 추가 작업의 구현이 용이한 구조가 많은 장점을 갖게 된다. 사용자 입장에서는 설정된 작업의 성공 여부가 중요한 요인이며 그 내부 구조에 대해 많은 정보를 알고 있을 필요가 없다. 하지만, 추가적인 작업의 추가 등의 목적을 위해서는 좀 더 체계적으로 분류된 제어 구조에 대한 연구가 필수적이다.

이러한 목적을 위해서는 다중 레이어 제어 구조(Multi-layer Control Architecture)가 가장 적합한 형태로 판단되며, 이러한 다중 레이어 제어 구조에서는 주변 환경에서 센서를 통해 얻어진 환경 정보가 Reactive Layer, Sequencer, Deliberative Layer를 거쳐 Actuator를 통해 주변 환경에 영향을 주게 된다(그림 3.3.0.5 참조).

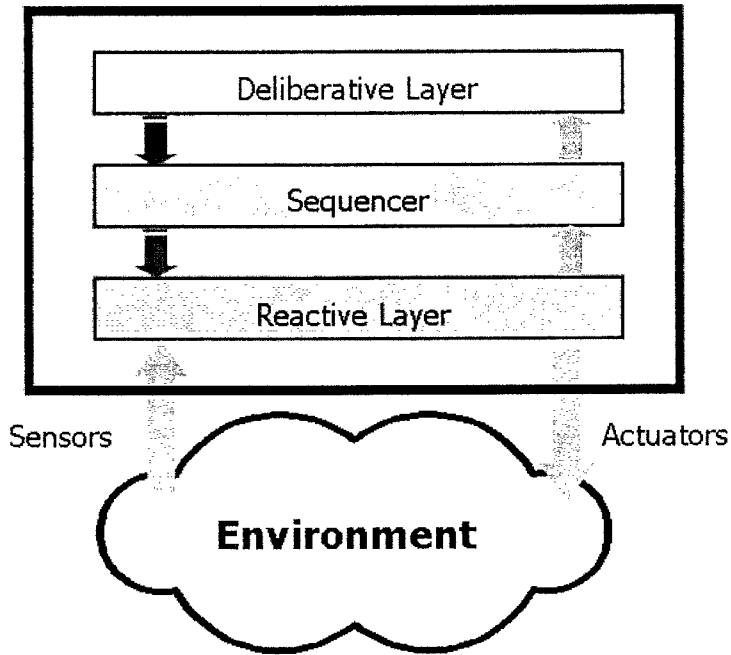


그림 3.3.0.5. 다중 레이어 제어 구조의 전형적인 형태

본 연구에서는 이러한 목적을 위하여 독일 Bremen 대학의 IAT(Institute of Automation Technology)와의 정보 공유를 통하여 새로운 제어 구조를 제안하고자 하였다⁶⁾. 기본적인 구조는 그림 3.3.0.5에 도시한 다중 레이어 제어 구조를 기반으로 하고 있으나, Deliberate Layer(혹은 Human-Machine Interface(HMI) Layer)와 Reactive Layer간의 직접 연결이 가능하다는 것에 근거하여 복합형 다중 레이어 제어 구조(Hybrid Multi-layer Control Architecture)로 명명하였다[30]. 그림 3.3.0.6은 이러한 복합형 다중 레이어 제어 구조의 전체 구조를 HMI Layer(최상위층)에 초점을 두고 도시한 것이다.

그림 3.3.0.6의 구조에서의 특징점은 **다양한 사용자 입력 인터페이스에 대하여 현재 선정된 명령(Command Context) 정보에 근거하여 명령 융합(Command Fusion), 장치 선정(Device Selection) 등의 과정을 거친 후 가상 장치(Virtual Device)라는 개념을 이용하여 하드웨어가 직접적으로 이해 가능한 형태의 명령을 생성해 내는 과정이다.** 가상 장치에서 얻어진 새로운 형태의 명령은 Sequencer로 전달되어, 현재 지정된 작업(Task)에 대한 부작업에 해당하는 세부 서비스(Service)로 분류되고 각 서비스는 그에 해당하는 하드웨어와의 직접적인 연결 통로인 Reactive Layer로 전달된다. 경우에 따라서는 정해진 작업이 아닌 사용자 의도에 따른 제어를 위해 Reactive Layer와 직접 연결되기도 한다

6) 독일 IAT에서는 휠체어 기반 재활로봇인 FRIEND 시스템에 관한 연구를 1997년부터 수행한 바 있다.

(‘Direct Control’). 각 서비스의 종료시에는 특정한 이벤트 신호가 발생하여 다음 서비스로의 진행을 가능하게 한다. 경우에 따라서는 긴급 정지 등의 의사 표현에 의해 Sequencer의 작업이 중단되는 경우도 있다.

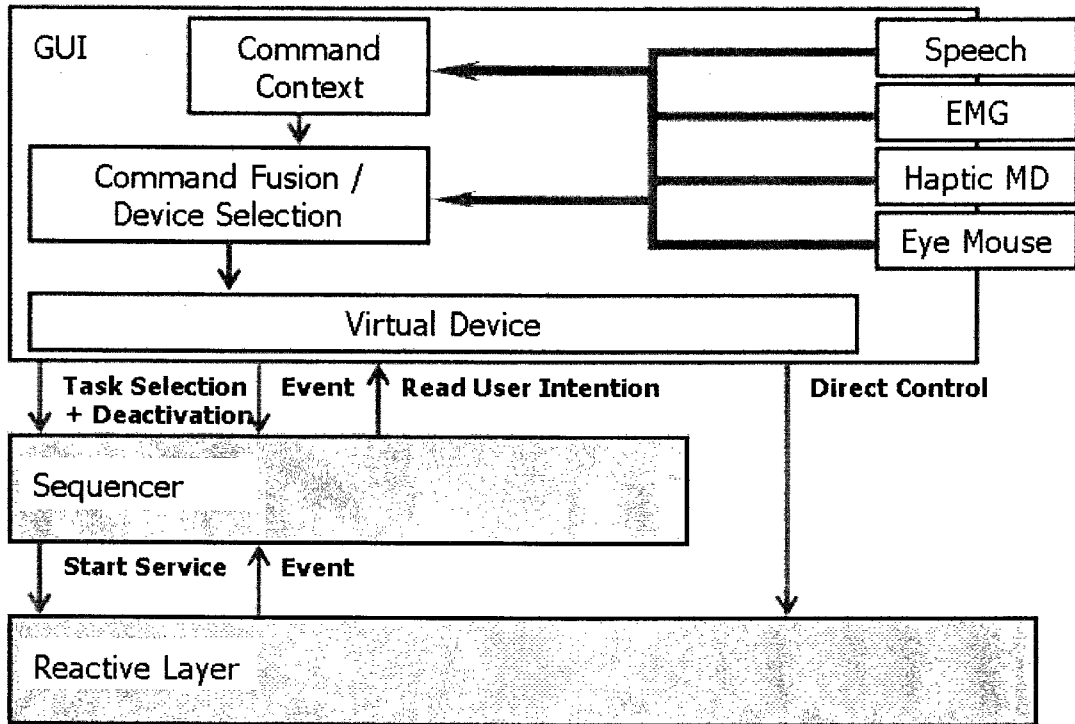


그림 3.3.0.6. 복합형 다중 레이어 제어 구조 - HMI 층

Reactive Layer는 하드웨어와 직접적으로 연결되어 상위층인 Sequencer에서 선정된 세부 서비스를 수행하기 위한 Message Router를 근간으로 한다(그림 3.3.0.7 참조).

사용자 입력 인터페이스를 통해 선정된 작업 정보를 세부 서비스로 분류하고, 이를 Reactive Layer 쪽으로 전달하는 역할은 Sequencer 층에서 수행된다(그림 3.3.0.8 참조). 이 중간 층에서는 상위의 HMI Layer의 명령 전달 이외에도 HMI Layer에서 입력되는 특정 이벤트 신호, 하위 층의 Reactive Layer에서 서비스 수행이 끝난 경우에 발생하는 이벤트 신호 등 다양한 정보가 다루어 진다.

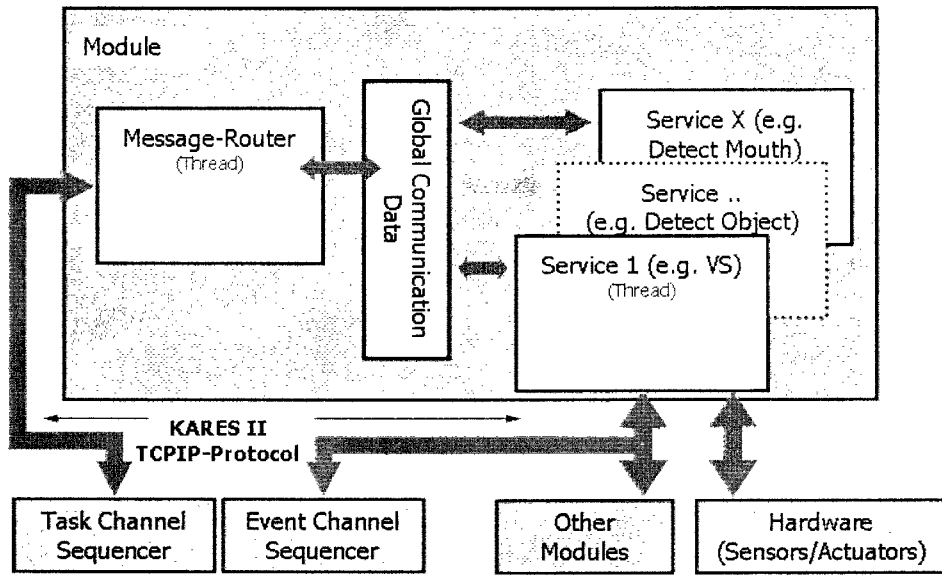


그림 3.3.0.7. 복합형 다중 레이어 제어 구조 -Reactive Layer

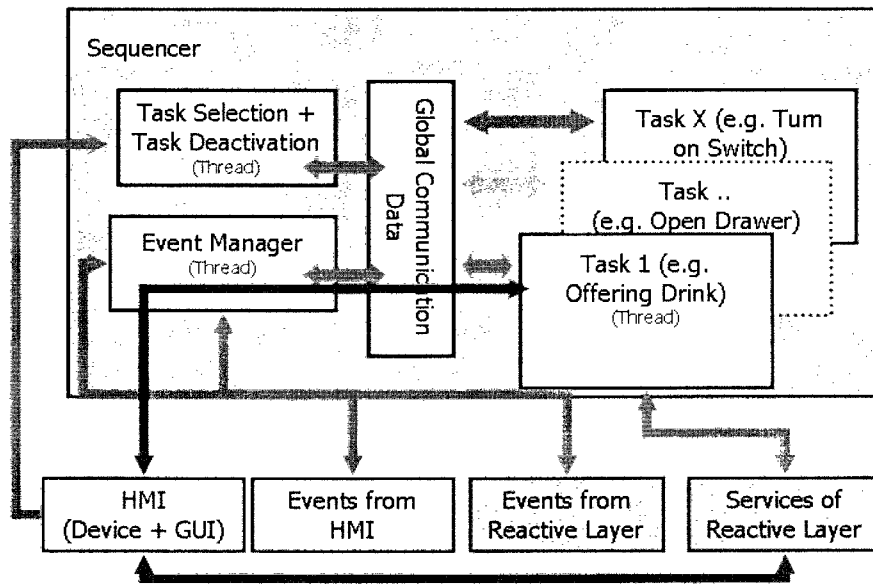


그림 3.3.0.8. 복합형 다중 레이어 제어 구조 - Sequencer

제안된 복합형 다중 레이어 구조에 의한 작업의 수행 과정을 예로 들어 그 유용성을 검토해 보았다. 12가지 기본 작업 중에서 다른 모든 작업의 수행 가능성을 포함하고 있는

‘물 마시기’ 작업에 대하여 제안된 구조 관점에서 입력 인터페이스, 작업 및 그 하부 서비스와 하드웨어 모듈을 도식적으로 연결하면 그림 3.3.0.9와 같이 표현된다. 각 서비스는 그에 할당된 하드웨어(Robot Arm 혹은 VS-Module)에 관련 명령을 전달하고, 각 Reactive 모듈에서는 할당된 서비스가 완료되면 이벤트 신호를 상위층인 Sequencer에 전달하여 작업을 수행한다. 이러한 세부 분류에 따른 제어 구조는 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 제어 구조의 전체적인 흐름을 쉽게 파악할 수 있다.
- 필요한 경우, 새로운 작업의 추가가 이전의 바텀업 구조에 비해 용이하다.
- 작업이 성공적으로 수행이 되지 못한 경우, 세부 서비스 점검이 가능하다.
- 사용자 입력 인터페이스에 무관하게 하드웨어에 적합한 형태의 명령을 생성할 수 있다.
- 단일화된 작업 시퀀스를 세부적으로 분류함으로써, 긴급 정지 등의 유연한 상황 대처가 가능하다.

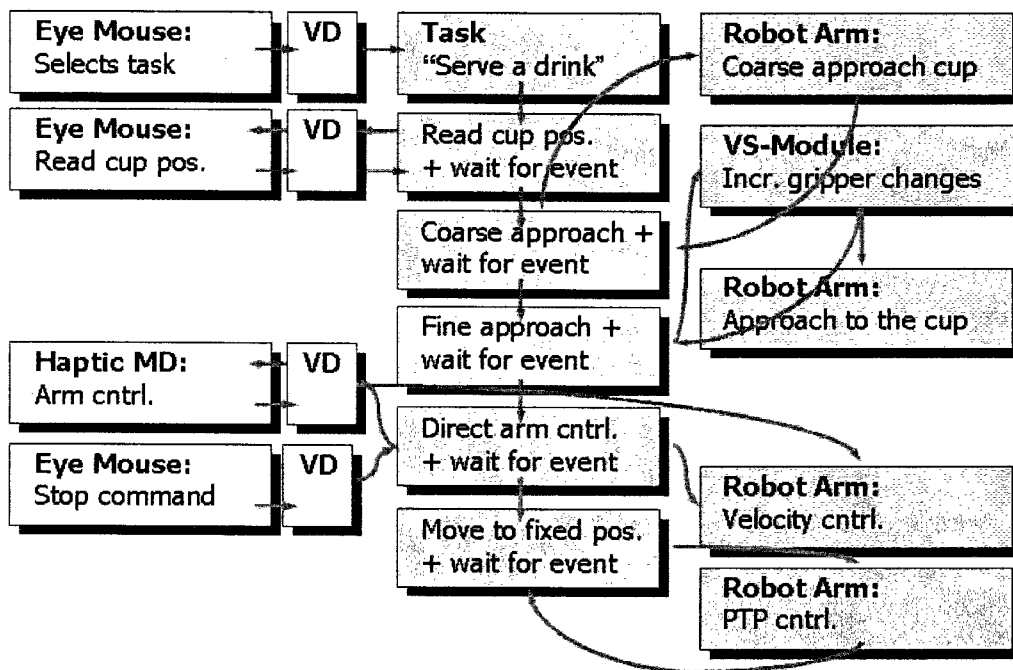


그림 3.3.0.9. 복합형 다중 레이어 제어 구조에 근거한 ‘물 마시기’ 작업의 수행

현재 KARES II 시스템은 제안된 구조와 일치하지는 않지만, 그 기본 철학을 유지한 형태로 제어 구조가 구성되어 있으며 2단계 연구에서는 주로 통신 구조에 대한 체계적 접근을 통한 작업 구현에 초점을 두고 연구가 진행되었다. 통신 구조에 관한 상세한 설명은 ‘나’에서 기술하기로 한다.

나. KARES II 시스템 통합을 위한 통신 구조

‘가’에서 제시된 제어구조를 개발된 시스템과 같이 다수의 서브모듈이 복합적으로 연결되어 있는 시스템에 적용하기 위해서는 공통으로 적용할 수 있는 통신 프로토콜을 만드는 것이 먼저 이루어져야 한다. 또한 앞서 설명된 제어구조를 적용하기 위해서는 각 모듈간의 순차적인 제어구조가 아니라, 서버를 중심으로 한 명령의 푸시-풀(push-pull) 체계가 구현되어야 한다(그림 3.3.0.10 참조).



그림 3.3.0.10 서버를 중심으로 한 명령 체계의 전환

전체 시스템의 소프트웨어 및 명령 전달 체계가 그림 3.3.0.10의 왼쪽과 같은 구조를 가질 경우, 각 인터페이스들의 효율적인 명령 조합 및 수행이 힘들고, 제어 구조를 적용하기 힘들다. 또한 작업 수행이 순차적으로 이루어지기 때문에 작업 확장 및 수행 구조의 변화가 어렵게 된다. 그리고 네트워크 장애 또는 통신 자체의 문제로 인해 발생하는 상황에 대한 자가 진단(self-diagnosis) 기능을 적용하기 힘들며, 현재 구동되고 있지 않는 모듈로부터의 긴급 정지 신호를 받아들이고 처리하기가 어려워지게 된다. 따라서 이러한 문제들을 해결하기 위해서 서버를 중심으로 하여 종합적으로 정보를 처리해 주고, 명령을 전달해 줄 수 있는 명령의 전달 체계가 구현이 되어야 하는 것이다.

표 3.3.0.1 각 모듈의 약어표

모듈명	약어
전체 모듈	ALL
서버(server)	SVR
로봇팔(robot arm)	ARM
비주얼 서보잉 모듈(visual servoing module)	VIS
아이 마우스(eye-mouse)	EYE
근전도 인터페이스(EMG interface)	EMG
햅틱 인터페이스(haptic interface)	HAS
모바일 로봇(mobile robot)	MBR
전동 휠체어(automatic wheelchair)	WHL

이를 위해 본 연구에서는 시스템의 개발 목표에 따라 정해진 12가지의 작업에 대한 시나리오를 서버를 중심으로 하는 명령의 입장에서 가능한 모든 서브 모듈의 사용 가능성을 고려하여 사용 순서를 조합한 후 가능한 명령의 전달 체계 및 명령을 분석해 보았다.

예를 들어 각 모듈의 약어를 표 3.3.0.1과 같이 표기할 때, 정의된 작업 중 면도하기(4번 작업)의 경우 명령 전달의 순서는 기본적으로 표 3.3.0.2과 같이 37단계로 나누어진다.

표 3.3.0.2 면도 작업에 대한 명령 전달 체계 시나리오

순서	발신모듈	수신모듈	내용
1	사용자	EYE	GUI를 통한 사용자의 명령 입력
2	EYE	SVR	서버에 명령전달, 작업 4번
3	SVR	MBR	보조도구 잡기 위한 정해진 위치로 이동, 작업 3번의 1번 정의 동작
4	MBR		정해진 위치로 이동
5	MBR	SVR	위치 보정을 위한 정보 요청, Target(MBR)의 기준축(BASEframe)에 대한 절대(ABS)위치 요청
6	SVR	EYE	EYE로의 정보 전달 요청
7	EYE	사용자	Vision을 통한 내부 연산 또는 사용자의 입력으로부터 모바일 로봇의 위치 정보 획득
8	EYE	SVR	위치 및 각도 정보 전달
9	SVR	MBR	위치 및 각도 정보 전달
10	MBR	SVR	이동 동작 완료 통지(작업 4번의 1번 정의 동작)
11	SVR	ARM	물건 잡기 명령(보조구 : 면도기), 작업 4번의 1번 정의 동작
12	ARM		보조도구 잡기 작업 수행
13	ARM	SVR	잡기 작업 완료 통지
14	SVR	ARM	닦기(긋기, 면도)를 위한 기본 위치(사용자 근처)로의 이동 명령, 작업 4의 2번 동작
15	ARM	SVR	초기위치 이동을 위한 얼굴 위치 정보 요청
16	SVR	VIS	초기위치 이동을 위한 얼굴 위치 정보 요청
17	VIS		얼굴 위치 정보 추출
18	VIS	SVR	위치 및 각도 정보 전달(요청한 option에 따른 얼굴의 위치 정보)
19	SVR	ARM	위치 및 각도 정보 전달
20	ARM		위치 정보에 기반한 사용자 근처로의 이동
21	ARM	SVR	이동 동작 완료 통지, 작업 4의 2번 정의 동작
22	사용자	EYE	세부조정 Command
23	EYE	SVR	서버의 작업 4번의 지정작업 1번(세부조정 작업)
24	SVR	HAS	햅틱의 데이터 수집 요청, 4번 작업의 경우1번 데이터 분류 요청(여러가지 경우가 있을 경우)
25	HAS	SVR	작업 4번의 경우 1번에 대한 분류 결과 통지
26	SVR	ARM	분류결과에 따른 이동 명령 통지(속도제어), 또는 분류결과에 따른 이동 명령 통지(정해진 동작:가깝게,정지,멀게)
27	사용자	EYE	세부조정 정지 Command
28	EYE	SVR	세부조정 정지 Command
29	SVR	HAS	햅틱의 작업 4번 경우 1의 데이터 수집 및 분류 정지
30	SVR	ARM	면도 작업 지시, 4번 작업의 7번 정의 동작
31	ARM		면도 작업
32	ARM	SVR	4-7 작업 완료 통지
33	SVR	ARM	보조구를 원위치로 옮기도록 지시, 4번 작업의 8번 정의 동작
34	ARM		보조구 원위치 및 초기 위치로 이동
35	ARM	SVR	4-8 작업 완료 통지
36	SVR	ALL	동작 완료 통지
37	EYE	사용자	동작 완료 통지(GUI)

표 3.3.0.2 및 나머지 11개의 작업에 대해서도 이와 같이 분석을 통하여 필요한 명령을 정리해보게 되면, 명령의 종류는 크게 ‘SET(명령 및 설정)/REQUEST(요청)/RETURN(반환)/NOTIFY(통지)’ 네 가지로 분류되며, 세부적인 명령까지 고려하게 되면, 다음의 그림 3.3.0.11과 같은 다단계 구조를 가지게 된다.

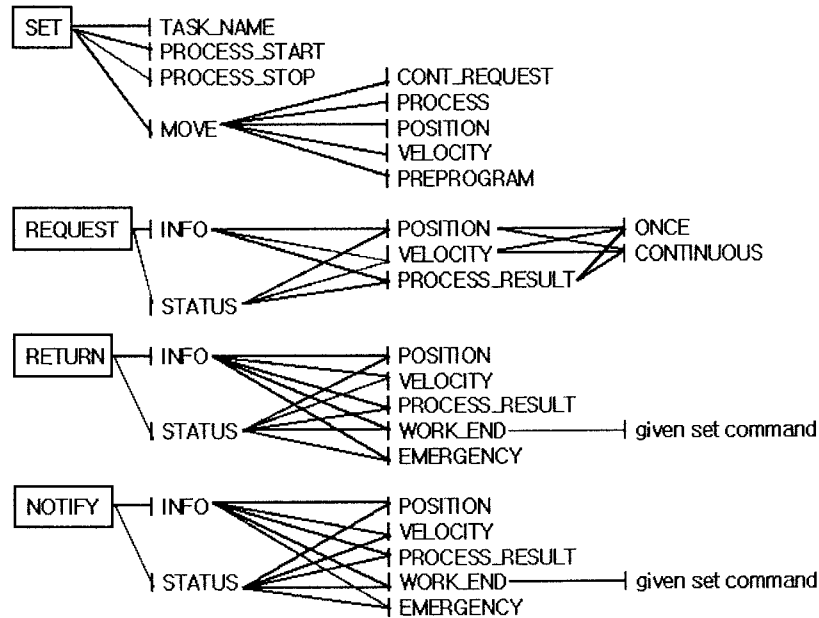


그림 3.3.0.12 다단계 명령 구조

이러한 체계를 가지는 명령의 조합을 공유하게 되면, 각각의 서브 모듈에서 새로운 기능 또는 내용이 개발되었다고 하더라도 명령을 보내는 틀 이내의 범위에서 제어가 되기 때문에 작업의 확장이 용이해지고 객체 지향적인 프로그래밍 및 시스템 개발이 가능해지게 된다. 그림 3.3.0.12에서 보이는 다단계 명령 구조를 보내기 위해 명령어는 네가지의 컴포넌트(component)로 구성되며, 그림 3.3.0.13에서 보는바와 같다.

Primitive	Command #1	Command #2	Command #3
-----------	------------	------------	------------

그림 3.3.0.13. 명령어 구조

명령어 집합은 최소한 Primitive 컴포넌트와 Command#1 컴포넌트를 가지게 된다. 그리고 명령에 대한 부가 설명이 필요할 경우 Command#2, Command #3가 붙을 수 있다. 이것으로서 각 클라이언트-클라이언트, 서버-클라이언트간의 정보 전달 및 요청에 대한 명령은 주어진 명령 체계로 모두 처리를 할 수 있게 된다. 그리고 이러한 명령어의 전달은

TCP/IP를 통해서 이루어지게 되고, 데이터 타입은 그림 3.3.0.14와 같은 KARES IIProtocol 구조체를 설정하여 사용하였다. 여기서 Parity 변수는 네트워크 장애로 발생할 수 있는 문제를 해결하기 위해 체크를 하는 parity bit로 사용을 하게 되고, SendID 및 ReceiveID는 각 모듈에게 할당된 일련 번호로서 명령의 출발지와 도착지를 명시한다.

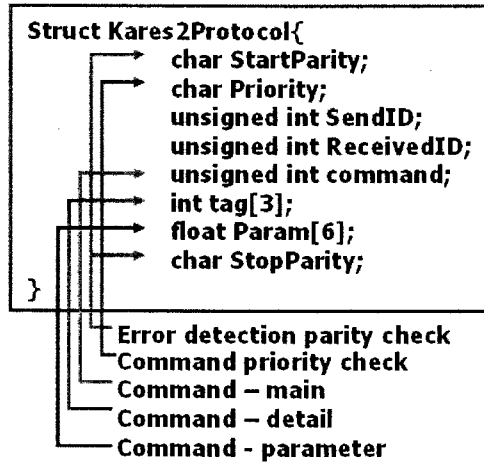


그림 3.3.0.14. KARES II Protocol 구조체

KARES II Protocol 구조체에서 command로 설정이 된 부분이 앞에서 설명한 명령이 되며, 그림 3.3.0.15와 같이 비트별로 정의가 되어 각 명령의 조합으로 SET|TASK_NAME 등과 같이 사용되게 된다.

```

#define SET 0x80000000
#define REQUEST 0x40000000
#define RETURN 0x20000000
#define NOTIFY 0x10000000

#define TASK_NAME 0x08000000
#define PROCESS_START 0x04000000
#define PROCESS_STOP 0x02000000
#define MOVE 0x01000000

#define INFO 0x00800000
#define STATUS 0x00400000

#define POSITION 0x00080000
#define VELOCITY 0x00040000
#define PREPROGRAM 0x00020000

#define PROCESS_RESULT 0x00008000
#define EMERGENCY 0x00004000
#define WORK_END 0x00002000

#define PROCESS 0x00000800
#define CONT_REQUEST 0x00000400

#define CONTINOUS 0x00000080
#define ONCE 0x00000040
  
```

그림 3.3.0.15 명령어 셋(set)의 정의

여기서 tag[3] 및 Param[6]은 명령 또는 반환값에 대한 부가적인 정보를 나타내 주기 위해 사용된다. tag변수는 tag[0],[1],[2]가 각각 명령에 따라 부가 명령을 나타내는 것으로서 명령이 제어에 대한 것일 경우 대상 객체(target), 절대/상대 기준축(absolute/relative), 기준축 명(coordinate name)을 의미하게 되며, 명령이 정의 작업(preprogrammed control) 일 경우는 tag[0], [1]이 각각 정의 작업, 정의 작업에서의 동작의 일련 번호를 의미한다. Param은 각 명령에 대한 Parameter를 넘겨주기 위한 것으로서 위치의 경우 위치(3 DOF) 및 방위(3DOF) 의 정보, 속도에 해당하는 경우 또한 마찬가지로 6개의 변수를 가지게 된다.

SET 명령은 대상 클라이언트에게 명령을 전달하는 경우에 사용되며, REQUEST는 대상 클라이언트에게 정보를 요청하는데 사용된다. RETURN은 정보 요청에 대한 반환 값 및 명령에 대한 작업 완료 통지 기능에 사용되며, NOTIFY는 요청하지 않은 정보 및 명령에 대해서 클라이언트 자신의 필요 또는 판단에 의해 정보를 넘겨주는 데 사용된다. 이러한 것을 바탕으로 표 3.3.0.2에서 나타난 시나리오에 대해서 명령어 조합을 다시 만들어 보면 다음과 같다(표 3.3.0.3).

지금까지 설명된 통신 프로토콜 및 명령어 체계를 기반으로 Kares 2 시스템에 제어 구조가 만들어지게 되며, 이러한 기본적인 체계를 가짐으로서 각 모듈에 대한 개발은 독립적으로 생각하고 전체의 시스템 구조를 만들 수 있게 되며, 구조의 확장 및 수정이 용이하게 된다.

표 3.3.0.3 면도 작업에 대한 명령어 전달 예

순서	발신모듈	수신모듈	명령어	Tag[3]	Param[6]
1	사용자	EYE	GUI		
2	EYE	SVR	SET|TASK_NAME	Tag[0]=4	
3	SVR	MBR	SET|MOVE|PREPROGRAM	Tag[0]=4, Tag[1]=1	
5	MBR	SVR	REQUEST|INFO|POSITION	Tag[0]=MBR, Tag[1]=ABS, Tag[2]=MBR_BASE	
6	SVR	EYE	REQUEST|INFO|POSITION	Tag[0]=MBR, Tag[1]=ABS, Tag[2]=MBR_BASE	
8	EYE	SVR	RETURN|INFO|POSITION	Tag[0]=MBR, Tag[1]=ABS, Tag[2]=BASE	Param[0]=x, Param[2]=y, Param[3]=a
9	SVR	MBR	RETURN|INFO|POSITION	Tag[0]=MBR, Tag[1]=ABS, Tag[2]=BASE	Param[0]=x, Param[2]=y, Param[3]=a
10	MBR	SVR	NOTIFY|STATUS|WORK_END| MOVE|PREPROGRAM	Tag[0]=4, Tag[1]=1	
11	SVR	ARM	SET|MOVE|PREPROGRAM	Tag[0]=4, Tag[1]=1	
13	ARM	SVR	NOTIFY|STATUS|WORK_END| MOVE|PREPROGRAM	Tag[0]=4, Tag[1]=1	
14	SVR	ARM	SET|MOVE|PREPROGRAM	Tag[0]=4, Tag[1]=2	
15	ARM	SVR	REQUEST|INFO|POSITION	Tag[0]=USR_FACE, Tag[1]=RES, Tag[2]=ARM_TOOL	
16	SVR	VIS	REQUEST|INFO|POSITION	Tag[0]=USR_FACE, Tag[1]=RES, Tag[2]=ARM_TOOL	
18	VIS	SVR	RETURN|INFO|POSITION	Tag[0]=USR_FACE, Tag[1]=RES, Tag[2]=ARM_TOOL	Param[0]=x, Param[2]=y, Param[3]=z Param[0]=a, Param[2]=b, Param[3]=r
19	SVR	ARM	RETURN|INFO|POSITION	Tag[0]=USR_FACE, Tag[1]=RES, Tag[2]=ARM_TOOL	Param[0]=x, Param[2]=y, Param[3]=z Param[0]=a, Param[2]=b, Param[3]=r
21	ARM	SVR	NOTIFY|STATUS|WORK_END| MOVE|PREPROGRAM	Tag[0]=4, Tag[1]=2	
23	EYE	SVR	SET|TASK_NAME|PREPROGRAM	Tag[0]=4, Tag[1]=1	
24	SVR	HAS	SET|PROCESS_START	Tag[0]=4, Tag[1]=1	
25	HAS	SVR	NOTIFY|INFO|PROCESS_RESULT	Tag[0]=4, Tag[1]=1	Param[0]=+1.0
26	SVR	ARM	SET|MOVE|VELOCITY		Param[0]=vx, Param[1]=vy, Param[2]=vz Param[0]=va, Param[1]=vb, Param[2]=vr
28	EYE	SVR	SET|TASK_NAME|PREPROGRAM	Tag[0]=4, Tag[1]=2	
29	SVR	HAS	SET|PROCESS_STOP	Tag[0]=4, Tag[1]=1	
30	SVR	ARM	SET|MOVE|PREPROGRAM	Tag[0]=4, Tag[1]=7	
32	ARM	SVR	NOTIFY|STATUS|WORK_END| MOVE|PREPROGRAM	Tag[0]=4, Tag[1]=7	
33	SVR	ARM	SET|MOVE|PREPROGRAM	Tag[0]=4 Tag[1]=8	
35	ARM	SVR	NOTIFY|STATUS|WORK_END| MOVE|PREPROGRAM	Tag[0]=4 Tag[1]=8	
36	SVR	ALL	NOTIFY|STATUS|WORK_END| TASK_NAME	Tag[0]=4	

다. KARES II 시스템의 Robotic System 및 User Interface 부분의 구현

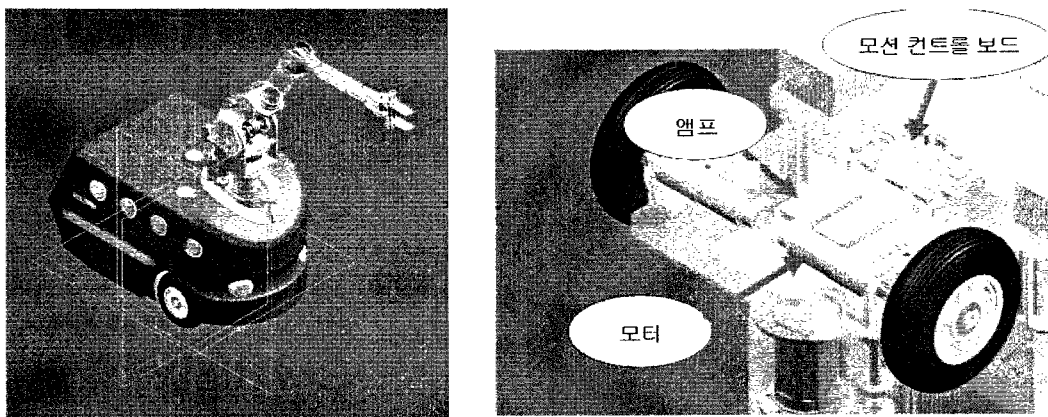
① Robotic System 구현을 위한 이동로봇의 제작

KARES II의 이동로봇 부분은 12가지 기본 작업을 보조하기 위한 수단으로써 필요하며, 자율주행이나 전방향(Omnidirectional) 구동 기능 등 최근 이동로봇 자체에 관해 많이 연구되는 기능에 대한 고려는 필요하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 원격 제어 기반의 일반적인 Caster 매커니즘 형태의 이동로봇과 로봇팔, 비주얼 서보잉 기능 등을 포함한 독립형 시스템 구성에 초점을 맞추고 이동로봇의 제작이 진행되었다. 표 3.3.0.4은 본 연구에서 제작한 이동로봇의 제원(Specification)을 나타낸다.

표 3.3.0.4. 이동로봇의 SPECIFICATION

항목	내역
크기 (mm)	536×500×920 (W×H×L)
모터	Maxon 150W, 48V, 43:1 감속비 ×2
구동부 감속기	5:1 감속비
최대 Payload	80kg
공급 전원	1kWh
최대 속도	0.5m/sec
구동 매커니즘	2 wheel + 1 caster (non-omnidirectional)
구동 방법	원격 제어 기반 (non-autonomous)

그림 3.3.0.16은 이동로봇의 외형 및 하단부의 2 Wheel 제어를 위한 모션 컨트롤 보드 및 모터, 앰프의 배치를 보이고 있다.



(a) 이동로봇의 외형

(b) 이동로봇 구동부의 배치

그림 3.3.0.16. 이동로봇의 외형 및 구동부 배치

그림 3.3.0.17는 이동로봇과 휠체어를 나란히 배치한 개념도를 보이고 있다. 이동로봇은 휠체어 사용자와의 높이 조화 및 작업 가능성을 충분히 검토하여 그 크기가 결정되었음을 알 수 있다.

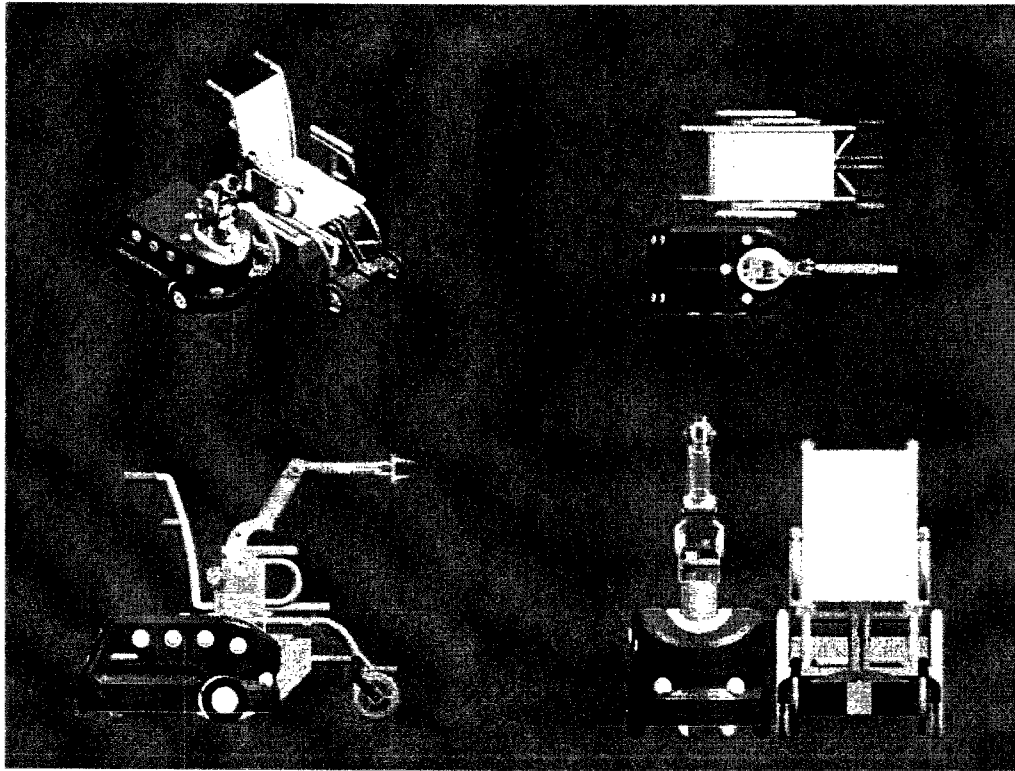


그림 3.3.0.17. 이동로봇과 휠체어가 나란히 배치된 개념도

기준에 정의된 12가지 작업의 원활한 수행을 위하여, 주변 바닥 및 휠체어 반대편 손잡이까지의 로봇팔의 운동 영역을 확보하는 것도 이동로봇의 크기 및 로봇팔의 배치에 매우 중요한 요인으로 감안되었다(그림 3.3.0.18).

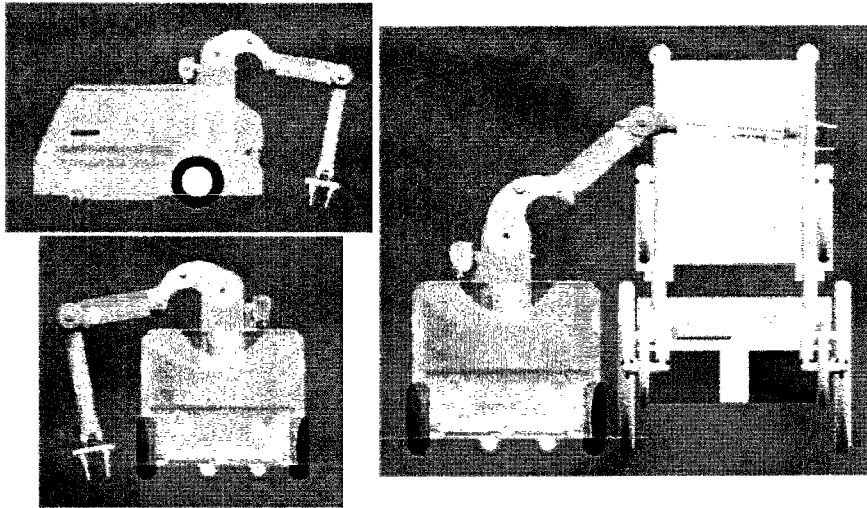


그림 3.3.0.18. 로봇팔 작업영역 확인(주변 바닥, 휠체어 반대편 손잡이)

제작된 이동로봇의 내부 상태 모니터링은 후면부에 배치된 6.3" LCD 모니터를 통하여 확인할 수 있다. 내부적으로는 다른 부품의 배치에 영향을 받지 않도록 가장 후면부에 배치하는 것이 좋은 것을 감안하여 제작되었다(그림 3.3.0.19).

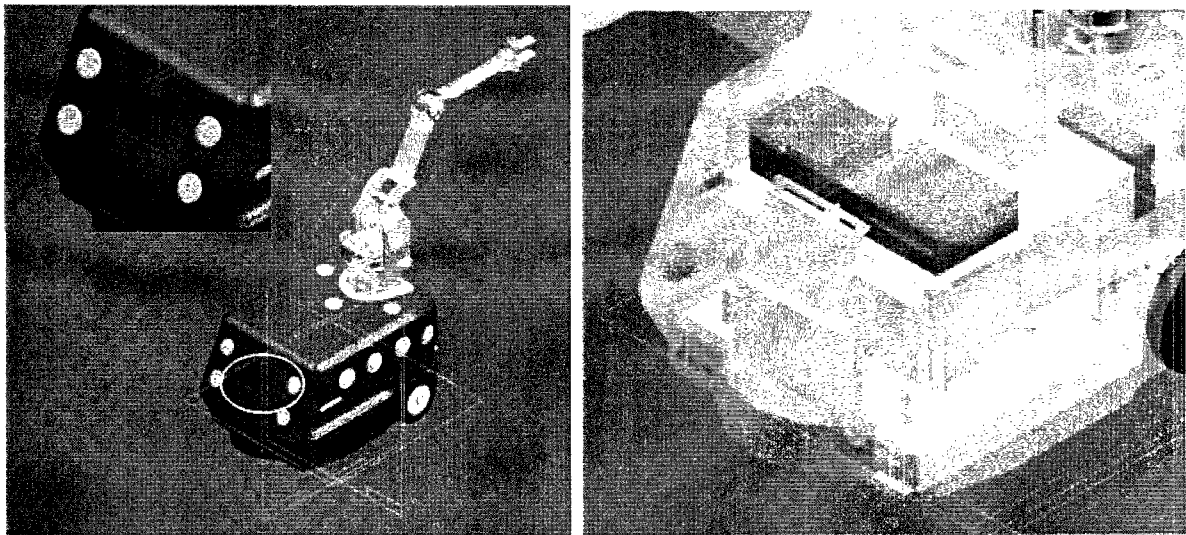
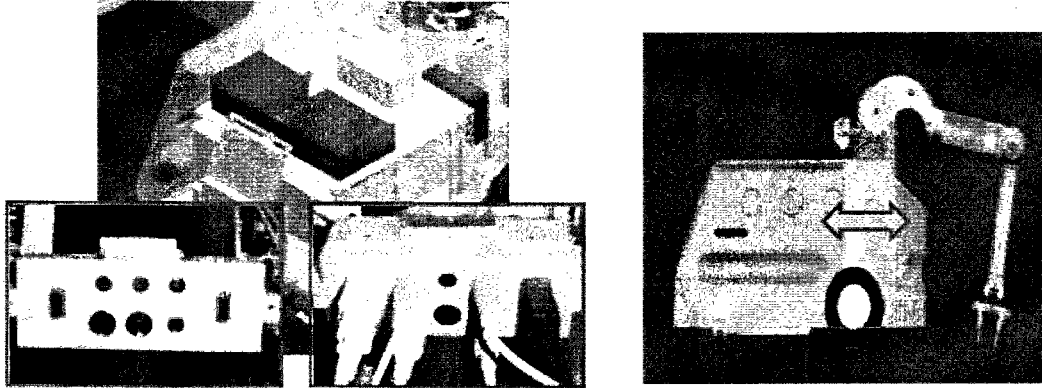


그림 3.3.0.19. 이동로봇 후면부에 배치된 6.3" LCD 및 내부부품과의 배치도

이상의 기본적인 이동로봇 구조는 12가지 작업을 수행하기 위한 최소의 조건을 만족하고 있으나, 현재 개발중인 시스템인 것을 감안하였을 때 여러 가지 면에 대한 보완이 필요하였다.

우선, 시스템 개발자가 내부 상태 모니터링 및 소프트웨어적 기능 구현을 위해 키보드,

마우스 및 모니터 등을 연결할 때 필요한 외부 I/O 인터페이스가 후면 하단부에 그림 3.3.0.20(a)와 같이 부착되었다. 또한, 이동시 로봇팔의 흔들림 현상은 실제 로봇팔을 이용한 작업시 안정성(Stability)을 저하하는 요인으로 작용하므로 그림 3.3.0.20(b)와 같이 내부 지지프레임을 적용함으로써 안정성 상승의 효과를 가져올 수 있다.



(a) 이동로봇 후면부

(b) 내부 지지프레임

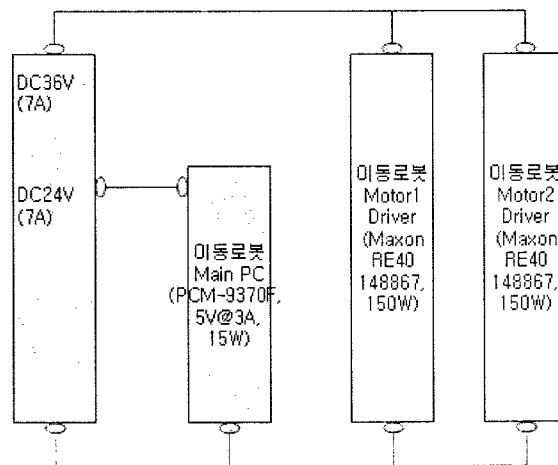
그림 3.3.0.20. 이동로봇 후면부와 내부 지지프레임

표 3.3.0.5는 현재 구현된 이동로봇의 내부 전력에 관한 사항을 종합적으로 정리한 것이다. 또한, 그림 3.3.0.21은 내부 전력에 관한 블록도를 이동로봇, DC전원으로 구동되는 시스템, AC전원을 사용하는 시스템으로 대별하여 도시한 결과를 보이고 있다⁷⁾.

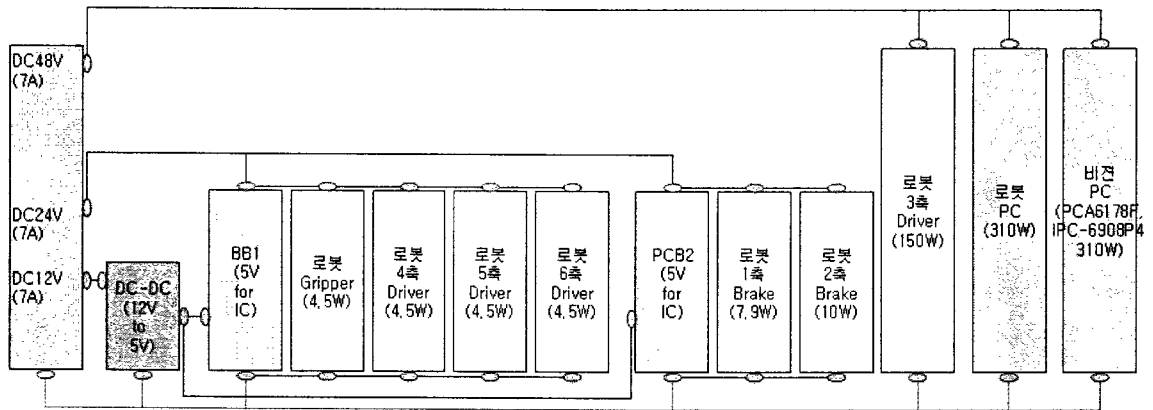
7) 현재 이동로봇 내부에 탑재된 로봇팔은 1, 2축 모터를 AC 구동 방식 모터를 사용하고 있다. 이것은 새롭게 적용된 Cable mechanism의 특성상 높은 감속비를 얻기 어렵고 큰 torque를 내기에는 DC 모터 자체의 크기가 문제가 되기 때문이다.

표 3.3.0.5. 이동로봇 내부의 전력 상세 내역

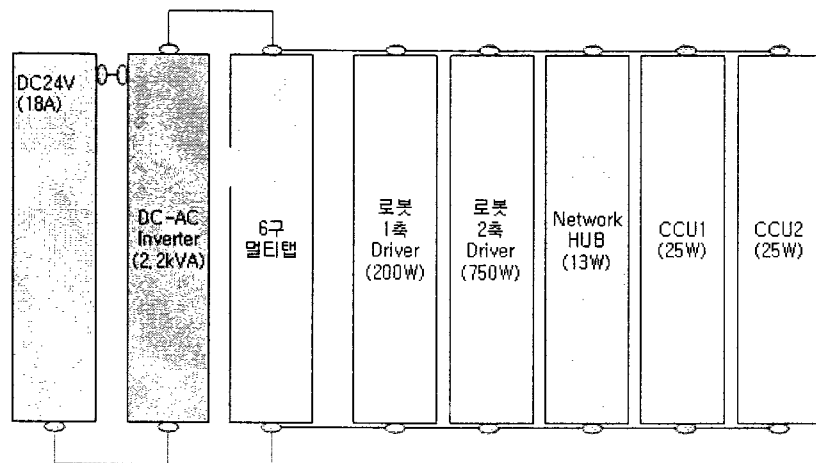
필요 전압 (DC배터리)	해당 부품	필요 전력	필요 전압 (DC 공급 전원, KAIST측 자재)	수량	비고
DC 48V	비전 PC	310W, -48V	48V (2x 30V,5A) 300W	1	구입 가능한 DC 전원.
	로봇 PC	150W	48V (2x 30V,5A) 300W	1	*현재 310W 사용.
	로봇팔 3축 Driver	150W	48V	1	1차 버전
DC 36V	이동로봇 구동부	150W	외부 전원 공급 곤란 (이동)	2	
DC 24V	로봇팔 1축 Brake	7.9W	24V (SMPS, 0.3~1.8A) 5V (Bread board)	1	5V 독립적으로 공급 가능성 검토 중.
	로봇팔 2축 Brake	10W		1	
	이동로봇 PC	15W (5V, 3A)	24V (SMPS, 4.5A)	1	PCM-9370F
	로봇팔 4축 Driver	4.5W	24V (SMPS, 1.8A)	1	
	로봇팔 5축 Driver	4.5W		1	
	로봇팔 6축 Driver	4.5W		1	
	로봇팔 Gripper	4.5W		1	
AC (인버터)	Camera Control Unit (CCU)	25W (12V, 2.08A)	12V, 2.08A, DC Adapter	2	Hirose HR10A/7P/6S 대체 가능
	Network HUB	13W (0.3A)	0.3A, Direct Cable	1	Corega, FSW-8L
	로봇팔 1축 Driver	200W	3-phase 200 to 230V AC 50/60Hz or 1-phase 230V AC 50/60Hz	1	Motor : HC-MPS23B Driver : MR-J2S-20A
	로봇팔 2축 Driver	750W	1축과 동일함.	1	Motor : HC-MPS73B Driver : MR-J2S-70A



(a) 이동로봇 관련 배선도



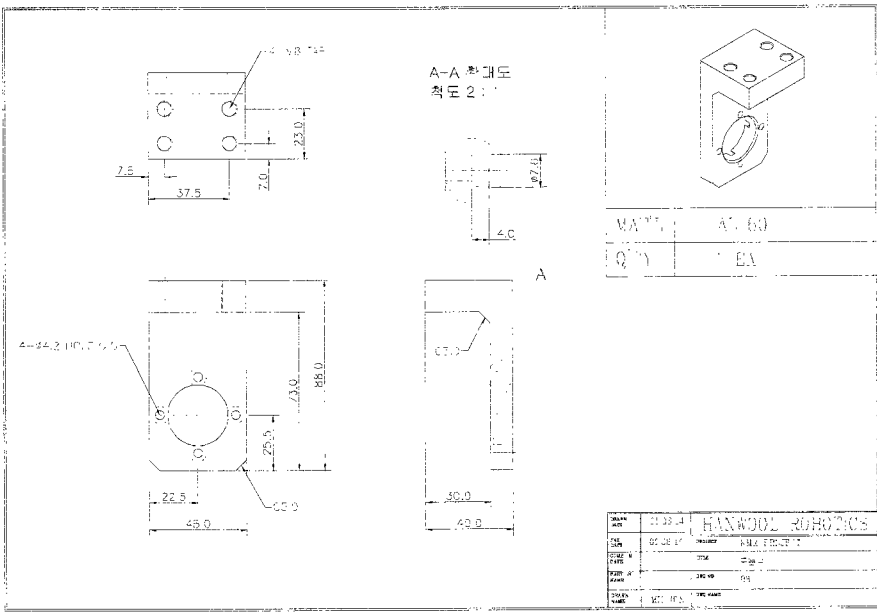
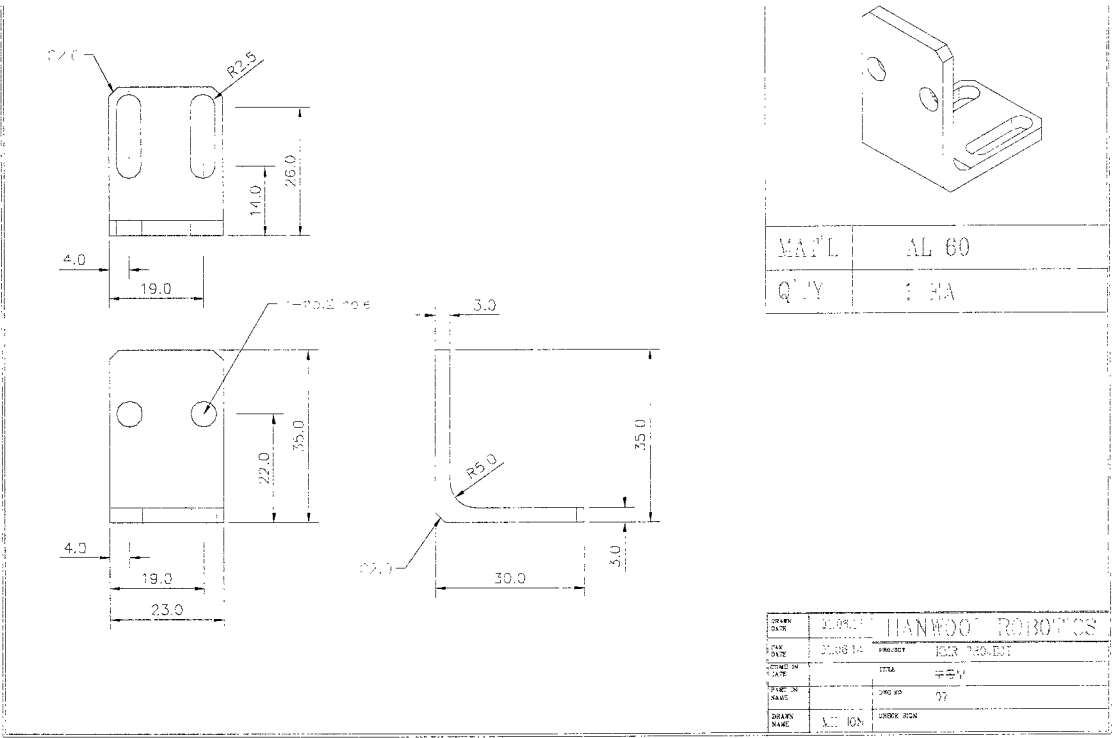
(b) DC 전원 구동 시스템

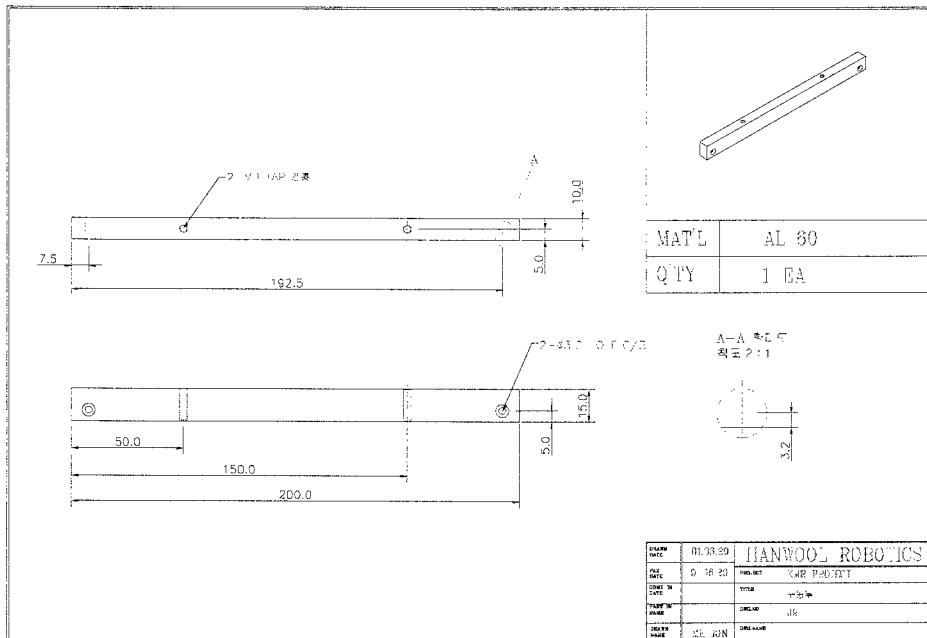
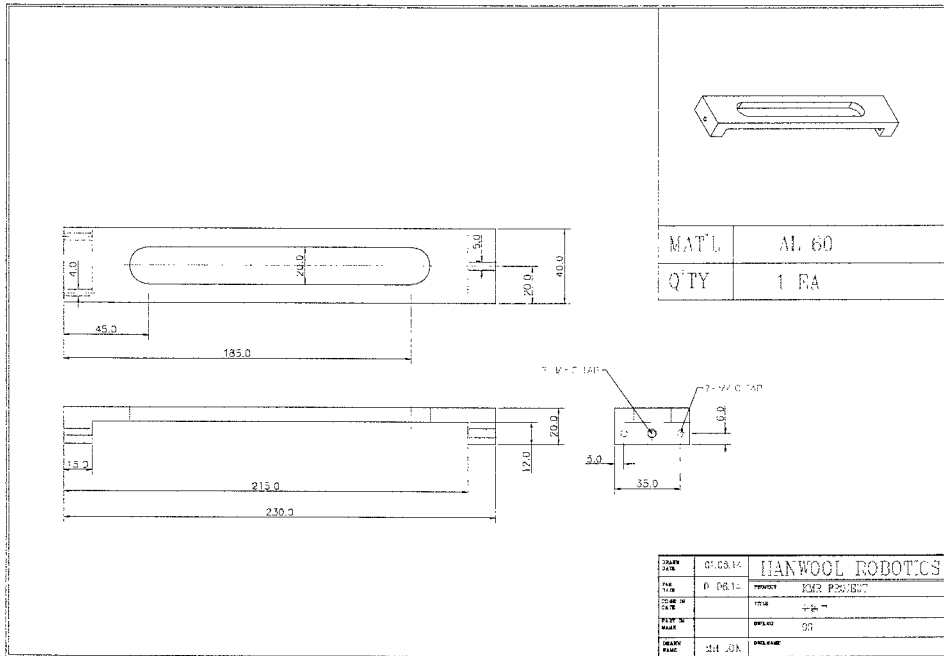


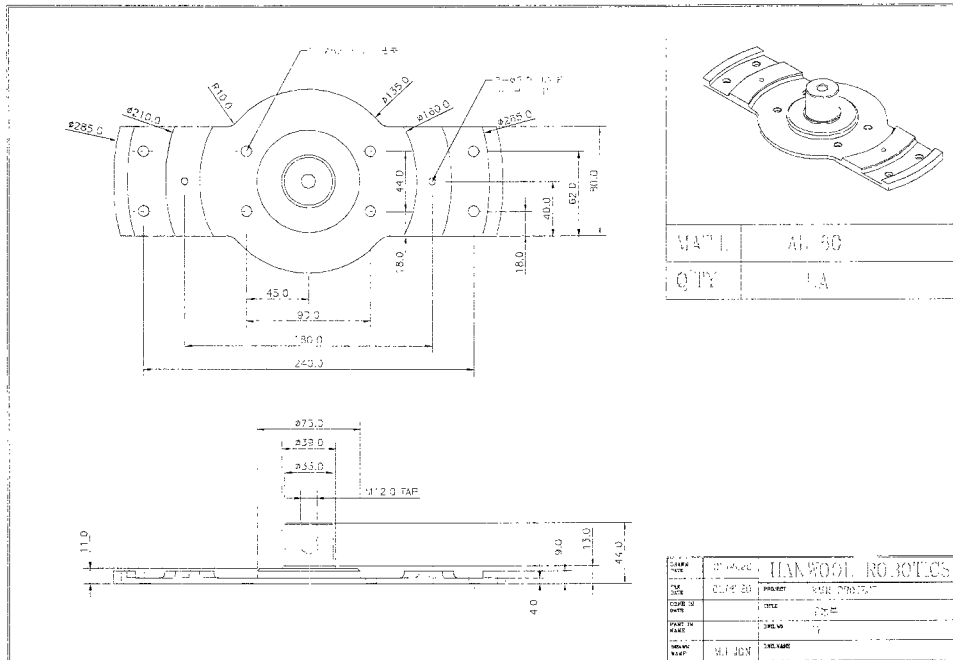
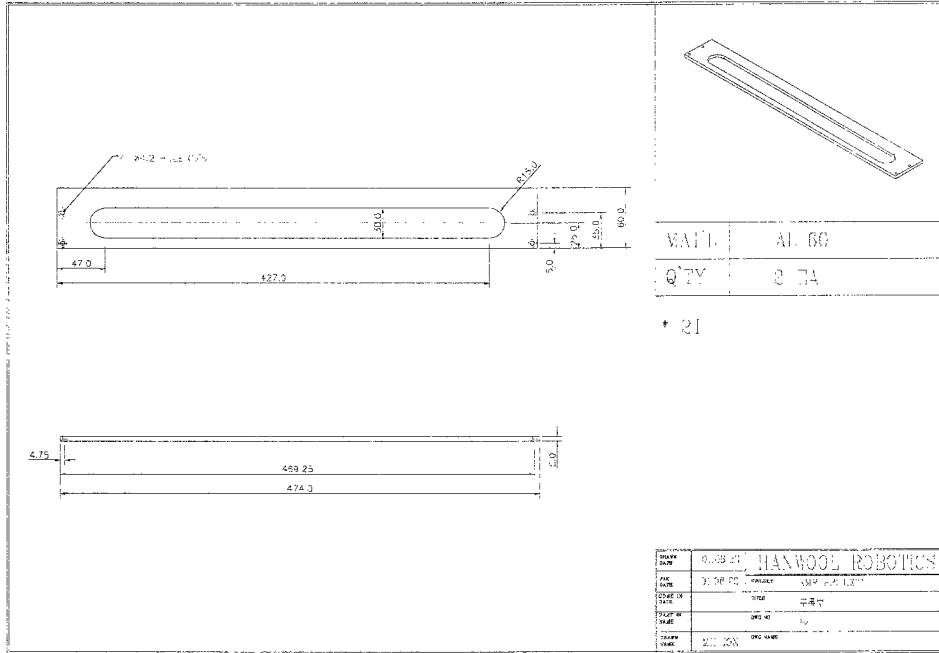
(c) AC 전원 구동 시스템

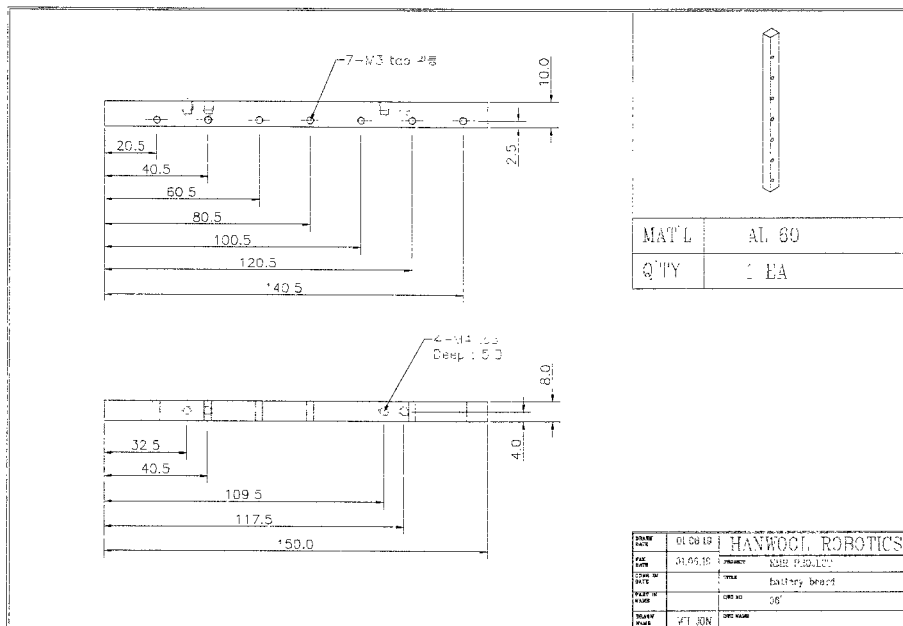
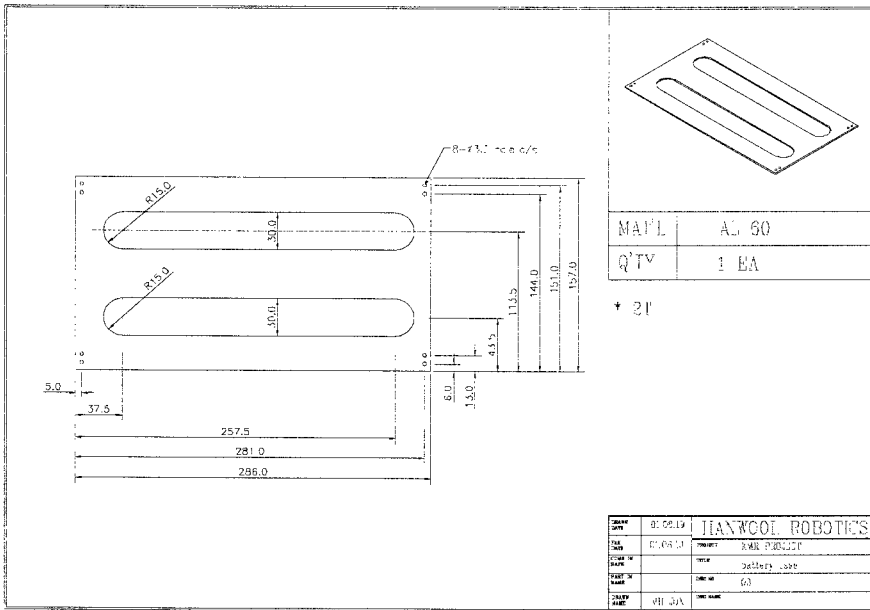
그림 3.3.0.21. 이동로봇 내부 탑재 시스템에 대한 전력 배선도
 다음 그림들은 이동로봇의 제작시 사용된 주요 부품에 대한 도면을 첨부한 것이다⁸⁾.

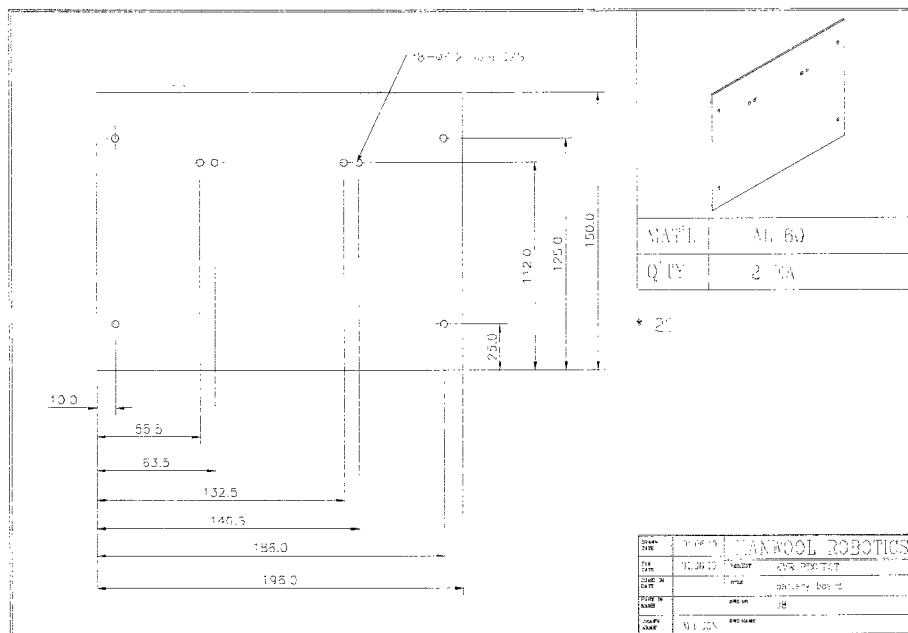
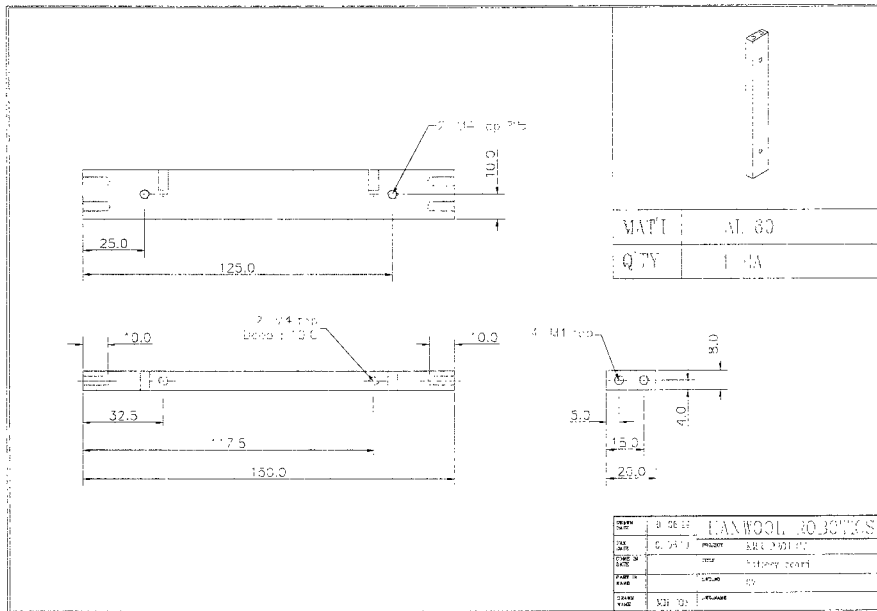
8) 자료 참조: 한울로보틱스 로봇설계팀.

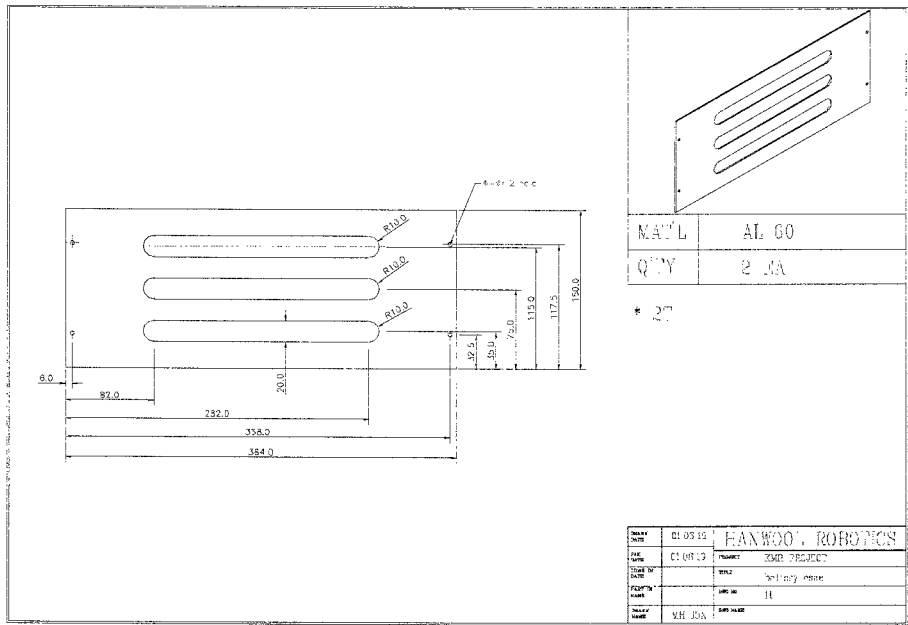
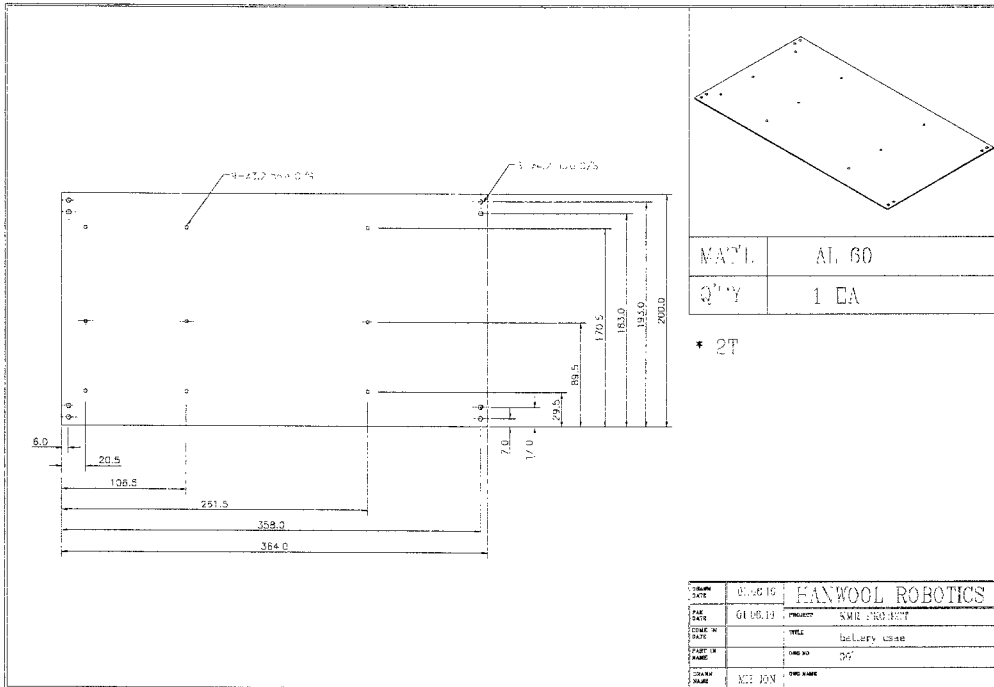


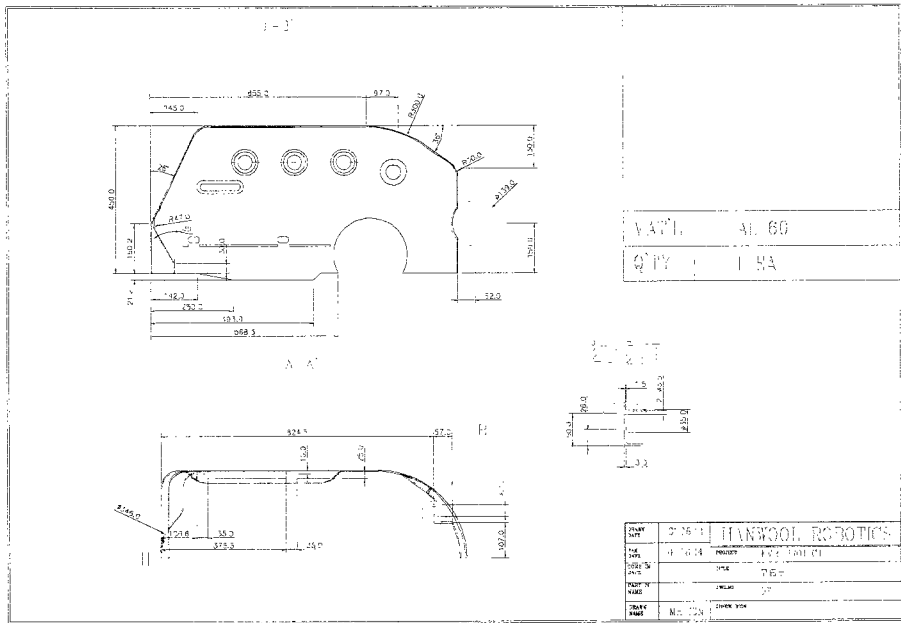
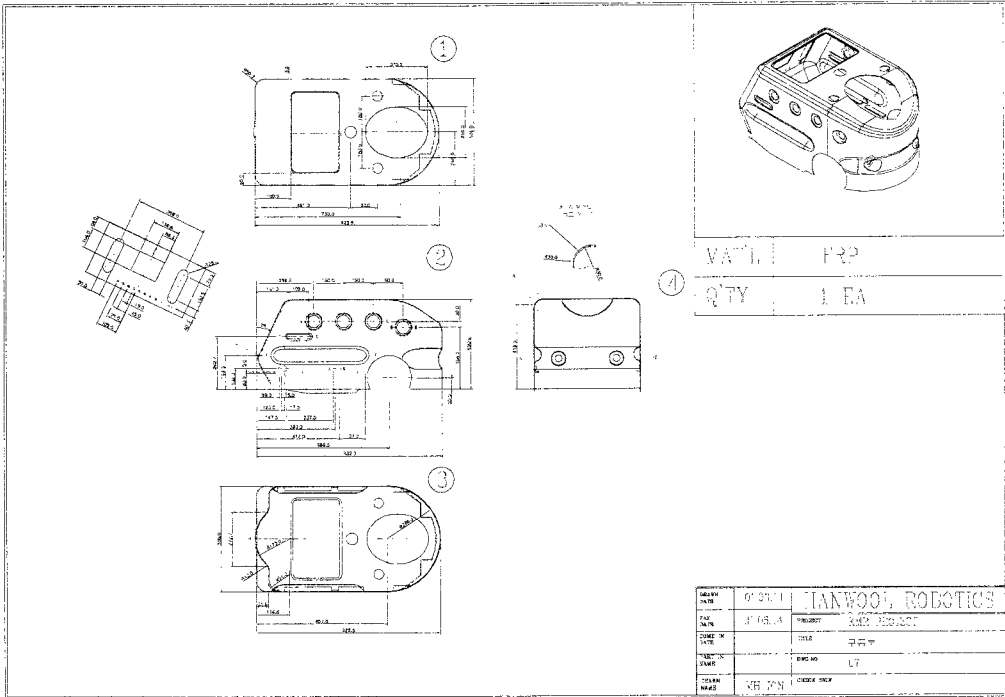


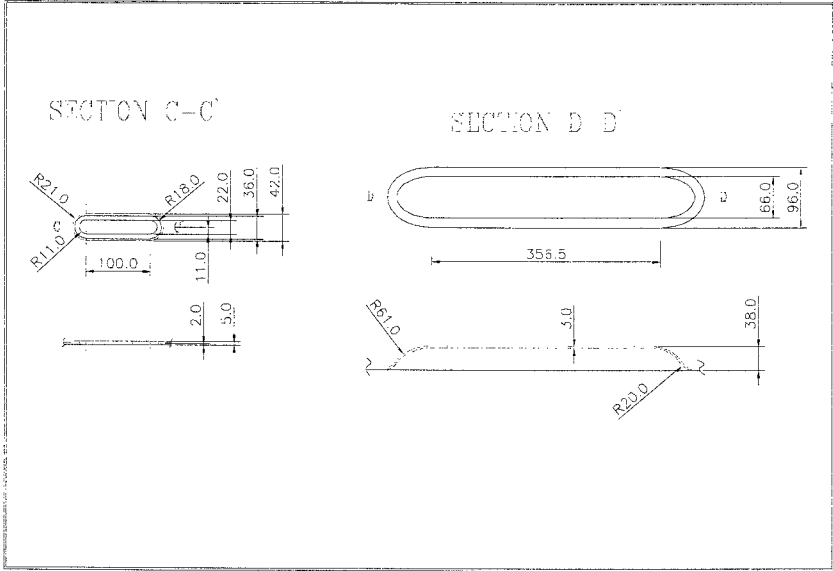
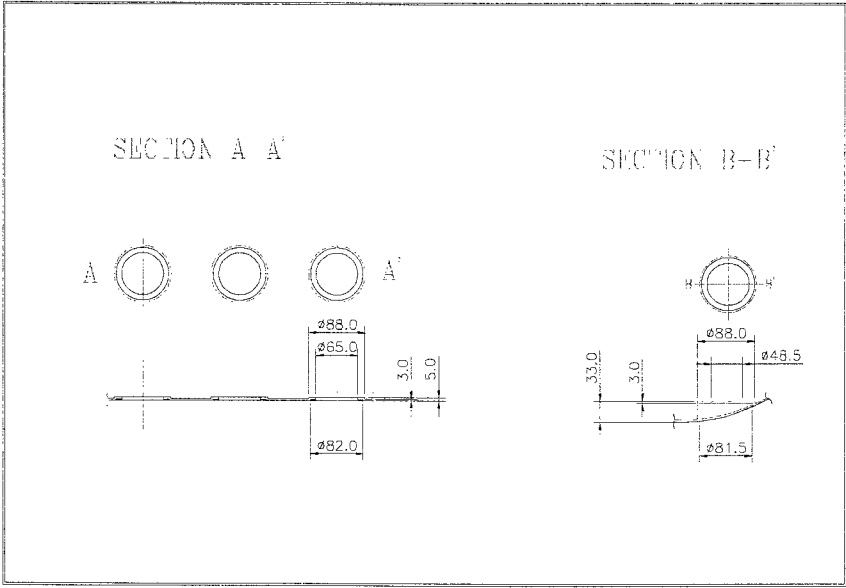


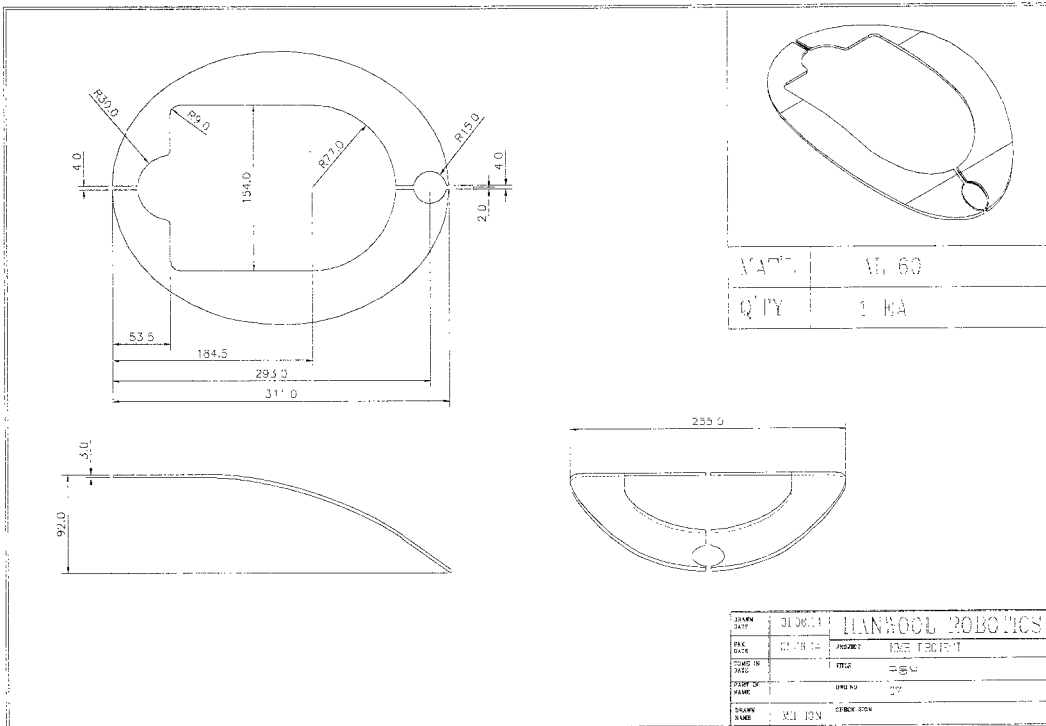
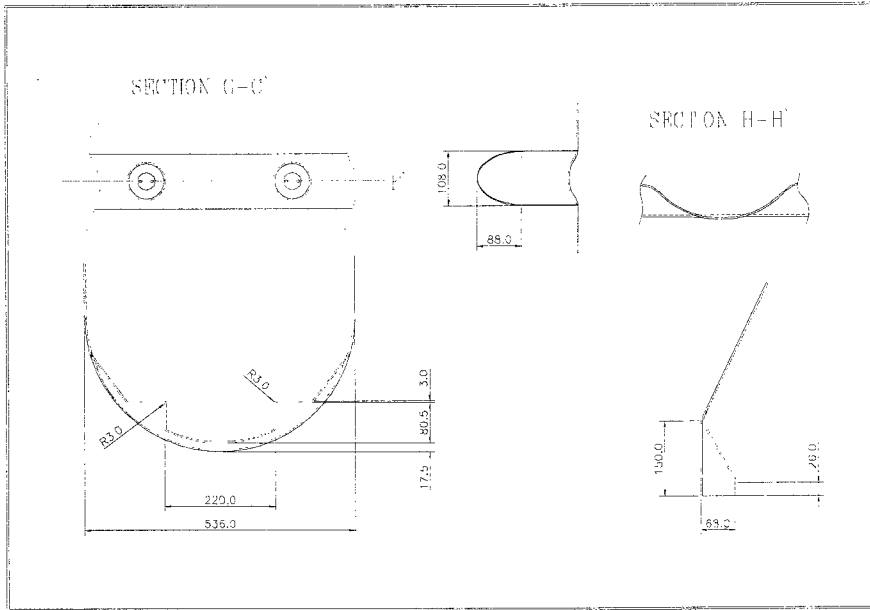












② User Interface 구현을 위한 휠체어 부분의 구현

휠체어 부분은 크게 전동 휠체어와 이에 부착된 다양한 인간-로봇 상호작용 장치로 구성되어 있다(그림 3.3.0.22). Dynamix 사의 5-스위치 모듈을 채용한 전동 휠체어는 Partner P/W6000 모델을 사용하였으며, 최대 속도는 12km/s, 무게는 70kg이다.

각종 작업과 지체 장애인들의 상체를 고정하기 위하여 나무 재질의 식판은 양쪽 손잡이 위쪽에 부착되어 있으며, 17" LCD 모니터는 아이마우스 시스템에서 구성한 메뉴를 수행하기에 적합한 형태로 셋팅되어 있다. 휠체어 후면에는 팬틸트(Pan-Tilt) 기능을 갖는 스테레오 카메라가 부착되어 사용자 주변의 물체까지의 3차원 위치 추정이 가능하며, 그 하단에는 장착형 아이마우스 시스템의 자기센서와 연동되는 자기 Transmitter가 탑재되어 있다. 좌석 후면에는 각종 인간-로봇 상호작용 장치들과의 연동을 위한 PC가 부착되어 있으며, 자기센서와 PC간의 인터페이스, 카메라 및 팬틸트 제어를 위한 시스템 내장을 위한 컨테이너가 부착되어 있다.

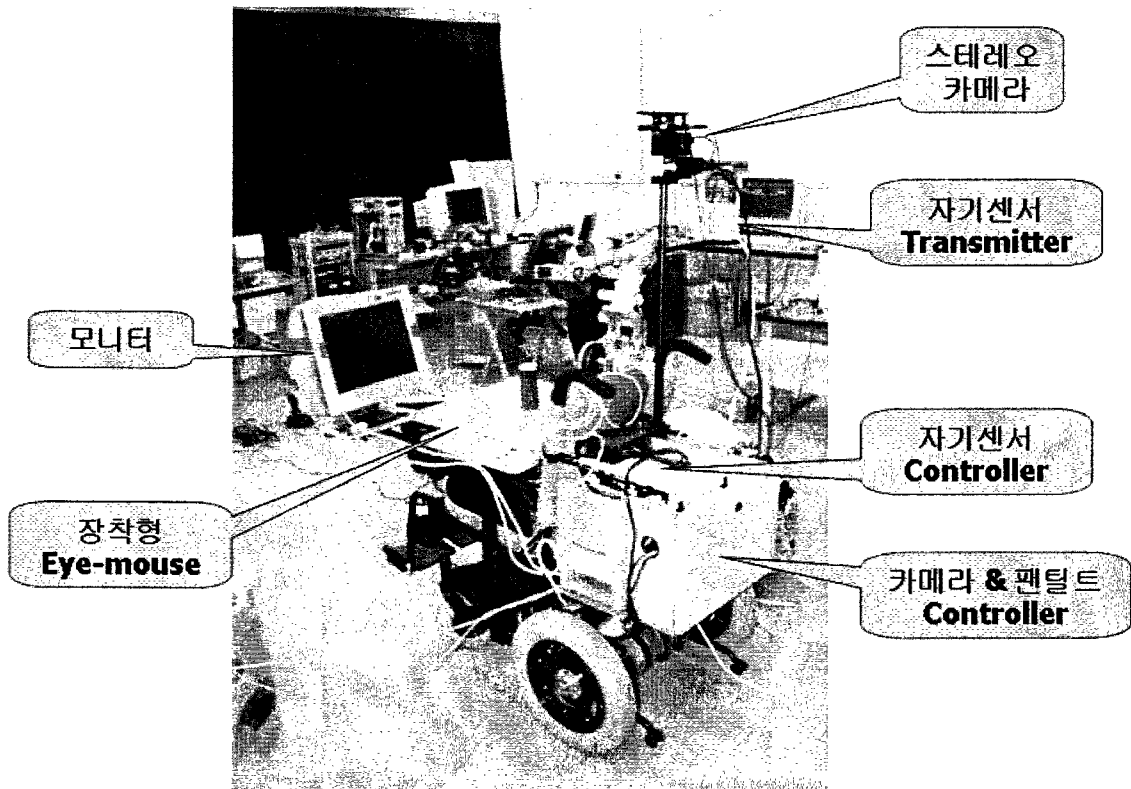


그림 3.3.0.22. 휠체어 부분의 외형

라. KARES II 시스템을 이용한 장애인 대상 임상 실험

개발된 KARES II 시스템을 이용한 임상 실험을 위해, 총 6인의 척수 손상 장애인을 대상으로 국립재활원(서울시 수유리 소재)을 2002년 2월 4일부터 8일까지 방문하여 각 시스템에 대한 임상 실험을 수행하였다. 표 3.3.0.6은 임상 실험에 참가한 피실험자에 관한 대략적인 인적 정보와 손상 정도, 사고경위 등이 정리되어 있다. 여기서 손상레벨 이하 11개 항목은 개발된 각종 인터페이스의 사용 가능성 등을 미리 가늠해 봄으로써, 실제 실험 시에 좀 더 편리함을 얻기 위한 사전 조사 결과이다.

표 3.3.0.6. KARES II의 임상 실험에 참가한 피실험자 정보

피실험자 항목		A	B	C	D	E	F
성별		남	남	남	남	남	남
나이		34	36	37	52	22	32
주거지		서울시	경기도	서울시	서울시	서울시	서울시
직업		장애인 의상연구소	건축화가	Ditto (홈페이지 제작)	무직	무직	무직
사고경위		교통사고, 10년	추락사고, 2년	교통사고, 9년	교통사고, 10년	교통사고, 3년	교통사고, 9년
손상레벨		C4	C4	C4	C6	C5	C5
전동휠체어 소유		○	×	×	○	○	○
전동휠체어 속도		매우 빠르게	-	-	10km/h	가장 천천히	가볍게 뛰는 정도
조정장치 소유		×	-	-	×	×	×
부착실험 거부감		×	×	×	×	아이마우스×	×
장시간실험 가능		○	○	○	○	○	○
사용 기능	어깨 전방으로 움직이기	△	△	△	○	○	○
	어깨 후방으로 움직이기	△	△	△	○	○	○
	어깨 옆으로 움직이기	△	×	×	○	○	○
	팔꿈치 굽히기	△	×	△ (우측)	○	○ (우측)	△ (우측)
	팔꿈치 펴기	×	×	×	○	○ (우측)	△ (우측)
	손목 손등쪽 움직이기	×	×	×	△ (좌측)	×	×

임상 실험은 총 4일에 걸쳐 6인에 대하여 오전/오후로 나뉘어져 수행되었다(그림 3.3.0.23). 임상 실험은 크게 관찰에 의한 설문지 작성, 실제 장치를 사용한 경험에 의한 설문지 작성 등으로 나뉘어 진행하였다. 각 피실험자에 대하여 약 3시간 정도의 시간을 할당하고 진행하였으나, 모두들 적극적으로 실험에 임하여 큰 어려움은 없었다. 다만, 장애 정도가 심한 분들이 피실험자로 선정된 관계로 수시로 간병인의 도움을 필요로 하는 경우가 많았으며, 오전 실험의 경우 피실험자 및 간병인이 실험 장소로 이동하는데 어려움이 있어 추후 임상 실험에서는 가능하면 오후 시간대를 활용하는 것이 좋은 것으로 판단되었다.

임상 실험과 관련된 설문지 전문은 생략하였으며, 각 시스템에 대한 연구 수행결과 부분에서 임상 실험의 상세한 내용과 그 결과에 대해 기술하기로 한다.



(a) '물마시기' 작업 (비주얼 서보잉)



(b) 면도하기 작업



(c) 컴퓨터 화면 제어 - 아이마우스



(d) 휠체어 제어 - 햅틱수트

그림 3.3.0.23. 국립재활원에서의 임상 실험 장면.

1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현

가. 사용자의 안전성 개선을 위한 능동 컴플라이언스 제어

장애인들과의 설문 조사로 정해진 12가지 작업을 살펴보면, 로봇이 장애인과 접촉하는 작업들이 존재한다. 이 접촉하는 작업 시에 로봇이 장애인에게 과도한 힘을 가하여서 장애인이 다치는 것을 방지하며 이 작업이 원활히 진행하기 위해서는 컴플라이언스 제어(Compliance control)가 필요하다.

기존의 컴플라이언스 제어는 환경과 로봇의 접촉 작업에 대하여 그 동안 수많은 연구가 이루어졌다[1]. 기존의 컴플라이언스 제어 알고리즘은 컴플라이언스를 구현하는 방법에 의하여 두 가지로 나뉘어진다[2].

첫 번째는 수동적으로 컴플라이언스(passive compliance)를 구현하는 방법이다. 이 방법은 RCC(Remote Center Compliance)와 같은 기계적인 메커니즘을 사용하여서 컴플라이언스를 구현 하는 방법이다. 이러한 방법은 설계 당시에서부터 구현해야 할 컴플라이언스를 잘 선정하여서 구현 할 경우 별도의 제어가 필요 없고, 안정성도 보장할 수 있다. 그러나, 수동적인 메커니즘은 설계 시에 컴플라이언스가 고정되어 있어서 상황에 따른 적합한 컴플라이언스를 얻기에 적합치 않고 큰 컴플라이언스를 필요로 하는 작업의 경우에 있어서는 관절의 유연성(flexibility)의 증가로 인하여 진동이 발생하여 제어가 쉽지 않게 된다. 또한 수동적인 메커니즘을 사용할 경우에는 로봇 관절부에 수동적인 메커니즘을 부착해야 하기 때문에 설계가 어렵고, 로봇의 크기와 무게를 증가시키게 된다.

두 번째는 능동적으로 컴플라이언스(active compliance)를 구현하는 방법이다. 이 방법을 구현하기 위하여, 강성(Stiffness) 제어 기법[3], 댐핑(Damping) 제어 기법[4] 과 임피던스(Impedance) 제어 기법[5]등이 개발 되었다. 능동적으로 컴플라이언스를 구현하는 방법은 외부 환경과의 안정성에 대한 고려가 필요하지만 각각 상황에 따른 적합한 컴플라이언스를 제어를 통하여 손쉽게 구현 할 수 있고, 관절의 유연성이 증가되는 등의 문제가 발생하지 않으며 별도의 메커니즘을 설계하여야 할 필요가 없기 때문에 로봇의 구조가 간단하여진다. 따라서 여러가지 작업을 수행해야 하는 재활 로봇의 경우에 있어서는 능동적인 컴플라이언스 제어 방법이 더 타당하다.

이러한 능동적인 컴플라이언스 제어를 실제로 적용하기 위해서는 외부 환경과의 접촉 힘을 측정할 필요가 있다.

그러나, KARESII에 힘 센서를 이용한 능동적인 컴플라이언스 제어 알고리즘을 구현

하는데 문제가 있다.

첫 번째로 힘 센서를 사용 시에 KARESⅡ의 가격이 증가된다. 대부분의 힘 센서는 수백 만원씩 하는 고가의 장비이다. 따라서 이런 장비를 로봇에 부착하면 전체적으로 KARESⅡ의 가격이 높아지고, 이로 인하여 실제 사용자인 장애인들에게 큰 부담을 지우게 된다. 장애인들과의 인터뷰 결과에서도 재활 로봇의 가격이 장애인들이 실제로 로봇을 사용할지 여부를 결정하는데 있어서 가장 중요하게 고려되는 사항임을 알 수 있었다.

두 번째로는 힘 센서를 사용함으로써 인해서 재활 로봇 시스템이 전체적으로 복잡해진다는 점이다. 힘 센서를 사용하면 배선이 복잡해지며, 이를 위한 A/D채널이 필요해진다. 실제 로봇을 제작함에 있어서 배선 문제라는 것은 상당히 복잡한 문제중의 하나이다. 힘 센서를 사용하기 위한 별도의 A/D 채널과 배선은 로봇의 고장 및 오 작동 확률을 높이는 원인 중의 하나이다.

세 번째로는 힘 센서를 사용함으로써 인해서 로봇 관절의 유연성(flexibility)이 증가한다는 점이다. 원하지 않는 관절 유연성의 증가는 로봇의 진동을 유발하는 원인으로, 전체 로봇 시스템의 제어 성능을 나쁘게 한다. 따라서 KARESⅡ에 컴플라이언스 제어를 적용하기 위해서는 별도의 힘 센서 없이 접촉 힘에 관한 정보를 얻는 방법이 필요하다.

별도의 힘 센서 없이 외부와의 접촉 힘을 추정해 내는 방법에 관한 연구는 기존에 몇 가지 방식을 통하여 진행 되어 왔다[6,7,8]. 이 방법은 외란(disturbance)을 추정하기 위하여 관측기(observer)를 사용하였고, 외란으로 발생하는 토크 값과 로봇의 역 동역학(Inverse Dynamics)으로부터 얻어진 토크 값의 차이를 이용하여 접촉 힘의 크기를 구한다. 그러나 별도의 힘 센서를 사용하지 않고 접촉 힘을 측정하는 기존의 모든 연구가 로봇의 역 동역학을 정확히 계산하는 것을 요구하고 있고 실제 적용에서도 2~3 자유도 DD-Arm 이외의 적용 사례를 찾아 볼 수가 없다. KARESⅡ의 경우에는 기존의 연구에서 사용했던 2 ~ 3 자유도 DD-Arm에 비해서 6자유도로서 훨씬 자유도가 높으며 감속비로 인해서 복잡한 마찰력 항이 들어가게 된다. 이에 따라서 역 동역학 식 자체가 매우 복잡해지며 추정해 내야 할 매개 변수의 개수도 많아지게 된다. 또한 부정확한 마찰력 모델로 인해 모델링 자체가 어려워진다. 일례로서 잘 알려진 PUMA 560 6자유도 로봇의 경우를 보면 6자유도 로봇의 역 동역학이 얼마나 복잡하고 또한 얼마나 많은 매개 변수를 추정해야 하는지 알 수 있다[9].

따라서 KARESⅡ의 설계에서는 동력 전달 체계의 부정확한 마찰력의 영향을 최소화하고 좋은 기계적 특성을 갖도록 하기 위하여 케이블 메커니즘을 사용하였다. 케이블 메커니즘이 작은 백 래쉬와 작은 마찰 그리고 높은 backdrivability를 가진다는 것은 이미 Townsend 의 연구에 의해 잘 알려진 사실이다[10]. 특히 높은 backdrivability는 로봇 외

부에서 가해지는 환경과의 접촉 힘에 대해 로봇이 민감하게 반응할 수 있는 좋은 기계적인 특성이다.

이러한 13가지 장애인 보조 작업, 특히 접촉 작업의 존재와 이를 위한 별도의 힘 센서 없는 컴플라이언스 제어 알고리즘의 필요성, 그리고 이를 쉽게 구현하기 위해 케이블 메커니즘을 사용하여 제작된 KARESII의 좋은 기계적 특성 등으로 인하여 케이블 메커니즘을 사용한 재활 로봇의 컴플라이언스 제어에 관한 연구가 이루어지게 되었다.

(1) 컴플라이언스 제어 알고리즘

13가지 기본 작업 중에서 **면도하기, 얼굴 닦기, 식사 보조, 물마시기 작업**의 경우에는 사용자인 장애인과 로봇이 **접촉하는 상황이 발생**한다. 따라서 이러한 상황에서는 장애인의 안전과 작업의 원활한 수행을 위하여 컴플라이언스를 필요로 한다

(가) 컴플라이언스 제어 전략

① 컴플라이언스 제어시의 고려사항

컴플라이언스가 필요한 작업은 대부분이 기본적으로 **정적인(static) 자세에서 장애인과 접촉**한다. 그리고 **장애인과 접촉**은 장애인들이 대부분 목 아래 부분은 마음대로 움직일 수 없는 심한 장애를 가지고 있기 때문에 **로봇 끝 단 뿐만 아니라 로봇 팔의 어느 부분에서도 일어날 수 있다**. 또한 미리 정의된 13가지 작업은 **미리 정의된 궤적을 따라서 움직이는 반복 작업**이다. 마지막으로 **힘 센서를 사용하지 않고서 컴플라이언스 제어가 가능하여야 한다**.

따라서 KARESII의 컴플라이언스 제어는 **관절 공간(Joint Space)**에서 반복 작업에 대해 이루어지며, **정적인 자세에서 힘 센서를 이용하지 않고 이루어진다는 것**을 고려하여 수행되어야한다

② 컴플라이언스 제어가 필요한 작업에 대한 제어 알고리즘

앞에서 기술한 바와 같이 KARESII에 적용되는 컴플라이언스 제어는 반복적인 작업에 대해서 행하여지므로 **언제 장애인과 접촉을 하게 되는지 미리 알 수 있는 경우가 있다**. 따라서 **장애인과 접촉이 없는 동안은 위치제어를, 장애인과 접촉이 일어난다고 정의된 시점부터는 컴플라이언스 제어를 하는 것이 가능하다**. 또한 장애인과의 접촉이 일어나는 상황이 대부분 정적인 상황이기 때문에 식 3.3.1.1와 같이, 로봇 역 동역학 전체가 아닌 중력 보상을 위해 필요한 토크만을 계산해 낼 수 있으면, **제어 입력 중에서 중력 보상 토크를 뺀 부분이 접촉 힘이 되므로 접촉 힘의 감지도 쉽게 할 수 있다**.

$$\tau_{ext} = \tau - G(\theta) \quad (3.3.1.1)$$

또한 장애인과의 접촉 상황에서는 컴플라이언스 제어방법으로 간접적으로 접촉 힘의 크기를 제어하는 방식을 사용하는 것이 타당하다. 직접적인 힘 제어 방식은 힘 궤적을 미리 정하여 주는 것이 필요하고 혼합 제어의 경우에는 위치 제어를 수행할 방향과 힘 제어를 수행할 방향을 결정해줘야 한다. 그러나 장애인 보조 작업의 경우 위와 같은 것들을 결정하는 것은 부적합하다. 또한 정확한 힘의 크기를 유지하는 것이 필요한 작업들이 아니므로 간접적으로 접촉 힘의 크기를 제어하는 방식이 적합하다.

따라서 그림3.3.1.1과 같은 컴플라이언스 제어 알고리즘이 가능하게 된다.

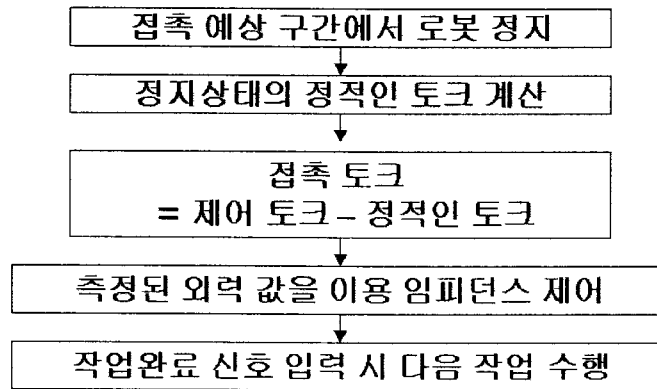


그림 3.3.1.1 미리 정해진 작업에 대한 컴플라이언스 제어 알고리즘

접촉 예상 구간에 들어가게 되면 일단 정지를 한 후 그 상태를 유지하는데 필요한 정적인 토크를 계산한다. 장애인과의 접촉 힘을 현재 제어입력과 정적인 토크와의 차이로부터 구한다. 구하여진 접촉 힘을 사용하여 임피던스 제어를 수행한다. 작업이 완료되는 시점에서 다음 작업을 수행한다.

이 절에서 제안한 컴플라이언스 제어 알고리즘은 미리 정해져 있는 작업의 특성을 잘 파악하여서, 기존의 연구들이 접촉 힘의 추정을 위해서 모든 로봇 역 동역학 계산을 필요로 했던 것에 비해 적은 계산량만을 사용하면서도 원하는 성능을 낼 수 있도록 논리적으로 구성되었다.

다음 절에서는 이 전략을 실제로 구현하기 위해서 필요한 접촉 힘 추정 방법 그리고 이를 실제로 제어에 응용하기 위한 시간 지연을 이용한 제어기법에 기반한 임피던스 제어에 관해서 설명한다.

(나) 제어기

KARESⅡ의 경우에는 컴플라이언스 제어를 수행함에 있어서 힘 센서를 사용하지 않고서 외력의 크기를 알아야 한다. 또한 외력의 크기를 알 수 있다면 이로부터 어떠한 컴플라이언스 제어 법칙을 사용 할 것인지 결정 하여야 한다. 이 절에서는 외력 측정 방법 및 KARESⅡ에 실제로 적용 될 시간 지연을 이용한 제어기법에 기반한 임피던스 제어에 대해서 설명한다.

① 시간 지연 추정에 기반한 센서 없는 접촉 힘 측정 방법

접촉 힘 측정을 위해서는 외란에 대해서 잘 추정해 낼 수 있는 방법이 필요하다. 그 중 한 가지 방법으로서 **시간 지연을 이용한 제어기법(TDC-Time Delay Control)**에서 쓰이는 **시간 지연 추정(TDE-Time Delay Estimation)**을 들 수 있다. 본 절에서는 이 장에서 다루는 로봇 매니퓰레이터(Manipulator)에 대한 시간 지연을 이용한 제어 법칙에 관해서 기본이 되는 원리인 시간 지연 추정을 중심으로 기술한다. 또한 이를 기반으로 한 접촉 힘의 측정 방법에 대해 설명한다.

② 시간 지연을 이용한 제어 기법

일반적인 선형 혹은 비선형 시스템에 대한 시간 지연을 이용한 제어법칙은 K. Youcef-Toumi에 의해 유도되었다[11]. 로봇 매니퓰레이터의 경우에 대한 시간 지연을 이용한 제어 법칙은 Hsia에 의해서 유도 되었다[12]. 시간 지연을 이용한 제어기법의 안정성에 관한 해석은 권오석 씨에 의해 일반적인 경우와 로봇 매니퓰레이터의 경우에 대하여 유도되어 있다[13].

시간 지연을 이용한 제어기법에서 가장 중요한 부분은 시간 지연 추정의 원리라고 할 수 있다.

일반적인 로봇 매니퓰레이터의 동역학식은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \tau_{ext}$$

(3.3.1.2)

여기서 $M(\theta)$ 는 $n \times n$ 관성 행렬(inertia matrix), n 은 로봇 관절의 수, θ 는 $n \times 1$ 관절 변

수 벡터, $V(\theta, \dot{\theta})$ 는 코리올리(Coriolis)력과 원심력의 $n \times 1$ 벡터, $G(\theta)$ 는 $n \times 1$ 중력 벡터, τ_{ext} 는 외란(disturbance)과 같이 모델링 되지 않은 힘, 그리고 τ 는 관절에 가해지는 $n \times 1$ 토크 벡터를 나타낸다.

만약 우리가 로봇 매니퓰레이터의 모든 동역학 양을 정확히 추정할 수 있다면 Computed Torque 제어 방식으로 제어를 할 수 있다. 그러나 로봇 매니퓰레이터의 동역학을 정확히 안다는 것은 상당히 어려운 일이다. 또한 외란이 존재할 경우에는 더더욱 불가능하다. 이들 불확실한 동역학과 외란을 추정해 내는 방법이 시간 지연 추정이다.

비선형 벡터 $H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ 를 다음과 같이 정의하면,

$$H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = (M\theta) - \overline{M}\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \tau_{ext} \quad (3.3.1.3)$$

식 3.3.1.3은 다음과 같이 바꿔 표현될 수 있다.

$$\tau = \overline{M}\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (3.3.1.4)$$

이제 여기서 우리가 추정해 내야 되는 양은 로봇 매니퓰레이터의 모든 비선형 항들과 외력 항들을 포함한 $H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ 가 되었다.

비선형 벡터 H 의 추정값 \mathcal{H} 을 구하기 위하여 시간 지연을 이용한 제어기법은 다음과 같은 시간 지연 추정 방법을 사용한다. 만일 시간지연(time delay) L 이 충분히 작다면, 다음과 같은 근사식이 성립한다.

$$\begin{aligned} H(t) &\approx \mathcal{H} \\ &= H(t-L) = \tau(t-L) - \overline{M}\ddot{\theta}(t-L) \end{aligned} \quad (3.3.1.5)$$

이를 바탕으로 Computed Torque Control 기법의 관점에 따라 시간 지연을 이용한 제어 법칙을 구성하면 식 3.3.1.6과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \tau(t-L) - \overline{M}\ddot{\theta}(t-L) \\ &\quad + \overline{M}(\ddot{\theta}_d(t) + \ddot{K}e(t) + K_p e(t)) \end{aligned} \quad (3.3.1.6)$$

H 와 H 의 추정 값 \mathcal{H} 사이엔 $H = \mathcal{H}$ 이 성립한다면, 폐루프(Closed loop)의 오차 동역학

(error dynamics)은 식 3.3.1.7과 같이 된다.

$$\ddot{e} + K_D \dot{e} + K_P e = 0 \quad (3.3.1.7)$$

만약 \bar{M} 를 대각 상수 행렬로 선정한다면, 시간지연을 이용한 제어기법은 PD계인과 대각 상수 행렬 \bar{M} 만을 사용하는 독립된 조인트 제어기로서 그림 3.3.1.2와 같이 쉽게 구현될 수 있다.

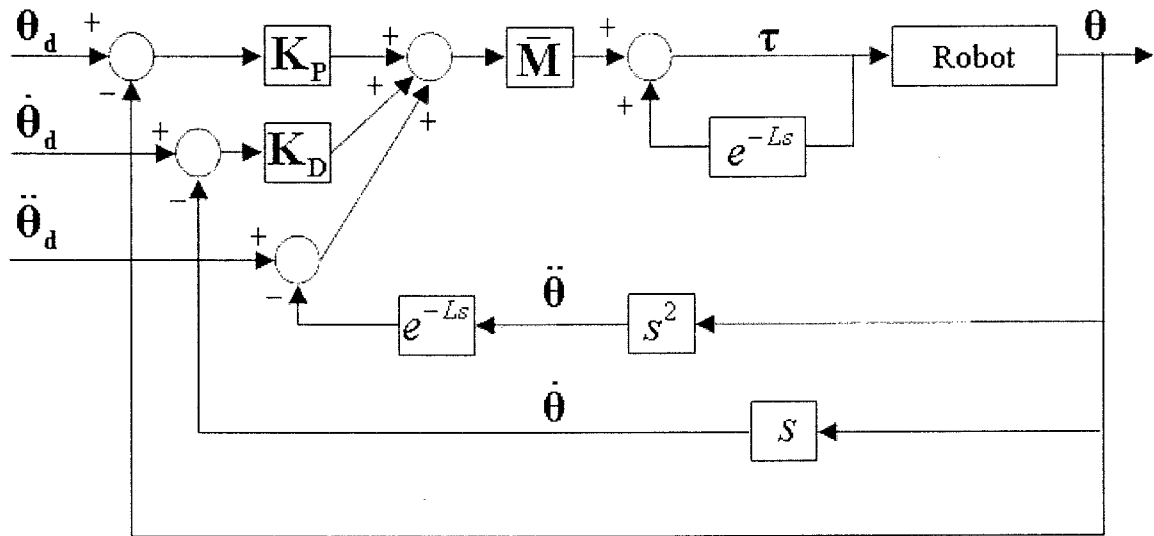


그림 3.3.1.2 시간 지연을 이용한 제어 기법(TDC)의 block diagram

시간 지연 추정은 식 3.3.1.3과 식 3.3.1.5에서 알 수 있듯이 모델링 되지 않은 동역학 및 외부에서 가해지는 힘을 시간 지연 추정으로 추정해 낼 수 있기 때문에 별도의 힘 센서 없이 컴플라이언스 제어를 할 수 있는 기초를 마련해 준다.

㉔ 접촉 힘 추정

시간 지연 추정을 이용하게 되면 로봇의 비선형 동역학 및 환경과의 접촉 힘을 모두 추정해 낼 수 있다. 이로부터 접촉 힘을 추정해 내기 위해서는 로봇의 역 동역학을 알아서 제어 입력과의 차이를 구하는 것이 필요하다.

일반적으로 6자유도 로봇의 동역학을 모두 정확히 알아낸다는 것은 쉽지 않은 일이다.

그러나 앞에서 언급되었듯이 정적인 상황에서의 컴플라이언스 제어가 이루어지는 것만으로도 미리 정의된 작업을 수행할 수 있기 때문에 정적인 상황을 유지하기 위한 중력 및 마찰력 값만을 계산해 낼 수 있으면 된다. 따라서 제어 입력이 τ 라 할 때 환경과의 접촉 힘 τ_{ext} 는 다음 식 3.3.1.8과 같이 구해진다.

$$\tau_{ext} = \tau - G(\theta) - F(\theta, \dot{\theta}) \quad (3.3.1.8)$$

여기서 $G(\theta)$ 는 $n \times 1$ 의 중력 벡터, $F(\theta, \dot{\theta})$ 는 $n \times 1$ 의 마찰력 벡터이다.

② 임피던스 제어의 원리

이 절에서는 컴플라이언스 제어 방법 중에서 본 논문에서 제안하는 제어전략에 사용되는 임피던스 제어(Impedance Control)의 물리적 원리를 중심으로 서술하고자 한다.

임피던스 제어는 Neville Hogan 등에 의하여 제안되었다[5]. 로봇이 환경(environment)과 접촉을 할 경우, 위치 제어만을 할 경우에는 로봇이 환경(environment)에 계속적으로 무리하게 힘을 가하게 된다. 로봇이 환경에 무리한 힘을 계속 가하게 됨으로써 로봇이 망가지거나 환경에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다. 이런 것을 방지하기 위해서는 로봇이 환경과 접촉 시에 과도한 힘을 가하지 않도록 하는 제어가 필요하다.

그러나 접촉 시에 힘과 위치를 모두 제어한다는 것은 인과 관계(causality)를 만족시킬 수 없기 때문에 불가능하다[14]. 그러나 환경과의 접촉 시에 접촉 힘과 위치사이의 관계(로봇의 임피던스)를 정하여 주는 것은 가능하다. 이런 제어 방식을 임피던스 제어라고 한다.

로봇과 접촉하는 환경은 힘을 독립 변수(independent variable)로서 받아들이고 위치를 종속 변수(dependent variable)로서 내어주는 어드미턴스(admittance) 형태이거나, 반대로 위치를 독립 변수로서 받아들이고 힘을 종속 변수로서 내어주는 임피던스(impedance)형태 두 가지 다 가능 할 수 있다. 실제적으로 대부분의 환경에 존재하는 물체는 질량을 가진 강체로서 어드미턴스로 잘 모델링(modeling) 될 수 있다. 예를 들어서 로봇이 벽과 접촉을 한다고 할 경우 벽은 질량을 가진 강체로서 외부에서 가해지는 힘에 대해서 위치를 표현하는 것은 가능하다. 그러나 외부에서 주어지는 위치에 대해 힘이 얼마나 걸리는지를 표현하는 것은 불가능하다. 환경이 어드미턴스로 작용하기 때문에 당연히 로봇은 인과 관계를 맞추기 위해서 임피던스로서 작용을 하여야 한다. 그 관계는 그림 3.3.1.3에 잘 나타나 있

다.

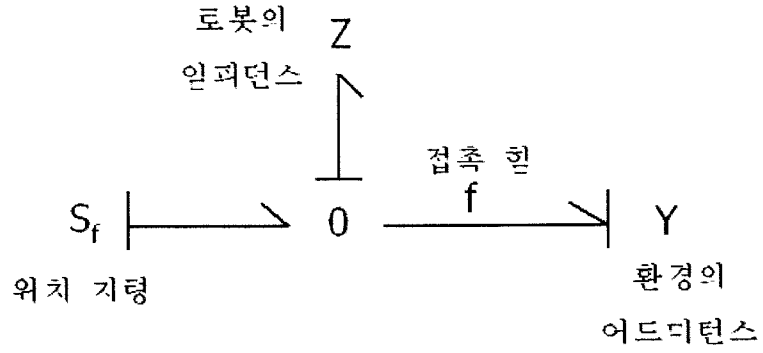


그림 3.3.1.3 로봇 컴플라이언스 제어의 본드 그래프 등가 선도

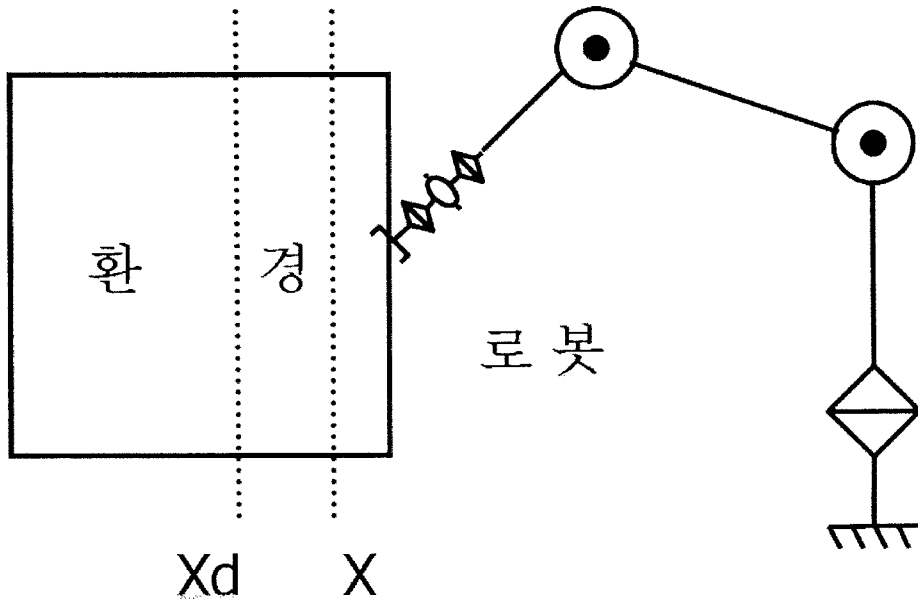


그림 3.3.1.4 환경과 로봇의 접촉 상황 개념도

본 연구에서 기본적인 제어기로 선정된 시간 지연을 이용한 제어기법을 사용하는 경우에 대해서 그림 3.3.1.4와 같은 상황에 대해 고찰해 보자.

로봇이 추종해야 될 위치가 X_d 라 할 때 위치 제어만을 수행한다면 앞 절에서 설명했듯이 오차 동역학은 식 3.3.1.7과 같이 구성되므로 로봇은 환경에 과도한 힘을 가하더라도 오차를 0으로 만들기 위해 X_d 에 도달하려 할 것이다. 그러나 임피던스 제어를 적용하여 오차 동역학을 식 3.3.1.9와 같이 만들면,

$$\ddot{e} + K_D \dot{e} + K_P e - K_f \tau_{ext} = 0 \quad (3.3.1.9)$$

외력 τ_{ext} 와 위치 오차 e 사이에 식 3.3.1.10과 같은 임피던스가 구현되어서 환경에 과도한 힘을 가하지 않으면서 어느 정도의 위치 오차가 존재하여 추종해야 할 X_d 가 아니라 X 에 도달하게 된다.

$$\tau_{ext i} = \frac{s^2 + K_{di}s + K_{pi}}{K_{fi}} e \quad (3.3.1.10)$$

여기서 아래 첨자 i 는 i 번째 관절에 관한 변수임을 의미한다.

정상 상태(steady-state)에 도달하게 되면 속도 오차와 가속도 오차는 0으로 수렴하게 될 것이고 오차 동역학은 식 3.3.1.11과 같은 용수철과 비슷한 거동을 보이게 된다.

$$\tau_{ext i} = \frac{K_{pi}}{K_{fi}} e \quad (3.3.1.11)$$

③ 제어 입력과 접촉 힘 측정의 시간에 관한 인과관계 분석

가-(1)-(나)-①에서는 접촉 힘 측정에 관하여, 가-(1)-(나)-②에서는 시간 지연을 이용한 제어기법에 기반 한 컴플라이언스 제어에 관하여 설명하였다.

그러나 이 두 가지를 실제로 적용하기 위해서는 시간에 대한 인과 관계(causality)의 분석이 필요하다. 식 3.3.1.8에서 보듯이 어떤 시간 t 에서의 접촉 힘을 계산하기 위해서는 시간 t 에서의 제어 입력을 알아야 하는 것으로 되어있다. 그러나 식 3.3.1.9에서 알 수 있듯이 시간 t 에서의 제어 입력을 계산하기 위해서는 그 순간의 접촉 힘을 알아야만 한다. 즉

동시에 접촉 힘 측정과 제어 입력의 계산이 이루어질 수는 없다.

따라서 접촉 힘 측정에 관하여 좀더 명확한 시간에 따른 인과 관계의 분석이 필요하다. 이를 위해서, 우선 그림 3.3.1.5와 같은 샘플링 타임에 따른 제어 입력 계산 과정을 살펴보기로 하자.

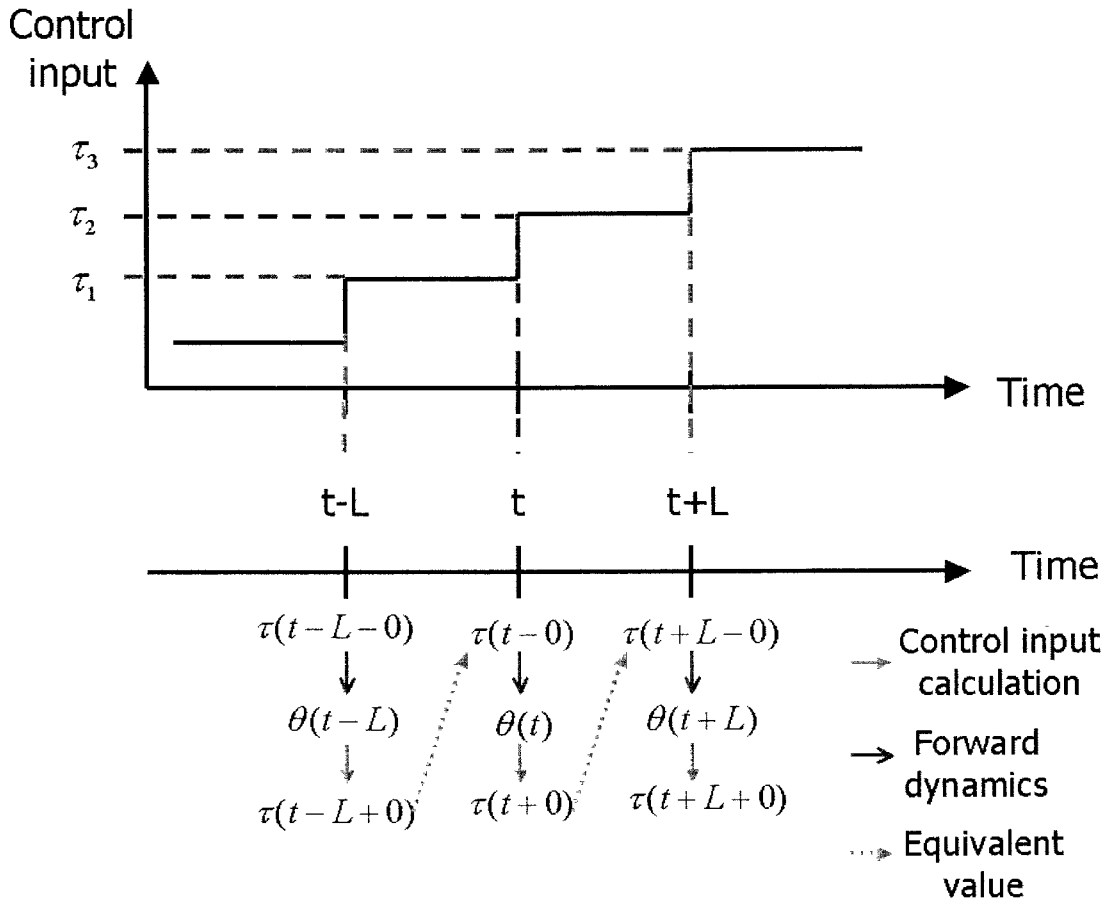


그림 3.3.1.5 제어 입력과 접촉 힘 측정의 인과관계 분석

이 분석을 하기 위해서는 샘플링 타임이 L 이라 할 때, 시간 t 에서의 제어 입력이 τ_1 인가, τ_2 인가에 관한 명확한 정의가 필요하다. 이에 보다 명확한 분석을 위하여 시간 t 직전 까지 유지되는 제어 입력(τ_1)을 $\tau(t-0)$ 와 같은 표기를 통하여 시각 t 로부터 미소 시간 전의 제어 입력 값이라 표기하고, 마찬가지로 시간 t 직후부터 다음 샘플링 타임까지 유지되는 제어 입력(τ_2)을 $\tau(t+0)$ 와 같이 표기하기로 한다. 이와 같이 표기를 정하면 식 3.3.1.11

과 같은 등식이 성립한다.

$$\begin{aligned}\tau(t-L+0) &= \tau(t-0) \\ \tau(t+L-0) &= \tau(t+0)\end{aligned}\tag{3.3.1.11}$$

이제 실제로 각 샘플링 타임마다 제어가 되는 과정에 대해서 살펴보면 시간 $t-L$ 직전까지는 그 전 샘플링 타임에 계산된 제어 입력($\tau(t-L-0)$)에 의하여 로봇이 움직여진다. 시간 $t-L$ 에서는 관절의 각도 $\theta(t-L)$ 을 읽은 후 제어 입력($\tau(t-L+0) = \tau_1$)을 계산하여 내보내 준다. 시간 t 직전까지는 이 제어 입력($\tau(t-0) = \tau_1$)이 유지가 되며 시간 t 에서는 그 직전 샘플링 타임에서와 마찬가지로 제어 입력 계산을 위해 $\theta(t)$ 을 읽고, 이로부터 제어 입력($\tau(t+0) = \tau_2$)을 내어주게 된다. 이와 같은 과정이 제어하는 과정 내내 반복하여 이루어지게 된다.

이제 각 샘플링 타임에서 어떻게 제어가 이루어지는가에 대하여 밝혀졌으므로, 표기의 간편성을 위하여 **시간 t 에서의 제어 입력($\tau(t)$)은 식 3.3.1.13과 같이 각 샘플링 타임에서 새로이 계산되는 값, $\tau(t+0)$ 으로 정의한다.** 이렇게 정의를 하는 이유는 제어 입력이라는 관점에서 각 샘플링 타임마다 새로이 계산되어 그 이후에 사용되는 값을 그 시간에서의 제어 입력으로 표기하는 것이 타당하기 때문이다. 만약 시간 t 에서의 제어 입력을 $\tau(t-0)$ 으로 정의한다면, $t=0$ 에서는 제어를 시작하기 이전의 값을 정의를 하여줘야 하는 어려움이 발생한다.

$$\tau(t) \equiv \tau(t+0)\tag{3.3.1.13}$$

그렇다면 이제 어떤 시간 t 에서 접촉 힘의 정보는 어디에서 구하는 것이 타당한가에 대한 분석을 할 수가 있다. 시간 t 에서의 접촉 힘의 정보라는 것은 시간 t 가 되기 바로 전에 외부에서 걸린 접촉 힘에 대한 정보이다. 즉 시간 t 에서 제어 입력을 계산하기 전까지 외부에서 걸린 접촉 힘에 대한 정보를 말한다. 따라서 시간 t 에서의 제어 입력($\tau(t)$)은 그 시간 이후에 앞으로 로봇을 어떻게 움직일 것인가에 대한 정보만을 가지고 있으므로, 그 시간에서의 접촉 힘의 정보를 얻어내는데 사용하는 것은 적합하지 않다.

따라서 시간 t 이전의 접촉 힘과 정적인 상태를 유지하는데 필요한 힘에 관한 정보가 가장 잘 담겨 있는 바로 한 샘플링 타임 전인 $t-L$ 에서의 제어 입력($\tau(t-L)$)을 접촉 힘 측정에 사용하는 것이 타당하다. 그렇다면 이제 제어 입력($\tau(t-L)$)에서 어느 시간의 정적인 상태를 유지하는데 필요한 힘을 계산하여 빼는 것이 옳은가에 대한 분석이 필요하다. 시간 t 바로 직전의 접촉 힘에 대한 정보를 제어 입력 $\tau(t-L)$ 이 가지고 있으므로, 이 때 빼어주어

야 하는 정적인 힘도 시간 $t-L$ 에서의 값 $G(\theta(t-L))$ 을 사용하는 것이 타당하다. 만약 $G(\theta(t))$ 를 사용한다면 이는 이미 $\tau(t-L)$ 에 의해서 영향을 받은 관절 각도($\theta(t)$)를 사용하는 것이므로 시간에 관한 인과 관계를 만족 시키지 못한다. 따라서, 실제로 접촉 힘 측정 방법을 적용할 때에는 식 3.3.1.14와 같은 방식으로 하여 적용하는 것이 타당하다.

$$\tau_{ext} \approx \tau(t-L) - G(\theta(t-L)) - F(\theta(t-L), \dot{\theta}(t-L))$$

(3.3.1.14)

만약 샘플링 타임 L 이 점점 작아져서 0에 근접한다면 식 3.3.1.14 는 근사 식이 아니라 등식으로서 성립하게 된다.

이 절에서는 컴플라이언스 제어에 관하여서 기존의 연구 동향을 알아보고 이를 바탕으로 KARES II에 적용할 경우 발생하는 문제점을 지적하였다. 또 이를 바탕으로 컴플라이언스가 필요한 미리 정의된 작업에 대해서 힘 센서 없이 외력을 측정하고 컴플라이언스 제어를 구현하는 제어 알고리즘 및 방법을 제시하였다.

(2) 기초 실험 결과

(가) 모의 실험

모의 실험은 식사 보조 작업과 면도 작업에 대해서 수행되었다. 물 마시기 작업의 경우는 식사 보조 작업과, 세안 작업의 경우는 면도 작업과 거의 같은 궤적으로 움직이게 되므로 모의 실험에서는 제외하였다.

두 작업 수행 시 접촉 힘은 그림 3.3.1.6과 같이, 두 경우 다 장애인 근처에 갔을 때에 한해서 걸리는 것으로 하고 식사 보조 작업의 경우에는 로봇 끝단에 Z축 방향으로 5N, Y축 방향으로 3N, 면도 작업의 경우에는 로봇 끝단에 Z축 방향으로 10N이 걸리는 상황으로 설정하였다.

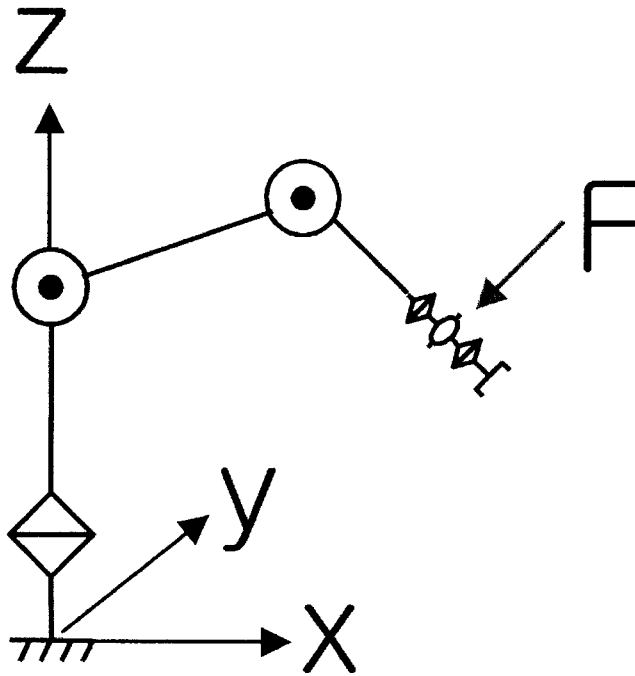


그림 3.3.1.6 접촉 상황 개념도

또한 사용된 로봇 동역학은 3자유도 로봇 동역학을 사용하고 로봇 손목 축부터 그리퍼 (Gripper) 까지는 모두 3자유도 로봇 끝에 질량이 붙어 있는 것으로 간주 하였다. 이러한 가정이 가능한 이유는 식사 보조나 면도 작업의 경우 로봇이 장애인 얼굴 근처에서 멈춰서 있는 상태에서 컴플라이언스 제어가 수행되므로 손목 축의 움직임이 없기 때문이다. 또한 $K_p=100$, $K_f=57.3$ 으로 설정하여서 각 관절이 정상 상태에서는 0.57 deg./Nm 의 컴플라이언스가 구현 되도록 하였다.

식사 보조 작업의 모의 실험 결과 각 관절에서 원하는 컴플라이언스가 구현되었음을 알 수 있다(그림 3.3.1.7). 또한 접촉 힘의 측정이 잘 됨을 확인 할 수 있었다(그림3.3.1.8)). 각 축에 걸리는 실제 토크 값과 본 연구에서 제안한 접촉 힘 추정 방법 결과로 구해진 접촉 힘의 크기가 거의 일치함을 볼 수 있다. 또한, 구현하려 했던 컴플라이언스인 0.57 deg./Nm 가 구현되었음을 알 수 있다.

면도 작업의 경우도 역시 식사 보조 작업의 모의 실험 결과와 마찬가지로 좋은 모의 실험 결과를 얻을 수 있었다. 원하는 컴플라이언스가 구현 되고(그림3.3.2.9), 접촉 힘의 측정이 별 무리 없이 가능함(그림3.3.2.10) 을 확인 할 수 있었다.

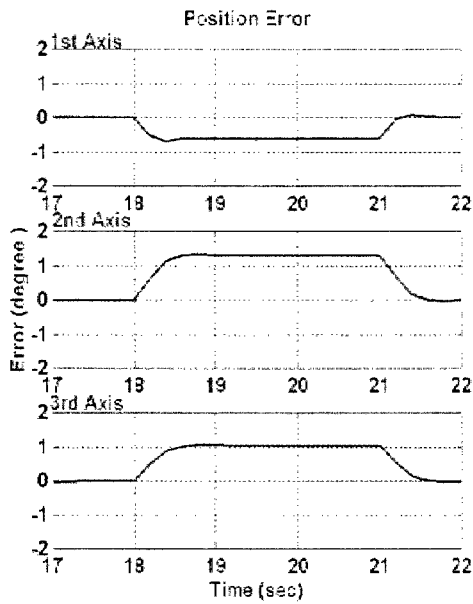


그림 3.3.1.7 관절 위치 오차

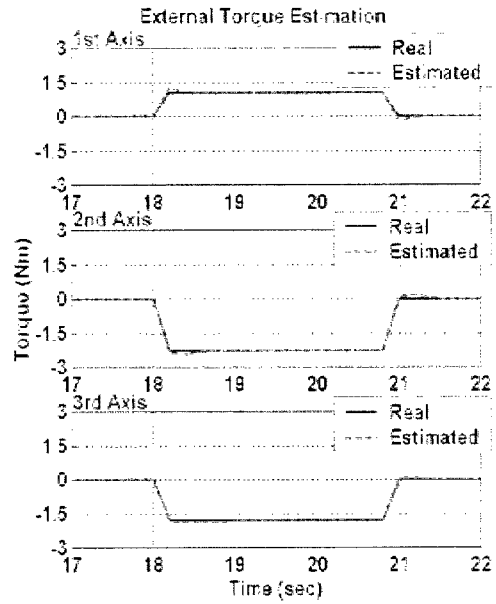


그림 3.3.1.8 접촉 힘 측정

식사 보조 작업의 경우

(접촉이 일어난다고 정의된 시간 구간에 대해서만 표시한 것임)

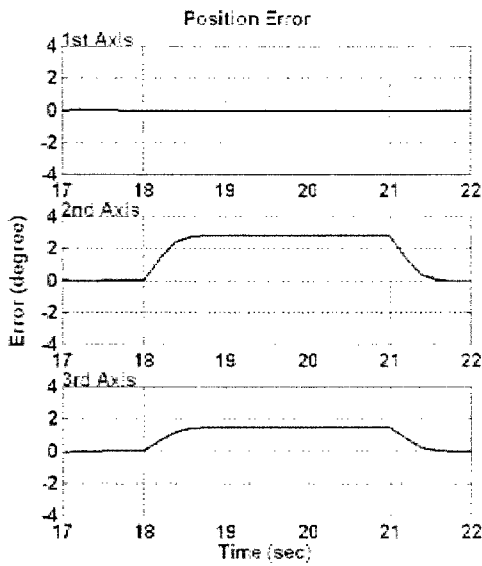


그림 3.3.1.9 관절 위치 오차

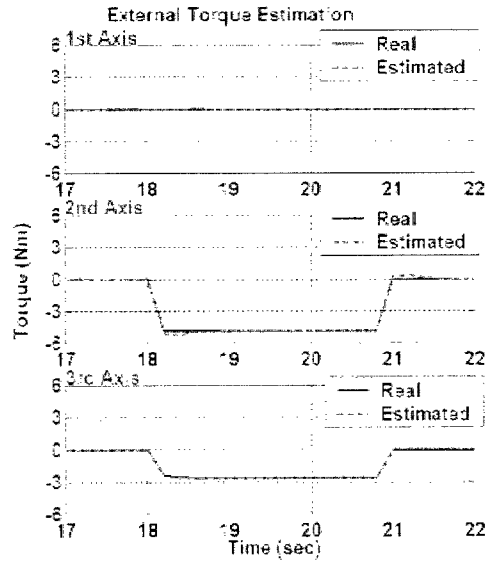


그림 3.3.1.10 접촉 힘 측정

면도 작업

(접촉이 일어난다고 정의된 시간 구간에 대해서만 표시한 것임)

(나) 마찰력 모델 설정 실험

앞서 언급된 바와 같이 KARESⅡ는 케이블 메커니즘을 사용하여 거의 마찰이 없도록 설계 되었다. 그러나 실제로 외력 측정을 위한 로봇의 정적인 상태에서의 모델을 구성하기 위해서는 정확한 모델을 필요로 한다.

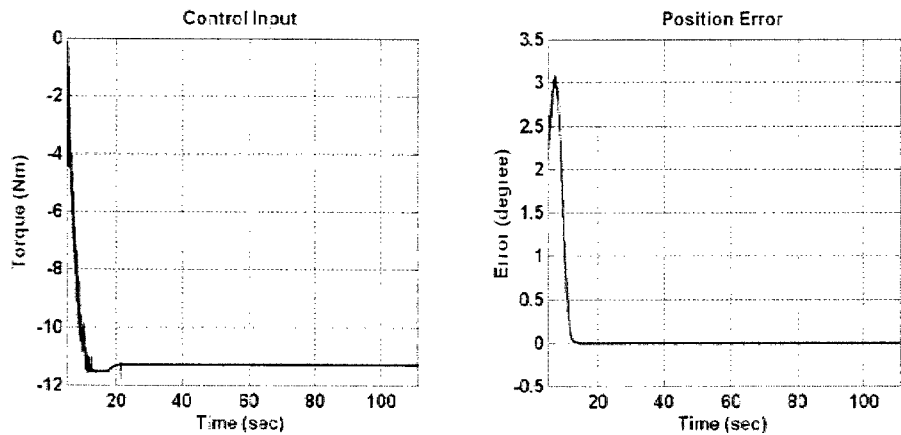
따라서 우선은 일반적으로 고려하는 동적인 상태에서의 점성 마찰력 및 쿨롱 마찰과 정적인 상태에서의 스틱슬립(Stick-Slip)을 일단은 모두 고려하여야 한다.

그러나 이미 저속 운동 시에 시간 지연을 이용한 제어기법(TDC)의 성능과 스틱슬립의 영향과의 관계에 관한 연구는 [15]에 있다.

이에 따르면 동적인 마찰력만이 존재하는 경우에는 시간 지연을 이용한 제어기법은 완벽하게 주어진 궤적을 추종하는 성능을 보이지만 스틱슬립이 존재하는 경우에는 추종 성능에 문제가 발생하며 스틱슬립 현상이 그대로 제어 입력과 추종 오차에 반영된다.

KARESⅡ의 경우에도 마찬가지로 스틱슬립이 존재하는가에 관해서 위치 제어만을 수행한 경우의 제어 입력과 추종 오차를 살펴봄으로서 확인 할 수 있다. 위치 제어만을 한 경우에 제어 입력과 추종 오차는 그림 3.3.1.11과 같다.

그림 3.3.1.11에서 알 수 있듯이 추종 오차가 0으로 수렴하며 제어 입력도 한 값으로 수렴하는 것으로부터 스틱슬립 현상은 존재하지 않음을 알 수 있다. 따라서 KARESⅡ의 정적인 상태에 대한 모델에서 스틱슬립 모델은 필요로 하지 않음을 알 수 있다. 이로부터 KARESⅡ가 마찰에 관해 좋은 기계적 성능을 보임도 확인 할 수 있다.



a) 제어 입력

b) 관절 위치 오차

그림 3.3.1.11 시간 지연을 이용한 제어 기법을 이용한 위치 제어 결과

a) 제어 입력은 일정한 값으로 수렴

b) 관절 위치 오차는 0으로 수렴

(다) 매개 변수 추정 실험

3장에서 제안한 접촉 힘 측정 방법을 실제로 적용하기 위해서는 중력 값과 마찰력에 대한 추정이 필요하다. 실제로 로봇의 동역학은 식 3.3.1.15과 같이 표시 된다.

$$\tau = M(\theta) \cdot \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + F(\theta, \dot{\theta}) \quad (3.3.1.15)$$

여기에서 중력에 관한 항인 $G(\theta)$ 와 마찰력에 관한 항인 $F(\theta, \dot{\theta})$ 만을 추정해 내기 위해서는 로봇을 각각 관절마다 등속 운동 시킨 후 등속 운동에 필요한 토크를 제는 것이 필요하다. 등속 운동은 시간 지연을 이용한 제어법칙을 사용하여 구현 할 수 있다.

앞에서 밝힌 바와 같이 KARES II에는 마찰력은 점성 마찰력과 쿨롱 마찰력이 존재 한다고 가정하고서 수행하였다.

각 축 별로 중력과 마찰력에 관한 식을 표시하면 식 3.3.1.16과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \beta_{11} \dot{\theta}_1 + \beta_{12} \text{sgn}(\dot{\theta}_1) \\ \tau_2 &= \alpha_{21} C_2 + \alpha_{22} S_{23} + \beta_{21} \dot{\theta}_2 + \beta_{22} \text{sgn}(\dot{\theta}_2) \\ \tau_3 &= \alpha_{31} S_{23} + \beta_{31} \dot{\theta}_3 + \beta_{32} \text{sgn}(\dot{\theta}_3) \end{aligned} \quad (3.3.1.16)$$

여기서 α_{ij} 는 중력과 관계된 값이고 β_{ij} 는 점성 마찰 계수 및 쿨롱 마찰 계수 값이다. 식 3.3.2.16은 식 3.3.2.17과 같은 꼴로 변형이 가능하다.

$$\tau_i = W_i \Phi_i \quad (3.3.1.17)$$

여기서 τ_i 는 i 번째 관절 토크 W_i 는 i 번째 관절의 위치와 속도 등에만 관계된 양으로 이루어진 행렬, Φ_i 는 i 번째 링크의 추정해야 할 매개 변수로 이루어진 행렬이다. 식 3.3.1.17으로부터 τ_i 와 Φ_i 가 선형적인 관계에 있음을 알 수 있다. 따라서 최소 자승법(Least Square Method)를 사용하여서 Φ_i 를 추정할 수 있다. 추정된 매개 변수 값은 표 3.3.1.1과 같다.

표 3.3.1.1 매개 변수 추정 결과

매개 변수	추 정 값
α_{21}	18.3580
α_{22}	5.9060
α_{31}	5.9160
β_{11}	0.5950
β_{12}	0.0170
β_{21}	0.1742
β_{22}	0.8246
β_{31}	0.4000
β_{32}	0.6400

추정된 매개 변수를 이용하여서 실제 제어 입력과 추정된 중력 및 마찰력 값을 비교한 결과는 그림 3.3.1.12와 같다.

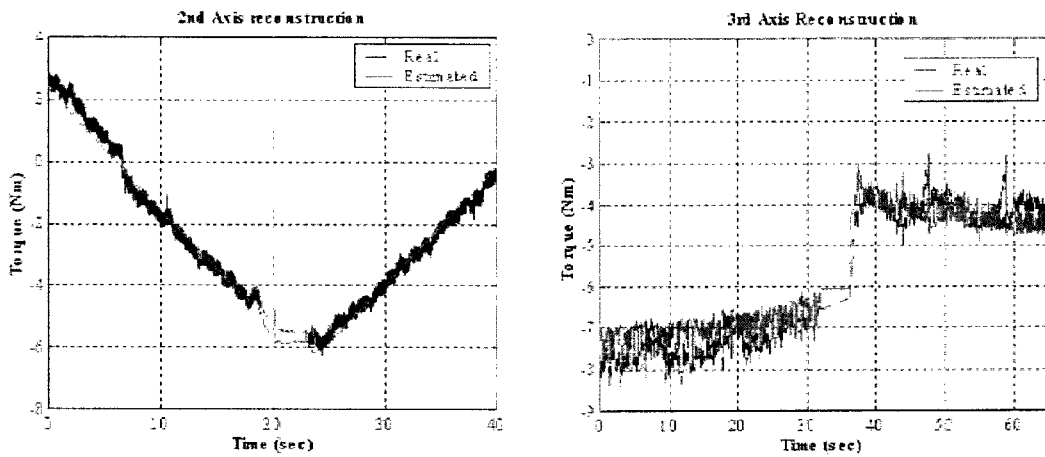


그림 3.3.1.12 중력 및 마찰력 추정 값 및 실험 값

실험 결과에서 확인 할 수 있듯이, 매개변수 추정은 정확하게 이루어졌으며, 접촉 힘 추정에 충분히 쓰일 수 있음을 알 수 있다.

(라) 접촉 힘 추정 실험

앞 절에서 수행한 매개 변수 추정을 바탕으로 하여서 면도작업의 경우에 대해서 장애인 얼굴 근처에 도달한 상황에서 접촉 힘 측정 실험을 수행하였다. 그림 3.3.1.13와 같이 일정한 접촉력을 유지하기 위해서 7.84N정도 무게를 용수철 저울을 사용하여 -Z 방향으로 가하는 실험을 수행하였다.

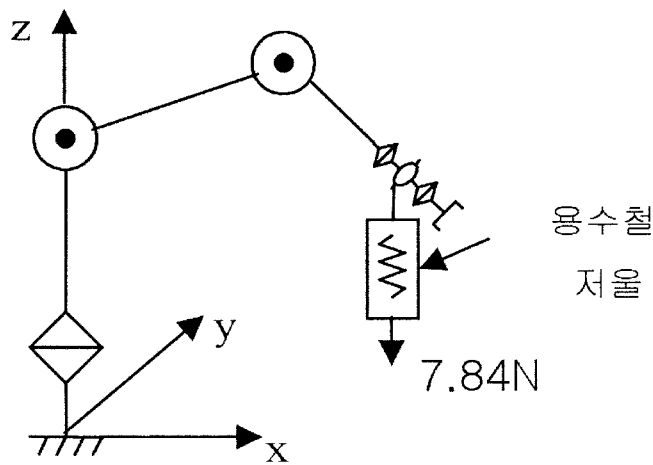


그림 3.3.1.13 접촉 힘 측정 실험 상황

실험 결과 그림 3.3.1.14와 같이 접촉 힘의 측정이 가능하였다. 이론상 3축 끝에 7.84N이 걸리게 될 경우 1축에는 0Nm, 2축에는 -2.4Nm, 3축에는 -1.2Nm 정도의 토크가 걸리게 된다. 실제 실험 결과에서도 표 3.3.1.2와 같이 1축의 경우 거의 0에 가깝게, 2, 3축의 경우에도 이론 치와 거의 오차 없이 정확한 값을 잴 수 있음을 확인하였다

표 3.3.1.2 실제 토크 값 및 측정된 토크 값

축	실제 토크 값(Nm)	측정된 값(Nm)
1	0	0.1
2	-2.4	-2.45
3	-1.2	-1.2

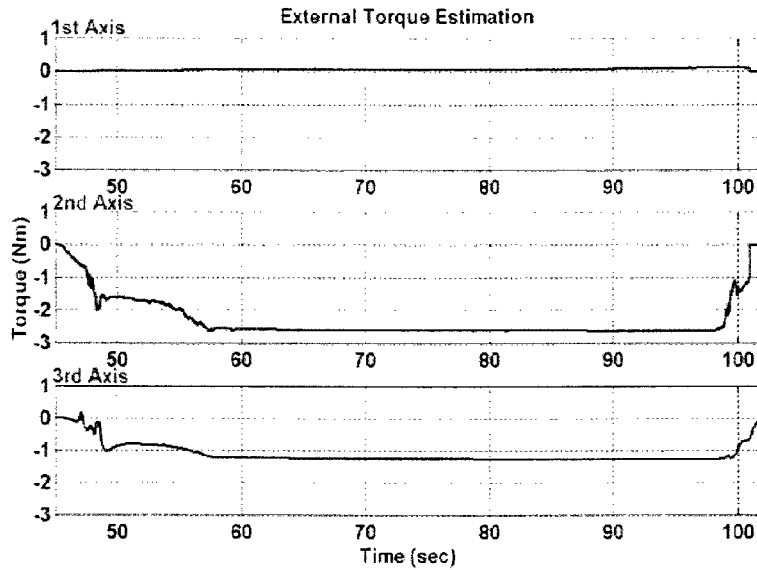


그림 3.3.1.14 접촉 힘 측정 실험
 3축 끝에 7.84N이 걸렸을 때 각 관절에 걸리는 토크를 제안한 접촉
 힘 측정 방법으로 측정한 결과임
 (접촉이 일어난다고 정의된 시간대만을 그린 것임)

또한, 장애인이 다치지 않을 만큼의 접촉 힘이 감지 가능한지의 여부도 중요하기 때문에, 외부에서 외력이 걸리지 않은 상황에서 제안한 접촉 힘 측정 방법이 얼마만큼의 오차를 가지고 있는지를 측정하는 실험을 수행하였다. 실험 결과는 그림 3.3.1.15과 같다. 실험 결과 값과 실제 면도 및 세안 작업등을 수행 할 때 1N을 측정하기 위해 필요한 최소 토크 값의 비교는 표 3.3.1.3에 나와 있다. 실험 결과에서 알 수 있듯이, 1N의 힘, 즉 질량이 100g인 물체의 무게 정도의 외력이 걸리는 것에 대해서는 민감하게 반응함을 알 수 있다. 따라서 장애인과의 접촉 시에 장애인에게 큰 힘이 가하여져서 위험해지기 이전에 컴플라이언스 제어가 가능함을 알 수 있다.

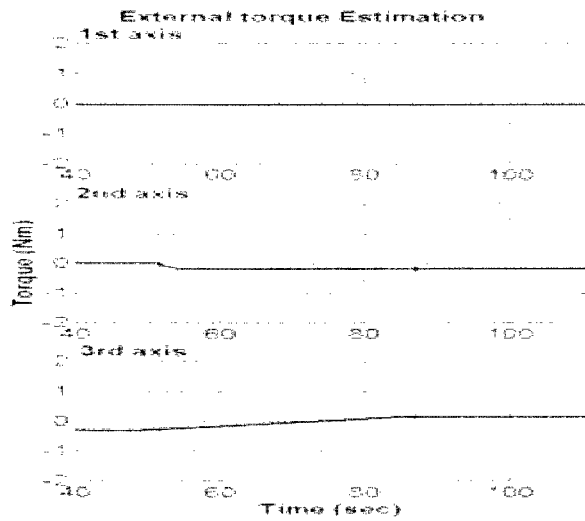


그림 3.3.1.15 측정 가능 최소 접촉 힘 실험 결과

표 3.3.1.3 측정 가능한 최소 접촉 힘 실험 결과

축	1N 감지 위한 최소 토크 (Nm)	최소 접촉 토크 (Nm)
1	0.7	0.05
2	0.7	0.18
3	0.4	0.15

(마) 관절 공간(Joint Space) 컴플라이언스 구현 실험

앞의 매개 변수 추정 실험과 접촉 힘 측정 실험을 바탕으로 하여 면도 작업 시에 컴플라이언스 제어가 필요한 구간에서 제안한 컴플라이언스 제어 방법의 성능을 실험하여 보았다. 실험 방법은 접촉 힘 측정 실험에서와 마찬가지로 3축 끝 단에 7.84Nm의 힘을 Z방향으로 가한 후에 원하는 컴플라이언스가 구현이 되는지를 보았다.

정상 상태에서 구현되기를 위한 각 축의 컴플라이언스는 표 3.3.1.4와 같다.

표 3.3.1.4 구현되기를 위한 각 축의 컴플라이언스

축	컴플라이언스 (deg/Nm)
1	2.21
2	1.17
3	0.39

실제로 각 축에서 구현된 컴플라이언스는 아래 표 3.3.14과 같다.

표 3.3.15 실제로 구현된 각 축의 컴플라이언스

축	컴플라이언스 (deg/Nm)
1	2.21
2	1.17
3	0.39

실험 결과 그림 3.3.1.16에서 알 수 있듯이 구현하기를 원했던 컴플라이언스가 실제 실험 결과에서도 모의 실험의 경우와 마찬가지로 잘 구현이 되었음을 알 수 있다.

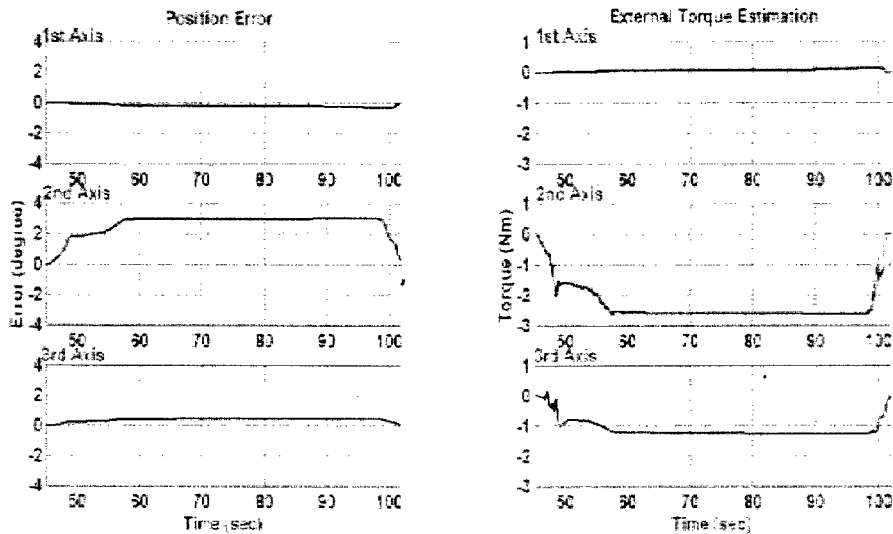


그림 3.3.1.16 컴플라이언스 제어 실험 결과

a) 관절 위치 오차

b) 접촉 토크 추정 결과

(접촉이 일어난다고 정의된 시간대만을 그린 것임)

그림 3.3.1.17은 실제로 컴플라이언스가 구현되어서 올바르게 작동하는지 여부를 확인하는 실험의 모습이다. 사람 손으로 로봇을 눌렀을 때, 로봇의 컴플라이언스가 구현이 되어서 눌렀다가 외력이 사라지자, 제자리로 돌아오는 것을 확인 할 수 있었다.

또한 이 연구는 실제 작업에의 적용을 염두에 두고서 한 것이므로, 실험실 환경 하에서 면도 작업에 대한 실험을 수행하였다. 이는 장애인을 대상으로 한 실험 이전에, 실제로 작업이 가능한지 여부를 확인하는 실험으로서 그림 3.3.1.18과 같이 실제 면도 작업에서도 우수하게 작동하는 것을 확인 할 수 있었다.

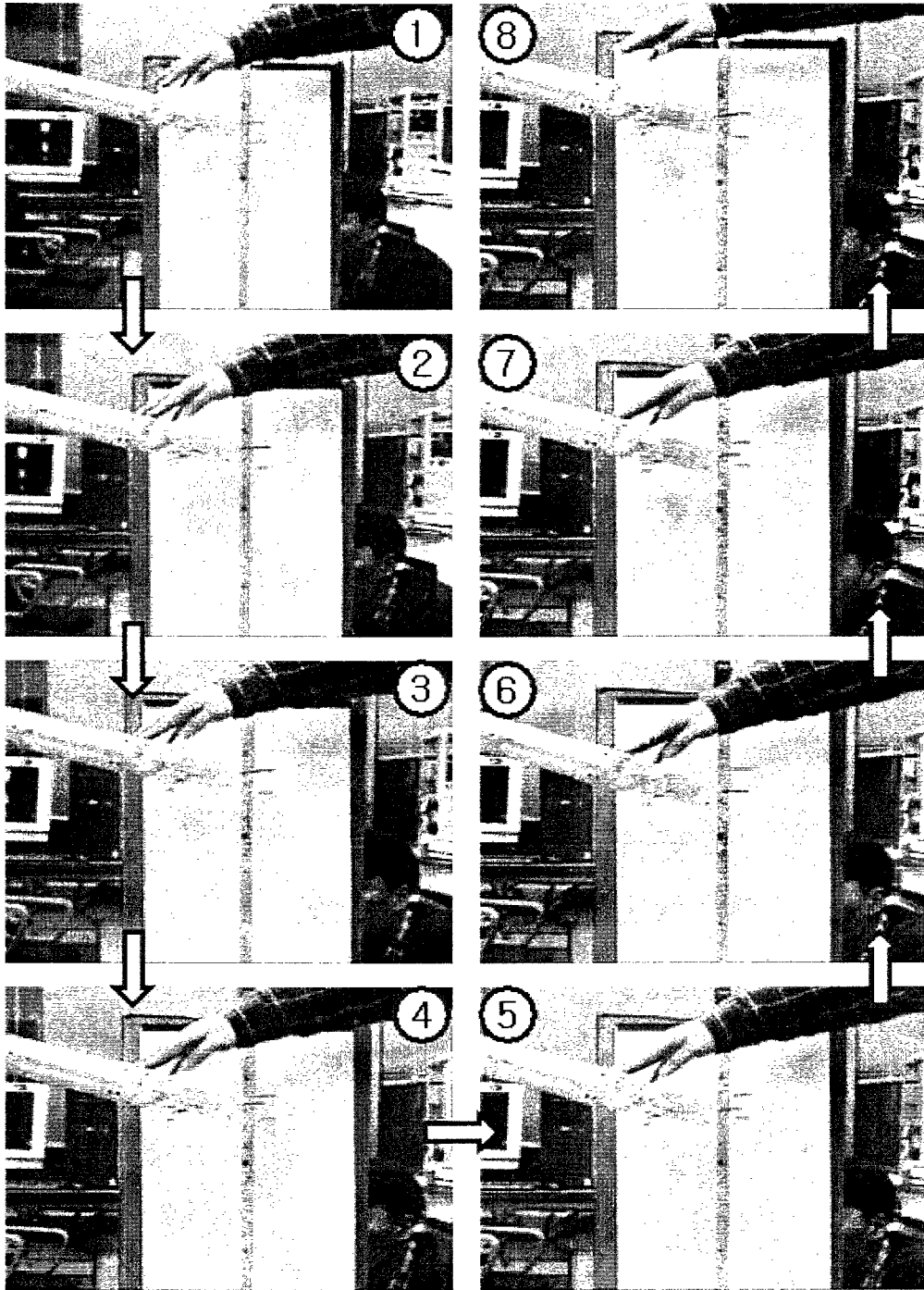


그림 3.3.1.17 컴플라이언스 구현 실험

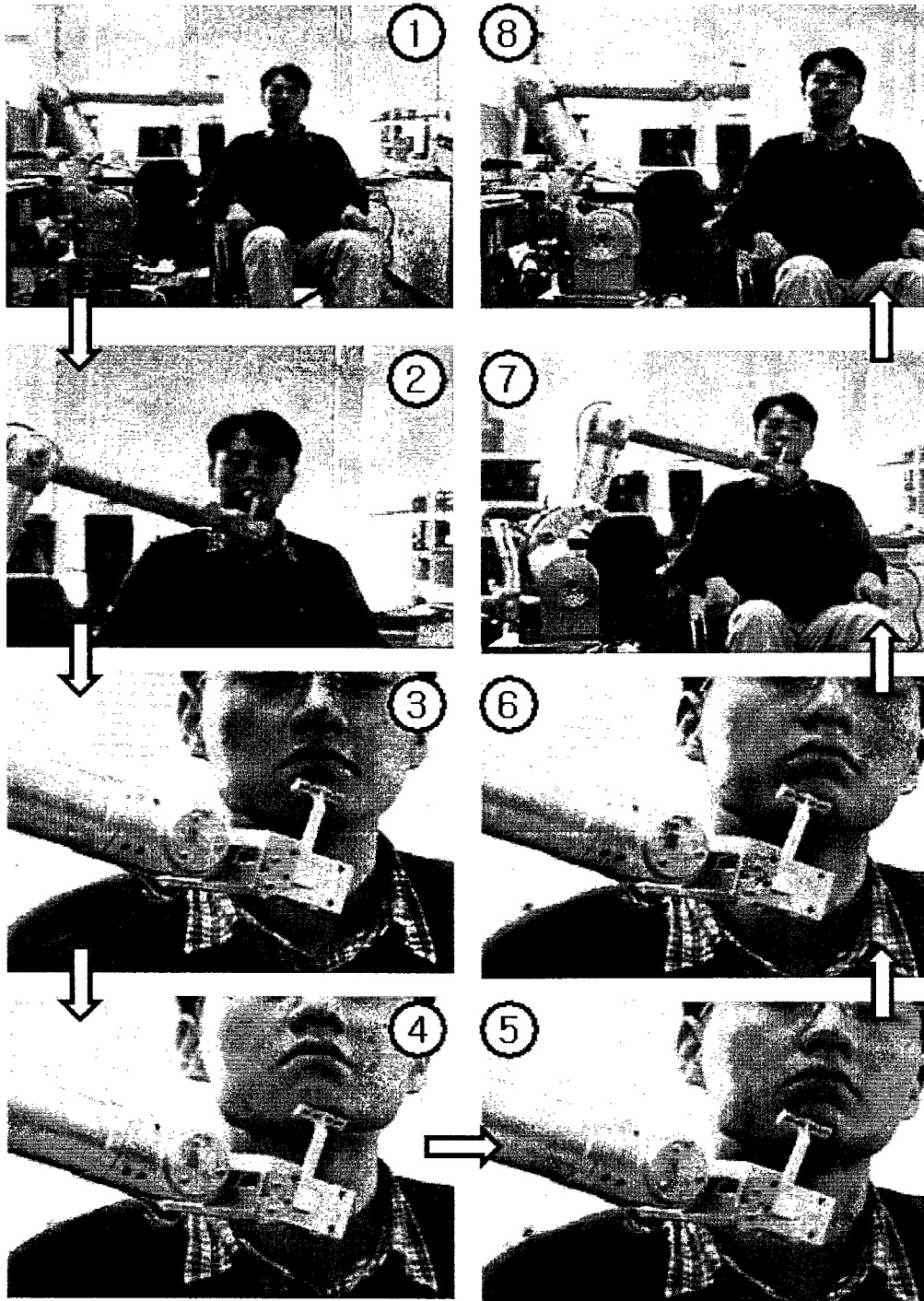


그림 3.3.1.18 번도 작업 적용 실험 결과

(3) 장애인 대상 임상 실험

KARES II는 장애인 보조 작업을 목표로 하고 있으므로, 실제적인 도움이 되기 위해서는 각 작업 별로 장애인들이 가장 선호하는 컴플라이언스 값을 알아야 할 필요가 있다. 즉 사용자가 가장 편하게 느끼는 컴플라이언스를 구현해 주는 것이 KARESII의 컴플라이언스 제어의 궁극적인 목표라고 할 수 있다. 이를 위해서 국립 재활원(National Rehabilitation Center)에서 C3~C5 레벨의 경추 손상환자를 대상으로 면도 작업 및 얼굴 닦기 작업에 대한 임상 실험이 이루어졌다.

그림 3.3.1.19 와 3.3.1.20은 국립재활원에서 실제 장애인이 면도 작업 과 세안 보조 작업을 수행하고 있는 모습이며, 장애인의 초상권 보호를 위하여 눈 부분이 가려졌다. 실험 방법은 그림 3.3.1.21 과 같다.



그림 3.3.1.19 면도 작업의 실제 장애인 대상 임상 실험



그림 3.3.1.20 세안 및 얼굴 긁기 보조 작업의 실제 장애인 대상 임상 실험

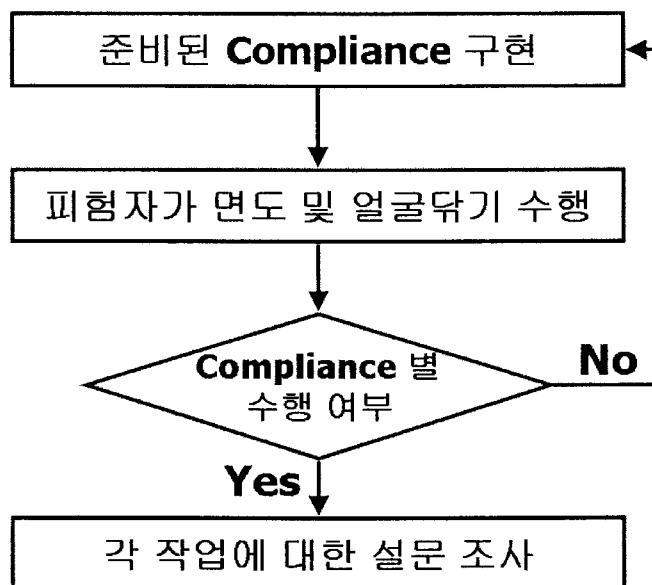


그림 3.3.1.21 임상 실험 순서도

임상 실험 방법은 사용자가 편하게 느끼는 컴플라이언스의 크기를 정하기 위하여 세 가지 레벨의 컴플라이언스를 미리 선정하여서, 세 가지 크기의 컴플라이언스를 사용하여 각각 작업을 수행 한 후에 어느 정도 크기의 컴플라이언스가 적합한지 여부를 설문 조사를 통하여 응답하는 형식으로 진행하였다.

실험에 주어진 컴플라이언스의 크기는 두 작업 모두에 대하여, 표 3.3.1.5와 같이 세가지 level로 주어졌다. 컴플라이언스는 로봇 팔의 1, 2, 3축에 대해 구현되었으며, 링크(link)의 길이를 고려하여 각 축의 컴플라이언스를 주었다. 손목 축에 해당하는 4, 5, 6축에서는 로봇 끝단의 엔드 이펙터(end-effector)의 방위(orientation)를 결정하기 때문에, 직교 좌표 공간(Cartesian space)의 위치좌표 x, y, z 축에 대한 컴플라이언스는 1, 2, 3축만으로 주어질 수 있다.

표 3.3.1.6에서 레벨 1이 컴플라이언스가 가장 작은 경우, 즉 강성(stiffness)이 가장 큰 경우이며, 레벨 3이 컴플라이언스가 가장 큰 경우 즉, 강성(stiffness)이 가장 작은 경우이다. 세 가지 레벨은 [16]에서 주어진 사람 팔의 컴플라이언스 값을 기초로 비슷한 큰 값과 작은 값을 결정하였다.

표 3.3.1.6 세 가지 레벨의 컴플라이언스 [deg./Nm]

축	Level 1	Level 2	Level 3
1	1.232	2.053	4.107
2	0.782	1.303	2.610
3	0.131	0.218	0.436

실험에 주어진 설문은 아래와 같이 네 가지로 주어졌다.

1. 어느 경우가 가장 안전하다고 느껴집니까?
2. 느낌이 가장 좋았던 것은 셋 중 어느 경우입니까?
3. 그 경우에 먼도(세안)은 만족스럽게 이루어졌습니까?
4. 만족스럽지 않았다면 어느 경우에 만족스럽게 이루어졌습니까?

이 설문은 최종적으로 만들어진 로봇을 사용하게 될 사용자들이 현재 구현된 컴플라이언

스를 어떻게 느끼는가를 객관적으로 조사하고자 작성되었다. 질문 2와 3의 경우에는 중복성이 있는 질문으로서, 중복되는 내용에 사용자가 답하게 함으로서, 좀 더 정확한 평가를 얻고자 선정되었다. 이 질문들에서 궁극적으로 얻고자 하는 것은 사용자가 느끼는 안전성 및 편안함이다.

먼저 면도작업의 경우, 3가지 level에 대해 실험하였을 때, 장애인이 안전하게 느끼는 정도의 선호도는 그림 3.3.1.22 와 같이 분포한다.

그림 3.3.1.22는 면도작업 시에 장애인이 각각의 레벨(level)에 대해 안전하다고 느끼는 정도를 보여주며, 그림 3.3.1.23은 같은 작업 시에 각각의 레벨(level)에 대해 작업의 만족도를 보여준다.

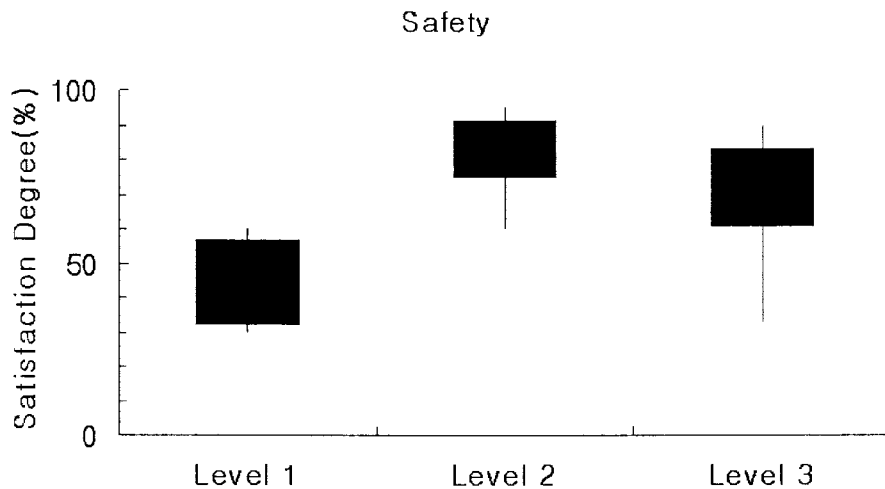


그림 3.3.1.22 장애인이 안전하게 느끼는 정도에 대한 설문 조사 결과

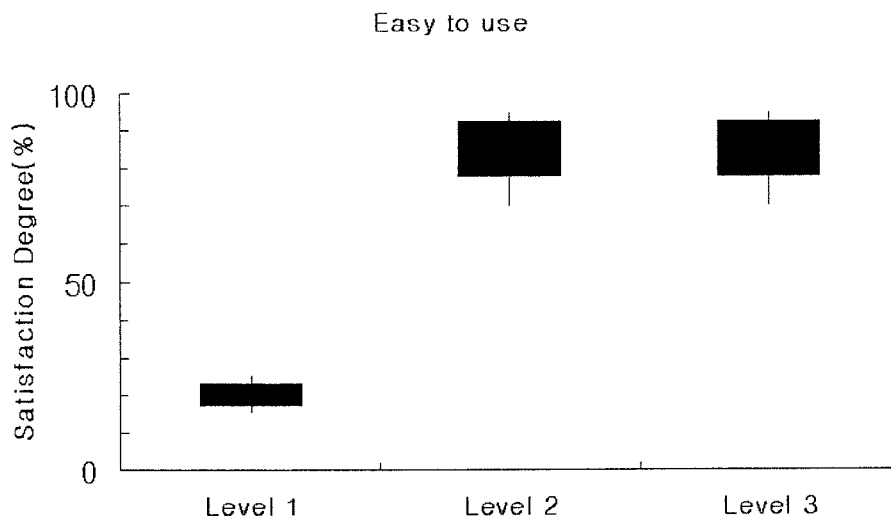


그림 3.3.1.23 장애인이 편하게 느끼는 정도에 대한 설문 조사 결과

결과에서 볼 수 있듯이, 레벨 2에서 작업의 안전성에 대한 만족도가 가장 높은 것을 볼 수 있으며, 작업의 편안함의 만족도는 레벨 2가 레벨 3보다 근소하게 더 좋게 느끼는 것으로 나타났다. 이는 장애인이 면도작업을 할 때는 간병인의 팔처럼 컴플라이언스가 구현되는 것이 더 안전하고 편리하며, 그 값이 큰 값 (stiffness가 작은 값) 에서 만족도가 높다는 것을 보여 준다.

세안 작업의 경우는 위의 세 가지 level에 대해 모두 만족도가 나쁜 것으로 나타났으며, 표 3.3.1.4의 컴플라이언스보다 훨씬 작은 값, 즉 매우 강성(stiff)이 큰 경우에 만족스럽게 느끼는 것을 알 수 있었다. 이는, 작업의 특성상 로봇이 컴플라이언트 하여서 얼굴과 접촉 시 밀려나서는 세안을 하기가 어렵기 때문이다. 즉, 세안 작업은 얼굴에 있는 이물질 제거하기 위하여 로봇 팔이 큰 강성을 가지고 버텨주는 것이 더 바람직하다 할 수 있다. 따라서 세안 작업의 경우는 면도 작업과 같이 컴플라이언스를 주기 보다는 강성이 크게 하여 버텨 주어야 만족된 작업이 이루어지며, 컴플라이언스 제어를 구현해 주는 것보다 로봇이 수건을 원하는 위치에 단단하게 고정시켜주고 장애인이 자신의 얼굴을 움직여서 얼굴을 닦는 것이 더 바람직하다는 것을 보여준다. 또한 이에 대한 장애인의 의견으로는 전체적인 세안에 로봇 팔을 이용하는 것도 가능하지만, 장애로 인한 신체적인 부작용들을 막기 위하여 먹는 약물에 의하여 피부에 일어나는 가려움을 로봇 팔을 이용하여 긁음으로서 해소하는데 사용하는 데에도 사용할 수 있다는 의견이 있었다.

이와 같이 실제 사용자인 장애인 대상의 임상 실험을 통하여, 장애인들의 로봇 팔에 대한 의견을 수렴할 수 있었으며 이를 통하여 로봇 팔에 어느 정도 컴플라이언스를 주는 것이 가장 좋은지를 얻어 낼 수 있었다.

그리고, 제안한 컴플라이언스 제어 방법이 유용하며, 실제 상황에서도 잘 활용될 수 있음을 반복되는 임상 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

또한 임상 실험을 통하여 얻어진 이 자료들은 앞으로 장애인을 위한 로봇 시스템을 디자인하는데 있어서 중요한 자료로서 활용 될 수 있을 것이다.

나. 사용자의 안전성을 고려한 로봇 팔의 개발

(1) 소프트 로봇팔의 2차 시제품 제작

(가) 1차 시제품에 비해 개선된 사항

① 효율적인 장력조절장치 개발

소프트 로봇팔의 1차 시제품을 조립할 때 1,2,3축에서 가장 중요한 것은 **장력(tension)**이 만족할 만큼 커지도록 **케이블(cable)**을 감는 것이다. 케이블의 **장력이 작은 상태**로 감기게 되면 **백래쉬(backlash)**가 발생할 가능성이 있고, 로봇을 제어할 때 **진동을 발생시킬 소지**가 있다. 로봇을 조립하면서 케이블의 장력을 조절하는 것은 매우 어려운 작업이었고, 또한 초기에 케이블을 감을 때 장력이 커지도록 하는 것도 힘든 작업이었다. 그리하여, 초기에 케이블을 감는 작업을 수월하게 하고, 케이블을 감은 후에도 **케이블의 장력(tension)**을 조절할 수 있는 장치를 고안하여 추가하는 것이 필요하였다.

이러한 조건을 만족시킬 수 있는 부품을 찾아 본 결과 **웜기어(worm gear)**가 가장 적당하였다. **웜기어를 이용한 장력조절 장치**는 그림 3.3.1.24에서 보이는 것처럼 웜의 회전 방향이 동력전달 방향과 수직을 이루고 있다. 그림 3.3.1.25는 장력조절장치에 대한 개념도이고 이를 실제로 구현한 것은 그림 3.3.1.26과 같다. 또한, 전해지는 동력의 크기에 따라 웜기어의 크기를 달리 하였다. 1축과 3축에는 지름 13mm 정도의 웜기어를 사용하였고, 2축에는 지름 25mm 정도의 웜기어를 사용하였다. **장력조절장치를 추가함으로써 케이블 감기가 수월해졌고 장력 조절이 매우 용이해졌다.** 그림 3.3.1.27은 로봇팔의 1축과 3축에 적용된 장력조절장치를 보여준다.

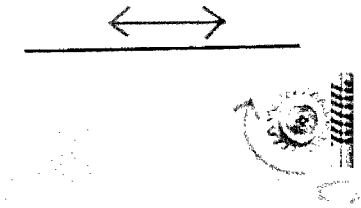


그림 3.3.1.24 웜기어를 이용한
장력조절장치

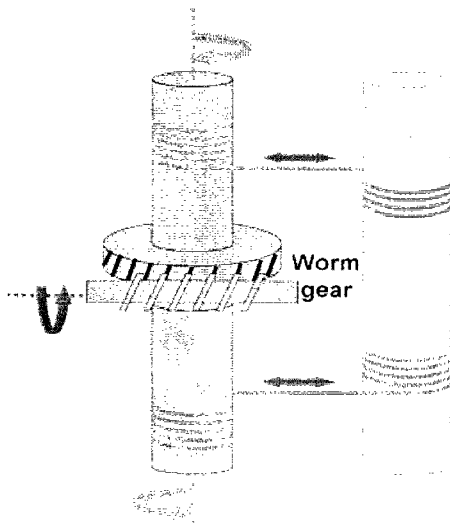


그림 3.3.1.25 장력조절장치의 개념도

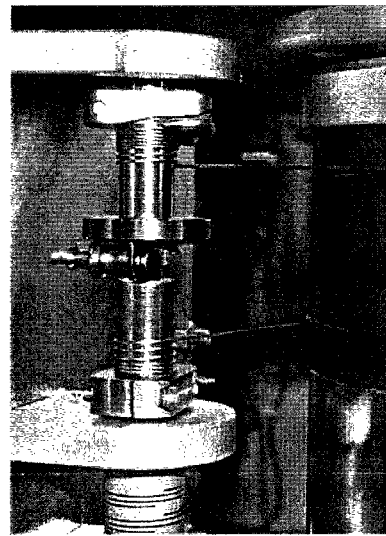


그림 3.3.1.26 제작된 장력조절장치

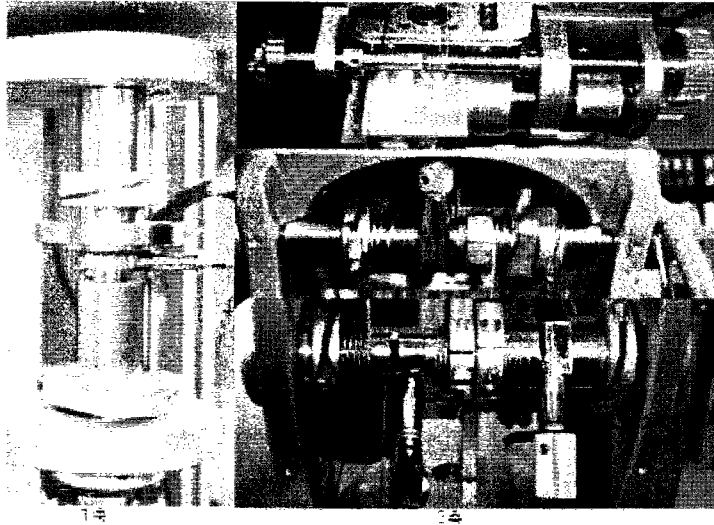


그림 3.3.1.27 로봇팔 1축과 3축에 적용된 장력조절장치

② 개선된 손목축의 제작

소프트 로봇팔의 1차 시제품에서는 손목축을 구현하는데 베벨기어(bevel gear)를 사용하였다. 손목축의 롤(roll) 운동과 피치(pitch) 운동을 구현하기 위해 5개의 기어를 배치하였는데, 여러 개의 기어가 맞물려 구동됨으로 인하여, 백래쉬(backlash)와 마찰이 커지는 현상이 발생하였다. 그리하여, 손목축이 부드럽게 작동되지 않아 원활한 제어에 어려움이 생기는 문제가 있었다. 그 이유로는 베벨 기어 가공의 정밀도와 관련이 있었다. 그러나 기어 가공을 정밀하게 한다고 하더라도 기어 자체가 가지고 있는 백래쉬를 없앨 수는 없기 때문에 이러한 문제를 보완하기 위해 베벨 기어 대신 케이블을 이용한 손목축을 개발하였다. 롤과 피치 운동을 필요로 하는 손목축을 케이블 메카니즘(cable-driven mechanism)으로 구현하기 위하여 그림 3.3.1.28와 같은 새로운 설계를 제안하였다. 제안된 구조는 손목축의 롤과 피치를 담당하는 모터를 길이 방향으로 배치하여 손목축이 옆으로 커지는 것을 방지하고자 하였다. 모터를 길이 방향으로 배치하기 위하여 아래 부분의 실린더가 추가되었고, 이 실린더를 2개로 분리시켜 롤과 피치 운동이 가능하도록 설계하였다. 제안한 방법은 현재 특허 출원을 준비 중이다. 제안된 개념 설계를 바탕으로 세부 설계된 손목축은 그림 3.3.1.29과 같다.

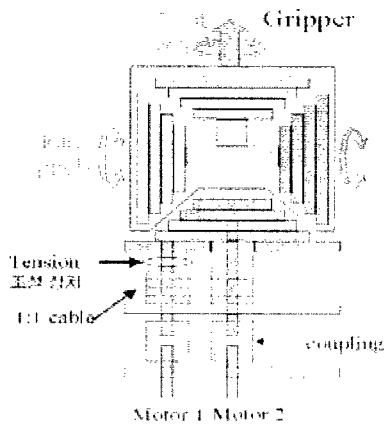


그림 3.3.1.28 손목축 개념도

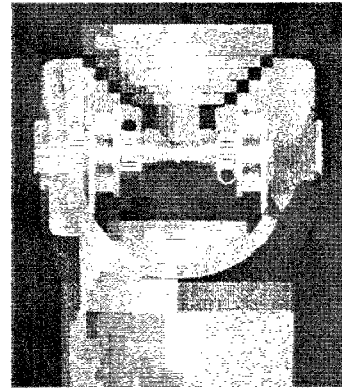


그림 3.3.1.29 3D로 설계된 손목축 부분

세부 설계된 4,5,6축 부분의 전체 모습은 그림 3.3.1.30과 같다.

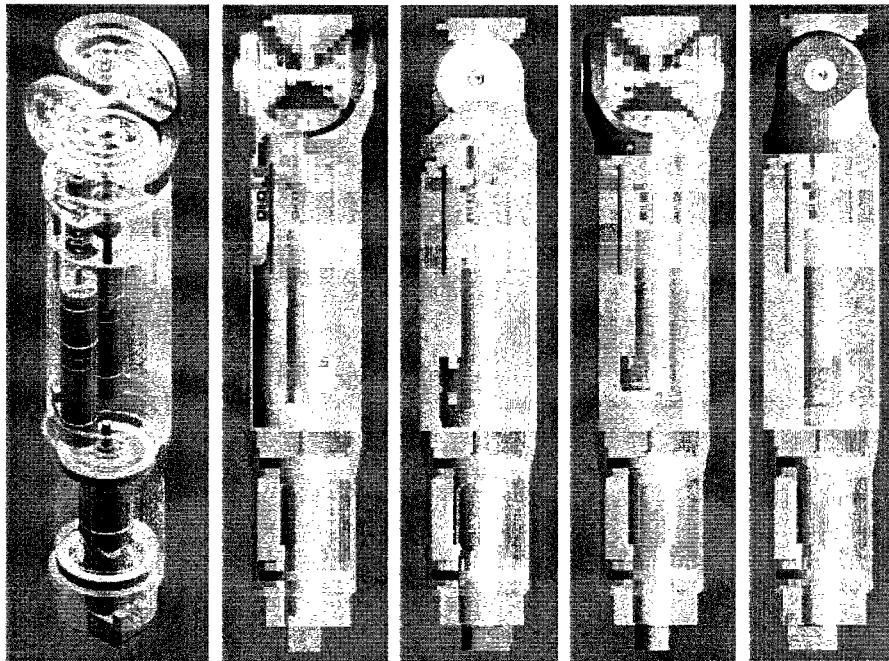


그림 3.3.1.30 설계된 4,5,6축의 전체 모습

2차 시제품을 위해 개발된 손목축은 케이블을 통하여 동력이 전달되므로, **케이블의 장력을 조절하는 장치를 같이 고려**해야 한다. 만일 그런 장치가 없어 케이블의 장력이 작아질 경우 백래쉬가 발생할 가능성이 존재하기 때문이다. 손목축은 소프트 로봇팔 1,2,3축과

같이 넓은 공간이 존재하지 않기 때문에 장력조절장치의 배치에 어려움이 있었다. 이 문제를 해결하기 위해 손목축에 적합한 장력조절장치의 배치를 고안하였다. 웜기어를 이용한 장력조절장치를 배치하는데 4개의 실린더 중 내부 공간에 여유가 있는 2개의 실린더에만 장력조절장치를 배치하고, 각 실린더에 2개씩의 장력조절장치를 넣어, 필요한 총 4개의 장력조절장치를 구현하였다. 그림 3.3.1.29에 보이는 금색부분이 장력조절장치에 사용되는 웜기어를 나타내는데, 웜기어를 좌우 두 개의 실린더에 각각 2개씩 배치한 것을 확인할 수 있다. 손목축에도 장력조절장치를 넣음으로써 조립이 용이하고, 장력 조절에 편리해지는 이점을 얻었다. 이로써 1차 시제품의 손목축이 갖는 문제를 모두 해결하였다. 실제 제작된 케이블로 구동되는 손목축의 모습은 그림 3.3.1.31, 그림 3.3.1.32, 그림 3.3.1.33과 같다.

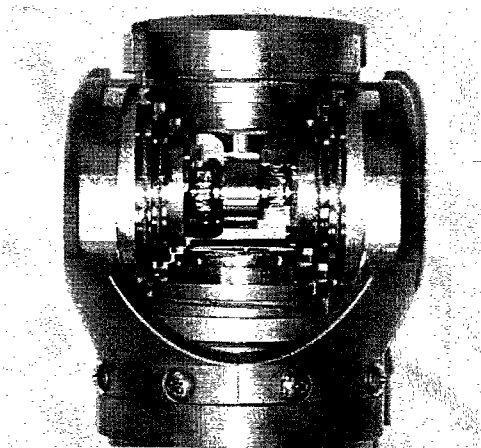


그림 3.3.1.31 손목축의 장력조절장치 부분

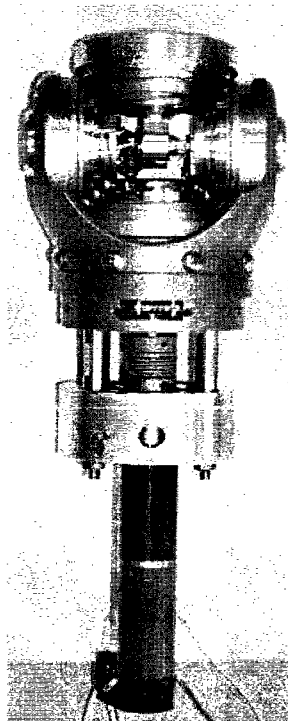


그림 3.3.1.32 제작된 손목축의 모습 (정면)

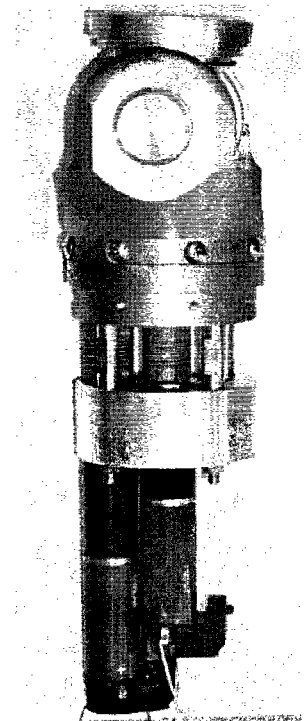


그림 3.3.1.33 제작된 손목축의 모습 (측면)

(나) 개선된 2차 시제품 설계 및 제작

1,2차년도에 제안한 로봇의 설계 전략인 TOD(Task Oriented Design) 방법을 이용하여 2차 시제품을 설계 제작하였다. TOD에 대하여 간략히 서술하면, 먼저 로봇팔이 수행해야 하는 작업은 정의하고, 각각의 작업에 대한 분석을 하여, 각각의 작업을 수행하기 위해서

로봇이 만족시켜야 하는 작업 공간을 정의한다. 작업 공간이 정의된 후에는 정의된 작업 공간을 만족시킬 수 있는 최적의 기구학적 구조를 찾아 선정한다. 로봇의 기구학 구조가 결정된 다음 단계에서는 실제 로봇을 설계하고 제작하는 과정을 수행한다. 로봇의 기구학적 구조가 결정되면, 링크의 길이나 관절의 무게를 추정할 수 있고, 정의된 작업을 수행할 때의 부하하중을 알기 때문에, 동역학적인 모의실험을 통해서 각 관절의 최대 토크를 계산해 낼 수 있다. 또한, 각 관절이 움직이는 최대속도를 지정함으로써, 관절마다 사용할 모터의 크기를 선정할 수 있다. 이때는 감속비도 같이 결정된다. 이때, 로봇 관절의 토크 측정을 위하여 어떠한 기법을 사용할지를 고려하여 모터의 크기, 감속비, 감속 방법 등을 결정한다. 그 후에는 선정된 것들에 적합한 관절구조를 선정하여 설계해야 한다. 그 이후에는 링크를 설계하여 최종적인 설계를 완성하게 된다. 작업의 분석 및 작업 공간의 결정은 이전 연구 결과로서 나와 있기 때문에 내용을 생략하고, 로봇팔 2차 시제품의 기구학적 구조, 동역학적 모의 실험, 최종 설계된 결과에 대하여 서술하고자 한다.

① 로봇팔 2차 시제품의 기구학적 구조

2차 시제품의 제작에 있어서 링크 길이에 변화가 있었다. 1차 시제품은 손목축 중심으로 부터 그리퍼(gripper) 중앙까지의 거리가 10cm였으나, 2차 시제품은 17cm로 늘어나게 되었다. 그 이유는, 비주얼 서보잉(visual servoing)을 위한 카메라를 그리퍼 부분에 장착하게 되는데 카메라 장착을 위한 여유 공간이 필요하게 되어 길이를 더 늘려 잡게 되었다. 2차 시제품에 대한 기구학적 구조는 그림 3.3.1.35와 같다.

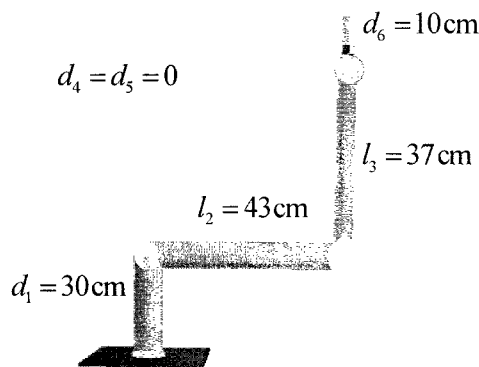


그림 3.3.1.34 1차 시제품의 기구학적 구조

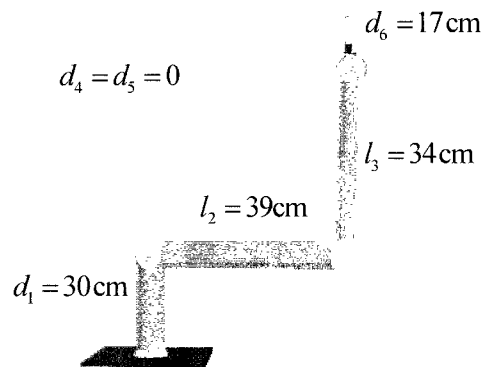


그림 3.3.1.35 2차 시제품의 기구학적 구조

표 3.3.1.7 원활한 Visual Servoing을 위한 로봇의 팔길이 조정

	1차 시제품	2차 시제품
1 축	30 cm	30 cm
2 축	43 cm	39 cm
3 축	37 cm	34 cm
손목축	10 cm	17 cm

새로 결정된 로봇팔의 기하학적 구조가 주어진 작업들을 수행하는지 살펴보기 위해, 각 작업에 대한 역기구학(inverse kinematic) 해를 구해본 결과 주어진 작업을 원활히 수행함을 확인할 수 있었으며 이때 각 작업별로 필요한 각 축의 관절각(joint angle)은 표 3.3.1.8 부터 표 3.3.1.16과 같다.

표 3.3.1.70 세안 / 면도 작업에 대한 관절각

	1축	2축	3축	4축	5축	6축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	$0^{\circ} \sim 52^{\circ}$	$-96^{\circ} \sim 0^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 29^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 76^{\circ}$	$-60^{\circ} \sim 55^{\circ}$	$-37^{\circ} \sim 90^{\circ}$
손목축까지 거리가 17cm인 경우	$0^{\circ} \sim 59^{\circ}$	$-105^{\circ} \sim 0^{\circ}$	$-3^{\circ} \sim 34^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 82^{\circ}$	$-64^{\circ} \sim 60^{\circ}$	$-44^{\circ} \sim 90^{\circ}$

표 3.3.1.71 밥먹는 작업에 대한 관절각

	1축	2축	3축	4축	5축	6축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	$0^{\circ} \sim 47^{\circ}$	$-53^{\circ} \sim 0^{\circ}$	$-8^{\circ} \sim 21^{\circ}$	$-160^{\circ} \sim 0^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 52^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 170^{\circ}$
손목축까지 거리가 17cm인 경우	$0^{\circ} \sim 50^{\circ}$	$-60^{\circ} \sim 0^{\circ}$	$-25^{\circ} \sim 25^{\circ}$	$-156^{\circ} \sim 0^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 68^{\circ}$	$0^{\circ} \sim 170^{\circ}$

표 3.3.1.72 문 여는 작업에 대한 관절각

	1축	2축	3축	4축	5축	6축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	0°~46°	-80°~0°	0°~32°	0°~66°	0°~52°	0°~90°
손목축까지 거리가 17cm인 경우	0°~53°	-86°~0°	0°~39°	0°~73°	0°~56°	0°~90°

표 3.3.1.73 서랍 열고 꺼내는 작업에 대한 관절각

	1축	2축	3축	4축	5축	6축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	-8°~0°	-125°~0°	-45°~53°	0°~60°	-70°~65°	-60°~0°
손목축까지 거리가 17cm인 경우	-8°~0°	-135°~0°	-90°~0°	0°~18°	-75°~95°	-18°~0°

표 3.3.1.74 차/물 마시는 작업에 대한 관절각

	1축	2축	3축	4축	5축	6축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	0°~52°	-125°~0°	0°~47°	0°~55°	-75°~75°	0°~90°
손목축까지 거리가 17cm인 경우	0°~60°	-136°~0°	-3°~52°	-157°~0°	-80°~80°	-13°~90°

표 3.3.1.75 책 꺼내는 작업에 대한 관절각

	1축	2축	3축	4축	5축	6축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	0°~26°	-92°~0°	-27°~37°	-155°~0°	-15°~77°	-120° ~80°
손목축까지 거리가 17cm인 경우	0°~32°	-100°~0°	-35°~42°	-150°~0°	-15°~80°	-110° ~135°

표 3.3.1.76 프린터 용지 빼는 작업에 대한 관절각

	1축	2축	3축	4축	5축	6축
손목측까지 거리가 10cm인 경우	0°	-125°~0°	0°~53°	0°	-72°~0°	0°
손목측까지 거리가 17cm인 경우	0°	-136°~0°	0°~60°	0°	-75°~14°	0°

표 3.3.1.77 CD 바꾸는 작업에 대한 관절각

	1축	2축	3축	4축	5축	6축
손목측까지 거리가 10cm인 경우	-27°~0°	-23°~7°	0°~36°	-38°~0°	0°~120°	-17°~90°
손목측까지 거리가 17cm인 경우	-38°~0°	-31°~15°	0°~42°	-46°~5°	0°~120°	-28°~90°

표 3.3.1.78 스위치 켜는 작업에 대한 관절각

	1축	2축	3축	4축	5축	6축
손목측까지 거리가 10cm인 경우	0°	-120°~0°	0°~52°	0°	-30°~10°	0°
손목측까지 거리가 17cm인 경우	0°	-130°~0°	0°~58°	0°	-30°~22°	0°

② 동역학 모의 실험을 통한 구동기 선정

로봇에 사용될 모터는 로봇의 형태와 로봇이 수행할 작업을 같이 고려하여 결정하여야 한다. 앞 절에서 결정된 로봇의 기구학적인 구조와 정해진 작업 및 각 링크의 무게, 모터의 무게 및 위치, 조인트의 무게 및 위치 등을 같이 고려하여 결정하였다. 그리고, 로봇의 작업 속도는 장애인 주변에서 움직일 때 너무 빠르지 않게 대략 15cm/s 정도로 고려하였다. 주어진 작업에 대해 필요한 토크는 다음의 표 3.3.1.17부터 3.3.1.25와 같다.

표 3.3.1.79 세안 / 면도 작업시 필요한 토크

	1축	2축	3축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	6.8 Nm	36 Nm	18 Nm
손목축까지 거리가 17cm인 경우	6.4 Nm	35 Nm	17 Nm

표 3.3.1.80 밥먹는 작업시 필요한 토크

	1축	2축	3축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	0.1 Nm	36 Nm	18 Nm
손목축까지 거리가 17cm인 경우	0.1 Nm	40 Nm	17 Nm

표 3.3.1.81 문 여는 작업시 필요한 토크

	1축	2축	3축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	0.1 Nm	36 Nm	18 Nm
손목축까지 거리가 17cm인 경우	0.1 Nm	34 Nm	17 Nm

표 3.3.1.82 서랍 열고 꺼내는 작업시 필요한 토크

	1축	2축	3축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	0.1 Nm	36 Nm	18 Nm
손목축까지 거리가 17cm인 경우	0.1 Nm	47 Nm	18 Nm

표 3.3.1.83 차 / 물 마시는 작업시 필요한 토크

	1축	2축	3축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	0.1 Nm	36 Nm	18 Nm
손목축까지 거리가 17cm인 경우	0.1 Nm	31 Nm	17 Nm

표 3.3.1.84 책 꺼내는 작업시 필요한 토크

	1축	2축	3축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	0.1 Nm	36 Nm	18 Nm
손목축까지 거리가 17cm인 경우	0.1 Nm	42 Nm	18 Nm

표 3.3.1.85 프린터 용지 빼는 작업시 필요한 토크

	1축	2축	3축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	0 Nm	36 Nm	18 Nm
손목축까지 거리가 17cm인 경우	0 Nm	31 Nm	17 Nm

표 3.3.1.86 스위치 켜는 작업시 필요한 토크

	1축	2축	3축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	0 Nm	36 Nm	18 Nm
손목축까지 거리가 17cm인 경우	0 Nm	33 Nm	17 Nm

표 3.3.1.87 CD 바꾸는 작업시 필요한 토크

	1축	2축	3축
손목축까지 거리가 10cm인 경우	0.1 Nm	36 Nm	18 Nm
손목축까지 거리가 17cm인 경우	0.2 Nm	32 Nm	17 Nm

손목축, 즉 4,5,6축에 걸리는 토크를 계산하여 각 축에 필요한 토크를 정리해 보면 다음과 같다.

1축 : 6.4 Nm, 2축 : 47 Nm. 3축 : 18 Nm,
4축 : 3.3 Nm, 5축 : 1.7 Nm. 6축 : 1.7 Nm

각 축마다 감속비를 고려하여 결정한 모터의 용량은 다음과 같다.

1축 : 200 W, 2축 : 400 W. 3축 : 100 W,
4축 : 20 W, 5축 : 6 W. 6축 : 6 W

③ 2차 시제품을 위한 관절부, 링크부의 설계

2차 시제품은 1차 시제품과 마찬가지로 총 6개의 관절로 이루어져 있고, 이 중 1,2,3축은 케이블을 이용한 Tendon 구조를 적용하였다. 2차 시제품에서는 장력조절장치를 각 축에 적용하여 조립이 용이하고, 조립 후의 장력조절에도 편리하도록 설계하였다.

2차 시제품의 3D 설계된 결과는 다음 그림과 같다.

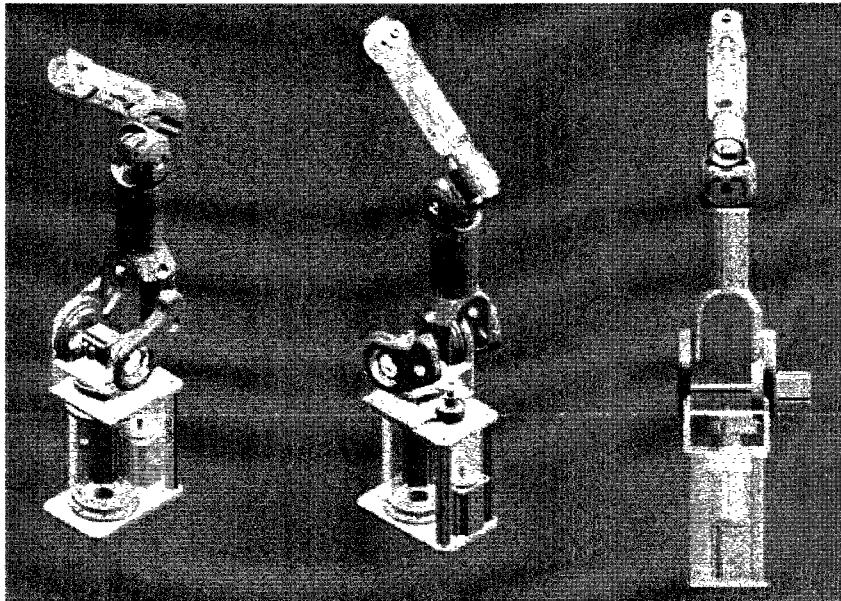
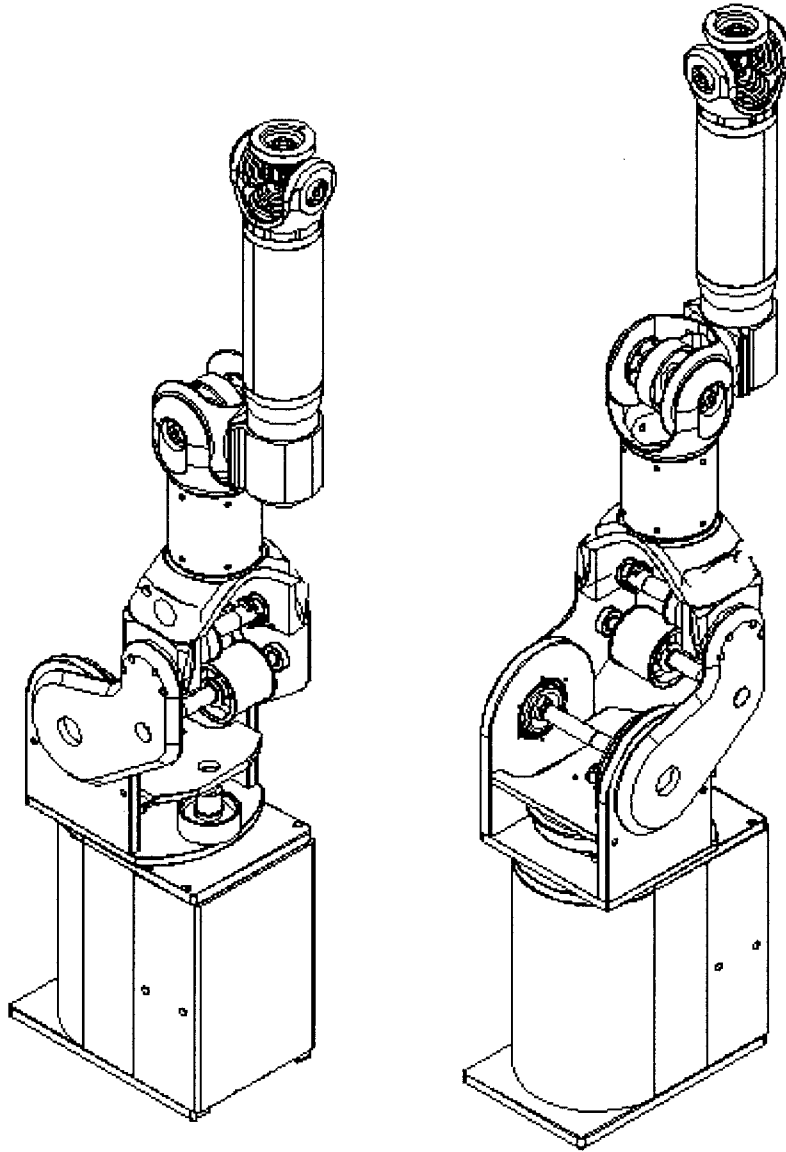
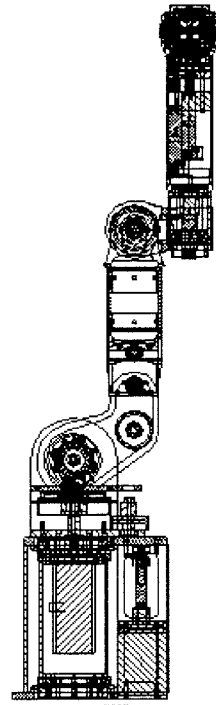
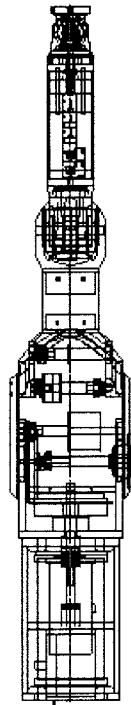
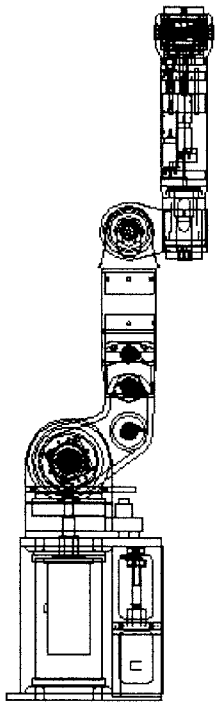
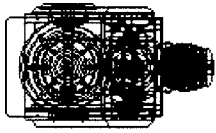
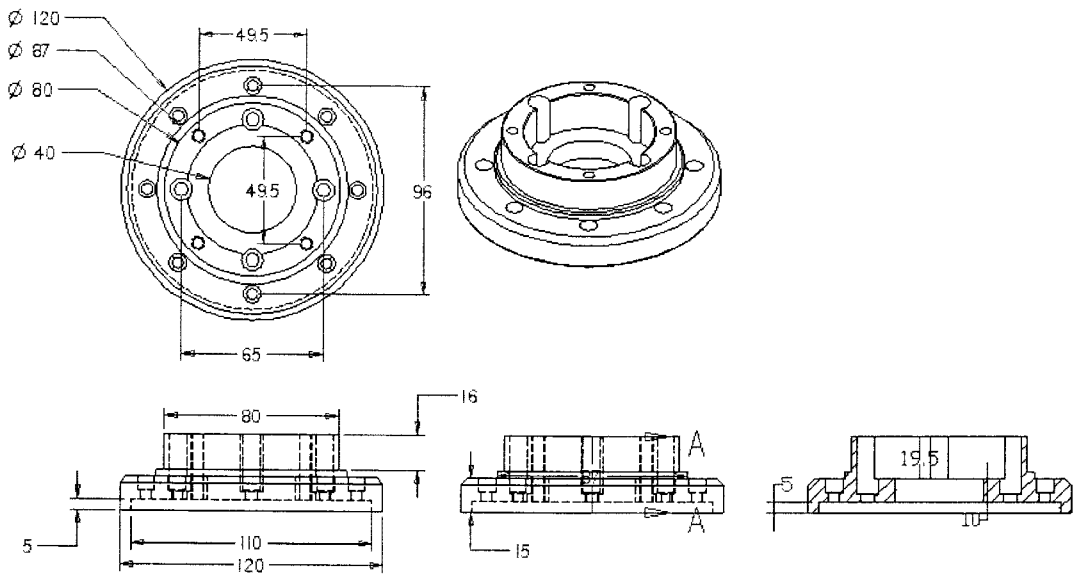
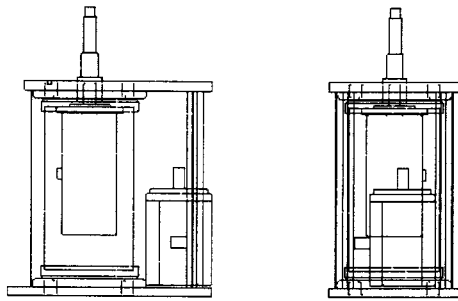
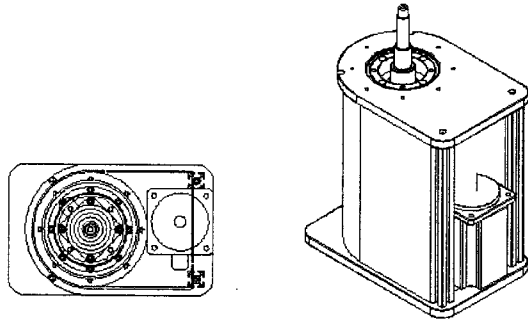


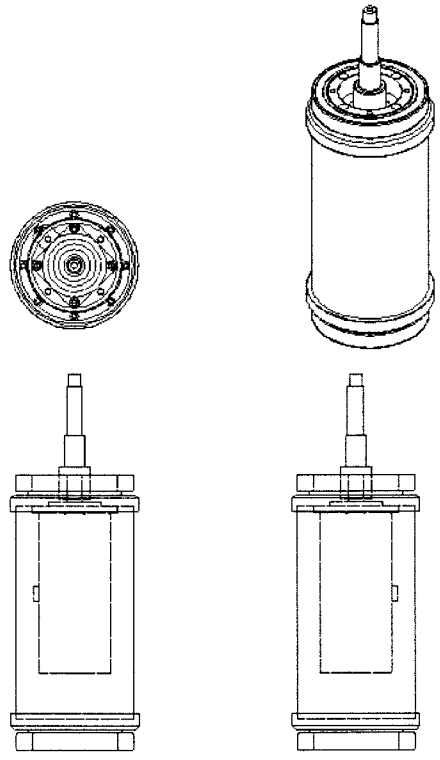
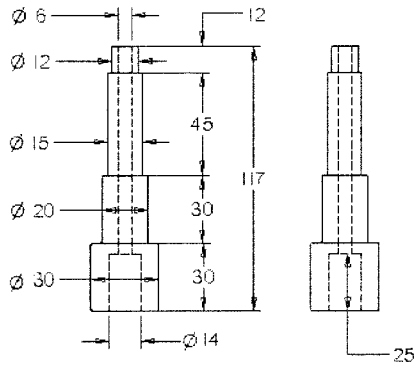
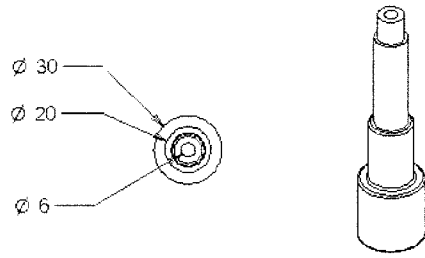
그림 3.3.1.36 2차 시제품의 설계

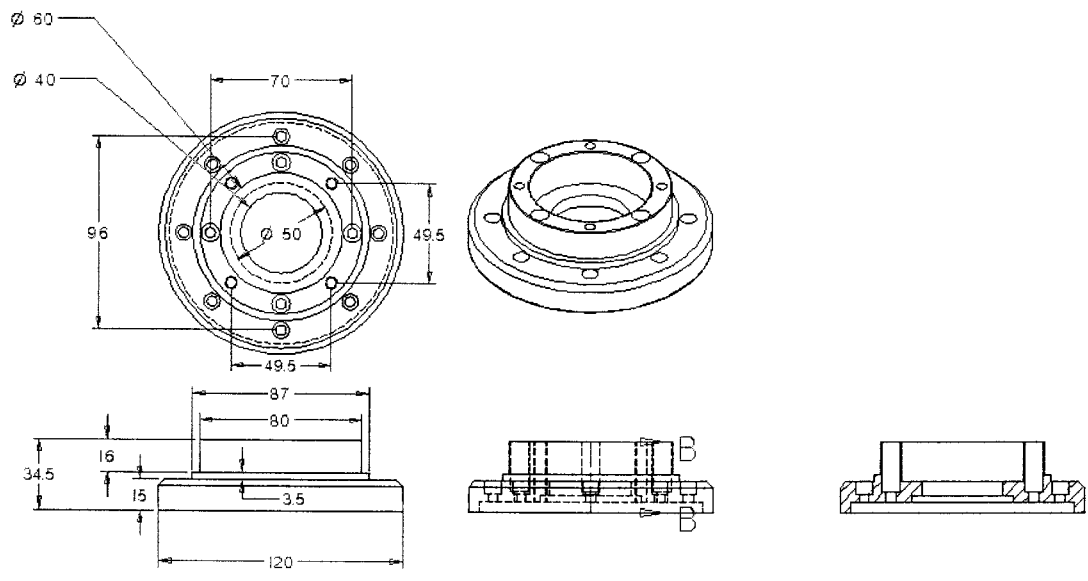
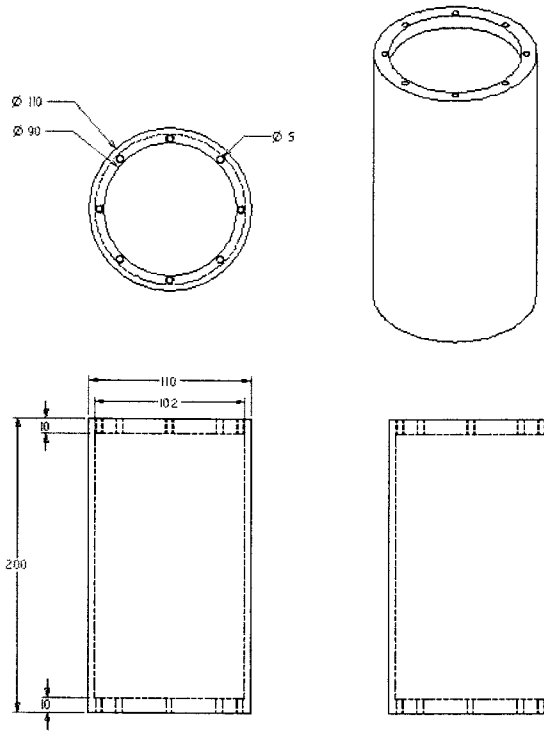
다음은 2차 시제품에 대한 설계 도면이다.

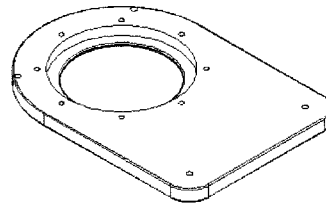
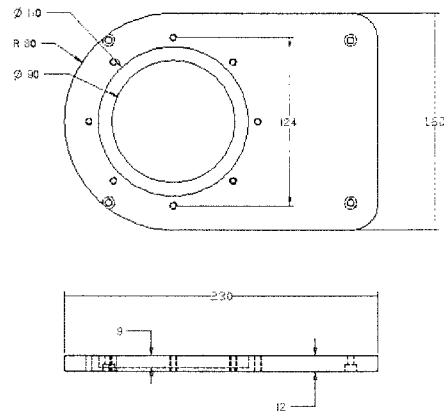
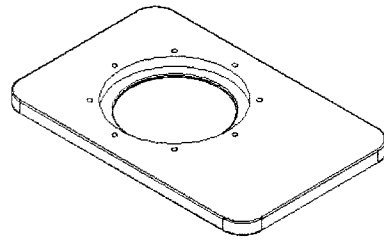
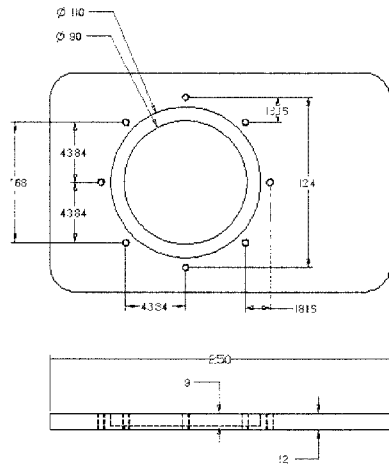


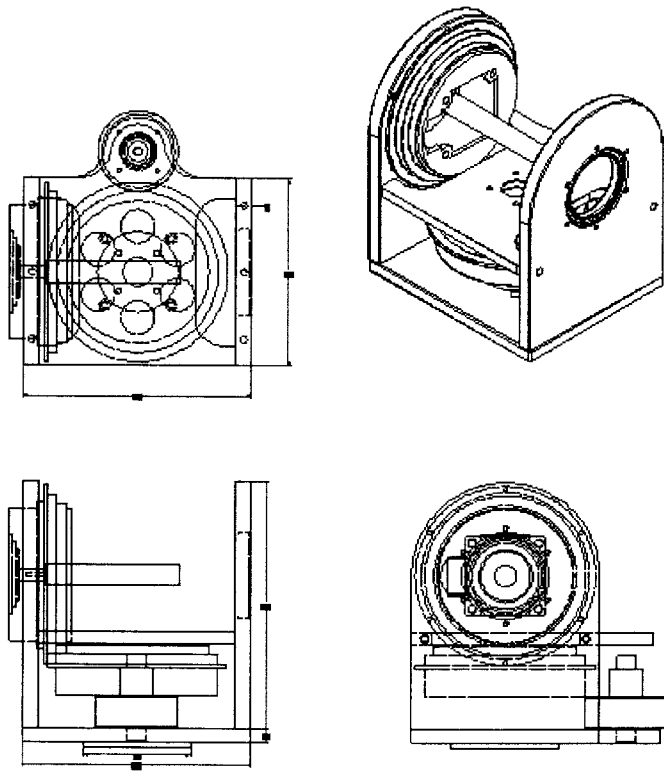


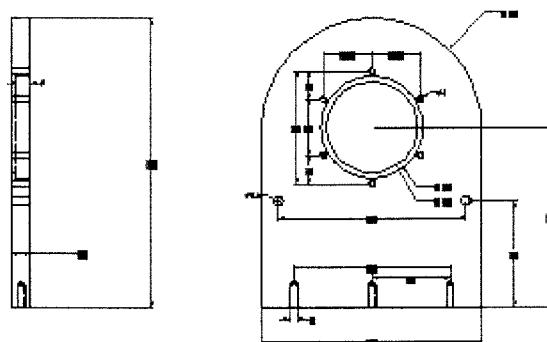
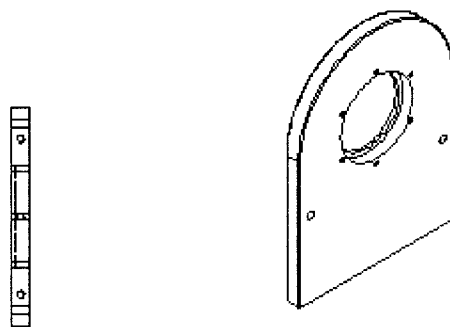
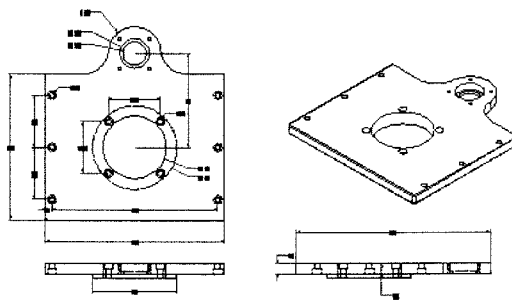
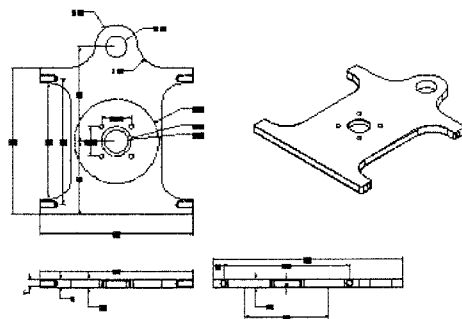


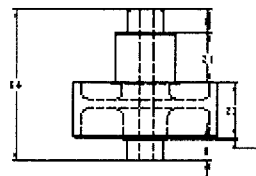
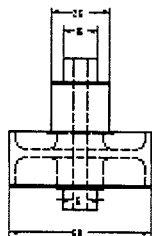
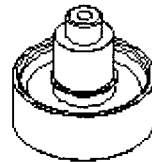
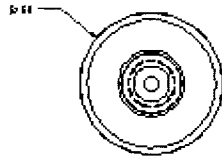
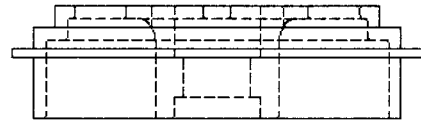
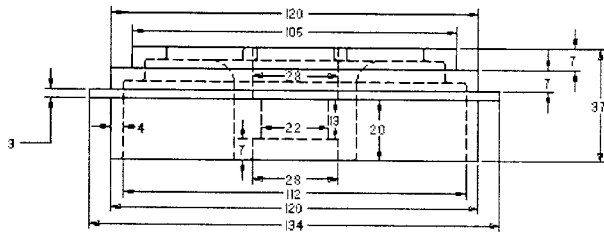
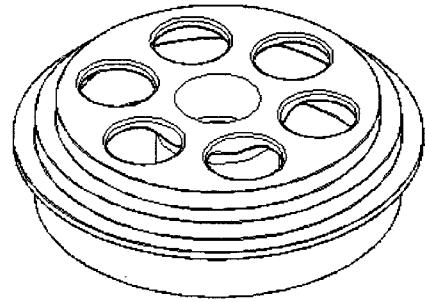
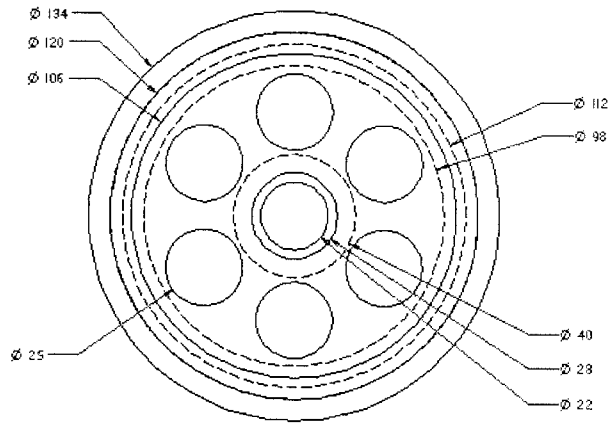


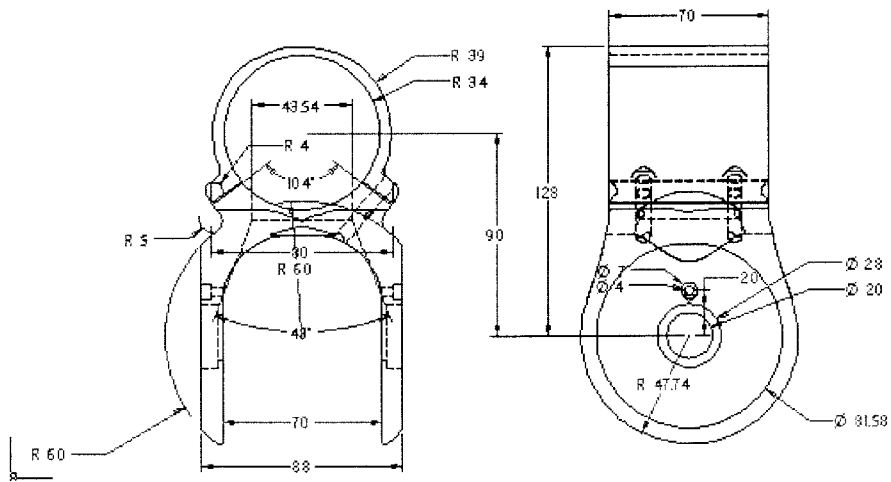
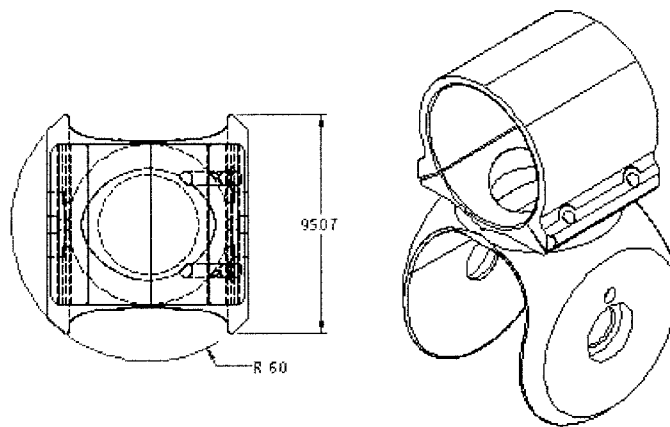


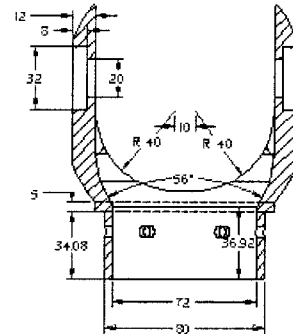
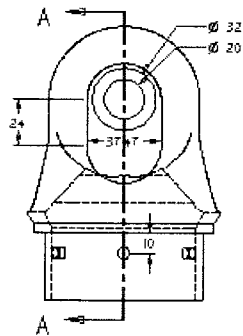
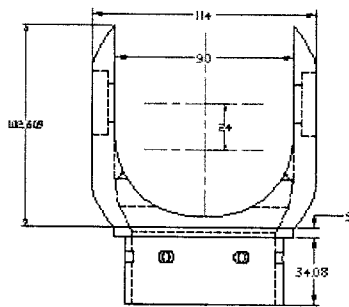
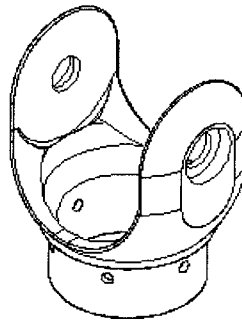
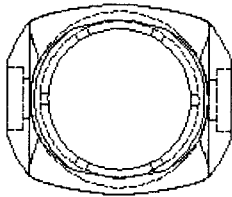
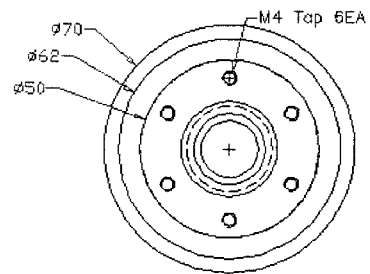
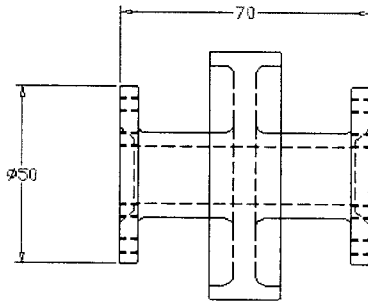
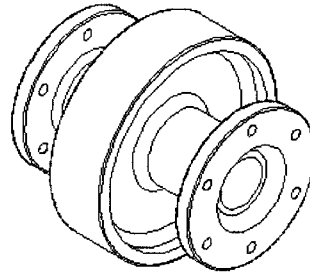
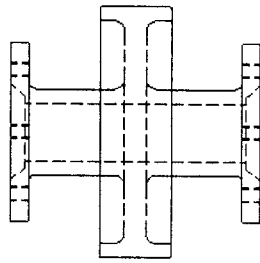


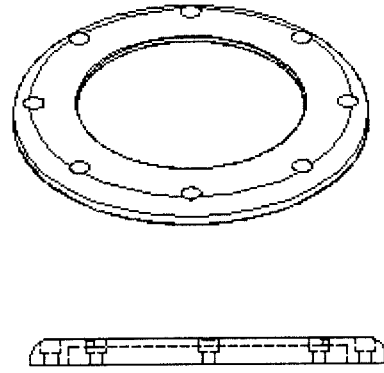
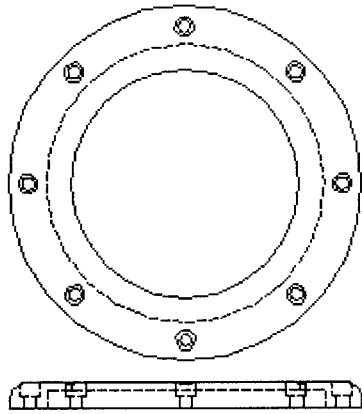


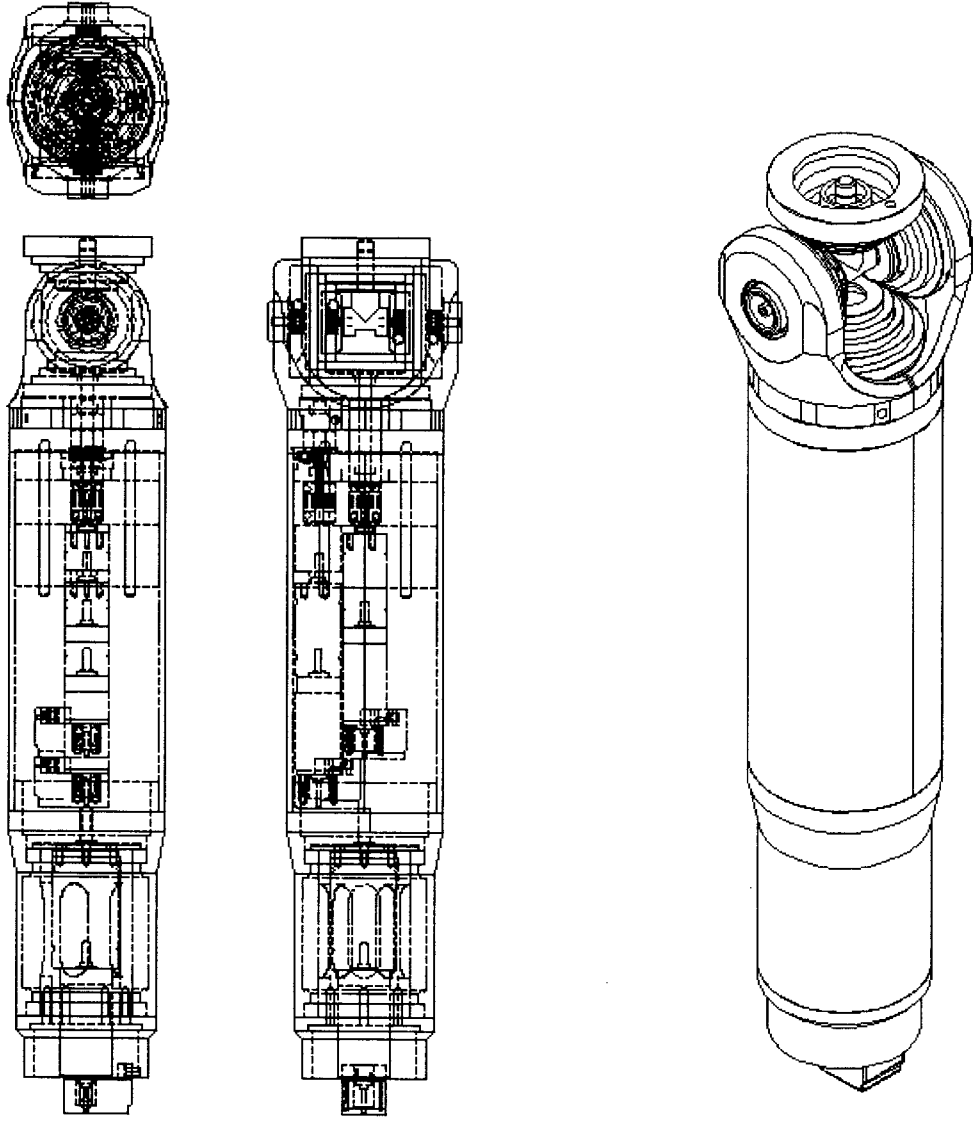


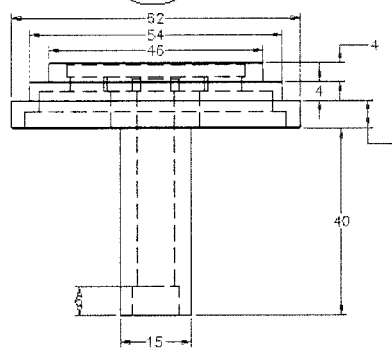
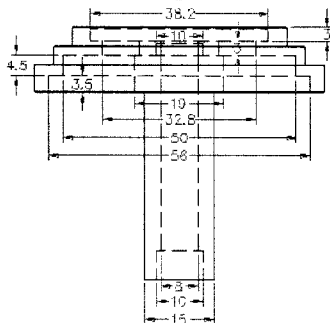
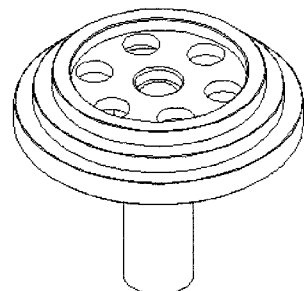
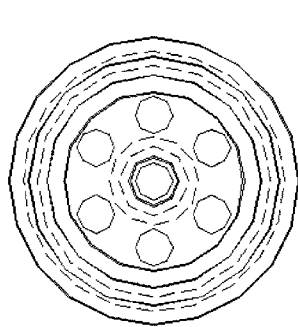
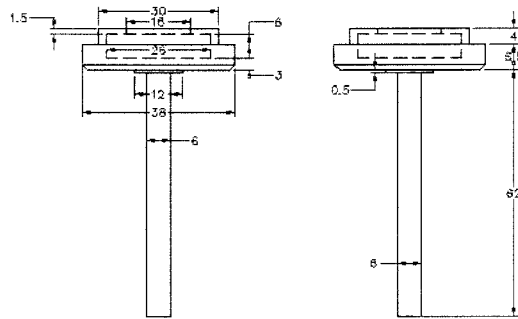
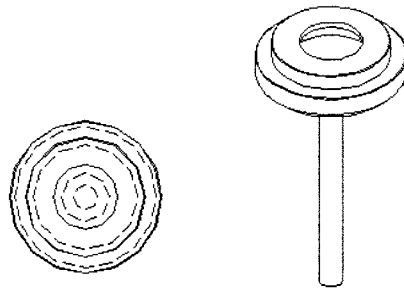


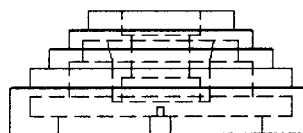
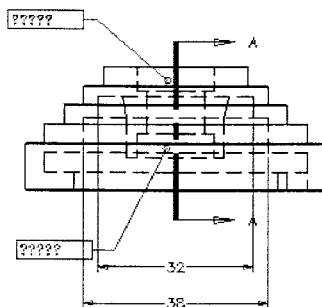
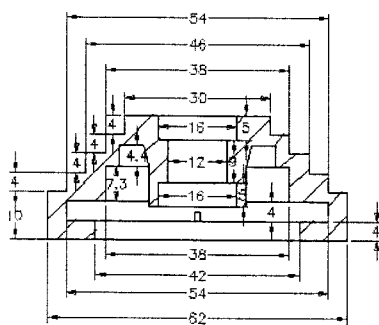
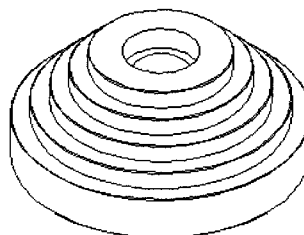
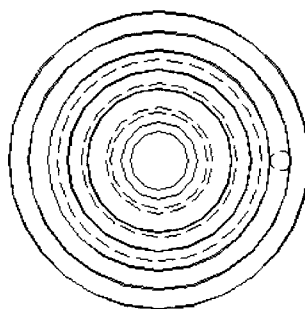
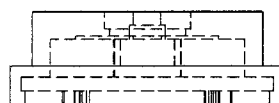
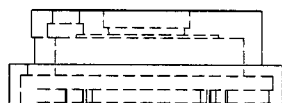
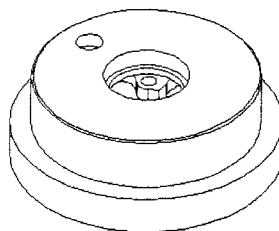
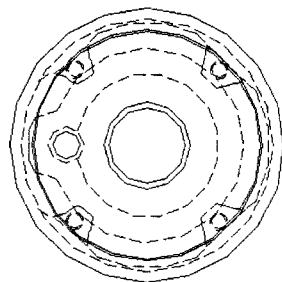


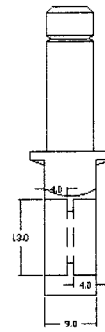
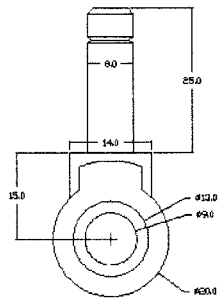
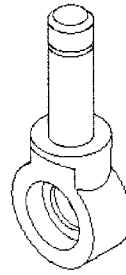
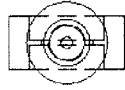


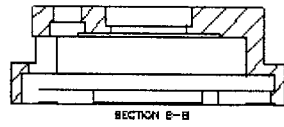




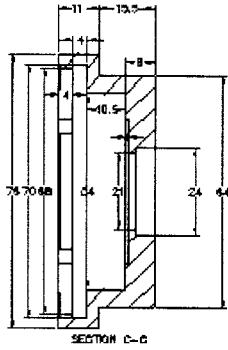




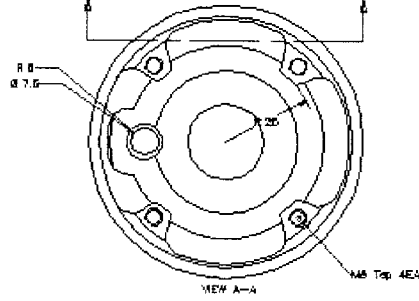
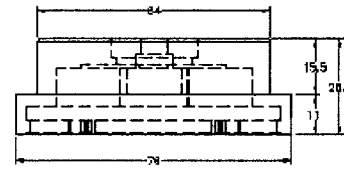
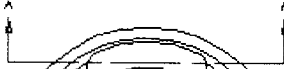
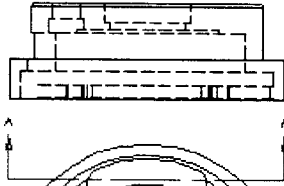
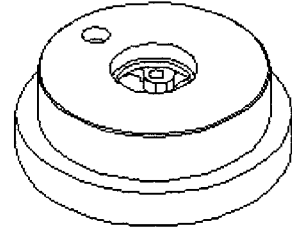
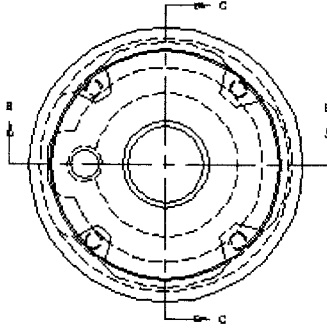




SECTION E-B

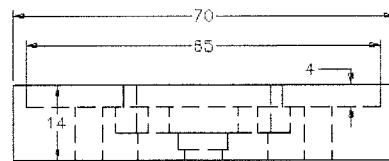
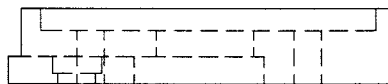
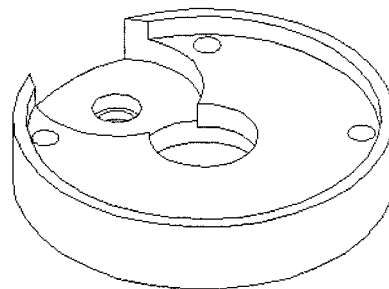
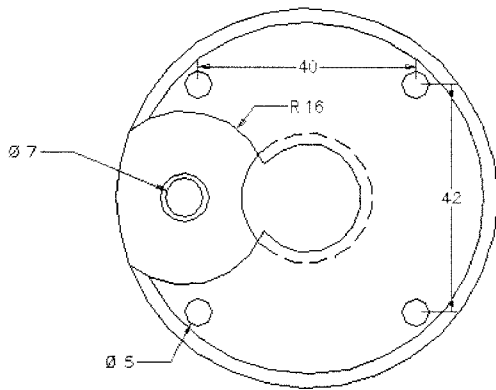
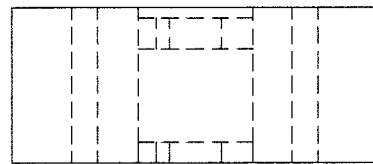
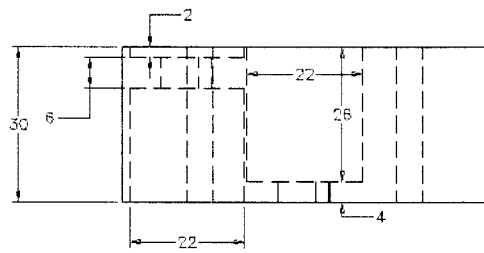
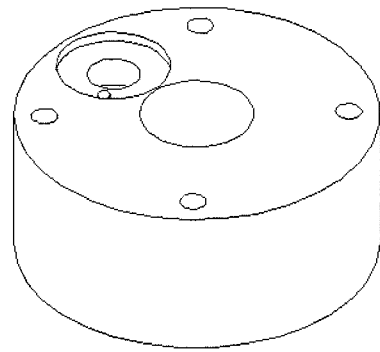
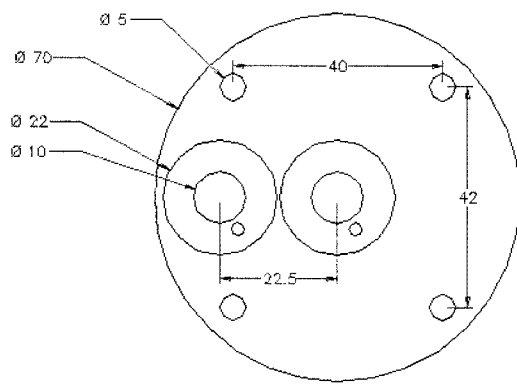


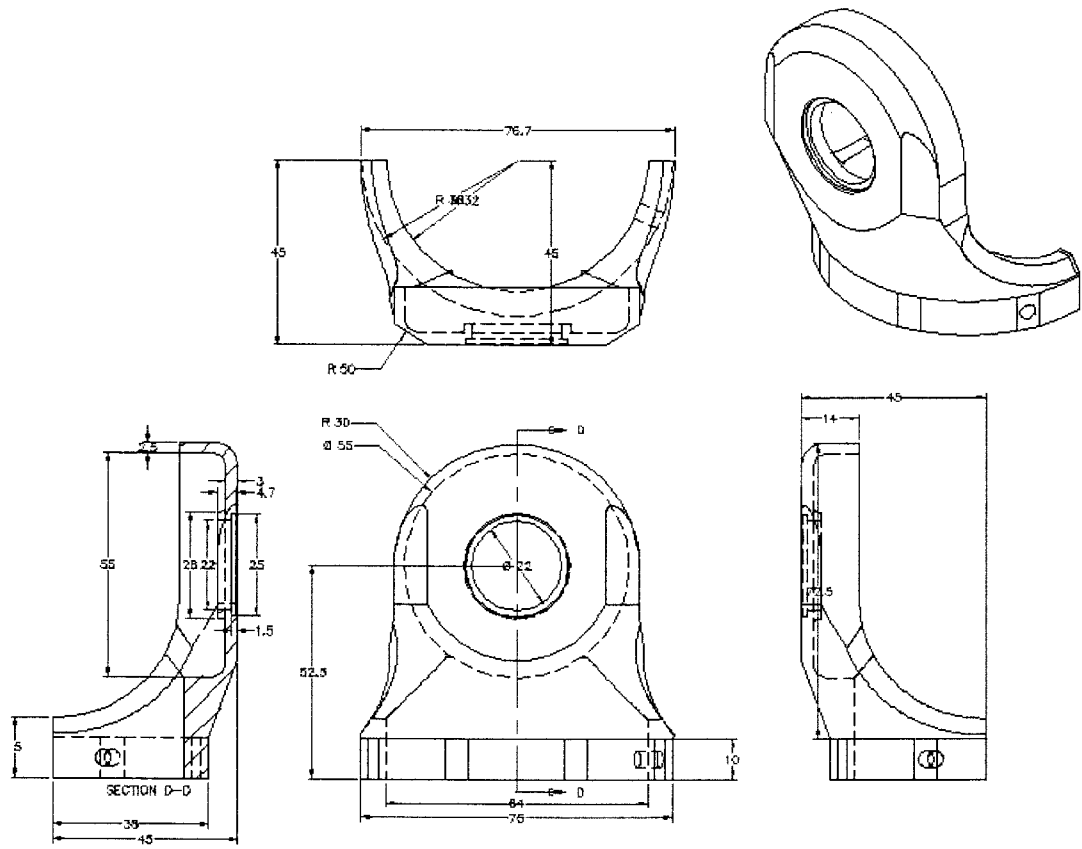
SECTION C-C

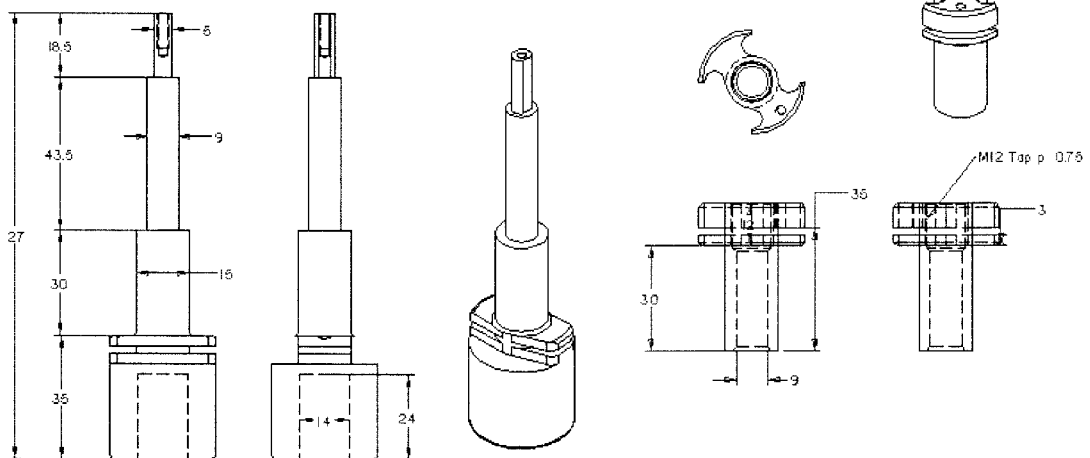
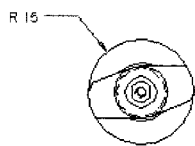
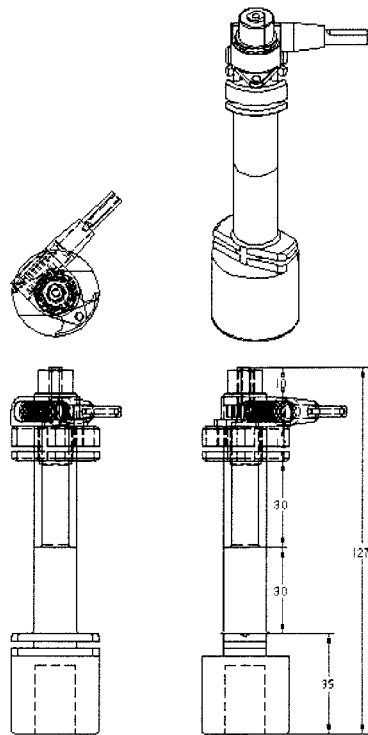


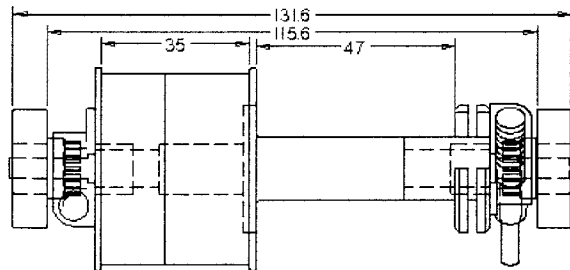
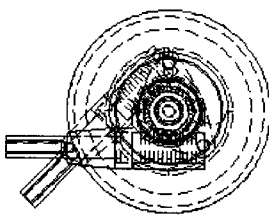
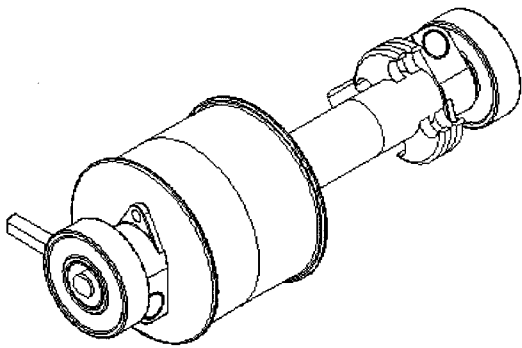
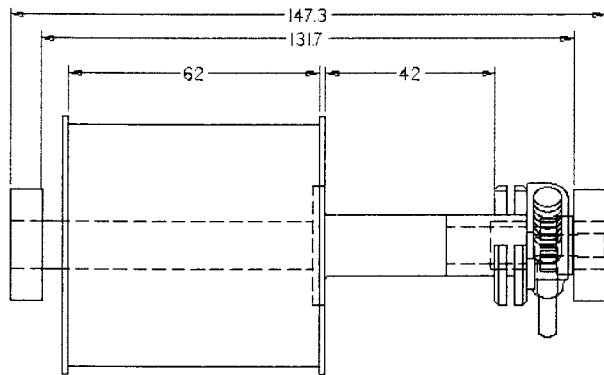
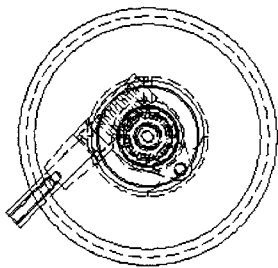
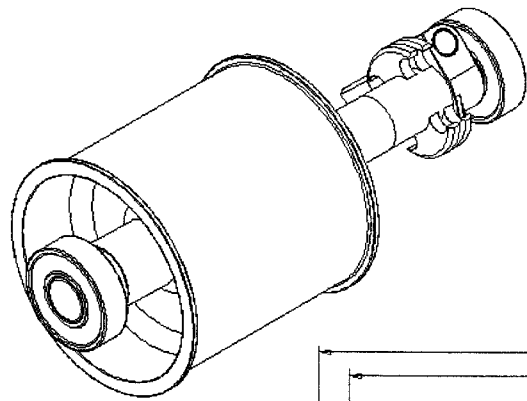
VIEW A-A

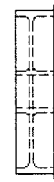
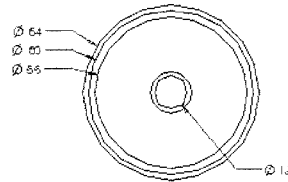
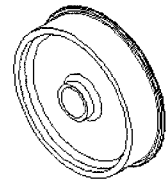
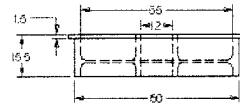
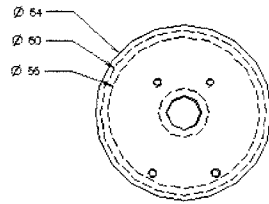
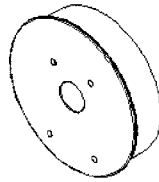
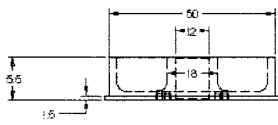
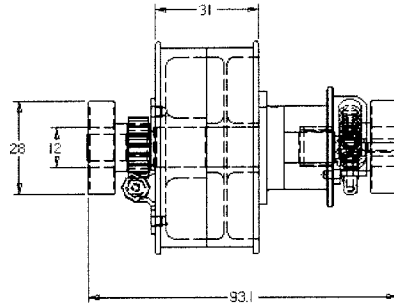
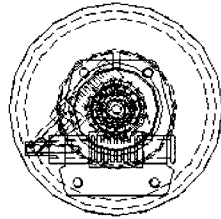
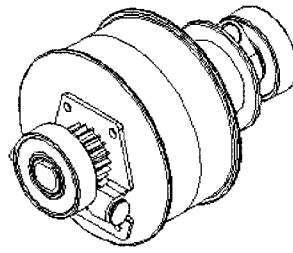
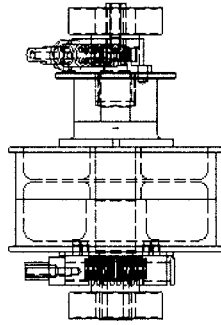
MB Top 4E4

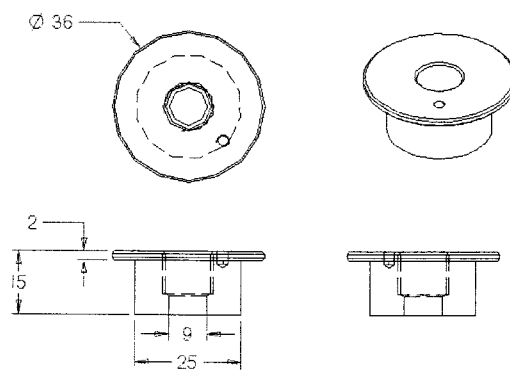
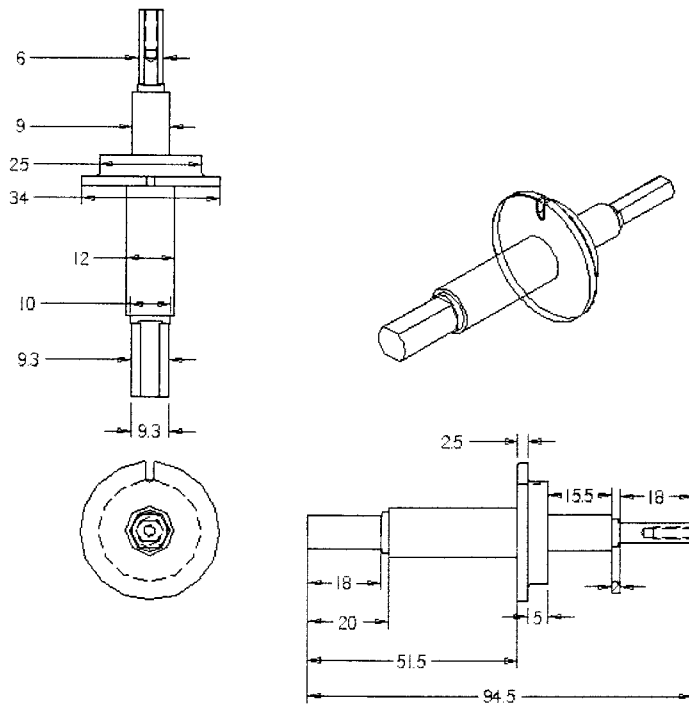












④ 설계를 기준으로 2차 시제품 제작

앞 절에서의 설계를 바탕으로 2차 시제품을 제작하였다. 2차 시제품의 재질은 1차 시제품과 마찬가지로 가벼운 알루미늄 재질을 사용하였고, 장력조절장치에는 부분적으로 스테인리스 스틸을 사용하였다. 그리고, 내외부는 무광무색의 아노다이징 처리를 하였으며, 1차 시제품과는 달리 2축과 3축의 구동이 독립적이 되도록 3축 모터를 배치하였다. 제작된 2차 시제품의 형태는 그림 3.3.1.37 ~ 그림 3.3.1.42과 같다.

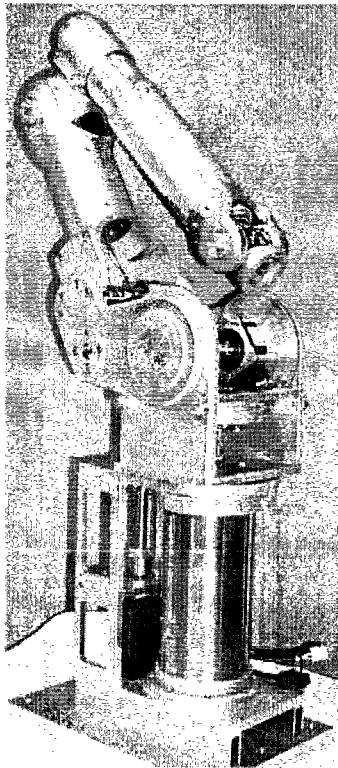


그림 3.3.1.37 2차 시제품의
전체 모습 1

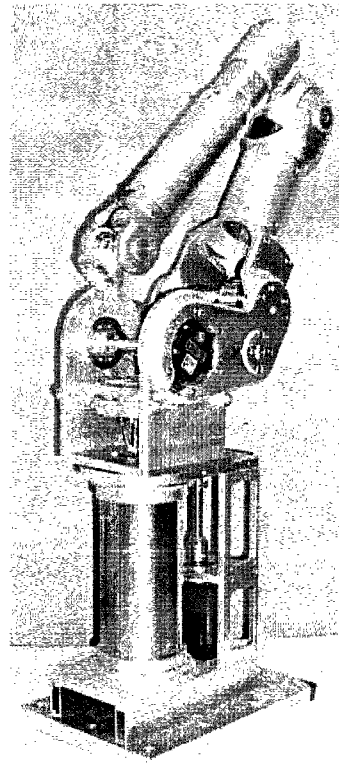


그림 3.3.1.38 2차 시제품의
전체 모습 2

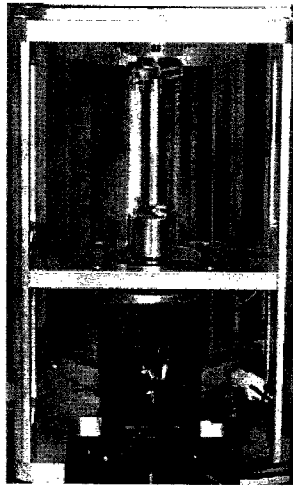


그림 3.3.1.39 시제품의
1축 모습

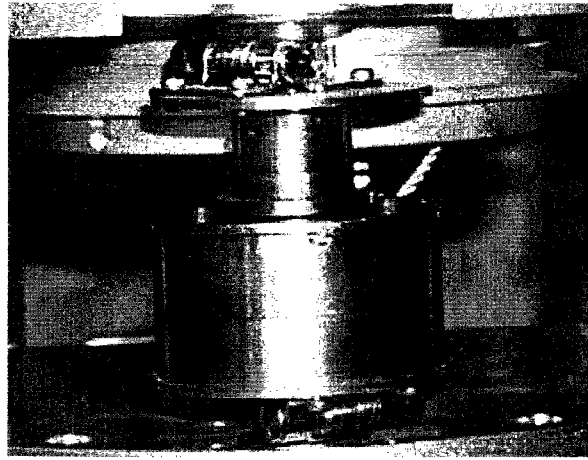


그림 3.3.1.40 시제품의 2축 장력조절장치

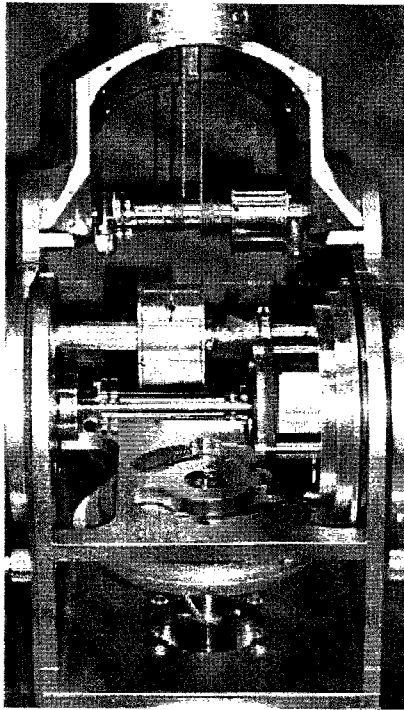


그림 3.3.1.41 시제품의 2축과
3축의 모습

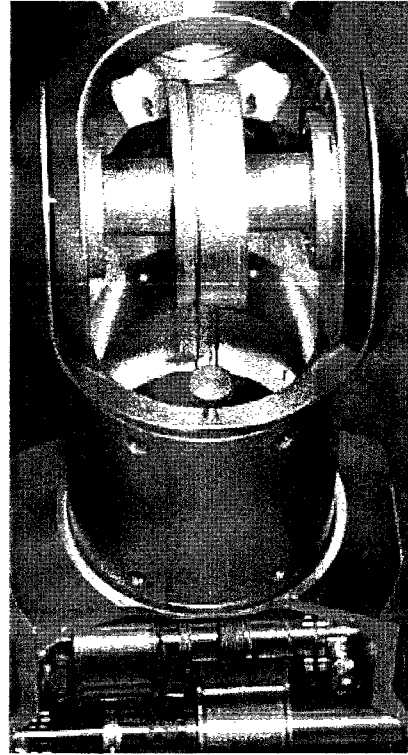


그림 3.3.1.42 시제품의 3축 모습

(2) 사용자가 편하게 느끼는 시각적 디자인

지금까지 소프트 로봇팔의 제작에 있어서는 로봇팔의 외형보다 기능의 구현에 중점을 두었다. 우선은 장애인을 보조해 주는 작업들을 구현하는 것이 중요하지만, 장기적으로 **상품화**까지 진행시켜야 한다고 본다면 사용자인 장애인의 입장에서 **사용자 지향적인 디자인을 고려**해 보는 것이 좋을 것이라는 판단에 우리가 할 수 있는 부분에 대한 시각적 디자인을 고려하였다. 먼저 장애인을 대상으로 이동로봇과 결합된 소프트 로봇팔의 1차 시제품을 보여주면서 설문조사를 벌인 결과, 로봇팔에 대한 것보다는 이동로봇의 크기와 무게감에 대하여 불만을 표시하였다. 이동로봇이 너무 크고 무겁게 보여 전체적으로 기계적인 느낌이 든다는 의견이 대부분이었다. 이동로봇에 대한 이러한 불만은 문제의 성격상 단기적으로는 해결하기가 어려운 부분인데, 그 이유는 이동로봇에 실리게 되는 부품들의 종류와 가지수로 인하여 그 크기를 획기적으로 줄일 수 없기 때문이다. 그리고, 이동로봇은 가정집의 방문을 통과할 수 있도록 고려되어 만들어졌기 때문에 이동 기능의 구현에는 문제가 없다. 그리하여 이동로봇이 아닌 **로봇팔에 대하여 우리가 할 수 있는 범위 내에서 좀더 편안하고 친밀함을 느낄 수 있는 방법**에 대하여 고려하였다. 그 방안은 **로봇팔의 내부 구조가 보이지 않도록 하는 것과, 배선이 최대한으로 밖으로 보이지 않도록 하는 것, 그리고 외관의 곡선 처리** 등이다. 내부 구조가 보이지 않도록 커버 처리를 하고, 로봇팔의 내부로 배선이 이루어지도록 하며, 기계 가공이 가능한 한 로봇팔 외관에 대한 곡선처리를 고려한 설계를 하고자 하였다. 그 결과는 다음 그림과 같다.

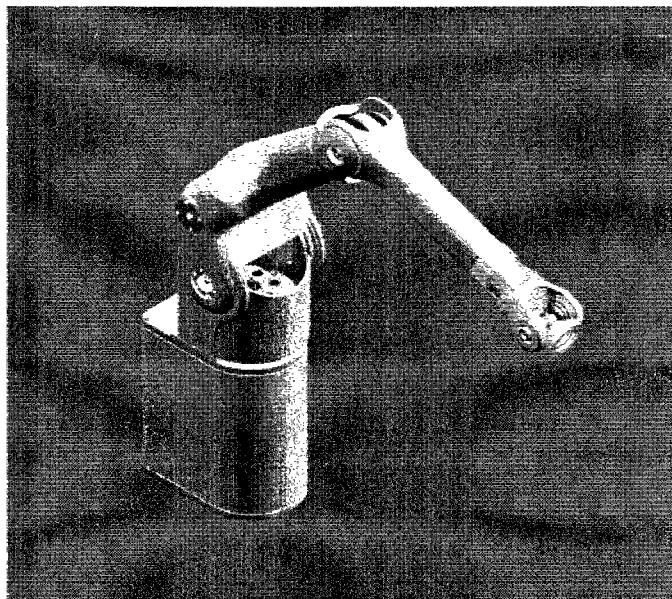


그림 3.3.1.43 시각적 디자인을 고려한 로봇팔 (황동색)

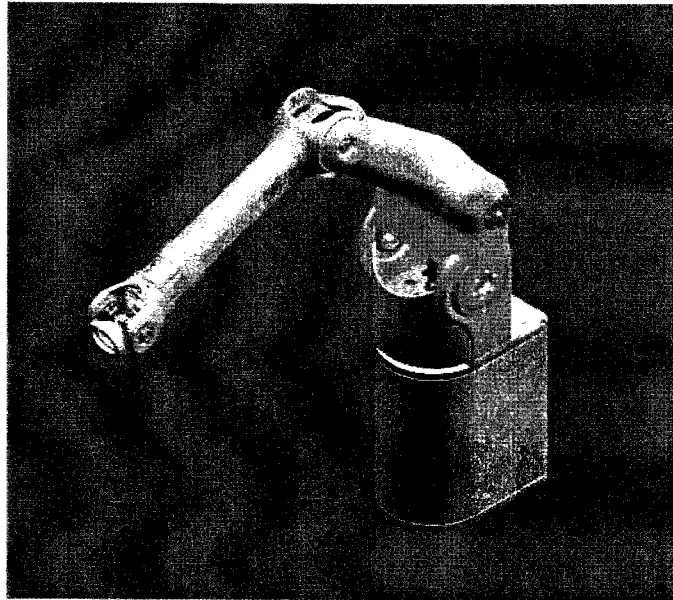


그림 3.3.1.44 시각적 디자인을 고려한 로봇팔 (황동색)

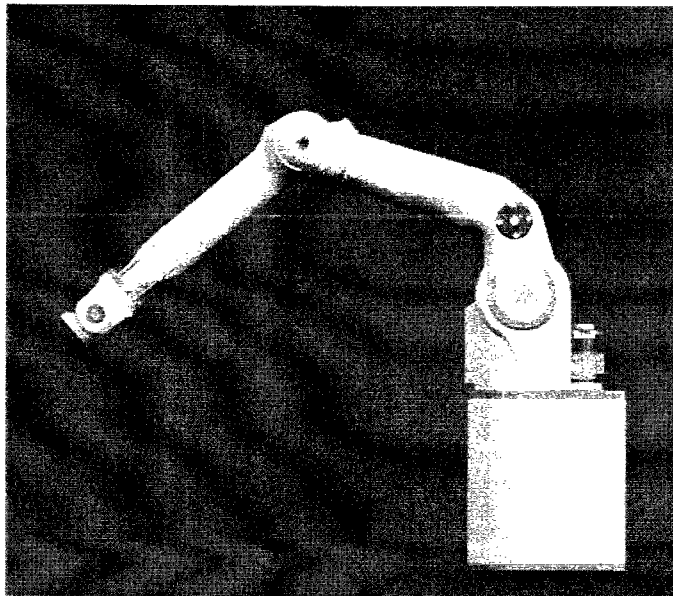


그림 3.3.1.45 시각적 디자인을 고려한 로봇팔 (연분홍색)

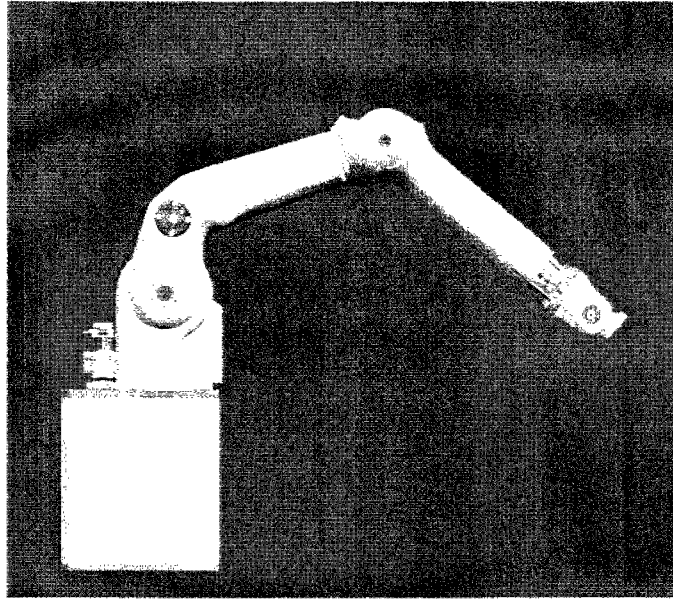


그림 3.3.1.46 시각적 디자인을 고려한 로봇팔 (연분홍색)

장애인이 갖는 다양한 주관적인 성향을 모두 만족시키기는 쉽지가 않다. 개인의 주관적 성향이라는 것은 Arrow's Impossibility Theorem (in Hazelrigg, G.A. "Theoretical Foundations of Engineering Design," Lecture at MIT, 1998) 에 의하면 그 결론을 도출하는 것이 매우 어렵다. 이 부분에 대해서는 나중에 제품화를 할 때 시각적 디자인을 전공한 전문가가 맡아서 진행할 필요가 있다.

(3) Backdrivability 개선을 위한 관절 마찰력 감소

(가) 최소 감지 가능한 토크 측정

최소 감지 가능한 토크(Minimum Backdrivable Torque)는 로봇이 외부와 접촉할 때 모터축에 토크센서(Torque Sensor)가 없이도 접촉힘(Contact Force)을 감지할 수 있게 하기 위해 필요한 지수이다. 최소 감지가능한 토크가 작을수록 작은 접촉힘이라도 제대로 감지할 수 있다. 최소 감지 가능한 토크의 측정방법은 그림 3.3.1.47과 같이 로봇을 역구동할 수 있는 최소토크를 측정함으로써 추정 가능 하다.

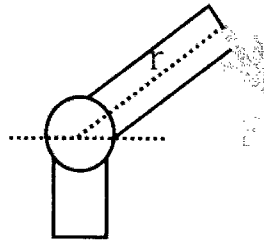


그림 3.3.1.47 최소감지
가능 토크의 측정

로봇팔의 1차와 2차 시제품에 대한 최소 역구동 토크는 표 3.3.1.26과 같다.

표 3.3.1.88 로봇 각 축의 최소 감지 토크

	1차 시제품	2차 시제품
1 축	0.4 Nm	0.21 Nm
2 축	1.2 Nm	0.30 Nm
3 축	0.6 Nm	0.28 Nm

(나) Backdrivability의 개선

1차 시제품의 1축과 3축의 최소 감지가능 토크에 비하여 2축의 최소 감지가능 토크가 매우 컸다. 즉 2축의 역구동성(Backdrivability)이 좋지 않았는데, 이는 2축에서 작은 접촉힘을 감지할 수 없다는 것을 의미하므로 능동 컴플라이언스 제어를 할 때 원하는 성능을 낼 수가 없다. 2축 모터에서의 **최소 감지 가능 토크가 크게 측정된 원인을 분석하여** 본 결과 2축에 사용한 모터 자체에 내장된 3.5:1의 **기어 헤드의 마찰이 커서** 발생한 것이었다. 그리하여 2차 시제품에서는 **2축의 역구동성을 개선하기 위해 감속기가 부착되지 않은 모터를 사용**하였다. 그리고, 케이블의 장력을 조절가능하도록 하여 역구동성의 개선 효과를 얻을 수 있게 각 축에 **장력조절장치를 부착**하여 최소 감지가능한 토크를 측정한 결과 표 3.3.1.26에 보이는 것처럼 1차 시제품에 비해 **각 축의 최소감지 토크가 0.3Nm 이하로 개선된 결과**를 얻을 수 있었다.

(4) 안전성을 위한 접촉 센서 부착

(가) 접촉 센서의 대상

① 접촉 센서의 대상 규정

㉓ 대상 규정의 필요성

접촉 센서를 부착하기 위해서는 우선 그 부착 위치가 명확해야 한다. 또한 부착 위치를 결정하기 위해서는 우선 장착할 접촉 센서의 대상부터 명확히 규정하는 것이 필요하다. 우리가 TOD (Task Oriented Design) 관점에서 인간친화형 소프트 로봇팔을 개발한 것과 마찬가지로 로봇팔에 장착할 접촉 센서 역시 그 대상을 명확히 규정한 후에 장착부위를 정할 경우 더욱 효율적이다.

이러한 **TOD 관점의 접근**으로 접촉 센서의 위치를 결정할 경우 얻는 이득은 다음과 같다.

- 원하는 접촉 센서의 목적을 만족시키기에 용이.
- 센서 장착 부위 선정의 논리적이고 체계적인 접근 가능.
- 센서 장착부위를 필요만큼 최소화하여 비용 및 복잡성을 줄임.

실제로 막연히 접촉 센서를 단다고 생각하고 일을 진행하였을 때보다 TOD 관점에서 대상을 명확히 규정하고 일을 진행하였을 경우 훨씬 체계적인 접근을 할 수 있었고 접촉 위치 결정 또한 빠르게 진행할 수 있었다.

㉔ 대상 규정

대상을 규정하기 위해선 우선 이 접촉 센서의 목적을 다시 한번 생각해 볼 필요가 있다. 이 접촉 센서는 **안전성**을 위한 접촉 센서이다. 여기서 누구를 위한 또는 어떤 상황을 위한 안전성인지가 중요해진다.

이를 알기 위해서는 센서가 장착되어 사용될 로봇에 대해서 다시 한번 생각해 볼 필요가 있다. 우리가 접촉 센서를 장착할 인간친화형 소프트 로봇팔은 장애인을 도와주기 위한 로봇팔로 정해진 12가지 작업을 도와주는 역할을 수행한다. 결국 로봇팔은 12가지 작업을 수행할 때 장애인과의 상호작용을 하는 것이다. 이 사실로부터 **접촉 센서의 목적은 12가지 작업을 수행할 때에 장애인과 로봇 사이의 접촉을 감지하여 장애인의 안전성을 높이는 역할**이라는 것을 알 수 있다.

이제 목적은 분명해졌으니 이제는 그 대상을 명확히 규정할 때이다. 접촉 센서의 대상은 목적에서 알 수 있듯이 장애인과 로봇 사이의 접촉이다. 이 접촉은 12가지 작업을 수행할 시에 장애인과 로봇 사이에 일어나는 어떠한 접촉도 모두 포함하게 된다.

남은 것은 대상을 구체화하는 것이다. 우선 장애인은 어떤 장애인인가 하는 것은우리가 로봇팔을 통해 도와주기로 했던 장애인이 척추 장애인이라는 점에서 척추 장애인으로 정할 수 있다. 또한 로봇팔의 경우는 이번 4차년도에 만든 로봇인 2차 시제품을 접촉 센서의 적용 대상으로 정하여 접촉 센서 작업을 수행하였다.

위의 내용을 종합하여 접촉 센서의 대상을 규정해보면 다음과 같다. **인간친화형 로봇팔 2차 시제품이 척추장애인을 도와주기 위한 12가지 정의된 작업을 수행할 때에 장애인**

과 로봇 사이의 일어나는 모든 접촉이다. 이렇게 정한 대상을 기준으로 아래와 같은 접촉 센서 관련 작업을 계속 수행하였다.

㉑ 접촉 센서의 대상 분석

위의 ㉑ 과정에서 접촉 센서의 구체적인 대상이 정해졌다. 하지만 이것만으로는 접촉 센서의 부착 위치를 결정할 수 없다. 대상에 대한 구체적인 분석 작업이 필요하게 된다. ㉑에서 정한 대상에서 접촉 센서의 부착 위치를 결정하기 위해 알아야 할 것으로는 **인간친화형 로봇팔 2차 시제품이 12가지 작업을 어떻게 움직이면서 수행하는지 와 척수장애인이 어떻게 움직이는지**이다.

㉒ 로봇팔 관련 분석

먼저 로봇팔의 경우는 로봇팔 2차 시제품 자체의 분석은 앞의 로봇팔 파트에서 많은 분석이 이루어져 있으므로 여기서는 생략하도록 하겠다. 그리고 12가지 작업을 어떻게 수행하는지는 결국 12가지 작업에 따른 각 Task Point 들이 중요해지는데 이는 12가지 작업을 정의한 1, 2 차년도에서 구체적으로 정의되었으므로 이를 그대로 사용할 수 있었다. 이 역시 TOD 관점에서 로봇팔을 설계한데서 비롯된 편리함이라고 볼 수 있다.

㉓ 장애인 관련 분석

다음은 척수장애인의 움직임이다. 척수장애인은 그 장애의 특성상 휠체어 위의 몸 부분은 매우 제한적인 움직임밖에는 할 수가 없다. 아래 그 움직임에 대한 설명이 있다. 이 사실들은 모두 국립재활원에서 얻은 정보를 토대로 한 것이다.

첫번째로 배 근육의 순간적인 수축 등으로 휠체어에 앉아 있다가 앞이나 뒤로 순간적으로 넘어가는 일이 있게 된다. 이 움직임을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

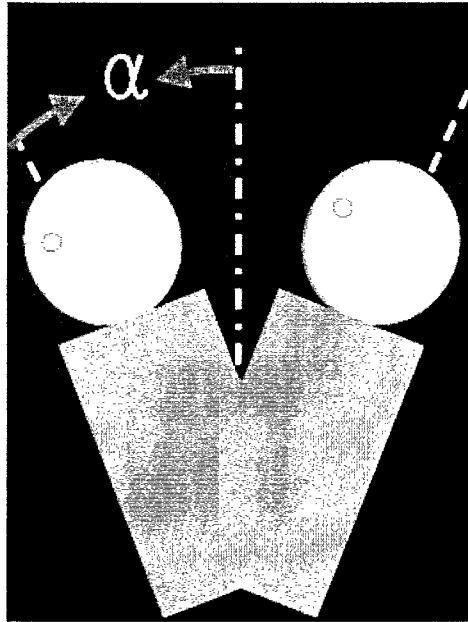


그림 3.3.1.48 장애인의 움직임 ①

여기서는 **혈체어** **앞쪽으로 움직이는 범위인 각도 α**가 중요한 값이 된다.

두번째로 몸이 어느 한 쪽으로 기울면 다시 몸을 원위치로 회복시키지 못하는 현상이 있게 된다. 이 움직임을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

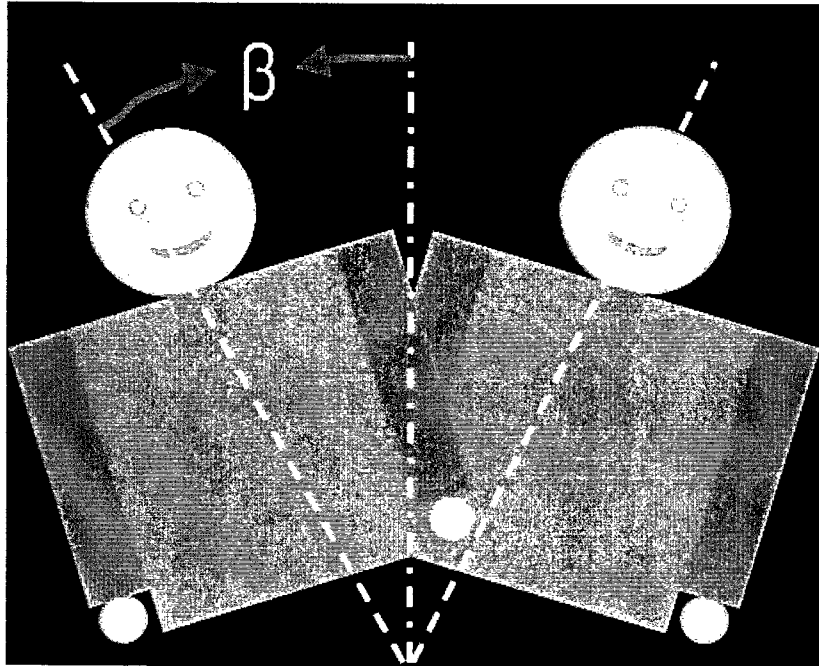


그림 3.3.1.49 장애인의 움직임 ②

여기서는 **장애인이 기우는 정도인 β 값이 중요한 값**이 된다.

이 두가지 움직임이 접촉 센서의 대상이 되는 장애인의 움직임이 된다. 이 두 움직임은 각 파라미터인 α , β 로 결정되므로 움직임의 범위를 알기 위해서는 이 두 값의 범위를 알아야 한다. 이를 구하기 위해 간단한 Test를 수행해 보았다.

먼저 우리가 12가지 작업을 정의하고 로봇을 설계하는데 사용하였던 휠체어에 일반인을 앉히고 위의 두 가지 움직임을 수행해보도록 하였다. 이는 장애인이 일반인에 비해서는 적은 움직임을 보일 것이므로 결국은 범위의 안전한 최대값을 구해보고자 하는 의도였다. 이를 수행한 사진은 다음과 같다.

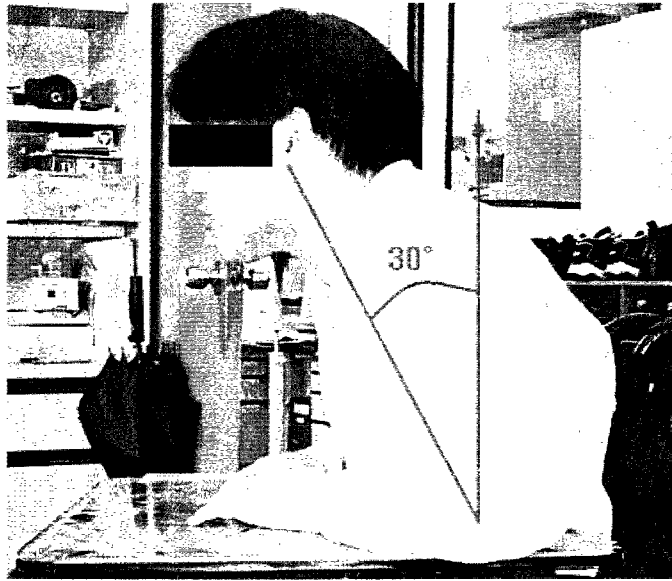


그림 3.3.1.50 움직임 실험 ①



그림 3.3.1.51 움직임 실험 ②

결국 $\alpha \leq 30^\circ$, $\beta \leq 18^\circ$ 로 파라미터를 선정할 수가 있었다.

이러한 과정을 통해 접촉 센서의 대상인 장애인의 움직임을 분석하였다. 이로서 로봇팔과 장애인의 움직임은 구체화되었고 비로소 접촉 센서 부착 위치 결정 작업을 수행할 수 있게 되었다.

(나) 접촉 센서 부착 영역 결정

① 전산 프로그램 개발

로봇팔의 부착 영역을 결정하기 위해서는 접촉 센서의 대상에 따라서 12가지 작업을 수행할 때 로봇팔과 장애인이 접촉하는 영역을 알아내는 것이 필요했다. 이를 위해서는 12가지 작업 수행시의 로봇의 움직임, 장애인의 움직임을 보고 둘 사이에 일어날 수 있는 접촉 영역을 구해야 했다. 이를 구하기 위해서 전산 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 사용하기로 하였다.

이 작업을 위해서 전산 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 TOD (Task Oriented Design)을 위해서 연구실에서 자체적으로 개발하였으며 kinematic, dynamic simulation 등이 가능하고 OpenGL 기반의 3D 그래픽 표현이 가능한 Window 기반 프로그램이다.. 이 프로그램의 형태는 다음과 같다.

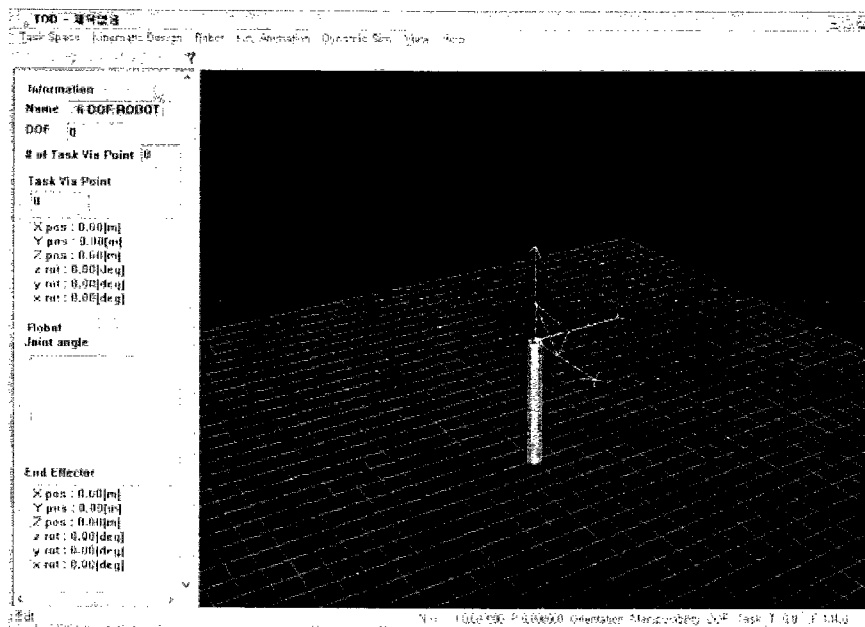


그림 3.3.1.52 개발된 전산 프로그램

하지만 이 프로그램을 이용해서 접촉 영역을 찾아내기 위해서는 로봇팔 2차 시제품의 형상과 장애인의 움직임이 추가되어야 했다. 로봇팔 2차 시제품을 추가하는 것은 로봇팔 설계 시에 정하였던 DH (Denavit-Hartenberg) Parameter 를 사용하였다. 하지만 장애인의 움직임을 추가하는 것은 프로그램 상에서 기준이 되는 로봇팔의 위치와 상대적인 장애인의 위치를 알아야만 가능하였다. 이는 예전 1, 2 차년도에서 12가지 작업을 정의할 때에

같이 정의된 것으로 그 위치관계는 다음과 같았다.

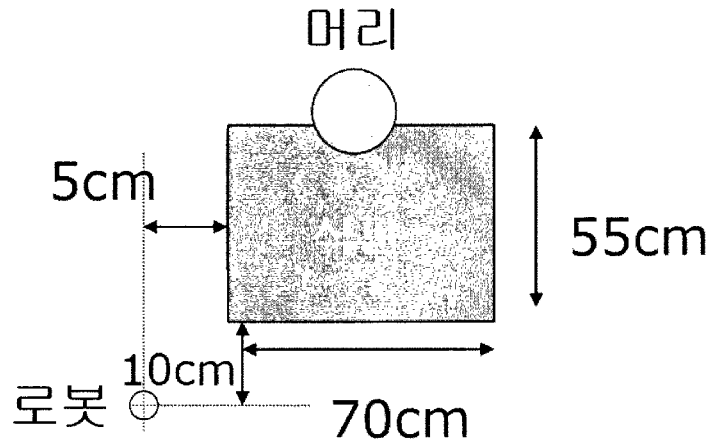


그림 3.3.153 로봇팔과 장애인의 위치관계

앞에서 분석한 장애인의 움직임 범위 α, β 값을 사용하여 프로그램 상에 로봇팔 2차 시제품과 장애인의 움직임 형상을 추가하였다. 여기서 장애인은 최대 지름 60cm의 원뿔을 자른 형상으로 표현하였고 휠체어는 식판을 위주로 표현하였다. 그 형태는 다음과 같다.

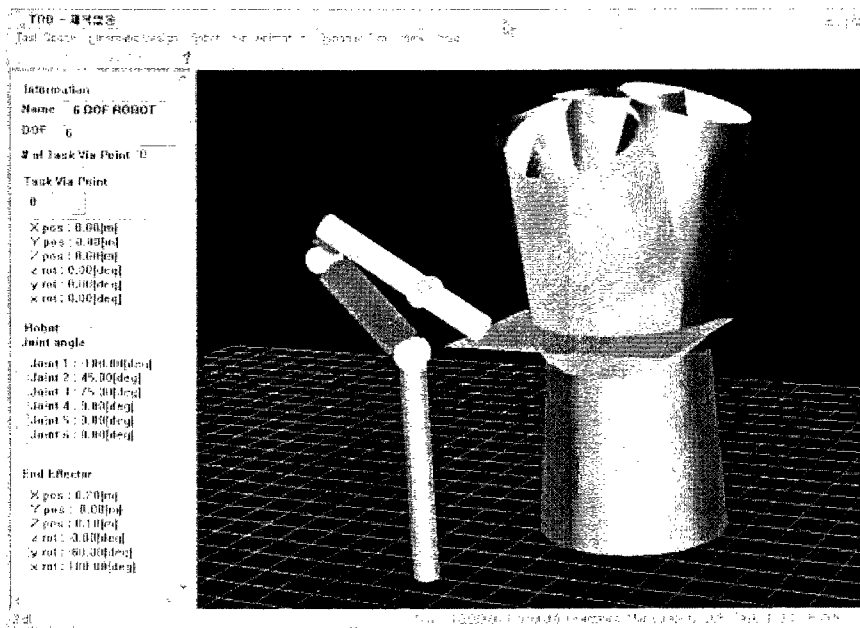


그림 3.3.154 장애인의 움직임 추가

② 영역 결정

앞에서 개발된 프로그램 Tool 을 가지고 시뮬레이션을 통해 접촉이 일어나는 영역을 찾는 작업을 수행하였다. 12가지 작업에 대해서 주어져 있는 Task Point 정보를 이용하여 inverse kinematics 를 풀어 각 Task Point 에 대해 로봇팔이 가리키는 형상을 보며 장애인의 움직임 영역과 겹치는 부분을 접촉 영역으로 선정하였다.

12가지 작업에 대해 모두 수행해 본 결과 식사보조, 물마시기, 얼굴닦기, 면도하기, 차 만들기 의 5가지 경우가 로봇팔과 장애인의 접촉이 일어나는 작업으로 판명되었다. 그 밖의 다른 7가지 작업의 경우는 장애인과 떨어져 있는 곳에서 작업이 이루어지는 관계로 접촉이 일어나지 않았다. 접촉이 일어나는 5개 작업에서의 접촉을 나타내는 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

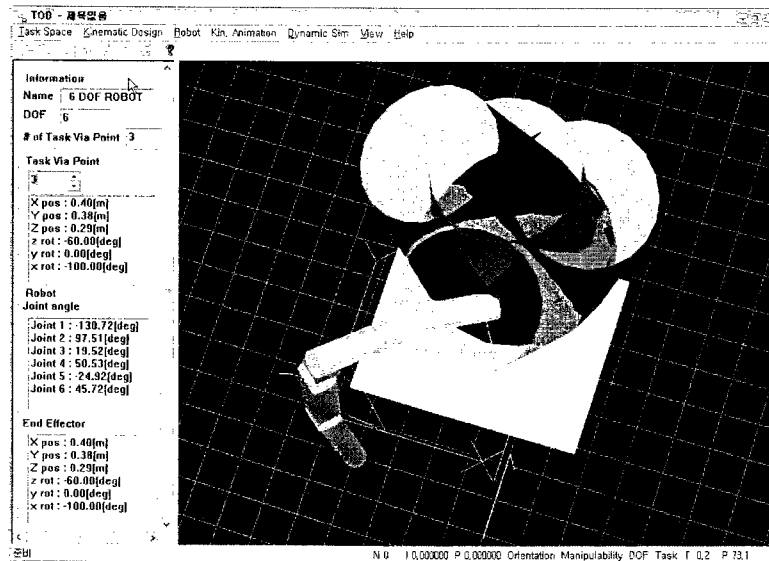


그림 3.3.1.55 식사보조 작업

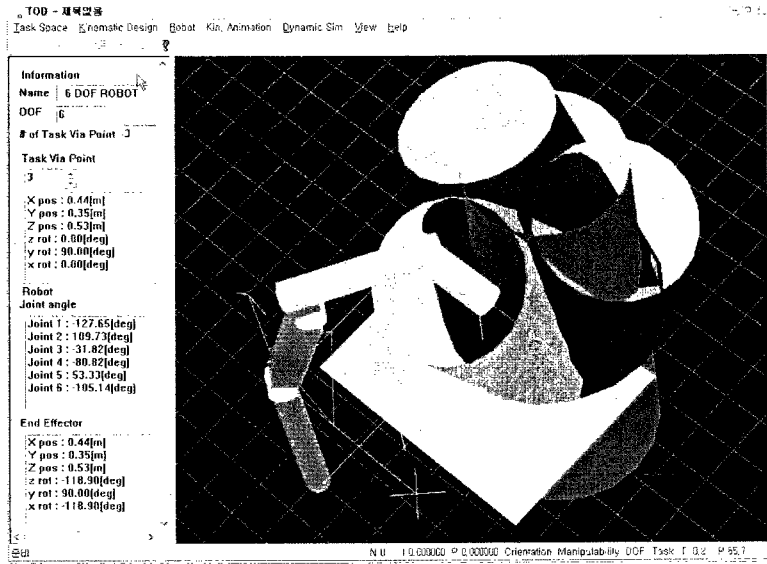


그림 3.3.1.56 물마시기 작업

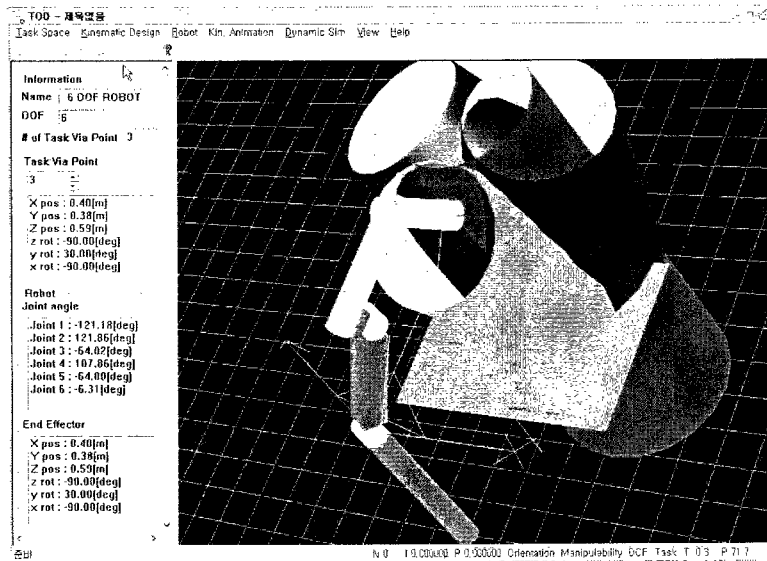


그림 3.3.1.57 얼굴 닦기 작업

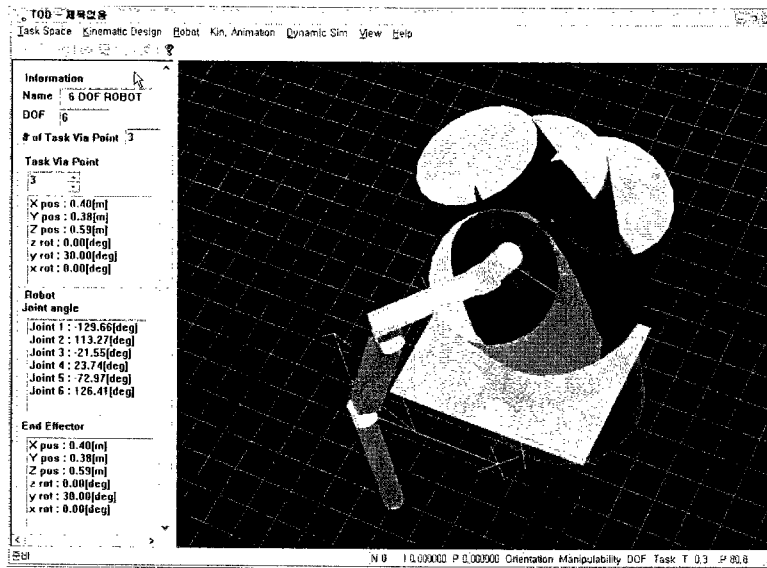


그림 3.3.1.58 면도하기 작업

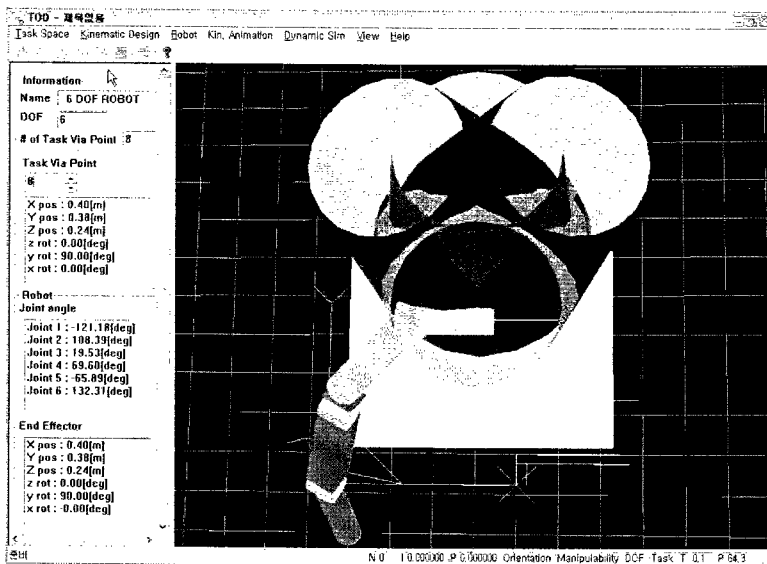


그림 3.3.1.59 차만들기 작업

위와 같은 시뮬레이션 결과를 토대로 로봇팔 2차 시제품에 적용할 접촉 센서의 부착 영역을 최종적으로 결정하였다. 결정한 부분은 아래와 같다.

- 손목축부 링크 반 원통형 부위 (112mm)
- 전체 그립퍼의 절반 부위

이를 나타낸 그림은 다음과 같다.

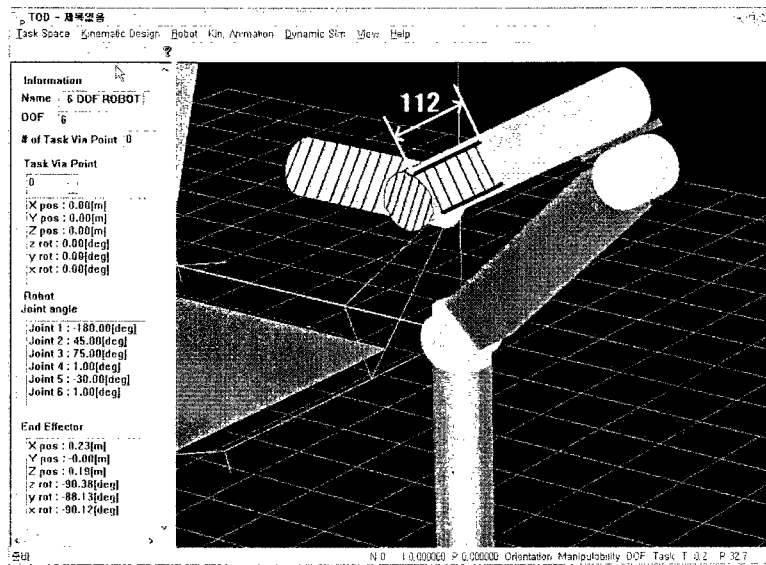


그림 3.3.1.60 결정된 부착 영역

(다) 접촉 센서 선정 및 부착

① 접촉 센서 선정

㉠ 센서 선정 고려사항

접촉 센서 부착 영역이 앞에서 결정되었으므로 다음 문제는 어떠한 접촉 센서를 선정하여 부착할 것인가였다. 사실 이 접촉 센서를 선정하는 작업은 **로봇의 어느 정도 부위를 포함할 것인지**가 매우 중요하다. 어디에, 어느 정도 장착할 것인지를 알고 있지 않으면 접촉 센서의 선정은 직관적으로 이루어지기 쉽고 선정된 접촉 센서를 실제로는 사용할 수 없는 상황까지 발생할 수 있는 것이다.

하지만 접촉 센서 선정을 위해 필요한 정보가 부착 영역만은 아니다. 이 **접촉 센서의 목적을 명확히 하고 이 목적을 만족시키기 위해 어떤 것을 고려해야 하는지** 결정하는 것도 또한 중요하다. 이것이 명확해진다면 그에 맞는 접촉센서를 체계적으로 선정할 수 있는 것이다.

우선 로봇의 어느 정도 부위를 포함할 것인지를 이미 (나)에서 결정함으로써 접촉 센서의 적용 가능성을 쉽게 생각해 볼 수 있게 되었다. 실제로 부착 영역을 선정하기 전에는 적용가능성을 생각하기가 어려웠지만 영역 선정 후에는 이미 알고 있는 영역이고 그 부분의 하드웨어 모양도 있는 상태이므로 부착하기 좋은 접촉 센서를 생각하기가 매우 수월하였다. 접촉 센서를 부착할 하드웨어의 모양은 아래와 같았고 이를 토대로 센서 선정을 하였다.

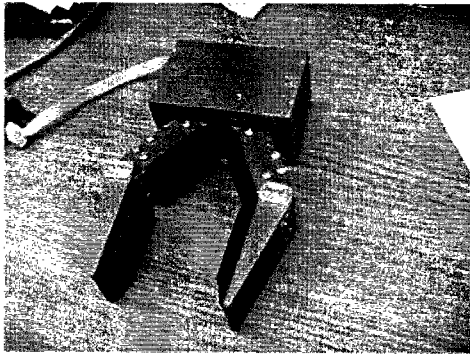


그림 3.3.1.61 그립퍼

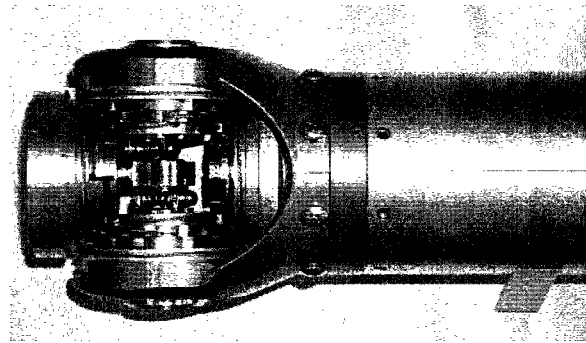


그림 3.3.1.62 손목축 링크부

그리고 접촉 센서의 목적은 (가)-①-④에서 이미 밝힌 바 있다. 12가지 작업을 수행할 때에 장애인과 로봇 사이의 접촉을 감지하여 장애인의 안전성을 높이는 역할이 바로 접촉 센서의 목적이다. 여기서 중요한 포인트는 접촉을 감지하여 어떤 방법으로 장애인의 안전성을 높이냐 하는 것이다. 이것은 접촉 센서의 고려 사항 중 가장 중요할 수 있는 기능성 문제이다.

사실 우리가 개발하고 있는 인간친화형 소프트 로봇팔은 장애인의 안전성을 고려한 컴플라이언스 제어를 하고 있다. 하지만 컴플라이언스 제어를 상시 하고 있는 것은 아니며 접촉이 일어날 것을 미리 알고 있는 때에만 컴플라이언스 제어를 수행한다. 이를 나타낸 그림은 다음과 같다.

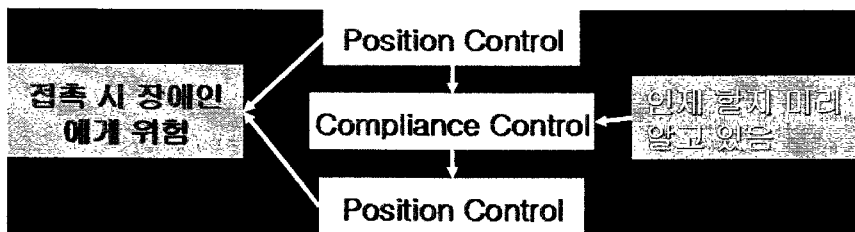






그림 3.3.1.63 제어 Sequence

이 그림에 따르면 결국 접촉센서의 역할은 로봇팔과 장애인이 불시에 접촉하는 경우를 알아내는 것이다. 장애인의 안전성을 높이는 것은 바로 이런 불시의 접촉을 알아내고 로봇을 정지시키는 것이 될 것이다. 이로서 **접촉 On/Off 판별** 여부가 꼭 필요한 기능의 고려사항이 된다.

㉔ **접촉 센서 선정**

다음은 센서 선정을 위해 접촉 센서를 조사하였다. 접촉 센서로 사용되는 타입은 크게 4종류로 각각은 Strain-gage, Piezo-film, FSR (Force Sensing Resister), PCR (Pressure Conductive Rubber) 이었다. 이 4개의 센서 타입에 대해 장단점을 정리해보면 표 3.3.1.27과 같다.

표 3.3.1.27 4개 타입 접촉 센서의 장-단점

	장 점	단 점
Strain-gage 	간단한 회로로 구현. 가격이 저렴.	넓은 범위 측정 어려움. 누르는 힘 측정 어려움.
Piezo-film 	정확한 힘 측정 가능. 넓은 범위 측정 가능.	약한 내구성. 비교적 복잡한 회로 필요. 가격이 비쌈.
FSR 	간단한 회로로 구현. 가격이 저렴.	넓은 범위 측정 어려움. 가공 및 설치 어려움.
PCR 	가공 및 설치 쉬움. 간단한 회로로 구현. 넓은 범위 측정 가능.	정확한 힘 측정 어려움. 전기적 isolation 필요.

위와 같이 센서 타입 조사를 마친 후 이 4개의 센서 타입 중에서 하나를 선정하기 위해 토의를 하였다. 여기서는 (다)-①-㉔에서 언급되었던 대로 적용 가능성과 접촉 On/Off 판별이 용이한지를 중점적으로 토의하여 센서 타입을 선정하였다. 토의 결과 선정된 센서 타입은 **PCR (Pressure Conductive Rubber)** 로 결정이 되었다. PCR 은 압력이 가해지면 매우 큰 저항이었던 rubber 가 작은 저항으로 줄어드는 원리를 이용한 접촉 센서이다. 이 타입의 선정 이유는 **접촉 On/Off 판별을 위한 회로부가 간단하면서도 판별 성능 또한 충분할 것으로** 예상되었고, **넓은 범위에 적용이 쉽고 가공 또한 쉬워 결정된 영역에 부착하기에도 용이할 것으로** 생각되었기 때문이다.

위의 PCR 타입 선정을 바탕으로 ZOFLEX 사의 ZL45 PCR 을 선택하였다. 이 제품의 특성은 아래와 같다.

표 3.3.1.28 ZOFLEX ZL45 PCR 특성표

Characteristic	Sym.	Data	Conditions
Operating Voltage Range	V_e	0-16V	DC, AC
Resistance Without Pressure	R_{no}	>30M Ω	25 °C
Min. Resistance Under Pressure	R_{min}	1 Ω	25 °C
Max. Switching Current ⁶ @ 6VDC	I_{max}	0.5A/cm ²	$R_L=12\Omega$ linear load Material thickness ≤ 2.5 mm
Max. Continuous Current ⁶ @ 6VDC	I_{CTmax}	2A/cm ²	$R_L=31\Omega$ linear load Material thickness ≤ 2.5 mm
Max. Switching Current ⁶ @ 12VDC	I_{max}	0.3A/cm ²	$R_L=10\Omega$ Linear load Material thickness ≤ 2.5 mm
Max. Continuous Current ⁶ @ 12VDC	I_{CTmax}	1A/cm ²	$R_L=12\Omega$ Linear load Material thickness ≤ 2.5 mm
Max. Continuous Power Dissipation	P_d	0.25W/cm ²	Material thickness ≤ 2.5 mm
Shore A Hardness	--	15	25 °C
Thermal Operating Range	--	-40 °C to 220 °C	--
Density	ρ	1.82 g/cm ³	25 °C

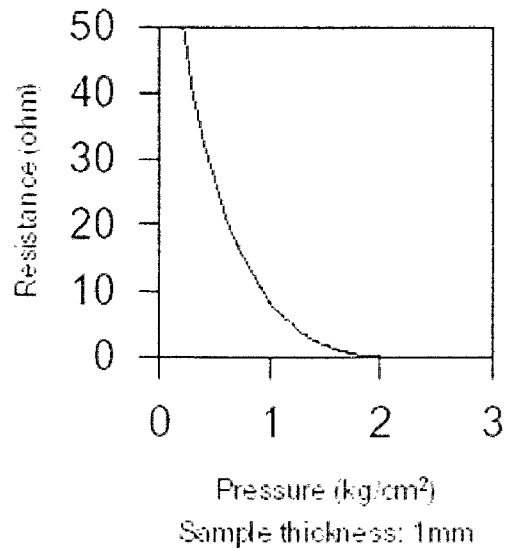


그림 3.3.1.64 ZOFLEX ZL45 PCR 저항 변화

② 접촉 센서 부착

㉞ 접촉 센서 테스트 및 부착

센서 테스트를 위해 접촉 감지를 위한 회로를 생각해 본 결과 간단한 기본 회로를 구성하였다. 그 기본 회로도에는 아래와 같다.

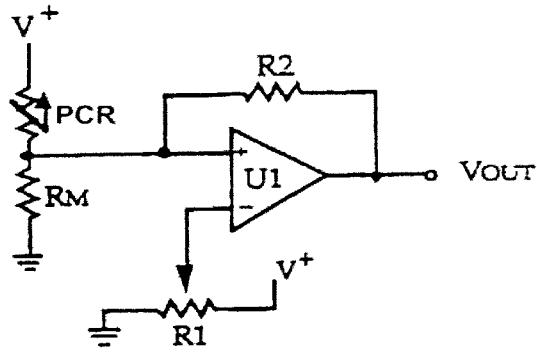


그림 3.3.1.65 접촉 센서 기본 회로도

이 회로는 접촉 On/Off 감지용 회로로 간단한 Comparator 이다. TTL (Transistor-Transistor Logic) 방식인 V_{out} 이 3.3V 이상이 나오느냐를 통하여 접촉 On/Off 를 알려준다. 또한 가변저항 R_1 을 변화시키는 방법으로 접촉으로 판별되는 접촉 힘 또는 압력을 임의로 정해 줄 수가 있다.

다음은 센서가 사양대로 잘 동작하는지를 확인하기 위해 저항 변화 테스트를 수행하였다. 사양과의 비교를 위해서 가로 1cm, 세로 1cm, 두께 1mm 의 크기로 자른 PCR 위에 고무 압력을 받을 수 있도록 판을 놓고 무게를 올려놓는 방식으로 테스트를 수행하였다. 테스트한 무게는 판을 포함하여 200g, 390g, 520g 으로 그 결과 저항의 변화는 아래와 같이 비교적 근사하게 나타났다.

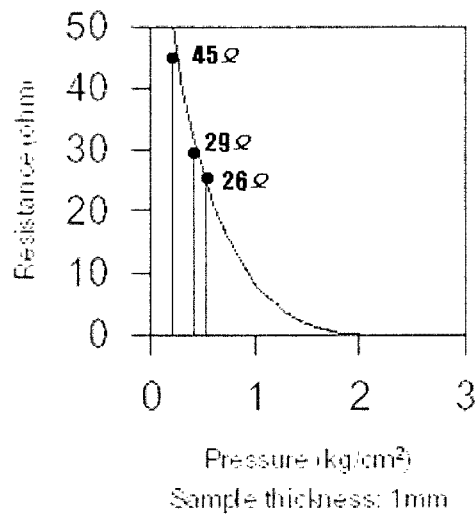


그림 3.3.1.66 저항 변화 테스트

다음은 PCR 을 이용하여 넓은 범위의 접촉 On/Off 를 감지할 수 있는 센서를 만들었다. 만든 접촉 센서의 구조는 다음과 같다.

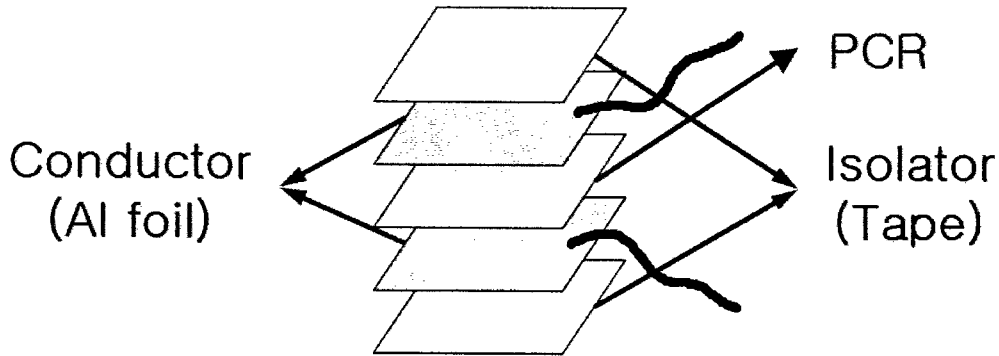


그림 3.3.1.67 만든 접촉 센서의 구조

PCR 은 압력에 대한 가변저항의 특성을 가지고 있지만 눌리는 부분 근방만이 그림 3.3.1.1 의 저항변화 테스트 같은 변화를 보이게 된다. 따라서 넓은 부분에서 압력에 따른 저항 변화를 느끼기 위해선 다른 방법이 필요하다. 우리는 이를 위해서 전도체를 PCR 위에 원하는 측정 부분 전부에 부착하는 방법을 사용하여 넓은 부분에서의 측정을 가능하게 하였다. 이 전도체로는 알루미늄 박을 사용하였다. 또한 전도체에서 흐르는 전기로 인해 접촉시에 일어날지 모르는 사고를 방지하기 위해서 전도체 위, 즉 하드웨어나 접촉 대상에 닿을 수 있는 부분에 절연체를 부착하였다. 이 절연체로는 스카치테이프를 사용하였다. 이렇게 만들어진 접촉 센서의 형태는 다음과 같다.



그림 3.3.1.68 만든 접촉 센서

이렇게 만들어진 센서는 넓은 범위에서의 측정이 가능했지만 접촉 On 판별은 약 200g/cm² 정도부터 가능하였다. 이는 초기 변화를 가하지 않았을 때의 테스트에 비해 성능이 감소한 것으로 이는 저항이 감소하지 않은 다른 PCR 의 영향으로 보인다. 이 점은 개선해야 할 사항으로 생각된다.

센서 제작을 마친 후에 (나)에서 정한 부착 영역에 위에서 만든 접촉 센서들을 부착하였다. 정해진 부착 영역에서 손목측 링크부의 접촉 가능성이 미비한 틈새부분과 그립퍼 일부부분을 제외한 대부분에 부착을 하였다. 부착한 사진은 아래와 같다.

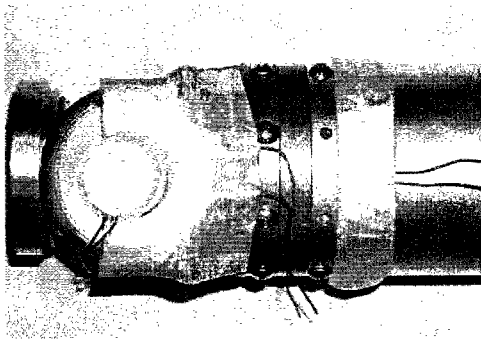


그림 3.3.1.69 로봇팔 ①

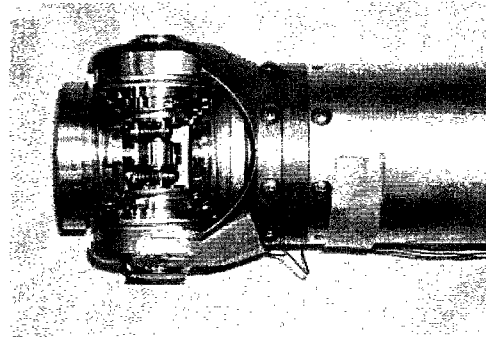


그림 3.3.1.70 로봇팔 ②

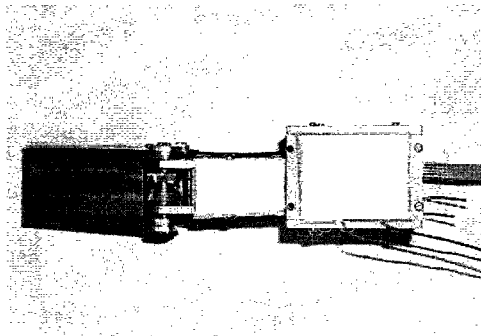


그림 3.3.1.71 그립퍼 ①

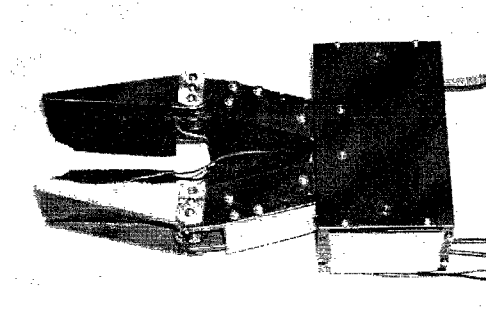


그림 3.3.1.72 그립퍼 ②

센서는 로봇팔 3개, 그립퍼 3개 해서 총 6개를 사용하였다. 그리고 그립퍼 윗면 쪽에 접촉 센서를 부착하지 않은 것은 이 부분에 비주얼 서보잉 용 카메라가 장착될 예정이기 때문이다.

㉔ 센서 작동 테스트

다음은 접촉 센서를 테스트해 보기로 했다. 테스트 전에 200g/cm² 를 접촉 감지 압력 기준으로 정하고 테스트하였다. 200g/cm² 의 압력은 만들어진 센서의 측정 가능한 최소 기준

으로 이를 위해 그림 3.3.1.65 의 회로의 가변저항 R_1 을 $100k\Omega$ 으로 맞추어 놓고 테스트를 수행하였다. 이 접촉 감지 압력 값은 사용자의 필요에 따라 가변저항 R_1 값을 바꾸면서 수정이 가능하다.

우선 접촉이 일어났을 경우를 테스트해 보았다. 접촉이 일어날 때의 그림 3.3.1.65 의 V_{out} 의 변화는 아래와 같다.

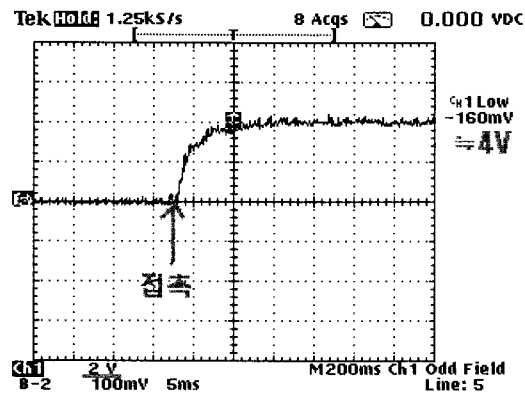


그림 3.3.1.73 접촉 일어날 경우 실험

이 결과 접촉을 잘 감지함을 알 수가 있다.

다음은 접촉이 끝났을 경우 역시 마찬가지로 아래와 같이 이를 잘 감지함을 알 수 있었다.

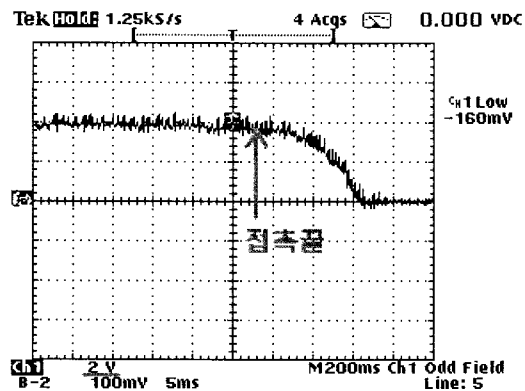


그림 3.3.1.74 접촉 끝났을 경우 실험

위의 결과로부터 부착한 접촉 센서가 잘 작동하는 것을 확인할 수 있었다. 결국 부착된 접촉센서는 인간친화형 소프트 로봇팔 2차 시제품이 12가지 작업을 수행할 때에 장애인의 안전성을 크게 높여줄 것으로 기대된다. 다만 접촉 센서의 측정 범위를 좀 더 늘리는 것이 필요할 것으로 생각된다.

(5) 개선된 그립퍼(Gripper) 설계시 요구되는 조건 분석

로봇의 작업 성능은 많은 부분 로봇 팔이 요구되는 작업을 수행할 수 있는가의 여부에서 크게 구분이 되게 된다. 그러나 로봇 팔 자체가 요구되는 작업 경로를 모두 다 잘 통과 할 수 있다고 하여서 원하는 작업을 다 잘 구현할 수 있는 것은 아니다. 로봇의 손에 해당하는 그립퍼가 원하는 작업을 하기에 적합하지 않다면, 작업 수행에 적합하도록 제작된 로봇이 존재한다고 하여도 그 성능을 100% 발휘하기가 어렵게 된다. 따라서 그립퍼를 설계함에 있어서도 **12가지 작업에 대한 분석을 통해서 어떤 목적에 어떤 기능이 요구되는가를 확실히 할 필요가 있다.** 현재, 본 연구에서 목표로 하고 있는 12가지 작업을 잘 수행할 수 있기 위해서 그립퍼에 요구되는 사양은 다음과 같은 것들이 있다.(표 3.3.1.29)

표 3.3.1.29 12가지 작업을 수행하기 위해 Gripper 설계에 요구되는 조건

작업 번호	작업 이름	Gripper에서 요구되는 조건
1	식사 보조	1. Gripping Force 조절 기능
2	물 마시기	2. Visual Servoing 오차 고려한 여유폭
3	얼굴 닦기 (꺠기)	
4	면도하기	
5	물건 집기	1. Gripping Force : 최대 65.4 N (2kg 가반하중) 2. 영한 사전 너비의 물체 잡을 수 있어야 함
6	스위치 켜고 끄기	
7	문 여닫기	1. 문 손잡이를 미끄러짐 없이 돌릴 수 있어야 함 Gripping Force : 최대 46.5 N 2. 여러 종류 문손잡이를 잡을 수 있는 기구학적 설계
8	차 만들기	
9	서랍 열기	서랍 손잡이를 잡을 수 있는 기구학적 설계
10	게임하기 (chess)	
11	CD/Tape 바꾸기	1. Gripping Force 조절 기능 2. CD를 잡을 수 있는 기구학적 설계
12	프린터/팩스 용지 제거하기	Gripper 표면 재질 (마찰 계수)

표에 나와있는 요구 사항을 간단히 설명하면, 식사 보조 작업이나 물 마시기 작업의 경우에는 여러 가지 종류의 반찬을 집음에 따라서 그립퍼의 수저를 쥐는 힘이 적절하게 조정이 되어야 하며, visual servoing을 이용하여 컵 등의 물체의 위치를 파악하여 잡을 경

우, **visual servoing**에서 존재할 수 있는 오차를 감안하여, 약간의 오차가 있더라도 그립퍼가 잡을 수 있는 것이 요구되었다. 물건 집기 작업의 경우도 마찬가지로 어떤 종류의 물건을 집는가에 따라서 그립퍼의 악력이 조절 가능하여야 잡는 물건의 손상이 되지 않을 수 있다. 이것은 CD/Tape을 바꾸는 작업에서 역시 마찬가지로 요구되는 것으로서 CD나 Tape과 같이 약한 물건을 잡을 경우에는 잡는 힘의 조절이 꼭 필요하다. 또한 문 손잡이를 문제없이 돌리고, 2kg의 가반 하중을 견디기 위해서는 최대 **65.4N** 정도의 악력을 낼 수 있는 것이 요구된다. 또한 물체를 놓치지 않기 위해서는 그립퍼의 물체를 잡는 쪽 면의 마찰력이 중요한 영향을 끼치게 된다. 마찰력의 크기는 접촉면에 수직 방향으로 같은 크기의 힘을 주었을 때, 마찰 계수의 크기에 비례하게 된다. 또한 마찰 계수의 크기는 접촉면의 재질에 따라서 결정이 되게 된다. 따라서 **그립퍼 접촉면의 재질 역시도 고려가 되어야 할 대상**이다.

그리고, 또 한가지 꼭 고려되어야 할 사항은 그립퍼 자체의 무게가 너무 크거나, 크기가 너무 커서 안된다는 것이다. 그립퍼 자체의 무게가 너무 무거울 경우, 로봇 팔의 가반 하중이 줄어드는 효과를 가져오며, 그립퍼 자체의 크기가 너무 큰 경우에는 외관상 좋지 않을뿐더러, 자체의 크기로 인하여 작업에 방해가 될 수도 있다. 따라서 그립퍼의 무게는 **로봇 팔의 가반 하중 2kg에 크게 영향을 주지 않도록 300g 이하로 선정** 되었다. 그립퍼의 크기 또한 **로봇의 손목축의 중심에서부터 그립퍼의 중심까지가 17cm 이하로 선정**되었다. 이러한 요구조건에 따라서, 새로운 그립퍼의 설계가 이루어졌으며 그 설계 결과는 3장 3절 1.에서 자세히 다루기로 한다.

다. 정의된 12가지 작업 수행

대부분의 로봇은 그 로봇이 사용되어야 할 환경과 작업들이 어느 정도 정해져 있다. 그림에도 불구하고, 로봇의 작업을 명확하게 정의하지 않은 채 로봇을 설계한다면, 나중에 제작된 로봇이 주어진 작업을 수행하지 못하는 경우가 발생할 수도 있고, 혹은 불필요하게 많은 자유도를 가진 로봇이 제작되어, 실제로 주어진 작업을 수행할 때 사용되지 않는 관절이 존재하여 여러모로 큰 손실을 초래 할 수도 있다. 따라서 장애인 보조 로봇은 제작 할 당시부터 꼭 수행해야 하는 12가지 작업을 선정하여, 선정된 작업들을 잘 수행 할 수 있도록 설계가 이루어져왔다. 이에 따라 그림 3.3.1.75와 같은 디자인 순서를 정하고, 로봇을 제작하였다.

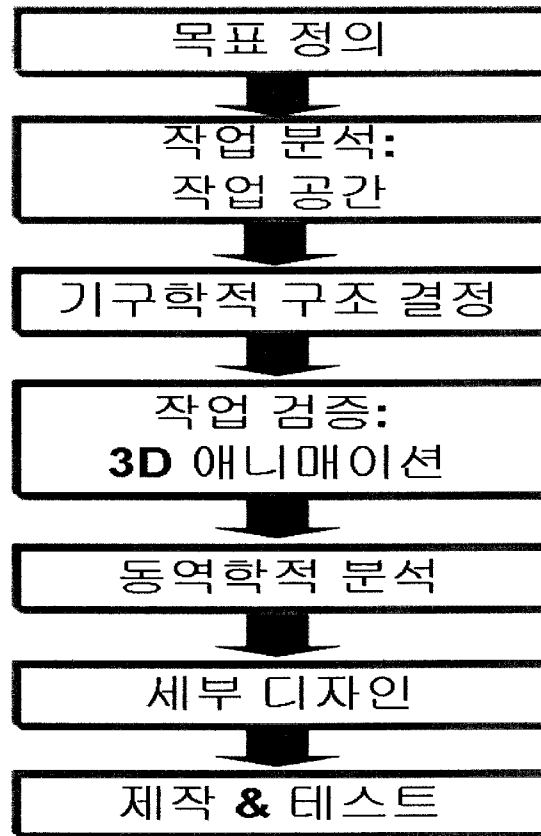


그림 3.3.1.75 목표 지향 로봇 설계 전략

이 목표 지향 로봇 설계 방식은 로봇이 꼭 수행해야 할 작업들로부터 작업 공간을 선정하고, 이에 따른 로봇의 기구학적 디자인이 먼저 수행된 후, 이를 바탕으로 하여서 로봇의 구동기(actuator)를 선정 한 후, 로봇을 제작하여 로봇이 처음에 정의한 작업들을 잘 수행할 수 있는지의 여부를 최종 점검하는 것으로 이루어져 있다.

이에 따라서 로봇은 프로젝트 1단계에서 설계 제작되었으며 이 과정에서 로봇의 기구학적인 구조는 3차원 애니메이션을 통하여 모든 작업을 수행하기에 적합하다는 것이 검증되었다. 2단계에서는 목표 지향 로봇 설계 전략의 마지막 단계인 실제 제작된 로봇이 작업을 잘 수행하는지 여부를 테스트하는 것을 필요로 한다.

(1) 작업(task)들의 하위 작업(sub task) 종류에 따른 분석

목표 지향 설계 방식에 따라서 장애인들과의 인터뷰 및 일상 생활 현장 방문 조사를 통하여 결정된 12가지 작업은 표 3.3.1.30과 같다.

표 3.3.1.30 12가지 정의된 작업

작업 번호	작업 이름	사용자와의 거리
T1	식사 보조	가까움
T2	물 마시기	가까움
T3	얼굴 닦기(긁기)	가까움
T4	면도하기	가까움
T5	물건 집기	멈
T6	스위치 켜고 끄기	멈
T7	문 여닫기	멈
T8	차 만들기	멈
T9	서랍 열기	멈
T10	게임하기(chess)	가까움/멈
T11	CD/Tape 바꾸기	가까움/멈
T12	프린터/팩스 용지 제거하기	가까움/멈

실제로 12가지 정의된 작업을 로봇이 잘 수행할 수 있는지 테스트를 위하여 로봇 설계 단계에서 이루어진 작업 공간 분석과는 다른, **실제 작업을 적용함에 있어서 어떤 순서로 어떻게 작업을 진행하는 것이 옳은가에 대한 분석**을 할 필요가 있다. 이러한 작업 분석은 로봇 팔에게 불필요한 동작을 최소화함과 동시에 작업이 원활하게 수행 될 수 있도록 하는 기초 자료로서 유용하다.

또한 정의된 12가지 모든 작업에 대하여 이러한 분석을 수행함으로써, 로봇 팔에게 요구되는 **세부적인 동작들을 하위 작업 별로 분류** 할 수 있다. 따라서 로봇 팔이 잘 동작하는가 여부를 테스트 할 때, 12가지 모든 작업을 시간과 노력을 들여서 테스트하지 않더라도 **가장 많은 하위 작업(sub-task)을 포함하는 작업에 대한 테스트**를 함으로서 로봇의 성능을 검증할 수 있다.

이에 따라서 로봇이 주어진 12가지 작업을 수행함에 있어 어떠한 동작들을 필요로 하는지 하위 작업들을 분류하는 하위 작업 항목에 따른 분석이 이루어졌다. 이 하위 작업 항목 분석 결과, 10가지의 하위 작업이 선정되었다. 선정된 결과는 표 3.3.1.31과 같다.

표 3.3.1.31 하위 작업 항목 분석 표

작업 번호	하위 작업 이름
S1	현재 위치에서 지정된 위치로 이동
S2	물체 근처로 접근
S3	물체 잡기/놓기
S4	물체 인식
S5	얼굴(입) 인식
S6	얼굴(입) 근처로 이동
S7	얼굴(입) 근처로 접근
S8	얼굴(입) 과 접촉
S9	사용자 이외의 것과 접촉
S10	초기 자세로 복귀

선택된 하위 작업들을 설명하면 S1의 경우에는 로봇 팔이 현재 위치에서 지정된 다른 위치로의 이동하는 작업이며, S2의 경우에는 식판이나 바닥, 책장 등에 있는 물체를 잡기 위하여 접근하는 동작이다. 이들 작업들은 문 손잡이, 스위치 등의 정해진 위치에 존재하는 것의 경우에는 미리 정의된 경로 점들로 로봇 팔이 이동하는 것이고, 물 컵이나 식사 보조를 위한 반찬의 위치 등으로 가는 경우에는 비주얼 서보잉 등의 입력 장치를 통하여 움직여 가야할 경로점을 입력 받아서 움직이는 것이 가능하다.

S3의 경우에는 그립퍼(Gripper)를 이용하여 물체를 잡거나 놓는 작업이다. S4, S5의 경우에는 로봇 팔의 직접적인 동작과는 무관하지만, 비주얼 서보잉에 의하여 물체의 위치나 장애인의 얼굴을 인식하는 하위 작업이다.

S6의 경우에는 장애인의 얼굴 근처로 이동하는 작업이며, S7의 경우에는 장애인의 얼굴 근처로 가까이 접근해 가는 작업이다. 이들 두 작업의 경우에도 장애인의 얼굴 근처의 경로점이 미리 주어져 있거나, 비주얼 서보잉, 햅틱 슈트 등의 입력 장치로 움직임을 입력 받아서 움직이는 것이 가능하다.

S8의 경우에는 식사 보조, 물 마시기, 면도 작업 및 얼굴 닦기 작업에서 일어날 수 있는 장애인과의 접촉 작업들이며, 특히 면도 및 얼굴 닦기 작업의 경우에는 로봇 팔과 장애인의 직접적인 접촉이 존재하게 된다. S9의 경우에는 로봇이 어떤 물체를 식판이나 다른 어떤 곳에 놓을 경우에 일어날 수 있는 접촉에 관한 것이며, S10은 작업을 수행한 이후에 원래 초기 자세로 돌아오는 하위 작업이다.

(가) 하위 작업들의 조합에 따른 12가지 작업의 진행 순서

10가지 하위 작업(sub task)들이 선정되었으므로, 하위 작업들을 조합하여서 다음과 같이 작업의 진행 순서를 정의하는 것이 가능하다.

① 식사 보조 작업 (T1)

S1(수저 근처 이동)→S3(수저 집기)→S2(반찬 근처)→S4(반찬 인식)→S9(반찬 집기)→S6(얼굴 근처)→S5(입 인식)→S7(입으로 접근)→S8(사람 입과 접촉)→S1(수저 자리로 복귀)→S3(수저 놓기)→S10(초기자세 복귀)

② 물 마시기(T2)

S1(식판으로 이동)→S2(컵 근처)→S4(컵 인식)→S3(컵 집기)→S6(입 근처 이동)→S5(입 인식)→S7(입으로 접근)→S8(사람 입과 접촉)→S1(식판으로 이동)→S9(컵 놓기)→S10(초기자세 복귀)

③ 세안(T3)

S1(수건 근처 이동)→S3(수건 집기)→S6(얼굴 근처 이동)→S7(얼굴로 접근)→S5(얼굴 인식)→S8(얼굴과 접촉)→S1(수건 원래 있던 자리로)→S3(수건 놓기)→S10(초기자세 복귀)

④ 면도(T4)

S1(면도기 근처 이동)→S3(면도기 집기)→S6(얼굴 근처 이동)→S7(얼굴로 접근)→S5(얼굴 인식)→S8(얼굴과 접촉)→S1(면도기 원래 있던 자리로)→S3(면도기 놓기)→S10(초기자세 복귀)

⑤ 물건 집기(T5)

S1(물건 근처 이동)→S4(물건 인식)→S2(물건 근처 접근)→S3(물건 집기)→S1(식판 등 물건 놓을 장소로 이동)→S3(물건 놓기)→S10(초기자세 복귀)

⑥ 스위치 켜고 끄기(T6)

S1(스위치 근처 이동)→S4(스위치 인식)→S2(스위치 접근)→S9(스위치 누르기)→S10(초기자세로 복귀)

⑦ 문 여닫기(T7)

S1(손잡이 근처로 이동)→S4(손잡이 인식)→S2(손잡이 접근)→S3(손잡이 잡기)→S9(문

밀기)→S3(손잡이 놓기)→S10(초기자세로 복귀)

⑧ 차 만들기(T8)

S1(주전자 위치로 이동)→S4(주전자 인식)→S2(주전자로 접근)→S3(주전자 잡기)→S1(컵 근처 이동,물 붓기)→S1(주전자 제자리로 이동)→S3(주전자 놓기)→S1(숟가락 위치로 이동)→S3(숟가락 집기)→S1(컵으로 이동 하여 찌기)→S10(초기 자세로 복귀)

⑨ 서랍 열기(T9)

S1(서랍 위치로 이동)→S4(서랍 손잡이 인식)→S2(서랍 손잡이로 근접)→S3(서랍손잡이 잡기)→S1(서랍 손잡이 지정된 위치까지 움직이기)→S3(서랍 손잡이 놓기)→S10(초기자세로 복귀)

⑩ 게임 하기(T10)

S1(체스판 위치로 이동)→S4(체스 말 인식)→S2(체스 말로 접근)→S3(체스 말 잡기)→S1(체스 말 위치 옮기기)→S3(체스 말 놓기)→S10(초기 자세로 복귀)

⑪ CD/Tape 바꾸기(T11)

S1(CD/Tape 근처 이동)→S4(CD/Tape 인식)→S2(CD/Tape에 접근)→S3(CD/Tape 잡기)→S1(CD/Tape 수납장으로 이동)→S9(CD/Tape 놓기)→S4(CD/Tape 인식)→S2(CD/Tape에 접근)→S3(CD/Tape 잡기)→S1(CD/Tape player로 이동)→S3(CD/Tape 넣기)→S10(초기 자세로 복귀)

⑫ 프린터/팩스 용지 제거하기(T12)

S1(프린터/팩스 근처 이동)→S4(용지 인식)→S2(프린터/팩스에 접근)→S3(용지 잡기)→S1(용지를 지정된 장소에 놓기)→S10(초기 자세로 복귀)

(나) 작업의 하위 작업 분류에 따른 상호 연관성 분석

앞에서 하위 작업들을 정의하고, 정의된 하위 작업들을 가지고 12가지 정의된 작업들의 작업 진행 순서를 정하였다. 이제 앞선 분석들을 토대로 하여서, 12가지 작업 각각에 대하여 어떤 하위 작업을 필요로 하는지 표 3.3.1.32과 같이 정리할 수 있다.⁹⁾¹⁰⁾

9) T#m은 m번째 작업을, S#n은 n 번째 하위 작업을 의미한다.

10) 작업과 하위 작업사이에 연관 관계가 존재하는 것에는 √표시를 사용하여 관계가 있음을 표시하였음

표 3.3.1.32 12가지 작업과 하위 작업과의 연관성 분석

작업	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
S1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S2	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S3	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
S4	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S5	✓	✓	✓	✓								
S6	✓	✓	✓	✓								
S7	✓	✓	✓	✓								
S8	✓	✓	✓	✓								
S9	✓	✓				✓	✓					
S10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

표 3.3.1.32의 분석 결과를 보면 식사 보조 작업과 물 마시기 작업 (T1,T2)이 모든 하위 작업들을 포함함을 알 수 있다. 즉 물 마시기 작업은 모든 하위 작업들을 필요로 하며, 이 작업이 성공적으로 수행되었다는 것은 다른 어떤 작업도 가능하다는 것을 의미한다.

실제로 식사보조(T1)의 경우에는 물 마시기 작업과 같은 작업으로 식판에서 가져와야 하는 물건이 다를 뿐이라고 할 수 있으며, 세안(T3)이나 면도(T4) 작업의 경우에는 장애인 얼굴과의 접촉이 좀 더 자주 일어난다는 점을 제외하면 물 마시기 작업보다 간단한 작업임을 알 수 있다. 또한 5~12번 작업의 경우에는 1~4번의 작업들이 가능하다면, 이미 구현된 모든 하위 작업들 중에 몇 가지를 재 조합하면, 별 문제 없이 가능한 작업들임을 알 수 있다. 5~12번의 작업들의 경우에는 장애인과의 직접적인 접촉이 없기 때문에, 직접적으로 장애인과 접촉이 있는 식사 보조나 물 마시기 작업에 비해서, 필요로 하는 하위 작업의 가지 수가 적을 수밖에 없다. 따라서 디자인 된 로봇 팔이 원래의 작업을 충실하게 수행할 수 있는가를 테스트한다면, 모든 작업을 수행하도록 하여서 그 성능을 평가 할 수 도 있으나, 물 마시기 작업을 성공적으로 수행 할 수 있는가를 테스트함으로써 한가지 작업만 가지고도 충분히 테스트가 가능함을 알 수 있다.

(2) 장애인을 대상으로 한 작업 세부 내용 설문 조사

로봇이 실제로 작업을 수행함에 있어서 첫 번째로 고려되어야 하는 것은 장애인이 로봇의 움직임에 대하여 어떠한 의견을 가지고 있는지를 아는 것이다. 즉 사용자의 의도가 반영되지 않은 상태의 로봇 팔은 작업을 수행 할 수는 있지만, 사용자들을 만족시키지 못하며, 이는 목표 지향 설계에서 추구하는 작업의 원활한 수행과 대치된다고 할 수 있다. 따라서 장애인들이 로봇 팔의 움직임과 관련하여 가지고 있는 의견을 수렴하고, 실제 작업 수행 계획에 반영하는 것은 매우 중요하며, 절대 빠져서는 안 되는 단계라고 할 수 있다.

따라서 장애인의 의견을 반영하기 위하여 로봇 팔의 속도 및 궤적에 관하여 설문 조사를 수행하였다. 또한 로봇 팔에 컴플라이언스를 구현하는 것이 좋은지에 관한 설문 또한 이루어졌다. 로봇이 장애인 주변에서 작업을 하게 되므로, **로봇 팔의 속도는 장애인의 안전과 직결된 문제**이다. 또한 실제로 로봇이 안전하면서도 빠르게 움직일 수 있을지라도, **장애인들이 느끼기에 위험하다고 느껴지거나 불쾌하다고 느껴지는 경우가 있을 수 있다**. 따라서 로봇 팔의 속도라는 것은 장애인들에 의해서 결정되는 것이 타당하다. 또한 **로봇 팔의 궤적 역시도 장애인들의 안전이라는 측면과, 장애인들이 느낄 수 있는 불안감과 관계가 있으므로 중요한 요소**라고 할 수 있다. 면도나 얼굴 닦기 작업 시에 장애인의 안전을 위하여 컴플라이언스는 꼭 필요한 요소이다. 그러나 **장애인들이 실제 일상 생활에서 어떠한 방식으로 하고 있는가 여부는 공학적인 측면에서 컴플라이언스의 필요성과 다를 수 있으므로 이 역시 설문이 필요한 부분**이다.

설문 조사는 구현된 로봇 팔의 움직임을 여러 가지 속도의 동영상으로 만들어서 장애인들에게 보여준 후, 어느 정도의 속도가 타당한지에 대한 방식으로 이루어 졌으며, 움직임에 관해서는 로봇 팔과 장애인과의 위치를 역시 보여준 후 어떤 궤적을 따라서 로봇이 움직이는 것이 좋은지에 관한 선호도를 조사하였다. 로봇 팔의 compliance의 유무에 대해서는 면도 및 얼굴 닦기 작업 시에 면도기나 수건이 눌리는 것을 선호하는지 여부에 대한 설문으로 이루어졌다.

가장 중점적으로 조사의 대상이 된 것은 물 마시기 작업이다. 대표적인 장애인 근처에서 이루어지는 작업이며, 다른 여타 장애인 근처에서 이루어지는 작업들의 경우에도 결국 물 마시기와 비슷한 궤적으로 움직이게 되므로 물 마시기 작업을 중점적인 설문 조사의 내용이 되었다. 다른 작업의 경우에도 부수적인 설문 조사가 이루어졌다. 설문 조사의 결과는 표 3.3.1.33에 나와 있다.

표 3.3.1.33 작업에 대한 장애인의 의견

설문 내용	의견
식판에서 입 근처까지 걸리는 시간	7~8초
얼굴 닦기 보조시에 compliance	있는 것이 좋음
면도 보조시에 compliance	있는 것이 좋음
책장에서 책을 가져 오는 경로	될 수 있는 한 사람과 떨어져서 움직이는 것 선호

이러한 설문 조사 결과로부터 장애인들이 로봇에 대하여 원하는 속도와 compliance, 로봇의 궤적에 대한 결과를 알 수 있게 되었다. 장애인 주변에서 하는 작업의 경우에 있어서는 로봇 팔의 속도가 더 빠르게 움직일 수 있다는 것을 설문 조사시에 보여 주었으나, 7~8 초 정도를 소요하여서 오는 것을 선호하는 것으로 나타났다. 즉, 이는 **장애인 주변에서는 로봇 팔이 빠르게 움직이는 것보다는 천천히 움직이더라도, 장애인에게 위협적으로 보이지 않는 것을 선호하는 것**을 알 수 있다. 얼굴 닦기와 면도 작업 보조 시에 compliance 의 유무에 관해서는 두 경우 다 **compliance 가 존재하는 것을 선호하는 것**으로 나타났다. 또한 책장에서 책을 가져오는 것처럼, 어떤 물체를 가지고 장애인에게 오는 경우 **될 수 있는 한 장애인과 떨어진 경로로 물건을 가져오는 것을 선호하는 것**을 알 수 있었다. 이는 로봇 팔의 속도 설문 결과에서, 빠른 속도 성능보다 느리더라도 위협적으로 보이지 않는 것을 선호하는 경향과 일치하는 결과라고 볼 수 있다.

(3) 1차 시제품의 제어 성능 개선

로봇이 12가지 작업을 잘 수행하기 위해서는, 첫 번째로 로봇 자체의 기구학적, 동역학적인 성능이 좋아야 한다. 그러나 로봇 자체의 기계적인 구조가 잘 디자인되었다고 해서 로봇이 우수한 성능을 발휘할 수 있는 것은 아니다. 또 한가지 꼭 고려되어야 하는 것은 로봇의 제어기의 제어 성능이 얼마나 뒷받침되어 줄 수 있는가 이다. 1차 시제품에서는 이러한 제어기의 성능을 개선하는 작업들이 수행되었다.

(가) 작업별 궤적의 재 구성

우선적으로 로봇이 주어진 작업을 잘 수행하기 위해서는 로봇이 추종하여야 하는 궤적이 **연속적이며 부드럽게(smooth) 구성**되어야 한다. 이를 위하여 위치, 속도, 가속도의 연속성을 보장하며 부드럽게 만들어 줄 수 있는 5차 다항식(polynomial)을 사용한 궤적이 작성되었다. 5차 다항식은 일반적으로 다음과 같은 형태를 가지게 된다.

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \tag{3.3.1.18}$$

시작점에서의 위치를 θ_0 , 속도를 $\dot{\theta}_0$, 가속도를 $\ddot{\theta}_0$ 라하고, 도착점에서의 위치, 속도,

가속도를 각각 θ_f , $\dot{\theta}_f$, $\ddot{\theta}_f$ 라하고, 시작점에서 끝점까지 걸리는 시간을 t_f 정의하면 위의 다항식의 계수 a_i 들은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$a_0 = \theta_o \quad a_1 = \dot{\theta}_o$$

$$a_2 = \frac{\ddot{\theta}_o}{2}$$

$$a_3 = \frac{20\theta_f - 20\theta_o - (8\dot{\theta}_f + 12\dot{\theta}_o)t_f - (3\ddot{\theta}_o - \ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^3}$$

$$a_4 = \frac{30\theta_o - 30\theta_f + (14\dot{\theta}_f + 16\dot{\theta}_o)t_f + (3\ddot{\theta}_o - 2\ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^4}$$

$$a_5 = \frac{12\theta_f - 12\theta_o - (6\dot{\theta}_f + 6\dot{\theta}_o)t_f - (\ddot{\theta}_o - \ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^5}$$

(3.3.1.19)

이를 바탕으로 하여 제안된 5차 다항식의 궤적은 그림 3.3.1.76와 같이 구성되었다.

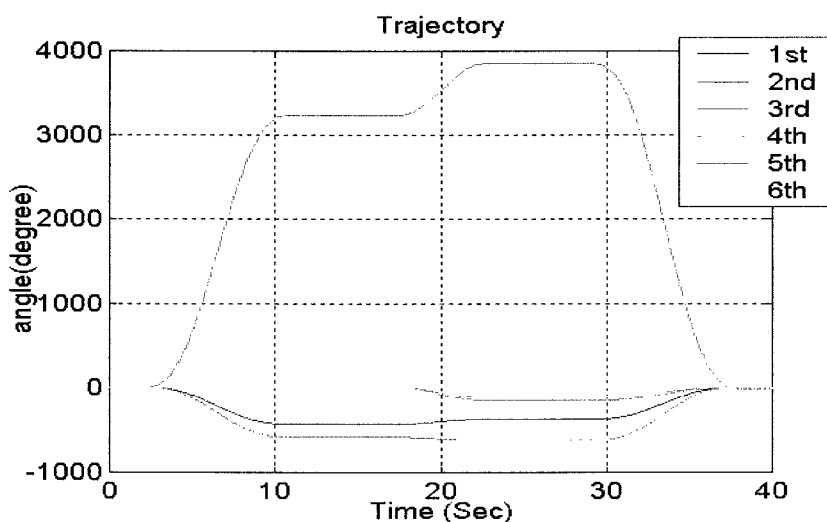


그림 3.3.1.76 재 구성된 5차 다항식 로봇 궤적

(나) 제어 알고리즘의 세부 조절

로봇은 엔코더(encoder)를 사용하여 위치 값을 직접 측정이 가능하지만, 속도 와 가속도 값의 경우에는 수치 미분을 통하여 구하게 된다. 이렇게 수치 미분을 통하여 구해진 속도 및 가속도 값은 수치 미분 오차에 의하여 부정확한 값을 보이게 된다. 또한 이 때 센서에서 측정되는 값에 노이즈가 섞일 수 있게 된다. 따라서 수치 미분과 센서 노이즈

에 의한 영향을 최소화하기 위하여 제어기의 속도 및 가속도 수치 미분치를 필터링을 통하여 여과 시켜서 사용하는 방법을 제안하였다.

기본적으로 1차 저주파 필터는 라플라스 영역(Laplace domain)에서는 다음과 같은 형태를 가지게 된다.

$$\frac{X_f(s)}{X(s)} = \frac{\lambda}{s + \lambda}$$

(3.3.1.20)

여기서 X_f 는 필터링 된 신호, X 는 필터링 시키기 이전의 신호이며, λ 는 cut-off-frequency 이다.

그러나 실제 제어기는 컴퓨터를 통하여 이산화 된 구조를 가지고 있으므로 이를 그대로 적용 할 수는 없다. 따라서 필터를 이산화 하는 과정이 꼭 필요하게 된다. 우선 식 3.3.1.20을 다음과 같은 형태로 변형한다.

$$sX_f(s) + \lambda X_f(s) = \lambda X(s)$$

(3.3.1.21)

여기서 이산화 된 제어기의 sampling time 이 L 이라고 하면, 식 3.3.1.21은 다음과 같이 이산화 된 형태로 바뀌게 된다.

$$\frac{x_f(t) - x_f(t-L)}{L} + \lambda x_f(t) = \lambda x(t) \tag{3.3.1.22}$$

이식을 $x_f(t)$ 에 관하여 정리를 하면 식 3.3.1.23과 같은 이산화 된 저주파 필터를 얻을 수 있다.

$$x_f(t) = \frac{L\lambda x(t) + x_f(t-L)}{1 + \lambda L} \tag{3.3.1.23}$$

이산화 된 저주파 필터를 실제 속도 신호에 적용하여 필터링 한 결과는 그림 3.3.1.77과 같으며, 수치 미분 및 센서 노이즈에 의해서 오염되어 있던 신호가 필터링 되어 진 것을 확인 할 수 있다.

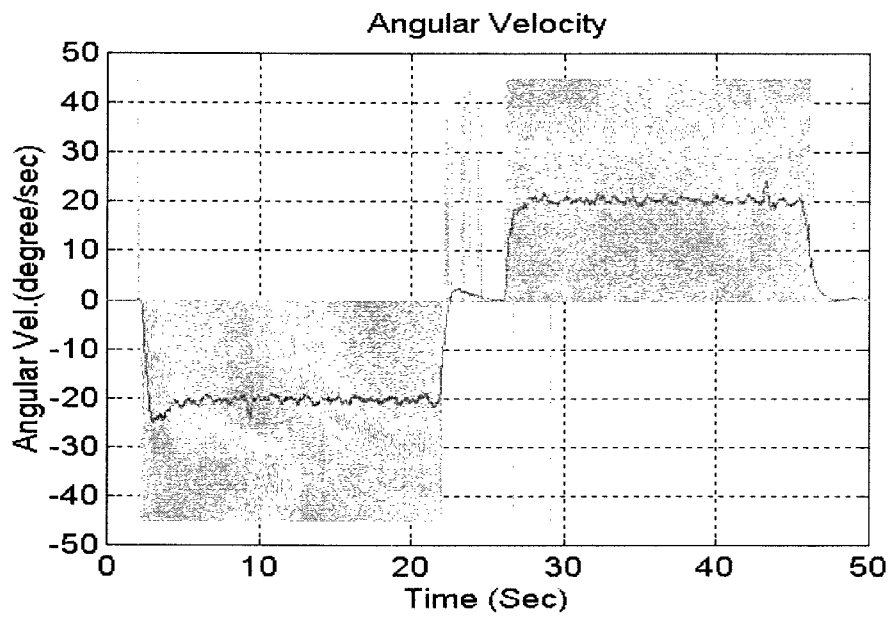


그림 3.3.1.77 저주파 필터에 수치 미분한 속도 신호를 통과시킨 결과

(4) 작업 수행 실험

(가) 로봇 팔을 이용한 12가지 작업 수행

앞서 수행한 작업의 하위 작업별 분석과, 장애인들을 대상으로 한 작업 내용에 관한 설문 조사, 1차 버전의 제어 성능 향상 등이 모두 종합되어서 로봇이 12가지 작업을 잘 수행 할 수 있는가에 대한 테스트로서 작업 수행이 이루어지게 되었다. 우선 로봇 팔이 정해진 궤적을 안정적으로 잘 추종할 수 있는지 여부에 대하여 중점을 두고 12가지 작업이 수행 되었다. 그림 3.3.1.78 ~ 3.3.1.81는 이 중에서 물 마시기, 식사보조, 물건 집기(책 집기), 면도 작업에 대한 수행 결과이다.



그림 3.3.1.78 물 마시기 작업

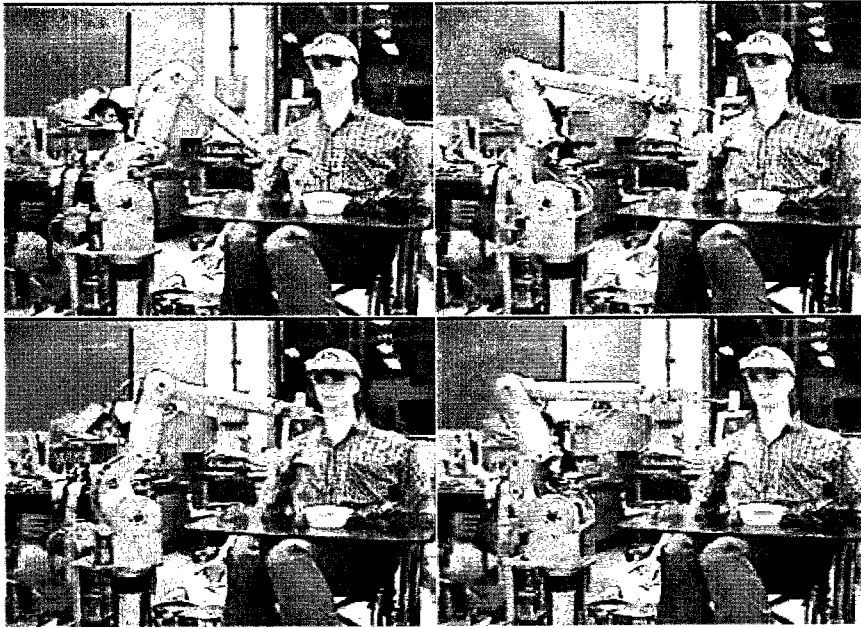


그림 3.3.1.79 식사 보조 작업

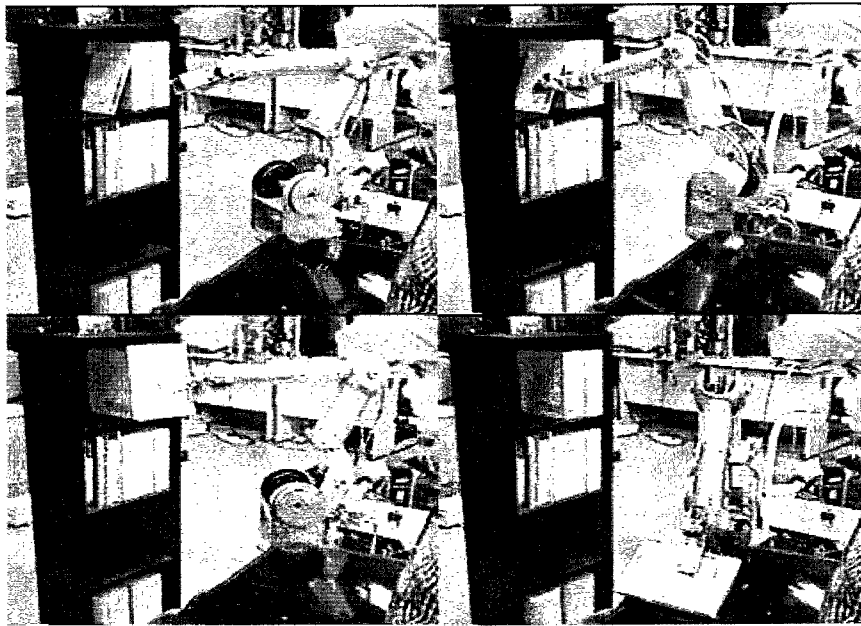


그림 3.3.1.80 물건 집기 (책 집기) 작업

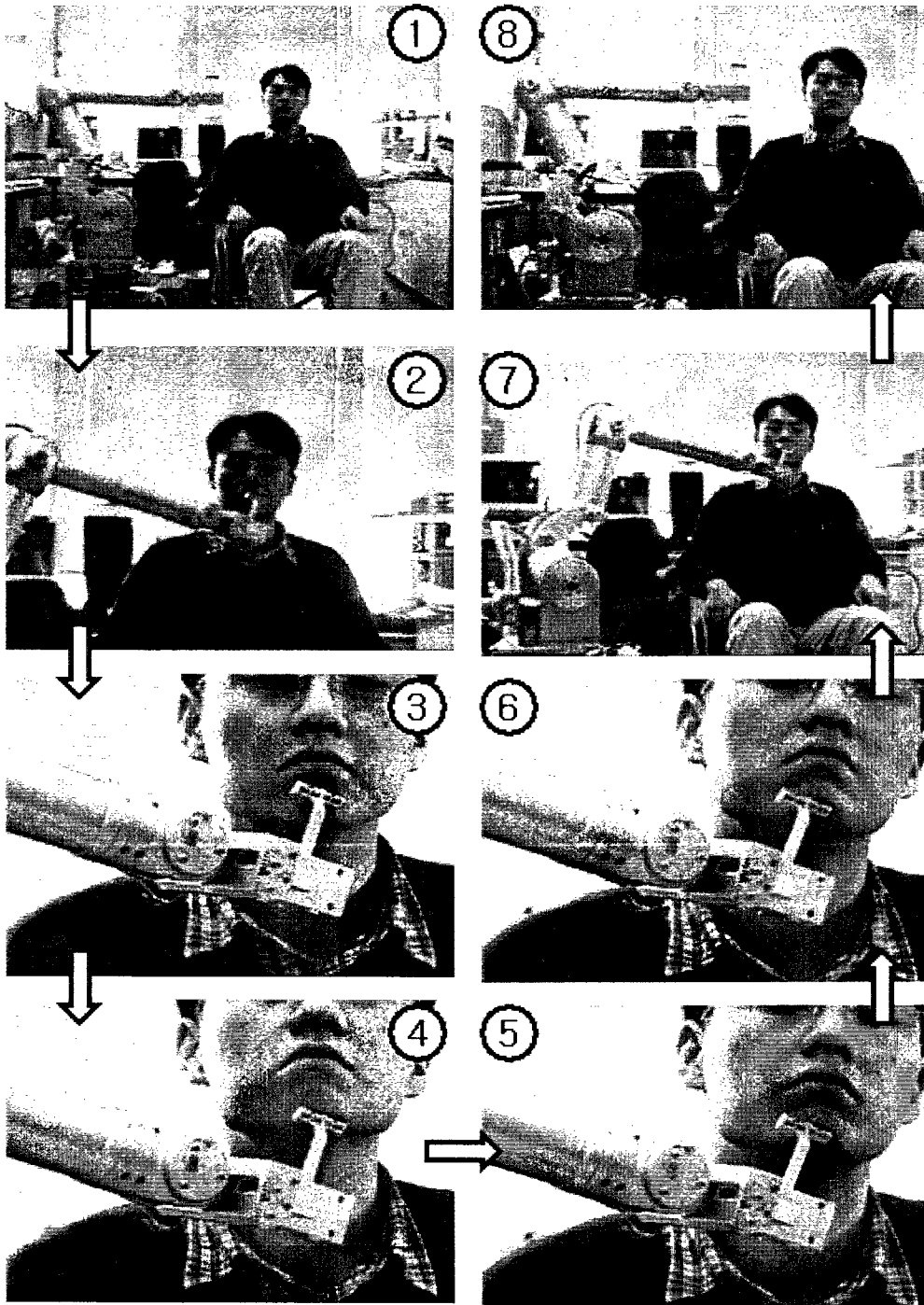


그림 3.3.1.81 면도 작업

수행결과 모든 작업이 성공적으로 수행되었으며, 특히 모든 하위 작업을 포함하고 있는 식사 보조 작업과 물 마시기 작업의 경우에 있어서도 복잡한 경로를 로봇이 무리없이 추종함을 알 수 있었다. 이는 로봇이 목표 지향 로봇 설계 방식으로 설계되었기 때문에 당연한 결과라고도 볼 수 있다.

(나) 통합된 작업 수행

하위 작업에 따른 작업 분류에 따르면, 물 마시기 작업의 경우에는 모든 하위 작업을 포함하는 작업으로서 로봇 팔 뿐만 아니라 비주얼 서보잉 등 다른 모듈들과의 통합이 잘 되었는지 여부를 테스트하는데 있어서 가장 중요한 작업이라고 할 수 있다. 즉 물 마시기 작업과 같이 복잡한 작업이 성공적으로 수행될 수 있다면, 다른 작업 역시도 수행하는데 있어서 별 무리가 없이 가능하다.

따라서 다른 모듈들과의 통합된 작업 수행은 물 마시기를 성공적으로 수행할 수 있는가를 우선 중점적으로 다루었다. 통합된 물 마시기 작업의 경우 작업 순서는 하위 작업에 따른 분석에서 이루어진 것처럼

S1(식판으로 이동)→S2(컵 근처)→S4(컵 인식)→S3(컵 집기)→S6(입 근처 이동)→S5(입 인식)→S7(입으로 접근)→S8(사람 입과 접촉)→S1(식판으로 이동)→S9(컵 놓기)→S10(초기 자세 복귀)

의 작업 순서를 가지며 그림 3.3.1.82과 같이 성공적으로 수행되었다.

그림을 설명하면, ①번 그림에서는 eye-mouse를 이용하여서 장애인이 물 마시기 작업의 메뉴를 선택하고, ②번 그림에서는 물 마시기 작업을 전달받은 로봇 팔이 식판 근처에서 물 컵의 정확한 위치를 파악하기 위하여 visual servoing을 하고 있다. ③번 그림에서는 visual servoing을 끝마친 로봇 팔이 물 컵을 잡고 있으며, ④번 그림은 물 컵을 집은 로봇 팔이 haptic-suit 로 장애인의 의지에 의하여 조정되어서 입 근처로 물 컵을 가져가는 상황이다. ⑤번은 로봇 팔이 물 컵을 장애인 입 근처로 가져갔을 때 장애인이 물을 마시는 장면이다. ⑥번은 물을 다 마신 장애인이 다시 eye-mouse를 이용하여서 물을 다 마셨다는 신호를 로봇 팔에게 보내는 장면이며, ⑦⑧번은 eye-mouse로부터 물을 다 마셨다는 신호를 받은 로봇 팔이 물 컵을 제 자리에 놓고 원래 위치로 복귀하는 모습이다.



그림 3.3.1.82 통합된 물 마시기 작업

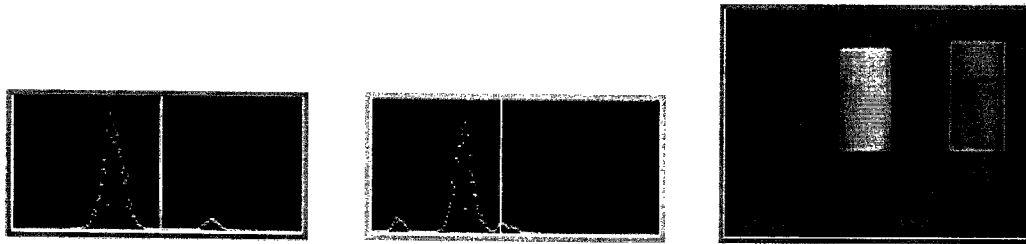
이 작업에서 로봇 팔이 비주얼 서보잉에 의하여 물 컵 등의 물체를 집게 되는데 이때, 얼마나 정확하게 물체의 위치를 파악할 수 있는가는 작업의 성패를 가르는 중요한 사항이 된다. 그래서 본 연구에서는 로봇 팔의 비주얼 서보잉 작업 동안의 물체 인식을 위해, 단일 컬러로 특징화된 작업 물체를 상정하고, 작업 성공률을 높이기 위한 강인한 영상처리 방법으로 Otsu's Method를 활용하였다[17]. Otsu's Method의 장점을 대략적으로 소개하면 다음과 같다.

- 영상 이진화를 위한 전역적인 임계치(Threshold)를 구하는 가장 효율적인 방법.
- 흑백 영상의 히스토그램 분석에 의존, 패턴 인식의 구분 지수(Discriminant Index) 관점에서 최적화된 임계치를 선정 가능.
- 계산 시간이 빠르고, 영상 크기에 크게 의존하지 않음.

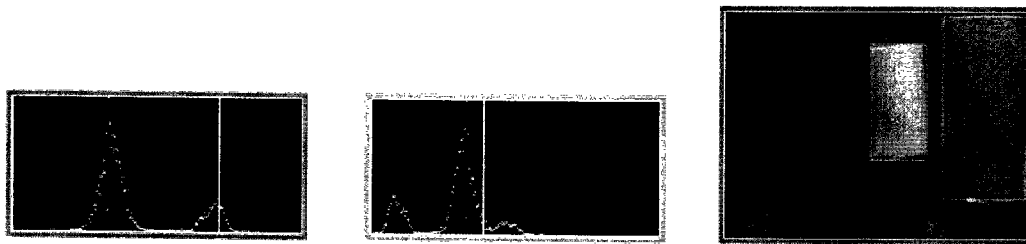
그림 3.3.1.1은 Otsu's Method를 이용한 물체 잡기 작업 동안의 영상을 보이고 있다. 맨 우측의 그림은 로봇 팔 말단부에 부착된 카메라에서 취득된 영상이며, 좌측의 두 영상은 순서대로 각각 적색, 녹색 컬러공간에 대한 히스토그램 분포와 Otsu's Method에 의해 선정된 최적 임계치를 보이고 있다. 세 가지 경우에 대해 모두 임계치의 선정이 변화되며, 물체 인식이 성공적으로 수행됨을 볼 수 있다.

기존의 Otsu's Method를 사용하지 않고 수동적으로 임계치를 정하는 경우의 작업 성공률은 실험에 의하면 약 81% 수준에 머무르고 있으며, 이 경우의 오류는 물체 외형의 불균일한 추출(물체 외형이 불균일하게 추출되면 로봇팔이 잡기 작업을 수행할 지점의 오류를 가져오게 되어 물체 잡기가 실패하는 경우가 발생함) 뿐만 아니라 로봇팔의 이동 동작 동안 변화하는 조명, 컬러공간 정보 등에 대한 임계치 자동 추출 과정이 미비한 것으로 분석되었다.

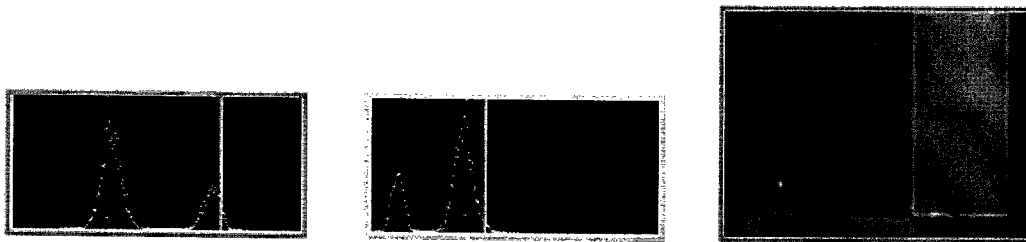
Otsu's Method를 이용한 경우 **비주얼 서보잉 작업의 성공률은 약 94%**를 달성하였으며, 작업에 있어서 오류는 물체 외형의 불균일한 추출에만 기인한다. 이 부분은 물체를 특징짓는 컬러 마커의 특수한 형태에 대한 고려를 통해 충분히 해결 가능한 것으로 예상된다.



(a) 멀리 떨어진 상태의 녹색(좌), 적색(우) 음료수 캔



(b) 적색(우) 음료수 캔을 잡기 위해서 로봇팔이 우측으로 이동



(c) 적색 음료수 캔을 잡기 직전

그림 3.3.183 Otsu's Method를 활용한 로봇팔의 음료수 캔 잡기 작업 동안의 영상

따라서 로봇은 강인한 비주얼 서보잉을 이용하여 물체를 잡는데 있어서 90%를 상회하는 높은 성공률을 보이며 작업을 수행할 수 있었으며, 또한 eye-mouse와 haptic-suit 등의 여러 가지 모듈에서 오는 입력들을 잘 받아들여서 가장 많은 하위 작업을 포함하고 있는 물 마시기 작업을 무리 없이 수행 할 수 있음이 확인되었다.

(5) 장애인들의 작업에 대한 평가

통합 작업이 수행이 되었으므로 국립 재활원에서의 임상 실험을 통하여 통합 작업에 대한 피실험자들의 평가를 얻었다. 피실험자들의 견해는 크게 3가지 정도로 분류할 수 있다.

① 일상 생활에서의 자연스러운 동작을 반영한 작업 구성.

로봇 팔이 비주얼 서보잉 기능을 통하여 음료수 캔을 집어서 피실험자의 얼굴 근처까지 가져 온 후, 햅틱수트를 이용한 능동적인 어깨 움직임으로 음료수 캔의 위치를 앞뒤로

조정하여 음료수를 마시기 편한 위치로 움직이는 행위는, 정상인들이 음료수 캔을 다루는 것과 비슷한 행위로서 피실험자들에게 거부감이 적으며, 가장 상식적인 방법이라는 것이 피실험자 뿐만 아니라 재활의학 전문의에 의해 얻어진 견해이다. 즉, 피실험자들의 경우 팔 전체를 쓰지는 못하지만, 팔과 가장 가까운 부위에 있는 자신의 어깨를 움직임으로서 로봇 팔을 움직이게 되므로 자연스러운 물 마시기 작업이 가능하다는 것이다.

② 작업 수행의 복잡성.

단순한 한가지 작업을 하기 위하여 피실험자들이 입거나 착용해야 하는 장치들의 가짓수가 많다는 점이다. 물 마시기 작업을 하기 위해서 아이마우스(eye-mouse)를 조작해야하며, 햅틱수트(haptic-suit)를 입어야 하고, 물을 다 마셨음을 로봇에게 알려주어야 한다는 점에 있어서 시스템이 복잡하며 불편하다는 의견이 있었다. 이는 전체적인 시스템의 관점에서 고려가 필요한 부분으로서 차후에 연구를 통하여 해결해 나갈 수 있는 내용이다.

③ 간병인 대체보다는 보조 매체로서의 활용.

통합 작업을 수행하면서, 얻은 견해의 대부분이 시스템의 가격이 전반적으로 감당하기 힘들고 기존의 간병인에 의한 역할을 완전히 대체하기에는 현 기술 수준으로 부족한 점이 많고, 본인이 충분히 할 수 있는 부분까지 대체하는 것은 오히려 생활의 질이 저하될 수도 있다는 점을 우려하는 것으로 파악되었다. 따라서, 개발될 시스템은 간병인 대체의 목적보다는 제 2의 간병인 형태로써, 단순 반복 작업이나 정밀도, 육체적/정신적 피로를 요구하는 작업을 보조하는 보조기구로서의 역할이 타당한 것으로 파악되었다.

통합 작업과 직접적으로 연관되지는 않지만, 전체 시스템에 관한 의견은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 좀 더 인간 친화적인 느낌이 드는 외관으로 만드는 것이 필요함.
- 시스템 단가를 낮추기 위하여, 전체 시스템의 제품화 이외에도 각 세부 시스템(각종 인간-로봇 상호작용 장치)에 대한 제품화가 우선적으로 수행되어야 할 것임.
- 첨단 기술 위주의 시스템보다는, 실용적이고 사용 가능성이 빈번한 시스템 위주로 제품화를 우선적으로 수행하는 것이 좋을 것임

이와 같은 장애인들의 시스템에 대한 평가는 차후에 개선이 가능한 사항들이며, 앞으로 시스템을 발전시켜나가는데 있어서 중요한 지표가 될 수 있다.

(6) 현재의 기술로 추가로 수행 가능한 작업 조사

현재까지 목표로 한 작업은 총 12가지로서, 장애인들이 일상 생활을 하는데 있어서 없어서는 안 되는 꼭 필요한 작업들로 구성되어 있다. 그러나 이들 작업만큼 중요성을 가지지

않을 수는 있으나, 현재 구현된 로봇 팔을 이용하여 추후에 더 추가 할 수 있을 만한 작업을 조사하였다. 이는 현재의 연구에서는 구현을 목표로 하고 있지는 않다. 그러나, 앞으로 이 연구 이후에 계속 될 수 있는 장애인을 보조하는 시스템을 위한 연구들에서 구현을 목표로 해 볼 수 있을 만한 작업들이다.

어떤 작업을 추가로 구현하는 것이 가능 할 것인지를 판단하기 위해서는 우선 현재 설계 되어있는 로봇 팔에 관한 자세한 정보가 있어야 한다. 로봇 팔과 장애인과의 관계는 크게 다음과 같은 네 가지의 특징을 가지고 있다.

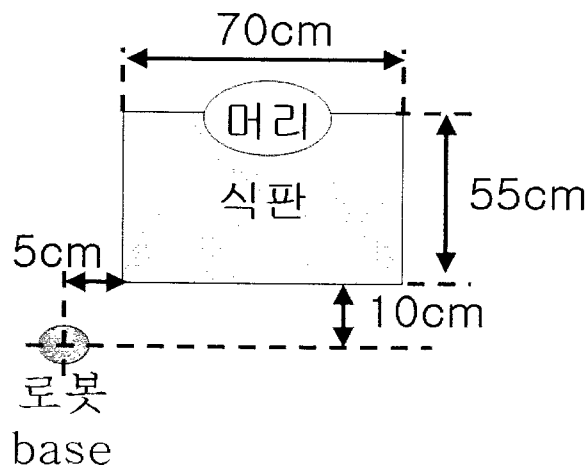


그림 3.3.1.84 로봇 base 와 장애인의 위치 관계

- ① 로봇 팔은 그림 3.3.1.84와 같이 장애인이 휠체어에 식판을 올려놓고 앉았다고 하였을 경우 식판으로부터 우측으로 5cm, 전면으로 10cm 떨어진 위치에 베이스(base)가 존재하며, 지면으로부터는 70cm 높이에 위치한다.
- ② 로봇 팔의 각축의 길이는 그림 3.3.1.85와 같다.

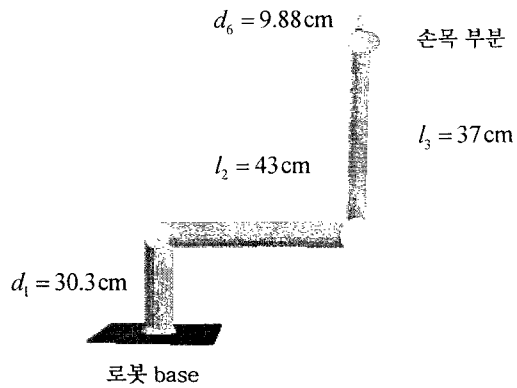


그림 3.3.1.85 완성된 로봇 팔의 길이

③ 장애인의 평균적인 신체 사이즈는 그림 3.3.1.86과 같다.

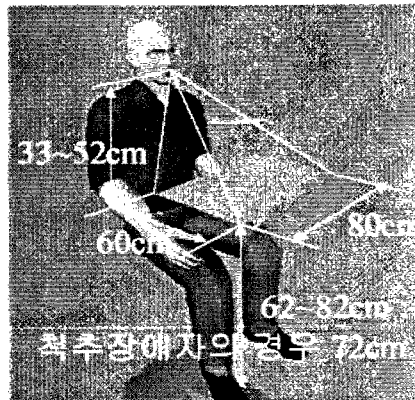


그림 3.3.1.86 장애인의 평균적인 신체 조건

④ 마지막으로 로봇 팔은 목표 지향 로봇 설계 방법에 의해서 설계되었으며, 설계 당시에 식판 및 장애인의 얼굴 부분은 모두 접근이 가능하도록 경로 점으로서 설정되었다.

따라서 이와 같은 구조를 가진 로봇 팔은 장애인의 얼굴 부위와 식판 근처의 장애인 상반신 모두에 접근이 가능한 구조를 가졌다.

개발된 로봇 팔이 그 이외에 가지고 있는 특징으로는

⑤ 컴플라이언스 제어가 가능하다.

⑥ 2kg정도의 가반 하중을 견딜 수 있다.

등이 있다.

따라서 이와 같은 로봇 팔과 장애인과의 관계와 로봇 팔의 기능으로부터 다음과 같은 추가적인 작업을 수행하는 것이 가능하리라는 예상을 할 수 있다.

- 장애인 상반신의 마사지 : 이 작업은 로봇 팔이 컴플라이언스 제어가 가능하며, 척수 장애인의 경우에는 근육을 제대로 쓰지 못함으로 인한, 근육이 뭉치는 현상이 발생 할 수 있으므로 유용한 작업이 될 수 있다.
- 이 닦기 : 이 작업은 식사 보조 작업과 유사한 작업으로서, 로봇 팔이 장애인 얼굴 근처로 전동 칫솔을 가져간다면 현재의 로봇 시스템의 연구로도 앞으로 적용해 볼 수 있는 작업이다.
- 전화(핸드폰) 가져다 주기: 장애인들은 집안에 있는 경우가 많으므로, 컴퓨터 이외에 외부와 접촉할 수 있는 몇 가지 안되는 방법중의 하나가 전화이다. 실제로 많은 장애인들이 전화를 이용하고 있으나, 주변에서 누군가가 도와주지 않는다면 전화를 받을 수 없는 경우가 많이 있다. 이 역시 물건 집기와 비슷한 작업으로서 현재의 로봇 팔로서 가능하리라 생각되는 작업이다.
- 물감 집어다 주기: 장애인들은 부자유스런 몸으로 인해서 할 수 있는 일들이 제한되어 있다. 그래서 많은 수의 장애인들이 구족 화가로서 활동하는 경우가 있다. 이 때 물감이나 붓을 집어서 입에 물려 줄 수 있도록 하는 것은 장애인들의 사회 활동을 도와주는 것으로서 현재 로봇 팔이 목표로 하고 있는 물건 집기 와 유사한 작업이다.
- 식판 위의 물건 치우기: 이는 식사 보조 작업과 비슷한 작업으로서 장애인이 휠체어에 앉아있을 때, 식판 위에 원치 않는 물건 (식사가 끝난 후의 지저분한 식기) 등이 존재할 경우 장애인들은 불편감을 느끼게 된다. 따라서 가벼운 식기 등을 식판에서 다른 곳으로 옮겨서 치워 줄 수 있는 물건을 치우는 작업 역시도 구현을 생각해 볼 수 있는 작업이다.

이와 같이 현재 로봇 팔이 수행하고 있는 작업을 바탕으로 하여서, 추후에 구현을 해 볼 수 있을 만한 작업으로서 다섯 가지 작업을 선정하였다. 이는 **지금 현재로서는 구현을 목표로 하고 있지는 않으나, 개발된 로봇 팔이 얼마든지 수행 할 수 있는 작업들이며, 앞으로 장애인을 위한 다른 연구들에서 충분히 목표로 삼을 수 있는 작업들이다.**

2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

가. 주위환경에 적응하며 인간 친화적인 Visual Servoing 기술

(1) Space Variant Vision과 Fuzzy Decision Maker을 이용한 인간 친화적인 Intelligent Visual Servoing 구현

로봇 팔의 정의된 12가지 작업에 대한 분석을 통하여 Visual Servoing 기술을 적용할 수 있는 핵심적인 시나리오로 “로봇 팔이 사용자의 입 근처로 접근하는 작업”을 선정하였다. 비전 센서를 이용한 로봇 팔의 자율제어 및 사용자 의도파악을 통하여 사용자에게 사용의 편의성 및 안전성을 제공하고, 이를 바탕으로 인간 친화적인 인간-로봇 상호작용이 가능하도록 구현하였다(그림 3.3.2.1).

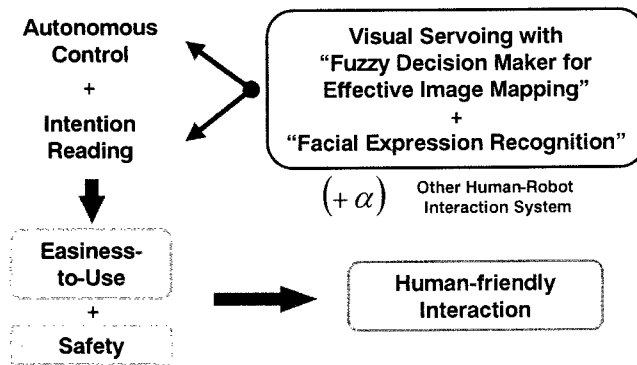


그림 3.3.2.1. 인간 친화적인 지능형 비주얼 서보잉의 개념도.

Real-time Visual Processing을 포함하는 효율적인 시각 처리를 위해 Space Variant Vision 기술을 적용하였으며, 효율적인 영상 매핑을 위하여 Fuzzy Decision Maker를 제안하였다. 기존의 Log-polar Mapping (LPM)[31], 카메라에서 가까운 목표물을 다루기 위해 새롭게 제안된 Modified Log-polar Mapping (MLPM)[5], 그리고 단순히 영상의 크기를 줄이는 Uniformly Subsampled Mapping (USM)을 상황에 맞게 효율적으로 적용하는데 Fuzzy Decision Maker는 중요한 역할을 한다(각 매핑의 특징은 표 3.3.2.1 참고. LPM 및 MLPM 영상은 그림 3.3.2.2 참고). LPM와 MLPM은 Space Variant Vision의 한 방식으로 인간의 눈의 광수용기(Photoreceptor) 분포와 비슷하다는 특징을 가진다. 즉, LPM은 인간의 망막의 Cones의 분포에 대응하며 MLPM은 인간의 망막의 Rods의 분포에 대응된다(그림 3.3.2.3)[32].

표 3.3.2.1. Log-polar Mapping (LPM), Modified Log-polar Mapping (MLPM), Uniformly Subsampled Mapping (USM)의 특징 비교

매핑	LPM $(x, y) \rightarrow (\xi, \eta)$	MLPM $(x, y) \rightarrow (\xi, \hat{\eta})$	USM $(x, y) \rightarrow (\hat{x}, \hat{y})$
수식	<ul style="list-style-type: none"> Central Region, $0 \leq \rho < \rho_{fb}$ $\xi = c \cdot \rho$, Peripheral Region, $\rho_{fb} \leq \rho \leq \rho_{max}$ $\xi = \log_a(\rho/\rho_0)$, $\eta = \theta$	<ul style="list-style-type: none"> Central Region, $0 \leq \rho < (\rho_{max} - \rho_{fb})$ $\xi = \xi_{max} - \log_a((\rho_{max} - \rho)/\rho_0)$, Peripheral Region, $(\rho_{max} - \rho_{fb}) \leq \rho \leq \rho_{max}$ $\xi = \xi_{max} - c \cdot (\rho_{max} - \rho)$, $\eta = \theta$	$\hat{x} = c_x \cdot x$ $\hat{y} = c_y \cdot y$
샘플링	Non-uniform Sampling	Non-uniform Sampling	Uniform Sampling
좌표계시스템	Polar Coordinate	Polar Coordinate	Cartesian Coordinate
고해상도 영역	Central Region	Periphery	None
비고	카메라에 대한 목표물의 Scaling & Rotational 운동 표현에 유리함.	매우 근접한 목표물을 상대적으로 쉽게 다룰 수 있음. 카메라에 대한 목표물의 Scaling & Rotational 운동 표현에 유리함.	카메라에 대한 목표물의 병진 운동 표현에 유리함. 발견되지 않은 목표물을 찾을 때 유리함.

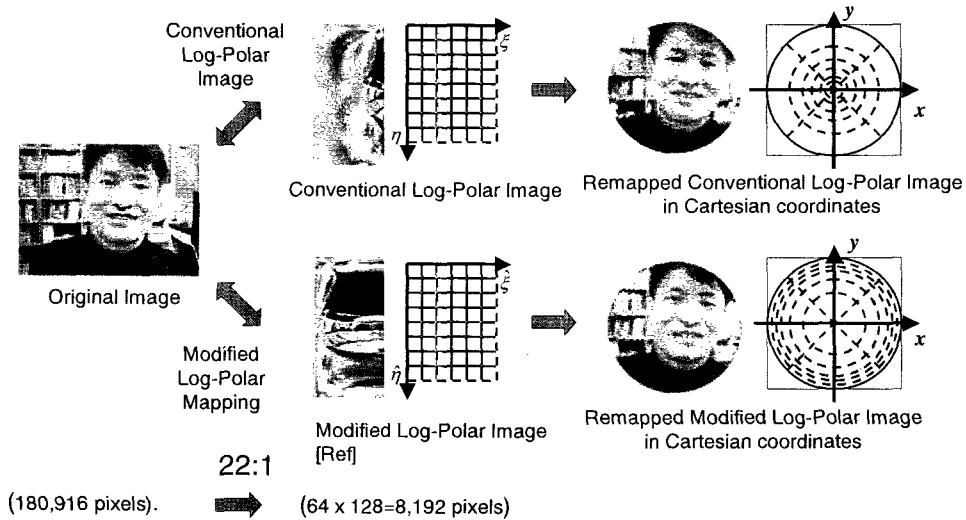


그림 3.3.2.2. 기존의 Log-polar Mapping과 Modified Log-polar Mapping.

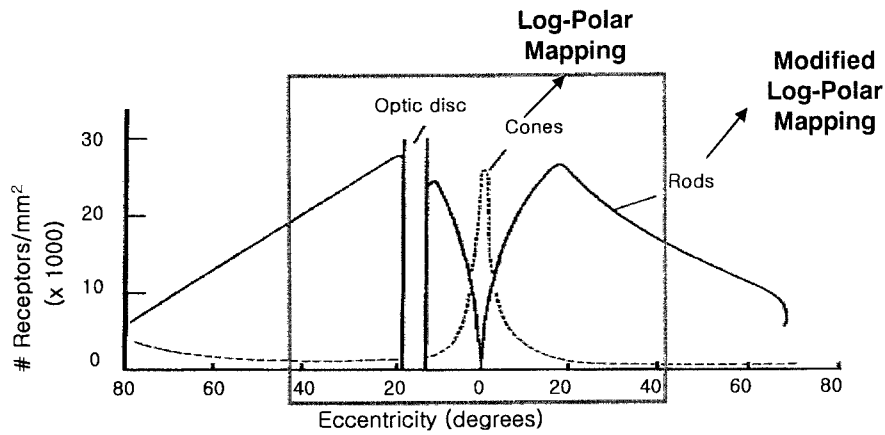


그림 3.3.2.3. 포비아를 지나는 수평선상의 Rods, Cones의 분포[32]

성공적인 Visual Servoing을 위해서는 Robot Control, Visual Processing, Decision Making의 세 모듈의 조화가 필요하여 Decision Making Unit을 통해서 효율적인 Visual Processing이 가능하도록 하였다(그림 3.3.2.4).

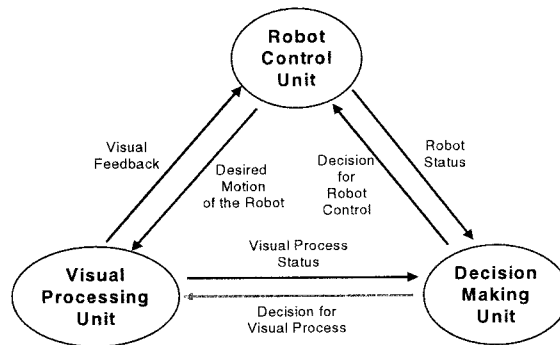


그림 3.3.2.4. 성공적인 Visual Servoing을 위해서는 Robot Control, Visual Processing, Decision Making의 세 모듈의 조화가 필요함.

Fuzzy Decision Maker를 통한 Visual Servoing 기법을 정의된 시나리오인 입 근처로 로봇 팔이 접근하는 작업에 적용하였다. Visual Servoing을 위한 Testbed는 본 연구의 1 단계, 2차년도에 이미 구축된 PowerCube 로봇 팔 시스템 및 구현된 Eye-in-hand용 카메라 헤드, 2대의 PC로 구성된다(그림 3.3.2.5). Visual Servoing를 위한 Vision PC와 Robot Control을 위한 Robot PC는 TCP/IP를 이용하여 연결되고 각 PC의 프로그램은 Window

에서 Multi-threads Programming 기법을 사용하여 구현하였다(그림 3.3.2.6).

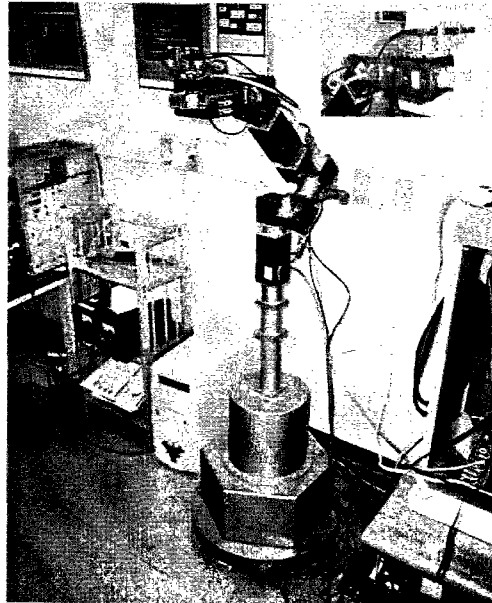


그림 3.3.2.5. 비주얼 서보잉을 위한 Testbed.

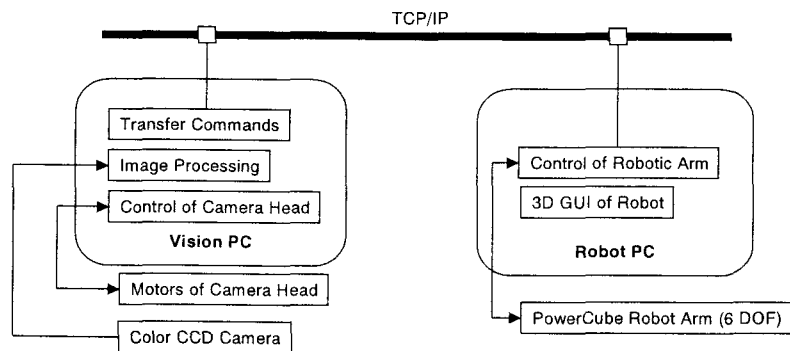


그림 3.3.2.6. 구현된 Visual Servoing System의 블록도.

Eye-in-hand Camera Configuration에서 Vergence Movements가 가능한 카메라 헤드에 장착된 두 개의 카메라의 영상과 로봇 End-effector사이의 관계에 대하여 Image Jacobian을 유도하고, 실제 로봇의 제어는 Image-based Visual Servoing 방법을 적용하였다[5]. 얼굴에 로봇 팔이 접근하는 작업을 위해서 다음과 같은 가정을 설정하였다.

- 1) 로봇 팔은 6 DOF이지만 2 DOF은 컵과 같은 로봇이 잡고 있는 물체의 방위를 유지하기 위해서 사용되므로 2 DOF를 제외한 4 DOF만 주로 제어됨.
- 2) Foreground Color는 Background Color에 비하여 다른 Color를 가짐.
- 3) 카메라 앞에는 장애물이 없어서 두 카메라는 비슷한 영상을 얻을 수 있음.
- 4) 로봇 팔은 Singular Points가 없는 Workspace에서 움직임.

입 근처에 로봇이 접근하는 작업은 다음과 같은 5단계로 분류하였다.

- 1) 로봇 팔의 Prepositioning. 2) 목표물의 Detecting. 3) 목표물에 대한 접근. 4) 목표물의 Tracking. 5) 로봇 팔의 Parking.

이 중에서 2), 3), 4) 단계에서 Visual Processing이 주로 필요하다. 입 근처로 로봇 팔이 접근했을 때 입의 벌림 정도를 입술 Color와 무게 중심 및 입술 모양 정보를 이용하여 간단한 긍정/부정의 사용자 의도 파악 기능을 구현하였다[5].

Fuzzy Decision Maker를 이용한 Visual Servoing 기법을 이용하여 입 근처로 로봇 팔이 접근하는 작업을 구현하였다(그림 3.3.2.7). Fuzzy Decision Maker를 위한 구체적인 Task의 분석 및 시뮬레이션을 통하여 표 3.3.2.2과 같은 퍼지 규칙을 얻었다¹¹⁾.

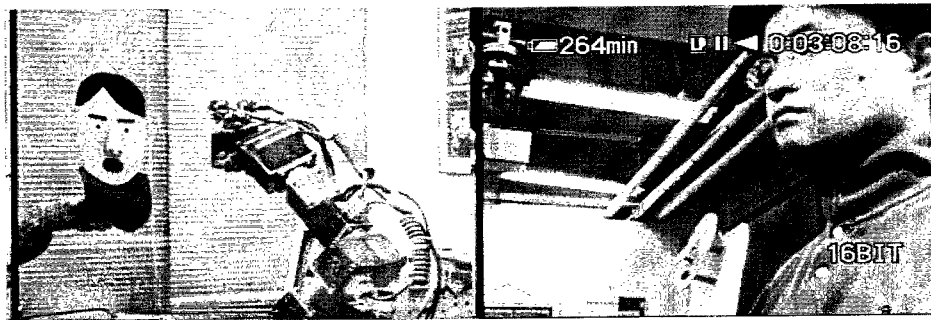


그림 3.3.2.7. 입 근처로 접근하는 실험 모습.

11) 전건부의 빈칸은 don't care condition을 의미함. 예를 들어 목표물의 Depth가 Small이고, 목표물의 Motion이 Large이고 목표물의 Detection Level이 크면 (확실하게 Detect되었으면), 적절한 Mapping은 Modified Log-polar Mapping임을 의미함.

표 3.3.2.2. Fuzzy Decision Maker를 위한 규칙.

"if" part			"then" part
Depth	Motion	Detection Level	Mapping
Small	Large	Large	MLPM
Small	Medium	Large	MLPM
Small	Small	Large	MLPM
Medium		Large	LPM
Large		Large	LPM
Small	Large	Medium	MLPM
Small	Medium	Medium	MLPM
Small	Small	Medium	LPM
Medium		Medium	LPM
Large		Medium	USM
		Small	USM

목표물의 Detecting을 위해, HLS (Hue, Lightness, Saturation) Color 모델의 정보를 이용하여 Color Mark가 부착된 물체를 찾고 카메라 헤드의 Vergence Movements를 통한 물체의 Depth 정보를 획득하였다. 목표물에 대한 접근을 위해서, 피부 영역을 추출했을 때 무게 중심에 의한 Point Feature 및 Image Jacobian을 이용하여 Image-based Visual Servoing을 통해 로봇의 3D 위치 제어를 수행하였다. 최종적으로, 목표물의 Tracking을 위해서는 목표물이 카메라에 충분히 가까울 때는 Optical Flow정보를 이용하여 물체의 움직임을 추정하였다.

Fuzzy Decision Maker의 전건부 조건(IF condition)은 (1) Horn의 Optical Flow[33]를 이용한 카메라에 대한 물체의 Velocity (그림 3.3.2.8), (2) 전체 영상면적에서 살색 Color 면적의 비를 이용한 얼굴의 Detection Level (=얼굴영상면적/전체영상면적), (3) Vergence Movements를 통한 초기 Depth 정보를 기준으로 로봇 팔의 이동치를 이용하여 추정된 물체의 Depth가 사용되었으며 후건부 조건(THEN condition)은 MLPM, LPM, USM의 세 종류의 매핑이 사용되었다(퍼지소속함수는 그림 3.3.2.9 참고).

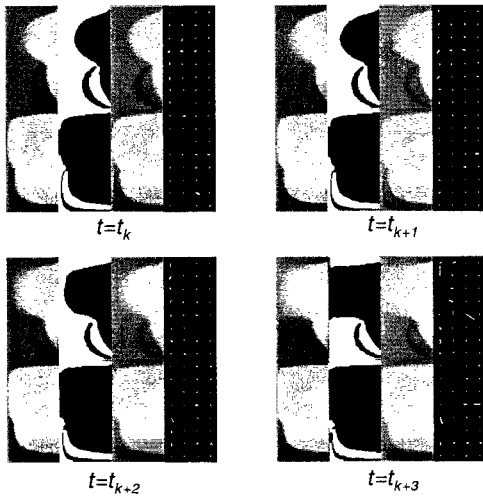


그림 3.3.2.8. LPM 및 MLPM 영상에서의 Optical Flow.

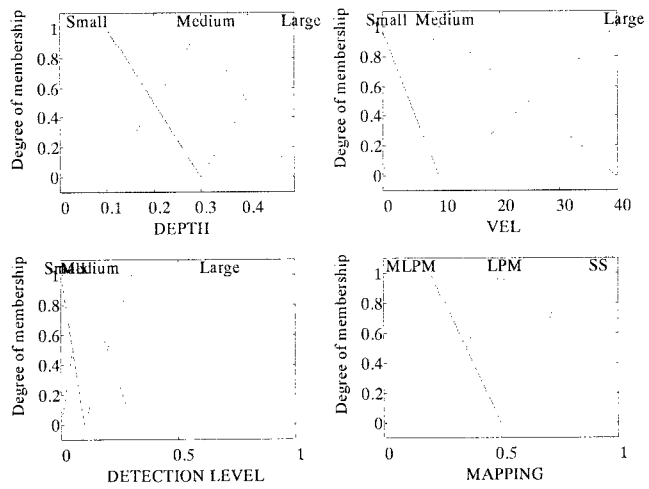


그림 3.3.2.9. 적절한 영상 매핑을 얻기 위한 퍼지 Decision Maker의 퍼지소속함수.

이렇게 구성된 Fuzzy Decision Maker를 사용하여 접근 및 추적 작업을 성공적으로 수행하였다(접근 및 추적 작업을 수행하는 동안의 Image Feature의 움직임은 그림 3.3.2.10 참고, 퍼지 Decision Maker의 입출력은 그림 3.3.2.11 참고). 가까운 물체에 대하여 MLPM 영상은 LPM 영상에 비하여 정확한 정보를 제공하였으며 Centering 작업(그림 3.3.2.12)에서 $\pm 10\text{mm}$ ($=\pm 10$ pixel)이하의 오차를 가지는 것으로 나타났다. 영상처리에서는 Double Buffering, LPM/MLPM에 의한 영상 축소 과정으로 통해 실시간 Visual Processing(>15 Frames/sec)을 구현하였다. Cartesian 영상과의 처리 속도 비교 결과를 표 3.3.2.DJ03로 첨부하였다¹²⁾. 영상 처리 속도는 주로 영상의 크기에 비례하며 RGB에서 HLS로의 Color Space Conversion에서 많은 계산이 필요한 것으로 밝혀졌다.

12) Asynchronous grabbing (Double buffering) 방식이 사용됨. 위 표에서 표기된 Frame Rate은 전 단계의 처리 시간을 포함함.

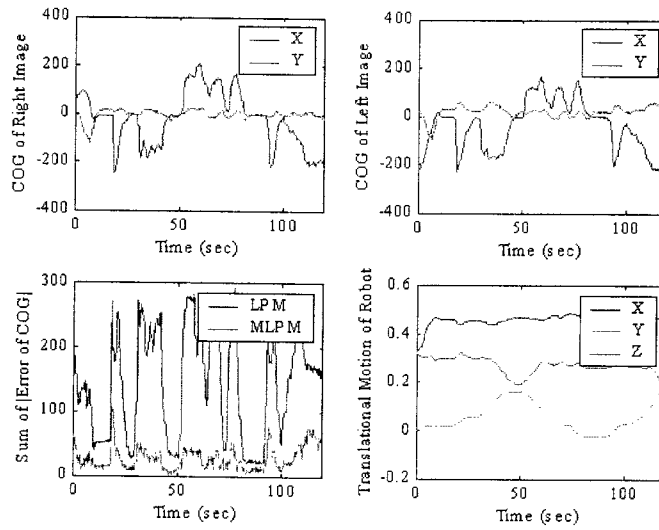


그림 3.3.2.10. Visual Servoing을 이용한 접근 및 추적에 대한 실험결과. 매우 가까이 있는 물체가 움직일 때는 MLP M 영상을 이용한 정보가 LPM을 이용한 영상의 정보 보다 더 정확함을 알수 있음.

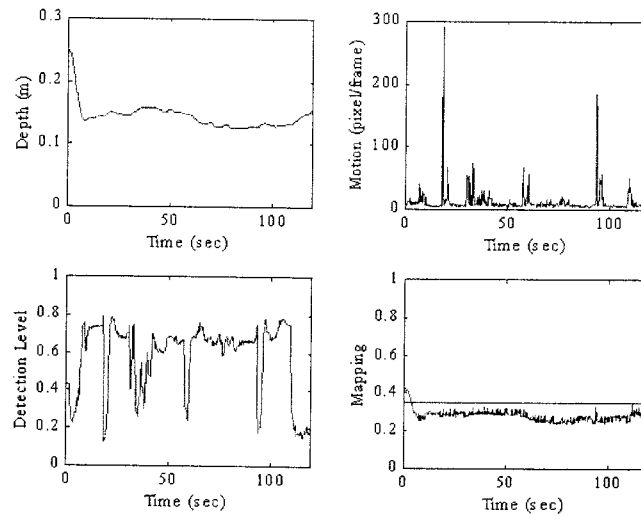


그림 3.3.2.11. Visual Servoing을 이용한 접근 및 추적에 대한 실험에서의 퍼지 Decision Maker의 입출력 결과.

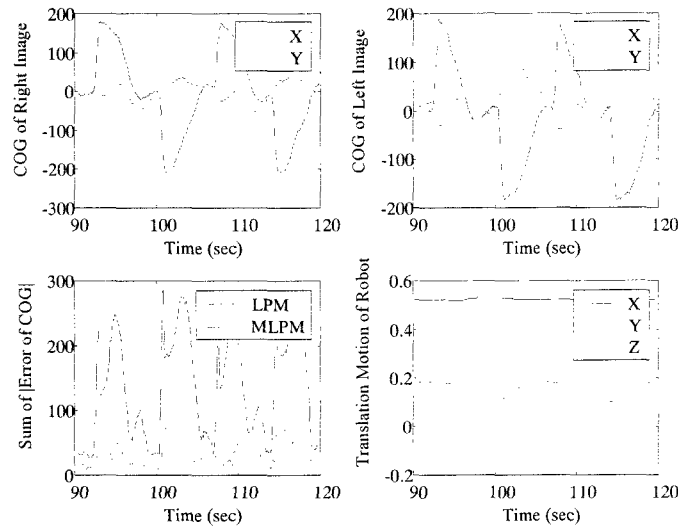


그림 3.3.2.12. 입에 대한 Centering 실험 결과.

표 3.3.2.3. Visual Servoing을 위한 영상 처리 속도 비교 (단위: Frames/초).

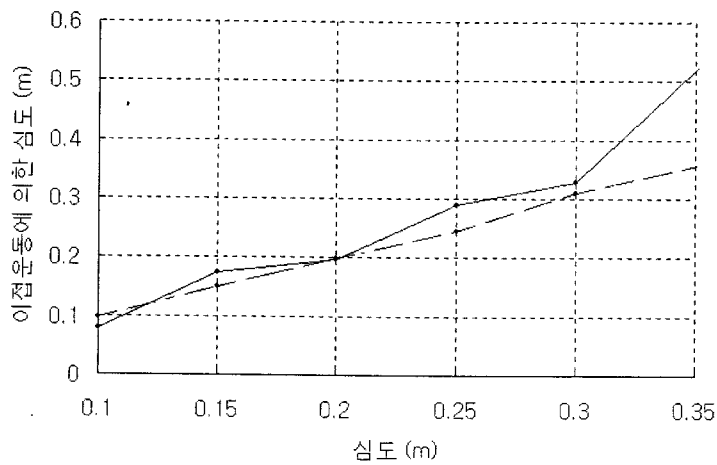
Processing		640×480 Cartesian Images	320×240 Cartesian Images	64×128×2 Space Variant Images
Genesis (C80, NOA)	Image Mapping using LUT	N/A	N/A	30.0
	Color Conversion	15.1	30.0	20.0
	Binarization with Morphological Operation	11.0	20.0	20.0
PC (PIII-850)	Extraction COG	8.7	20.0	18.0
	Normalized Correlation	4.3	16.2	17.0
	Optical Flow	1.8	13.0	17.0

Modified Log-polar Mapping(MLPM)은 주로 가까이 위치한 물체를 다루는 데 유용하며 특히 Fuzzy Decision Maker를 통해서 LPM 및 MLPM영상의 가중치를 정함으로써 효율적인 비주얼 서보잉 기능을 구현할 수 있다. 하지만, 목표물이 멀리 있을 경우에는 MLPM영상 정보만을 이용할 경우에는 로봇 제어를 안전하게 수행하기 힘들다. LPM과 MLPM을 이용한 Chattering문제는 Fuzzy Decision Maker를 도입함으로써 대폭 줄일 수 있었다. 입 근처로 접근했을 때 입의 벌림 정도를 이용한 간단한 사용자 의도 파악 기능은 Space Variant Image에서의 입술의 HLS 모델에서 입술의 무게 중심을 찾고 Cartesian 영상에서 입술의 벌림 정도를 추정하는 과정을 통해 구현하였다.

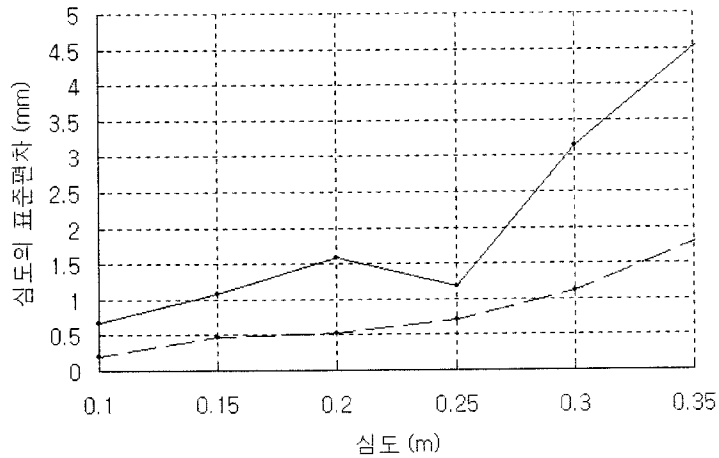
(2) 상품성 있는 소형/경량의 스테레오 카메라 헤드 구현

2차년도에 제작된 1차 시제품의 문제점 분석을 통해 다음과 같은 문제점들과 해결 방안을 마련하였다[34].

1) 케이블 장력이 약한 경우 동력전달과정에서 백래시로 작용하여 제어오차가 발생하므로 장력조절장치가 필요하다. 1차 시제품의 경우에는 장력 조절을 위해서 케이블의 길이를 정확하게 조절해야 하므로 정비성이 떨어지므로 2차 시제품의 경우 카메라쪽의 폴리를 두 개로 분리하여 장력을 조절할 수 있도록 하였다. 장력에 변화를 주고 이접운동을 통해 대상물체의 심도추출 실험(그림 3.3.2.13)을 수행한 결과, 적절한 장력 조절을 통해 심도추출의 정확성을 확보하였다.



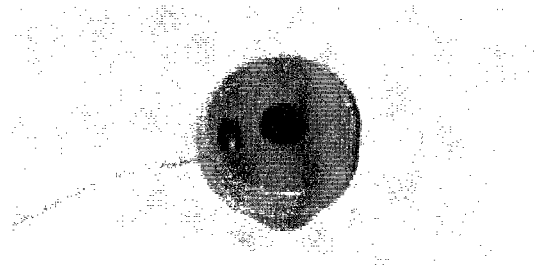
(a) 장력변화에 따른 심도추출에서의 심도 평균값



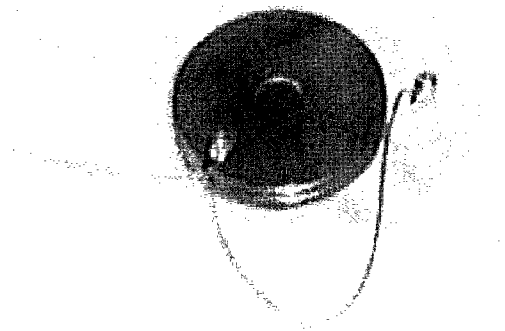
(b) 장력변화에 따른 심도추출에서의 표준편차

그림 3.3.2.13. 장력변화에 따른 심도추출 결과

2) 1차 시제품의 경우 폴리에 세트스크류를 이용하여 케이블을 고정하는 방식(그림 3.3.2.14(a))을 사용함으로써, 케이블의 내구성 뿐만 아니라 정비성도 떨어진다. 이것을 보완하기 위해, 2차 시제품의 경우 케이블 끝에 작은 금속을 고정하고 이를 폴리에 만들어진 홈에 고정하는 방식으로 케이블을 고정(그림 3.3.2.14(b))하였다. 케이블 고정방식의 변화 및 장력조절 장치의 이용을 통해 정비성 향상 및 카메라 헤드의 내구성 향상 등 기존의 세트스크류 방식의 단점(고정부에서 케이블이 끊어지는 현상, 케이블의 끊어짐으로 인해 카메라 헤드 전체의 내구성 저하 현상)을 해결하였다.



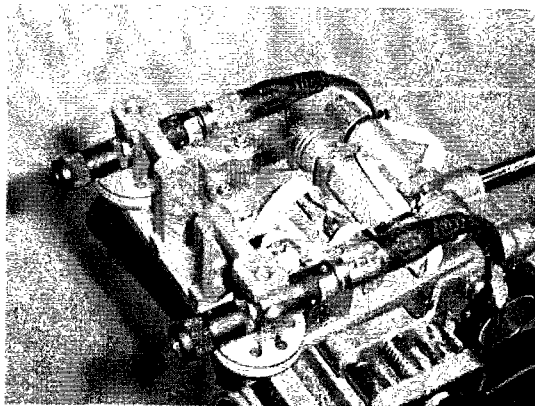
(a) 1차 시제품에서의 케이블 고정 방식



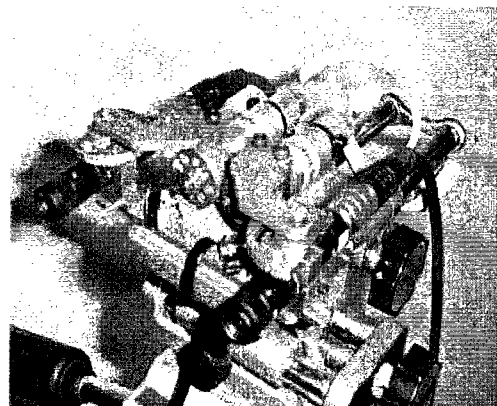
(b) 개선된 케이블 고정 방식

그림 3.3.2.14. 케이블 고정 방식의 변화

3) 1차 시제품에 비해 소형화/경량화 구현을 위해 모터와 카메라의 효과적인 배치를 통한 소형화/경량화를 구현하였다(표 3.3.2.04, 그림 3.3.2.15(b)).



(a) 1차 시제품



(b) 개선된 형태의 카메라 헤드

그림 3.3.2.15. 모터와 카메라 배치를 통한 카메라 헤드의 소형화/경량화 구현

표 3.3.2.04. 카메라 헤드 2차 시제품의 사양

카메라 헤드 2차 시제품 사양	
구동구조	케이블을 이용한 텐던 구동구조
크기	110mm(W) x 110mm(L) x 35mm(H)
바닥에서 카메라까지 높이	15mm
중량	177 g(모터 및 카메라 중량 포함)
이접운동 가능범위	-30~60 deg
이접운동 최대속도	180 deg
이접운동 분해도	0.0229 deg
모터 사양	
제품번호 및 제조사	1319-006S (1.5 Watt) / Faulhaber 사
최대속도	16300 rpm(무부하 속도)
중량	45 g
카메라 사양	
제품번호 및 제조사	JAI CV-M2350 (D=12mm) / JAI 사
중량	12 g

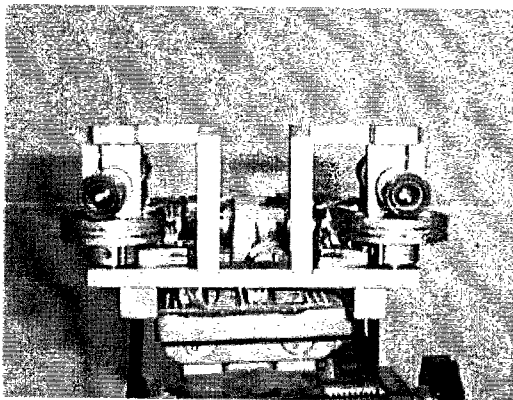
표 3.3.2.05는 1차 시제품과 2차 시제품간의 비교 결과를 보여 준다. 그림 3.3.2.16은 각 시제품간의 외형 비교를 위한 그림을 나타내고 있다. 개략적으로, 카메라 헤드의 높이가 감소하였으며(75mm → 35mm), 바닥면에서 카메라까지의 높이가 감소하였다. (35mm → 15mm) 목표물에 가까이 접근하였을 때도 틸트구동 없이 충분한 시야를 확보할 수 있게 되었으며, 중량이 60%로 감소하였다. (284g → 177g)

카메라 헤드의 내구성(연속 동작, 진동)은 1차 버전 대비 2배 향상이 되었다. 1차 시제품의 경우 2시간 이상의 연속동작을 보장하지 못하는 것에 비해, 2차 시제품은 케이블 고정 방식의 변화를 통해 연속동작에 있어서 10시간 이상의 내구성을 보장한다. 또한, 장력조절이 가능함에 따라 장력변화로 인한 진동현상이 사라졌다.

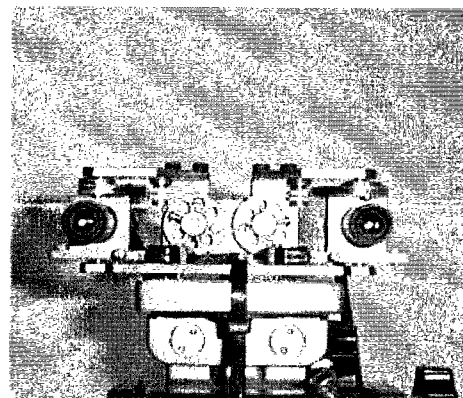
2차 시제품은 1차 시제품에 비하여, 그리퍼 형태를 고려한 새로운 형태의 카메라 헤드 구현 가능성을 확인하는 계기를 마련하였다. 텐던 구동구조를 이용함으로써 동력의 전달 방향을 쉽게 변화시킬 수 있으며 동력전달 방향의 자유로운 변화를 이용하여 그리퍼 형태에 맞게 카메라 및 모터를 배치할 수 있었다.

표 3.3.2.5. 제작된 카메라 헤드의 사양비교

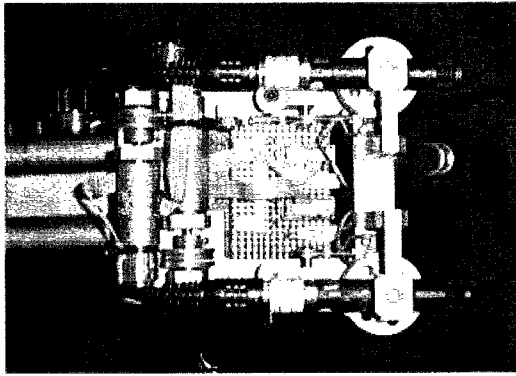
사양		1차 제작품	2차 제작품
구동구조		텐던 구동구조	텐던 구동구조
크기	폭(mm)	110	110
	길이(mm)	135	110
	높이(mm)	57	35
카메라까지 높이		35	15
중량(g)		284	177
이접운동 가능범위		-30 ~ 45 deg	-30 ~ 60 deg
이접운동 최대속도		180 deg/sec	
이접운동 분해도		0.0229 deg	
모터제품번호		1319-006S (1.5 Watt) / Faulhaber 사	
모터 최대속도		16300 rpm (무부하 속도)	
모터 중량		45 g	
카메라 제품번호		JAI CV-M2350 (D=12mm) / JAI 사	
카메라 중량		12 g	
특징			케이블 장력 조절 가능 케이블 고정방법 개선



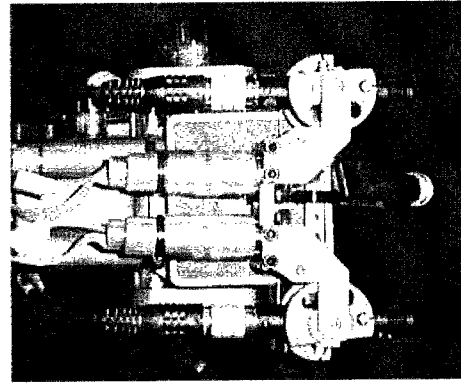
(a) 1차 제작품(정면)



(b) 2차 제작품(정면)



(c) 1차 제작품



(d) 2차 제작품

그림 3.3.2.16. 카메라헤드의 크기 비교

여기서 제작된 카메라 헤드를 제어하기 위해서는 RS232 시리얼 통신을 기반으로 하는 제어 시스템을 구축하였다. 이를 위해서 Minimotor사의 MCDC2805 모델을 사용하였다(그림 3.3.2.17 참조)



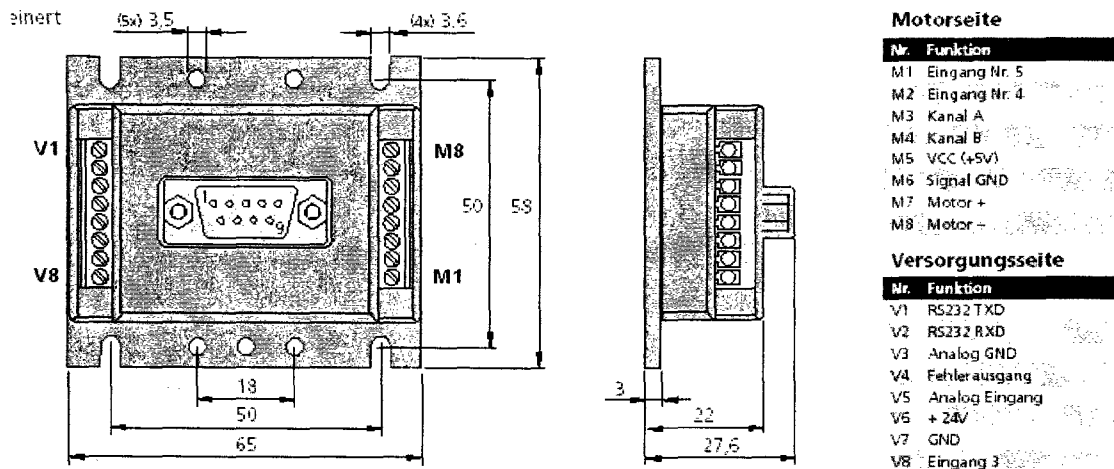


그림 3.3.2.17. Serial motion controller MCDC2805

카메라 헤드 제어를 위해서는 두개의 모터를 독립적으로 제어해야 하므로, 제작된 카메라 헤드와 제어기를 함께 상품화 하기 위해서는 이를 같이 제어할 수 있는 케이스를 포함한 모듈로 제작이 되어야 한다. 그리고, 주어진 모션 제어기를 두개 이상 쓰기 위해서 멀티 플렉서 보드(Multiplexer board)를 사용하여 프로그램을 통해 선택적으로 모터를 제어할 수 있도록 하였다. 그림 3.3.1.18는 케이스를 제외한 모션 제어기 부분의 내부 실장 모습이며 입출력 단자를 보여주고 있다.

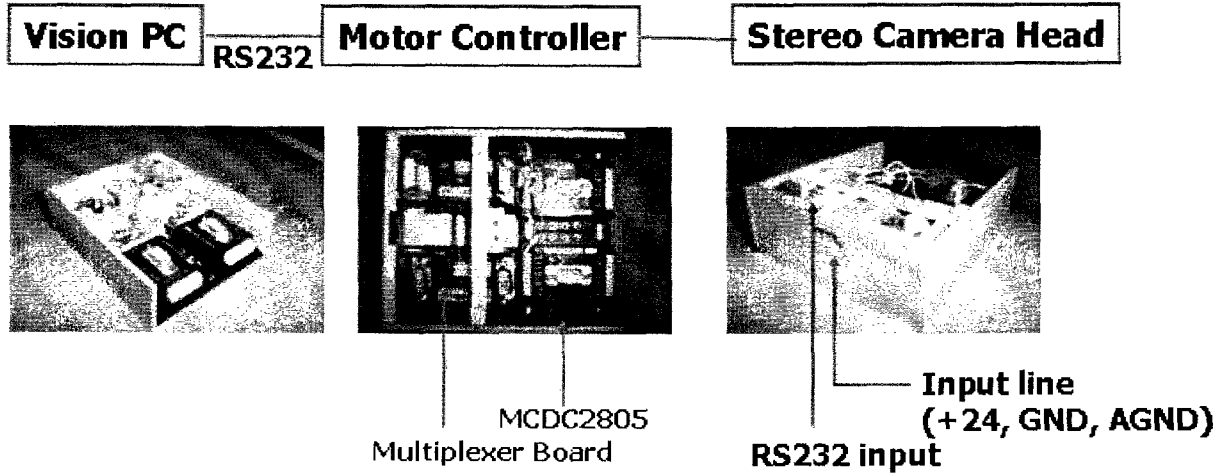
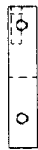
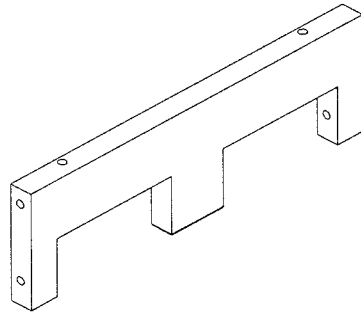
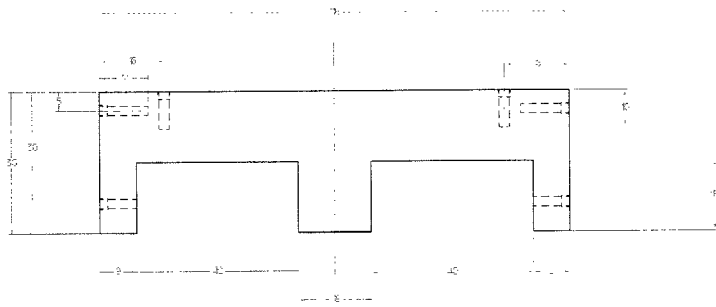
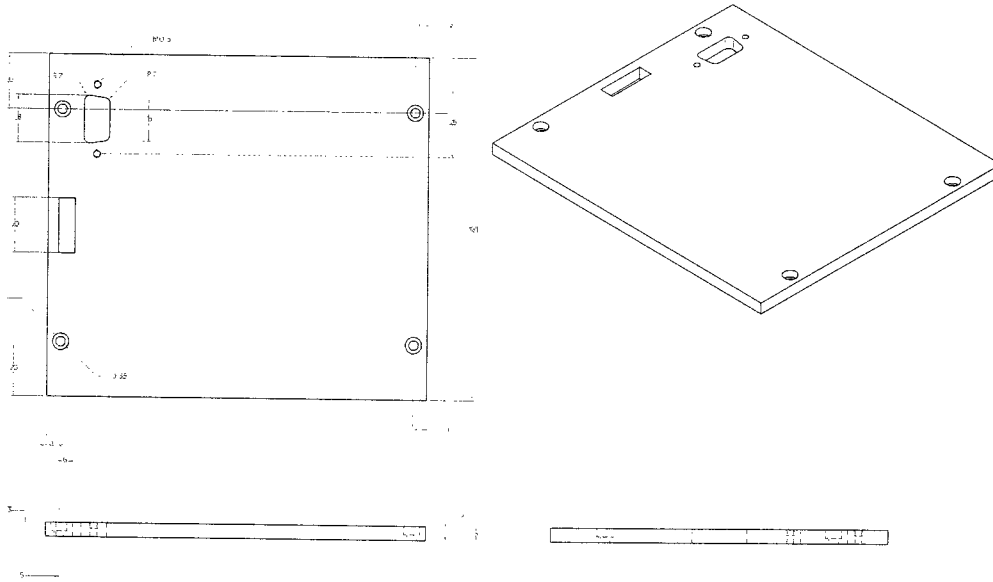


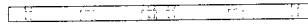
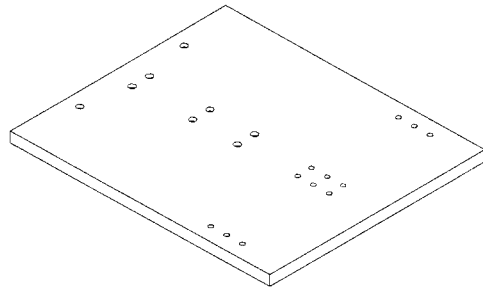
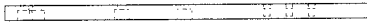
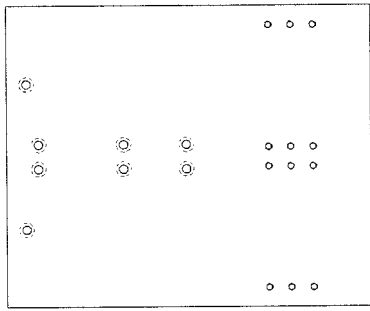
그림 3.3.2.18. 제작된 시리얼 제어기 모듈

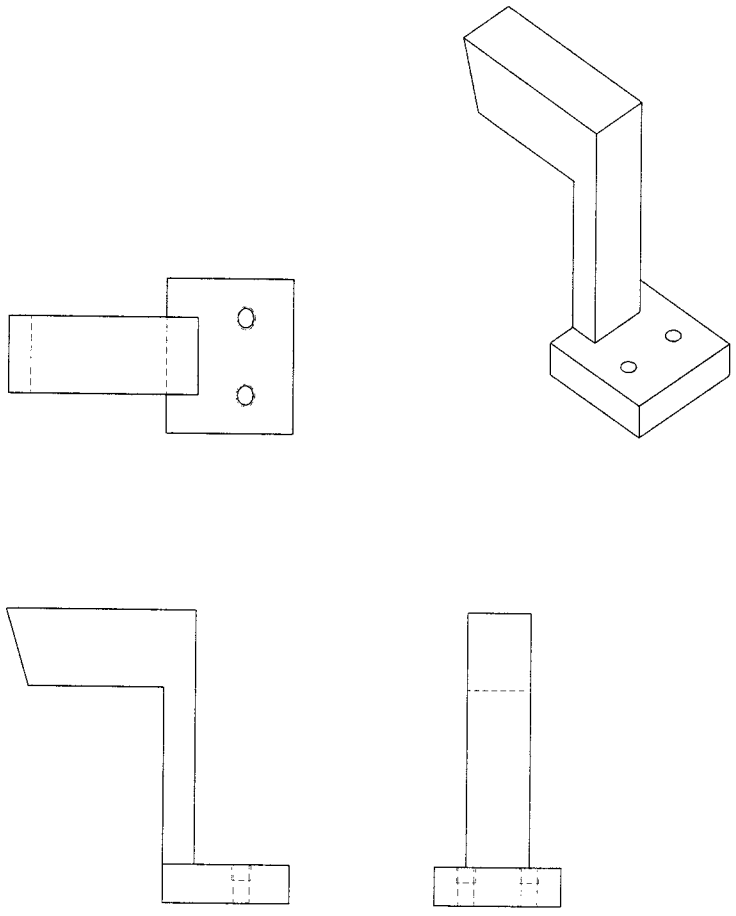


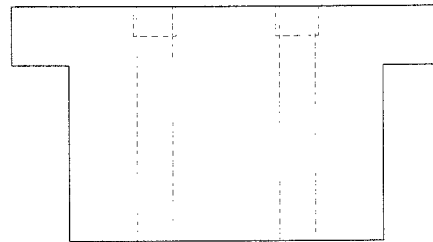
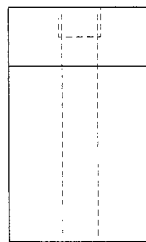
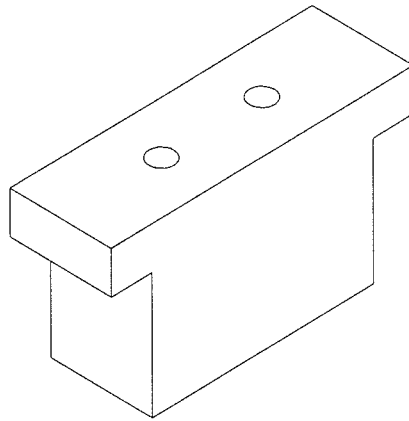
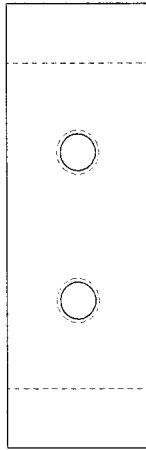
425
7

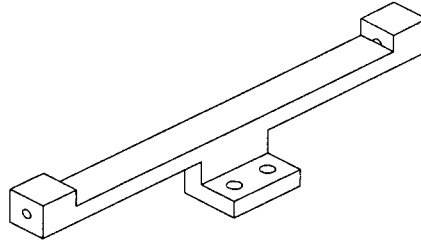
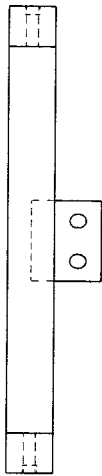


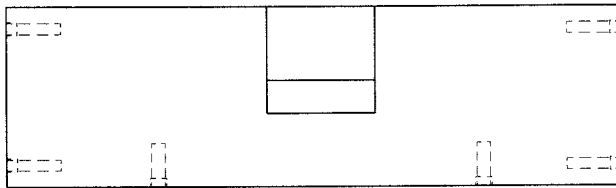
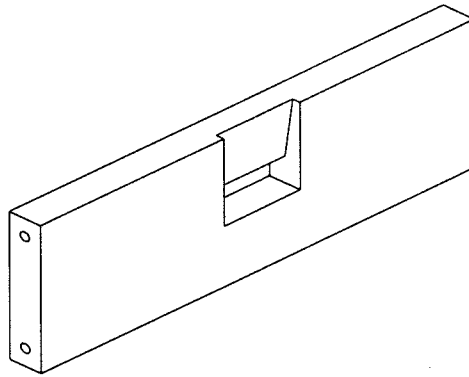


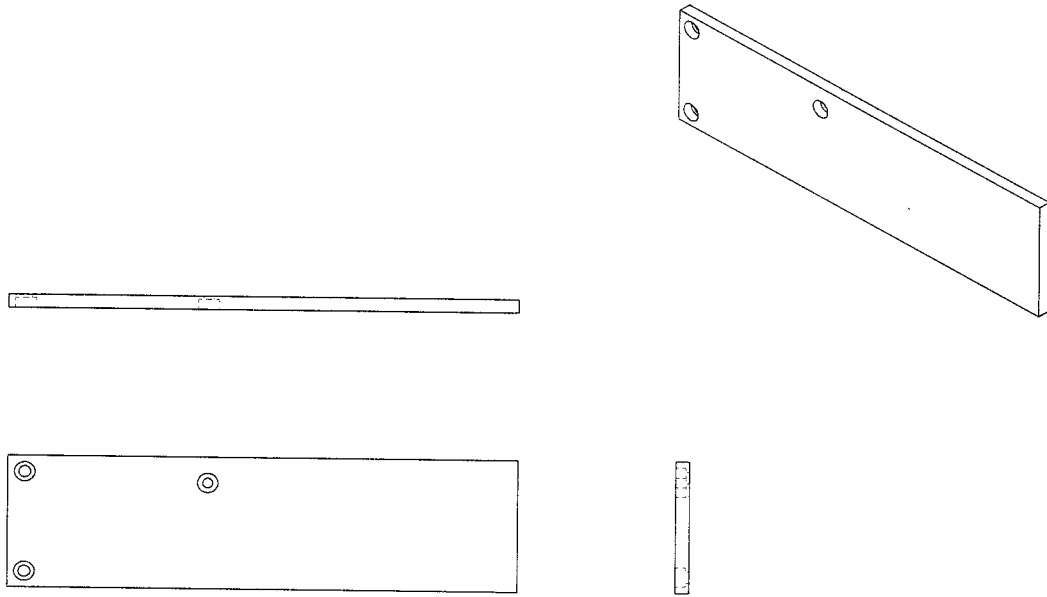












제작된 제어기의 크기는 124mm*148mm*47mm 이며, 입력으로는 24V/5A의 전력이 들어가게 된다. 그리고 Analog GND 신호를 넣어주어야 하며, PC로부터 연결되는 RS232 시리얼 케이블이 연결된다. 제어기의 모터쪽 입출력 신호로는 모터의 +/- 전압신호, 엔코더(encoder) A/B 신호, GND 신호가 있다. 프로그램은 RS232 통신을 통하여 ASCII 문자를 보냄으로서 EEPROM에 입력되어 있는 커맨드 셋(command set)에 따라 속도 및 위치 제어가 가능하게 된다.

(3) '센서 융합' 및 '인간-로봇 공동작업'에 의한 주변상황 대처기능 구현 및 실험

1) 작업 성공률을 높이기 위한 센서 융합 기술

개발된 시스템은 Eye-in-hand 카메라 구성을 가지고 있는데, 물체 잡기등의 작업을 보다 높은 성공률로 수행을 하기 위해서는 선택한 카메라 구성의 한계점인 정확한 거리 측정의 범위를 벗어나는 근거리 검출을 위한 것과 원거리 검출을 위한 거리 검출 센서가 필요하게 되고, 물체를 잡는 힘을 조절하기 위한 힘센서가 필요하게 된다. 거리측정은 물체의 종류 및 주변 조명에 상관없는 센서로 원거리 측정을 위한 초음파 센서의 선정, 근거리 측정을 위한 작은 센서 모듈 개발이 필요하게 된다.

센서 융합을 위한 기본 테스트를 위하여 선정된 센서는 표 3.3.2.6과 같다. 거리 측정을 위해서는 비전(Vision) 센서의 오차 한계 이내 범위를 벗어나는 원거리와 근거리에 대한

센서로 나누어서 선정을 해야 하며, 원거리의 경우 주변 조명 및 물체 종류에 강인한 특성을 가져야 하고, 근거리 측정은 그리퍼 모듈과 같이 사용되어야 하므로 거리 측정 범위는 제한이 되더라도 소형이어야 한다. 그리고 물체를 적절한 힘으로 잡기 위해서 물체를 잡는 힘(grasping force)를 측정하기 위한 적절한 사양의 힘센서가 필요한데, 물체를 잡기 위한 적절한 힘의 범위 내에서 힘의 크기에 비례하는 출력 전압을 나타내 주어야 하며, 그리퍼 모듈에 삽입되어야 하므로 그 크기 또한 소형이 되어야 한다.

표 3.3.2.6. 센서 융합을 위한 센서 선정


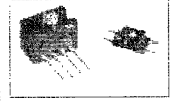
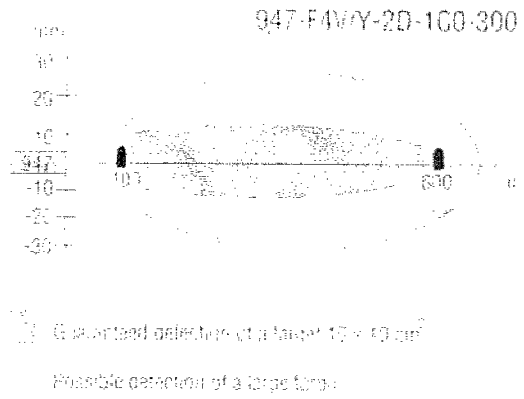
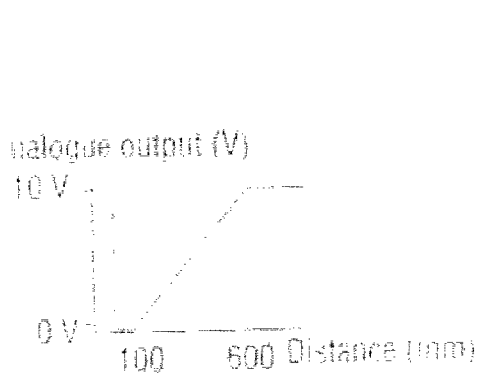
센서	기능	모양	특징
초음파 센서	거리 측정		크기 : $\Phi 20\text{mm} \times 100\text{mm}$ 측정 범위 : 10cm-60cm, 30°확산 주변 조명, 물체 종류에 강인한 특성
PSD & Light Emitter Module	거리 측정	제작 필요	크기 : 모듈 제작에 따라 소형화 가능 측정 범위 : 10cm 범위 이내 광원 및 모듈 구성에 따라 다른 특성을 보임
Force Sensor	힘 측정		크기 : 12.7mm×10.5mm×8.5mm 측정 범위 : 0-15N 소형, 힘의 크기에 비례하는 출력 전압

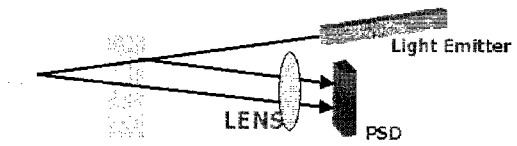
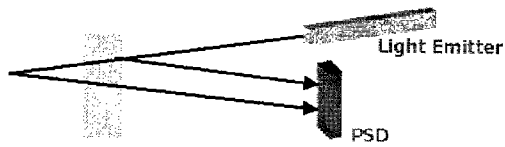
그림 3.3.2.19은 초음파 센서에 대한 출력 특성을 보여 주며, (a)는 주어진 측정 범위인 10cm-60cm의 범위에 대해서 비례 출력을 내보내주고 있음을 알 수 있으며, (b)는 확산형 거리 측정장치인 초음파 센서가 거리에 따라서 수평으로 어느 정도 범위의 물체까지 인식을 할 수 있는가를 보여주고 있다. PSD(Position Sensitive Device)는 수광소자의 하나로써 빛의 광량에 의해서 출력이 조절되지 않고 수광위치에 따라서 출력값이 달라지는 소자이다. 따라서 이러한 특성을 이용해서 적절한 발광소자(Light Emitter)를 선택하게 되면, 기구학적 구조를 도입하여 거리측정 센서를 만들수가 있게 된다. 그림 3.3.2.20는 이러한 발광 소자와 PSD 소자와의 조합을 통하여 거리를 측정하는 센서의 구조를 보여준게 된다. 그리고 그림 3.3.2.21은 이러한 개념을 적용하여 실제로 제작된 PSD 모듈의 크기 및 외관을 보여준다.



(a) 거리에 따른 출력 특성

(b) 센서의 감지 범위

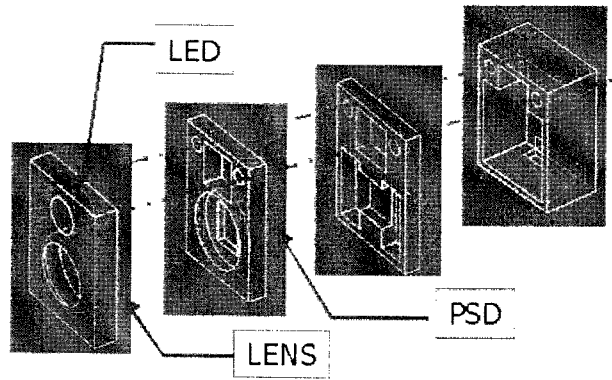
그림 3.3.2.19. 초음파 센서 특성



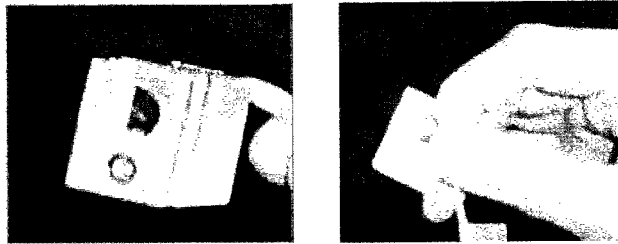
(a) 기본 구조

(b) 렌즈를 사용한 구조

그림 3.3.2.20. PSD 와 Light Emitter를 이용한 거리 측정 구조



(a) 개념도 및 3차원 투시도



(b) 실제 제작된 PSD 모듈
 그림 3.3.2.21. PSD 모듈의 제작

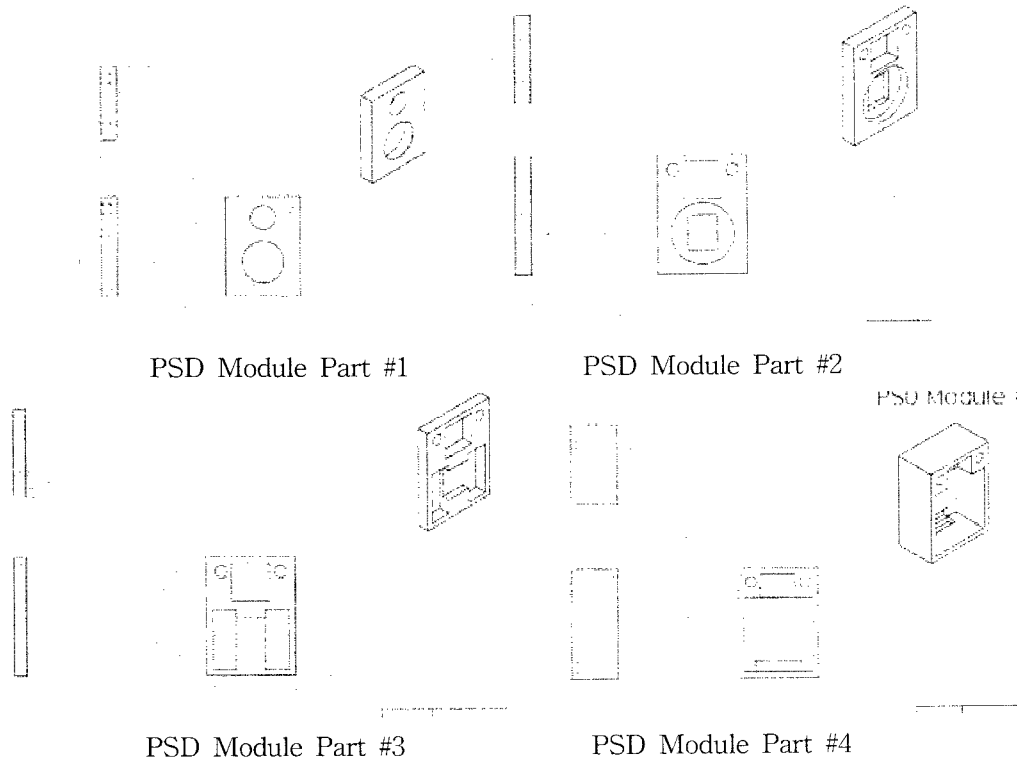
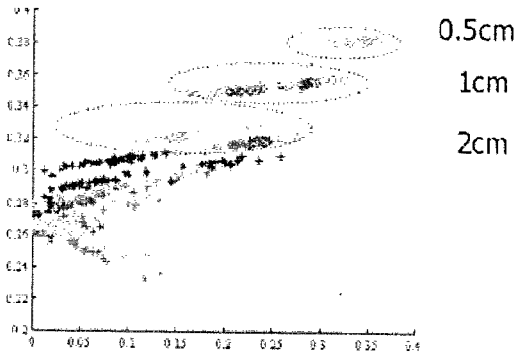
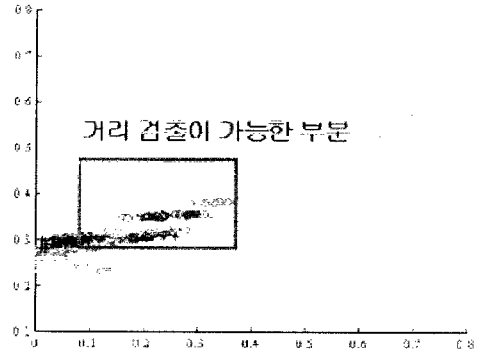


그림 3.3.2.22는 PSD와 발광소자를 조합하여 거리 검출의 가능성을 테스트해 보기 위해 다른 부가 장치(렌즈 등)는 사용하지 않고 최소한의 장치인 PSD와 980nm의 파장을 가지는 일반 LED를 사용하여 거리를 검출한 특성을 보여주고 있다. (b)에서 사각형으로 테두리 되어 있는 부분은 거리에 따른 아날로그 출력값을 보여주며, 나머지 부분은 물체가 없는 부분을 의미한다. (a)에서 원으로 구분지어진 것은 거리에 따른 출력값의 균들을 보여준다.



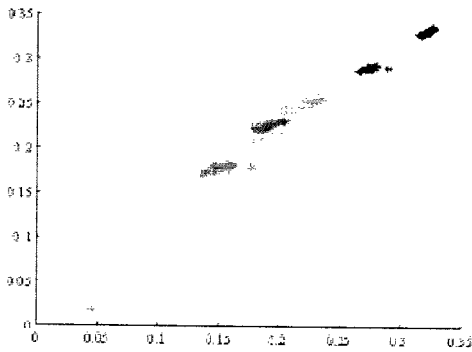
(a) 거리별 데이터 추출



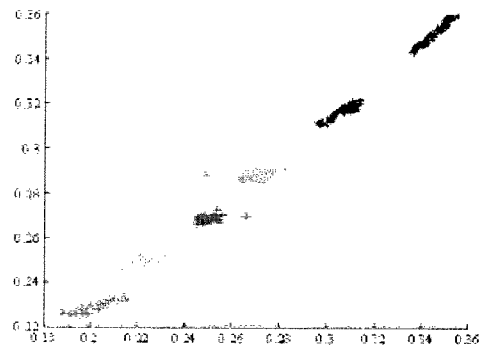
(b) 물체가 없는 경우와 비교

그림 3.3.2.22. PSD와 Light Emitter를 조합한 거리 측정 실험 : 980nm General LED 사용

그림 3.3.2.23은 PSD와 발광소자에 렌즈를 추가하여 수광성능을 높였을 때 거리를 추출한 결과를 보여주고 있다. (a)와 (b)의 경우는 일반적인 LED(확산형)을 사용했을 경우와 파장의 크기가 다르고 직전성이 우수한 레이저(Laser Emitter)를 사용했을 경우를 보여준다. 각각의 군은 0.5cm간격의 거리 군을 나타낸다.



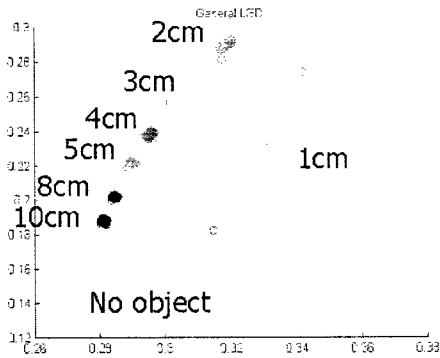
(a) General LED 980nm



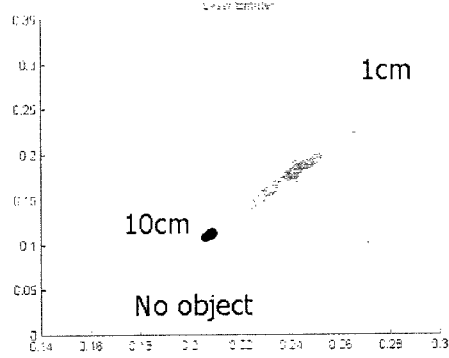
(b) Laser Emitter 850nm

그림 3.3.2.23. PSD와 Light Emitter를 조합한 거리 측정 실험 : LENS 사용

이러한 결과를 바탕으로 최종적으로 제작된 렌즈를 추가한 PSD 모듈을 이용하여 원하는 범위인 1-10cm 범위내에서 거리 측정의 분류 결과값을 보면, 3.3.2.22과 같으며, 이는 일반적인 확산형 LED와 Laser emitter에 대해서도 분류를 잘 해주는 것을 볼 수 있다.



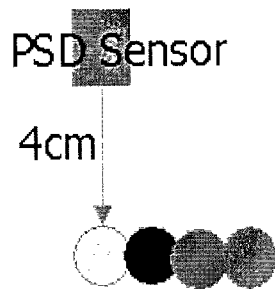
(a) General LED 980nm



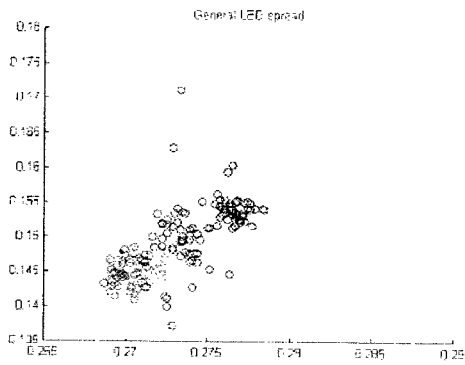
(b) Laser Emitter 850nm

그림 3.3.2.24. PSD 모듈 거리 측정 실험

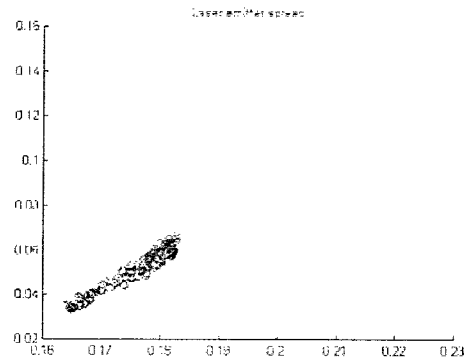
또한 그림 3.3.2.25는 PSD 모듈의 거리 검출 직진성을 알아본 것으로서, 물체를 거리 4cm 지점에 두고 1cm씩 수평으로 이동시켜 가면서 거리를 검출해 낼 수 있는지의 여부를 확인해 본 것이다. 결과 그래프를 보게 되면, 발광소자로 Laser Emitter를 사용했을 경우, PSD 소자가 향하고 있는 직선범위와 나머지 부분이 확연하게 구분되는 것을 보이고 있으며, 이는 정밀한 물체의 위치 및 거리 검출을 하는데 사용될 수 있다. 그리고, 일반 확산형 LED의 경우도 Laser Emitter와 같이 우수한 성능을 보이지는 않으나 1cm의 오차이내에서 직진성을 보임을 알 수 있다. 따라서 각각의 경우는 사용목적에 따라 정밀한 물체의 모양 및 위치를 검출하는 경우는 Laser emitter를, 주어진 범위내에서 최소한의 단가를 요구하는 센서 사용시에는 일반 확산형 LED를 사용하면 원하는 스펙의 센서로 이용할 수가 있게 된다.



(a) 실험 조건 : 거리 4cm, 색깔별로 수평이동 했을 경우 출력값



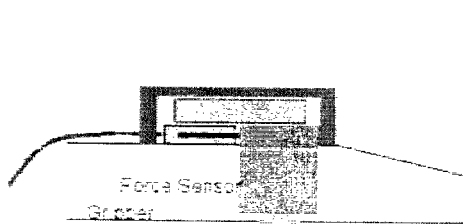
(b) General LED 980nm



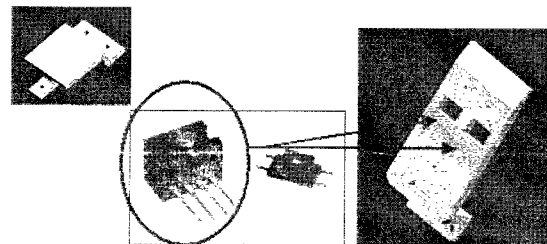
(c) Laser Emitter 850nm

그림 3.3.2.25. Light emitter의 종류에 따른 직진성 테스트

그림 3.3.2.26은 힘 센서와 물체 잡기의 연동 실험을 위한 그리퍼(Gripper) 시작품의 개념도를 보여주고 있다. 그리퍼 시작품은 선정된 힘센서를 내부에 설치하여 적절한 힘센서의 배열을 통하여 물체를 잡을 때의 힘을 감지하며, 물체를 적절한 힘으로 들어올릴 수 있는 알고리즘을 적용할 수 있는 기반을 마련할 수 있도록 제작되었다.



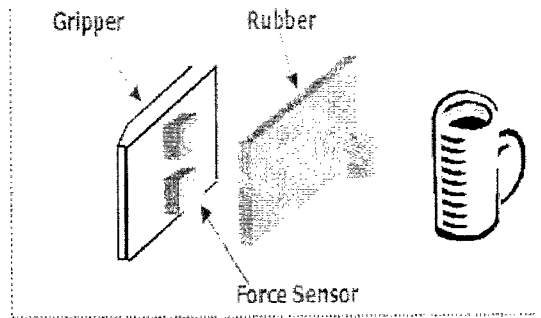
(a) Gripper와 Force 센서 연동 개념도



(b) 설계된 Gripper와 Force Sensor

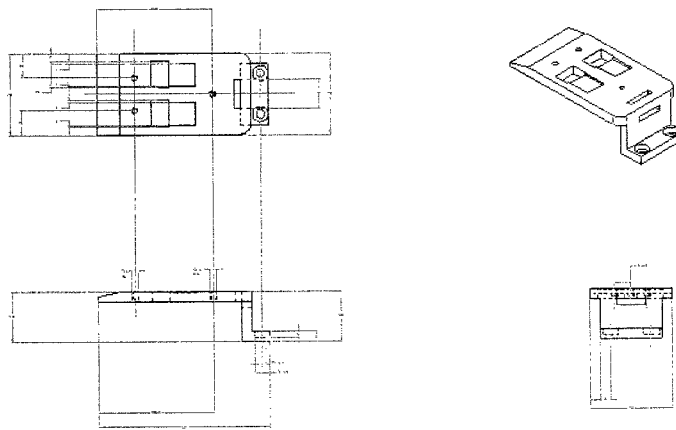


(c) 제작된 Force Sensor 실험용 Gripper 시작품

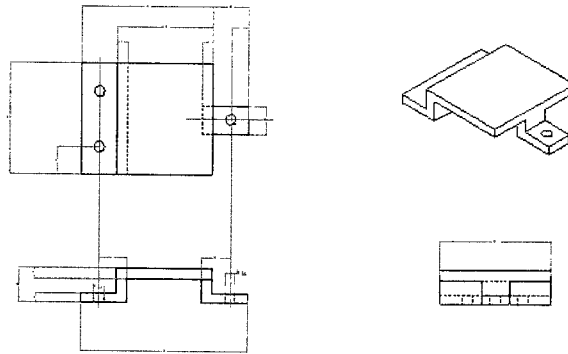


(d) 물체 잡기를 위한 개념도

그림 3.3.2.26. Force 센서 실험을 위한 Gripper 시작품의 제작과 개념도



Gripper Fingertip



Gripper Sensor Cover

그림 3.3.27은 힘센서를 연동하여 물체 잡기 작업에 적용하는 것을 실험하기 위한 실험 환경을 보여준다. PC는 Windows NT 4.0에서 VC++ 6.0으로 작성된 소프트웨어 기반으로 구동되었으며 센서 정보를 수집하기 위해서 Sensory626 보드를 사용하여 아날로그 (Analog) 신호를 디지털(digital) 신호로 변환하여 사용하였다. 로봇은 6DOF 로봇팔인 PowerCube를 사용하여 실험하였다. 그림 3.3.28는 물체잡기를 위한 알고리즘의 간략한 순서도를 보여주며, 여기서는 물체 잡기를 잡는 과정과 들어올리는 과정으로 나누어 해당 되는 알고리즘을 적용할 수 있도록 하였다. 우선 힘 센서의 특성으로부터 수치가 변하는 최소한의 한계점을 측정하여, 그리퍼의 양쪽(위또는 아래의 힘센서)에서 모두 일정한계 이상의 힘이 검출 되면 물체에 접촉(contact)한 것으로 인지를 하게된다. 이러한 힘의 임계 값(threshold)은 실험을 통해서 적절한 값으로 선정이 된다. 그리고 물체를 들어올리는 단계에서는 그리퍼 양쪽의 안쪽면에 위아래로 달려있는 힘센서의 불균형을 측정하게 된다. 안정적으로 물체를 잡았을 경우 힘은 고르게 분포되어 위쪽 센서와 아래쪽 센서의 변화가 한계 범위를 넘지 않게 되고, 왼쪽과 오른쪽의 핑거에도 비슷한 특성이 나타나게 된다. 그러나 물체를 안정적인 힘으로 잡지 못했을 경우 물체를 들어올리는 작업이 시작되면서 물체는 미끄러지기 시작하게 되고 이러면 좌우 및 위,아래의 힘센서에 힘의 불균형이 측정된다. 이 경우 그리퍼는 이러한 특성이 나타나지 않을 때까지 잡는힘을 증가시키게 되며, 이 경우 물체를 안정적으로 들어올릴 수 있게 된다. 그림 3.3.29는 물체를 들어올리는 과정을 보여 주며, 표 3.3.2.7는 실험에서 임계값을 변환시켜가며 물체를 들어올리는 실험을 수행한 것에 대한 결과를 보여 준다. 이는 최종적으로 힘센서를 사용하여 대상 물체를 여러 가지로 바꾸어 보았을 때 질량 범위 4-500g 이내에서 물체 잡기의 성공률을 77.5%로 얻은 것을 보여준다.

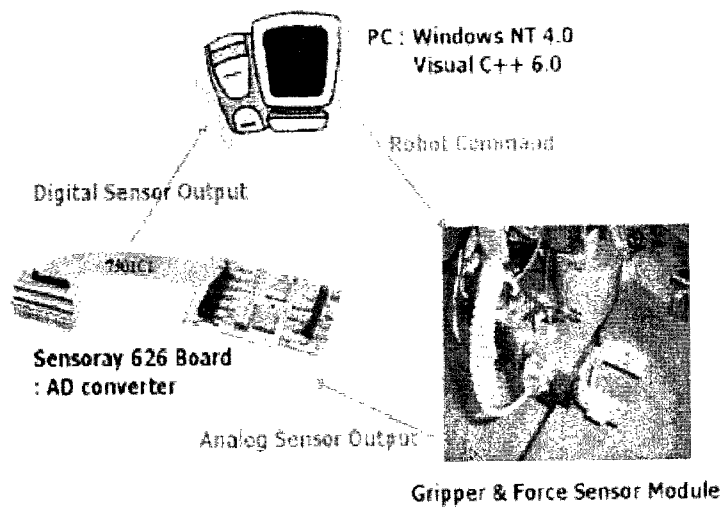


그림 3.3.27. Force Sensor 실험을 위한 Gripper 모듈 실험 환경

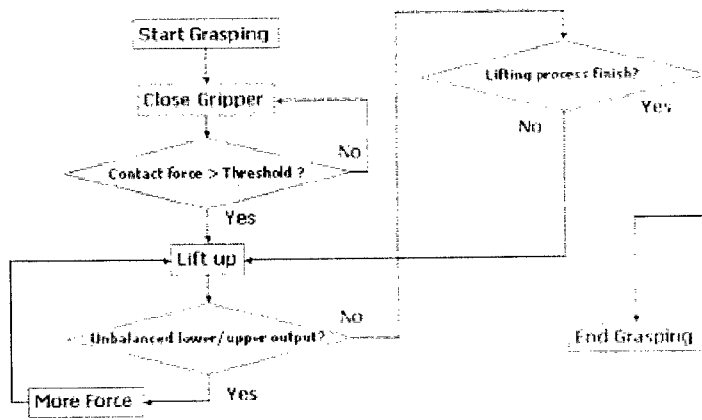
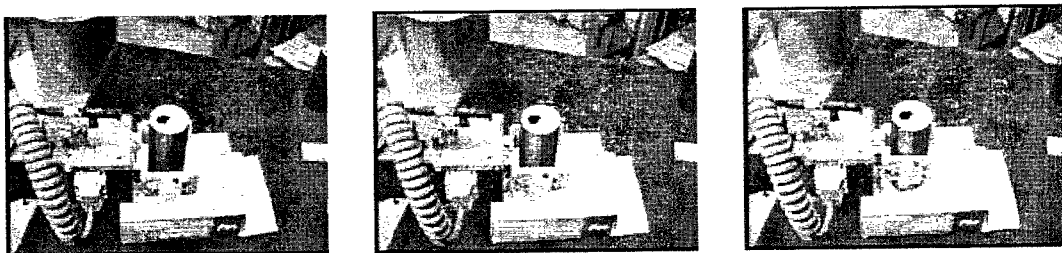
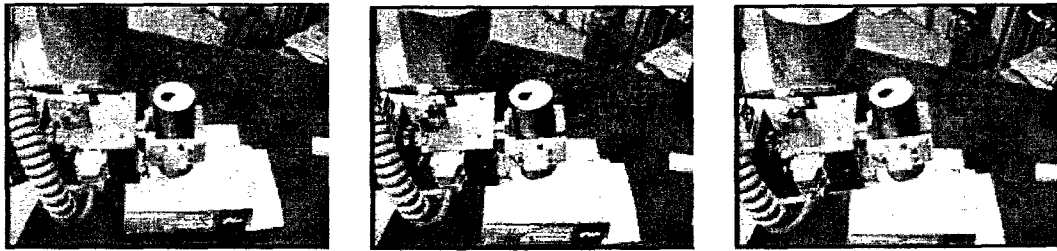


그림 3.3.28. Force Sensor를 이용한 미끄러짐 감지 잡기 흐름도



(a) Grasping process



(b) Lifting up process

그림 3.3.2.29. 물체 잡기 실험

표 3.3.2.7. Force Sensor를 사용한 물체 잡기 실험

실험 방법	내용
1	Simple Contact Threshold(잡는 힘을 고정) : 0.005
2	Simple Contact Threshold : 0.010
3	Simple Contact Threshold : 0.015
4	Simple Contact Threshold : 0.020
5	Simple Contact Threshold : 0.030
6	Contact Information(Threshold=0.02) Material Information(접촉순간부터 Threshold값에 도달하기까지의 Gripper의 이동거리로 휘기 쉬운 물체와 단단한 물체를 구분, Force 및 Limit을 조절, 평평한 물체에 대해서 미끄러짐 감지)

(a) 실험 방법

대상물체	방법 1	방법2	방법3	방법4	방법5	방법6
종이컵(4g)	10/10	10/10	10/10	10/10	0/10	8/10
빈 캔(30g)	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	7/10
컵, 캔+음료수(280g)	0/10	7/10	7/10	8/10	9/10	7/10
컵+음료수(500g)	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	9/10
평균 성공률	50%	67.5%	67.5%	70%	47.5%	77.5%

(b) 성공률

그리고 이러한 실험에서 추가하여 물체 잡기에서 가장 간단한 형태의 인간-로봇 공동 작업이라고 할 수 있는 것으로서 GUI(Graphic User Interface)를 사용하여 물체에 대한 개략적인 정보를 로봇 시스템에 넘겨 주었을 때, 성공률의 증가는 표 3.3.2.8에서 볼 수 있으며, 물체잡기를 위해 사용자로부터 정보를 넘겨받을 수 있는 GUI는 그림 3.3.2.30 이며 이를 통해 물체의 개략적인 무게와 재질(단단함/부드러움)을 사용자 입력으로부터 받아 물체 잡기에 적용하여 앞서 제시되었던 알고리즘의 임계값을 조절하게 된다.

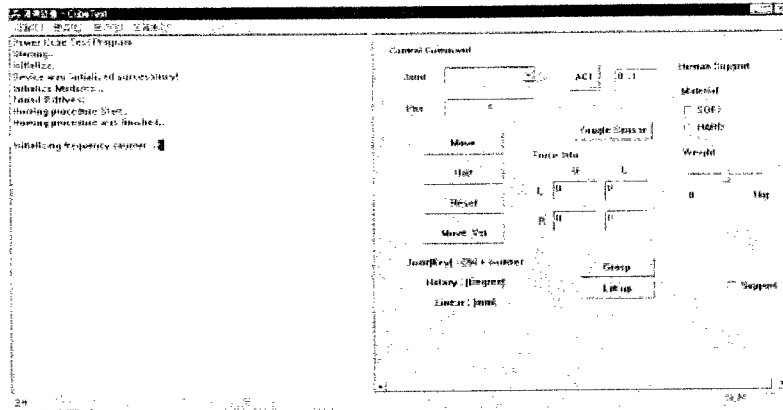


그림 3.3.2.30. 물체 잡기를 위한 인간-로봇 공동 작업 GUI

표 3.3.2.8. 인간-로봇 공동 작업에 의한 물체 잡기 성공률 향상

	센서 정보만 이용	사람의 정보를 추가했을 경우
실험내용	표 3-2-4. 방법 6	사람으로부터의 물체 재질에 대한 정보 및 대강의 물체 무게 입력
종이컵(4g)	8/10	8/10
빈 캔(30g)	7/10	9/10
컵, 캔+음료수(280g)	7/10	8/10
컵+음료수(500g)	9/10	7/10
평균 성공률	77.5%	80%

Eye-in-hand 카메라 구조의 센서 융합에서 사용되는 가장 중심적인 센서는 스테레오 비전을 사용하는 카메라 시스템이다. 그리고 다른 센서와 융합하여 사용하기 위해서는 비전 센서로부터 물체를 인식하여 거리를 추출해 내는 범위에 대한 정확한 오차 한계를 분석해야 한다. 영상 처리를 통해서 물체의 색깔을 인식하고 인식 성공률을 증가 시키기 위한 방법에 대한 내용은 ‘인간-로봇 공동 작업’ 부분에서 다루도록 하고 이 부분에서는 거리 추출을 하는 것에 대해 다루기로 한다.

스테레오 영상으로부터 물체가 인식이 되면, 카메라 헤드의 중심에 대해서 로봇팔의 이동을 통해 센터링(centering)작업이 이루어지고, 이후 카메라 헤드의 이접 운동을 통해 화면 영상(image plane)상에서 물체를 중심에 두어 거리를 추출하게 된다.

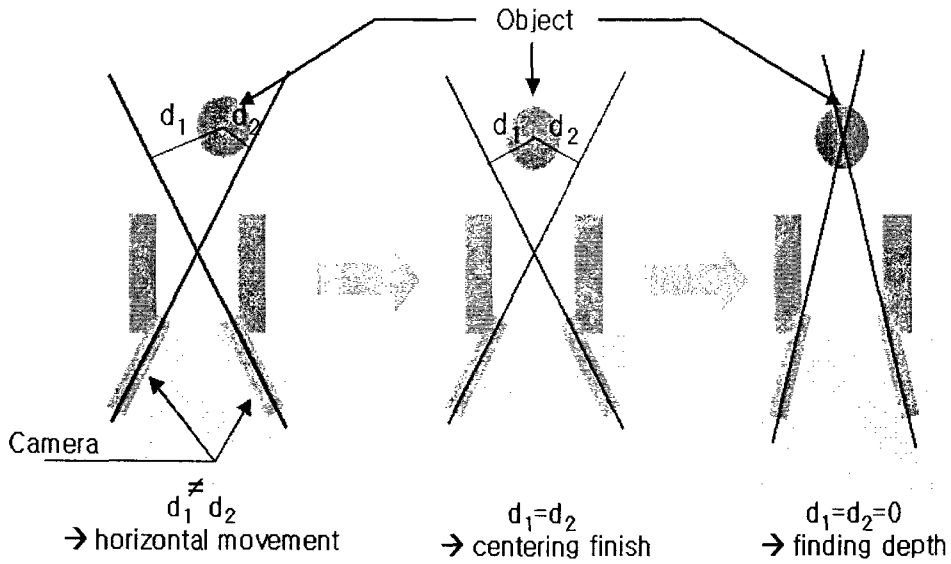


그림 3.3.2.31. 물체까지의 거리 검출 과정

이론적인 경우 카메라의 이접각을 θ 라 하고, 카메라의 초점 사이 거리를 b 라 할때 물체까지의 심도 d 는 다음의 식과 같이 표현된다.

$$\tan(\theta) = \frac{b}{d}, \text{ where } 0 < \theta < \frac{\pi}{2}$$

수식에서 볼 수 있듯이, θ 가 작아지게 되면 d 가 기하급수적으로 커지게 되기 때문에 물체가 멀리 있을수록 각도를 세밀하게 조절할 수 있지 않으면, 물체에 대한 거리를 제대로 추출해 낼 수가 없다. 또한 카메라 헤드의 제어기 성능에 따라 정밀 제어가 불가능할 경우 시스템에 따라 물체와의 거리를 정확히 측정해낼 수 있는 범위가 달라진다.

구현한 시스템에서 물체를 이동시켜가며 카메라 헤드의 이접각을 조사해 본 경우, 제어기의 성능에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다(그림 3.3.2.32 참조). 이 때, 카메라 헤드 제어기는 RS232 Serial 통신을 사용하는 MiniMotor사의 MCDC2805 모델을 이용하였다.

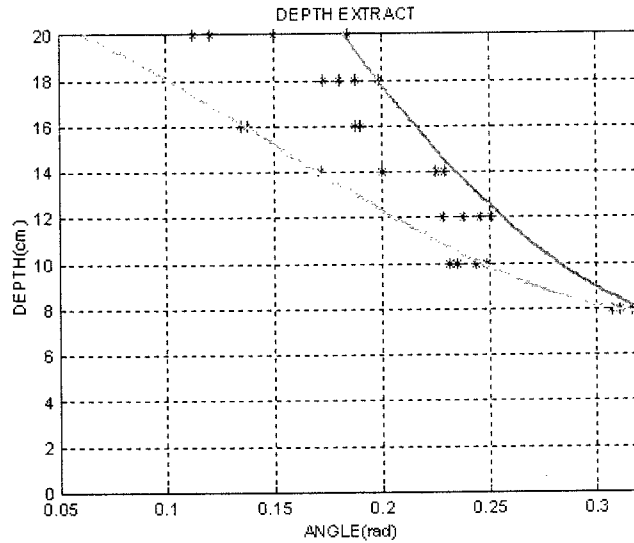


그림 3.3.2.32. 거리에 따른 카메라의 이접각

즉, 같은 거리에 대해서도 거리가 멀수록 제어기 성능의 한계로 물체를 영상의 중앙으로 맞추었다고 하더라도 오차가 많이 날 수 있다. 위의 그래프를 바탕으로 상한선(u)과 하한선(l)을 3차 다항식으로 근사해 보면 각각 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$u = 430.71\theta^3 - 8.3924\theta^2 - 174.55\theta + 48.925$$

$$l = 594.78\theta^3 - 276.12\theta^2 - 16.374\theta + 21.883$$

수식에서 보듯이 얻어진 영상 정보에 대한 이접각이 얻어졌다고 했을 때, 거리 오차는 최대 (u-l)까지 나올 수 있다. 심도를 위 두 식의 평균으로 추정했을 때 추정 오차는 가장 작아지므로 심도 d를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$d = \frac{u(\theta) + l(\theta)}{2}$$

얻어진 심도 d에 대하여, 물체를 힘센서에 의해 적절한 힘으로 잡을 수 있는 오차 범위가 1cm 이내라고 한다면, 심도 추출에 대한 SI(Sensor Reliability)를 다음 식과 같이 정의할 수 있다(그림 3.3.2.33).

$$SR = \begin{cases} 1.0 & , 0.0 \leq u-l < 1.0 (d < 8.75) \\ 1/(u-l) & , 1.0 \leq u-l < 10 \\ 0.1 & , 10.0 \leq u-l (d > 20.82) \end{cases}$$

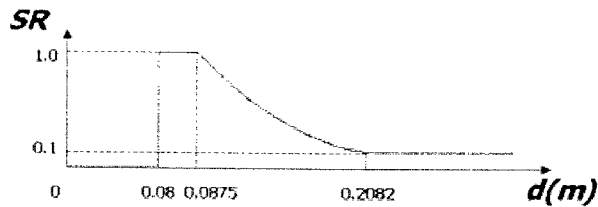
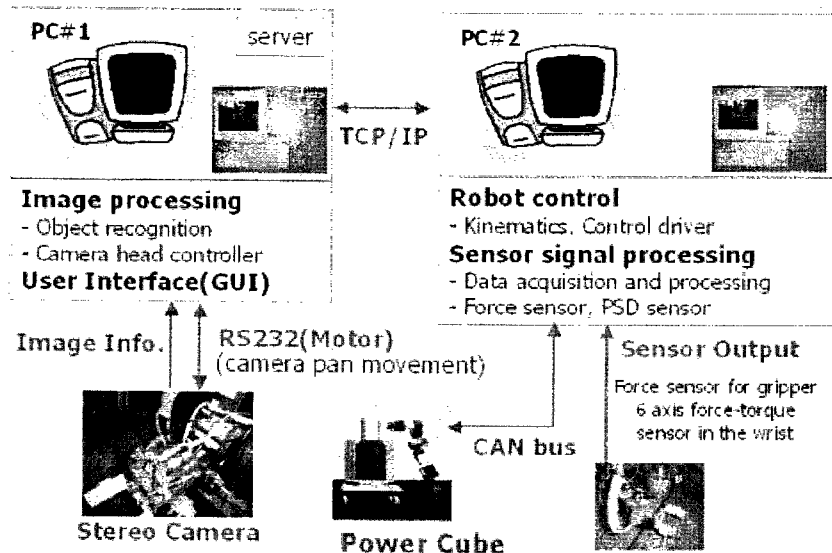


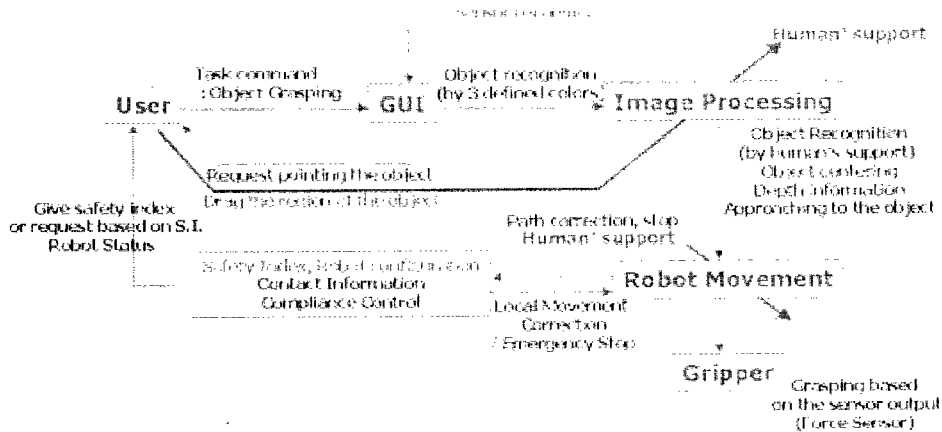
그림 3.3.2.33. SR(Sensor Reliability)

곧, SR의 값이 낮아지는 범위에 대해서는 사용자가 이를 보고 판단하여 거리 정보를 주거나, 반복적인(iterative) 방법을 통하여 로봇팔을 제어하여 물체를 잡을 수 있도록 해주어야 한다. 그리고 이를 기반으로 비전 센서의 거리 측정 오차 한계를 벗어나는 범위에 대해서는 근거리 및 원거리 검출 센서를 사용하여 대상이 되는 거리 범위에 대해서 SR의 값이 기준 이상의 값을 가질 수 있도록 하면 작업 성공률을 증가시킬 수 있다.

이상의 내용을 종합하여 물체 잡기를 위한 시스템 구성도 및 흐름도를 나타내어 보면, 그림 3.3.2.34와 같다.



(a) 하드웨어 구성도



(b) 물체 잡기 흐름도

그림 3.3.2.34. 물체 잡기를 위한 시스템 구성도

인간-로봇 공동 작업과 연관된 부분은 다음 항목에서 다시 기술하기로 하고 물체를 시스템에 대해서 설명을 하면, 우선 데이터 처리의 부하를 나누기 위하여 영상 처리용 PC와 로봇 제어용 PC로 나누고, 주 인터페이스 및 의사 결정부(central decision maker)는 영상 처리 PC에 두도록 한다. 두 PC는 TCP/IP를 통하여 정보를 주고 받을 수 있도록 한다. 로봇팔은 Amtec사의 6자유도 모듈화 로봇팔인 파워큐브(PowerCube)를 사용한다. 로봇팔의 손목 축에는 6자유도 힘-토크(force-torque)센서가 연결되어 로봇 PC로 힘 정보를 전달한다. 그리고 그리퍼(gripper)는 물체잡기를 위해 힘센서(force)센서를 연결한 것을 제작하여 물체를 잡을 때의 힘 정보가 로봇 PC로 전달 된다. 로봇 팔의 6축 모듈에는 이접운동(pan movement)가 가능한 카메라 헤드에는 스테레오 카메라(stereo camera)시스템이 장착되어 영상 정보 및 카메라의 각도가 영상 처리 PC로 전달 되며, 카메라의 이접운동은 RS232를 통해 명령이 전달된다.

이 시스템에서는 인터페이스로서 디스플레이 패널(display panel)을 구현하였다(그림 3.3.2.35 참조). 그림에서 볼 수 있듯이, 디스플레이 패널로부터 사용자는 스테레오 카메라로부터 들어오는 영상 정보를 확인할 수 있고, 물체를 인식한 결과를 볼 수 있다. 또한 작업에 대한 명령을 내릴 수 있고 로봇팔의 세부적인 동작에 대한 명령 또한 디스플레이 패널을 통해서 이루어 진다. 그리고 이것으로부터 SR(Sensor Reliability)에 대한 정보와 SI(Safety Index)에 대한 정보를 제공하여 사용자가 상황에 적절한 명령을 내릴 수 있도록 한다. SI의 개념 및 물체 잡기에 적용한 결과에 대해서는 인간 로봇 공동 작업에서 다루기로 한다.

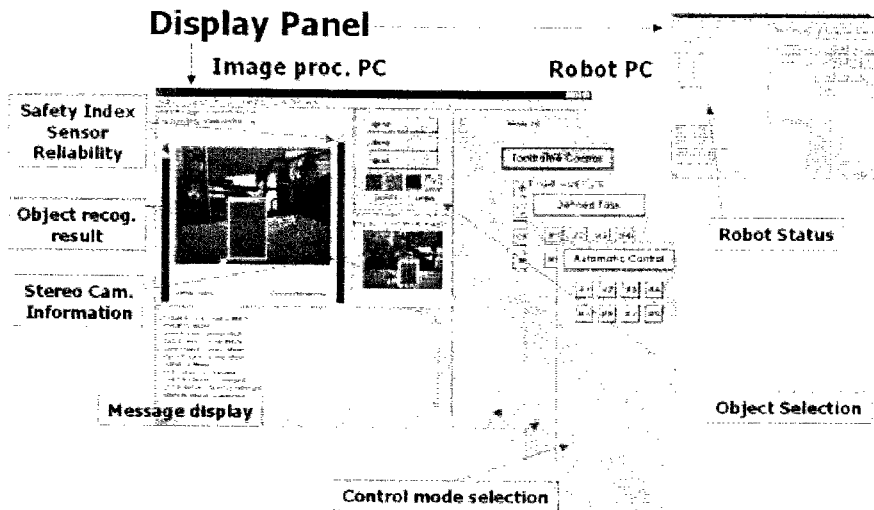


그림 3.3.2.35. 디스플레이 패널

2) 재활 로봇에서의 인간-로봇 공동 작업 및 개발된 시스템에의 적용
 인간의 공동 작업을 형태에 따라 분류해 본후, 이에 해당하는 인간-로봇 공동 작업의 형태로 비교하여 표로 정리해 보면 표 3.3.2.9와 같다.

표 3.3.2.9. 공동 작업의 분류

구분(인간-인간)	예	구분(인간-로봇)	예
2명 이상이 서로 동등하거나 그 이상의 기능을 각자가 독립적으로 수행하는 경우	긴 책상 운반	로봇의 기능이 사람의 기능과 동등 또는 그 이상으로 독립적인 수행이 가능할 경우	로봇과 사람이 공동으로 긴 책상 운반
2명 이상이 각각의 담당 기능을 가지고 있는 경우	건축물의 제작(설계 파트, 구조물 제작 파트, 배선 파트 등)	로봇이 담당하는 부분과 사람이 담당하는 부분이 나뉘어져 있는 경우	원격 제어(tele-operation)에 사용되는 마스터 슬레이브 로봇, 수술 로봇
2명 이상이 같은 기능을 서로 공유하며 최선의 결과를 얻으려 하는 경우	회의(같은 자료를 기반으로 하는 상황 분석, 토의)	로봇이 사람의 의도를 파악하여, 자신의 판단과 융합하여 동작을 하는 경우	모바일 로봇의 Shared Control : 제어를 하기 위해 둘 이상의 제어기가 서로 비슷한 권한을 가지는 것으로 모바일 로봇의 충돌 회피를 위해 사람과 로봇 자체의 충돌 회피알고리즘이 동시에 동작하여 이를 융합한 결과에 행동에 반영되는 것

위의 표에서 인간-로봇 공동작업은 3명 이상의 공동 작업을 다루지는 않으며, 인간과 로봇의 일 대 일 공동 작업의 경우만으로 한정하여 예시를 들었다. 물론 담당 하는 기능면에서 공동 작업을 분류하면 표 3.3.2.9와 같이 분류할 수 있으나, 시스템에 따라서 두 가지 이상이 조합되어 있는 형태로 나타나는 경우도 있으며, 차후 설명되겠지만, 여기서 접근하고자 하는 공동 작업은 두 번째와 세 번째의 특성에 초점을 맞추어 구현이 되었다.

그렇다면 이렇게 일반적인 개념에서 출발한 인간-로봇 공동 작업의 개념을 그대로 재활용 로봇 시스템에 적용할 수 있을 것인가에 대한 여부를 생각해 볼 수 있다. 일반적인 개념의 공동 작업이란, 표 3.3.2.9에서 분류한 바와 같이 '로봇의 기능이 사람의 기능과 동등 또는 그 이상으로 독립적인수행이 가능할 경우' 또는 '서로의 장점을 서로 융합하여 작업을 효율적으로 수행해 나가는 것'을 의미하는 것으로서 이는 주로 정상인과 일반 로봇 시스템의 공동 작업의 경우를 의미한다.

하지만, 재활용 로봇에서의 공동 작업의 개념은 일반적인 개념의 공동 작업에서 좀 더 확장된 개념을 필요로 한다. 결론부터 말하면, '재활용 로봇 시스템과 대상 사용자는 각각의 독립된 개체이면서, 동시에 하나의 개체'로 볼 수 있다는 것이다. 각각의 독립된 개체라는 소리는 일반적인 공동 작업의 개념으로부터 출발하며, 재활용 로봇 시스템과 대상 사용자 각각을 하나의 개체로 생각하는 것이며, 이들이 서로 공동 작업을 통하여 같은 작업을 수행해 나가는 것을 의미한다.

그러나 '하나의 개체'로 볼 수 있다는 말에서 재활용 로봇 시스템의 특이성을 찾아 볼 수 있다. 재활용 로봇 시스템의 가장 기본적인 목적은 장애인의 부족한 부분을 채워 줄 수 있다는 데서 출발한다. 예를 들어, 물 마시기나 식사 보조, 책 보여주는 작업등을 보조해 줄 수 있는 시스템과 대상 장애인은 두 개체가 하나로 묶였을 때, 정상인과 같은 일상의 생활을 누릴 수 있다. 한쪽 팔 절단 장애인의 경우, 이를 대신해 줄 수 있는 의수가 있거나, 로봇 팔 시스템을 통해서 정상인과 같은 기능을 할 수 있게 된다. 곧, 일반적인 개념의 공동 작업을 구현하기 이전에, 정상인과 같은 기능을 할 수 있도록 만들어 주는 것도 중요한 문제 중의 하나이다. 사람의 각 기관은 판단 중추와 신경계를 매개체로 서로 가장 효율적인 방법으로 공동 작업을 해 나가고 있다. 각각의 독립된 개체로서 공동 작업을 해 나감과 동시에 하나의 개체로서의 동작을 위해 내부적인 공동 작업을 생각하는 것, 이것이 재활용 로봇에서 추가되어야 할 확장된 공동 작업의 개념이다(그림 3.3.2.34 참조).

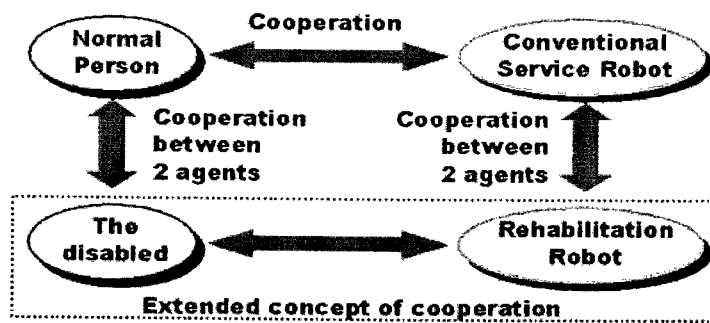


그림 3.3.2.36. 재활로봇에서의 인간로봇 공동작업 개념

그렇다면, 이러한 확장된 개념의 공동 작업을 일반적인 개념에서의 공동 작업과 연관지어 재활로봇에서의 인간-로봇 공동 작업에 대해서 생각해 볼 수 있다. 앞에서 정리해 보았던 인간-로봇 공동 작업의 종류와 관련지어 보면, 첫째 로봇이 인간과 동등 또는그 이상의 기능으로 독립적인 기능을 수행하는 경우는 재활 로봇 시스템에서 의미를 두기 어렵다. 두번째의 경우에 해당하는 로봇이 담당하는 부분과 사람이 담당하는 부분이 나뉘어 있는 것과 세번째의 경우에 해당하는 로봇이 사람의 의도를 파악하여 자신의 의도와 융합하여 동작을 하는 것이 재활 로봇 시스템에서 보다 의미를 가지는 공동 작업의 종류가 된다. 이번 절에서 설명한 확장된 개념의 공동 작업은, 공동 작업의 종류 중 세번째 개념을 확장한 것으로서, 각 개체를 하나로 융합해서 볼 수 있는 경우를 의미한다.

개발된 시스템에서 구현된 인간-로봇 공동 작업의 개념은 지금까지 설명된 두 가지 측면에서 초점을 두고 구현이 되었으며, 첫 번째는 인간과 로봇이 각각 담당하는 부분을 나누어 작업을 수행하는 것이며, 두 번째는 로봇이 사람의 의도를 파악하여 자신의 의도와 융합하여 동작을 하는 것이다.

먼저 첫 번째의 경우로서, 인간과 로봇이 각각 다른 기능을 가지고 있는 경우를 보면 다음과 같다. 사람은 전체적인 상황 인지 능력이 뛰어나고, 로봇은 국부적인 정보 수집력이 뛰어나며, 반복 수행 및 정확한 움직임이 가능하다. 그리고 로봇은 학습된 행동 또는 물체에 대해서 행동하거나 인지하기는 쉬우나 새로운 환경 또는 변화에 대해 대처하기가 힘들다.

물체 인식의 경우도, 대상 물체를 기본적인 색깔로 지정을 해 두고, 주변 조명에 대해 실험적인 임계값을 설정하여 인식을 시켜두었다고 하더라도 조명의 변화 및 배경에 대해서 항상 높은 성공률을 가지고 인식을 하기는 힘들다. 따라서 이 경우 사용자가 디스플레이 패널로 보여지는 스테레오 카메라의 영상으로부터 물체를 다시 지정하여 가르쳐 주게 되면, 로봇 시스템은 이 정보를 바탕으로 다시 임계값을 설정하여 물체를 다시 인식할 수 있게 된다.

구현된 시스템에서는 디스플레이 패널로부터 들어오는 영상 정보에서 물체 인식을 못하

고 있다고 판단될 경우, 사용자가 영상에서 물체의 범위를 마우스를 통하여 지정해 주도록 하고, 영상 처리 PC에서는 주어진 범위의 R, G, B 분포에 대하여 평균값(mean), 분산(variance)을 구하여 이를 r, g, b 값과 함께 임계값을 정하는 데 반영하여 물체를 다시 인식하도록 한다. 이에 대한 블록 다이어그램은 그림 3.3.2.37와 같다.

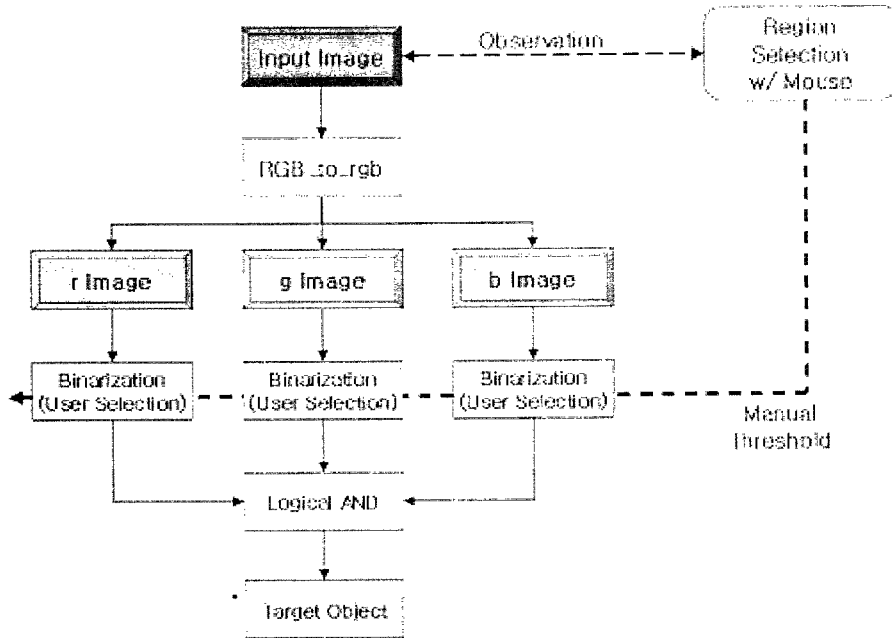
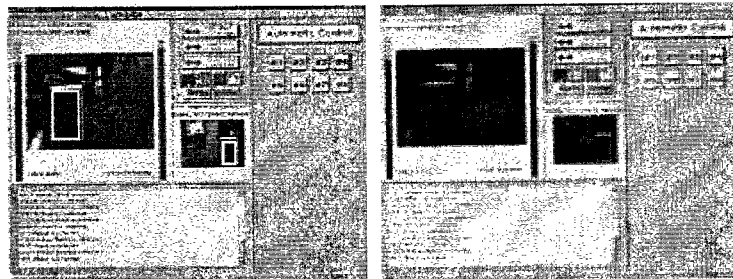


그림 3.3.2.37. 사용자 입력을 통한 색깔의 재인식 블록 다이어그램



(a) 밝은 조명(인식 가능) (b) 어두운 조명(인식 불가)

그림 3.3.2.38. 조명 변화로 인해 물체 인식이 실패하는 경우

그림 3.3.2.38은 조명의 변화로 인해 (a)의 경우에는 밝은 조명하에서 원하는 색깔이 인식이 잘 되어 그 결과를 디스플레이 패널 상에서 제대로 표시를 해 주고 있음을 알 수 있으나, (b)의 경우는 어두운 조명으로 인해 결과를 제대로 보여주지 못하고 있음을 볼 수 있다. (b)와 같은 경우는 사용자가 마우스를 이용하여 디스플레이 패널 상에서 대상 물체

(컵)의 범위를 지정해 주면, 물체를 그림 3.3.2.28의 알고리즘에 따라 새로운 임계값을 설정하여 물체를 인식하여 다시 인식된 물체를 알려주게 된다(그림 3.3.2.39).

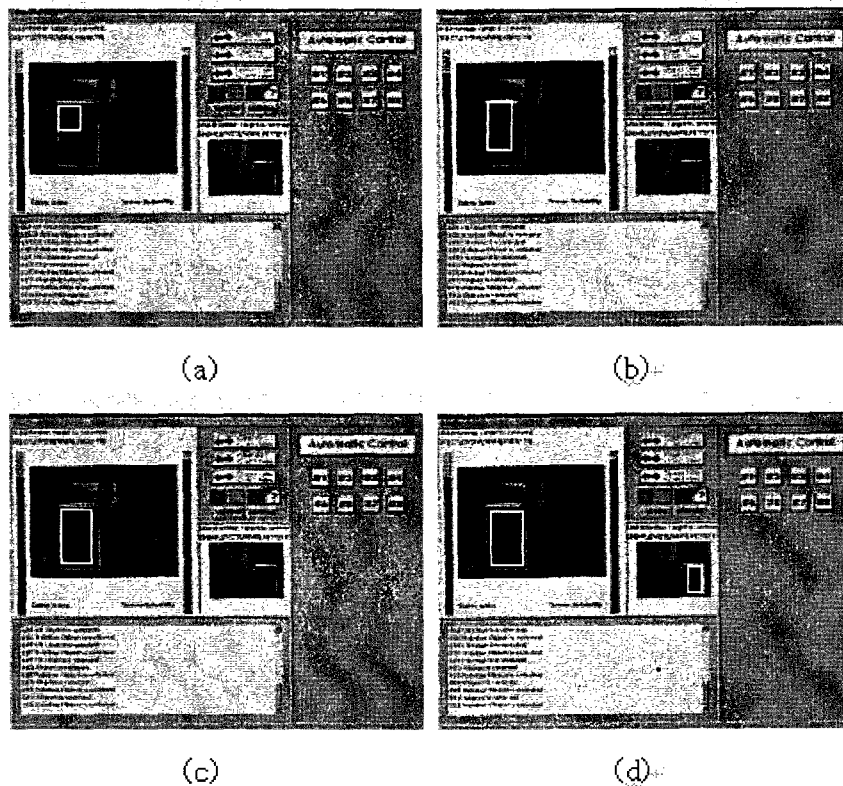


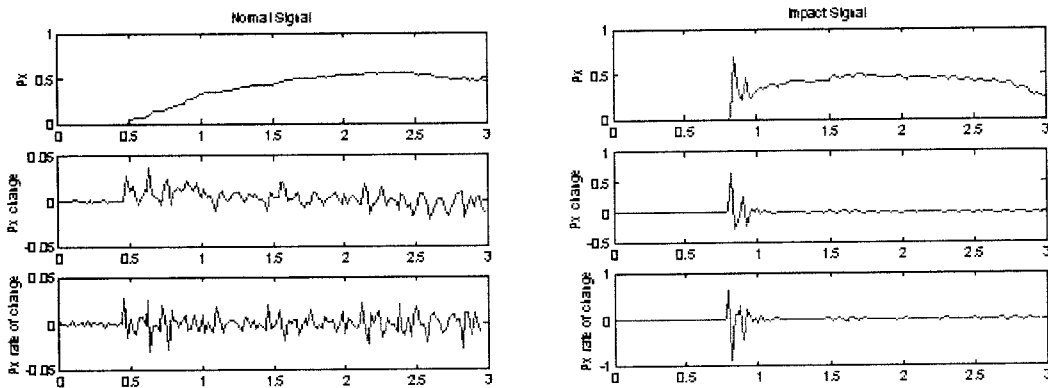
그림 3.3.2.39 사용자의 입력에 따른 물체의 재인식 결과

두 번째 경우로, 로봇 시스템이 사용자의 의도를 파악하여 시스템 자체가 파악한 정보와 융합하여 행동을 결정하는 경우이다. 이를 위해 6자유도 힘-토크 센서를 사용하여 PowerCube 로봇팔 시스템에 퍼지 순응 제어를 구현하였다. 6자유도 힘-토크 센서는 로봇팔의 손목(Wrist) 부분에 연결되며, 사용자로부터 인가되는 힘의 정보로부터 사용자의 의도된 힘인지, 충격에 의한 긴급 상황인지를 구분하여 행동에 반영하게 된다.

순응 제어 기법에서 문제가 되는 부분은 힘의 세기에 대해서 비례적으로 로봇팔에 속도 출력을 인가할 수 있어야 하는 점이고, 잡음 신호에 강한 특성을 보여야 하는 것이다. 그리고 재활 로봇에서의 안전성과 관련지어 충돌 신호와 사용자의 의도로 미는 힘에 대한 구분을 할 수 있어야 한다. 기존의 연구 결과 중 손떨림이 있는 장애인의 조이스틱제어를 위해 조이스틱으로 전달되는 힘의 변화율(df/dt)과 가속도(d^2f/dt^2)을 퍼지룰을 사용하여 떨림의 효과를 억제하여 출력의 변화를 제어한 사례가 있으나, 순응 제어 기법에서는 입력의 크기에 대한 비례 출력(proportional output)을 내보내 주는 것이 중요하고, 충격력과 사용

자의 의도를 구분해 내는 것 또한 중요하다. 단, 이 논문에서 순응 제어 기법을 구현하는 것은 로봇 말단부의 방위가 고정되어 있을 경우로 한정한다.

먼저, 같은 힘의 크기에 대해서 충격력의 신호파형과, 사용자의 의도로 미는 힘의 신호 크기를 보면 다음과 같다(그림 3.3.2.40 참조). 이것은 로봇의 말단부에 x방향으로 힘을 주었을 경우 힘-토크 센서의 x축으로 전달되는 힘의 세기와 변화율, 가속도에 대한 그래프를 나타낸 것이다.

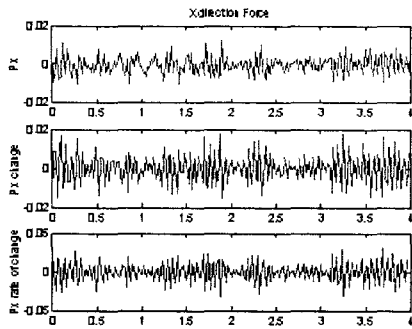


(a) 사용자의 의도

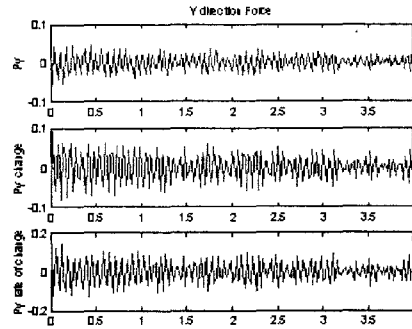
(b) 충격 신호

그림 3.3.2.40. 사용자의 의도와 충격에 의한 신호 비교

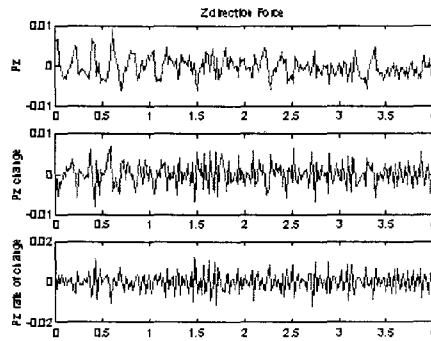
그리고, 로봇의 움직임에 대해서 힘-토크 센서에 측정되는 신호는 동작으로 인한 잡음 신호라고 볼 수 있다. 로봇의 말단부를 직교 좌표계에서 +y방향으로 이동시켰을 때 측정되는 신호를 보면 다음과 같다(그림 3.3.2.41 참조).



(a) x 방향 잡음 신호



(b) y 방향 잡음 신호



(c) z 방향 잡음 신호

그림 3.3.2.41. 로봇의 움직임에 대한 잡음 신호

이와 같은 로봇의 각 방향 움직임과 사용자의 힘을 측정된 결과를 바탕으로 각 입출력의 멤버십 함수의 형태를 결정하면, 다음과 같은 퍼지입출력 형태가 얻어진다(그림 3.3.2.42 참조).

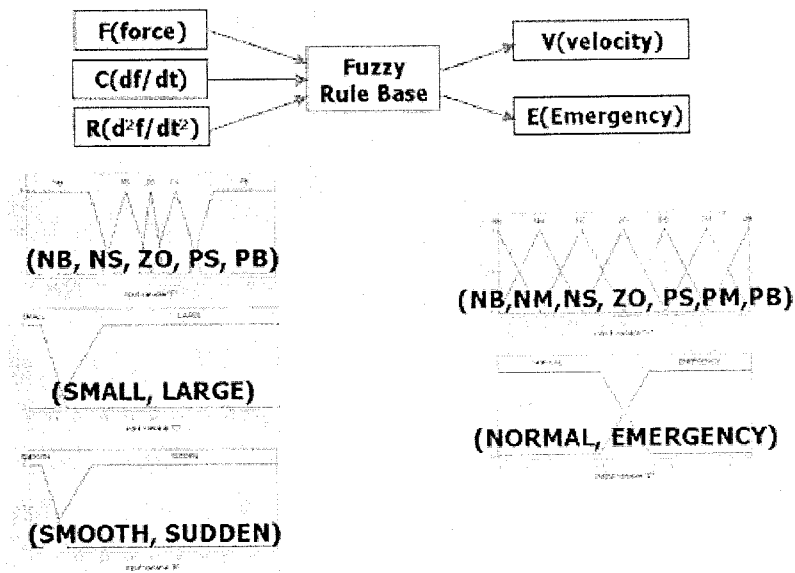


그림 3.3.2.42. 순응 제어를 위한 퍼지 멤버쉽 입출력 함수

이렇게 정의한 입출력 멤버쉽 함수에 대해, 작은 힘에 대해 변화율이 작고 갑자기 변화하는 신호는 잡음이라고 볼 수 있다. 그리고 힘의 크기가 크고 큰 변화율에 대해 갑자기 변화하는 힘은 충돌에 의한 것으로 보아 긴급 정지상태를 내보낼 수 있도록 한다. 나머지 부분에서는 사용자의 의도로 간주하여 출력의 신호를 조절하는 룰을 정하면 된다 이를 바탕으로 17개의 퍼지 룰(fuzzy rule)을 가진 룰베이스(rule-base)를 정하면 다음과 같다(그림 3.3.2.43).

```

If F is ZO then V is ZO and E is NORMAL
If F is NS and
  C is SMALL and R is SUDDEN then V is NS and E is NORMAL
  C is SMALL and R is SMOOTH then V is NM and E is NORMAL
  C is LARGE and R is SUDDEN then V is ZO and E is EMERGENCY
  C is LARGE and R is SMOOTH then V is NB and E is NORMAL
IF F is NB and
  C is SMALL and R is SUDDEN then V is NM and E is NORMAL
  C is SMALL and R is SMOOTH then V is NB and E is NORMAL
  C is LARGE and R is SUDDEN then V is ZO and E is EMERGENCY
  C is LARGE and R is SMOOTH then V is NB and E is NORMAL
If F is PS and
  C is SMALL and R is SUDDEN then V is PS and E is NORMAL
  C is SMALL and R is SMOOTH then V is PM and E is NORMAL
  C is LARGE and R is SUDDEN then V is ZO and E is EMERGENCY
  C is LARGE and R is SMOOTH then V is PB and E is NORMAL
IF F is PB and
  C is SMALL and R is SUDDEN then V is PM and E is NORMAL
  C is SMALL and R is SMOOTH then V is PB and E is NORMAL
  C is LARGE and R is SUDDEN then V is ZO and E is EMERGENCY
  C is LARGE and R is SMOOTH then V is PB and E is NORMAL

```

그림 3.3.2.43. 순응제어를 위한 퍼지 룰 베이스

이러한 퍼지 룰 베이스를 통과한 출력값에 대해 비퍼지화기(defuzzifier)는 무게중심법(center of gravity)를 사용하여 신호를 구분한 결과를 보면 다음과 같다. 그림 3.3.2.44는 사용자의 의도와 충격력을 구분하여 정상 상태와 긴급 상태를 구분하는 것을 보여 주고있으며, 그림 3.3.2.45은 로봇의 움직임에 대해서 잡음 신호가 들어 왔을 때 출력 신호를 내보내지 않는 것을 보여주고 있다. 이것은 로봇 말단부의 +x 방향 움직임에 대해서 잡음 신호에 대한 결과를 보여주는 것으로, x방향의 출력 속도는 사용자의 입력 신호에 대해 나가고 있으나, y, z 방향의 신호에 대해서는 출력 신호가 'ZO' 영역이 들어가 있음을 볼 수 있다.

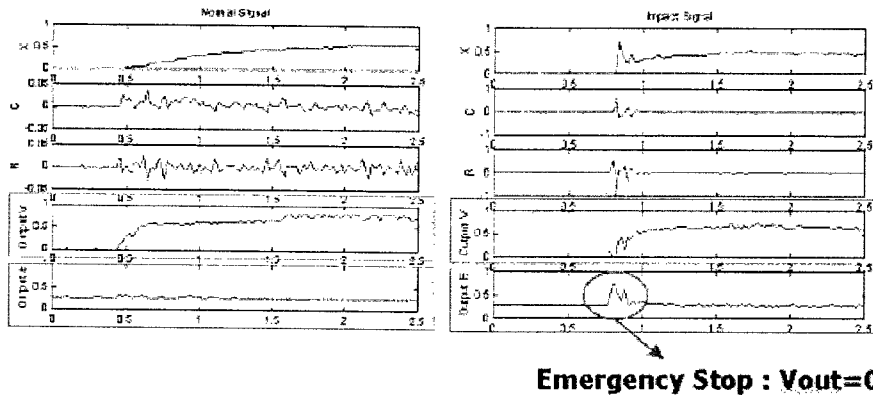


그림 3.3.2.44. 사용자의 의도와 충격력의 구분

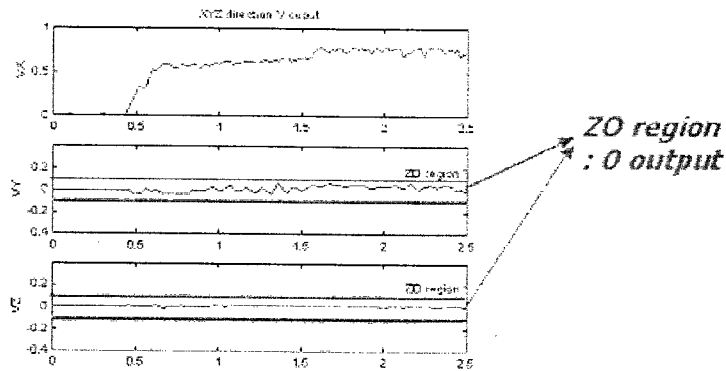
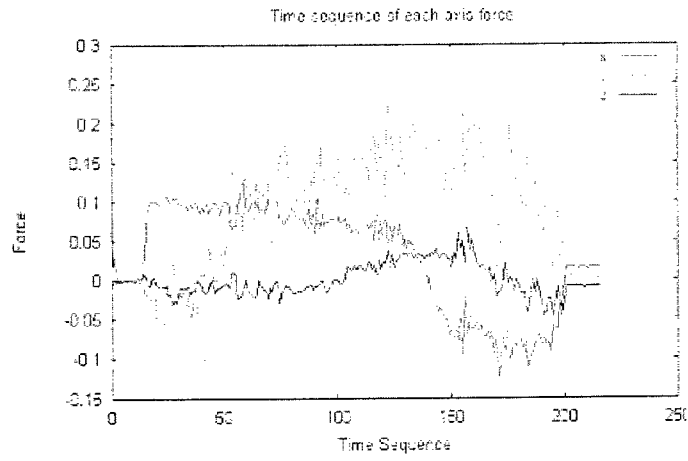
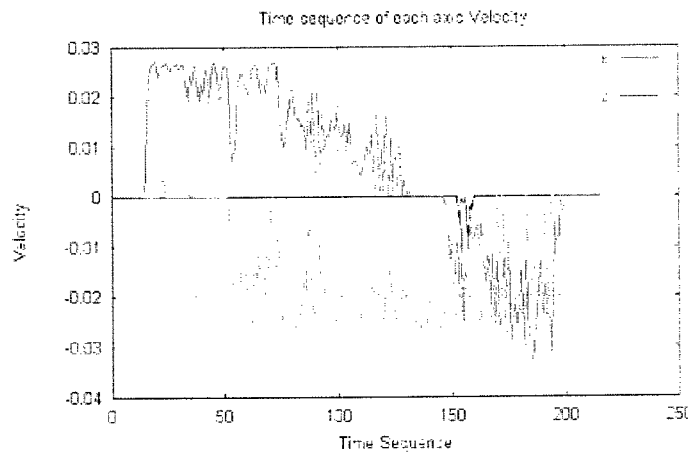


그림 3.3.2.45. 잡음 신호의 분리 결과

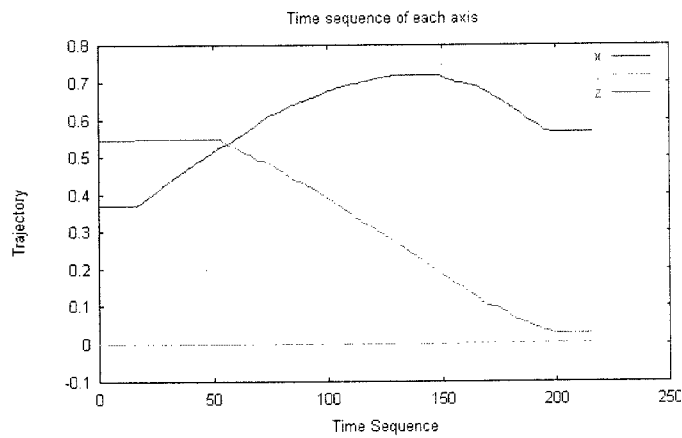
이를 바탕으로 순응제어를 실험해 보았을 때, 각 방향의 힘신호에 따라, 그에 해당하는 속도 출력 및 로봇 말단부의 경로 그래프를 그려 보면 다음과 같다(그림 3.3.2.46 참조).



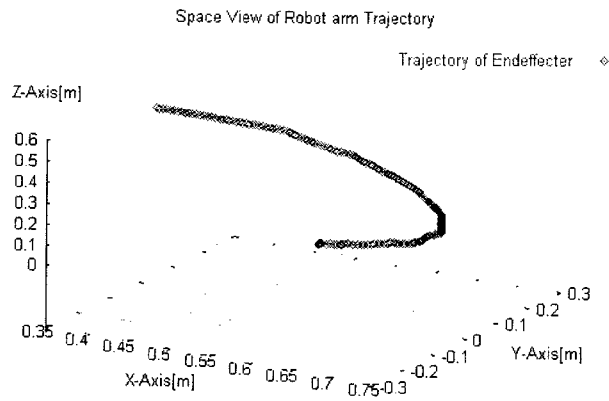
(a) 힘-토크 센서의 입력 신호



(b) 퍼지물을 통과한 속도 출력



(c) 시간에 따른 말단부 위치의 각 축에 대한 그래프



(d) 로봇 말단부의 3차원 공간상에서 경로 그래프
 그림 3.3.2.46. 순응 제어에 따른 말단부의 이동 경로

이상의 결과로부터, 사용자의 의도에 따라 퍼지 순응 제어 기법을 이용하여 직관적인 로봇 제어 방법을 제시할 수 있으며, 충격 신호에 대해서도 긴급 상황임을 인지할 수 있다. 그리고 이를 로봇의 행동에 적용하기 위해 SI(Safety Index)의 개념을 두어 로봇의 움직임에 반영하게 된다.

로봇의 작업 공간(Workspace)는 로봇의 기본 형태에 따라 달라지는데, 일반적인 PUMA 형태의 로봇팔의 기구학을 풀어보게 되면, 그림 3.3.2.47와 같은 구형을 띄게 된다.

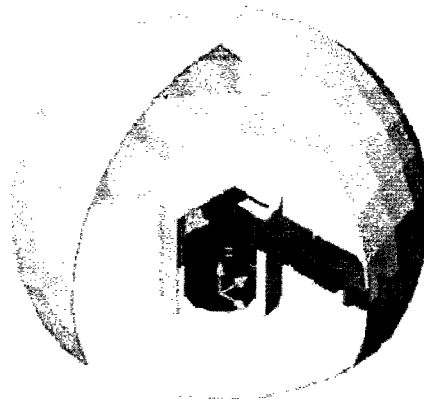


그림 3.3.2.47. PUMA arm의 작업 공간

그러나, 실제 로봇팔 시스템은 로봇 팔 자체의 형태와 두께, 말단부의 모양과 크기 그리고 연결되어 있는 지지대의 형태에 따라 작업 영역이 축소된다. 그리고 이에 대한 것을 실시간으로 수식으로 모든 경우를 고려하기는 어렵기 때문에 사용하고 있는 파워큐브를 대상으로 작업 영역에 대한 경계 조건(boundary condition)을 실험적으로 구해보면 다음 세식의 교집합으로 나타난다.

$$({}^e x_0)^2 + ({}^e y_0)^2 + ({}^e z_0 - 0.17)^2 < 0.82^2$$

$${}^e z_0 > -0.2$$

$$({}^e x_0)^2 + ({}^e y_0)^2 < 0.1^2 \quad \text{or} \quad {}^e z_0 > 0.3$$

하지만, 모든 작업에 대해서 이러한 경계 조건을 갖는 것이 아니라, 말단부의 방위에 따라서 범위가 축소될 수 있고, 로봇팔의 가동 범위 안에 있어라도 작업의 종류에 따라 오동작을 하는 범위일 수 있다. 예를 들어, 컵잡기 작업의 경우, 컵을 잡는부분은 테이블의 위치에 따른 테이블 위의 범위로 한정되며 순응 제어를 하는 부분은 고정된 방위 내에서 구현된 것이므로 일반적인 PUMA 로봇 팔의 작업영역보다 한정된 범위를 가지게 된다. 따라서 각 작업 별로 작업 영역을 설정하고 이를 기준으로 로봇팔의 움직임을 판별하여 그 결과를 사용자에게 제공해야 한다. 이를 정리하면 다음과 같다.

물체 잡기 작업 영역 작업 영역을 탁자 위와로봇의 직교 축에서의 제어 한계 범위로 한정하게 되면, 그림 3.3.2.48으로 도시할 수 있으며, 경계 조건은 다음 세식의 교집합으로 나타난다.

$$({}^e x_0)^2 + ({}^e y_0)^2 + ({}^e z_0 - 0.17)^2 < 0.82^2$$

$$0.1 < {}^e x_0, -0.30 < {}^e y_0 < 0.30, -0.20 < {}^e z_0 < 0.67$$

$$({}^e x_0)^2 + ({}^e y_0)^2 < 0.1^2 \quad \text{or} \quad {}^e z_0 > 0.35$$

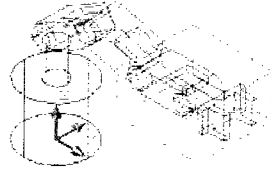


그림 3.3.2.48. 컵잡기 작업의 작업 영역

또한 순응 제어 작업 영역 말단부 축(end effector coordinate)의 z 방향을 베이스 축(base frame)의 x 방향으로 고정시켰을 때, 작업 영역은 그림 3.3.249로 도시할 수있으며, 경계 조건은 다음의 세식의 교집합으로 나타난다.

$$({}^e x_0)^2 + ({}^e y_0)^2 < 0.1^2 \quad or \quad {}^e z_0 > 0.35$$

$$0.1 < {}^e x_0, -0.30 < {}^e y_0 < 0.30, -0.20 < {}^e z_0 < 0.67$$

$$({}^e x_0)^2 + ({}^e y_0)^2 + ({}^e z_0 - 0.17)^2 < 0.82^2$$

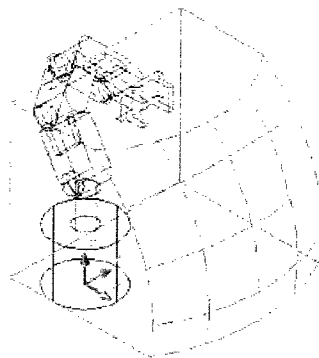
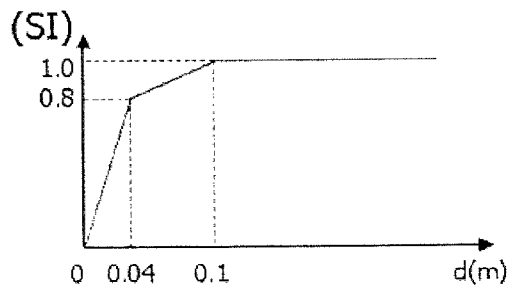


그림 3.3.2.49. 순응제어의 작업 영역

위와 같이 각 작업에 따른 작업 영역을 한정하였을 때 자코비안(Jacobian)을 사용하여 직교 좌표계에서 속도 제어를 하는 경우 로봇의 말단부가 작업 영역의 경계면으로 가까이 갈수록 로봇의 기구학적 특이점(kinematic singularity)에 가깝게 되어 오동작을 할 가능성이 높아지므로 사용자에게 제공되는 정보는 각경계영역의 x, y, z방향으로의 최단 거리를 기준으로 다음 그림 3.3.2.50와 같이 SI에 대응시키도록 한다. 다음 식에서 dx, dy, dz 는 각각 말단부의 위치로부터 x, y, z 축의방향으로 경계면과의 거리를 나타낸다.



$$d = \min(dx, dy, dz)$$

그림 3.3.2.50. SI(Safety Index)

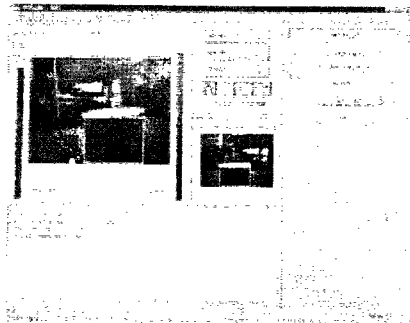
그리고 SI는 앞서 설명한 퍼지 순응제어의 상태 출력(State output)과도 연결되어 상태가 Emergency에 가깝게 되면, SI를 낮추어 긴급 정지 신호를 보내게 되며, 사용자의 의도가 로봇을 진행하는 방향이라 하더라도 로봇 시스템의 판단에 의해서 정해진 작업의 작업영역을 벗어나려고 한다면 SI가 낮아지게 되어 정지 신호를 보내게 된다.

3) 물체 잡기 작업에의 적용

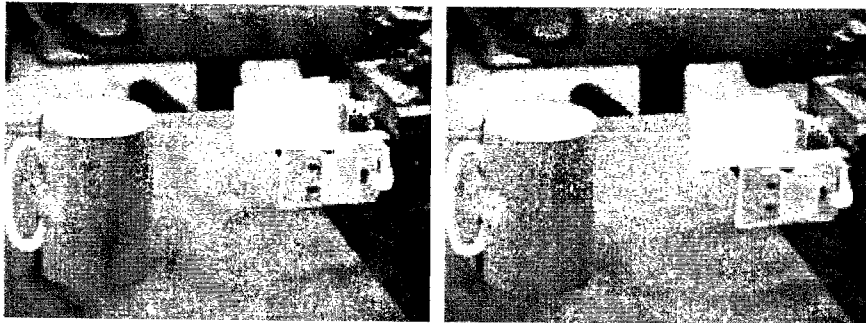
물체를 잡기 위해 초기 조건이 자동 작업을 할 수 있는 범위에 있을 경우, 초기 위치 이동-물체 인식-그리퍼에 대한 센터링 작업-카메라 헤드 제어를 통한 거리 추출-물체 근처로의 이동-물체 잡기 및 들어올리기의 순서로 작업이 진행된다. 이 경우 갑작스런 조명의 변화를 제외하고 컵 잡기 작업의 경우는 센서 융합을 이용하여 90%이상의 작업 성공률을 가진다(그림 3.3.2.51 참조)



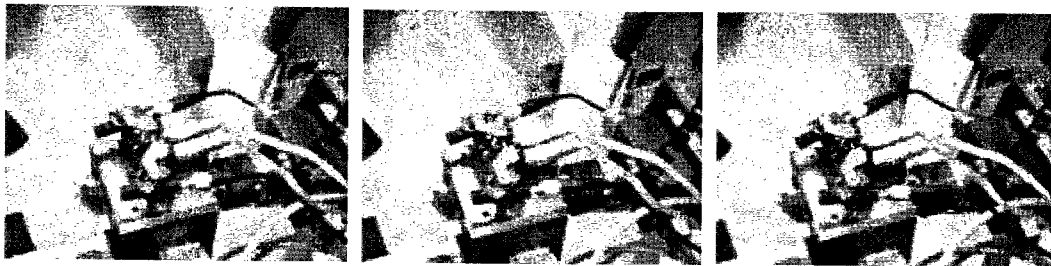
(a) 초기 위치로 이동



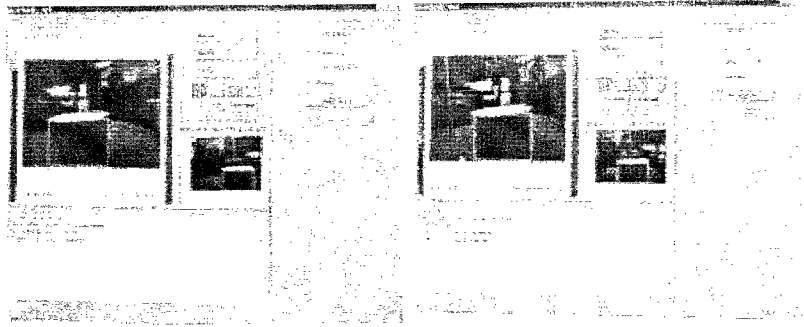
(b) 디스플레이 패널의 인식 결과



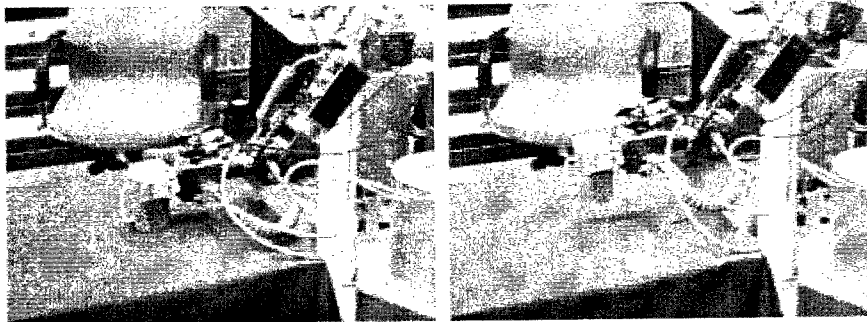
(c) 그리퍼에 대한 물체 센터링



(d) 카메라 헤드 제어를 통한 거리 추출



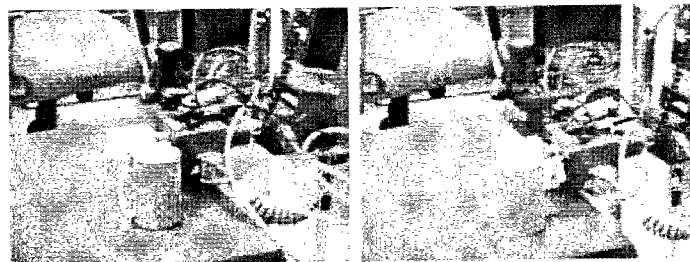
(e) 디스플레이 패널을 통한 센터링 결과 표시



(f) 물체 근처로의 이동 및 잡기 작업

그림 3.3.2.51. 자동 작업에 의한 물체 잡기 과정

하지만, 이것은 물체가 자동 작업을 수행할 수 있는 범위 이내에 있을 경우를 보여준 것이고, 그렇지 않을 경우는 작업 수행을 할수가 없게 된다. 그림 3.3.2.52은 로봇팔의 초기 위치에 대해, 물체가 카메라의 인식 범위 밖에 있어서 물체를 치게 되는 경우를 보여 주며, 그림 3.3.2.53은 물체의 위치에 대해서 로봇 팔의 초기위치가 너무 벗어나 있어서 물체를 찾지 못하는 경우를 보여준다.



(a)

(b)

그림 3.3.2.52. 초기 위치오차로 인한 물체와의 충돌



(a)

(b)



(c)

그림 3.3.2.53. 초기위치 오차로 인한 물체 찾기 실패

이러한 경우에는 순응 제어를 통하여, 물체를 볼 수 있는 위치 근처까지 사용자가 도와 주게 되면 성공적으로 물체를 찾고, 잡기 작업을 할수 있다. 앞서도 밝힌 바 있지만, 로봇 팔의 말단부를 원하는 위치로 이동시키기 위하여 음성이나, GUI를 통하여 명령을 전달하는 방법은 사용자에게 있어서 반복적인 명령의 수행이 필요하고 그 과정 또한 상당히 불편하게 된다. 반면, 로봇 팔을 원하는 방향으로 밀거나 당겨서 원하는 위치에 이동시키는 방법은 상당히 직관적인 방법으로 사용자가 쉽게 명령을 전달하는 방법이 된다. 그림 3.3.2.54는 순응 제어를 통하여 물체 근처로 로봇 팔의 말단부를 이동시키는 결과를 보여주며, 이 때 사용자는 손을 사용할 수 없는 장애인으로 가정하여 옷으로 손을 감싸고 실험하였다.

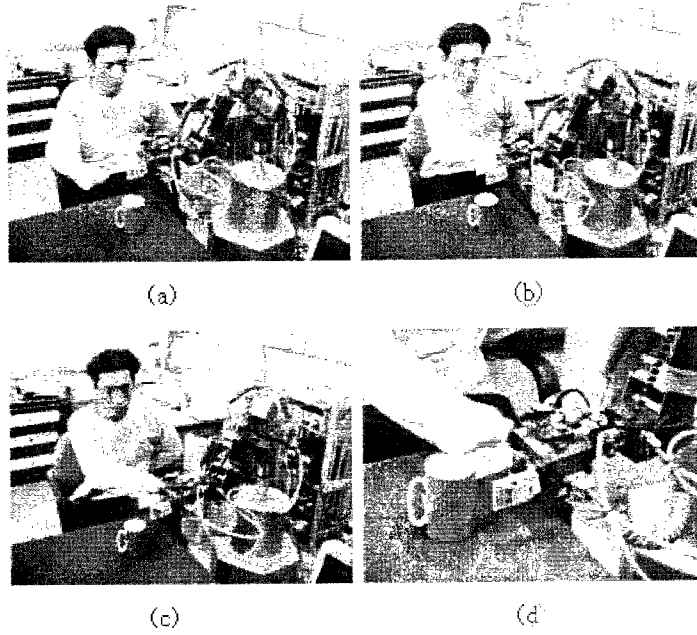


그림 3.3.2.54. 순응 제어를 통한 말단부의 물체 근처 이동

그림 3.3.2.55은 잡은 컵을사용자 근처로 가져오거나, 사용자가 이를 거부할 경우에 순응 제어를 사용하는 것을 보여주고 있다.

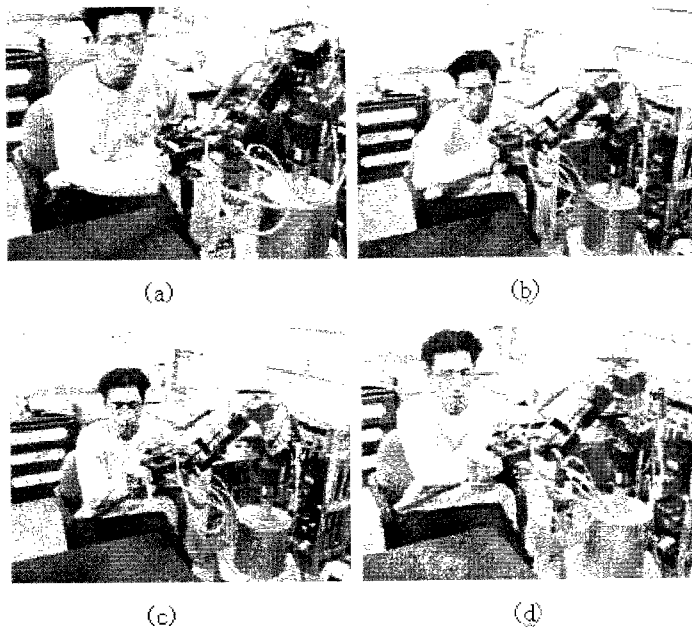


그림 3.3.2.55. 순응제어를 통한 사용자의 의도 전달

이러한 과정 및 물체를 제대로 인식하지 못했을 경우 인간-로봇 공동 작업을 통한 물체의 재인식 과정을 통하여 작업을 성공적으로 진행할 수 있게 되며, 이는 디스플레이 패널을 사용하여 사용자와 로봇 시스템간에 자신의 상태 및 의도가 효율적으로 교환되기 때문이다. 따라서, 초기 위치 오차 및 주변 상황 변화로 인한 조건 속에서도 90%이상의 작업 성공률을 가지게 된다. 그리고, 퍼지 순응 제어에 의한 결과물로서 외부의 충격력을 감지하여, 사용자의 의도된 힘과 충돌 신호를 감지하여 사용자의 안전성(safety) 또한 확보할 수 있게 된다.

(4) 표정 인식을 통한 사용자 의도 파악 기술 향상

본 연구에서는 사용자 얼굴 인식 및 표정 인식 과정을 수행하기 위하여, 얼굴 영상 추출 단계에서 인식 단계에 이르는 전 과정에 대한 체계적 구조를 제시하고, 각 단계 별로 강인한 영상 처리를 위한 방안을 제안하였다. 그림 3.3.2.56은 본 연구에서 이용한 표정 인식을 위한 전체 단계의 흐름을 나타낸다.

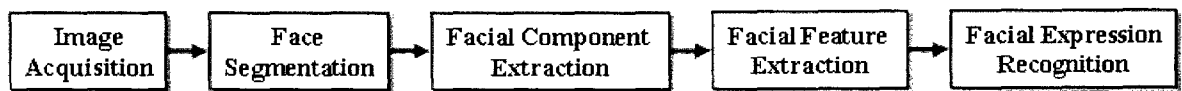


그림 3.3.2.56. 표정 인식을 위한 영상 처리의 전체 흐름도

(가) 강인한 얼굴 분할

본 연구에서는 얼굴 분할을 위해, 주성분분석(Principle Component Analysis; PCA) 과정에 기반해 얻어진 컬러 공간(식 (3.3.2.1))을 사용하였다. 이 컬러 공간은 기존에 널리 알려진 I1I2I3 컬러 공간(식 (3.3.2.2))[35]의 유도에 사용된 과정과 유사하지만, 피부색 픽셀을 중심으로 한 주성분분석을 통해 피부색 추출에 최적화되어 있다는 특징을 갖는다.

$$\begin{bmatrix} I_{P1} \\ I_{P2} \\ I_{P3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.322 & 0.315 & 0.363 \\ -0.398 & -0.133 & 0.469 \\ -0.341 & 0.516 & -0.143 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \quad (3.3.2.1)$$

$$\begin{aligned} I_1 &= (R+G+B)/3 \\ I_2 &= R-B \\ I_3 &= (2G-(R+B))/2 \end{aligned} \quad (3.3.2.2)$$

제안된 컬러 변환을 사용한 경우 기존의 다양한 컬러 공간에 비하여 피부색 추출에 있어서 효과적인 결과를 얻었다(표 3.3.2.10)¹³⁾. 성능 비교를 위해 사용된 지수는 참조 문헌 [36]를 참고하였다.

13) 제안된 컬러 공간은 C(%) 관점에서 기존의 HLS 컬러공간에 비해 0.1% 정도 성능이 낮지만, 320×240, True color 영상에 대한 컬러변환 수행결과, 0.11sec를 소요함으로써 HLS 변환에 필요한 0.17sec보다 빠른 시간에 수행된다.

표 3.3.2.10. 여러 가지 컬러 공간에 대한 피부색 추출 성능 비교

	rgb	HLS	I1I2I3	YCrCb	Proposed
C (%)	88.62	91.1	89.52	90.18	91.0
SE (%)	0.9	0.9	0.8	0.9	0.86
NSE (%)	10.52	8.02	9.66	8.92	8.16

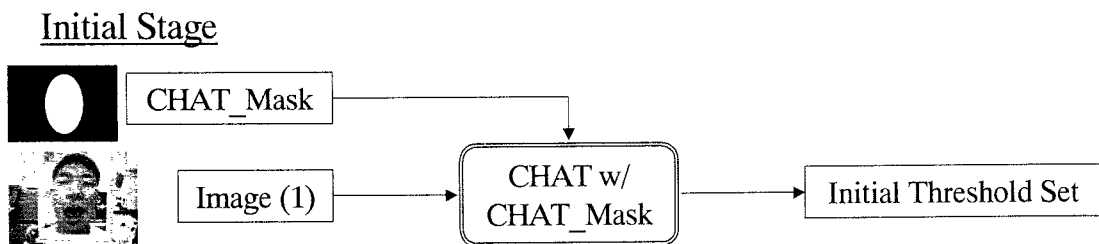
여기서, C (Percent Correct): 정확히 구분된 픽셀(Pixel)의 백분율(Percentage).

SE (Skin Error): 피부가 아닌 픽셀이 피부로 구분된 백분율.

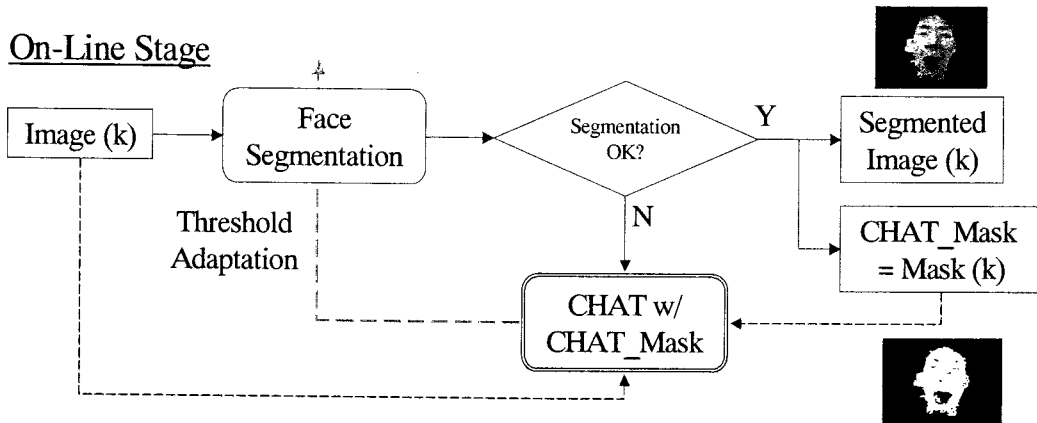
NSE (Non-skin Error): 피부인 픽셀이 피부가 아닌 것으로 구분된 백분율.

얼굴 분할의 구체적인 방법으로는, 컬러 히스토그램 기반 임계치 자동 결정(Color Histogram Adaptive Thresholding: CHAT) 기법을 이용한 얼굴 분할을 사용하였다(그림 3.3.2.57)[37]. 여기서의 가정은 조명 변화가 심한 경우, 얼굴의 움직임은 거의 없다는 것이다.

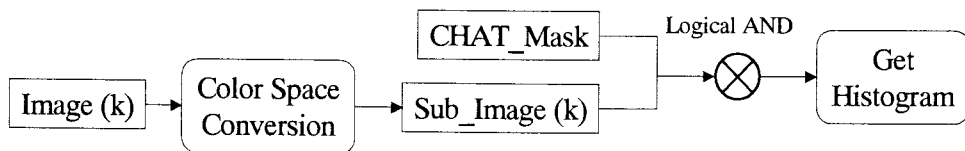
CHAT 기법에 기반한 얼굴 분할에서는, 초기에 입력된 영상은 초기의 CHAT_Mask와 병합되어 초기 임계치를 결정(그림 3.3.2.57(a))하게 되고, 그 이후의 연속된 입력 영상의 경우, 얼굴 분할에 오류가 없을 경우 현재 분할된 Mask 영상을 CHAT_Mask로 갱신하게 된다(그림 3.3.2.57(b)). 만약, 얼굴 분할에 오류가 있을 경우 CHAT 기법을 이용하여 새로운 임계치를 결정하게 된다(그림 3.3.2.57(b)). CHAT 기법은 입력된 영상의 컬러 공간 부영상(Color Space Subimage)과 CHAT_Mask의 논리곱(Logical AND)을 통해 컬러 히스토그램을 구하고 무게중심(COG)을 이용, 임계치를 결정하는 과정이 그 핵심이다(그림 3.3.2.57(c)).



(a) 초기에 입력된 영상에 대한 임계치 결정



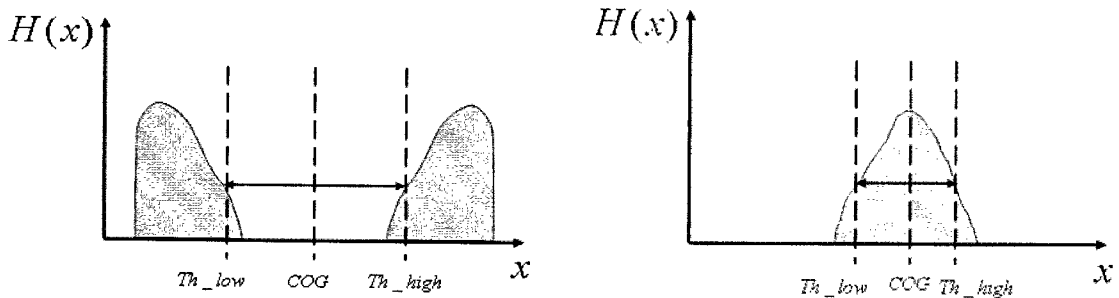
(b) 연속된 영상 입력에 대한 임계치 자동 결정 과정



(c) CHAT 기법의 핵심 프로세스

그림 3.3.257. 컬러 히스토그램에 기반한 임계치 자동 결정 방법.

그림 3.3.257(c)에서 컬러 히스토그램을 구하고, 새로운 임계치를 얻기 위해서는 무게 중심법(Center of Gravity; COG)에 의해 히스토그램 분포의 중심점을 얻고 일반적으로 피부색 영역에 대하여 얻어지는 두 가지 분포를 기준으로 임계치 탐색 방법을 이용한다. 그림 3.3.258는 피부색 영역에 대해 얻어지는 두 가지 분포 및 임계치 탐색 방법을 도시하고 있다.



(a) 쌍봉형(Bi-modal Type) 분포

(b) 단봉형(Uni-modal Type) 분포

그림 3.3.258. 피부색 영역에 대한 두 가지 대표적 히스토그램 분포와 COG 기반 임계치 탐색

그림 3.3.2.59은 본 연구에서 제안한 CHAT 기법에 기반한 임계치 자동 결정 방법을 이용한 얼굴 영역 추출의 결과를 영상의 시간적 흐름에 기준하여 나타낸 것이다. 초기의 추출 영상은 얼굴 이외의 다양한 잡영(Artifacts)을 포함하고 있지만, 시간이 흐름에 따라 외란적 요소가 제거되고 최종적으로는 얼굴 영상 부분만 추출함을 알 수 있다.

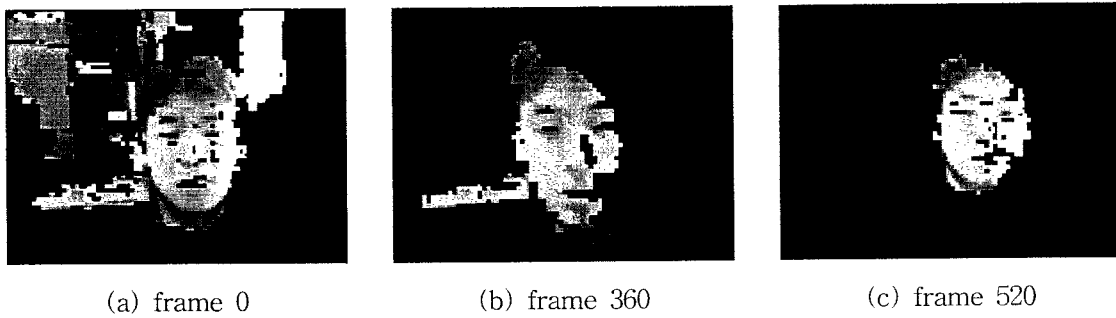


그림 3.3.2.59. CHAT 기법에 기반한 얼굴 영상 추출 결과

(나) 강인한 얼굴 요소 추출 및 표정 인식을 위한 특징 추출

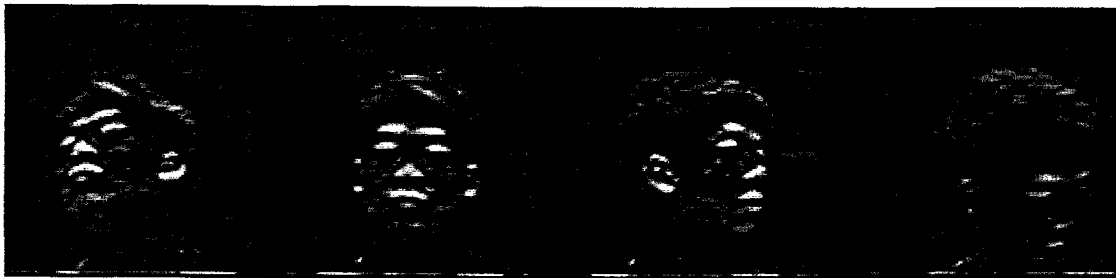
본 연구에서는 (가)에서 추출된 얼굴 영역 내의 얼굴 요소 추출을 위해 Coarse-to-Fine 논리에 따른 접근 방식을 이용한다[38]. Coarse-to-Fine 논리에 따르면, 대략적인 얼굴 요소의 배치에 대한 인식을 행한 다음, 그 정보를 적극적으로 이용하여 세부적인 얼굴 요소의 배치를 인식하는 것을 그 과정으로 한다.

1) T자 기반형 가변 템플릿을 이용한 대략적인 얼굴 요소 인식

다양한 얼굴 영상에 대한 관찰 결과, 대부분의 얼굴 영상은 얼굴 요소의 특성상 수평 에지(Edge) 성분이 많은 것으로 알려져 있다. 이러한 수평 에지 성분의 전체적인 배치 구조에 의하면 대부분의 얼굴 요소는 T자 형태를 보이고 있음을 알 수 있다(그림 3.3.2.55).



(a) 다양한 방향에 대한 얼굴 영상



(b) (a) 영상에 대한 수평 에지 영상



(c) (b) 영상에 대한 T자 기반형 템플릿 매칭

그림 3.3.2.60. 얼굴 영상에 대한 수평 에지와 T자 기반형 템플릿 매칭

그림 3.3.2.60에서 나타낸 것처럼 다양한 방향을 바라보는 사용자 얼굴에서 T자 형태는 일관되게 나타나지만, 각 부분 요소(T자 템플릿의 상단 가로줄, 하단 세로줄 등)의 변형(Deformation) 현상을 관찰할 수 있다. 가변형 템플릿 매칭(Deformable Template Matching) 기법은 이러한 일관된 형태를 갖는 여러 가지 변형된 얼굴 요소를 찾는 데 용이하게 사용될 수 있다[39].

본 연구에서는 T자의 각 요소를 다음과 같이 모델링하여 얼굴 요소를 추정하는데 사용하였다. 우선, T자형 가변 템플릿은 상단 가로줄의 두께, 길이, 수평선상에 대한 각도 및 하단 세로줄의 두께, 길이, 수직선상에 대한 각도로 모델링될 수 있다(그림 3.3.2.61).

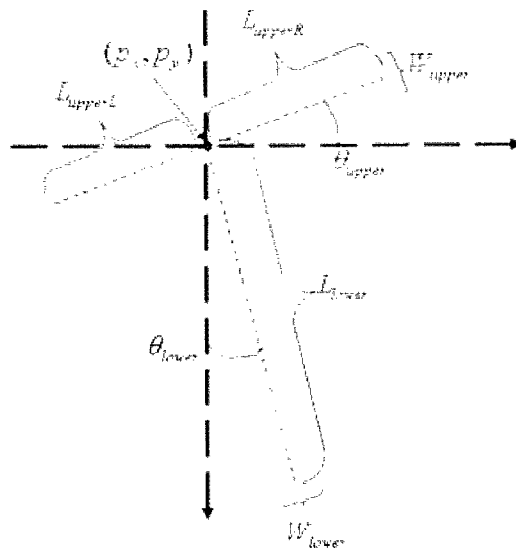


그림 3.3.2.61. T자형 가변 템플릿

얼굴 요소의 추출을 위해서 제안된 T자형 가변 템플릿을 실제 얼굴 영상과 매칭 (Matching)하는 과정에서는 우선 임의의 매개변수(Parameters)로 T자형 템플릿을 모델링 한 다음 얼굴 영상의 수평 에지 영상과의 매칭을 행한다. 얼굴 영역의 추출에 의해 얻어진 얼굴 영역 정보를 매개변수를 탐색하는 도메인(Domain)에 대한 제한조건으로 적용함으로써 탐색 시간을 감소시킬 수 있다.

2) 투영 정보의 그룹화에 의한 얼굴 요소 세부 위치 인식

본 연구에서는 수평/수직 투영 정보의 그룹화를 이용한 얼굴 요소 추출 방법을 Fine 접근 방법의 구현을 위해 사용하였다(그림 3.3.2.62)[40]. 여기서 얼굴은 거의 정면을 향하는 것으로 가정하였다(얼굴 요소가 모두 추출되는 범위). 우선, 수직 투영 정보를 각각 그룹화 한 후 각 그룹의 면적, 투영면에 대한 길이 정보, 가우시안(Gaussian) 가중치를 이용하여 얼굴 요소를 추출한다.

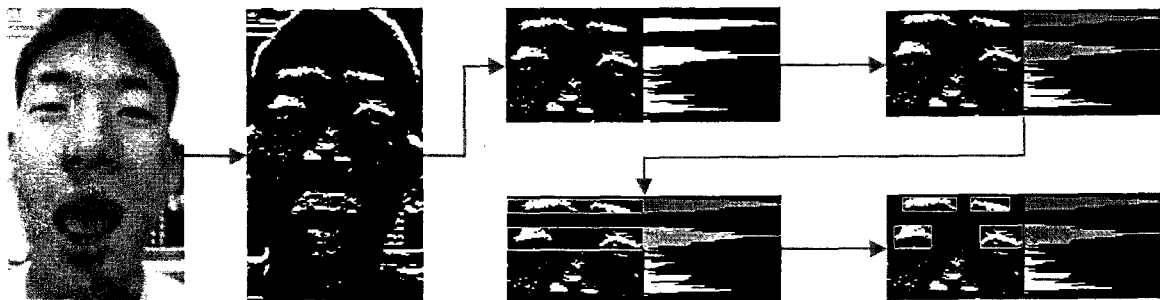


그림 3.3.2.62. 수평/수직 투영 정보의 그룹화를 이용한 얼굴 요소 추출 방법.

그림 3.3.2.63는 추출된 얼굴 요소의 예를 보이고 있다.

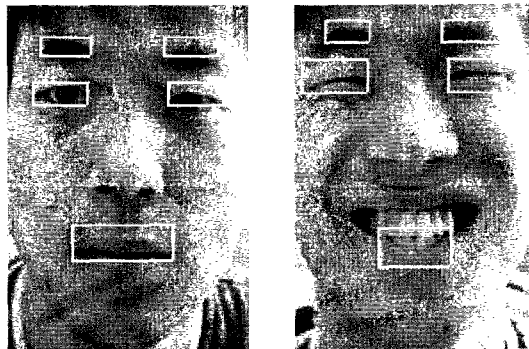


그림 3.3.2.63. 제안된 수평/수직 투영 정보의 그룹화를 이용한 얼굴 요소 추출 결과

3) 컬러 및 에지 정보에 기반한 입 영역의 인식

입 영역(좀 더 정확하게는 입술 영역)은 얼굴 전체 영역에 대하여 특징적인 컬러 공간, 수평 에지 성분에 의해 앞서 기술한 방법을 사용하지 않고도 쉽게 추출 가능하다. 본 연구에서도 그 목적에 따라 입 영역의 정보만이 필요한 경우에는 비교적 쉬운 방법을 이용하여 입 영역 인식을 수행하였다. 그림 3.3.2.64는 그 전체 과정을 도시하고 있다.

초기에 획득된 얼굴 영상(그림 3.3.2.64(a))은 컬러 변환을 통해 피부색 후보 영역 영상(그림 3.3.2.64(b))으로 변환되고, 얼굴 부위가 추출된다(그림 3.3.2.64(c),(d)). 최종적으로, 수평 에지 성분(그림 3.3.2.64(e))과 특정 컬러 공간(그림 3.3.2.64(f))만의 정보를 사용하여 입 부위가 추출되고(그림 3.3.2.64(g),(h)) 얼굴 영역 내부의 입 부위가 인식된다(그림 3.3.2.64(i)).

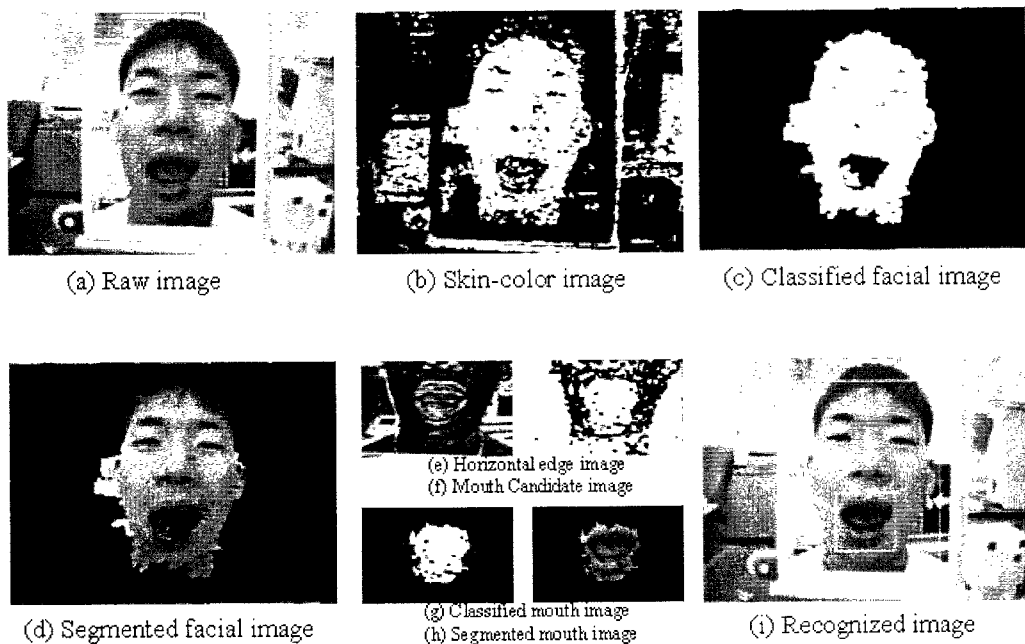


그림 3.3.2.64. 컬러 및 에지 정보에 기반한 입 영역의 추출

4) 추출된 얼굴 요소에 대한 표정 인식을 위한 특징 추출

이러한 과정을 통해 얻어진 얼굴 요소에 대하여 가버(Gabor) 필터[41]를 적용하여 그 계수를 특징으로 표정 인식을 행하였다. 사용된 가버 필터는 2가지 크기(10×10, 13×13 픽셀), 4가지 방향(0°, 45°, 90°, 135°)의 조합으로 구성되어 있다. 가버 필터 특징을 분석한 결과, 조명 변화에 무관한 특성을 얻을 수 있었다(그림 3.3.2.65, 표 3.3.2.11). 즉, 앞서 제안된 조명 변화 및 배경 변화에 무관한 얼굴 분할과 관련되어 가버 필터를 이용한 특징 추

출 역시 조명 변화에 무관한 특성을 보임으로써 강인한 얼굴 특징으로 사용 가능함을 알 수 있다.

가버 필터 특징을 수치적으로 분석하기 위해, 영상의 오른쪽 눈 내측의 가버 필터 응답을 밝기 변화('o'로 표시된 5단계의 밝기 변화, 각 단계는 평균 30 그레이 레벨(Gray Level)의 밝기 차이를 가짐)에 대하여 표시하면, 특정 방향(그림 3.3.2.65에서는 45°방향)에 대한 필터 응답은 다른 방향의 응답에 비하여 전체적인 변화가 둔감한 성질을 보이는 것을 알 수 있었다. 이것은 가버 필터의 크기 변화에 대해서도 유사한 결과를 얻을 수 있다. 표 3.3.2.11는 얼굴 요소의 12개 특징점¹⁴⁾ 각각에 대한 8가지 필터의 응답 특성을 '표준편차/평균×100'으로 정규화한 결과를 나타낸다(적을수록 조명 변화에 둔감).

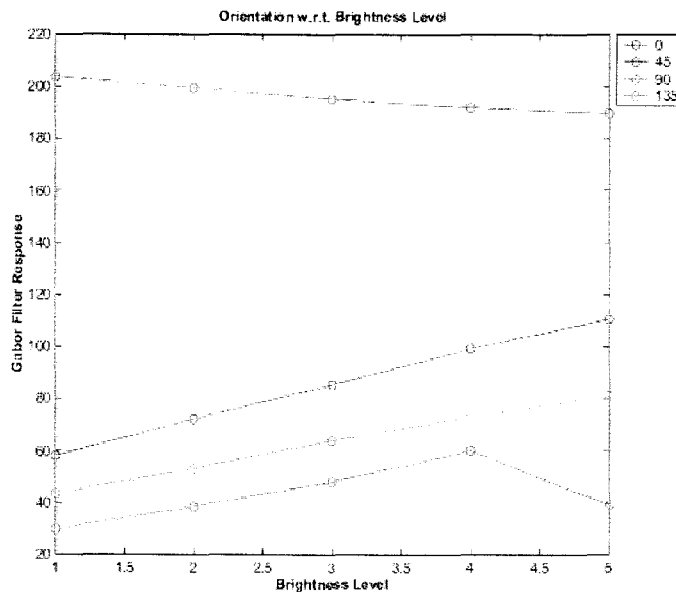


그림 3.3.2.65. 가버 필터 특징에 대한 분석 결과 (조명 변화를 중심으로)

14) '(다) 신경 회로망을 이용한 표정인식' 부분 참조.

표 3.3.2.11. 가버 필터 특징에 대한 분석 결과 (조명 변화를 중심으로)

	10×10				13×13			
	0°	45°	90°	135°	0°	45°	90°	135°
1	32.7	14.4	66.6	16.7	7.3	17.9	10.6	75.9
2	40.2	11.4	31.8	31.6	7.6	4.7	67.9	10.8
3	50.4	191.3	19.4	34.8	5.5	20.3	22.5	21.4
4	24.5	2.9	26.7	23.9	16.9	8.8	8.3	42.3
5	27.8	55.1	28.3	2.9	21.9	9.6	4.0	8.0
6	26.6	29.8	27.6	44.2	7.7	38.8	15.6	7.0
7	11.5	3.3	53.4	68.3	6.9	29.3	11.6	64.9
8	82.7	14.3	42.1	8.4	7.6	8.2	8.7	28.1
9	35.2	37.8	19.6	14.8	49.7	16.7	12.9	6.3
10	59.7	21.0	25.3	34.6	40.3	17.2	19.5	35.5
11	19.9	31.1	23.8	4.6	62.3	9.6	36.1	11.9
12	29.2	31.2	16.6	33.8	9.9	53.5	33.5	7.6

사용자 입의 개폐에 기반한 긍정/부정 의도 인식은 사용자와 로봇팔과의 상호작용을 위해 필수적인 기능이다. 이것을 위해, 입의 개폐와 관련한 가버 필터 기반 영상 특징[42]을 제안하였으며, 이 특징은 추출된 입 부위에 대한 가버 필터 결과의 절대 미분 및 투영 결과의 가우시안 가중치 합을 통해 입의 개폐 정보를 나타낼 수 있다(식 (3.3.2.3)).

$$f_G = \frac{\sum_{i=0}^{I_H-1} w_G(i) \cdot dy_P(i)}{\sum_{j=0}^{I_H-1} w_G(j)} \quad (3.3.2.3)$$

여기서, I_H 는 추출된 입 영상의 수직 크기,

$w_G(i)$ 는 가우시안 가중치,

$dy_P(i)$ 는 수직 투영치 $y_P(i)$ 의 절대미분치를 의미함.

사용자 눈의 개폐 정보는 앞서 제안된 입의 개폐 정보와 연관되어, 의도 파악 기능을 확장시키는 데 중요한 역할을 한다. 눈의 개폐 정도를 얻기 위하여 본 연구에서는 공간변화 비전기술의 대표적인 구현 방법인 로그-폴라 변환(LPM) 기법을 이용하였다. 로그-폴라 변환은 일반적으로 많이 사용되는 카테시안(Cartesian) 좌표계 기준의 영상을 극(Polar) 좌표계로 변환하고, 영상 중심부의 정보를 강조하기 위한 연산자로서 로그 연산자를 사용한다. 이러한 로그-폴라 영상 변환을 이용하면 영상의 중심부를 중심으로 한 특징을 추출하

기 용이한데, 특별히 로그-폴라 영상에서 많이 사용되는 특징으로는 bulge, Dip 특징이 있다[43]. Bulge 특징은 로그-폴라 변환된 영상에서 특정한 Blob이 가로축(영상 중심부에서 외측으로의 거리를 의미) 방향으로 분포하는 최대 거리를 의미하며, Dip 특징은 최소 거리를 의미한다.

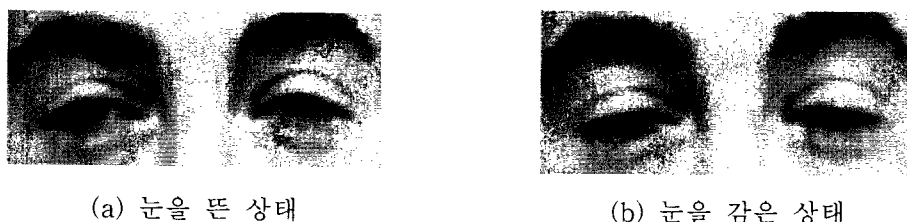


그림 3.3.2.66. 눈의 개폐에 대한 보기 영상

다양한 눈 영상에 대한 관찰을 통하여 눈의 개폐 정도는 눈꺼풀(Eyelid)의 형태와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다(그림 3.3.2.66). 즉, 눈을 뜬 상태에서는 눈꺼풀이 얼굴 상단 방향으로 볼록한 형태를 취하며 눈을 감은 상태에서는 눈꺼풀이 얼굴 하단 방향으로 오목한 형태를 취하게 된다. 따라서, 눈꺼풀을 눈 영상 내부에서 추출하고 그 모양에 대한 정보를 얻으면 눈의 개폐 정도를 쉽게 알 수 있다. 눈꺼풀의 모양을 얻기 위해서는 다양한 방법이 있을 수 있겠으나 비교적 간단한 방법이 로그-폴라 변환과 로그-폴라 변환된 영상의 주요한 특징인 Dip 특징을 이용하는 것이다. 눈을 뜬 상태에서는 눈꺼풀이 얼굴 상단 방향으로 볼록하므로, 로그-폴라 변환 영상에서는 Dip 값이 커지게 되고 눈을 감은 상태에서는 그 반대의 결과를 얻을 수 있다(그림 3.3.2.67)[44].

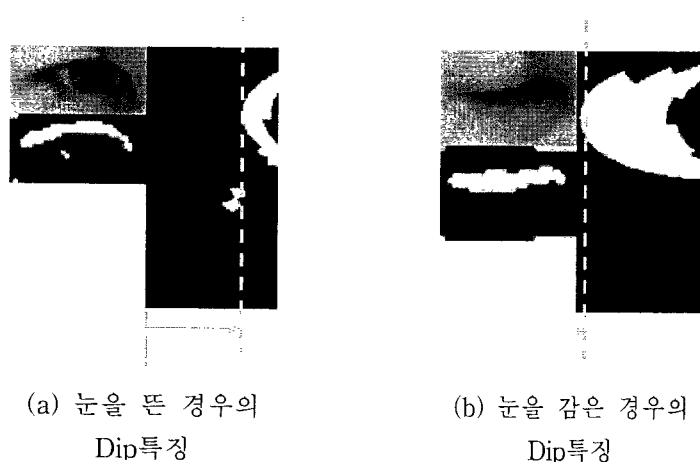


그림 3.3.2.67. 눈의 개폐에 따른 눈꺼풀 추출 및 Dip 특징 추출 결과

영구적인 얼굴 요소 중에서 눈썹은 눈과 밀접하게 관련되어 중요한 정보를 제공한다. 일

반적으로, 눈과 눈썹 사이의 거리가 인식에 있어서 중요한 요인으로 여겨지므로 본 연구에서도 얼굴 요소 추출 과정을 통하여 얻어진 눈과 눈썹의 위치 정보를 활용하여 얼굴 표정 인식을 위한 특징으로 사용한다.

시변적인 얼굴 요소는 영구적인 얼굴 요소의 추출이 끝난 이후에 영구적인 얼굴 요소의 위치로부터 대략적으로 추정해서 그 위치를 얻는다. 일반적으로 많이 사용되는 특징은 미간 사이의 주름(Nasal root wrinkles; NLR)과 양쪽 눈 바깥쪽에 위치한 까마귀발 주름(Crow's-feet wrinkles; CFW), 코와 입 언저리에 나타나는 주름(Nasolabial furrows; NLF) 등이다(그림 3.3.2.68)[45]. 이러한 시변적인 얼굴 요소에서의 특징 추출을 위해서는 비교적 간단한 영상 처리 방법의 일환으로, 가버 필터의 방향성 정보를 이용하였다. 즉, 각 주름이 일반적으로 나타나는 양상을 관찰하여 특정 주름의 인식을 위해서는 해당 방향성을 갖는 가버 필터를 적용하여 그 계수를 이용한 특징을 사용하였다. 이 방법은 간단하면서도 비교적 효과적으로 사용될 수 있다.

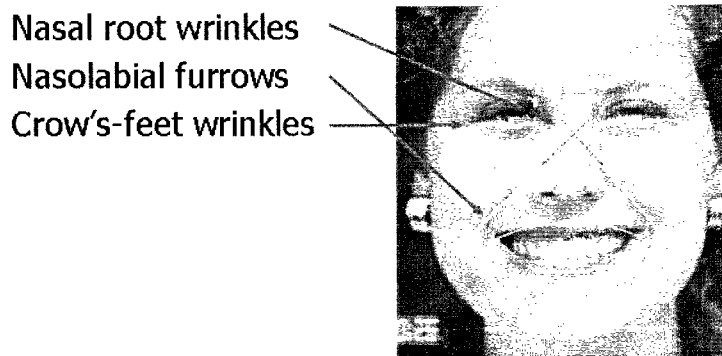


그림 3.3.2.68. 시변적인 얼굴 요소의 대표적인 예 [45]

(다) 신경 회로망을 이용한 표정인식

① 7가지 표정에 대한 인식

표정인식을 위한 기본 인식기로서 신경 회로망을 사용하였으며, 표정인식을 위한 대상으로는 7가지 표정(행복, 슬픔, 공포, 화남, 놀람, 역겨움의 6가지 기본 표정[46] 및 무표정)을 설정하였다. 또한, 간단한 의도 파악을 위한 긍정/부정 인식 문제도 역시 신경 회로망 기반의 접근 방법을 이용하여 해결하고자 하였다.

얼굴 표정에 대한 표준 영상으로 많이 사용되는 Ekman's DB(110가지의 얼굴 표정 영상 포함)를 이용하였으며, 기본 인식기에 기반한 표정인식의 안정성을 위하여 오프라인(Offline) 상에서 획득한 영상을 기반으로 인식 시스템 구성하여 그 가능성을 검토하였다.

신경 회로망의 학습에는 일반적으로 많이 사용되는 오차 역전파 학습 방법을 이용하였으며, 96개의 입력 노드, 7개의 출력 노드 및 1층의 은닉 노드(20개)로 구성된 3-layered 구조(96×20×7, 시그모이드(Sigmoid) 함수 이용)를 이용하였다. 신경 회로망의 입력 변수로는 12개의 특징점에 대한 각 8개의 가버 필터 계수를 사용하였다(그림 3.3.2.69).



그림 3.3.2.69. 12개 특징점 및 4가지 방향에 대한 가버 필터 응답 예.

7가지 표정에 대한 인식률을 측정된 결과, 전체적으로 81.2%의 인식률을 획득할 수 있었다(표 3.3.2.12). 표 3.3.2.12은 Confusion Matrix[47]라고 불리는 표현 방식으로써, 각 셀(Cell)은 '인식영상 수/해당학습영상 수'의 형식으로 구성된다. 예를 들어 '공포' 행(row)의 '공포' 열(column)의 '11/15'의 의미는 원래 주어진 학습영상에서는 공포에 해당하는 영상이 15개 존재하는데, 실제 인식기의 결과로 얻어진 결과는 11개만 공포로 분류되고 나머지는 다른 표정을 분류되었다는 의미를 나타낸다.

표 3.3.2.12. 7가지 표정에 대한 인식률 측정 결과

	행복	슬픔	공포	화남	놀람	역겨움	무표정
행복	13/18 (=72.2%)	1/0	0/0	2/0	0/0	1/0	1/0
슬픔	0/0	12/17 (=70.6%)	1/0	2/0	1/0	0/0	1/0
공포	0/0	0/0	11/15 (=73.3%)	1/0	2/0	0/0	1/0
화남	0/0	0/0	0/0	16/17 (=94.1%)	0/0	1/0	0/0
놀람	0/0	1/0	0/0	0/0	12/14 (=85.7%)	0/0	1/0
역겨움	0/0	1/0	0/0	0/0	1/0	13/15 (=86.7%)	0/0
무표정	0/0	0/0	1/0	1/0	0/0	0/0	12/14 (=85.7%)

앞서 기술한 신경망 기반 표정 인식 기술은 신경망의 구조 선정이라든가, 학습 매개변수의 설정 등에 대한 일반적인 해법이 제시되어 있지 않고 기존에 잘 알려진 인지심리학적 연구결과를 반영하기에 많은 어려움이 따른다. 이를 해결하기 위한 한 가지 방법으로 널리

알려진 것이 퍼지 신경망(Fuzzy Neural Networks)으로서, 90년대 중반에 제안된 이후로 다양한 연구가 이루어지고 있다. 퍼지 신경망에 대한 일반적 이론에 관한 사항은 참조 문헌 [48]를 참고하기 바란다.

본 연구에서 표정 인식을 위해 사용한 퍼지 신경망은 5개의 입력 노드와 7개의 출력 노드를 가진 형태로 되어 있다(그림 3.3.2.70).

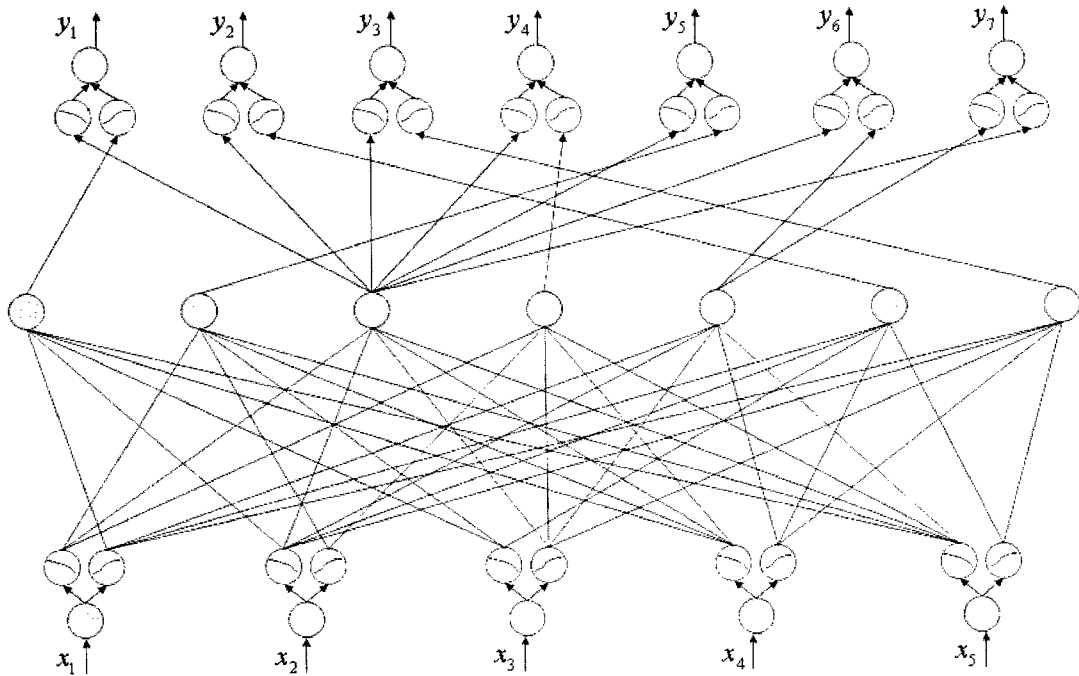


그림 3.3.2.70. 퍼지 신경망의 구조 (입력 5개, 출력 7개)

각 입력(x_i)과 출력(y_i)의 의미는 표 3.3.2.13와 같다. 입력의 각 항은 (나)에서 상술한 각 특징에 해당하며, 시변적 요소인 미간 사이 주름(NLR), 입술 주변의 주름(NLF)의 정도에 대한 정보는 앞서 신경망 기반 인식기 구성에 사용된 4가지 방향성에 대한 가버 필터 중에서 0° , 45° , 135° 세 가지 필터 응답의 조합을 이용해 얻게 된다.

표 3.3.2.13. 퍼지 신경망의 입력 및 출력 노드의 의미
(a) 퍼지 신경망의 입력 노드

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
의미	눈을 뜬 상태에 대한 정도	미간 사이 주름(NLR) 정도	입 주변 주름(NLF) 정도	입의 벌림에 대한 정도	눈과 눈썹 사이의 거리

(b) 퍼지 신경망의 출력 노드

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7
의미	행복	슬픔	공포	화남	놀람	역겨움	무표정

퍼지 신경망에 의한 얼굴 표정 인식 실험을 위해 역시 Ekman 등이 제안한 FACS 매뉴얼에 포함된 110개의 남녀 배우에 대한 얼굴 표정 영상을 사용하였다. 각 세부 영상에 대한 인식률은 가장 우측 열에 나타나 있으며, 전체 인식률은 92.7%를 얻었다. 표 3.3.2.14에서도 알 수 있지만, 무표정 영상의 경우 다른 영상에 비해 인식률이 낮은 것을 확인할 수 있다. 또한, 행복이나 화남과 같이 얼굴 표정의 정도 변화가 심하고 일반인들의 경우에도 표현하기 쉬운 감정의 경우 인식률이 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 따라서, 실제 얼굴 표정 인식 기술을 실생활에 응용하기 위해서는 표 3.3.2.15에서와 같이 인식률이 비교적 높은 표정을 중심으로 하는 응용 시스템을 구축하는 것이 필요하다.

표 3.3.2.14. 7가지 표정에 대한 인식률 측정 결과 (퍼지 신경망)

	행복	슬픔	공포	화남	놀람	역겨움	무표정	인식률(%)
행복	17/18	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/0	94.4
슬픔	0/0	15/17	0/0	0/0	0/0	0/0	2/0	88.2
공포	0/0	0/0	14/15	0/0	0/0	1/0	0/0	93.3
화남	0/0	0/0	0/0	17/17	0/0	0/0	0/0	100.0
놀람	0/0	0/0	1/0	0/0	13/14	0/0	0/0	92.9
역겨움	1/0	0/0	0/0	0/0	0/0	14/15	0/0	93.3
무표정	0/0	1/0	0/0	1/0	0/0	0/0	12/14	85.7

② 사용자 의도 파악에 의한 인간-로봇 상호작용

제안된 가버 필터 기반 영상 특징(식 3.3.2.2) 및 얼굴의 입에 대한 높이비와 면적비를 신경 회로망의 입력 특징으로 사용하여, 사용자의 의도 파악을 위한 인식기를 구성하였다.

의도 파악의 간단한 형태 중 하나인 긍정/부정에 대한 인식률 측정 결과, 92.2%의 인식률을 얻었다(표 3.3.2.15). 그림 3.3.2.71은 10개의 연속된 입모양 영상과 이에 대한 의도 파악 결과를 보여 준다. 입의 열고 닫음에 따라 긍정/부정에 대한 의도가 매우 유사하게 판단되는 것을 알 수 있다[42].

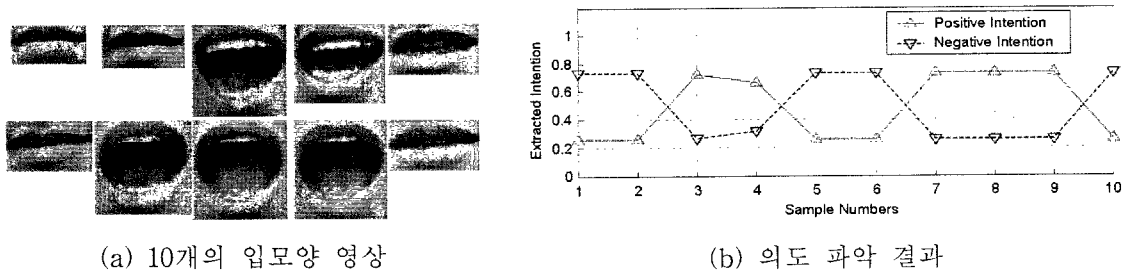


그림 3.3.2.71. 긍정/부정에 대한 인식률 측정 (10개의 입모양 영상 시퀀스(Sequence))

표 3.3.2.15. 긍정/부정에 대한 인식률 측정 결과

	긍정	부정
긍정	30/35 (=85.7%)	5/0
부정	1/0	74/75 (=98.7%)

사용자 입의 개폐에 따른 간단한 의도 파악 기능을 인간-로봇 상호작용 기술에 응용하기 위하여 본 연구에서는 KARES II가 수행할 12가지 작업의 대표격인 ‘물 마시기’ 작업에 포함된 탁자 위의 컵을 잡아서 사용자 입으로 가져다 주는 시나리오를 설정하였다. 간단히 요약하면, 사용자는 입의 열고 닫음에 의해 물 마시기 작업을 원하는가 원하지 않는가를 표현하게 되고, 고개를 흔드는 것에 의해서 물 마시기 작업을 원하지 않으니 로봇팔로 하여금 사용자 입으로부터 멀어지길 원한다는 의도를 표현하게 된다(그림 3.3.2.72).

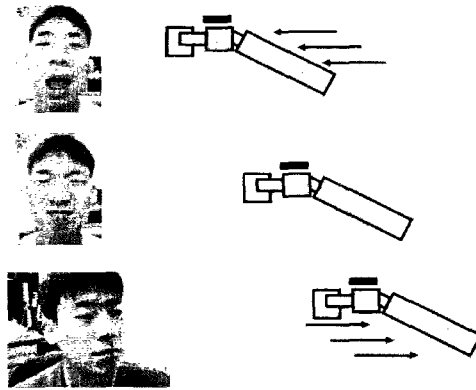


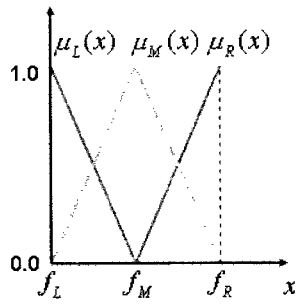
그림 3.3.2.72. 사용자-로봇 상호작용 시나리오

사용자 입의 개폐에 대한 정보는 앞서 기술한 가버 필터 기반 특징 등을 이용하여 파악이 가능하며, 사용자의 고개 흔들에 대한 정보는 다음과 같은 과정에 의해 이루어진다.

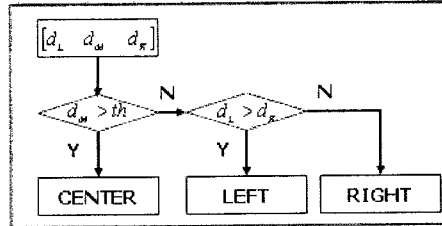
우선, 추출된 사용자의 얼굴 영역에 대하여 수평 에지 영상을 얻는다. 이 영상에는 앞서 얼굴 요소 추출 부분에서 기술한 것처럼 각종 영구적 얼굴 요소들이 포함되어 있으므로 이 영상에 대한 수직 투영(Projection) 성분에 대한 분석을 통해 얼굴의 좌/우 방향성을 추정할 수 있다. 방향성 추정을 위해서는 그림 3.3.2.73(a)에 도시한 좌측(L), 정면(M), 우측(R) 방향에 대한 소속도 함수를 설정하고 식 (3.3.2.4)에 의해 얻어지는 방향 특징에 대하여 그림 3.3.2.73(b)의 방향 결정 논리를 이용한다[40].

$$\begin{aligned}
 d_L &= \sum_{x=f_L}^{f_M} I_{xproj}(x) \cdot \mu_L(x) \\
 d_M &= \sum_{x=f_L}^{f_R} I_{xproj}(x) \cdot \mu_M(x) \\
 d_R &= \sum_{x=f_M}^{f_R} I_{xproj}(x) \cdot \mu_R(x)
 \end{aligned}
 \tag{3.3.2.4}$$

여기서, $I_{xproj}(x)$ 는 추출된 얼굴 영상에 대한 수평 에지 영상의 수직 투영 결과를 의미한다.



(a) 방향에 대한 소속도 함수



(b) 얼굴 방향 결정을 위한 논리

그림 3.3.2.73. 얼굴 방향 결정을 위해 필요한 소속도 함수 및 논리 개념도

제안된 방법을 이용하여 실제 얼굴 영상에 대해 방향성을 추정한 결과는 그림 3.3.2.74과 같다. 각 경우에 대하여 좌측은 입력된 얼굴 영상 및 추정된 얼굴 및 입 부위, 중앙은 수평 에지 영상 및 방향성에 대한 문자열 결과, 우측은 식 (3.3.2.04)에 의해 얻어진 소속도 함수값 및 중앙의 수평 에지 영상에 대한 수직 투영 결과를 나타낸다. 수직 투영 결과가 얼굴의 방향성을 추정하는데 매우 유용한 정보임을 알 수 있다.

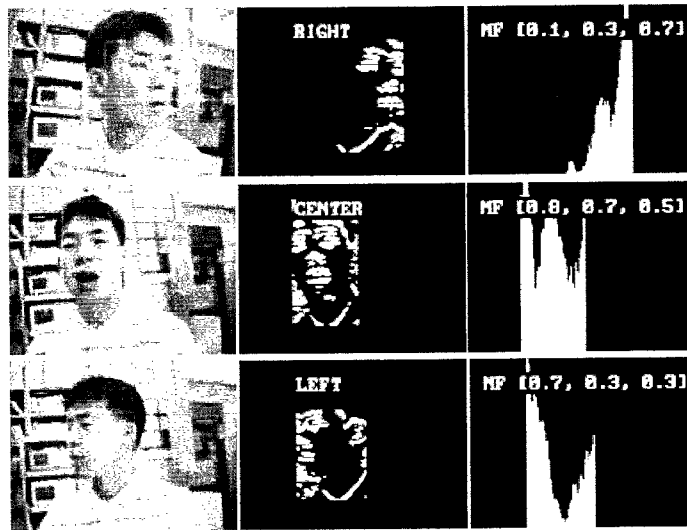


그림 3.3.2.74. 얼굴 영상에 대한 방향성 추정

이상의 얼굴 영상에 대한 방향성 추정 방법을 이용하여 사용자-로봇 상호작용에 적용한 결과는 그림 3.3.2.75와 같이 표현된다. 고개를 좌우로 흔드는 경우에는 로봇팔은 사용자로

부터 멀어지게 되고, 중앙에 배열된 3개의 영상에서와 같이 입의 벌리는 정도가 커지면 로봇팔은 사용자에게 빨리 다가오게 되고 입을 다물면 로봇팔은 그 자리에 정지하게 된다. 영상처리의 경우만 감안하면 약 11 frame/sec에 해당하는 속도를 보인다.

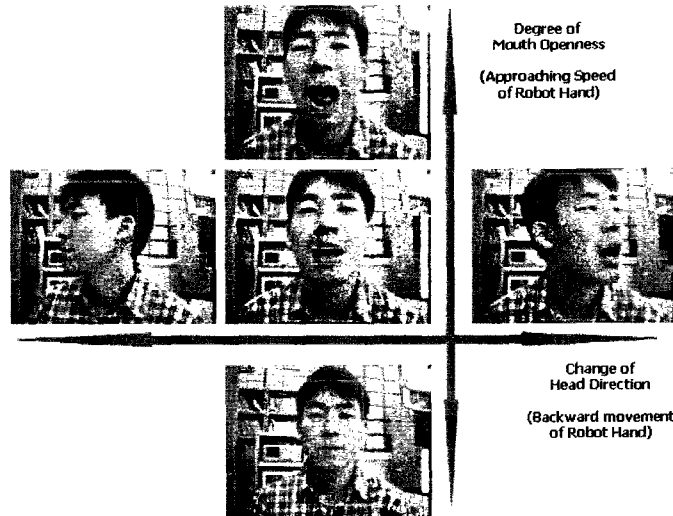


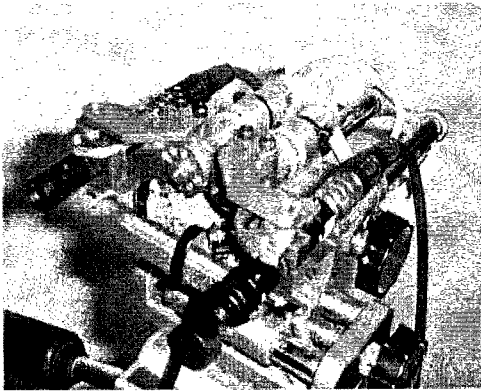
그림 3.3.2.75. 사용자-로봇 상호작용 결과

(5) 임상 실험에 의해 얻어진 비주얼 서보잉에 대한 평가 및 개선 방안

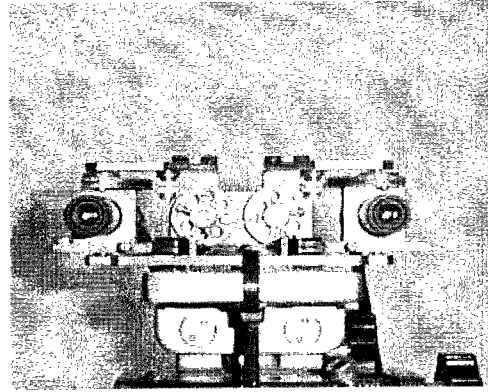
비주얼 서보잉 기능은 로봇 팔의 말단부에 부착된 스테레오 카메라를 이용한 물체 인식, 얼굴 인식 및 표정 인식에 근거한 의도 파악 기능이 주를 이룬다. 따라서, 사용자의 직접 사용에 의한 것 보다는 시각적인 측면에 의존하여 주로 작업에서의 역할에 대한 관찰 및 질문을 통한 평가를 위주로 임상 실험을 행하였다.

1) 개발된 소형 스테레오 카메라 헤드의 외형에 대한 평가(그림 3.3.2.76)

- 개발된 소형 스테레오 카메라 헤드는 기술적으로 케이블 메커니즘의 사용을 통한 소형화/경량화를 이루어 매우 진보된 것으로 판단되나, 실제 사용자 관점에서는 외형에 있어서의 느낌이 중요할 것이라 판단되어 주로 외형에 관한 평가를 하였다.



(a) Quarter View

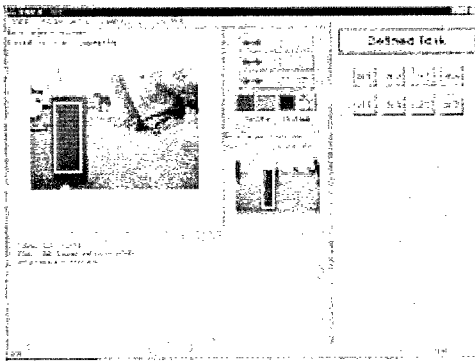


(b) Front View

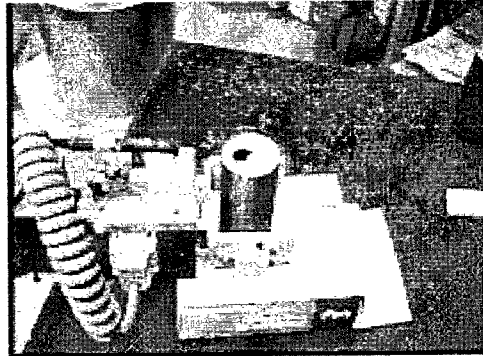
그림 3.3.2.76. 임상 실험에 사용된 소형 스테레오 카메라 헤드의 외관

2) 개발된 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)에 대한 평가(그림 3.3.2.77(a), 그림 3.3.2.78(a))

- 비주얼 서보잉 기능의 대부분이 사용자가 직접 사용해 보고 평가할 수 있는 부분이 아니므로, 평가에 직접적인 영향을 미치는 부분은 GUI 부분이 될 것이다. 주요 평가 항목은 현재 구현된 GUI의 화면 및 버튼의 배치, 표기 항목의 유용성 등이다.



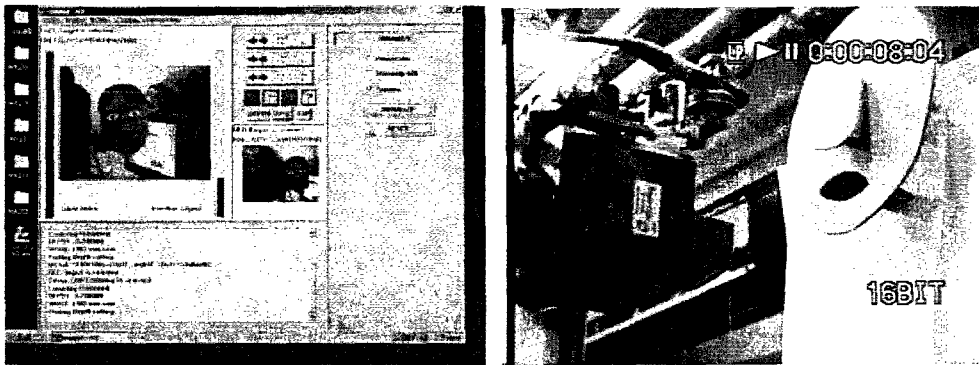
(a) 개발된 GUI



(b) 물체 잡기 실험

그림 3.3.2.77. 물체 인식/잡기 기능을 위한 GUI¹⁵⁾ 및 물체 잡기 실험

15) 스테레오 카메라에 대한 View는 두 개의 화면으로 구성되며, 인식된 물체는 흰색 사각형으로 표시된다.



(a) 개발된 GUI

(b) 얼굴 인식 실험

그림 3.3.278. 얼굴 인식/표정 인식 기능을 위한 GUI¹⁶⁾ 및 얼굴 인식 실험

3) 개발된 물체 인식 기능의 유용성/실용성에 대한 평가(그림 3.3.279)

- 임상 실험을 통하여 물체 인식 기능의 유용성을 평가하고, 실용성을 확보하기 위하여 필요한 요인이 무엇인지 평가하고자 하였다. 예를 들면, 필요한 인식 대상 물체의 수 및 종류, 인식 속도에 대한 만족도 등이다.

4) 개발된 얼굴 인식/의도 파악 기능의 유용성/실용성에 대한 평가(그림 3.3.279)

- 임상 실험을 통하여 얼굴 인식 및 의도 파악 기능의 유용성을 평가하고, 실용성을 확보하기 위하여 필요한 요인이 무엇인지 평가하고자 하였다. 예를 들면, 인식한 얼굴의 표현 방법, 의도 파악 기능의 실질적인 사용 용도 등이다.

그림 3.3.279은 비주얼 서보잉 기술에 대한 임상 실험 결과를 정리한 것으로서, 주요한 4개 항목(스테레오 카메라 헤드의 외관(Appearance), 사용자 인터페이스 구성(GUI), 실생활에서 인식해야 할 물체의 수(No. of Objects), 의도 파악 기능에 대한 전반적 평가(Will to use Intention Reading)) 부분을 만족도(Satisfaction Degree(%)) 관점에서 정규화한 것이다[49].

16) 얼굴 인식 결과는 얼굴 및 입에 대한 사각형으로 표시되며, 의도 파악 결과는 1번 카메라 화면 우측의 막대 그래프로 표시된다.

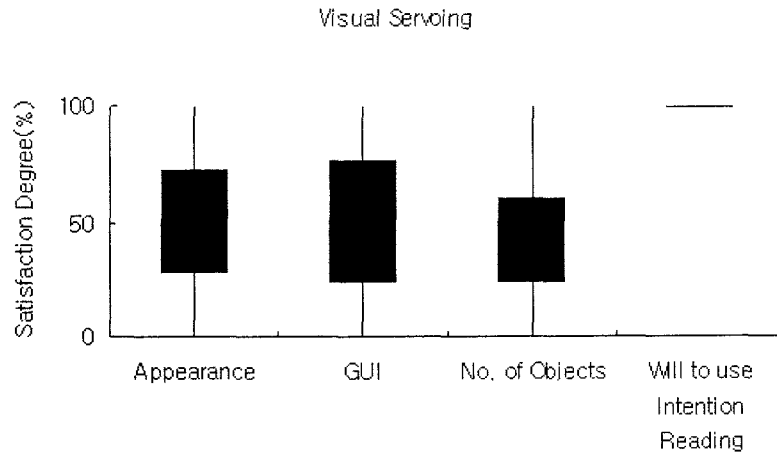


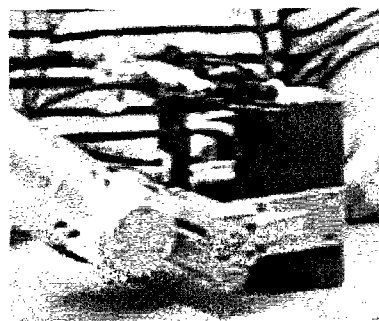
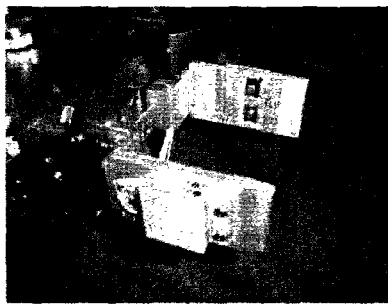
그림 3.3.2.79. 비주얼 서보잉 임상 실험에 대한 주요 항목 결과

그림 3.3.2.79에 나타난 것처럼, 스테레오 카메라 헤드의 외관은 좀 더 사용자 친숙성 위주로 개발해야 할 필요가 있다. 또한, 대부분의 장애인들이 사용자 인터페이스 구성에서는 모국어(Korean)를 많이 사용하는 것이 만족도를 향상시킬 수 있는 방안으로 지적하였다. 비주얼 서보잉 기능의 일부인 물체 인식 기술에 있어서, 좀 더 실생활에서 필요한 물체 수의 확장이 필요한 것으로 평가되었다. 마지막으로, 의도 파악 기술은 상당히 긍정적인 반응을 얻었으며 (100%) 입 이외의 다른 요소도 고려하여 의도 파악 기능을 확장하는 것이 필수적이다.

스테레오 카메라 헤드의 외관 개선 및 비주얼 서보잉에 적합한 새로운 형태의 그리퍼 개발에 관한 사항은 (6)에서 다루어 질 것이며, 의도 파악 기능의 향상과 관련한 부분은 (4)에서 상세히 기술하였다.

(6) Eye-in-Hand type Visual Servoing에 적합한 새로운 형태의 그립퍼 개발.

Eye-in-hand type의 Visual Servoing을 효과적으로 하기 위해서는 이에 적합한 그립퍼의 개발은 필수적이 된다. 카메라의 크기를 고려하지 않고 그립퍼를 디자인하게 되면, 카메라가 물체를 잡는 동작에 방해될 하게 되거나, 로봇의 손목 부위가 움직일 때 로봇팔에 부딪히는 결과를 초래하게 된다. 그렇지 않으면, 손목부위로부터 높은 위치에 스테레오 카메라 시스템을 설치해야 하나, 이 경우는 외관상 보기가 좋지 않으며, 그립퍼 전체의 크기가 커지는 것과 마찬가지로 좁은 공간으로의 작업을 방해할 수 밖에 없게 된다.



(a) PowerCube 용 그립퍼 시작품 (b) KARES II 1차 버전 그립퍼

그림 3.3.2.80. 기존의 그립퍼 시작품

그림 3.3.2.80은 기존에 사용하던 그립퍼 시스템 및 이전 버전에서 사용했던 그립퍼 시스템을 보여주고 있다. (a)에서 보듯이 PowerCube에 연결해서 힘센서와 연동을 목적으로 개발되었던 그립퍼의 시작품은 1자유도를 가지며 평판 그립퍼로서 수평으로 이동을 할 수 있게 된다. 그립퍼 모듈로 되어 있는 로봇팔 시스템이어서 그립퍼 모듈의 크기가 스테레오 카메라 헤드가 들어가기에 충분한 손등을 가지고 있기 때문에 카메라의 크기가 로봇의 동작에 영향을 미치지 않으며, 물체를 잡는 동작에도 영향을 미치지 않는다. 하지만 이 경우 그립퍼 모듈의 무게가 상당히 무겁고 큰 크기 때문에 통합시스템에는 사용할 수 없으며, 수평으로 움직일 수 있는 폭이 5cm 정도이므로 그립퍼의 초기 제작형태에 따라 큰 물체만을 잡거나 좁은 범위의 물체만을 잡을 수 있는 것으로 한정된다.

(b)에서 보듯이 KARES II 시스템의 1차버전 그립퍼는 무게면에서 상당히 경량이라는 장점을 가지고 있으나, 손등의 크기가 너무 작아 스테레오 카메라 헤드를 연결하기 위해서는 그림에서 보는 것과 같이 높이를 보정하여 어느 정도 이상의 범위에서 설치를 해야만 카메라의 크기가 로봇의 동작에 영향을 주지 않게 된다. 또한 PowerCube 용 그립퍼 시작품과 같이 평판이며 수평으로만 이동을 할 수 있는 형태이기 때문에 손등 부분의 폭이 그립퍼가 움직일 수 있는 범위를 한정하게 된다. 따라서 이 경우또한 그립퍼의 이동 범위가

내부의 리미트 스위치 및 안감 재료의 두께에 따라서 4-5cm로 제한되어 캔을 잡기 위해서 상당히 정확한 비주얼 서보잉 결과를 요구하게 된다. 따라서 이러한 점을 개선하기 위해서 새로운 형태의 그리퍼 개발은 필수적이다.

기존에 제작되어 있는 형태의 그리퍼는 제작 목적 자체가 인간형 손을 모방하기 위한 로봇 핸드(Robot Hand)와 3손가락 그리퍼, 2손가락 그리퍼로 나뉘어진다. 로봇 핸드는 인간형 손을 모방하기 위해 만들어진 것으로 대표적인 것으로는 독일의 DLR(Deutsches Centrum fur Luft- and Raumfaerhrt)이 있다(그림 3.3.2.81 참고). 이 로봇 핸드는 각 손가락마다 4개의 축(joint)과 3 능동 자유도를 가지며 1개의 수동축을 가진다. 그리고 각 손가락마다 축각도, 축토크, 스테레오 비전 등등의 센서가 25개씩 존재하며, 최대 핑거팁 힘은 11N이며 전체 4 핑거 핸드의 질량은 1800g이다[50].

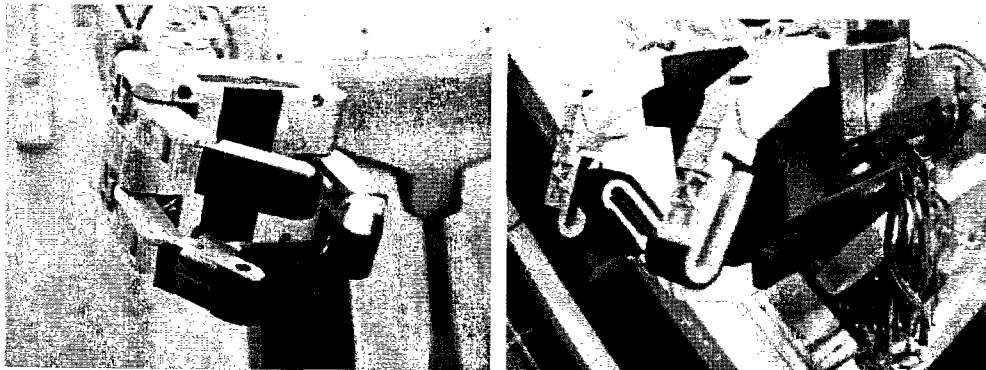


그림 3.3.2.81. DLR Hand

이러한 형태의 핸드는 실제적인 기능의 효율에 충실하기 보다는 보다 자연스러운 움직임을 추구하고 인간의 손동작에 가깝게 하려는 것이 취지이므로 상대적으로 기능적인 면이 중시되는 재활 로봇 시스템의 입장에서는 단가면에서도 맞지 않고 자체의 질량이 많기 때문에 그리퍼를 포함한 로봇팔의 payload가 2kg인 재활로봇 시스템에는 이용할 수가 없게 된다.

그 외에 실제적인 기능면을 중심으로 하는 것은 3손가락 그리퍼 시스템과 2손가락 그리퍼 시스템을 들 수 있다. 3손가락 그리퍼는 일반적인 다목적 기능으로 사용하기 위하여 제작되며, 이 경우 제작 목적에 따라 그리퍼의 크기 및 잡을 수 있는 무게가 결정된다. 그러나 일반적으로 3 손가락 시스템의 경우, 각 손가락마다 독립적인 자유도를 가지고 있을 경우 구동부인 모터의 수가 증가하게 되고, 수동축(passive coupled joint)이 있다고 하더라도 내부 메카니즘이 복잡해지게 되어있어 크기가 커질 수 밖에 없다. 2 손가락 그리퍼의 경우 싼 단가를 목적으로 만들어지게 되고, 물체를 잡는 동작이 3 손가락 그리퍼에 비해 안정적이지 못하다는 단점이 있다. 그리고 단순한 평판 그리퍼의 경우는 물체를 잡을 수

있는 폭이 상당히 작거나, 그리퍼 자체의 크기가 상당히 커져야 하는 단점이 있다. 그림 3.3.2.82은 KIST의 휴먼 로봇 센트에 사용되는 그리퍼(a)와 공공 서비스 로봇용으로 개발되는 그리퍼(b)를 보여주고 있다.



(a) 센트의 그리퍼 (b) 서비스로봇용 그리퍼

그림 3.3.2.82. 3 손가락 그리퍼 시스템

(b)와 같은 경우는 전체 4자유도를 가지게 되며, 각 손가락이 한개씩의 자유도를 가지고 4bar linkage 구조를 사용하여 수동연결축을 하나씩 가지고 있다. 그리고 손가락의 각도를 조절하기 위한 자유도 한개를 가지며, 전체 무게는 1200g이며 크기는 대략 20cm×20cm×20cm 정도의 크기를 가진다.

이상으로부터 비주얼 서보잉을 위한 가능성을 체크해 보면 우선, 비주얼 서보잉을 위해서 스테레오 카메라 시스템을 그리퍼 시스템에 장착하기 위해서 목적을 전체 크기를 최소화 하고자 하는 것에 둔다면, 카메라 시스템을 그리퍼에 최대한 밀착하는 방법밖에 없는데, 이 경우 3손가락 이상의 그리퍼 시스템은 카메라의 시야를 가리기 쉽다. 이렇지 않을 경우, 로봇팔 시스템의 손목 부위에 상당히 높은 지지대를 세우고 스테레오 카메라 시스템을 설치해야 하나 이것은 앞에서 언급했던 바와 같이 외관상 좋지 않을 뿐더러, 협소한 공간에서의 작업을 하기에 불편하게 된다. 그리고 3 손가락 시스템의 경우 무게 때문에 개발된 로봇팔 시스템에 적용하기 어려울 뿐 아니라, 대상 사용자가 장애인인 만큼 크기면에서도 큰 크기는 사용자에게 부담감을 줄 수 있다. 그리고 상품화를 목적으로 한다면 대상 사용자(potential user)가 장애인인 만큼 싼 단가로 공급을 해야 하기 때문에 2손가락으로 정해진 작업을 이행할 수 있고 어느 정도의 확장 작업을 수행할 수 있다면 3 손가락 시스템을 만드는 것은 불필요한 것이된다.

따라서 새로 개발할 그리퍼 시스템의 목적은 경량이며, 물체를 잘 잡을 수 있는 구동 메카니즘을 가지고 있어야 하고, 스테레오 카메라 시스템을 연결하여 구동에 방해가 되지 않고 카메라의 시야 또한 가리지 않아야 한다. 그리고 로봇팔의 기구학적 계산 범위 이내에

들기 위해 로봇팔의 손목 중심으로부터 그리퍼 손가락의 중심까지 거리가 17cm 이내인 조건을 만족해야 한다.

개발된 그리퍼 2차 시작품의 동작은 그림 3.3.2.83와 같다.

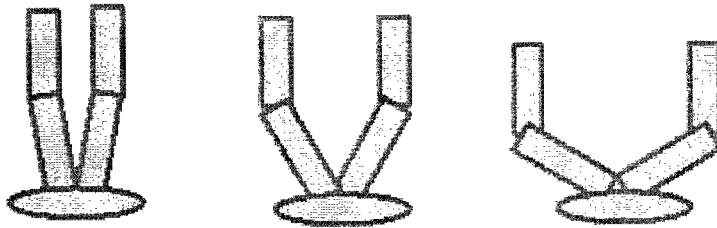


그림 3.3.2.83. 그리퍼 2차 시작품의 동작 개념도

개념도에서도 볼 수 있듯이 1자유도로 동작이 가능하나, 각각의 손가락에는 수동적으로 연결된(passively coupled) 축이 존재한다. 그리고 완전히 그리퍼를 닫게 되면 종이도 잡을 수 있도록 평판 그리퍼가 닫힌 형태로 가능하며, 완전히 열렸을 때는 안쪽 부분의 축은 붙어 있으나, 바깥쪽 부분은 수동 연결 축에 의해 작은 손등의 폭에 비해 상당히 넓게 벌려 잡을 수 있는 물체의 크기가 크도록 고안하였다.

이를 위해 텐던 구조(tendon mechanism)과 기어를 동시에 사용하여 모터 1개로 이러한 동작을 구현할 수 있도록 하였다. 그림 3.3.2.84는 모터가 들어가있는 손등 부분의 크기를 보여주고 있다.

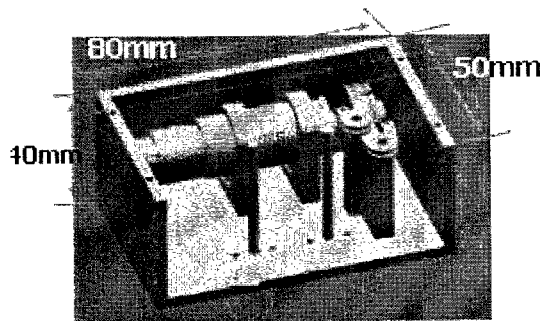


그림 3.3.2.84. 모터를 포함한 손등 부분의 크기

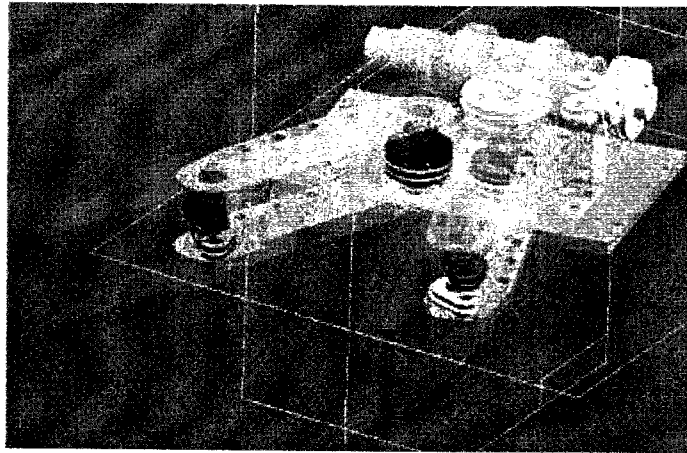


그림 3.3.2.85. 손등 덮개를 제외한 내부 조립도

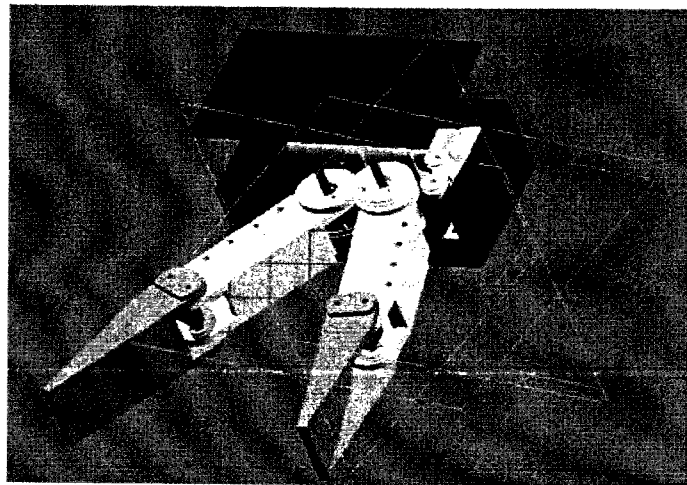
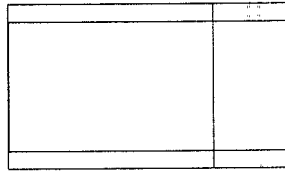
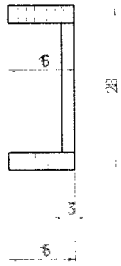
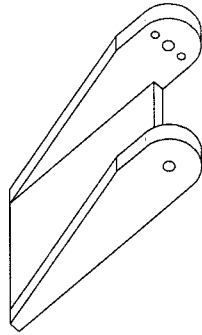
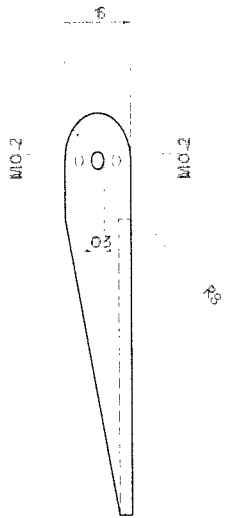
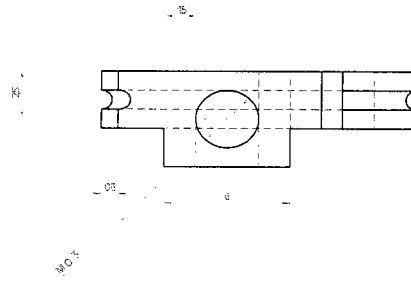
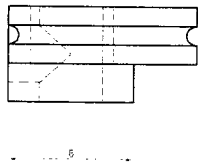
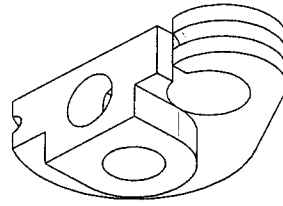
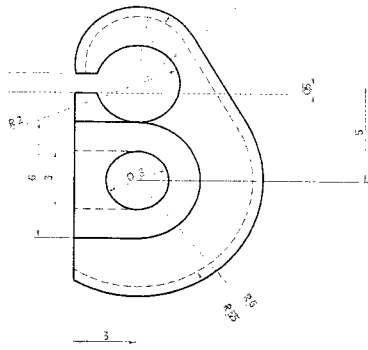
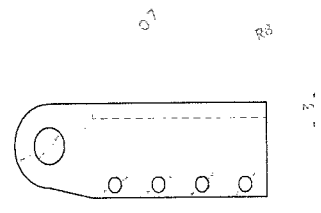
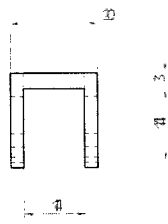
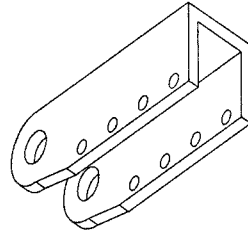
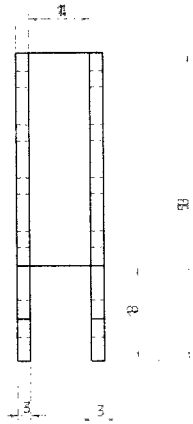


그림 3.3.2.86. 그립퍼 부품 조립도





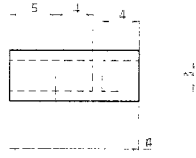
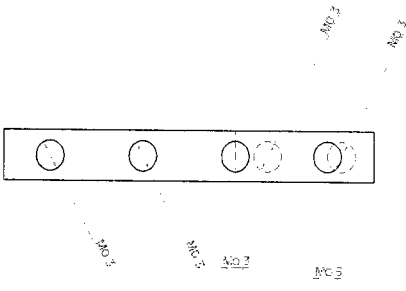
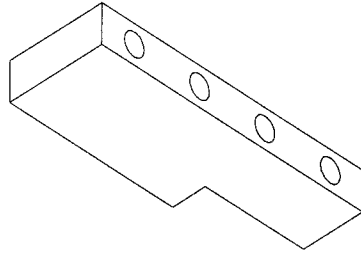
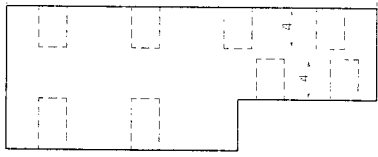


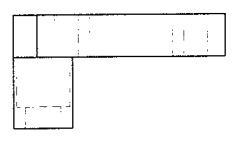
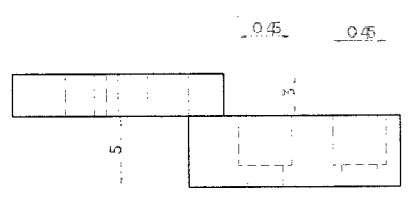
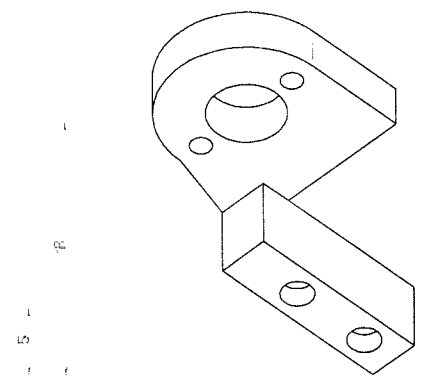
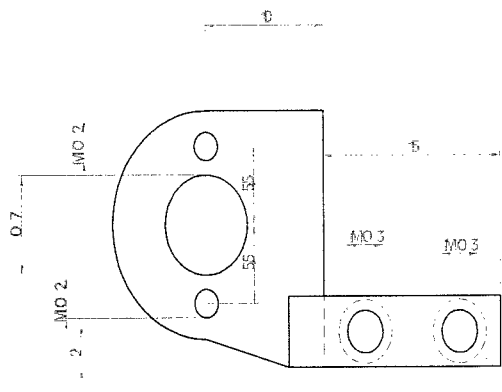
MP 5

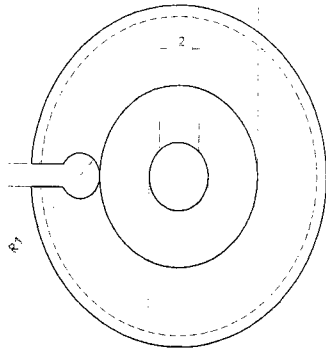
MP 7

MP 3

MP 3

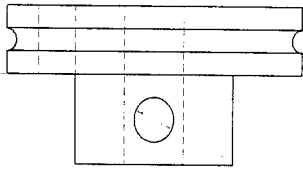






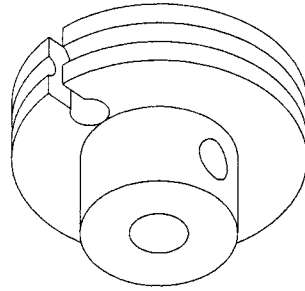
2

3



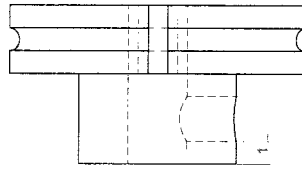
4

8



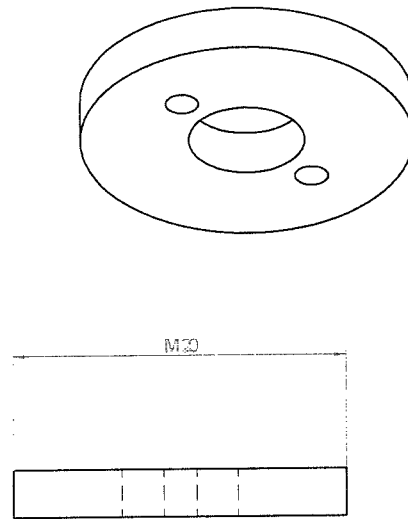
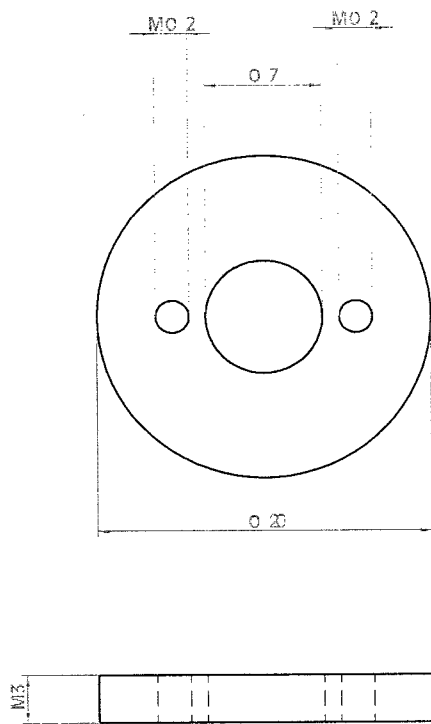
2

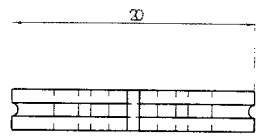
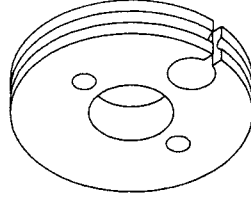
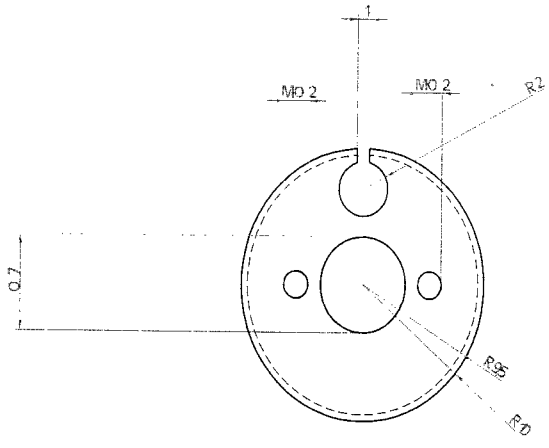
1



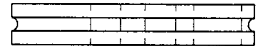
3

MC2



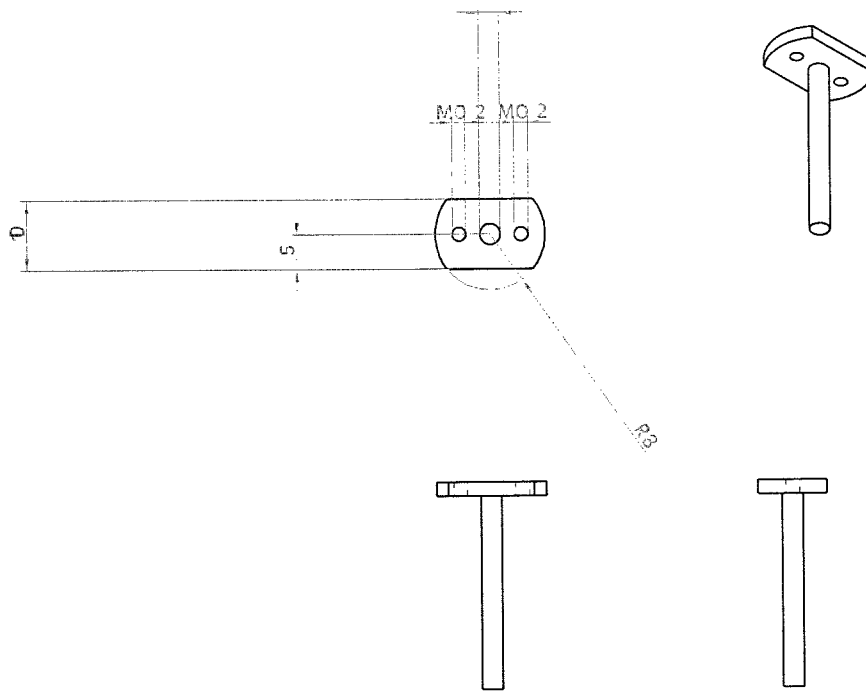


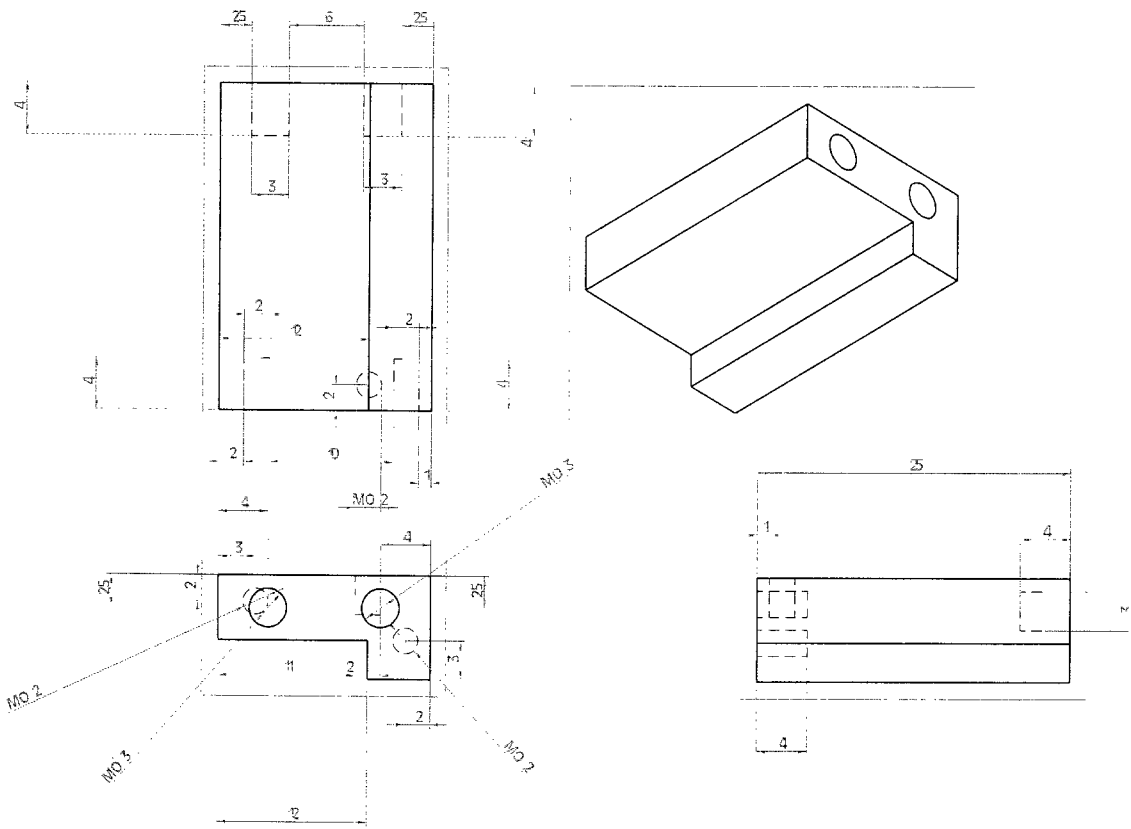
1

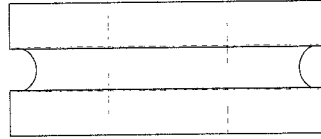
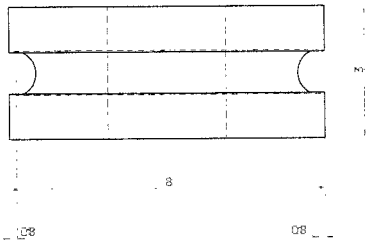
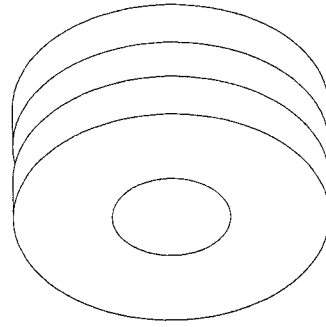
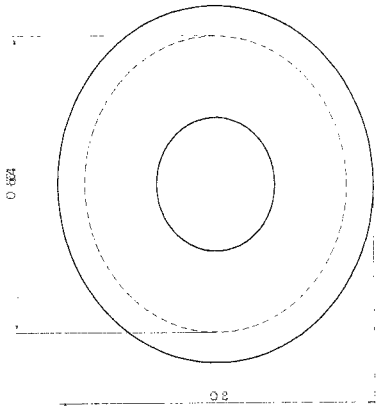


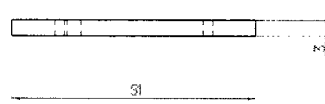
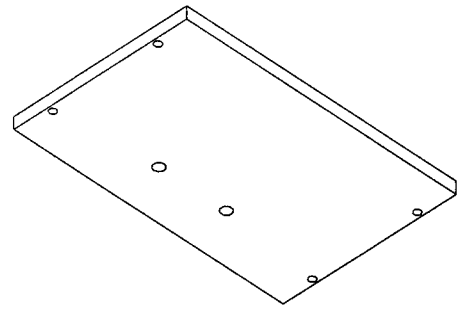
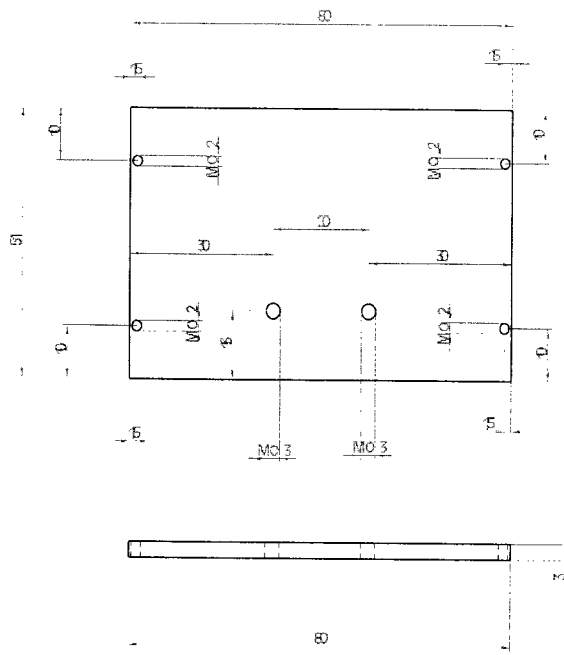
2

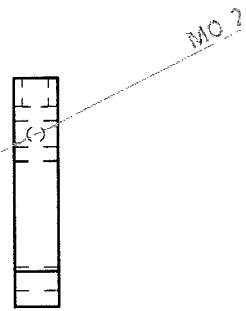
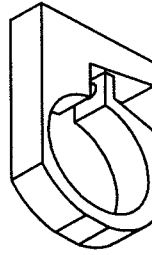
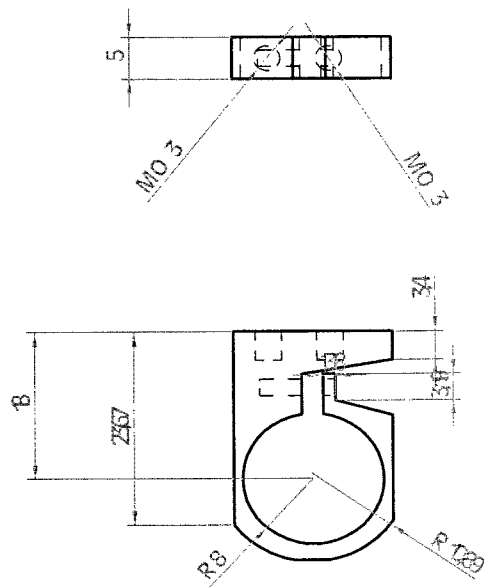
129

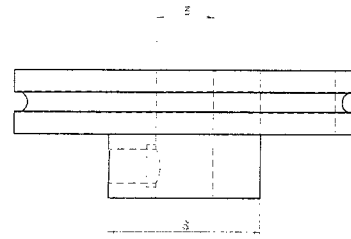
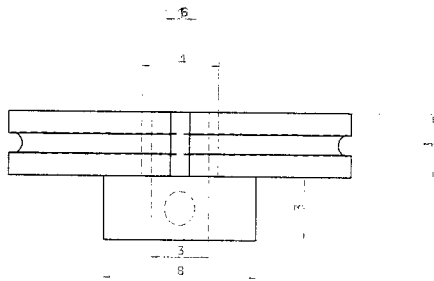
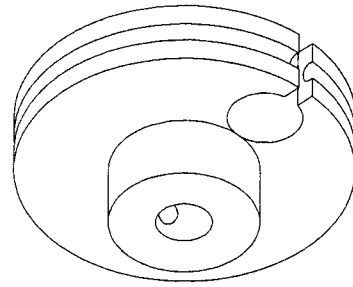
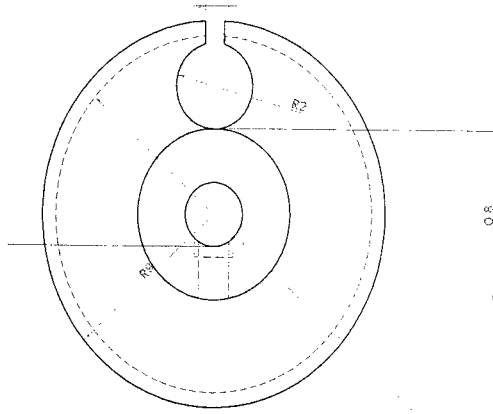






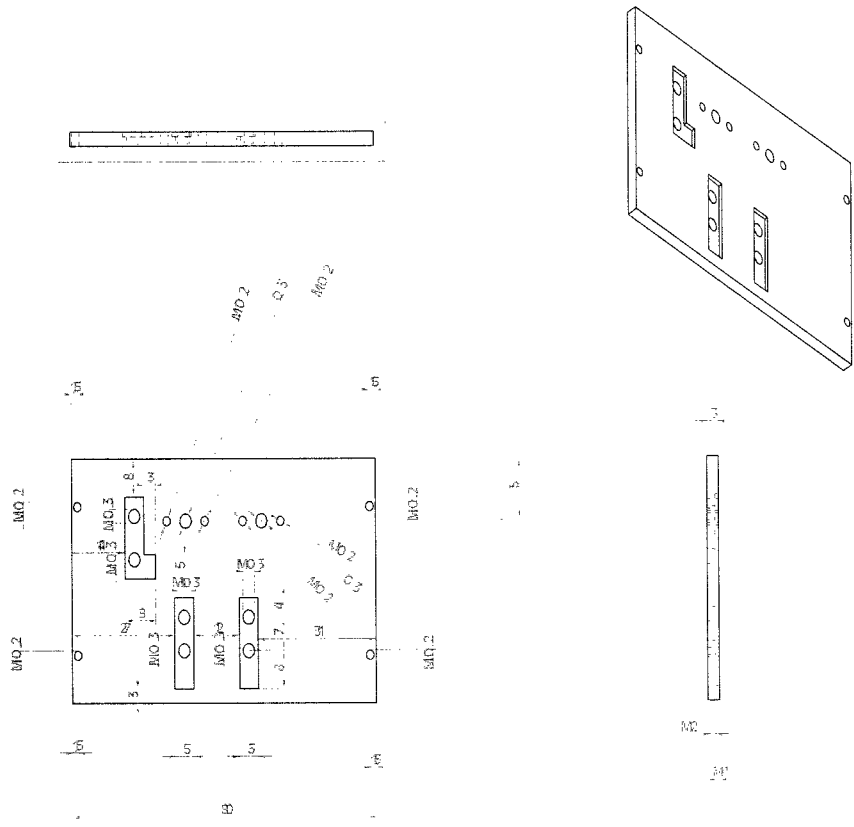


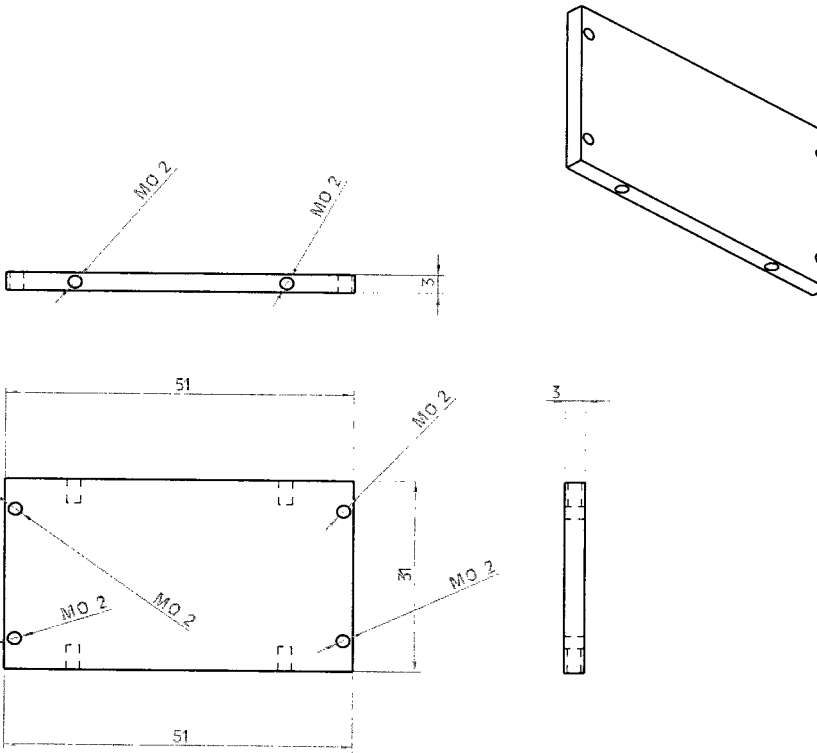
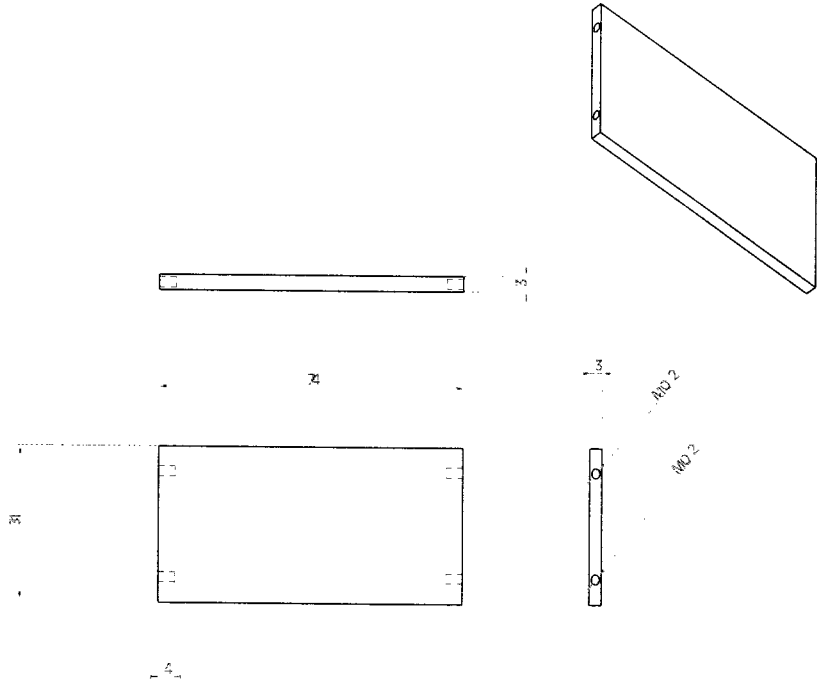




MC 5

8





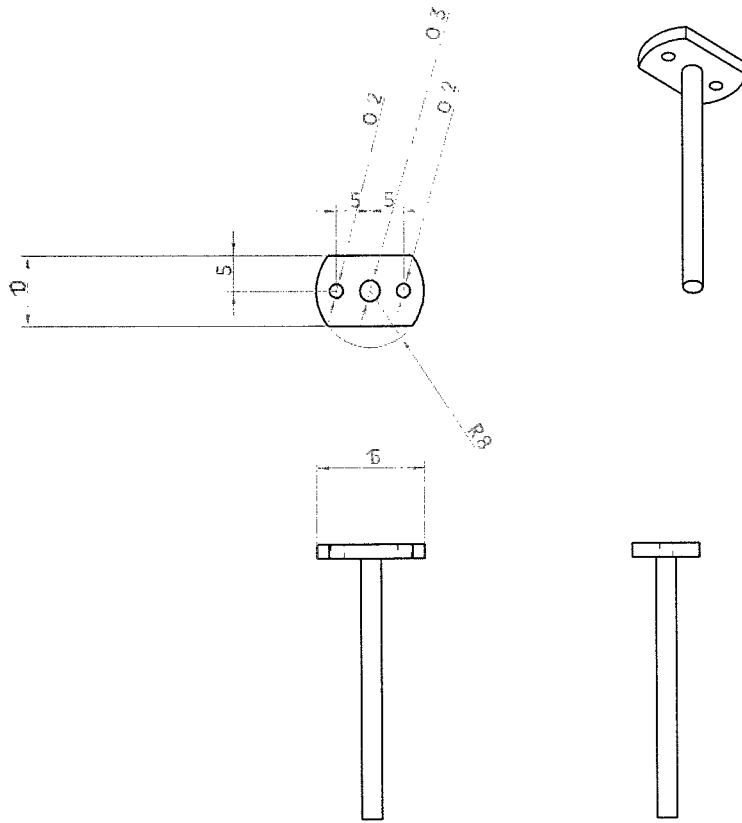


그림 3.3.2.85과 그림 3.3.2.86은 그리퍼 2차 시작품의 조립도를 보여주고 있다. 외형을 비롯한 내부 폴리등의 모든 구조물은 새로 가공된 것이며, 능동축과 수동축의 폴리의 반지름 비를 조절함으로써 그리퍼가 닫히는 모양을 변하게 할 수 있다. 또한 능동축부분의 마디는 길이를 조절할 수 있도록 해서 적절히 길이를 늘인후 케이블을 다시 연결해 주면 길이 조절도 가능하게 된다. 제작된 그리퍼는 그림 3.3.2.87과 같다.

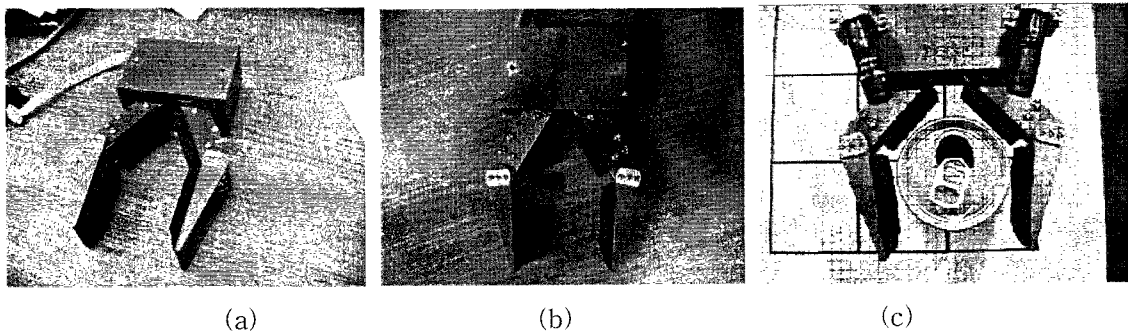
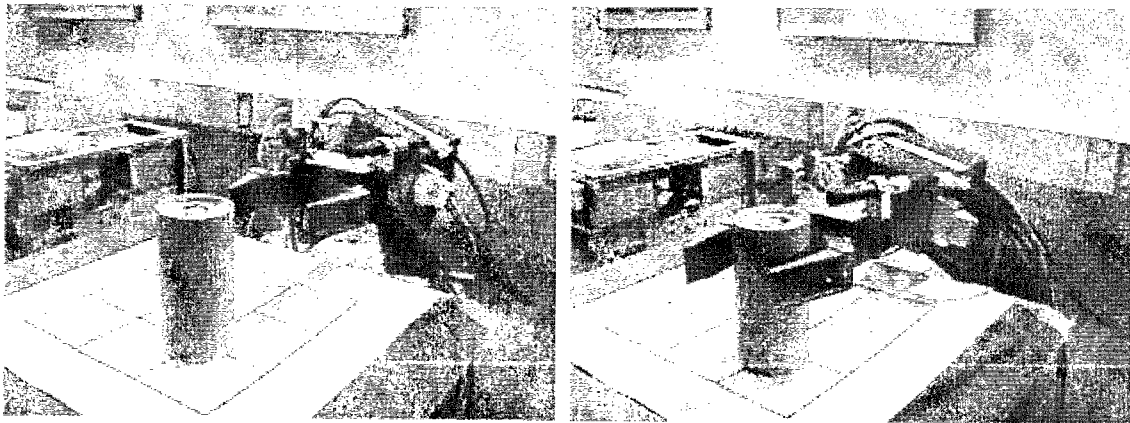


그림 3.3.2.87. 제작된 그리퍼 2차 시작품

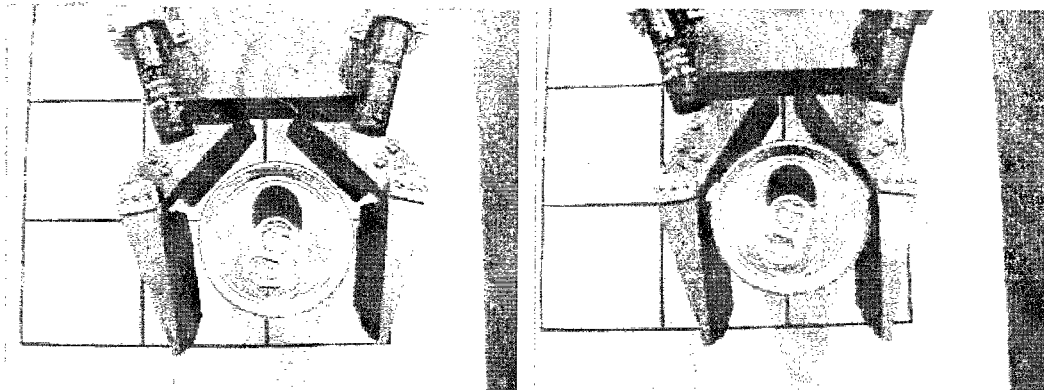
제작된 그리퍼는 물체를 잡을 때 보다 안정적으로 잡기 위해 그리퍼의 안감을 여러 가지로 테스트하여 실험적으로 얻어진 적절한 탄성을 갖는 스펀지를 접착해 두었다. 그림 3.3.2.87에서 볼 수 있듯이 스테레오 카메라 시스템을 연결하고 물체를 잡는 것에 영향을 주지 않으며, 물체를 잡을 때는 감싸는 형태로 되어 있어 보다 안정적으로 물체를 잡을 수 있음을 알 수 있다.

그리퍼의 모터 제어는 Minimotor 사의 시리얼 통신 모터 제어기인 MCDC2805를 사용하여 시리얼 통신을 사용한 모터제어를 하게 되고 모터 제어기에는 24V, 5A의 별도 전력을 공급해 주게 된다.

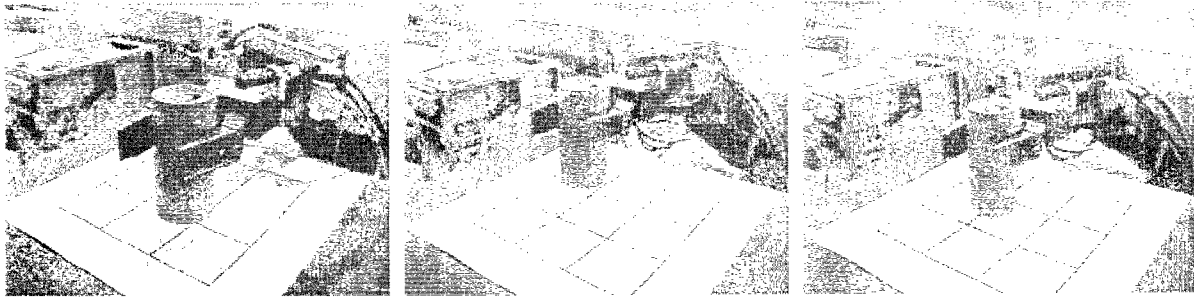
그림 3.3.2.88는 제작된 그리퍼와 비주얼 서보잉 기술을 접목하여 격자위에 단색의 캔을 놓고 사용자의 지시에 따라 물체를 인식하고 원하는 격자로 이동하는 실험을 보여주고 있다. 그림 3.3.2.89은 이때 사용된 디스플레이 패널의 화면을 보여준다.



(a) 물체 인식 및 거리추출, 물체 근처로 이동



(b) 물체 잡기



(c) 원하는 위치로 물체의 이동

그림 3.3.2.88. 격자위의 물체 잡기 및 원하는 위치로 이동

ACE
파일(E) 편집(E) 보기(V) 도움말(H) CONTROL VIEW

NO Target is selected

Safety Index
Sensor Reliability

CAMERA 1 CENTERING

CAMERA 2 CENTERING

Stereo CAM CENTERING

DEPTH

STOP(M)

Automatic Control

#1	#2	#3	#4
#5	#6	#7	#8

NO Target is selected

Client Open Failed.
Port COM1 initialized successfully
Gripper Control Mode
Automatic Command Control Mode

준비
NUM

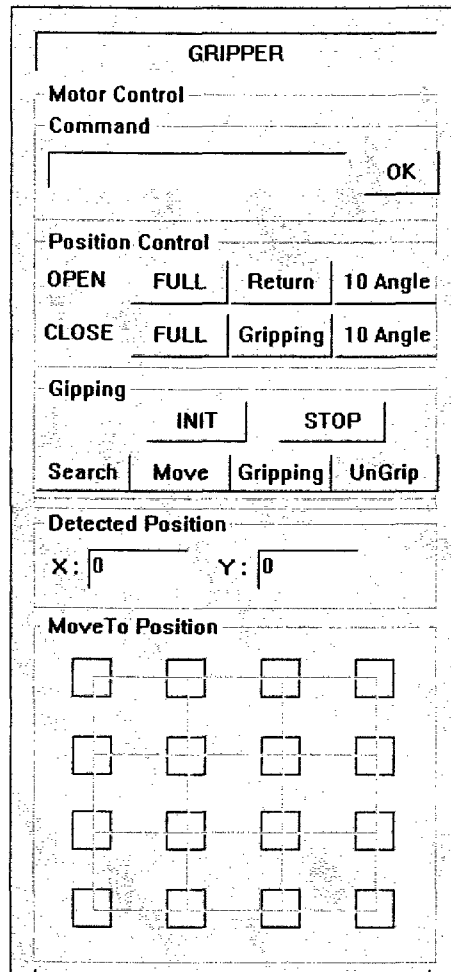


그림 3.3.2.89. 그립퍼 테스트 및 격자위의 물체 이동을 위한 디스플레이 패널 구조

곧, 제작된 그립퍼를 통하여 물체를 잡고 이동을 시키는 작업을 수행함으로써 비주얼 서보잉 시스템과의 연동 가능성을 체크했으며, 제어기 성능을 개선하고 케이블 텐션을 조절하는 메카니즘을 보완할 경우 보다 좋은 성능을 가지는 그립퍼가 될 수 있다. 또한 저속의 고투크를 가지는 초음파 모터도 현재 사용하고 있는 DC 모터의 대안으로 제안될 수 있다.

나. 로봇 팔 제어 알고리즘을 위한 생체 신호 (EMG) 분류 기술

(1) 로봇 팔 제어를 위한 근전도 신호에 기반한 인간친화적인 6자유도 분류 알고리즘 개발

기존의 연구 (1, 2, 3차년도)를 통해 근전도 신호를 이용한 팔 동작 분류 선행연구의 가

장 큰 문제점이었던 분류 방법의 사용자 의존성을 없애기 위해 소프트 컴퓨팅 기법을 이용하여 사용자 독립적인 특징 선택 방법을 제안하였다. 실험결과로부터 제안한 알고리즘이 사용자 의존성을 어느 정도 완화하는 것을 확인하였다. 제안한 방법은 Fuzzy C-means 알고리즘, Rough set 이론, 퍼지 최대-최소 신경망(FMMNN) 등을 이용하여 사용자에게 무관하게 각 동작별로 같은 퍼지 멤버십 함수를 가지는 공통 클러스터를 추출하고, 여기에 바타케리어 거리[51]를 적용하여 최소 특징 집합을 선택하였다. 사용자가 근전도 신호를 이용하여 로봇 팔을 자연스럽게 사용하기 위해서는 보다 높은 자유도를 제어할 수 있어야 하며 이를 위해 4차년도에는 기본동작을 확장하여 6자유도 (12가지 동작, 그림 3.2.2.90)의 명령을 분류할 수 있는 분류기를 개발하였다.

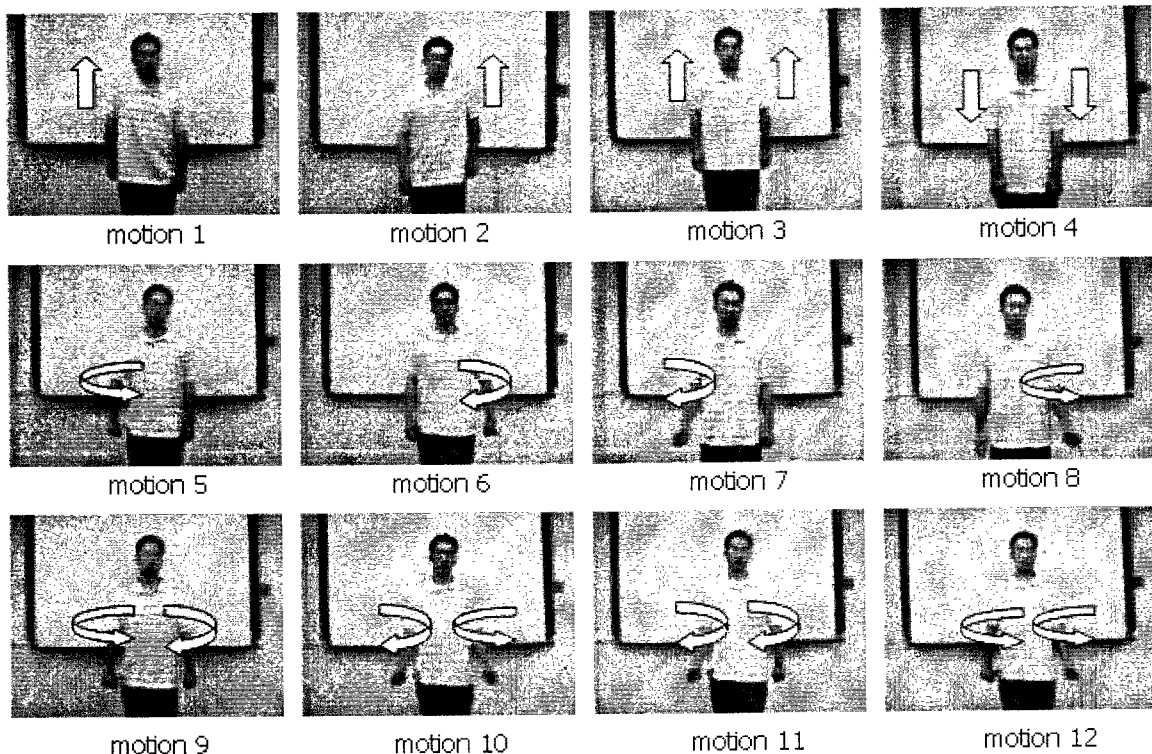


그림 3.2.2.90. 12가지 기본 동작

1) 근전도 신호

근전도 신호는 근육의 수축시에 발생하는 전기적 신호이며[52], 다음과 같은 과정을 거쳐 생성된다. 뇌의 운동피질(motor cortex)에서 신경 임펄스열(impulse train)이 발생하여 척수를 통하여 각 운동단위에 연결된 신경에 연속적으로 전달된다. 그리고 신경 임펄스 열이 운동단위에 가해질 때 운동 단위열이라는 운동 활동 전위열(MUAPT; motor unit

action potential train)을 발생시키며, 이 활동 전위열의 시간에 대한 공간적 합이 근전도 신호를 이루게 된다[52]. 이 때 근육의 수축력은 운동신경 펄스의 발생 비율의 변화와 작용하는 운동단위 수의 변화에 의해 조정된다. 그림 3.2.2.91는 근전도 신호의 발생 모델을 나타낸다[20].

근전도 신호의 특징은 다음과 같다[17][53][54]. 첫째, 근전도 신호는 불안정(nonstationary)하다. 따라서 근전도 신호의 기준 패턴 및 모델의 신뢰성이 제한되며 시간에 따라 변하는 근전도 신호의 특징을 잘 반영할 수 있는 방법이 필요하다. 둘째, 하나의 운동 단위를 이루는 근섬유의 수가 사람마다 달라 사용자마다 동일한 동작에 대한 근전도 신호가 다르다. 셋째, 근전도 신호를 측정하기 위한 위치의 피부 두께의 차이나 다른 근육 조직들로 인해 사용자마다 근전도 신호가 다르다. 넷째, 근전도 신호의 크기는 보통 수십 μV 에서 수 mV 정도로 주변 환경의 잡음의 영향을 많이 받아 측정된 신호에 잡음이 많다.

근전도 신호를 이용하여 사용자의 명령을 로봇에게 전달해 주는 방법은 다른 인간-로봇 상호 작용 기술에 비해 사용하기에 자연스럽다는 점, 시스템 명령어에 대한 부가적인 학습이 필요 없다는 점, 비 구조화된 환경에서 사용 가능한 조이스틱, 키패드, 3차원 입력기 등을 사용할 수 없는 중증 장애인에게도 적용 가능하다는 점, 다른 입력 장치에서 쉽게 추출할 수 없는 유용한 정보(팔의 움직임 속도[55], 근육의 피로도[56]) 등을 이용할 수 있다는 점 등의 장점을 가진다.

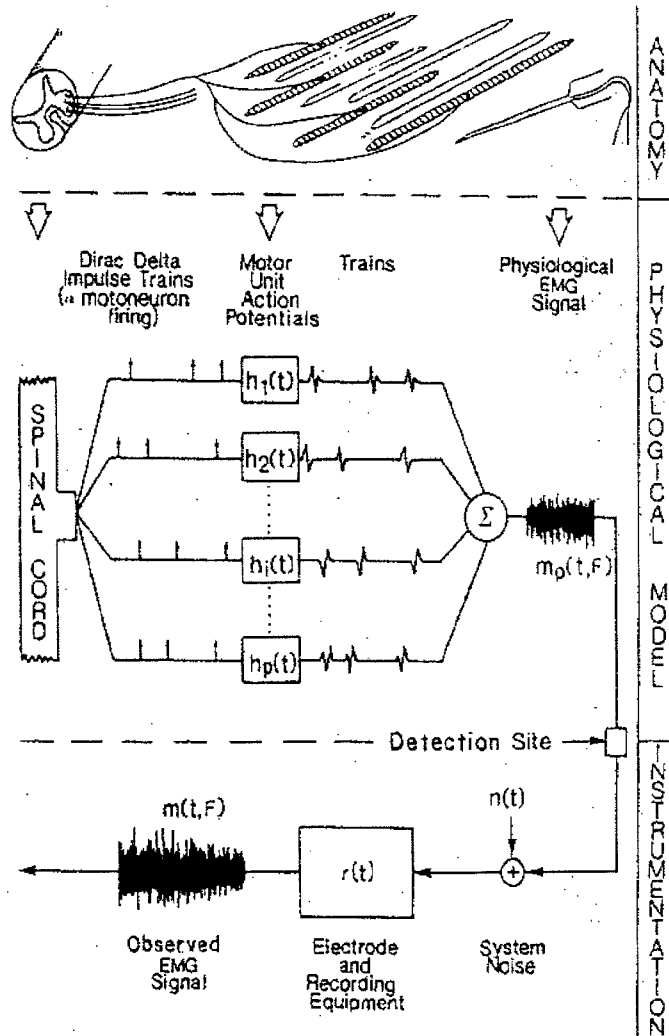


그림 3.2.2.91 근전도 신호 발생 모델 [20]

2) 연속적인 로봇 팔 제어를 위한 최적의 동작 분류 시간 결정

기존의 연구결과[24]를 통해 사용자의 생체 신호에 대한 로봇의 반응시간이 300msec 이상일 때 사용자가 거부감을 느낀다는 것을 조사하였다. 동작 분류를 위해 사용하는 생체 신호 window의 크기가 클수록 동작 분류 성공률은 높아지지만 로봇 제어에 사용할 경우 지연 시간이 존재한다. 또한 생체 신호 window의 크기가 300msec이상이 되면 사용자에게 거부감을 초래할 수 있으므로 본 연구에서는 로봇 팔 제어를 위한 명령분류 시간을 최소화하면서 기본 동작 분류 성공률을 유지하기 위해 sliding window의 크기를 가변시키면서 최적의 sliding window의 크기를 실험적으로 구하였다(그림 3.2.2.92, 표 3.2.2.16). 실험적

으로 구한 최적의 sliding window의 크기(128msec)를 사용하여 사용자에게 자연스러운 로봇 팔 제어를 가능하게 함을 실험적으로 확인하였다.



그림 3.2.2.92. Sliding Window의 크기에 따른 기본 동작 분류 에러
(참고: 최적의 sliding window의 크기를 정하기 위해 사용한 기본동작은 그림 3.2.2.96임)

표 3.2.2.16 최적화된 Sliding Window Length(128msec)을 이용시 기본 동작 분류 성공률

Data Set	성공률
Training Data Set	847/903* 100= 93.8%
Test Data Set #1	406/450* 100= 90.2%
Test Data Set #2	404/450* 100= 89.8%
Total Test Data Set	810/900* 100= 90.0%

3) 로봇 팔 제어를 위한 6자유도(12동작) 분류 알고리즘

그림 3.2.2.90에서 근전도 신호를 측정하기 위해서 적절한 근전도 위치를 그림 3.2.2.93과 같이 실험적으로 선정하였다. 실험을 위한 전체적인 구성은 그림 3.2.2.94와 같다.

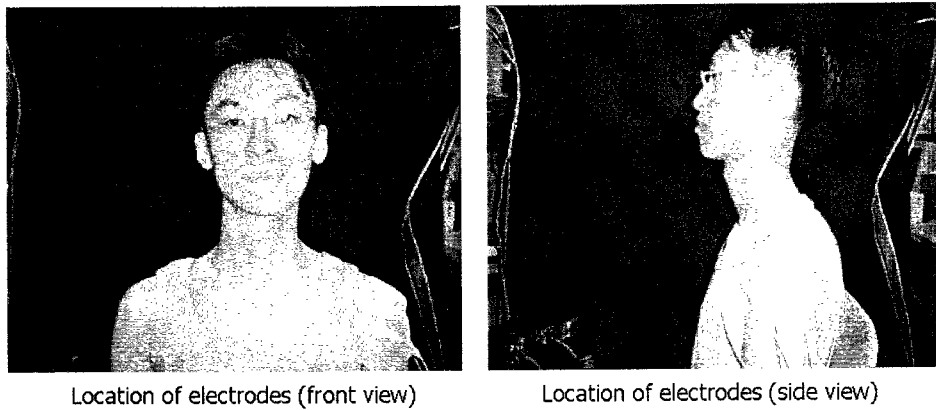


그림 3.2.2.93. 기본 동작 분류를 위한 근전도 측정 위치 (왼쪽 팔의 경우)

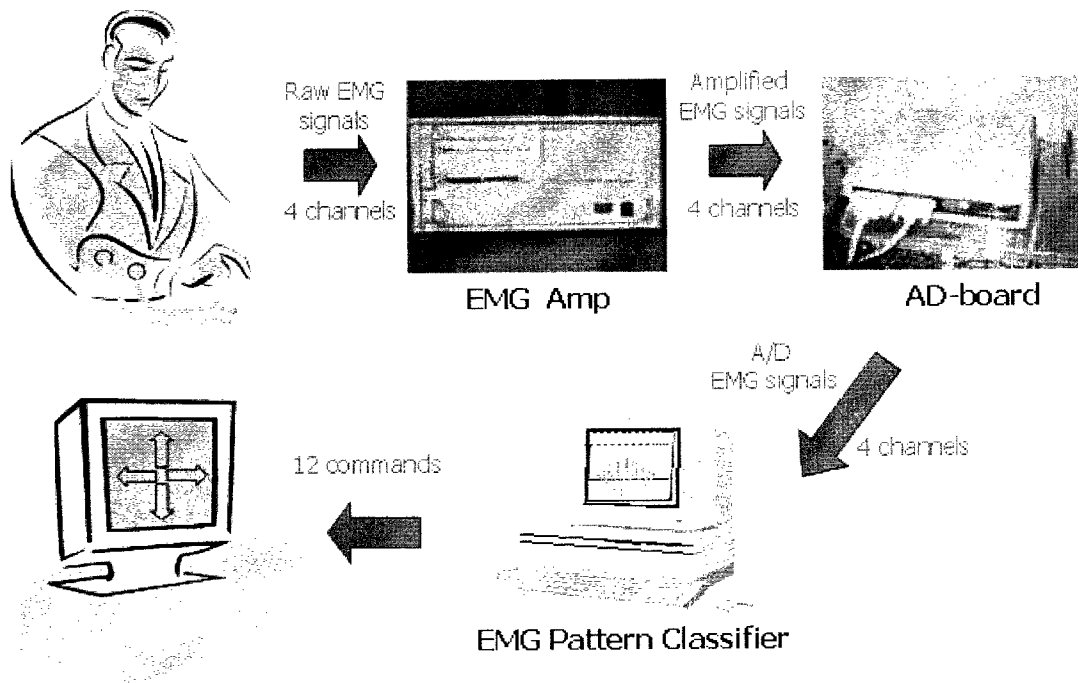


그림 3.2.2.94. 12가지 기본 동작을 분류하기 위한 전체 시스템 구성도

측정된 근전도 신호를 이용하여 기존에 널리 알려진 특징들(IAV, VAR, ZC, FR)을 추출하였다. 추출된 특징들을 소프트 컴퓨팅 기법에 의해 제안한 특징 추출방법을 이용하여 유용한 특징 집합들을 얻었다. 패턴 분류의 과정은 그림 3.2.2.95과 같다. 각 과정에 대한 간략한 설명은 다음과 같다.

- ① Data acquisition: 기본 동작에 대한 근전도 신호 획득
- ② Preprocessing: 저주파 잡음의 일종인 동잡음(motion artifact)를 제거함
- ③ Feature extraction: 기존에 널리 알려진 특징 추출
- ④ Feature clustering: 각 사용자에게 대해서 특징값의 분포에 따라 Fuzzy-C-means 알고리즘을 이용하여 clustering함.
- ⑤ Common Cluster Set Selection: 모든 사용자에게 대해서 각 동작에 대해 같은 fuzzy linguistic 값을 갖는 특징 집합을 선택함
- ⑥ Minimal Feature Set Selection: 많은 common cluster set 중에서 분리도가 가장 높고 최소의 특징 집합을 선택하여 패턴 분류를 위한 특징으로 사용함
- ⑦ Pattern Recognizer: 퍼지 최대-최소 신경망(FMMNN)[57]은 지도 학습(supervised learning) 신경망 패턴 분류기이다. 각 클래스는 퍼지 집합으로 표현되는 초상자(hyperbox)의 합집합에 의해 표현되며 초상자는 n 차의 최대-최소값에 의하여 결정된다. FMMNN은 온라인 학습 기능이 있다. 즉, 새로운 데이터에 의하여 초상자의 크기를 변화시켜 적응성을 가지도록 구성되어 있다. 온라인 학습 기능은 근전도 패턴 분류기에서 아주 중요하다. 왜냐하면 근전도 신호는 시간에 따라 변하는 비정상적인 성질을 가지고 있기 때문이다. 또한 FMMNN은 비선형 분리(nonlinear separability)가 가능하고 클래스의 중복(overlapping classes) 기능을 가졌다.

보다 자세한 설명은 [4]를 참조하기 바란다.

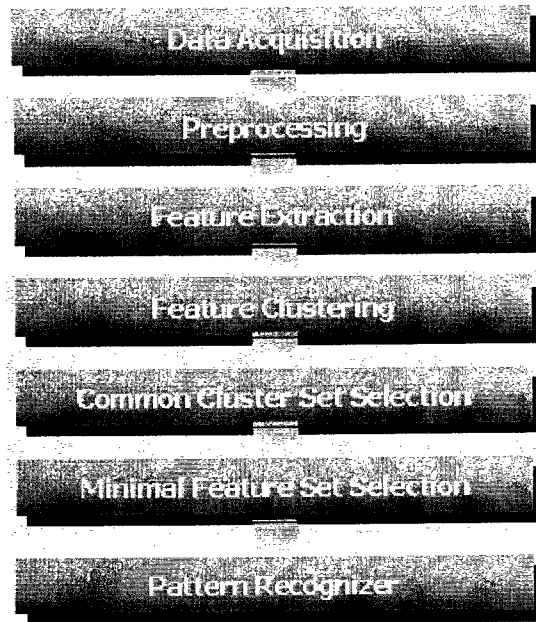


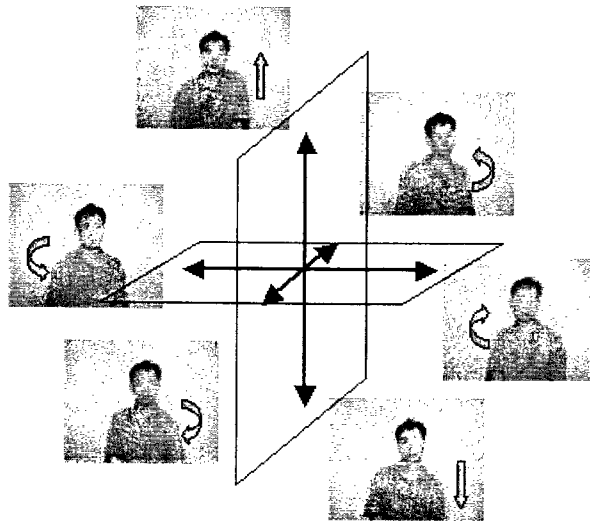
그림 3.2.2.95. 특징 집합 추출 및 근전도 분류 알고리즘

12가지 동작을 패턴 분류한 결과는 표 3.2.2.17과 같으며 전체 평균 분류 성공률은 86.9%을 얻을 수 있었다. 여기에서 정의된 12가지 동작이 사용자들이 처음 사용하기에는 쉽게 기억하기 힘든 점이 있으나 중증 척수 손상 장애인도 쉽게 해 낼 수 있는 동작들만을 선정한 것이기 때문에 개발된 결과를 그대로 적용할 수 있는 장점이 있다.

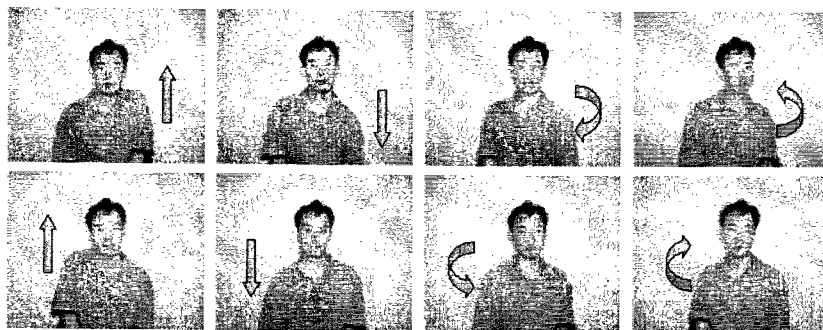
표 3.2.2.17. 12가지 동작 분류 성공률 (전체 분류 성공률: 86.9%)

결과	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
M1	98	0	2	7	2	0	5	0	0	0	0	0
M2	2	100	1	8	0	2	0	0	0	0	0	0
M3	0	0	97	5	0	0	0	0	0	0	0	0
M4	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0
M5	0	0	0	0	90	0	11	1	2	0	0	0
M6	0	0	0	0	0	85	0	15	3	0	0	0
M7	0	0	0	0	8	0	84	3	0	0	0	0
M8	0	0	0	0	0	13	0	81	0	0	0	0
M9	0	0	0	0	0	0	0	0	84	8	0	5
M10	0	0	0	0	0	0	0	0	5	81	10	7
M11	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	82	5
M12	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	8	83
평균	98%	100%	97%	80%	90%	85%	84%	81%	84%	82%	81%	81%

4) 추출된 힘 정보와 분류 결과를 동시에 이용하여 6자유도 로봇 팔 제어 알고리즘 근전도 신호를 이용하여 12가지 기본동작을 분류하는 알고리즘과 근전도 신호로부터 추출된 힘 정보 (다음 절에서 설명)를 동시에 이용하여 로봇 팔을 제어하였다. 즉, 분류결과에 따라 로봇 팔 end-effector의 움직임 방향(end-effector control mode) 혹은 로봇 조인트의 회전방향(joint control mode)이 결정되고 추출된 힘 정보에 따라 움직이는 속도(end-effector control mode) 혹은 회전하는 각도(joint control mode)를 결정하였다. 이를 위해 end-effector control mode(그림 3.2.2.96)과 joint angle control mode(그림 3.2.2.97)를 제안하였다. 또한 사용자의 갑작스러운 힘의 변화를 근전도 신호로부터 감지하여 긴급 정지 스위치의 입력으로 사용하여 사용자의 안전성(그림 3.2.2.98)을 향상시켰다.

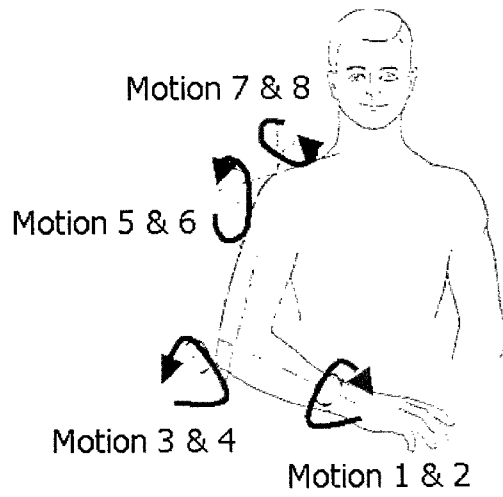


(a) End-effector의 X, Y, Z좌표

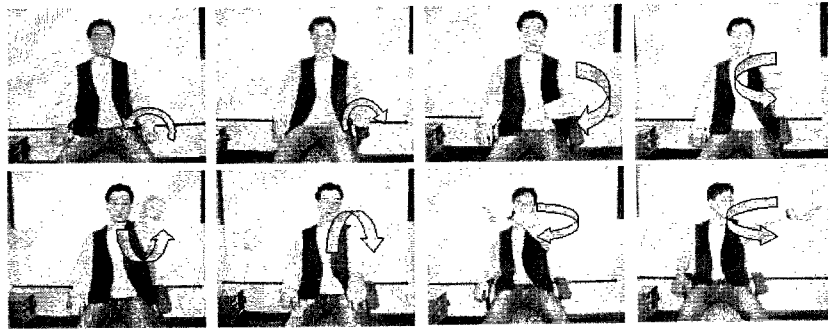


(b) End-effector의 제어를 위한 기본 동작

그림 3.2.2.96. End-effector의 X, Y, Z좌표와 기본 동작과의 매핑(Mapping) 관계

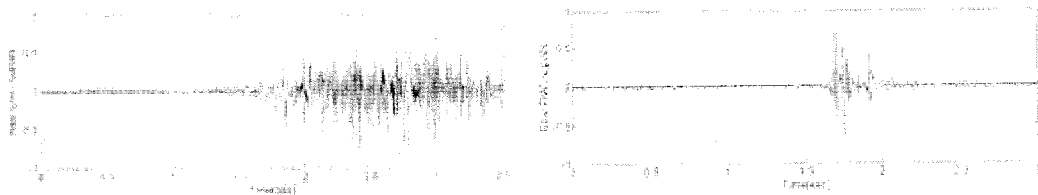


(a) 로봇 팔의 Joint 회전각



(b) 로봇 팔의 Joint 회전각 제어를 위한 기본동작

그림 3.2.2.97. 로봇 팔의 Joint의 회전각과 기본 동작과의 매핑 관계



(a) 정상 상태와 긴급 상태일 때 근전도 신호

(b) 정상 상태와 긴급 상태일 때 ASIAV의 변화량
 그림 3.2.2.98. 정상 상태와 긴급 상태일 때 근전도 신호와 ASIAV

(2) 비례 제어를 위한 근전도 신호로부터 힘 정보 추출 알고리즘 개발

앞서 개발된 근전도 분류 알고리즘을 이용하여 사용자의 근전도 신호에 기반하여 로봇 팔에게 사용자가 원하는 명령을 내릴 수 있다. 보다 인간 친화적으로 로봇 팔을 사용하기 위해서는 단순히 동일한 속도로 로봇 팔을 이동시키거나 특정 조인트를 회전시켜서는 안 된다. 사용자가 로봇 팔을 자연스럽게 제어하기 위해서는 단순한 ON/OFF 제어가 아니라 사용자의 힘의 크기에 비례해서 로봇 팔을 제어하는 방법이 필요하다. 비례 제어란 사용자의 힘 정보의 크기에 비례해서 로봇 팔의 end-effector의 움직이는 속도나 로봇 팔 조인트의 회전 각도를 비례해서 움직이는 것을 말한다.

1) 근전도 신호와 힘 관계 기존의 대표적인 연구 조사

근전도 신호로부터 힘 정보를 찾기 위한 연구는 기존에 많이 수행되었다. 기존에 발표된 대표적인 국내외 논문을 조사하여 근전도 신호로부터 힘 정보를 추출해 내는 알고리즘을 조사하여 신호처리 관점에서의 각 방법의 장■단점을 분석하면 표 3.2.2.18과 같다. 기존의 연구결과는 제안된 알고리즘의 유용성을 검증하기 위한 테스트 베드로 사용하였다.

근전도 신호로부터 힘 정보를 추출해 내기 위해서 우선 근전도 신호의 수학적 모델에 대해서 조사하였다. (그림 3.2.2.99, 그림 3.2.2.100) 그림 3.2.2.99에서 볼 수 있는 것처럼 인간의 몸 속에서 생성된 근전도 신호를 실제로 측정하는 동안 여러 가지 요소들이 근전도 신호의 특성을 변화시킴을 알 수 있다. 그림 3.2.2.100에서 알 수 있는 것처럼 근전도 신호는 수학적으로 힘 정보를 담고 있는 신호와 노이즈 신호의 곱으로 표현할 수 있다.

$$M(t) = \sigma(t) \times N(t)$$

여기에서, $\sigma(t)$ 는 힘 정보를 담고 있는 신호, $N(t)$ 는 노이즈 신호이다. 제안한 방법은 근전도 신호의 수학적 모델에 근거하여 측정된 선형 mixture로부터 원래의 source 신호를 찾는 ICA (independent component algorithm) 기법을 사용하였다.

표 3.2.2.18. 근전도 신호 및 힘(Force)/토크(Torque)와의 상관관계를 연구한 기존 연구 결과

이름	간략한 내용	장·단점
A Full Wave Rectifier And Low-pass Filter	근전도 신호를 전파 정류기(Full Wave Rectifier)을 취한 뒤에 Low-pass Filter를 통해 근전도 신호의 힘 정보를 추정함.	<ul style="list-style-type: none"> 가장 간단하게 힘 정보를 추정할 수 있음. 사용자의 힘 정보 패턴의 변화를 잘 추정하지 못함. S/N비가 가장 낮음.
A Linear Minimum Mean Square Error Estimator	근전도 신호를 전파 정류기(Full Wave Rectifier)을 취한 뒤에 로그 변환을 통해 근전도 신호를 힘 정보와 노이즈 정보의 선형 조합으로 분리, Kalman filter를 이용하여 힘 정보를 추정함.	<ul style="list-style-type: none"> 정상상태 오차를 A Full Wave Rectifier And Low-pass Filter보다 10배정도 향상시킴. 노이즈 정보로 인해 추정된 힘 정보의 진동(Oscillation)이 존재함.
A Moving Average Root Mean Square Estimator	$y(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=k-(N-1)}^k x^2(i)}$ 여기서, $x(i)$ 는 시간영역에서 근전도 신호, $y(k)$ 는 추정된 힘 정보, N 은 Sliding Window의 크기임.	<ul style="list-style-type: none"> 위의 두 방법에 비해 좀 더 정확히 힘을 추정 가능하며 진동 현상도 현격히 줄일 수 있음. 추정된 힘 정보에 시간 지연이 존재함. 이 방법의 경우 Sliding Window의 크기가 245msec일 때 최적의 S/N비를 보이는데(논문상의 결과), 힘 추정 시간 지연이 길다는 단점이 있음.
Time Varying Autoregressive Filter	근전도 신호의 초기 분산값을 입력으로 하는 Time-varying AR 필터를 이용하여 MARMS의 S/N비를 향상시켜 힘 정보를 추정함.	<ul style="list-style-type: none"> 4개의 방법 중 가장 높은 S/N비를 나타냄. MARMS 방법의 경우에서처럼 힘 정보 추정에 시간 지연이 존재함.

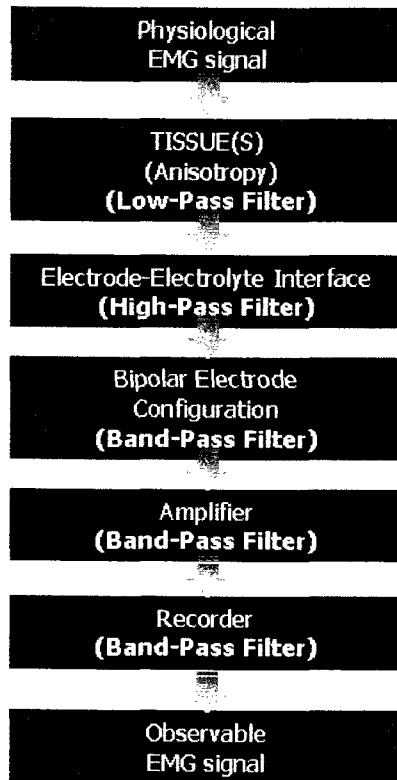


그림 3.2.2.99. 근전도 신호 측정시 영향을 미치는 주요 요소에 대한 Block diagram

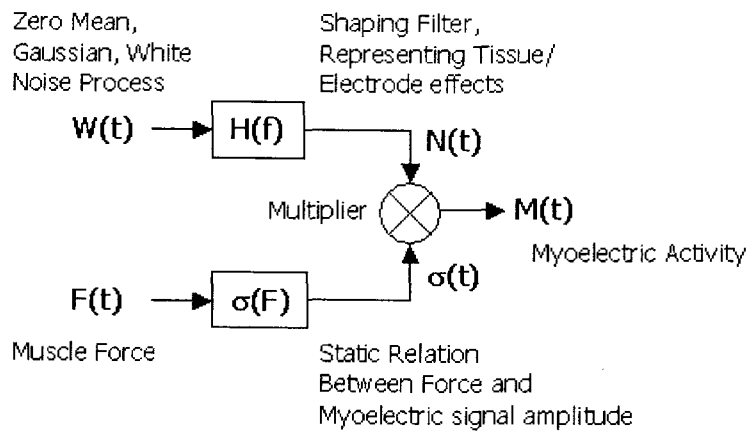


그림 3.2.2.100. 근전도 신호의 수학적 모델

2) ICA (independent component algorithm) 알고리즘과 제안한 힘 정보 추출 알고리즘
 ICA 알고리즘은 관찰된 다차원의 랜덤 벡터로부터 통계적으로 독립적인 각 요소를 찾아내는 방법으로 최근 blind separation 등의 분야에서 각광받고 있다. 관찰된 m 차원의 랜덤 변수와 n 차원의 입력 소스 신호를 다음과 같이 표현하자.

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T: \text{관찰된 (혹은 측정된) } m \text{ 차원의 랜덤 변수}$$

$$s = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T: \text{입력 소스 신호로 } n \text{ 차원의 랜덤 변수}$$

ICA 방법은 측정된 x 로부터 s 를 찾는 통계적인 방법으로 x, s 의 관계는 $s = f(x) = Wx$ 으로 주어진다. 여기서 W 는 각 소스 신호의 선형 변환 계수이다. 만약, 각 소스 신호의 mixture 정보인 W 를 미리 알 수 있다면 주어진 x 로부터 s 를 찾는 과정은 쉬운 일이지만, W 를 알 수 없는 상황에서 단지 측정된 x 만을 이용하여 s 를 찾아내는 것은 어려운 과정이다. ICA 알고리즘은 어떤 임의의 시간 t_1 에서의 각 소스 신호가 통계적으로 독립적이라는 사실로부터 측정된 각 신호의 독립성(Independence)을 측정, 이 값을 최대화 할 수 있는 W 를 찾아내고, 이를 이용하여 원래의 소스 신호를 찾아내는 방법이다. 임의의 시간에 각 신호의 독립성으로부터 W 를 찾아내는 알고리즘은 Jutten-Herault 알고리즘, Non-linear Decorrelation 알고리즘, The FastICA 알고리즘 등이 있으며 본 연구에서는 기존에 있는 많은 ICA 알고리즘 중에서 계산량이 적고 실시간 처리가 가능한 The FastICA 알고리즘을 사용하였다.

ICA 알고리즘을 이용하여 근전도 신호로부터 힘 정보를 추출하는 알고리즘은 그림 3.2.2.101와 같다. 아이디어는 힘과 노이즈 정보의 곱으로 표현된 근전도 신호를 로그 변환을 통해 선형 mixture로 분리한다. 이렇게 분리된 선형 mixture (측정된 신호)로부터 ICA 알고리즘을 적용하여 소스 신호 (힘 정보, 노이즈 정보)를 찾아낼 수 있다. 찾아진 힘 정보를 다시 $\exp()$ 변환을 통해 실제 힘 정보를 추출할 수 있다. 알고리즘의 각 단계에 대해서 설명하면 아래와 같다.

- 근전도 신호 측정함.
- 입력 신호의 로그 변환(Log Transform)을 위해 Full Rectifier를 거침.
- 로그 변환을 통해 근전도 신호를 노이즈 신호와 힘 신호의 선형 Mixture로 분리.
- ICA 기법(FastICA 알고리즘)을 적용하여 로그 변환된 힘 신호를 추정.
- $\exp()$ 함수를 통해 추정된 힘 신호의 복원.

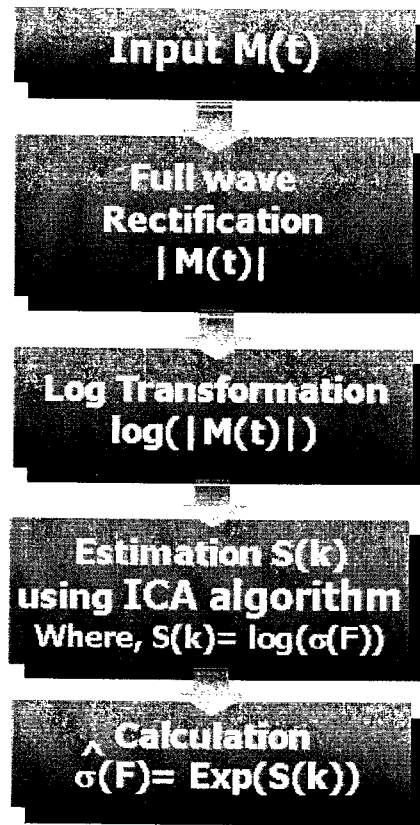
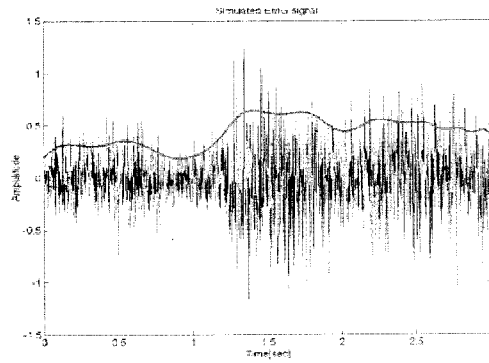
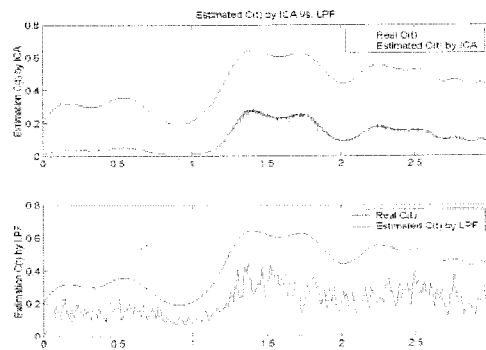


그림 3.2.2.101. ICA에 기반하여 제안한 힘 추정 알고리즘

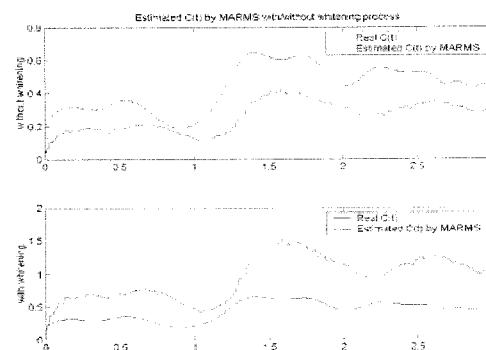
ICA에 기반하여 제안한 힘 추정 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 기존에 사용되고 있는 방법들을 테스트베드로 이용하여 힘 정보 성능을 검출하였다. 그림 3.2.2.102 (a)는 근전도 신호와 근전도 신호 속에 숨겨진 힘 정보 (굵은 선으로 표시됨) 를 표시하고 있다. (b)는 제안한 방법과 기존의 방법 중에 하나인 LPF (low pass filter)를 비교한 것이며 (c)는 가장 널리 쓰이는 MARMS (moving average root mean square)방법을 사용하여 힘 정보를 추출한 것이다. 결과에서 알 수 있는 것처럼 제안한 방법은 힘 정보 패턴을 정확하게 추출할 뿐만 아니라 다른 방법에 비해서 시간 지연도 적음을 알 수 있다. 근전도 신호로부터 이렇게 추출된 힘 정보는 로봇 팔 제어에서 end-effector의 속도나 특정 조인트의 회전 각으로 매칭되어 실제 제어에 사용되었다.



(a) 근전도 신호와 근전도 신호 속에 숨겨진 힘 정보



(b) ICA, LPF를 이용해서 힘을 추정한 결과



(c) MARMS(w/w.o. Whitening Process)를 이용해서 힘을 추정한 결과

그림 3.2.2.102. 힘 추정 시뮬레이션 결과

(참고: 그림 (b), (c)에서 볼 수 있는 것처럼 제안된 기법으로 힘 정보를 추출할 경우, 사용자의 힘의 변화 패턴을 정확하게 추정하고 있지만, 다른 방법의 경우 힘의 변화 패턴을 정확하게 추정하지 못할 뿐만 아니라 시간 지연 현상까지 발생함.)

(3) 무선 생체 신호 증폭기의 개발

기존의 연구(1, 2, 3차년도)를 통해 개발된 근전도 증폭기는 근전도 신호를 측정하고 측정된 신호를 PC로 전송하기 위해서 유선을 사용하므로 사용자에게 불편함을 유발한다. 따라서 이번 연구에서는 근전도 증폭기에 무선 기능을 추가하고 기존의 근전도 증폭기의 성능을 개선하였다.

1) 근전도 증폭기의 성능 개선

생체신호(근전도)의 크기는 보통 수십 μV 에서 수 mV 정도로 주변 환경의 잡음의 영향을 많이 받아 측정된 신호에 잡음이 많다. 잡음의 제거는 생체신호 해석에 있어서 가장 중요한 부분이며 이를 위해 저 잡음 고증폭도의 증폭기의 설계가 필수적이다. 그림 3.2.2.103은 개발된 생체신호 증폭기의 전체 구조이다. 특히 전원 잡음 등의 제거를 위한 Notch Filter의 설계가 중요하다. 저항, 커패시터 등의 수동소자를 이용한 간단한 형태의 Notch Filter는 전원노이즈 뿐만 아니라 제거하고자 하는 주위 대역의 신호까지 동시에 제거함으로써 근전도 신호의 유의미한 정보를 잃게 한다. 이를 해결하기 위해 Biquad(2nd order) Notch Filter를 설계, 제작하여 유의미한 신호의 손실을 최소화하였다. 제작된 생체신호 증폭기(그림 3.2.2.103)는 1500V/V의 증폭도와 60Hz에서 -32.5dB의 Stop Rate를 가지며, 20Hz-500Hz의 통과 대역을 가져 근전도 신호를 측정, 증폭하는데 충분한 조건을 만족한다. 다음에서 각 부분에 대해 상세하게 알아보자.

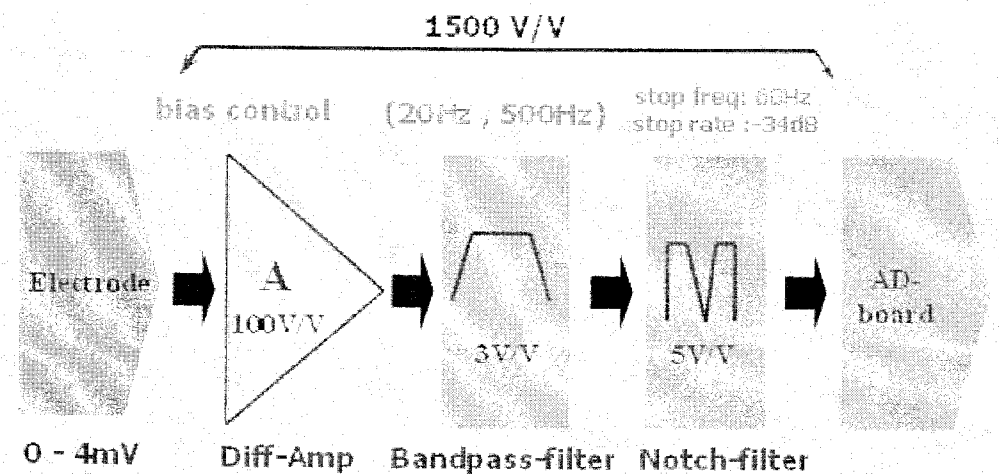


그림 3.2.2.103 생체신호 증폭기의 전체 구조

2) 차등증폭기

앞서 설명한 바와 같이 생체신호는 그 크기가 매우 작아 주위 환경의 잡음에 많은

영향을 받는다. 따라서, 근전도의 경우 차동증폭기를 생체신호 증폭기의 입력단에 사용하여 동상잡음을 제거하여 보다 깨끗한 신호를 얻는다. PSPICE를 이용하여 약 100V/V의 증폭도를 가지는 회로를 이론적으로 설계, 시뮬레이션 후에 그림 3.2.2.104의 회로를 설계, 제작하였다. 제작된 차동증폭기는 R_7 , R_8 의 값을 조정하여 DC offset을 조정할 수 있도록 설계되어 있다. 제작된 차동증폭기를 이용하여 실험해 본 결과 약 97.54V/V(38.4dB)의 증폭도를, 3dB 주파수는 33kHz로 측정되었다(그림 3.2.2.104).

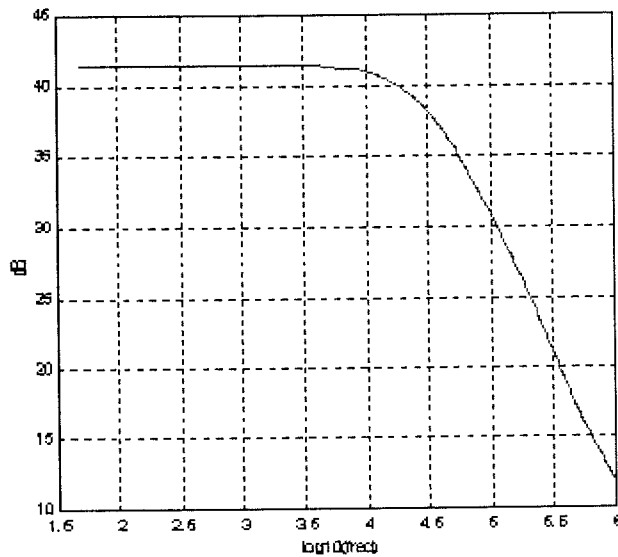


그림 3.2.2.104 차동증폭기의 주파수 응답특성 (note: x축은 log(주파수)이며 y축은 dB(크기)임.)

3) 노치 필터

전원 잡음 등을 포함한 주위 환경의 잡음을 잘 제거할 수 있는 notch filter 부분의 설계가 생체신호 증폭기에서 가장 중요한 부분이다. 특히 전원 잡음의 경우 근전도 신호에 비해서 그 크기가 크개는 30배에 달한다고 알려져 있다[58]. 저항, 커패시터 등의 수동소자를 이용한 간단한 형태의 Notch Filter는 전원노이즈 뿐만 아니라 cut-off 주파수 주위 대역의 신호까지 동시에 제거함으로써 근전도 신호의 유의미한 정보를 잃게 한다. 기존에 널리 알려진 notch filter를 조사, 비교하여 다른 notch filter에 비해서 사용되는 부품 수는 많지만 높은 Q factor와 좋은 안정성(stability)을 가지며 주파수 선택도가 탁월한 Biquad notch filter[59] (표 3.2.2.19)를 2단으로 설계, 제작하였다.

표 3.2.2.19. Notch filter의 성능 비교

	장점	단점
VCVS Band-rejected Filters ($Q \leq 10$) - 그림 3.2.2.105	<ul style="list-style-type: none"> - 사용되는 소자의 수가 적음 - 소자 수에 비해서 Q가 높음 - noninverting gain값을 가짐 - R1으로 f_0를 조절할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - gain이 1로 고정되어 있음
multiple-feedback band-rejected filter ($Q \leq 25$) - 그림 3.2.2.106	<ul style="list-style-type: none"> - gain을 조절할 수 있음 - VCVS보다 높은 Q를 가짐 - R4를 움직이면 f_0와 상관없이 Q를 바꿀 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - inverting gain을 가짐
Biquad Band-reject filter ($Q \leq 50$) - 그림 3.2.2.107	<ul style="list-style-type: none"> - 높은 주파수 선택성을 가짐 - 확실히 높은 Q를 가짐 - 높은 stability - R1을 조절하여 gain값을 조절할 수 있음 - R2를 조절하여 Q값을 조절할 수 있음 - R3를 조절하여 f_0를 조절할 수 있음 - 직렬 연결을 통해 더 높은 차수의 회로 구성 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> - 다른 notch filter에 비해 사용되는 소자의 수가 많음

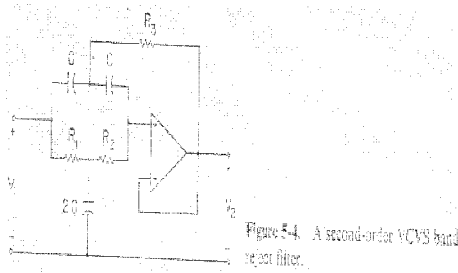


그림 3.2.2.105. VCVS notch filter

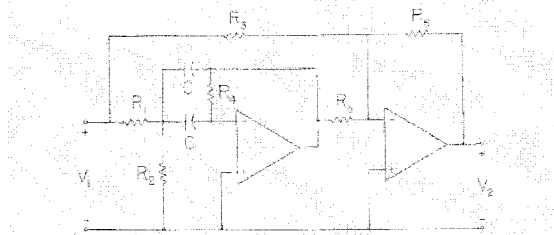


그림 3.2.2.106. Multiple feedback notch filter

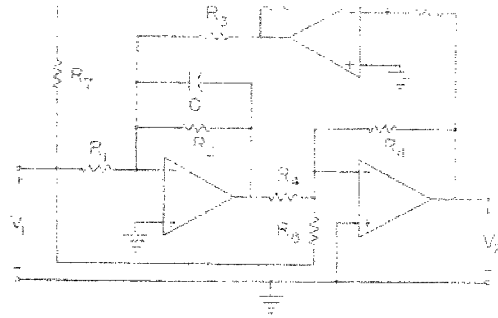


Figure 5-6. A second-order biquad band-reject filter.

그림 3.2.2.107. Biquad notch filter

설계시 1단의 경우 normal gain을 $5V/V$ 로, Q factor를 5, stop rate를 $1/5$ 로 설정하였으며, 2단의 경우 normal gain을 $1V/V$ 로, Q factor를 3, stop rate를 $1/10$ 으로 설계하여 1단과 2단을 cascade로 연결하였다. 여기서 Q factor를 작게 잡은 이유는 60Hz에서의 stop gain을 떨어뜨리기 위함이다. R_8 을 가변저항으로 하여 중심 주파수(center frequency)의 정밀한 조정이 가능하도록 하였으며 실험시에는 오실로스코프를 이용하여 60Hz 성분이 최소가 되도록 조정하였다. 설계된 notch filter의 증폭도는 $5V/V$, 60Hz에서 stop gain은 $0.11V/V$ 로 측정되어 60Hz 성분이 대부분 제거됨을 알 수 있었다(그림 3.2.2.108)

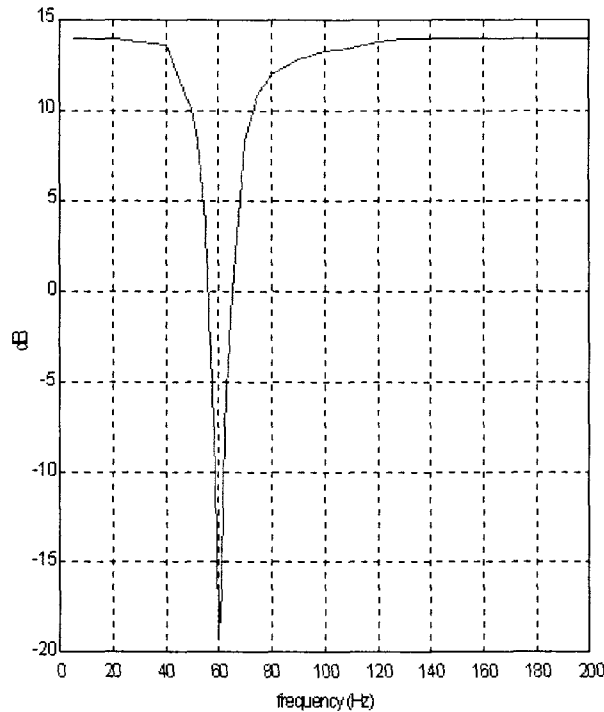


그림 3.2.2.108 설계, 제작된 Biquad notch filter의 주파수 응답특성
(note: x축은 주파수이며 y축은 dB(크기)임.)

4) 전체 회로의 연결

앞서 제작된 차동증폭기, 대역 통과 필터, Biquad notch filter를 이용하여 전체 생체신호 증폭기를 구성하였다. 전체 회로를 연결하는 과정에서 대역통과 필터의 3dB 주파수 설정과 관계된 R_1 을 $22\text{ k}\Omega$ 으로 조정하여 대역통과 필터의 저주파 3dB를 15Hz에서 22Hz로 조정하였다. 그림 3.2.2.109은 전체 생체신호 증폭기의 주파수 응답특성이다. 제작된 생체신호 증폭기는 1500V/V 의 증폭도와 60Hz에서 -32.5dB 의 Stop Rate를 가지며, 20Hz-500Hz의 통과 대역을 가져 근전도 신호를 측정, 증폭하는데 충분한 조건을 만족한다(그림 3.2.2.110). 제작된 생체신호 증폭기를 이용하여 측정한 근전도 신호는 그림 3.2.2.111이다. 전체 회로도 는 그림 3.2.2.112이다.

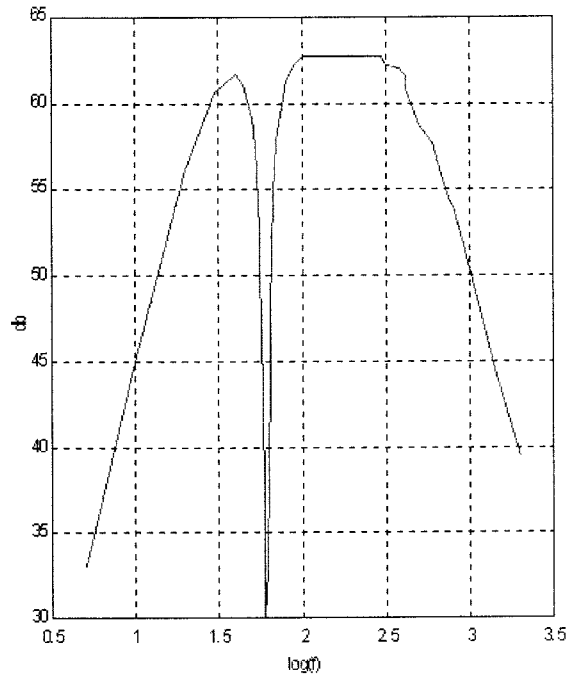


그림 3.2.2.109 설계 제작된 생체신호증폭기의 주파수 응답 특성 (note: x축- log(freq.), y축- 크기(dB))

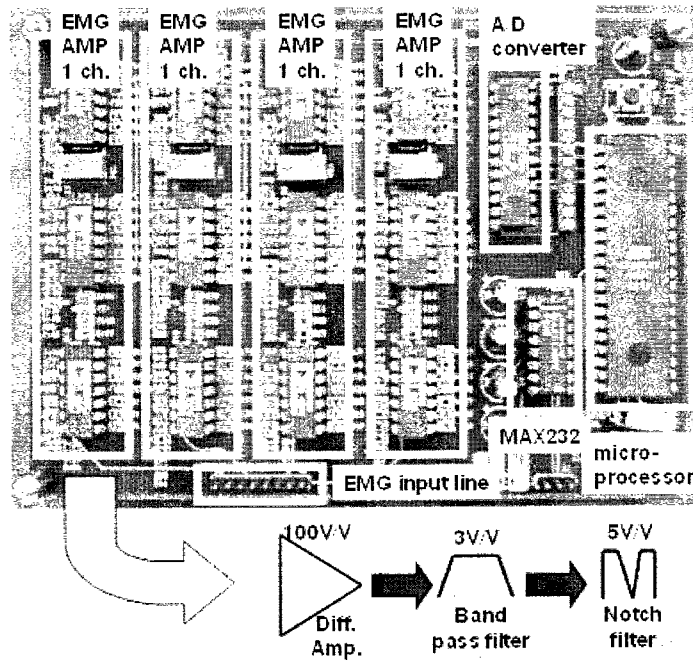


그림 3.2.2.110. 최종 개발된 EMG AMP

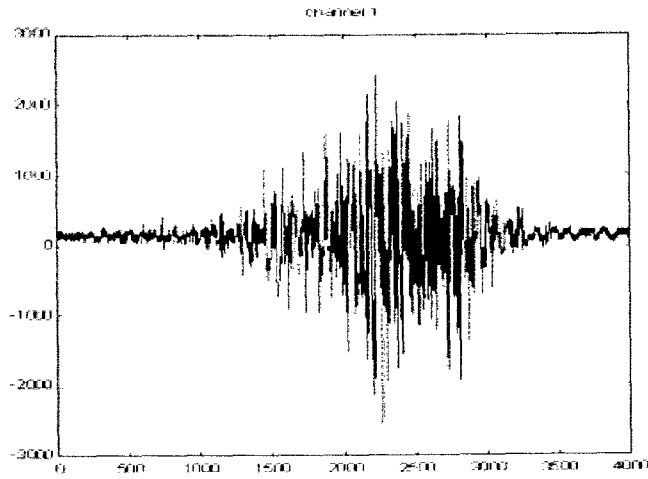
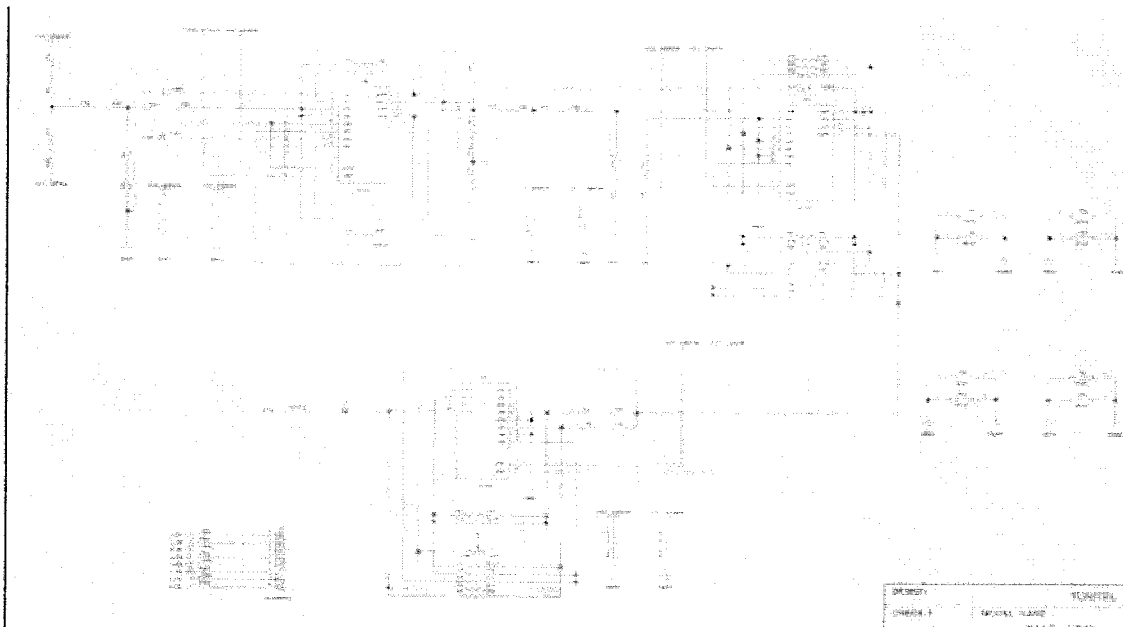
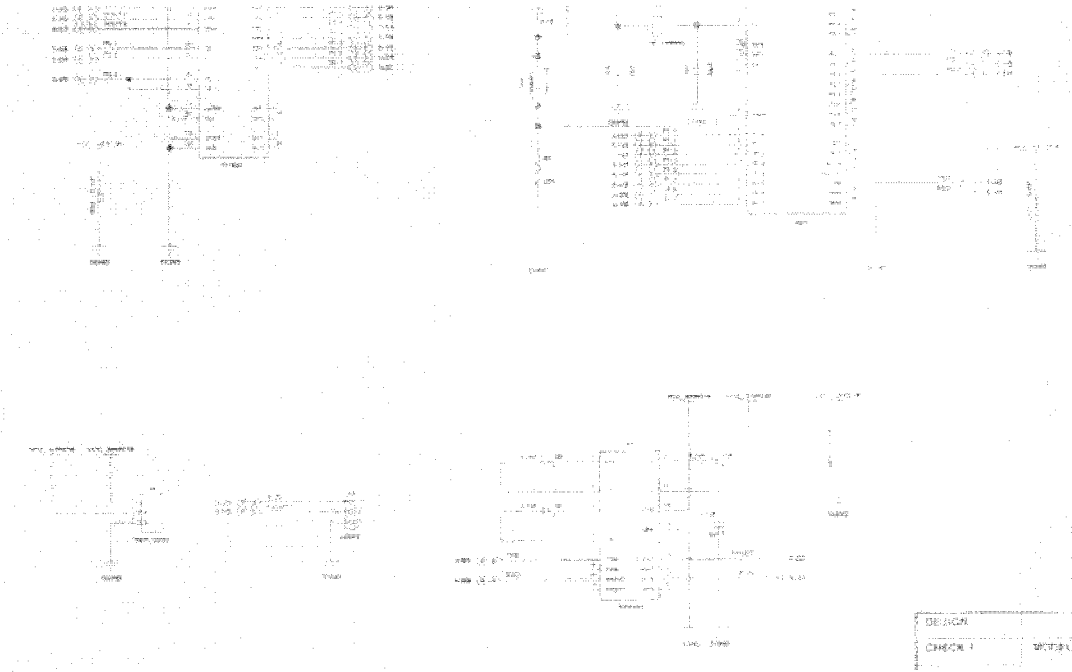


그림 3.2.2.111 제작된 생체신호 증폭기를 이용하여 목 근육에서 측정된 근전도 신호
(note: x축- 샘플수, y축- 근전도 신호의 크기임.)



(a) 아날로그 증폭단 (1채널만 표시)



(b) 디지털 신호 처리 부분
 그림 3.2.2.112. 설계된 근전도 증폭기

5) 부가적으로 개선된 부분

개발된 근전도 증폭기는 아래의 사항을 추가적으로 개선하여 사용상에 보다 편리하도록 하였다.

■ 입력 전원 부분을 소형의 DC-to-DC converter를 사용하여 전체 회로의 크기를 줄임: 전체적인 EMG AMP의 크기를 줄이기 위해서 차동 증폭기, 노치 필터 등에 사용되는 OP AMP를 Quad OP AMP AD704를 사용하였다. AD704는 입력 전압으로 $-5 \sim 5V$ 부터 $-15 \sim 15V$ 의 전압이 필요하다. 하나의 DC 전원(건전지)를 가지고 $+/-$ 전압을 만들기 위해 DC-to-DC converter를 입력 전원부에 설치하였다. 사용한 DC-to-DC converter는 LAMBDA사에서 제조한 PPD3-12-1212 이다. 입력 전압은 $+9V$ 이고 출력 전압은 $+/-15V$ 이다.

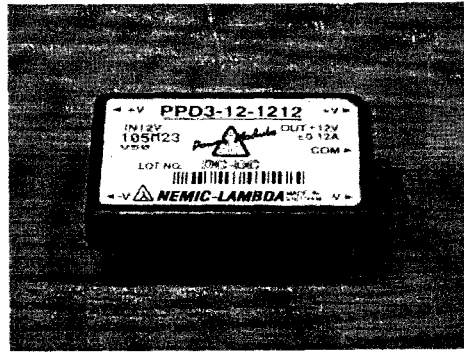


그림 3.2.2.113. DC-to-DC converter

■ clamp 회로를 도입하여 과입력으로 인한 A/D chip을 보호함: 증폭된 신호의 A/D 변환을 위해서 사용하는 chip은 AD7824이다. microprocessor와의 입출력 연결부가 간단한 AD7824 chip은 4채널의 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환할 수 있으며 최대 채널당 10kHz의 A/D 속도를 보장한다. 하지만, 입력단의 과부하로 인한 보호회로가 없어 회로가 이상 동작시 칩이 고장 나는 단점을 갖는다. 이를 방지하기 위해서 그림 3.2.2.114와 같은 zener diode와 저항을 이용한 간단한 clamp 회로를 설계하여 A/D 입력단에 각각 달아주었다.

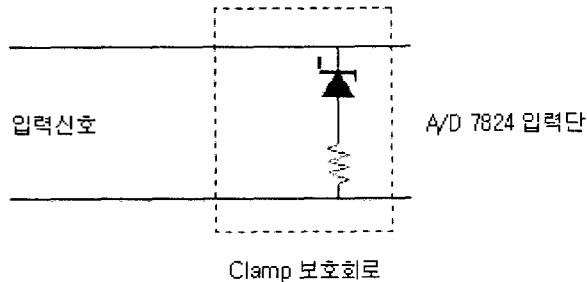


그림 3.2.2.114. AD7824 보호 Clamp 회로

■ debug LED를 장착하여 추후 사용상에 편리함을 기함

6) RF 부분

이렇게 측정된 근전도 신호를 PC로 전송하기 위해서 RF module을 개발하였다. 기존에 사용되는 근전도 측정기의 경우 증폭기와 PC 사이에 유선으로 연결되어 있어 실제 사용함에 있어 많은 불편을 초래하였다. 최근에 무선 근전도 증폭기가 개발되어 상용으로 판매되고 있으나 제품의 가격이 고가(Laxtha, 4채널 무선 근전도 증폭기, 약 1000만원)이어서 일반적으로 사용하기가 쉽지 않다.

그림 3.2.2.115는 RF module을 포함한 전체 시스템의 구성도이다. 사용자로부터 측정된

근전도 신호는 개발된 EMG AMP에 의해 증폭되고 A/D 변환된다. 이렇게 변환된 신호를 RF module을 이용하여 송신한다. 이 때 송신단과 수신단 사이에는 전송 에러를 줄이기 위해 패킷 통신을 한다. 수신단에서는 받아들인 신호에서 채널별로 데이터를 분리한 뒤에 PC와 RS-232 통신을 통해서 데이터를 전달한다.

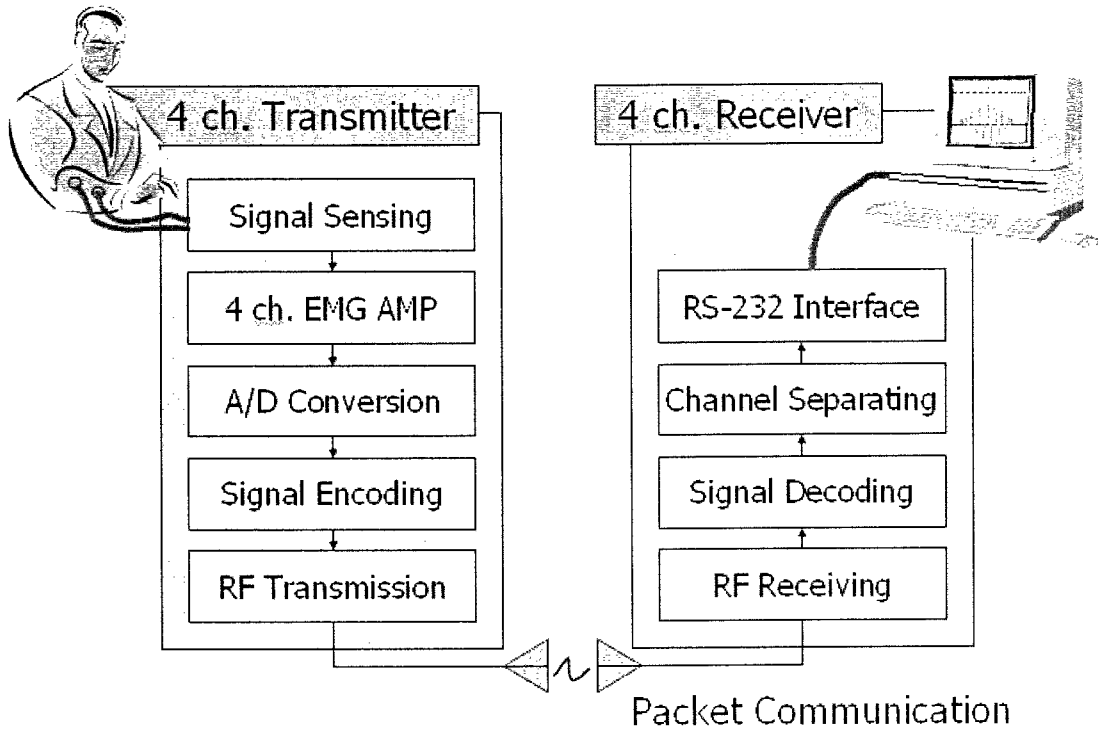


그림 3.2.2.115. 무선 근전도 증폭기의 전체 구성도

여기에서 사용한 RF chip은 그림 3.2.2.116와 같다. 기존에 사용하던 RF chip보다 성능이 우수하며 전송속도도 빠른 BiM2는 현재 로봇 축구에서 RF 통신을 위해 많이 사용되고 있다 (표 3.2.2.20).

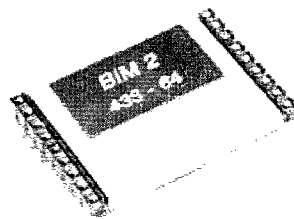


그림 3.2.2.116. 무선 통신을 위해 사용한 BiM2 칩의 외관

표 3.2.2.20. 무선 통신을 위해 사용한 BiM2 칩의 특징

항목	내용
특징	<ul style="list-style-type: none"> - EN-300 220-1 & ETS 300 683에 준수하여 - TX 파워 10mW @ 5V - RX수신감도 -100dBm @ 1ppM BER - 데이터 전송 속도 64Kbps - 열린공간에서는 200m, 빌딩내에서는 50m - 완전한 간섭 차단 - SAW제어 FM 송,수신기 - 이중전환 슈퍼헤드 수신기 - 낮은 높이 < 4mm - BiM-433-F와 교체하여 사용 가능 - 저 전력 사용 - 기존의 RX/TX 보다 속도 빨라졌음
사양	<ul style="list-style-type: none"> - Size 23 x 33 x 4mm - 사용주파수 : 433.92MHz - TX파워 : 10mW @ 5V - RX 수신감도 : -100dBm @ 1ppm BER - 사용전압 : 3-6V @ 12mA tx & 17mA rx - 데이터 전송속도 : 64Kbit/s - 이미지 거부 : -70dB - 저 누출 : -70dBm

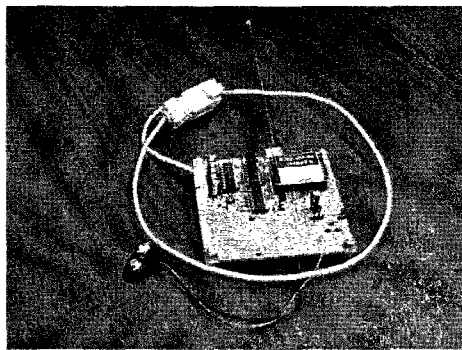


그림 3.2.2.117. 제작된 무선 Module(수신 모듈)

또한 시리얼 통신시 송/수신 에러를 줄이기 위해서 패킷 통신을 사용하였다. 그림 3.2.2.118은 RF 칩 제조회사에서 추천하는 패킷 형식과 실제 실험에 사용한 패킷 형식을 나타낸 것이다.

3ms 이상의 프리앰블	0xFF	(0xFF)	Start byte	(0x01)	Data bytes	CRC or Check Sum
--------------	------	--------	------------	--------	------------	------------------

수신 안정화 신호: 수신기 내부에 있는 데이터 슬라이서의 정상동작을 위해 최소 3ms이상의 01B (10B) 값이 필요함

(a) RF 칩 제조사에서 추천하는 패킷의 형태

0x55 * 10	0xFF	(0xFF)	0x01	0x02	Data bytes	0x03
-----------	------	--------	------	------	------------	------

(b) 실제 실험에 사용한 패킷의 형태

그림 3.2.2.118 RF 칩 제조사에서 추천한 패킷의 형태와 실제 사용한 패킷의 형태

그림 3.2.2.119은 입력 아날로그 신호와 A/D 변환 후 RF 수신 신호를 나타내고 있으며 표 3.2.2.21은 전송속도 및 전송 거리에 따른 송/수신 성공률을 나타낸다.

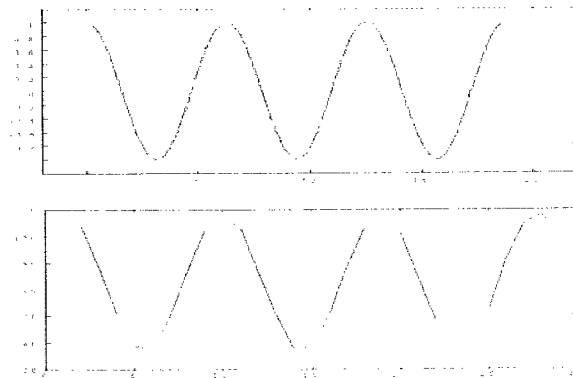


그림 3.2.2.119. 입력 아날로그 신호와 A/D 변환 후 RF 수신 신호 (x축은 데이터의 수, y축은 신호의 크기를 나타냄.)

표 3.2.2.21. 거리 및 통신 속도에 따른 통신 수신 성공률

전송 속도 (Baud)	수신 성공률	통신 거리 (m)	수신 성공률
9600	100%	1	100%
14400	98%	3	100%
19200	90%	5	90%

(4) 중증 척수 장애인을 위한 소형화된 휠체어 인터페이스의 개발

중증 척수 손상 장애인의 경우 기존에 전동 휠체어를 제어하기 위해서 사용되는 입력 장치들, 예를 들면, 조이스틱, sip & puff 장치, 초음파 장치들은 사용할 수 없거나 사용자가 제한되는 단점이 있다. 또한 sip & puff 장치의 경우에는 입으로 장치를 동작을 시켜야 하므로 휠체어를 동작시키는 동안 의사소통을 할 수 없는 단점을 갖는다. 중증 척수 손상 장애인이라 하더라도 어깨나 목의 움직임은 자의적으로 가능하며 이런 근육의 움직임으로부터 근전도 신호를 측정해 낼 수 있다. 이렇게 측정된 근전도 신호로부터 사용자의 명령을 해석하여 휠체어 구동 명령을 내림으로써 보다 자연스럽게 전동 휠체어를 제어할 수 있다.

1) 근전도 측정 위치의 선정

중증 척수 손상 장애인의 어깨나 목의 여러 근육 중에서 자의적으로 수축이 가능하며 그 수축 정도가 크게 나타나는 두 곳의 근육을 근전도 측정을 위한 후보지로 선정하였다. (그림 3.2.2.120) 이렇게 선정된 근육 후보지에서 휠체어 명령을 위한 어깨나 목의 운동시 근전도를 측정해 보았다. 측정된 결과를 그림 3.2.2.121와 같다.

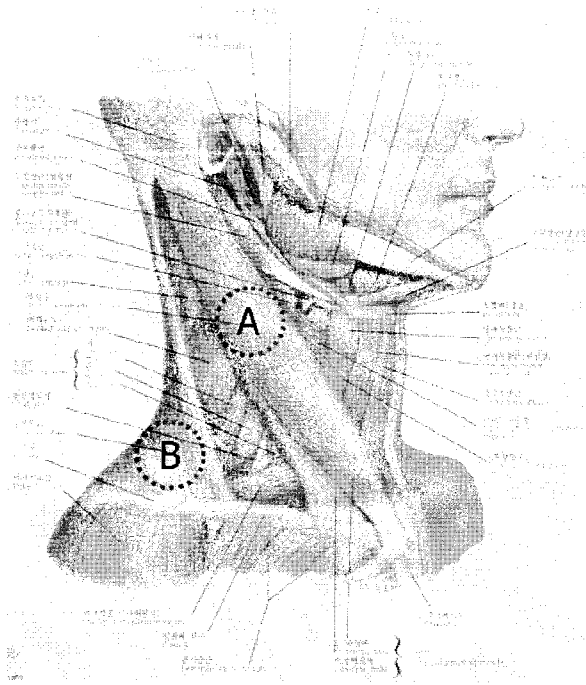


그림 3.2.2.120. 휠체어 조이스틱 제어기 개발을 위한 근전도 측정 후보 선정 위치
(참고: A- 목빗근(Sternocleidomastoid Muscle, B- 등 세모근(Trapezius Muscle))

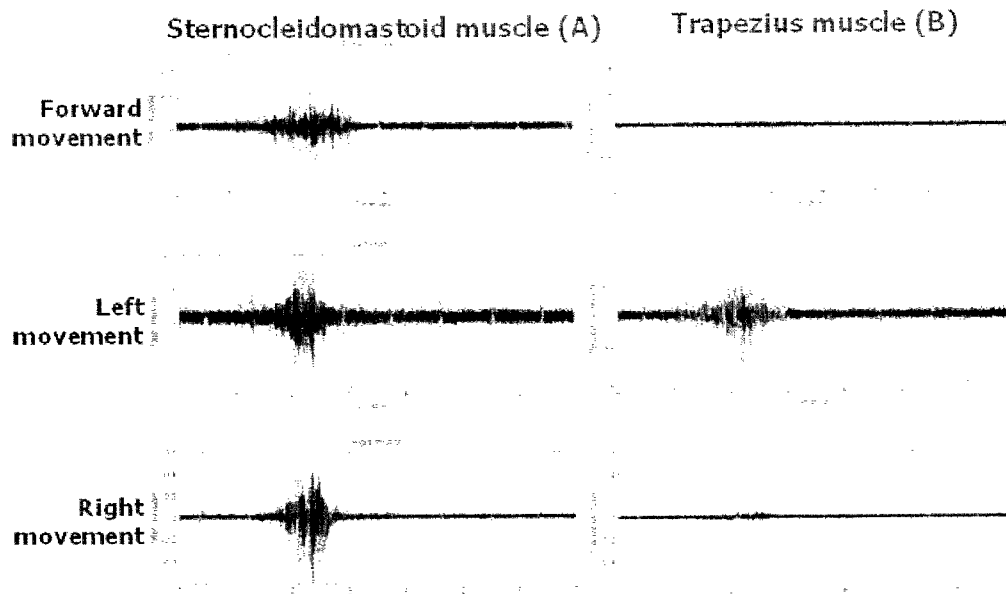


그림 3.2.2.121. 목의 각 동작에 따른 근육 후보지에서 측정된 근전도 신호

그림 3.2.2.121에서 볼 수 있는 것처럼 근육 위치 (A)에서는 목의 좌, 우, 앞의 움직임에 대해 근육이 적절히 수축함을 알 수 있으나 (B)의 경우에는 목의 좌측 운동에서만 근육이 수축함을 알 수 있다. 따라서 최종적으로 선정된 근육의 위치는 그림 3.2.2.122과 같다.

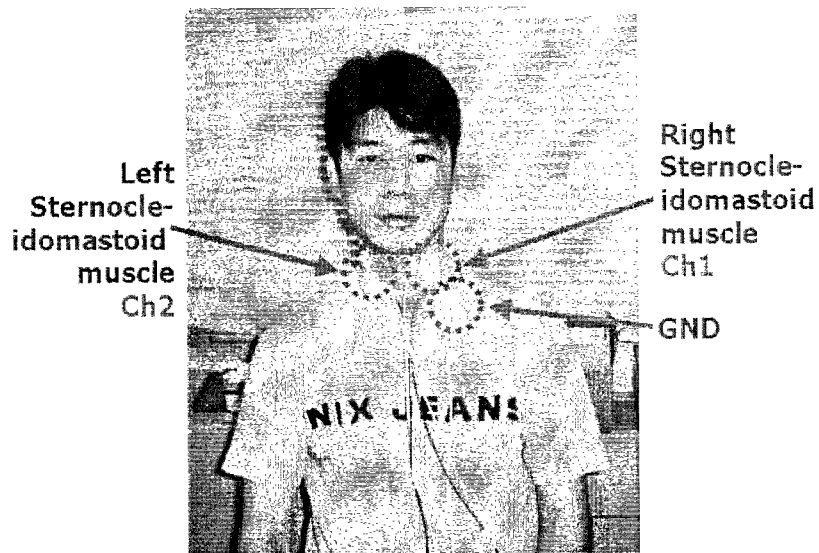


그림 3.2.2.122. 선정된 근전도 측정 위치

2) 유효한 특징 집합의 선정

기존에 널리 알려진 동작 분류를 위해 사용된 특징들은 분류하고자 하는 동작에 따라 그 성능이 차이가 난다. 따라서 기존에 널리 알려진 특징 집합들을 사용자의 목 운동(좌, 우, 앞으로 운동, 정지)에 따라 추출하여 각 특징들의 동작에 대한 유용성을 검증하였다. 이 때 사용한 특징 집합은 다음과 같다.

■ 절대적분치(IAV; Integral Absolute Value): 근전도 신호의 절대 적분치를 나타내는 특징으로서, 일정시간 동안의 신호의 절대값을 적분한 것이며 다음 식으로 정의된다.

$$\overline{X}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_j(i\Delta t)|$$

여기에서 j 는 채널 번호, x_j 는 채널 j 에서 측정된 근전도 신호이며, i 는 샘플의 순서, Δt 는 샘플링 시간 간격, N 은 샘플의 수를 나타낸다.

■ 분산(VAR; Variance): 근전도 신호가 평균값에서 얼마나 떨어져 분포되어 있는가를 나타내는 특징으로서 다음 식로 표현된다.

$$\sigma_j^2 = E[x_j^2] - \{E[x_j]\}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \{x_j(i\Delta t)\}^2$$

여기에서 $E[x_j] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{x_j(i\Delta t)\}$ 이며, x_j 의 평균값을 나타낸다.

■ 영교차수(ZC; Zerocrossing): 근전도 신호가 영점을 지나는 횟수로 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$ZC_j = \sum_{i=0}^{N-1} q[x_j(i\Delta t)x_j((i+1)\Delta t)]$$

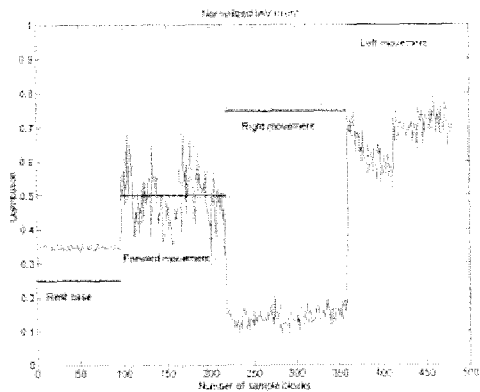
이 때, $q(x) = \begin{cases} 1, & x < 0 \text{ 인 경우} \\ 0, & \text{그 외} \end{cases}$ 이다.

■ 이동평균 RMS값(MARMS; Moving Average Root Mean Square): 특정 Window 동안의 근전도 신호의 제곱의 평균의 제곱근을 의미하며 다음 식으로 정의된다.

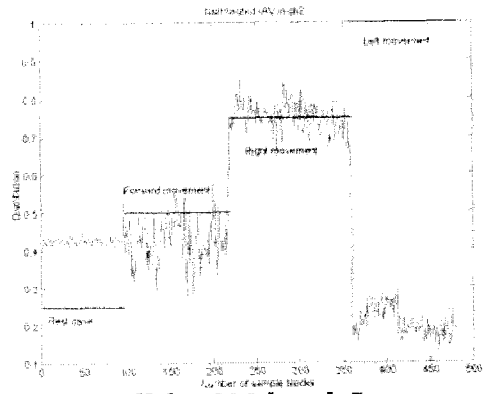
$$y(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=k-(N-1)}^k x^2(i)}$$

여기서, $x(i)$ 는 시간영역에서 근전도 신호, $y(k)$ 는 추정된 힘 정보, N 은 Sliding Window의 크기이다.

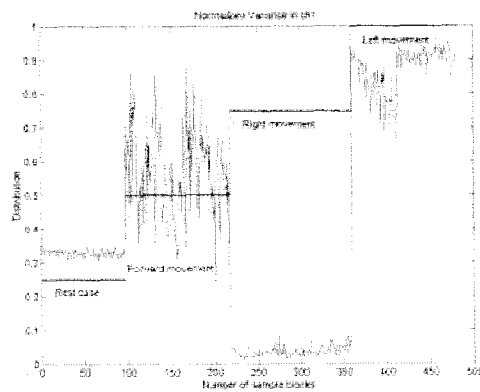
채널 1과 채널 2에서 추출된 위의 4가지 특징들을 각 동작에 따라 그래프로 그려보면 그림 3.2.2.123, 그림 3.2.2.124과 같다. 여기에서 x축은 sample block의 수를 의미하며 y축은 각 특징들의 분포를 나타내고 있다. 또한 그래프 안의 첫 번째 직선동안은 rest 상태, 두 번째 직선동안은 앞으로 목을 숙인 상태, 세 번째 직선동안은 목을 오른쪽으로 움직인 상태, 네 번째 직선동안은 목을 왼쪽으로 움직였을 때 각 특징들을 추출한 것이다. 그림 3.2.2.123은 각 동작에 대해서 특징들의 분리도가 뛰어나고 동일한 동작에 대해서 분포가 한 곳에 몰려 있어 패턴 분류를 위한 특징으로 사용하기에 유용하다. 이에 비해 그림 3.2.2.124의 특징들은 각 동작에 대한 특징들이 서로 겹칠 뿐만 아니라 동일한 동작에 대해서도 그 분포가 퍼져 있어 패턴 분류를 위한 특징으로 사용하기에 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 IAV, VAR만을 패턴 분류를 위한 특징으로 사용하였다.



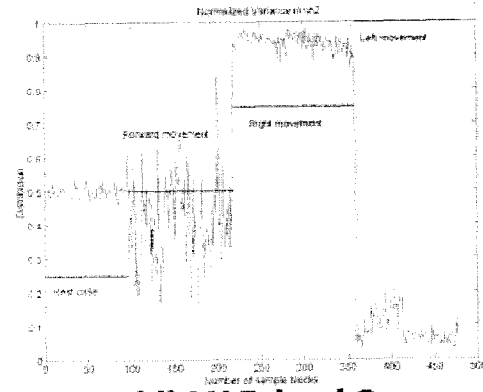
(a) IAV in ch1



(b) IAV in ch2

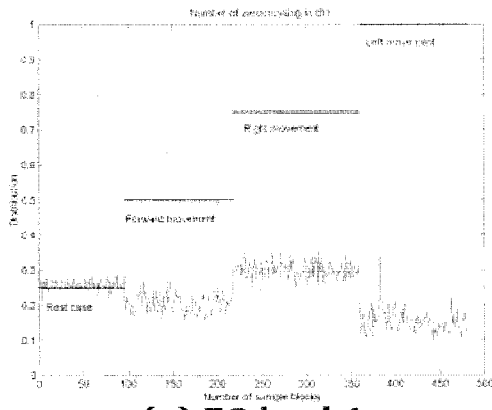


(c) VAR in ch1

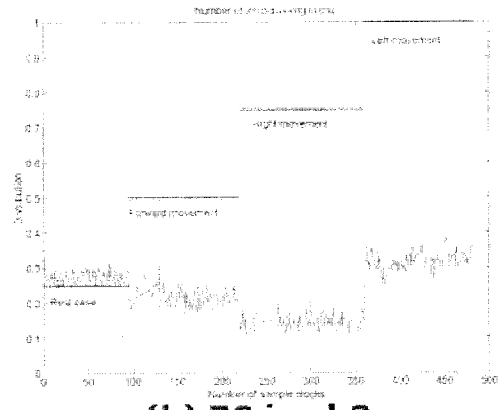


(d) VAR in ch2

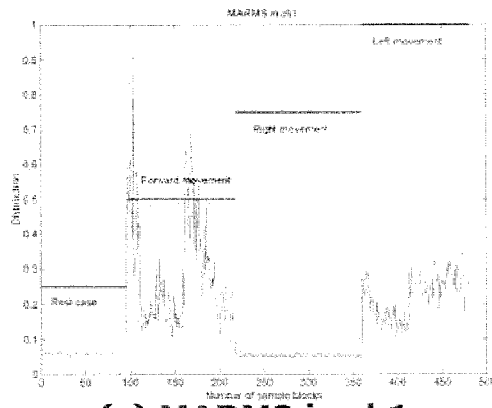
그림 3.2.2.123. 기본 목운동 동작별로 분리도가 뛰어난 특징들: IAV, VAR



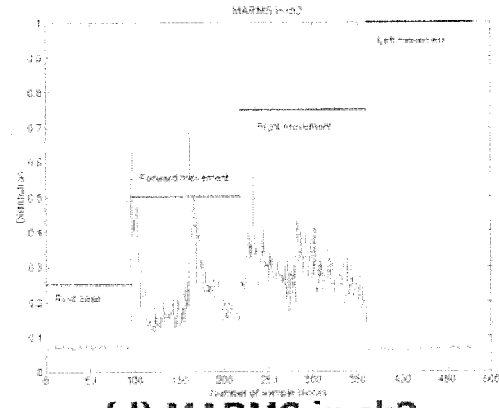
(a) ZC in ch1



(b) ZC in ch2



(c) MARMS in ch1



(d) MARMS in ch2

그림 3.2.2.124. 기본 목운동 동작별로 분리도가 나쁜 특징들: ZC, MARMS

3) 패턴 분류

앞 절에서 선택된 특징 집합을 이용하여 목의 좌, 우, 앞, 정지 상태를 분류하는 패턴 분류기를 설계하였다. 설계된 패턴 분류기의 결과를 이용하여 전동 휠체어를 구동하기 전에 중증 척수 손상 장애인을 대상으로 개발된 분류기가 유용한지를 검증해 보았다. 이를 위해 그림 3.2.2.125의 휠체어 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 휠체어 시뮬레이터는 분류결과에 따라 화살표의 방향이 바뀌며 추출된 힘의 크기에 따라 화살표의 크기가 바뀔 수 있도록 제작되었다. 그림 3.2.2.126은 중증 척수 장애인과 실험하는 모습이며 그림 3.2.2.127는 이동로봇을 이용하여 실험하는 장면이다.

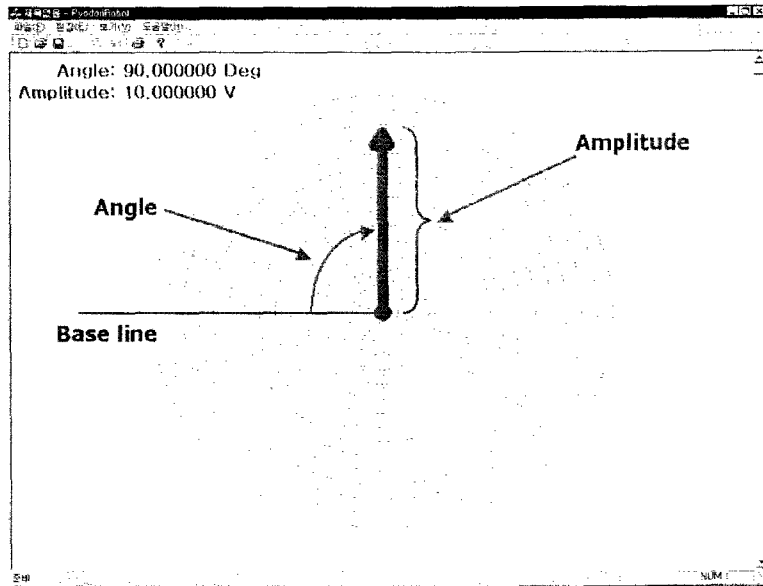


그림 3.2.2.125. 개발된 휠체어 조이스틱 시뮬레이터

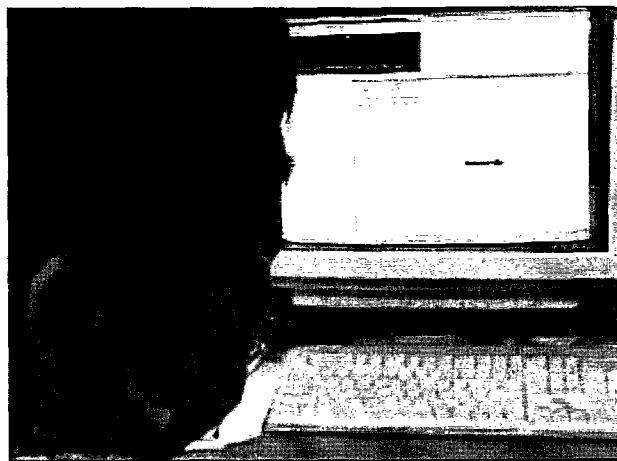


그림 3.2.2.126 개발된 휠체어 조이스틱 시뮬레이터를 이용한 중증 척수 손상 환자의 실험장면

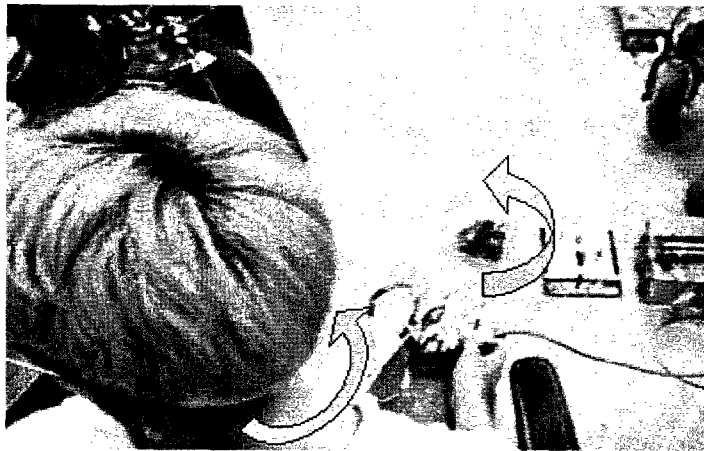


그림 3.2.2.127. 근전도 신호에 기반한 휠체어 제어를 이용한 이동 로봇 실험 장면

표 3.2.2.22, 3.2.2.23은 패턴 분류 결과이다.

표 3.2.2.22. 학습 데이터를 이용한 분류 결과 (평균 분류결과= $474/480 \times 100 = 98.75\%$)

분류 결과	rest case	forward movement	right movement	left movement
rest case	96	5	0	0
forward movement	0	117	0	1
right movement	0	0	141	0
left movement	0	0	0	120
평균 분류 성공율	$96/96 \times 100 = 100\%$	$117/122 \times 100 = 95.9\%$	$141/141 \times 100 = 100\%$	$120/121 \times 100 = 99.2\%$

표 3.2.2.23. 테스트 데이터를 이용한 분류 결과 (평균 분류결과= $439/480 \times 100 = 91.2\%$)

분류 결과	rest case	forward movement	right movement	left movement
rest case	96	7	0	0
forward movement	0	114	4	29
right movement	0	1	137	0
left movement	0	0	0	92
평균 분류 성공율	$96/96 \times 100 = 100\%$	$112/122 \times 100 = 91.8\%$	$137/141 \times 100 = 97.2\%$	$92/121 \times 100 = 76.0\%$

(5) 임상 실험을 통한 근전도 휠체어 인터페이스에 대한 평가 및 성능 보완

중증 척수 손상 장애인을 위한 근전도 기반 휠체어 인터페이스를 실제 사용자들에게 평가를 받아보았다.

사용상의 용이함, 사용상의 정확성, 근전도 측정을 위해 붙이는 전극에 대한 느낌, 개발

된 시스템의 외관에 대해서 평가를 하였다. 그림 3.2.2.128은 사용자 평가결과를 보여주고 있다. 대체적으로 쉬운 사용법과 사용상의 정확성에 만족하였지만 근전도를 측정하기 위해 전극을 붙이는 과정에 대해서는 거부감을 나타내는 사용자도 있었다. 특히 근전도 신호를 잘 측정하기 위해 전극 안쪽 면에 electrode paste를 바르게 되는데 이를 싫어하는 사용자가 많았다. 이런 사용자의 의견을 반영하기 위해서 Delsys사에서 개발한 paste없이 측정 가능한 전극을 구입하여 추후 연구에 활용하고자 한다.

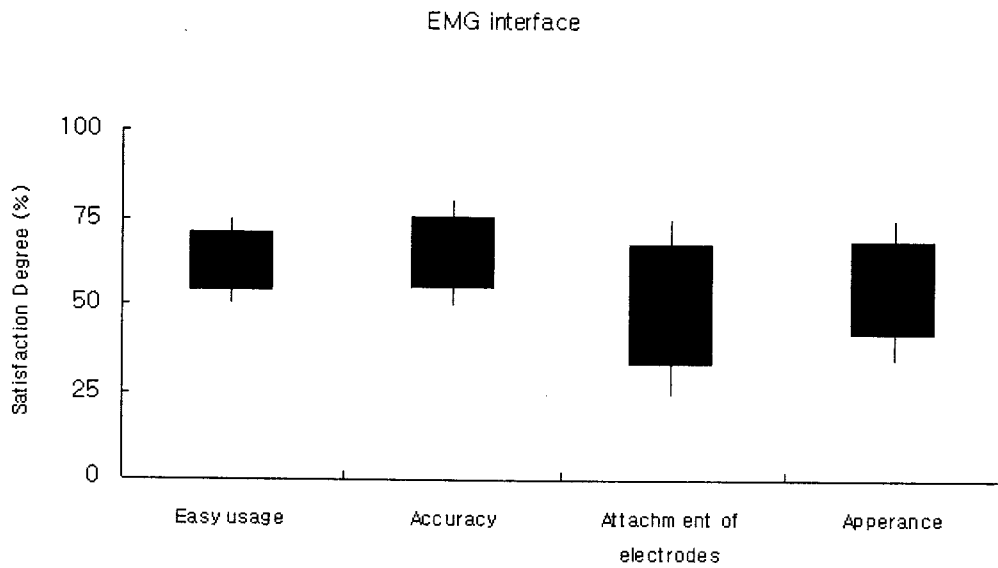


그림 3.2.2.128. 근전도 기반 전동 휠체어 인터페이스의 사용자 평가 결과

3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발

가. 장착형 Eye-mouse 시스템

(1) 전체 시스템 구조

시선 방향 추적 시스템의 전체 구성은 두 가지로 나뉜다. CCD 카메라로 눈의 영상을 얻어서 동공을 검출하는 부분과 머리의 움직임을 알아내는 자기센서 부분이다. 그림 3.3.3.1은 시스템의 전체 구조를 나타내고 있다.

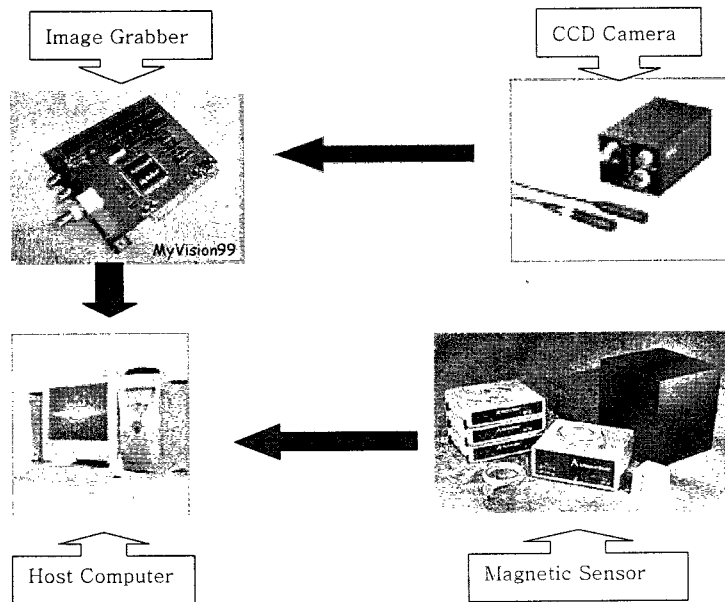


그림 3.3.3.1 전체 시스템 구조

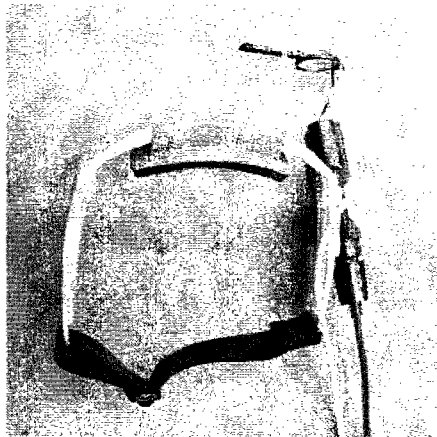


그림 3.3.3.2 장착형 기구부



그림 3.3.3.3 기구부 장착한 모습

컴퓨터는 1.4GHz 펜티엄IV 프로세서를 사용하였다. 이미지 그래버는 Micro-robot사의 MyVision을 이용하였다. MyVision 이미지 그래버는 NTSC 신호를 이용하며, 영상 획득 속도는 30 frames/sec 이다. 여기에서는 CCD 카메라를 이용해서 눈의 영상을 받아들이기 위한 기구부를 설계하였다. 기구부의 구조는 그림 3.3.3.2와 같고, 그림 3.3.3.3에서는 장착한 모습을 보여주고 있다. 기구부의 전방에는 적외선 LED 가 있어서 적외선을 조사한다. 적외선 빛의 방향이 카메라의 광축과 일치할 때는 동공이 밝은 흰색으로 변하고, 광축과 어긋날 때는 더욱 어두운 검은색으로 되는 현상이 발생하는데, 실험할 때 이용하는 입력 영상은 동공 부분이 어두워지는 영상을 이용한다.

서양인과 같이 홍채가 푸른빛을 띠면 동공을 찾는 것이 쉬울 수도 있으나 동양인처럼 갈색이나 흑갈색의 눈에서는 영상만으로 검은 눈동자 중에서 동공 부분만을 구분해 내기가 상당히 어려운 문제이다. 이런 이유로 인해서 동공을 구분해 내고자 적외선 빛을 이용하였다.

그림 3.3.3.5는 눈 영상 획득에 대한 개략도를 보여주고 있다. 적외선 LED에서 빛을 조사하면 눈의 동공부분이 더욱 검은색으로 바뀌고, 기구부의 전방에 달린 거울을 통해서 반사된 영상을 CCD 카메라에서 받아들인다. 이용된 CCD 카메라는 JAI사의 CV-M538 Remote Head Monochrome CCD 카메라로 그림 3.3.3.4에서 살펴 볼 수 있다. 카메라의 크기는 직경 17.2mm, 길이 95mm 값을 갖는다. 적외선 LED는 Agilent Technologies 의 HSDL-4400 을 사용하였다. LED의 파장은 875nm이고 조사 각도는 110°이다.

머리의 움직임을 알아내기 위해서 자기센서를 이용하는데 자기센서는 Ascension Technology Corporation의 Flock of Birds(FOB)를 이용하였다. FOB는 전송부(transmitter)에서 자기장을 발생시키고, 전송부에 대한 수신부(receiver)의 상대적인 위치를 알아내는 장치이다. FOB는 동시에 30개의 수신부까지 이용가능하며 3차원의 위치와

회전 정보를 알아낼 수 있는 6 자유도(DOF)의 측정 장치이다. 수신부가 전송부의 ± 4 feet 안에 위치할 경우에 각 수신부의 위치와 회전 정보를 초당 20-144 번 정도 측정이 가능하다. 작동 범위는 옵션에 따라서 ± 8 feet 까지 확장 가능하다. FOB는 펄스형태의 DC 자기장을 전송하고 동시에 모든 수신부에서 자기장을 측정하여 위치와 회전 정보를 결정한다. 측정된 자기장의 특성을 가지고 각각의 센서는 독립적으로 자신의 위치와 회전 정보를 계산하여 이것을 사용자의 컴퓨터에서 이용할 수 있도록 정보를 넘겨준다. FOB와 컴퓨터와의 통신은 RS-232C 인터페이스를 사용한다. 머리의 6 자유도는 머리에 장착하는 기구부에 부착된 자기 센서에 의해 측정한다. 자기 센서의 크기는 약 $25 \times 25 \times 20mm$ 정도로 작고 가벼운 장치이다. 전송부에서 자기장을 발생시키면 수신부에서 감지하여 머리의 위치와 회전 정보를 얻을 수 있게 된다. 만약 자기장의 영역 내에 낮은 주파수의 electromagnetic interference(EMI)나 금속 물체가 존재한다면 자기센서의 성능이 저하된다. 따라서 자기 센서의 성능을 보장하기 위해서는 전송부와 수신부 모두가 컴퓨터의 모니터나 전원공급기 등의 EMI를 생성하는 물체로부터 어느 정도 떨어진 곳에 위치해야 하고 자기장의 영역 내에 금속 물체가 없어야 한다. 자기센서의 측정 범위를 살펴보면 평행 이동에 대해서는 측정 범위가 $122cm$ 이다. 회전 운동에 대해서는 azimuth 와 elevation 은 180° 이고 roll 방향에 대해서는 90° 이다.

그러므로 눈동자의 시선을 측정하기 위해서 머리에 장착하는 기구부에는 CCD 카메라, 거울, IR LED, 자기센서의 수신부 등이 부착되어 있고, 이러한 센서 데이터들의 융합으로 최종적으로 눈동자의 시선을 계산해 낼 수 있다. 여기에서 제작한 장착형 eye-mouse 시스템의 전체 질량은 $240g$ 이고, 기존의 상용 제품들과 가격을 비교해보면, Applied Science Group의 Model210이 2000 만원이고, LC Technologies 의 Eye-gaze Development System 이 $\$17,900$ 인데, 여기에서 설계된 전체 시스템의 가격이 PC, 카메라, 자기센서 등을 합한 총액이 550만원 정도이므로 상대적으로 저렴한 시스템을 구축했다고 볼 수 있다.

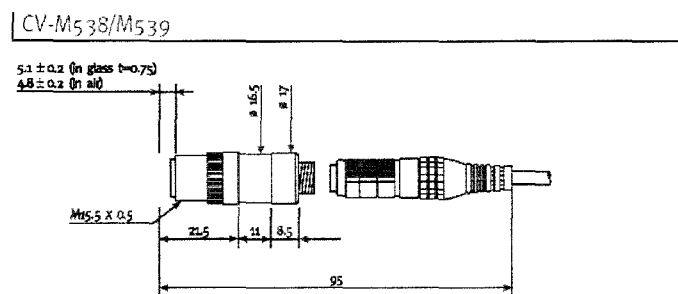


그림 3.3.3.4 CCD 카메라

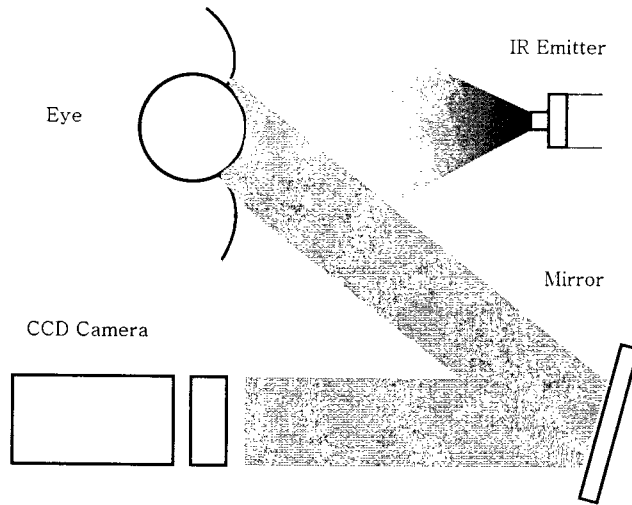


그림 3.3.3.5 눈 영상 획득에 대한 개략도

(2) 적외선과 자기센서의 안전성

레이저 빛은 파장에 따라 자외선, 가시광선, 적외선으로 이루어진다. 레이저가 다른 빛과 다른 특징은 직진성이 강하다는 점이다. 자외선은 $100\sim 400nm$, 가시광선은 $400\sim 700nm$, 적외선은 $700nm \sim 1mm$ 의 파장 영역을 갖는다. 레이저 빛의 직진성 때문에 레이저 빛이 비추어 질 때 그 빛이 부분적으로 흡수되어서 물체의 내부나 표면 온도를 증가시킬 수 있다. 이러한 경우에 물체를 변형시킬 수 있는 가능성이 있다. 또한, 사람 눈의 가장 앞쪽 바깥에 위치한 각막은 피부와는 다르게 눈을 보호하는 외부 표피층이 없다. 빛의 스펙트럼 중에서 자외선의 가장 아래 부분과 적외선의 가장 윗부분의 빛이 눈에 입사된다면 각막은 레이저 에너지를 흡수해서 눈에 피해를 줄 수 있는 가능성이 있다. 파장대가 대략 $400nm$ (violet light)부터 $1400nm$ (near-infrared) 에 이르는 부분을 *retinal hazard region* 이라고 부르는데 가시광선, 적외선이 포함된 부분으로 눈 주위에서 사용할 때는 주의를 기울일 필요가 있다. 이 파장대의 빛이 눈에 입사된다면 눈의 수정체가 볼록렌즈의 역할을 해서 망막의 어느 한 지점에서 초점이 형성되어 그 지점에서 단위 면적당 에너지가 높아져서 좋지 않은 결과를 초래할 수 있는 가능성이 있다. [11]

레이저 빛은 눈에 입사되어 수정체를 거쳐서 망막에 초점을 형성한다. 레이저의 이러한 특성으로 인해서 선진국에서는 레이저의 안전한 사용을 위한 규약을 정해 놓고 있다. 레이저의 안전성에 관한 연구는 David Sliney가 집필한 *Safety with Lasers and Other Optical Sources*로부터 찾아볼 수 있다. 이 책에서는 $400\sim 1400nm$ 의 파장대의 빛이 눈에 입사될 때, 눈 표면에서의 빛의 세기가 $10 mW/cm^2$ 이하이면 안전하다고 말하고 있다. 레이저의 안전성을 규정하는 규약은 여러 가지가 있으나 그 중에서 가장 중요하고, 가장 많

이 언급되고 있는 규약은 American National Standards Institute 에서 규정한 ANSI Z136.1이다.[12] 이 규약은 미국의 노동안전위생국(Occupational Safety and Health Administration)과 미국의 여러 주에서 레이저의 안전성을 평가하는 근거로써 사용되고 있다. 이 규약에서는 700~1050nm 레이저 빛에 대해서 노출시간이 10~3×10⁴sec 일 때, maximum permissible exposure (MPE)를 2.24 mW/cm²로 정의하고 있다. 여기서 MPE는 사람이 레이저에 노출되었을 때 눈이나 피부에 상해나 생물학적인 변화를 주지 않는 최대 한의 레이저 방사 정도를 말한다.

그림 3.3.3.6은 실험에 사용된 적외선 LED를 보여주고 있다. 이 적외선 LED는 Agilent Technologies의 HSDL-4400 제품으로 조사각도가 110°로써 직진성이 약하다. ANSI 규약에서는 직진성이 강한 레이저 빛에 대해서 안전성을 규정하고 있다. 직진성이 약하면 눈에 조사된 빛이 수정체를 지나 망막에서 초점이 형성될 가능성이 낮아진다. 따라서 직진성이 낮은 빛을 조사할 경우에는 ANSI 규약에서 정의하고 있는 MPE 값보다 더 큰 값의 빛이 조사되어도 안전하다고 말할 수 있다.

표 3.3.3.1은 사용한 적외선 LED 의 규격을 나타내고 있고 그림 3.3.3.7은 각도에 따른 상대적인 복사 강도를 보여주고 있다.

장착형 기구부의 전방에 적외선 LED가 부착되어 있고, 눈에서 LED까지의 거리는 7cm 정도이다. LED에서 7cm 떨어져서 적외선 빛의 세기를 측정하니 0.3~0.4 mW/cm² 정도의 측정값을 얻을 수 있었다. 이 값은 최악의 경우를 고려하여 적외선 빛을 레이저로 가정했을 때 허용되는 2.24 mW/cm² 보다도 훨씬 작은 값이다. 따라서 실험에 사용한 적외선 LED 의 빛의 세기는 안전하다고 말할 수 있다. 시선방향을 찾기 위해서 적외선을 이용한 다른 제품으로는 Applied Science Laboratories 의 Model210 이 있다. 이 제품에서 적외선 빛의 세기는 0.3~0.8 mW/cm² 정도의 값을 보이고 있다. 또 17inch CRT 모니터에서 나오는 적외선 빛의 세기를 측정해본 결과, 모니터에서 50cm 떨어져서 측정했을 때 0.4~0.5 mW/cm² 정도의 값을 얻을 수 있었다. 다른 제품과 ANSI 규약 등을 참고한 결과 실험에 사용한 적외선 LED는 안전하다고 판단된다.

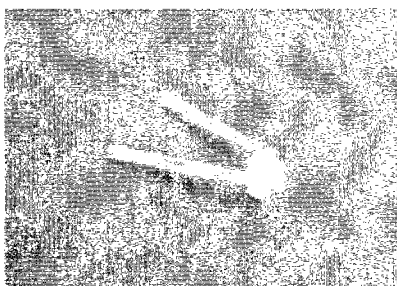


그림 3.3.3.6 적외선 LED

표 3.3.3.1 HSDL-4400 규격

	Min.	Typ.	Max.	Unit
Peak Wavelength	860	875	895	nm
Radiant On-Axis Intensity	1	3	8	mW/sr
View Angle		110		degree

(T = 25 °C, I_{fdc} = 50mA)

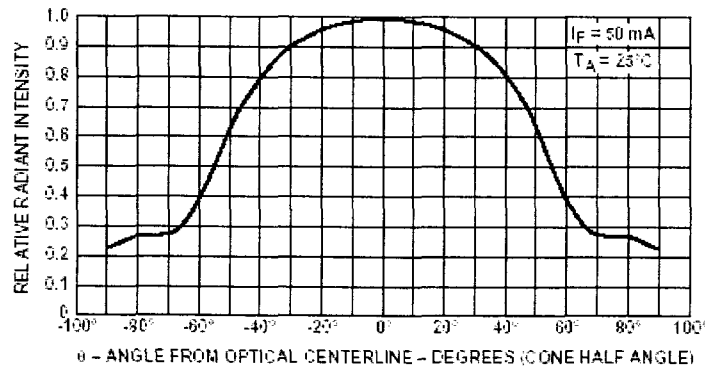


그림 3.3.3.7 각도 분포에 따른 복사강도 (HSDL-4400)

실험에 사용한 자기센서는 Ascension Technology Corporation 의 Flock of Birds를 이용하였다.[13] 이 제품은 위에서 설명한 전자파의 안전 규약들 중에서 FCC(Federal Communication Commission), Radio Interference Regulation of the Canadian Department of Communications, European Union standards EN 50081-1, and 50082-1 규약을 따르고 있다.

(3) 시선 방향 추적 알고리즘

전체시스템 부분에서 언급했듯이 시선 방향을 찾기 위해서 적외선을 눈에 조사하고, 동공이 어두워지는 dark-eye 영상을 기구부에 장착된 CCD 카메라를 이용하여 연속적으로 받아들인다. 여러 가지 시선 방향 추적 방법 중에서 동공을 추적하는 기법을 이용하고자 한다. 홍채를 추적하는 기법은 홍채가 눈꺼풀에 가려지는 단점이 있어서 시선 방향을 찾는 데에 부적합하다. 또 각막 반사와 동공의 영상을 이용한 방법은 머리의 움직임에 제한을 받는 단점이 있다. 본 연구에서는 머리의 움직임을 자유롭게 하기 위해서 자기 센서를 이용하고 있고, 동공이 눈꺼풀에 가려지는 경우는 거의 없다는 점에 근거하여 동공을 추출하

는 방법을 사용하고 있다. 또한 입력 영상의 처리 속도를 높여서 실시간으로 시선 방향을 찾기 위해, 입력 영상 중에서 탐색 영역을 따로 설정하여 탐색 영역 내부에서 동공을 추출하는 방법을 이용하였다. 제일 먼저 수행하는 초기화 과정은 기구부를 머리에 장착하고 나서 한 번 하는 교정 과정으로써, 입력 영상 중에서 동공의 중심 좌표와 모니터 평면상에서 응시 좌표간의 관계를 설정하는 과정이다. 이 과정은 뒷부분에서 언급하기로 하고, 먼저 입력 영상을 이용해서 동공의 중심을 찾는 과정을 살펴보기로 하자. 그림 3.3.3.8은 입력 영상에서 동공의 중심을 찾고, 자기센서 정보를 이용하여 최종적으로 시선 방향을 찾는 전체적인 알고리즘의 순서도를 나타내고 있다.

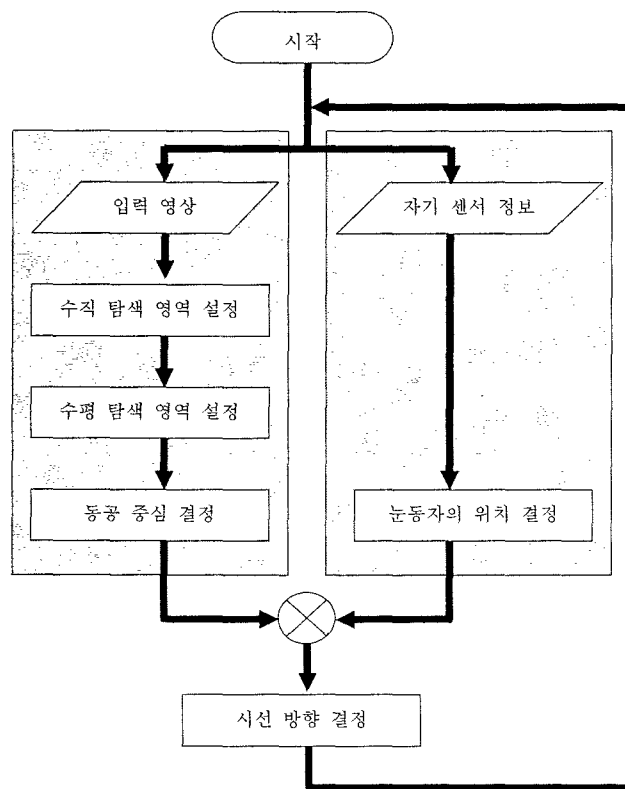


그림 3.3.3.8 시선 방향 추적 알고리즘의 순서도

(가) 눈의 움직임 추적

그림 3.3.3.8에서 시선 방향 추적 알고리즘의 순서도를 보여주고 있는데, 순서도의 왼쪽 부분은 CCD 카메라에서 얻은 영상을 이용해서 동공의 중심을 찾는 부분이고, 오른쪽 부분은 자기 센서 정보를 이용해서 머리의 움직임 정보를 알아내는 것이다. 여기에서는 먼저 카메라에서 얻은 입력 영상을 가지고 동공의 중심을 찾는 알고리즘을 설명하고자 한다.

실시간으로 시선 방향을 찾는 것을 목표로 하고 있으므로 입력 영상의 처리 속도가 문

제가 될 수 있다. 따라서 처리 속도를 높이기 위해서 입력 영상에서 일부분만을 선택하고, 선택한 탐색 영역 내에서 동공의 중심을 찾는 방법을 이용하고자 한다. 먼저 수직 탐색 영역을 설정하는 방법에 대해서 살펴보자.

① 수직 탐색 영역 설정

적외선 빛을 조사할 때 카메라의 광축과 어긋나게 조사하면 동공 부분이 검게 된다. 동공은 원래 홍채보다도 검은 색을 띄지만 어두운 조명 환경에서는 구분하기가 쉽지 않다. 밝은 대낮에는 사람의 눈으로 보았을 때, 동공과 홍채를 구분할 수 있지만 어두운 조명 환경에서는 사람의 눈으로 구별을 할 수가 없다. 사람의 눈으로 구별할 수 없는 정도라면 카메라도 구분할 수가 없다.

적외선을 조사하여 동공 부분이 더욱 검게 되고, 홍채와 다른 부분은 적외선 빛이 반사되어 원래의 밝기 값보다 밝은 색을 띤다. CCD 카메라의 입력 영상은 기구부에 장착된 거울에서 반사된 눈의 영상인데, 눈 주변만을 나타내고 있다. 눈 주변 영상에서는 동공과 홍채 부분이 가장 어두운 밝기 값을 가진다는 사실을 이용해서 수직 탐색 영역을 설정하고자 한다. 또한 보통의 조명 환경에서 조명의 변화에 강인하게 하기 위해서 자동으로 threshold 값을 변화시키는 p-tile 방법을 이용하고자 한다. 여기에서 사용한 p-tile 방법은 구분하고자 하는 물체의 크기를 알고 있을 때 사용하는 방법이다. CCD 카메라에 입력되는 영상 중에서 홍채와 동공의 대략적인 크기는 알고 있는 값이므로 p-tile 방법을 이용하고자 한다. 그 방법에 대해 살펴보면 다음과 같다.

입력 영상에서 동공 부분이 가장 어두운 부분에 해당하고 대략적인 동공의 크기를 알고 있으므로 가장 어두운 이미지부터 픽셀의 개수를 계산한다. 픽셀의 개수가 동공의 크기(P1%) 만큼 되었을 때 threshold를 하면 동공 부분의 밝기 값을 갖는 영역을 구분해 낼 수가 있다. 이 때의 threshold 값은 T1에 해당하는 밝기 값을 가진다.

홍채는 동공보다는 밝은 부분이다. 따라서 동공으로 구분된 영역을 제외하고 나머지 영역에서 어두운 밝기 값을 갖는 픽셀의 수를 더해나간다. 홍채의 크기(P2%)도 대략 알고 있는 값이므로, 어두운 이미지부터 계산해서 홍채 크기만큼의 픽셀수가 되면, 그 밝기 값에서 threshold 한다. 이렇게 하면 홍채의 밝기 값을 갖는 영역을 구분해낼 수 있다. 이 때의 threshold 값은 T2에 해당하는 밝기 값을 가진다. 입력 영상 중에서 동공과 홍채를 동시에 찾는 이유는 수평 탐색 영역에서도 홍채의 이미지를 이용하고자 하는 이유 때문이다.

P-tile 방법으로 동공과 홍채 부분을 구분해 내었는데, 이 때 얻은 부분은 동공이나 홍채의 밝기 값과 비슷한 다른 영역도 동공과 홍채 부분인 것처럼 구분이 된 영상이다. 이것은 오로지 밝기 값만을 가지고 threshold를 해서 구분해 내었기 때문이다. 따라서 동공과 홍채를 포함하는 영역만을 다시 구분해 낼 필요가 있다. 이런 목적에 타당한 방법은 Component Labeling 방법과 Size Filtering 방법이다. Component Labeling 방법은 영상에

서 서로 이웃하고 있는 픽셀들이 하나의 대상을 나타내는 것인지를 구별하는 방법이다. 즉 이진 영상에서 공간적으로 서로 연결된 픽셀들을 하나의 대상으로 구분하여 라벨을 부여하는 방식을 이용하므로 여러 개의 대상을 구별해 낼 수가 있다. 이렇게 구분된 여러 개의 대상들은 각각의 크기가 있으므로 원하는 크기를 갖는 대상을 Size Filtering 방법으로 구별해 낼 수가 있다.

Component Labeling 기법들 중에서 여기에 사용한 기법은 4-connectivity를 이용한 sequential connected component 알고리즘이다. 이 알고리즘은 이진화된 영상에 적용되는 것이고, 4-connectivity 라는 말의 의미는 두개의 픽셀이 서로 연결되었나를 알기 위해서 4가지 방향(상하좌우)으로 살펴본다는 의미다. 그림 3.3.3.9는 sequential connected component 알고리즘을 간략하게 도시화한 것이다. P-tile 방법과 4-connectivity를 이용한 sequential connected component 알고리즘에 대한 좀 더 자세한 내용은 [30]을 참고하기로 한다.

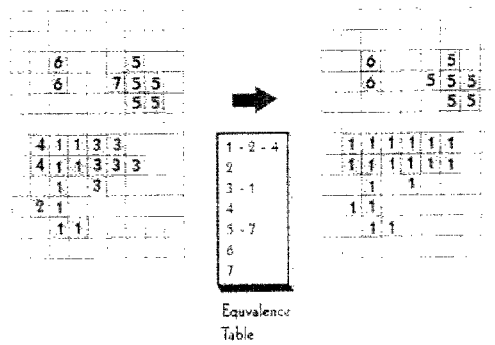


그림 3.3.3.9 4-connectivity를 이용한 sequential connected components 알고리즘

입력 영상에 p-tile 방법과 component labeling 기법을 적용하면 동공과 홍채의 밝기 값을 갖는 대상을 구별해 내게 되고, 그 다음으로는 동공을 포함하는 홍채부분만을 선택해서 수직 탐색 영역으로 설정한다. 그림 3.3.3.10은 입력 영상과 수직 탐색 영역을 설정한 형태를 보여주고 있다. 홍채의 밝기 값과 비슷한 밝기 값을 갖는 다른 부분도 함께 선택된 모습을 보여 주고 있는데, 수평 탐색 영역을 설정할 때 다시 고려할 수 있기 때문에 여기서는 문제가 되지 않는다. 수직 탐색 영역을 설정한 다음에는 이 영역 내부에서 수평 탐색 영역을 구하고자 한다.

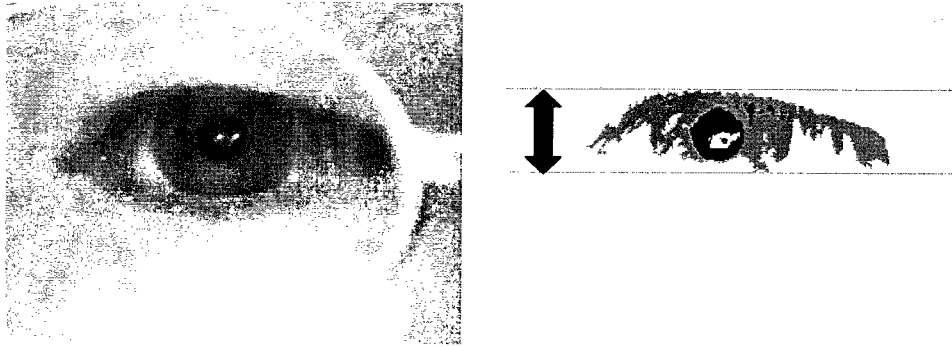


그림 3.3.3.10 입력 영상과 설정된 수직 탐색 영역

② 수평 탐색 영역 설정

수평 탐색 영역은 동공을 포함하는 영역을 구분하여 그 내부에서 동공을 찾기 위한 것이다. 수평 탐색 영역을 찾을 때는 동공 부분과 홍채, 흰자위의 밝기 값이 서로 다르다는 사실을 이용한다. 동공, 홍채, 흰자위 부분의 픽셀에 서로 다른 *count* 값을 할당하고 수평 방향으로 *x* 위치에 있는 모든 픽셀의 *count* 값을 합해서 $f(x)$ 로 둔다. $f(x)$ 를 이용해서 수평 방향의 탐색 영역의 중심을 구한다. 수직 탐색 영역 내부에서 동공 부분에는 가장 큰 값의 *count*를 주고, 홍채 부분에는 동공 보다는 작은 값의 *count*를 준다. 눈의 흰자위 부분에 음수의 *count*를 주면 눈썹 부분의 *count*값을 상쇄시켜서 수평 방향의 탐색 영역 설정에 효과적이다. 아래는 수평 방향의 탐색 영역을 설정하는 방법을 간략히 수식 화하고 있다.

$$count = \begin{cases} c_p & \text{if pupil} \\ c_i & \text{if iris} \\ c_w & \text{if white sclera} \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad c_p > c_i > 0 > c_w$$

$$f(x) = \sum_{y=bottom}^{top} count$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i f(x_i)}{\sum_{i=1}^n f(x_i)} \quad (n: \text{image width})$$

$$\text{수평 탐색 영역: } [\bar{x} - d, \bar{x} + d]$$

위에서 구한 \bar{x} 는 수평 탐색 영역의 중심을 나타내고 있다. 동공에 큰 값의 *count* 값을 주고 홍채에는 작은 *count* 값을 주었다. 또 흰자위에는 음수의 *count* 값을 주어서 눈썹 부분이 그 밝기 값 때문에 동공이나 홍채로 분류되는 것을 상쇄시켰다. 결론적으로 위에서 구한 수평 탐색 영역의 중심인 \bar{x} 는 동공의 중심 근방에 위치한다. 따라서 수평 탐색 영역

을 x 를 중심으로 동공을 포함하도록 d 값을 임의로 할당하여 설정할 수 있다. 그림 3.3.3.11은 수평 방향의 탐색 영역이 설정된 것을 보여주고 있다.

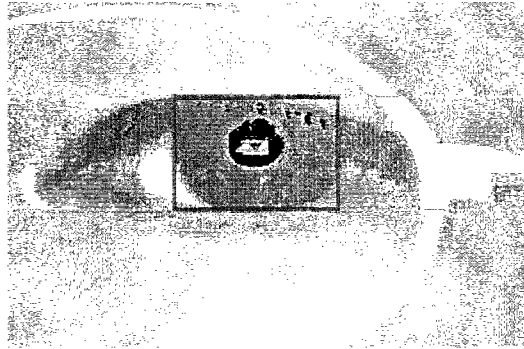


그림 3.3.3.11 수평 방향 탐색 영역 설정

③ 동공 중심 결정

탐색 영역을 찾아내었으면 그 영역 내부에서 동공을 찾아서 중심을 구한다. 그 과정을 설명하면, 찾아진 영역 내부에는 동공 부분 이외에도 속눈썹 부분이 검은 색을 띄어서 동공 부분과 연결되는 경우가 많다. 따라서 p-tile 방법으로 동공의 밝기 값을 갖는 부분을 분류해 낸 다음에 morphology 연산 중의 하나인 erosion을 수행하여 눈썹 부분을 동공 부분과 분리시킨다. Erosion 연산은 침식 연산을 말하며 대상의 모양을 가늘게 하는 효과가 있다. 따라서 동공과 연결되어 있는 눈썹 부분을 동공에서 분리해 낼 수 있게 된다. 동공과 눈썹을 분리해 낸 다음에는 component labeling 기법을 적용하여 크기가 가장 큰 대상을 찾아낸다. 여기서 가장 큰 대상은 동공이다. 동공을 나타내는 대상을 찾은 다음에는 앞서 행한 침식 연산으로 동공의 이미지가 작아진 것을 보상하기 위해서 다시 morphology 연산의 하나인 dilation을 행한다. Dilation은 팽창 연산이라고 하며 원래 이미지의 형태를 팽창 시키는 역할을 한다. 따라서 이 과정을 거치고 나면 동공을 나타내는 대상이 처음 동공의 크기로 복귀된다. 동공을 나타내는 대상의 중심 좌표를 구해서 최초의 동공 중심으로 선택하고 다시 동공의 중심을 찾는다. Morphology 연산에 관한 좀 더 자세한 내용은 [30]을 참고하기로 한다.

그림 3.3.3.12는 동공을 찾는 알고리즘을 순서대로 적용하여 얻은 형태를 보여주고 있다. 그림 3.3.3.12에서 input image는 카메라에 입력되는 이미지이고, 그 아래의 그림들은 설정된 탐색 영역 내부에서 동공의 중심을 찾아가는 과정을 나타내고 있다. 그림 3.3.3.12의 각각의 그림들은 단지 알고리즘을 수행한 결과의 형태를 보여주고 있으며 시간상으로 같은 프레임에서 얻은 결과는 아니다. 최종 결과를 얻었으면 획득한 대상의 중심좌표를 구해서 이 값을 초기 동공 중심의 위치로 선택한다. 최종 dilation 결과 이미지가 각막과 렌즈의 내·외측에서 하얗게 반사된 Purkinje image 때문에 정확히 동공의 형태를 취하고 있지

는 않는다. 따라서 초기 동공의 중심을 획득한 다음에 다시 동공의 중심을 얻고자 한다.

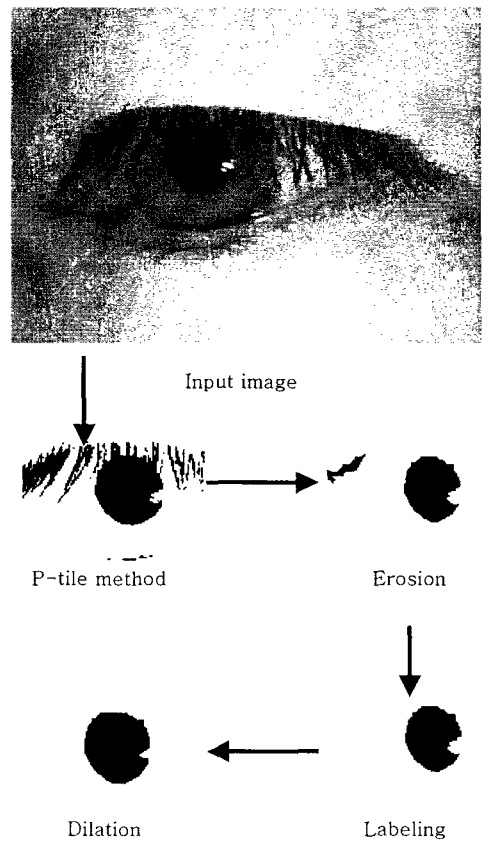


그림 3.3.3.12 초기 동공 중심 위치

초기 동공의 중심 위치를 찾았으면 dilation 에서 얻은 영상에서 동공의 반지름을 구한다. 동공은 카메라가 눈을 보는 각도에 따라서 조금씩 다른 타원 형태가 되지만 여기서는 원으로 가정하고 동공의 반지름을 구한다. 동공이 눈의 중심에서 많이 벗어나면 동공이 원이 아닌 타원 형태가 되어서 시선 방향을 찾을 때 오차의 원인이 될 수 있는데, 이런 경우를 대비해서 눈이 움직일 수 있는 최대 각도를 제한하여 오차를 줄이고자 한다.

㉔ Purkinje 이미지 제거

동공을 원의 형태로 가정하고 dilation의 결과로 얻은 이미지에서 동공으로 구분된 대상의 좌우상하 크기를 측정하여 동공의 반지름을 구한다. 동공의 반지름을 구한 다음에는 초기 동공 중심을 기준으로, 구한 반지름을 갖는 원의 내부 영역에서 4가지 형태의 Purkinje image 를 제거한다. Purkinje image 는 각막의 내·외측 표면에서 반사된 이미지와 렌즈의 내·외측 표면에서 반사된 이미지이다.[10] 이 중에서 각막의 외측에서 반사된 것이 가

장 밝은 이미지인데, 이 것을 특별히 glint 라고 말한다. Glint 는 쉽게 구분해 낼 수 있지만 다른 3개의 Purkinje 이미지는 쉽게 구분하기가 어렵다. Purkinje 이미지를 제거하는 과정은 아래와 같다.

- ㉠ 동공의 반지름 내부 영역에서 glint를 구분한다.
- ㉡ 탐색 영역 내에서 dilation 된 동공의 이미지와 1.에서 구분된 glint를 high 값으로 두고 나머지는 low로 둔다.
- ㉢ 동공 내부 영역에서 low 값을 갖는 픽셀을 찾아낸다.
- ㉣ Low 값을 갖는 픽셀에 아래와 같은 마스크(mask)를 이용해서 다음에 설명하는 연산을 한다. 마스크의 중앙이 low 값을 갖는 픽셀 위치이다.
 - low 값을 갖는 픽셀의 상하 좌우 방향으로 비교해서 마스크의 4방향 중 3 방향 이상에서 high 값이 발견되면 동공으로 간주해서 값을 high로 바꾼다.
- ㉤ 이렇게 한 후에 다시 대상의 중심 위치를 구해서 동공의 중심으로 결정한다.

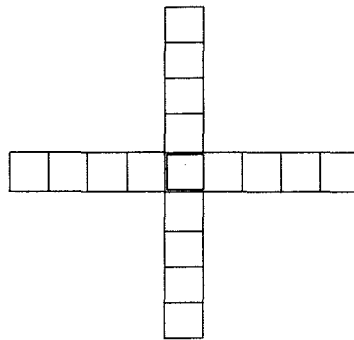


그림 3.3.3.13 Purkinje image 제거를 위한 마스크

(나) 머리의 움직임 추적

머리의 움직임을 찾아내기 위해서 자기 센서를 이용하는데, 자기 센서의 수신부가 머리에 장착하는 기구부의 측면에 부착되어 있어서 머리의 움직임을 알아내게 된다. 시선 방향을 찾아내어 이 것을 컴퓨터 인터페이스로 이용하고자 한다면 삼차원 공간상에서 시선 방향을 나타내는 직선과 모니터 평면이 만나는 교점을 알아내야 한다. 이렇게 하기 위해서는 자기센서의 전송 장치의 좌표와 모니터 평면 좌표간의 변환 관계를 알아야 한다. 이러한 변환 관계를 알기 위해서는 교정 과정이 선행되어야 하는데, 뒤에서 살펴보기로 한다. 그림 3.3.3.14는 모니터 좌표와 자기센서의 전송부 좌표간의 교정 과정을 나타낸 그림이다.

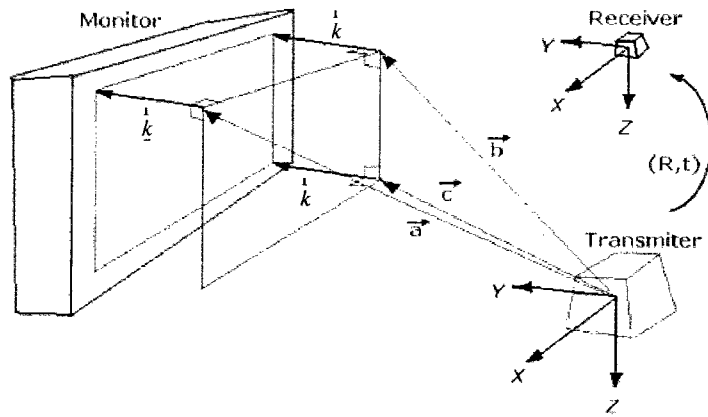


그림 3.3.3.14 모니터 평면과 전송부와의 좌표 변환 관계

① 모니터 좌표와 전송부 좌표의 변환 과정

그림 3.3.3.14는 모니터와 자기센서 전송부의 좌표 변환 관계를 나타내고 있다. 자기센서는 주변에 EMI를 발생시키는 장치가 있을 때 오차가 커지는 단점이 있다. CRT 모니터는 EMI를 많이 발생시키지만 LCD 모니터는 CRT 모니터보다 훨씬 적게 발생시킨다. 실험 환경에서는 LCD 모니터를 사용하고 있다. 모니터에서 자기 센서가 멀어질수록 자기센서의 정밀도가 좋아지므로, 자기센서의 정밀도를 높이기 위해서 그림 3.3.3.14에서 보여주는 것처럼 모니터 평면에서 \vec{k} 만큼 떨어진 점의 좌표를 이용해서 변환을 한다. 그림 3.3.3.15는 모니터 좌표와 시선 방향이 만나는 점을 표시하고 있다. 변환 관계의 과정을 자세히 살펴보면 아래와 같다.

㉓ 자기 센서의 수신부를 모니터 3곳의 모서리에서 \vec{k} 만큼 떨어진 위치에 순서대로 배치시킨다. 이러한 과정에서 우리는 자기 센서의 전송부의 3차원 좌표를 기준으로 모니터 평면에서 \vec{k} 만큼 떨어진 평행한 평면을 나타내는 3곳의 좌표 값을 알아낼 수 있게 된다. 그 값들을 각각 벡터 \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} 로 표현하기로 하자.

㉔ 여기에서 구한 벡터 \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} 를 통해 자기 센서의 전송부의 좌표를 기준으로 모니터의 위치를 나타내는 하나의 평면을 결정할 수 있다. 이 평면을 자기 센서의 전송부 좌표를 기준으로 모니터의 원점(top-left point) \vec{O}_{tm} 사이의 위치 벡터와 모니터 평면의 u 방향, v 방향의 단위 벡터 \vec{a}_u , \vec{a}_v 로 표현할 수 있다. 그 과정은 다음과 같다.

$$\vec{k} = k \vec{a}_k = k \frac{(\vec{c} - \vec{b}) \times (\vec{a} - \vec{b})}{|(\vec{c} - \vec{b}) \times (\vec{a} - \vec{b})|}$$

$$\vec{O}_{tm} = \vec{a} + \vec{k}$$

$$\vec{a}_u = \frac{-(\vec{a} - \vec{b})}{|(\vec{a} - \vec{b})|}, \quad \vec{a}_v = \frac{(\vec{c} - \vec{b})}{|(\vec{c} - \vec{b})|}$$

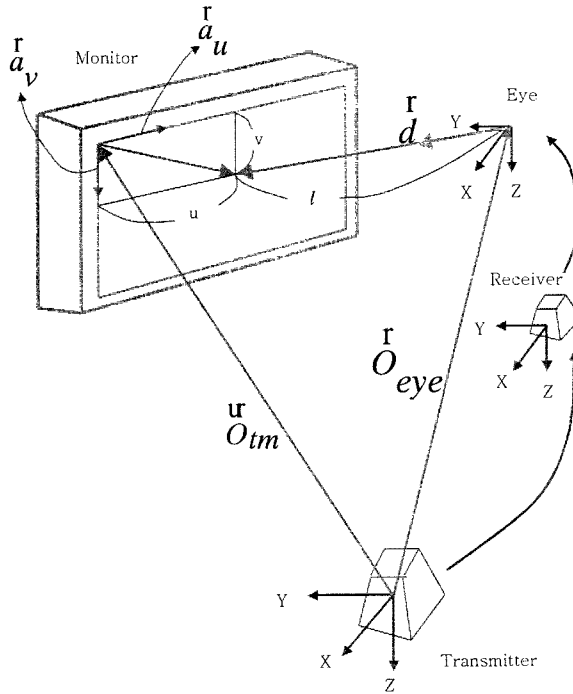


그림 3.3.3.15 모니터 좌표와 시선방향

㉔ 여기에서 모니터의 위치는 (ㄴ) 과정 후에는 움직이지 않는다는 가정이 필요하다. 만약 움직이게 되면 (ㄱ)과 (ㄴ) 과정을 다시 수행해야 한다. 움직이지 않는다는 가정 하에 자기 센서의 전송부를 기준으로 모니터 평면의 원점 \vec{O}_{tm} 과 평면의 u, v 방향의 단위 벡터(\vec{a}_u, \vec{a}_v)는 (ㄴ) 과정에서 구한 값이다. 눈 응시 추적 기구부에 부착되어 있는 수신부의 좌표는 자기센서에서 계산되어 알 수 있는 값이다. 자기센서 정보를 이용해서 눈의 중심 위치 \vec{O}_{eye} 를 알 수가 있다. 이 과정은 다음 절에서 알아보기로 하자. 눈의 중심 위치를 알고, 시선 방향을 나타내는 3차원 벡터를 구하게 되면 시선 방향이 모니터 평면과 만나는 교점의 위치를 알 수가 있다. 예를 들어 임의의 시선 방향 단위 벡터 \vec{d} 와 모니터 평면과의 만나는 위치 (u, v) 를 모니터 평면의 원점을 기준으로 구하면 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\vec{O}_{tm} + u \cdot \vec{a}_u + v \cdot \vec{a}_v = \vec{O}_{eye} + l \cdot \vec{d}$$

$$\begin{aligned} [\vec{a}_u \ \vec{a}_v - \vec{d}] \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ l \end{bmatrix} &= [\vec{O}_{eye} - \vec{O}_{tm}] \\ \therefore \begin{bmatrix} u \\ v \\ l \end{bmatrix} &= [\vec{a}_u \ \vec{a}_v - \vec{d}]^{-1} \cdot [\vec{O}_{eye} - \vec{O}_{tm}] \end{aligned}$$

여기서 (u, v) 는 모니터 평면의 좌표를 나타내고, l 은 모니터 평면에서 눈까지의 거리이다. (u, v) 와 l 을 구하는데 필요한 값들 중에서 $\vec{a}_u, \vec{a}_v, \vec{O}_{tm}$ 는 (L) 과정에서 이미 구한 값이고, \vec{d} 와 \vec{O}_{eye} 는 아직 구하지 않은 값인데, 그 부분은 뒷부분에서 설명하고자 한다.

② 눈의 중심 위치와 시선 방향

자기 센서의 수신부는 머리에 장착하는 기구부에 부착되어 있고, 이 것이 머리의 움직임을 측정한다. 자기 센서는 수신부의 위치 정보와 회전 정보를 제공한다. 기준 좌표인 전송부를 기준으로 수신부의 회전은 azimuth, elevation, roll 형태로 나타내질 수 있다. 그리고 그 세 가지의 회전을 고려한 회전 행렬은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R = \begin{bmatrix} CA \cdot CE & CA \cdot SE \cdot SR - SA \cdot CR & CA \cdot SE \cdot CR + SA \cdot SR \\ SA \cdot CE & CA \cdot CR + SA \cdot SE \cdot SR & SA \cdot SE \cdot CR - CA \cdot SR \\ -SE & CE \cdot SR & CE \cdot CR \end{bmatrix}$$

where $SA = \sin(\text{azimuth}), SE = \sin(\text{elevation}), SR = \sin(\text{roll}),$
 $CA = \cos(\text{azimuth}), CE = \cos(\text{elevation}), CR = \cos(\text{roll})$

수신부의 위치 벡터를 P 라 하면, 기준 좌표인 전송부와 수신부간의 변환 matrix ${}^{tr}T_{re}$ 는 아래와 같다.

$${}^{tr}T_{re} = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

기구부에서 수신부는 약간 경사져서 부착되어 있다. 따라서 계산상의 편리를 위해서 수신부 좌표계가 눈의 중심에 위치한 좌표계와 평행을 이루도록 회전변환을 시킨다. 이 때 사용한 변환 matrix를 ${}^{re}T_{re}$ 로 표시한다. 눈의 중심에 위치한 좌표계는 머리의 움직임이 없는 한 고정된 좌표계이다. 회전 변환된 수신부 좌표계와 눈의 중심 좌표계 간의 변환 matrix는 ${}^{re'}T_{eye}$ 로 표시한다. 눈의 중심에서 눈이 움직이는 대로 회전하는 좌표계가 있다고 하자. 이렇게 하면 눈의 시선 방향을 좌표계의 한 축으로 선택할 수 있다. 따라서 시선 방향을 나타내는 단위 벡터 \vec{d} 는 눈의 중심에서 눈의 움직임에 따라서 회전하는 좌표계의 한 축 방향의 단위 벡터이다. 눈의 회전은 azimuth대신에 yaw를 elevation 대신에

pitch를 사용한다. yaw는 눈의 왼쪽과 오른쪽에 대한 회전을 나타낸 것이고, pitch는 눈의 위, 아래 회전을 나타낸 것이다. 따라서 카메라의 입력 영상을 가지고 눈의 회전을 알아내면 시선 방향을 알아낼 수 있다. 눈의 회전 각도를 계산하는 과정은 다음 절에서 설명하기로 한다. 눈의 중심에서 눈의 움직임과는 관계없는 좌표계와 눈의 움직임에 따라 회전하는 좌표계 간의 변환 matrix를 ${}^{eye}T_{eye'}$ 로 표시한다.

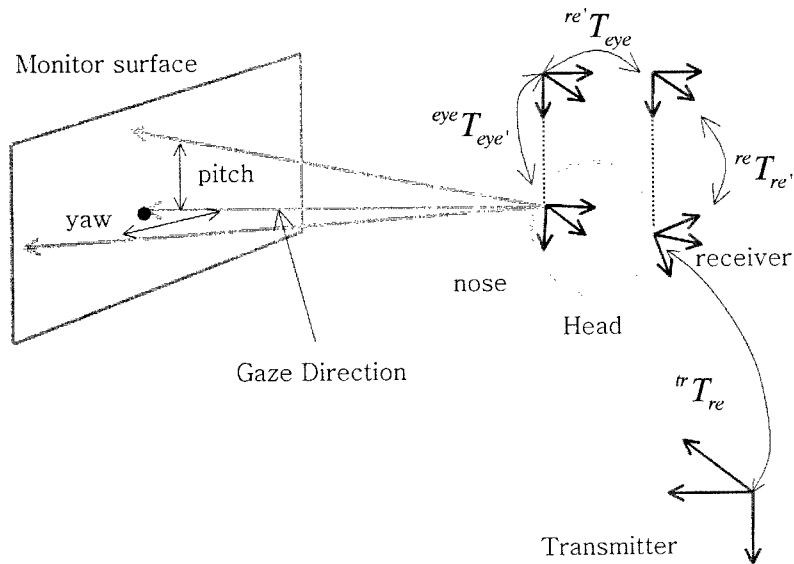


그림 3.3.3.16 시선방향과 좌표변환 관계

최종적으로 시선 방향을 구하려면, 눈의 중심에서 회전하는 좌표계와 전송부 간의 변환 matrix ${}^{tr}T_{eye'}$ 를 구해야 하는데 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 {}^{tr}T_{eye'} &= {}^{tr}T_{re} \cdot {}^{re}T_{re'} \cdot {}^{re'}T_{eye} \cdot {}^{eye}T_{eye'} \\
 &= \begin{bmatrix} x_x & y_x & z_x & p_x \\ x_y & y_y & z_y & p_y \\ x_z & y_z & z_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

따라서 눈의 중심 위치 $\vec{O}_{eye} = \vec{O}_{eye'}$ 는 위에서 구한 p 벡터이고, 시선 방향의 단위 벡터 \vec{d} 는 기구부의 구조상 위에서 구한 값 y 가 된다. 그림 3.3.3.16은 시선 방향과 좌표 변환 관계를 나타내고 있다. 변환 matrix와 눈의 회전 정보를 가지고 시선 방향을 찾는 순서는 다음과 같다.

- ㉔ 카메라의 입력 영상에서 눈동자의 회전(yaw, pitch) 값을 알아낸다. 이 값들을 알기 위해서는 영상의 좌표와 모니터 평면의 교정점 사이의 교정 과정이 필요하다. 이 부분을 초기화 과정이라고도 말한다. 이 부분은 다음 절에서 자세히 설명하기로 한다.
- ㉕ 자기센서의 수신부로부터 머리의 움직임을 알아낸다.
- ㉖ 변환 matrix를 이용하여 시선 방향의 단위 벡터 \vec{a} 를 알아낸다.
- ㉗ 시선 방향 벡터와 모니터 평면이 만나는 교점을 구한다.

③ 눈의 회전각도 계산 방법

눈의 회전 각도를 구하고자하려면 먼저 초기화 과정이 필요하다.[20] 이 과정은 모니터 평면에 교정점을 응시하면서 카메라의 입력 영상에서 눈의 중심을 기억하는 초기화과정이다. 이 초기화 과정은 눈의 응시 방향을 찾을 때 최초로 한 번만 하면 된다. 초기화 과정을 설명하고 있는 것이 그림 3.3.3.17이다.

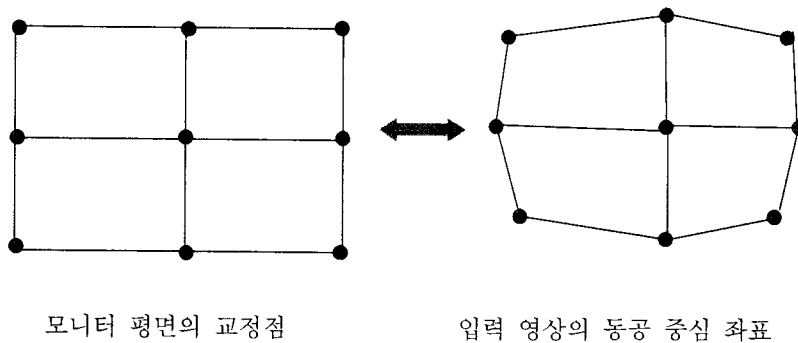


그림 3.3.3.17 초기화 과정

초기화 과정이 끝난 후에는 눈의 회전각도(yaw, pitch)를 계산할 수가 있는데, 그림 3.3.3.18을 이용해 설명하고자 한다. 그림 3.3.3.17의 초기화 과정에서 얻은 동공의 좌표가 그림 3.3.3.18에도 표시되어 있다. 카메라에서 얻은 영상을 가지고 계산된 동공의 중심 좌표가 P 일 때 회전 각도를 계산하는 과정은 다음과 같다.

- ㉘ 상하좌우 방향의 단위 벡터인 U, D, L, R 을 계산한다.
- ㉙ 중심 C_o 에서 P 방향의 단위 벡터를 계산하고, 이 단위벡터와 (㉘)에서 구한 U, D, L, R 벡터와 서로 비교하여 P 가 4개의 다각 사변형 중에서 어디에 속하는 지를 결정한다.
- ㉚ 만약 P 가 다각 사변형의 외부에 있다면 이 것은 미리 설정한 눈의 최대 회전 각도를 벗어나는 것이므로 다각 사변형의 최대 외곽선에 위치시킨다.
- ㉛ 다각 사변형 내부에서 회전각도(yaw, pitch)를 계산하는 과정은 아래와 같다.

그림 3.3.3.18의 왼쪽 위에 있는 다각 사변형만을 그린 것이 그림 3.3.3.19이다. 그림 3.3.3.19에서 점 O 는 영상의 원점을 나타낸다. P 는 동공의 중심좌표를 나타낸다. 다각사변형의 4개의 변들을 살펴보면, $\overline{C_{o,u}C_{o,o}}$ 는 yaw = 0 인 점의 집합이고, $\overline{C_{u,l}C_{o,l}}$ 은 yaw = predefined maximal degree 인 점의 집합이다. $\overline{C_{o,l}C_{o,o}}$ 는 pitch = 0 인 점의 집합이고, $\overline{C_{u,l}C_{o,u}}$ 는 pitch = predefined maximal degree 인 점의 집합이다.

㉠ 다각사변형 내부에 있는 점 P 는 yaw 와 pitch 값을 가지는데, 다각사변형의 윗변과 아랫변에서 P 와 동일한 yaw 값을 갖는 점을 각각 P_u, P_d 로 놓자. 이 때 벡터 $\overrightarrow{OP_u}$ 와 $\overrightarrow{OP_d}$ 는 각각 다음과 같이 변형될 수 있다. 아래 식들에서 P_u, P_d 의 yaw 값이 같으므로 두 식의 u 값은 같다. u 는 미리 정의된 yaw의 최대값에 대한 상대적인 값을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OP_u} &= \overrightarrow{OC_{o,u}} + \overline{C_{o,u}P_u} \\ &= \overrightarrow{OC_{o,u}} + u \times (\overrightarrow{OC_{u,l}} - \overrightarrow{OC_{o,u}}) \\ \text{where } u &= \frac{\overline{C_{o,u}P_u}}{\overline{C_{o,u}C_{u,l}}}, \quad u \in [0, 1] \\ \overrightarrow{OP_d} &= \overrightarrow{OC_{o,o}} + \overline{C_{o,o}P_d} \\ &= \overrightarrow{OC_{o,o}} + u \times (\overrightarrow{OC_{o,l}} - \overrightarrow{OC_{o,o}}) \\ \text{where } u &= \frac{\overline{C_{o,o}P_d}}{\overline{C_{o,o}C_{o,l}}}, \quad u \in [0, 1] \end{aligned}$$

㉡ $\overrightarrow{OP_u}, \overrightarrow{OP_d}, \overrightarrow{OP}$ 를 이용해서 다음과 같은 식을 세울 수 있다. 여기서 v 는 미리 정의된 pitch의 최대값에 대한 상대적인 값이다.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OP} &= \overrightarrow{OP_d} + \overline{P_dP} \\ &= \overrightarrow{OP_d} + v \times (\overrightarrow{OP_u} - \overrightarrow{OP_d}) \\ \text{where } v &= \frac{\overline{P_dP}}{\overline{P_dP_u}}, \quad v \in [0, 1] \end{aligned}$$

위의 세 식을 풀면 yaw 와 pitch 의 상대적인 값인 u, v 를 구하게 된다.

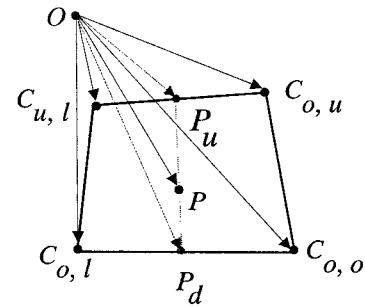
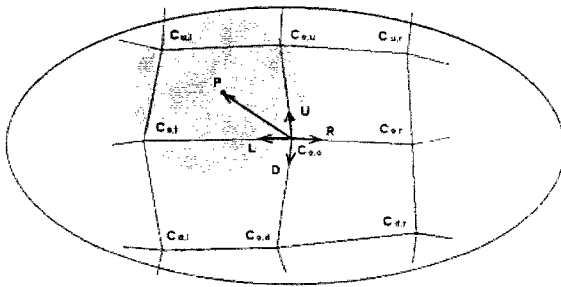


그림 3.3.3.18 눈동자 움직임 판별을 위한 교정 맵 그림 3.3.3.19 눈의 회전각도 계산

(4) 실험 결과

(가) 실험 환경

전체시스템에 관해서 살펴본 바와 같이 실험에 사용된 것은 시선 방향 추적 기구부와 CCD 카메라, 이미지 그래버, 자기센서, IR LED, PC 등이다. PC의 사양은 Pentium IV, 1.4GHz 이다. 실험에 사용된 모니터는 LCD 모니터이다. 그림 3.3.3.20은 실험에서 사용한 프로그램의 모습을 나타내고 있다. 알고리즘을 구현한 프로그램은 Visual C++ 6.0을 이용하여 만들었다. 프로그램의 작동 순서에 대해서 간략히 설명하면 다음과 같다.

자기 센서를 사용하기 위해서 자기 센서의 전송부와 수신부 사이의 데이터들이 직렬 통신을 통해 컴퓨터에 보내지기 때문에 데이터를 받기 위해서 초기화 과정이 필요하다. 이 초기화 과정은 그림 3.3.3.21와 같다. 이 과정은 약 5초 정도의 시간이 소요된다.

자기 센서의 초기화 과정이 끝나고 나면, 모니터 평면의 좌표와 자기 센서의 전송부 사이의 좌표 변환 관계를 구한다. 이 과정은 자기 센서의 전송부와 모니터의 상대적인 위치가 바뀌지 않는 한 초기에 한 번만 하면 된다.

모니터와 전송부 사이의 좌표 변환 과정을 끝냈다면, 이미지 그래버를 이용하여 눈의 영상을 연속적으로 받아들인다. 영상을 얻은 후에는 눈이 실제로 움직인 좌표와 카메라 영상의 좌표 사이의 교정 과정을 거친다. 이 과정이 끝나고 나면 머리의 움직임과 눈의 움직임 정보를 이용하여 시선 방향이 모니터 평면과 만나는 교점을 구하게 된다.

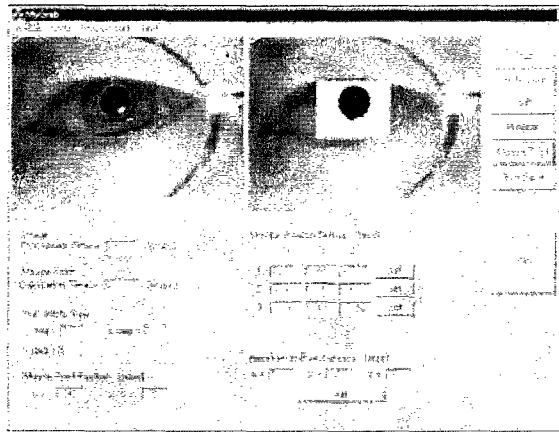


그림 3.3.3.20 프로그램 구현한 화면

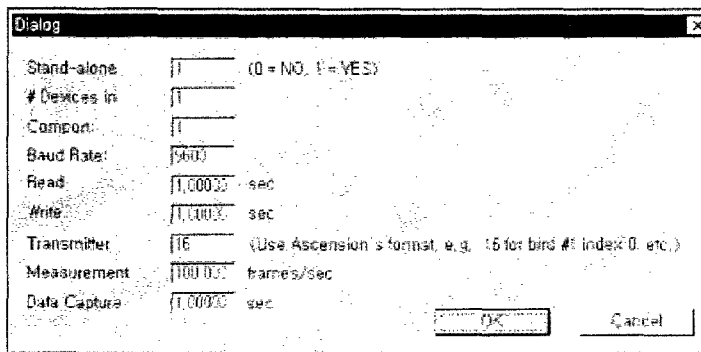


그림 3.3.3.21 자기 센서의 직렬 통신 초기화 화면

(나) 눈의 움직임 추적에 대한 실험

그림 3.3.3.22, 그림 3.3.3.23은 CCD 카메라에서 연속적으로 눈의 영상을 받아들이고, 제안한 알고리즘을 구현해서 얻은 실험 결과이다. 그림 3.3.3.22는 밝은 대낮에 조명을 밝게 해서 얻은 실험 결과이다. 그림에서 오른쪽은 탐색 영역과 알고리즘이 수행되고 나서 동공 부분으로 인식된 부분을 나타낸 것이고, 왼쪽은 카메라에 입력되는 영상과 찾아낸 동공을 표시하고 있다. 왼쪽의 영상에서 동공을 표시하는 부분을 살펴보면, 동공의 중심을 표시한 점이 의미 있는 값이고, 동공과 홍채의 경계를 표시한 작은 원은 단지 동공을 제대로 검출했는가를 확인하기 위해서 표시한 것이다. 그림 3.3.3.23은 어두운 조명 환경 하에 안경을 착용한 상태에서 얻은 결과이다. 이 때는 안경의 밝기 값 때문에 탐색 영역이 조금 크게 설정되는 경우가 있다. 조명의 밝기에 강인하도록 p-tile threshold 방법을 이용했기 때문에 조명의 밝기에 관계없이 동공을 잘 검출할 수 있음을 확인할 수 있다.

실시간으로 시선 방향을 찾아내는 시스템을 구현하는 것이 목적이었으므로, 연속적인 영상을 가지고 알고리즘을 구현하는데 걸리는 시간을 살펴보아야 한다.

앞에서 언급하였듯이 실험에 사용한 PC 는 Pentium IV 1.4GHz 프로세서이다. 이미지 그래버는 NTSC 신호를 이용하며, 영상 획득 속도는 30frames/sec 이다. 이미지 그래버는 눈의 영상을 320×240 의 크기로 연속적으로 받아들인다. 이미지 그래버가 하나의 영상을 획득하는데 걸리는 시간은 대략 33ms 이다. 획득한 영상은 메모리에 저장되고, 다시 새로운 영상을 계속 받아들인다. 알고리즘을 구현할 때 사용하는 영상은 메모리에 저장된 영상이고, 이 것을 이용하여 알고리즘을 구현하는데 걸리는 시간은 대략 20~25ms 이다. 메모리에 저장된 영상을 이용해서 알고리즘을 구현하고, 새로운 영상이 메모리에 저장되면 다시 알고리즘을 구현하는 방식을 이용하는데, 알고리즘의 구현 시간(22.5ms)이 이미지 그래버의 영상 획득 시간 (33ms) 보다 적게 걸리므로 이미지 그래버에서 획득한 영상을 연속적으로 사용할 수 있다.

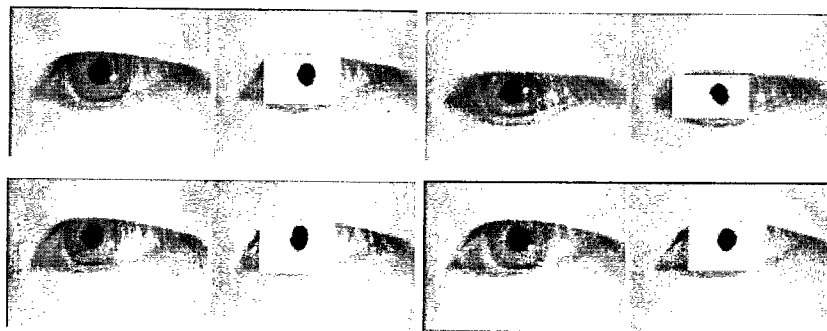


그림 3.3.3.22 밝은 조명에서 연속적인 영상에 대한 실험 결과

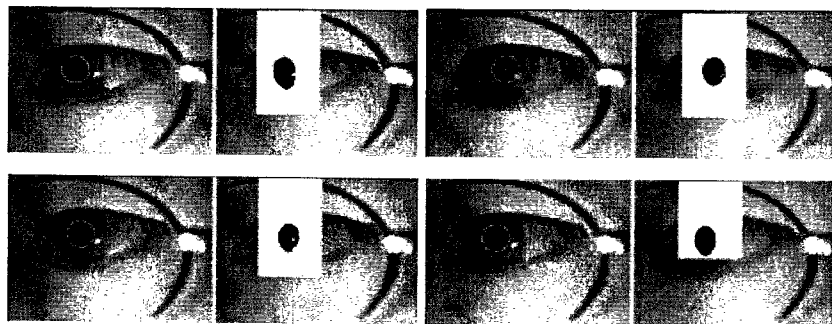


그림 3.3.3.23 어두운 조명에서 연속적인 영상에 대한 실험 결과

(다) 시선 방향 검출 결과

여기에서는 모니터 평면에 그리드(grid)를 만든 상태에서 교차점을 바라보면서, 계산된 시선방향과 모니터 평면이 만나는 교점을 점으로 표시하여 오차를 분석하고자 한다. 그림 3.3.3.24는 사람이 모니터에서 50cm 떨어진 상태에서 수행한 실험 결과이다. 표 3.3.3.2는 그 오차 분포를 나타내고 있다. 15inch 모니터의 크기는 대략 308×232mm 이다. 여러 번

의 실험 결과, 평균적으로 50cm 거리에서 가로 14, 세로 12의 크기로 모니터 평면을 구분해 낼 수 있다. 이 값은 교정 과정에 따라서 조금씩 정밀도가 달라질 수 있다.

표 3.3.3.2 시선 방향 추적 실험 오차 분포

(단위: mm)	최대 오차	최소 오차	평균	표준편차
U 방향	15.9	0.0	6.58	4.80
V 방향	19.25	0.60	5.24	4.66

(단위: mm)	최대 오차	최소 오차	평균	표준편차
U 방향	9.02	0.3	4.46	2.70
V 방향	12.93	0.0	5.09	2.65

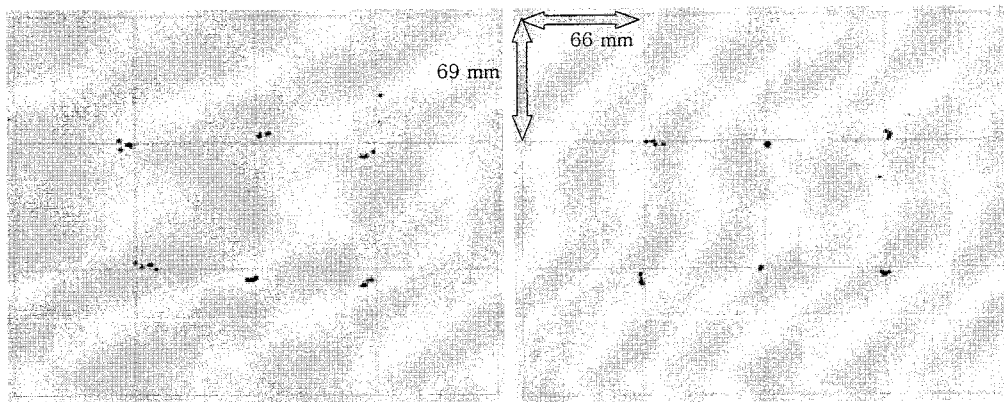


그림 3.3.3.24 시선 방향 추적 실험 결과

여기에서 사용한 시선 방향 추적 시스템의 정밀도와 기존의 다른 시스템과의 정밀도 비교를 해보면 표 3.3.3.3과 같다. 표 3.3.3.3에서 나온 값들은 모니터에서 대략 50cm 떨어진 거리에서 측정한 값들이다. 본 시스템의 정밀도가 모니터 평면을 세로12, 가로 14로 구분할 수 있으므로 이 것을 각도로 환산하면 수직 방향으로는 2.1, 수평 방향으로는 2.5 정도가 된다. 기존의 다른 시스템들을 살펴보면 그 측정 방법이 서로 달라서 모든 시스템과 비교하기에는 어려움이 있었다. 따라서 측정 방법이 유사한 방법들과 비교를 하였다. 기존의 시스템 중에서 카메라를 이용한 방법들은 처리 속도가 카메라와 이미지 그래버의 update rate 에 영향을 받을 수 밖에 없는 한계성이 있다. 최근에 사용되는 이미지 그래버의 update rate는 30 frames/sec 나 60 frames/sec 정도이다. 따라서 이 보다 빠르게 처리할 수는 없다. 그러나 신호처리를 이용한 기법들은 카메라를 이용한 기법들보다 속도가 매우

빠르다는 장점이 있다. 표 3.3.3.3에 나와 있는 방법 중에서 Opto-electronic technique 은 신호처리 기법을 이용하였고 update rate 가 200 Hz 로 매우 빠르다. 표에서 나머지 2가지 방법은 카메라를 이용하고 있는데, Neural network method 는 카메라가 사용자의 전방에 있는 모니터 부근에 위치하고 있는 방법이어서 머리의 움직임에 상당한 제한이 따른다는 단점이 있다. 만약 머리가 카메라의 view angle 을 벗어나면 시선 방향을 놓치게 된다. 이런 제한점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 머리의 움직임을 측정하는 자기센서를 이용하여 대략 1m 이내에서는 머리를 자유롭게 움직여도 시선 방향을 찾을 수 있도록 하였다.

표 3.3.3.3 기존 시스템과의 정밀도 비교

단위: degree	수직 정밀도	수평 정밀도
Optoelectronic technique (by Navikas)	2.0	4.0
Neural network method (by Stiefelhagen)	2.3	2.3
Pupil detection method	2.1	2.5

(라) 시선 방향을 이용한 컴퓨터 인터페이스 활용 실험

시선 방향 추적 시스템을 사람과 컴퓨터간의 인터페이스로 활용할 수 있는가에 대한 실험을 해보았는데, 그 결과는 다음과 같다. 이동로봇에 로봇팔이 장착되어 있고, 사용자의 컴퓨터와 이동로봇 간의 통신은 무선 TCP/IP 프로토콜을 이용한다. 사용자의 전방에 위치한 모니터에는 명령을 내릴 수 있는 메뉴 프로그램이 별도로 존재한다. 이 메뉴 프로그램은 클릭 동작을 필요로 하지 않고, 마우스 포인터가 메뉴를 가리키고 다시 확인 버튼을 가리키면 명령을 전달하는 프로그램이다. 이 메뉴 프로그램은 머리 윗부분에 장착된 스테레오 카메라를 이용해서 사용자의 주변을 관찰하고, 스테레오 카메라에 연결되어 있는 pan-tilt를 제어하는 메뉴버튼이 있고, 이동로봇이나 로봇팔에 TCP/IP 를 이용해서 명령을 전달할 수 있는 메뉴버튼이 있는 프로그램이다. 시선 방향을 계산해서 시선 방향이 모니터 화면과 만나는 교점에 마우스 포인터를 위치시킨다. 이 마우스 포인터가 메뉴 프로그램의 메뉴 버튼과 확인 버튼을 차례대로 지시하면 TCP/IP 프로토콜을 이용해 명령을 전달할 수 있다. 그림 3.3.3.25의 첫 번째 그림은 이동로봇을 제어하는 전체화면을 보여주고 있다. 만약 제대로 움직이기 힘든 장애자가 멀리 떨어진 곳에 위치한 물건을 집어오기를 원한다면, 시선방향을 이용해서 모니터에 있는 메뉴 프로그램에 명령을 내리고, 이동로봇이 이동하여 로봇 팔이 물건을 집어서 장애자에게 물건을 전달할 수 있을 것이다. 그림 3.3.3.25의

두 번째 그림은 모니터에 나타난 메뉴 프로그램이다. 이런 실험을 통하여 시선 방향 추적 시스템이 컴퓨터와 사용자 간의 인터페이스로 활용할 수 있음을 확인하였다.

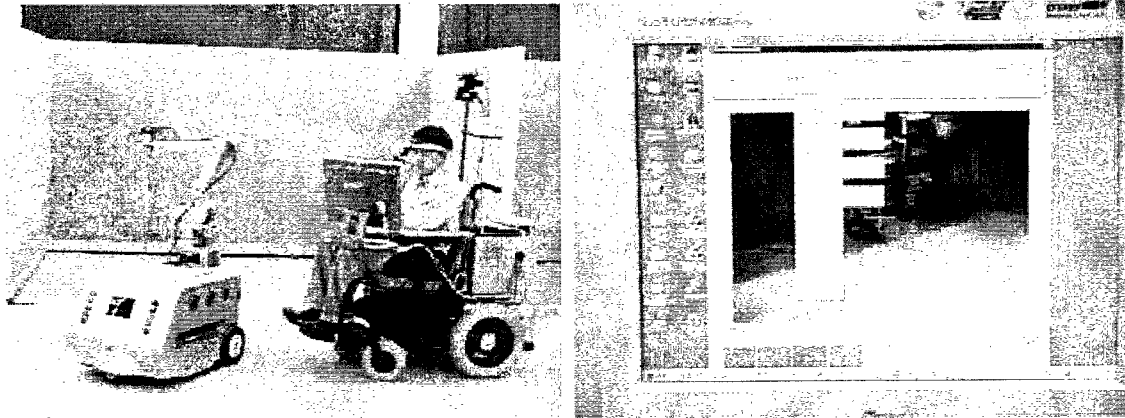


그림 3.3.3.25 시선 방향을 이용한 이동 로봇 제어 실험

나. 비장착형 Eye-mouse 시스템

(1) 비장착형 Eye-mouse 시스템의 시선추출 알고리즘

(가) 연구 배경

앞에서 설명한 장착형 Eye-mouse 시스템의 경우 장애인의 머리에 카메라와 자기센서를 부착하여야 하기 때문에 사용자가 불편을 느낄 수 있는 단점이 있다. 특히 장애인의 경우는 더욱 신체의 장애로 인해서 이런 문제가 더 크게 느껴질 수 있다. 따라서 이런 단점을 극복하기 위하여 비장착형의 Eye-mouse 시스템을 개발하게 되었다. 비장착형 Eye-mouse 시스템은 사용자의 몸에 어떠한 장치도 부착하지 않고 카메라를 비롯한 다른 장치를 외부에 놓고 사용자를 관찰하여 눈의 응시 방향을 추정하는 시스템이다. 추후에 결론에서 언급하겠지만 비장착형 시스템은 장착형 시스템에 비해 사용하기 편하다는 장점이 있지만 정밀도가 낮은 단점이 있다.

(나) 기존의 연구들

기존의 비장착형 눈 응시 방향 추적기술은 대표적으로 적외선 LED의 반사를 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 카메라로부터 얻은 영상에서 적외선의 각막 반사에 의한 밝은 점과 동공의 상대적인 위치를 이용하여 눈의 응시 방향을 추정하는 방법이다. 적외선 LED와 같은 특별한 장치 없이 CCD카메라로부터 얻은 눈의 영상만을 이용해서 추정하는 방법이 있지만 이 방법은 적외선 LED를 이용하는 방법에 비해 상대적으로 정밀도가 낮다. 적외

선 LED의 반사를 이용하는 방법은 다른 방법에 비해 추정 알고리즘이 간단하면서도 가장 높은 정밀도를 나타내고 비접촉식이며 시스템을 비교적 저렴하게 구성할 수 있다는 장점이 있어서 가장 많은 연구가 진행되었다.

적외선 LED를 이용하여 눈의 움직임을 관찰하는 방법은 Mason[35]에 의해 처음 시도되었다. 한 개의 적외선 LED를 이용하여 눈의 각막에서 반사가 일어나도록 하고 CCD카메라로 눈을 관찰한다. 카메라로부터 얻은 영상에는 적외선 LED에서 방출되는 적외선이 눈의 각막에서 반사되어 밝은 점이 나타나고 동공의 중심 위치를 찾아내어 두 점의 상대적인 위치가 눈의 응시 방향에 따라 변하는 성질을 이용해서 응시 방향을 추정하였다. 이와 같은 방법은 영상에서 동공의 중심위치와 각막 반사에 의한 밝은 점의 위치의 정확도가 중요한데 동공의 경우 동공의 색이나 주변의 홍채의 색과 유사하기 때문에 동공의 위치를 찾기가 어렵다. 동공의 중심 위치를 보다 정밀하게 찾아내기 위해서 Hutchinson[36]은 적외선 LED가 카메라의 광축에 가까이 있을 때 눈의 동공이 밝게 빛나는 현상(Bright-eye)을 이용하여 동공을 더 정밀하게 찾아내는 방법을 제시하였다. Cleveland[37]는 동공의 중심과 각막 반사에 의한 밝은 점의 상대적인 위치와 눈의 응시 방향사이의 관계를 수식적으로 정형화하고 캘리브레이션을 통해 수식의 계수를 구하였다. 하지만 이 방법에서는 눈의 응시 방향을 정확히 알아내기 위해서 카메라로부터 눈까지의 거리를 필요로 하게 되는데 실제 거리를 구하기 어렵기 때문에 식을 근사화하여 사용하였다. 따라서 머리의 움직임이 큰 경우에는 오차가 커지는 단점이 있다. Sugioka 등[38]은 카메라로부터 눈까지의 실제 거리를 구하기 위해서 초음파 센서를 이용해 거리를 측정하고 응시 방향 추정에 이용하였다. 하지만 이러한 방법들의 문제는 눈의 기하학적인 형태와 카메라의 위치, 적외선 LED의 위치 사이의 관계를 정확히 모델링하기 어렵고 카메라와 눈 사이의 거리가 필요한데 측정하기 어렵다는 것이다.

(다) 비장착형 Eye-mouse 시스템의 구성

본 연구에서도 역시 적외선 LED를 사용하여 눈의 응시 방향을 추정하려고 한다. 하지만 앞에서 언급한 것과 같이 눈의 위치, 카메라의 위치, 모니터의 위치 사이의 관계를 구하고 눈 응시 방향을 계산하기 위해서 카메라와 눈 사이의 거리를 측정하는 문제를 해결하기 위해서 다른 방법과 달리 복수개의 적외선 LED를 사용한다. 전체 시스템은 한 개의 CCD 카메라와 5개의 적외선 LED로 구성된다(그림 3.3.3.26). CCD카메라는 모니터의 아래 부분에 장착되어 있고 4개의 적외선 LED는 컴퓨터 모니터의 각 모서리에 설치되고 그림에는 나타나있지 않지만 나머지 한 개의 적외선 LED가 카메라의 렌즈 중심 부분에 위치하고 있다.

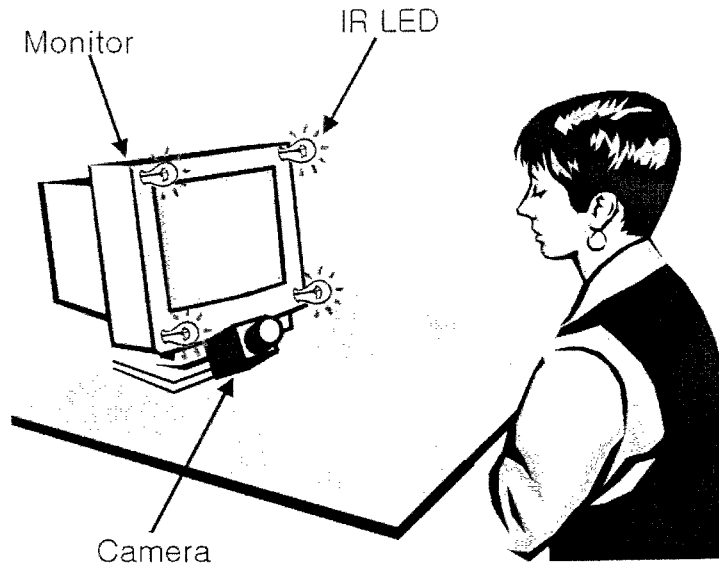


그림 3.3.3.26 비장착형 Eye-mouse 시스템의 전체 구성도

사용된 적외선 LED는 두 종류를 사용하는데 모니터의 모서리에 부착되는 적외선 LED와 카메라에 부착되는 적외선 LED가 다르다. 모니터에 부착되는 적외선 LED는 Agilent사의 HDSL-4400로서 장착형 Eye-mouse에서 사용된 것과 같다. 모니터의 적외선 LED의 경우 장애인의 머리가 자유롭게 움직이는 상황에서도 눈에서 반사를 일으켜야하기 때문에 view angle이 큰 것을 선정하였다. 반면, 카메라의 광축에 위치하는 적외선 LED는 OPTEL사의 OPE5688로 형태는 그림 3.3.3.27과 같고 특성은 표 3.3.3.4와 같다. 두 적외선 LED 모두 안전을 위해서 국제표준 ANSI Z136.1에 따라 세기가 약한 것을 선정하였고 근적외선 파장대역을 갖는 것을 선정하였다.

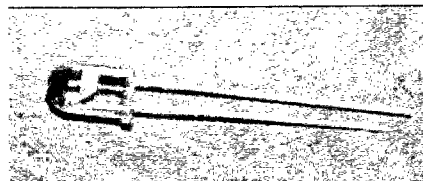


그림 3.3.3.27 OPE5688(OPTEL)

표 3.3.3.4 OPE5688의 특성

	Min.	Typ.	Max.	Unit
Peak wavelength		880		nm
Radiant on-axis intensity	10	25		mW/sr
View angle		22		degree

모니터의 각 모서리에 부착되는 적외선 LED는 실제로는 하나만 사용하지 않고 그림 3.3.3.28과 같이 여러 개를 함께 사용하였는데 이는 각막 반사(corneal reflection)에 의해 생성되는 밝은 점의 크기가 크게 하여 영상처리 과정을 통해서 쉽게 특징점을 얻기 위해서이다. 이렇게 제작된 적외선 모듈들을 모니터의 각 모서리에 부착하고 이를 카메라를 통해 얻은 영상은 그림 3.3.3.29와 같다. 이 그림에서 눈의 동공부분(검은자위)에 나타난 밝은 네 개의 점들(glint)은 모니터의 모서리에 부착된 적외선 LED에서 방출되는 적외선이 반사되어 생성되는 밝은 점들이다.

카메라의 광축에 부착되는 적외선 LED는 그림 3.3.3.30와 같이 렌즈 위에 고정시켰다. 이때 사용된 카메라의 렌즈는 고배율렌즈로서 영상에서 눈이 가능한 크게 확대되어 나타나도록 하여 정밀도를 높인다. 이렇게 카메라의 광축에 일치하도록 적외선 LED를 부착하면 LED에서 나오는 적외선이 눈의 동공을 통해 들어가 망막에서 난반사를 일으켜 동공이 밝게 빛나는 현상이 나타난다. 이와 같은 현상을 Bright-eye effect라고 하고 그림 3.3.3.31과 같은 영상을 얻게 된다.

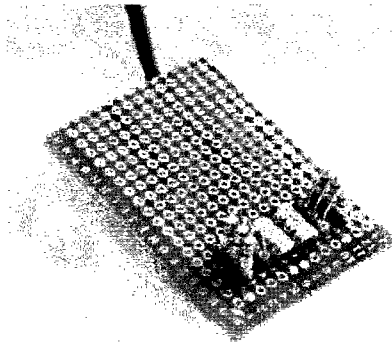


그림 3.3.3.28 모니터에 부착된 적외선 LED모듈



그림 3.3.3.29 모니터에 부착된 적외선 LED에 의한 각막 반사 결과 영상

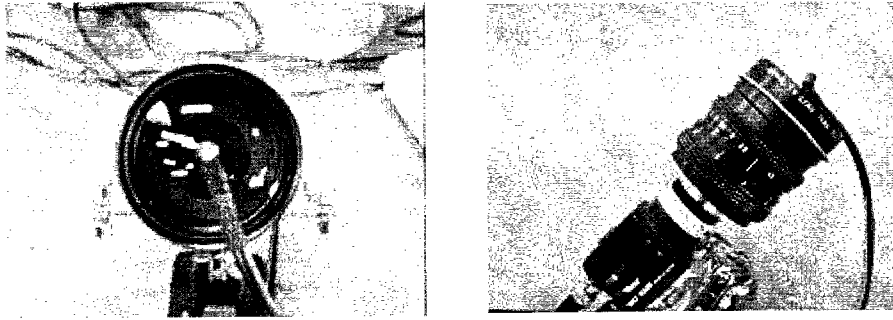


그림 3.3.3.30 카메라와 적외선 LED

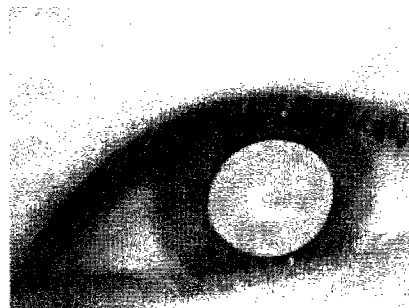


그림 3.3.3.31 카메라의 광축에
부착된 적외선 LED에 의한 동
공 반사와 Bright-eye effect

각막반사를 일으키기 위해서는 모니터에 부착된 적외선 LED들을 켜고 카메라에 부착된 적외선 LED는 꺼야한다. 반대로, 동공반사를 일으키기 위해서는 모니터에 부착된 적외선 LED들은 끄고 카메라에 부착된 적외선 LED는 켜야 한다. 이와 같이 적외선 LED들을 구동하기 위해서 그림 3.3.3.32와 같이 컴퓨터의 병렬포트를 사용하여 제어할 수 있도록 드라이버보드를 제작하여 전체 시스템을 구성하였다.

(라) 응시점 추정 방법

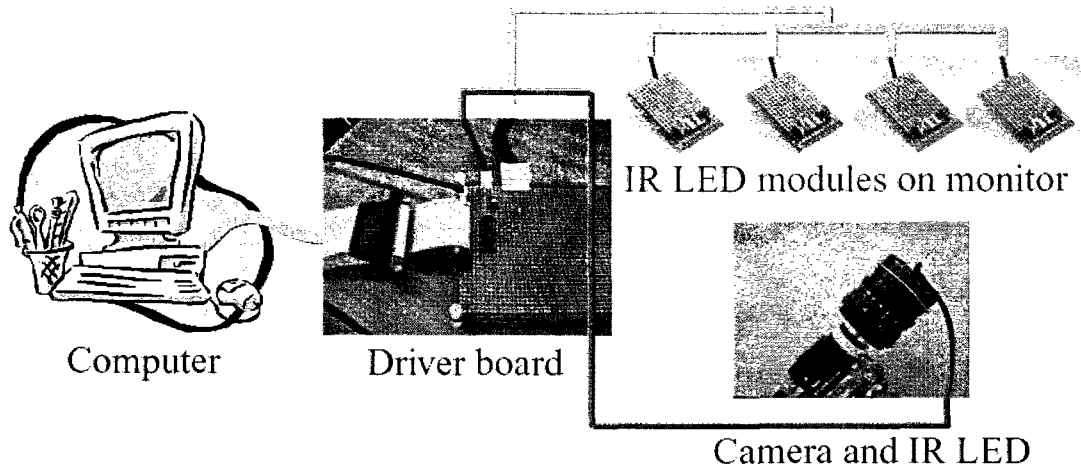


그림 3.3.3.32 모니터와 카메라에 부착된 적외선 LED들을 구동하기 위한 시스템 구성

본 연구에서 제시하는 방법은 기존의 방법에서처럼 눈의 응시 방향을 먼저 구하고 눈의 위치와 모니터의 위치에 따라 모니터 스크린의 어느 점을 보고 있는지 다시 계산하지 않는다. 눈의 응시 방향을 구하지 않고 모니터의 스크린의 바라보고 있는 점(이하 응시점)을 직접 추정한다.

모니터의 각 모서리에 위치한 적외선 LED들을 켜고 카메라에 부착된 적외선 LED는 켜지 않을 때 눈의 각막에서 적외선이 반사되어 4개의 밝게 빛나는 점(glint)으로 나타내게 된다(그림 3.3.3.29). 이와 같은 반사를 각막 반사(corneal reflection)라고 한다. 그림 3.3.3.33은 눈의 응시점을 추정하기 위한 개념도이다. 적외선 LED가 모니터의 각 모서리에 붙어있기 때문에 각막 반사에 의한 밝은 점들을 꼭지점으로 하는 사각형(ABCD)는 모니터의 스크린(A'B'C'D')이 투영된 사각형이라고 생각할 수 있다. 그러면 사용자가 모니터를 계속해서 바라보고 있을 경우에 동공의 중심(그림 3.3.3.33의 P점)은 항상 사각형ABCD 안에서 움직이게 된다. 따라서 사각형ABCD는 사각형A'B'C'D'가 투영된 것이라 가정할 때 거꾸로 P점으로 투영되기 위한 P'의 좌표를 계산할 수 있다면 이 점이 바로 추정된 응시점이 된다.

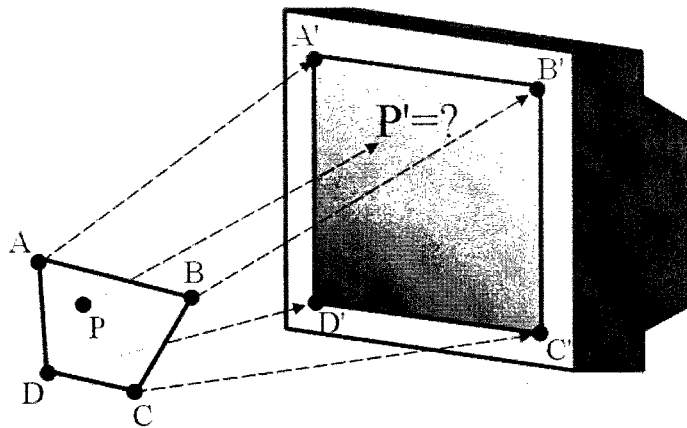


그림 3.3.3.33 적외선 LED들(A',B',C',D')과 밝은 점들 (A,B,C,D) 사이의 투영. 점P는 영상에서의 동공의 중심이고 P'는 눈의 응시점이다.

① 특징점 추출

응시점의 추정을 위해 사용하게 되는 특징점은 동공의 중심의 위치와 각막 반사에 의한 네 개의 밝은 점들이다. 각막의 밝은 점들은 비교적 큰 밝기값(intensity)을 가지기 때문에 그림 3.3.3.34와 같은 과정을 통해서 쉽게 얻을 수 있다. 먼저 카메라로부터 들어온 영상을 임계값에 의한 영역 분할(segmentation)을 하고 잡음에 대한 영향을 줄이기 위해서 binary morphology 중에서 dialation과 erosion을 몇 차례 수행한다. 그 후 region grouping을 통해서 영역을 구분 짓고 각 영역의 중심을 찾아서 구할 수 있다. 찾아진 결과 영상은 그림 3.3.3.35의 (c)와 같다.

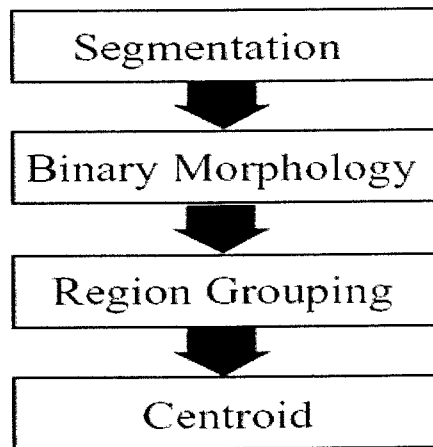


그림 3.3.3.34 각막반사에 의한 밝은점을 추출하기 위한 영상 처리 과정을 나타낸 흐름도

동공의 중심 위치는 동공의 색이 그 주변과 유사하기 때문에 분할하기 어렵다. 여기서는 이 문제점을 해결하기 위해 Ebisawa[1]의 방법을 사용하였다. 카메라의 중심에 위치한 적외선 LED를 켜고 모니터 모서리의 적외선 LED들은 끈 상태에서 영상을 받아들이면 동공이 밝게 빛나는 그림 3.3.3.35의 (b)와 같은 영상(Bright eye)을 얻게 된다. 그리고 카메라의 중심에 위치한 적외선 LED는 끄고 모니터 모서리의 적외선 LED들을 모두 켜면 각막 반사가 일어나면서 이번에는 동공이 오히려 어둡게 나타나는 현상(Dark eye)을 볼 수 있다(그림 3.3.3.35의 (a)). 따라서 짧은 시간에 모니터 모서리의 적외선 LED들과 카메라 중심의 적외선 LED를 번갈아 켜면서 연속적으로 두 영상을 얻게 되면(시간차가 충분히 작다면) 눈의 동공을 제외하고 나머지 부분들은 유사한 밝기값을 가지고 동공 부분의 값은 차이가 크게 된다. 이 두 영상의 차를 구하면 동공 부분에 해당하는 픽셀들은 큰 값을 가지고 다른 픽셀들은 작은 값을 갖는다(그림 3.3.3.35의 (d)). 그러므로 앞에서와 유사한 방법으로 임계값에 의한 영역분할을 한 후 영역의 중심을 구하여 동공의 중심 위치를 찾는다(그림 3.3.3.35의 (e)).

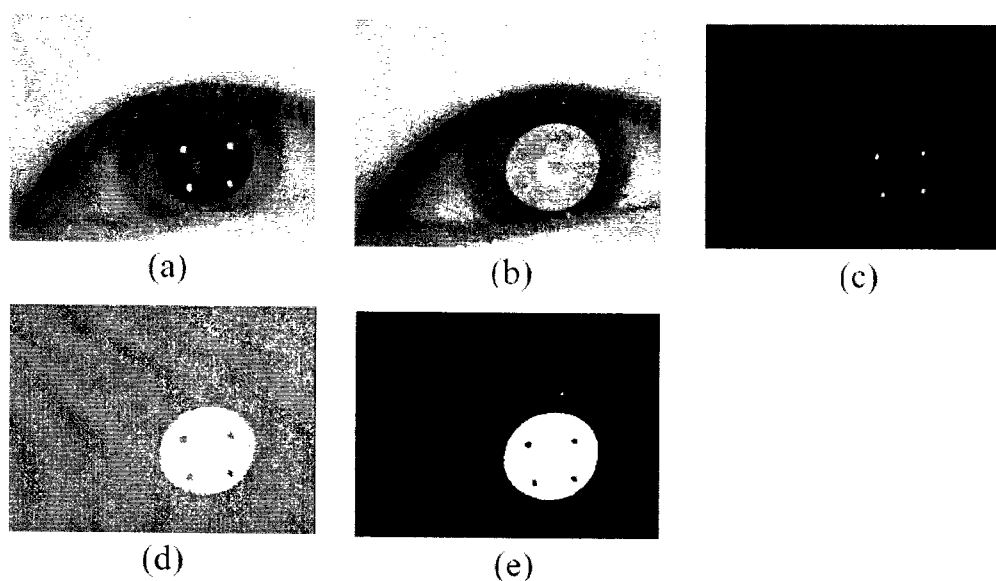


그림 3.3.3.35 특징점 추출을 위한 입력 영상들과 영상 처리 결과. (a) 각막 반사와 dark-eye 현상 (b) 동공 반사와 bright-eye 현상 (c) 추출된 각막반사에 의한 밝은 점들 (d) 차영상(difference image) (e) 추출된 동공 영역과 중심 위치

② Cross ratio을 이용한 응시점 추정

앞에서와 같이 얻어진 영상에서의 네 개의 밝은 점들의 위치와 동공의 중심 위치를 이용하여 모니터 상의 응시점을 추정하기 위해서는 사각형ABCD와 동공중심P가 모니터 스크린A'B'C'D'와 P'가 투영된 것이기 때문에 투영을 하여도 변하지 않는 값을 이용하게 되

면 응시점P'를 얻을 수 있다. 투영공간에서도 불변하는 특징값으로 cross ratio가 있다. 즉 ABCD와 P를 이용하여 구한 cross ratio는 A'B'C'D'와 P'를 이용해서 구하는 cross ratio와 같다.

그림 3.3.3.36은 각막에 나타나는 밝은 점들을 꼭지점으로 하는 사각형(ABCD)과 동공 중심 P를 이용하여 cross ratio를 구하는 법을 보여주는 그림이고 그림 3.3.3.37은 모니터 스크린에 해당하는 직사각형(A'B'C'D')과 응시점(P')를 이용하여 cross ratio를 구하는 법을 보여준다.

먼저, 응시점의 x좌표를 구하기 위해서 두 그림에서 각각 x좌표에 대한 cross ratio를 구한다. 그림 3.3.3.36에서 점E는 사각형의 두 대각선의 교점이고 점P는 동공의 중심 위치이다. $(x_i, y_i) (i=1,2,..,7)$ 는 영상에서의 좌표이다.

(\hat{x}, \hat{y}) 을 추정된 응시점의 스크린 상의 좌표라고 할 때 x좌표값은 다음과 같이 구한다. cross ratio를 구하기 위해선 최소 4개의 점들이 있어야 하기 때문에 직선 \overline{AD} 와 직선 \overline{BC} 를 이용해서 소실점(vanishing point)을 구하고 두 점 M_1, M_2 의 좌표를 구한다. M_1 은 소실점과 E점을 잇는 직선이 \overline{AB} 와 만나는 점이고 M_2 는 소실점과 P점을 잇는 직선이 \overline{AB} 와 만나는 점이다.

네 점 A, M_1, M_2, B 에 의한 cross ratio는 다음과 같다.

$$CR_x = \frac{(x_1y_2 - x_2y_1)(x_3y_4 - x_4y_3)}{(x_1y_3 - x_3y_1)(x_2y_4 - x_4y_2)}$$

이 cross ratio는 스크린 좌표계 상에서도 같은 값으로 유지되기 때문에 마찬가지로 스크린에서의 cross ratio를 구하면 다음과 같다.

$$CR_x = \frac{(w - \frac{w}{2})\hat{x}}{(w - \hat{x})\frac{w}{2}} = \frac{\hat{x}}{w - \hat{x}}$$

두 값을 같다고 놓고 식을 풀면 응시점의 x좌표 \hat{x} 는

$$\hat{x} = \frac{w \cdot CR_x}{1 + CR_x}$$

이다. 이 때, w 는 모니터 스크린의 가로 길이이다.

같은 방법으로 응시점의 y 좌표를 구하기 위해 그림 3.3.36에서 cross ratio를 구하면

$$CR_y = \frac{(x_4y_5 - x_5y_4)(x_6y_7 - x_7y_6)}{(x_4y_6 - x_6y_4)(x_5y_7 - x_7y_5)}$$

이고 그림 3.3.37에서 cross ratio를 구하면

$$CR_y = \frac{(h - \frac{h}{2})\hat{y}}{(h - \hat{h})\frac{h}{2}}$$

이다. 이 두 식이 같기 때문에 응시점의 y 좌표 \hat{y} 는

$$\hat{y} = \frac{h \cdot CR_y}{1 + CR_y}$$

이 된다. 이 때, h 는 스크린의 세로 길이이다.

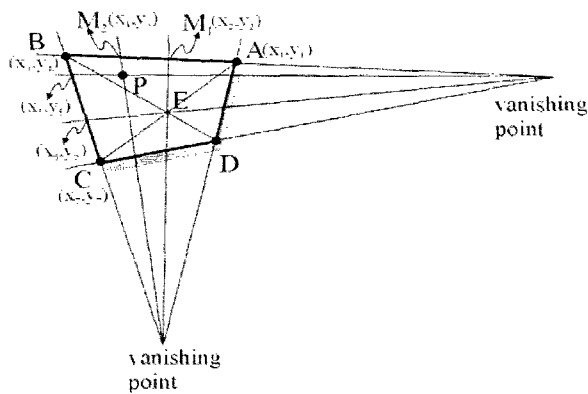


그림 3.3.36 영상에서 cross ratio의 계산.

A,B,C,D는 밝은 점들이고 P는 영상에서 동공 중심의 위치이다. E는 다각형ABCD의 대각선의 교점이다.

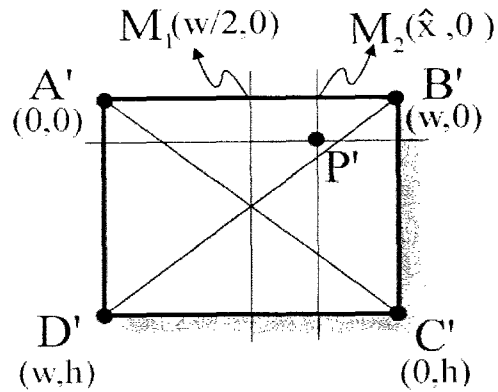


그림 3.3.37 모니터 스크린에서의 cross ratio의 계산.

w 는 스크린의 가로 길이, h 는 스크린의 세로 길이이고, P' 는 추정된 응시점이다.

(마) 실험 결과

실험에서는 칼라CCD카메라를 사용하였고 영상의 크기는 640×480 픽셀이다. 사용된 컴퓨터의 사양은 펜티엄IV-1.4GHz 컴퓨터와 17인치 모니터에서 실험하였다.

모니터의 스크린을 9×12의 블록으로 나누고 사용자가 모니터로부터 30cm~40cm정도 떨어진 일반적인 상황을 가정하고 실험하였다. 사용자가 각 블록의 중심을 바라 본 상태에서 영상을 얻고 앞에서 설명한 알고리즘에 따라 눈의 응시점을 추정하였다. 추정오차는 표 3.3.3.5와 같다. 응시점 추정을 위한 수행시간은 200msec이다.

표 3.3.3.5 응시점 추정오차

(mm)	최대오차	최소오차	평균	표준편차
X	25.4	-22.6	0.4	8.9
Y	11.6	-24.9	-2.5	6.3

오차가 생긴 원인은 몇 가지로 분석할 수 있다. 첫 번째는 특징점 추출에서 발생하는 오차이다. 이와 같은 시스템의 성능은 결국 영상에서 동공의 중심 위치와 각막의 밝은 점들의 위치를 얼마나 정확하게 찾는가에 달렸다. 각막 반사의 경우 비교적 찾기가 쉽지만 동공의 중심 위치의 경우는 주변 조명의 변화 등의 원인에 의해서 부정확한 결과를 얻는 경우가 발생한다. 그림 3.3.3.38과 같은 경우가 그런 경우이다. 그림은 임계값에 의해 동공의 영역을 분할하여 이진 영상을 만든 결과인데 이런 경우 주변의 조명의 변화로 인해 사용된 임계값이 적절하지 않아서 동공 영역의 추출이 잘못된 것이다. 동공 영역이 부정확하게 얻어졌기 때문에 중심의 위치에 오차가 많이 포함되게 된다. 두 번째 문제점은 모니터, 카메라, 사용자의 눈의 위치에 따라 각막 반사에 의한 밝은 점의 위치가 달라진다는 것이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 눈의 위치에 따른 변화를 고려하기 위한 캘리브레이션 과정을 추가하여야 한다. 세 번째, 우리는 눈동자의 표면을 평면이라고 가정하였다. 하지만 실제로는 굴곡이 있기 때문에 정밀한 결과를 얻어야 할 경우에는 눈동자의 굴곡을 무시할 수 없을 것이다. 따라서 실제로 모니터의 스크린은 동공에 투영되었을 때 밝은 점을 잇는 선이 직선이 아니라 곡선이 된다. 그리고 마지막으로 실험할 때 사용자가 가능한 블록의 가운데를 쳐다보려고 하였지만 눈은 무의식적으로 계속 움직이기 때문에 중심이 아닌 다른 곳을 쳐다봤을 가능성도 있다.

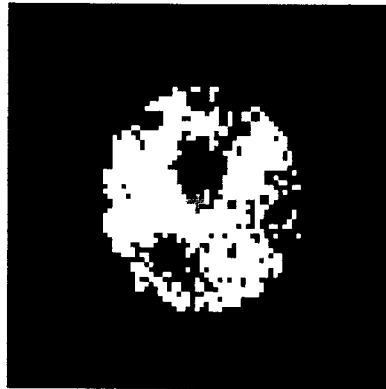


그림 3.3.3.38 부정확한 동공영역추출

비장착형 Eye-mouse 시스템은 기존의 연구들과 다르게 복수개의 적외선 LED를 사용하여 얻은 각막 반사의 사각형이 모니터의 스크린의 투영된 것이라는 사실에 따라 응시점을 간단한 계산으로 추정하였다. 이 방법은 기존의 방법과 같이 눈의 위치, 카메라의 위치, 모니터의 위치에 따른 복잡한 계산식을 필요로 하지 않고 특히 카메라로부터 눈까지의 거리를 필요로 하지 않아서 비교적 간단한 방법으로 눈의 응시점을 추정할 수 있다. 하지만, 좀 더 정밀한 결과를 얻기 위해서는 앞에서 언급한 것과 같이 눈의 굴곡을 고려하고 모니터, 카메라, 사용자의 눈의 위치를 고려하도록 알고리즘을 개선할 필요가 있다.

(2) 눈 추적 기구부

(가) 눈 추적 기구부의 필요성

위의 3.3.3.2절의 가. 단원에서 비장착형 Eye-mouse를 위한 시선 추출 알고리즘을 설명하였다. 그러나 장착형 Eye-mouse와는 달리 이러한 비장착형 Eye-mouse는 사용자의 머리에 카메라가 부착되는 것이 아니라 외부에 고정되어 있기 때문에 사용자의 머리가 움직일 때는 카메라의 가시영역에서 눈의 영상이 벗어날 수 있다. 더욱이 비장착형 Eye-mouse에 쓰이는 카메라의 렌즈는 눈의 영상을 크게 얻기 위해 매우 고배율이다. 사용자의 눈의 영상을 크게 얻으면 얻을수록 시선 추출의 결과가 정밀할 것이기 때문이다. 그러나 렌즈의 특성상 고배율일 경우에는 카메라의 가시영역은 좁아지게 되고 따라서 눈의 영상이 가시영역을 벗어날 가능성이 더 커지게 된다. 사용자가 컴퓨터 앞에서 작업을 할 경우 머리의 움직임이 크지는 않지만 자연스럽게 인터페이스 도구를 사용하면서 작업을 할 수 있도록 하려면 머리의 움직임을 허용할 수 있는 방법의 개발이 필요하다. 이것은 비장착형 Eye-mouse의 경우에 눈의 위치를 고배율의 카메라가 계속 추적하여 그 영상을 지속적으

로 얻을 수 있도록 하여야 가능하다. 그래서 본 연구에서는 이러한 동작을 가능하도록 눈 위치 추적 기구부를 설계 및 제작하였다. 아래의 그림3.3.3.39는 제작된 기구부의 사진을 보여주고 있다.

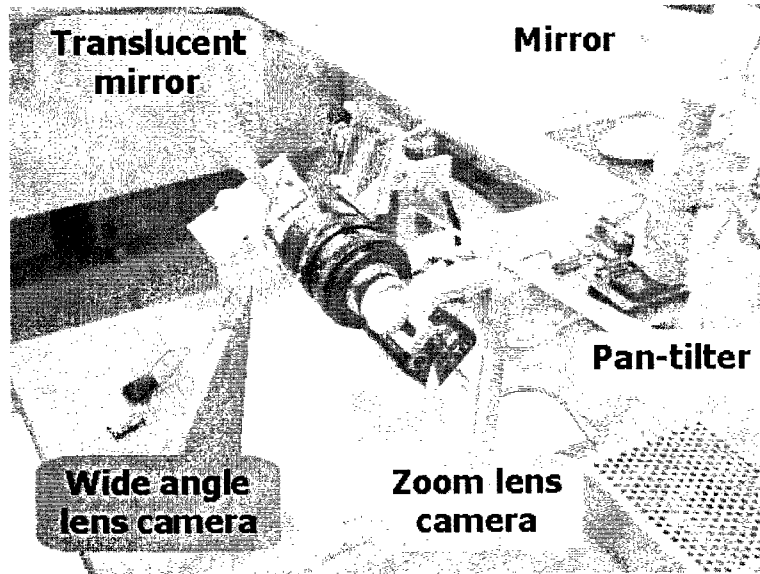


그림 3.3.3.39 비장착형 Eye-mouse를 위한 눈추적 기구부

이 시스템의 구조는 세 가지로 나눌 수 있다. 우선 넓은 영역을 보는 광각 카메라(Wide angle lens camera) 그리고 눈의 확대된 영상을 얻는 고배율 카메라(Zoom lens camera) 그리고 거울을 움직이는 팬-틸트이다. 그림 3.3.3.39에서 광각 카메라는 사다리꼴 형으로 생긴 통안에 장착되어 있다.

(나) 눈 추적 기구부의 구조와 동작원리

눈 추적 기구부의 원리를 설명하는 것이 그림 3.3.3.40이다.

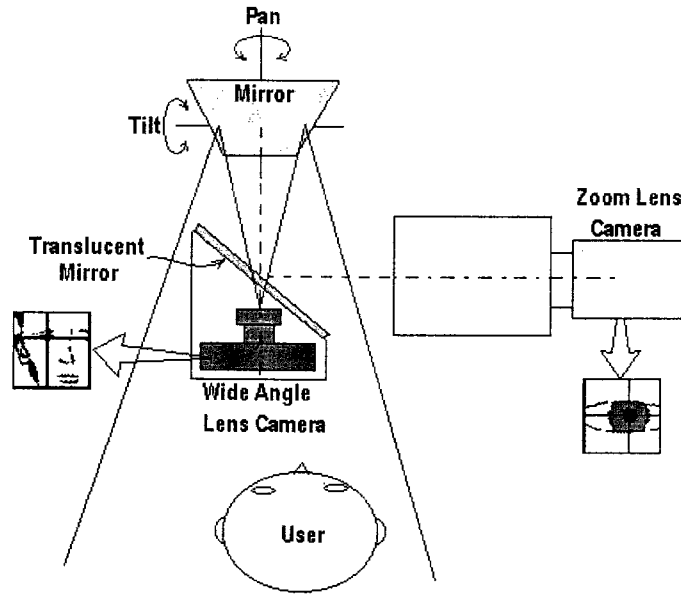


그림 3.3.3.40 눈 추적 기구부의 구조와 동작원리

그림을 보면 먼저 두 개의 거울이 있다. 하나는 일반 거울이며 하나는 반투명 거울이다. 우선 반투명 거울 때문에 사다리꼴로 생긴 통안의 광각 카메라와 옆으로 향하고 있는 고배율 카메라는 같은 곳을 바라볼 수 있다. 즉, 두 카메라의 광축을 일치시킬 수 있다. 그러면 그림에서처럼 두 카메라에서 얻게 되는 영상의 중심에는 같은 지점이 다른 배율로 보이게 된다. 그리고 일반 거울은 팬-틸트에 장착되어 있다. 따라서 팬-틸트를 구동시킴으로써 두 카메라의 보는 방향을 조정할 수 있게 된다. 광각 카메라는 시야각이 넓기 때문에 눈의 위치를 놓치지 않고 계속 추적할 수 있다. 따라서 광각 카메라에서 얻은 영상에서 눈의 위치를 찾아서 팬-틸트를 구동시켜서 영상의 중심에 눈의 영상이 위치하면 고배율 카메라에도 눈의 영상이 나타나고 고배율로 영상을 얻을 수 있게 된다. 이러한 영상을 얻게 되는 상황이 그림3.3.3.41과 같다. 그림에서 얼굴이 전체적으로 나오는 영상이 광각 카메라에서 얻은 영상이다. 이 영상에서 눈의 위치를 찾고 팬-틸트를 구동시켜서 영상의 중심에 눈이 왔을 때 고배율 카메라에서 얻게 되는 눈의 영상이 그 아래에 나타나고 있다.

(다) 눈 추적 기구부의 구동

앞에서 설명한 대로 눈 추적 기구부는 눈의 위치가 영상의 중심에 오기 위해 팬틸트를 구동해야 한다. 본 연구에서는 기구부에 DC모터 두 개를 장착하여 팬-틸트 동작이 일어나도록 하였다. 이러한 DC모터의 자체적인 컨트롤을 위해 80C196KC를 탑재한 CPU 보드를 이용하였고 DC모터의 모션 컨트롤은 National Semiconductor사의 LM 629M-8 칩을 이용하였다. 그림3.3.3.42에 이러한 회로가 나타나 있다. PC에서 눈의 위치를 파악하여 위치 정

보를 RS232C 직렬통신을 통해 전송하면 80C196KC보드는 이 정보를 받아서 LM 629M-8 칩에 DC모터의 동작 명령을 보내게 된다. 현재까지는 특정한 색의 물체를 추적하는 것으로 기구부가 원하는 동작을 하는지 테스트하는 동작실험을 마쳤으며 추후 계획으로 눈의 위치를 강인하게 추출하여 눈의 위치를 추적할 것이다. 그림3.3.3.2.(5)에 이러한 추적 실험을 수행한 실험 환경이 보이고 있다.

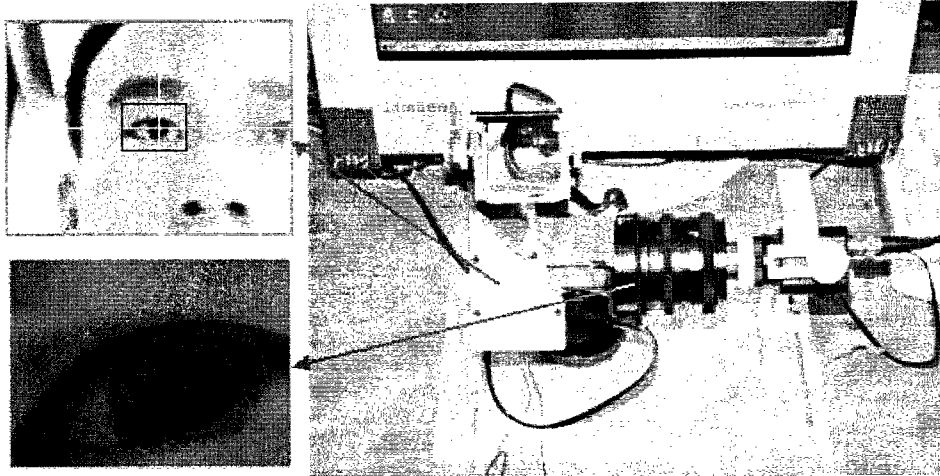


그림 3.3.3.41 눈 추적 기구부에 의한 눈 영상 획득

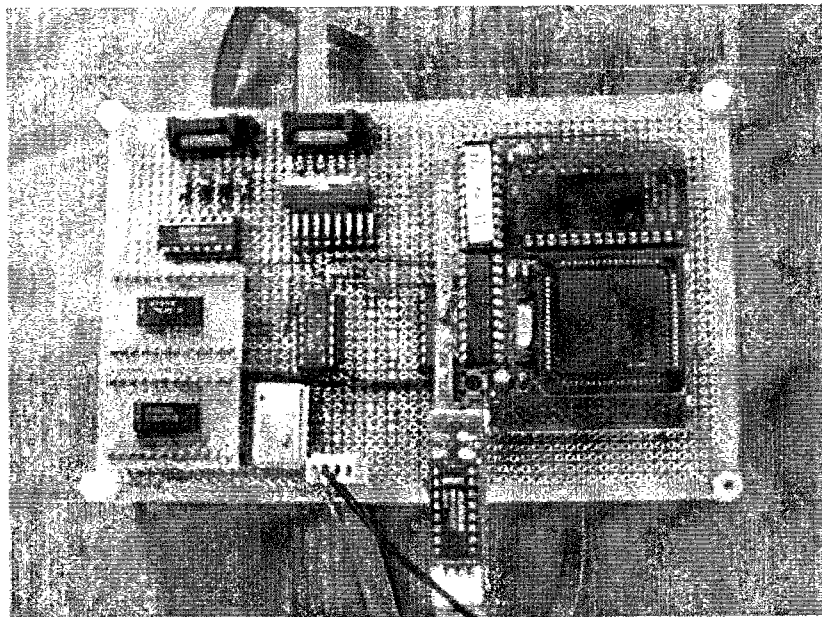
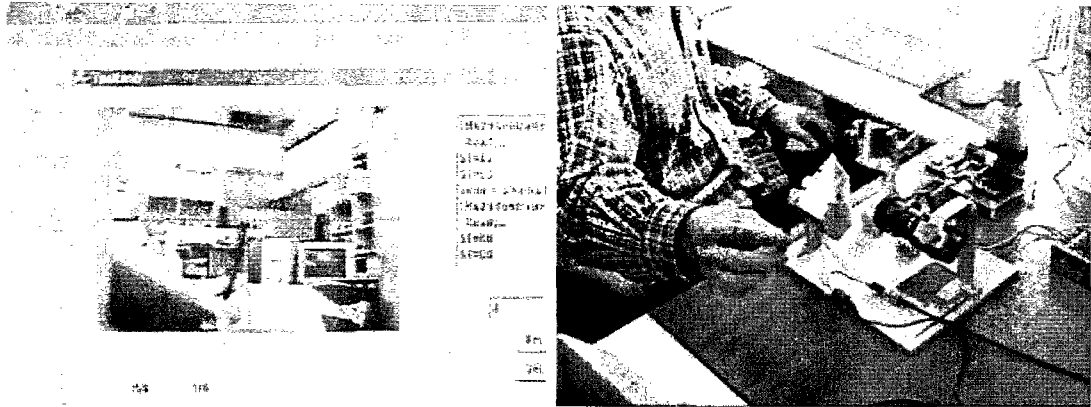


그림 3.3.3.42 눈 추적 기구부의 구동 회로



(a) 눈 추적 기구부 프로그램

(b) 눈 추적 기구부 동작 실험

그림 3.3.3.43 눈추적 기구부 실험 환경

다. Eye-mouse 시스템을 위한 인터페이스 기술 개발

1단계 연구에서 Eye-mouse를 위한 인터페이스 메뉴를 설계하는데 대한 필요성과 수행 내용을 언급하였었다. 2단계 연구에서는 Eye-mouse system에 적합한 체계화된 메뉴 방식의 설정 및 mouse 클릭 동작을 전체 KARESII시스템[48]에 맞게 직접 구현하고 Eye-mouse를 통해 실험해 보았다. 인터페이스 프로그램의 필요 동작은 아래와 같다.

- 메뉴 방식으로 마우스의 포인터가 메뉴 위로 오면 저절로 pull-down되어 사용자가 원하는 명령들로 구성된 메뉴의 리스트가 나타난다. 이것은 mouse의 클릭을 척수장애인들은 수행할 수 없기 때문이다.

- 메뉴의 리스트 중 선택된 메뉴가 최종 결정을 위한 레벨이 되면 그 옆에 부가적인 'OK'메뉴를 나타나게 한다. 'OK'메뉴는 마우스 포인터가 위로 오면 저절로 눌러지게 되어 위의 해당 메뉴를 클릭한 것처럼 선택된다.

- 전체 KARESII 시스템을 위해서는 팬-틸트 위에 장착된 스테레오 카메라 시스템을 구동할 필요가 있으므로 인터페이스시스템은 팬-틸트 방향을 변화시키기 위한 구동 버튼이 필요하다. 따라서 마우스 포인터가 위로 오면 자동으로 눌러지는 팬-틸트 구동을 위한 자동 눌림 버튼을 구현해야 된다.

위와 같은 인터페이스 시스템을 프로그램으로 구현 한 것이 그림3.3.3.44와 같다. 그림의 프로그램을 보면 우선 좌측 상단에 KARESII 시스템이 수행해야할 작업에 대한 종류를 선택할 수 있는 상위 메뉴(Task Selection)가 있고 그 메뉴에 소속된, 작업의 종류에 대응하는 하위 메뉴가 pull-down 되어 나타난 것을 볼 수 있다. 그리고 그림에서는 작업의 종류중 하나인 물 마시기 작업(Drinking) 메뉴를 선택하는 상황을 보여주고 있다. 이것을 선

택하면 이 명령이 로봇에게 전달되어 로봇은 원하는 작업을 수행하게 된다. KARESII 시스템에서는 로봇 팔이 이동로봇에 장착되어 있어서 사용자가 원하는 물건이 멀리 떨어져 있을 때도 이동로봇이 이동하여 로봇팔이 물건을 잡을 수 있도록 한다(그림3.3.3.45). 따라서 인터페이스 프로그램에는 이동로봇의 움직임을 정하는 메뉴가 필요하다. 그림3.3.3.46에서 이동로봇의 움직임을 선택할 수 있는 상위 메뉴와 그에 따른 하위 메뉴를 볼 수 있다. 그림에서는 이동로봇을 좌측으로 움직이는 메뉴(Left)를 선택하는 상황을 보여주고 있다. 그리고 그림3.3.3.44와 그림3.3.3.46에서 하위 메뉴의 옆에 추가적인 'OK'메뉴를 볼 수 있다. 해당되는 메뉴를 선택하고 싶으면 마우스 포인터를 추가적인 'OK'메뉴의 위로 가게 하고 이때 이 메뉴는 저절로 눌러져서 대응하는 메뉴가 클릭된다. 그리고 또 하나 고려해야 할 상황은 사용자는 시선을 이동하다가 실수로 메뉴를 선택하게되어 원하지 않는 명령을 로봇에게 내릴 수 있다. 따라서 추가적인 'OK'메뉴를 누른 후에 그것이 실수인지 아닌지를 확인하기 위해 한번 더 확인 버튼을 누르게 하였다. 그림3.3.3.47에는 이러한 확인 버튼(Done)을 누르는 상황을 보여 주고 있다. 이 버튼은 평소에는 활성화되지 않아서 누를 수 없지만 추가적인 'OK'메뉴가 눌러지면 활성화되어 눌러지기를 기다린다. 만약 사용자가 실수로 메뉴를 선택했다면 그 후 이 버튼을 누르지 않으면 메뉴는 선택되지 않은 것이 된다. 이러한 확인 버튼 또한 마우스 포인터가 위로 오면 저절로 눌러지는 기능을 가지고 있다.

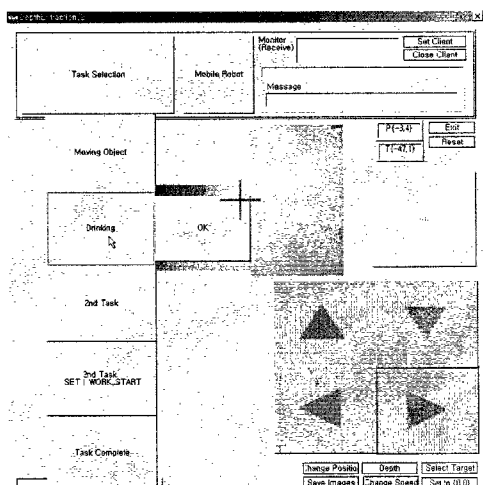


그림 3.3.3.44 Eye-mouse를 위한 인터페이스 프로그램 (Drinking 메뉴 선택 상태)

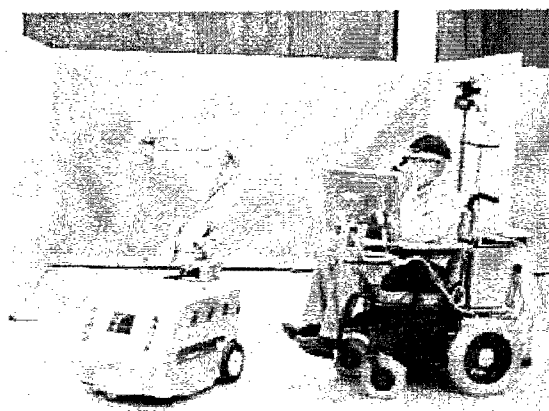


그림 3.3.3.45 KARESII 시스템에서 이동로봇과 장착된 로봇팔 그리고 휠체어 시스템

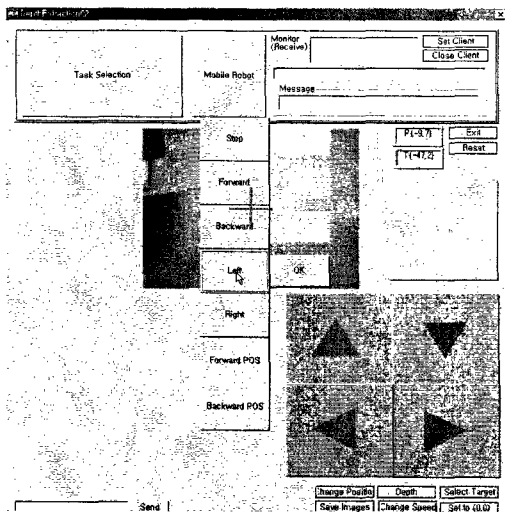


그림 3.3.3.46 인터페이스 프로그램에서 이동로봇의 좌측으로 이동 메뉴 선택

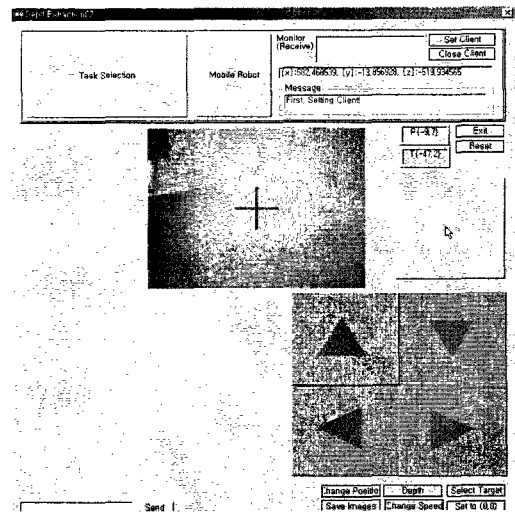


그림 3.3.3.47 메뉴 선택을 한번 더 확인 하기 위한 버튼

인터페이스 프로그램을 보면 중앙에 이미지가 나타나 있음을 볼 수 있고 그 중앙에 십자 표시가 있다. 이 화면은 사용자가 앉아 있는 휠체어의 뒤쪽 상단에 존재하는 스테레오 카메라(그림3.3.3.45)의 한쪽 카메라에서 획득되는 영상이다. 사용자는 스테레오 카메라의 팬-틸트를 구동하여 이 이미지의 십자표시에 원하는 물건이 오도록 한다. 그러면 스테레오 시스템은 이 물건의 위치를 계산하여 로봇에게 알려주게 된다. 따라서 앞에서 언급한, 팬-틸트 방향을 변화시키기 위한 구동 버튼이 인터페이스 프로그램에는 존재한다. 그림 3.3.3.48은 이 버튼 중 팬-틸트를 위로 움직이는 버튼을 눌렀을 때의 상황을 보여 주고 있다. 이 버튼 역시 마우스 커서가 위로 오면 자동으로 눌러지고 누르는 동안 팬-틸트는 해당 방향으로 이동한다. 마우스 커서가 버튼에서 벗어나면 동작은 멈추게 된다. 팬-틸트 동작버튼은 위,아래,좌,우로 움직이기 위해 네 개가 존재하며 눌러질 때 버튼의 색이 변하여 눌러지고 있음을 가시적으로 보여준다. 그림3.3.3.49, 그림3.3.3.50, 그림3.3.3.51은 각각 아래, 좌,우로의 이동 버튼이 눌러질 때의 상황을 보여 준다.

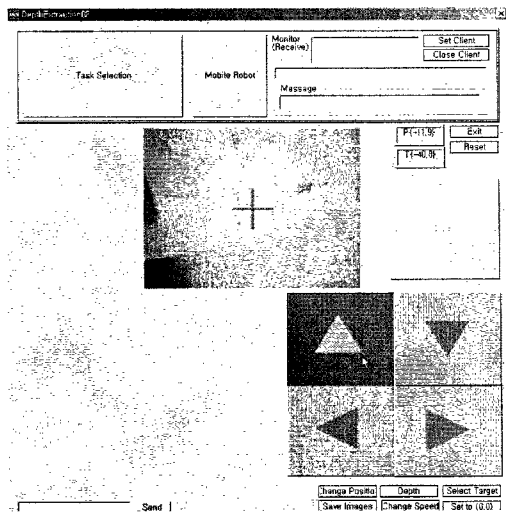


그림 3.3.3.48 인터페이스 프로그램에서 팬-틸트 동작버튼(위)을 누른 상황

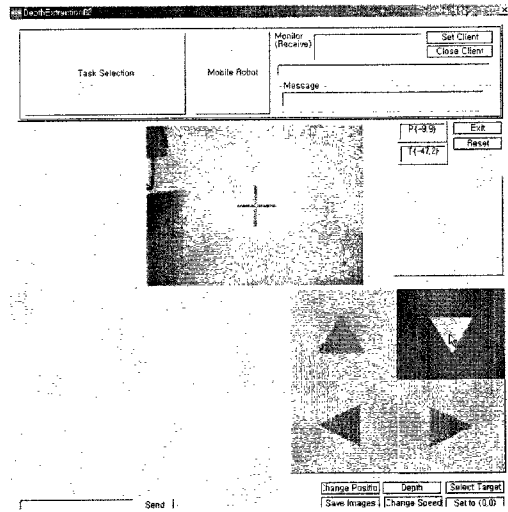


그림 3.3.3.49 인터페이스 프로그램에서 팬-틸트 동작버튼(아래)을 누른 상황

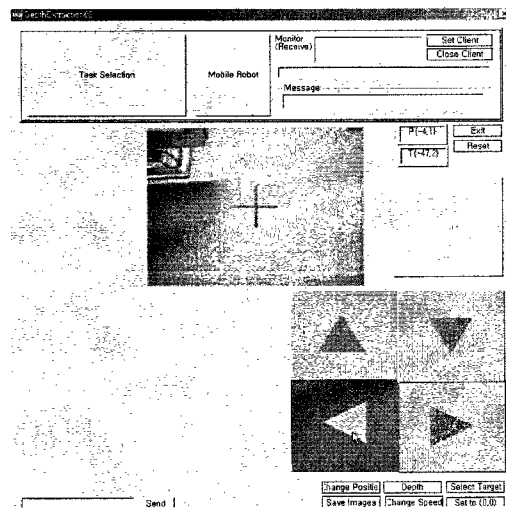


그림 3.3.3.50 인터페이스 프로그램에서 팬-틸트 동작버튼(좌)을 누른 상황

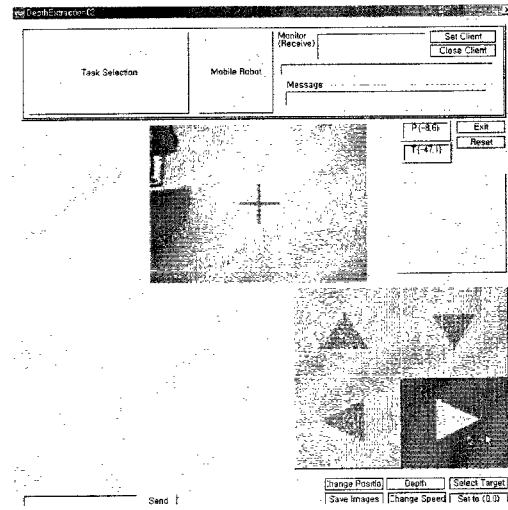


그림 3.3.3.51 인터페이스 프로그램에서 팬-틸트 동작버튼(우)을 누른 상황

라. 스테레오 비전을 이용한 3차원 위치 정보 추출 시스템

(1) 개요

휠체어 시스템 상단에는 스테레오 비전 시스템이 장착되어 있으며 팬-틸트 구동부(Pan-Tilt Unit)를 작동해서 카메라를 통해 보고자 하는 물체가 있는 방향으로 움직일 수 있다(그림 3.3.3.52). 두 대의 카메라를 통해 들어오는 영상 중 하나는 작업자의 앞에 놓여 있는 모니터에 출력된다. 모니터에 출력되는 영상을 통해서 고개를 돌리기 어려운 위치에

있는 물체에 대한 작업 등 작업에 대한 모니터링을 수행할 수 있다. 물론, PTU는 Eye-mouse 시스템을 이용하여 조종한다(그림 3.3.3.53).

스테레오 비전 시스템은 모니터링뿐만 아니라 작업 대상 물체의 위치 정보를 추출하는 데 주로 이용된다. 모니터링 과정에서는 두 카메라에서 들어오는 영상 중 1개만 이용해도 충분하였지만, 물체의 3차원 위치를 알아내기 위해서는 두 개의 영상이 필요하다. 캘리브레이션이 되어 있는 두 대의 카메라에서 동일한 3차원 좌표에 대한 두 영상에서의 2차원 좌표를 알면 삼각법을 이용해서 원래의 3차원 좌표를 얻어낼 수 있다. 카메라의 캘리브레이션 과정과 두 쌍의 2차원 영상 좌표를 이용하여 3차원 좌표를 얻어내는 과정은 1단계 보고서에 자세히 언급되어 있다. 여기서는 주로 두 영상에서 어떻게 동일한 3차원 좌표에 대응하는 두 쌍의 2차원 좌표를 얻을 것인가 하는 문제에 대해서 언급한다. 즉 한 쪽 영상에서 주어진 좌표에 대응하는 다른 쪽 영상에서의 좌표를 구하는 matching problem에 대해서 설명한다.



그림 3.3.3.52 3차원 정보 추출 시스템(스테레오 비전 시스템)

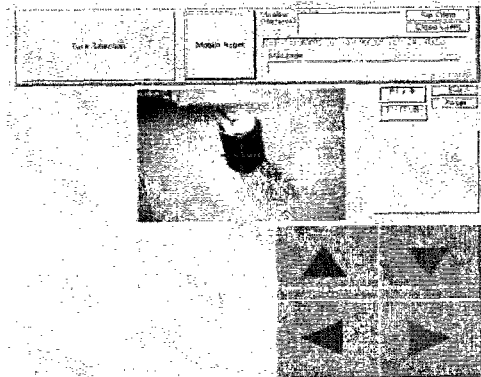


그림 3.3.3.53 작업 모니터링 화면

(2) 대응점 추출을 위한 영상 비교

스테레오 비전 시스템에서 한 쪽 영상의 특정 좌표에 대응하는 다른 쪽 영상에서의 좌표를 찾는 방법은 다음과 같다. 처음 영상을 A라고 하고 다른 쪽 영상을 B라고 할 때 가장 단순한 방법은 A 영상에서 지시한 좌표에서 나타나는 특성과 가장 비슷한 부분을 B 영상에서 찾는 것이다. 여기서 비슷한 특성이라 함은 밝기 영상의 분포가 비슷하거나 근처에서 발견되는 모서리가 비슷하거나 그 영역의 색상 분포가 비슷하거나 등 여러 가지로 정의할 수 있다. 색상 정보를 이용할 경우 보다 많은 정보를 이용하기 때문에 좋은 성능을 기대할 수 있지만 그 만큼 복잡해서 많은 계산 시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 밝기 정보와 그 밝기 정보의 변화량을 나타내는 에지 정보의 SSD를 이용하여 두 영상 특정 영역을 비

교한다. 두 영상의 특정 윈도우 내의 밝기 값 벡터를 각각 $\mathbf{R} = (R_1, R_2, \dots, R_p)^T$ 과 $\mathbf{S} = (S_1, S_2, \dots, S_p)^T$ 라고 가정하자. 이 두 벡터 사이의 유사성 또는 비유사성을 표현하기 위해 일반적으로 두 벡터 사이의 '거리'를 활용한다. 여러 가지 거리 측정 방법 중에서 많이 사용되는 Minkowski 거리는 다음과 같다.

$$d(\mathbf{R}, \mathbf{S}) = \left[\sum_{k=1}^p (R_k - S_k)^m \right]^{1/m}$$

위 식에서 $m=2$ 인 경우가 자주 사용하는 유클리드 거리가 되면 이를 제곱한 형태가 영상 처리에서 많이 사용하는 SSD(Sum of Squared-Difference)로서 다음과 같.[49].

$$SSD = \sum_{k=1}^p (R_k - S_k)^2$$

따라서 SSD 값이 최소가 되는 두 벡터가 가장 유사한 벡터라고 할 수 있다. 여러 가지 잡음이 삽입된 경우에 SSD 방식이 상관값(correlation) 방식보다 좀 더 잡음에 강인한 것으로 알려져 있다[50].

(3) Epipolar 제한 조건을 이용한 검색 영역 축소

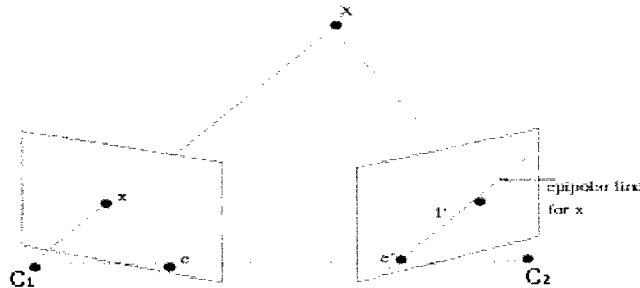


그림 3.3.3.54 epipolar line으로 제한된 검색 영역

A라는 영상에서 특정 좌표에 대응하는 부분을 영상 B에서 찾기 위해서는 일반적으로는 영상 B의 모든 영역에 대해 SSD를 계산해서 최소가 되는 부분을 찾아야 한다. 하지만 캘리브레이션이 되어있는 두 카메라의 경우 카메라의 위치 관계를 이용해서 검색 영역을 줄일 수 있다. 즉 두 카메라 사이의 위치 관계를 알고 있는 경우 A 영상에서 주어진 좌표에 대

용하는 B 영상에서의 좌표는 epipolar line 이라고 불리는 직선 위에 있게 된다[51](그림 3.3.3.54). 왼쪽 영상의 x라는 점에 해당하는 3차원 좌표는 왼쪽 카메라의 중심 C_1 과 x를 연결하는 직선 상에 존재해야 하며 이것을 다시 오른쪽 카메라에서 바라보면 대응하는 점은 직선 l' 위에 존재해야 한다.

결국 전체 영상에 대해서 SSD를 계산할 필요 없이 epipolar line 위에 있는 점들에 대해서만 SSD를 계산해서 최소가 되는 점을 찾으면 대응점이 된다.

Epipolar line을 계산하는 방법은 다음과 같다. 먼저 카메라 캘리브레이션에 의해 얻어진 3×4 카메라 프로젝션 행렬을 각각 P_1, P_2 라고 하자. 틸드(~)가 붙은 것은 프로젝티브(projective) 좌표 계를 의미한다. 이때 P_1, P_2 는 다음과 같은 형태이다.

$$P_1 = [P_1 | \bar{p}_1], \quad P_2 = [P_2 | \bar{p}_2]$$

여기서 P_1 과 P_2 는 3×3 행렬이며 \bar{p}_1 과 \bar{p}_2 는 3×1 벡터이다. 여기서 오른쪽 카메라의 epipole \bar{e}_2 를 구한다. 위 그림의 e' 의 프로젝티브 좌표에 해당한다.

$$\bar{e}_2 = P_2 \begin{bmatrix} -P_1^{-1} \bar{p}_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

\bar{e}_2 를 이용하여 skew-symmetric 행렬 E_2 를 만든다.

$$E_2 = [\bar{e}_2]_x$$

여기서 위의 기호의 의미는 벡터 $a = [a_1, a_2, a_3]^T$ 일 때

$$[a]_x = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

이고, $a \times b = [a]_x b$ 의 특성을 갖는다.

E_2 를 이용하여 fundamental 행렬 F 를 구할 수 있다.

$$F = E_2 P_2 P_1^{-1}$$

그림 3.3.3.54에서 왼쪽 영상의 한점 x가 주어지면 오른쪽 영상의 대응하는 점 x' 은 다음 식을 만족해야 한다.

$$[x'^T \ 1] \cdot F \cdot \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix} = 0$$

이 식을 만족하는 x' 의 집합은 오른쪽 영상에서 직선을 이룬다. 이것을 epipolar line이라고 한다.

(4) Depth 제한 조건을 이용한 검색 영역 축소

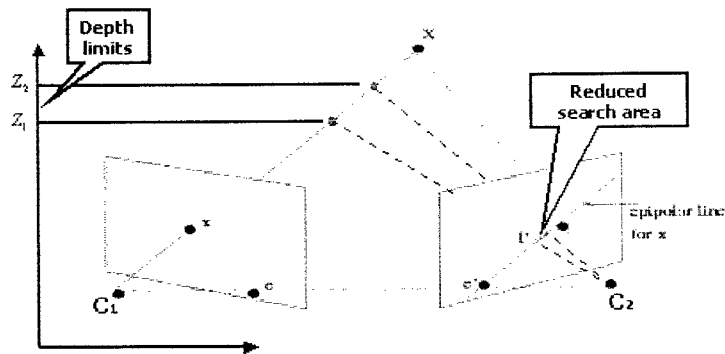


그림 3.3.3.55 Depth 영역을 제한한 경우의 검색 영역

실제로 작업을 수행하게 될 때 작업 대상 물체는 로봇 팔이 작업할 수 있는 영역 내에 존재해야 한다. 또한 로봇 팔이 스테레오 카메라 시스템에서 멀리 떨어져 있지 않다고 가정하면, 작업 대상 물체의 위치에 대해서 어느 정도 제한을 둘 수 있게된다. 실제로 본 시스템에서는 카메라가 바라보는 방향으로 10m 이내의 물체에 대해 작업을 수행한다고 가정하고 있으며 이러한 가정은 실내 환경에서 거의 문제가 없는 가정이라 할 수 있다. 이렇게 카메라가 바라보는 방향의 특정 영역에 대상 물체가 있다고 가정하면 대응점을 찾기 위한 검색 영역을 더욱 줄일 수 있다.

그림 3.3.3.55에서 작업 대상 물체의 위치 X 가 왼쪽 카메라의 Z 방향에 대해서 Z_1 과 Z_2 사이에 존재해야 한다는 제한 조건이 들어가면 그림에서 보듯이 오른쪽 카메라의 영상에서는 epipolar line의 일부에만 대응점이 존재할 수 있다. 카메라 캘리브레이션이 되어 있어서 두 카메라의 위치 관계를 알고 있고 Z_1 과 Z_2 가 주어지면 epipolar line 상의 제한 영역을 계산할 수 있다. 이러한 제한 영역 내에서만 SSD를 계산하여 최소 점을 찾음으로써 대응점 추출에 필요한 계산 시간을 상당히 줄일 수 있다.

(5) 실험 결과



그림 3.3.3.56 Epipolar line과 depth 영역 제한 실험

그림 3.3.3.56의 왼쪽 그림에서 흰색 컵을 지시한 경우 오른쪽 그림에서 대응점을 찾기 위한 검색 영역을 표시한 결과이다. 오른쪽 그림에서 컵을 지나가는 약간 기울어진 수평 선분이 왼쪽 영상에서 지시한 점(수직 선분의 중점)에 의해 결정되는 epipolar line이다. 오른쪽 영상의 5개 수직 선분은 각각 물체가 1m, 3m, 5m, 7m, 9m의 위치에 있다고 가정하는 경우의 대응점이다. 따라서 작업 대상 물체가 1m~9m 사이에 있다고 가정하면 epipolar line 중에서도 1번과 9번으로 표시된 수직 선분과 만나는 두 점 사이의 영역만 검색하면 된다. 오른쪽 영상의 전체 영역을 검색하는 경우에 비하면 계산량을 상당히 줄일 수 있다. 640x480 영상의 경우 위의 그림에서는 대략 1000배 이상(대략 480x3) 계산량을 줄인 결과가 된다.



그림 3.3.3.57 대응점 추출 실험 (1)

그림 3.3.3.57에서 그림 3.3.3.60은 실제 스테레오 영상에서 대응점 추출 실험을 한 결과를 보여주는 그림이다. 그림 3.3.3.57의 왼쪽 영상에서 수직 선분으로 표시한 부분이 지시한 물체이고 오른쪽 영상에서 수직 선분은 앞에 설명한 방식으로 찾아진 대응점이다. 양쪽 영상에서 수평 선분은 각 영상의 epipolar line이다. 또한 각 영상 하단의 그래프는 epipolar line 상의 점들의 밝기 값을 표시한 것이며 밝기 값이 갑자기 많이 변하는 edge에 해당하는 점들을 같이 표시하고 있다.

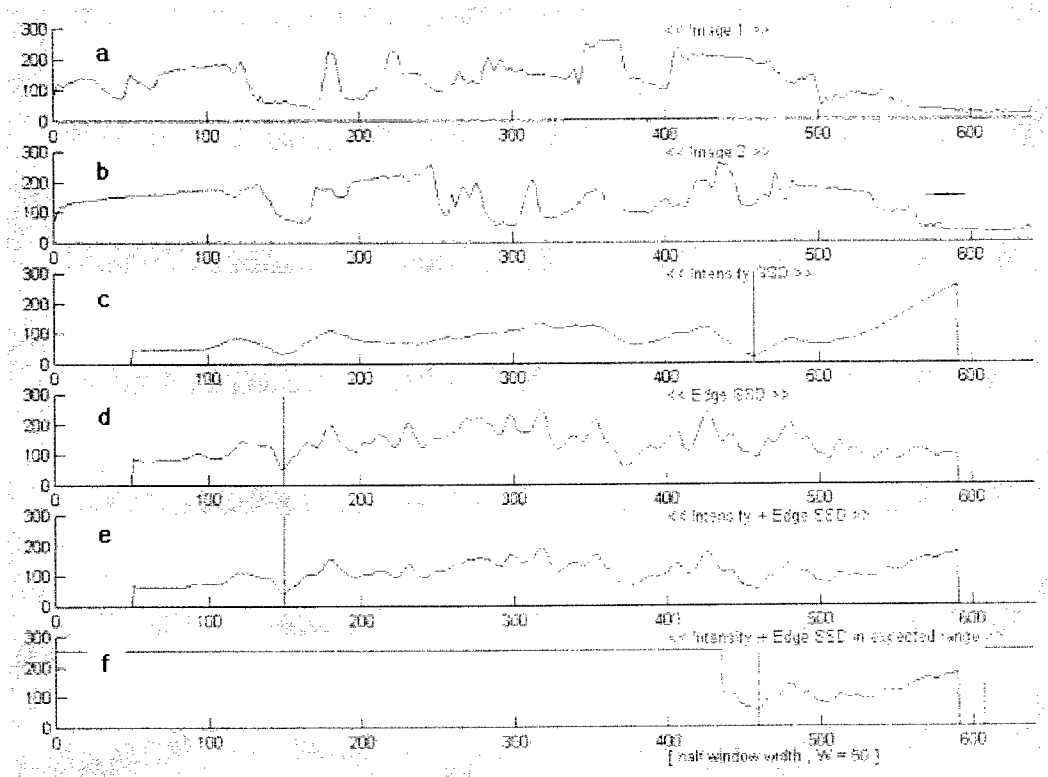


그림 3.3.3.58 실험 (1)에서의 SSD

그림 3.3.3.58은 알고리즘이 적용되는 과정을 보여주는 그림이다. 먼저 a와 b는 지시한 점에 의해 결정되는 두 영상의 epipolar line에서 추출할 밝기 값들이다. 결국, a에 표시된 위치에 해당하는 위치를 b에서 찾는 것이 과제이다. 실험에 사용한 윈도우의 크기는 양쪽으로 각각 50 픽셀이다. c는 밝기 정보를 이용한 SSD 값을 계산한 그래프이며 d는 edge 값을 이용한 SSD를 보여주는 그래프이다. 또한 e는 이 두 값을 합한 것이다. c, d, e에서의 수직 막대기는 최소 값이 나타나는 위치를 표시한 것이다. f는 e와 동일하지만 depth를 1m에서 10m 사이로 제한한 영역만을 표시하고 최소 값을 그 영역에서만 구한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 edge SSD와 밝기 값에 의한 SSD를 동일한 비중으로 고려하여 대응

점을 구하고 있다. 지시한 위치 주변 물체의 모양이나 코너 정보 등을 이용하지 않고 밝기 값과 그 변화 성분인 edge만을 이용하므로 정보가 상당히 부족한 편이다. 따라서 최소가 되는 위치가 실제 찾아져야 하는 부분이 아닌 다른 곳에서 나타나기도 한다(e). 하지만, 작업 대상 물체의 존재 영역을 미리 제한하여 검색 영역을 상당히 줄임으로써 대응점이 제대로 찾아진 것을 볼 수 있다. 많은 경우에 있어서 depth 제한 조건이 없어도 올바른 대응점이 추출된다. 하지만 그림 4.2.3.4.6에서 그림 4.2.3.4.9는 depth 제한 조건을 사용해야만 대응점이 제대로 추출되는 경우를 보여주는 그림들이다. 즉, depth 제한 조건을 이용함으로써 검색 영역을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 잘못된 대응점 추출도 막을 수 있다.

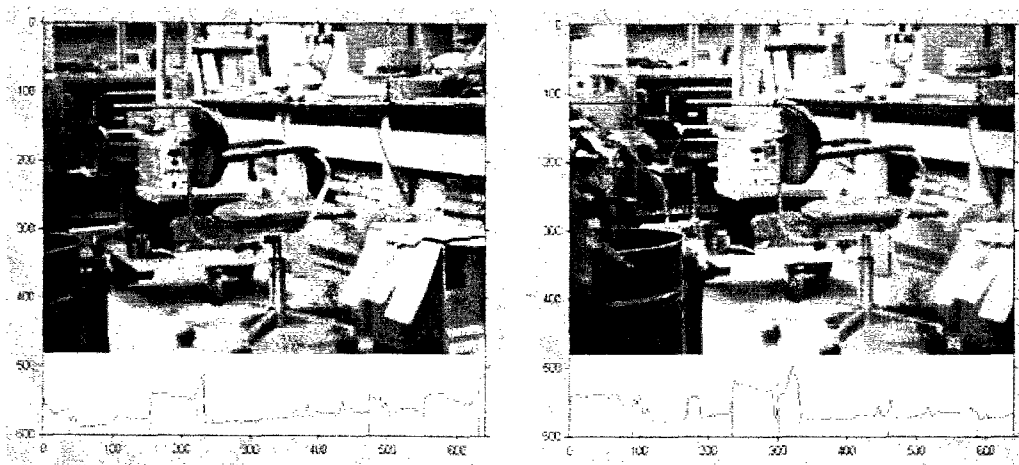


그림 3.3.3.59 대응점 추출 실험 (2)

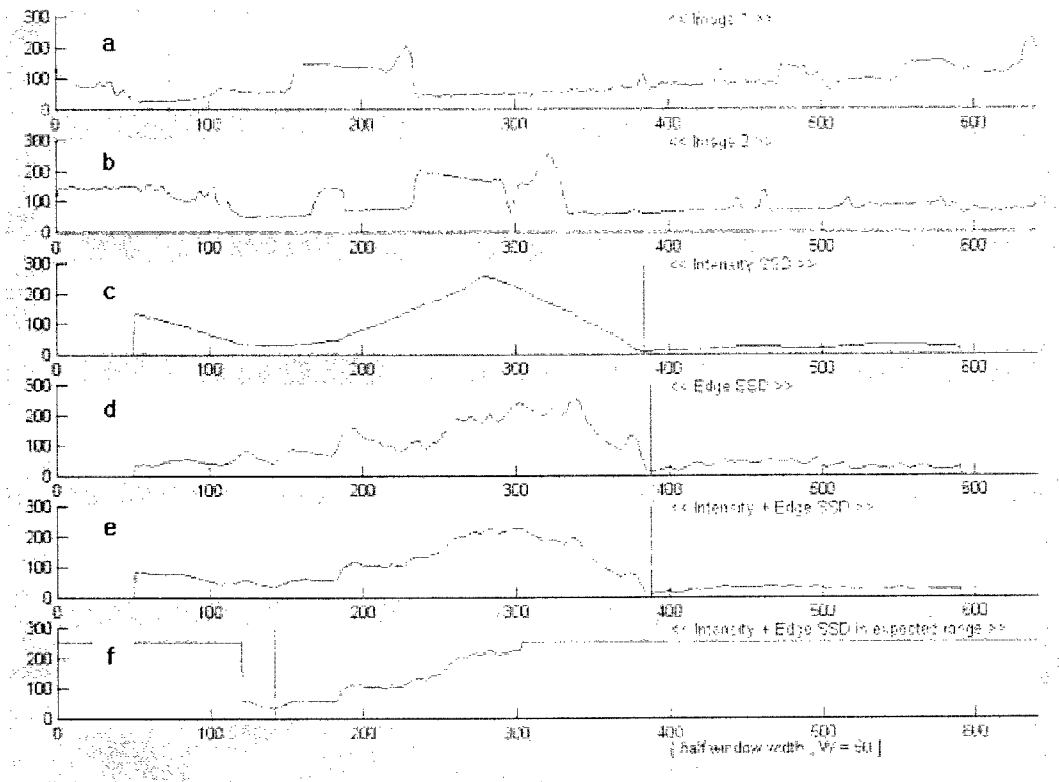


그림 3.3.3.60 실험 (2)에서의 SSD

그림 3.3.3.59의 왼쪽 영상의 지시된 점과 오른쪽 영상의 찾아진 대응점을 살펴보면 올바른 대응점이 잘 찾아진 것을 볼 수 있다. 그림 3.3.3.60을 보면 여기서도 depth 영역에 의한 제한 조건이 중요한 역할을 했음을 알 수 있다. 전체 영역에서의 SSD는 e에서 보듯이 380 픽셀 부근에서 최소이지만 제한된 영역에서는 140 픽셀 부근에서 최소 값이 찾아지고 이것이 올바른 대응점인 것을 그림 3.3.3.59의 양쪽 영상을 비교해 보면 알 수 있다.

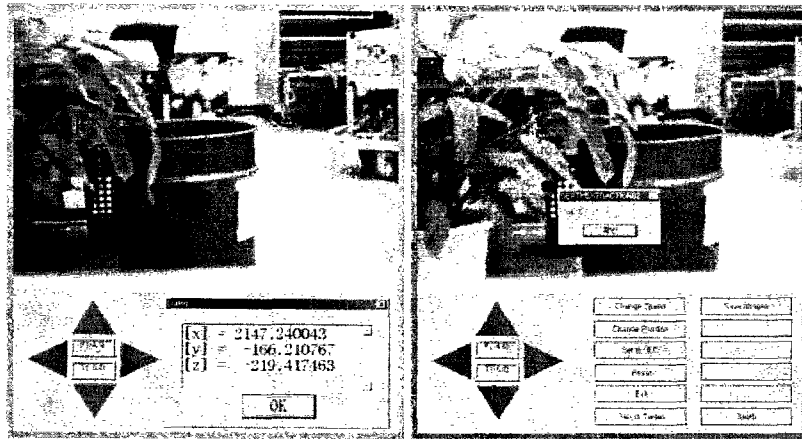


그림 3.3.3.61 3차원 위치 추출 실험

그림 3.3.3.61은 대응점을 찾고 3차원 위치까지 추출해 내는 실험을 한 그림이다. 왼쪽 영상에서 지시한 위치를 오른쪽 영상에서 제대로 찾았음을 볼 수 있다. 오른쪽 영상은 작업자의 모니터에 나타나지는 않지만 지시한 작업 대상 물체의 3차원 위치를 알아내기 위해 가지고 있어야 한다. 위의 그림은 대응점을 제대로 찾았음을 보이기 위해서 표시한 것이다. 왼쪽 그림 하단에 찾아진 3차원 위치 정보가 출력된다. 여러 번의 실험을 해 본 결과 거리 오차는 약 2m 떨어져 있는 물체에 대해서 평균 5cm 정도로 나왔다. 이 정도의 오차는 로봇 팔에 달린 카메라가 대상 물체의 위치를 인식하는데 문제가 없는 정도의 오차이다. 물론 이러한 위치 추정 오차는 대응점을 추출할 때의 오차와 카메라 캘리브레이션의 오차가 모두 영향을 끼치는 값이다.

마. 임상실험 결과

제작된 Eye-mouse를 이용하여 두 단계의 실험을 하였다. 하나는 시선 방향 검출의 정밀도 실험인데 모니터상의 특정한 점을 응시하게 하여 Eye-mouse로 추출된 값과 비교를 하였다. 이것은 사용자가 바라보는 응시점을 Eye-mouse가 정확하게 계산하는지 알아보는 것이다. 둘째는 앞에서 설명한 인터페이스 프로그램을 Eye-mouse를 이용하여 구동시켜 본 후 인터페이스 프로그램의 구동에 있어서 사용자 편리성을 설문을 통해 정성적으로 파악하였다. 그리고 제작된 Eye-mouse는 장애인이 장시간 착용하여 사용해야 하는 인터페이스 도구이므로 착용감과 디자인이 사용자에게 있어서 매우 중요하다. 따라서 이에 대한 설문조사도 수행하였다.

우선 시선 방향 추출의 정밀도 실험 결과는 표 3.3.3.6과 같다. 이 결과는 모니터와 환자의 거리가 500mm일 때 이다. 표 3.3.3.6의 1,2번째 행에서 괄호 안의 수들은 각각 가로와

세로에 대한 오차 결과를 보여 주고 있다. 각각의 사용자에게 대한 오차 결과를 이용하여 바람직한 인터페이스 프로그램 상의 버튼의 크기를 결정한 것이 표 3.3.3.6의 3번째 행이며 15인치 모니터를 대상으로 할 때의 구분 가능한 resolution을 구한 것이 4번째 행이다. 실험실 환경에서 개발자에 의해 실험을 수행할 경우인 14×12에 비해 정밀도가 떨어짐을 알 수 있으며 사용자에게 따라 결과들이 차이가 있음을 알 수 있다 그리고 1, 2, 6번째 실험자의 경우는 정량적인 결과를 얻기가 힘들었는데 그 이유는 다음과 같다.

- 첫 번째는 Eye-mouse를 통한 시선 방향의 검출에 있어서 자기센서의 수신부 좌표계에 대해 눈의 중심 좌표가 필요한데 이것이 대상자마다 다르다. 임상실험 과정에서는 이것을 매번 측정하기가 어려워 고정된 값을 사용하였는데 이것이 오차에 영향을 주었다.
- 두 번째로 시선의 움직임은 세커딕 모션(saccadic motion)을 포함하기 때문에 하나의 점에 시선을 고정하기 위해서는 집중력이 필요하다. 이것이 사용자마다 다르기 때문에 결과에 있어서 차이를 보임을 알 수 있었다.
- 세 번째로 제안된 방법은 영상을 기반한 방법이므로 눈에 비치는 조명의 상태에 따라 동공 검출 과정이 영향을 받게 된다. 임상실험 시 천장의 조명이 눈에 비치어 동공 검출 알고리즘의 오 동작 상황이 가끔씩 관찰되었다.

첫 번째 경우는 이러한 교정과정은 실 사용자들에게는 매우 불편한 과정이어서 개선이 필요함을 알 수 있으며 두 번째 경우는 사용자가 시스템에 숙련되면 어느 정도 개선될 것으로 예상된다. 세 번째의 경우는 주변 조명에 있어서 더욱 강인한 이미지 처리 과정의 개발이 필요함을 알 수 있었다. 추후 과제는 이러한 문제를 해결하는 방향으로 진행될 것이다. 인터페이스 프로그램의 편리성과 Eye-mouse의 착용감, 디자인에 대한 설문 조사 결과는 그림 3.3.3.62와 같다. 인터페이스 프로그램의 구조에 대해서는 대부분 매우 긍정적인 반응을 보였다. 특히 부가적인 'OK'버튼의 사용에 대해서는 매우 편리하다는 의견이었으며 자동 눌림 버튼을 통한 팬/틸트(pan/tilt)의 구동도 매우 쉽게 수행하였다. 디자인과 착용감에 대해서는 무난한 결과를 얻었다. 장시간 이용 시에 불편이 없도록 좀더 가볍고 압박감이 없기를 원하였으며 땀이 차는 문제에 대한 해결을 요구하였다. 그리고 디자인에 관해서는 남의 시선을 끌지 않는 외관을 선호하는 것으로 나타났다. 이러한 착용감과 디자인에 대한 설문 결과를 기반으로 추후에 새로운 형태의 Eye-mouse를 제작할 것이다.

표 3.3.3.6 Eye-mouse의 정밀도 실험 결과

Subject	1	2	3	4	5	6
Error mean(pixel)			(-36.1, -6.7)	(6.3, -7.1)	(1.3, 20.0)	
Error std(pixel)			(50.4, 45.1)	(98.4, 88.4)	(32.6, 15.4)	
Possible Button size(mm)			51.5 X 31.1	62.3 X 57.2	20.2 X 21.2	
Possible Monitor Resolution("15)			6 X 7	5 X 4	15 X 11	

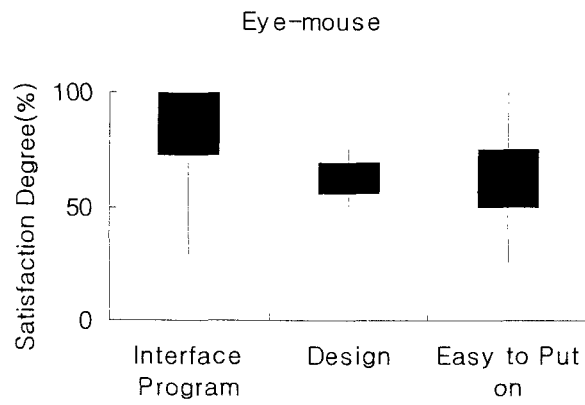


그림 3.2.3.62 On filed validation about Eye-mouse

4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발

가. 로봇 인터페이스의 개발

(1) 어깨 움직임 측정용 센서 2차 보완

어깨 움직임 측정용 센서는 스트링 센서는 스트레인게이지를 이용하는 타입과 원형 스프링을 이용하는 타입을 연구 진행하였다. 이 연구에서 스트레인 게이지를 이용하는 타입의 스트링 센서는 센서 box안에 얇은 판이 부착되어 있고 판끝에는 Elastic Cord가 연결되어 있다. 이 Elastic Cord는 어깨에 연결되어 있어서 이것이 늘어나면서 생기는 장력이 얇은 판에 전달되면 얇은 판은 매우 조금 휘어지게 된다. 이때 휘어진 정도를 스트레인 게이지로 측정하면 Elastic Cord가 늘어난 양을 측정 할 수 있다.

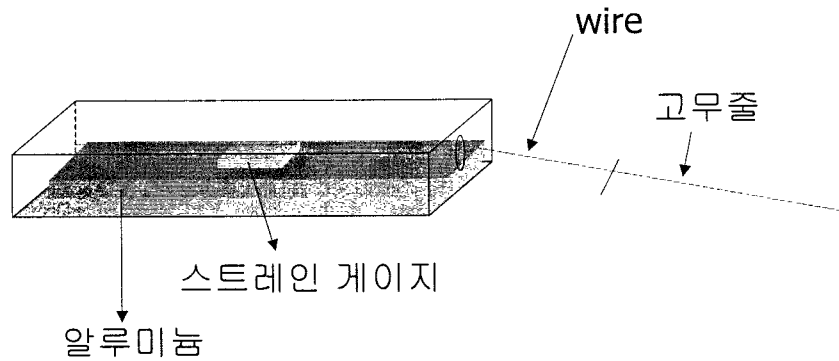


그림 3.3.4.1 길이 측정이 가능한 스트링 센서의 개념 설계

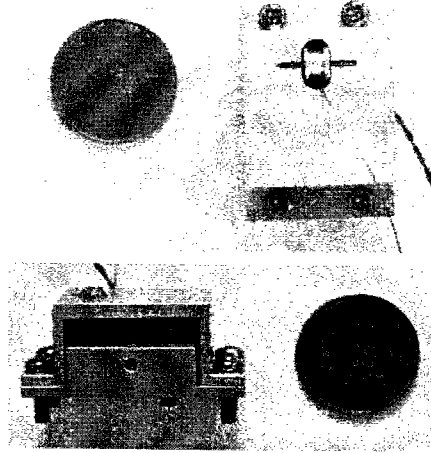


그림 3.3.4.2 길이 측정이 가능한 스트링 센서

스프링을 이용하는 타입의 스트링센서는 Elastic Cord를 이용하는 대신에 원형 스프링을 이용하여 Wire가 당기는 길이의 원운동을 변환하고, 변환된 원운동을 포텐서미터나 엔코더로 측정하여 길이 방향 측정이 가능하도록 설계되어 있다.

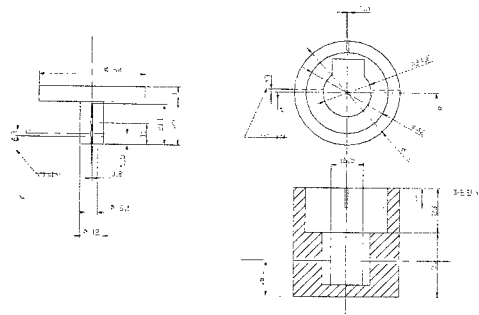


그림 3.3.4.3 회전 스프링을 이용한 스트링 센서 설계

이 두가지 type의 센서중에 스트레인 게이지를 이용한 스트링 센서가 더 작게 제작이 가능하여서 스트레인 게이지를 이용하는 타입의 스트링 센서를 채택하여 실험하였다.

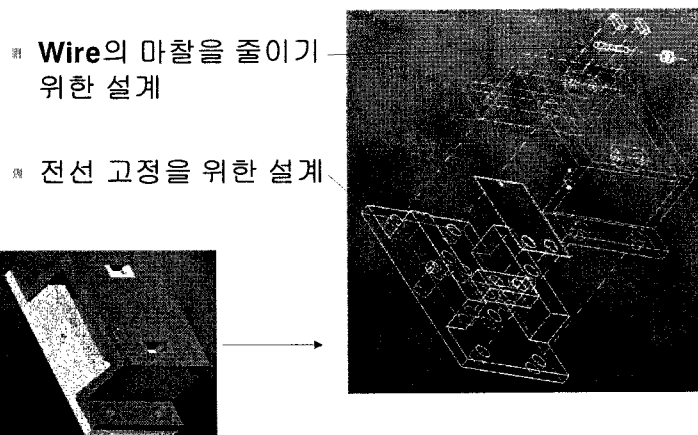


그림 3.3.4.4 스트링 센서 설계도

이렇게 해서 제작된 스트링 센서를 이용하여 실험을 하였을 때 0.8V/cm의 Sensitivity를 가지고 노이즈 제거 회로가 없을 때 0.1V의 노이즈를 갖고, 0.68W의 전력을 소모하는 것을 알 수 있었다. 아래 그림은 1개의 센서를 이용한 실험의 결과를 나타낸 것이다.

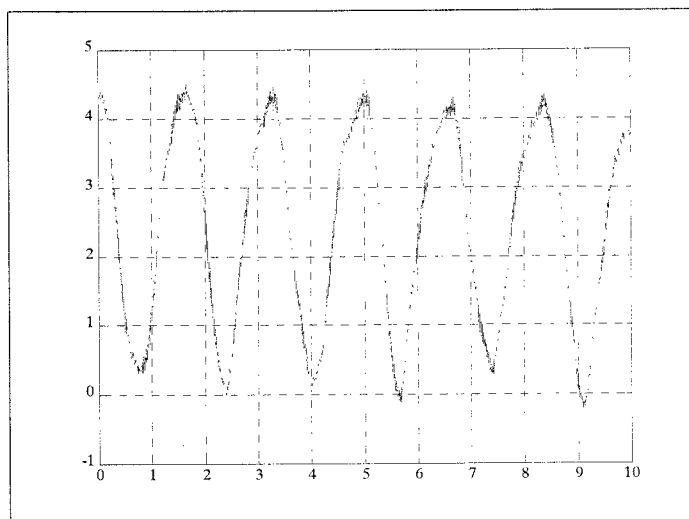


그림 3.3.4.5 스트링 센서의 1자유도 실험 결과

(2) 의복 형태 조종기의 2차 시작품 제작

제작된 스트링 센서를 이용해서 어깨 고정 보호대를 이용하여 만든 의복에 부착하였다.

이 스트링 센서는 어깨로부터 앞쪽 허리띠와 뒤쪽허리띠로 이어지는 두곳에 부착되며 이를 이용하여 어깨의 2자유도 움직임을 측정할 수 있다. 센서값과 어깨의 위치 명령이 1:1 대응이 되면서 좋은 복원성을 갖게 하기 위해서는 움직임 측정용 센서를 허리띠에 부착하는 위치가 몸의 중앙에 가까울수록 좋다.

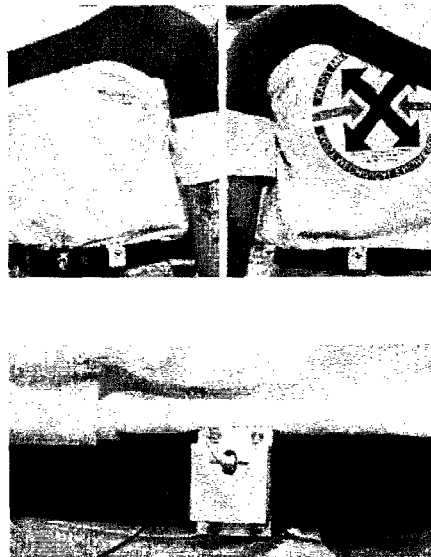


그림 3.3.4.6 의복 형태 조종기 2차 시작품의 센서 부착 위치

(3) 제작된 의복형태의 조종기를 이용한 Mobile robot 조종 실험

제작된 의복형태의 조종기를 이용하여 2개의 바퀴를 갖는 휠체어에 대응하는 Mobile robot을 조종하는 실험을 하였다. 이때 어깨를 위로 움직이면 로봇은 앞으로, 어깨를 아래로 움직이면 로봇은 뒤로, 어깨를 뒤로 움직이면 로봇은 반 시계방향으로, 어깨를 앞으로 움직이면 로봇은 시계방향으로 움직이도록 하였다.

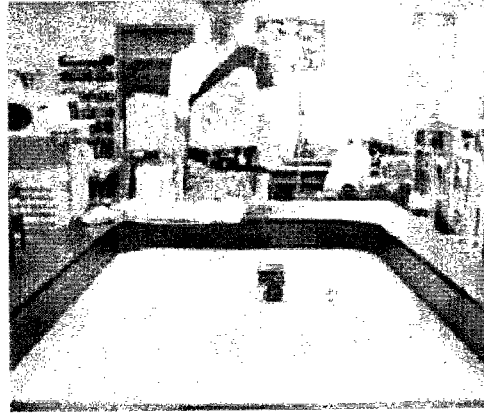


그림 3.3.47 어깨 조종기를 이용한 mobile 로봇 움직임 제어

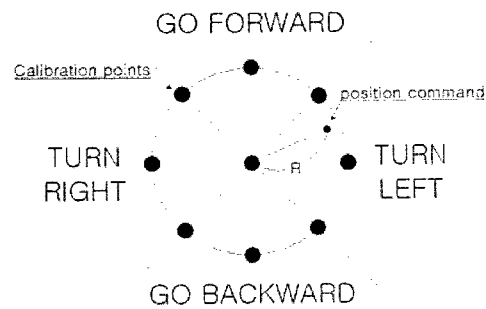


그림 3.3.48 Mobile Robot 조종 실험을 위한 조종 방법

Mobile robot 근처에 놓여 있는 볼을 움직이며 원하는 곳으로 움직임이 가능하게 하였고 여기서 Calibration 및 사상함수의 개선의 필요성이 부각되었다.

(4) 조종 가능한 자유도 증가 방법 연구

어깨의 움직임은 2자유도로 한정되기 때문에 6자유도 로봇 팔등 다자유도 로봇을 제어 하기 위해서는 움직임을 조합하여 조종해야 한다. 실제로 마우스의 움직임을 버튼을 이용하여 6자유도 로봇팔을 스크린상에서 조종이 가능하므로 가능성이 있음을 알 수 있다. 먼저 작업의 종류에 따라 툴의 방향을 설정한 후 세 개의 평면을 순서대로 설정하여 2자유도 움직임으로써 3차원 상의 좌표를 설정할 수 있다.

(5) Calibration 및 사상 함수 알고리즘 보완

보다 정확한 Calibration과 실제와 가까운 센서값으로부터 어깨의 위치 명령을 산출해 내는 사상함수를 위해 Calibration 방법을 근본적으로 변경하였다. 인간이 매번 일정하게

낼 수 있는 어깨 움직임 중 가장 반복성이 좋은 원운동을 이용함으로써 좋은 Calibration 방법을 제안하였다.

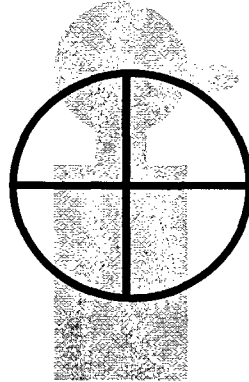


그림 3.3.4.9 새로이
채택된 Calibration
Points

이렇게 제안된 Calibration 방법은 계산 부하를 줄이고 센서값을 위치 명령으로 좀 더 정확하게 사상할 수 있게 해준다. 기존의 Cartesian Coordinates에서 나타나는 Calibration 정보와 Polar Coordinates를 이용하여 나타낸 Calibration 정보는 아래 그림과 같다.

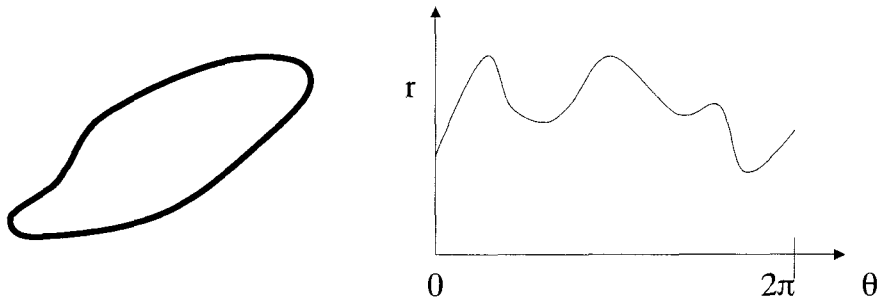


그림 3.3.4.10 Polar Coordinates에서 나타낸 Calibration 결과

아래 그림에서 알 수 있듯이 Calibration 시에 얻은 원의 경계를 1로 하였을 때 제어시 얻은 원점에서의 거리와 원의 경계의 비율로부터 r 값을 얻어낼 수 있게 된다.

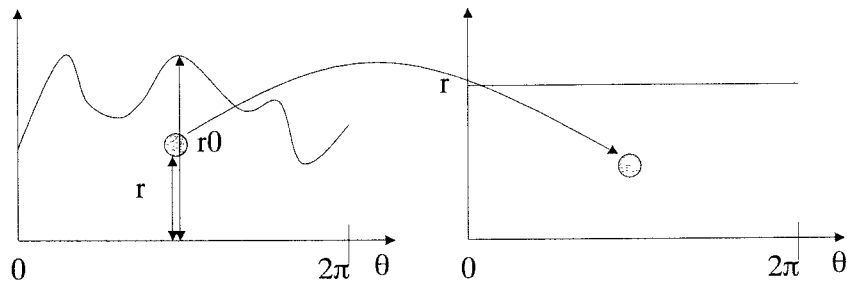


그림 3.3.4.11 Polar Coordinates로부터의 사상 방법

이렇게 했을 때 반지름 뿐만 아니라 각도의 Distortion도 같이 발생하게 된다.(그림 3.3.4.12)

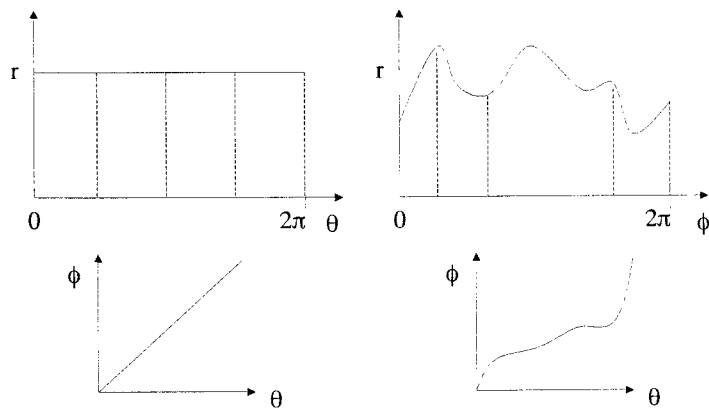


그림 3.3.4.12 각도 영역에서의 왜곡 현상

이를 보상하기 위하여 상하, 좌우 운동을 통하여 얻은 0도 90도 180도 270의 네 점으로부터 다음의 5차식의 각도 사상함수를 구 할 수 있다.

$$a\phi^5 + b\phi^4 + c\phi^3 + d\phi^2 + e\phi + f = 0 \quad (\text{식 3.3.4.1})$$

이 때 5차식이 되는 이유는 0도일 때와 360도일 때 1차 미분이 같도록 하는 조건을 추가하기 위해서임 1차 미분이 같으면 좀 더 부드러운 위치 명령을 줄 수 있게 된다.

$$\begin{pmatrix} \phi_1^5 & \phi_1^4 & \phi_1^3 & \phi_1^2 & \phi_1^1 & 1 \\ \phi_2^5 & \phi_2^4 & \phi_2^3 & \phi_2^2 & \phi_2^1 & 1 \\ \phi_3^5 & \phi_3^4 & \phi_3^3 & \phi_3^2 & \phi_3^1 & 1 \\ \phi_4^5 & \phi_4^4 & \phi_4^3 & \phi_4^2 & \phi_4^1 & 1 \\ \phi_5^5 & \phi_5^4 & \phi_5^3 & \phi_5^2 & \phi_5^1 & 1 \\ 5(\phi_1^4 - \phi_5^4) & 4(\phi_1^3 - \phi_5^3) & 3(\phi_1^2 - \phi_5^2) & (\phi_1 - \phi_5) & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ 0 \end{pmatrix}$$

(식 3.3.4.2)

이렇게 Calibration을 하기 위해 어깨로 원운동을 할 때 인간은 시작점과 끝점을 정확히 일치시킬 수 없게 되는 현상(그림3.3.4.13) 이 생기게 되는데, 이를 없애기 위해서 Scaling Function을 이용하여 시작점과 끝점을 일치시켜주게 되면 시작점과 끝점을 정확하게 일치시킬 수 있게 된다. (그림3.3.4.14, 그림3.3.4.15]

$$f_s = 1 + \frac{R_1 - R_2}{R_2} \frac{\theta}{2\pi} \quad (\text{식 3.3.4.3})$$

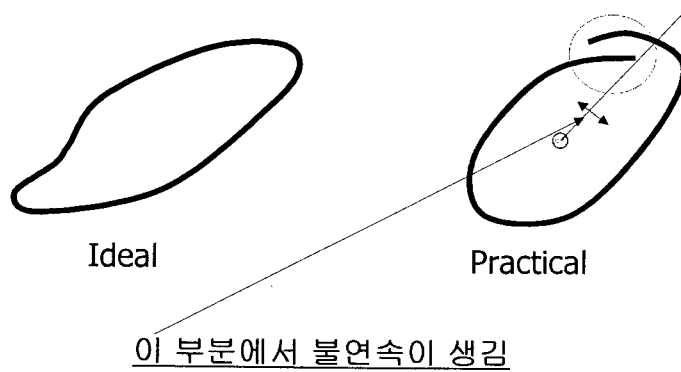


그림 3.3.4.13 Calibration시에 생기는 시작점과 끝점의 불연속 현상

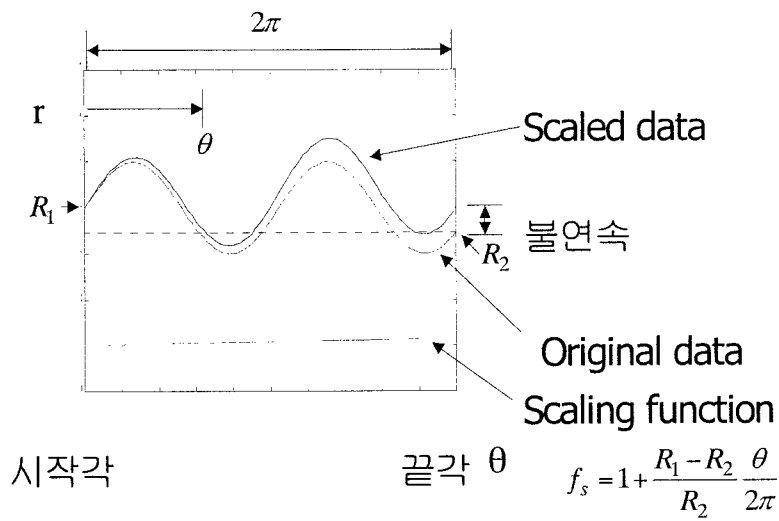


그림 3.3.4.14 불연속 현상을 극복하기 위한 Scaling Function의 적용 (Cartesian Coordinates Representation)

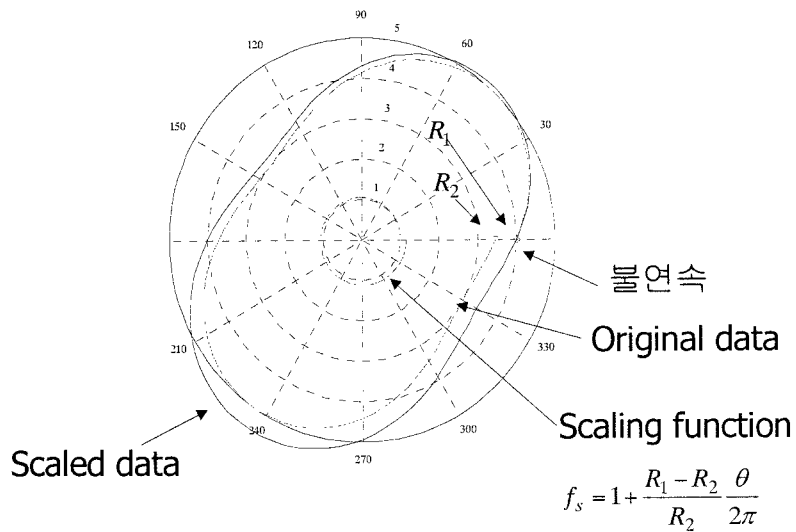


그림 3.3.4.15 불연속 현상을 극복하기 위한 Scaling Function의 적용 (Polar Coordinates Representation)

(6) 2차 시제품 완성 및 다른 장치와의 통합

2차 시제품과 다른 시스템과의 통신을 위하여 직렬 통신이 가능하고 독립적으로 구동 가능한 제어기를 설계하였다. 이 제어기는 PIC16F873 마이크로 콘트롤러를 이용하여 독립 CPU를 갖는 센서 제어 보드로 구성하였다.

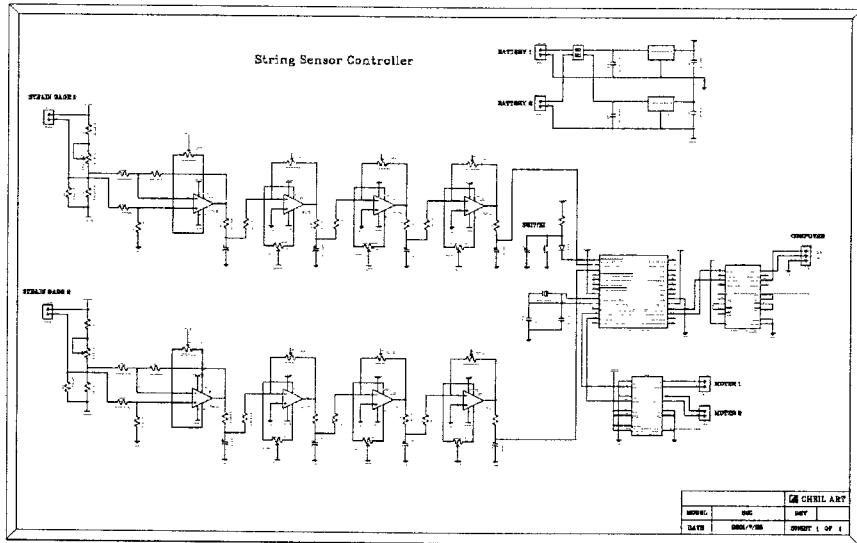


그림 3.3.4.16 의복형태 조종기 제어기의 설계

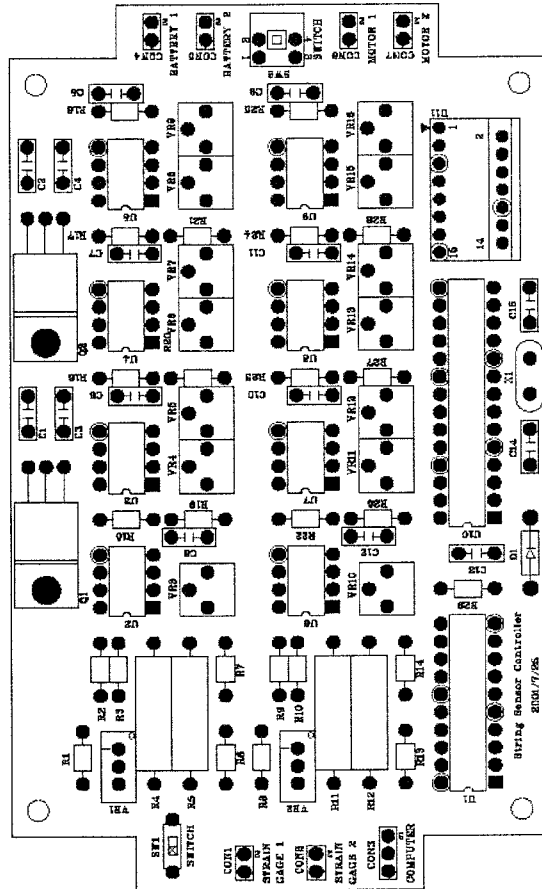


그림 3.3.4.17 의복형태 조종기 제어기의 PCB 도면

센서 제어 보드는 직렬 통신으로 휠체어에 있는 제어기와 통신을 하고, 의복 형태 조종기의 Vibrotactile Actuator 2개를 구동할 수 있는 Motor Driver가 포함되어있다. Motor Driver는 LM298 칩을 이용하여 PWM 신호로 모터에 흐르는 전류를 제어하는 형태로 되어 있고 haptic suit에 사용하는 2개의 스트링 센서에서 나오는 신호를 300배 증폭한 후 영점 조절을 할 수 있도록 하였고 300배 증폭한 신호에서 나오는 노이즈를 처리 할 수 있게 하여 PCB로 제작하였다.

(7) 의복 형태 조종기의 개선

(가) 어깨의 운동 영역

자기위치센서(Flock of Bird)를 이용하여 어깨의 움직임 영역을 측정하여 보았다. 우선 어깨 움직임을 측정하기 위해 하나의 기준 점을 정해 전역 좌표계를 만들어야 되므로 가

슴을 원점으로 삼도록 하였고 어깨 끝에 수신부를 부착하여 상하앞뒤의 최대 운동가능영역을 측정하였다.

[그림 3.3.4.18]에서 점 1은 초기 중립상태 이고 2는 최대로 올렸을 때, 3은 최대로 내렸을 때, 4는 전방으로, 5는 후방으로 어깨를 제쳤을 때이다. 그 후 어깨를 한번 크게 회전을 했는데 사실 이 값은 어깨 자체만의 움직임일 수 있는 한계가 아니라 몸 전체가 움직였기 때문에 실질적인 한계 값보다 더욱 광범위하게 나올 수 있었다.

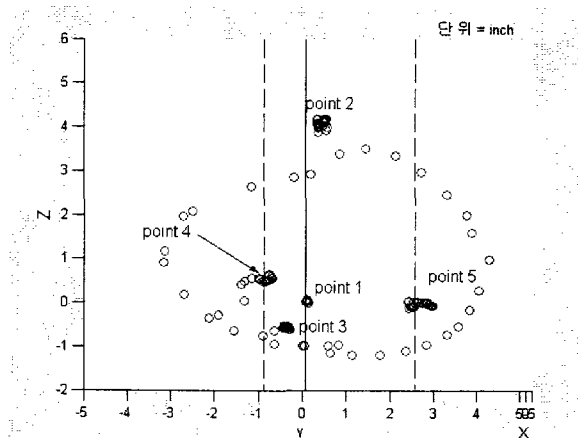


그림 3.3.4.18 옆에서 본 어깨의 움직임 영역

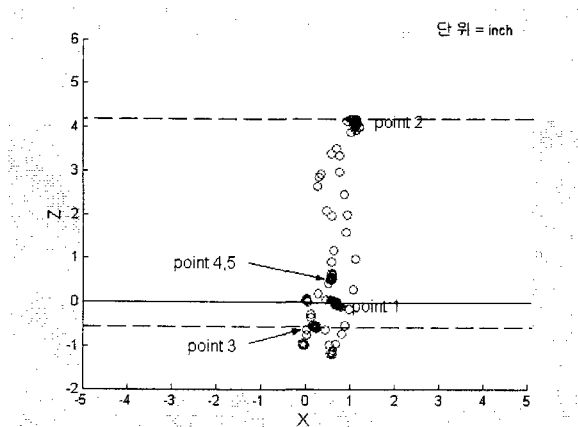


그림 3.3.4.19 정면에서 본 어깨의 움직임 영역

위의 결과를 보면 어깨를 위쪽으로 움직일 수 있는 한계는 4.2인치(10.7cm)이고 아래쪽으로는 0.6인치(1.52cm)였다. 그리고 앞쪽으로는 0.8인치(2.03cm), 뒤쪽으로는 2.5인치(6.35cm)라는 데이터를 얻을 수 있었다. 정량적 결과는 다음과 같이 도출하였으나 전후의 움직임을 있어선 상대적으로 많은 힘이 들었을 뿐만 아니라 주변 다른 근육의 운동역시

때 필요로 하였다. 또한 아무리 C4~5 경수장애인이 어깨를 움직일 수 있다고 하여도 정상인의 자유스런 움직임보단 훨씬 못할 것이므로 정상인의 50%의 운동영역을 가진다고 가정하면 가장 쉽게 얻을 수 있는 신호는 위쪽방향 뿐이다. 결국 어깨 입력장치는 어깨의 상방향 움직임을 측정하여 휠체어를 구동시키는 것이 가장 합당하다는 결론을 내릴 수 있다.

(나) FSR (Force Sensing Resistor) 센서

최초의 FSR은 초기에 음악 연주자들이 건반을 부드럽게 혹은 강하게 누를 때 전기적 반응에 의해 그 음을 발생시키는 전자 피아노를 개발하기 위해 개발되었으며, 현재에는 그 기술이 발달하여 전기적, 기계적 장치의 누르는 힘을 조절하기 위해 민감도가 어느 정도 최적화되었다.

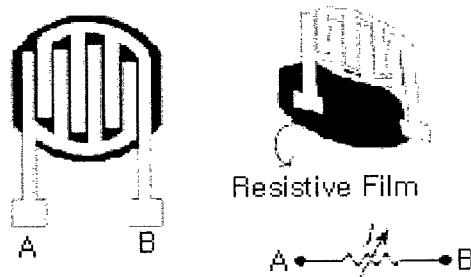


그림 3.3.4.20 FSR 센서의 외형

FSR (Force Sensing Resistor)의 정의는 [그림 3.3.4.20]에서처럼 센서 표면에 힘을 증가시킬 때 감소하는 저항이 발생하는 중합체의 필름(Polymer Film) Transducer라고 할 수 있다. 피에조 필름(Piezo Film)과 비교해 보면 FSR이 진동과 열에 훨씬 더 영향이 적을 뿐만 아니라 가격면에서도 가장 저렴한 센서이다. 다만 strain-gauge등이 힘의 정밀한 측정의 용도에 사용되는 것과 다르게 FSR은 그 측정의 정밀도가 다소 낮은 것이 특징이다.

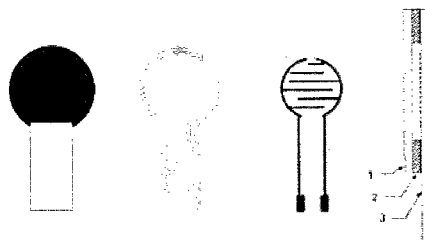


그림 3.3.4.21 FSR 센서의 구성

FSR(Force Sensing Resistor)는 [그림 3.3.4.21]에서와 같이 3개 층의 Polymer Thick Film (PTF)으로 구성되어 있으며, 상층부에는 반도체성분이 PTF 표면에 인쇄되어 있고, 중간층은 하층부와 상층부 사이에 미세한 공간을 확보하기 위한 Spacer 이다. 그리고 하층부에는 그림의 active area에서 보여주는 형태로 두 개의 전극이 인쇄 되어있으며, 이 두 개의전극은 서로 분리되어 있으므로 두 전극의 저항은 무한대 값을 가진다. Active area에 힘이 가해지면 상층부의 면이 flexible 하므로 눌러지는 힘에 따라 하층부와 접촉이 발생하는 면적이 변화하며, 하층부의 active area에서 서로 전기적으로 연결되는 면적이 변화한다. 힘이 크게 가해질수록 접촉면적은 넓어지고, 두 전극 사이의 전기적 저항 값은 감소한다. 이상과 같이 가해진 힘과 저항 값 사이의 관계가 [그림 3.3.4.22]에 나타나 있다.

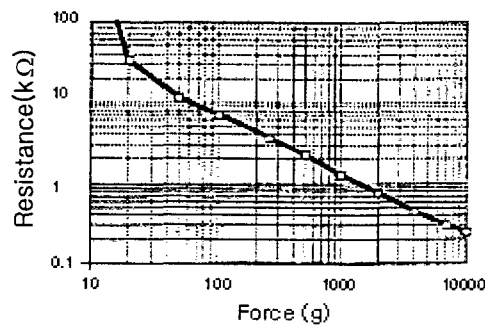


그림 3.3.4.22 FSR 센서의 힘의 변화에 따른 저항 값 변화 그래프

위의 특성 그래프를 토대로 데이터를 얻어 힘과 저항간의 상관관계 함수를 도출하고자 하였다.

표 3.3.4.1 FSR센서의 힘-저항간의 상관관계

Force(g)	Resistance	Force(g)	Resistance
20g	32	1000g	1.4
50g	12	2000g	0.75
100g	6.5	4000g	0.45
260g	3.6	7000g	0.3
500g	2.2	10000g	0.26

Origin을 사용하여 curve-fitting을 한 결과

$$R(\Omega) = \frac{k}{F(N)^{0.8}} \quad (\text{식 3.3.4.4})$$

의 관계를 얻을 수 있었다. (K는 coefficient of FSR)

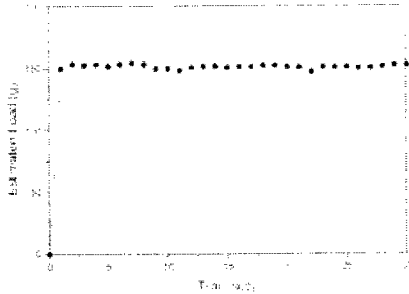


그림 3.3.4.23 FSR센서에서 시간에 따른 저항 값 변화그래프

[그림 3.3.4.23]는 시간 응답 특성을 확인하기 위해 당사에서 사용하는 FSR에 대해 150g의 하중을 가하여30초 동안 측정된 결과를 보여주고 있다. 시간에 따라 안정된 응답특성을 가지며, 약 2%이하의 오차를 갖는 정밀한 측정임을 알 수 있다.

(다) 기구부 디자인

(가)에서 어깨의 움직임 영역을 분석해 본 바대로 위쪽으로는 10.7cm, 아래쪽으로는 1.52cm정도였으나 장애인은 정상인 보다 훨씬 50%정도 감소한다면 결국 아래쪽은 포기하고 위쪽으로 약 5cm의 변화량을 측정할 수 있도록 하여야 한다. 고정부를 허리에 두고 어깨에 멜빵을 대어서 아래쪽은 고정부에 연결한 뒤 그에 대해 어깨가 움직일 때 늘어나는 고무에 비례하는 힘의 변화를 측정할 수 있는 장치를 만들었다. 최초 장치는 어깨 보호대와 같은 하나의 의복형태를 입혔었으나 짝 쪼이는 옷을 입어야 된다는 불편함과 더불어 탈/부착이 힘들다는 단점이 있었다. 따라서 두 번째 형태로 멜빵으로 대체를 하게 되었고 선행연구에서 불편했던 점을 다소나마 해결할 수 있었다. 기구부의 형태는 다음 그림과 같다.

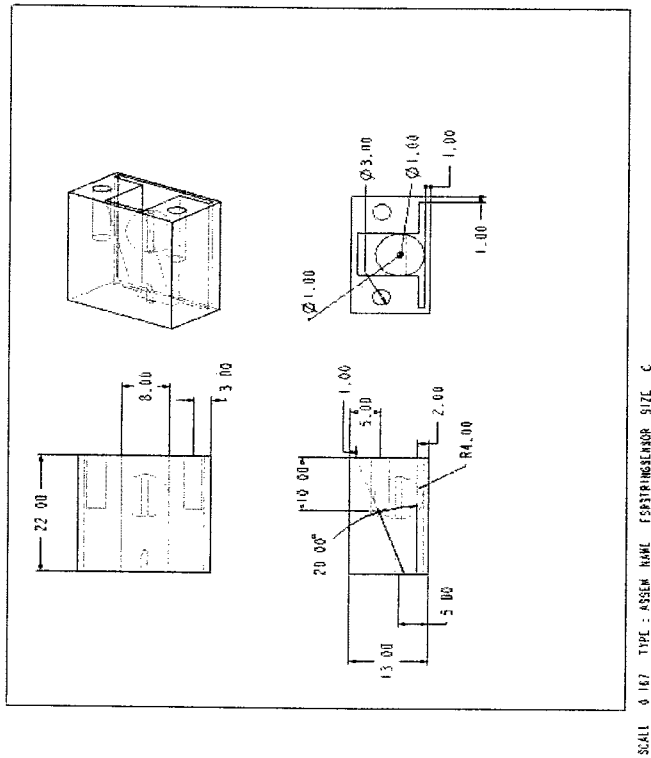


그림 3.3.4.24 어깨입력장치의 기구부 설계

위 [그림 3.3.4.24]을 보면 내부를 20°기울여서 경사를 낸 뒤 그 속에 작은 구슬이 들어 가는데 반대편으로 흘러내리지 않도록 매듭을 지어서 꿰고 다른 반대편 구멍을 통해 어깨 에 닿는 고무줄에 연결이 되도록 하였다. 경사면 맞은편 평평한 면에 FSR센서를 부착 완 성을 하였다. 이를 위에서 끈으로 잡아당기면 구슬과 접촉되는 두 면에 힘이 분산이 되고 그 중 수직인 면에 부착되어 있는 FSR센서의 저항 값이 달라지게 되는 원리를 이용한 것 이다.

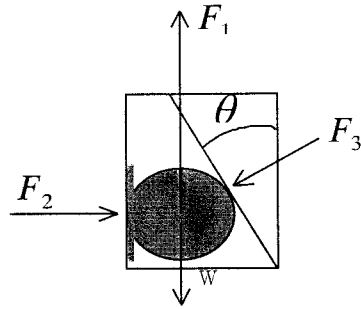


그림 3.3.4.25 어깨센서 입력장치의 힘-평형 상태도

위의 그림에서 F_1 은 위에서 실제로 어깨의 움직임에 따라 당겨지는 힘을 나타내고 F_2 는 FSR센서에 작용하는 수평 반력이며, F_3 은 경사면에 전달되는 힘을 나타낸다. W 는 구슬의 무게를 나타내는데 여기에서 아주 가벼운 플라스틱 구슬을 사용하였으므로 당겨지는 힘 F_1 에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있다고 가정할 수 있고 경사각 θ 는 20° 이다. 따라서 관계식은 $F_3 \times \sin 20 = F_1$ 이고 $F_3 \times \cos 20 = F_2$ 이므로

$$F_2(N) = \cot 20 \times F_1(N) \quad (\text{식 3.3.4.5}) \text{ 이 된다.}$$

FSR센서의 동작영역의 최소무게가 20g이므로 최소 당기는 힘 $F_1 = \frac{20}{2.747} = 7.28g$ 이면 가능하므로 초기의 고무줄 장력을 고려하면 아무런 문제없이 사용할 수 있다.

(라) 휠체어 제어방법

멜빵을 이용하게 되면 장애인이 탈 부착하기가 용이하고 또한 외관상으로도 겉옷 안에 착용 할 수도 있기 때문에 이질감을 느끼지 않는다는 큰 장점이 있다. 다음 그림은 실제 착용을 한 형태이다.

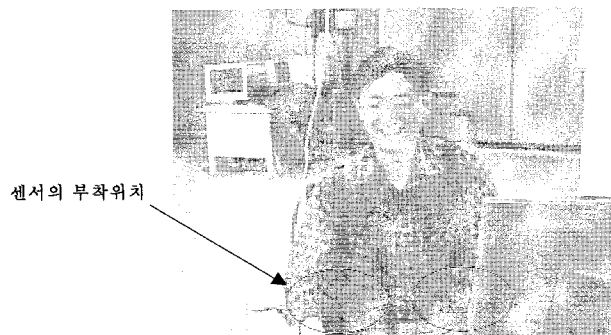


그림 3.3.4.26 어깨 움직임 측정 장치의 착용형태

양쪽 어깨의 움직임을 측정할 수 있도록 두개의 장치가 벨트에 부착된다. 이때 어깨의 최대 움직임이 초기 중립상태에서 앞에서 측정한대로 10cm이므로 고무벨트의 신축성이 약 10g/cm정도를 사용하게 되면 초기위치에서의 늘어난 길이가 5센티미터라고 가정하면 최소 50g에서 최대150g까지 변화하게 되고 이때 FSR센서에 전달되는 힘은 (식 3.3.4.5) 에서 본 바와 같이 $F_2(g) = 2.747 \times F_1(g) = 2.747 \times 50(g) = 137.4(g)$ 까지의 힘을 측정하면 된다.

장애인에 따라 어깨의 운동영역이 달라지고 또한 착용 시마다 절대적인 힘이 센서에 가해질 수가 없으므로 휠체어 구동 전에 항상 교정작업(calibration)을 거치도록 하였다. 방법은 휠체어 구동 전 교정모드로 들어가기 위해 추가된 외부스위치를 누르게 되면 양쪽어깨를 움직여서 움직인 영역의 최대값과 최소값을 얻어낸다. 그 후 최대값과 최소값의 영역을 5구간으로 나뉘어서 최초 첫 번째는 중립영역으로 그리고 다음 두 번째는 이력구간으로 두고 그 상위 구간에서야 비로소 교시신호가 발생하도록 하였다. 아래 [그림 3.3.4.27]처럼 이력구간을 둬으로써 jittering 현상을 방지할 수 있어 안정된 신호를 얻을 수가 있다.

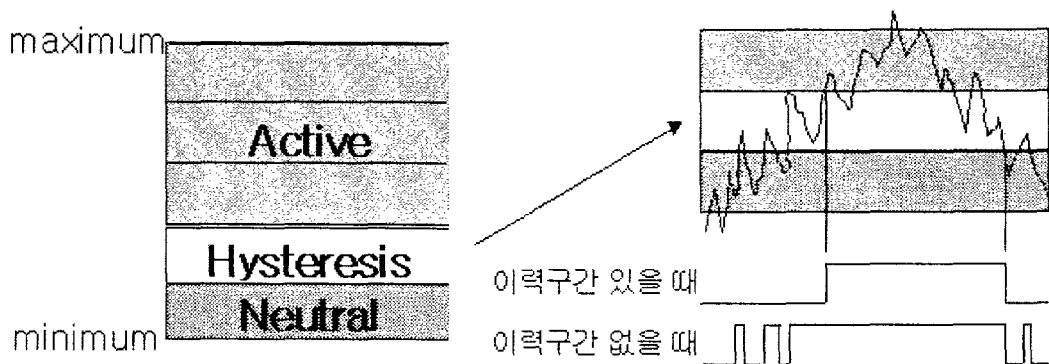


그림 3.3.4.27 어깨 움직임 영역에 대한 교정방법

<소스코드>	
left_max=right_max=0;	//변수설정
left_min=right_min=0x3ff;	//A/D 는 최대10bit 따라서 최고값이 0x3ff
if(left_max<left_fsr) left_max=left_fsr;	//최고-최저의 영역을 구하는 부분
if(left_min>left_fsr) left_min=left_fsr;	
if(right_max<right_fsr) right_max=right_fsr;	
if(right_min>right_fsr) right_min=right_fsr;	
left_upper=left_min+(left_max-left_min)*2/5;	// 5개로 나눠 가운데를 중립으로 함
left_lower=left_min+(left_max-left_min)*1/5;	
right_upper=right_min+(right_max-right_min)*2/5;	
right_lower=right_min+(right_max-right_min)*1/5;	
if(left_upper<left_fsr) left=1;	// 1은 전진 , 0은 정지
if(left_lower>left_fsr) left=0;	
if(right_upper<right_fsr) right=1;	
if(right_lower>right_fsr) right=0;	

휠체어의 동작구성은 다음 [표 3.3.4.2]와 같다.

표 3.3.4.2 어깨움직임에 따른 휠체어 동작 상태

왼쪽어깨	오른쪽어깨	휠체어동작
상	중	왼쪽으로 회전
중	상	오른쪽으로 회전
상	상	직진
상--	상--	후진

본 장치로는 앞서 다양한 휠체어 제어방법 중 장애인의 신체적 부담을 줄이기 위해 직진 시 latch 모드를 적용하였다. 즉 양쪽 어깨를 한번 올리게 되면 그 신호가 latch되어 계속해서 직진을 하게 되고 후진의 경우는 양쪽 어깨를 계속 들고 있을 경우에만 후진이 되도록 하였다. 그리고 회전 역시 회전하고자 하는 방향의 반대쪽 어깨를 들고 있을 경우에만 회전이 진행되도록 하였다.

이 장치의 가장 큰 장점 중 하나는 실용적인 측면에서 접근을 하여 아주 저렴하게 제작할 수 있다는 것이다. 사용된 FSR센서도 일반 스트레인 게이지, 로드셀 그 외 기타 힘 측

정장치에 비해 가장 저렴하고 뿐만 아니라 멜빵역시 기존의 것을 사용할 수도 있으므로 비용이 들지 않는다. 또 다른 장점은 장애인들이 가장 신경 쓰는 것 중 하나가 다른 사람들이 자신들을 다르게 보는 것을 무척이나 싫어한다는 것이다. 따라서 이들은 조금 불편함을 감수하더라도 오히려 남들에게 이상하게 보이지 않는 그런 장치를 사용하고 싶어하는데 그 욕구에 부합하는 장치가 본 연구에서 개발한 장치라 생각이 된다. 외부인이 보았을 때 전혀 거리감을 느끼지 않을 뿐만 아니라 어쩌면 입력 장치인 줄도 모를 수도 있으므로 장애인에게 디자인 면에서 아주 적합할 것이다.

(8) 머리를 이용한 입력장치

(가) 머리의 운동 영역

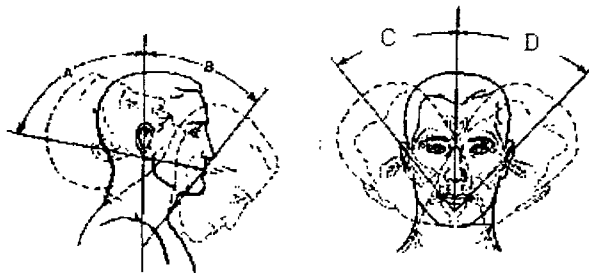


그림 3.3.4.28 목의 움직임 가능 영역-Dorsal(A), Ventral(B), Right(C), Left(D) flexion

참고문헌[14]에 의하면 일반 남성을 대상으로 한 조사에서 머리움직임 영역은 다음과 같다.

표 3.3.4.3 Range of Movement at the Neck Joint

	평균	편차
Ventral flexion	60	12
Dorsal flexion	61	27
Right-left flexion	41	7

위와 같은 선행 데이터를 토대로 하여 실제로 일반인의 머리움직임 영역에 대해서 실험을 수행하여 보았다. 측정은 앞서의 어깨 움직임과 마찬가지로 자기위치센서를 사용하였

다. 아래 그림과 같이 우선 수신부를 가슴에 달아 기준 좌표축의 원점으로 삼은 뒤 다시 그 위치를 이마에 붙여서 하나의 가상 링크를 구성하여 링크의 운동반경에 대한 데이터를 얻고자 하였다.

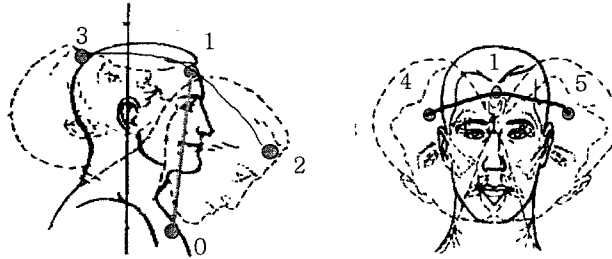


그림 3.3.4.29 머리움직임 측정을 위한 자기 센서의 부착 위치 및 이동 순서

발신부의 지면에 고정된 위치가 원점이므로 우선 새로운 기준점(가슴)에 대해서 좌표이동을 해준 다음 공간상에서 얻은 점을 그려보았다. 반경에 둘러싸인 타원은 마지막으로 머리를 한바퀴 큰 반경을 그리며 회전한 결과이다.

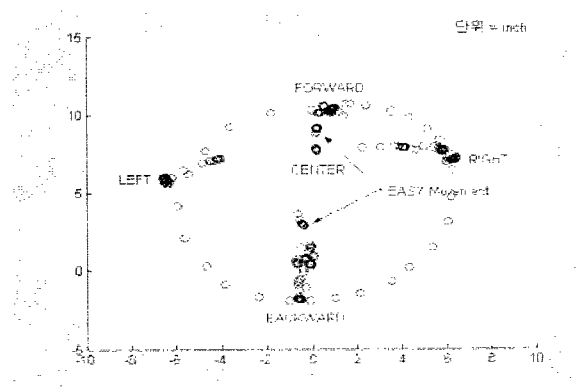


그림 3.3.4.30 위에서 본 머리의 운동영역

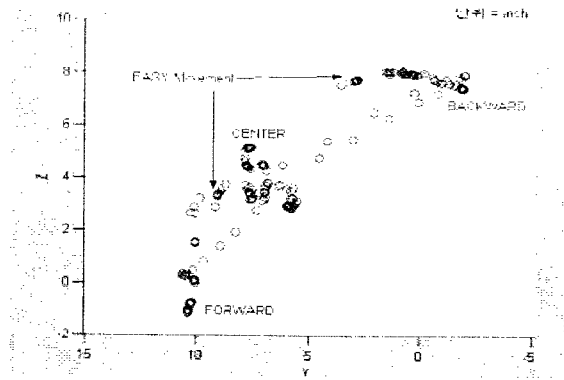


그림 3.3.4.31 옆에서 본 머리의 운동 영역

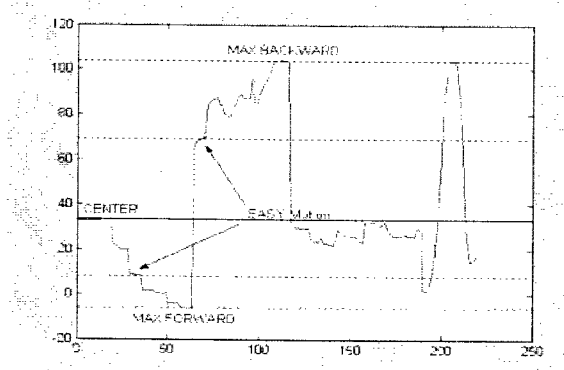


그림 3.3.4.32 머리의 앞뒤 운동(pitch)의 범위 결과 데이터

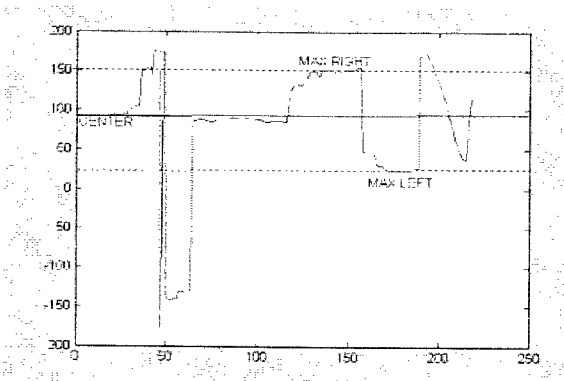


그림 3.3.4.33 머리의 좌우 운동(roll)의 범위 결과 데이터

[그림 3.3.4.32]로 부터 머리가 초기 중립상태를 유지하고 있을때가 기준점으로부터 32°이고 앞으로 최고로 숙였을 때 (ventral)의 값이 -9°, 뒤쪽으로 최대한 제쳤을 때(dorsal)가 105°였다. 따라서 최대한 기울일수 있는 각은 41°이고 최대한 뒤로 기울일 수 있는 각은 73°가 되고 좌우의 roll각은 [그림 3.3.4.33]에서 보면 좌우 동일하게 60°정도의 범위를 가지고 있음을 알 수 있다. 앞서 참고문헌에서 본 바와 같이 사람마다 목 근육의 유연성이 다르기 때문에 편차가 심하게 나타남을 본 실험을 통해서도 알 수 있었다. 장애인들 역시 더욱 심하게 개인별로 운동영역이 다르므로 머리 움직임을 이용한 입력 장치 역시 휠체어 구동 전에 교정과정(calibration)이 필요하다고 결론을 지을 수 있다.

(나) 기구부 디자인

힘에 따라 변화하는 FSR센서를 사용하여 머리의 roll과 pitch 각을 측정하기 위해 다음과 같은 [그림 3.3.4.34] 간단한 장치를 만들었다.

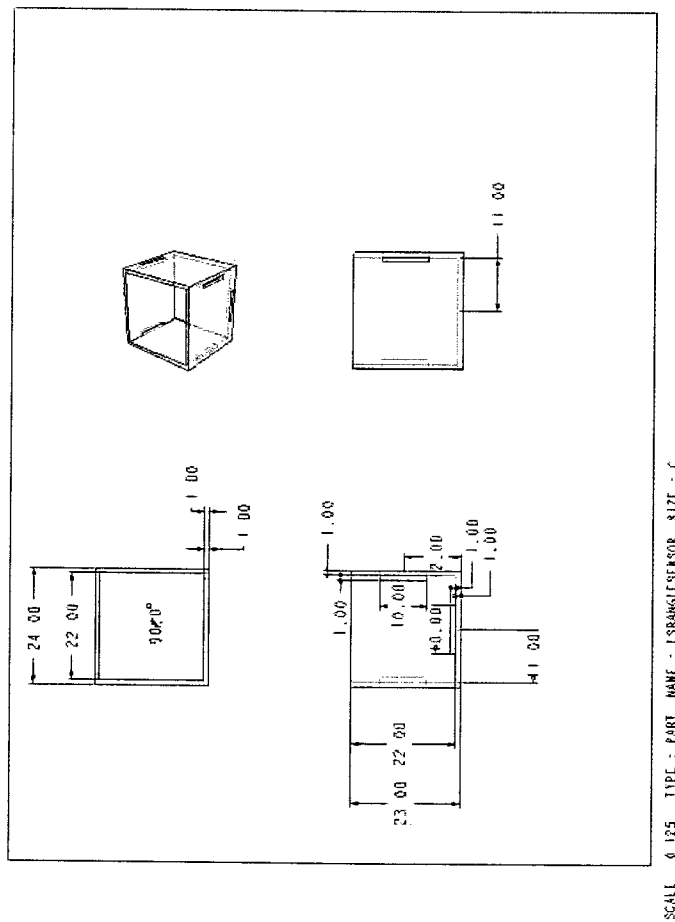


그림 3.3.4.34 머리입력장치의 기구부 디자인 및 도면

위와 같이 아주 간단히 만든 내부가 뚫린 육면체 내부에 각각 FSR 센서를 하나씩 부착한 다음 강구를 집어넣는다. 그러면 중력방향에 대해서 기울게 위 장치가 기울게 될 때 다음 [그림 3.3.4.35] 과 같은 상태가 되고

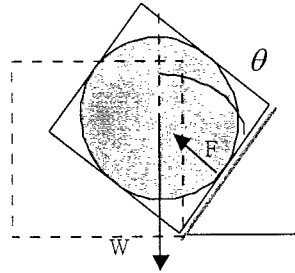


그림 3.3.4.35
머리입력장치의 힘
평형의 상태도

이때 FSR 센서에 미치는 구의 힘은

$$F = W \times \cos(90 - \theta) \quad (\text{식 3.3.4.6})$$

센서 저항 값의 변화를 간단하게 [그림 3.3.4.36]의 voltage divider를 사용하여 다음 (식 3.3.4.7) 에서처럼 전압의 변화로 바꾸어 준다.

$$V = \frac{R_m \times V_{cc}}{R_m + R} \quad (\text{식 3.3.4.7})$$

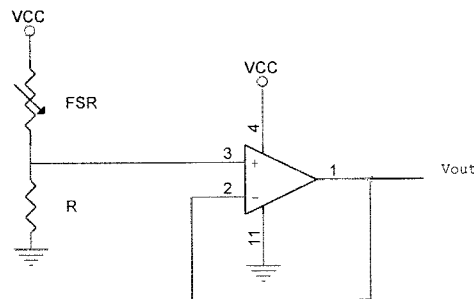


그림 3.3.4.36 머리입력장치에서의
저항변화를 전압으로 바꾸기 위한 전압
분배기

결국 머리의 각도변화에 따른 전압의 변화는

$$V = \frac{R_m}{R_m + \frac{k}{(W \times \cos \theta)^{0.8}}} \times V_{cc} \quad (\text{식 3.3.4.8})$$

과 같고 각도에 따른 전압변화의 민감도(sensitivity)는

$$S = \frac{\partial V}{\partial \theta} = 0.7 \times k \times \frac{R_m V_{cc} W \sin \theta}{\left(R_m + \frac{k}{(W \cos \theta)^{0.8}}\right)^2 \times (W \cos \theta)^{1.8}} \quad (\text{식 3.3.4.9})$$

와 같이 된다.

여기에서 사용한 구슬의 무게 $W = 0.070 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 0.686 \text{ N}$, $V_{cc} = 5 \text{ V}$, $R_m = 10000 \Omega$ 일 때 위의 두 식을 이용하여 다음과 같은 <각도-전압> 관계 및 <각도-전압의 민감도> 관계의 그래프를 그렸다

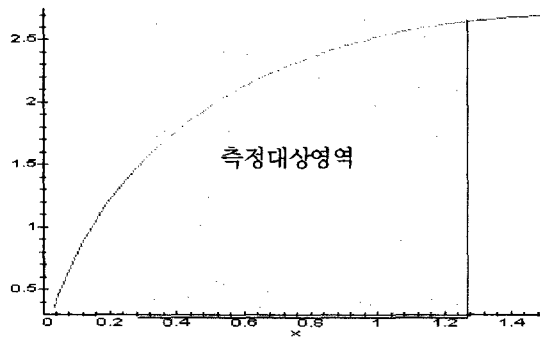


그림 3.3.4.37 각도(rad)-전압(v) 관계 그래프

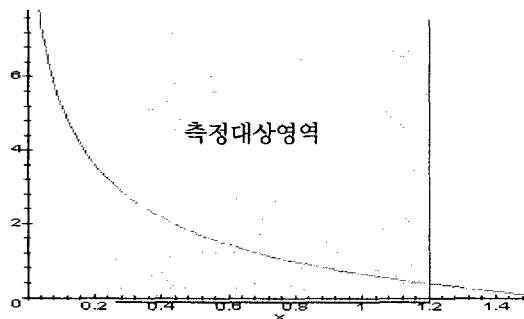


그림 3.3.4.38 각도(rad)-전압민감도(s) 관계 그래프

초기 상태에서 FSR에 가해지는 힘이 0이고 이 때의 각도는 0° 이다. FSR 센서의 특성 데이터를 보면([그림 3.3.4.37]) 현재 구입한 FSR센서의 최소 한계측정 무게가 20g이므로

벽면에 20g이 가해지기 위해선 중력방향에 대해 최소 $\blacksquare 90^\circ - \cos^{-1}(20/70) = 16.6^\circ$ 즉 0.29 rad 이하로 기울어 져야 신호가 변할 수 있다. 앞선 실험에서 목을 최고로 기울였을 때의 각이 정면에 대해서 73° 이었으므로 측정범위는 $16.6^\circ(0.29 \text{ rad})$ 에서 $73.4^\circ(=1.28\text{rad})$ 으로 이때의 전압 변화는 1.5V 에서 2.6V 사이의 영역이다. 또한 이 영역에서의 감도가 초기 동작영역(0.29rad)에서 우수하고 서서히 기울기가 증가하면서 비록 감도가 감소하지만 10비트 A/D컨버팅의 해상도로 구별함에 있어 충분한 변화량이다.

중력방향에 대한 각을 기울이면서 실험을 수행해 본 결과는 다음과 같다.

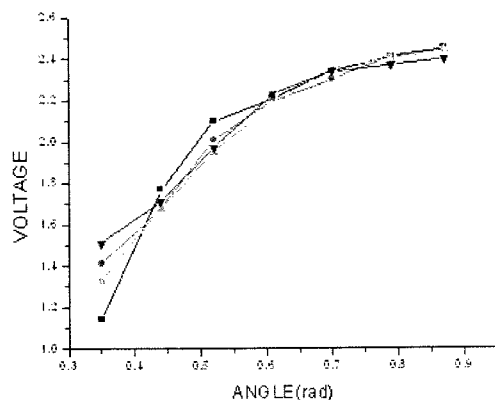


그림 3.3.4.39 각도 변화에 따른 전압변화의 실험 결과

위의 결과를 보면 센서의 동작 영역인 16.6이상인 20에서부터 측정을 하였는데 센서의 동작시작 부분에서의 값은 제대로 수렴하지 않았으나 점점 더 큰 무게가 눌러지면서 데이터 값이 수렴함을 알 수 있다.



그림 3.3.4.40 모자에 부착된 머리입력장치의 외형

센서를 모자를 이용하여 위와 같이 창에다가 붙였다. 비록 현재의 FSR센서의 사양상(최소 반응무게가 20g) 구의 무게가 조금은 부담 될 수밖에 없고 또한 크기도 조금 커지긴 했지만 이 문제는 센서의 특별주문으로 가능하다는 것을 확인하였다. 연구용으로 큰 지출을 피하기 위해 일단은 사용하고 있는 센서로 동작가능성에 대한 타당성을 검증하였다. 추후 상용화될 수 있다면 그때 소형화, 소 경량화 시킬 수가 있고 그렇다면 부착하는 방법도 좀 더 다양하게 안경테 밑이나 음악 감상용 백폰 같은 곳에 부착할 수도 있다. 머리 입력 센서 역시 무엇보다 별로 제작하는데 있어 비용이 들어가지 않는다. FSR센서 4개와 육면체 금속구, 그리고 구슬 하나가 전부인 이 장치의 가장 큰 장점은 저렴한 장치란 것이다.

(다) 휠체어 제어방법

장치를 모자에 부착한 상태에서 휠체어를 구동하는 방법에 대해서 다양하게 접근을 시도해 보았다.

① 가상 스위치 형태의 방법

머리를 상하로 움직이는데 앞으로 한번 끄덕일 때마다 구동신호가 발생하도록 하여 그 신호를 latch시키는 방법이다.

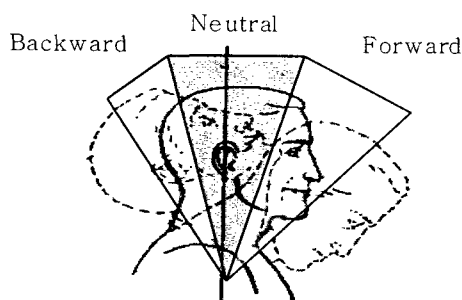


그림 3.3.4.41 가상 스위치 방법을 위한 머리 운동의 영역구분

참고문헌[14]에 의하면 일반인들의 자연스러운 목의 운동영역이 지면에 수직 상태에서 $\pm 30^\circ$ 정도인데 원치 않는 신호가 휠체어 구동에 들어가지 않도록 전후방 동작영역을 타당하게 정하여야 한다. 여기에서 역시 어떤 절대적인 각도변화에 의해 휠체어가 동작하게 하면 장애인에 따라 또한 모자의 위치변경에 따라 오 동작 신호가 발생할 수 있는 여지가 있다. 또한 장애인의 운동 반경역시 정상인에 비해 전후의 목의 움직임은 덜하나 좌우 roll 각의 운동범위가 현격히 줄어드는 것이 예상되는바 구동 전 교정과정(calibration)이 필요하였다.

센서의 전압 값의 최저 값은 0V이므로(중력방향으로 놓여있을 때) 전후좌우 움직임의 최고치를 어깨 센서의 교정작업과 같은 방법으로 획득하여 구역을 두 부분으로 나뉜 뒤 상위 영역에선 동작하고 하위영역에선 비동작 신호를 내도록 하였다.

이 방법은 순간순간 원하는 응답속도가 빠르고 구현방법이 간단하지만 속도를 조절함에 있어 항상 목의 움직임이 요구되므로 사용자에게 과도한 근육운동의 소모를 불러올 수 있다는 단점이 있다.

② 비례제어 방법

앞에서의 교정작업에서와 같은 범위를 먼저 얻은 뒤 전방으로 가능한 운동영역을 4단계로 나뉘어서 해당영역에 목이 위치하고 있으면 그에 해당하는 속도로 휠체어가 주행을 하게끔 하는 momentary 방법이다. 단 후진에 대해서는 단일속도만 필요하므로 2개의 영역만으로 나뉘어 ON/OFF 제어를 하면 된다.

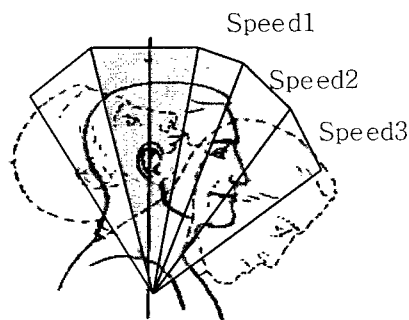


그림 3.3.4.42 비례제어 방법을 위한 머리의 영역구분

다음과 같은 방법을 쓰게 되면 속도를 제어함에 있어 응답속도가 매우 빠르다는 장점을 가질 수 있어 위급한 상황 시 바로 대처할 수 있다는 장점이 있지만 주행을 하기 위해 항상 사용자가 아래쪽으로 주시하고 있어야 되므로 시야확보가 충분치 못할 뿐만 아니라 근육의 피로도 역시 증가시키는 결과를 가져온다.

③ 스위치와 타이머의 혼합 방법

이는 스위치 방법에서 사용했던 영역을 그대로 유지하면서 해당영역에 유지하는 시간에 비례하여 속도의 증가를 가져오도록 하는 방법으로써 장애인이 휠체어를 구동함에 있어 힘이 적게 들뿐만 아니라 원치 않는 교시신호가 발생하는 경우가 비례제어 방법보다 훨씬 줄어들었다.

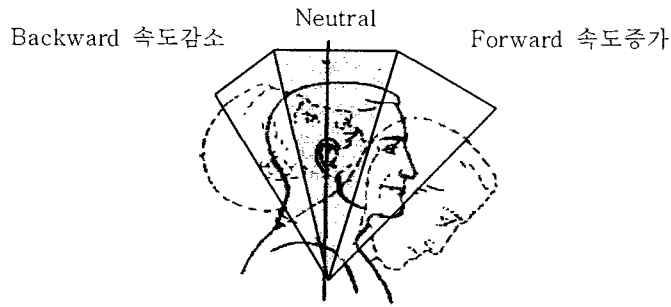


그림 3.3.4.43 혼합제어 방법을 위한 머리의 영역구분

(9) 1자유도 실험장치의 햅틱 제어 기법

1자유도 실험장치의 하이브리드 햅틱 제어 기법을 실험하였다. MR Brake와 Motor의 선택적, 동시적 사용을 가능하게 하는 하이브리드형 제어기를 설계하였다. 햅틱 제어의 흐름을 보면 아래 그림과 같다.

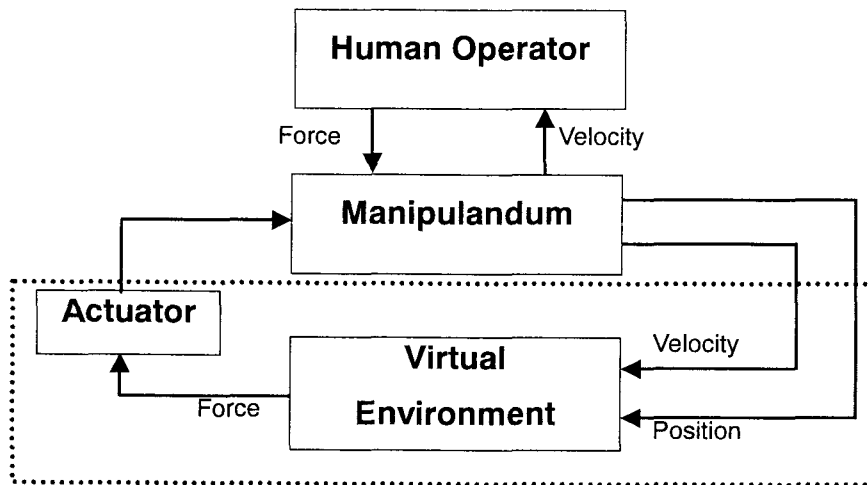


그림 3.3.4.44 햅틱 시스템의 제어 흐름

본 연구에서 사용한 하이브리드형 제어 시스템의 블록 선도를 보면 아래와 같이 나타난다.

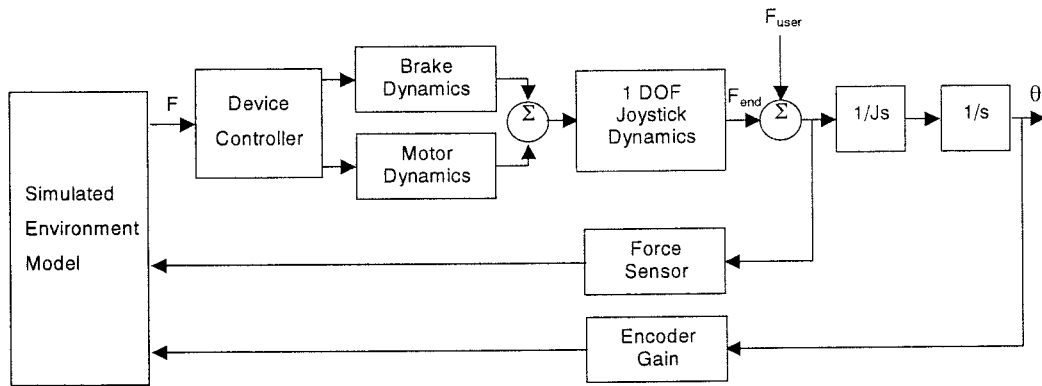


그림 3.3.4.45 1자유도 햅틱 제어 시스템의 블록 선도

위와 같은 시스템 블록 선도를 이용하여 QNX 기반의 제어를 설계하여 Motor와 MR Brake 모두 1kHz로 제어하였다.

(10) 브레이크를 포함한 실험장치의 마찰 보상

자유도 실험장치의 마찰 보상으로 대상물과 접촉하지 않는 환경에서 조이스틱의 동작을 자연스럽게 하였다. 실험 장치에서 생기는 마찰력을 측정하고 이를 보상시켜 주었다.

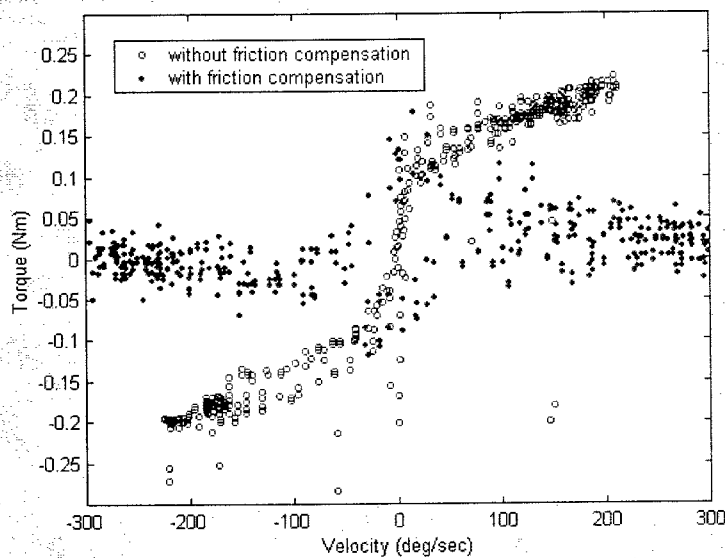


그림 3.3.4.46 1자유도 실험장치의 마찰 보상

힘센서를 이용하여 사람이 조이스틱에 가하는 힘을 피드백(Force Feedback)하여 동적 마찰(Dynamic Friction) 성분을 제거하고, 마찰 모델(Karnopp's Model)을 피드포워드(Feedforward)하여 토크 오차로부터 보상 방향을 결정함으로써 정적 마찰(Static Friction)을 제거할 수 있다.

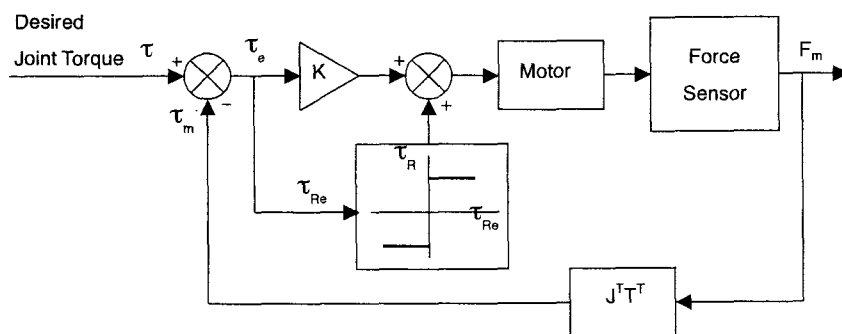


그림 3.3.4.47 마찰 보상을 위한 블록 선도

(11) 실제 대상물의 힘-속도 프로파일 추정 및 햅틱 모델링

1자유도 실험장치를 이용한 햅틱 제어 실험을 통해 MR Brake와 Motor의 하이브리드 구동기의 가능성을 입증하였다. 레고 블록과 스티로폼의 힘-속도 데이터를 1자유도 조이스틱과 힘 센서를 이용하여 얻은 그래프는 다음과 같다.

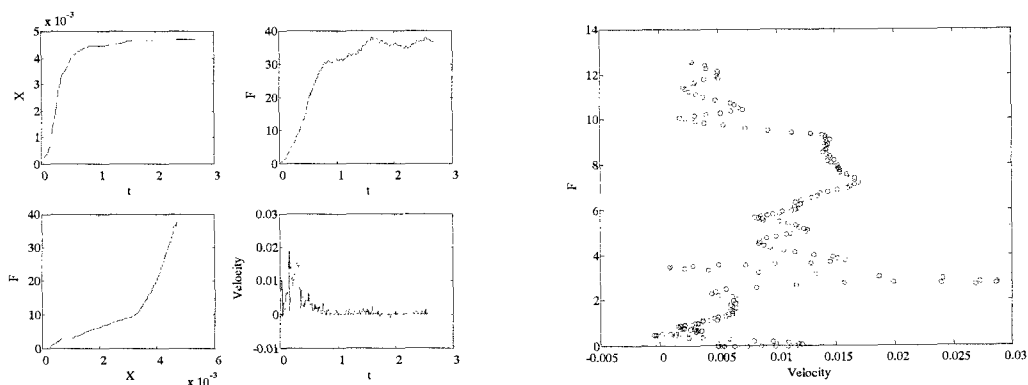


그림 3.3.4.48 레고블럭의 힘-속도 추정 데이터

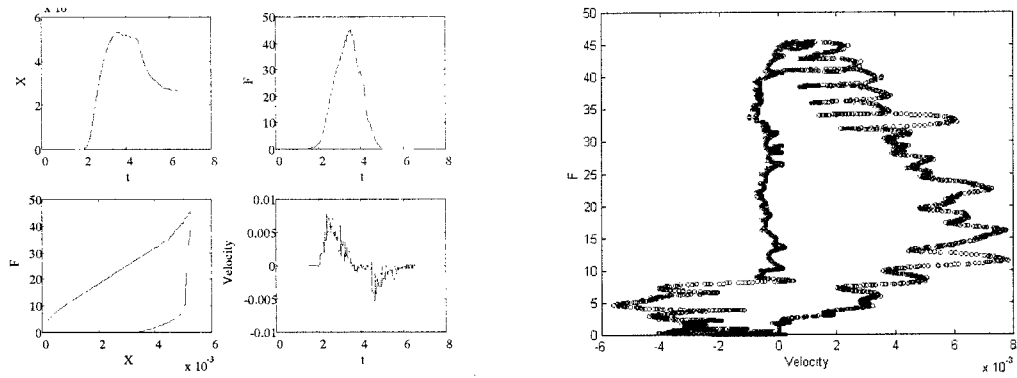


그림 3.3.4.49 스티로폼의 힘-속도 측정 데이터

레고블럭 실험 데이터를 고찰한 결과, 레고블럭은 Karnopp's Model로 모델링할 수 있으며 따라서 MR Brake만으로 구현 가능하다

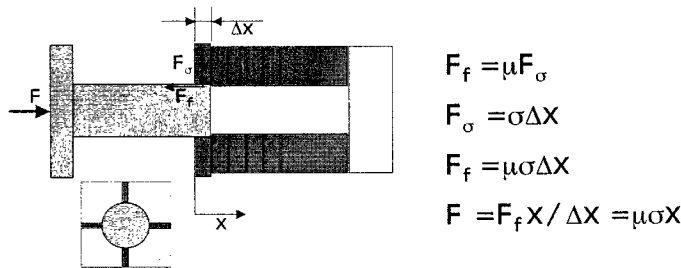


그림 3.3.4.50 레고블럭의 햅틱 모델

스티로폼 실험 데이터 분석 결과, 스티로폼은 탄성변형과 소성변형을 함께 나타냄을 알 수 있으며, 영구 변형량이 존재함으로 배경 댐핑(Background Damping)을 갖도록 탄성-소성 모델로서 햅틱 모델링할 수 있으며, MR Brake와 Motor를 함께 사용함으로써 구현할 수 있다.

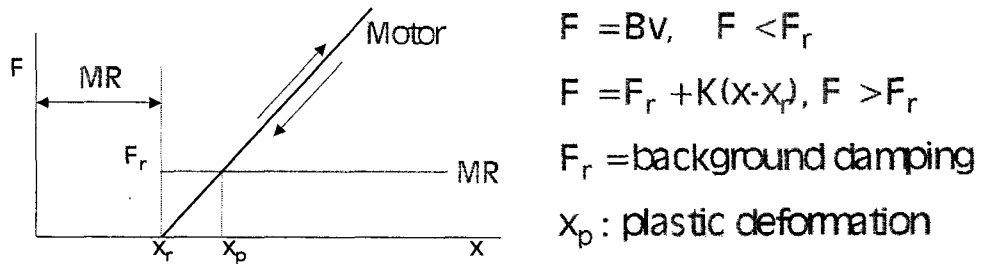


그림 3.3.4.51 스티로폼의 햅틱 모델

1자유도 햅틱 제어 실험을 통해 측정 데이터와 햅틱 모델링의 경향을 비교 분석한 결과 MR Brake와 Motor를 함께 이용함으로써 Motor만으로 구현하기 힘든 대상물을 구현할 수 있음을 입증하였다.

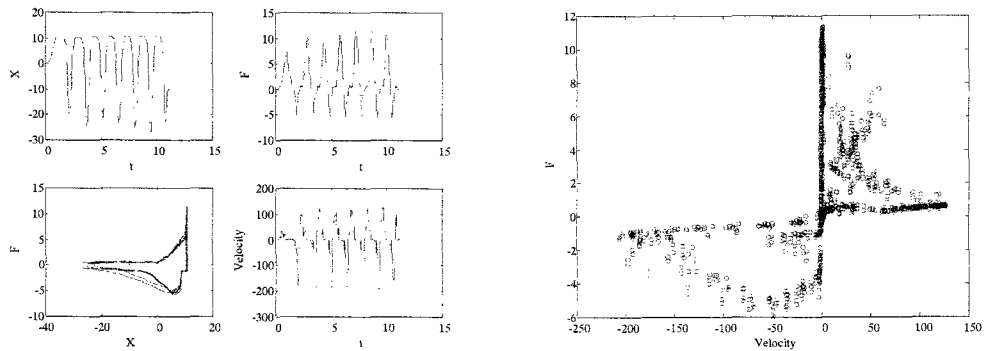


그림 3.3.4.52 1자유도 실험장치를 이용한 레고블럭의 구현

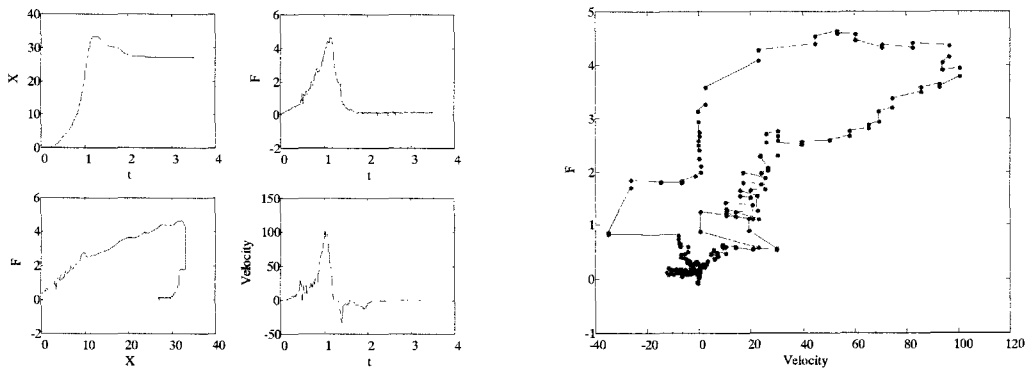


그림 3.3.4.53 1자유도 실험장치를 이용한 스티로폼의 구현

MR Brake의 Coulomb 마찰 특성을 응용한 스틱-슬립 모델의 구현한 모델은 아래와 같다.

• Kamopp's model

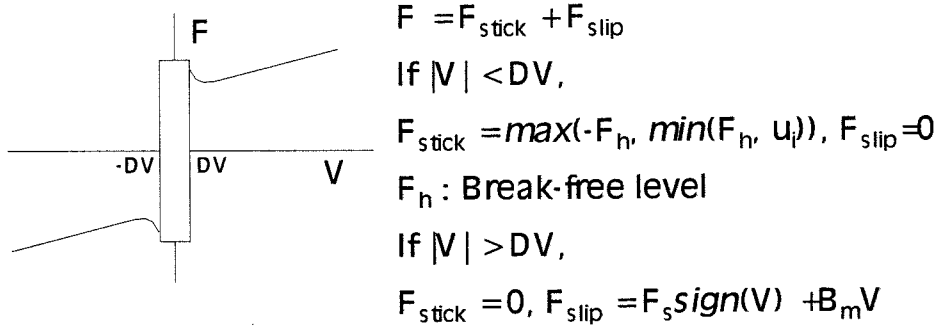


그림 3.3.454 스틱-슬립(Stick-Slip) 햅틱 모델

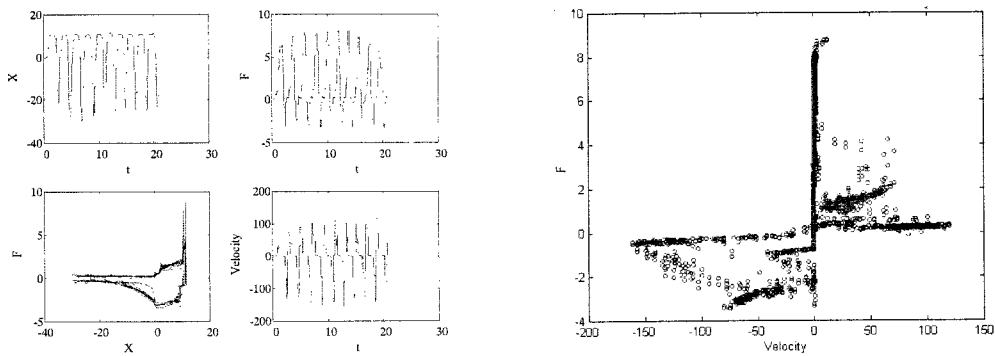
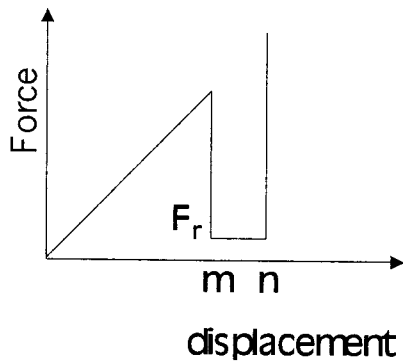


그림 3.3.455 1 자유도 실험장치를 이용한 스틱-슬립의 구현

Motor의 능동특성과 MR Brake의 수동특성을 응용한 스위치버튼 모델의 구현하여 실험한 그래프는 아래와 같다.



$$F = K_1 x (1 - u_m) + F_r u_m + F_b u_n$$

u_m, u_n : unit functions have zero value for $x < m$ and $x < n$

그림 3.3.4.56 버튼의 햅틱 모델

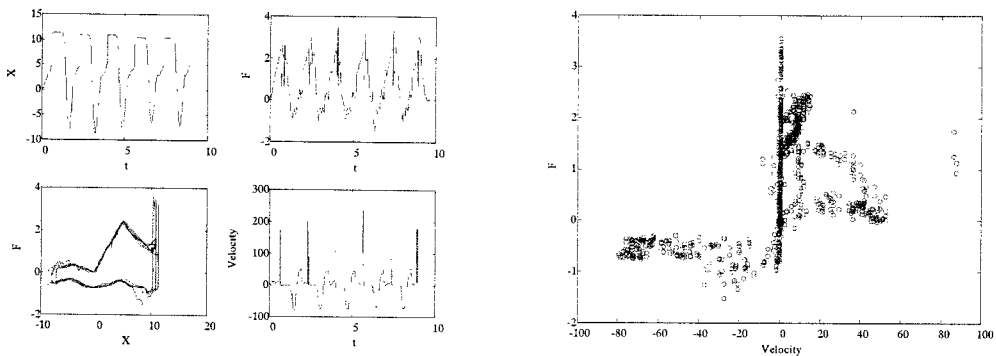


그림 3.3.4.57 1자유도 실험장치를 이용한 버튼의 구현

이와 같이 1자유도 실험장치를 이용해서 레고 블록, 스티로폼, 스틱슬립, 버튼을 구현하였고 모델링 한 결과와 MR Brake와 모터를 이용한 실험장치를 이용한 결과가 비슷하게 나오는 것을 알 수 있다.

(12) 2자유도 경사진 벽에 대한 MR Brake의 힘 반향 적용 범위

1자유도의 실험을 바탕으로 2자유도의 확장을 위해서 우선 2자유도 경사진 벽에 대한 MR Brake의 힘 반향 적용 범위를 파악하였다.

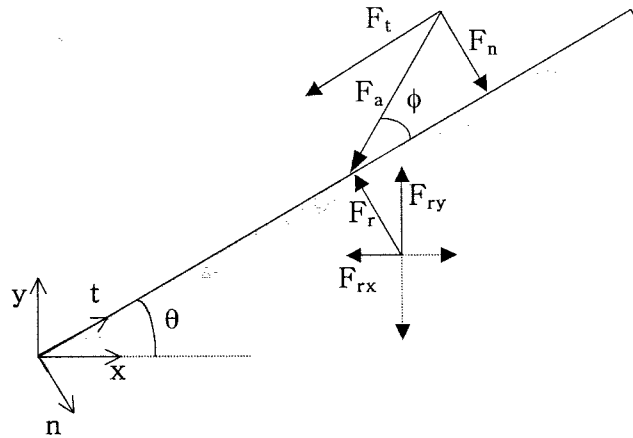


그림 3.3.4.58 2자유도 경사벽의 자유몸체도

구동축이 연성 되지 않은 2자유도 공간에서 좌표계를 구동축에 놓인 조인트 좌표계(Joint Space, XY 좌표계)와 힘이 작용하는 경사면에 대한 작업 좌표계(Task Space, UV 좌표계)로 나누고, 작업 좌표계에 대하여 법선 방향의 힘 성분과 접선 방향의 힘 성분을 표현하였다.

$$\text{법선방향: } \Sigma F_n = |F_a| \sin \phi (1 - \cos 2\theta) \quad (\text{식 3.3.4.10})$$

$$\text{접선방향: } \Sigma F_t = |F_a| \sin \phi \sin 2\theta - |F_a| \cos \phi \quad (\text{식 3.3.4.11})$$

경사면에 힘이 작용할 때, 경사면에 대한 법선 방향의 힘 성분만을 구동기로 구현하면, 사람이 경사면을 느낄 수 있을 수 있게 된다. 그러나 경사각(Slope)과 작용력 방향(Viewpoint Angle)이 변하는 경우, 어떤 배치(Configuration)에서는 MR Brake의 Coulomb Friction 특성으로 인해 더 이상 움직일 수 없이 고착되는 상태가 발생하게 되므로, MR Brake만을 사용할 때 마찰여부에 관계없이 사람이 경사면을 따라 조이스틱을 움직일 수 있는 영역은 경사면의 접선 방향의 힘이 음의 값을 가질 때이다. 경사면을 따라 미끄러지는 경우, 경사면이 조인트 공간의 표준좌표계 즉, 구동축과 일치하는 경우에는 MR Brake만으로 마찰이 없는 벽을 구현할 수 있게 된다.

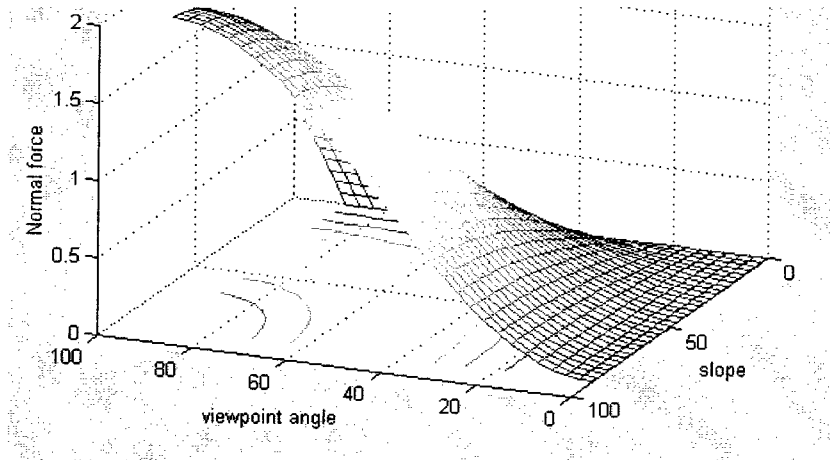


그림 3.3.4.59 경사각과 작용력 방향에 따른 법선 방향의 힘 성분

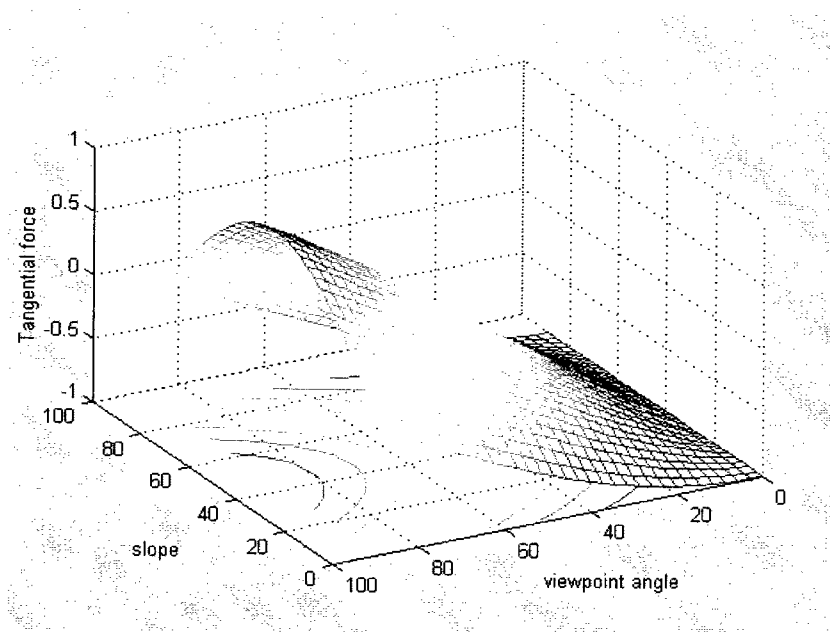


그림 3.3.4.60 경사각과 작용력 방향에 따른 접선 방향의 힘 성분

(13) 2자유도 무마찰 경사면을 구현할 수 있는 MR Brake에 대한 Motor의 힘 반향 적용 범위

아래 그래프는 경사면을 따라 미끄러지도록 할 수 있는 MR Brake의 힘반향 적용범위와 마찰이 없는 경사면을 구현할 수 있는 MR-brake에 대한 Motor의 힘 반향 적용 범위에 대한 그래프이다. 여기서 2자유도에서 MR Brake와 Motor를 함께 사용한 Hybrid 구동기의 가능성을 알 수 있다.

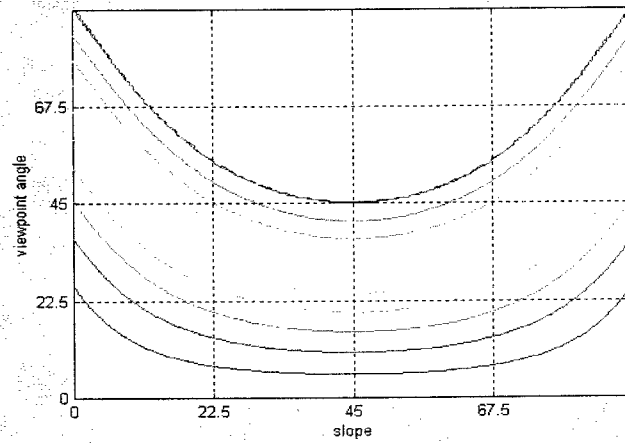


그림 3.3.4.61 경사면을 따라 미끄러지도록 할 수 있는 MR Brake의 힘 반향 적용 범위

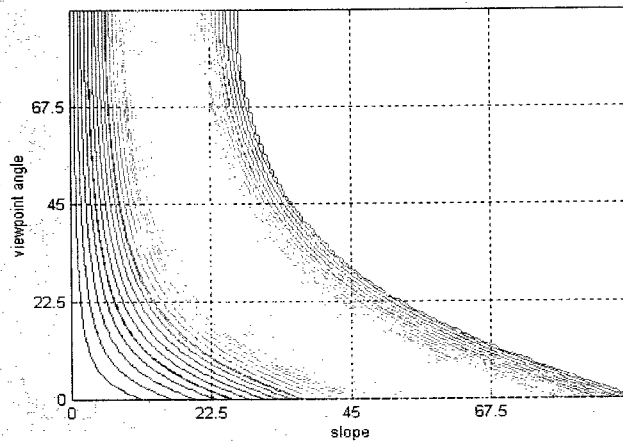


그림 3.3.4.62 마찰이 없는 경사면을 구현할 수 있는 MR-brake에 대한 Motor의 힘 반향 적용 범위

조인트 공간에서 Brake로 표현 가능한 구동축 방향의 힘 성분은 MR Brake로 표현하고 다른 구동축 방향의 힘 성분은 Motor로 표현함으로써 경사면에 대한 마찰이 없는 힘 반향을 구현할 수 있다. Motor의 토크 능력이 Brake의 토크 능력의 1/2인 경우, Motor의 힘 반향 적용 범위를 파악하였다.

$$\sin \phi \theta \sin \theta - 0.5 \cos \theta \leq 0 \blacksquare \quad (\text{식 3.3.4.12})$$

(14) 휠체어 장애인용 2자유도 수동형 조이스틱 설계 및 제작

휠체어 장애인들 중에 손을 사용할 수 있는 장애인을 위해 2자유도 수동형 조이스틱을 설계하고 제작하였다. 수동형 조이스틱이란 브레이크를 사용하여 장애인의 안전을 보장하고 장애물의 회피나 장애물 근접 방지를 목적으로 하는 것이다. 그림 1에 제작된 2자유도 수동형 조이스틱을 나타낸다.

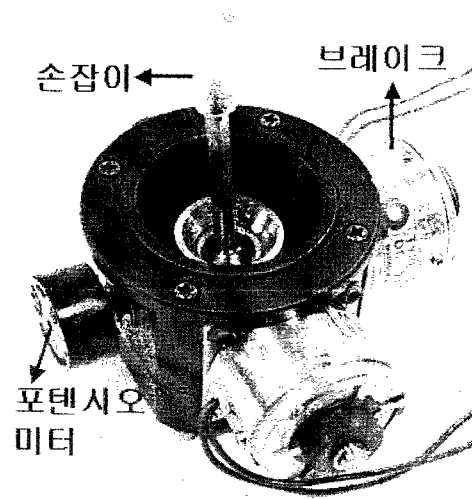


그림 3.3.4.63 2자유도 수동형 조이스틱

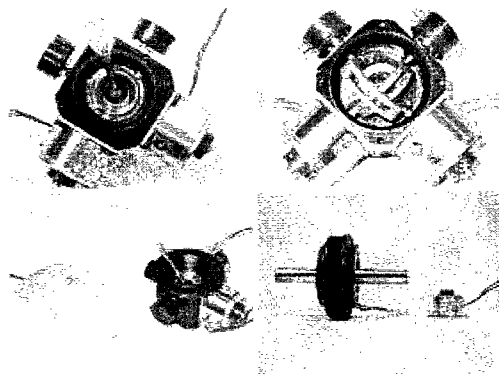


그림 3.3.4.64 2 자유도 수동형
조이스틱의 외관

그림 3.3.4.63과 그림 3.3.4.64에 나타낸 바와 같이, 제작된 조이스틱은 크기가 80X80X95mm이고, 작업공간은 모든 방향으로 $\pm 35^\circ$ 이며, 손잡이 끝에서 느낄 수 있는 최대 힘은 15N이며, 무게는 540g이고 위치신호 검출을 위해 사용되는 포텐시옴터의 회전 각은 60° 이다. 저렴한 원가로 제작이 가능한 2자유도 수동형 조이스틱은 자기 브레이크를 사용하여 장애인의 안전성을 확보할 수 있다. 또한 필요한 토크를 연속적으로 만들어 내기 위해 PWM신호를 이용하였다. 사용된 자기브레이크는 중량 130g, 정격전압 24V에서 정마찰토크 0.25Nm를 갖는다. 기구부의 설계는 카던 조인트를 채택하였다. 카던 조인트는 기구적으로 쉽게 이해되며 조인트를 독립시킬 수 있어서 제어가 용이한 장점을 갖는다. 전체적인 외형 설계도는 그림 3.3.4.65와 같다.

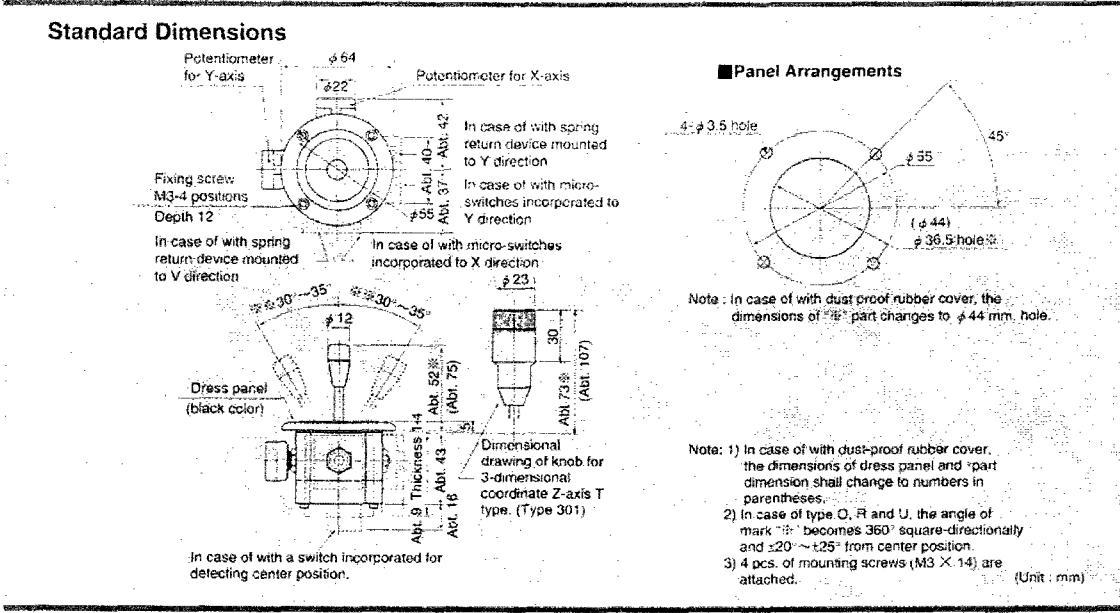


그림 3.3.4.65 2자유도 수동형 조이스틱의 외관 설계도

나. 로봇 인터페이스를 위한 지능형 알고리즘의 개발

장애인이 smart 휠체어를 주행하는 것을 일반 사람이 말을 타고 주행하는 것으로과 다 음 그림 3.3.4.66 과 같이 비교해 보면 본 연구과제가 목표하고 있는 관리제어 시스템을 이 해하는데 훨씬 도움이 될 것이다. [20]

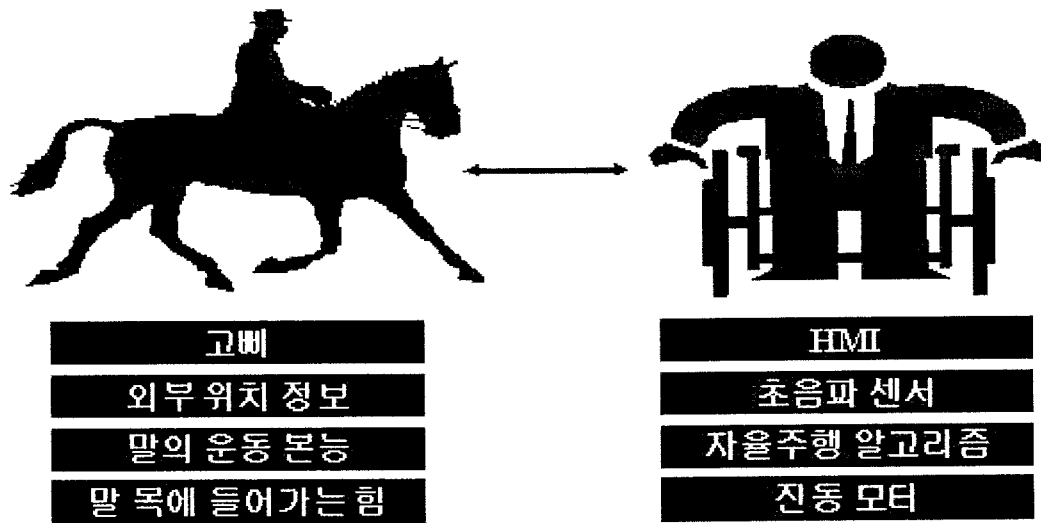


그림 3.3.466 스마트 휠체어 시스템과 승마와의 비유

일반적으로 말은 low-level 작업들을 담당하는데 예로써 다리의 위치설정, 주행의 안정성, 장애물 회피, 적절한 동작 힘, 그리고 다른 행동에 따라 적절한 속도를 조절하는 역할 등을 한다. 반면에 승마자의 경우 주행을 위한 전역적 경로를 설정하고 이를 달성하기 위해 말과 고삐를 통해 상호작용을 하고 필요한 경우 말의 행동에 제약을 가하곤 한다. 이들 둘 사이의 상호작용은 간단하면서도 자연스럽게 주고 받게 되는데 사람은 말에게 고삐나 다리를 통해 명령을 내리고 말은 사람에게 목의 힘으로나 갑작스러운 위험상황 발생시 앞발을 들어올림으로써 서로 의사를 주고 받게 된다. 그리고 말의 기본적 상황 판단능력으로 인해 독자적으로 장애물을 회피하거나 적절한 속도를 유지하게 된다.

결국 고삐역할을 하는 입력장치로 앞에서 제작한 머리입력장치를 첫번째 상호작용을 위한 도구로 사용하였고 외부 위치 정보를 획득하기 위한 장치로써 초음파센서를 사용하였다. 그리고 기본적인 장애물 회피 알고리즘을 통해 말의 운동본능을 표현한 것이 된다. 마지막으로 말의 의사표현 수단과 같은 역할을 하는 장치로 다음 에 설명할 진동모터를 사용하여 진행방향에 대한 암시 및 위험물체 표시등을 하도록 하였다.

전반적인 휠체어 시스템의 구성요소를 먼저 살펴보면 전동휠체어를 구동하기위해 가장 기본적인 장치가 머리 및 어깨 입력장치라면 사용자가 그 입력장치를 사용함에 있어 더욱 원활히 그리고 쉽게 사용하도록 하기 위한 장치가 자율주행 장치였다. 그렇다면 언제 어떤 입력을 받아서 어떤 출력을 내는가가 전체 휠체어 시스템의 구동에 있어 가장 중요한 부분 중의 하나라고 할 수 있겠다. 전체 시스템 통합의 개념도를 아래와 같이 두 가지의 제어 형태로 구분하여 나타내었다.

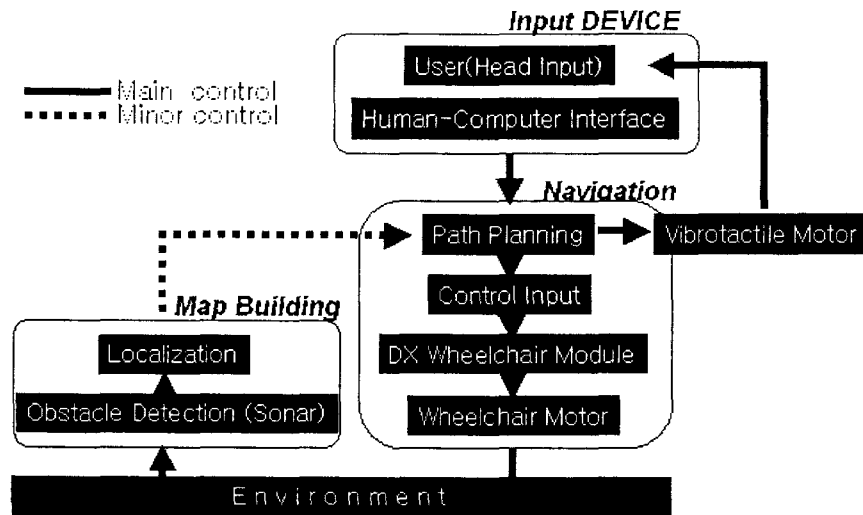


그림 3.3.4.67 전체 휠체어 시스템의 입력장치에 의한 구동 구조

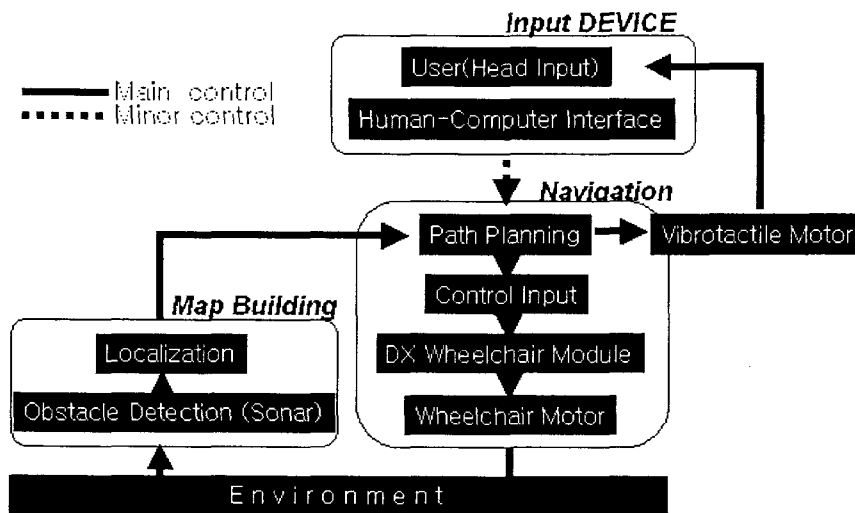


그림 3.3.4.68 전체 휠체어 시스템의 자율 주행 제어 구조

그림 3.3.4.67 은 수동모드로써 사용자와 작업사이에 항상 지속적인 입력을 통해 휠체어를 구동 시키는데 현 시스템에서 장애인 본인의 시각적인 상황 판단 외에 갑작스러운 돌발 상황 시야를 벗어난 상황에 대해 장애인에게 진동모터를 통해 피드백 시켜 줄 수 있도록 하였다. 긴급상황 시 수동모드일지라도 컴퓨터가 제어를 함에 우선권을 부여 받아 정지 혹은 회전의 작업을 수행 할 수 있다. 그림 3.3.4.68는 자동모드로써 컴퓨터와 외부환경사

이에 닫힌 루프를 구성해 자율적으로 작업을 수행하는 상태도를 나타낸 그림으로 주제어 권한은 컴퓨터에게 있으나 이의 동작에 대해서 항상 장애인에게 진동모터를 통해 미리 알려도록 한다. 즉 컴퓨터의 의도를 장애인에게 미리 좌우에 붙어 있는 진동모터를 통해 방향전환을 알릴 수 있도록 하여 양쪽의 의도가 다른 신호일 경우엔 서로 경합을 하여 제어의 우선순위를 가지도록 한다.

우선 입력 장치에서 휠체어 구동 명령을 내리게 되면 그 때부터 메인 컴퓨터는 입력장치 변화의 신호와 외부 장애물의 위치를 파악하는 초음파 센서의 신호를 모두 연속적으로 받아들여지게 된다. 이 신호들을 합쳐서 다음절에 언급하는 퍼지 이론을 토대로 하여 관리자를 결정하도록 하였다.

(1) 자율주행

(가) Ultrasonic Ranging System

전동휠체어가 주위의 환경을 인식할 수 있도록 하기 위해서 일반적으로 vision sensor, laser, ultrasonic sensor가 사용된다. Vision의 경우 입체적인 시각으로 주위 위치정보를 얻을 수 있지만 가격이 비싸고 또한 데이터를 처리하는데 따른 시간이 꽤 걸린다는 단점이 있다. laser 의 경우 빠른 정보 획득 및 정확성을 장점으로 가지는 반면 외부사람의 안전성을 해칠 수 있는 단점이 있다. 반면 초음파 센서의 경우 가격이 매우 저렴하고 일반적으로 가장 많이 사용되고 있기 때문에 본 연구에서 장애물 검출을 위해 초음파 센서를 사용하기로 한다. 사용 제품은 Polaroid Instrument 사의 Grade 600 Series electrostatic transducer로써 외관 및 특성은 다음과 같다.

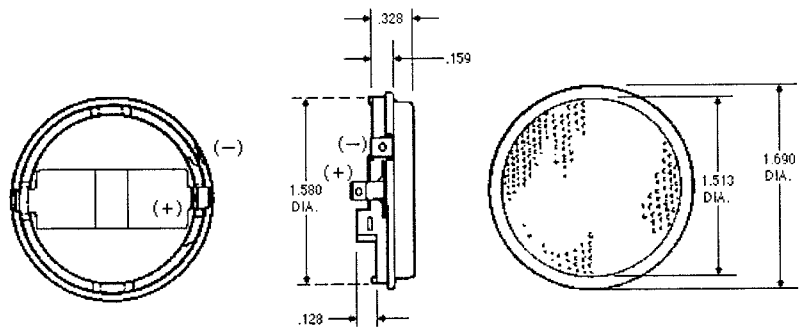


그림 3.3.4.69 초음파 센서의 형태 및 크기

Operating Frequency	50kHz
Measurement Range	10cm~10m
Accuracy	99%(5m range)
Resolution	0.5cm
Physical Dimension	110 x 75 x 30(mm)
Sample Rate	10 feet Range: maximum 18ms 20 feet Range: maximum 36ms
Computer I/F	USB BUS(12M bps)

표 3.3.4.4 초음파 센서의 특징 및 사양

다른 거리 측정 센서에 비해 초음파 센서의 가장 큰 단점이 다음그림에서 보는 바와 같이 방사 각이 대략 전방에 대해 30° 정도로 넓기 때문에 정확한 물체의 위치를 파악하기 힘들다는 것이다.

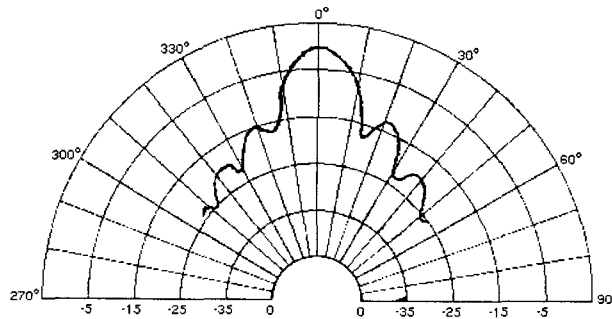


그림 3.3.4.70 Typical Beam Pattern At 50 kHz

본 논문에서 사용되는 초음파센서는 전방 180도를 확보할 수 있도록 총 11개의 센서 배열을 다음 그림과 같은 프레임을 제작하여 사용하였다

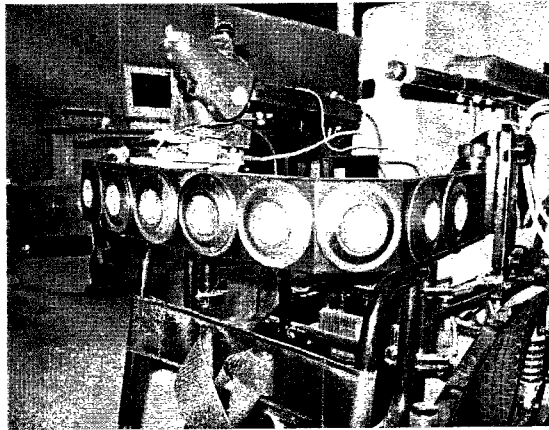


그림 3.3.4.71 초음파 센서를 부착하기 위한 프레임

(나) 센서를 이용한 장애물 위치 판별법

초음파 센서는 넓은 영역에 걸쳐 데이터를 얻을 수 있는 장점이 있지만 방향성이 너무 넓고 반사물체의 형태에 따라 다른 곳으로 반사가 되어 근접해있는 센서쪽으로 간섭현상이 발생하게 되어 엉뚱한 값들을 얻는 경우가 빈번하다는 단점이 있다.

이를 극복하면서 보다 신뢰성 있는 국지적인 지도를 만들기 위해 많은 연구들이 이루어져왔는데 그 중에서 Kuc 와 Siegel은 모서리, 벽 그리고 에지를 판별하기 위해 펄스-에코 응답을 분석하는 방법을 사용했고 [15] 이것이 후에 지도생성의 한 방법으로 발전하게 되었다. 그러나 여기에서 사용하는 방법은 위에서의 반사파의 파형을 분석하는 대신 초음파의 TOF(time of flight)를 측정한 값으로부터 거리정보를 얻어 확실한 격자를 생성하는 방법을 이용하였다.[16][17] 이 방법은 파형분석법에 비해 간단하고 다른 센서에 적용이 쉬우며 센서 값의 합성을 함에 있어 장애물의 위치가 격자형태로 명확히 드러나므로 장애물 회피를 하는데 충분하다는 장점을 가지고 있다.

알아본 바와 같이 초음파의 방사각이 원뿔형태를 이루게 되는데 대략 30도 정도로 퍼지므로 다음과 같이 모델링 할 수가 있다.

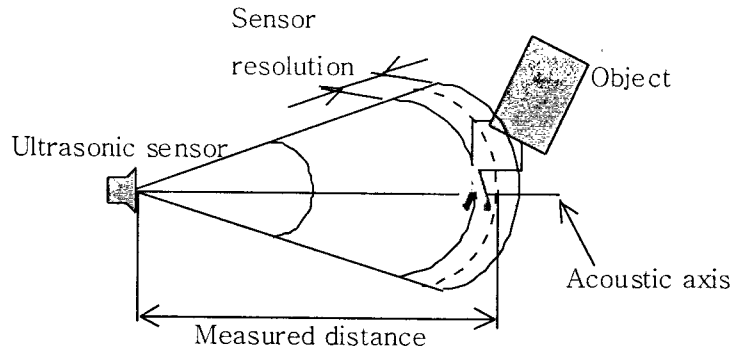


그림 3.3.4.72 초음파 센서 방사형태에 대한 모델링

위의 그림에서처럼 물체가 감지되면 거리정보는 정확하더라도 방사형태로 인해 어느 방향에 위치하는지 정확히 알 수 없고 A영역 어디에서든 존재할 수 있다고 볼 수밖에 없다. Elfes [17]는 A 의 모든 영역의 격자에 확신값(certainty value)을 부여하면서 축에 대해서 정규 분포적으로 확률 값을 가지도록 하고 감지된 거리와 센서사이의 값은 음수로 표현하였다. 본 연구에서는 Borenstein이 제시한 Histogramic In-Motion Mapping(HIMM) 방법을 사용하였다.[18]

HIMM 은 2차원의 직교좌표에서 장애물의 확률분포를 격자에 확신값(Certainty Value)을 통해 나타내는 방법이다. CV는 장애물이 있을 확신값을 말하는 것이고 앞선 Elfes 가 제시한 CMU method와는 다르게 물체가 감지된 전영역의 격자 값을 정규 분포화 시켜 확률적으로 증가하는 게 아니라 단지 센서 축에 있는 격자 하나의 CV만 증가시킨다. 과도하게 단순화시켰다고 할지 모르나 휠체어가 움직이면서 빠르게 지속적으로 거리정보의 데이터 값을 얻어서 업데이트 시켜주게 되면 다음그림처럼 같은 격자 혹은 그 주위의 격자의 CV가 증가하게 된다.

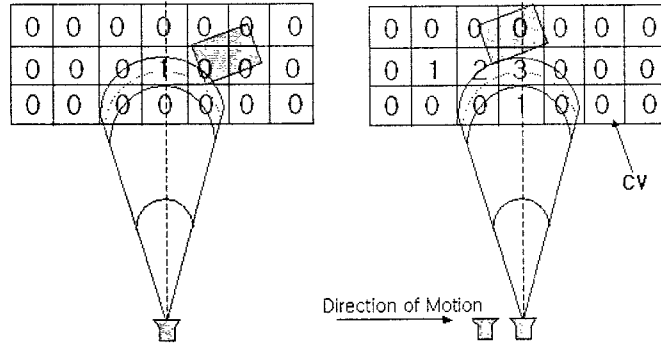


그림 3.3.4.73 물체의 위치 파악을 위한 확률분포 값 생성방법

또한 빠른 샘플링을 위해서 초음파 센서와 물체가 발견된 격자 사이의 격자들에 대해선 모두 CV값을 -1씩 감소시킨다. 그리고 앞에서는 물체가 감지된 격자에 대해 +1씩 증가한다고 했지만 만약 증가치와 감소치가 같으면 확률분포가 제대로 나올 수 없다. 따라서 그림 3.3.4.73과 같이 CV의 증가치를 +3으로 하고 CV_{max} 을 15로 CV_{min} 을 0으로 둔다.

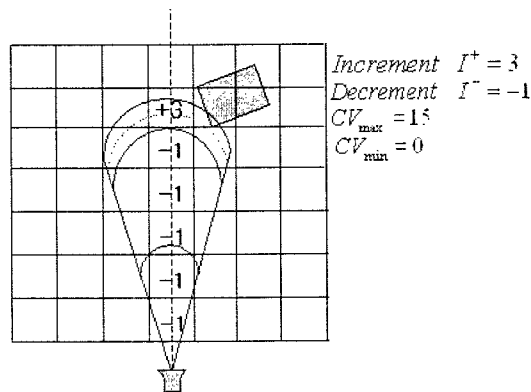


그림 3.3.4.74 물체위치 파악을 위한 격자 확신값(CV) 증가방법

여기에서 I^+ 값은 실험적으로 임의로 변경할 수 있는데 너무 크면 몇 번의 간섭신호들 로도 휠체어가 반응을 하게 될 수 있고 또 너무 작으면 CV_{max} 값에 도달하지 못할 경우도 생겨 장애물이 있어도 피하지 않는 경우가 발생 할 수 있다. 따라서 많은 변수들로 인해 적절히 실험적을 택하고 그 값에 따라 I^- 값도 선택할 수 있다. 단 I^- 은 한꺼번에 내부

에 있는 모든 격자의 값을 감소시키므로 I^+ 보다 작은 값을 가져야 한다. 이들의 관계를 수학적으로 정량화 하기는 많은 변수들로 인해 힘들다.

(다) 장애물 회피 알고리즘=Virtual Force Field Method

휠체어의 장애물 회피를 위해 본 논문에서는 가상 힘력 장 (Vector Force Field)방법을 사용한다.[19]

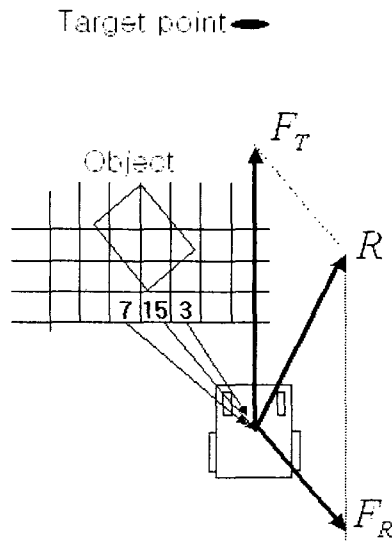


그림 3.3.4.75 가상 힘 반력
장(VFF) 방법의 개념도

VFF는 그림 3.3.4.75 처럼 휠체어 주위의 격자들이 가진 확신값(CV) 비례하는 가상적인 반력이 휠체어에 미치는 것으로 하여 휠체어의 방향 및 속도를 제어 하는 방법이다. 이 반력의 크기는 전기장과 같이 각 격자가 위치하는 곳과 휠체어 사이의 거리의 제곱에 반 비례하고 격자의 CV에 비례한다.

$$F_R = \sum F(i, j) = \sum \frac{CV(i, j)}{d^2(i, j)} \left[\frac{x_i - x_o}{d(i, j)} x + \frac{y_i - y_o}{d(i, j)} y \right] \quad (\text{식 3.3.4.12})$$

여기에서는 절대위치를 알 수 있는 지도정보를 가지고 있지 못하므로 원하는 목적위치를 알 수가 없기 때문에 진행방향에서 초음파센서가 측정 가능한 최대거리의 위치가 원하는 지점이라 가정할 수 있다. 또한 이 목적 포인트의 CV값을 크게 잡게 되면 끄는 힘이 상대적으로 많이 커지게 되므로 장애물 발생시 회전정도를 나타내는 벡터에 의한 합이 상

대적으로 작아지게 되고 또한 목적포인트 값이 너무 작으면 쉽게 회전을 하게 되므로 적절한 값을 선택을 해야 한다. 여기에서는 휠체어 전방의 위험거리로 가정한 50cm에서 이3개의 격자가 모두 일렬로 최대의 CV값을 가질 때 즉 반력의 크기가

$$\blacksquare F_R = \frac{15(CV) \times 3(\text{격자수})}{0.5^2(\text{거리})} = 180 \text{일 때 휠체어가 정지하도록 할 수 있는 값 결국 } F_T = 180$$

의 고정된 값을 선정하였다.

이로써 각 격자들의 CV값으로부터 계산되어지는 반력과 목적지의 인력의 합력으로 계산되어진 벡터 값으로 방향과 속도를 제어 할 수 있다.

(2) 퍼지알고리즘을 이용한 관리자 휠체어 모드결정 방법

전방에 장애물이 있을 경우 일반적으로 선택할 수 있는 경로는 다음 그림 3.3.4.76 에서처럼 4가지로 나뉘어 볼 수가 있다. Task1은 원하던 방향 앞에 이동 가능한 사람과 같은 장애물이 갑자기 나왔을 경우 그 장애물을 피해 원래의 방향으로 직진을 계속하는 경우이고 Task2와 Task 4의 경우는 세갈래 길이거나 복도 등지에서 코너를 도는 경우가 해당되겠는데 2는 휠체어가 독립적으로 회전을 하게 되는 경우이고 반대로 4의 경우는 휠체어의 회전과 반대되는 방향으로 회전을 하게 되는 경우이다. 마지막으로 Task3의 경우는 장애인이 전방에 있는 장애물이 책상 등 기타 가까이 가기 위한 물체일 경우에 해당되는 작업에 해당이 된다.

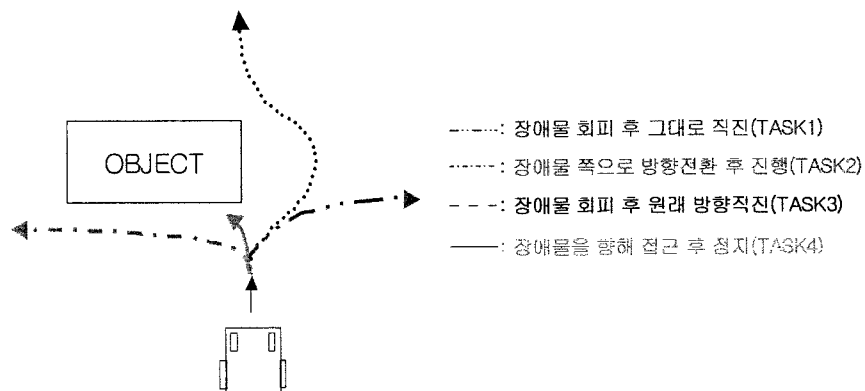


그림 3.3.4.76 관리자 휠체어에서의 장애물 회피를 위한 알고리즘 순서도

위에서 말한 4가지의 동작을 가능하게 하기 위해 상황에 맞도록 휠체어와 사용자간의 입력을 구성하여야 되고 서로 상호작용이 원활하게 진행이 되어야 하는데 앞에서 비유를 들었던 승마의 경우를 보면 말의 경우 승마자가 고삐를 당기는 힘과 고삐의 방향, 그리고 마지막으로 말 자체의 자율정도의 조합으로 현재 진행상태의 관리자가 결정됨을 알 수 있

다. 이와 마찬가지로 본 휠체어 시스템의 경우 고삐의 세기에 해당하는 머리입력장치의 기울어지는 정도와 고삐의 방향에 해당하는 현재 진행방향에 대해서 입력장치의 기울어지는 각도, 그리고 말의 자율성을 외부환경정보에 따라 변하는 휠체어의 자율성으로 두면 세 가지 입력변수를 통해 관리자를 선정할 수가 있다. 세 가지 입력변수와 최종적으로 결정하려는 관리정도를 좀 더 효과적으로 제어하기 위해 퍼지 알고리즘을 사용하고자 하였다.

(가) Fuzzification

모드선정을 위한 입력변수로서 머리가 기울어지는 각, 진행방향과 입력장치의 기울어지는 방향과의 차이, 그리고 초음파 센서를 통해 얻은 외부물체의 위치정보를 기반으로 하는 자율정도를 입력변수로 하여 출력은 자동인지 수동인지를 나타내는 자율정도가 된다.

① 머리의 기울기 각

첫 번째 퍼지 변수로 머리가 기울어지는 각을 측정한다. 초기의 중심 상태에서부터 현재 머리가 놓여있는 곳까지의 각을 말하는데 이 값은 사용자 자신의 가고자 하는 곳에 대한 확신을 나타내는 정도, 의지의 표현으로 볼 수 있다. 결국 구한 것을 확실성으로 표현하도록 하겠다. 최고 값의 기준은 초기 교정과정에서 획득한 움직임 방향에 대한 최대 각이 되고 이를 기준으로 확신도가 약함, 중간, 강함으로 3분류로 나뉘어 다음 그림처럼 최대값을 5구간으로 나뉘어 Fuzzification시켰다.

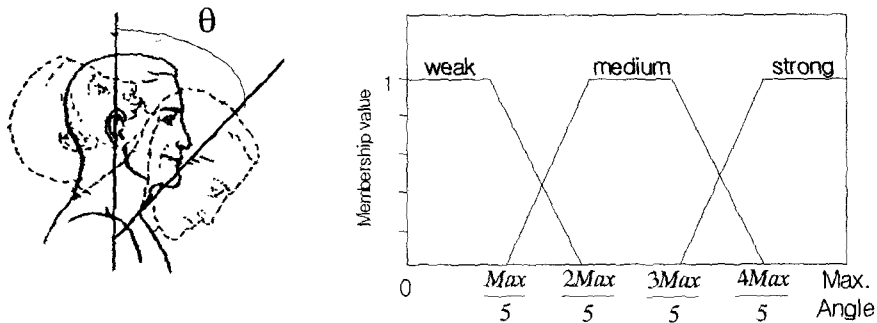


그림 3.3.4.77 머리 기울기에 대한 측정 및 소속함수

② 진행방향에 대한 벗어나는 각

두 번째 퍼지변수로 현재 진행방향에 대한 벗어나는 각도(ϕ)로써 다음그림처럼 평상시에는 휠체어 전방이 기준이 되고 회전을 알리는 상황 즉 진동모터가 다음 단계에 오른쪽 혹은 왼쪽으로 회전을 알리는 상황에서부터 회전이 진행중일 때까지는 그 회전이후의 방향이 기준방향이 된다.

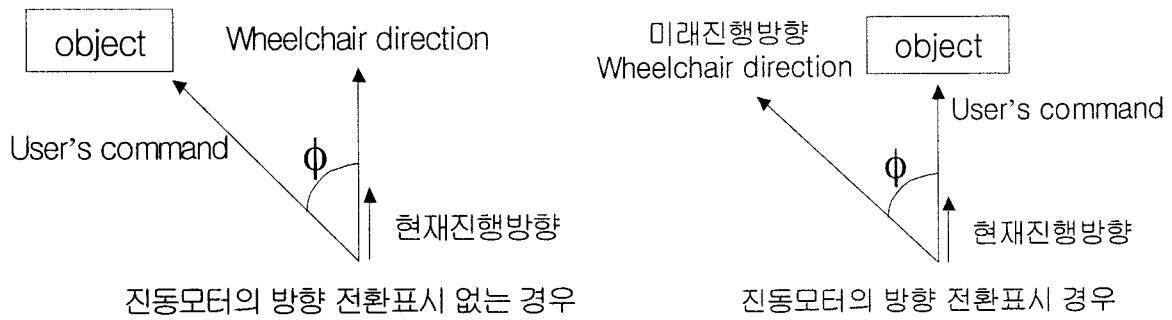


그림 3.3.4.78 진행방향에 따른 벗어나는 각도 (ϕ)

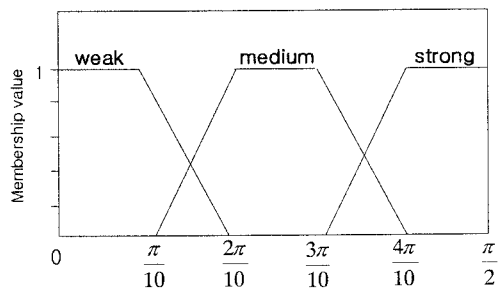


그림 3.3.4.79 진행방향에 따른 벗어나는 각도 (ϕ)에 대한 소속함수

위에서 구한 값 ϕ 는 결과적으로 휠체어의 진행방향과 사용자의 의도하는 방향이 일치하는지 그렇지 않은지를 나타내는 것으로 서로의 상충 정도라 다시 볼 수 있다. 이 값의 Fuzzification은 앞에서 구한 처럼 약함, 중간, 강함의 세 값을 가지도록 하고 구간역시 최대값 90로 하여 전영역을 5구간으로 나뉜다.

③ 휠체어 자체의 자율정도

자율정도의 값(Auto)은 초음파센서로부터 얻어진 전방향에 있는 물체의 위치와 구동 시간의 따라 변하는 함수로 그 값은 0(수동)에서 1(자동)까지로 변화하도록 하였다. 앞의 승마에서 일반적으로 말이 전방에 장애물을 만나게 되면 우선은 승마자의 방향전환 의사에 따라 쉽게 전환할 수 있지만 특별한 신호가 없으면 말 자체적으로 적절한 방향으로 회전을 하게 된다. 이와 마찬가지로 본 휠체어의 자율정도 역시 전방에 장애물이 발견이 되어 적정 영역에 들어오게 되면 진동모터와 연동하여 방향전환의 표시를 알림과 동시에 사용자의 입력을 쉽게 받아들이기 위해 자율성을 0.2 정도 까지 줄이게 된다. 그 후 특별한 입력 신호가 들어오지 않으면 거리에 비례하여 자율정도가 증가하도록 하여 자체적으로 자동전환 되어 회전을 수행하도록 하고자 하였다.

반대로 전방에 아무런 물체가 보이지 않으면 증가하였던 자율정도가 다시 감소하게 되고 0.5의 상태 값을 유지하도록 하였다. 이는 전방 물체가 없을 시 장애인의 좀더 편안한 자세 유지를 위해 조금의 움직임을 filtering 하기 위한 것이기도 하다..

자율 정도값을 0(수동적)~1(자율적)사이로 두면

■ $Auto = f(\text{distance}, \text{time}, \text{manualcheck})$

if	distance < 100cm	Auto = +0.07
	150cm < distance < 100cm	Auto = +0.04
	distance > 200cm	Auto = -0.08
if	manual check == true	Auto = 0.5

와 같이 변화하도록 하였다. 그림으로 다시 나타내 보면 다음과 같다.

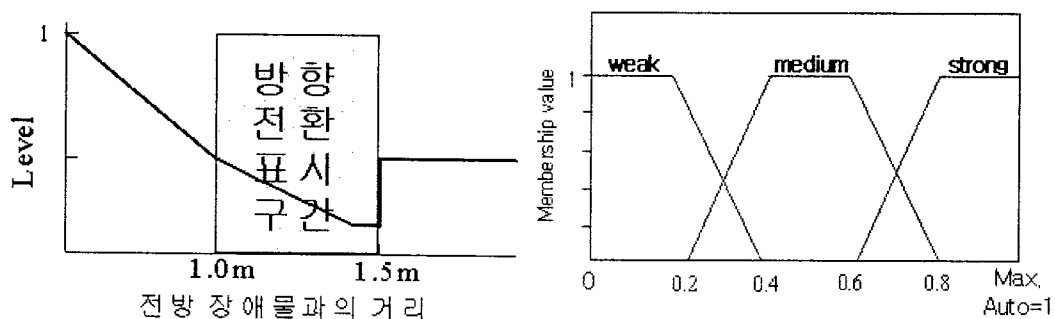


그림 3.4.4.80 자율정도의 변화 및 그 소속함수

전방에 배치된 초음파센서 4번에서 5번까지의 거리측정 결과 중에서 위험구간 알림 표시영역(150cm)이내 장애물이 있으면 한 sampling 마다 0.07의 값이 증가하고 그 외 2단계 속도 영역에서는 한 sampling에 0.04 증가하도록 하였다. 그리고 전방에 아무런 물체가 없을 경우 다시 한 sampling마다 0.08씩 감소되도록 하여 휠체어의 자율정도를 낮추는 것으로 하였다. 또한 양쪽이 경합을 벌이다 결국 수동입력이 취해졌을 경우 그때 자동변수를 초기화시킨다. Fuzzification 은 위의 두 가지 변수와 마찬가지로 같은 5구간으로 나뉘어서 함수화 하였다.

④ 관리자 레벨

앞에서의 3개 변수를 이용하여 얻어내고자 하는 출력은 관리 레벨이다. 이 변수는 5개의 소속함수로 구분하여 다음에 나올 규칙들을 결과를 적용하고자 한다. 완전한 수동, 거의 수동, 중립, 거의 자동, 완전한 자동의 5개 모드로 나뉘어서 실질적인 출력이 AUTO, MANUAL 혹은 SEMI-AUTO으로 나뉘도록 하였다. 우선 위의 규칙들에서 보면 특이할 만한 점은 세 개의 입력변수 모두가 strong로 나올 경우 사람의 입력에 우선순위를 부여하여 수동상태로 되게끔 하도록 하였다. 이를 통해 얻어지는 출력결과는 다음 그림과 같다.

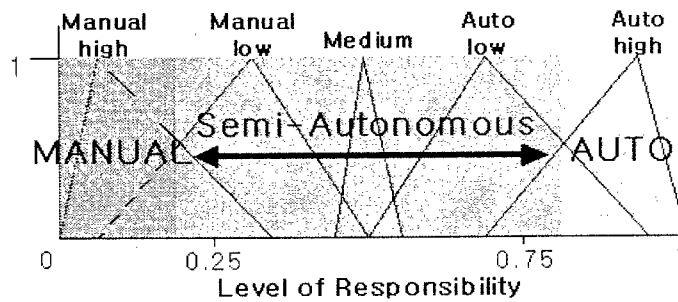


그림 3.4.4.81 출력 값의 소속함수

(나) Fuzzy Rule & Inference method

퍼지 제어기의 지식베이스는 rule-base와 제어 규칙부로 구성되어진다. 데이터베이스는 퍼지집합의 소속함수의 형태, 입력변수가 전체집합의 이산화인지 정규화 방식 등 퍼지 제어기의 규칙작성과 적용은 추론에 기본이 되는 지식을 가지고 있으며 퍼지 제어규칙은 if-then 형식의 퍼지 조건 문으로 기술할 수 있다. 이러한 조건 문은 일반적으로 여러 개의 복수 입력복수출력(MIMO)으로 구성되지만 다음과 같이 복수 입력단일출력(MISO)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \blacksquare R_1 &: \text{If } x_1 \text{ is } A_1, x_2 \text{ is } B_1 \text{ and } x_3 \text{ is } C_1, \text{ then } y \text{ is } D_1 \\
 R_2 &: \text{If } x_1 \text{ is } A_2, x_2 \text{ is } B_2 \text{ and } x_3 \text{ is } C_2, \text{ then } y \text{ is } D_2 \\
 &\vdots \\
 R_n &: \text{If } x_1 \text{ is } A_n, x_2 \text{ is } B_n \text{ and } x_3 \text{ is } C_n, \text{ then } y \text{ is } D_n
 \end{aligned}$$

이 세개의 변수들을 통해 원하는 모드 선정을 원활하게 그리고ダイナミック하게 할수 있도록 하기 위해 적용규칙을 다음의 도표에 표시한 바와 같이 적용하였다.

표 3.3.4.5 퍼지 입출력에 관한 규칙

자율	확신(θ)	상충(ϕ)	모드	자율	확신(θ)	상충(ϕ)	모드
Strong	S	S	Manual_High	M	M	W	M
S	S	M	M_Low	M	W	S	M_L
S	S	Weak	Medium	M	W	M	M
S	Medium	S	M	M	W	W	M
S	M	M	Auto_Low	W	S	S	M_H
S	M	W	Auto_High	W	S	M	M_H
S	W	S	A_L	W	S	W	M_H
S	W	M	A_H	W	M	S	M_H
S	W	W	A_H	W	M	M	M_H
M	S	S	M_H	W	M	W	M_L
M	S	M	M_H	W	W	S	M_H
M	S	W	M_L	W	W	M	M_L
M	M	S	M_H	W	W	W	M_L
M	M	M	M_L				

위의 규칙에서 특이할만한 몇 가지는 우선 세 입력변수가 모두 strong 값을 가질 때 휠 제어의 자유도 보다 장애인에게 그 우선순위를 주고자 하였다. 그리고 일반적 주행에서 휠 제어의 자유도가 0.5 인 점을 감안하여 입력 신호가 없으면 관리레벨이 중립이 되도록 하였고 진행방향에 대한 각이 변할 경우는 단순히 머리의 편안한 운동이라 가정하여 입력신호에서 필터링 되도록 하였다.

다음으로 의사결정단계에서는 퍼지입력과 퍼지 제어규칙으로부터 퍼지값을 추론하기 위해서는 의사결정논리가 필요하다. 추론법에는 singleton 추론법과 일반적인 퍼지논리를 사용하는 추론법이 있는데 주로 시스템 제어에는 singleton 형태의 추론법이 많이 사용된다. 이는 M.Mizumoto 논문에서 일반적인 퍼지 논리를 사용하는 것과 거의 동일한 특성을 가짐을 보였고 비교적 연산이 쉽다는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 Mamdani의 min 연산을 사용하였는데 그 방법은 다음의 그림과 같다.

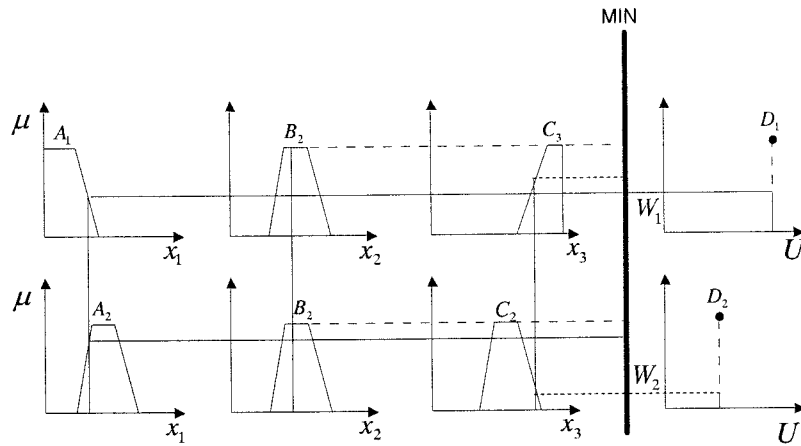
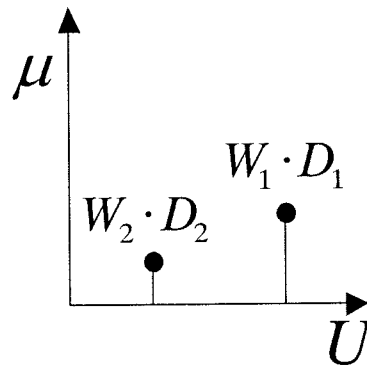


그림 3.3.4.82 Mamdani의 추론입력



Mamdani의 추론결과
그림 3.4.4.83 Mamdani의
singletone 추론방법

(나) Defuzzification

Defuzzification 단계에서는 추론의 결과가 나왔을 때 이를 컴퓨터가 이해할 수 있게끔 명확한 값으로 표현을 해주는 과정이다. 최대값을 이용하는 방법, 최대평균법 그리고 무게 중심법이 있는데 본 연구에서는 일반적으로 우수하다고 알려져 있는 무게 중심법을 사용하였고 방법은 다음과 같이 해당 함수 영역의 넓이의 중심을 구해서 그 값을 결과값으로 사용하는 방법이다.

$$\blacksquare u = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \cdot D_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (\text{식 3.4.4.13})$$

위의 방법을 통해 Defuzzification 한 결과를 나타내어 보았다.

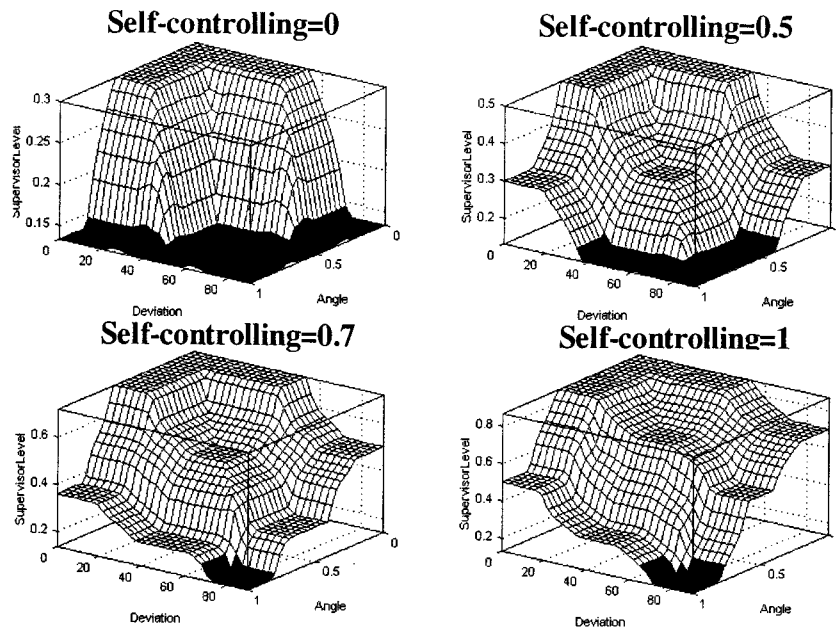


그림 3.4.4.84 Defuzzification 한 결과에 따른 관리 레벨값의 변화

관리 레벨이 0.2 이하 일 경우가 수동제어가 가능하고 0.8 이상일 경우는 완전한 자율주행으로 이뤄진다. 위의 결과를 보면 앞에서 말했던 것처럼 자율정도가 낮으면 작은 머리의 움직임으로 휠체어를 수동적으로 제어를 할 수 있으나 자율정도가 커짐에 따라 수동으로 전환하기 위해서는 큰 모션으로 운동과 더불어 진행방향과 상충되는 영역으로의 움직임이 이뤄져야 수동으로 제어를 할 수가 있다.

(라) 결과적용

Defuzzification은 영역 무게 중심을 이용하는 방법을 사용하였고 그 결과 책임정도가 0.2이하인 경우 완전한 수동 모드이고 0.8이상인 경우는 완전한 자동모드로 선택이 되고 그 사이 영역에서는 반자동 모드가 된다. 수동모드에서의 동작방법은 2장에서 설명한 혼합 제어방법을 사용하였고 자동모드에서의 동작은 3장에서 설명한 가상 힘 반력의 합력을 이용하여 장애물을 회피하는 방법을 사용하였다.

속도 제어에 장애인의 의사를 반영 할 수 있도록 하고자 최초 구동 시 및 장애물이 없는 일반 주행 시에 수동 모드로 넘어오게 되면 그 상태에서 수동적으로 휠체어의 최대속도를 지정해 줄 수 있다. 만약 항상 수동 제어 시 속도가 조절 되게 한다면 장애물로 향하

는 수동모드 주행일 경우 역시 속도의 증가가 일어나 결국 관리제어와 수동제어의 속도 제어간에 충돌이 일어나 바람직하지 않는 경우가 생긴다. 따라서 이를 방지하고자 전방 장애물이 없는 경우의 수동 영역에서만 속도 제어가 되도록 하였다. 그 외 경우 장애물 발견 시 반자동 및 자동 영역에서는 최고 속도를 3가지의 속도로 구분하여 일정거리 이하 장애물에 대해서 자율적으로 제어가 가능하도록 하였다.

그리고 반 자동영역에서의 방향제어는 장애물의 위치에 따른 가상 힘 반력에 의해 구해진 합력의 x축 값에 현재의 관리 값을 곱한 값을 토대로 방향제어를 하도록 다음과 같이 하였다.

$$\begin{aligned} & \textit{Turning value} \\ & = \angle \textit{ of Autonomous}(\textit{by Virtual Force}) * \textit{Supervisor Level} \quad (\text{식 3.3.4.14}) \end{aligned}$$

이러한 방법을 통해 관리정도가 큰 값을 가질수록 휠체어 자체적으로 회전하려는 성질이 크게 되고 쉽게 회전을 할 수 있게 된다. 그리고 장애인을 위한 설정으로써 이 반자동 영역에서의 회전 시 회전에 사용되었던 위의 방향제어 값들이 메모리에 기억을 시키고 본 회전이 모두 끝난 상태 즉 전방에 장애물이 없는 상태가 되면 저장된 방향 제어 값으로 본 회전과 반대방향으로의 회전하기 위한 값으로 사용하도록 하여 원래의 주행 방향으로의 진행이 가능하게끔 하였다.

다. 개발된 로봇 인터페이스 및 알고리즘 실험 및 결과

(1) 실험 장치

(가) 전동 휠체어 시스템

본 연구에 사용되는 휠체어(그림 3.3.4.85)는 뉴질랜드의 다이나믹스사에서 제작된 상용화된 Partner P/W6000 전동 휠체어이다.

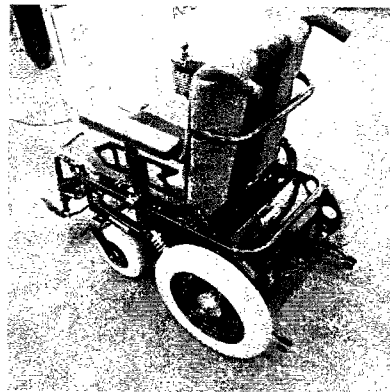


그림 3.3.4.85 다이나믹스사의
전동휠체어(P/W6000)

P/W 6000 전동휠체어는 최고시속 12km/h 이고 중량은 70kg이며 메인 컨트롤러는 마찬가지로 동일 회사에서 제작된 DX 모듈을 사용하고 있다. 조이스틱이 아닌 외부 입력장치와 컨트롤러와의 연결을 위해 별도로 5스위치 모듈을 구입해서 사용하였다

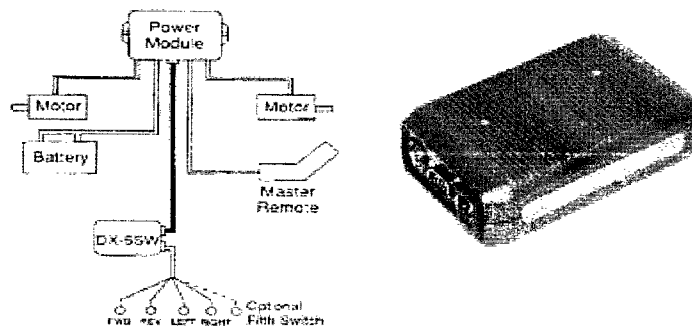


그림 3.4.4.86 5 Switch Module의 외관 및 구성

이를 통해 다양한 방법으로 휠체어를 제어할 수가 있는데 우선 속도를 제어하는데 본 연구에서는 단일 속도 및 속도 프로파일을 3부분으로 나뉘어서 제어하는 방법을 썼다. 또한 신호를 latch시켜 한번의 ON신호만으로 계속 상태를 유지하도록 하는 방법(Latch Mode) 및 계속 ON으로 되어 있어야 동작을 하는 방법(Momentary Mode)이 있는데 어깨를 이용한 입력장치는 momentary 모드를 사용하였고 머리를 이용한 입력장치는 latch 모드를 사용하였다..

(나) 휠체어 구동 컨트롤러

어깨 및 머리 입력장치에서 사용되는 FSR센서의 저항 값 변화량을 얻기 위해 버퍼를 뒤쪽에 단 뒤 다음과 같이 간단하게 전압 분배기를 사용하였다

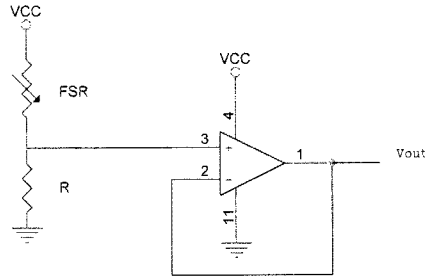


그림 3.4.4.87 FSR의 저항변화를 얻기 위한 전압 분배기

어깨센서는 2개의 아날로그 입력을, 그리고 머리 센서는 4개의 아날로그 입력을 받고 또 추가로 모드변경 스위치의 입력을 하나로 필요로 한다. 본 논문에서 사용되는 마이크로 프로세서는 PIC16F873이라는 ONE Chip 마이크로프로세서로써 사용하기가 편리할 뿐만 아니라 별도의 A/D converter가 필요 없기 때문에 컨트롤러의 크기를 집약화 할 수 있었다.

여기에서 사용되고 있는 PIC 칩의 특성을 보면 우선 3개의 입/출력 포트를 가지고 있고 각 포트별로 8개의 입/출력 단자가 있다. 우리는 여기에서 포트 B를 출력단자로 하여 휠체어를 직접 컨트롤하는데 사용하고 또한 진동모터의 컨트롤 역시 하게 된다.

진동모터는 좌우로 어깨근처에 배열을 하려고 하는데 한 개씩에 그치지 않고 4개씩 일렬로 놓으려고 한다. 이는 마이크로 프로세서에서 3개의 out핀을 사용하여 8bit latch 분배기인 74HC259 의 칩 선택 입력으로 들어가 4개의 핀을 독립적으로 선택을 하면서 latch 시킬 수 있도록 하였다.

또한 좌우 모터의 진동 구별은 PIC 칩에서 나오는 PWM신호와 AND gate를 사용하여 독립적으로 구동 시킬 수가 있다.

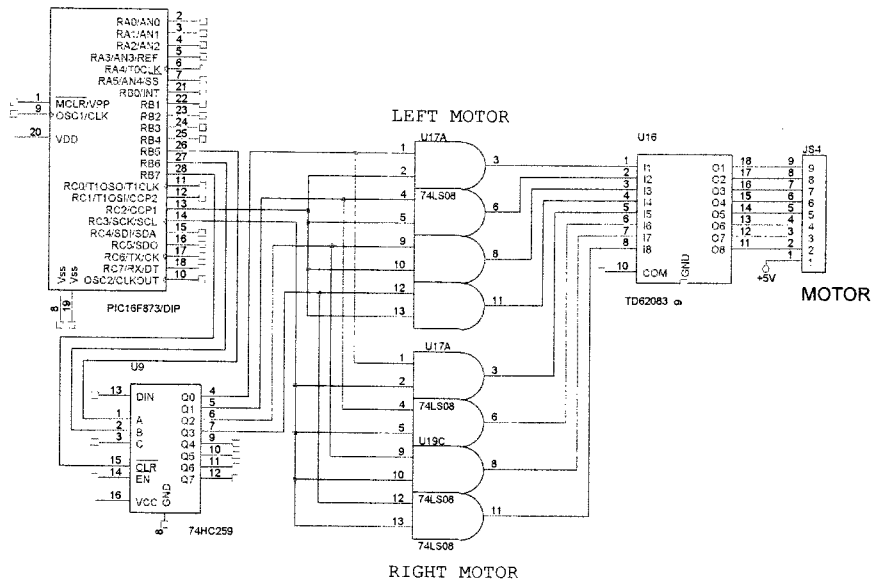


그림 3.3.4.88 8개 진동모터 제어회로

그리고 PIC 마이크로 프로세서에는 10비트의 A/D 컨버터가 5개 내장이 되어있어서 이 5개 아날로그 입력단자에 FSR의 저항 변화에 따른 전압값을 연결하여 디지털로 변화시키도록 하였다.

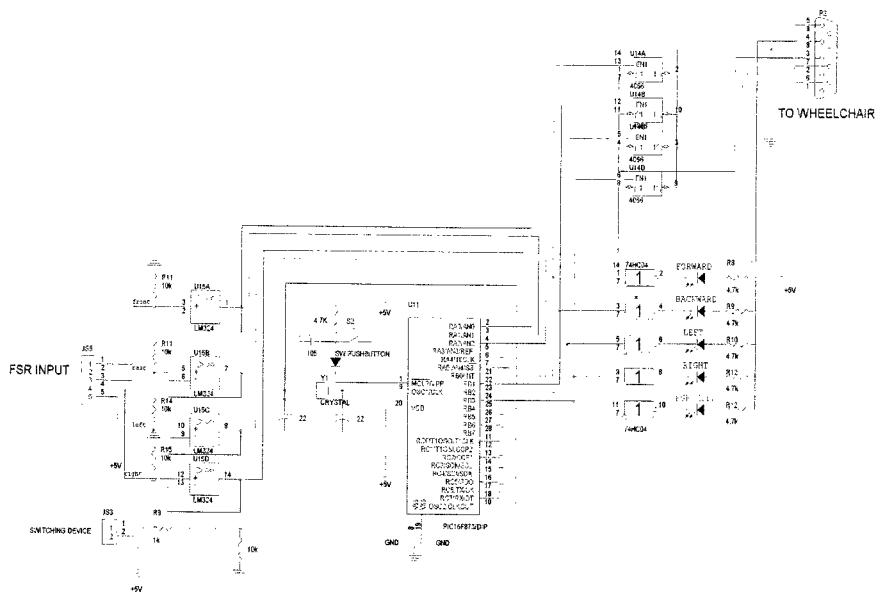


그림 3.3.4.89 FSR센서의 입력 및 휠체어 컨트롤 송신부

휠체어의 주제어 장치로 직접 들어가지 않고 그림 3.4.4.89 에 있는 5스위치 모듈을 통해 제어를 하는데 우린 여기에 신호를 보내 주도록 하였다. 전후좌우에 대한 신호와 나머지 긴급정지 스위치가 동작하도록 회로를 전기적 스위치 기능을 하는 4066칩을 사용하였고 현 휠체어의 속도 상태 및 명령인식여부를 알 수 있도록 전방에 간단한 LED를 붙여서 상태확인이 가능하도록 하였다. 또한 이는 전후좌우뿐만 아니라 현재 자동모드인지 혹은 수동모드인지를 구별할 수 있도록 하여 현재 상황에 대한 확신을 할 수 있는 보조장치의 역할도 수행한다.

(2) 머리 및 어깨 입력장치를 이용한 임상실험

(가) 실험 방법

새롭게 만든 머리 입력장치와 추가적으로 개선한 어깨 입력장치에 대한 유효성을 검증하고 또 나아가 실제로 사용하게 되는 심각한 경수 손상자로부터 피드백을 받기 위해 서울에 있는 국립재활원에서 현재 재활 치료를 받고 있는 경수손상 장애인들을 대상으로 임상실험을 수행하였다. 피실험자는 전체 6명의 C3, C4 경수손상을 입은 성인 남성들로 구성되어 있으며 20대에서부터 50대에 이르기까지 다양한 연령으로 분포되어 있다.

그들 중 4명은 전동휠체어를 보유하고 있었으나 실질적으로 사용하고 있는 사람은 한명 밖에 없었고(그 분은 C4 손상자였으나 손목의 움직임이 가능하여 조이스틱의 변형장치를 사용함) 나머지는 입력장치가 적절치 못해 계속 연습은 하고 있으나 원활하게 사용할 수가 없다고 하였다.

실험 순서는 우선 각각의 입력장치에 대한 기본적 구동설명을 한 뒤 입력장치를 착용하고 교시신호를 발생하는 연습을 하였다. 어느 정도 익숙해진 상태에서 아래와 같이 주어진 경로를 따라가게 하도록 하여 전체 소요시간 및 경로를 벗어난 횟수를 측정하였고 최종적으로 장치에 대한 설문조사를 수행하였다.

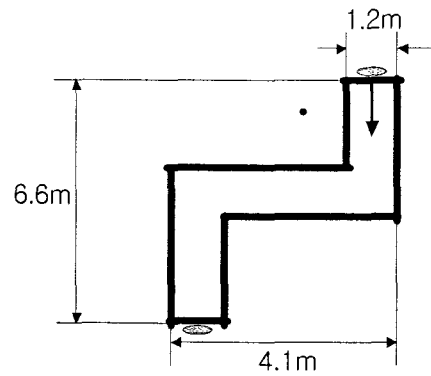


그림 3.3.4.90 임상 실험을 위한
주행경로

(나) 실험결과

주행 실험 결과를 다음의 표 3.3.4.5 과 표 3.3.4.6 에 정리하였다.

표 3.3.4.5 Experimental result of head interface

Subject	1	2	3	4	5	6	Avg	Normal
Elapsed Time(sec)	/	45	42	58	92	120	71.4	21
Number of Collision	/	2	0	2	2	5	2.2	0.5
Recognition rate(%)	/	80	80	65	80	60	73	85

표 3.3.4.6 Experimental result of Shoulder Interface

Subject	1	2	3	4	5	6	Avg	Normal
Elapsed Time(sec)	/	34	30	113	/	28	51.3	21
Number of Collision	/	2	3	2	/	1	2	0.5
Recognition rate(%)	/	80	65	55	/	80	70	85

위의 장애인에 대한 결과를 정상인과 비교해 보기 위하여 정상인이 기존의 입력 장치인 조이스틱을 사용하여 같은 주어진 경로를 주행하는데 걸리는 시간을 측정해본 결과 평균 주행시간 21 초 평균 경로이탈 횟수 0.5회 이었다. 결국 정상인과 비교해보면 장애인은 3 배 정도 시간이 더 걸렸고 경로이탈 역시 4배 정도 많이 발생함을 알 수 있었다. 그렇지만 일반적으로 경수 손상자들이 새로운 입력장치를 가지고 휠체어를 구동시키기 위해 그 장치에 익숙해 있어야만 되는데 본 실험에서는 단지 불과 몇 분의 연습만으로 주행테스트를 했기 때문에 최적화된 결론이라고 볼 수는 없다는 것을 인지해야만 하고 짧은 시간에 어느 정도 적용한 사실을 높이 평가할 수 있다. 그리고 이들 심각한 경수 손상 장애인들은 그 전에는 전혀 이러한 주행을 할 수 없었는데 반해 이 장치를 통해 그나마 움직일 수 있는 부위를 최대한 활용하게 되어 보조자의 도움이 전혀 없이도 전동휠체어를 제어할 수 있음에 그 가치가 있었다. 입력장치의 인식률은 피실험자가 방향전환이나 그 외 자기가 하고자 하는 바를 입으로 표현함과 동시에 움직임을 취해 그때 원하는 동작으로 휠체어가 구동하는지를 확인함으로써 얻어진 값으로 두개의 장치 모두 평균 70%를 웃돌았는데 좀 더 개선의 여지를 남겨두었다.

위의 도표에서 실험에서 제외된 대상이 몇 분 있었는데 머리입력장치의 경우 첫번째 피실험자는 머리의 좌우(roll angle)운동을 제대로 할 수 없었기 때문에 회전이 불가능하였고 어깨입력장치의 경우 첫번째와 다섯번째 피실험자는 좌우 어깨의 움직임을 독립적으로 원활하게 움직일 수가 없어 회전이 불가능하였기 때문에 본 실험대상에서 제외할 수 밖에 없었다. 결국 이러한 장애인을 위한 입력장치의 경우 각각의 장애정도와 운동가능영역에 적당한 특화 된 장치를 사용할 수 밖에 없기 때문에 이러한 입력장치가 모든 장애인을 위한 장치 라기 보단 특수한 목적에 부합되는 장치를 제작하여야 됨을 알 수 있었다.

(다) 설문조사 결과

주행실험을 마친 후 피실험자들을 대상으로 설문조사서를 통해 장애인들의 본 입력장치 및 휠체어 구동 방법에 대해서 설문 조사를 실시 하였다. 그 결과를 다음의 그림 3.3.4.91 과 그림 3.3.4.92에 표시하여 놓았다.

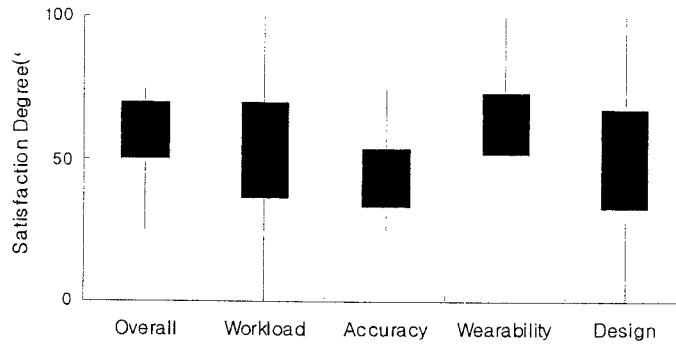


그림 3.3.4.91 머리입력장치에 대한 설문조사결과

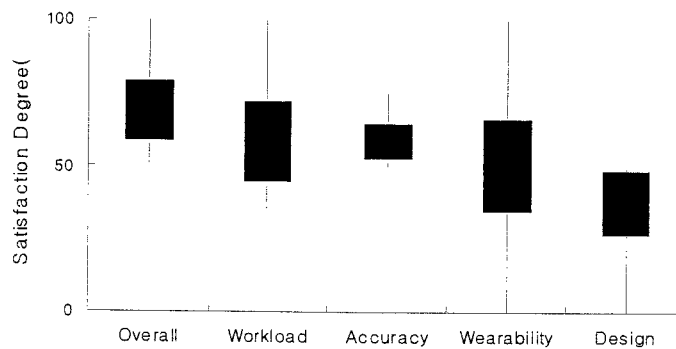


그림 3.3.4.92 어깨입력장치에 대한 설문조사결과

결과를 보면 전반적으로 두 장치에 대해서 만족하는 수준(평균 70%)이었지만 머리입력 장치의 경우 상대적으로 개선의 여지를 남겨놓았다. 구동하기 위해 소요되는 힘(=workload) 같은 경우 머리입력장치의 경우 넓게 분포하는 것은 좌우의 움직임(roll)에 의외로 주변근육의 운동이 꽤 필요하기 때문인 것으로 드러났다. 모자의 경우 착용하는 것이 매우 쉬웠지만 어깨 벨트의 경우 초기타입으로 제작되다 보니 불편하다고 하는 분도 꽤 있었으며 디자인 역시 마찬가지였다. 하지만 어깨장치에 많은 호감을 보였는데 이는 일반인들이 착용하는 자연스러운 장치를 통해 타인으로부터 이상한 장치를 씌으로써 집중 받는 것을 피할 수 있기도 하고 또한 거추장스럽지도 않기 때문에 많은 개선점을 찾게 되면 아주 유용할 것이라는 결론을 낼 수 있었다. 전반적으로 보았을 때 아직 많은 개선점을 남겨놓고 있는 것은 사실이다. 그렇지만 아무리 완벽하게 동작하는 장치를 만들었다 할지라도 약간의 움직임에 힘들어 하는, 그리고 자기가 원하는 바대로 원활하게 신체의 움직임을 표현하지 못하는 경우가 빈번한 이들 심각한 경수손상자의 경우 단지 완벽한 입력장치의 사용만으

로는 홀로 독립적인 주행을 할 수 없음을 알 수 있었고 이를 해결하기 위해 5장에서 말하는 관리제어를 적용하여 장애인의 부족한 운동능력을 보완하도록 해결하고자 하였다.

(3) Smart wheelchair 의 다양한 장애물 회피 실험

(가) 실험방법

개발한 머리입력장치와 구현된 장애물회피 알고리즘 그리고 관리 제어기법을 혼합하여 다양한 장애물 회피가 가능한가를 알아보기 위해 먼저 시뮬레이션을 수행해 보았다. 실제와 똑 같은 환경을 유지하기 위하여 거리 정보는 단지 센서가 달린 위치에서부터 장애물까지의 거리를 벡터로 계산하였고 휠체어가 non-holonomic하기 때문에 좌우 양쪽 바퀴의 속도제어를 통해 전체의 움직임을 제어하도록 하였다. 즉 휠체어 양쪽 바퀴의 속도를 V_L , V_R 이라 했을 때 휠체어의 진행방향 선속도와 각속도는 각각

$$V = \frac{V_L + V_R}{2}, \quad W = \frac{V_R - V_L}{D} \quad (\text{식 3.3.4.15})$$

가 된다.

결국 휠체어 구동 입력신호는 좌우 바퀴의 속도가 되는데 자율적 장애물회피 방법에서는 아래그림에서 처럼 전방 장애물이 50cm ~ 100cm 내에 들어왔을 때 가상의 반력의 합을 통해 그 방향을 (식 3.3.4.15) 에서 구한

$$F_R = \sum F(i, j) = \sum \frac{CV(i, j)}{d^2(i, j)} \left[\frac{x_i - x_o}{d(i, j)} x + \frac{y_i - y_o}{d(i, j)} y \right] \quad (\text{식 3.3.4.16})$$

에서 x 값을 이용하여

$$V_L = \text{velocity (function of distance)} + a \times F_{RX}$$

$$V_R = \text{velocity (function of distance)} - a \times F_{RX}$$

(식 3.3.4.17)

만약 $F_{RX} > \beta$ 일 경우 제자리 회전을 하도록

$$V_L = a \times F_{RX}$$

$$V_R = -a \times F_{RX}$$

(식 3.3.4.18)

의 값을 가지도록 한다.

여기에서 velocity는 그림 3.3.4.93 에서와 같이 3단계의 속도로 단순화 시켜서 구동하도록 하였다.

마찬가지로 수동입력에서도 머리의 움직임에 의해 발생하는 deviation angle(θ)를 측정하여 0~1사이로 값을 normalization 한 뒤

$\theta < 0.7$ 일 경우

$$V_L = \text{velocity (function of distance)} + \beta \times F_{RX}$$

$$V_R = \text{velocity (function of distance)} - \beta \times F_{RX}$$

(식 3.3.4.19)

$\theta > 0.7$ 일 경우 (제자리 회전)

$$V_L = \beta \times F_{RX}$$

$$V_R = -\beta \times F_{RX}$$

(식 3.3.4.20)

이 되도록 하였다.

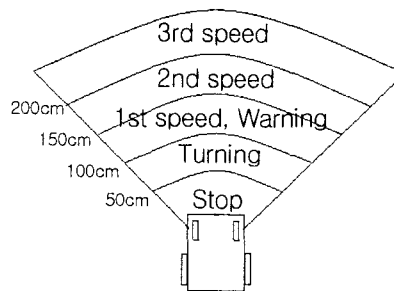


그림 3.3.4.93 장애물의 거리에 따른 휠체어의 구동상태

(나) 모의 실험 및 결과

OpenGL 을 사용하여 그래픽 환경을 구현하였고 실제와 똑 같은 환경을 구현하기 위해 현재의 어떠한 위치정보도 모르고 단지 전방에 달려있는 초음파 센서에 의해서만 외부 정보를 알 수 있도록 하였다. 또한 등받이에 달려있는 진동모터의 구동효과를 확인하기 위해 화면 하단 좌우에 하나씩 LED를 점멸하도록 하였다. 결과적으로 실제 상황보다 거리 정보가 100% 정확해 진다는 것 말고는 모든 상황이 똑같도록 하였다. 그 화면 구성은 그림 3.3.4.94 와 같은데 오른쪽 하단은 머리 입력장치의 움직임을 정규화 한 값에 의해 뿌려지

는 화면이고 그 위에 있는 막대 그래프는 현재의 관리자 레벨을 좀더 빨리 볼 수 있도록 하기 위한 것이다. 그 외 상단의 텍스트들은 현재 거리정보와 휠체어 상태등을 표시하도록 하였다.

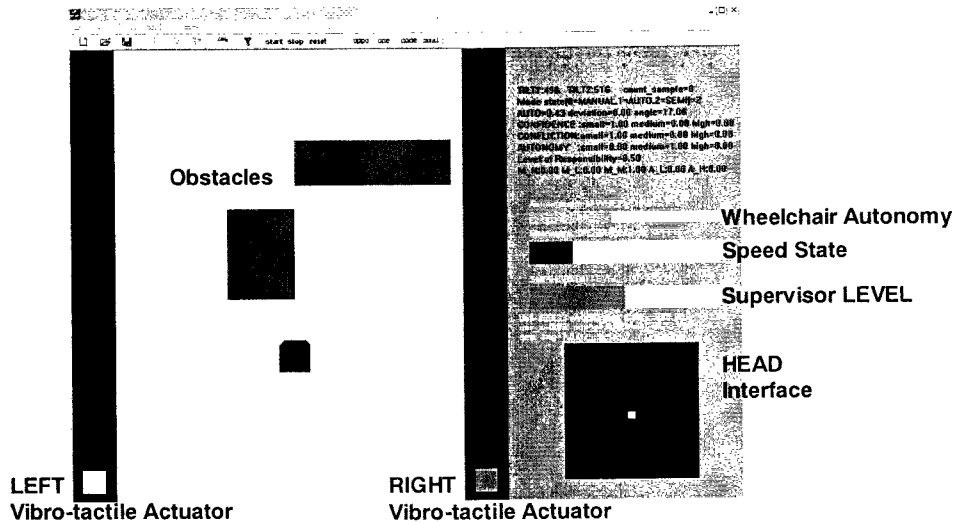


그림 3.3.4.94 Smart Wheelchair 시뮬레이션 환경

그림 3.3.4.94에서 말한 바와 같이 일반적으로 전방에 장애물이 있을 시 휠체어는 4가지 방법으로 그 장애물을 피할 수 있다. 결과 그래프에서 * - 은 관리레벨을 나타내는 선으로 그 값이 0~1 사이를 가지고 선 위에 -이 찍힌 것은 현재 휠체어의 상태를 나타낸다. 그 값의 의미는 다음과 같다.

표 3.3.4.7 Wheelchair state 값의 의미

wheelstate	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0
의미	3단계속도	2단계속도	1단계속도	우측진동 모터구동	좌측진동 모터 구동	회전	정지

그리고 마지막으로 거리는 전방향 센서로부터 장애물까지의 거리 중 가장 짧은 값을 나타내도록 하였다.

① 휠체어 독자적으로 장애물 회피 후 그대로 직진하는 경우

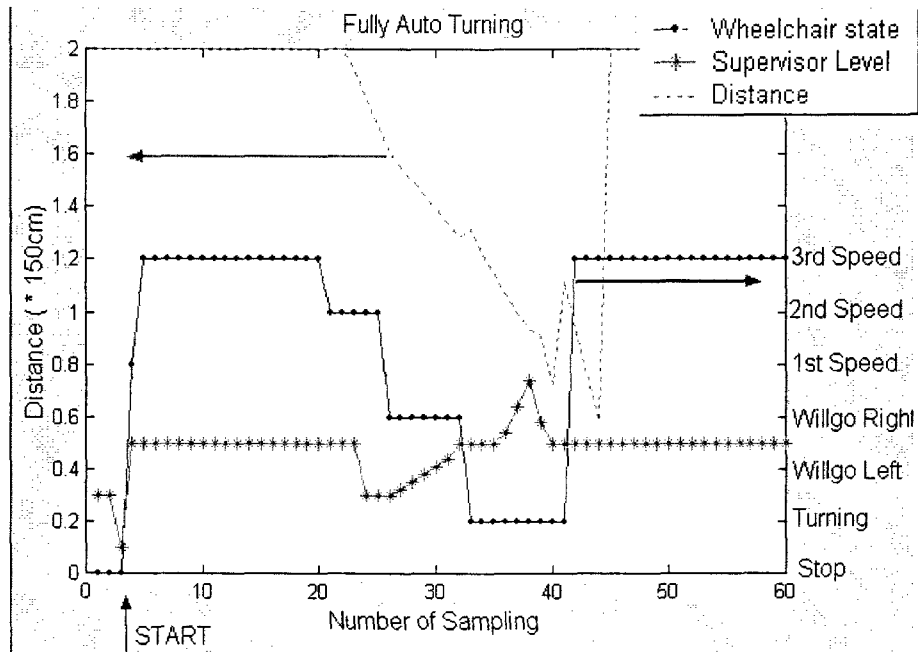


그림 3.3.4.95 장애물 회피 후 그대로 직진하는 경우 결과

- A. 최초 정지상태(관리레벨=0.3)에서 머리입력장치를 이용하여 구동
- B. 전방 장애물 없으므로 3단계 속도로 주행
- C. 좌측 전방에 물체를 발견하면서 단계적으로 속도 감소
- D. 오른쪽으로 회전하려는 의도를 장애인에게 진동모터로써 알림과 동시에 관리레벨이 사용자에게로 내려감(관리레벨=0.3)
- E. 아무런 입력이 없게 되면 관리레벨 값이 증가함과 동시에 서서히 회전 값이 커지게 되고 결국 오른쪽방향으로 회전

Direction = Angle of Autonomous(by 가상 힘 반력의 합)* Supervisor Level

② 정면에 있는 장애물에 가까이 가서 정지하고자 할 때

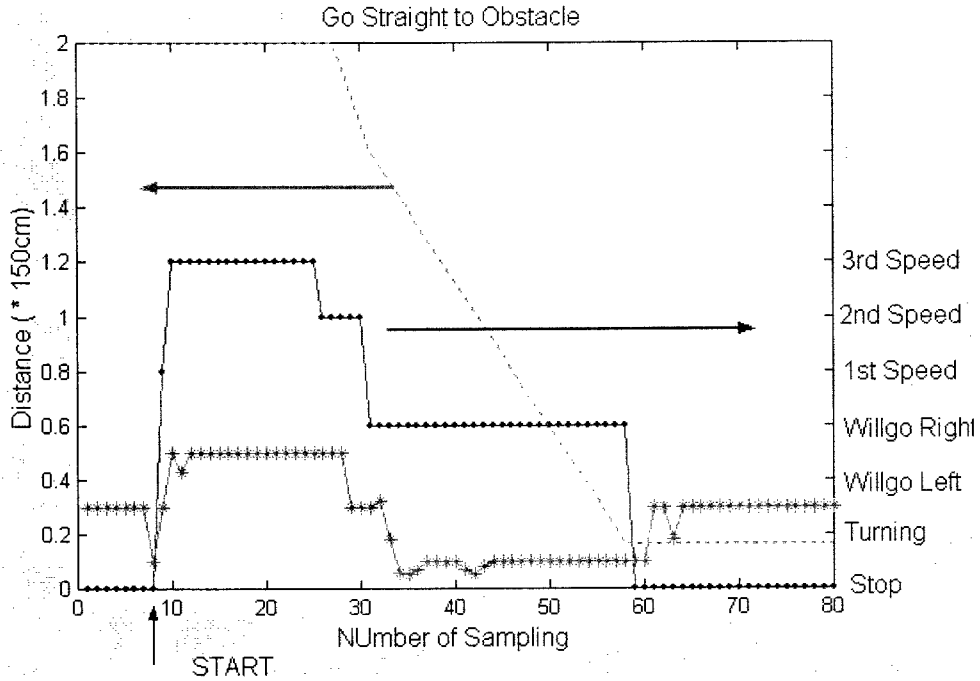


그림 3.3.4.96 장애물에 가까이 가서 정지할 때의 결과

- A. 위의 A, B, C, D 와 같은 단계를 거침
- B. 이때 전방을 향해 고개를 많이 숙이게 되면 관리레벨의 급격히 감소하게 되고 수동 모드로 전환, 결국 회전이 일어나지 않음
- C. 계속 해서 전방으로 진행하다가 정지영역에 해당되었을 때 비로서 휠체어가 정지(관리레벨=0.3으로 초기상태로 복귀)

③ 휠체어 회전과 반대방향으로 회전을 하고자 할 때

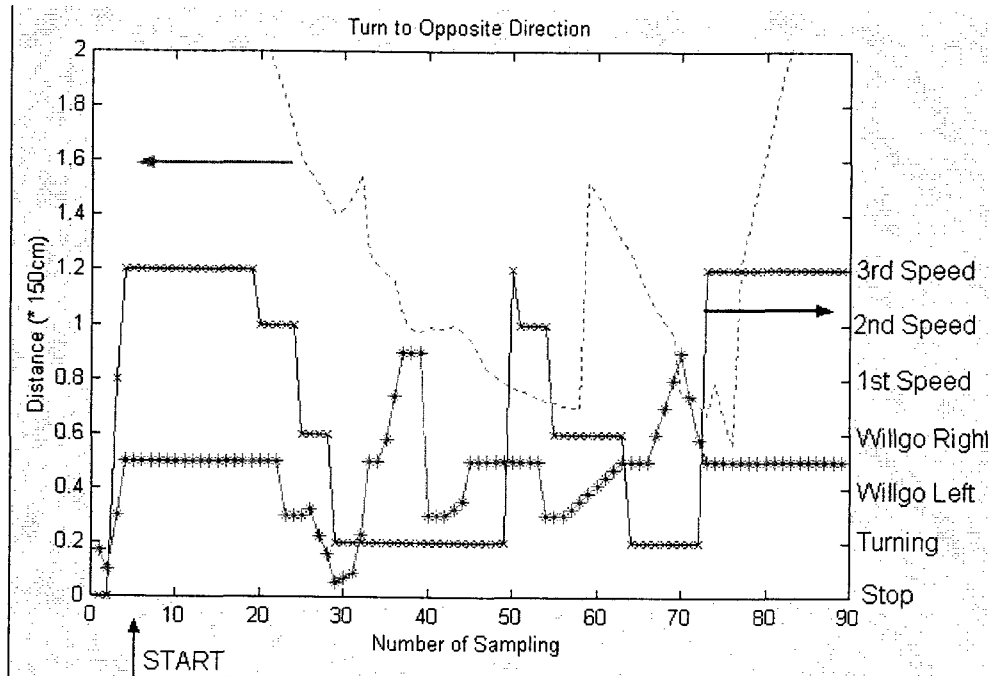


그림 3.3.4.97 휠체어가 의도한 방향과 반대방향으로 회전한 결과

- A. 위의 A, B, C, D 와 같은 단계를 거침
- B. 반대방향으로 머리입력장치로 신호를 가하면 관리레벨이 떨어지면서 수동 전환
- C. 머리의 원위치와 더불어 관리레벨이 증가하면서 계속해서 같은 방향으로의 회전이 진행
- D. 회전이 끝나고 관리레벨이 0.5로 된 상태에서 다시 ①의 자율 회전 과정을 수행한 결과를 나타냄

④ 장애물을 피한 뒤 원래의 진행방향으로 다시 진행하도록 할 때

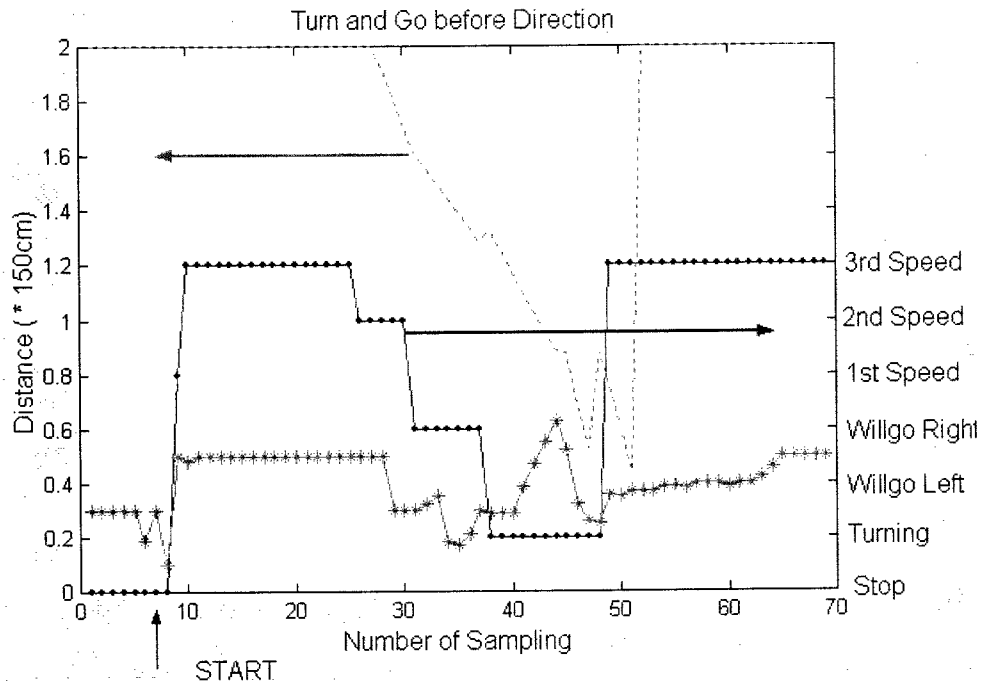


그림 3.3.4.98 전방 장애물 회피 후 다시 원래방향으로 주행하는 결과

- A. 위의 A, B, C, D 와 같은 단계를 거침
- B. 머리를 적당히 앞으로 숙이게 되면 관리레벨이 외부 장애물과의 거리에 따라 0.2~0.8 사이를 오가면서 semi영역에 위치하게 됨
- C. 회전이 진행되면서 그 회전 값들이 메모리에 기억이 되고 회전이 끝난 뒤 전방 장애물이 없을 때 다시 반대방향으로 메모리에 기억이 된 값만큼 회전

(다) 휠체어 주행 실험 결과

시뮬레이션을 수행한 결과를 토대로 같은 방법으로 실제 휠체어 시스템 구동에 적용을 하였다. 마찬가지로 입력장치는 머리입력장치를 사용하였고 본 실제 주행에서는 과연 이러한 관리제어기법이 장애인에게 얼마나 도움을 주는지에 대해 초점을 맞춰서 그 결과들을 분석하여 보았다.

가장 극명하게 대조되는 주행방법 ④를 순수한 수동제어를 통해 구동하는 것과 위의 관리제어 방법으로 구동하는 것과의 차이를 알아보고자 하였는데 먼저 수동주행의 결과를 다음 그림 3.3.4.99에 나타내었다.

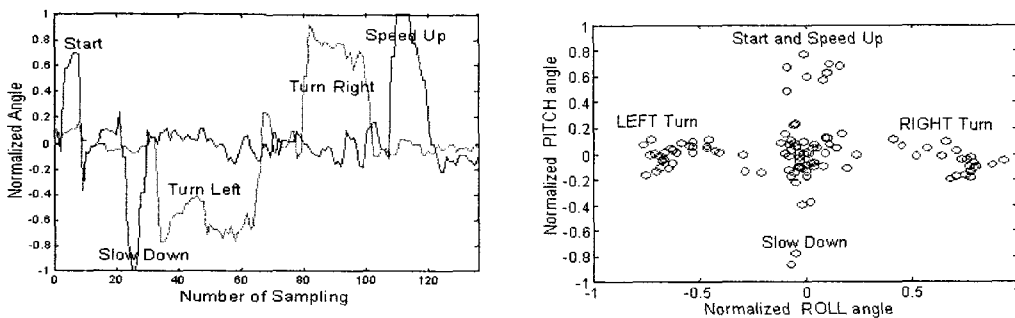


그림 3.3.4.99 수동제어를 이용한 장애물 회피 결과

일반적으로 장애인이 주행도중 전방에 장애물을 발견하였을 시 취하는 순서는

- ① 속도를 적절히 감소
- ② 적정 위치에서 장애물 회피를 위한 회전
- ③ 원래 방향으로 다시 회전
- ④ 원래의 속도로 증가

위의 순서대로 진행하기 위해 머리입력장치를 사용한 결과가 바로 그림 3.3.4.100이다. 먼저 출발 신호를 보내고 속도를 줄이기 위해 머리를 뒤로 하고 방향전환이 두 번, 다시 원래 속도로 주행을 하기 위해 앞으로 고개를 숙이는 머리의 전반적 움직임 과정을 나타낸 것이다.

이에 반해 관리제어를 수행하여 똑 같은 장애물 회피 작업을 수행한 결과가 다음의 그림과 같다.

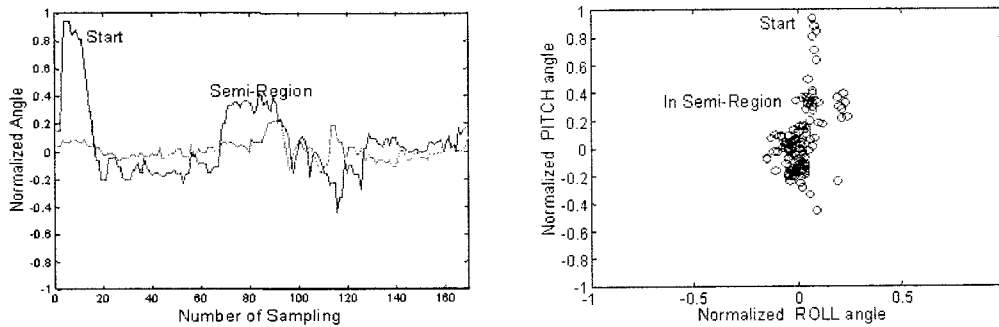


그림 3.3.4.100 관리제어를 이용한 장애물 회피 결과

위의 그림에서 보면 장애인이 해야 되는 일은 출발 신호 후 단지 머리를 적당한 영역의 전방에 위치만 하고 있게 되면 된다. 그러면 앞서 말한 관리제어의 semi영역에서 동작으로 인해 원하는 방향으로 갈 수가 있다. 위의 두 제어 방법에 따른 비교자료를 다음과 같이 표로 만들어 보았다.

표 3.3.4.8 수동제어와 관리제어의 장애물 회피 비교결과

내 용	수 동 제 어	관 리 제 어
끄덕임 회수	4	1
최대각의 0.5구간 이상에 머문 비율(%)	56%	6%
도달시간(sec)	20	25

먼저 머리가 최대 움직일 수 있는 영역까지를 1로 두었을 때 그 움직임 가능한 절반 이상의 구간에서는 피로가 빨리 온다고 가정할 수 있다. 수동제어 방법에서 위의 주행을 하기 위해서는 전체 136번의 샘플링 구간 중 76번이 최대 가능영역의 절반 이상의 구간에 놓여있었는데 비해 ($76/136=0.56$) 관리제어 방법을 사용하였을 때에는 전체 170번의 샘플링 횟수 중 단지 11번만이 해당영역에 놓여 있음을 알 수 있었다. ($11/170=0.06$) 또한 매 샘플링 마다 해당 점까지의 거리를 적분 해본 결과 수동제어 시 17.14 였고 관리제어에서는 10.53으로 역시 절반 정도 움직인 거리가 줄어들 수 있었다. 다만 도달 영역까지 소요되는 시간은 20초 대 25초로 상대적으로 조금 느린 결과를 얻었다.

또 다른 실험으로 일반적으로 전방에 장애물이 없을 경우 즉 관리제어 방법에서 관리레벨이 0.5 일 경우에 해당할 때 과연 얼마나 불필요한 신호를 잘 걸러내는가, 즉 장애인에게 주행 중 자율성을 어느 정도 부과할 수 있을 것인가를 확인해 보고자 다음의 결과를 얻어보았다.

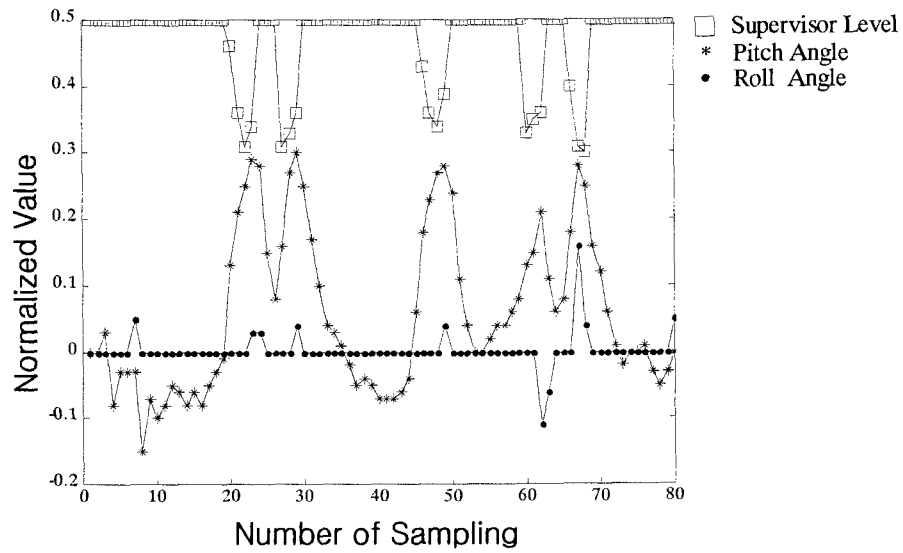


그림 3.3.4.101 일반주행시 외란(=장애인의 기본적 움직임)제거 정도

머리를 약간 앞으로 구부리거나 대각선으로 움직일 때의 결과인데 관리레벨에서 보다시피 수동 영역인 0.2 이하로 내려가는 일이 없기 때문에 전혀 휠체어의 교시신호 인식되지 않는다.

5. Hand-held Master의 개발

본 연구에서는 인간친화성(Human Friendliness)을 가진 Hand-held Master의 각종 센서의 조합에 따른 여러 가지 시제품을 개발하고 이의 성능평가를 수행하였으며, 개발된 Hand-held Master에 특화된 Master-slave 제어알고리즘을 개발하여 이를 테스트하고, 각종 적용방안을 도출하였다. 다음은 각 시제품에 대한 자세한 설명과 평가결과 및 master-slave 제어알고리즘에 대하여 설명한 내용이다.

가. Hand-held Master의 시제품 개발

(1) Hand-held Master의 개념

Hand-held master는 master-slave 작업에 있어서 1) 가속도계, 자이로, 마그네틱 센서, 초음파센서 또는 카메라를 이용하여 master의 6차원 자세를 실시간으로 획득하고 이를 이용하여 2) 가상 또는 실제의 로봇과 물체의 운동을 지시하고 그로부터 얻어지는 3) 힘의 피드백정보를 master의 진동으로 나타내어 사용하기 편리하고 직관적인, 닫힌 루프 제어를 가능하게 하는 일종의 입력장치이다. 그림 3.3.5.1은 Hand-held master의 구성개념도를 나타내고 그림 3.3.5.2는 Hand-held master의 활용개념도를 나타낸다.

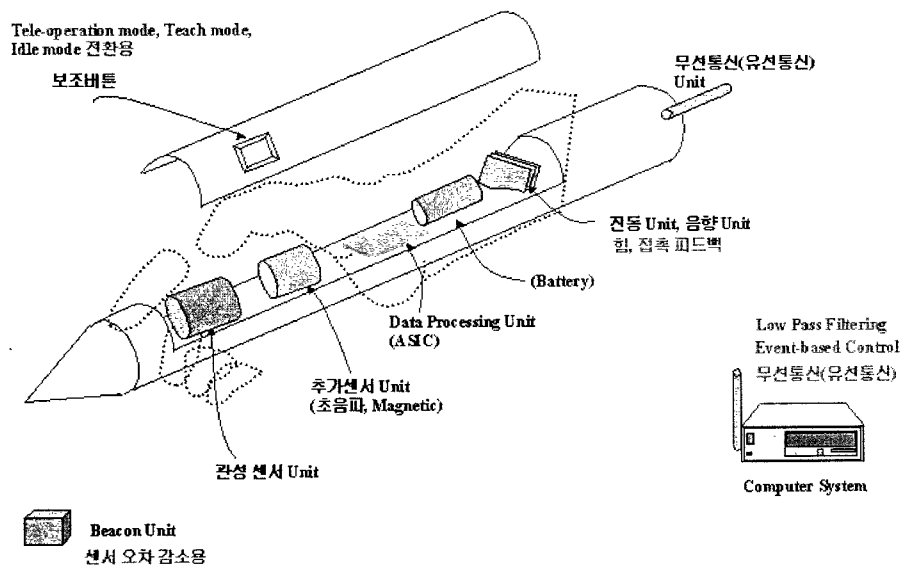


그림 3.3.5.1 새로운 입력장치 개념도

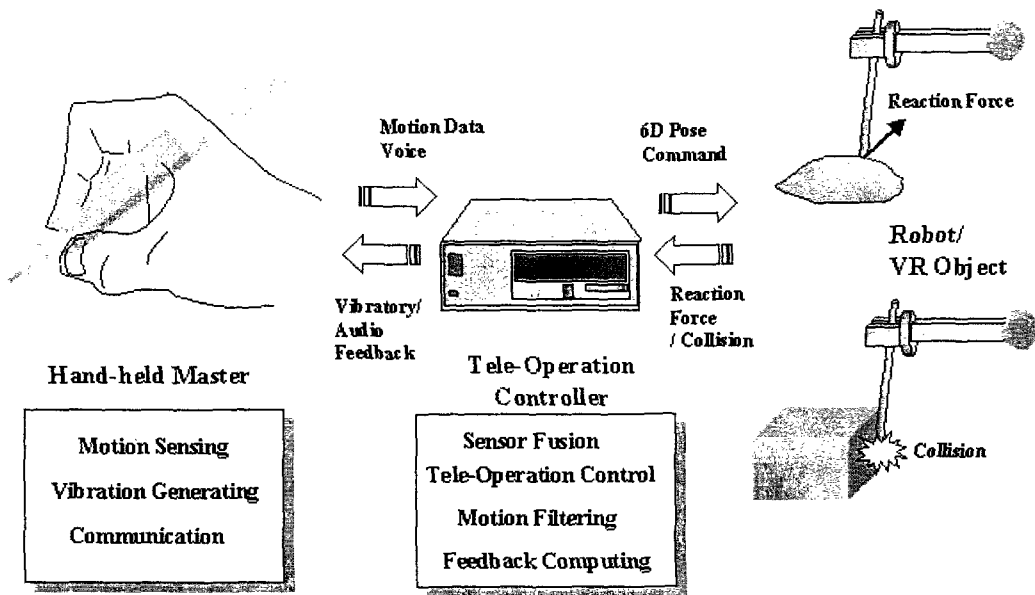


그림 3.3.5.2 Hand-held Master 활용 개념도

Hand-held master는 6차원 운동명령을 직접 내릴 수 있으므로 로봇운동의 직관적인 지시가 용이하고, 구조가 매우 간단하고, 작업공간의 제한이 없고, 저가형으로 만들 수 있고, 안전성을 확보할 수 있고, 힘 및 접촉피드백 정보를 사용할 수 있다. 또한, 특이점이 존재하지 않고, 작업공간의 제한이 거의 없으며 입력장치의 Manipulability가 무한대이다. 그림 3.3.5.3은 Hand-held master 시스템구성의 한 예를 나타낸다.

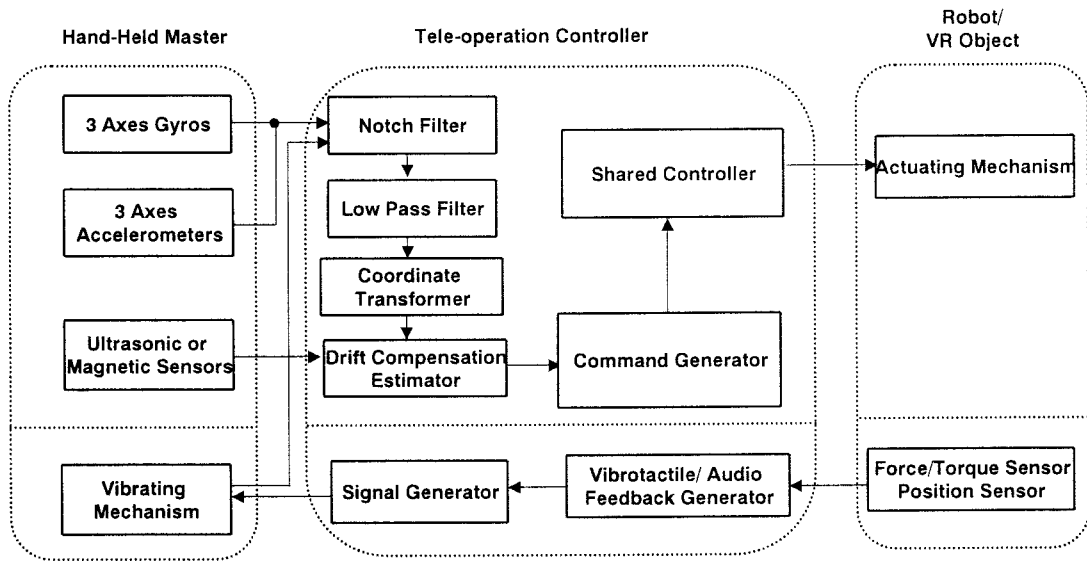


그림 3.3.5.3 Hand-held Master 시스템의 구성 예

이러한 Hand-held master를 실제로 사용하기 위해선 정확한 위치 및 자세를 구하는 것이 가장 중요하다. 다음은 이를 구하기 위한 기초적인 수학적 배경 및 모델링을 설명한다.

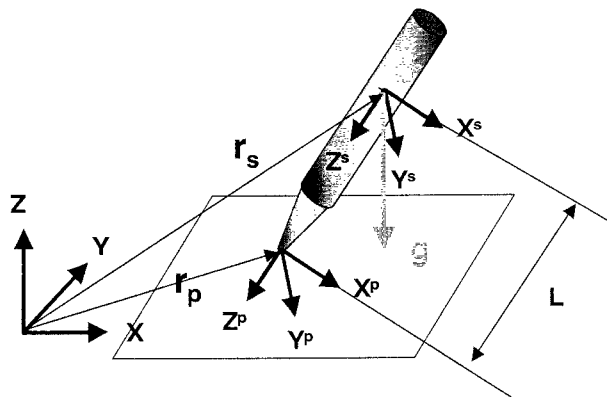


그림 3.3.5.4 Master의 고유 좌표계와 중력 좌표계

본 연구에서는 2개의 상이한 좌표계를 사용한다. 하나는 Hand-held Master 고유의 좌표계로서 그림 3.3.5.4에서 보듯이 (X_s, Y_s, Z_s) 는 샤프트 중간을 기준으로 하는 좌표계이며, (X_p, Y_p, Z_p) 는 master의 끝부분을 의미하며, 마지막으로 (X, Y, Z) 는 실제 master가 따라 움직이게 되는 평면을 나타내며 중력 좌표계로 표시된다.

Hand-held Master를 통해 얻어진 데이터들은 다음의 수행 알고리즘을 통해 최종적으로 움직임과 Hand-held의 위치를 알아내게 한다.

- INITIAL SLANT ANGLE: 초기 경사각 측정 부분에서는 master의 기울어진 초기 각도를 계산한다. 초기 Master가 움직이지 않는 상태에서 3개의 서로 다른 가속도계 센서를 이용하여 구해진 속도변화량을 이용하여 중력 좌표계에서 표현되는 값으로 초기 치를 설정한다.
- SLANT ANGLE: 이 부분에서는 3개의 서로 다른 자이로스코프를 이용하여 master의 기울어진 경사각의 변화량을 측정한다. Master는 손을 따라 움직이게 되며, 이 때 자이로를 이용하여 변화량을 측정한 다음 그 값을 중력 좌표계로 표현한다.
- Coord. Transform: Master의 고유 좌표계를 중력 좌표계로 변환시킨다. 변환시키는 과정은 다음의 알고리즘을 이용한다.

$$\begin{pmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \phi & \sin \phi \sin \theta \cos \phi + \cos \phi \sin \phi & \cos \phi \sin \theta \cos \phi + \sin \phi \sin \phi \\ \cos \theta \sin \phi & \sin \phi \sin \theta \sin \phi + \cos \phi \cos \phi & \cos \phi \sin \theta \sin \phi + \sin \phi \cos \phi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix}$$

- Accelerometer at Tip: 이 부분에서는 3개의 가속도계를 이용하여 master의 고유 좌표계를 통해 얻어진 가속도량을 master의 경사각을 기본으로 하는 중력 좌표계로 변환시킨다.
- Movement: 이 부분에서는 Master의 끝이 움직인 방향과 움직인 거리를 계산한다. 네 번째 단계에서 구해진 가속도량을 가지고 실제 거리를 구하게 된다. 움직인 거리는 Master이 쓰여지는 평면이 완벽한 2차 평면이 아닌 경우라도, 좌표 변환을 통해 움직인 양과 거리를 보상하여 계산하면 된다.

(2) Hand-held Master 1차시제품

본 연구에서 최초로 제작된 1차시제품(그림 3.3.5.5, 그림 3.3.5.6)은 다음과 같다.

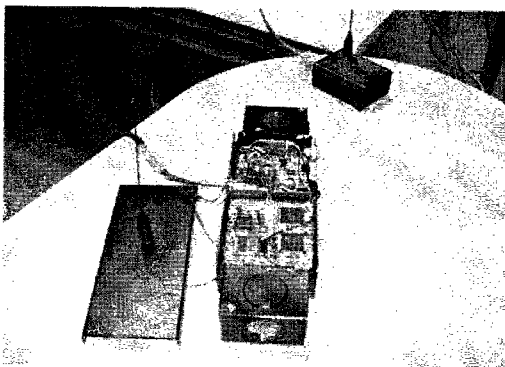


그림 3.3.5.5 1차시제품 외관

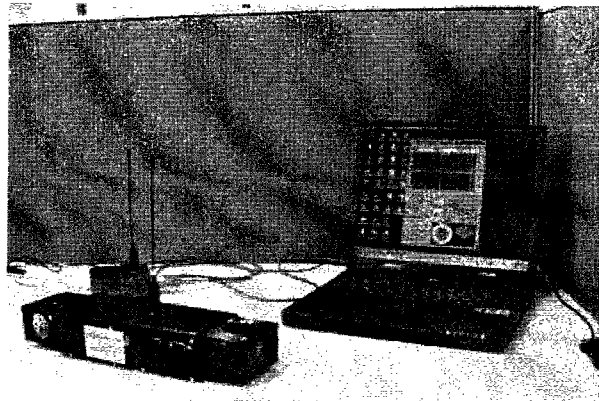


그림 3.3.5.6 1차시제품 테스트

1차 시제품은 일단 크기를 고려하지 않았으며 가능한 센서는 대부분 사용하여 한계를 알기 위한 테

스트베드의 성격이 강했다. 1차시제품은 가속도센서(ADXL202), 자이로(Murata Enc05E), 초음파센서 모듈 (Polaroid Sigma 6500)을 채택했으며, 크기는 100mm X 340mm X 56mm로 한 손으로는 쥘 수 없을 정도로 큰편이었고, 관성센서 및 초음파센서를 이용한 6차원 자세인식기능을 가지고 있다. Hand-held master의 기능 중, 진동피드백 기능은 포함되지 않았다. 데이터획득 Bandwidth는 100Hz이상으로 안정적이었다. 작업공간은 1m X 1m X 1m이고, 정확도는 10mm이하, 1deg 이하 목표사양으로 제작되었다.

하드웨어는 DSP 보드, Power 보드, IO 보드, 센서보드, TMS320C31로 이루어져 있다. DSP는 TMS320C31을 사용하였고, 2CH Serial 통신이 구현가능하며, 1MX32bit RAM과 1MX8bit Rom, Keyboard Controller, LCD(128X64) Controller이 장착되어 있다. Power 보드는 12-5 (4A) Processor 용과 12-5 (1A) Sensor 용으로 구성되었다. IO 보드는 6CH PWM Generator, 6CH PWM Checker, 8CH AD Converter(14bit)이 장착되어 있으며 4CH Serial 통신이 구현가능하다. Sensor 보드는 2개의 2CH Accelerometer (ADXL202), 2개의 2CH Gyroscope (Murata Enc05E), 3CH Magnetic Sensor (Honeywell Hmc1001 and 1002), 6개의 초음파센서모듈 (Polaroid Sigma 6500)이 장착되어 있다. (그림 3.3.5.7참조)

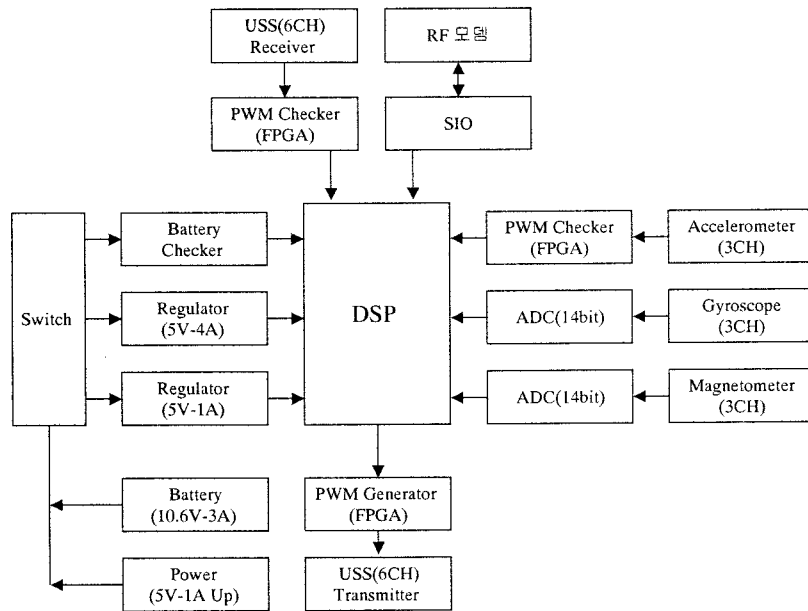


그림 3.3.5.7 1차시제품의 구조 개념도

1차시제품은 초기에 제작되었으므로 많은 센서를 포함시켰으며 안정적인 데이터를 송신하는데 성공하였다. 그러나 큰 크기를 가지고 있으므로 본연구에선 이후 시제품에서 크기를 줄이고 같은 기능을 구현하는데 초점을 맞추었다.

(3) Hand-held Master 2차시제품

2차시제품은 초음파센서를 이용하여 거리를 측정함으로써 가속도계의 가속도 이중적분으로 인한 에러누적을 피하였으나 초음파센서를 사용하기 위한 외부 틀이 필요하는등 제한점을 가지고 있다. 한편 2차시제품에서는 Low Pass Filter, High Pass Filter, Notch Filter 등의 각종 필터링을 수행하였다.

(가) 2차시제품의 구조 및 기능

Hand-held Master 2차시제품은 3축가속도계, 3축Gyro, 초음파센서, 마그네틱센서, Vibration Motor로 이루어져 있다. Master의 CPU로는 Microprocessor를 사용하였고, HOST PC에선 Windows Based User I/F를 사용하였으며 SW기반의 여러 가지 Filtering (Hand Tremor Notch, Low Pass, High Pass)을 수행하였다. 크기는 20mm X 20mm X 200mm 이하이고 Bandwidth 는 60 Hz 이상이다. 그림 3.3.5.8과 그림 3.3.5.9는 2차시제품의 PCB기판을 나타내며 그림 3.3.5.10은 2차시제품의 외관을 나타낸다.

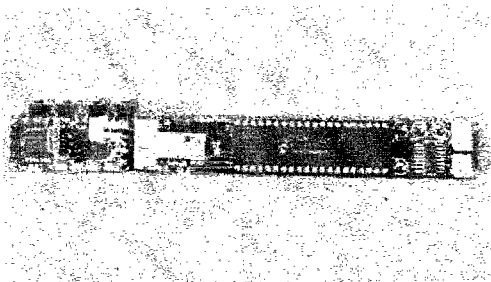


그림 3.3.5.8 2차시제품 Top view

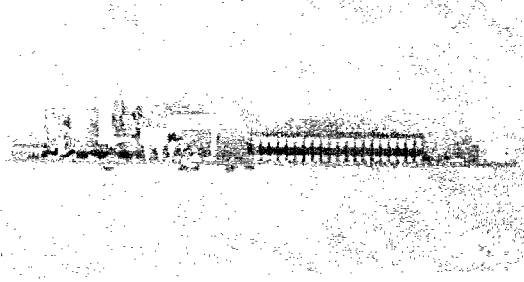


그림 3.3.5.9 2차시제품의 Side view

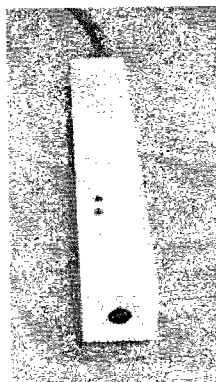


그림 3.3.5.10 2차시제품의 외관

가속도 센서로는 ADXL 205을 채택하였으며 사양은 다음과 같다.

- 단일 모놀리딕 IC내의 완전한 가속 측정 시스템. 80dB Dynamic Range 적절한 추가 회로로 Scale Factor 조절 가능. 낮은 잡음 : $1 \text{ mg}/\sqrt{\text{Hz}}$. 낮은 파워 : 축 당 2mA 미만. 최하 4V의 전원 사용 가능. 칩 내부에 2 극 필터 채용. 2축 가속 계측. $\pm 50\text{g}$ 까지 측정이 가능. 넓은 Dynamic Range. 향상된 0g 바이어스 흔들림. (그림 3.3.5.11 참조)

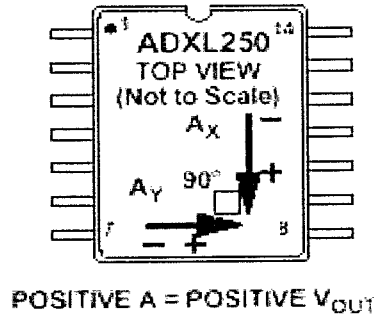


그림3.3.5.11 ADXL250 구조

각속도 센서로는 ENC-03J, CGL33 AB0/AB1을 채택하였으며 사양은 다음과 같다.

- ENC-03J : 작은 크기와 가벼운 무게, 빠른 응답, 낮은 구동 전압과 낮은 전류 소비, 내부 AGC 회로에 의한 신뢰성 있는 동작 보장. 입력 전압은 2.7 ~ 5.5V를 기준으로 하며 속도 0의 상태에서 기준 전압 1.35V를 출력함. 최대 각속도 범위 : 300deg/s. Scale Factor는 0.67mV/deg/s. 소비 전류: 평균 3.2mA.

데이터 획득에는 사용하지 않았으나 2차시제품은 마그네틱 센서도 가지고 있으며 Honeywell사의 HMC1001(1축,Z축) 과 HMC1022(2축,X축,Y축)이 있다. 사양은 다음과 같다.

- 측정 물체 주위에 일정한 자기장을 만들어준 후 MR sensor를 물체에 부착하여 물체의 위치를 MR sensor의 자기장에 따른 값 변화를 측정함

- HMC1001 - Resolution : $27 \mu \text{ gauss}$ ($1 \text{ gauss} = 10^{-4}T$), Field Range : $\pm 2 \text{ gauss}$ (earth's field = 0.5 gauss), Sensitivity : Typical : 3.2 mV/V/gauss, Max : 4.0 mV/V/gauss, Set/Reset Current : Min : 3.0A, Typical : 3.2A, Max : 5.0A

- HMC1022 - Resolution : $85 \mu \text{ gauss}$ ($1 \text{ gauss} = 10^{-4}T$), Field Range : $\pm 6 \text{ gauss}$ (Earth's Field = 0.5 gauss), Sensitivity : Typical : 1.0 mV/V/gauss, Max : 1.2 mV/V/gauss, Set/Reset Current : Min : 0.5A, Typical : 0.5A, Max : 4.0A

초음파센서는 위치 데이터의 Drift 보정용으로 이용하였다. Master에는 초음파 송신부를 장착하고, Workspace에 다수의 수신부를 설치하여, 삼각측량법을 적용해 Master의 위치정보를 획득하였다.

(나) Sensor의 초기 Calibration 수행 알고리즘

본 연구에서는 2가지의 좌표계를 사용한다. 하나는 Master 끝이 움직이는 평면을 나타내는 중력좌표계(X_g, Y_g, Z_g) 와 Master 샤프트를 연장해서 생기는 좌표계(X_s, Y_s, Z_s) 로 이루어진다. 초기 Calibration에서는 초기 경사각을 중력좌표계에서 찾기 위해 Master 샤프트의 가속도계를 이용해 초기치 (θ_0, ϕ_0, ψ_0)를 측정한다. 이 때 θ_0 는 X_s 축과 Y_s 축사이에서 측정한 각을 의미하며, ϕ_0 는 Z_s 축과 X_s 축사이에서 측정한 각을 의미하며, 마지막으로 ψ_0 는 Y_g 축과 Z_g 축 사이에서 측정한 각을 의미한다.

2차시제품의 경우 기존의 프로그램을 실행하면, 에러 값이 계속 누적되어 그림 3.3.5.12에서 보듯이 초기치를 설정하기 위해서 항상 보조버튼(Set base 버튼)을 누르고 그 점을 기준으로 시작을 하여야 했다. 하지만 본 실험에서는 프로그램 실행시 master의 위치를 자동으로 추적하여 나타내어 질수 있게 하였고, 만약 Set base를 누를 경우 master의 현재 위치를 기준점으로 하여 움직이도록 프로그램을 수정하였다.

그림 3.3.5.12는 초기 Calibration 수행 이전의 상태를 보여준다. 즉 Set Base를 누르기 전, 에러 값들이 계속 누적되어 값이 증가함을 알 수 있고, 결국 elapsed time=80 근처에서 값이 Saturation됨을 알 수 있다. 또한 Set base를 누른 후부터는 그 점이 기준점이 됨을 알 수 있다. 이 부분을 수정하였으며 결론적으로 다음 절에서 설명할 High-pass Filter까지 결합했을 때 Set base 버튼을 누르지 않고도 0에서 시작하게 되었다.

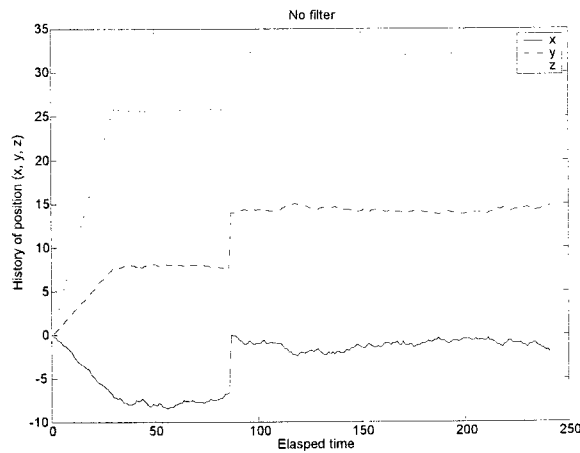


그림 3.3.5.12 필터 사용 전의 (x, y, z) 위치 변화

(다) Sensor의 floating offset을 제거하기 위한 High-Pass Filter 설계

그 동안의 연구 결과를 통해 인간의 손에서 진동이 발생한다는 것을 알 수 있었다. 연구자들은 물리적인 실험을 통해 인간의 손에서 발생하는 진동을 측정하였고, 이 진동의 값은 8-12Hz정도라는 것을 알았다. 이 진동은 누구나 발생하는 진동이며 개인적인 차이나 몸 상태에 따라서 그 값의 크기나 주파수에 차이가 있을 수 있다. 이 진동은 Hand-held Master의 정확한 위치를 결정하는데 오차로 작용한다. Hand-held Master의 센서에서 감지한 진동을 filter를 통과하지 않고 출력을 하게 되면, 부드럽지 못한 결과를 얻을 수 있다. 특히 Hand-held Master의 Master를 정지상태에 있다고 하여도 진동에 의해서 출력 결과로는 많은 진동이 발생하게 될 것이다. 앞에서 손에 의해서 발생하는 진동의 수치는 8-12Hz정도라고 하였다. 이 수치의 진동은 low-frequency이다. 따라서 이 진동을 제거하기 위해 High-pass filter가 필요하다.

High-pass filter를 구성하는 방법은 여러 가지가 있다. 가장 간단한 방법으로 High-pass filter를 구성할 수 있는 예는 R-C filter 이다. 이와 같이 구성된 filter의 차단주파수는 다음의 식을 이용하여 얻을 수 있다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

소프트웨어를 이용하여 filter를 제작할 수도 있다. 예로는 FIR과 IIR filter등이 있다. 본 연구에서는

FIR과 IIR filter 설계를 통해 성능을 비교 분석하려 한다.

초음파 센서의 경우, gyroscope를 통해 들어오는 데이터에는 상당량의 노이즈가 섞여 들어오게 된다. 따라서 우리가 실제로 받는 데이터도 역시 어느 정도 에러가 있을 수 있음을 알 수 있다. 이런 이유로 더해지는 노이즈, 즉 drift량을 줄이기 위해 High-pass Filter를 사용하였다. 필터는

$$f(x) = 1 - \exp(-x^2)$$

라는 식을 이용하였다.

이와 같은 High-pass Filter를 사용한 후 결과는 다음과 같다. 그림 3.3.5.14는 z축을 따라 움직일 경우 나타나는 위치를 표시한 것이다.

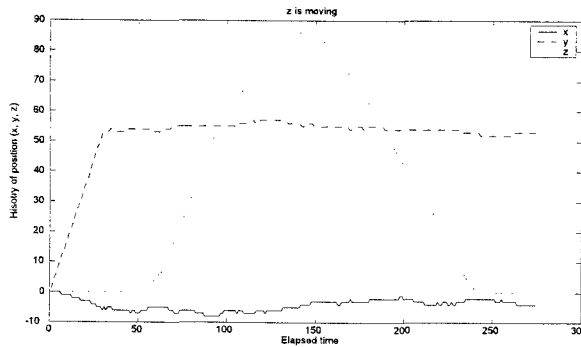


그림 3.3.5.13 2차시제품을 z축으로 움직일 경우

(라) Master의 초기 경사각을 측정하기 위한 Low-Pass Filter 설계

가속도계와 자이로로부터 읽어들이는 데이터를 A/D Converter에 통과시켜 얻어진 디지털 신호는 아래의 그림 3.3.5.15과 같다. 여기에서 10Hz 부근의 저주파 성분은 가속도계와 자이로의 정보이고 100Hz 부근의 고주파 성분은 Master의 tip과 Handwriting Surface 사이에 Master의 움직임으로서 발생하는 마찰성분의 주파수이다. 마찰에 의해 발생한 주파수는 Noise이기 때문에 Low Pass Filter를 이용하여 100Hz부근의 주파수성분을 제거하여 필요한 정보가 포함되어있는 10Hz부근의 성분만을 남기기 위해 Low Pass Filter를 이용한다.

그림 3.3.5.12에서 보듯이 들어오는 데이터에 상당량의 노이즈가 섞여 들어옴을 알 수 있다. 따라서 Low-pass 필터를 사용하여 이를 해결할 수 있다. Low-pass Filter는 위 High-pass Filter의 동작과 반대되는 개념으로 설계하였다. 즉 Master를 실제로 움직이는 동작에서, 데이터의 변화량이 적은 부분은 에러가 적게 발생하였으므로 가중치를 높여주고, 반대로 갑자기 데이터의 변화량이 큰 부분은

가중치를 낮추어 데이터 값이 갑자기 변화하는 것을 방지하였다. 기존의 프로그램의 경우는 20개의 데이터를 취하여 그 평균값을 구하였는데, 이것의 단점은 일단 20개의 데이터를 동시에 처리하여야 하므로 처리하는 데 시간 지연이 생기기 쉽고, 또한 진정한 의미에서 평균값은 Low-pass Filter의 취지에 적합하지 않다고 판단되었다. Low-Pass Filter를 사용한 후의 결과는 다음과 같다. 그림 3.3.5.15이 보여주듯이 그림 3.3.5.12와 같은 처음의 결과보다 기준 점을 기준으로 편차가 줄어들었음을 알 수 있다.

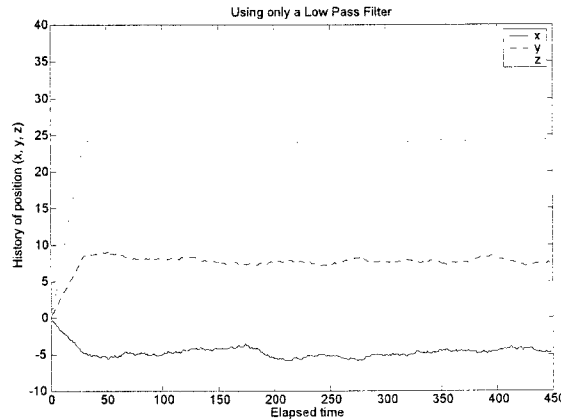


그림 3.3.5.14 Low-Pass Filter를 사용한 후의 (x, y, z)의 위치변화

(마) Master의 Sensor-Fusion Filter 설계 (Design of Sensor Fusion Filter)

우선 그림 3.3.15(a)에서 보듯이 master가 A 지점에서 초기 경사각 (θ_1, ϕ_1, ψ_1)을 나타내고, master를 움직여 B 지점에서의 경사각이 (θ_2, ϕ_2, ψ_2)로 변하는 경우에 관해 생각해 보자. 이 때 master가 실제 움직인 거리는 (A 지점 - B 지점)이 되며, 이 거리는 master의 중간 부분이 실제 움직인 거리가 된다. 만약 초음파 센서만을 이용하여 master를 움직이는 경우는 master 끝에서 받아들이는 데이터를 가지고 계산을 하므로 실제 거리보다 더 많이 움직인 것처럼 보여질 수 있다. 따라서 이것은 잘못된 것이므로 본 연구에서는 추가로 가속도 센서를 사용하여 경사각을 측정하고 다음 실제 움직인 거리와 정확한 위치를 찾아내는 방법에 관해 설명한다.

가속도 센서를 통과한 raw data는 외부 환경에 민감한 특성을 보인다. 따라서 High-Pass Filter를 사용하여 Hand Tremor와 같은 저주파수에서 발생하는 떨림 현상을 없애도록 한다. High-Pass Filter를 통과한 data는 다시 초음파 센서를 이용하여 얻어진 master의 끝부분의 위치를 보정해 주는데 사용된다.

본 절에서는 가속도 센서를 이용하여 master의 경사각을 찾아내고 이것을 이용해 실제 master의 움

직인 거리를 계산하도록 한다. 초음파 센서만을 이용하는 경우 초음파 센서가 master가 다니는 큐빅의 바닥에 부착되어 있으므로 master의 움직인 거리 계산은 master의 끝부분이 가리키는 방향에 의해 결정되는 단점이 있을 수 있다. 따라서 본 실험에서는 가속도 센서를 이용해 경사각을 찾고 처음 경사각과 master가 직인 후 나중 경사각과의 차이를 찾아내어 초음파 센서를 통해 계산된 거리 값에 그 차이를 더해주게 된다.

그림 3.3.15 (b)-(d)는 가속도 센서를 이용해 master의 경사각을 구한 후 이것을 이용해 master의 실제 거리를 계산한 결과를 나타낸다. 그림 3.3.15(b)는 X-축 방향으로 master를 움직였을 때이며, 그림 3.3.15(c)는 Y-축 방향으로 master를 움직였을 때이며, 마지막으로 그림 3.3.15(d)는 Z-축 방향으로 master를 움직이며 비교를 한 결과이다. 그림에서 실선 부분은 아무런 필터를 master에 사용하지 않은 raw data를 직접 표시하였다. 그림에서 실선-점선 부분은 Low-Pass Filter와 High-Pass Filter만을 사용한 후 결과를 표시한 것이다. 마지막으로 점선 부분은 가속도 센서와 초음파 센서를 이용하여 만든 Discrete Kalman Filter를 사용한 후 결과를 표시한 것이다. 그림에서 보듯이 아무런 필터를 사용하지 않은 경우에는 데이터가 상당히 불안정하며 많은 vibration이 생김을 알 수 있다. Low-Pass Filter와 High-Pass Filter만을 사용한 경우도 많은 진전을 보았다. 그림에서 보듯이 전보다 master의 움직임이 상당히 부드러워졌으며 master의 위치 값이 갑자기 변하는 부분이 없어졌음을 알 수 있다. 그러나 서두에서 밝혔듯이 초음파 센서만을 사용한 경우 진정한 master의 움직인 거리 계산은 어렵다. 따라서 가속도 센서를 사용하여 경사각을 측정하고, 초기 경사각과 나중 경사각과의 차이를 가지고 거리 계산에 보정을 하게 된다.

그림 3.3.15(b)-(d)에서처럼 가속도 센서를 이용하여 거리를 계산한 결과는 Low-Pass Filter와 High-Pass Filter만을 사용할 때보다 실제 거리 값에 차이가 생김을 알 수 있다. 이것은 바로 가속도 센서를 이용한 실제 거리 계산으로부터 차이가 나타난다. 그림에서 아무런 Filter를 사용하지 않은 경우와 다음으로 Low-Pass와 High-Pass(L&H) Filter를 사용한 경우, Discrete Kalman Filter를 사용한 경우의 결과에서 어느정도 time delay가 발생함을 알 수 있다. 이것은 Filter를 통해 data를 처리하여 다시 디스플레이로 전달되는 과정에서 생기는 시간 지연으로부터 기인한다. 따라서 필터를 사용한 후의 결과는 raw data보다는 약간 시간적으로 지연되어 화면에 나타남을 알 수 있다. 실험을 통한 결과로 가속도 센서를 이용한 Discrete Kalman Filter 사용이 가장 효율적이고, 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

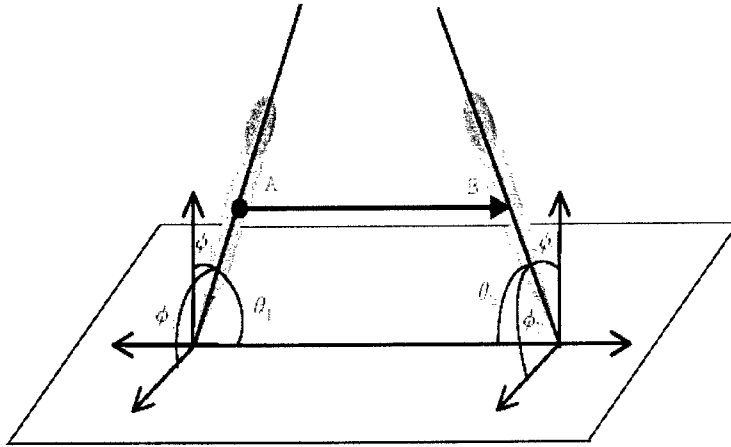


그림 3.3.15(a) 초음파 센서를 이용한 Hand-held master 이동 거리

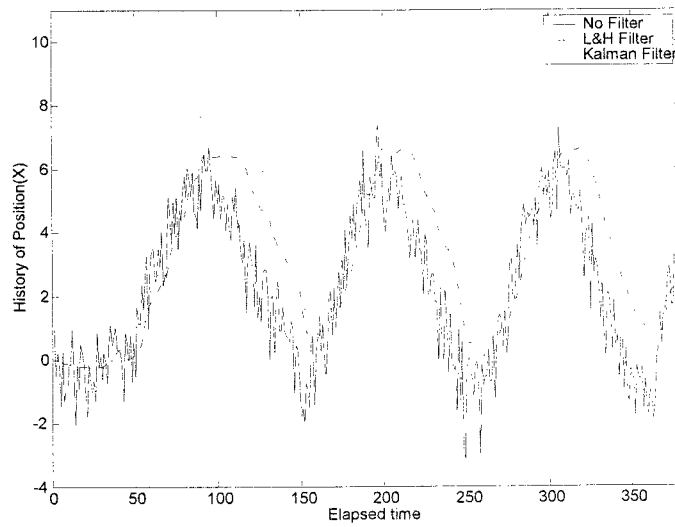


그림 3.3.15(b) X-축 방향에 대한 Sensor Fusion Filter 사용 결과 비교

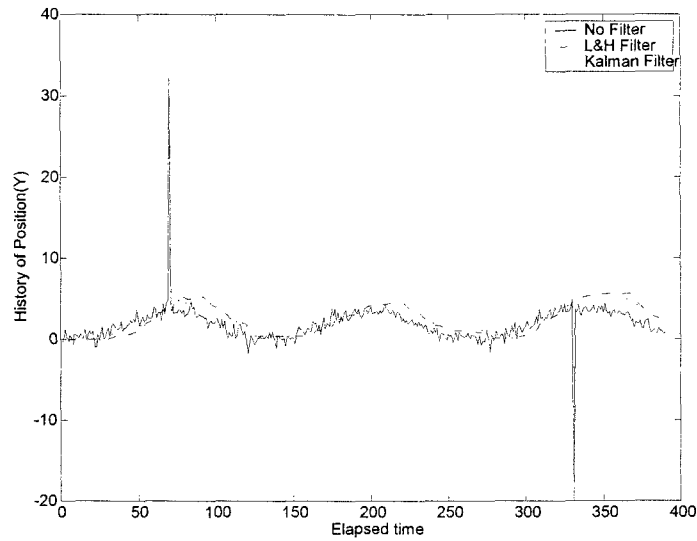


그림 3.3.15(c) Y-축 방향에 대한 Sensor Fusion Filter 사용 결과 비교

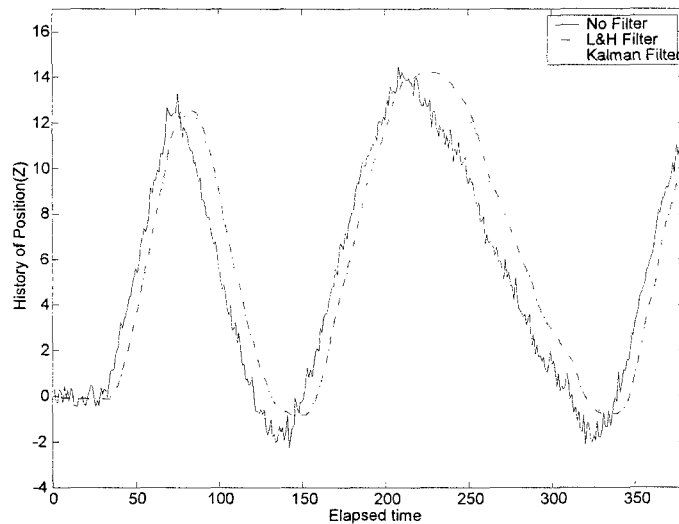


그림 3.3.15(d) Z-축 방향에 대한 Sensor Fusion Filter 사용 결과 비교

(4) Hand-held Master 3차시제품

Hand-held Master의 3차시제품(그림 3.3.5.16)은 2차시제품에서 나타난 문제점인 가속도계의 drift 현상의 보정을 위해 상용자이로센서 모듈인 Tokin센서를 사용하였고, 손떨림방지필터로 노치필터(Notch Filter)를 채택하였다.

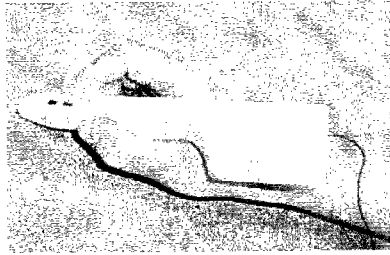


그림 3.3.5.16 3차시제품의 외관

3차시제품에 사용된 Tokin 센서는 내부에 자이로와 가속도계가 내장된 싱글 유닛의 방향 측정용 센서를 사용한다. Tokin 센서는 그 자체로 노이즈에 상당히 robust한 성질을 지닌다. 본 절에서는 Tokin 센서를 이용한 Fusion 필터로써 Low-pass Filter와 High-pass Filter를 동시에 사용하여 개선된 성능을 입증하려한다.

(가) Sensor의 floating offset을 제거하기 위한 High-pass Filter 설계

본 실험에서는 2차시제품의 경우처럼 자이로스코프를 통해 들어오는 외부 노이즈를 줄이기 위해 High-pass Filter를 사용한다. Master를 손으로 잡고 있을 경우, 사람 손을 통해 전달되는 고유 진동에 의해 master는 어느 정도 흔들림이 생기게 된다. 이것은 Master를 움직이려는 의지가 들어간 동작이 아니므로 신호가 전달이 되어서는 안 된다. 따라서 master를 쥐고 있는 것과 또는 master가 움직이고 있다가 정지한 후의 동작에서 master는 움직임이 멈춘 것으로 인식되어야 한다. 이러한 과정을 수행하기 위해 High-pass Filter의 사용은 필수적이다. High-pass Filter 설계시 Drift율을 스펙에 맞추어 정지시 Offset의 1% 미만이 되도록 설계하였다. 마찬가지로 필터에 관한 식은

$$f(x) = 1 - \exp(-x^2)$$

을 사용하여 고주파 부분은 통과시키며 저주파부분은 가중치가 적게 곱해지거나 필터를 통과할 수 없도록 만들었다.

(나) Master의 초기 경사각을 측정하기 위한 Low-pass Filter 설계

Master가 움직이는 동안 센서를 통해 들어오는 노이즈들은 고주파 성분의 신호와 같이 센서로 입력된다. 따라서 고주파 성분의 신호에 실려있는 노이즈 성분을 제거하기 위한 Low-pass Filter의 사용은 필수적이다. Low-pass Filter에 관한 식은 High-pass Filter에 관한 식과 반대의 개념으로 생각

할 수 있다. 즉 저주파성분은 통과시키고, 고주파성분은 주파수가 높을수록 가중치를 점점 작게 곱해 지게 된다. 따라서 이와 같은 목적으로 설계된 Low-pass Filter와 High-pass Filter를 동시에 사용한 후의 결과는 다음 그림 3.3.5.17과 같다.

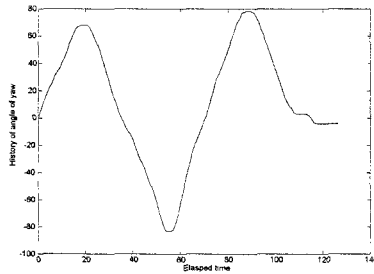


그림 3.3.5.17 Filter 사용 후
Yaw 각을 움직인 경우

(다) 손떨림 방지를 위한 Notch Filter 설계

손떨림 방지를 위해 (가)의 High-pass Filter로는 불충분한 경우가 많으므로 본 연구에서는 다음과 같이 Notch Filter를 설계하였다. 많은 사람들은 병적인 (자신이 원하지 않는) 상태로 떨림 현상이 일어난다. 이런 증상은 경화증, 혹은 뇌의 손상으로 인해 발생한다. 이런 모든 증상들은 인간의 움직임을 제어함에 있어 하나의 노이즈 신호로 간주될 수 있다. 일반적으로 자발적이고 의도적인 떨림 현상은 보통 아주 낮은 주파수에서 일어나고, 손상이나 수동적인 떨림 현상은 2~12 Hz 사이에서 발생한다. 이런 떨림 현상을 감쇄시키기 위해 보통의 경우 Low-pass filter를 사용하게된다. 하지만 Low-pass filter의 cutoff 주파수도 상대적으로 낮아질 수밖에 없으므로 원하지 않는 주파수 선택에 문제가 생길 수 있다. 따라서 노치 필터를 이용하면 원하지 않는 떨림 현상은 없애고, 우리가 자발적으로 진동을 일으켰던 의도적인 떨림 현상이 일어나는 주파수 부분은 통과시킬 수 있다. 떨림 주파수는 정확히 그 값을 알 수 없고 시간에 따라 변하기 때문에, 시불변 (time invariant) 하는 노치 필터의 경우는 용도가 적어진다. 따라서 떨림 주파수와 그 크기를 찾을 수 있는 adaptive filter의 개발이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 인간과 기계사이의 상호작용과정에서 생기는 떨림 현상을 줄이기 위한 adaptive filter 개발에 중점을 둔다. 오프라인시 시스템은 기록된 데이터를 가지고 떨림 정도를 양자화시킨다.

본 연구에서 개발되는 알고리즘은 계산상 시간이 적게 들며, 구현이 간단함에 그 목표를 둔다. 노치 필터는 밴드패스필터의 반대 개념이라고 할 수 있으며, 비교적 좁은 폭의 중역대 주파수를 깎아내는 기능을 한다.

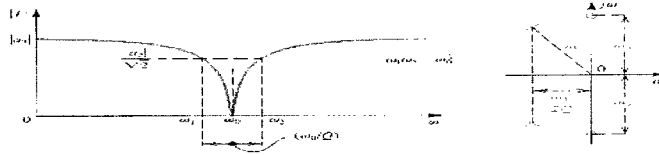


그림 3.3.5.18 이차 함수로 표현된 Notch 필터

그림 3.3.5.18은 이차함수로 표현된 노치 필터의 한 예를 보여주고 있다. 이런 필터를 표현하는 전달함수는

$$T(s) = a_2 \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

로 표현된다. 위 식에서 a_2 는 DC 이득 또는 고주파에서의 이득 성분을 의미한다.

본 연구에서는 Weighted-Fourier Linear Combiner(WFLC) 신호 처리 알고리즘을 개발하였다. WFLC는 Fourier Linear Combiner의 새로운 형태이다. 여기서는 기본이 되는 신호의 주파수를 갖는 신호를 모델화한다. WFLC 방법은 미지의 주파수와 크기를 갖는 주기 신호를 모델화할 때 사용한다. WFLC에서 사용하는 노치 필터의 넓이는 방정식에서의 μ 값에 비례한다. 노치 필터의 폭이 넓을수록 떨림 현상은 더욱 줄일 수 있지만, 신호 중에서 자발적인 요소에 대해서는 신호 왜곡이 증가한다. 병적으로 떨리는 모든 증상들은 대부분 2~12 Hz 사이에서 발생한다. 때때로 떨림 신호의 크기와 주파수가 빠르게 진동하는 경우가 있다. 이런 이유로 WFLC의 떨림 주파수 측정은 Notch 필터의 사용보다는 Low-pass Filter의 cutoff 주파수를 변화시켜 구하게 된다. 본 연구에서 사용하게 될 WFLC 알고리즘은 다음과 같다.

$$x_{r_k} = \begin{cases} \sin(r \sum w_{o_i}), & 1 \leq r \leq M \\ \cos((r-M) \sum w_{o_i}), & M+1 \leq r \leq 2M \end{cases}$$

$$\epsilon_k = s'_k - w_k^T x_k$$

$$w_{0_{k+1}} = w_{0_k} + 2\mu \epsilon_k \sum (w_i x_{M+i} - w_{M+i} x_i)$$

$$w_{k+1} = w_k + 2\mu_1 x_k \varepsilon_k$$

여기서 $w_k = [w_{1k} \cdots w_{2M_k}]^T$, $x_k = [x_{1k} \cdots x_{2M_k}]^T$, M 은 사용되는 하모닉의 수를 나타내며, s'_k 는 노이즈 신호 s'_k 를 High-pass filter를 통과시킨 후의 결과이며, μ_0 , μ_1 은 각각 adaptive filter의 이득 파라미터 값을 의미한다.

따라서 위 식을 이용하여 WFLC를 설계하게 되며, 제안된 알고리즘을 이용하여 미지의 떨림 현상에 대한 주파수와 크기를 adaptive한 방법으로 찾아내려한다. 이런 방법을 통해 master를 통해 들어오는 신호 중에서 손 떨림과 같은 현상으로 발생하는 신호들은 필터를 통해 제거하고, 가속도계와 자이로, 다른 초음파 센서 혹은 마그네틱 센서를 통해 들어오는 원하는 신호를 구하고자 한다.

그림 3.3.5.19과 그림 3.3.5.20은 Notch Filter를 사용하기 전 각각 pitch, yaw 각에 대한 움직임을 나타낸다. Notch Filter 사용 전의 그림으로부터 master 사용시 약간의 미세한 떨림이나 master를 잠시 정지하였다 다시 움직이는 경우 부드럽지 못함을 볼 수 있다. 그림 3.3.5.21과 그림 3.3.5.22은 Notch Filter 사용후의 결과를 보여준다. 그림 3.3.5.21은 필터 사용 후 pitch 각 방향으로 움직인 master의 궤적을 보여준다. 그림 3.3.5.22는 필터를 사용하여 yaw 각 방향으로 움직인 master의 궤적을 의미한다. 위의 그림에서 보듯이 master를 움직이는 동안 궤적은 연속적이며 부드러운 형태로 표현된다. 또한 master가 동작 중에 방향전환을 하는 경우 잠시 멈추는 동작에서도 peak나 또는 Tremor 현상이 줄어들었음을 알 수 있다.

Token 센서 자체는 단일 센서 유닛으로 만들어졌으므로 노이즈에 어느 정도 강인함을 보였다. 따라서 Notch Filter를 사용한 후의 개선된 성능을 육안으로 확인하는 데에는 어려움이 따른다. 하지만 그림 3.3.5.21와 그림 3.3.5.22에서 알 수 있듯이 master의 동작 자체가 부드럽고 끊김이 없는 연속적인 형태로 master가 움직임을 확인할 수 있다.

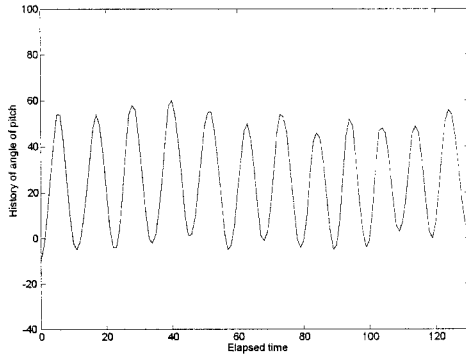


그림 3.3.5.19 Notch Filter 사용 전 pitch 각의 움직임

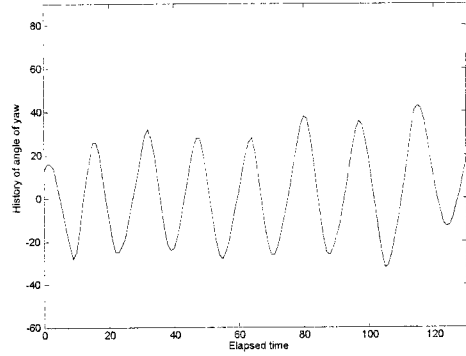


그림 3.3.5.20 Notch Filter 사용 전 yaw 각의 움직임

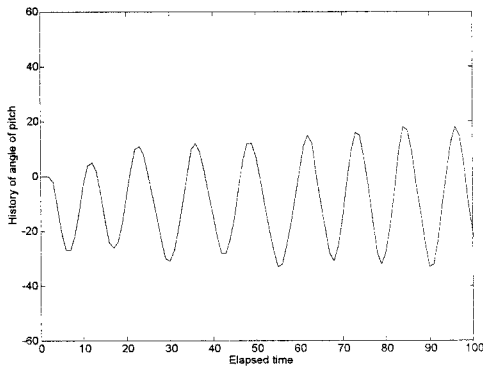


그림 3.3.5.21 Notch Filter 사용 후 pitch 각의 움직임

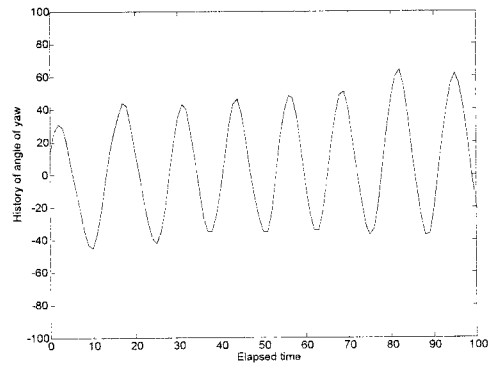


그림 3.3.5.22 Notch Filter 사용 후 yaw 각의 움직임

(5) Hand-held Master 4차시제품

Hand-held Master 4차시제품(그림 3.3.5.23)은 2,3차 시제품에서 나타난 문제점인 Sensor Fusion Filter의 부재 및 무선통신 문제를 해결하기 위하여 제작되었다. 기본적인 구조는 윗부분이 뭉툭한 Pen 의 형태(그림 3.3.5.24)를 띠며 크기는 50mm X 50mm X 200mm 이고 손으로 쥐기 쉽도록 아랫부분은 가늘다. 4차시제품은 가속도계, 자이로스코프, 마그네틱 센서를 기반으로 하여 구성되었으며 무선 통신을 이용하여 거리면에서 상당히 진보된 성능을 보였다. 또한 피드백 신호로 진동 모터를 사용하였다. 무선 통신 속도는 1Mbps 이상으로 전송하게 된다.

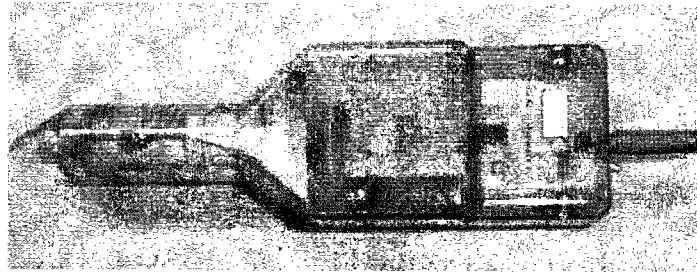


그림 3.3.5.23 4차시제품의 외관

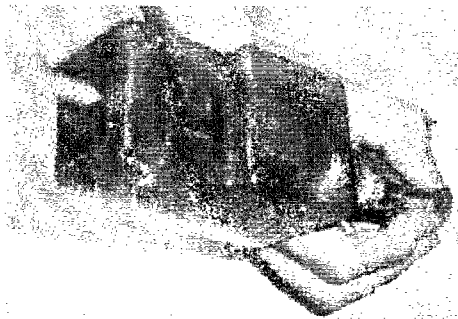


그림 3.3.5.24 4차시제품의 외관(2)

(가) 4차시제품의 구조와 기능

각 센서 데이터는 마이크로컨트롤러인 PIC16F876이 받아서 처리한다. Master와 PC와의 통신은 RF를 이용한다. Master의 Main 회로는 그림 3.3.5.25와 같다. 센서의 output수는 magnetic sensor가 3개(analog), acceleration sensor가 3개(digital), gyro sensor가 3개(analog) 총 9개이다. 그러나 PIC16F876의 A/D channel은 총 5개이므로 analog switch 4066을 사용하여 output을 switching하여 a/d convert 하였다. 우선, digital output인 가속도 센서는 bandwidth를 높이기 위해 PIC16F876 외부 인터럽트단자에 연결하였다. PIC16F876에는 외부 인터럽트 단자가 하나뿐이므로 세 개의 가속도 센서 output을 4066을 사용하여 switching하였다. PIC16F876의 내부 timer로는 가속도 센서의 bandwidth를 100Hz로 만들 수 없기 때문에 switching 방법을 사용하였다. 그 다음으로, analog 신호인 magnetics sensor output 3개와 gyro sensor output 3개중에서 gyro의 X축 output과 magnetics sensor 세 개의 축 output은 직접 PIC16F876의 A/D 단자에 연결하고 나머지 gyro의 Y축, Z축 output은 4066을 사용하여 switching하여 A/D convert하였다.

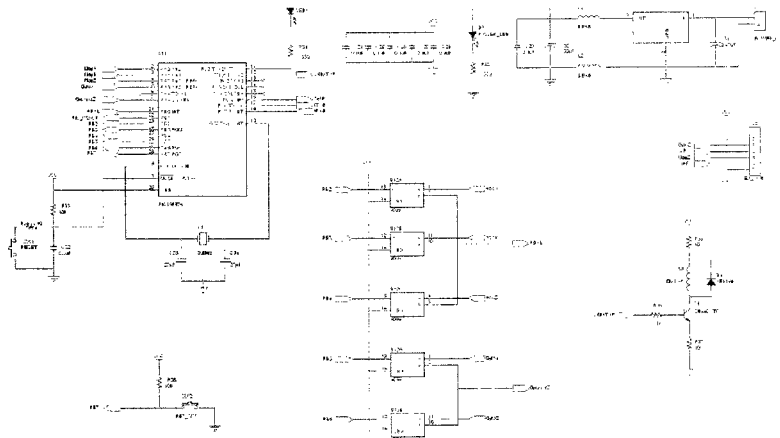


그림 3.3.5.25 메인 회로도

PIC16F876의 다른 port는 그림 3.3.5.25를 보면 진동 모터를 위한 output, switch 4066을 선택하기 위한 outputs, RF(BIM-433-F)의 송신과 수신을 선택하는 output, RF와 data를 주고 받기 위한 Tx/Rx, magnetic sensor의 Set/Reset을 위한 output 등으로 이루어져 있다. 진동 모터는 master의 특정 상황을 모터의 진동주기를 변화시켜 master에 알려주는 역할을 한다. 만약 master가 작업 영역을 벗어나려고 하면 진동주기를 느리게 해서 약한 진동을 주고 완전히 벗어나게 되면 진동주기를 빠르게 해서 강한 진동을 준다. 이렇게 진동 모터는 PC로부터 master로 상태를 전달하기 위해 사용된다. 참고로 4066은 analog switch이지만 digital switch에도 무리 없이 사용할 수 있다. 위 main 회로에서는 4066을 두 개 사용하였다. Magnetic sensor의 Set/Reset는 PIC16F876의 하나의 port를 할당해서 Set, Reset 주기를 설정해서 magnetic sensor로 입력하였다. 이 때 Set, Reset 주기에 따라 센서의 output 성능이 달라진다. 약 200Hz의 주기로 설정하였다.

4차시제품의 가속도계, 자이로, 마그네틱센서는 다음 그림 3.3.5.26 및 그림 3.3.5.27과 같이 부착되어 있다.

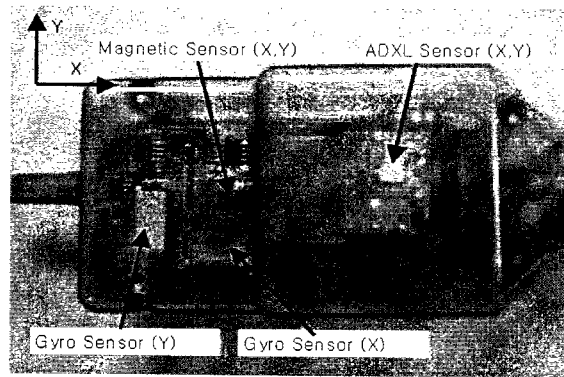


그림 3.3.5.26 4차시제품의 내부(1)

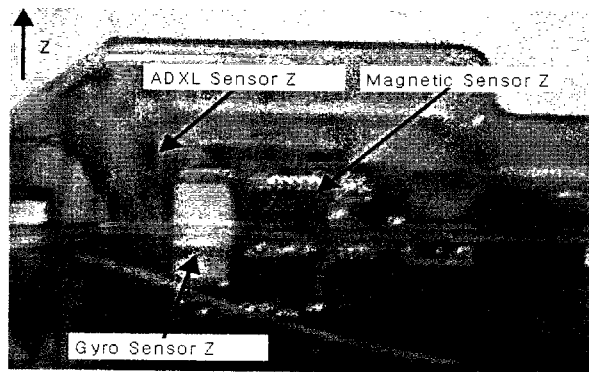


그림 3.3.5.27 4차시제품의 내부(2)

가속도 센서로는 Murata사의 ENC-03J를 사용하였다. ENC-03J는 한 축에 대한 가속도 값을 나타내므로 3개의 센서는 세 축에 대한 가속도 값을 얻는다. ENC-03J의 sensitivity는 0.67mv/deg/sec 이므로 output Gyro X의 sensitivity는 6.7mv/deg/sec이 된다. 이 의미는 1deg/sec 변할 때 output 전압은 6.7mv 씩 변한다는 것이다. ENC-03J의 가속도가 0deg/sec일 때, output은 +1.35V를 나타낸다. 만약, 가속도가 5deg/sec가 된다면, output = 1.35V + 6.7mv*5 = 1.3825V이 된다. 이 결과를 PIC16F876의 A/D converter를 거쳐 digital 값으로 바꾸었다.

가속도 센서는 Analog Device사의 ADXL202를 사용하였다. ADXL202는 두 개의 축의 가속도를 측정할 수 있는 chip이다. 세 개의 축에 대한 가속도를 얻기 위해서 ADXL202를 두 개 사용하였다. ADXL로 가속도를 측정하여 지구 중력에 대한 pitch, roll을 측정할 수가 있다. 일반적으로 pitch, roll을 측정하는 센서를 tilt 센서라고 한다. 이 ADXL202는 tilt 센서로 많이 사용된다. 중력 방향에 수직인 평면에 대한 pitch와 roll은 다음 수식에 의해서 구할 수 있다.

Magnetic sensor는 Honeywell사의 HMC1022를 두 개 사용하였다. HMC1022하나로 2축방향에 대

한 자기장 변화를 감지할 수 있다. 위에서 센서 동작 방법을 잠시 소개했는데, 센서 output을 좀 더 정확하게 깨끗하게 만들기 위해서 다음과 같이 센서 요소의 특성을 이용한다

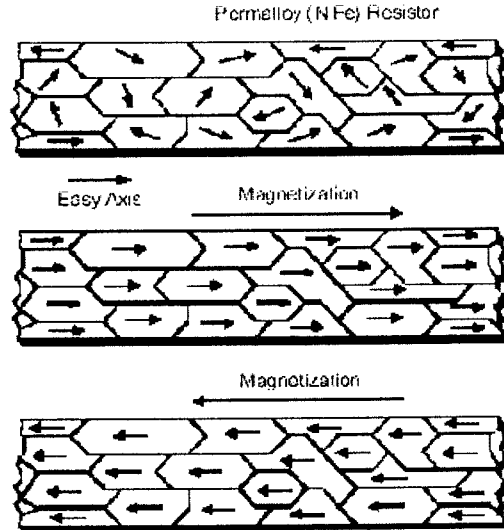


그림 3.3.5.28 Set/Reset Pulse에 따른 센서의 자기화

위 그림 3.3.5.28의 첫 번째 그림은 센서가 자기장이 있는 곳에 놓여졌을 때, 센서 요소들이 각각 임의의 방향을 가리키는 것을 나타내고, 두 번째 그림은 Set pulse를 센서에 주었을 때, 자기력 방향과 같은 방향으로 센서 요소들이 놓이게 되는 것을 보여준다. Reset 신호를 주었을 때는 세 번째처럼 센서 요소들이 자기력방향의 반대 방향을 가리키게 된다. 일단 Set pulse나 Reset pulse가 주어지고 자기장이 없는 곳에 놓이면 반영구적으로 센서는 현 상태를 유지하고 있게 된다. 따라서 센서에 Set/Reset pulse를 주어 좀 더 안정된 output을 얻을 수 있다. 여기서 Set/Reset pulse를 주기적으로 주어 안정된 output을 얻는다. Set/Reset 신호를 주기적으로 발생시키기 위해 PIC16F876의 port를 사용하고, 그 port로부터 나온 신호를 International Rectifier사의 IRF7105를 사용하여 빠르게 스위칭하여 센서에 입력한다. 센서 output과 앞에서 사용한 가속도 센서(tilt sensor-용으로)를 이용하여 Master의 heading angle을 알아낸다.

무선 통신을 위해서 소형의 Radiometrix사의 “BIM-433-F” RF module을 사용하였다. 센서 정보를 Master에서 PC로 송신하고, PC에서 Master쪽으로 진동 모터 신호를 송신하기 위해 반이중통신 RF module을 선택하였다 (그림 3.3.5.29).

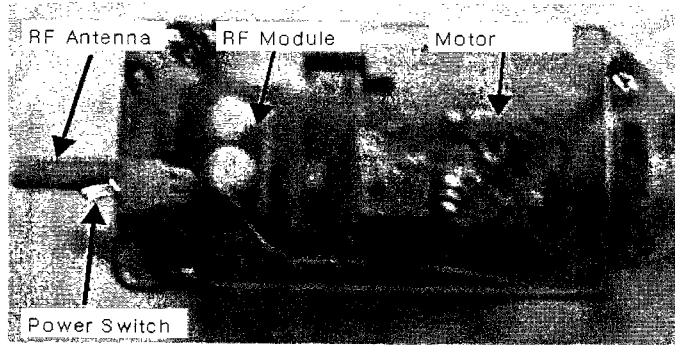


그림 3.3.5.29 4차시제품의 내부

BIM-433-F는 알아서 data를 decoding하거나 encoding하지 않기 때문에 PIC가 data를 decoding/encoding해야 한다. BIM-433-F를 사용할 때, 주의할 점은 다음과 같다.

-> 최소 3ms이상의 preamble 신호(10101010 or 01010101)가 있어야 그 이후의 data를 신뢰할 만하다고 여긴다.

-> 마크(0) 와 스페이스(1)의 비율이 30~70% 범위 내에 존재해야 안전하게 수신한다.

BIM-433-F의 안전한 통신을 위해서 권장하는 protocol은 다음과 같다.

Preamble - Control - Address - Data - CRC

우선 preamble신호(10101010 or 01010101)를 3ms이상 보내고, 그 다음 수신 UART가 lock되도록 한 개 내지 두 개의 0xFF, 그 다음 시작 메시지 0x01, 그 다음에 data, 마지막에 error check 및 수정을 위한 checksum 또는 CRC를 보낸다. 위에서 마크(0)와 스페이스(1)의 비율을 30~70% 범위 내로 유지하기 위한 방법 중 하나는 FEC coding방법이다. FEC coding방법은 송신하는 data 한 바이트당 그 보수를 취한 것을 보내는 방법이다. 이 방법은 마크, 스페이스 비율을 30~70%내로 유지할 수 있지만 한 바이트 정보를 위해 두 바이트를 보내야 한다. 따라서 최대 전송속도가 절반으로 떨어지게 된다. 따라서, 일반적 통신속도로 19200bps를 사용한다. PC와 PIC간의 무선 통신은 BIM-433-F를 사용하여 간단히 수행할 수 있다. PIC16F876에서 PC로 여러 센서 data를 전송하기 위해서는 단순히 위 몇 가지 조건만 맞춰주고 TXD port로 출력시켜 주면 된다. 수신은 몇 가지 조건을 따져서 RF module이 알아서 하게 된다. BIM-433-F는 반이중(Half duplex)통신이므로 상대방이 모두 수신하거나 모두 송신은 할 수 없다는 단점이 있다.

(나) Sensor의 floating offset을 제거하기 위한 High-pass Filter 설계

마그네틱 센서를 통해 들어오는 노이즈를 줄이기 위해 고주파 성분을 제거하기 위해 High-pass Filter를 사용한다. Drift율은 스펙에 맞추어 1% 미만이 되도록 설계한다. 필터 식은 2차시제품의 경우와 동일한 방식의

$$f(x) = 1 - \exp(-x^2)$$

과 같은 식을 사용한다.

(다) Low-pass Filter 및 High-pass Filter 설계

2차시제품의 경우와 동일한 이유로 저주파 영역을 감쇄시키기 위한 Low-pass Filter를 첨가한다. 이때 사용된 식은 High-pass Filter 식을 이용하여 고주파 부분은 가중치를 작게 곱하고, 저주파영역은 대부분 통과시킬 수 있도록 설계한다. Low-pass, High-pass Filter를 사용하기 전의 경우 master 를 움직이는 과정은 어느 정도 연속적이지만, 아직은 부드럽지 못한 느낌을 준다. 또한 master 각도 측정의 한계값 근처에서는 어느 정도의 peak가 발생함을 알 수 있다. 따라서 이런 부분들은 master 사용시 정확한 값을 읽어오는 데 어려움으로 작용하게 된다. Low-pass, High-pass Filter를 사용한 후 엔 Filter를 사용하기 전보다 master의 궤적이 부드럽고 노이즈의 영향을 어느 정도 줄여줌을 보여준다. 그러나 master 각도의 한계점 근처에서도 master 사용 전보다 peak가 약간은 줄어들었지만 효과면에서는 다소 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 이를 보완하기 위해 다음은 Sensor Fusion Filter로써 Discrete Kalman Filter를 사용하게 된다.

(라) 6D data 구현을 위한 Kalman Filter/Extended Kalman Filter 설계

본 연구에서는 칼만 필터를 이용해 6D data를 구하는 방법에 관해 연구하였다. 칼만 필터는 least-square 방법을 사용하여 효과적으로 반복적인 방법을 통해 계산 결과를 얻어내게 된다. 칼만 필터를 사용해서 얻는 장점은 첫째 과거, 현재 또는 미래의 상태 값을 예측할 수 있고, 둘째로는 모델이 불확실한 경우라도 그 값들을 예측할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 이산(discrete) 칼만 필터를 사용하고, 아울러 Extended Kalman Filter를 사용하여 성능을 증가시킬 수 있도록 하였다.

본 연구에 사용될 칼만 필터는 이산-시간으로 조절되는 공정에서 어떤 상태변수(x) 값을 예측하려 할 때 사용된다. 예를 들면,

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1}$$

과 같은 시스템을 고려하자. 이 때 측정값은 변수 z 를 가지고,

$$z_k = Hx_k + v_k.$$

와 같은 식을 따라 움직인다고 가정하자. 이 식에서 확률 변수 w_k 와 v_k 는 각각 공정과 측정에서의 잡음 신호를 의미한다. 또한 \hat{x}^- 는 전시간 상태 추정치를 의미하며 \hat{x} 는 다음 시간 상태 추정치를 의미한다. 따라서 전시간 및 다음시간 추정 에러 covariance는

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}]$$

$$P_k = E[e_k e_k^T].$$

과 같이 표현된다. 이때 P_k 를 최소로 하는 이득 K 는 다음과 같이 구해진다.

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$$

칼만 필터는 피드백의 형태를 이용하여 어떤 공정의 결과 값을 추정할 때 사용한다. 즉 어느 시간에서 상태의 값을 예측하는 것과 측정값의 형태로 피드백 신호를 얻을 수 있도록 한다. 칼만 필터 방정식은 두 가지 그룹으로 나눌 수 있다. (1) 시간 수정 방정식과 (2) 측정치 수정 방정식으로 나뉜다. 처음 방정식은 현상태와 에러 covariance값을 다음 단계를 위해 시간적으로 미리 계산을 하여 값을 얻어 낸다. 다음 방정식에서는 피드백 신호와 상관 지어진다. 즉, 수정된 추정치값을 얻기 위해 측정치 값을 사용한다. 따라서 시간 수정 방정식은 일종의 예측기로 표현되며, 측정치 수정 방정식은 에러 수정기 (error corrector)로서 표현되어질 수 있다.

그림 3.3.5.30은 예측기와 수정기로서의 칼만 필터가 어떻게 동작하는지 보여주고 있다. 이 그림에서 보듯이 시간에 따라 상태 값을 변화시키는 예측기에 관해서는

$$\hat{x}_k^- = A \hat{x}_{k-1} + B u_k$$

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q$$

이며, 위의 식들을 따라 결정된다. 측정값을 보정하는 방법은

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-$$

를 이용한다.

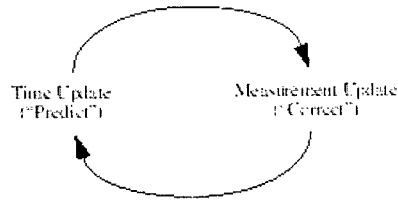


그림 3.3.5.30 이산 칼만 필터
사이클

개선된 Fusion Filter 기술로서 Discrete Kalman Filter를 사용한다. 이 때 필터의 구성은 2차시제 품의 경우와 유사하다. 필터는 피드백 형태로서 크게 두 부분으로 구성된다. 첫 번째 부분은 time update 과정이다. 전 단계의 상태에서부터 다음 단계의 상태를 예측하고, error covariance를 시간에 따라 수정해 나간다. 다음 단계로서 measurement update 과정을 거친다. Kalman Filter의 이득을 계산하고, 측정치를 이용하여 예측 값을 수정하며, 마지막으로 error covariance를 update하게 된다.

필터에 관한 방정식은 다음과 같이 구성한다.

$$\begin{pmatrix} \theta_k \\ \phi_k \\ \psi_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{k-1} \\ \phi_{k-1} \\ \psi_{k-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta t & 0 & 0 \\ 0 & \delta t & 0 \\ 0 & 0 & \delta t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_{\theta, k-1} \\ \omega_{\phi, k-1} \\ \omega_{\psi, k-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_{\theta, k-1} \\ w_{\phi, k-1} \\ w_{\psi, k-1} \end{pmatrix}$$

위 식에서 $(\theta_k, \phi_k, \psi_k)$ 는 각각 현상태에서의 pitch, yaw, roll 의 각도를 나타내며, $(\theta_{k-1}, \phi_{k-1}, \psi_{k-1})$ 는 전단계에서의 pitch, yaw, roll의 각도를 의미하며, $(\omega_{\theta, k-1}, \omega_{\phi, k-1}, \omega_{\psi, k-1})$ 는 자이로 센서로부터 얻은 각속도벡터, δt 는 샘플링 시간을 나타낸다. 본 연구에서는 샘플링 시간을 0.02초로 정하였다. 또한 $(w_{\theta, k-1}, w_{\phi, k-1}, w_{\psi, k-1})$ 은 신호처리 과정에서 나타나는 노이즈를 의미한다. 사용된 자이로 센서는 Murata 사의 ENC-03J이며, 센서를 통해 얻는 data는 sensitivity 0.67(mV/deg/sec)를 갖는다.

실제 측정되는 위치에 관한 상태방정식은

$$\begin{pmatrix} \theta_k \\ \phi_k \\ \psi_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_k \\ \phi_k \\ \psi_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \nu_{\theta, k} \\ \nu_{\phi, k} \\ \nu_{\psi, k} \end{pmatrix}$$

과 같다. 이 식에서 $(\theta_k, \phi_k, \psi_k)$ 는 우리가 측정하는 실제 pitch, yaw, roll 각도를 나타내며 $(\nu_{\theta, k}, \nu_{\phi, k}, \nu_{\psi, k})$ 는 측정에서 생기는 외부 노이즈를 의미한다. Discrete Kalman Filter를 꾸미기

위해 각각의 A, B, H 행렬은 윗식의 상태방정식들로 대치하게 된다. 또한 Q와 R 행렬은 각각 프로세스 노이즈와 측정 노이즈들의 covariance를 의미한다. 이때 행렬의 각 원소들은 1보다 작은 값을 취하게 된다.

Discrete Kalman Filter를 사용한 후의 결과는 다음과 같다.

그림 3.3.5.31(a)(b)는 master에 Discrete Kalman Filter를 사용하기 전과 사용후의 결과를 비교하였다. 각각의 그림은 서로 다른 3개의 변화를 표시한다. 그림에서 점선은 Filter를 사용하기 전의 raw data를 표시하였다. 그림에서 보듯이 master가 정지 시와 동작 시 모두 어느 정도의 떨림 현상이 있음을 알 수 있다. 그림에서 중간 점선은 Low-Pass Filter와 High-Pass Filter 모두 사용한 후의 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 Filter를 사용하기 전보다 어느 정도 부드럽고 연속된 형태로 master가 움직임을 알 수 있다. 마지막으로 그림에서 실선은 자이로 센서를 이용한 Sensor Fusion Filter로써 Discrete Kalman Filter를 사용한 후의 결과를 보여준다. 각각의 그림에서 pitch와 yaw는 Discrete Kalman Filter를 사용하여 훨씬 부드럽고 peak도 어느 정도 감소시킬 수 있었다.

그림 3.3.5.32(a)(b)는 Discrete Kalman Filter를 사용한 후의 결과를 Peak 점들을 기준으로 확대한 그림이다. 두 그림 모두 Peak 점을 기준으로 Peak량이 줄어들었으며, master가 움직이면서 경사각이 변하는 과정도 부드럽게 움직임을 알 수 있다.

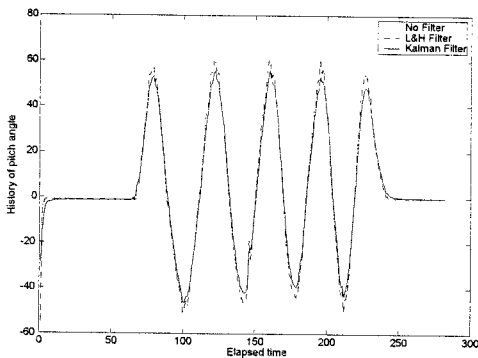


그림 3.3.5.31(a) 필터 사용 전과 사용 후의 pitch 각 비교

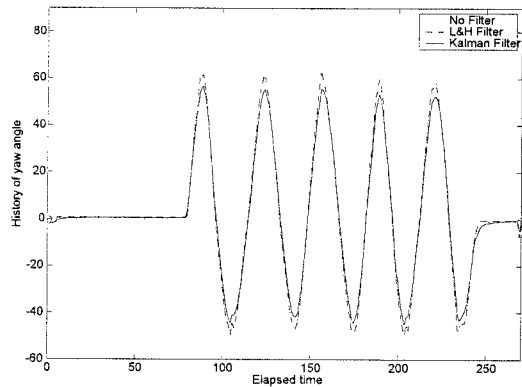


그림 3.3.5.31(b) 필터 사용 전과 사용 후의 yaw 각 비교

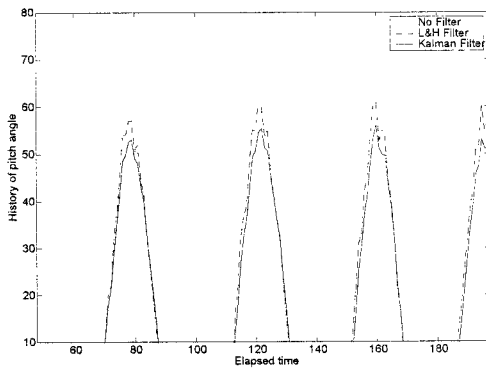


그림 3.3.5.32(a) pitch 각 비교를 위해 확대된 peak points

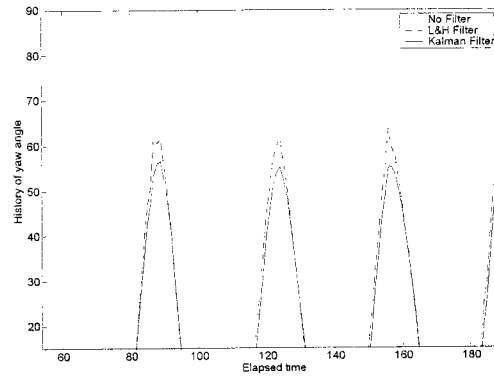


그림 3.3.5.32(b) yaw 각 비교를 위해 확대된 peak points

그림 3.3.5.33은 모터를 이용한 master의 정량적 성능 분석을 위한 실험 장치구성이다. 그림의 왼쪽은 모니터로서 master의 실험 데이터를 실시간으로 저장하게 된다. 오른쪽은 DC 모터로써 다른 컴퓨터를 이용해 원하는 각도로 master의 끝부분을 회전이동 시키게 된다.

모터를 이용하여 얻은 실시간 데이터와 master를 통해 얻은 데이터 비교에서는 각각 다른 샘플링 시간을 사용하여 그림을 통한 절대적 비교에는 한계가 있지만 master를 통해 얻은 결과치를 interpolation을 통해 샘플링 시간을 조정하면 모터를 통해 얻은 데이터와 근사화되어짐을 알 수 있다. 그러나 모터 자체에서 발생하는 자기장과 master에서 이용하는 마그네틱 센서가 영향을 받아 실제 master를 통해 얻은 데이터들은 어느 정도 시간이 지연된 결과로 나타났다.

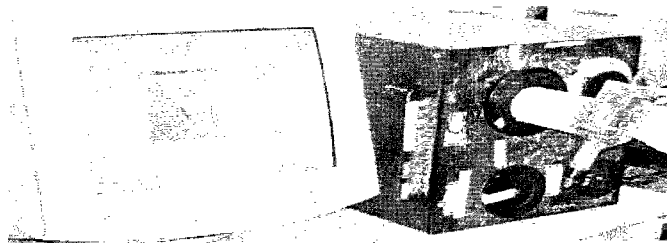


그림 3.3.5.33 모터를 이용한 분석 시스템

본 연구에서도 2차시제품의 경우와 마찬가지로 master를 움직였을 때 master가 이동한 실제 거리와 master의 현재 위치를 찾기 위해 실험하였다. 실험 방법은 가속도 센서를 통해 얻은 data를 가지고 이동 거리를 계산하도록 한다. 가속도를 시간에 관해 두 번 적분한 결과는 이동 거리가 되므로 이 사

실을 이용한다. 실험결과 master를 움직인 경우 얻어진 data는 실제 master의 이동 거리와 상당한 차이를 보인다. master를 움직일 때마다 그 방향에서의 가속도 값은 변하지만 그 값은 결코 master의 이동 시간당 수평적인 가속도를 의미하지는 않는다.

본 실험에 사용된 master의 내부에 내장된 가속도 센서는 지구 중력에 관한 변화값을 측정하는 센서이다. 따라서 master를 수평적으로 움직일 경우 가속도 값은 거의 변화가 없다. 다만 master를 아주 급속히 움직인 경우, 즉 중력가속도에 변화를 줄 수 있는 양만큼 master를 빨리 움직인 경우만 가속도 값은 의미를 갖게 된다. X-축, Y-축으로 master를 각각 움직인 경우 master들은 모두 순간적인 위치 변화가 생기지만, 다시 제자리로 돌아옴을 알 수 있다. 따라서 현재의 master으로 위치를 찾는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위하여 다음의 5차시제품에선 camera를 사용하는 방법을 제안하였다.

(6) Hand-held Master 5차시제품

Hand-held Master 5차시제품은 1-4차시제품에서 가장 큰 문제점으로 대두된 위치인식의 문제점을 해결하기 위하여 제작되었다. 5차시제품은 master의 끝단에 초소형카메라를 부착시켜서 optical flow를 측정하여 위치를 추정하고 자이로 및 마그네틱센서로부터 얻어진 master의 방향데이터와 함께 센서퓨전을 거쳐 최적화된 추정값을 얻어낸다. 본 연구의 개발 내용은 1)Master시스템의 하드웨어 설계 및 Proto 제작, 2)Master시스템의 위치와 자세를 알기 위한 알고리즘 적용 및 소프트웨어 개발 환경을 구축하는 것과 같이 크게 두 가지로 나누어지며 다음절에서 각각 이를 설명한다.

(가) 구조 및 기능

5차시제품의 하드웨어는 크게 보아 센서부, Main CPU board, Vibration Motor, 기타의 4가지부분으로 이루어진다. 센서부는 CCD Camera, 가속도계, 마그네틱센서로 이루어지며 CCD Camera는 Optical Flow를 측정하여 master의 위치를 추정하고, 가속도계는 중력을 측정하여 master의 경사각(pitch angle, roll angle)을 추정하며, 마그네틱 센서는 master의 회전각(head angle)을 측정한다. Main CPU로 채택된 DSP(TMS320C6711)는 영상 처리 등을 위한 고속의 DSP CPU이다. Vibration motor는 컴퓨터로부터 전달되는 원격제어 대상의 force feedback정보를 모터의 진동으로 오퍼레이터에게 전달하게 된다. 그외에도 통신 모듈(시리얼 통신)은 측정된 master의 3차원 위치 및 자세정보를 컴퓨터로 전달하고, 보조 버튼은 master의 구동 시작 등을 알리는 보조기능을 수행한다. 카메라는 그림 3.3.5.34, 3.3.5.35의 저가형 Gray 카메라 Eagle-160 이다

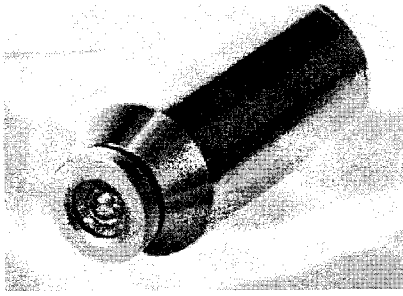


그림 3.3.5.34 소형카메라

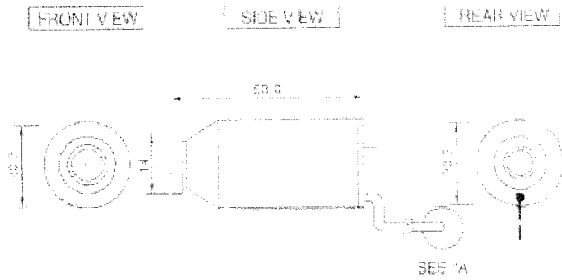


그림 3.3.5.35 소형카메라 개념도

또한 optical flow 획득 등의 영상처리를 위해 Image capture board를 채널 NTSC 출력 카메라를 지원하는 형태로 설계하였다.

자세 측정 센서 모듈(그림 3.3.5.35)에 쓰일 자세 측정 센서로는 마그네틱 센서를 제작하는 것으로 유명한 하니웰사의 HMR3300을 채택하였다. 이 센서 모듈은 하니웰사의 마그네틱 센서 모듈에 아날로그 디바이스사의 가속도계 센서를 함께 부착하여 3차원 자세 정보를 동시에 추출하고, 자동으로 센서 calibration까지 이루어지는 센서 모듈이다. 즉, 마그네틱 센서 HMC-1021을 수직으로 두개 부착하여 경사에 따른 자기 변화를 보정해 주면서 master의 head angle을 측정함과 동시에 가속도 센서 ADXL-202AE를 사용하여 master의 pitch angle과 roll angle을 측정해 낸다.

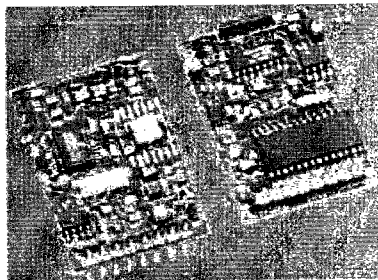


그림 1147.3.5.35 자세측정
센서모듈

5차시제품의 마이크로프로세서는 Optical flow와 같은 영상처리 알고리즘을 수행해야 하므로 TI사의 DSP인 TMS320C6711 CPU를 채택하였다. Main board는 DSP CPU, 센서 인터페이스부, Serial Communication, Input(Button) 인터페이스부, Vibration motor 제어부로 구성된다.

5차시제품의 소프트웨어는 Image capture program, Optical flow algorithm, 센서 모듈 calibration, Sensor data acquisition program, Sensor fusion algorithm, Serial Communication

program, Input(button) interface program, Vibration motor control program 등으로 구성되며 master에서 전송된 데이터 표시 및 간단한 3-D animation을 위한 user interface 환경이 있다.

카메라 캡처는 NTSC 출력을 읽어들이는 회로를 제작하므로써, 어떠한 카메라도 인터페이스가 가능하도록 설계하였다. 또한, 영상 처리 속도에 따라 초당 20 ~ 30 프레임을 읽어들이 수 있는 구조이다. 고속의 DSP CPU 를 사용하므로써, optical flow 이외의 복잡한 영상처리 알고리즘에도 충분한 성능을 발휘할 수 있는 구조이다.

마그네틱센서와 가속도센서는 일반적인 시리얼 인터페이스를 사용하도록 설계하였다. 최대속도는 19200 bps 이며, character based command & data 를 사용하므로써, 프로그래밍이 쉽도록 상호 통신 프로토콜을 설계하였다. 통신 프로그램은 일반적인 rs-232 serial communication 프로그램을 사용하면 된다.

또한, 시스템 구동 시작 등으로 사용하기 위해 한 개의 입력 버튼을 장착한다. 한번 버튼을 누르면 master의 기능이 가동되고, 다시 한번 누르면 기능이 중지되는 형태로 프로그램이 설계되었다.

Master의 유일한 actuator로 vibration motor 가 있다. 이는 master를 이용하여 로봇 등을 원격 제어할 때, 원격지인 로봇 시스템에서 외부 저항 등에 의해 전달되는 힘을 사용자가 느낄 수 있도록 하기 위함이 주 목적이다. 즉, 로봇의 end effector 또는 gripper 등에 힘이 가해지면 원격으로 조정하는 사용자는 vibration motor에 의해 그 상황을 전달 받게 되고, 이에 적절한 행동을 취하게 된다.

그림 3.3.5.36은 5차시제품의 모니터링 시스템을 보여준다. 오른쪽 부분은 카메라 캡처와 이를 통한 optical flow 알고리즘 처리 내용을 보여 주고 있다. 또한 마그네틱, 가속도 센서에 의한 head, pitch, roll angle 에 대한 내용은 왼쪽 상단과 가운데 부분에서 이루어 진다. 이에 master의 3차원 자세에 대한 그래픽을 동반하고 있는데, 그래픽 디스플레이의 속도를 증가 시키기 위해 OpenGL method 를 이용하여 3차원 그래픽을 시도하고 있다. 더불어 왼쪽 하단은 master 의 위치 변화를 그림으로 표현해 주는 역할을 한다.

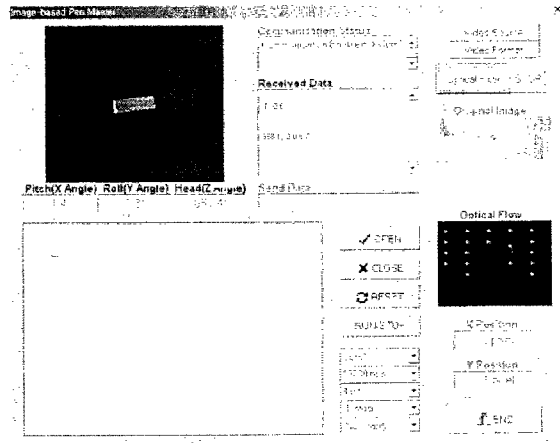


그림 3.3.5.36 5차시제품의 모니터링 시스템

본 연구에서 개발코자 하는 camera-based master는 앞 부분에 카메라와 영상 캡처 모듈 및 버튼 관련 회로, 가운데 부분은 메인 DSP 및 메모리, 뒷부분은 마그네틱 센서 및 가속도계 센서, 모터부로 구성되어 있다 (그림 3.3.5.37). 5차 시제품은 시스템의 기능 구현에 충실하고자 노력하였기에, 하나의 보드에서 모든 기능을 구현하였다. 본 연구의 5차시제품은 당초 목표로 했던 정밀도 5mm, 0.5deg 및 저가격화, 경량화를 달성하였다.

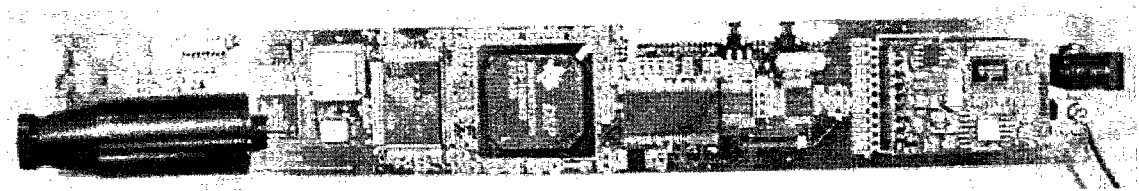


그림 3.3.5.37 5차시제품의 PCB기판

(나) Master의 위치를 알기 위한 optical flow 알고리즘 개발

Dynamic system에 설치되어 있는 카메라 영상에서 system motion을 구할 때, 일반적으로 optical flow 알고리즘을 이용한다. Optical flow는 3차원 물체를 2차원에 투영한 이미지의 각 pixel에 대한 motion velocity 이다. 즉, 3차원 객체의 움직임에 의해 영상 좌표계 상에 투영된 2차원 영상내의 각 화소의 이동 속도를 나타내는 속도장으로서 실세계 영상의 연속적인 흐름을 반영, 대상의 3차원 구조, 물체의 움직임 등에 관한 정보를 얻을 수 있다.

Optical flow 를 구하는 방법은 각 영상 프레임으로부터 특징을 검출하여 정합하고, 그 특징의 위치에서 정확한 속도를 추정한다. 하지만, 잘못 정합된 특징점들은 에러를 유발하므로, 정합된 특징점들에 대한 선택 등이 중요한 문제로 대두된다. 개략적인 optical flow 알고리즘의 흐름도는 그림 3.3.5.38과 같다.

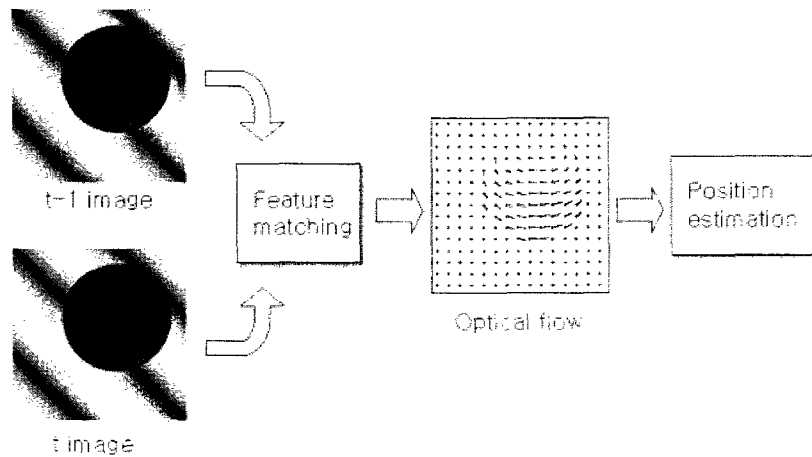


그림 3.3.5.38 Optical Flow Algorithm

현재, 순차적인 두 영상에서 정합점들을 찾아내는 feature matching 방법으로는 template block matching 방법을 사용하고 있다. 즉, template block size 를 결정하고, 이에 일치하는 정합점들을 주변 영역에서 찾아나간다.

기본적으로 optical flow 알고리즘 적용의 제한 조건은 slow motion 이다. 다시 말하면, 일치하는 정합점을 주변 영상 영역에서 찾아내야 하므로, 알고리즘 처리 시간이 길어진다면 빠른 영상 변화에는 적용이 불가능하다. 이에 본 연구에서는 영상처리 알고리즘 시간을 매우 빠르게 하므로써, slow motion 이라는 제한 조건을 극복하였다. 현재 본 연구의 optical flow 알고리즘 처리 시간 목표는 100 msec이므로, floating point 연산이 가능한 고속의 DSP CPU 가 필요하다. 이에 맞추기 위해 성능 대비 가격이 저렴한 TI 사의 TMS320C6711 DSP 를 채택하였다.

현재는 160X120 pixel size 영상에서 15X15 template block 을 이용하여 개발하고 있으며, 정합 점들이 5 개 이상 구해지면 그 벡터량을 평균하여 상대 위치 변화량을 계산하고 있다. 향후에는 좀더 적절하게 noise optical flow vector 들을 제거할 수 있는 방법이 계속 모색되어야 하리라 생각된다.

(7) 가상 텔레로봇시스템

본 연구에서 개발된 master를 실제의 master-slave robot 시스템에 적용하기 위해서는 우선 가상의 텔레로봇으로서 그림 3.3.5.39와 같이 텔레로봇용 Graphic Simulator가 필요하다. 본 연구에서는 개발된 master 시제품과 텔레로봇 제어알고리즘을 테스트하기위한 테스트베드로서 이와 같은 가상 텔레로봇 시스템을 개발하였다.

가상 텔레로봇 시스템은 Robot의 Motion Data에 근거하여 3차원 Robot Animation(그림 3.3.5.40)을 구현함으로써, Robot 알고리즘 개발자의 Robot 자세 분석에 기여하고 프로그램확장이 가능하도록 한다. 본 시스템은 Object-Oriented Programming 기법을 이용하여 프로그램 확장이 가능하고 Sampling Rate는 50Hz이상으로서 1sample당 수행시간은 20msec이하이다. 현재는 PUMA560로봇의 Kinematics Parameter를 기본으로 사용하였으나, 다른 Robot의 Kinematics Parameter도 매뉴얼 또는 Code상으로 입력하여 사용이 가능하다. 이 시스템의 기본 구조는 그림 3.3.5.41과 같다.

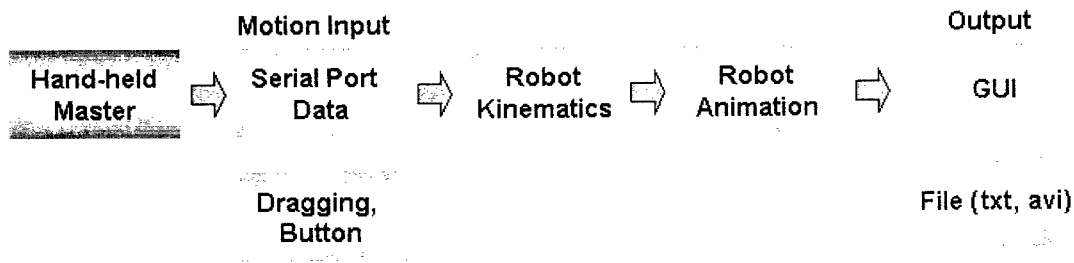


그림 3.3.5.39 Virtual Tele-robot 개념도

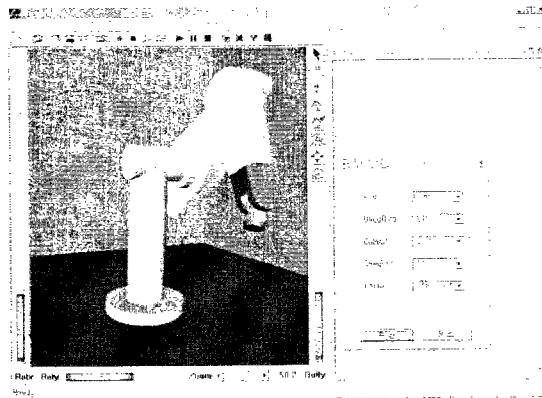


그림 3.3.5.40 Robot Graphic Simulator

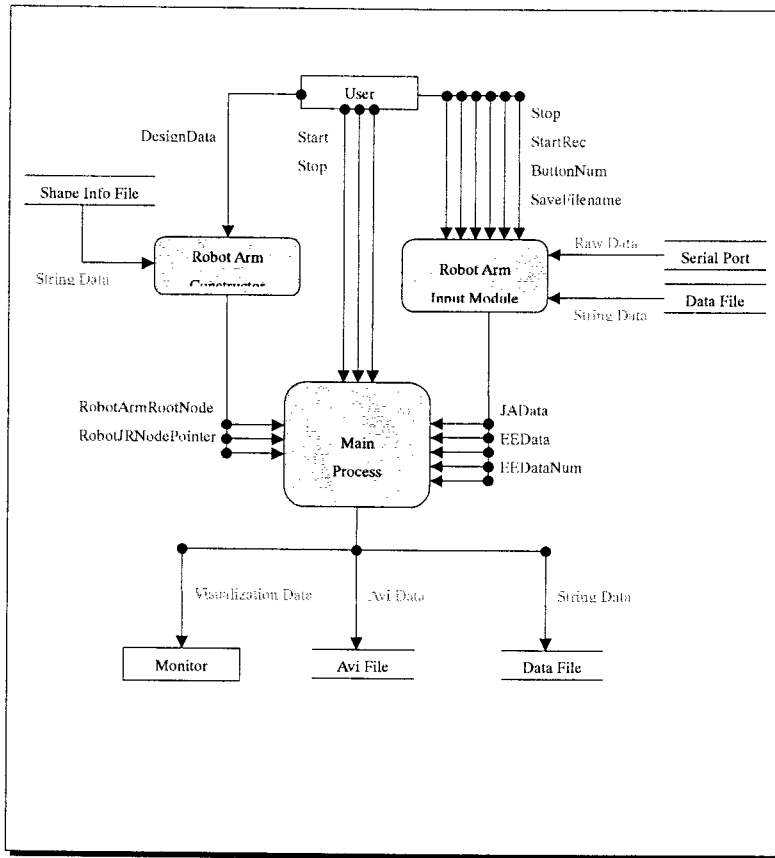


그림 3.3.5.41 Virtual Robot SW구조 개념도

나. Master-Slave 제어알고리즘 개발

본 연구에서 개발한 Hand-held master를 이용한 master-slave robot 시스템은 bilateral tele-robot (master와 slave가 서로 영향을 주는 텔레로봇)이 아니고 uni-lateral tele-robot 시스템이므로 사용에 주의를 기울여야한다. 즉 slave가 singular position에 도달하거나, slave의 역기구학해 (inverse kinematic solution)가 존재하지 않는 경우, slave가 object에 contact하여 force를 가하는 경우, slave가 obstacle에 충돌하는 경우 등과 같이 slave의 운동이 master의 운동을 따라가지 못하는 상황이 발생하는 경우를 대비하여 텔레로봇 제어알고리즘을 설계해야한다. 좀더 구체적으로 이를 살펴보자.

대부분의 전형적인 로봇제어기는 사전에 계획된 궤적과의 오차를 최소화하기 위해 제어신호를 발생시켜 궤적추적(trjectory tracking)을 한다. 그러나 대부분의 경우 로봇의 주위환경과의 상호작용(interaction)을 필요로 하므로 추적오차의 최소화는 어렵게 될 가능성이 있다. 그 결과 발생된 시간

지연(delay)과 추적오차는 사전에 계획된 경로에서 많이 벗어나게 하므로 로봇과 그 주위환경에 있어 강한 반응력, 예측하지 못한 운동 등 심각한 영향을 초래할 수도 있다. 그러므로, 실용적인 로봇제어에서는 사전에 계획된 경로에 따라 다음 상태(state)의 명령을 주는 것보다는 현재 상태에 기초하여 다음 명령을 주는 것이 더 낫게 된다. 그러한 제어기는 로봇과 그 주위환경에 대해 갱신된 정보에 따라 다음 상태에 도달하게 하는 것이므로 오차를 줄이는데 있어 더욱 합리적이 된다. 이러한 개념에 따라 본 연구에서는 원격조종(Tele-operated) 로봇 제어를 위한 기법으로서 Reference 적응 제어기술을 연구 개발하였다.

우선 로봇 제어시 지연 및 추적오차를 보정하기 위하여 슬레이브 로봇의 목표위치를 현재위치에서의 최적경로를 계산하여 실시간으로 결정하는 최적 경로 접근 방식을 채택하였다. 즉, 현재 위치를 $x(k)$ 라 할 경우, 다음 샘플링 시간에서의 목표위치 $x^d(k+1)$ 은 현재위치 $x(k)$ 로부터 최종 목적점과의 최적 경로를 구하여 결정한다.

임피던스(Impedance)제어나 순응(Compliance)제어와는 달리 Reference 적응제어기술은 compliance의 범위의 제한이 없고 Time delay에 대처할 수 있는 장점을 가진다. 또한 임피던스(Impedance) 제어기법과 결합하여 희망입력 $x^d(k)$, $\dot{x}^d(k)$, $\ddot{x}^d(k)$ 를 최적경로접근방식에 의해 구하는 Reference 적응 임피던스 제어기법을 제안하였다.

Force Accommodation은 Tele-operation에 있어서 자유운동(Free motion)과 구속운동(Constrained Motion)의 페이즈 전환 문제 (Phase Transition Problem)을 다룬다[5]. 그림 3.3.5.42와 같이 slave robot은 자유운동상태에서는 속도제어를 수행하고, 접촉 발생후엔 힘제어를 수행한다. Force Accommodation Based Adaptive Reference Control (FABARC)은 Force Accommodation과 Adaptive Reference의 개념을 결합하여 Hand-held master의 제어에 적용하기 위한 Control Algorithm이다.

FABARC의 기본 개념은 그림 3.3.5.43과 같다. 이 그림에서 나오는 수식의 의미는 다음과 같다.

◦ \dot{x}_m : 카테시안 속도명령. \dot{x}_r : Reference Adaptation에 의해 보정된 속도명령. \dot{x}_f : Force Accommodation Rate. \dot{x}_c : 제어입력명령, f_r : Reaction force

여기서 Master와 Slave의 Scale Factor는 1로 가정한다.

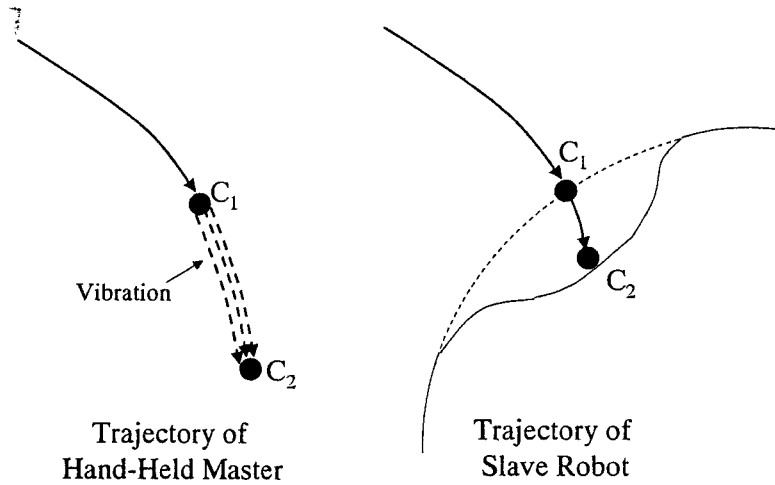


그림 3.3.5.42 Master-Slave의 Phase Transition 문제

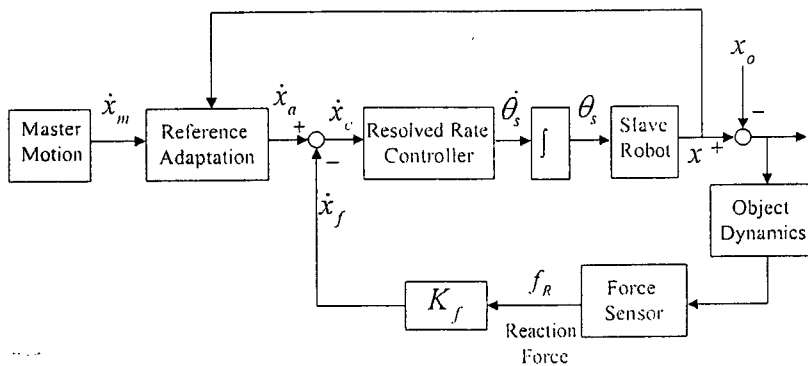


그림 3.3.5.43 Force Accommodation Based Adaptive Reference Controller

Reference Adaptation이 없다고 가정하고, 자유운동상태에서 반응력 (Reaction force)은 0이므로 $\dot{x}_f = 0$ 이고 전체 controller는 기존의 Resolved Rate Controller와 같은 형태를 가지게 된다. 그러므로 독립관절 제어(Independent Joint Control) 등을 이용하면 된다. 접촉운동 상태(Contact motion)에서는 로봇 및 작업대상체의 손상을 방지하기 위해 Force Accommodation Rate Law $\dot{x}_f = K_f f_n$ 를 이용한다. K_f 는 Diagonal Matrix로서 안정성을 보장하는 Gain으로 구성된다. 보상된 제어입력명령은 $\dot{x}_c = \dot{x}_m - \dot{x}_f$ 이므로 Slave가 물체에 가하는 힘이 증가하면, 가하는 힘의 반대방향으로 힘을 만들어 상쇄하는 제어명령이 발생된다. 평형상태가 되면 Master의 위치와 Slave의 힘이 서로 대응된다. 이 제어기법은 고정되지 않은 Hand-held master 고유의 특성에 따라 활성모드(Active Mode)와 비활성모드(Inactive Mode)와의 실시간 Switching이 필요하다. 이 과정에서 발생하는 불연속성을 제

거하기 위해 다음과 같은 Reference Adaption을 적용한다.

Master가 Active Mode에 있을 경우

$$\dot{x}_m(i+1) = \dot{x}(i) + [\dot{x}_m(i+1) - \dot{x}_m(i)]$$

Master가 Inactive Mode에 있을 경우

$$\dot{x}_m(i+1) = \dot{x}(i)$$

본 연구에서 개발된 Hand-held Master 시제품은 Force Accommodation Based Reference Adaptive Control (FABARC)에 의해 Virtual Robot을 안정적으로 조종할 수 있었다.

다. Hand-held Master 적용방안 도출

본 연구에서 개발된 Hand-held Master는 다양한 적용방안을 가질 수 있다.

우선 Hand-held Master를 이용하여 다양한 원격조종 로봇수술작업을 수행할 수 있다 (그림 3.3.5.44, 3.3.5.45). 수술의 안전성을 도모할 수 있고, 의사의 직관성을 높여 피로도를 감소시킬 수 있다. 최근 원격조종(Tele-operation) 기법을 이용한 무침습 (Non-invasive) 또는 최소 침습수술 (Minimally Invasive Surgery) 및 이를 이용한 진단이 증가되고 있다. 그러나 의사가 수술작업부위를 직접 다루지 않고 떨어져서 다루는 이러한 작업은 인체 내 조직에 대한 정보를 제한적으로 줄 수 밖에 없으므로 의사의 수술도구 조작능률을 저하시켜 피로도, 수술시간 및 수술 중 오류발생확률을 증가시키고 적용할 수 있는 수술기법의 범위를 제한한다. 이러한 최소 침습수술의 근본적인 단점을 극복하기 위하여 매스터-슬레이브 원격조종 (tele-operated) 수술이 도입되어 내시경, 수술도구 등을 의사의 의도와 직관에 최대한 근접시켜 움직일 수 있는 매스터(master) 및 원격조종 제어기술 등의 인간친화형(Human-friendly) 인간-로봇 상호작용기술이 활발히 연구되고 있다. 이러한 원격조종 기술이 넓게 사용되기 위해서는 사용자의 조작시 피로도를 최소화시킬 수 있도록 사용자가 사용하기 쉽게 만드는 인간친화형 Hand-held Master 기술의 개발이 필수적이다.

또한, Hand-held Master는 공간상의 위치를 정확히 계산 할 수 있으므로 로봇 작업시의 Caibration에 유용하게 사용될 수 있다(그림 3.3.5.46). Hand-held Master의 그러한 특성을 이용하면 가상현실공간이나 3D Game상에서의 입력장치로도 사용될 수 있다(그림 3.3.5.47). 기존의 Joystick이나 Wand보다 훨씬 직관적인 장점을 가지게 된다. 이외에도 미래에는 Wearable PC나 휴대용 차세대PC의 사용이 늘어날 것이므로 Hand-held master는 이러한 다양한 PC의 입력장치로 사용될 수 있다 (그림 3.3.5.48).



그림 3.3.5.44 수술용 로봇 (ZEUS)

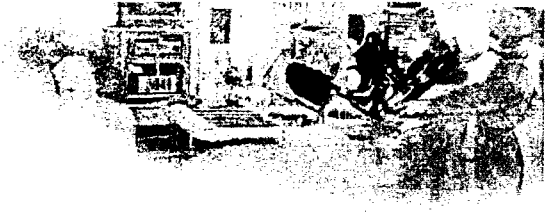


그림 3.3.5.45 수술용 로봇 (da Vinci)

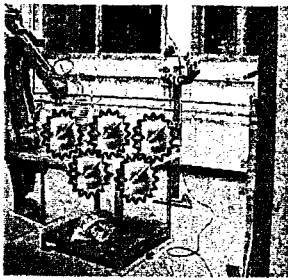


그림 3.3.5.46 Calibration



그림 3.3.5.47 3D Game



그림 3.3.5.48 Wearable PC

제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발

1 수직철골 용접로봇 시스템의 개발목표

본 과제는 건설 자동화 분야 우선 순위 설문 조사에서 업계들로부터 그 필요성이 가장 높은 것으로 조사된 수직 철골 용접 로봇을 개발하는 것으로서, 이것을 토대로 건설용 로봇기술을 국가적인 전략적 산업분야로서 중점 육성하여 국제경쟁력을 높이고, 나아가 관련기술의 파급으로 자동화기술의 선진화를 유도하고자 한다.

◎ 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발 사양

- 적용 범위 : 각주, 환주, H빔 [기둥치수(각주의 경우): 550 ~ 1000 mm]
- 로봇 이동 방식 : 레일 주행 방식
- 중량 : 로봇 50Kg이내, 주행장치 50Kg이내
- 용접품질 향상 기능 : 센서를 통한 용접선 검출 및 보정
- 토치 위치제어 및 검사기능 : 위치 정밀도 $\pm 0.5\text{mm}$
- 작업 편이성 : 설치, 이동의 간편성 (설치시간 5분 이내)
- 로봇 제어장치 및 용접장치 운반 기능

다음 그림은 본 과제에서 개발 목표로 하고 있는 철골 용접 로봇 시스템의 개념도로서, 보다 상세한 설명은 다음절에서 기술하였다.

그림 3.4.1.1 수직 철골 용접 로봇 시스템의 개념도

2. 개념 정립 및 기본 설계

앞장에서 언급한 바와 같이 직접 건설 현장을 답사하여 작업환경을 조사하여 얻은 수직 철골 용접 로봇 설계시 고려해야 할 조건과 필요기능을 정리하면 각각 표 3.4.2.1, 3.4.2.2와 같다.

표 3.4.2.1 용접 로봇의 설계 조건

구분		로봇 설계 조건
적용 공법	시공방식 용접방식	기존의 철골시공공법을 준수 옆보기자세 CO2 arc welding
대상 작업물	형상	H 형강(각주, 환주 확장가능)
	치수	500~1000mm (폭, 높이)
	재질	일반철구조용강(SS40계열)
	자세	수직 기둥
	용접부 위치 개선각 erection plate	바닥면에서 1~2m 높이 30deg 이상 있음
작업량	용접 속도	100~300 mm/min
	최대 연속용접 작업 능력	24시간 이상 인간작업자의 4배이상
	환경조건 (옥외조건)	작업 온도 비/습도 진동/충격
작업 준비	작업 온도	상온
	비/습도	방습방진 구조
	진동/충격	내구성
	지지고정대 허용하중 로봇시스템 운반방법 설치 조립 조건 수직이동/고정방식 주변장치	100kgf 대차운반 조립분해식, 설치해체5분이내 winch/clamp 장탈착식 바닥면 배치
	예열 장애물제거 후열 스퍼터 제거 용접부 검사	요구되면 수작업 수작업 요구되면 수작업 option 사양 기존방식 (수작업)

표 3.4.2.2 수직 철골 용접의 기술과 기능

필요 기술	세부 기술
환경인식/ 교시기술	용접선 추적기술 (Laser tracker) 장애물 회피 기술 (Vision 인식 / 회피) 작업 교시 기술 (Off-line teaching) 학습 기능 (용접 path 적층 기술)
시스템 설계 기술	로봇 시스템 경량화 / 모듈화 지지대 고정 / tilting 및 안전 로봇 시스템 전장 / 제어부 MMI 및 모니터링
용접 작업 기술	용접 환경 및 조건 설정 / 용접 DB 용접 개시점 인식 Fail recovery 기능 주행 경로 설정

용접시스템의 상용화를 염두에 두면 로봇시스템의 가격 및 현장적합성 등을 고려해야 하며, 따라서 가능한 한 구조와 기능의 단순화, 경량화가 필요하다. H-beam 수직철골 용접의 경우 로봇용접 작업은 web부위를 용접할 때는 플랜지가 장애물이 되며, 플랜지 용접 시는 erection piece가 장애물이 된다. 따라서, 용접자세의 실현, 장애물 회피를 위해서 적어도 6개 이상의 자유도가 요구된다. 용접작업은 플랜지부와 web부를 각각 독립적인 용접구간으로 하여, 기둥을 따라 이동하면서 용접하게 되며, 기둥 주위에는 레일을 설치, 고정하는 메커니즘이 필요하다. 수직방향으로는 철골조립 전에 미리 철골에 후크를 용접하여, 용접 작업 시 레일과 용접 로봇을 와이어로 지지토록 한다. 수직이동은 윈치를 활용하고, 1차 시제품에서는 H-beam의 4코너를 가이드로 로봇시스템의 경사각 (tilting angle)을 조정토록 하였다. 레일은 빔의 치수에 따라 조정 가능하도록 8분할방식으로 설계하였으며, 고정부에는 거리조정이 가능한 clamp를 설계하였다. 그림 3.4.2.1는 본 연구에서 개발하고자 하는 용접 로봇 시스템의 1차 년도 개념도를 나타낸다. 1차 년도 초기에는 그림과 같이 2개의 소형 용접 로봇을 이용한 설계를 하였으나, 최종 단계에서는 1개의 용접로봇을 사용하여 기능을 할 수 있도록 설계변경, 시제품을 제작하였다.

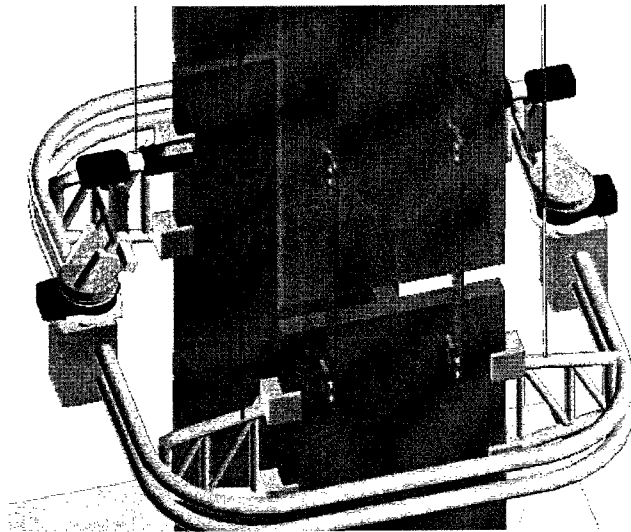
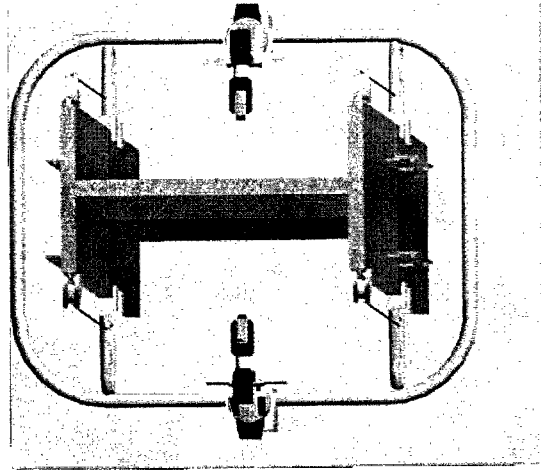


그림 3.4.2.1 H-beam 수직 철골 로봇 용접의 개념 설계

3. 수직철골 용접 로봇 시스템의 H/W 설계 및 시제품 제작

가. 시스템 구성 및 주행 메커니즘 설계

그림 3.4.3.1은 용접 로봇 시스템의 전체 구성도를 나타낸다. 여기에는 용접 로봇 및 제어기, 용접로봇 주행 캐리어, 각종 센서(레이저 센서, 아크 센서, 터치센서) 등으로 구성되어 있다.

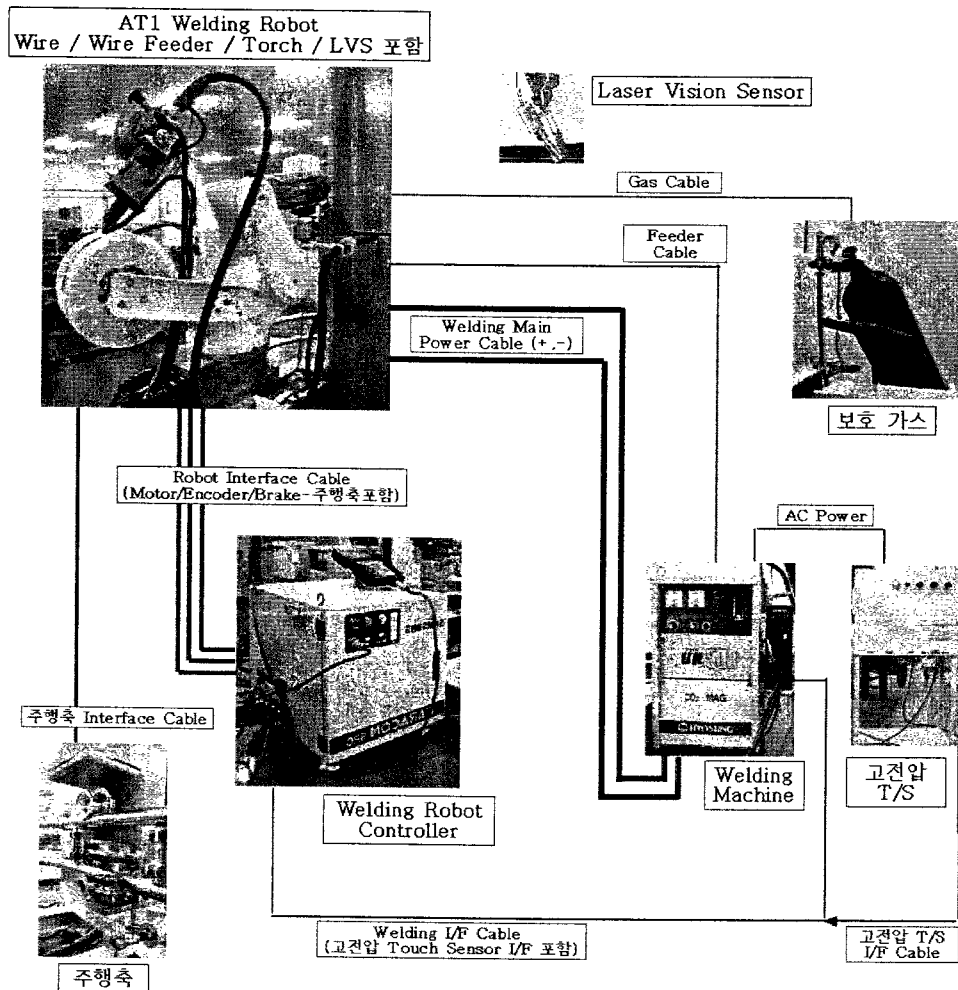


그림 3.4.3.1 수직철골 용접 시스템의 System layout

(1) 1차 시제품

그림 3.4.3.3은 설계 제작된 레일 주행부 메커니즘을 나타낸다. 주행부는 DC 서보 모터를 이용하여 곡

선부 주행이 가능하도록 설계하였으며, 미끄럼 방지를 위한 wheel 예압 메커니즘으로 구성하였다. 또한, 주행 레일부는 현장 조립이 쉽게 이루어질 수 있도록 경량화, 모듈화하여 설계하였다. 그림 3.4.3.4는 로봇 설치 및 고정을 위한 elevator 장치를 보여준다. 2개의 원치용 모터와 도르래를 사용하여 용접부위에 로봇시스템을 고정시킬 수 있도록 상승과 하강이 용이하도록 구성하였다. 그림 3.4.3.5는 용접 와이어 공급장치(wire feeder)로서 로봇 이동시에도 용접선 공급이 원활히 이루어질 수 있도록 하기 위하여 로봇 후단부에 고정 부착시켰다.

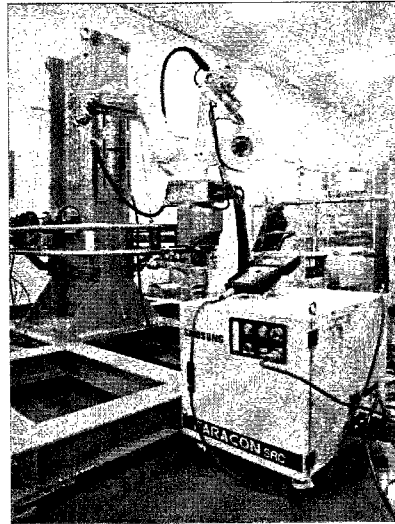


그림 3.4.3.2 수직 철골 용접 로봇 시스템의 Prototype

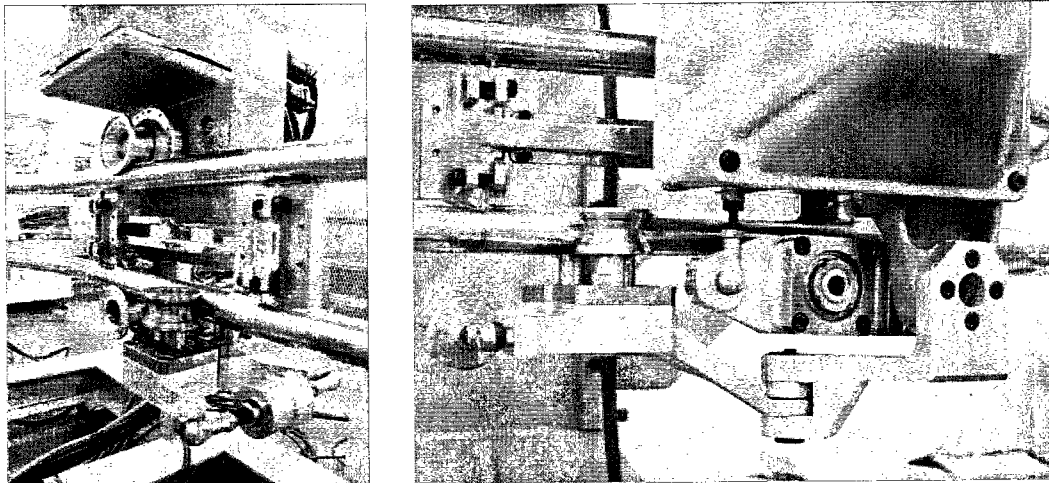


그림 3.4.3.3 용접 로봇 시스템의 Rail moving mechanism

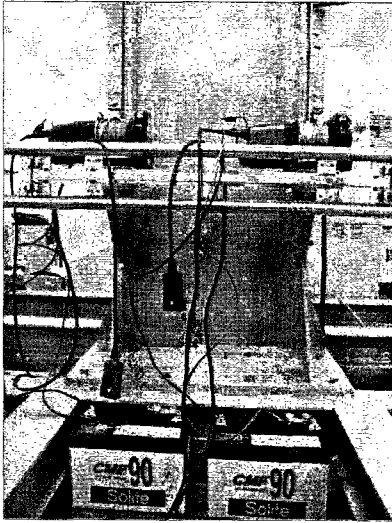


그림 3.4.3.4 Elevator unit

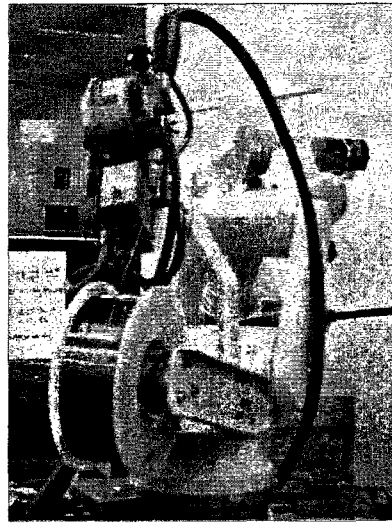


그림 3.4.3.5 Wire feeder

(2) 2차 시제품

소형 용접로봇은 삼성전자의 6축 다관절 로봇을 사용하였으며, 여기에 용접 기능을 구현할 수 있도록 제어기 및 S/W 등을 개발하였다. 수직철골 용접로봇 시스템에서 또 하나 중요한 요소는 레일 주행부로서, 용접로봇을 탑재하여 주행하면서 넓은 영역에 대한 용접작업이 가능하게끔 한다. 2차 시제품에서는 이러한 용접 로봇 캐리어에 대한 안정성 및 편의성을 향상시키고자 보완 작업을 수행하였다.

로봇의 용접작업은 일련의 상하 가이드 레일에 주행 캐리어 시스템을 설치하고 그 위에 용접로봇을 탑재한 상태에서 용접을 수행하게 되며, 이 주행 캐리어 시스템을 이용하여 가이드 레일을 따라 로봇을 주행시키면서 구간 이동뿐만 아니라 주행 중에도 안정된 용접이 가능하도록 고안한 것이다.

본 연구에서 개발한 주행 캐리어는 곡선부 주행이 가능하며 주행 중에도 용접이 가능하도록 한 시스템으로서 3방향(roll, pitch, yaw)의 모멘트 지지 구조로 이루어져 있다. 이를 위해서 주행 캐리어 시스템의 무게중심을 낮게 설계/제작하였으며, 구동부와 가이드부를 일정한 거리 간격을 두었고 편심 가이드 롤러를 설치하여 예압을 조정할 수 있게 하여 안정적인 동적 특성을 지닐 수 있게 하였다. 또한 구동시 슬립이 발생하면 주행후 자기 위치 원복시 많은 주행 오차를 갖게되기 때문에 구동 롤러와 가이드 레일간의 일정한 선속도를 유지하도록 한 것이 특징이며, 곡선부 주행시 회전중심에 따라 자기 위치 복원이 자연스럽게 이루어지도록 장치를 구성하였다. 또한, 용접작업의 현장성과 향상된 작업 효율을 위한 장치들, 레이저 비전 센서, 와이어 커터 그리고 앤티 스피터 유닛 등을 설치할 수 있도록 용접로봇의 캐리어 시스템을 구성하였다.

(가) 주행 캐리어 시스템의 부품 구성과 특징

주행캐리어 시스템은 철골을 용접하는 용접로봇의 주행을 위해서 200W DC 서보 모터를 사용하였으며, 중공 구동축과 구동 롤러를 1축으로 구성하고 가이드 레일을 중심으로 상대편에 부착된 편심 가이드 롤러 축을 한 쌍으로 하는 구동부와 회전모멘트 발생을 방지하기 위한 가이드 롤러들로 구성된 가이드부로 구성되어 있다. 또한, 용접로봇의 무게를 지지하고 가이드 레일의 접촉을 확실하게 하기 위한 V형 썸기타입의 구동 롤러와 이 구동 롤러의 구동력을 편심 가이드 롤러에 전달하여 슬립을 방지하는 슬립방지 구동기어 세트를 구비하였다.

모터의 회전력을 전달하는 구동부와 회전모멘트 발생 방지를 위해 구동부와 일정간격을 두고 설치한 가이드부로 구성하여 주행 안정성을 극대화한 것이 3차 연도 주행 캐리어 시스템의 특징이다. 또한 곡선 주행시 일정한 선속도를 유지하고 자기 원위치 복원을 위해서 가이드 레일의 중심선상에 설치한 오일리스 베어링 등으로 구성하여 가이드 레일의 내외측면의 압력차에 의해 자연스럽게 가이드 레일의 곡선반경에 대한 접선방향으로 놓여지게

한 것이 특징이다.

그림 3.4.3.6은 수직철골 용접로봇이 탑재된 주행 캐리어 시스템의 전체 조립도이다. 그림 3.4.3.7은 주행 캐리어 시스템의 구동부 단면도이며, 그림 3.4.3.8는 주행 캐리어 시스템의 가이드부 단면도이다. 그림 3.4.3.9은 곡선부 레일 주행시 선속도 유지를 위한 자기 위치 복원에 대한 설명도이다.

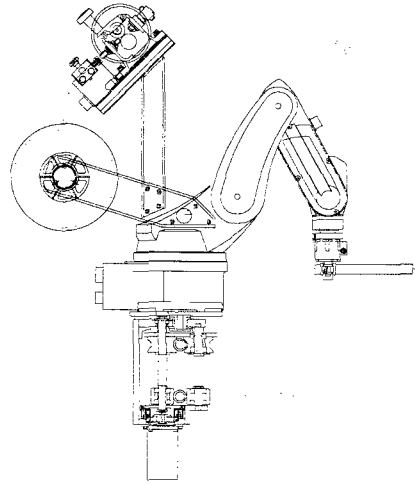


그림 3.4.3.6 용접로봇이 탑재된 주행 캐리어 전체 조립도

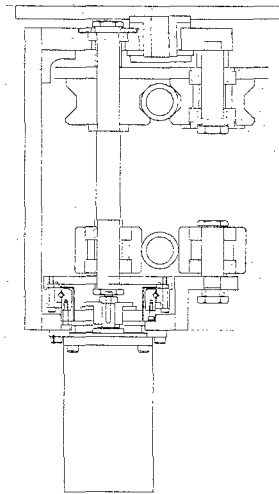


그림 3.4.3.7 주행 캐리어 시스템의 구동부 단면도

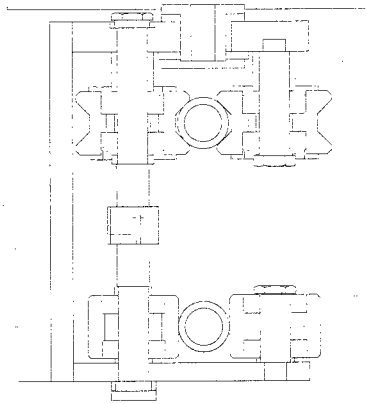


그림 3.4.3.8 주행 캐리어 시스템의 레일 가이드부 단면도

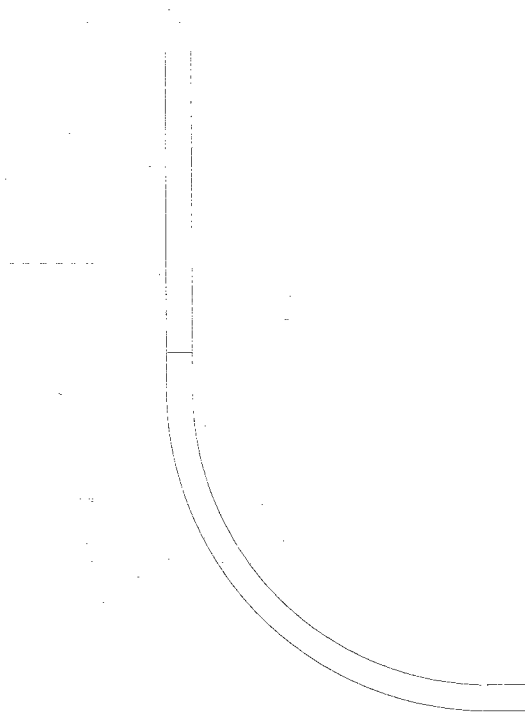


그림 3.4.3.9 자기 위치 복원 설명도

*도면의 주요부분에 대한 부호의 설명

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| 1 : 로봇 설치대 | 2 : 캐리어 상판 |
| 6 : 캐리어 하판 | 8 : 구동 중공축 |
| 10 : 구동 롤러 | 12 : 가이드 원통 롤러 |
| 13 : 편심축 | 26 : 캐리어 상하판 지지대 |
| 29, 30 : 슬립방지 구동기어 세트 | 31 : 편심 가이드 롤러 |
| P1 : 크로스 롤러 베어링 | P2 : 테이퍼 롤러 베어링 |
| P3 : 원통 롤러 베어링 | P4,5 : 오일리스 베어링 & 와셔 |

(나) 주행 캐리어 시스템의 설계 제작

본 연구에서는 H-Beam의 크기와 종류에 따라 주행 가이드 레일의 설치가 용이하도록 직선부 4개와 곡선부 4개로 구성된 일련의 상하 가이드 레일을 1세트로 구성하였으며, H-Beam의 크기가 바뀌게 되면 직선부 가이드 레일 길이만을 교체하도록 한 현장성을 특징으로 하고 있다. 또한, 현장 적용성을 목적으로 빠른 설치의 용이성을 위해 클립 레버 타입의 접철식 레일 조립 방법으로 수정 보완하였다.

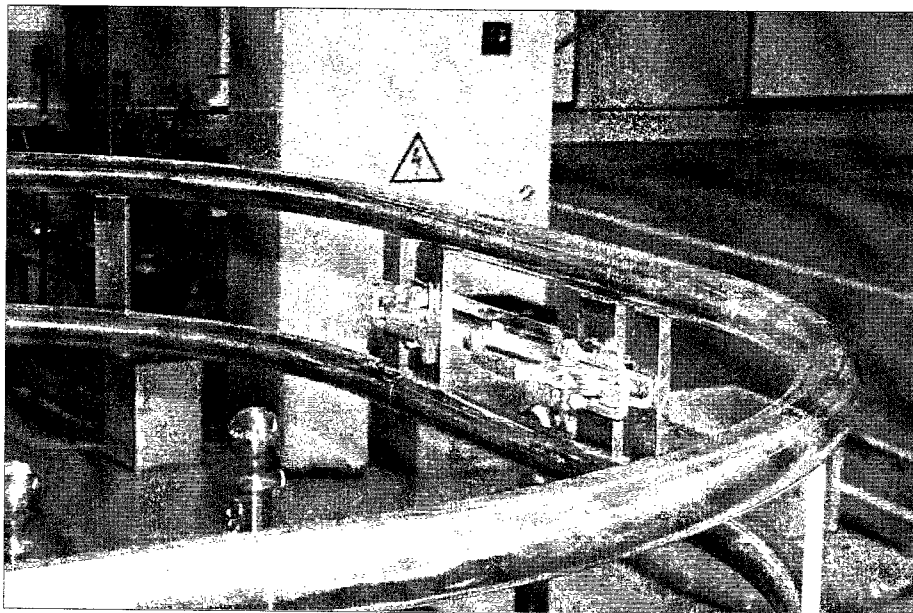


그림 3.4.3.10 접철식 레일 구조

본 용접로봇의 주행 캐리어 시스템은 상기 설명된 상하 가이드 레일에 설치하게 되며 이

주행 캐리어 시스템 위에 용접로봇을 탑재하여 용접작업을 수행하게 된다. 가이드 레일에 주행 캐리어 시스템을 고정한 상태에서 용접작업을 수행하기도 하지만 주행 캐리어 시스템을 이용하여 용접로봇을 주행하게 하여 주행중 용접도 가능하게 한 것이 특징이다. 뿐만 아니라 작업구간 이동 혹은 곡선부 용접도 가능하도록 설계 제작하였다.

본 주행 캐리어 시스템 2차 년도까지 경과된 상태에서의 문제점을 보완하고 현장 적용성을 갖추기 위해 주행안정성을 최대의 목표로 진행되었으며, 본 과제의 최종 년도로서 용접로봇의 용접품질 향상을 위해서 무엇보다도 용접로봇의 안정된 주행 동적 특성을 지니도록 주안점을 두어 진행한 결과, 3방향(roll, pitch, yaw)의 모멘트 지지 구조로 설계하여 주행 중에도 용접이 가능하도록 제작되었다. 그 동안 고질적인 문제로 제기되던 용접로봇의 주행중 흔들림을 완전히 해소하였고 직선부와 곡선부 구간 이동시 구동력 미전달로 인한 문제 등을 3차 연도에서는 해결한 것이다.

이를 위해서 주행 캐리어 시스템의 무게중심을 낮게 설계 제작하였으며 구동부와 가이드 부를 일정한 거리 간격을 두었고 편심 가이드 롤러를 설치하여 예압을 조정할 수 있게 하였다. 또한 구동시 슬립이 발생하면 주행후 자기 원위치 복원시 슬립량 만큼의 주행 오차를 갖게되기 때문에 구동 롤러와 가이드 레일간의 일정한 선속도를 유지하도록 한 것이 특징이며, 곡선부 주행시 회전중심에 따라 자기 위치 복원이 자연스럽게 이루어지도록 주행 캐리어 시스템을 구성한 결과, 용접로봇의 주행시 안정적인 동적 특성을 지니게 되어 전체 수직 절골 용접 로봇 시스템의 완성도를 높이는 계기를 마련하였다.

이하 본 연구의 결과를 상세히 설명하기 위하여 그림과 현장사진의 실시 예를 첨부된 도면을 참조로 하여 설명하기로 한다. 그림 3.4.3.11, 3.4.3.12은 설계/제작된 주행 캐리어의 모습을 보여준다.

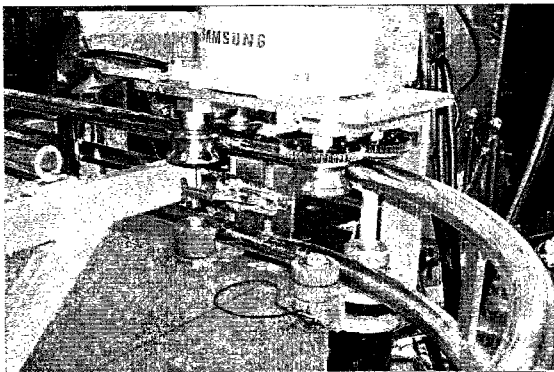


그림 3.4.3.11 주행 캐리어 후면

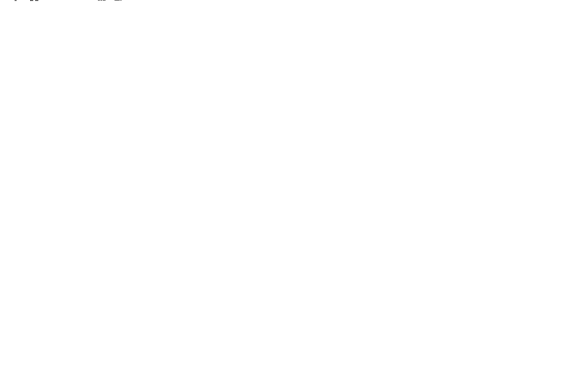


그림 3.4.3.12 주행 캐리어 측면

용접로봇이 탑재된 주행캐리어 시스템의 전체조립도(3.4.3.6), 주행 캐리어 시스템의 구동부 (그림 3.4.3.7), 주행 캐리어 시스템의 가이드부(그림 3.4.3.8)에 도시되어 있는 바와 같이 주행 캐리어 시스템의 로봇 설치대(1)위에 용접로봇을 탑재하게 되며 용접로봇의 주행은 구동모터의 구동력을 구동 중공축(8)을 통해 구동 롤러(10)에 전달하게 된다. 모터에 의해 구동 롤러(10)가 회전하게 되면 주행 캐리어 시스템은 가이드 레일과의 접촉 면압으로 인해 가이드 레일을 따라 주행하게 되는 것이다. 따라서 구동 롤러는 내마모성을 지녀야 하며 구동시 슬립이 발생하지 않도록 하여야 한다. 이를 위해서 슬립방지 구동기어 세트(29,30)를 구비하였다. 이 슬립방지 구동기어 세트(29,30)은 캐리어 시스템의 구동을 위해서는 꼭 필요한 부품은 아니나 구동부와 가이드부의 슬립으로 인한 회전수의 차이를 방지하기 위한 부품으로서 구동 롤러(10)의 구동력을 편심 가이드 롤러(31)로 전달하여 편심 가이드 롤러(31)가 가이드 레일을 따라 자연스럽게 회전하며 전체 주행 캐리어 시스템의 주행이 이루어지는 것이다. 구동 롤러와 편심 가이드 롤러가 가이드 레일에 확실한 접촉과 조립이 이루어지도록 편심 가이드 롤러의 회전축은 편심 축으로 제작되어 있어서 가이드 레일에 조립시 예압을 조정할 수 있도록 되어 있다.

구동 롤러(10)와 편심 가이드 롤러(31)는 용접로봇의 무게를 지지하는 동시에 구동력을 전달하기 위해서 V형 쉐기타입의 롤러 구조로 되어있다. 이 롤러들은 상하 가이드 레일 중에 상 가이드레일에 접촉하며 하 가이드 레일에는 가이드 원통 롤러(12)가 구성되어 있어서 회전 모멘트(roll) 발생을 억제하고 있다. 이 가이드 원통 롤러(12)들은 롤러와 가이드 레일 면의 마찰력으로 인하여 가이드 레일을 따라 자연스럽게 회전하며 주행 캐리어 시스템의 주행을 유도한다. 또한 구동부(A-A)와 가이드부(B-B)가 일정간격을 두고 설치되어 있어서 주행중 발생하는 회전모멘트(pitch) 발생을 방지한다.

주행 캐리어 시스템의 곡선부 주행원리를 설명하는 그림 4에 도시되어 있는 바와 같이 구동부(A-A)와 가이드부(B-B)가 가이드 레일의 곡선반경을 중심으로 자동적으로 조절(자동조심 기능)되는데 이는 가이드 레일의 중심선을 기준으로 한 쌍의 롤러 축이 가이드 레일의 내측과 외측의 회전 접촉 면압의 차이로 자동적으로 발생하게 되는 것이다.

그림 2와 그림 3에서의 오일리스 베어링과 와셔(P4,5)는 로봇 설치대(1)에 부착되어 있는데 이 오일리스 베어링과 와셔(P4,5)는 상 가이드 레일의 중심선상에 위치하고 있어서 항상 가이드 레일과 중심이 일치하며 구동 롤러(10)의 회전축과 편심 가이드 롤러(31)의 회전축을 잇는 캐리어 상판(2)은 이 오일리스 베어링과 와셔(P4,5) 축에 의해 가이드 레일의 중심선을 중심으로 내 외측의 면압 차이만큼 회전하게 된다. 따라서 항상 가이드 레일 곡선 반경의 중심점에 대한 접선방향으로 구동부(A-A)와 가이드부(B-B)가 위치하도록 하는 것이다.

캐리어 상판(2)은 다시 상하 지지대(26)를 통해 캐리어 하판(6)에 연결되어 있어서 하 가이드레일의 중심선을 중심으로 양측의 가이드 원통 롤러(12) 간의 내외측 면압을 유도하

게 된다.

이로서 곡선부 주행의 회전모멘트(yaw) 발생을 방지하며 전체 캐리어 시스템의 일정한 선속도를 유지하게 하는 것이다. 물론 곡선부 주행을 마치고 직선부로 돌아오면 다시 양측의 롤러 축은 자연스럽게 평행상태를 유지하게 되는 것이다.

용접의 현장성과 효율성을 높이기 위해서 로봇 설치대(1)에 다양한 부가 부착물을 부착하였는데, 레이저 비전 센서, 와이어 커터, 앤티 스퍼터 유닛 등을 용접로봇의 작업 공간내에 부착할 수 있도록 별도의 지그를 제작하여 설치하였다. 그림 3.4.3.13는 로봇 설치대에 장착된 클리너 유닛을 보여주며, 그림 3.4.3.14는 전체적으로 개조된 2차 시제품을 나타낸다.

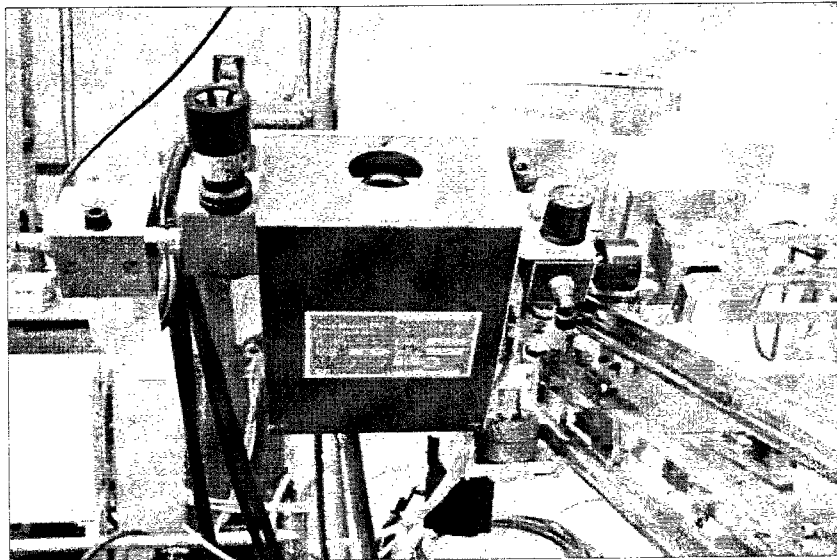


그림 3.4.3.13 로봇 설치대에 장착된 와이어 커터 및 앤티 스퍼터 유닛

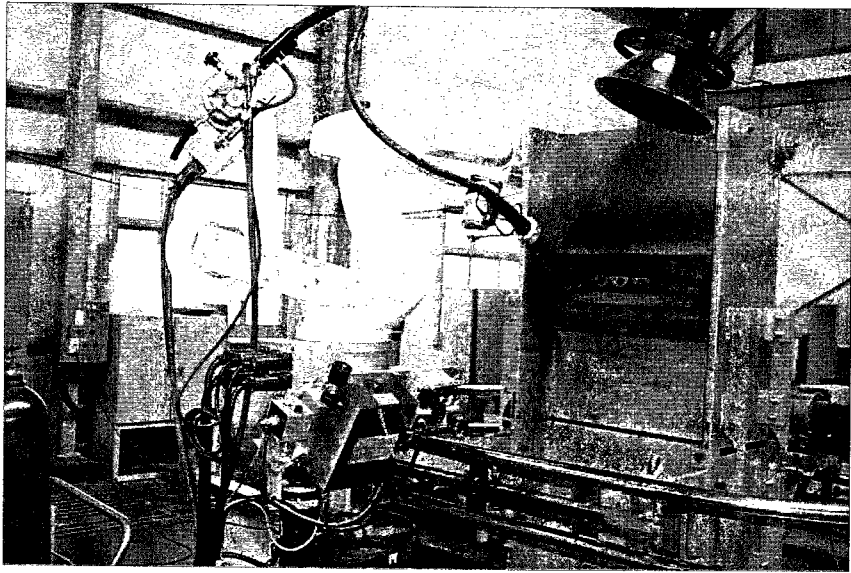


그림 3.4.3.14 용접로봇 시스템 2차 시제품

나. 소형 용접 로봇 및 제어기 개발

1차 년도 초기에 삼성전자에서 개발 중이던 5축 소형 용접 로봇을 2차 년도 개발 과제까지 적용하고 3차 년도에서는 6축으로 개조된 소형 용접 로봇을 개발, 적용하였다. 수직 철골 용접 로봇 시스템에서 용접 공법에 가장 영향을 주는 부분은 Torch의 Approach 각도이며, 이 부분을 원활하게 하기 위해서는 (일본 현장에서는 주로 전용 장치를 적용) 6축 자유도를 갖는 로봇이 필요하다. Arc Sensor Tracking 및 Laser Sensor Tracking에서의 로봇 End Effector 접근각도는 6 자유도를 갖는 로봇의 경우에서 가능하며, Vertical 용접을 위해서는 로봇이 갖는 자유도가 특히 중요하다.

아래의 그림 3.4.3.15과 같은 5축 자유도를 갖는 소형 로봇을 6축 로봇(그림 3.4.3.16)으로 개조하여 Forward/ Inverse Kinematic Solution을 풀었고, 제작을 위한 이관 및 신뢰성 검증 시험을 진행하여 3차년도 2차 시제품에 적용, 용접 작업을 구현하였다.

이번에 개발한 미니 로봇은 옥외에서의 용접 작업에 사용할 수 있도록 무게를 40Kg이하로 최소화했으며, 동시에 방수 기능이 될 수 있도록 설계되었다. (IP50, 54)

삼성 SRC Controller는 기존 로봇 외에 주행부까지 동시 제어가 되도록 내부 H/W 사양을 추가 변경하였으며, Serial 통신이 가능하다. 첩부의 용접 로봇 시스템 Layout에서 알 수 있듯이 철골 용접 로봇 시스템은 Laser Vision System 및 Host PC를 각각 Interface하여 운용할 수 있도록 하였다. 그림 3.4.3.17과 그림 3.4.3.18는 소형 로봇 제어기의 외관 및 내부 장착 슬롯의 정보를 보여주며, 이 로봇 제어기는 외부 작업 현장에서 사용될 수 있도록 방수 및 방진 설계가 된 모델이다.



그림 3.4.3.15 5축 소형 용접 로봇

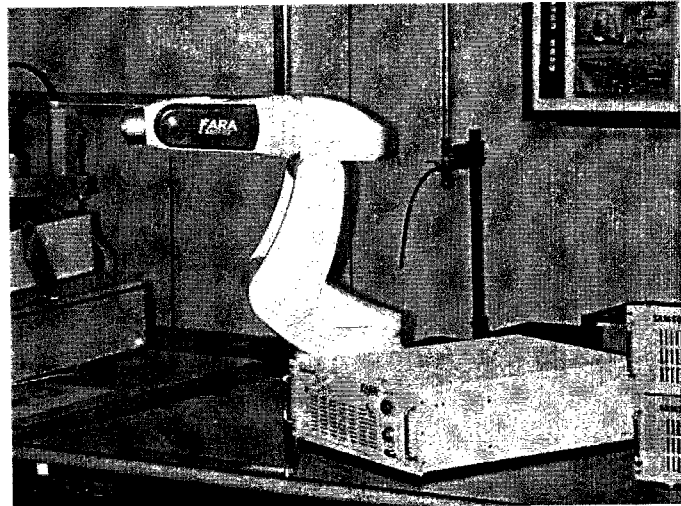


그림 3.4.3.16 개조된 6축 소형 용접 로봇

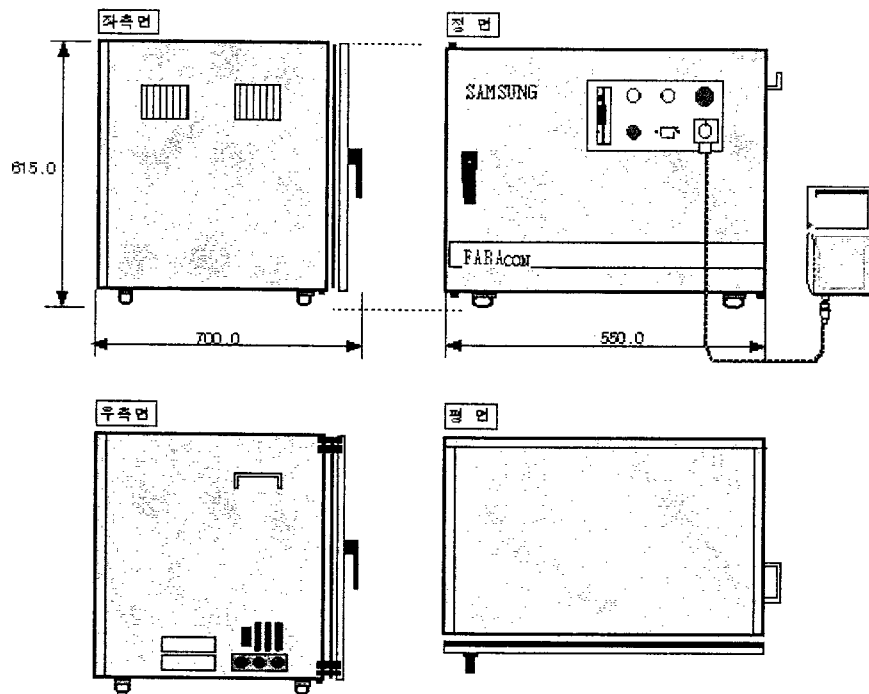


그림 3.4.3.17 SRC Controller 외관

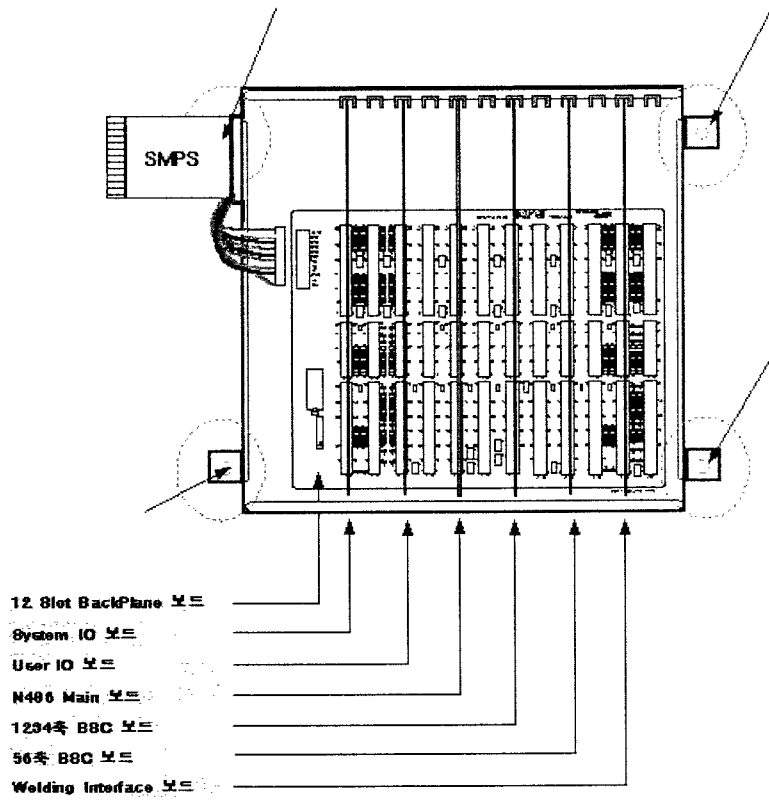


그림 3.4.3.18 SRC Slot Information

그림 3.4.3.19은 개조된 소형 6축 로봇이 주행 캐리어에 장착된 모습을 보여주며, 그림 3.4.3.20은 간이 시편에 용접 작업을 하는 모습을 나타낸다.

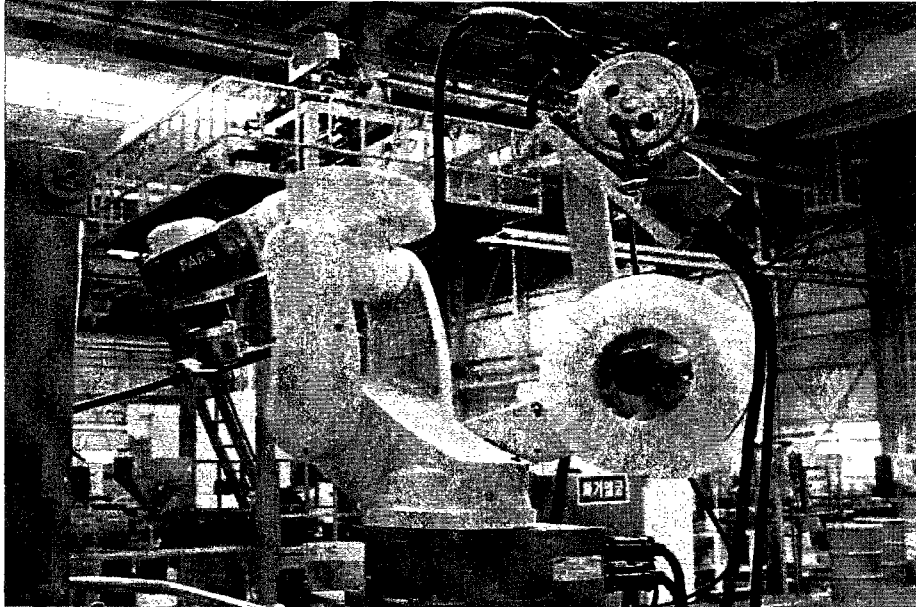


그림 3.4.3.19 주행 캐리어에 장착된 소형 6축 용접 로봇

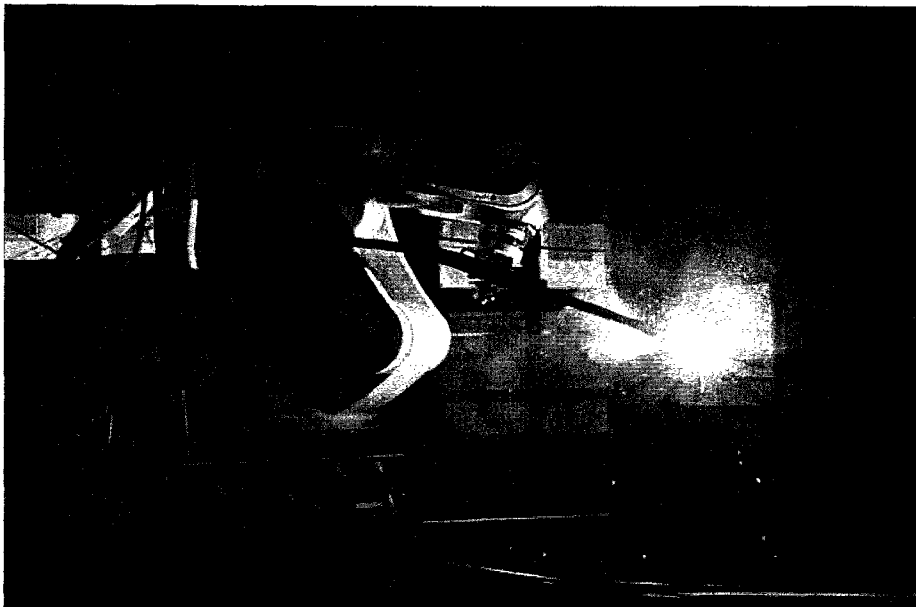


그림 3.4.3.20 레일 주행 시스템 위에서 용접 작업을 하는 모습

다. 용접 기구부 설계

로봇에 Mount되는 용접 관련 장치로는 크게 End Effector와 Body Attach 부분으로 나눌 수 있다. End Effector 부분은 로봇 Hand 끝단에 붙는 Shock Sensor 및 Clamping 장치, 그리고 Welding Torch가 있으며, Body Attach 부분으로는 Wire Feeder, Feeding Motor, Wire 그리고 Wire Hanging 장치가 있다. 그 외 용접관련 I/F를 위한 각종 Cable류가 접속된다. 각각의 설계는 Rail에서 주행하면서 작업을 진행 할 수 있도록 전체 Work Space에 맞도록 하였으며 Robot Body가 Rail 위에서 작업중일 때 Load의 편중이 없도록 전체 Load가 Rail 위에서 대칭 되도록 최적화했다.

그리고 주행부 제어를 위해서는 제어기로부터 온 Cable Harness를 로봇 Base부분으로 배치하고 이곳에서 주행부 Box로 분기되도록 하였으며, 로봇 Hand 끝단의 Shock Sensor Line이 Controller 내부까지 유입되도록 별도의 Cable 여분을 사용 적용하였다. 이 부분은 로봇의 충돌시 Controller의 비상정지가 작동하도록 H/W적으로 연결시켰으며 이를 선택할 수 있도록 별도의 H/W를 추가하였다. 그 외 Torch Neck 및 Torch Clamper 부위에 Laser Camera가 장착된다. 그림 3.4.3.21는 소형 로봇에 각종 용접 장치가 붙어있는 모습을 나타낸다.

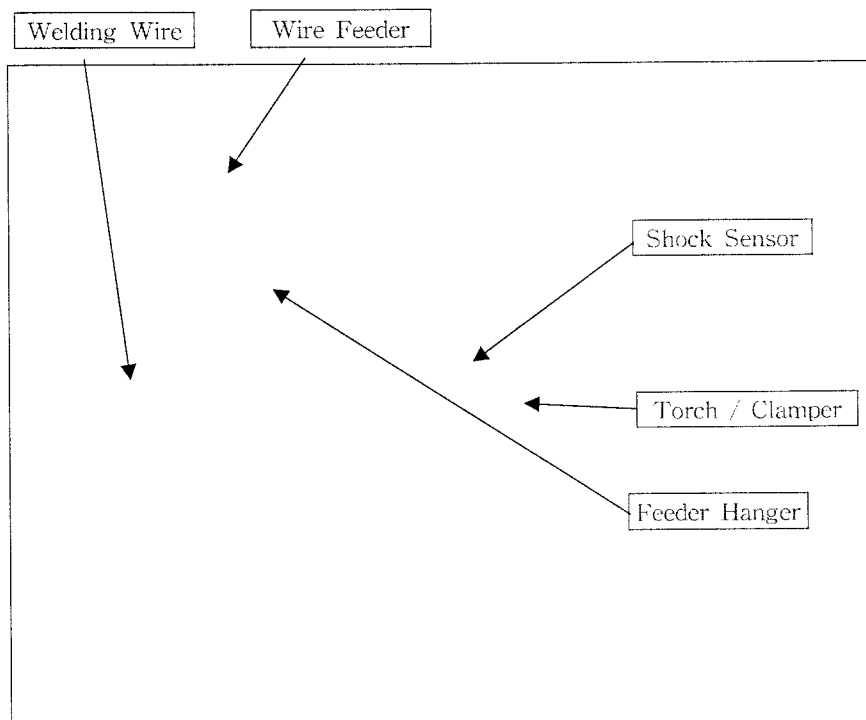


그림 3.4.3.21 소형 용접 로봇과 용접 관련 장치

라. 용접로봇 장탈착을 위한 이동리프트 시스템

용접 로봇의 활용성을 높이기 위해서는 현장성을 바탕으로 한 시스템 개발이 되어야 한다. 실제로 건설현장을 조사해 본 결과, 건설 현장마다의 공통적인 시공법은 물론 나름대로의 특이성도 존재하고 있어서 수직 철골에 용접 로봇 시스템을 적용하기 위해서는 다양한 환경에 대한 적응성과 함께 연계 확장성이 관건이라고 할 수 있다.

시스템의 H/W적인 측면에서의 현장성을 고려할 때 로봇 설치의 간편성과 이동의 용이성, 다양한 수직 철골 및 주변 환경에 대한 적응성 등이 설계의 주안점인 바, 이를 위해서 본 과제에서는 로봇 장탈착을 위한 이동 리프트 시스템을 제작하였다.

개발된 대차 시스템은 전동유압식 테이블 리프트형으로서 로봇 시스템의 현장 이동과 시스템 설치시 위치설정, 수직 철골에 로봇 시스템의 지지 및 고정을 용이하게 하기 위한 것이다.

수직 철골에 로봇 시스템을 장착하기 위해서는 우선 로봇과 주행 메커니즘이 설치된 주행 레일의 직선부를 하나의 시스템으로써 수직방향에 대한 상하이동이 자유로워야 한다. 로봇 시스템을 용접부 위치에 가장 효율적으로 위치시키기 위한 초기 자세 세팅을 위한 것이다. 또한 철골에 대한 접근성을 고려한다면 수평방향의 이동도 기본 리프트 시스템의 이동이외에 테이블 위에서 미세조정이 가능한 것이 유리하기 때문에 리니어 가이드와 스크류 방식을 조합한 조정장치를 설치하였다. 아울러 다양한 수직철골의 초기 위치 세팅을 위해서 스케일을 장착하였으며 접근시 리프트 모서리 부위의 충돌을 고려한 우레탄 캐스터를 장착하였다. 또한 용접환경이 연구실이 아닌 현장임을 고려하여 이동 리프트 시스템 설치의 안정성을 위해 트리거를 장착하였다. 향후 수직 철골 현장에서의 빈번한 이동과 설치를 고려하여 이동 리프트 시스템의 구동방식을 전동방식으로 설계 제작하는 방안도 추진중이다.

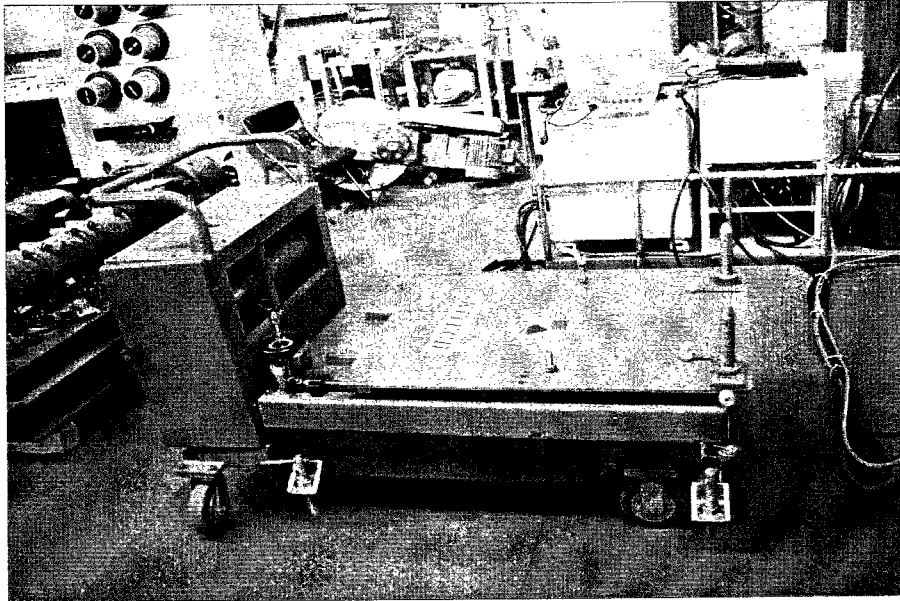


그림 3.4.3.22 이동 리프트 시스템

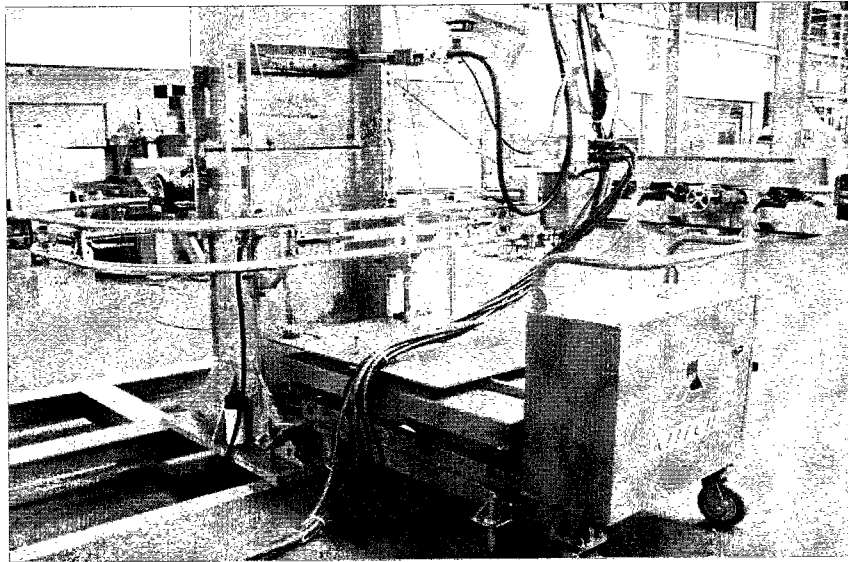


그림 3.4.3.23 이동리프트 시스템을 이용한 로봇 장착 모습

4. 수직철골 용접 로봇 시스템의 S/W 설계

가. 기능 구현 S/W 개발

상위제어기 S/W는 삼성전자 SRC Controller의 RS232C Protocol3를 사용하여 사용자가 보다 편리하게 수직철골 용접 로봇 시스템을 사용할 수 있도록 한 MMI(Man Machine Interface) 프로그램이다. 현장상황이나 현실적인 여건이 모든 작업을 자동으로 처리할 수 없기 때문에 현장상황에 빨리 적용할 수 있고 최대한 사용자가 편리하게 사용할 수 있는 S/W의 개발에 중점을 두었다. 즉, 용접로봇의 정밀한 최초용접위치의 교시는 사용자가 하위로봇제어기의 teaching pendant를 사용하여 직접 교시하고 나머지 층에 대한 위치교시는 철골주의 형상과 용접조건에 의해 상위제어기에서 계산하여 자동 생성하는 방법을 취하였다. 또한 사용자가 로봇 시스템이나 용접작업의 현황을 쉽게 파악하고 사용할 수 있도록 직관적인 user interface와 실시간 그래픽 모니터링을 강화하여 개발하였다.

(1) 개요

일반적으로 로봇제어기를 조작하기 위해서는 teaching pendant를 사용한다. 그러나 teaching pendant를 사용할 경우, 로봇의 위치 교시나 로봇 프로그래밍 및 프로그램 편집 등의 작업이 직관적이지 못하고 키보드에만 의존하기 때문에 숙련자의 경우에도 매우 까다롭고 지루한 작업이 된다. 따라서 본 과제에서는 수직철골용접 로봇 시스템을 보다 직관적이고 용접작업을 일관성 있게 관리 및 처리하기 위해서 그림 3.4.4.1와 같이 별도의 상위제어기를 설치하였다.

그림에서 보듯이 상위제어기는 산업용 PC를 사용하여 작업 모니터링, 용접 경로 생성 및 용접로봇제어기와의 통신 등의 주요기능을 구현한다. 용접로봇제어기와의 통신은 RS232C의 protocol3를 사용하였으며 향후 LAN통신을 추가 사용할 수 있도록 하였다.

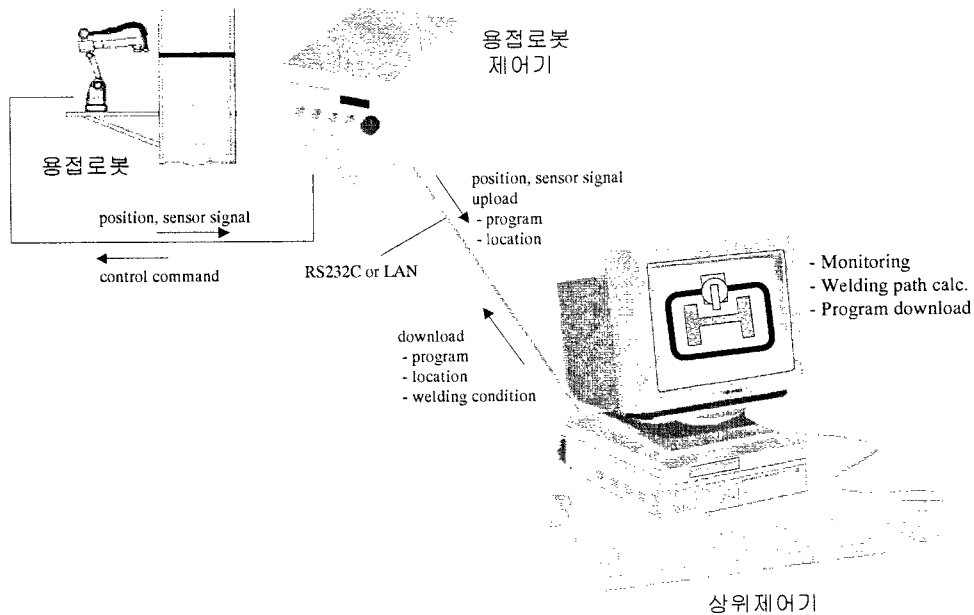


그림 3.4.4.1 상위제어기 구성도

(2) 상위제어기 작업시나리오

상위제어기를 사용한 용접부위가 직선구간일 경우의 용접작업 과정을 살펴보면 그림 3.4.4.2과 같다. 즉, 그림 3.4.4.2은 상위제어기와 로봇제어기 그리고 사용자간의 작업 흐름을 나타낸다. 그림에서 LOCM0는 용접 준비위치, LOCM1, LOCM4는 용접 접근위치, LOCM2, LOCM3는 용접 시작 및 용접 끝위치를 각각 나타낸다. 그림 3.4.4.2에 대하여 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 먼저 사용자가 하위 로봇제어기와의 통신이 연결한다. 그리고 통신연결전이나 통신연결후 용접조건 및 작업Beam 형상정보를 입력한다. 입력된 Beam의 형상정보를 이용하여 최초 용접 위치를 계산한다. 본 시스템은 완벽한 OLP 기능이 탑재되어 있지 않으므로 Teaching pendant와 OLP를 병행하여 수행한다. 즉, 안전을 고려하여 실제 계산위치보다 안전거리를 확보한 위치에 로봇을 위치(예: LOCM1, LOCM4) 시킨 후, 보다 정밀한 교시는 사용자가 직접 Teaching pendant를 사용하여 그 위치(예: LOCM2, LOCM3)를 확정하고 하위로봇제어기에 그 위치를 저장한다. 용접 접근위치 및 용접 시작 및 용접 끝 위치를 모두 하위제어기에 저장하고나면 사용자는 상위제어기에서 교시완료를 확인한다. 교시완료가 확인되면 상위제어기는 하위로봇제어기에 저장된 Location 파일을 사용하여 첫 번째 용접을 실시한다. 그리고 두 번째부터는 작업 범의 형상정보와 용접조건을 고려하여 다음 경로를 상위제어기에서 자동 생성하여 나머지 용접작업을 수행·완료한다.

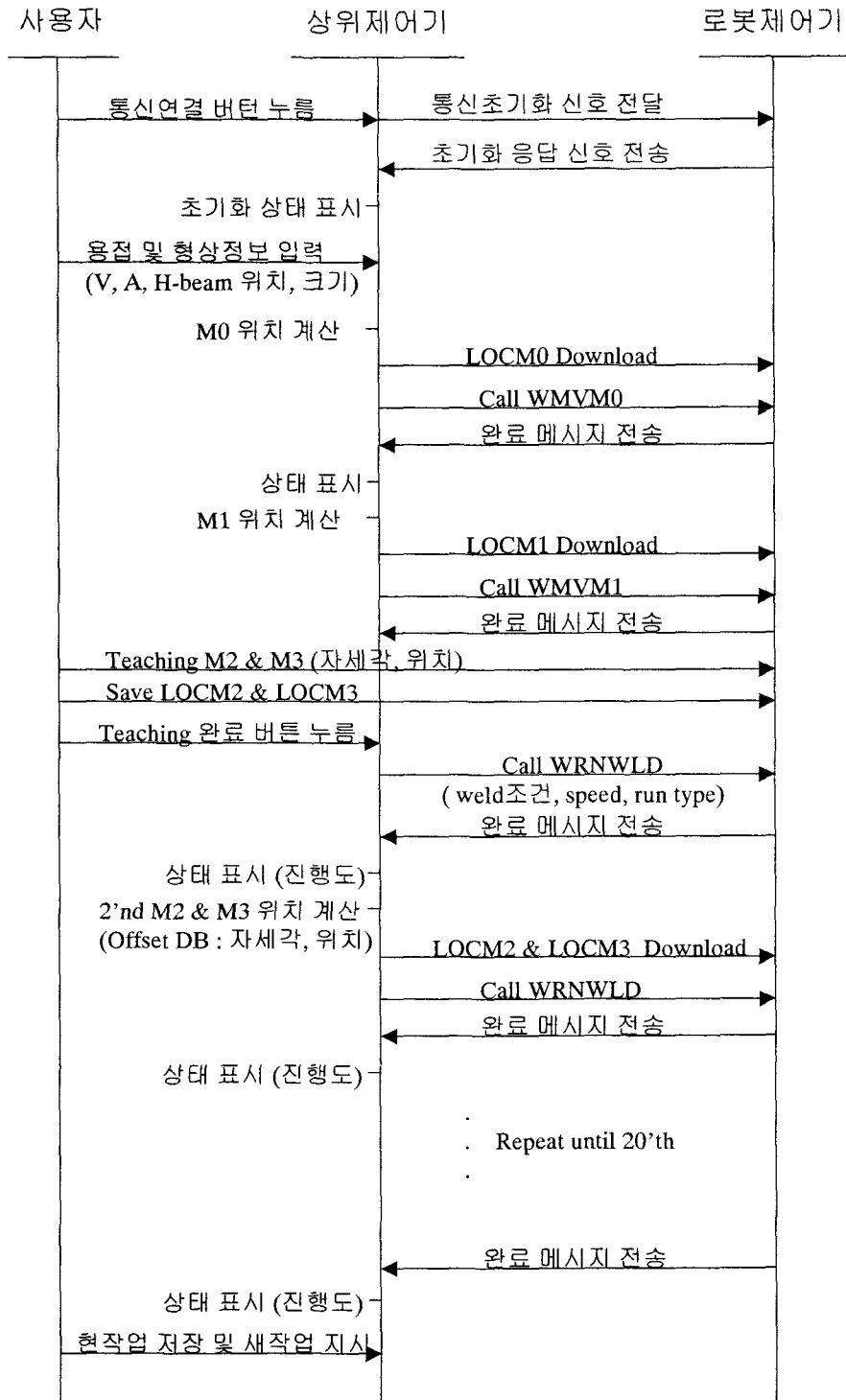


그림 3.4.4.2 상위제어기를 이용한 용접작업 흐름도

(3) 상위제어기의 주요기능

상위제어기의 주요 기능은 앞서 언급한 바와 같이 작업 모니터링, 용접 경로 생성, 용접로봇제어기와 통신으로 구성되어 있다. 각 기능들에 대하여 좀더 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

● 용접 경로 생성

작업할 beam의 형상, 용접부 형상 및 위치 등의 정보로 용접로봇의 forward kinematic 및 inverse kinematic, 용접조건(Voltage, Current, Speed)을 고려하여 용접할 경로를 계산한다. 이때 생성된 경로는 실제 로봇프로그램에 적용된다.

● 용접로봇제어기와 통신

상위제어기와 용접로봇 제어기와 통신을 담당하는 부분으로써

- robot program, location, system parameters file download & upload
- robot position, sensor information 통신
- 각종 command(emergency stop, program run & stop등) 실행

등의 기능을 수행한다. 통신프로토콜은 SRC제어기에서 제공하는 protocol3을 사용한다. protocol3는 문자열 전송방식을 사용한 프로토콜로서, 제어기내의 프로그램을 실행하는 방법으로 로봇을 제어한다.

● 작업 모니터링

실제 용접로봇의 위치 및 제어기와 연결된 센서들의 정보를 실시간으로 모니터링함으로써 현재 작업의 진행률 및 문제점을 파악한다. 이때 각 정보는 상위제어기와 용접 로봇제어기간에 연결된 RS232C나 LAN선을 통하여 상위제어기에 전달된다.

그림 3.4.4.3은 상위제어기의 주요기능간의 Data흐름을 나타내는 DFD(Data Flow Diagram)이다.

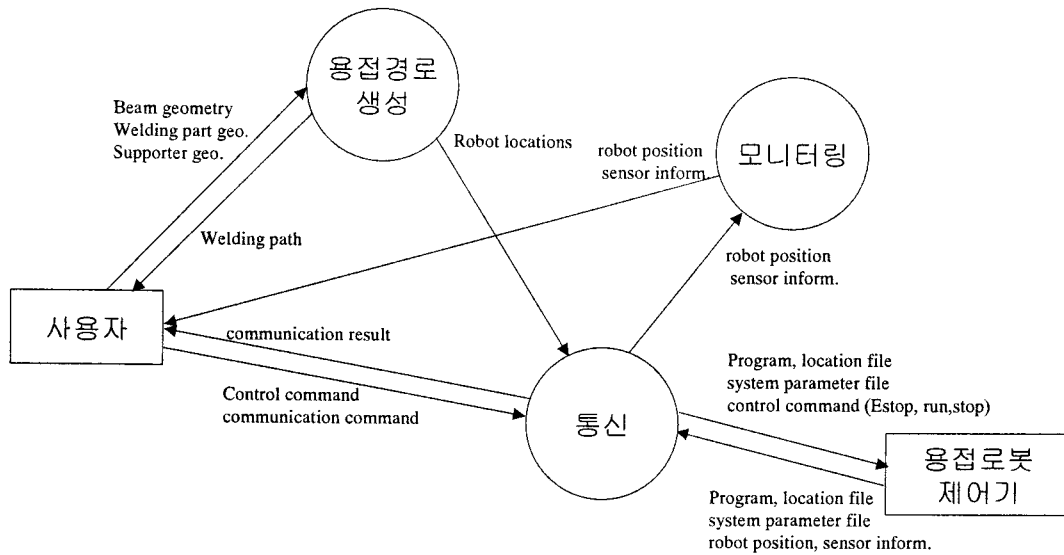


그림 3.4.4.3 상위제어기의 DFD

(4) 상위제어기 프로그램

상위제어기 프로그램은 Microsoft Visual Basic 6.0으로 작성하였으며 각 메뉴 및 기능은 다음과 같다.

(가) 모니터링 기능

상위제어기에서는 그림 3.4.4.4과 같이 용접 공정 진척도, 용접작업 현황, 용접작업 위치 및 로봇의 위치 및 자세각을 실시간으로 모니터링한다. 용접 공정 진척도는 현재 몇번째 층을 용접하고 있고 작업 경과 시간 및 남은 시간을 실시간으로 표시한다. 용접 작업 현황은 용접조건, 즉, 로봇의 용접자세각, 용접전압, 용접전류, 용접속도 등을 각 층별로 표시한다. 용접작업 위치는 현재 로봇의 작업Beam의 어느 부위를 용접하고 있는지를 실시간으로 표시하며 로봇의 위치는 현재까지 완료된 로봇의 작업 위치점을 표시한다.

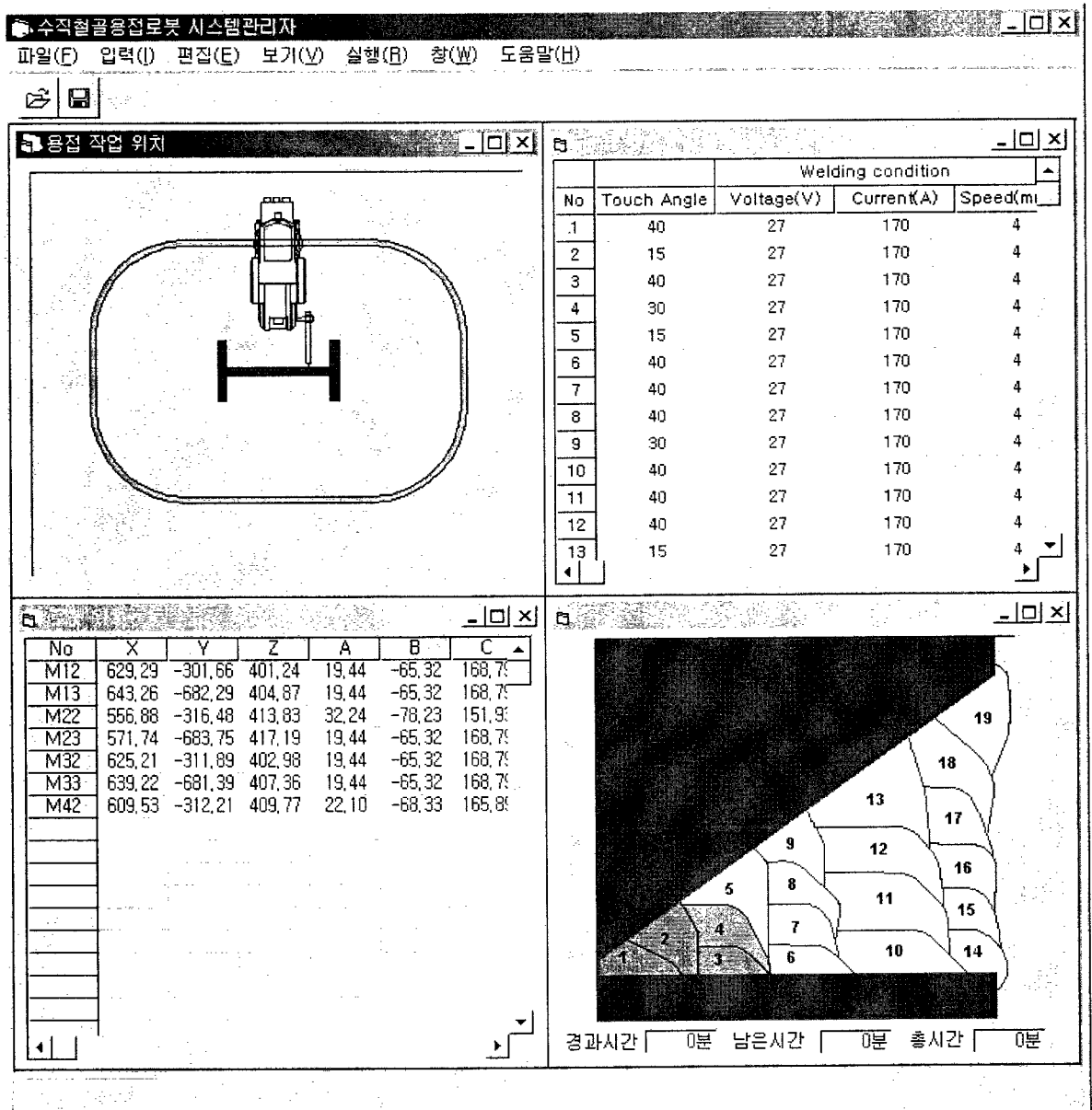


그림 3.4.4.4 상위제어기의 모니터링

(나) 하위로봇제어기 원격제어 기능

상위제어기에서도 하위로봇제어기에 주요명령 및 간단한 jog기능을 수행할 수 있는 기본 기능을 제공한다. Teaching pendant에서 가능한 모든 기능을 포함하고 있지는 않으나 간단한 명령(servo on/off, zero return)이나 간단한 jog기능을 수행할 수 있다. 따라서 간단한 명령이나 정밀한 로봇의

이동이 요구되지 않는 로봇의 이동에는 상위제어기의 원격제어 기능을 사용하면 편리하다. 그림 3.4.4.5는 원격제어기능을 담당하는 모듈을 나타낸다.

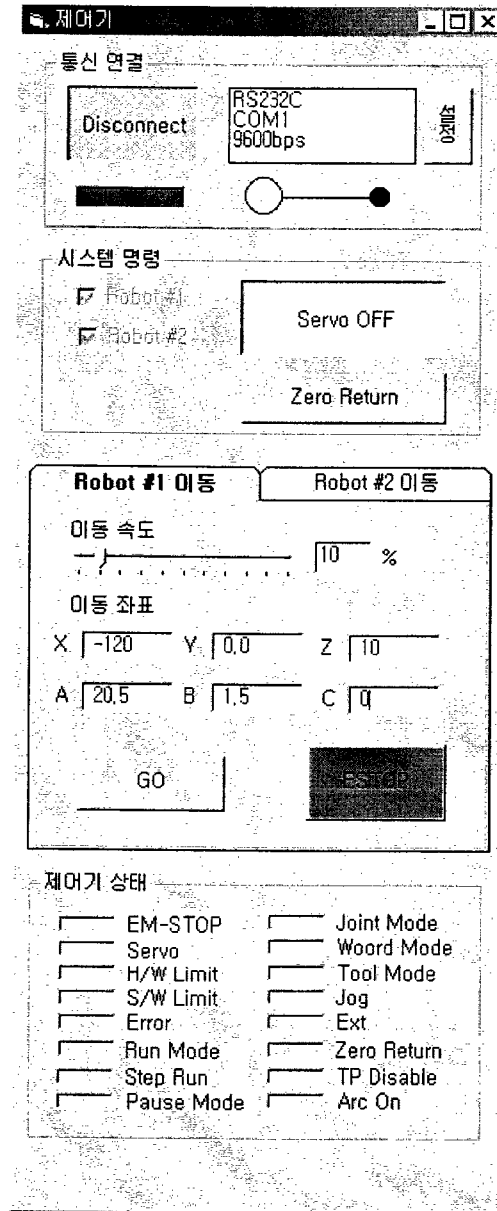


그림 3.4.4.5 원격제어기

(다) 파일관리 기능

용접작업과 관련된 파일(용접 프로그램, 용접환경 파일, 용접경로 파일, 기타 시스템 설정값 등)을 저

장하고 기존에 작업한 용접작업을 다시 읽어들인다. 그리고 Window상의 내용을 인쇄하는 기능을 수행한다. 그림 3.4.4.6은 상위제어기 프로그램의 파일 메뉴를 나타낸다.

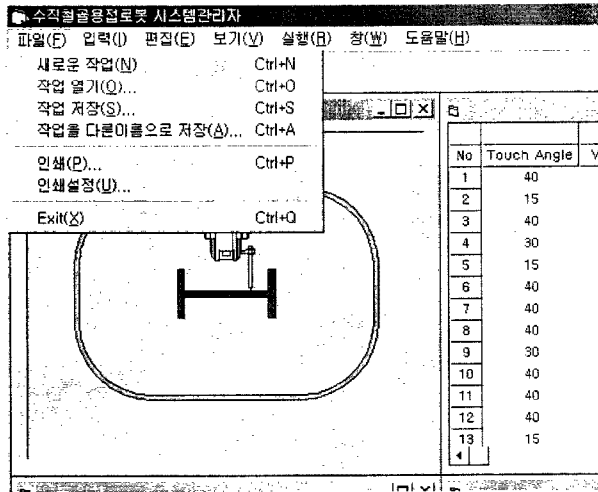


그림 3.4.4.6 파일 관리 기능

(라) 입력 기능

용접경로계산을 위하여 용접조건과 용접할 부재의 기하학적 형상을 입력하고 용접로봇제어기와 통신을 위한 설정값들을 입력한다. 그림 3.4.3.30은 상위제어기의 입력메뉴를 나타낸다. 그리고 그림 3.4.4.8는 용접환경을 설정하는 대화상자이고 그림 3.4.4.9은 통신환경을 설정하는 대화상자를 나타낸다. 그림 3.4.4.10, 3.4.4.11는 각각 용접환경 대화상자에서 철골주 형태와 철골주 고정부 형태를 선택했을 때 나타나는 형상정보 대화상자이다.

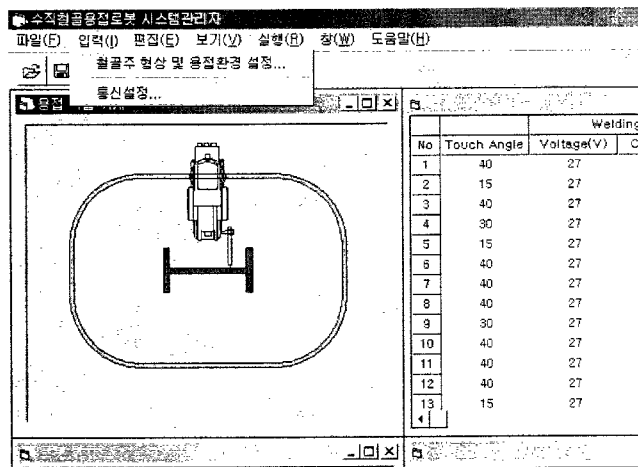


그림 3.4.4.7 입력 기능

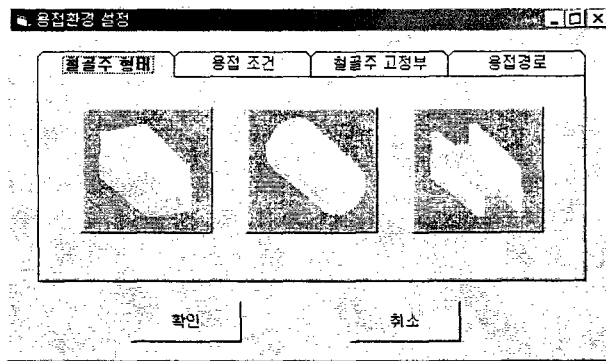


그림 3.4.4.8 용접환경 설정 대화상자

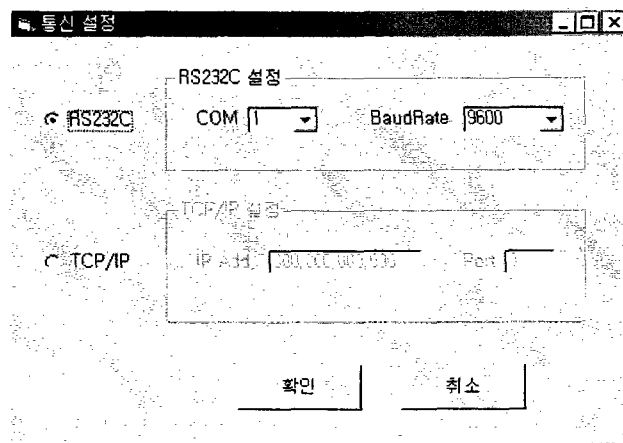


그림 3.4.4.9 통신설정 대화상자

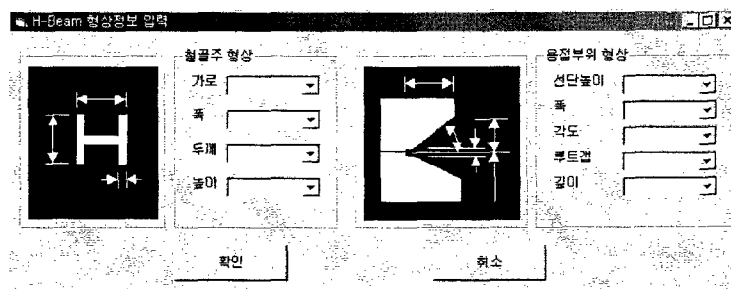


그림 3.4.4.10 H-beam 형상정보 입력 대화상자

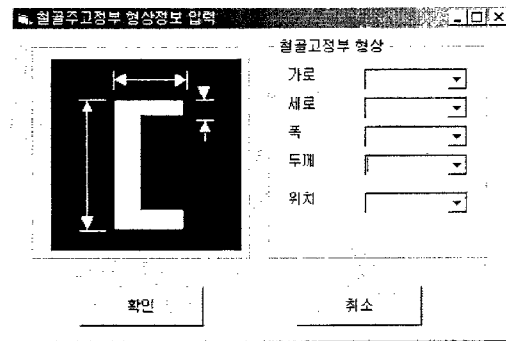


그림 3.4.4.11 철골주 고정부 형상정보 입력 대화상자

(마) 편집 기능

계산된 용접경로 및 기존에 작성된 로봇 프로그램을 수정·편집 할 수 있는 기능이다. (그림 3.4.4.12)

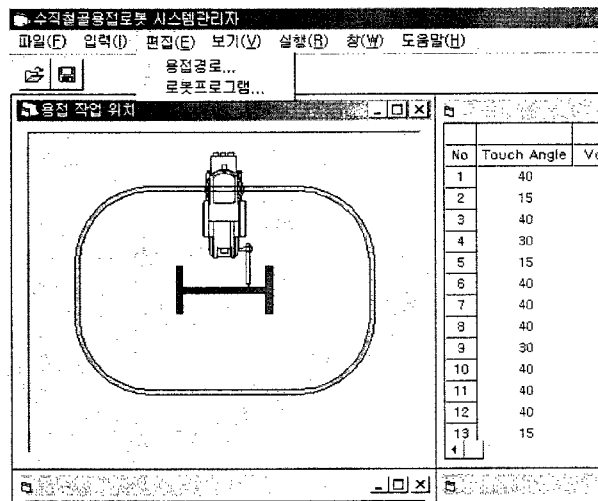


그림 3.4.4.12 편집 기능

(바) 보기 기능

용접작업과 관련된 원하는 각종 자료들을 보기 위한 기능이다. 보기 항목에는 로봇프로그램, 용접경로, 용접작업 모니터링, 시스템상태 모니터링, 용접환경 정보 등이 있다. (그림 3.4.4.13)

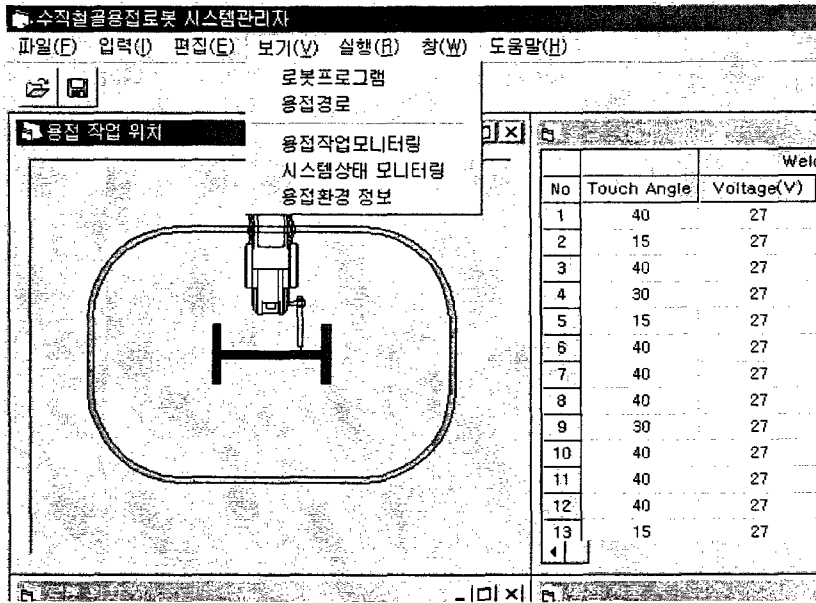


그림 3.4.4.13 보기 기능

(아) 작업 실행 기능

작업 실행 기능에는 그림 3.4.4.14과 같이 크게 시스템 초기화 및 점검, 로봇 교시, 용접작업 개시가 있다. 초기화 및 점검 모듈은 수직절골 용접 로봇시스템을 설치하고 난 후 상위제어기에서 이를 확인하는 작업을 수행한다. 로봇교시 모듈은 최초 용접위치를 사용자가 teaching pendant로 교시한 후, 하위제어기에 저장된 location 파일명을 상위제어기에 입력시키면서 동시에 교시가 완료되었음을 확인하는 절차에 해당된다. 로봇교시 모듈에서는 그림 3.39와 같이 입력된 location 파일명을 이용하여 최초 용접 작업을 로봇프로그램을 작성하여 하위로봇제어기로 전송한다. 용접 작업 개시 모듈은 실제 용접작업을 수행하는 모듈로서 로봇교시 모듈에서 전송된 최초 용접작업을 수행하고 나머지 층에 대한 용접위치와 용접조건을 계산하여 하위로봇제어기로 전송하여 나머지 모든층에 대한 용접 작업을 완료한다.

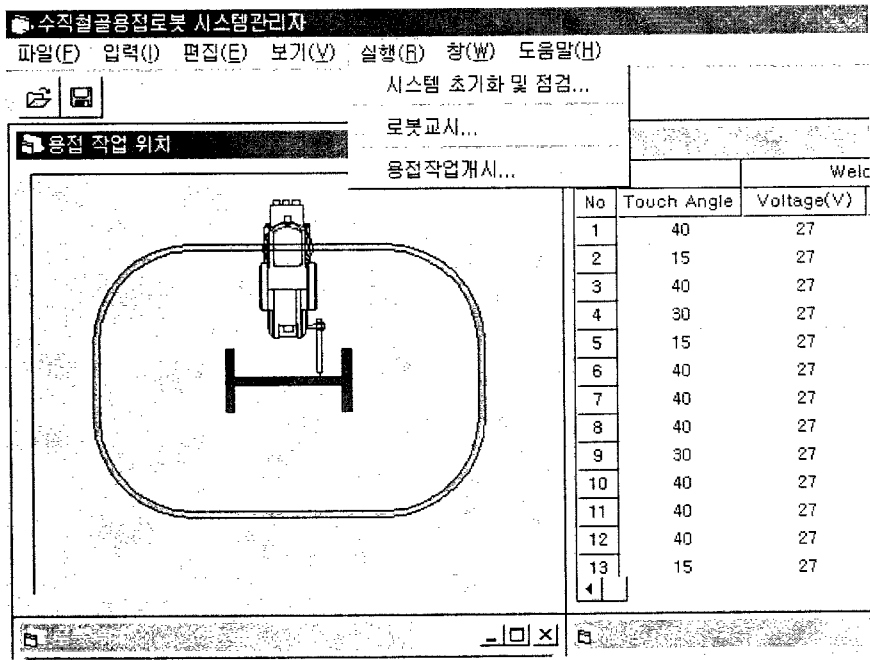


그림 3.4.4.14 작업 실행 기능

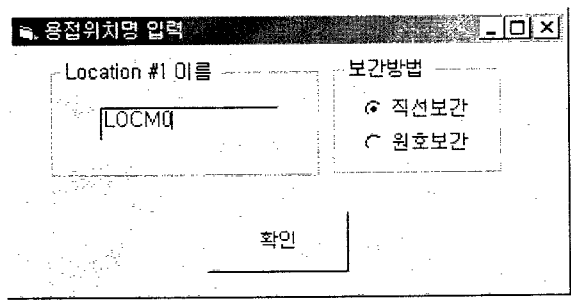


그림 3.4.4.14 교시위치 파일명 입력

나. 지지부의 Uncertainty가 존재할 때 용접로봇의 용접선 추종 제어법
- 근사 자코비안 연산자를 이용한 외계센서 제어 -

(1) 서론

건설 현장용접자동화를 위한 로봇시스템은 이동 및 설치의 간편성을 위해서도 경량형 설계가 필연적이다. 또한 지지부의 현장설치에 따른 설치에 의한 위치자세의 오차와 지지부의 강성부족으로 인한 처짐, 레일을 따라 이동할 때 발생하는 진동 등이 로봇용접작업에 지대한 영향을 주게된다. 불행하게도 지지부는 현장조건에 따라 적절히 세팅될 수밖에 없으므로 그 특성은 달라질 수밖에 없어 정확한 모델링을 하기도 곤란하다. 이러한 지지부의 특성은 로봇의 제어 측면에서 볼 때 uncertainty로서 인정된다.

로봇의 목표는 철골의 용접선을 따라 용접작업을 수행하는 것으로서 지지대의 특성, 설치오차에도 불구하고 원활한 작업을 할 수 있는 능력을 구비해야 한다. 본 절에서는 이러한 uncertainty문제를 해결하는 방안을 모색하도록 한다.

(2) 제어문제 설정과 가상링크의 도입

(가) 외계피드백상의 제어문제

“외계센서에 의한 로봇end effector의 정밀 위치제어” 이것은 위치를 작업 좌표계에서 직접 측정함으로써 로봇 관절부와 링크오차의 영향을 최소화시키는, 일종의 외계센서 귀환(external sensory feedback) 방법으로 laser tracker에 의한 용접선 추적장치도 이러한 방식의 일종이다. 매니플레이터에 대한 외계센서 귀환은 역 자코비안 행렬(inverse Jacobian matrix)을 이용하는 방법, 전치 자코비안 행렬(transposed Jacobian matrix)을 이용하는 방식이 연구되어 있고, 특히, 전치 자코비안 행렬 방식은 특이점(singular point)문제를 극복할 수 있는 방법으로 귀환제어에 폭넓게 활용되고 있다. 그러나 우리의 문제와 같이, 지지부에 Uncertainty가 있는 경우, 그 특성이 로봇에 영향을 주게되어, 기존의 외계센서 서보 방식이 그대로 활용할 수 있는 지가 의문시된다.

(나) Nonholonomic 구속문제

로봇의 관점에서 보면 지지부란 일종의 구속조건에 해당된다. 완전지지가 가능할 때는 작업좌표상의 기하학적인 구속으로 표현되며 이때의 전 시스템은 holonomic계이다. holonomic system일 경우는 로봇에 여유자유도가 존재한다면, 일반적으로 구속조건 $\Phi(x) = 0$ 을 고려한 제어입력을 구성시킴으로써 제어가 가능하다. 그러나 지지부에 탄성이 있다면 로봇본체의 위치가 지지부의 동특성에 의해 결정되기 때문에 구속조건은 적분항을 포함하는 이른바 nonholonomic system이 되어 문제가 단순하지 않다. 특히 지지부의 동특성은 2중 적분형 구속조건 $\Phi(x, \dot{x}) = 0$ 으로 나타나게된다. 이러한 구속조

건은 다음의 예로서 직관적으로 이해될 수 있다. 탄성지지부 위에 위치한 로봇이 급격한 가속을 하게 된다면 지지부의 탄성운동이 일어나며 이 때문에 로봇은 복합적인 운동을 하게된다. 즉 로봇의 가속도는 지지부와 연동되는 원동력으로 inertia coupling이 주된 구속이라고 할 수 있다. 따라서 이러한 구속은 가속도, 즉 2중 적분항을 포함한다.

(다) 자코비안 문제

귀환제어에서는 작업좌표상의 목표위치와 현재위치와의 편차를 자코비안 행렬을 이용하여 관절에 분배, 이 관절편차에 대해 각 관절 서보는 귀환제어를 하게된다. 고정지지로봇의 경우, 관절 상태변수벡터 $\theta, \theta \in R^m$ 와 작업좌표상의 위치벡터 $z, z \in R^n$ 가 $z = h(\theta)$ 의 관계를 가질 때, 미소 변위에 대해 자코비안 행렬 $J = (\delta z = J \delta \theta, J = \partial f(\theta) / \partial \theta, J \in R^{n \times m})$ 으로, J^{-1} 또는, J^T 를 이용하여 제어입력을 구성한다. nonholonomic 구속조건이 존재하는 시스템의 경우, 구속조건 $\Phi(x, \dot{x}) = 0$ 에 대한 가상 변위 $\delta x, \delta \dot{x}$ 는 다음방정식을 만족해야한다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} \delta \dot{x} = 0,$$

여기서, $\det[\partial \Phi / \partial \dot{x}] \neq 0$ 이라면,

$$\delta \dot{x} = D \delta x, \quad D \equiv \left[\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} \right]^{-1} \left[-\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right]$$

으로 지지부의 특성을 고려한 제어입력은 로봇자신의 자코비안 J 부분 및 지지부의 특성 제어를 위한 자코비안 D 을 부가한 입력이 요구된다. 물론 이러한 제어가 실현되려면, 로봇에 충분한 여유자유도가 있고, 또한 D 를 알고 있어야 한다. 실제 지지부의 특성이 미지라고 할 때 이러한 제어는 실현할 수 없고 또 우리 시스템에서는 여유 자유도도 충분치 않다.

(라) 지지부의 가상링크모델 도입과 제어 목표 재설정

로봇측에서 볼 때, 지지부의 uncertainty는 가속도에 의존하는 nonholonomic 구속이지만 가상적인 다관절 로봇을 도입함으로써 holonomic 구속문제로 변환시킬 수 있다. holonomic 문제로서의 변환은 기존 로봇이론적용이 용이하여, 통일적인 해석이 가능하다. 즉 지지부의 각 변수를 관절 변위로 가정하고 각 관절에는 복원력이 작용하는 수동관절(passive joint)로 간주하자. 가상관절의 변수벡터를 q 라고 하면, 작업 좌표상 end effector의 위치벡터 z 는 가상로봇 상태변수 $q, q \in R^p$ 를 포함한 $z = h(\theta, q)$ 가 되고, 이때 $J = [J_\theta \ J_q], J \in R^{n \times (n+p)}$ 로서 이 자코비안을 이용함으로써 피드백제어가 가능하게된다.

완전한 귀환제어를 위해서는 자코비안 행렬의 연산이 필요하나 가상관절에 관련된 자코비안 부분은 미지이다. 현실적인 방법으로는 근사 자코비안 행렬을 이용할 수밖에 없다. 그렇다면 적절한 근사 자코비안 행렬의 설정방법은 무엇이며, 이때 시스템의 제어특성은 어떻게 보장할 수 있을까?

이 문제에 대한 Idea는 지지부 관련 특성제어를 제어 포기하고 로봇의 End Effector만을 목표에 수렴시키도록 하여, 이때의 시스템 안정성을 해석해보는 것이다.

본 절에서는 이러한 문제에도 불구하고 시스템의 안정문제를 해결하는 현실적인 제어법에 대해 논의 하고, 실험을 통하여 그 유용성을 실증하고자 한다. 이론적인 고찰에서는 이러한 문제를 명료하게 하기 위해 무중력 공간 내의 작은 작동범위를 갖는 로봇을 상정하고, 선형화된 모델을 다루도록 한다. 선형모델은 고속운동과 같은 경우의 안정성문제를 다루기에 충분치 않지만 관절변수와 가상변수의 관계 및 본질적 안정조건을 설명할 수 있다. 다음의 (3)에서는 간단한 1자유도 로봇계에 대한 해석을, 다.에서는 다링크 로봇계로의 확장을 시도한다.

(3) 탄성지지를 갖는 1축 Robot의 외계피드백 제어 Simulation

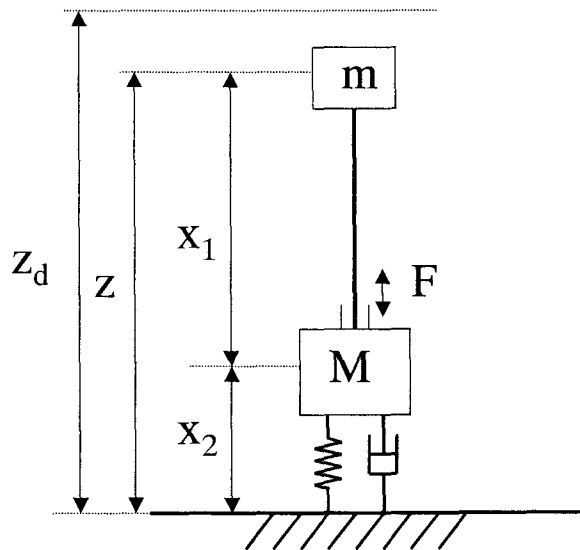


그림 3.4.4.15 지지부 1자유도-로봇 1자유도 계의 외계피드백제어

(가) 모델링

그림 3.4.4.15과 같이 작업 좌표계에서의 end effector 위치가 Z , 목표 위치가 Z_d , x_1 은 actuator의 변

위, x_2 는 지지부의 탄성변위 즉 가상로봇의 변위라고 하자. 이때의 운동방정식은 Lagrangian Equation으로부터

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_1 + m\ddot{x}_2 &= F \\ m\ddot{x}_1 + (m + M)\ddot{x}_2 + Kx_2 &= 0 \end{aligned}$$

가 얻어진다. 지지부의 마찰력을 고려한다면

$$\begin{bmatrix} m & m \\ m & m + M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 된다. 이 모델로부터 지지부와 로봇이 관성항에 의한 간섭이 일어남을 알 수 있다.

또한 실제 로봇과 가상 로봇의 구속 조건과 Jacobian을 살펴보면

$$\begin{aligned} z &= x_1 + x_2 \\ \delta z &= J_1 \delta x_1 + J_2 \delta x_2, \quad (J_1 = J_2 = 1) \end{aligned} \quad (2)$$

과 같이 된다.

(나) Control(PD제어)

제어의 관심은 가상로봇의 변위(지지부의 탄성변위)가 있더라도 z 를 목표 z_d 에 일치시키도록 제어하는 것이다. 이를 위해서 완전 귀환 제어를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$F = -K_p J^T (z - z_d) - K_D J^T (\dot{z} - \dot{z}_d)$$

여기에서 정확한 J 는 알 수가 없다. 따라서 actuator의 자코비안 J_1 을 근사 자코비안으로 이용한 제어식을 다음과 같이 구성한다.

$$F = -K_p J_1^T (z - z_d) - K_D J_1^T (\dot{z} - \dot{z}_d)$$

(다) 안정성 증명

증명 : 식(1)의 양변에 관성행렬의 역행렬을 곱하면

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{C}{M} \\ 0 & \frac{C}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K}{M} \\ 0 & \frac{K}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{M+m}{Mm} \\ -\frac{1}{M} \end{bmatrix} F \quad (3)$$

얻어진다, 한편 식(2)를 고려하면 식(3)의 1행과 2행을 더한 식은 다음과 같다.

$$(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) = \frac{F}{m}$$

즉 End Effector의 자유운동방식과 같아진다. 즉,

$$\therefore \ddot{z} = \frac{F}{m} \quad (4)$$

한편 제어법에서

$$\tau = -K_P J_1^T(z - z_d) - K_D J_1^T(\dot{z} - \dot{z}_d)$$

이고 PTP제어에서 $\dot{z}_d = 0$ 으로 놓으면,

$$\tau = -K_P J_1^T(z - z_d) - K_D J_1^T(\dot{z}) \quad (5)$$

식 (5)를 (4)에 대입하면 Closed Loop System의 운동방정식이 된다. 즉,

$$\ddot{z} + K_D J_1^T(\dot{z}) + K_P J_1^T(z - z_d) = 0 \quad (6)$$

여기서, Liapunov함수를 적용하면,

$$V = \frac{1}{2} \dot{z}^2 + \frac{1}{2} \Omega(z - z_d)^2, \text{ 단 } \Omega = K_P > 0 \text{라 가정하면}$$

당연히 $V > 0$ 이다. 또한

$$\begin{aligned} V &= \dot{z}\dot{z} + \Omega(z - z_d)\dot{z} \\ &= \dot{z}\{\dot{z} + \Omega(z - z_d)\} \end{aligned}$$

이고, 식(6)을 대입하면

$$V = \dot{z}(-K_D J_1^T \dot{z})$$

$$= -K_D J_1^T \dot{z}^2$$

이 되므로 $K_D J_1^T > 0$ 이면 항상, $V < 0$ 이다. 따라서 $K_D > 0$, $K_P^T > 0$ 이면 점근 안정이다. 그러므로 z 는 z_d 에 수렴한다.

(라) Simulation

그림 3.4.4.16와 같은 Block Diagram으로 Loop를 구성하여 Simulation을 하였다.

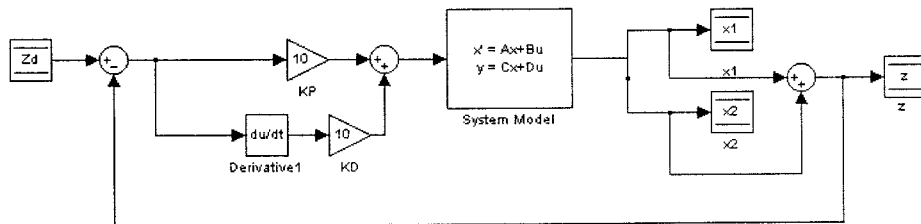


그림3.4.4.16 지지부 1자유도-로봇 1자유도 계의 외계피드백제어의 Block Diagram

$M=4\text{Kg}$, $m=2\text{Kg}$, $K=100\text{N/m}$, $C=0.1\text{N}\cdot\text{s/m}$, $z_d=5\text{m}$ 을 각각의 상수 값으로 하고 게인값을 $K_P = 300$, $K_D=150$ 으로 하였을 때 로봇의 actuator부분의 변위와 이에 따른 가상로봇의 변위를 그림 3.4.4.17에 나타내었고, End Effector의 위치를 그림 3.4.4.18에 나타내었다.

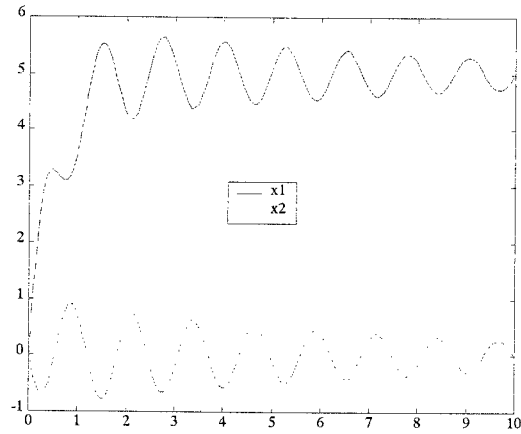


그림 3.4.4.17 Actuator와 지지부의 변위

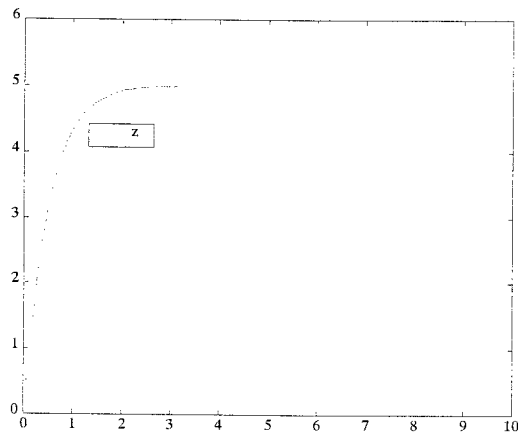


그림 3.4.4.18 End Effector의 변위

그리고 지지부의 임의의 외란을 주었을 때, 즉 $0.2 \cdot \sin(20t)$ (약5Hz) 정도의 외란을 주고 이 때 게인값을 $KP=700$, $KD=250$ 으로 설정하고 Simulation한 결과를 그림 3.4.4.19와 그림 3.4.4.20에 나타내었다.

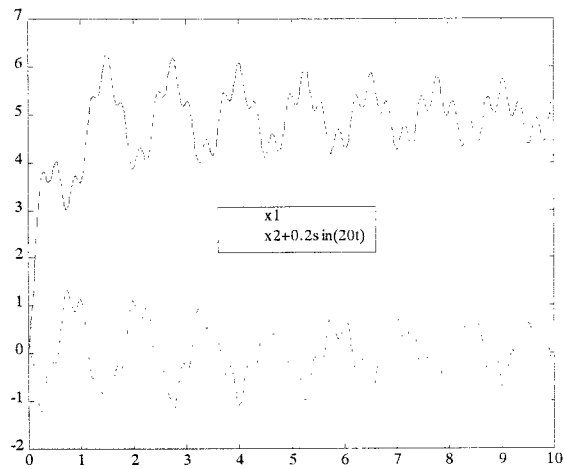


그림 3.4.4.19 외란이 있을 때 Actuator와 지지부의 변위

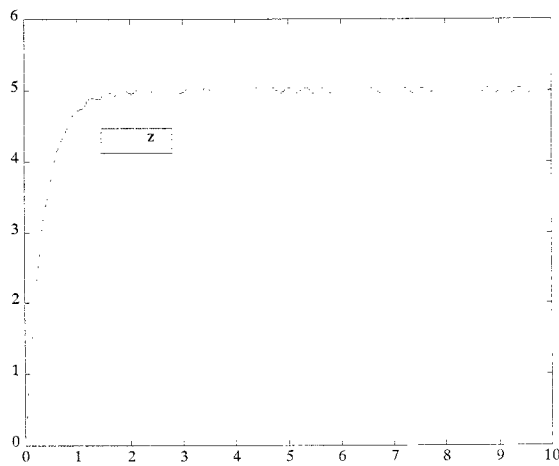


그림 3.4.4.20 외란이 있을 때 End Effector의 변위

결과에서 볼 수 있듯이 목표위치에 도달하기 위해서 actuator가 작동할 때 지지부의 수동관절은 변위를 일으키고, 제어기는 이를 보완하면서 목표에 수렴시키는 것을 알 수 있다. 또한 외란에 대해서도 지지부의 변위를 보완하면서 actuator를 작동시켜서 목표위치로 End Effector를 이동시키는 것을 알

수 있다.

(4) 결론

Simulation에서 알 수 있듯이 1자유도의 Actuator와 Uncertainty를 갖는 경우, Actuator는 지지부의 변형을 보완하면서 전체적으로 보았을 때 목표위치에 수렴하고 있음을 알 수 있다. End effector의 위치만을 측정하고 있다면, 지지부와 Actuator의 변위의 합으로 나타나는 End effector의 위치를 지지부의 변화에 상관없이 제어 할 수 있는 것이다. 즉 지지부의 변위를 측정하지 않고도 Actuator만의 자코비안으로 전체 오차를 분배하여 보정할 수 있는 것을 알 수 있다. 그 안정성 또한 4.나. 의 (3)의 식 (3)에서 증명하였다. 다자유도를 가지는 경우에도 지지부의 불확실한 변위를 다축로봇의 자코비안만을 사용하여 제어루프를 구성하면, 최종의 End effector의 위치측정(Laser vision sensor등)만으로 위치 추종이 가능하다고 본다. 이러한 제어법의 강점은 불확실한 지지부에 대한 어떠한 복잡한 해석을 하지 않고도 제어할 수 있다는데 있다. 이러한 알고리즘을 실장하기 위해서는 현재 사용되고 있는 제어기의 상위루프를 개조해야 하는데, 상용화된 로봇 제어기의 상위루프를 개조하는 것이 상당한 난관이 있을 것으로 예상된다.

다. 탄성지지를 갖는 다축 Robot의 외계피드백 제어

(1) 가상 링크를 이용한 모델화

그림 3.4.4.21와 같이 p 개의 회전관절로 구성된 매니플레이터와 uncertainty를 가지고 있는 지지부를 같은 매니플레이터와 p 개의 자유도를 가지는 수동관절 로봇으로 모델링하였다. 각 관절은 강체이며, 각 링크는 균일한 단면 빔이며 가상로봇의 각 관절은 수동관절(탄성변형과 마찰만이 작용)이라고 가정한다. 관절위 임의의 점 S의 위치와 자세각을 작업좌표계에서 본 벡터형식으로 표현하여 z 라하고, 그 차원도 이론전개의 편리성을 위해 p 라고 하자. 이때 z 는 base에서 본 위치 벡터 x_1 과 지지부의 변위(가상로봇 관절의 탄성 변위) x_2 의 함수로서, 탄성 변위를 고려한 동차변환 (homogeneous transformation)[9]를 통해 다음과 같이 표현된다.

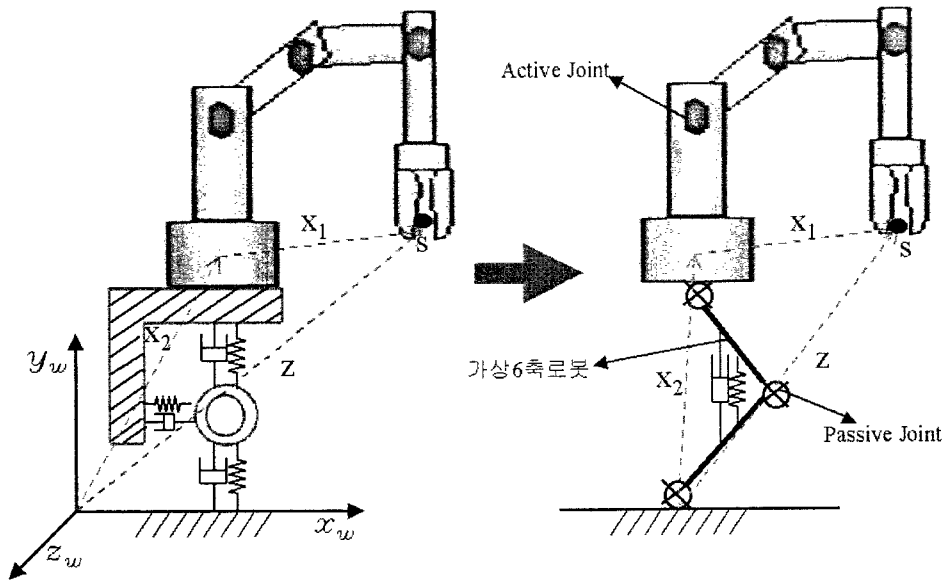


그림 3.4.4.21 Modeling of robot base uncertainty

$$z = h(x_1, x_2), \quad z \in R^{b \times 1}$$

$$z = h(\theta, q), \quad z \in R^{b \times 1} \tag{1}$$

$$x_1 = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p]^T$$

$$x_2 = [q_1, q_2, \dots, q_b]^T \tag{2}$$

여기서 q_i 는 가상로봇 관절의 탄성변위다.

(2) 탄성링크 로봇의 동력학모델과 구조특성

시스템의 운동에너지는 θ, \dot{q} 의 함수, 위치에너지는 무중력상태로 가정하였기 때문에 가상로봇관절의 탄성변위에 대한 탄성에너지만을 고려하여 Hamilton의 변분원리를 적용하면 다음과 같은 형태의 운동방정식이 얻어진다.[9]

$$R(x)\ddot{x} + S(\dot{x}, x) + Q^*\dot{x} + \Omega^*x = Bu \quad (3)$$

단, $x = [\theta^T, q^T]^T$. 좌변 제1항은 관성력으로서 각 상태변수간의 상호작용에 의해 항상 다음관계가 성립된다.

$$R(x) = R(x)^T > 0,$$

$$R(x) \in R^{(2p) \times (2p)}$$

제2항은 코리올리력, 원심력을 나타내는 비선형항이며, 제3항은 가상로봇관절의 탄성변형에 대한 내부의 감쇄력으로 각 탄성모드에 대해 양의 값을 갖는다. 입력 행렬 B 는 p 개의 모터의 토오크 τ_i 가 관절회전에 작용하므로 다음형태를 갖게 된다.

$$Q^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix}, \quad \Omega^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Omega \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Q > 0, \quad Q \in R^{p \times p} \quad \Omega = \text{diag}\{w_1^2, w_2^2, \dots, w_p^2\}, \quad \Omega \in R^{p \times p}$$

$u = [\tau_1, \dots, \tau_p]^T$ 단, I 는 $R^{p \times p}$ 인 단위행렬.

이 운동방정식의 구조적인 특징은 각 상태변수간의 상호간섭이 관성행렬을 통해 이루어지게 된다는 점이다. 다시 말해서 실제 로봇의 운동은 관성항의 간섭을 통해 가상로봇의 운동, 즉 진동이 야기된다는 것을 의미하며, 가속운동이 없다면 가상로봇의 운동도 발생하지 않는다. 이후의 이론전개를 위해 명확한 구조의 선형모델을 표현하자.

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{12}^T & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4)$$

(3) 자코비안 연산자

End Effector의 작업좌표상의 위치벡터 z_e 는 식(1)과 유사하게

$$z_e = h(\theta, q) \quad (5)$$

이라 정의할 수 있다. 이것은 시각 등 외부센서에 의해 측정되는 위치이다. End Effector의 목표벡터를 z_d 라 할 때 이에 대응되는 유일해 관절목표 $x_d = [\theta_d^T, q^T = 0]^T$ 가 존재하는 영역은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$z_d \in \varepsilon, \quad \varepsilon = \{z \mid \det(\partial h / \partial \theta) \neq 0\}$$

일반적으로 End Effector의 위치에 대해 관절목표는 해가 없거나 복수 해가 존재하지만, 위 조건과 $q=0$ 를 도입함으로써 대응되는 벡터 θ_d 는 적당한 영역 내에서 유일하게 결정될 수 있다(가상로봇이 움직이지 않고 고정되어 있다고 가정하면 실제로봇과 같은 조건이다).

목표 z_d 부근에서 Taylor급수 전개하여 고차항을 무시하고 ($z_e = z_d + \delta z$, $\theta = \theta_d + \delta \theta$), 다시 $z \equiv \delta z$, $\theta \equiv \delta \theta$ 라 쓰자.

$$z = J_\theta \theta + J_q q, \quad (6)$$

$$\text{단 } J_\theta = \left[\frac{\partial h}{\partial \theta} \right]_{\theta = \theta_d, q = 0}, \quad J_\theta \in R^{p \times p}$$

$$J_q = \left[\frac{\partial h}{\partial q} \right]_{\theta = \theta_d, q = 0}, \quad J_q \in R^{p \times p}$$

여기에서 J_θ, J_q 는 상수를 요소로 하는 자코비안 행렬로 각각 관절운동과 탄성거동(가상로봇의 관절

운동)에 관련된다. 실제로 J_q 는 가상로봇의 기하학적 관계이므로 자코비안 계산뿐만 아니라 완전한 벡터 q 를 추정하는 것도 불가능하다. 제어 시에 이용할 수 있는 유일한 방법으론 자코비안 행렬을 근사한 이른바 근사 자코비안 행렬뿐이다. 여기서 적당한 근사 자코비안을 개발하기 위해 식(7)으로 정의되는 연산자를 도입하도록 하자.

$$z(t) \equiv F[\theta(t)] \tag{7}$$

이것을 앞으로 자코비안 연산자(Jacobian operator)라 부르기로 한다. 이 자코비안 연산자는 다음의 동역학적인 관계를 고찰함으로써 도출되어진 것이다.

진동이란 정역학적 거동이 아니라 동역학적인 운동이다. 다시 말해서, 탄성모드변수 q 는 동역학적인 과정을 통하여 발생됨으로, 기하학의 관계에게만 의존하는 변수 θ 와는 성질이 다르다. 진동은 가속운동에서 관찰되지만, 등속운동에서는 그다지 발생되지 않는다는 일상적인 경험을 통해서도 이 사실은 잘 이해될 수 있다. 로봇 지지부 변위 실제 로봇의 운동에 수반되는 부차적인 동적 운동으로서 간주되기 때문에, q 는 θ 에 대한 미분 또는 적분을 포함하는 연산자로 다시 표현할 수 있다. 앞 절의 모델설명에서도 밝혔듯이, 방정식(4)의 제2열로부터 이 관계를 확인할 수 있다.

식(4)와 식(6)을 Laplace 변환하여 다음의 표현을 얻을 수 있다.

$$z(s) = F(s)\theta(s), \tag{8a}$$

$$F(s) = J_\theta - s^2 J_q [s^2 R_{22} + sQ + \Omega]^{-1} R_{12}^T \tag{8b}$$

여기에서 $F(s) \in C^{p \times p}$ 는 아래 특성을 가지고 있다.

- 행렬 $F(s)$ 는 proper하며 안정된 극을 갖는 전달함수로 구성되는 행렬이다.
- $F(s)$ 의 제1항 J_θ 은 실제 매니플레이터의 자코비안 행렬에 대응된다.
- $F(s)$ 의 제2항은 가상로봇관절의 탄성 운동의 영향을 나타낸다. 이것은 각 관절의 가속도에 의해서 야기된다

식(7)의 자코비안 연산자 $F[\theta(t)]$ 는 $F(s)$ 의 시간영역에서의 표현이다. 이제부터 특별한 경우를 제외하고는 자코비안 연산자를 $F\theta = F[\theta(t)]$ 로 표기하도록 한다.

여기서, 앞으로 제어방법의 논의에 도입되는 공역연산자(adjoint operator) F^* 와 이에 관련된 수학을 정의하자[10].

$$\langle y, Fx \rangle = \langle F^*y, x \rangle$$

여기에서 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 는 아래와 같이 정의되는 L_2 공간에서의 내적(inner product)을 의미한다.

$$\langle f, g \rangle \equiv \int_0^\infty f^T(t)g(t) dt, \quad f, g \in L_2$$

그리고 L_2 의 놈(norm)은 다음과 같이 주어진다.

$$\|f\| = \left| \int_0^\infty f^T(t)f(t) dt \right|^{1/2}$$

비슷하게 확장공간 L_{2e} 상의 절사내적(truncated inner product) $\langle \cdot, \cdot \rangle_T$ 와 절사놈 $\|\cdot\|_T$ 을 정의한다. 만약 연산자 F 가 아래를 만족하는 유한 값의 상수 δ, β 가 존재한다면 F 는 유한연산자(finite operator)이다.

$$\|Fg\| \leq \delta\|g\| + \beta, \quad g \in L_2$$

탄성링크 매니플레이터의 F 는 안정된 전달함수를 갖는 행렬이므로 당연히 유한연산자이며, 또 선형 연산자이다.

(4) 근사 자코비안 연산자와 외계센서 귀환제어법

전달함수행렬 $F(s)$ 는 부분분수행렬로 나눌 수 있다. 이 부분분수 전달함수행렬에 대응하는 부분연산자를 정의함으로써, 자코비안 연산자 F 또한 부분연산자의 합으로 표현할 수 있다.

만약 우리가 제어하고자하는 모드에 관련되는 설계 자코비안 연산자를 F_c 로, 나머지 모드에 관련되는 잔여연산자를 F_R 이라 한다면 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$z = z_c + z_r, \quad z_c = F_c \theta, \quad z_r = F_R \theta \quad (9)$$

이때, F 는 유한연산자이므로, 부분연산자 F_c, F_R 또한 유한연산자이다. F_c 는, 실제 매니퓰레이터의 외계센서귀환에서의 자코비안 행렬과 같이 제어기에서 직접 연산하는 근사 자코비안 연산자이고, F_R 은 제어기 속의 연산과정에서 무시되는 잔여연산자로 간주하자.

만일 $F(s)$ 의 지배적인 유한 개 부분전달함수로 구성되는 $F_c(s)$ 를 선택한다면, 대응되는 근사 자코비안 연산자 F_c 는 쉽게 구할 수 있어, 실제 매니퓰레이터의 외부센서귀환과 같이 on line 제어입력을 생성시킬 수 있다. 근사 자코비안 연산자는 자코비안 행렬과 달리 탄성모드의 근사 설계에 관계없이 $p \times p$ 의 정방행렬이어서 종래의 제어이론과 연결이 용이하며, 안정된 극을 갖는 선형연산자이기 때문에 보다 치밀한 제어기 설계도 가능하다는 특징이 있다.

외계센서 귀환제어기를 실제 매니퓰레이터의 PD제어기와 유사하게 아래와 같이 설계하도록 하자.

$$u = -F_c^* K z - G_v \theta \quad (10)$$

여기서 F_c^* 는 공역 근사 자코비안 연산자, K, G_v 는 positive definite인 귀환 이득행렬이다. 제1항은 시각센서와 같은 외계센서 위치 귀환, 제2항은 시스템 안정화를 위한 내부센서귀환 즉 관절속도를 이용한 감쇄항이다.

(5) 근사 자코비안 연산자의 선정조건

1링크 매뉴플레이터의 경우는 지지부의 특성에 상관없이 End Effector가 목표에 수렴함을 증명하였다면, 다링크계로의 확장은 지지부의 특징이 안정되었다는 가정 하에 그 수렴성이 증명된다. 즉 여기 부터 증명하는 내용은 1링크의 경우보다 훨씬 조건이 강화된 충분조건이다.

공역 근사 자코비안 연산자 F_c^* 는 매니플레이터 운동에 지배적인 전달함수를 고려하여 설계함이 중요하다. 제어기설계에 있어서 제어계가 목표위치에 도달하기 위해 구비해야 할 최소한의 조건은 다음 lemma로 주어진다. 우선 여기서 이용할 적분연산자를 정의하자.

$$C_1 \equiv C \int_0^t (\cdot) d\tau, \quad C \equiv F_c^* K \quad (11)$$

단, K : 임의의 상수행렬 (constant matrix)

Lemma.:

$C_1 F_R$ 이 유한연산자가 되기 위한 필요충분조건은 F_c 가 J_θ 즉, 실제 매니플레이터의 자코비안 행렬을 포함하는 것이다.

증명:

자코비안 전달함수 식(8b)를 다시

$$F(s) = J_\theta + s^2 J_e(s)$$

로 놓자. 여기서 J_θ 은 상수행렬, $s^2 J_e(s)$ 는 시스템 전달함수로부터 안정된 proper 전달함수 행렬임을 알 수 있다.

(가) 필요조건:

강체 매니플레이터 자코비안을 나누어 $J_\theta = J_c + J_R$ 이라 한다면, $F_c(s) = J_c$, $F_R(s) = J_R + s^2 J_e$ 가 된다.

$C_1 F_R \theta$ 의 놈을 주파수영역에서 표현하면

$$\| C_1 F_R \theta \|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{ \theta^*(j\omega) F_R^*(j\omega) C_1^*(j\omega) C_1(j\omega) F_R(j\omega) \theta(j\omega) \} d\omega$$

이 된다. 한편 C_1 은 적분연산자이므로,

$$F_R^*(j\omega)C_1^*(j\omega)C_1(j\omega)F_R(j\omega) \\ = [J_R^T + \omega^2 J_e^*(j\omega)] \frac{KJ_c^T J_c K}{\omega^2} [J_R + \omega^2 J_e(j\omega)]$$

이다. 여기서 J_c, J_R 은 상수행렬이므로, 위 식 가운데

$$\frac{J_R^T K J_c^T J_c K J_R}{\omega^2}$$

은 $\omega \rightarrow 0$ 에 대해 무한대가 된다. 따라서 상수행렬을 갖는 $C_1 F_R$ 은 유한연산자가 아니다.

(나) 충분조건:

$F_c(s) = J_\theta, F_R(s) = s^2 J_e$ 으로 분해하면, $F_R(s)$ 또한 안정 프로퍼 전달함수행렬이다.

$$C_1(s)F_R(s) = \left(\frac{J_\theta^T K}{s}\right)(s^2 J_e(s)) = s J_\theta^T K J_e(s)$$

도 안정한 전달함수행렬이 된다. 따라서 유한연산자임을 알 수 있다. F_c 에 탄성모드 부분의 전달함수 성분을 포함시켜도 동일한 결과가 얻어진다. □

이 lemma 의 조건은 제어기 설계 시 자코비안 연산자에 실제 로봇의 자코비안 행렬 J_θ 을 포함시켜야 잔여성분이 유한 값을 갖게 된다는 것을 의미하며, 이것은 다음절에서 논의하는 귀환제어의 안정조건에 중요한 역할을 한다

(6) 외계센서 위치귀환제어

Theorem : 폐회로 시스템의 안정성

운동방정식(4)과 제어식 (10)에 의해 구성되는 폐회로 시스템에 대해

- (1) $C_1 F_R$ 이 유한연산자,
- (2) $K > 0, G_v > 0$ 라고 하자

이때 충분히 큰 관절속도 이득 G_v 에 대해
시간 $t \rightarrow \infty$ 에서 $z \rightarrow 0, q \rightarrow 0$ 즉, 점근안정이다.

증명: 다음과 같은 양의 함수를 정의하자.

$$V(t) = \frac{1}{2} \{ \dot{x}^T R \dot{x} + q^T Q q + z_c^T K z_c \} \geq 0. \tag{12}$$

목적에 따라 V 를 미분하고, 식(4),(10)을 이용, 정리하면

$$\dot{V} = -\dot{q}^T Q \dot{q} - \theta^T G_v \theta - \theta^T F^* K z_r$$

을 얻는다. 우측 제3항을 식(11)의 연산자로 바꿔 쓰면

$$= -\dot{q}^T Q \dot{q} - \theta^T G_v \theta - \theta^T C_1 \dot{z}_r - \theta^T F^* K z_r(0)$$

가 된다. 여기 $z_r(0)$ 항은 연산자 정의에 따른 적분 초기치를 보상하는 부분이다. 시간 $[0, T]$ 에 대해 적분을 수행하고 식(12)의 부등식 관계를 이용하면

$$\begin{aligned} 0 \leq V(T) &= V(0) - \int_0^T \dot{q}^T Q \dot{q} dt \\ &\quad - \int_0^T \theta^T G_v \theta dt - \int_0^T \theta^T C_1 F_R \theta dt - \int_0^T \theta^T C z_r(0) dt \end{aligned}$$

를 얻는다. 이것은 확장 L_{2e} 공간에서의 절사내적을 이용하여 다시 쓰면

$$\begin{aligned} 0 \leq V(T) &= V(0) - \langle \dot{q}, Q \dot{q} \rangle_T - \langle \theta, G_v \theta \rangle_T \\ &\quad - \langle \theta, C_1 F_R \theta \rangle_T - \langle \theta, C z_r(0) \rangle_T \end{aligned}$$

이 되고, 다음 부등식을 얻을 수 있다.

$$\langle \dot{q}, Q \dot{q} \rangle_T + \langle \theta, G_v \theta \rangle_T$$

$$\leq V(0) + |\langle \theta, C_1 F_R \theta \rangle_T| + |\langle \theta, C z_r(0) \rangle_T| \quad (13)$$

단 $|\cdot|$ 은 절대값을 의미한다. 한편, 최소고유치 $\delta_1 = \lambda_{\min} Q > 0$, 조건(2)에서 $\delta_2 = \lambda_{\min} G_v > 0$ 이 존재하므로 부등호 좌변 항은 각각

$$\langle \dot{q}, Q \dot{q} \rangle_T \geq \delta_1 \|\dot{q}\|_T^2, \quad \langle \theta, G_v \theta \rangle_T \geq \delta_2 \|\theta\|_T^2$$

가 성립한다. 우변 제2항은 Schwartz의 부등식에서

$$|\langle \theta, C_1 F_R \theta \rangle_T| \leq \|\theta\|_T \|C_1 F_R \theta\|_T$$

이며, 또 조건(1) $C_1 F_R$ 의 유한성을 이용하면, 다시

$$\|\theta\|_T \|C_1 F_R \theta\|_T \leq \delta_3 \|\theta\|_T^2 + \beta \|\theta\|_T$$

의 관계가 성립하여, 결국

$$|\langle \theta, C_1 F_R \theta \rangle_T| \leq \delta_3 \|\theta\|_T^2 + \beta \|\theta\|_T$$

임을 알 수 있다. 마지막으로 우변 제 3항은

$$|\langle \theta, C z_r(0) \rangle_T| \leq \|\theta\|_T \|F_c^* K z_r(0)\|_T$$

에서, $z_r(0)$ 은 유한 값, K 는 상수행렬, F_c 는 유한 연산자이므로 $\|F_c^* K z_r(0)\|_T$ 는 어떤 상수 값, 따라서

$$|\langle \theta, C z_r(0) \rangle_T| \leq c \|\theta\|_T$$

이 성립한다. 이상을 종합하면 식(13)은

$$\delta_1 \|\dot{q}\|_T^2 + (\delta_2 - \delta_3) \|\theta\|_T^2 - (c + \beta) \|\theta\|_T \leq V(0)$$

여기서, 귀환이득 G_v 를 충분히 크게 선택한다면 $\delta_2 - \delta_3 > 0$ 를 만족시킬 수 있다.

$$\delta \equiv \delta_2 - \delta_3 > 0, \quad a \equiv \delta^{1/2}, \quad b \equiv (c + \beta) / 2\delta^{1/2}$$

라 놓으면 위의 식은

$$\delta_1 \|\dot{q}\|_T^2 + (a \|\theta\|_T - b)^2 \leq V(0) + b^2$$

이 된다. 오른쪽 항은 시간 T 에 의존하지 않기 때문에, 이 관계가 모든 시간 t 에 대해 성립하려면

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \theta(t) = 0$$

이어야 한다. $t \rightarrow \infty$ 에서 이 식이 성립하려면 $\dot{\theta}(t)=0, \ddot{q}(t)=0$ 이 되어야 하므로 식(4), (10)의 폐회로 시스템은

$$0 = -F_c^* K z, \quad \Omega q = 0, \quad \text{for } t \rightarrow \infty$$

이 된다. 한편 F_c^* 는 선형 연산자, $K > 0, \Omega > 0$, 따라서 $t \rightarrow \infty$ 에서 $z=0, q=0$ 가 성립한다. \square

여기에서 고찰한 제어기는 로봇에 관련된 근사 자코비안 연산자만을 이용함에도 불구하고 정리의 간단한 조건만을 만족시킨다면 시스템의 안정성이 보장된다는 사실을 시사하고 있다. 물론 폐회로 시스템의 안정성은 관절속도 귀환 항과 링크내부의 구조 감쇄항에 의존하고 있기는 하지만, 근사 자코비안 연산자의 선정여부에 의해 제어성능 향상도 가능하다.

Corollary 1

실제 로봇 자코비안 행렬을 이용하는 PD 제어기를,

$$u = -J_\theta^T K z - G_v \dot{\theta}, \quad K > 0, \quad G_v > 0 \quad (14)$$

로 설계하였을 때, 충분히 큰 속도이득에 대하여 폐회로 시스템은 점근 안정이다.

증명: 공역 근사 자코비안 연산자 $F_c^* = J_\theta^T$ 이므로 lemma를 만족, 즉 정리 1의 모든 조건이 만족된다. 따라서 시스템은 점근안정이다. \square

(7) 결론

공역 근사 자코비안 연산자로 전치 자코비안 행렬을 채용하는 제어기는 아주 간단하면서도 안정된 시스템이 실현된다. 실제 로봇은 마치 가상로봇의 위치변화를 보상하듯이 운동하기 때문에 End Effector의 위치는 안정화시킬 수 있다. 이러한 제어법에 더 보완하여 Decoupling 입력을 구성한다면 더욱 효과적인 목표추정(Tracking)이 가능하다고 본다.

라. 장애물 회피 알고리즘 개발

-분리 자코비안을 이용한 장애물회피방법-

- 근접 센서(초음파, 적외선 센서)를 로봇 팔에 장착시켜 장애물 회피 동작과 동시에 목표 용접선 추적을 실현
- 장애물에 접근할 때 반발 potential을 주고 목표에는 목표 추종 potential을 부여
- 반발 potential은 부분 자코비안을 활용하여 각 관절에 분배하고, 목표 추종은 전체 자코비안을 이용하여 수행한다.(잉여자유도가 2개, 목표 추종을 위한 자유도 5개)
- 수렴성에 대한 조건 및 증명

(1) 서론

H beam과 같은 철골주의 용접작업은 용접작업물의 형상이 용접의 장애물로서 작용한다. Web부를 용접하려할 때는 Flange부가 용접로봇의 자세를 제한시키게 되고, 때로는 충돌의 위험도 있다. 용접 교시 중에도 충돌위험을 회피하기 위해 작업자가 극히 조심해야한다. 작업대상물의 형상을 알고 있다면 로봇작업에 대한 시뮬레이션을 통해 충돌문제를 미리 점검하는 것이 가장 안전한 방법이라 할 수 있다. 그러나 예상하지 않았던 철골주의 현장 가설물 등이 존재한다면, 또 교시작업의 편이성을 부여하기 위해서도, 자동적인 장애물회피동작이 요구되어진다. 본 절에서는 이러한 문제에 대처할 수 있는 실제적인 장애물회피방법을 도출하고자 한다.

현재 투입 예정된 로봇시스템은 레일상의 주행자유도를 합하여 7개의 자유도를 갖고 있다. 그중 실제 용접토치의 자세와 위치를 결정하는 데에는 5개의 자유도가 이용되고(용접위치:3자유도, 자세각:2자유도), 나머지는2개는 여유자유도로 간주될 수 있다. 이 여유자유도를 이용하여 장애물회피동작을 하면서, 용접작업이 가능한 방법을 모색하도록 하자.

(2) 기존의 연구

장애물회피방법에는 다양한 어프로치의 연구가 진행되고 있다. 초음파센서 등에 의한 장애물인식과 간단한 정지/회피동작은 기존 AGV등에 이미 이용되고 있으며, 시각인식에 의한 경로계획법, 인공 포텐셜에 의한 반발력 생성법, Fuzzy등 AI기법을 이용한 방법 등 많은 제안이 있다. 여기서는 로봇팔의 특성에 알맞은 Real Time장애물회피 알고리즘이 요구되고, 실용적인 측면에서의 현실성을 고려해야 한다. 로봇은 이미 제어기와 서보계를 장착하고 있어, 이것과 장애물회피용 저가형 센서를 추가 장착함으로써 시스템구현이 가능한 방식이 유리하다. 이러한 의미에서 보면, 로봇팔에 부착이 용이한 초음

과거리센서 등이 유망하고, 제어방식으로는 장애물에 대한 반발포텐셜법이 유리하다.

반발포텐셜법은 O,Katib에 의해 제안된 방법으로, 작업좌표상 장애물과의 최단거리가 r , 설정최단거리 r_d 라고 할 때 r_d 와의 차를 이용하여, 포텐셜

$$U_r = \frac{1}{2} K_r \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_d} \right)^2, \text{ for } r < r_d$$

$$U_r = 0, \quad \text{for } r > r_d \quad (1)$$

을 인위적으로 설정하여, 그 구배, 즉 반발력 $f_r = -\text{grad } U_r$ 를 로봇에 부여하는 방법이다.

이러한 포텐셜은 복수의 장애물이 있을 경우, 또는 목표지점으로의 흡입포텐셜이 존재할 경우, 정류점 (local minimum points, saddle points, etc)에 빠지는 단점이 있다. 이를 해결하기 위한 방식으로, Okufu가 제안한 타원 포텐셜법이 있으나, convex 장애물에는 효과적이지만, concave 장애물의 경우는 역시 정류문제가 발생한다. 凹장애회피방안으로 반발벡터의 방향과 크기를 분리하여 작업경로를 계획하는 방식(H. Noborio)등이 있으나, 목표 수렴성 등이 보증되지 않는 등 실제적 방법이 아니다. 이러한 문제를 극복하기 위한 방법으로 유체포텐셜 즉, Laplace Potential Method가 제안되어 있는데, 이는 개념적으로 개울물이 흐르는 것과 같이 모든 작업영역내의 포텐셜을 계산하여 목표로 향하도록 하는 방법이나 방대한 계산량을 요구하고 있어 Real Time제어가 곤란하다.

(3) 인공포텐셜과 부분자코비안 행렬을 이용한 제어법

H Beam의 내부를 로봇팔로 용접작업 할 때는 장애물은 凹형, 목표도 凹내에 있다. 그러나 다행히도 용접토치만이 목표를 향하고, 팔 자신은 여유자유도로서 장애물 회피동작을 한다면 이러한 악조건 내의 장애물도 회피할 가능성이 있다. 즉 흡인포텐셜은 용접토치에, 반발포텐셜은 장애물센서로서 감지된 최근접 arm위에 위치시킴으로서 서로 독립적인 제어가 가능하다. 이러한 개념적인 방법을 논의하기 위해 다음 그림 3.4.4.22와 같은 충분한 자유도 n 을 갖는 로봇 시스템을 생각하자.

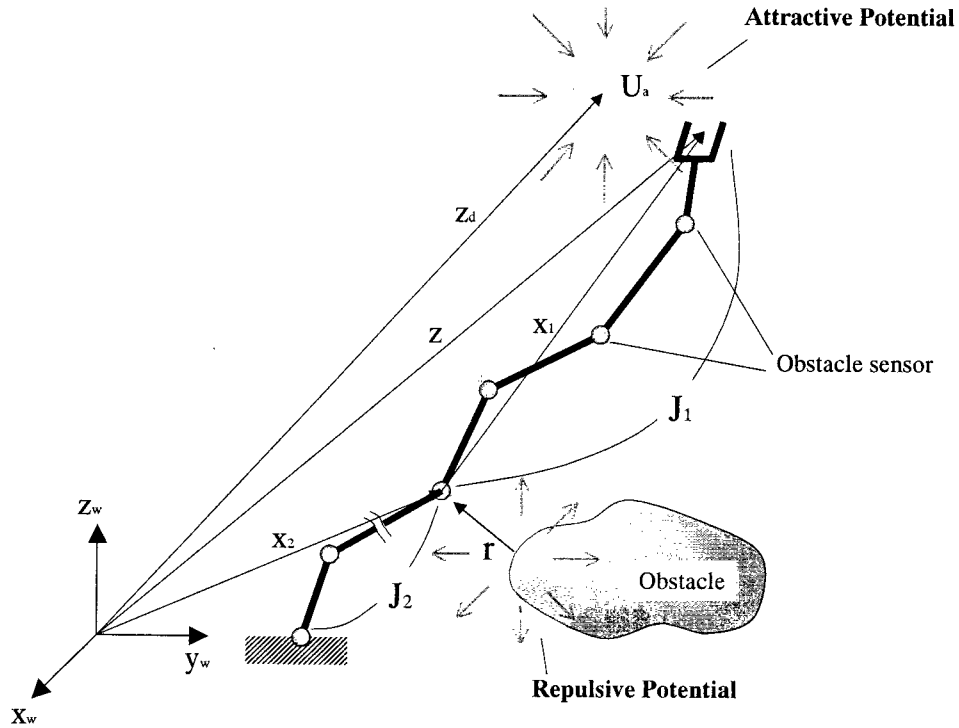


그림 3.4.4.22 인공포텐셜과 부분자코비안

편의상 각 관절상에 장애물 센서가 부착되어있고, 그 중 장애물과의 거리가 가장 가까운 센서의 위치가 작업좌표 기준으로 x_2 , 그 위치부터 end effector까지의 거리가 x_1 , 작업좌표계에서 본 end effector의 위치는 z , 목표위치는 z_d 라 하자. 이때 위치벡터는

$$z = x_1 + x_2, \quad z, x_1, x_2 \in R^{p \times 1} \quad (2)$$

또, 기하학적구속에 의해 관절변수 θ 와의 관계는

$$z = H(\theta), \quad \theta^T = [\theta_1^T, \theta_2^T]^T, \quad \theta \in R^{n \times 1}, \quad \theta_1 \in R^{p \times 1}, \quad \theta_2 \in R^{(n-p) \times 1} \quad (3)$$

으로서 이때의 θ_1, θ_2 는 각각 x_1, x_2 에 대응되는 관절변수이다. 이 정의에 따라 자코비안을 부분으로 분리하여 기술하면,

$$\delta z = J_1 \delta \theta_1 + J_2 \delta \theta_2, \quad J_1 \in R^{p \times p}, \quad J_2 \in R^{p \times (n-p)} \quad (4)$$

$$\text{단, } J_1 \equiv \frac{\partial H}{\partial \theta_1}, J_2 \equiv \frac{\partial H}{\partial \theta_2}, J_1 \in R^{p \times p}, J_2 \in R^{p \times (n-p)}$$

으로 표현된다.

로봇선단에 장착된 용접토치를 $z \rightarrow z_d$ 으로 동시에 장애물을 회피하는 동작을 수행하기 위해서 각각의 인공포텐셜을 다음과 같이 정의하자. 흡인포텐셜을

$$U_a = \frac{1}{2} [z - z_d]^T K_p [z - z_d], \quad K_p \in R^{p \times p} \quad (5)$$

반발포텐셜을 장애물과의 최단거리 r (scalar값)을 이용하여

$$U_r = \frac{1}{2} k_r \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_d} \right)^2, \quad \text{for } r < r_d.$$

$$\text{otherwise, } U_r = 0 \quad (6)$$

라 놓자. 따라서 주어진 인공포텐셜은

$$U = U_a(z) + U_r(r) \quad (7)$$

이 된다. 따라서 복원력에 의한 가상일 δW 은 다음과 같다.

$$\delta W = \left(\frac{\partial U_a}{\partial z} \right)^T \delta z + \left(\frac{\partial U_r}{\partial r} \right)^T \delta r \quad (8)$$

제1항의 가상변위 δz 는 관절변수로 변환시키기 위해, 식(4)의 자코비안 관계식을 이용하면

$$\left\{ \begin{bmatrix} J_1^T \\ J_2^T \end{bmatrix} \frac{\partial U_a}{\partial z} \right\}^T \begin{bmatrix} \delta \theta_1 \\ \delta \theta_2 \end{bmatrix}$$

로 표현할 수 있다.

제2항에 대해서도 마찬가지로 관절변수로 변환시키기 위해, 우선 가상변위 δr 에 대해 고찰해보자. 거리 r 이란 작업좌표계에서 보는 장애물상의 최단지점 위치벡터를 x_{2o} 라 할 때

$$r = \|x_2 - x_{2o}\|$$

을 의미한다. 즉, r 은 x_2 의 변수임이 자명하다. 따라서

$$\delta r = \frac{\partial r}{\partial x_2} \delta x_2$$

이며, 편 미분을

$$J_{2r} \equiv \frac{\partial r}{\partial x_2}, \quad J_{2r} \in R^{1 \times (n-p)}$$

라고 정의하면, 다시

$$\delta r = J_{2r} \delta x_2$$

로 쓸 수 있다. 또 식(2),(4)에서 $\delta x_2 = J_2 \delta \theta_2$ 이므로 위 식은 최종적으로

$$\delta r = J_{2r} J_2 \delta \theta_2$$

이된다. 따라서 제2항은

$$(J_2^T J_{2r}^T \frac{\partial U_r}{\partial \theta_2})^T \delta \theta_2$$

을 얻을 수 있다. 이를 종합하면 식(8)을 가상 관절변위에 대한 가상일로 표현하게 된다.

$$\delta W = \left(\begin{bmatrix} J_1^T \\ J_2^T \end{bmatrix} \frac{\partial U_a}{\partial z} \right)^T \begin{bmatrix} \delta \theta_1 \\ \delta \theta_2 \end{bmatrix} + (J_2^T J_{2r}^T \frac{\partial U_r}{\partial \theta_2})^T \delta \theta_2 \quad (9)$$

이것으로 각 관절에 포텐셜의 구배를 배분하고 있는 입력으로 한다면

자연스러운 제어입력이 얻어진다. 따라서 PD형 제어입력은 다음과 같이 구성된다.

$$u = - \begin{bmatrix} J_1^T & 0 \\ J_2^T & J_2^T J_{2r}^T \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} K_p & 0 \\ 0 & \frac{k_r}{r^3 r_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z - z_d \\ r_d - r \end{bmatrix} + K_v \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \right\}$$

즉,

$$u = - \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ 0 & J_{2r} J_2 \end{bmatrix}^T \left\{ \begin{bmatrix} K_p & 0 \\ 0 & \frac{k_r}{r^3 r_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z - z_d \\ r_d - r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{v1} & 0 \\ 0 & k_{v2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \right\}$$

$$\text{for } r < r_d, \quad \text{otherwise, } k_r = 0 \quad (10)$$

(4) 안정성 고찰

로봇의 운동에너지는

$$E_k = \frac{1}{2} [\theta_1^T \theta_2^T]^T \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{12}^T & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

이므로 선형 운동방정식은

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{12}^T & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = u \quad (11)$$

로 표현된다. 한편 운동방정식은 자코비안 관계식으로부터

$$\begin{bmatrix} \delta z \\ \delta r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ 0 & J_{2r}J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \theta_1 \\ \delta \theta_2 \end{bmatrix},$$

따라서

$$\begin{bmatrix} \delta \theta_1 \\ \delta \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ 0 & J_{2r}J_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \delta z \\ \delta r \end{bmatrix} \quad (13)$$

운동방정식(11)에 식(10)을 대입하고, 식(13)의 관계를 이용하여 자코비안을 양변에 곱하여 정리하면,

$$\left\{ \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ 0 & J_{2r}J_2 \end{bmatrix}^T \right\}^{-1} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{12}^T & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ 0 & J_{2r}J_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \\ - \left\{ \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ 0 & J_{2r}J_2 \end{bmatrix}^T \right\}^{-1} \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ 0 & J_{2r}J_2 \end{bmatrix}^T \left\{ \begin{bmatrix} K_p & 0 \\ 0 & \frac{k_r}{r^3 r_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z - z_d \\ r_d - r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{r1} & 0 \\ 0 & k_{i2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \right\}$$

즉, $\mathbf{R} \Delta \dot{z} + \mathbf{K}_p \Delta z + \mathbf{K}_v \Delta \dot{z} = 0$ 이고

$\mathbf{R} > 0$, $\mathbf{K}_p > 0$, $\mathbf{K}_v > 0$ 이라면 $\Delta z \Rightarrow 0$, 즉 점근안정이다. 이것은 장애물회피와 함께 목표추정이 가능하다는 것을 말해주고 있다. 이 기본적인 고찰에서는 장애물까지의 거리를 유지하기 위해 로봇의 자유도 1개를 이용하고 있다.

remark:

$$r = x_2 - x_{20}, \quad r_d = x_{2d} - x_{20},$$

$$r - r_d = x_2 - x_{20} - x_{2d} + x_{20} = x_2 - x_{2d}$$

장애물과의 목표거리 x_{2d} 가 일정하다면 $\dot{r} = \dot{x}_2$ 이다.

(5) 결론

건설 현장이라는 환경의 악조건과 복잡한 형상의 H-beam용접이라는 조건은 로봇의 움직임에 많은 장애물을 발생시킨다. 이러한 장애물을 회피하는 알고리즘은 용접을 수행할 때나 교시를 할 때 모두 필요하다. 이를 위해 인공포텐셜과 부분자코비안을 이용한 제어법을 제안하였다. 이 알고리즘은 근접 센서(초음파, 적외선 센서)를 로봇팔에 장착시켜 장애물 회피 동작과 동시에 목표 용접선 추적을 실현할 수 있다. 장애물에 접근할 때는 반발 potential을 부여하여 부분자코비안을 써서 잉여 자유도를 이용하여 회피하고, 목표에는 목표 추종 potential을 부여하여 전체 자코비안을 이용하여 각 관절에 분배하여 수행한다. 또한 이러한 제어법의 수렴성에 대한 조건 및 증명을 하였다. 이 알고리즘을 실장하기 위해서 로봇에 센서를 부착하고 제어기의 외부루프에 알고리즘을 넣는 것이 필요하다.

5. 용접로봇 시스템의 용접 작업 구현

가. 레이저 센서를 이용한 로봇 자동 용접

로봇 자동용접[11]은 사람이 용접 GUN을 사용하여 용접하는 반자동 용접에 비하여 다음과 같은 많은 장점을 가지고 있다.

- (i) 연속작업이 가능하므로 작업 효율이 높고,
- (ii) 용접상태가 일정하며,
- (iii) 유해한 환경조건에 적합하고,
- (iv) 인건비 감소의 효과가 있다.

또한, 자동용접의 단점으로는

- (i) 교시(Teaching) 시간이 오래 걸리며,
- (ii) 용접 부재의 위치가 틀어진 경우 용접선 추적이 어렵고,
- (iii) 일시 투자비용이 필요하다.

이러한 단점을 보완하기 위하여, 일련의 부가적인 Software 및 Hardware를 개발하려는 노력이 로봇 제작자들에 의하여 행하여져 왔다. 자동용접에서의 용접선 추적방법에는 주로 아크센서[12,13,14] 또는 레이저 센서[15]를 사용하여 보상하는 방법이 있다.

그러나 Arc Sensor는 Weaving Motion에서만 사용가능 하므로, Weaving을 할 수 없는 작업(예를 들면, 박판 용접)에서는 Laser Vision Sensing Tracking 방법을 사용하게 된다. 또한 정밀도면에서도 레이저센서를 이용한 추적방법을 사용하면 정확한 추적이 가능하다. 그러나, 레이저 센서는 상대적으로 고가이므로 그 용도가 제한적이라고 할 수 있다.

(1) 레이저 센서의 기본원리 및 알고리즘

레이저 센서는 Triangulation 기법을 이용하여 조사 대상물의 높이 데이터를 알아내게 된다. 먼저 대상 조인트를 지정하면 측정 데이터를 분석하여 해당 조인트의 파라메타(중심위치, Gap, Mismatch.

Area, Normal Angle 등)를 로봇 제어기로 전달하여준다. 제어기는 이를 분석하여, 용접 중심선의 추적 및 용접출력(전류, 전압, 속도 등)을 변경시켜 주게 되어 있다. 용접 조인트의 지정 없이 자동으로 용접 조인트의 종류를 판별하여 주는 방법도 개발되어있다[16].

그림 3.4.5.1과 같이, 용접토치의 앞단에 레이저 센서를 장착하고서, 이 레이저 센서로부터 읽어들이는 측정치를 이용하여 용접 중심선을 추적하는 것이 레이저 센서 추적의 기본원리이다. 이때, 레이저 조사빔(Beam)을 조사하는 방식에 따라서 Point 방식과 Stripe 방식의 2가지로 레이저 센서의 방법이 나누어진다. Point 방식은 하나의 레이저 Point를 Galvanometer 등을 이용하여 반사판을 좌우로 움직이며 각 위치에서의 측정치를 얻는 방식이다. Stripe 방식은 Prism등을 이용하여 레이저 Stripe을 만들어서 이를 조사하는 방식이다. 본 개발에서는 Point 방식을 채택한 Servo Robot사의 MSPOT-280 레이저 센서를 이용하여 추적 알고리즘을 개발하였다. 레이저 센서는 Triangulation 기법을 이용하여 조사 대상물의 높이 데이터를 알아내게 된다. 먼저 대상 조인트를 지정하면 측정 데이터를 분석하여 해당 조인트의 파라메타(중심위치, Gap, Mismatch, Area, Normal Angle등)를 로봇 제어기로 전달하여준다. 제어기는 이를 분석하여, 용접 중심선의 추적을 하게 되어 있다.

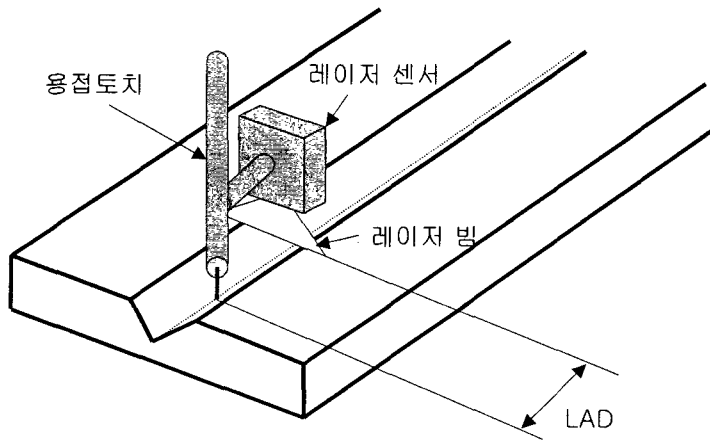


그림 3.4.5.1 레이저 센서를 이용한 자동용접(LAD=Look Ahead Distance)

레이저 센서를 사용시에는 여러 가지 파라메타들을 정확하게 입력하여 주어야만 올바른 추적이 가능하다. 이러한 파라메타에는 전방거리(Look Ahead Distance), Sensor Calibration Data, 그리고 용접선 편차 등이 있다. 이러한 값이 정확하게 입력되지 못하면, 결국 추적이 올바르게 행하여 질 수 없게 된다. 용접선 편차란, 그림 3.4.5.2에서 보는 바와 같이 로봇의 초기이동 방향으로 이동시에 전방거리만큼 이동하였을 때에 용접 중심선의 위치차를 의미하며, Calibration Data란 레이저 센서의 측정치를 실제 단위로 보정하는 것을 의미한다. 레이저 센서 추적을 하기 전에 미리 보정을 하여 이 값을 입

력하여 놓아야 한다.

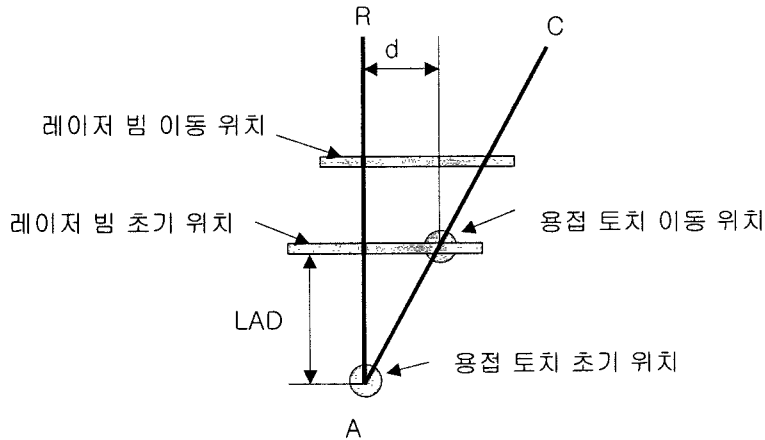


그림 3.4.5.2 레이저 센서의 편차

(d=편차, LAD=전방거리(Look Ahead Distance, AR=레이저중심선, AC=로봇 이동경로)

여기서 레이저 센서와 아크 센서를 비교할 필요가 있다. 표 3.4.5.1에 나타낸 바와 같이 레이저 센서는 아크센서에 비하여 실시간성(Real Time)이 뒤떨어진다. 즉, 아크센서는 틀어진 정도를 결정하면 바로 다음 Sampling Time(예를 들면, 16 msec)에 이를 바로잡기 위하여 토치를 이동시키는데 비하여, 레이저 센서 추적에서는 레이저 센서가 위치 틀어짐을 결정하고 나서 상당한 시간 후에 이를 반영한다. 이것은 레이저 센서의 위치가 용접토치로부터 전방거리(Look Ahead Distance)만큼 떨어져있기 때문이다. 따라서, 보정을 행하기 전에 용접조인트 자체에 변화가 오게 되면, 이를 효과적으로 보상할 수 있는 방법이 없게 되는 단점이 존재한다.

레이저 센서를 이용하면 용접 중심선의 좌우와 높이방향의 2차원적인 추적 외에도 토치의 Orientation까지도 조정하는 3차원 추적이 가능하다. 즉, 각각의 측정 위치에서 앞뒤의 측정치를 기준으로 해서 접선 벡터(Tangent Vector)를 구할 수 있으므로 이 값을 이용하여, 미리 정한 Lateral Angle 및 Forward Angle에 맞도록 토치의 방향을 조정 가능하다. Twin Arc Sensor를 채용하면, Arc Sensor 추적에서도 토치 Orientation 조정이 가능하기도 하다[14]

표 3.4.5.1 레이저 센서와 아크센서 추적 비교

추적 방식	레이저 센서	아크 센서	비교 분석
(i)보상 방식	Off Line	On Line	전방거리(Look Ahead Distance) 뒤에 보상
(ii)초기점, 끝점 인식	일정 범위안에서 가능	Touch Sensor와 병행시 일정범위안에서 가능	자동인식 가능
(iii)대상 조인트	모든 조인트	워빙이 필요한 조인트	특히 박판 용접에 유용
(iv)용접 변수 변화 판정	Gap, Mismatch, Normal, Area 변화 판정가능	판정이 힘들	변수에 따라 용접전류, 전압, 속도 조정가능
(v)3차원 추적	가능	불가(Twin Arc Sensor에서는 가능)	용접토치의 Orientation 조정 기능
(vi)가격	고가	저가	고급 용접에 적합

용접용 로봇을 이용한 레이저 추적방식의 경우에 용접 모재의 상태에 따라서 레이저 센서의 측정이 불가능한 경우에는 그 앞뒤의 측정치를 이용하여 Interpolation을 하여 편차를 보정하였다. 이러한 경우에는 대표적으로 가접(Tack)의 예를 들 수 있는데 일정 크기 이하에서는 Interpolation을 하면서 계속 용접을 진행하므로 가접이 존재하는 경우에도 용접선 추적이 가능하다. 물론 가접 위치에서 용접선이 급격한 변화를 하게되면 추적에 치명적으로 나쁜 영향을 주게되므로 주의를 요한다.

(2) 5축 로봇에의 레이저 센서 적용 및 실험 결과

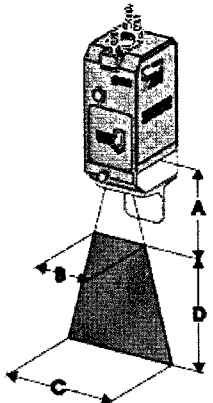
(가) 레이저 센서의 선정

철골용접 로봇시스템에서 사용된 레이저센서는 기존에 용접로봇 분야에 경험이 많은 캐나다의 ServoRobot사의 Scanning 방식센서 중 하나인 MSPOT-280으로 정하였다. 센서의 FOV (Field Of View)가 최대 175mm로 다소 큰 편이나 향후에 실시간 센서 추적뿐만 아니라, Off-line으로 용접선을 미리 검색하는 기능에도 사용할 목적으로 비교적 큰 FOV 제품을 선택하게 되었다. 또한, 데이터의 신뢰성 면에서도 기존에 삼성전자에서 채용한 경험이 있는 Line Sensor 형태의 BIP-60 보다 뛰어난 모델을 선정하였다. MSPOT-280에 대한 자세한 사양은 그림 3.4.5.3를 참조한다.

M-SPOT

- Real-time 3D joint tracking for welding robots
- Real-time joint measurement
- Single pass and multipass arc welding
- Heavy duty applications

VERSATILE LASER SCANNING CAMERAS



	M-SPOT 90	M-SPOT 200	M-SPOT 250	
A Stand off	70	152	55	
Field of view	B Closest	40	79	35
	C Far plane	82	180	175
D Depth of field	90	195	280	

Resolution: From 0.05 *

Camera dimensions: 63 x 48 x 97

그림 3.4.5.3 M-SPOT Camera 사양

(All Dimensions are in Millimeters. * = Depending on Selected Model.)

(나) 레이저센서와의 통신방식

레이저센서와 로봇제어기(NCC Type)와의 실시간 통신방식은 기존의 ISA BUS방식 대신에 범용성을 증가시키기 위하여 RS-232C를 통한 실시간 통신 방식을 채택하였다. 기존의 BUS통신 방식이 통신 관점에서 보면 속도나 신뢰성이 우수한 것은 사실이나, 레이저 센서용 Vision Processing Board를 NCC 제어기 내부의 Slot에 장착하여야 함으로 인하여 범용성이 떨어지고, 또한 로봇제어기의 Motion Board등에서 발생한 Noise가 Vision Board로 쉽게 영향을 줌으로 인하여 용접 Joint 인식 결과에 문제가 발생하는 문제를 해결할 수 있었다.

이러한 직렬통신을 사용한 Path 보정방법은 단지 레이저 센서에 국한되어 사용되는 기술이 아니고, 다양한 로봇관련 센서에 사용이 가능하다. 특히, Deburring에 사용되는 Force Sensor를 이용한 위치 보정에도 동일한 위치보정 방식이 사용될 수 있다. 이러한 기능을 실시간 위치보정이라고 부르며, 본 개발을 통하여 향후에 다른 공정에도 기본개념이 적용 가능할 것으로 판단된다.

(3) 용접조인트

철골 빔 용접에서 발생하는 용접조인트는 한쪽 면은 평평하고, 마주보는 면은 45도의 개섵각을 가지는 Half-V Groove로 정의된다. ServoRobot(사)의 Software에 미리 이 형태의 조인트가 정의되어 있으므로 이를 선택하여 용접조인트 검색을 하였다. H-beam 철골의 접합부는 다음 페이지의 그림과 같은 형태를 가지고 있다. 이 그림은 직접 건설현장에서 철골 용접을 준비중인 상황을 보여주고 있다. ServoRobot(사)의 Software내에는 기존의 Corner, Fillet, Butt, Lap, V Groove등의 다양한 용접 조인트들이 정의되어 있어서 적당한 형태의 조인트를 지정하여 검색할 수 있게 되어 있다.

(4) 실험

5축용접 로봇과 1축 주행장치를 포함하는 용접로봇시스템에 레이저 센서를 설치하여 실시간으로 용접선을 추적하였다. 용접 실험을 통하여 레이저 센서 추적 성능이 양호함을 입증하였다. 그림 3.4.5.4 과 그림 3.4.5.5은 Tracking장면을 보이고 있다.

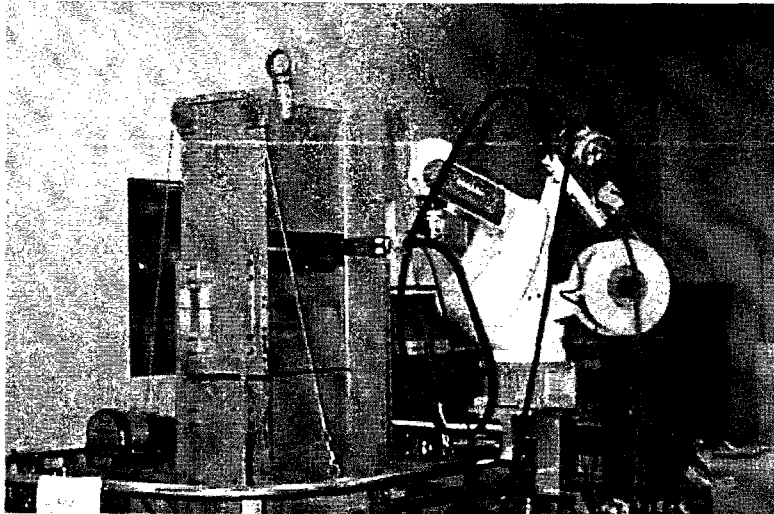


그림 3.4.5.4 레이저 센서를 이용한 tracking 작업

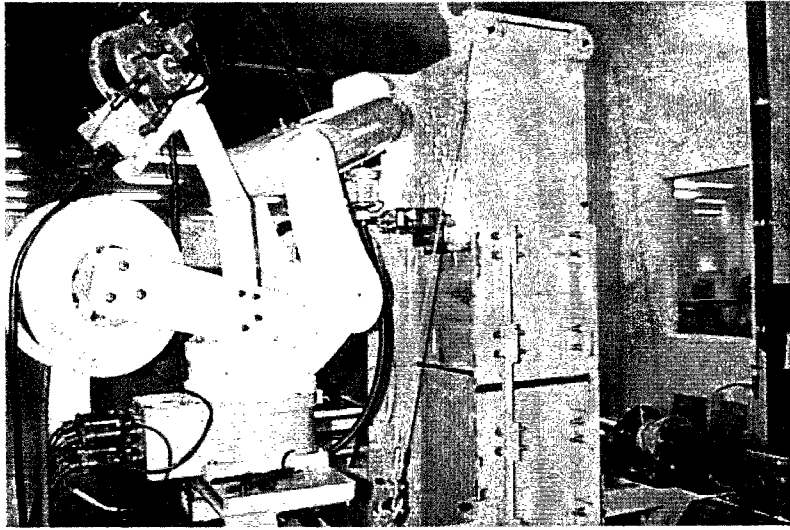


그림 3.4.5.5 레이저 센서를 이용한 실부재 용접 작업

나. 아크센서를 이용한 용접선 추적 기법

건설현장에서 행해지는 H-beam 철골주 연결용접은 작업환경이 열악하고, 용접시간이 매우 길다는 점에서 사람에게서는 매우 힘든 작업중의 하나이다. 현재 선진국에서는 다양한 자동용접 시스템이 개발되어 상용화 단계에 이르고 있는 실정이나, 국내에서는 H-beam 용접을 비롯한 건설용 로봇의 경우에 적용이 거의 전무한 실정이다. 이러한 H-beam 연결용접을 자동화하기 위한 전제조건으로서 가장 중요한 것 중의 하나로 용접선 자동추적장치가 필요하다. 즉, 어떻게 하면 사람이 없는 상황에서 자동으로 용접선을 추적하며 성공적인 용접작업을 수행할 수 있는지가 중요한 문제이다. 본 연구에서는 용접선 추적 방식의 하나인 아크센서를 이용하여 용접선을 추적하는 방법을 제시하고자 한다.

일반적으로 로봇을 이용한 자동용접은 수작업으로 하는 반자동 용접에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 구체적으로, (i) 연속작업이 가능하므로 작업 효율이 높고, (ii) 용접상태가 일정하며, (iii) 유해한 환경 조건에 적합하고, (iv) 인건비 감소 등의 효과를 얻을 수 있다. 그러나, 자동용접의 단점으로는 교시(Teaching) 시간이 오래 걸리며, 용접 부재의 위치가 틀어진 경우 용접선 추적이 어렵고, 일시 투자비용이 필요한 점등을 들 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 일련의 부가적인 S/W 및 H/W를 개발하려는 노력이 로봇 제작자들에 의하여 행하여져 왔다.

용접중 부재의 변형, 치구의 부정확성, Off-Line Programming 입력의 Calibration 오차 등의 제반 부정확성을 효과적으로 보상해주는 목적으로 Arc Sensor가 이용된다.[11] Arc Sensor의 장점은 (i) 주변 부속장치가 불필요하고 (ii) 용접선 추적능력이 뛰어나고 (iii) 값이 저렴하며 (iv) 사용하기에 편리하다는 점이다. 그러나, Arc Sensor는 Weaving Motion에서만 사용 가능하므로, Weaving을 할 수 없는 작업에서는 Laser Vision Sensing Tracking 등의 다른 방법을 사용하여야 한다.

(1) Arc Sensor의 기본원리 및 Algorithm

Arc Sensor는 용접 Wire에 흐르는 Arc Current값의 변화를 측정하여 용접중심선의 위치를 찾는 방식을 의미한다. Arc Sensor를 적용하기 위해서는 일반적으로 Weaving이라고 부르는 동작으로 용접 토치를 용접선과 수직인 방향으로 좌우로 흔들어 주는 동작을 필요로 한다. 위빙동작은 단위시간에 용접량을 극대화하기 위하여 사용되는 방법이다. 물론, 이러한 위빙동작은 일정한 하나의 pattern이 있는 것이 아니라, 용접조건에 따라서 수많은 변형된 pattern이 존재하게 되고, 따라서 Arc Sensor는 이러한 pattern에 적합하게 개발되어야만 한다. 로봇을 이용하여 그림 3.4.5.6과 같이 좌우로 Weaving을 하면 Weaving 중심점을 대칭으로 Arc Current가 변화하게 된다. Arc 전류의 변화에

영향을 주는 가장 큰 원인은 위빙동작시 용접위치에 따라서 용접 아크 및 용접 Wire의 길이가 변화함에 따르는 저항치의 변화이다. 즉, 아크전류는 저항값이 작은 경우에 많이 흐르고, 저항값이 큰 경우에는 적게 흐르게 된다.

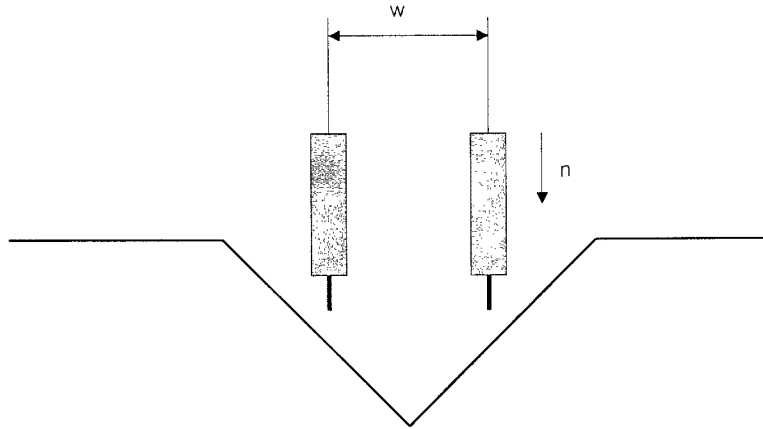


그림 3.4.5.6 용접 Torch의 Weaving Pattern

(w = Weaving Direction, n = Normal Direction)

이를 그래프로 설명하자면, 용접토치의 Weaving 중심이 용접 중심선 바로 위에 위치하고 있을 때, 즉 용접토치가 용접선을 올바르게 추적하고 있는 상황에서는 그림 3.39에서 실선으로 표시한 전류 파형이 나온다. 그러나, 용접 Torch가 예를 들어 왼쪽으로 치우쳐 있을 때에는 3.4.5.7의 점선과 같이 전류의 파형이 변화하게 된다. 오른쪽으로 치우친 경우는 그림에 표시하지는 않았지만, 왼쪽으로 치우친 경우와 정반대의 조건을 보여주게 된다. 이러한 조건을 이용하면 Weaving 용접 진행 시에 실시간으로 용접 Torch의 중심을 용접선 위에 위치시킬 수 있는 Algorithm을 구성할 수 있다.

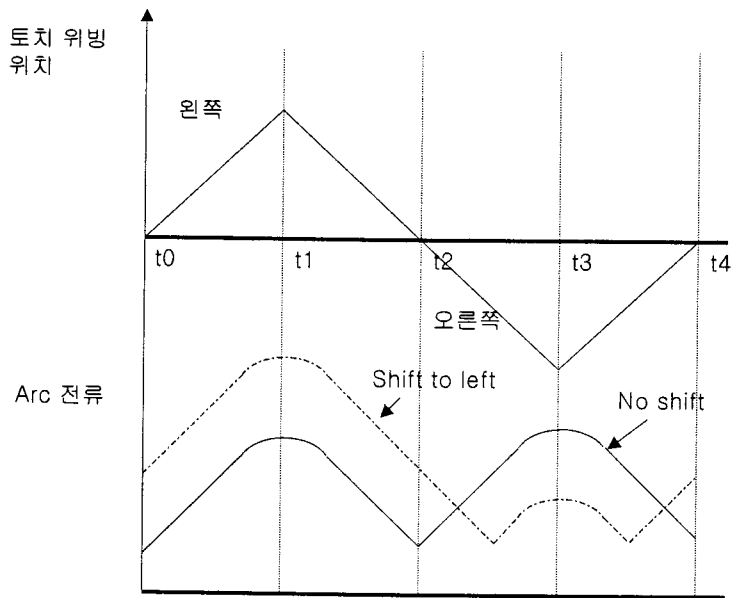


그림 3.4.5.7 Torch 위치에 따라 변화하는 Arc Current Pattern

또한, 용접 Arc 전류값의 명령치와 측정치를 비교하면 용접토치가 용접선으로부터 얼마나 떨어져 있는지를 판단할 수가 있다. 이를 이용하여, 용접전류가 너무 높으면 용접토치를 용접선에서 멀게 하고, 용접전류가 너무 낮으면 용접선에 가깝게 이동시키는 제어도 가능하다. 따라서, 아크센서를 사용하여 용접선을 추적하는 일과 용접토치를 용접선의 위에 적당한 높이에 위치시키는 일을 동시에 할 수 있다. 용접품질을 유지하기 위하여서는 용접선을 추적하는 일과 용접토치의 높이를 적당히 유지시키는 일 모두 중요한 것이다.

위에서 언급한 용접 조건을 이용하여, 용접 Torch의 치우친 방향을 결정하는 방법에는 다음과 같은 여러가지가 있고, 이러한 방법들이 기존의 Arc Sensor 개발에 이용되어 왔다. 판별방식을 나열하면, (i)적분방식, (ii)미분방식, (iii)첨두치 방식, (iv)시간 비교 방식, (v)주파수 분석 방식[2] (vi)기준치 비교 방식[3]등이 있다. 적분방식은 t1 에서 t2 까지의 전류 적분량 I1 과 t2 에서 t3 까지의 전류 적분량 I2 를 비교하여서, I1 이 I2 보다 크면, Torch의 중심이 왼쪽으로 치우쳤다고 판별하는 방법이다. 미분방식은 t2 에서의 전류 미분치 D2 를 계산한 후, D2 가 음수이면 왼쪽으로 치우쳤다고 판별하는 방법이다. 첨두치 방식이란, t1 과 t3 에서의 전류치 i1 과 i3 값이 Torch 중심의 치우침에 따라서 변화하는 것을 이용하는 방법이다. 즉, i1 값이 i3 값보다 크면, Torch 중심점이 왼쪽으로 치우쳤다고 결정하게 된다. 위에서 언급한 용접 조건을 이용하여, 용접 Torch의 치우친 방향을 결정하는 방법에는 다음과 같은 여러가지가 있고, 이러한 방법들이 기존의 Arc Sensor 개발에 이용되어 왔다. 판별방

식을 나열하면, (i)적분방식, (ii)미분방식, (iii)첨두치 방식, (iv)시간 비교 방식, (v)주파수 분석 방식 [2] (vi)기준치 비교 방식[3]등이 있다. 적분방식은 t_1 에서 t_2 까지의 전류 적분량 I_1 과 t_2 에서 t_3 까지의 전류 적분량 I_2 를 비교하여서, I_1 이 I_2 보다 크면, Torch의 중심이 왼쪽으로 치우쳤다고 판별하는 방법이다. 미분방식은 t_2 에서의 전류 미분치 D_2 를 계산한 후, D_2 가 음수이면 왼쪽으로 치우쳤다고 판별하는 방법이다. 첨두치 방식이란, t_1 과 t_3 에서의 전류치 i_1 과 i_3 값이 Torch 중심의 치우침에 따라서 변화하는 것을 이용하는 방법이다. 즉, i_1 값이 i_3 값보다 크면, Torch 중심점이 왼쪽으로 치우쳤다고 결정하게 된다.

시간비교 방식이란, $T_1 = t^* - t_1$ 과 $T_2 = t_3 - t^*$ 를 비교하는 방식이다. 여기서 t^* 는 t_1 과 t_2 사이에서 Arc 전류가 최저치가 되는 시간을 의미한다. 그림 3.4.5.7에서 보는 바와 같이 T_1 이 T_2 보다 크면, Torch 중심이 왼쪽으로 치우쳤다고 판별하게 된다. 주파수 분석 방식은 Torch 중심점이 한 쪽으로 치우친 경우에는 f_0 와 $2f_0$ 의 성분이 동시에 검출되고, Torch 중심이 용접선 위에 있는 경우에는 $2f_0$ 성분만이 검출됨을 이용하여 용접 Torch 의 치우침을 찾아내는 방식이다. 기준치 비교 방식은 t_1, t_2, t_3 에서의 기준 전류치 i_1, i_2, i_3 와 순시 전류치 i_1, i_2, i_3 를 비교하여 분석하는 방법이다. 표 3.4.5.2 에서 각각의 방식을 비교 분석하였다.

표 3.4.5.2 Torch Shift 판별 방식 비교

방식	판단 factor	판단방법	특징
(i)적분 방식	$I_1 = \int_{t_1}^{t_2} i(t)dt$ $I_2 = \int_{t_2}^{t_3} i(t)dt$,	$I_1 = I_2$: No Shift $I_1 > I_2$: Shift to Left $I_1 < I_2$: Shift to Right	비교적 간단하고, 치우친 정도 판단이 가능하다.
(ii)미분 방식	$D_2 = \frac{di}{dt}(t_2)$	$D_2 = 0$: No Shift $D_2 < 0$: Shift to Left $D_2 > 0$: Shift to Right	판단시간은 빠르나, 치우친 정도는 판단 불가
(iii)첨두치 방식	$i_1 = i(t_1), i_3 = i(t_3)$	$i_1 = i_3$: No Shift $i_1 > i_3$: Shift to Left $i_1 < i_3$: Shift to Right	간단하나, 판단 오차 가능성이 높다.
(iv)시간 비교 방식	$T_1 = t^* - t_1$ $T_2 = t_3 - t^*$,	$T_1 = T_2$: No Shift $T_1 > T_2$: Shift to Left $T_1 < T_2$: Shift to Right	최저점을 찾아내야 한다.
(v)주파수 분석 방식	f_0 . Weaving Frequency	only $2f_0$: No Shift f_0 and $2f_0$: Shift	판단시간이 길다.
(vi)기준치 비교 방식	기준전류치 i_1, i_2, i_3 와 $i_1 = i(t_1), i_2 = i(t_2), i_3 = i(t_3)$	$i_1 = i_1$: No Shift $i_1 \neq i_1$: Shift	기준치를 미리 알아야 하는 단점이 있다.

(2) 철판용접에의 적용

그림 3.4.5.8에서 보는 바와 같이 H-Beam의 접합부는 Vertical 용접이면서 Half-V Groove 형태이다. 용접방식은 철판용접 현장에서 현재 행하여지는 FCAW(Flux Cored Arc Welding) 방식을 채택하였다. 아크센서에서 사용된 방식은 위에서 소개된 방식 중에서 비교적 안정적인 적분 방식을 이용하여 Arc Sensor를 개발하였다. 용접기에서 나오는 출력 전류는 불안정한 Spatter등으로 인하여 Filtering을 하여줄 필요성이 있으므로, 사용자가 지정한 범위만큼 Median 또는 Average Filter를 지정하여 사용할 수 있도록 하였다.

개발된 Arc Sensor는 용접 Torch 가 Weaving 방향 및 Normal 방향(그림 3.38 참조)상에서 용접선 위에 적당히 위치되도록 하는 능력을 가지고 있다. 또한, 직선 보간과 원호 보간에서 모두 적용이 가능하다. Arc Sensor에서 사용되는 파라메타를 표 3.4.5.3에 정리하였다. Correction Size란 용접토치를 보정하는 경우에 1번 보정당 이동하는 거리를 의미하며, Sensitivity는 보정이 발생하는 데 필요한 최소량을 지정하는 데에 이용된다. 따라서 Sensitivity를 큰 값으로 지정하면 변화가 자주 발생하지 않게 되어 Arc Sensor의 감도를 낮추는 효과를 가지게 된다. Compensation Size와 Sensitivity는 모두 위빙방향과 직각방향 각각에 대해서 별도로 지정이 가능하다.

Weaving Direction Change는 용접선이 틀어진 경우 위빙방향을 새로이 찾은 용접선에 대해서 직각인 방향으로 변경할 것인지 또는 원래 지정된 방향으로 유지할 것인지를 지정하는 것이다. 위빙 방향이 용접선에 대해서 직각을 유지하는 것이 용접품질에 중요한 영향을 주는 경우에는 1로 선택하게 된다. Welding Distance Compensation은 용접선의 틀어짐으로 인하여 용접선의 직선거리가 단축된 경우에 이를 반영하여 용접을 미리 끝마칠지의 여부를 지정하게 된다.

자동용접 시에 용접 대상물의 위치가 바르게 놓여 있지 않은 경우가 많이 있다. Arc Sensor는 효과적으로 이러한 위치의 부정확성을 보상하여 줄 수 있다. 본 Arc Sensor는 기존의 로봇 제어기 내에 Software 형태로 개발이 되었으므로 외부 Processing Unit(보통, PC)를 별도로 필요치 않는다.

일반적으로 Arc Sensor는 Root pass를 추적하는 데에는 효과적이지만, 철판주 용접과 같은 후판 용접에서 요구되는 Multi-pass에서는 사용하기가 어렵다. 물론, root pass에서 얻은 정보를 사용하여 위치 틀어짐을 어느 정도 보상할 수는 있겠으나, 이에 대한 추가 연구가 3차 년도에 진행될 예정이다.

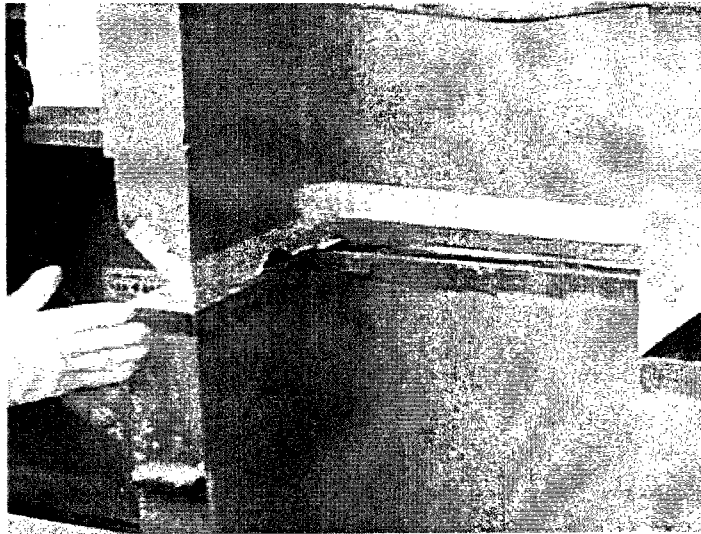


그림 3.4.5.8 대표적인 철골빔 조인트 형상

표 3.4.5.3 Arc Sensor Parameter

Correction size in weaving direction	Correction size in normal direction
Sensitivity in weaving direction	Sensitivity in normal direction
Median filter	Average filter
Weaving direction change	Welding distance compensation

다. Multi-pass 용접 기능 구현

용접 작업의 경우, 본 연구에서는 건설 현장에서 사용되는 철골주를 대상으로 하고 있다. 따라서, 용접 대상물이 30mm이상의 후판으로 되어 있으며, 다양한 종류의 두께와 개선각을 갖게 된다. 이에 Multi-pass를 거쳐 용접이 이루어져야 하며, 용접대상물의 두께와 개선각에 따라 자동적으로 Multi-pass를 생성하는 기능을 구현하였다. 이렇게 자동 생성된 Multi-pass의 위치 및 토치 접근각은 미세 조정을 통하여 실제 용접 작업에 적용시킬 수 있도록 하였다. 이를 위하여 상위 제어기와의 RS 232C Macro Command 통신을 통해 각 Layer 구간에서의 용접 Data를 변경 적용할 수 있도록 하였으며, Root path로부터 각

Layer를 상대적인 Offset으로 설정하여 구현하도록 하였다. 또한, Arc Sensor Tracking 기능을 이용할 경우, Root path에서의 Tracking data를 나머지 Layer에서도 반영 적용할 수 있도록 하였다.

우선 시험적으로 두께 30mm, 개섩각 45도의 후판으로 시험 시편을 만들어 옆보기 용접을 수행하였다. 실제 건설 현장의 철골주는 Half-V Groove 형태로 Multi-pass 용접이 요구되며, 특히, 용접대상물의 두께가 증가함에 따라서 요구되는 용접 Pass의 수가 크게 증가된다. 숙련공에 의한 반자동 용접의 경우에는 용접 결과에 따라서 Pass수를 조정하게 되나, 본 연구에서는 용접 대상 부재에 따라 pass가 자동 계산되도록 기능을 구현하였다. 용접성 시험을 위하여 모재의 두께를 30mm, GAP을 2mm로 하고 용접을 진행하였으며, 용접은 FCAW(Flux Cored Arc Welding)을 시행하였다. 이때, 용접 Torch 접근각, 전류 등의 값을 적당히 하지 않으면 흘러내림 현상 발생하게 되며, 이러한 기초 데이터를 기준으로 하여 용접 파라메타를 자동으로 조정하는 기능을 구현하였다. 표 3.4.5.4은 시험 시편에 대해 실시한 용접 조건을 보여준다.

그림 3.4.5.9은 시험 부재에 대해 생성된 Multi-pass data 정보를 그림으로 나타낸 것으로, 모두 6개의 Layer로 19개의 pass가 필요함을 보여주고 있다. 그림 3.4.5.10은 이러한 조건으로 실부재에 용접 작업을 구현하는 장면을 보여주며, 그림 3.4.5.11은 용접작업이 이루어진 부재의 사진을 나타낸다.

㉔ 3.4.5.4 Multi-pass Welding Condition (Half-V Groove)

Plate thickness: 30mm, Bevel Angle: 45°, Root Gap: 2mm

Pass No.	Torch angle [deg]	Welding condition			Carter condition		
		Voltage [V]	Current [A]	Speed [m/s]	Voltage [V]	Current [A]	Time [sec]
1	40	26	165	4	28	180	1.5
2	15	27	170	4	28	180	1.5
3	40	27	170	4	28	180	1.5
4	30	27	170	4	28	180	1.5
5	15	27	170	4	28	180	1.5
6	40	27	170	4	28	180	1.5
7	40	27	170	4	28	180	1.5
8	40	27	170	4	28	180	1.5
9	30	27	170	4	28	180	1.5
10	40	27	170	4	28	180	1.5
11	40	27	170	4	28	180	1.5
12	40	27	170	4	28	180	1.5
13	15	27	170	4	28	180	1.5
14	40	27	170	4	28	180	1.5
15	40	27	170	4	28	180	1.5
16	40	27	170	4	28	180	1.5
17	40	27	170	4	28	180	1.5
18	15	27	170	4	28	180	1.5
19	15	27	170	4	28	180	1.5

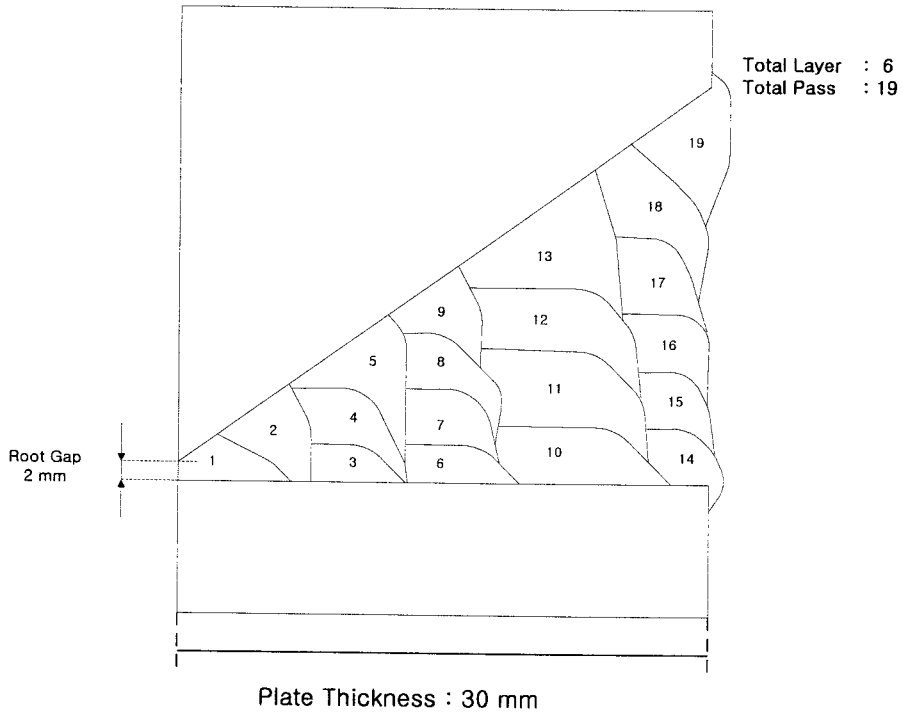


그림 3.4.5.9 생성된 Multi-pass

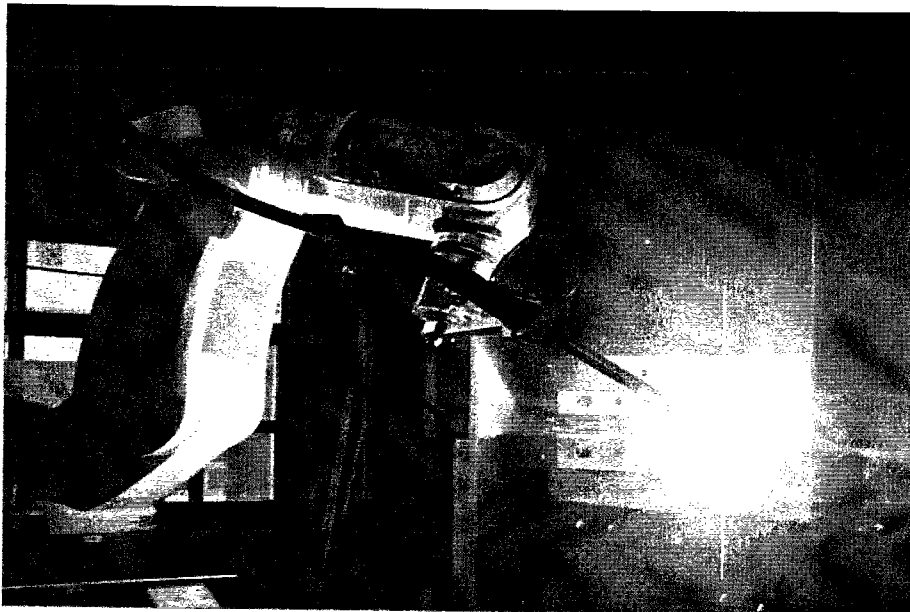


그림 3.4.5.10 Multi-pass 용접 시험 장면

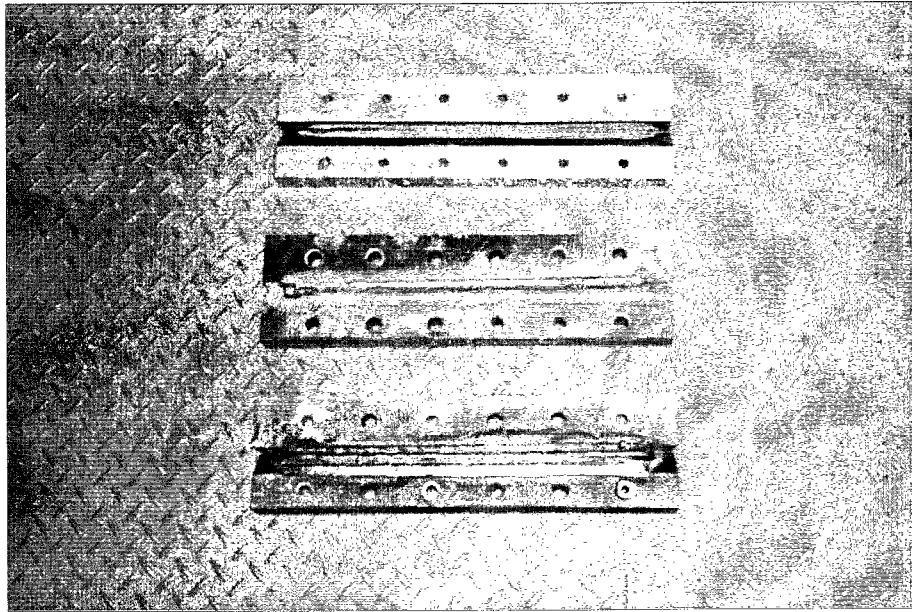


그림 3.4.5.11 Multi-pass 용접을 수행한 시편들

라. 용접 품질 시험

Multi-pass 용접 시험한 시편을 한밭대학교 용접공학센터에 의뢰하여 평가를 수행하였다. 1차 시편은 Multi-pass의 가능성만을 타진한 시편으로서, 매 pass마다 cooling을 수행한 결과와 Root pass부터 끝까지 cooling 과정없이 시험한 시편 2가지에 대해서 용접부위 단면 시험 평가를 수행하였다.

그림 3.4.5.12은 용접부 단면을 관찰하기 위한 시료채취 위치를 나타내고 있다.

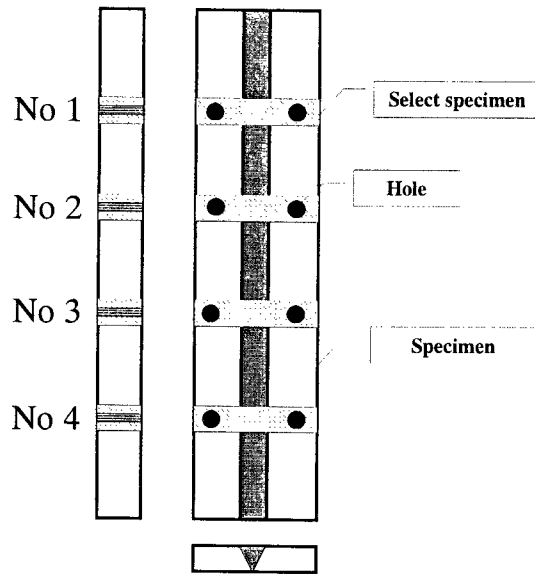


그림 3.4.5.12 용접부 단면을 관찰하기 위한 시료채취 위치

그림 3.4.5.13, 3.4.5.14은 각 금속 조직의 사진을 보여주는 것으로서, 그림 3.2는 매 pass마다 일정 시간 cooling을 수행하면서 Multi-pass 용접을 수행한 시편의 상태를, 그림 3.3은 Root pass부터 끝까지 한번에 용접을 수행한 시편의 단면 상태를 나타낸다. 이에 대한 상세한 설명은 4×4 행렬처럼 라벨링하여 설명하기로 한다.

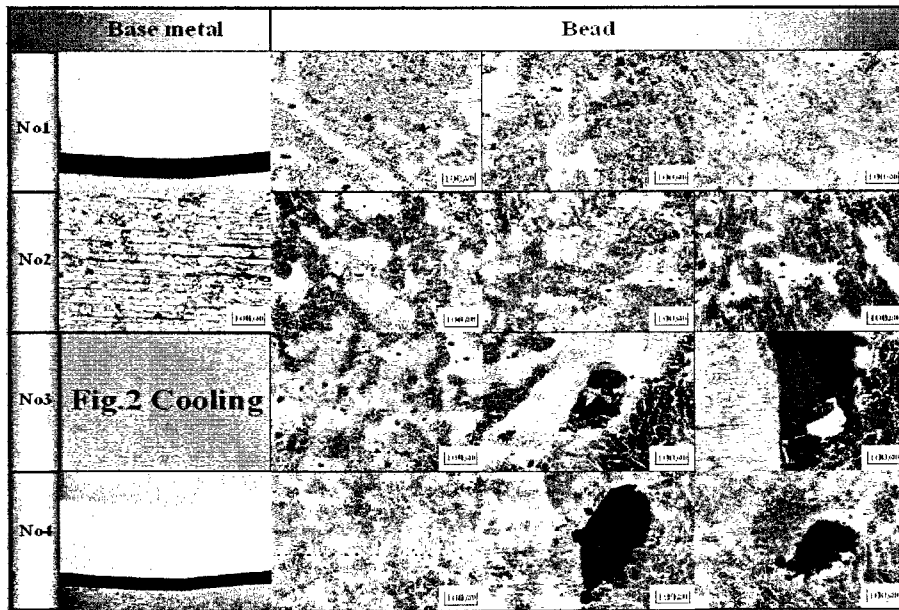


그림 3.4.5.13 Cooling 시편의 단면 검사 표면

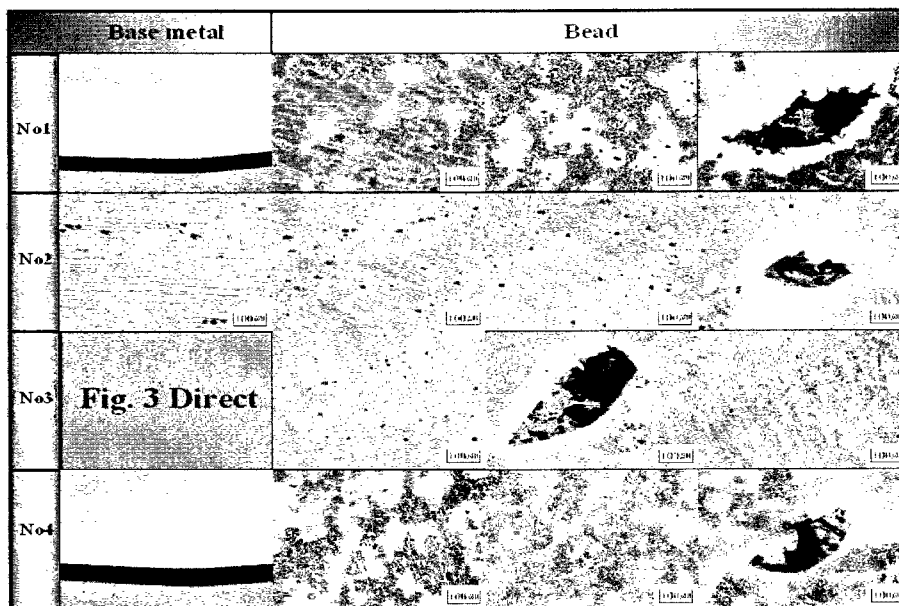


그림 3.4.5.14 direct 시편의 단면 검사 표면

Fig31은 시험 시편 두 종류를 Cooling과 Direct로 구분한 것이며, Fig21은 모재(원래철강시편)의 금속조직을 나타낸다. Fig11과 Fig41은 용접부 단면을 macro하게 나타내는 것으로 4개의 sampling 중 두개를 골라 실은 것이다. Fig12, Fig22, Fig32, Fig42는 대략적으로 용접부의 윗부분에서 촬영된 것이고, Fig13, Fig23, Fig33, Fig 43은 대략 아랫 부분에서 촬영된 것이다. Fig14, Fig24, Fig34, Fig44는 특색있는 부분(예: slag 혼입결함부위, Fusion HAZ 경계부) 등을 촬영한 것이다. 모재는 (Fig 21) 대략 ferrite가 압연된 전형적인 연강조직을 나타내고 있으며 약간의 기공(porosity)으로 관찰되는 검은 점들이 보인다. 용접부는 기공들이 훨씬 많이 관찰되고 있으며 그 이유는 가스 shielding의 적합하지 못함 또는 적정용접조건이 아닌데 기인할 수 있다고 판단된다. 검은 점이 크게 배열된 사진 (cooling 사진의 경우 Fig33, Fig43, Fig34, Fig44 그리고 direct 사진의 경우 Fig33, Fig14, Fig24, Fig44)은 slag가 묻혀있는 것으로 판단되며, 기타 direct의 경우 Fig34와 cooling의 경우 Fig14는 용착 금속과 모재의 경계부를 나타내고 있다. 용접부 조직은 ferrite 조직내에 원래 austenite 입계상의 입계 ferrite가 존재함을 관찰할 수 있으며, 조대한 침상(acicular) ferrite를 가진 입계 ferrite로부터 성장한 widmannstatten 조직을 관찰할 수 있다. 또한, 이러한 조직들 외에 banite와 ferrite-carbide 응집물이 함유된 것으로 보이는 martensite 용접부 조직을 이루고 있음을 관찰할 수 있다.

1차 시험 시편의 검사 결과 그렇게 만족할만한 결과를 보이지는 못했다. 그러나, 이것은 Multi-pass의 가능성만을 타진한 시험 시편의 결과이며, 다양하게 용접 조건을 변경시키면서 시험을 수행한다면 우수한 품질의 용접 상태를 얻을 수 있을 것이다.

6. 연구 성과

본 연구를 수행하면서 얻어진 연구 결과를 이용하여 특허 등록 1건, 특허 출원 5건을 하였으며, 현재 2건이 출원 예정 중에 있다. 논문발표 실적으로는 국내 논문집에 2편이 게재되었으며, 1편이 게재 확정되었다. 또한, 국제학술대회에 1편, 국내학술대회에 2편의 논문 발표 실적이 있으며, 국내 업체에 용접용 로봇 시스템과 관련하여 기술을 이전하였다.

연구 성과		내 용				
구 분	명 칭	국 명	출원일	등록일	비 고	
						특허출원 · 실용신안 · 의장 · 규격 등
논문 발표	명 칭	저널·학회명	발표일	비 고		
	수직철골 용접용 로봇의 설계 및 제작	한국정밀공학회 춘계학술대회	2000. 5. 12			
	건설용 서비스 로봇 -수직철골 용접로봇 개발-	한국정밀공학회 논문집	2000년 9월 제17권 제9호			
	탄성지지부를 갖는 용접로봇 시스템의 제어	한국정밀공학회 추계학술대회	2000. 10			
	근사 자코비안 연산자를 이용한 경량 매니퓰레이터의 시각서보 제어	제어,자동화,시스템 공학회 논문집	2000년 12월 제6권 12호			
	Development of Tracking Algorithms for Robotic H-Beam Welding System at Construction Site	ISR 2001	2001. 4. 19~21			
	근사 자코비안 연산자를 이용한 탄성 지지부를 갖는 로봇 시스템의 제어	한국정밀공학회 논문집	2001년 10월 제18권 10호 게재확정			
기술이전실적 등	명 칭	수요기관	이전기간	비 고		
	용접용 로봇시스템 이관 (제어기 통신)	IRAM(주) G.E.T	99.8.9~00.11.30 00.6.5~00.9.30	H/W, S/W		

여 백

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단

서비스 로봇 기술개발 사업단에 제시된 사업내용 및 목표는 다음 3개 분야로 요약되며 각 분야에 대한 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도는 아래와 같다.

1. 사업 총괄관리 및 세부과제 진행관리는 사업의 원활한 진행과 국내외 기술환경 변화에 따른 연구방향의 조향 및 세부과제의 진행관리로 이루어져 있으며 그 결과는 차기년도 연구계획 및 사업 자원의 배분에 반영된다. 본 분야를 위하여 각 세부과제의 진행이 모니터링 되었으며 당해연도 연구목표의 달성여부와 새로운 기술환경의 변화를 고려하여 차기년도 연구계획에 반영하였다. 사업단의 사업총괄 및 수행관리 결과는 각 세부과제에 충분히 기여하였으며 목표에 달성하였다고 판단된다.
2. 서비스로봇 국내외 기술 현황분석은 국내 분석은 로봇 연구조합, 특허청 등의 현황자료를 기초로 하여 조사되었으며 해외 현황은 IARP(International Advanced Robotics Programme)에 참석하여 country report를 교환하고 Web Search를 통하여 세계 각국 정부 및 주요 연구기관의 연구활동을 조사하고 기술개발 결과를 모니터링 하였다. 국내외 기술현황분석은 서비스로봇 기술개발 사업과 관련된 국내외 기술 현황을 대부분 망라하고 있고 이를 기초로 본 사업의 방향에 기여를 하였으므로 기여도와 목표 달성도가 충분히 이루어졌다고 판단된다.
3. 서비스로봇 기술개발사업의 정보공유와 연구자원의 효율적 활용을 위하여 예정된 워크숍을 개최하고 Special Interest Group을 구성 운영을 하여 서비스로봇 사업추진에 기여하였으므로 목표달성과 기여도가 충분하다고 판단된다.

제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

목 표	달성도	내 용
힘센서를 장착한 3 손가락 로봇손개발	100%	<ul style="list-style-type: none"> - 압력 센싱을 위한 sensing 장치의 개발 및 finger tip 에의 성공적인 장착, 작동 압력의 위치 및 크기를 추정할 수 있는 sensor의 개발, - 검지와 중지 사이의 상대운동을 가능하게 하는 새로운 형태의 hand 제작 완료, PSR platform에 통합시험 완료.
manipulation 기능	100%	6축 arm을 이용한 sensor based motion planning 기법, 비전센서와 로봇 운동을 이용하여 대상 물체의 집기, 놓기 작업 구현.
전방향 이동부의 개발	100%	자중 100 Kg, payload 30 Kg, 안정 최고 속도 0.3m/sec, Omni-directional mobile base 의 성공적 개발, 견인 mobile robot의 path를 성공적으로 추종하는 trailer system의 개발
자율 주행 기능 구현	100%	초음파, 레이저, 적외선, 자이로, 차륜 엔코더 등을 이용하여 자기 위치 추정 및 장애물 감지를 수행하여 목표지점까지 안전하게 자율 주행 기능을 구현함.
대형 건물 내에서 서류 등의 전달기능을 구체적인 내용으로 설정한 demo	100%	hand를 장착한 manipulator를 이용한 서류 box의 mobile robot으로의 전달기능 및 예상치 않은 장애물이 있는 상황에서의 potential field 이론에 근거한 sensor 를 이용한 collision avoidance 기능, wall following 기능의 demo

2. 이동형 정보서비스로봇 개발

가. 목표 달성도

목 표	달성도	내 용
Robot system 개발	100%	<ul style="list-style-type: none"> - Bi-directional mechanism 채택 및 문턱극복 가능 시스템 구현 (1차버전) - 0.5m/sec의 주행 속도 구현 - 200*400*200 크기의 구현 (1차버전) - compact mobile manipulator 구현
자율 주행기술 개발	95%	<ul style="list-style-type: none"> - stereo vision을 이용한 hybrid type의 map 구현 - Condensation algorithm에 바탕을 둔 localization 알고리즘 구현 - Bezier curve를 이용한 path generation 알고리즘 구현 - Laser slit과 열가형 CCD camera를 이용한 장애물 검지 시스템 구현 - 다양한 환경에서의 실험 진행 중
얼굴 인식 시스템 개발	90%	<ul style="list-style-type: none"> - Wavelet + Probabilistic PCA에 기반한 face detection and recognition 알고리즘 구현 (2 종류 개발) - 인식율을 높이는 방안 추가 연구 진행중 (현 인식율 80%/10인) - robot 시스템에 통합 구현
음성인식에 의한 task generation 기술 개발	100%	<ul style="list-style-type: none"> - 음원 방향 검출 시스템 개발 구현 - 음성인식 시스템의 robot system에 통합 구현 - 음성인식에 의한 human-robot interface 및 그에 따른 task generation 을 system software에서 통합 구현
Internet 기반 원격제어 시스템 개발	95%	<ul style="list-style-type: none"> - robot을 server로 하고 사용자를 client로 하는 원격제어 시스템 구현 - TCP/IP와 ActiveX를 활용하여 Web 방식의 로봇 원격제어 구현 - 신뢰성있는 영상 전송 방안 실험 진행중

나. 기여도

(1) 기술 발전적 측면

- 소형의 mobile robot의 설계 능력 향상
- mobile manipulator의 compliance control 기법의 기술력 심화

- 소형화를 위한 Hardware module (CAN 통신, stereo camera)의 개발에 따른 기술 표준화 유도
- 통합화된 visual navigation 기술의 획득
- robot의intelligence를 높이기 위한 고도의 sensing modality (face recognition, obstacle detection, 음성 인식 통합)의 기술력 심화

(2) 경제적 측면

- 참여기업과의 적극적 참여 유도로 산업계의 기술력 증가
- 개발된 hardware 및 software의 상업화 유도 가능
- 소형 로봇의 저변확대와 그에 따른 시장 생성의 동인 마련

3. 형상적응형 universal hand 개발

본 연구는 참여 기업인 현대 자동차와의 긴밀한 협의 하에 시초부터 철저히 현장 적용을 목표로 추진되어 왔다. 따라서 현장에서 요구되는 크기, 중량, 강도, 최소 높이, 형상 적용 속도, 제작비, 보전성 등의 까다로운 제한 조건들이 설계 때부터 반영되었으며 그 조건들을 만족하는 최선의 유연 그립퍼를 개발하고자 노력을 경주한 결과, 최종적으로 채택된 모델이, 다른 제한 조건들은 물론 가장 어려웠던 조건이며 서로 trade-off 관계에 있는 저 중량과 고강도 조건을 적절하게 동시에 만족하였으므로 당초 연구 목표를 훌륭히 달성한 것이며 향후 현장 적용 가능성이 높은 것으로 사료된다.

연구의 특성상 응용 범위가 넓다고 볼 수는 없기에 관련 분야의 기술 발전에의 기여도를 평가하기 어려우나, 자동차 회사의 생산성 및 관리 효율에 직접 연관된 연구 주제이며 관련 업계에서 최초로 현장 적용에 성공하게 되면 기존 자동차 회사들에 끼칠 파급 효과가 막대하므로 이와 유사한 후속 연구들이 이어지리라 전망된다. 한편, 본 연구 중에 고려되고 제안되었던 다양한 방법들을 바탕으로, 상대적으로 요구 조건이 까다롭지 않은 다른 분야에서 쓰이는 장치들은 수월하게 개발될 수 있으리라 기대된다.

제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현

표 4.3.1.1. 인간 친화형 소프트 로봇 팔의 연구개발목표 달성도

목표	달성도(%)	내용
소프트 로봇 팔을 이용한 13개 작업 구현 및 2차 시제품 제작 (3차년도)	100	<ul style="list-style-type: none"> •소프트 로봇 팔을 이용한 능동 compliance 제어 <ul style="list-style-type: none"> - 로봇의 접촉 힘 측정 성능(최소 감지 가능한 토크)을 파악하여 1차 버전의 경우 1축 0.4Nm, 2축 1.2Nm, 3축 0.4Nm로서 2축의 모터 자체의 마찰이 큰 것을 확인하여 이를 개선하기 위해서 2축의 모터를 교체함. 각 축의 최소 감지 토크가 0.3Nm 이하로 개선이 되었음 - 각 축의 tension조절 장치를 설계 및 제작하여, 케이블 매커니즘의 단점을 보완, 각 축의 최소 감지 토크가 줄어드는데도 영향을 줌 (특히 출원 준비 중) - 접촉 감지 기법의 제안으로 미리 정의된 작업의 경우에는 접촉이 일어날 것으로 예상되는 구간에서만 효율적으로 compliance 제어 실행 가능함 - 접촉 후 토크 센서 없는 능동 컴플라이언스 제어(TDC based Impedance Control)을 수행함으로써 장애인의 안전성 보장이 가능한 것으로 판단됨 •정의된 13가지 작업의 수행 <ul style="list-style-type: none"> - 저주파 필터의 사용과 D/A converter의 문제를 해결하여 1차 시제품의 제어 성능 개선, - 13가지 작업의 구현 실험을 통하여 설계된 로봇 팔이 실제 작업 수행이 가능함을 확인 - 장애인들에게 직접 전시하여 평가를 받고 작업에 대한 조언을 feedback 받음, feedback 된 자료들은 앞으로의 기술 개발에 중요한 지표가 될 것으로 판단됨. •개선된 2차 시제품의 설계 및 제안 <ul style="list-style-type: none"> - 효율적인 장력 조절 mechanism을 개발함, 경제성을 고려한 worm 기어의 선정으로 저렴하면서도 효율적인 mechanism 설계 및 제작 - 장력 조절 장치를 이용한 손목축 및 1,2,3축 관절부의 재설계 및 제작 - Visual servoing이 원활하도록 링크 길이를 재설정하고, 무게를 줄이기 위한 링크부 재설계 및 제작
사용자의 안전성을 고려한 소프트 로봇 팔의 개발 (4차년도)	100	<ul style="list-style-type: none"> •13가지 작업의 통합 구현 및 작업 확장. <ul style="list-style-type: none"> - 13가지 작업의 하위 작업별 분석에 따른 분류를 통하여 물 마시기 작업이 다른 모든 작업을 포함함을 확인 - 물 마시기 작업의 통합 구현으로 로봇 팔과 user interface(Eye Mouse, Haptic Suit, EMG, Visual Servoing)이 모두 통합된 시스템 구축이 잘 되었다고 판단됨 - 국립 재활원에서의 임상 실험을 통하여 장애인들에게 구현된 작업을 보여주고 평가를 얻음, 평가자료는 앞으로의 시스템 개발에 중요한 지표로 사용될 수 있을 것으로 판단됨. - 현재 설계된 로봇 팔을 이용하여 앞으로 실현이 가능 할 것으로 예상되는 추가 작업의 선정. 이는 앞으로 있을 수 있는 장애인 관련 연구에서 목표로 삼을 수 있다고 판단됨 •사용자의 안전성 개선을 위한 능동 컴플라이언스 제어 기법의 구현. <ul style="list-style-type: none"> - 장애인이 다치지 않을 정도의 접촉힘(1N 이하)의 감지가 가능함 - 접촉 상태에서 안전하게 작업을 수행할 수 있는 강인한 임피던스 제어 기법(TDC based Impedance Control)을 구현하여 면도 작업에 직접 응용하여 제어 기법의 우수성 검증 - 국립 재활원에서의 장애인 대상 임상 실험을 통한 장애인들이 원하는 compliance 크기 선정, 인간과 접촉하는 작업을 하는 로봇에 있어서 중요한 연구 결과로 판단됨 •사용자의 안전성을 고려한 로봇 팔의 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 장애인들로부터 로봇 외관, 색상, 구조 등에 대한 평가를 얻음 - 평가에 기초한 로봇 외관의 시각적 디자인 개념 도출 - 접촉 센서 부착 위치 선정을 위한 장애인들의 움직임 범위 선정 - 13가지 작업 분석을 통한 접촉 센서의 부착 위치 선정

2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

가. 주위환경에 적응하며 인간 친화적인 Visual Servoing 기술

표 4.3.2.1. Visual Servoing의 연구개발목표 달성도.

목표	달성도(%)	내용
Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇팔 제어 (3차년도)	100	<ul style="list-style-type: none"> • Visual Servoing의 정의된 작업에 대한 성공률, 주위의 환경에 대처 가능성 및 인간과의 협동 작업의 효율성 <ul style="list-style-type: none"> - 강인한 얼굴 위치 추정 및 요소 추출 방법을 통해 주위 환경에 대한 대처 가능성을 충분히 확보한 것으로 판단됨. - 긍정/부정에 대한 의도 파악 기능 및 7가지 표정에 대한 인식 가능성을 부여하여 인간과의 협동 작업에 있어 상당한 효율성을 부여한 것으로 판단됨. - 근거리 측정용도와 Gripper에 장착을 위한 소형 PSD 모듈의 제작 및 Force 센서를 사용하여 물체를 안전하게 잡기에 대한 성공률을 77.5% 확보 및 인간-로봇 공동작업에 의한 GUI를 개발하여 성공률을 80%로 향상 시켜 센서 퓨전 및 인간-로봇 공동작업에 대한 기본 기술을 확보함. • 카메라 헤드의 독창성, 우수성 및 제품화 가능성 <ul style="list-style-type: none"> - 케이블을 이용한 텐던구동 구조를 이용하여 독창적인 카메라 헤드를 설계함(특허출원, 2000-85816) - 백래시를 현격히 줄임으로써 상용의 카메라 헤드 성능으로써 충분하다고 판단됨 - 크기 및 중량면에서 아이-인-핸드 구조에 적용이 가능한 카메라 헤드로 판단됨. • Visual Servoing기술이 통합된 시스템의 완성도 및 가능성 <ul style="list-style-type: none"> - Fuzzy Decision Maker를 이용하여 적절한 영상정보를 상황에 맞게 선택하여 효율적인 실시간 처리가 가능하게 하였고, 그 예로 입 근처로 로봇 팔이 접근하는 작업을 Image-based Visual Servoing 기법을 이용하여 구현 함. - 사용자 의도 파악, 센서 퓨전 기법을 이용한 인간-로봇 협동 작업등을 통하여 Visual Servoing 시스템에 함께 적용함으로써 시스템의 완성도 및 가능성을 향상 시킨 것으로 판단됨.
Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇팔 제어 성능 개선 (4차년도)	100	<ul style="list-style-type: none"> • 센서융합을 통한 Visual Servoing 기술의 성공률 향상 및 인간-로봇 공동 작업에 의한 시스템 성능 향상 여부. <ul style="list-style-type: none"> - 센서 융합 기술 및 인간 로봇 공동 작업의 개념을 도입하여 사무실 환경에서 작업 성공률 90% 확보 - 인간 로봇 공동 작업 및 퍼지 순응 제어 기법을 통한 사용자 안전성 확보 및 작업 성공률 증가 • 표정 인식률의 향상 및 표정 인식을 통한 의도 파악에 의한 사용자 안전성(Safety) 확보 여부. <ul style="list-style-type: none"> - 퍼지 신경망에 의한 개선된 인식기 구성을 통한 인식률 향상(81.2% → 92.7%). - 사용자-로봇 상호작용에의 응용을 통한 비접촉형 인터페이스로써의 안전성 확보. • 장애인과의 임상 실험을 통한 시스템에 대한 만족도 및 개선 사항 반영 여부 <ul style="list-style-type: none"> - 임상 실험을 통한 카메라 헤드의 외관, 개발된 물체 인식/얼굴 인식 기능에 대한 긍정적 평가 획득. - 인간 친밀형 카메라 헤드 구현을 위한 신형 그리퍼 제작. • 스테레오 카메라 헤드의 제어를 위한 소형 제어기의 상품화 가능성. <ul style="list-style-type: none"> - MCDC2805 모델을 사용하여 카메라 헤드 제어기(124mm*148mm*47mm) 모듈을 제작, 이와 카메라 헤드 시스템과 연동. 24V/5A 전력 공급/ASCII 커맨드를 통한 카메라 헤드의 속도/위치 제어 가능.

제안서 상에 제안된 연구 성과 이외에도, 아이-인-핸드 구조를 위한 경량/소형화 스테레오 카메라 헤드의 제작 및 공간변화비전의 하드웨어 구현을 위한 어안렌즈 등은 본

연구에서 개발된 시스템들의 상품화 가치를 상승시키는 요인이 될 것으로 보이며, 개발된 로봇팔이 수행하게 될 여러 가지 정의된 작업들에 대하여 근간이 되는 시나리오를 설정하고 연구결과들의 효과적인 배합을 통해 연구개발목표의 달성도를 검증하였다.

나. 로봇 팔 제어 알고리즘을 위한 생체 신호(EMG) 분류 기술

표 4.3.1.2. 생체신호(Biosignal)의 연구개발목표 달성도.

목표	달성도(%)	내용
Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇팔 제어 (3차년도)	100	<ul style="list-style-type: none"> • 비례 제어 기법을 이용한 근전도 로봇 팔 제어기의 성능, 우수성 및 로봇 팔 제어의 편의성 <ul style="list-style-type: none"> - 비례 제어를 위한 힘 정보 추출을 위해 Blind Separation분야에서 최근 각광받고 있는 ICA 기법을 이용하여 기존의 여러 다른 방법들에 비해 아주 정확하게 힘 정보를 추출하여 사용자가 보다 자연스럽게 로봇 팔을 제어할 수 있어 사용자의 편의성을 향상시킨 것으로 판단됨. - 연속적인 로봇 팔 제어를 위해 로봇 팔 제어의 지연시간(Delay Time)을 최소화하면서 기본 동작의 분류 성공률을 유지하기 위한 최적의 시간을 실험적으로 결정, 적용하여 사용자의 로봇 팔 제어의 편의성을 향상시킨 것으로 판단됨. • RF기능이 추가된 생체신호 증폭기의 우수성 및 제품화 가능성 <ul style="list-style-type: none"> - 저가, 소형, 고성능의 Wireless EMG AMP를 개발하여 추후 모듈화를 통한 상품화가 기대됨. - 중증 척수 장애인을 위한 저가, 소형, 고성능의 휠체어 조이스틱 제어기를 개발하여 추후 상품화가 기대됨.
Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇팔 제어 성능 개선 (4차년도)	100	<ul style="list-style-type: none"> • 생체 신호 기반 6자유도 로봇 팔 제어 알고리즘의 우수성 및 로봇 팔 제어의 편의성 <ul style="list-style-type: none"> - 기존의 입력 장치가 가지는 저자유도로 인한 사용상의 불편함을 줄이기 위해 중증 척수 손상 환자들의 어깨와 팔의 움직임으로부터 12가지 동작(6자유도)을 정의하고, 근전도 신호를 측정하여 높은 성공률(85%)로 분류하여 사용자의 편의성을 향상시킨 것으로 판단됨. - 비례 제어 기법을 도입하여 사용자가 보다 자연스럽게 로봇 팔을 제어할 수 있도록 하여 사용자의 편의성을 향상시킨 것으로 판단됨. - 연속적인 로봇 팔 제어를 위해 짧은 시간(128msec)동안의 데이터를 이용하여 높은 성공률을 얻어 분류 지연으로 인한 사용자의 불편함을 최소화 하였음. - 대상 사용자들이 비장애인에 비해 위급한 상황을 처리하는 능력이 현저히 떨어지는 점을 보완하기 위해 근전도 신호를 측정, 위급한 상황을 감지, 위급한 상황일 경우 긴급정지 스위치를 구동시켜 사용자의 안전성을 증대시킨 것으로 판단됨. • 무선 생체 신호 증폭기의 우수성 및 상품화 가능성 <ul style="list-style-type: none"> - 개발된 무선 생체 신호 증폭기는 소형(110×110×20 (mm)), 저가, 고성능으로 제작되어 상품화 가능성을 확보했다고 판단됨. - 개발된 무선 생체 신호 증폭기 주요 스펙은 다음과 같음.- 증폭도: 1500V/V, 입력 채널 수: 4개, Pass Band: 20~500Hz- FM module을 이용한 RF 기능, 송수신 성공률: 90%- 통신 에러 최소화를 위한 packet 통신 • 2자유도 휠체어 인터페이스의 우수성 및 안전성 <ul style="list-style-type: none"> - 개발된 2자유도 휠체어 인터페이스는 사용자의 목의 움직임 혹은 어깨의 움직임에서 얻어지는 근전도 신호를 이용하여 휠체어를 사용자가 원하는 방향으로 제어할 수 있어 사용자 편의성을 향상시킨 것으로 판단됨. - 척수 손상 장애인과의 임상실험을 통해 얻어진 평가를 바탕으로 (전극 부착시 편의성, 후진 기능 포함 등)으로 추후 개선시 제품화 가능성이 충분한 것으로 판단됨.

3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발

개발한 시스템의 달성도를 표 4.2.3.1에 실었다. 3차 년도에는 개발한 Eye-mouse의 활용도를 검증하기 위해 주변 기기에 작업의 종류나 원하는 물체의 위치 등의 작업 명령을 전송하는 인터페이스를 만들어서 실험을 하여 그 가능성을 확보하였다. 또한 1,2차 년도의 비장착형의 Eye-mouse의 알고리즘을 개선하기 위해 많은 조사와 연구 끝에 새로운 알고리즘을 개발하여 구체적으로 구현하여 그 성능을 확인하였다. 장착형 Eye-mouse의 경우는 앞서 개발한 홍채 경계 기반 방법의 정밀도의 한계를 극복하기 위해 동공추출 알고리즘을 개발하여 시선방향 검출의 정밀도를 향상시켰다. 3차원 위치 정보 추출 시스템은 스테레오 시스템에서 중요한 대응점 추출 알고리즘의 구현을 통해 위치 정보 추출의 성공률을 높였다.

4차 년도에는 이러한 3차 년도의 결과를 바탕으로 전체 시스템을 구성하기 위해 휠체어 및 로봇과의 시스템 통합을 이루었다. 인터페이스 프로그램의 안정성과 편리성을 개선하고 이것을 통해 로봇에게 원하는 작업을 지시하고 수행하는 실험을 하였다. 비장착형 Eye-mouse는 알고리즘 보완 및 3차 년도에 제작된 머리 움직임을 보상하는 기구부의 동작을 실험하였다. 동공 추출 알고리즘을 이용한 장착형 Eye-mouse는 사용자가 착용해야 하는 점 때문에 더욱 인간 친화적인 디자인을 구현하였고 전체 시스템과 같이 인터페이스 프로그램을 통해 **실제장애인을 대상으로 한 임상 실험을 수행하였다**. 3차원 위치 추출 알고리즘은 대응점 추출 알고리즘을 보다 강인하게 구현하여 위치 추출 성공률을 향상시켰다.

본 연구는 3,4차 년도의 연구를 통해 비전 및 적외선 LED를 이용한 비장착형 Eye-mouse와 비전과 자기 센서를 기반으로 한 장착형 Eye-mouse의 실제 사용 가능성을 보였다. 이러한 인터페이스 장치는 장애인의 생활 및 작업을 도울 수 있을 뿐 아니라 일반인을 위해서도 편리한 인터페이스가 될 수 있다. 따라서 이러한 시스템의 개발은 장애인의 생활에 있어서 컴퓨터 및 주변 기기의 편리한 사용을 가능하게 하여 사회 참여를 유도할 수 있으며 일반인에게도 새로운 컴퓨터 등의 입력 장치로서 가치를 보여 주었다. 이러한 점을 고려할 때 늘어나는 장애인의 수와 인구의 고령화 추세에 발 맞춰 재활 분야나 컴퓨터의 사용이 증가하는 현 시점에서 가상 현실이나 게임 등의 분야에 새로운 사업화 가능성을 보였다.

표 4.2.3.1 달성도

목 표	달 성 도(%)	내 용
<p>눈동자 추적에 의한 대상물체 지적 (Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기초 기술 개발 (3차년도)</p>	<p>100</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 척수 장애인 대상의 Eye-mouse 시스템에 적합한 손발을 쓰지 않는 인터페이스 환경을 개발하여 로봇팔 등 주변기기 구동을 위한 명령을 전송 <ul style="list-style-type: none"> -사용자가 원하는 작업의 종류와 원하는 물체 및 위치를 지적할 수 있는 체계적인 인터페이스 환경 구성과 작업 명령을 주변기기에 전송 • 비 장착형 Eye-mouse system 개발 <ul style="list-style-type: none"> -각막 반사와 동공 반사의 상대적인 위치에 따라 눈의 응시 방향을 추정 -머리의 움직임을 보상할 수 있는 눈 위치 추적 시스템의 설계 • 장착형 Eye-mouse 시스템의 구현 <ul style="list-style-type: none"> -동공과 홍채 사이의 경계를 찾아내어 눈동자의 움직임을 검출함 -자기 센서와 홍채 추적 기반 비전 시스템 사이의 보정을 통한 응시 방향의 검출과 마우스 포인터의 구동 • 로봇팔의 지능적 작업을 도와주기 위한 3차원 정보 추출 시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> -3차원 위치 추정을 위해서 스테레오 영상에서의 대응점 추출 알고리즘을 개발함
<p>눈동자 추적에 의한 대상물체 지적 (Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발 (4차년도)</p>	<p>100</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 척수 장애인 대상의 전체 KARESII 시스템에 적합한 Eye-mouse용의 인터페이스 환경을 구현 <ul style="list-style-type: none"> -로봇팔 및 이동로봇에게 원하는 작업 지시 -Eye-mouse 시스템을 위한 인터페이스의 안정성 확보, 편리성 개선 및 로봇 팔, 휠체어, 주변기기와의 통합 • 비 장착형 Eye-mouse system 개발 <ul style="list-style-type: none"> -각막 반사와 동공 반사를 이용한 시선 추출 알고리즘의 보완 -머리의 움직임을 보상할 수 있는 눈 위치 추적 시스템의 추적 구동부 구현 -비 장착형 Eye-mouse 시스템의 제품화를 위한 전체 시스템의 간략화 및 인간 친화적인 디자인, 안정성 확보 • 장착형 Eye-mouse 시스템의 구현 <ul style="list-style-type: none"> -장착형 Eye-mouse 시스템의 제품화를 위한 인간 친화적인 디자인 및 안정성 확보 -실제 장애인을 대상으로 한 임상실험 • 로봇팔의 지능적 작업을 도와주기 위한 3차원 정보 추출 시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> -스테레오 대응점 알고리즘 보완을 통한 3차원 정보 추출 시스템의 성공률 향상을 통한 안정성 보완

4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발

목 표	달 성 도(%)	내 용
개발된 기술의 우수성	100	<ul style="list-style-type: none"> •••의복형태 조종기로의 휠체어 및 로봇팔 조종의 정밀도 <ul style="list-style-type: none"> -기존의 9의 점을 받아들이는 Calibration 방법을 개선하여 어깨의 원운동으로 Calibration을 하게 되면 Calibration 정보가 100배 이상 증가하여 정밀도가 향상됨 ••의복형태 조종기의 타 장치들과의 연계성 <ul style="list-style-type: none"> -독립적인 마이크로 콘트롤러가 탑재된 직렬 통신으로 쉽게 통신이 가능한 제어기를 설계하고 PCB를 제작함 •MR Brake의 제어 성능의 우수성 <ul style="list-style-type: none"> -마찰 보상 및 경사면 힘반향에 대한 제어 알고리즘 개발 •의복 형태 조종기의 완성도 및 제어 우수성 <ul style="list-style-type: none"> -센서 및 제어기의 개선을 통하여 성능을 향상 시키고 제품화가 가능케 함
개발된 기술의 창의성	100	<ul style="list-style-type: none"> •••의복형태 조종기의 자유도 확장 방법의 창의성 <ul style="list-style-type: none"> -Tool Orientation을 설정한 후 세 개의 평면상에서 3차원 좌표를 설정할 수 있는 자유도 확장 방법 제안 •MR Brake와 모터를 동시에 이용한 반동동 힘반향 제어의 독창성 및 우수성 <ul style="list-style-type: none"> -기존의 MR Brake만으로는 표현할 수 없었던 경사면에 대한 힘반향을 모터와 함께 제어함으로써 가능케 함 •휠체어 용 Manual Haptic Master의 성능 <ul style="list-style-type: none"> -기존에 개발된 수동 조종기에 대한 기본 기술을 바탕으로 작고 전형 새로운 형태의 콤팩트한 2자유도 반동동 힘반향 조종기를 개발 •개발된 장치의 다른 분야(컴퓨터 또는 가상환경 인터페이스)로의 적용가능성 <ul style="list-style-type: none"> -개발된 장치들은 모두 컴퓨터와 쉽게 연결이 가능하도록 직렬 통신을 채택하였으며 독립적인 소형 CPU를 장착하고 있으므로 컴퓨터에 계산 부하를 더하지 않음
개발된 기술의 실용성	100	<ul style="list-style-type: none"> ••의복 형태 조종기의 사용의 편리성 <ul style="list-style-type: none"> -기존의 센서를 개량하여 보다 쉽고 어깨를 움직여 제어하기 편리한 의복형태 조종기의 2차 시작품을 개발함 •의복형태 조종기의 Calibration의 편리성 <ul style="list-style-type: none"> -기존의 9개의 점을 받아들이는 방법을 개선하여 어깨의 원운동으로 Calibration하는 방법을 개발함으로써 보다 빠르고 편리한 Calibration이 가능함 •머리를 이용한 원격 제어기 장치를 이용해서 2자유도의 매니퓰레이터 또는 이동기구의 구동가능 여부 <ul style="list-style-type: none"> -기존의 의복형태 조종기를 사용할 수 없었던 장애인도 머리 움직임을 이용하여 휠체어를 쉽게 조종이 가능하도록 함 •위급상황 대처능력 및 사용자의 의도와 무관한 동작발생의 여부 <ul style="list-style-type: none"> -지능형 인터페이스 알고리즘을 개발하여 사용자의 상황 판단 능력과 자동 회피 알고리즘의 실시간 적용이 가능

5. Hand-held Master의 개발

본 연구는 Hand-held Master의 개발, 이를 위한 텔레로봇 제어기술의 개발 및 적용방안 도출을 목표로 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 여러 가지 센서를 이용한 Hand-held master를 제안하고, 각 단계별로 5개의 시제품을 제작 실험하여 성능을 개선하였다. 관성 센서는 드리프트에 의한 오류가 크므로, 이를 보완할 방법이 필요하였다. 이를 위해 초음파 센서, 마그네틱센서 및 카메라의 Optical Flow를 이용하며 위치오차를 보정하였다. 본 연구에서 개발된 이러한 기술은 추후 위치인식등 유사한 분야에서의 기술개발에 많은 도움을 줄 것이다. Hand-held master는 기존의 master와는 전혀 다른 개념으로서 고정되지 않은 형태를 가지며 직관성을 높일 수 있으므로, 수술용 보조 로봇 등 극한작업 환경용, 가상현실 및 위치추적 등 다양한 분야에서의 적용방안을 가질 것으로 예상된다. Hand-held master는 20mmX20mmX200mm의 소형화 및 저가 경량화를 달성하여 손에 쥐기 쉬운 형태로 제작되었고, 각종 필터링을 거쳐 최적의 신호를 출력할 수 있었다.

또한, 이 Hand-held master의 사용에 적합한 안전성 및 견실성을 구현한 master-slave 텔레로봇 제어기법(Force Accommodation Based Adaptive Reference Control Algorithm)을 개발하여 Hand-held master가 적절하게 적용될 수 있는 기반을 마련했다. 이는 미래 사회에서 증가될 것으로 보이는 Tele-robot에 폭넓게 적용됨으로써 그 사용범위를 증가시킬 것으로 기대된다. 본 연구에서 개발된 Hand-held master는 의료용 수술로봇, 산업용 Calibration, 게임 및 홈네트워크 서비스용, 휴대용 PC 용 등 매우 폭넓은 분야에서 구체적 적용방안을 가질 수 있을 것이다.

제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발

1. 연구개발 목표 달성도

목 표	달성도 (%)	내 용
개념정립 및 기본설계	100	<ul style="list-style-type: none"> - 철골 건설 현장 답사 및 작업환경 조사 (영종도 신공항건설현장, 도곡동 삼성물산 건설현장) - 시공법 분석 (시공법 변경없이 로봇 도입이 가능한 방안 연구) - 작업조건, 운영방안, 기초설계안 도출
H/W 설계 및 제작	100	<ul style="list-style-type: none"> - 용접 로봇 개조 설계 제작 (소형 6축 수직다관절 로봇 채용, 용접작업기능 구현) - 로봇 주행부, 고정 지지부 메커니즘 설계 및 제작 로봇: 37kg, 주행부: 45Kg - 로봇 주행 대차 설계/제작: 설치 용이성 증대 - H-beam 용접 작업 실험을 위한 test bed 설계, 제작 - 로봇 시스템 전장부 설계 및 시제작 - 제어기 H/W 구성 및 옥외용으로 설계 변경 - 전용 End-Effector 설계제작 - 교시, 제어용 패널 제작
기능구현 S/W 개발	100	<ul style="list-style-type: none"> - 용접환경 및 조건 설정 - 데이터 및 파라메타 확장 - 작업기능 Library화 - Man-Machine interface - 보조장치 제어기능 및 통신기능 - 환경조건 설정 기능 보완 - 주행부/매니퓰레이터 연동 기능 (Master/Slave 동시제어) - uncertainty가 있는 지지대에 대한 로봇의 제어 알고리즘 개발 - Serial 통신을 통한 시스템 제어/모니터링 기능 강화 - 통합 교시 경로 계획
자동 용접 구현 S/W 개발	100	<ul style="list-style-type: none"> - Laser Vision Sensor Tracking - Arc Sensor Tracking Algorithm - 용접 전압, 전류 Tuning Algorithm - 특수 용접 Motion Algorithm 개발 (Trapezoid, Saw-Type, Pendulum Oscillating) - 용접 전용 Display 구성 (Control/Monitoring 적용) - Vertical type Multi-pass 용접 구현
성능 시험 평가	95	<ul style="list-style-type: none"> - 모듈별 연속 반복 실험을 통한 신뢰성 검증 시험 수행 - 로봇 용접 기초 실험을 통한 용접 조건 설정 - 용접 성능 시험 검사: Multi-pass 용접 시편 시험 검사

◎ 목표 대비 연구결과 비교표

항목	목표 사양	연구 결과	비고
적용 범위	각주, 환주, H빔 [기둥치수: 550~1000mm]	가장 난이도가 어려운 H빔을 대상으로 수행 분할식 레일 구성으로 다양한 치수의 철골주 용접 가능	KS 규격품 이용 [600×300mm]
로봇 이동 방식	레일 주행 방식	Single arm type 레일 주행 방식 구현 주행 캐리어 메커니즘 제작	3방향지지 메커니즘, 안정성 향상
중량	로봇: 50kg이내 주행장치: 50kg이내	로봇: 37kg, 주행장치: 47kg, 용접부가장치: 10kg	제어장치 및 용접기, 가스 등은 별도로 설치
용접품질 향상 기능	센서를 통한 용접선 검출 및 보정	Laser seam tracking Arc sensor tracking Touch sensor tracking	Multi-pass 용접 기능 구현
토치 위치제어 및 검사 기능	위치 정밀도: ±0.5mm	로봇 자체 정밀도: ±0.04mm	Laser Tracker를 이용한 위치 정밀도 측정 준비중
작업 편이성	설치 시간 5분 이내		주행대차 이용 접철식 레일 방식
운반 기능	로봇 제어 장치 및 운반장치 이동 기능	운반용 주행 대차 설계, 제작	수동식 높낮이 조절 기능

2. 대외 기여도

본 과제를 통하여 수직 철골 용접 로봇 기술 개발이 완료된다면 다음과 같은 대외 기여도가 있을 것으로 기대된다.

가. 기술적 측면

- 신 기술개발 및 수요창출로서 관련기업의 경쟁력 제고
- 핵심기술 확보로 선진국 이상의 기술수준 조기확보
- 로봇의 핵심부품개발 및 시스템 통합기술확보
- 고기능 건설용 철골 용접 로봇의 국산화 개발로 세계 건설용 용접 로봇시장 선점 및 석권

난이도가 높은 로봇의 개발을 통한 로봇 기술의 세계 일류 수준 진입

기타 산업용 로봇 시장에서도 국산화 촉진 (수입 대체 효과 극대화)

로봇 시장의 규모 확대에 따라 로봇 가격 인하 및 국내 부품 산업의 활성화 촉진

건설 공사에서 용접 품질 안정 및 용접 작업 시간 단축으로 인한 생산성 향상

센싱 및 용접 기술 발달로 가공오차가 큰 대형 구조물에도 로봇 적용 확대

나. 경제·산업적 측면

건설기계산업의 전문화, 현대화달성

연구개발 및 기술확산전략 구축

개발업체(로봇제작업체)와 수요업체(건설회사)간의 공동수행으로 지속적인 생산 및 수요창출

3D 기피 현상으로 인한 용접 숙련공의 부족에 대처 가능

일본으로부터 기술 종속 탈피 (대일 무역 역조 개선)

3. 파급 효과 및 향후 전망

가. 기술적 파급 효과

저진동 Rail 주행 시스템, 소형경량 로봇시스템 및 지지대 불안정성에 대한 제어기술 등이 건설, 토목, 조선분야 등의 관련기술로 적용 가능함으로써 기술 파급효과 큼

국내 산업용 용접 로봇시장은 일체 로봇의 점유율이 대부분을 차지하고 있어 이러한 열세를 극복하기 위해서는 기존 일체 로봇이 아직 진출하지 못하고 있고 상당한 잠재 시장을 가지고 있는 건설용 철틀 용접 로봇을 일본보다 더 우수한 방식으로 개발하여 시장에 보급함으로써 국산 로봇의 성가를 높이고 결과적으로 일반 산업용 용접 로봇 시장도 국산으로 대체할 수 있을 것으로 기대됨

수직철틀용접로봇시스템의 개발로 산업용에서 전력, 가스, 농업, 임업 등의 비산업용으로 확대되는 로봇시장에 대응이 가능함

건설 공사에서 용접 품질 안정 및 용접 작업 시간 단축으로 인한 생산성 향상이 기대됨

나. 사회경제적인 의미부여

국내 건설시장은 투자액 38조 6천억원 (1990년), 국민총생산에 대한 점유율의 약 20%나 되는 거대 산업임에도 불구하고 노동집약적이며, 외국건설장비 의존도가 높아 자동화, 국산화 등 혁신적인 구조개혁 전략이 필요한 분야이다.

또한, 인건비상승, 기능인력 절대부족으로 인한 건설업의 생산성저하, 위험작업 등에 대한 대책으로 자동화, 로봇화가 주요과제로 대두되고 있다. 일본등 선진국에서도 로봇의 현장적용이 늘어나고 있으며, 국내에서도 점차 도입이 추진되고 있고, 2000년대에는 그 수요가 폭발적으로 늘어날 전망이다. (1995년 기준으로 국내수입량은 50억원 정도임)

수입되고 있는 건설토목용 로봇의 대당 가격이 엄청난 고가이므로, 국내 생산시 수입 대체효과가 기대된다. (예: 단순기능임에도 불구하고, 미장로봇의 대당 수입가격이 8,000만원 정도임)

국내의 로봇제작업체는 주로 산업용 로봇에 한정되어 있고 자체기술은 부분적으로 확보하고 있으나 로봇시장의 한계로 인하여 고전하고 있는 실정이다. 또한, 로봇부품의 국산화를 위한 기반이 조성되어 있지 않아 수입유발이 심한 품목이므로 이 부분의 국산화개발 전략이 요구된다. 따라서, 건설용 로봇의 개발로 국내 로봇산업의 활성화가 기대되며 주요 수입품인 로봇핵심 부품에 대한 기술개발의 당위성이 제기될 수 있게 된다. 한편, 기존산업용 로봇만으로는 시장이 협소하여 새로운 수요처를 찾지 못하여 기존 로봇업체가 고전하고 있으므로 건설로봇의 잠재수요 창출로 국내 로봇산업을 활성화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

철골 용접에는 용접사 자격증을 가진 숙련 용접사를 투입해야 하나 유자격 용접사의 수가 절대 부족한 현실이며 최근의 3-D 기피 현상을 감안할 때 이러한 구인난은 더욱 심화될 것으로 예상된다. 따라서 건설현장에서는 무자격 용접사를 투입하는 사례가 빈번한 바, 이는 건축물의 최종 안전에도 심각한 위협이 될 수 있다.

최근 숙련된 기능자의 부족과 열악한 작업환경 기피 및 고임금화로 인한 자동화 추세에 따라 로봇은 향후 21 세기 생산기술의 핵심이 될 것이며, 특히 arc 용접은 작업 환경의 열악성으로 인해 가장 우선적으로 자동화될 분야라 할 수 있다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단

서비스로봇 2단계사업은 1단계의 개념설정단계를 기반으로 서비스 로봇개발에 필요한 핵심기술을 완성하고 이를 바탕으로 시제품을 제작하는 단계이다.

서비스로봇 사업단은 2단계 사업이 원활히 수행되도록 세부과제의 총괄 관리와 추진관리를 주도하여 왔으며 국내외 기술현황을 바탕으로 서비스로봇 기술개발 방향을 조향하여 왔다.

이를 위하여 서비스로봇 사업단에서는 국내외 기술 현황을 조사보고서를 작성하였고 2단계에서 개발된 핵심기술들을 각 세부 연구팀간에 공유하기 위하여 서비스로봇 워크숍과 핵심기술 분야별 기술 연구를 위하여 기술별 Special Interest Group(SIG)를 형성하여 기술을 촉진시키고 Special Interest Group 워크숍을 추진하여 기술별 연구결과를 연구팀간에 파급토록 하였으며 서비스 로봇 기술의 핵심인 Dependable Robot에 대한 IARP/IEEE-RAS의 국제 워크숍을 국내에 유치, 개최함으로써 핵심기술에 대한 국제 기술교류를 추진하였다.

5차 년도는 지금까지 개발된 핵심기술을 바탕으로 상업화를 하는데 필요한 기술을 완성하는 단계이다. 2단계에서 수행된 사업결과는 3단계 연구계획서에 반영하여 최종 년도의 사업이 성공적으로 수행될 수 있도록 활용한다.

제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

본 연구개발의 대상인 서비스로봇은 그 자체로서 다음의 표에 나타내는 바와 같은 환경과 작업에 직접적으로 활용이 가능하다.

또한 서비스 로봇 기술은 전자, 전기, 기계, 정보통신, 전산, 센서, 재료, 산업공학 등 복합적인 기술의 집합체로써, 21세기 산업, 공공, 복지 및 사회 전반적인 분야에 수요가 일어나리라 예상된다. 우선 산업분야에서는 토목, 건축분야가 가까운 시일 내에 수요가 크게 일어날 것으로 예상되며, 이에 생산 현장 및 원자력 발전설비 수자원 등에서 수요가 있을 것으로 예상된다. 1차 산업분야인 농업, 축산업, 임업 및 광업분야에서도 이미 수요가 있으며, 3차 산업인 유통업, 창고업, 통신사업에도 로봇의 역할이 크게 예상된다.

복지분야에서는 공공 건물내의 다양한 업무를 처리하거나 노약자 보조용으로서의 로봇활용과, 구난에서의 로봇 수요가 예상되며, 환경분야에서는 폐기물 처리, 공공분야에서는 소방, 방재, 안보분야에서는 우주개발, 심해지개발, 국방장비 등에서 수요가 예상된다. 이와 같이 로봇은 각 분야에서 수요를 일으킬 것으로 예상되며, 21세기 후반부터는 현재의 개인용 컴퓨터와 마찬가지로 각 가정의 수요가 급증할 것으로 예측되며, 사회 전반적으로 미치는 파급효과가 클 것으로 판단된다.

	청소		안내		순찰/경비		물류이동	
	목표작업	활용가능성	목표작업	활용가능성	목표작업	활용가능성	목표작업	활용가능성
병원	바닥청소	높음	목표지점으로 안내	높음	야간순찰 필요	높음	chart 검체 약품 식사 쓰레기 기타	높음
박물관/ 홍보관	바닥청소	높음	목표지점으로 안내. 정해진 동선을 따라 안내	매우높음	야간순찰 필요	높음		보통
공항	바닥청소	높음	목표지점으로 안내. 정해진 동선을 따라 안내	높음	야간순찰 필요	높음	짐 수하물	높음
호텔	바닥청소	높음	목표지점으로 안내.	높음		보통	짐	높음
대형 office building	바닥청소	높음	목표지점으로 안내.	보통	야간순찰 필요	높음	서류 우편물 서적등 기타물류	높음

2. 이동형 정보서비스로봇 개발

본 연구는 소형의 이동형 정보 서비스로봇의 첨단 기술들을 획득할 수 있는 아주 중요한 연구 과제이다. 특히, 시스템 설계 기술, visual 및 voice information technology의 robot system에 통합, 그리고 robot과 internet의 결합 기술 등은 향후 지능형 로봇의 개발에 큰 역할을 할 것으로 기대 된다. 그러나, 전체적인 통합화는 아직도 연구 노력을 더 기울여야 할 부분으로 보이며, 특히 시스템의 error handling기법은 전체적인 기술적 완성을 위해서는 향후 더욱 중요하게 다루어 나가야 할 연구 내용으로 보인다.

본 연구를 통하여 달성된 기술은 일차적으로 참여기업(유진로보틱스)과 상품화 연구를 더욱 내실 있게 진행할 예정이다. 또한, 각각의 요소 기술들은 다른 robot의 상품화에도 사용 가능하므로 그 용도를 더욱 확장해 나갈 예정이다. 가정용 청소로봇이라든가 공공 서비스로봇 등에도 적극적인 상품화 노력을 기울일 예정이다.

3. 형상적응형 universal hand 개발

연구 종료 시까지 최종 시작품에 대한 강도 시험, 내구 시험, 위치 조절 시험 등을 반복할 계획이며 그와 동시에 참여 기업인 현대 자동차로의 기술 이전을 추진할 예정이다. 이를 위하여, 본 연구팀의 기술 지원과 감독 하에 현대 자동차 측에서 별도로 현장 적용을 위한 시스템을 개발하게 될 것이며 추석 연휴를 이용하여 현장 시험을 실시할 예정이다. 관련된 추가 연구는 현 시점에서는 필요치 않다고 사료되며, 기술 이전 과정에서 현장 작업자의 평가와 의견이 보다 많이 반영되도록 시스템을 보완해나갈 방침이다.

제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

현재 연구된 결과는 특허를 출원 또는 출원 중에 있으며, 특허를 바탕으로 다운사이징(Downsizing)된 형태로 제품으로부터 기업화로 시작하여 궁극적으로는 대규모 시스템은 휠체어 기반 로봇 팔 시스템까지 상용화 단계로 끌어올릴 수 있다.

표 5.3.0.1. 인간-로봇 상호작용기술을 바탕으로 제품화될 시스템

제품	내용	적용 사례
다용도 아이(Eye) 마우스	눈동자 추적 시스템 응용 소프트웨어	장애인을 위한 상호작용장치 가상 현실을 위한 상호작용장치
입을 수 있는 형태의 햅틱 수트(Haptic Suit)	2 자유도 햅틱 수트 6 자유도 햅틱 수트	로봇 조정 장치 가상현실/오락을 위한 상호작용장치 원격제어용 상호작용장치
비주얼 서보잉을 위한 소형/경량의 스테레오 비전 시스템	물체 추적 장치 지능 시각 모듈	움직이는 물체에 대한 추적/잡기 사용자의 표정을 이용한 상호작용장치
생체신호에 의한 로봇 구동 장치	4 자유도 로봇 구동 장치 6 자유도 로봇 구동 장치	지능 로봇 제어 사용자 의도 파악
소프트 로봇 팔	6 자유도 로봇 팔 케이블 메카니즘을 이용한 Backdrivable 기능	사용자의 안전성(Safety)을 고려한 로봇 팔
로봇의 기구학 구조 결정 Software	격자방법 이용, 정의된 작업을 구현하는 로봇의 기구학 구조를 찾아줌	작업이 정의되어 있는 로봇의 설계시에 유용하게 사용됨
재활 로봇 시스템	지능적 인간-로봇 상호작용	환자/장애인의 재활

본 세부과제에서 연구된 각종 사용자 의도파악기술과 로봇제작기술이 타 세부과제에서 활용되는 것의 논의되고 있다. 그 외에도, 세부과제간의 긴밀한 협의를 통하여 로봇 팔 등의 시스템간의 호환성을 확보할 계획이다. 그 외에도 연구개발결과는 실버공학시스템, 메디컬 로보틱스, 원격조종기술이 요하는 방재시스템, 엔터테인먼트 시스템 등에 활용될 수 있다.

1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현

본 연구에서 제안한 장력 조절이 가능한 cable mechanism은 기존의 cable을 사용한 동력 전달 방법에서 크게 문제가 되어왔던 장력 조절이 손쉽게 가능하며, 저렴한 worm 기어를 사용함으로써 저렴한 가격으로 제작이 가능하다. 그리고 cable mechanism 자체의 장점인 높은 backdrivability를 가지며, 무시할만한 백 래쉬(back-lash)와 작은 마찰력을 가

지게 된다. 또한 cable을 사용하는 특성상 구동기(actuator)와 실제 구동되는 부분이 멀리 떨어져 있어도 동력이 전달 될 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 cable mechanism의 장점은 대부분의 다른 동력 전달 메커니즘들이 가지지 못하는 장점으로서, **감속비가 요구되면서도 먼 거리에 동력을 전달해야 할 경우에 적용한다면 좋은 성능을 얻을 수 있을 것**으로 생각된다. 또한 동력 전달 체계에 있어서 **마찰력이 큰 문제가 되거나, 백 래쉬(back-lash)가 문제가 되는 경우에 잘 쓰일 수 있다.**

또한 본 연구에서 쓰이고 있는 목표 지향 설계에서 부산물로서 얻어진 **기구학적인 해를 찾아주는 소프트웨어는 단독적으로 상품화가 가능하며, 여러 가지 경우의 로봇에 대하여 기구학적인 해를 찾아주어 로봇의 기구적인 디자인 부분에서 큰 기여를 할 수 있을 것**으로 기대된다. 마지막으로 케이블 메커니즘의 backdrivability 특징을 잘 살린, 별도의 힘 센서 없는 컴플라이언스 제어 알고리즘의 경우에는, **힘 센서를 붙이기에는 부담스러운 저가격의 제품을 개발하고자 한다면 유용하게 쓰일 수 있을 것**으로 기대된다. 추후 과제로서 (1) 개발된 다양한 시제품 및 방법들을 기반으로 하여 **상품성이 있는 품의 개발과 (2) 추가적인 보완을 통한 시제품의 기능 보완 및 실사용자의 평가 수렴 등이 필요하다.**

2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

가. 주위환경에 적응하며 인간 친화적인 Visual Servoing 기술

아이-인-핸드(Eye-in-hand) 구조의 Visual Servoing을 위한 스테레오 비전 시스템에서 동력전달 방식으로 텐던(Tendon)구동 구조를 적용함으로써 카메라 제어에 있어 큰 걸림돌이던 **Backlash를 획기적으로 줄였으며 경량화/소형화를 이루었다.** 수 차례의 시제품 제작을 통하여 Cable을 고정하기 위한 폴리의 특별한 배치를 통한 새로운 형태의 카메라 헤드가 제안되었다. 이 구조는 임상 실험을 통한 실사용 대상자의 의견 수렴을 통해 **비주얼 서보잉에 적합한 스테레오 카메라 부착형 신형 그리퍼 제작에 응용되어 그 유용성을 확인하였다.** 또한, 기존의 로그-풀라 변환의 문제점을 가까운 물체와 이동중인 물체 관점에서 개선된 로그-풀라 변환을 통해 해결함으로써, 기존의 로그-풀라 변환만을 사용한 비주얼 서보잉에 비해 뛰어난 성능을 갖는 시스템 구성이 가능하였다. 지능형 비주얼 서보잉 기법의 구현을 위한 **사용자 얼굴 인식/추적 및 표정 인식을 통한 서비스 기능의 확장** 등은 재활 로봇뿐만 아니라 다양한 서비스 로봇에 직접 기술로서 실제적인 적용이 가능하다. 이외에 비전센서와 다른센서(힘센서, PSD 등)와의 **센서융합기술 및 인간-로봇 공동작업 기술**에 대한 연구를 통해 비주얼 서보잉 기술의 확장성을 높이는데 주력하였다. 추후과제로 (1) 개발된 다양한 시제품을 기반으로 한 **상품성 있는 제품의 개발, (2) 추**

가적인 임상 실험을 통한 실사용 대상자의 의견 수렴 및 기능 확장에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

나. 로봇 팔 제어 알고리즘을 위한 생체 신호(EMG) 분류 기술

기존의 지속적인 연구를 통해서 개발된 생체신호 증폭기는 소형, 저가, 고성능이며 사용자의 근전도 신호를 증폭하여 원하는 전압레벨까지 충분히 증폭할 수 있도록 설계되었으며 높은 S/N비를 갖는다. 이번 년도의 연구를 통해서 입력 전원을 위한 소형의 DC-to-DC converter 채용, A/D device 보호를 위한 clamp 회로의 도입, debug을 위한 LED 장착 등을 보완하였다. 또한 측정, 증폭된 근전도 신호를 RF기능을 이용하여 손쉽게 PC에서 데이터를 획득할 수 있도록 개선하였다. 또한 개발된 근전도 분류 알고리즘은 짧은 시간에 높은 성공률로 사용자의 의도나 명령을 해석할 수 있다. 따라서 이렇게 개발된 시스템은 중증 척수 손상 장애인을 위한 휠체어 인터페이스, wearable computer의 마우스 포인터 제어를 위한 장치, 생체 신호를 이용한 가전기기 제어장치의 입력부에서 충분히 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 추후 과제로 (1) 개발된 무선 근전도 증폭기의 사용자 안전성을 확보하기 위한 입력단 분리설계 (isolation) (2) 개발된 하드웨어와 알고리즘을 이용한 상품성 있는 제품의 개발 (3) 추가적인 임상 실험을 통한 실사용 대상자의 의견 수렴 및 기능 확장에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발

척수 장애인의 경우 손발을 자유롭게 사용할 수 없기 때문에 컴퓨터나 주변 장치를 자유롭게 사용하는데 어려움이 있다. 따라서 이들이 편리하고 쉽게 컴퓨터나 주변 장치를 사용할 수 있도록 해 주는 인터페이스 시스템의 개발이 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서 개발하고 있는 eye-mouse 시스템은 사용자의 머리와 눈동자의 움직임으로부터 컴퓨터와 주변 장치를 제어할 수 있도록 해 주는 인터페이스 장치로서, 척수 장애인이나 노약자뿐만 아니라 일반인에게도 편리한 입력 도구로서의 상품화 가능성이 높다. 다양한 인터페이스 시스템의 개발과 이의 활용에 대한 연구가 활발한 현 시점에 비추어볼 때, Eye-mouse 시스템과 같은 편리하고 직관적인 인터페이스 시스템은 컴퓨터나 게임 분야에서 일반인이 쉽게 사용할 수 있는 인터페이스 장치의 요구를 만족시켜 주는 상품으로의 개발이 가능하다. 현재까지 획득된 기술을 기반으로 상품화를 위한 경쟁력을 위해 시스템의 간략화를 구현할 계획이며 현재 비장착형 Eye-mouse 관련 눈 응시점 추정 시스템은 특허를 출원(출원 번호 10-2002-0009346)하여 상용 제품 개발에 필요한 기술 보호의 기반을 확보하였다.

4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발

의복 형태의 신체 움직임 측정 장치의 제작 방법에 대한 특허를 **미국 출원(출원번호 09/912,357)하여 제품화 추진시 기술 보호의 기반**을 확보하였으며 본 연구에서 개발된 의복형태 조종기 및 수동 조종기는 게임 산업, 의료 산업 등 활용 범위가 매우 넓어 그 파급 효과가 매우 크다. 앞으로 개발된 기술을 이용한 장애인에게 직접 적용 가능한 시스템과 그에 따라 파생될 각 산업 분야에 적용 가능한 Human Interface 장치들은 여러 산업 발전에 크게 기여할 수 있을 것이다.

5. Hand-held master의 개발

본 연구에서 개발된 Hand-held master는 저가격, 경량화를 추구하여 휴대용/이동형 시스템으로서의 장점을 갖출 수 있고, 궤적을 입력명령으로 이용할 수 있는 등 고정형 master에 비해 다양한 입력을 줄 수 있으므로 조작도(Maneuverability)를 향상시킬 수 있으므로, 이에 따라 원격조종 진단, 수술작업 외에도 마이크로 조립작업등에 적용할 수 있다. 또한 슬레이브 로봇의 입력장치로서의 기능 외에 정밀한 위치추적 기능을 이용하면 캘리브레이션, 가상현실에서의 응용 등 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서 개발한 Hand-held master의 이러한 장점들을 이용하여 홈서비스 로봇 및 휴대용 PC에서 적절한 인간친화적인 입력을 제공할 수 있도록 응용할 예정이다. 또한, Hand-held master를 위한 master-slave 제어 알고리즘 및 진동을 이용한 Force feedback기법에 대해 특허를 각각 출원하여 타연구에 적극적으로 활용할 예정이다.

제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발

건설분야에서 최초로 요구되어진 needs는 중노동에서의 해방이었다. 이러한 문제는 다양한 건설장비의 개발도입으로서 상당한 해결을 보게되었다. 또 1980년대부터 나타나기 시작한 인건비 상승, 만성적 노동력 부족 현상문제는 건설의 자동화가 그 해결책으로 제시되고, 자동건설장비의 본격적인 개발과 도입으로 일부나마 성과를 올리게 되었다.

그러나 최근에 대두되고 있는 과제는 작업자의 관점에서 보는 건설, 즉 노동조건 개선에 의한 건설 생산성 향상이다. 이것은 새로운 패러다임이며, 건설작업에 대한 혁신적인 사고전환과 대응할 수 있는 기술을 요구하고 있다. 다시 말하면 건설생산성 우선이라는 기존의 관점에서부터 작업자중심으로의 사고 전환을 필요로 하며, 이에 대응하는 시공방법, 장비의 개발을 요구하고 있다. 현재 그 해법으로 건설로봇에 의한 시공 기술이 주목되기 시작하였다. 이것은 작업자가 얼마나 손쉽게 그리고 안전하게 작업을 수행할 수 있는가가 건설생산성을 좌우한다는 새로운 사고전환을 의미하고, 작업자, 인간중심으로 본 작업에 관련된 서비스를 제공하는 건설용 로봇개발을 요청하고 있다.

건설시장은 국내총생산의 20%를 차지하는 거대시장으로서, 일본로봇협회의 예측에 의하면 건설관련 로봇시장은 총 로봇시장의 10%수준(일본 약1000억엔,2005년)이 되리라고 보고있는 유망한 분야이다 (국내시장은 일본의 10%정도로 추정됨). 이미 선진국에서는 관련로봇개발연구에 많은 투자가 이루어지고 있어, 수많은 종류의 로봇시제품이 개발되고 있고, 현장투입도 눈앞에 와 있는 상황이다. 이러한 추세를 보면, 조간만 건설현장에는 많은 종류의 로봇이 활용되는 신 공법이 확립되리라 예상된다. 세계시장 속에서 건설분야의 비교우위를 확보하기 위해서, 또한 시장의 한계성으로 침체되어 있는 국내 로봇산업의 활성화 차원에서라도, 실용화가 한 걸음 앞으로 다가온 건설용 로봇에 주목할 필요가 있다고 보여진다. 현재 국내에 도입, 활용되고 있는 로봇은 콘크리트 바닥 미장용 로봇정도이고, 건설분야에 대한 국내 로봇 수요 조사에 의하면 철골 구조물 용접 로봇도입이 가장 시급하다고 보고되어 있다.

최근, 빌딩건축 공법이 철근 콘크리트 대신 철골 구조의 공법으로 변화되고 있고 (1994년 일본 통계 자료에 따르면, 2억 4천만 m²의 건축 착공물 중 8천만 m²로 약 33%를 차지) 철골 구조물은 볼트 너트 체결 방식에서 용접 방식으로 전환되고 있다.

특히, 빌딩의 수직 기둥(column) 조립작업은 현장용접이 필수적인데, 현재 수작업으로 용접이 이루어지고 있다. 영종도의 공항터미널공사의 예를 들면 철골기둥 1개소를 용접하는데 1명의 용접기능공이 24시간 정도의 작업시간을 필요로 하며, 또 용접품질이 작업자에 따라 상이하여 전수검사가 필연적인 것으로 조사되었다.

일본에서는 1985년경 건축 철골 용접 로봇이 처음 도입되었는데, 초기에는 로봇의 기동성·조작성 등에 대한 연구와 용접 품질 문제 해결을 위한 연구가 주를 이루었다. 1988년~1990년경에는 보급기로서 용접로봇의 H/W와 S/W 개발에 대한 연구를 수행해 왔다. 그 후, 1990년대 중반부터는 용접부의 외관 형상, 내부품질 및 용접 금속의 기계적 성질 향상을 위한 노력이 이루어졌다. 그 결과 용접 로봇의 적용 범위도 공장내의 용접에서부터 철골주 용접, 철골보의 용접에까지 그 응용범위가 확대되었다. 철골주의 경우, 초기에는 원형주 및 각주에 대한 적용만이 이루어졌으며, 최근 들어서 H-beam에 대한 용접 로봇 적용 사례가 발표되기도 하였다.

철골주의 형태는 다양하지만 로봇용접 대상으로는 대형 H-beam, 사각주, 원형주가 주종이다. 각 용접 접합부는 후판 옆보기 용접자세로 다른 용접자세에 비해 용접이 까다로우며, 용접접합부의 경로를 따라 용접 비드를 다층 적층시켜 후판의 두께만큼 쌓아올린다. 사각주나 원형주의 경우에는 용접선이 단순하고 철골자체가 장애물이 되지 않아 3자유도의 직교형 로봇만으로도 철골기둥주위에 설치 고정된 레일을 따라 이동하면서, 이음새를 용접할 수 있다. 그러나, H-beam의 경우에는 로봇의 용접 자세각이 다양하게 요구되어 더 많은 자세각을 필요로 하게 된다. 또한 수직철골 용접로봇 시스템의 보다 신속한 설치 및 이동을 위한 시스템 개발이 중요하다.

본 과제에서는 수직철골 용접로봇의 기술을 보유하고 있는 일본에서도 난이도가 높아, 아직 실용화가 되어있지 않은 H-beam철골의 용접문제를 해결하기 위한 연구에 착수하였다. 보고서 내용에서 상세히 기술하고 있듯이, 철골 구조물 시공 및 작업 조건 등에 대한 기초 조사를 토대로 개념설계를 수행하고 1차, 2차 시제품 개발을 통하여 실제 작업에 활용 가능하도록 하였으며, 이 로봇시스템에 대한 기본기능시험 및 신기술정립을 위한 연구, 즉, 용접선 자동 추적 기술 및 uncertainty 극복 기술, 장애물 회피 연구를 수행하였다. 현재, 작업장 이동과 설치용이성을 고려한 설계를 토대로 6축 소형 용접로봇을 주행 메커니즘과 함께 레일 위에 탑재하여 레이저 센서를 이용한 자동 용접작업이 가능하도록 시스템을 구성하였다. 2차 시제품에서는 1차 시제품에서 발생된 주행중 흔들림 문제점 등을 보완하였다. 즉, 주행 캐리어 시스템의 무게 중심을 낮게 설계하였으며, 3방향(roll, pitch, yaw)의 모멘트 지지 구조로 하여 주행 중에도 용접이 가능하도록 제작하였다. 또한, 구동부와 가이드부를 일정한 거리 간격을 두었고 편심 가이드 롤러를 설치하여 예압을 조정할 수 있게 하여 안정적인 동적 특성을 지닐 수 있게 하였다. 또한, 후판에 대한 다층 용접에 대한 연구를 수행함으로써 수직 H-beam에 대한 용접 조건 등을 산출하였다. 향후, 이 시스템이 건설 현장에 바로 적용될 수 있도록 실용화 연구가 좀더 이루어져야 할 것이며, 또한 건설 시공 업체와의 협의를 통해 철골 시공에 자동화가 용이하도록 공법 변경에 대한 노력도 기울여야 할 것이다.

이 로봇시스템 개발이 완료된 시점에서의 활용계획은 다음과 같다.

개발된 로봇시스템을 성능시험평가 Test Bed로 활용

관련요소기술의 적용확대 : 주행 메커니즘, 장애물회피기능, 용접 Bead의 적층기술

지지부 uncertainty 극복기술의 타 분야 적용

(예: 자동차/선박 완충장치, 방진/정밀계측장치, 실버/장애자용이동기구, 영상촬영장비 등)

개발된 소형 용접 로봇 사업화 추진 (삼성전자)

삼성 건설의 건설 현장으로의 우선적 시범 적용 (약 1년)

시범 적용에서 성능이 인정되면 국내 중소기업에 OEM 생산

국내 판매 추이에 따라 생산량을 늘리고 수출 개시

여 백

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단

제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

○ 대표적으로 알려져 있는 지능형 자율이동 로봇으로는 독일 Bonn 대학과 Carnegie Mellon 대학이 공동으로 개발한 Rhino(그림5(a))로서, 1997년 독일 본 박물관에 투입되어, 약 6일간 관람객에게 각종 전시 정보의 안내 및 인터넷기반 원격 제어에 의한 안내기능을 수행하였다. 이동로봇 플랫폼은 시사의 B21을 사용하였으며, 56개의 적외선 센서와 2개의 Sick 레이저 레인지 스캐너를 장착하고 있어서 자동으로 지형을 익혀 이동한다.

○ 그림 5(b)는 Rhino의 차기 버전 로봇으로서, 미국의 Smithsonian 국립박물관에 투입되어, 안내기능을 수행하였다. 본 로봇의 특징으로는 자기위치인식 및 장애물검지에 활용되어온 레이저 레인지 스캐너의 경우, 박물관 등과 같이 관람객이 많은 경우나 공간이 넓은 공간에서는 센서 감지 영역이 좁아지거나, 불확실한 장애물의 다수 출현, 공간 인지를 위한 기준 특징물의 감지가 어렵다는 문제점을 보완하여, 박물관 천장 지향 카메라를 로봇에 장착하여, 천장패턴과 획득 천장영상의 확률론적인 정합 및 레이저 스캐닝 정보와의 결합에 의하여, 보다 안정된 자기위치를 인식한다. 또한, 가상 눈썹 및 입술을 부착하여, 기쁨, 성냄 등과 같은 감정표현이 가능하다.(작동시간 96Hour, 주행거리 44Km)

○ 그림 5(c)는 독일 Fraunhofer IPA에서 개발한 안내용 로봇으로서, 하노버 전시회를 통하여, 전시된 바 있다.



(a) Rhino



(b) Minerva



(c) IPA

Museum Tour Guide Robot

○ 박물관 안내용 로봇으로 활용된 바 있는 Rhino와 Minerva는 자율이동 기능과 안내화면, 가상눈썹, 입술모형, 스테레오 카메라 등을 이용하여, 관람객이나 인터넷 연결 사용자들과의 교감을 통한 연계 운용이 가능하였다. 그러나, 상기 로봇은 인간과의 공존에 있어서, 단순한 표정연출과 사용자의 능동적인 조정만에 의하여, 안내정보를 제공함에 따라, 안내용 로봇으로서의 역할보다는 기술력을 홍보하기 위한 로봇자세의 전시측면에서의 역할이 강한 느낌을 준다. 따라서, 로봇 자체의 능동적인 안내 모션 및 기능을 수행할 수 있는 기능의 구현이 요구된다. 예로서 관람객을 가이드하며, 설명한다든지, 양팔과 헤드 움직임에 의한 자연스러운 모션연출들이 있을 것이다.

제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현

다양한 재활 로봇의 개발과 이의 활용에 대한 연구들이 활발하게 이루어지고 있는 현재 시점에서, 로봇 팔 시스템은 많은 종류의 연구가 이루어지고 있으며 여러 가지 상용화 시도가 있어왔다. 아래는 그 회사들의 홈페이지 주소이다.

<http://home-1.worldonline.nl/%7Edynamics>: MANUS arm 홈페이지

<http://www.pyxis.com/> : HelpMate 홈페이지

<http://ourworld.compuserve.com/homepages/RehabRobotics/>: Handy 1 홈페이지

<http://www.appliedresource.com/RTD/index.htm> : Raptor 홈페이지

<http://www.yaskawa.co.jp/en/technology/64-2/t09.htm> : YASAKAWA 홈페이지

또한 본 로봇은 케이블 메커니즘을 이용하고 있으므로 이를 이용한 로봇의 선례인 Barrett사의 WAM(Whole Arm Manipulator)를 참고하였다. 아래는 Barrett사의 홈페이지 주소이다.

<http://www.barretttechnology.com/robot/>

2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

• 해외연구소 방문을 통해 얻어진 정보.

① ASEL (Applied Science and Engineering Laboratories)

- 방문일시: 2000년 7월 31일

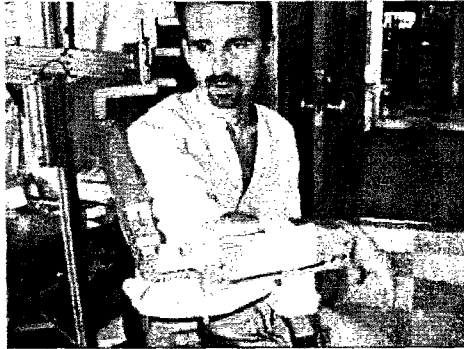
- 소재지: 미국, Delaware, Extended Manipulation Laboratories, Alfred I. duPont Hospital for Children

- 관련 URL: <http://asel.udel.edu/robotics/>

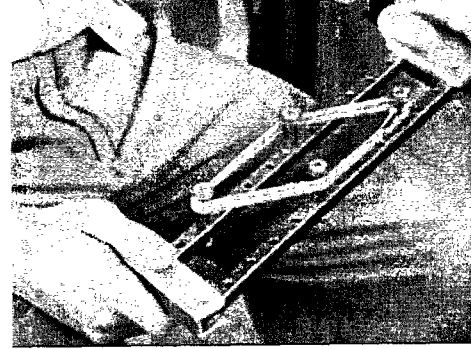
• 상박 보조 장치의 개발(Development of an upper limb orthosis)

- 관련 URL: <http://asel.udel.edu/robotics/orthosis/orthosis.html>

- 팔의 힘이 미약한 장애인 및 정신지체 환자들을 위한 보조 기구로 'Anti-gravity mechanism using linear springs'이라는 개념을 채용하여, 'Zero G' 상태를 가상적으로 느끼게 하는 시스템.



<상박 보조 장치의 외관>



<4-bar linkage를 응용한 구조>

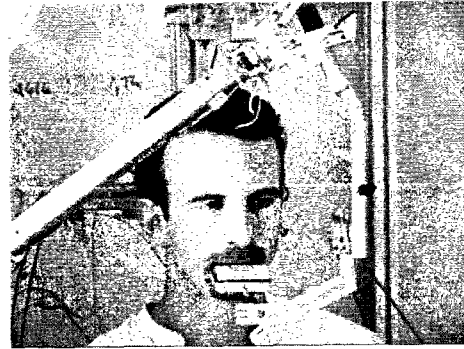
• Chameleon: A Body Powered Rehabilitation Robot

- 관련 URL: <http://asel.udel.edu/robotics/chameleon/chameleon.html>

- 팔의 움직임이 자연스럽게 않은 장애인 및 환자들이 입에 물고 사용 가능한 master 장치를 이용하여 6축 로봇팔을 제어하는 형태. 역시 anti-gravity mechanism을 채용하여 큰 힘을 필요로 하지 않는다.



<Chameleon의 외관>



<Mouth Controller for Chameleon>

- 수집 정보: 상기 시스템의 동작 및 설명에 관한 6mm Digital Video Tape.

② Dr. Libor Spacek

- 방문일시: 2001년 4월 30일

- 소재지: 영국, Colchester, Univ. of Essex, Dept. of Computer Science

- 관련 URL: <http://cswww.essex.ac.uk/staff/spacek.htm>

- Dr. Libor Spacek 는 90년대 중반 이후, 얼굴 인식 문제에 대한 연구를 해오고 있다. Edge 정보와 boundary에 기반한 curvature operator 등을 고안하여 효과적인 얼굴 인식 문제에의 해결 방안을 다수 제시한 바 있으나, computer science에 의존한 접근 방법으

로써 본 연구에서 다루고 있는 문제와는 많은 차이를 보인다.

- 수집 정보: **Dr. Libor Spacek**이 보유한 얼굴 인식을 위한 영상 DB.

- Total number of individuals: 395
- Number of images per individual: 20
- Total number of images: 7900
- Gender: contains images of male and female subjects
- Race: contains images of people of various racial origins
- Age Range: the images are mainly of first year undergraduate students, so the majority of individuals are between 18-20 years old but some older individuals are also present.
- Glasses: Yes
- Beards: Yes
- Image format: 24bit colour JPEG
- Camera used: S-VHS camcorder
- Lighting: artificial, mixture of tungsten and fluorescent overhead

③ BIME (Bath Institute of Medical Engineering)

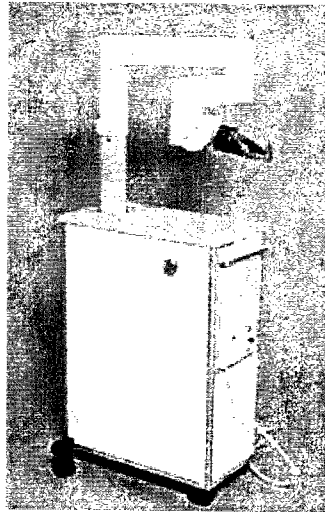
- 방문일시: 2001년 5월 4일

- 소재지: 영국, Bath, Univ. of Bath

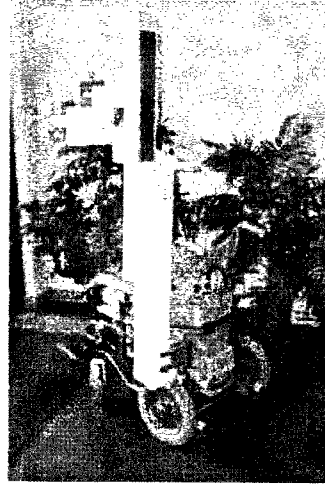
- 관련 URL: <http://www.bath.ac.uk/bime/home.htm>

- Bath 대학에 소재한 BIME에서는 약 10년에 걸쳐 재활로봇으로써의 로봇팔의 가능성에 대해 다양한 임상 실험을 수행하는 등, 활발한 연구를 행하였다. 현재까지 Wessex Trolley Mounted Robot, Weston Wheelchair Mounted Robot 등이 개발되었으며 다양한 임상실험을 통해 기능 보완에 힘써왔다. 사용자의 수동 조작에 의한 로봇 제어의 편의를 위한 Interface 등이 개발되었다.

- 수집 정보: **Weston Wheelchair Mounter Robot**의 동작 및 개발에 관한 일반 사항에 관한 토론 자료를 담은 6mm Digital Video Tape.



<Wessex Trolley
Mounted Robot>



<Weston Wheelchair
Mounted Robot>

④ IAT (Institute of Automation Technology)

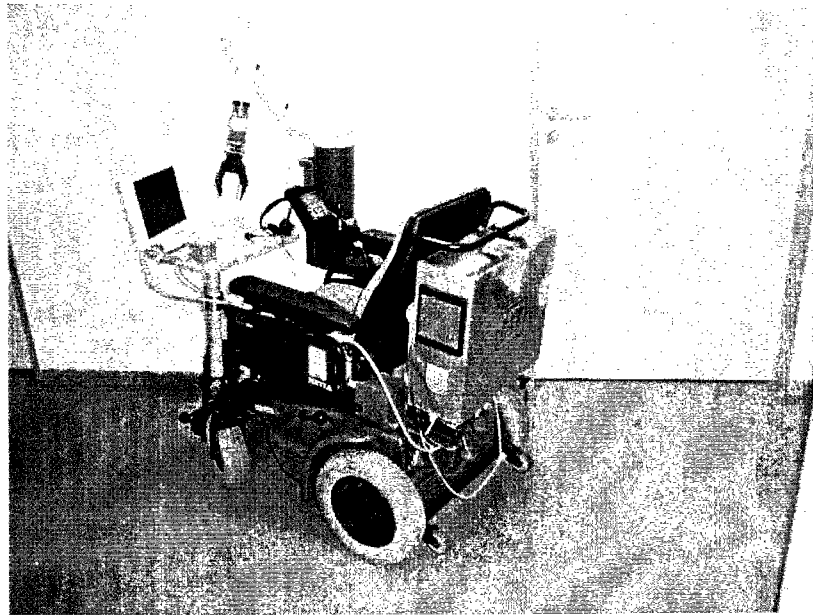
- 방문일시: 2001년 11월 1일 - 23일

- 소재지: 독일, Bremen, Univ. of Bremen

- 관련 URL: http://www.iat.uni-bremen.de/default_eng.html

- 독일 Bremen 대학에 소재한 IAT에서는 자동화에 관한 일반 연구 이외에도 1997년부터 휠체어 부착형 재활로봇 시스템인 FRIEND(Functional Robot Arm with User-Friendly Interface for Disabled People)에 관해 연구해 오고 있다. 음성명령을 기반으로 하여, Visual Servoing 기능을 이용한 상용 MANUS 로봇팔이 부착된 휠체어를 기반으로 하는 이 시스템은 현재 줌 기능을 첨가한 스테레오 카메라, 컬러 영상 처리 기법 및 효율적인 control architecture에 관해 활발한 연구가 진행 중이다.

- 수집 정보: FRIEND 시스템의 외관 사진 다수, 사용된 control architecture에 관한 논문 및 발표 자료, Visual Servoing에서 사용된 마커 인식 알고리즘에 관련된 논문.



<FRIEND 시스템의 외관>

· 해외학술대회 참석을 통해 얻어진 정보.

① ICORR2001 (7th International Conference on Rehabilitation Robotics)

- 장소 및 일시: 프랑스, Evry, 2001년 4월 25일-4월 27일
- 요약: 2년에 한번씩 개최되는 재활로봇 분야의 저명한 학술회의로써, 현존하는 대부분의 재활로봇에 관한 논문이 결집되는 학술회의. 다양한 논문에 의한 연구결과 이외에도 실제 시스템 시연을 통해 최신 정보 입수가 용이함. 참고로 ICORR2003 국제학술회의가 2003년 4월 23일-25일 예정으로 한국과학기술원에서 개최될 예정이다.
- 시연 시스템 정보
 - MIME robotic-aided therapy(Veterans Affairs, Palo Alto, USA)
 - GENTLE Rehabilitation robot (Rehabilitation Robotics, UK)
 - Manus robot (RTD Hetdorp, Netherlands ; INT-INSERM, France)
 - Handy I robot (Centre for Rehabilitation Robotics, Staffordshire.UK)
 - Weston Robot (Bath Institute of Medical Engineering, UK)
 - AFMA-Master Workstation (APPROCHE Association, France)
- 수집 정보: 각종 재활로봇 시스템의 실제 시연에 관한 동영상 자료를 수록한 6mm Digital Video Tape 다수, 구두 발표 및 포스터 발표 논문을 모두 수록한 Proceeding.

② CWUAAT2002 (1st Cambridge Workshop on Universal Access and Assistive Technology)

- 장소 및 일시: 미국, Minneapolis, 2002년 6월 27일-7월 1일
- 요약: Univ. of Cambridge에서 처음으로 개최되는 워싱턴으로 재활 공학의 전분야에 관련된 부분을 다루며 경제 분야, 의학 분야, 공학 분야 등의 여러 측면에서 재활 공학 쪽으로 접근한 사례 및 각 시스템들에 대한 최신 정보 입수가 가능.
- 수집 정보: 구두 발표 및 포스터 발표 논문을 모두 수록한 Proceeding. 시스템 시연 및 포스터 세션, 데모를 수록한 6mm Digital Video Tape.

③ RESNA2002 (Rehabilitation Engineering and Assistive Technology Society of North America)

- 장소 및 일시: 미국, Minneapolis, 2002년 6월 27일-7월 1일
- 요약: 매년 개최되는 북미 재활 분야의 저명한 학술회의로 재활 로봇뿐만 아니라 각종 재활과 관련된 많은 시스템들이 소개되며 북미지역의 최신 정보 입수가 용이함.
- 수집 정보: **각종 재활로봇 시스템의 실제 시연에 관한 동영상 자료를 수록한 6mm Digital Video Tape, 다수의 휠체어 관련 정보, 구두 발표 및 포스터 발표 논문을 모두 수록한 Proceeding.**

3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발

다양한 인터페이스 시스템의 개발과 이의 활용에 대한 연구가 활발한 현 시점에 비추어 볼 때 Eye-mouse 시스템은 새로운 컴퓨터 인터페이스로서 많은 외국회사의 상용화 시도를 파악할 수 있었다. 아래는 그 회사의 홈페이지와 주소이다.

- Assistive Technology, Inc. (<http://www.assistivetech.com>)
- LC Technologies, Inc. (<http://www.eyegaze.com>)
- EyeTech Digital systems (<http://eyetechds.com>)
- Applied Science Laboratories (<http://www.a-s-l.com>)
- Skalar Medical (<http://www.wirehub.nl/~skalar>)
- SensoMotoric Instruments (<http://www.smi.de>)
- Arrington Research, Inc. (<http://arringtonresearch.com>)

본 연구에서는 적외선 LED를 눈에 조사하여 사용하므로 적외선 LED의 안전성이 문제가 될 수 있다. 따라서 다음과 같은 안전에 관한 자료를 수집하여 사용하게 될 적외선 IR을 선정하는 기준으로 삼았다. 이 규약은 미국의 노동안전위생국(Occupational Safety and

Health Administration)과 미국의 여러 주에서 레이저의 안전성을 평가하는 근거로써 사용되고 있다.

- "ANSI Z136.1-2000", American National Standard for Safe Use of Lasers, 2000

4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발

기술 정보: HERMES - A Humanoid Experimental Robot for Mobile Manipulation and Exploration Services

출처: Bundeswehr Univ., Germany

정보 유형: Video Tape, Introduction of HERMES

요약: 앞으로 가정용 로봇은 'Plug-and-play'의 개념을 따를 것으로 생각된다. 즉, 로봇은 어떤 환경에서도 전원만 넣으면 로봇에 대해 전혀 모르는 사람도 로봇의 도움을 받을 수 있게 된다. HERMES는 비전, 촉감 센서 등의 여러 센서들을 포함하고 있고 인간 친화적인 방법으로 사용자와 의사 소통이 가능하다. 본 비디오에는 HERMES의 성능을 보여주는 실험들을 요약하고 있다. 비디오에서는 몇 가지 사용자와 로봇의 상호 작용이나 협력 작업을 보여준다. 또한 인터넷을 통한 서면, 시각 정보나 촉감 정보, 대화 등, 여러 방법으로 사람과 로봇이 의사소통을 하는 예를 포함한다.

5. Hand-held master의 개발

Hand-held master의 연구개발과정 중에 수집한 해외과학기술정보는 크게 각종 master에 관한 정보, 각종 텔레로봇 제어기법에 관한 정보, 각종 적용방안의 현재 상황등에 대한 정보로 나뉘어진다. 구체적인 내용은 제 2장 및 제 3장의 본문을 참조하기 바란다.

여 백

제 7 장 참고문헌

제 1 절 서비스로봇 기술 개발 사업단

제 2 절 이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발

1. 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

2.2.1.1 이동기술

[1] Maher Khatib, Sensor-based motion control for mobile robots, Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systemes, Toulouse, France.

[2] Jean-Claude Latombe, Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers, 1991.

[3] O. Khatib, Commande dynamique dans l'espace operationnel des robots manipulateurs en presence d'obstacles. Ph.D. thesis, Ecole Nationale Superieure de l'Aeronautique et de l'Espace, Toulouse, France, 1980.

[4] O. Khatib, Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. The internaional Journal of Robotics Resarch, vol.5, no.1, pp.90-98, 1986.

[5] B.H. Krogh & C. E. Thorpe, Integrated path planning and dynamic steering control for autonomous vehicles, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1986.

[6] J. Borenstein & Y. Koren, The Vector Field Histogram - Fast Obstacles Avoidance for Mobile Robots. IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.7, No.3, June 1991.

[7] Jerome Barraquand, Bruno Langlois, and Jean-Claude Latombe, Numerical Potential Field Techniques for Robot Path Planning, IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, vol. 22, no. 2, 1992

- [8] Kurt Konolige, A Gradient Method for Realtime Robot Control, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 639-646. 2000.
- [9] J.-S. Gutmann, W. Burgard, D. Fox, K. Konolige, An Experimental Comparison of Localization Method, IROS 1998
- [10] J.-S. Gutmann, C. Schlege, AMOS: Comparison of Scan Matching approaches for self-Localization in indoor Environments, EUROBOT 1996
- [11] D. Fox, W. Burgard, F. Dellaert and S. Thrun, Monte Carlo Localization: Efficient Position Estimation for Mobile Robots, Proc. of AAAI 99, 1999
- [12] D. Fox, W. Burgard, S. Thrun, A. B. Cremers, Position Estimation for Mobile Robots in Dynamic Environments, Proc. of AAAI 98, 1998

2.2.1.2 조작기술

- [1] T. Motita and S. Sugano, "Development of one-D.O.F. robot arm equipped with mechanical impedance adjuster," Proc. IEEE/RSJ IROS, pp. 407-412, 1995.
- [2] G. A. Pratt and M. M. Williamson, "Series elastic actuators," Proc. IEEE IROS, vol.1, pp. 399-406, 1995.
- [3] M. Okada, Y. Nakamura, and S. Ban, "Design of programmable passive compliance shoulder mechanism," Proc. IEEE ICRA, pp. 348-353, 2001.
- [4] Y. Yamada, K. Suita, K. Imai, H. Ikeda, and N. Sugimoto, "Human-robot contact in the safeguarding space," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 2. no. 4, pp.230-236, 1997.
- [5] H.-O. Lim and K. Tanie, "Human safety mechanisms of human-friendly robots: passive viscoelastic trunk and passively movable base," International Journal of Robotics Research, vol. 19, no. 4, pp. 307-335, 2000
- [6] H. Iwata, H. Hoshino, T. Morita, and S. Sugano, "A physical interference adapting hardware system using MIA and humanoid surface covers," Proc. of IEEE/RSJ

International Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1216-1221, 1999.

[7] K. Yoshida, C. Mavroidis, and S. Dubowsky, "Experimental research on impact dynamics of spaceborne manipulator systems," Preprints of the Fourth Int. Symp. On Experimental Robotics, ISER 95, Stanford, California, pp. 271-277, 1995 .

2.2.1.3 시스템 기술

[1] Erann Gat, Three-Layer Architectures. in D. Kortenkamp et al. eds. AI and Mobile Robots. AAAI Press, 1998.

[2] Nils J. Nilson, Principles of Artificial Intelligence, Palo Alto: Tioga, 1980.

[3] Rodney A. Brooks, A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 2, no.1, March 1986.

[4] Arkin, R.C., Integrating Behavioral, Perceptual, and World Knowledge in Reactive Navigation. Robotics and Autonomous System., vol.6, No.6, June, pp.24-31.

[5] Erran Gat. Reliable Goal-directed Reactive Control for Real-world Autonomous Mobile Robots. Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg, Virginia, 1991.

[6] R. P. Bonasso, Integrating Reaction Plans and Layered Competences through Synchronous Control. Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1991.

[7] Jonathan H. Connell, SSS : A Hybrid Architecture Applied to Robot Navigation. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2719-2724, 1992.

[8] Reid G. Simmons, Structured Control for Autonomous Robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.10, no.1, February, 1994.

[9] Sebastian Truen, Maren Bennewitz, Wolfram Burgart et al., MINERVA : A

Second-Generation Museum Tour-Guide Robot. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1999-2005, 1999.

3.2.1.1.나.서비스로봇의 경로계획 및 운동제어 기술

[1] Mattias Lindstrom, Anders Oreback, and Henrik I. Christensen, BERRA : A Research Architecture for Service Robots. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3278-3283, 2000.

[2] Ronald C.Arkin, Behavior-Based Robotics, The MIT Press, 1999

[3] Tadao Murata, Petri Nets : Properties, Analysis, and Applications, Proceedings of the IEEE, Vol.77, No.4, pp.541-580, 1989

3.2.1.1.다.

[1] J.-S. Gutmann, W. Burgard, D. Fox, K. Konolige, An Experimental Comparison of Localization Method, IROS 1998

[2] J.-S. Gutmann, C. Schlege, AMOS: Comparison of Scan Matching approaches for self-Localization in indoor Environments, EUROBOT 1996

[3] D. Fox, W. Burgard, F. Dellaert and S. Thrun, Monte Carlo Localization: Efficient Position Estimation for Mobile Robots, Proc. of AAAI 99, 1999

[4] D. Fox, W. Burgard, S. Thrun, A. B. Cremers, Position Estimation for Mobile Robots in Dynamics Environments, Proc. of AAAI 98, 1998

3.2.1.1.마. 주행시험결과

[1] Mattias Lindstrom, Anders Oreback, and Henrik I. Christensen, BERRA : A Research Architecture for Service Robots. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3278-3283, 2000.

[2] Ronald C.Arkin, Behavior-Based Robotics, The MIT Press, 1999

[3] Tadao Murata, Petri Nets : Properties, Analysis, and Applications, Proceedings of

the IEEE, Vol.77, No.4, pp.541-580, 1989

3.2.1.1.사 이동로봇의 calibration

[1] J.Borenstein & L.Feng , Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots , IEEE TRAN., Robotics and Auto., Vol 12, No. 6,

[2] N. Roy and S. Thrun, Online Self-Calibration For Mobile Robots, ICRA, 1999

[3] K. Komoriya and E.Oyama, "Position estimation of a mobile robot and systems", IROS 1994, 143-149

[4] J.Borenstein and Y. Koren, "A mobile platform for nursing robots", IEEE Trans. Ind. Electron. vol, 32, pp 73-79, 1987

[5] I.J.Cox., "Blanche an experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle", IEEE Trans, R.A. vol 7, pp193-204, 1991

[6] H.R. Everret, "Sensors for mobile robots", A.K.Peters, Ltd, Wellesley, 1995

3.2.1.2.나 psr 2manipulator 개발

[1] T. Motita and S. Sugano, "Development of one-D.O.F. robot arm equipped with mechanical impedance adjuster," Proc. IEEE/RSJ IROS, pp. 407-412, 1995.

[2] G. A. Pratt and M. M. Williamson, "Series elastic actuators," Proc. IEEE IROS, vol.1, pp. 399-406, 1995.

[3]M. Okada, Y. Nakamura, and S. Ban, "Design of programmable passive compliance shoulder mechanism," Proc. IEEE ICRA, pp. 348-353, 2001.

[4] Y. Yamada, K. Suita, K. Imai, H. Ikeda, and N. Sugimoto, "Human-robot contact in the safeguarding space," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 2. no. 4, pp.230-236, 1997.

- [5] H.-O. Lim and K. Tanie, "Human safety mechanisms of human-friendly robots: passive viscoelastic trunk and passively movable base," *International Journal of Robotics Research*, vol. 19, no. 4, pp. 307-335, 2000
- [6] H. Iwata, H. Hoshino, T. Morita, and S. Sugano, "A physical interference adapting hardware system using MIA and humanoid surface covers," *Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1216-1221, 1999.
- [7] K. Yoshida, C. Mavroidis, and S. Dubowsky, "Experimental research on impact dynamics of spaceborne manipulator systems," *Preprints of the Fourth Int. Symp. On Experimental Robotics, ISER 95, Stanford, California*, pp. 271-277, 1995 .

3.2.1.2.라 조작을 위한 대상물체 측정

- [1] D. Scharstein, A. J. Briggs, Real-time recognition of self-similar landmarks, *Image and Vision Computing*, 19(11):763-772, September 2001
- [2] C. Harris and M. Stephens, A Combined Corner and Edge Detection, *Proc 4th Aley Vision Conf. Manchester*, August 1988, pp 189-192
- [3] Peter I. Corke, Video-Rate Robot Visual Servoing, *Visual Servoing*, 1993, pp 257-283
- [4] Radu Horaud, Fadi Dornaika, Object Pose: The Link between Weak Perspective, Paraperspective, and Full Perspective, *International Journal of Computer Vision* 22(2), pp173-189, 1997

3.2.1.2.마 로봇손 개발

- [1] Mason and Salisbury. *Robot hands and the mechanics of manipulation*. MIT Press 1985
- [2] Jacobsen, S. C. et al. 1986, Design of the Utah/MIT dexterous hand, *Proc. IEEE*

Conf. Robotics and Automation, pp. 1520-1532

[3] Nakamura Y. Advanced Robotics, Redundancy and Optimization, Addison-Wesley

[4] Nguyen V.D. The synthesis of stable force-closure grasps, MIT Technical report 905

[5] Laliberte, T and Gosselin, C.M. Simulation and design of underactuated mechanical hands, Mech. Mach. Theory. 33(12), 39-57, 1998

[6] Kato, Ichiro 1982, Mechanical Hands Illustrated, Survey Japan

[7] Gosselin, C.M. et al. Analysis of underactuated Mechanical Grippers, J. Mechanical Design, Sep. vol 123, ASME 2001

[8] Gosselin, et al. US patent 5762390, 1998

[9] 이형진, 연세대학교 석사논문, 다양한 물체를 파지 할 수 있는 세 손가락 로봇핸드의 설계 및 제어, 2001

[10] Bicchi, A., " Hand for dextrous manipulation and robust grasping : a difficult road toward simplicity", IEEE Trans. Robot. Automat. Vol. 16, No 6, Dec. 2000

[11] Hanafusa, H. and Asada, H., "A robot hand with elastic fingers and its application to assembly process", Proc. IFAC Symp. on Information and Control Problems in Manufacturing Technology, pp. 127-138, 1977

[12] Salisbury, J. K. and Mason, M. T., " Robot hands and the mechanics of manipulation", The MIT Press, 1985

[13] Salisbury, J. K. and Roth, B., " Kinematic and force analysis of articulated mechanical hands", ASME J. Mech. Trans. Automation Design 105:35-41, 1983

[14] Salisbury, J. K. and Craig, J. J., "Articulated hands: force control and kinematic

issues", Int. J. Robot. Res. 1(1): 4-17, 1982

[15] Jacobson, S. C. et al. , " Design of the Utah/MIT dexterous hand", Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 1520-1532, 1986

[16] Kawasaki, H. et al, "Develop of an anthropomorphic robot hand driven by built-in servo-motors", Proc. of the 3rd Int. Conf. on Advanced Mechanics, Japan, pp. 215-220, 1998 JSME

[17] Lin, L. and Huang, H., " Mechanism design of a new multifingered robot hand", Proc. IEEE Inter'l Conf. Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota pp. 1471-1476, 1996

[18] Ulrith, N. T., " Method and apparatus for mechanically intelligent grasping", Unite State Patent No. 4,957,320 , 1990

[19] <http://www.barretttechnology.com/robot/products/hand/handfram.htm>

[20] Gosselin, C. M. et al., "Underactuated mechanical finger with return actuation", Unite State Patent No. 5,762,390 1998

[21] http://wwwrobot.gmc.ulaval.ca/recherche/theme04_a.html

[22] Munsang Kim, Sungchul Kang, Sooyong Lee, Woojin Chung, Kyungrae Cho, and Chong-won Lee, " Development of a humanoid robot centaur : Design, human interface, planning and control of its upper-body", In Proc. of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics , Tokyo, Japan, October 1999.

[23] Kato, Ichiro ," Mechanical hands illustrated", survey japan ,1982

[24] Doebelin, E. O., "Measurement systems - application and design ", McGraw-Hill, 1990

[25] Woojin Chung, Hyungjin Lee, Munsang Kim, Chong-won Lee, and Bongsoo Kang,

"Design and control of a dexterous multi-fingered robot hand", Proceedings of 2001 International conference on Control, Automation and Systems, pages 472-475, Cheju island, Korea, Oct 2001.

[26] Woojin Chung, Donghee Lee, Changjoo Lee, Gunhee Kim, Hyungjin Lee, Kihwan Kim, Munsang Kim and Chongwon Lee, " Development of the public service robot PSR-1", In Proc. of 2001 Service Robot Workshop, pages 14-19, Pyongchang, Korea, November 2001.

[27] Kyowa strain gages catalogue, 1999

[28] Craig, John J., " Introduction to Robotics ", Addison Wesley, 1989

[29] Gear, James M., Timoshenko P. S., " Mechanics of Materials - third edition", International Thomson Publishing, 1995

3.2.1.3.나 PSR의 제어구조

[1] Mattias Lindstrom, Anders Oreback, and Henrik I. Christensen, BERRA : A Research Architecture for Service Robots. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3278-3283, 2000.

[2] Ronald C.Arkin, Behavior-Based Robotics, The MIT Press, 1999

[3] Tadao Murata, Petri Nets : Properties, Analysis, and Applications, Proceedings of the IEEE, Vol.77, No.4, pp.541-580, 1989

2. 이동형 정보서비스로봇 개발

나. Visual navigation

[1] D. Kriegman and T. Binford, Generic Models for Robot Navigation, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 746-751, 1988.

[2] D. Kriegman, E. Triendle and T. Binford, Stereo Vision and navigation in Buildings for Mobile Robots, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 6, pp.

792-803, 1989.

- [3] C. Jennings, Don Murray and J. Little, Cooperative Robot Localization with Vision-based Mapping, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2659-2665, 1999.
- [4] G. D. Hager and C. Rasmussen, Robot navigation using image sequences, In Proceeding, AAAI, pp.938-943, 1996.
- [5] F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, Monte Carlo Localization for Mobile Robots, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999.
- [6] Michael Isard and Andrew Blake, CONDENSATION - conditional density propagation for visual tracking, Int. J. Computer Vision, Vol. 29, no. 1, pp. 5-28, 1998.
- [7] U. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi, A stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 384-389, 1990.
- [8] S.Yuta, S.Suzuki, Y.Saito and S.Iida, "Implementation of an Active Optical Range Sensor Using Laser Slit for In-Door Intelligent Mobile Robot", IEEE/RSJ In'tl Workshop on IROS '91, Nov.3-5, 1991.

4. Visual interface

(1) Face detection and face recognition

- [1] C. Garcia and G. Tziritas, "Face Detection using Quantized Skin Color Regions Merging and Wavelet Packet Analysis", IEEE Trans. Multimedia, vol.1, no.3, Sep. 1999.
- [2] E. Hjelm, B.K.Low, "Face Detection : A Survey", Computer Vision and Image Understanding no.83, pp.236-274, 2001.
- [3] J. Karlekar, U.B. Desai, "Finding Faces in Color Images using Wavelet transform", Image Analysis and Processing, Int'l, Conf. 1999.
- [4] R. Brunelli, T. Poggio, "Face recognition: Features versus templates", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intell., vol.15, Oct. 1993.
- [5] H.A. Rowley, S. Balula, and T. Kanade, "Neural network-based face detection", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intell., vol.20, 1998.
- [6] W.Zhao, R.Chellappa, A.Rosenfeld, P.J.Phillips, "Face Recognition : A Literature Survey", TR 2000.
- [7] B. Moghaddam, A.P. Pentland, "Probabilistic visual learning for object detection",

IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intell., vol.17, July. 1997.

- [8] Francois Fleuret Donald Geman, "Coarse-to-Fine Face Detection", Avant-Projet IMEDIA, June 2000.
- [9] Todd K. Moon, "Expectation-Maximization Algorithm", IEEE Signal Processing Magazine, Nov. 1996.
- [10] 삼성전자 종합기술원, "휴먼 인식 및 합성(Human recognition and Animation) - 과학 기술부 최종보고서", pp.9-12, 1998.

라. 음원 방향검출 및 음성인식 시스템

- [1] S. S. Ge and Y. J. Cui, "New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning", IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL. 16, NO. 5, OCTOBER 2000, pp. 615-620
- [2] M. Lindstrom, A. Oreback and H. I. Christensen, "BERRA: A Research Architecture for Service Robots"
- [3] M. Andersson, A. Oreback, M. Lindstrom and H. I. Christensen, "ISR: An Intelligent Service Robot"
- [4] Kazuhiro Nakadai, Hiroshi G. Okuno, Hiroaki Kitano: Auditory Fovea Based Speech Separation and Its Application to Dialog System Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2002), to be appeared, IEEE, Lausanne, Swiss, Oct. 2002.
- [5] Kazuhiro Nakadai, Ken-ichi Hidai, Hiroshi G. Okuno, Hiroaki Kitano: Real-Time Speaker Localization and Speech Separation by Audio-Visual Integration Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002), pp.1043-1049, Washington D.C., May. 2002.

제 3 절 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발

1. 인간친화형 소프트 로봇팔의 구현

- [1] Daniel E. Whitney, 1987, "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control," *The International Journal of Robotics Research*, vol.6, No.1, pp. 3-14
- [2] H. Asada and J. -J. E. Slotine, 1986, *Robot Analysis and Control*, A Wiley-Interscience Publication, chapter 7
- [3] Salisbury, J. K., 1980, "Active stiffness control of manipulator in Cartesian coordinates", *Proc. 19th IEEE Conf. On Decision and Contr*
- [4] Whitney, D. E., 1977(June), " Force feedback control of manipulator fine motions" *ASME J. Dyn. Sys., Meas., Contr.*, pp 91-97
- [5] Neville Hogan, 1985, "Impedance Control: An approach to manipulation, Part I II III", *Trans Of ASME, J. Dyn. Sys., Meas., Contr*, vol. 107, pp. 1-24
- [6] Kiyoshi Ohisi, Masaru Miyazaki, Masahiro Fujita and Yasumasa Ogino, 1991, " H^∞ observer based force control without force sensor", in *Proc. IEEE IECON' 91*, pp. 1049-1054
- [7] Toshiyuki Murakami, Ryo Nakamura, Fangming Yu and Kouhei Ohnishi, 1993, "Force sensorless Impedance Control By disturbance observer," in *Proc. IEEE Power Conversion Conference '93*, pp. 352-.357
- [8] K. S .Eom, I. H. Suh, W. K. Chung, S. -R. Oh, 1998, "Disturbance Observer Based Force Control of Robot Manipulator without Force Sensor," *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 3012-3017
- [9] Brian Armstrong, Oussama Khatib and Joel Burdick, 1986, "The explicit dynamic model and inertial parameters of the PUMA 560 arm," *IEEE Int. Conference on Robotics and Automations*, pp. 510-518
- [10] William T. Townsend, 1988, " The Effect of Transmission Design on Force-Controlled Manipulator Performance " Ph.D. Thesis, MIT
- [11] K. Youcef-Toumi and Osamu Ito, 1990, "A time delay controller for systems with unknown dynamics," *Trans. Of ASME, J. Dyn. Sys., Meas., Contr*, vol. 112, No. 1, pp. 133-142
- [12] T. C. Hsia and L. S. Gao, 1990, "Robot manipulator control using decentralized linear time-invariant time-delayed joint controllers," *IEEE Int. Conference on Robotics and Automations*, pp. 2070-2075
- [13] 권오석, 2001, "시간지연제어시스템의 안정성 해석", M.S. Thesis, 한국과학기술원 기계공학과
- [14] Dean C. Karnopp, Donald L. Margolis and Ronald C. Rosenberg, 1990, *System Dynamics: A Unified Approach*, 2ed, Wiley-Interscience Publication
- [15] 박석호, 1995, "강한 비선형성(포화요소/마찰)을 갖는 시스템의 시간지연제어에 관한 연구",

M.S. Thesis, 한국과학기술원 기계공학과

- [16] Hiroaki Gomi, Mitsuo Kawato, 1997, " Human arm stiffness and equilibrium-point trajectory during multi-joint movement", *Biological Cybernetics*, vol.76, pp 163-171
- [17] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histogram," IEEE Trans. on SMC(9), pp. 62-66, Jan. 1979.
- [18] J. C. Rosier 외, "Rehabilitation robotics. The MANUS concept", Fifth International Conference on Advanced Robotics - '91 ICRA Jun 19-22 1991
- [19] Eugenio Guglielmelli 외, "Modular and distributed supervisory system for a semi-autonomous personal robot for household applications", International conference on Advanced robotics, Proceedings, ICRA Jul 7-9 1997
- [20] Kazuhiko Kawamura, "Intelligent robotic systems in service of the disabled", IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering 3 1 Mar 1995 p 14-21

2. Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

- [1] Z. Bien et al., "Human-friendly Robotic Human/Machine Interaction System (KARES II) for the Disabled - Part I: System Overview and Subsystem Design," submitted for Special Issue on Rehabilitation Robotics in Autonomous Robots.
- [2] W.-K. Song, H. Lee, Z. Bien, "KARES: Intelligent Wheelchair-mounted Robotic Arm System using Vision and Force Sensor", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.28, No.1, pp.83-94, 31 July 1999.
- [3] R.C. Harrell, D.C. Slaughter, and P.D. Adsit, "A Fruit-Tracking System for Robotic Harvesting", *Machine Vision and Applications*, Vol. 2, pp. 69-80, 1989.
- [4] Jeong-Su Han, Won-Chul Bang and Z. Zenn Bien, "New Feature Set Selection Algorithm based on Soft Computing Techniques and its Application to EMG Pattern Classification," Accepted to *International Journal of Fuzzy Optimization and Decision Making*, will be published
- [5] W.-K. Song, "Intelligent Visual Servoing using Space Variant Vision with Application for Rehabilitation Robots," Ph.D. Thesis, KAIST, Korea, 2001.
- [6] P.I. Corke, "Visual Control of Robot Manipulators - A Review", pp 1-31. *Visual Servoing*, World Scientific. 1993.
- [7] *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 5, No. 4, December, 1998.s
- [8] P. Abolmaesumi, S.E. Salcudean, and W.H. Zhu, "Visual Servoing for Robot-assisted Diagnostic Ultrasound", TH-CXH-36, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, July 23-28, 2000.
- [9] R.A. Peters II, M. Bishay, M. E. Cambron, and K. Negishi, Visual servoing for service robot , *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 213-224, vol. 18, 1996.
- [10] S. Chen, Z. Kazi, R. Foulds, and D. Chester, Color and three-dimensional vision-based assistive telemanipulation , *Image and vision computing*, vol. 16, pp 265-274, 1998.

- [11] J.K. Tsotsos et. al, A visually-guided robot for physically disabled children , *Image and Vision Computing*, vol. 16, pp. 275-292, 1998.
- [12] E. Nattel and Y. Yeshurun, "An Efficient Data Structure for Feature Extraction in a Foveated Environment", *First IEEE International Workshop, BMCV 2000*, pp.217-226, Seoul, Korea, May 2000.
- [13] S.-I. Chien and I. Choi, "Face and Facial Landmarks Location Based on Log-Polar Mapping", *First IEEE International Workshop, BMCV 2000*, pp.379-386, Seoul, Korea, May 2000.
- [14] A. Mehrabian, "Communication without words," *Communication: Concepts and Process*, pp. 106-114, Prentice-Hall, Inc., 1971.
- [15] Y.-L. Tian et al., "Recognizing action units for facial expression analysis," *IEEE PAMI* 23(2): 97-115, 2001.
- [16] M. Pantic et al., "Expert System for Automatic Analysis of Facial Expression," *IJCV* 18(11): 881-905, 2000.
- [17] G. N. Saridis and T. Gootee, "EMG pattern analysis and classification for a prosthetic arm," *IEEE Tr. Biomed. Eng.*, vol. BME-29, pp. 403-409, June 1982
- [18] Daniel Graupe and William K. Cline, "Functional Separation of EMG Signals via ARMA Identification Methods for Prosthesis Control Purposes," *IEEE Tr. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-5, no. 2, pp. 252-259, March 1975
- [19] Sukhan Lee and G. N. Saridis, "The control of a Prosthetic Arm by EMG Pattern Recognition," *IEEE Tr. on Automatic control*, vol. AC-29, no. 4, pp. 290-302, April 1984
- [20] John V. Basmajian and Carlo J. De Luca, *Muscle Alive*, Williams & Wilkins, fifth edition, 1985
- [21] E. Shwedyk, R. Balasubraminian, and R. N. Scott, "A nonstationary model for the electromyogram," *IEEE Tr. on Biomed. eng.*, vol. BME-24, pp. 417-424, Sept., 1977
- [22] D. S. Dorcas, V. A. Dunfield and R. M. Scott, "Improved myoelectric control system," *Med. Biol. Eng.*, vol. 8, pp. 333-341, 1970
- [23] Osamu Fukuda, Toshio Tsuji, Akira Otsuka and Makoto Kaneko, "An EMG-based Rehabilitation Aid for Prosthetic Control," *IEEE Int'l Workshop on Robot and Human Communication*, vol. 1, pp. 214-219, Takamutsu, Kagawa, Japan, Sep.30- Oct.2, 1998
- [24] Yong-Sheng Yang, F. K. Lam, Francis H. Y. Chan, Yuan-Ting Zhang, Philip. A. Parker, "A New Fuzzy Approach for Pattern Recognition with Application to EMG classification," *The 1996 IEEE Int'l Conf. on Neural Networks*, vol. 2, pp. 1107- 1114, New York, USA, 1996
- [25] K-H choi, Y-S Byun, and S-H park, "Estimation of Proportional Control Signal from EMG," *J. of KOSOMBE*, vol. 5, no. 2, pp. 133-141
- [26] E.A. Clancy and N. Hogan, "Single Site Electromyograph Amplitude Estimation," *IEEE Tr.*

- on Biomedical Eng., vol. 41, no. 2, pp. 159-167, 1994
- [27] J-J Luh, G-C Chang, C-K Cheng, J-S Lai, and T-S Kuo, "Using Time-Varying Autoregressive Filter to Improve EMG Amplitude Estimator," IEEE-EMBC AND CMBEC, pp.1343-1344, 1997
- [28] <http://www.robotics.co.kr/a.htm>
- [29] C. Martens, "Draft of KARES II Control Architecture," Report on KARES II, Oct. 12, 2001.
- [30] C. Martens et al., "Concept for a Modified Hybrid Multi-Layer Control-Architecture for Rehabilitation Robots," Int'l Workshop on HWRS2002, Jan. 2002.
- [31] M. Tistarelli et al., "On the advantages of polar and log-polar mapping for direct estimation of time-to-impact from optical flow," IEEE PAMI 15(4), Apr. 1997.
- [32] M. Bolduc et al., "A review of biologically motivated space-variant data reduction models for robotic vision," CVIU 69(2): 170-184, Feb. 1998.
- [33] B.K.P. Horn, Robot Vision, MIT press, 1987.
- [34] J.-Y. Choi, "Design of Behavior-Based Controller using a Novel Camera Head and its Application to Service Robots," M.S. Thesis, KAIST, Korea, 2001.
- [35] Y. Ohta, T. Kanade and T. Sakai, "Color Information for Region Segmentation", CGIP, vol. 13, pp. 222-241, 1980.
- [36] B. Zarit et al., "Comparison of five color models in skin pixel classification," RATFG'99, pp. 58-63, 2000.
- [37] Dae-Jin Kim, "Image-based Personalized Facial Expression Recognition System using Fuzzy Neural Networks," Ph.D. Proposal, KAIST, Korea, Jun. 2002.
- [38] F. Fleuret et al., "Coarse-to-fine visual selection," [citeseer.nj.nec.com /fleuret99 coarsetofine.html](http://citeseer.nj.nec.com/fleuret99/coarsetofine.html)
- [39] A.K. Jain et al., "Object Matching Using Deformable Templates," IEEE Tr. on PAMI 18(3): 267-278, 1996.
- [40] D.-J. Kim and Z. Bien, "Image-based Personalized Facial Expression Recognition using Fuzzy Neural Networks," submitted for ROMAN2002.
- [41] M. Lyons, S. Akamatsu, M. Kamachi, and J. Gyoba, "Coding facial expressions with Gabor wavelets," Proc. of Third IEEE Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition, pp. 200 -205, 1998.
- [42] W.-K. Song et al., "Visual servoing for a user's mouth with effective intention reading in a wheelchair-based robotic arm," IEEE ICRA2001, 2001
- [43] Carl F.R. Weiman, "Tracking Algorithm Using Log-Polar Mapped Image Coordinates", SPIE vol. 1192 Intelligent Robots and Computer Vision VIII: Algorithms and Techniques, pp. 843-853, 1989.
- [44] 김대진 외, "퍼지 신경망과 강인한 영상 처리를 이용한 개인화 얼굴 표정 인식 시스템," pp. 25-28, 대한전자공학회 하계학술대회, 2002.

- [45] Y.-L. Tian et al., "Recognizing action units for facial expression analysis," IEEE PAMI 23(2): 97-115, 2001.
- [46] P. Ekman et al., "Facial Action Coding System," HIL, 1978.
- [47] U. Bhattacharya et al., "Recognition of Handprinted Bangla Numerals Using Neural Network Models," Proceedings of AFSS2002, pp. 228-235, India, 2002.
- [48] C.T. Lin, "Neural Fuzzy Control Systems with Structure and Parameter Learning," World Scientific, 1994.
- [49] Z. Bien et al., "Human-friendly Robotic Human/Machine Interaction System (KARES II) for the Disabled - Part II: Realization and Clinical Evaluation," submitted for Special Issue on Rehabilitation Robotics in Autonomous Robots.
- [50] Butterfass. J., Grebenstein. M., Liu. H. and Hirzinger, G., "DLR-Hand II: next generation of a dextrous robot hand", Proc. of Int'l conf. Robotics and Automation, 2001. Vol.1, pp. 109-114
- [51] Keinosuke Fukunaga, Introduction to statistical pattern recognition, Academic Press, first edition, 1972
- [52] Arnon Cohen, Biomedical (vol 2), CRC Press Inc., 1986
- [53] 장영건, 권장우, 한영환, 장원석, 홍승홍, "신경회로망과 확률모델을 이용한 근전도 신호의 패턴 분류에 관한 연구," 전자공학회지, 제 28권, 제 10호, pp. 85-95, 1991
- [54] Daisuke Nishikawa, Wenwei Yu, Hiroshi Yokoi and Yukinori Kakazu, "EMG Prosthetic Hand Controller Discriminating Ten Motions using Real-Time Learning Method," IROS '99, vol. 3, pp. 1592-1597, Kyungju, Korea, 1999
- [55] Brenda Bigland and O. C. J. Lippold, "The relation between force, velocity and integrated electrical activity in Human Muscles," J. Physiology. vol. 123, pp. 214-224, 195
- [56] 김성환 외, "골격근의 근전도 신호 분석을 위한 디지털 신호처리 시스템의 설계," 의공학회지, 제 17권, 제 2호, pp. 155-164, 1996
- [57] P. Simpson, Fuzzy Min-Max Neural Networks- Part 1: Classification, IEEE Tr. on Neural Networks, vol. 3, pp. 776- 786, Sep., 1992
- [58] 최홍진, "혼돈이론을 이용한 근전도신호 해석 및 자동의수의 제어", 포항공대 석사학위논문, 1998
- [59] D.E. Johnson, "Rapid Practical Designs of Active Filters", John Wiley & Sons, 1975

3. 눈동자 추적에 의한 대상물체 지적(Eye-mouse 시스템) 및 인터페이스 기술 개발

- [1] Y. Ebisawa, "Improved Video-Based Eye-Gaze Detection Method", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 1998
- [2] K. N. Kim and R.S. Ramakrishna, "Vision-Based Eye-Gaze Tracking for Human Computer Interface", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1999

- [3] J. Y. Kim, L. S. Kim, and S. H. Hwang, "An Advanced Contrast Enhancement using Partially Overlapped Sub-Block Histogram Equalization", IEEE International Symposium on Circuit and Systems, 2000
- [4] C. C. Yang and J. J. Rodriguez, "Efficient Luminance and Saturation Processing Techniques for Bypassing Color Coordinate Transformations", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1995
- [5] D. Crevier, "Hue-Based Segmentation of Color Images", Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1993
- [6] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos, "Snakes: Active Contour Models", International Journal of Computer Vision, 1988
- [7] A. Fitzgibbon, M. Pilu, and R. B. Fisher, "Direct Least Square Fitting of Ellipses", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence", 1999
- [8] A. S. Aguado, M. E. Montiel and M. S. Nixon, "Ellipse Detection via Gradient Direction in the Hough Transform", Image Processing and Its Applications, 1995
- [9] A. L. Yarbus, "Eye Movements and Vision", Plenum Press, 1967
- [10] K. F. Arrington, "ViewPoint Eye Tracker", Arrington Research, 1997
- [11] "Laser Safety Information Bulletin", Laser Institute of America, 2001
- [12] "ANSI Z136.1-2000", American National Standard for Safe Use of Lasers, 2000
- [13] "The Flock of Birds", Ascension Technology Corporation, 1999
- [14] A. J. Glenstrup and T. Engell-Nielsen, "Eye Controlled Media: Present and Future State", University of Copenhagen, 1995
- [15] S. Esaki, Y. Ebisawa, A. Sugioka and M. Konishi, "Quick Menu Selection using Eye Blink for Eye-Slaved Nonverbal Communicator with Video-Based Eye-Gaze Detection", EMBS, 1997
- [16] R. A. Colburn, M. F. Cohen, and S. M. Drecker, "The Role of Eye Gaze in Avatar Mediated Conversational Interfaces", Microsoft Research, 2000
- [17] J. A. Stark, "Adaptive Image Contrast Enhancement using Generalizations of Histogram Equalization", IEEE Trans. on Image Processing, 2000
- [18] S. Pastoor, J. Liu, and S. Renault, "An Experimental Multimedia System Allowing 3-D Visualization and Eye-Controlled Interaction Without User-Worn Devices", IEEE Trans. on Multimedia, 1999
- [19] C. H. Morioto, D. Koons, A. Amir, M. Flickner, and S. Zhai, "Keeping an Eye for HCI", Computer Graphics and Image Processing, 1999
- [20] K. T. Lee, "Eye-controlled Human/Computer Interface using the Line-of-sight and the Intentional blink", Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1995
- [21] W. Huang, B. Yin, C. Jiang, and J. Miao, "A New Approach for Eye Feature Extraction using 3D Eye Template", Proceedings of 2001 International Symposium on Intelligent

Multimedia, Video and Speech Processing, 2001

- [22] X. Xie, R. Sudhakar, and H. Zhuang, "On Improving Eye Feature Extraction using Deformable Templates", *Pattern Recognition*, 1994
- [23] D. H. Kim, "Development of an Eye-Gaze Tracking System using Video Image Sequence and Magnetic Sensory Information", Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2000
- [24] T. Ohno, "Feature of Eye Gaze Interface for Selection Tasks", *Computer Human Interaction*, 1998
- [25] J. Merchant, R. Morrissette, and J. Porterfield, "Remote Measurement of Eye Direction Allowing Subject Motion Over One Cubic Foot of Space", *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 1974
- [26] J. R. Lacourse, F. C. Hludik, JR, "An Eye Movement Communication-Control System for the Disabled", *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 1990
- [27] R. S. Allison, M. Eizenman, and Bob S. K. Cheung, "Combined Head and Eye Tracking System for Dynamic Testing of the Vestibular System", *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*
- [28] X. Xie, R. Sudhakar, H. Zhuang, "Real-Time Eye Feature Tracking from a Video Image Sequence using Kalman Filter", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1995
- [29] A. L. Yuille, P. W. Hallinan, and D. S. Cohen, "Feature Extraction from Faces using Deformable Templates", *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1989
- [30] R. Jain, R. Kasturi, and B. G. Schunck, "Machine Vision", McGraw-Hill, 1995
- [31] R. C. Gonzalez, and R. E. Woods, "Digital Image Processing", Addison-Wesley, 1993
- [32] "Performance Standards for Lasers", Dept. of FDA, CDRH, 1997
- [33] R. Stiefelhagen, J. Yang, A. Waibel, "Tracking Eyes and Monitoring Eye Gaze", *Interactive Systems Laboratories*, 1996
- [34] R. Stiefelhagen, J. Yang, A. Waibel, "A Model-Based Gaze Tracking System", *IEEE International Joint Symposia on Intelligence and Systems*, 1996
- [35] K. A. Mason, "Control Apparatus Sensitive to Eye Movement", U.S.Patent 3,462,604, August, 1969.
- [36] T. E. Hutchinson, "Human-Computer Interaction Using Eye-Gaze Input", *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, Vol. 19, No. 6, pp. 1527-1533, 1989.
- [37] D. Cleveland, "Method and Apparatus for Locating Image Features", U.S.Patent 5,231,674, July, 1993.
- [38] A. Sugioka, Y. Ebisawa, and M. Ohtani, "Noncontact Video-based Eye-gaze Detection Method Allowing Large Head Displacements", *IEEE Int. Conf. on Medicine and Biology Society*, pp.526-528, 1996.
- [39] S. Pastoor, J. Liu, and S. Renault, "An Experiment Multimedia System Allowing 3-D

- Visualization and Eye-Controlled Interaction Without User-Worn Devices", IEEE Trans. on Multimedia, Vol. 1, No. 1, pp. 41-52, 1999.
- [40] J. Liu, "Determination of the Point of Fixation in a Head-Fixed Coordinate System", Int. Conf. on Pattern Recognition, Vol. 1, pp.501-504, 1998.
- [41] C. H. Morimoto, et. al. "Keeping an Eye for HCI", Proc. on Computer Graphics and Image Processing, pp.171 -176, 1999.
- [42] R. Jain, R. Kasturi, and B. G. Schunck, "Machine Vision", McGraw-Hill, 1995.
- [43] Y. Matsumoto and A. Zelinsky, "Real-time Face Tracking System for Human-Robot Interaction", IEEE Int. Conf. on System, Man, and Cybernetics, pp. 830-835, 1999.
- [44] A. Azarbayejani, T. Starner, and B. Horowitz, and A. Pentland, "Visually Controlled Graphics", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 6, pp.602-605, 1993.
- [45] P. Ballard and G. C. Stockman, "Controlling a Computer via Facial Aspect", IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, Vol. 25, No. 4, pp. 669-677, 1995.
- [46] D. H. Yoo, Y. J. Lee, G. W. Chu, J. H. Kim, D. H. Kim, M. J. Chung, "Assistive Robot Control by an Eye-mouse System for the Disabled", World automation congress, pp.363-368, 2000.
- [47] D. H. Kim, J. H. Kim, D. H. Yoo, Y. J. Lee, and M. J. Chung, "A Human-Robot Interface Using Eye-Gaze Tracking System for People with Motor Disabilities", Trans. on Control, Automation, and Systems Engineering, Vol. 3, No. 4, pp.229-235, 2001.
- [48] Z. Bien, W. K. Song, D. J. Kim, J. S. Han, J. Y. Choi, H. E. Lee and J. S. Kim, "Vision-based control with emergency stop through EMG of the wheelchair-based rehabilitation robotic arm, KARES II", in Proceedings of the International Conference on Rehabilitation Robotics, Evry, pp. 177-185, April 2001.
- [49] M. Okutomi and T. Kanade "A Multiple-Baseline Stereo," IEEE Tans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 4, pp. 353-363, 1993
- [50] J. Martin and J. L. Crowley, "Experimental Comparison of Correlation Techniques," Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems, Karlsruhe, Germany, 1995
- [51] O. Faugeras, Three dimensional computer vision, The MIT Press, 1993

4. Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 개발

- [1] Bergasa, L.M.; Mazo, M.; Gardel, A.; Barea, R.; Boquete, L. Commands generation by face movements applied to the guidance of a wheelchair for handicapped people *Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference on, Volume: 4, 2000*, Page(s): 660 -663 vol.4
- [2] Kuno, Y.; Murashima, T.; Shimada, N.; Shirai, Y., Interactive gesture interface for intelligent wheelchairs, *ICME 2000. IEEE International Conference*, Page(s): 789 -792

vol.2

- [3] Ishimatsu, T.; Irie, N.; Takami, O., Computer interface device for handicapped people using head movement , *10 Years PACRIM 1987-1997 - Networking the Pacific Rim. 1997 IEEE Pacific Rim Conference on* , Page(s): 273 -276 vol.1
- [4] Fujisawa, S.; Ohkubo, K.; Nishi, T.; Yoshida, T.; Shidama, Y.; Yamaura, H, . Fundamental research on human interface devices for physically handicapped persons ,*Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. IECON 97. 23rd International Conference on* , Volume: 3 , 1997 , Page(s): 1288 -1292 vol.3
- [5] Yue Li; Aissaoui, R.; Brienza, D.N.; Dansereau, J , Determination of generic body-seat interface shapes by cluster analysis , *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on* Volume: 8 Issue: 4 , Dec. 2000 , Page(s): 481 489
- [6] Linda Fehr , Adequacy wheelchair control interfaces for persons with severe disabilities: A clinical survey , *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol 37 No.3 May/June 2000
- [7] H. Wakaumi, K. Nakamura, and T. Matsumura, Development of an automated wheelchair guided by a magnetic ferrite marker lane, *J.Rehab. Res. Dev.*, vol. 29, no. 1, pp. 2734, 1992.
- [8] J. Crisman and M. Cleary, Progress on the deictic controlled wheelchair, , *Assistive Technology and Artificial Intelligence*, V. Mittal, H. Yanco, J. Aronis and R. Simpson, Eds. New York: Springer, 1998, pp.137-149.
- [9] Bourhis, G.; Pino, P. Mobile robotics and mobility assistance for people with motor impairments: rational justification for the VAHM project , *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on* Volume: 4 Issue: 1 , March 1996 ,Page(s): 7 12
- [10] Levine, S.P.; Bell, D.A.; Jaros, L.A.; Simpson, R.C.; Koren, Y.; Borenstein, J. , The NavChair Assistive Wheelchair Navigation System , *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on* Volume: 7 Issue: 4 , Dec. 1999 , Page(s): 443 451
- [11] R. Simpson, D. Poirot, and M. Baxter, The Hephaestus smart wheelchair system, , *Proc. 22nd Annu. RESNA Conf.*, Long Beach, CA,1999.
- [12] Mazo. M. , An integral system for assisted mobility [automated wheelchair] , *IEEE Robotics & Automation Magazine* , Volume: 8 Issue: 1 , March 2001 , Page(s): 46 56
- [13] Kyoobin Lee, Dong-Soo Kwon, Wearable Master Device for Spinal Injured Persons as a Control Device of Motorized Wheelchairs , *Jounal of Artificial Life and robot*,Vol.4 No.4, pp. 182-187, 2001
- [14] C.T. Morgan et al., Human Engineering Guide to Equipment Design , *McGraw-Hill Book Company, New York,1963*, pp553-555
- [15] Kuc, R.; Barshan, B. , Navigating vehicles through an unstructured environment with sonar , *Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference* , Page(s): 1422 -1426 vol.3
- [16] Gerald D.Mashin , A simple ultrasonic ranging system , *presentation record 102nd convention of audio engineering society*, pp1-11,1983

- [17] Kuc, R.; Barshan, B. Matthies, L.; Elfes, A. , Integration of sonar and stereo range data using a grid-based representation , *Robotics and Automation, 1988. Proceedings., 1988 IEEE International Conference* , Page(s): 727 -733 vol.2
- [18] Borenstein, J.; Koren, Y., Histogramic in-motion mapping for mobile robot obstacle avoidance , *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* , Volume: 7 Issue: 4 , Aug. 1991 , Page(s): 535 539
- [19] Borenstein, J.; Koren, Y. , The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots , *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* , Volume: 7 Issue: 3 , June 1991 , Page(s): 278 288
- [20] Thomas B. Sheridan Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control , *MIT Press*, 1992
- [21] Tahboub, K.A.; Asada, H.H. A semi-autonomous control architecture applied to robotic wheelchairs *Intelligent Robots and Systems, 1999. IROS '99. Proceedings. 1999 IEEE/RSJ International Conference on* , Volume: 2 , 1999 Page(s): 906 -911 vol.2

5. Hand-held master의 개발

- [1] Intuitive Surgical Inc., *US Patent* No. 5807377, Force-reflecting Surgical Instrument and Positioning Mechanism for Performing Minimally Invasive Surgery with Enhanced Dexterity and Sensitivity, 1998
- [2] Computer Motion Inc., *US Patent* No. 5855583, Method and Apparatus for Performing Minimally Invasive Cardiac Procedures, 1999
- [3] California Institute of Technology, *US Patent* No. 5828813, Six Axis Force Feedback Input Device, 1998
- [4] M.C. Cavusoglu, F. Tendick, M. Cohn, and S. Shankar Sastry, A Laparoscopic Telesurgical Workstation, *IEEE Trans on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 4, 1999
- [5] R.L. Williams II, J.M Henry, and M.A. Murphy, "Free and Constrained Motion Teleoperation Via Naturally-Transitioning Rate-to-Force Control," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Automat.*, pp.225-230, 1999

제 4 절 수직 철골 용접 로봇 시스템 개발

- [1] 이호길 외, Construction Robot 개발을 위한 기획사업, 통상산업부, 1997.
- [2] 建設用ロボット , 日本ロボット學會誌, 제8권, 2호, 1990.
- [3] 김종필 외, 건설공사 자동화 방안 연구, 과학기술처, 1992.
- [4] 森口五郎, et al., 圖解 鐵骨造, 市ヶ谷出版社, 1996.
- [5] 荻原忠治, et al., 鐵骨丸柱現場橫向き溶接用ロボットの開發と實用化, 溶接技術, Vol.40, 1992, pp.112- 115.
- [6] 和田惇, 建設ロボットの施工ノウハウ, 近代圖書(株), 1995, pp. 126-129.
- [7] 丸岡義臣, 福山國夫, 建築鐵骨現場における溶接ロボットの搬送システム, 溶接技術, Vol.44, 1996, pp.75-79.
- [8] 中込忠男, 建築鐵骨における溶接ロボットの適用と現状, 溶接技術, Vol.45, 1997, pp.74-79.
- [9] H. G. Lee, F. Miyazaki, S. Arimoto: "PDS control of Flexible Multi-Link Manipulators", SICE, Vol.33, pp479-486, 1989. (in Japanese)
- [10] 中込忠男, 建築鐵骨における溶接ロボットの適用と現状, 溶接技術, Vol.45, 1997, pp.74-79.
- [11] Y. Kiyohara, Application of latest arc welding robot with synchromotion and sensor, Robot, pp. 37-43, vol. 102, Jan. 1995.
- [12] 허장욱, 김재웅, 나석주, 이승영, 혼합개스 GMA용접용 아크신호를 이용한 용접선 추적에 관한 연구, 대한용접학회지, pp. 23-30, 1990.
- [13] 문승빈, 윤명균, 홍용준, 홍성진, 황찬영, 김동일, 6축 로봇트를 이용한 자동용접에서의 Arc Sensor 개발, 대한용접학회 춘계학술 발표, pp. 15-18, 1995.
- [14] U. Dilthey, U. Kahrstedt, and L. Stein, "Advanced arc sensor cuts programming time for welding robots," Fourth Int. Conf. Automated Welding Sys. in Manufacturing , U.K., Nov. 1991.(SA-twin arc sensor)
- [15] P. Sicard and M. D. Levine, "Joint recognition and tracking for robotic arc welding,"

IEEE Trans. Syst. Man Cybern., pp. 714-728, 1989. (Laser sensor tracking: Servo Robot)

- [16] R. Mitaka, "An Adaptive Welding System for Corner Joints Which Applies Joint Recognition by Deformable Template Matching, IAPR Workshop on Machine Vision Applications, Kawasaki, Japan., pp. 510-513, Dec., 1994.
- [17] J. Nakajima, T. Araya, M. Tsuji, and S. Sarugaku, Arc sensor for welding line tracking applied to welding robot, IIW Doc. XII-954-86, 1986.(Arc sensor: Frequency analysis)

여 백

특정연구개발사업 연구결과 활용계획서

사업명	중사업명	중점국가연구개발사업		
	세부사업명	서비스로봇 기술 개발		
과제명		서비스로봇 기술개발 사업단		
연구기관	한국과학기술연구원	연구책임자	이종원	
총연구기간	2000년. 9 월. 1 일. ~ 2002 . 8 월. 31 일. (24개월)			
총 연구비 (단위 : 천원)	정부출연금	민간부담금	합계	
	94,000천원		94,000천원	
기술분야	사업총괄			
참여기업				
공동연구기관				
위탁연구기관				
연구결과활용 (해당항목에(√) 표시)	1. 기업화 ()	2. 기술이전()	3. 후속연구추진(V)	4. 타사업에 활용()
	5. 선행 및 기초연구()	6. 기타목적활용(교육,연구)()	7. 활용중단(미활용)()	8. 기타()
<p>특정연구개발사업 처리규정 제 31조(연구개발결과의 보고) 제 2항에 의거 연구결과 활용계획서를 제출합니다.</p> <p>첨부 : 1. 연구결과 활용계획서 1부. 2. 기술요약서 1부</p> <p style="text-align: right;">2002년 7 월 31 일</p> <p style="text-align: right;">연구책임자 : 이 종 원 연구기관장 : 박 호 군</p> <p style="text-align: right;">(인) (직인)</p> <p>과학기술부장관 귀하</p>				

여 백

[첨부1]

연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

서비스로봇 2단계 사업은 1단계에서 수행된 설계 개념확인 (proof of concept)을 바탕으로 이를 성공적으로 실용화하는데 필요한 핵심기술을 개발하고 이를 시작품에 적용하여 실용성을 확인하는 단계로서 사업단은 이를 성공적으로 수행하기 위한 사업 총괄 수행관리와 국내외 급변하는 서비스로봇 기술환경변화에 대응하는 연구방향의 조향(navigation) 및 세부연구팀간의 연구정보 및 자원을 공유하게 하는 것을 목표로 한다. 사업총괄 및 수행관리에는 연구의 총괄계획 수립과 세부과제 수행관리가 포함되며 연구방향의 조향을 위하여 국내외 서비스로봇 기술현황 조사 및 연구사업방향의 지속적 update를 하며 연구정보 및 자원을 공유하기 위하여 기술교류 워크숍을 개최하고 연구주제별 SIG (Special Interest Group)을 운영한다.

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록)일자	발명자 (출원인)	출원국	비고

나. 프로그램 등록목록

프로그램 명칭	등록번호	등록일자	개발자	비고

다. 노하우 내역

라. 발생품 및 시작품 내역

연구교유 워크숍 Proceeding 2권

국제 서비스로봇 워크숍 Proceeding 1권

마. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적(필요시 별지사용)

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명	SCI게재 여부
		년 월 일				
계: 건수						

○ 학술회의 발표 실적(필요시 별지사용)

학술회의 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명
		년 월 일			
계: 건수					

3. 연구성과

1. 서비스로봇 수행총괄 관리 및 세부과제 진행관리의 성과로 차기년도 연구계획서가 구성되었으며
2. 국내외 기술현황 조사에 대한 보고서가 생산되었으며
3. 연구정보의 공유 및 연구 자원의 효율적 활용을 위하여
 - 2000 및 2001 서비스로봇 공동 워크숍을 주최하여 Proceeding이 발간되었고
 - Special Interest Group을 형성하여 3개 주제에 대한 연구회를 추진하고 연구결과에 대한 SIG 워크숍을 개최하여 Proceeding을 발간하였으며
 - Robot Dependability에 대한 IARP/IEEE-RAS 국제 워크숍을 한국에 유치하여 개최하였고 Proceeding을 발간하였음

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

가. 당해연도 활용계획(6하원칙에 따라 구체적으로 작성)

차기년도 연구계획에 반영됨

나. 활용방법

사업 수행 총괄관리 결과는 차기년도 서비스로봇 연구계획에 반영함
국내외 연구현황에 대한 조사결과는 국가적 차원의 첨단로봇 연구계획 작성에 활용됨.

다. 차년도이후 활용계획(6하원칙에 따라 구체적으로 작성)

5. 기대효과

향후 활용에 따른 기술적, 사회·경제적 파급효과(정량적 및 정성적으로 전문가
입장에서 구체적으로 작성)

- 예상매출액(단위: 백만원), 수입대체효과((단위: 백만원), 수출증대효과(단위:
백만원), 원가절감(단위: 백만원,기존대비%), 에너지절감효과(단위: 백만원,기
존대비%), 생산성 향상(단위: 백만원,기존대비%) 인력양성 또는 고용창출효
과(단위:명), 투자유치실적((단위: 백만원), 인프라구축 효과 등

6. 문제점 및 건의사항(연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선
점을 기재)

없음

[첨부2]

기술 요약서

■ 기술의 명칭

해당사항 없음

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호			
과제명			
사업명			
세부사업명			
연구기관		기관유형	
참여기관(기업)			
총연구기간			
총연구비	정부()천원	민간()천원	합계()천원
연구책임자 1	성명		주민번호
	근무기관 부서		E-mail
	직위/직급		전화번호
실무연락책임자	성명		소속/부서
	직위/직급		E-mail
	전화번호		FAX
	주소	(-)	

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

해당사항 없음

<기술적 특징>

(1)

(2)

(3)

[용도 · 이용분야]

(1)

(2)

(3)

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√로 표시)하여 주십시오)

<input type="checkbox"/>	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
<input type="checkbox"/>	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
<input type="checkbox"/>	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
<input type="checkbox"/>	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술

[기술개요]

기술명	
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	

[기술을 도출한 과제현황]

과제관리번호			
과제명	세부과제명		
사업명	중점국가연구개발사업		
세부사업명	서비스로봇 기술 개발		
연구기관		기관유형	
참여기관(기업)			
총연구기간			
총연구비	합계 : ()백만원 - 정부 : ()백만원 민간 : ()백만원		
연구책임자	소속		성명
	전화번호		E-mail
연구개발 주요내용			

특정연구개발사업 연구결과 활용계획서

사업명	중사업명	중점국가연구개발사업		
	세부사업명	서비스로봇 기술 개발		
과제명		이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발		
연구기관	한국과학기술연구원	연구책임자	김문상	
총연구기간		2000년. 9월. 1일. ~ 2002년. 8월. 31일. (24개월)		
총 연구비 (단위 : 천원)	정부출연금	민간부담금	합계	
	1,976,000천원	1,022,000천원	2,998,000천원	
기술분야		대형·복합 / 로봇 및 메카트로닉스 / 시스템		
참여기업		현대중공업, 현대자동차, 유진로보틱스		
공동연구기관		현대중공업		
위탁연구기관		서울대학교, 한국과학기술원, 고려대학교, 경희대학교		
연구결과활용 (해당항목에(√) 표시)	1. 기업화 ()	2. 기술이전(√)	3. 후속연구추진()	4. 타사업에 활용 ()
	5. 선행 및 기 초연구()	6. 기타목적활용 (교육연구)()	7. 활용중단(미활용)()	8. 기타()

특정연구개발사업 처리규정 제 31조(연구개발결과의 보고) 제 2항에 의거 연구결과 활용계획서를 제출합니다.

첨부 : 1. 연구결과 활용계획서 1부.
2. 기술요약서 8부

2002 년 7 월 31 일

연구책임자 : 김 문 상
연구기관장 : 박 호 군



과학기술부장관 귀하

여 백

[첨부1]

연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

(1) 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

최종목표 : 대형건물내에서 사용되는 빌딩용 도우미 로봇 개발

- navigation의 효율화 및 mobile manipulation을 효과적으로 수행하기 위한 전방향 이동로봇 및 인간형 로봇손 개발.
- 실시간 환경 인식에 따른 장애물 감지 및 충돌 회피 주행 실현.

(2) 형상적응형 universal hand 개발

본 연구에서는 자동차 공장의 대량 생산용 프레스 작업에 있어서, 프레스당 수십 개를 제작, 대기시켜 놓고 금형 교환 시 일일이 교체해주어야 하는 attachment를 대체하는, 금형 교환 시에 미리 입력된 프로그램에 따라 다음 대상물의 크기와 형상에 맞도록 진공컵의 위치가 자동으로 조절되는, 소위 형상 적응이 가능한 작업물 이송용 유연 그립퍼 장치를 개발한다. 이를 위하여 현장에서 요구되는 다양한 제한 조건인, 높이의 최소화, 300mm 이상의 수직 방향 stroke, 50kg이하의 총중량, 충분한 강도 및 내구성, 3분이내의 위치 조정 시간, 충분한 넓이, 진공컵의 각도 조절 가능, 제작비 절감, 유지보수의 용이성 등을 모두 만족하는 시스템을 개발하여 실제 시작품의 제작을 통해서 성능을 확인한 후, 현장에 투입할 수 있도록 기업체에 기술 이전을 실시하는 것까지를 본 연구의 내용으로 한다.

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록)일자	발명자 (출원인)	출원국	비고
다지로봇핸드	01-69841	2001.11.9	김문상, 강봉수, 정우진, 이형진, 이종원	대한민국	
다수의 그림 지점을 갖는 작업물 이송용 유연 그림퍼 장치	출원번호 02-31426	출원일자 2002-06-04	김문상, 최종석, 황요하, 김승중, 신현오, 신종렬, 오승재, 임정찬, 박성기	대한민국	
단일의 서보 모터를 이용한 회전 2자유도 위치 조정 장치	출원번호 02-32126	출원일자 2002-06-08	김문상, 황요하, 김승중, 박정호, 이종민, 박성기, 최종석	대한민국	
유연 나사 구동식 높이 조절 장치	출원중		김문상, 황요하, 김승중, 박정호, 이종민, 박성기, 최종석	대한민국, 미국,일본	
작업용 로봇, 작 업용 로봇을 위 한 액츄에이터 및 그 제어방법	출원번호 02-8321	출원일자 2002-02-16	김문상, 강성철, 조창현, 신현오, 김재선	대한민국 PCT	

나. 프로그램 등록목록

프로그램 명칭	등록번호	등록일자	개발자	비고

다. 노하우 내역

- 레이저 센서를 이용한 로봇의 자기 위치 추정 방법.
- holonomic omni-directional 이동메커니즘.
- layered functionality, class, configuration으로 구성되는 제어구조설계.
- 손가락 힘 감지 센서 장치 및 수동 관절 설계.

라. 발생품 및 시작품 내역

- 손끝 힘감지 센서를 장착한 인간형 로봇손.
- holonomic omni-directional 이동로봇.
- 궤적 추종성능을 극대화한 다중 수동 트레이일러 시스템.
- PCJ 관절구조를 가지는 로봇 매니플레이터.
- 센서, 제어기, 기구부로 구성된 PSR1 / PSR2 로봇 플랫폼.

마. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적(필요시 별지사용)

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명	SCI게재 여부
Journal of Control, Automation and Systems Engineering	Topological Map building for mobile robot navigation	2002 년	8 (6)	제어자동화시스템공학회	한국	N
계: 1 건수						

○ 학술회의 발표 실적(필요시 별지사용)

학술회의 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명
2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and systems	Topological Map Building Based on Thining and Its Application to Localization	2002년 9월 (개제확정)		IROS	스위스
2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and systems	A passive multiple trailer system for indoor service robots	2001년10월		IROS	미국
IFAC workshop on Mobile Robot Technology	Design and control of the indoor public service robot	2001년 5월		IFAC	한국
2002 FIRA Robot World Congress	Topological Map Building Using Local Grid Maps in Unknown Environments	2002년 5월		FIRA	한국
2001 International conference on Control, Automation and Systems	Design and control of a dexterous multi-fingered robot hand	2001년 10월		ICCAS	한국
2001 International conference on Control, Automation and Systems	Optimal path planning using critical points	2001년 10월		ICCAS	한국
2nd International Workshop on Human-Friendly Welfare Robotic Systems	A passive multiple trailer system with off-axle hitching	2001년 1월		HWRS	한국
2nd International Symposium on Robotics and Automation	Development of a holonomic omni-directional mobile robot for indoor public services	2000년 11월		ISRA	멕시코
2nd International Symposium on Robotics and Automation	Development of a dexterous multi-fingered robot hand.	2000년 11월		ISRA	멕시코
계: 9건수					

3. 연구성과

3.3 형상적응형 universal hand 개발

본 과제에 참여 기업인 현대 자동차로의 기술 이전 작업이 추진 중에 있으며, 오는 추석 연휴에 현장 라인에 투입하여 성능 시험을 거친 후 본격적인 기술 이전 협의가 이루어질 예정이다.

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

(1) 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

가. 당해연도 활용계획(6하원칙에 따라 구체적으로 작성)

- 레이저 센서를 이용한 로봇의 자기 위치 추정 방법은 실내 자율 주행 기술의 완성을 위하여 장애물에 의하여 환경 정보가 점유되는 경우, 좁은 공간과 넓은 공간에서의 현장 시험을 통하여 알고리즘을 보완하여 모듈화한다.
- holonomic omni-directional 이동메커니즘은 상위 제어전략에 효율적으로 사용하여 장애물의 순간적 회피, 좁은 공간내의 이동동작을 효율적으로 구현하기 위한 기술로서 활용한다.
- layered functionality, class, configuration으로 구성되는 제어구조설계는 다양한 요소기술을 효율적으로 통합하여 office navigator를 완성하기 위한 기술로서 활용한다.
- 손가락 힘 감지 센서 장치 및 수동 관절 설계는 물체의 안정적 조작 기능을 수행하기 위한 기술로서 활용한다.

나. 활용방법

- 레이저 센서를 이용한 로봇의 자기 위치 추정 방법은 현장의 지도 작성 전략과 실 측정 결과를 비교하여 강인한 알고리즘을 구현한다.
- holonomic omni-directional 이동메커니즘은 기구학적 제어 방법을 통하여 원하는 동작을 확실히 얻을 수 있도록 구현한다.
- layered functionality, class, configuration으로 구성되는 제어구조설계는 여러 모듈의 완전 대체, 재사용이 가능토록 구현한다.
- 손가락 힘 감지 센서 장치 및 수동 관절 설계는 분산형 제어기와 통합하여 모듈구조로 동작 가능토록 구현한다.

다. 차년도이후 활용계획(6하원칙에 따라 구체적으로 작성)

- 레이저 센서를 이용한 로봇의 자기 위치 추정 방법은 office navigator의 자율주행을 위하여 캡슐화하여 적용하며, 건물내의 물건 나르기, 안내 등을 수행하는 제품의 구성요소로서 활용한다.

- holonomic omni-directional 이동메커니즘은 실제 사람과 공존하는 공간에서의 이동성을 보장하기 위한 메커니즘 요소로서 활용한다.
- layered functionality, class, configuration으로 구성되는 제어구조설계는 제품의 기능 구현과 재구성 가능성을 극대화 하기위한 시스템 운영 및 통합 방안으로서 제품의 주요 구성요소로 활용한다.
- 손가락 힘 감지 센서 장치 및 수동 관절 설계는 제품의 조작기능을 충실히 구현할 수 있도록 하는 요소임과 동시에 조립, 물체 핸들링 등의 조립작업에 독립된 모듈로 적용 가능토록 하여 활용한다.

5. 기대효과

(1) 고속 mobile 및 manipulation 기술 개발

가. 기술적 측면

공공복지형 서비스 로봇은 전기.전자.기계.신소재,정보통신,에너지 분야에의 직접적인 파급효과 기대할수 있다. 첨단 복합기술의 개발로 다양한 분야에의 파급효과(예, 미국우주산업)가 예상되며, 첨단 기술의 선진국에의 기술종속성을 탈피할 수 있다.

나. 경제·산업적 측면

복지국가 지향이라는 국가목표의 구체적인 가치화가 가능하고 첨단복합산업 분야에서 세계적인 주도그룹에 참여함으로써 고부가가치 시장 확보가 가능하다. 한국인의 우수한 아이디어의 비가시성을 구체적인 가치화로 전환하여 세계의 정보 및 S/W 산업화에서의 비교우위 확보를 확보할 수 있으며, 우수 인적자원 활용의 극대화 및 시너지 효과를 높일수 있다.

[예상수익]
만원)

(단위 : 백

제품·기술명	개발후 1년	개발후 3년	개발후 5년	개발후 10년	비 고
빌딩 도우미 로봇	500	1,500	2,500	5,000	
spin off	800	3,500	10,500	19,000	

6. 문제점 및 건의사항(연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점을 기재)

- 없음 -.

[첨부2]

기술 요약서 (1)

■ 기술의 명칭

- 레이저 센서를 이용한 로봇의 자기 위치 추정 방법.

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	M1-0017-01-0002			
과제명	이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술연구원	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	현대중공업(주), 현대자동차(주), 유진로보틱스(주)			
총연구기간	2000년. 9월. 1일. ~ 2002년. 8월. 31일. (24개월)			
총연구비	정부(1,976,000)천원 민간(1,022,000)천원 합계(2,998,000)천원			
연구책임자 1	성명	김문상	주민번호	540525-1026013
	근무기관 부서	한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터	E-mail	munsang@kist.re.kr
	직위/직급	책임연구원	전화번호	02-958-5623
실무연락책임자	성명	정우진	소속/부서	휴먼로봇연구센터
	직위/직급	선임연구원	E-mail	wjchung@kist.re.kr
	전화번호	02-958-5590	FAX	02-958-5629
	주소	(130-650) 서울 청량리 우체국 사서함 131		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

본 기술은 이동로봇이 실내를 주행할 때에 별도의 표식장치 등의 설치 없이 벽, 문 등의 형상 정보로부터 자기 위치를 추정해내는 방법으로서, 레이저 스캔 센서의 거리정보와 미리 작성된 환경 지도를 이용한다. 로봇의 운동모델과 센서모델을 정의하여 주행 알고리즘에 연동하여 동작하며, 장애물이 있거나 부분적으로 환경이 변형된 경우에도 적용이 가능함.

<기술적 특징>

- (1) 환경을 인위적으로 가공하지 않고 사용함.
- (2) 로봇의 자기 위치를 대역적, 국소적으로 추정 가능함.
- (3) 대부분의 실내환경에 적용 가능함.

[용도 · 이용분야]

- (1) 청소, 순찰 등의 실내 자율주행 이동로봇.
- (2) 실내를 자율 주행 할 수 있는 휠체어 등의 알고리즘으로 적용.

■ 기술의 개발단계 및 수준

[기술의 완성도] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 기초, 탐색연구단계 : 특정용도를 위해 필요한 신 지식을 얻거나 기술적 가능성을 탐색하는 단계
	② 응용연구단계 : 기술적 가능성의 실증, 잠재적 실용화 가능성의 입증 등 실험실적 확인 단계
√	③ 개발연구단계 : Prototype의 제작, Pilot Plant Test 등을 행하는 단계
	④ 기업화 준비단계 : 기업화에 필요한 양산화 기술 및 주변 기술까지도 확보하는 단계
	⑤ 상품화 완료단계

[기술의 수명주기] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 기술개념 정립기 : 기술의 잠재적 가능성만 있는 단계
	② 기술실험기 : 기술개발에 성공했으나 아직 실용성, 경제성 등이 확실치 않은 단계
	③ 기술적용 시작기: 최초의 기술개발국에서만 활용되고 있는 단계
√	④ 기술적용 성장기: 기술개발국 및 일부 선진국에서 활용되고 있는단계
	⑤ 기술적용 성숙기: 선진국사이에서 활발한 기술이전이 일어나며, 기술의 표준화가 되어가는 단계
	⑥ 기술적용 쇠퇴기: 선진국에서 개도국으로 기술이전이 활발하게 일어나고, 선진국에서는 기술의 가치가 저하되나, 개도국에서는 아직 시장의 가치가 높은 기술

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적용시킴
	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
√	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

[첨부2]

기술 요약서 (2)

■ 기술의 명칭

- holonomic omni-directional 이동메커니즘.

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	M1-0017-01-0002			
과제명	이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술연구원	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	현대중공업(주), 현대자동차(주), 유진로보틱스(주)			
총연구기간	2000년. 9월. 1일. ~ 2002년. 8월. 31일. (24개월)			
총연구비	정부(1,976,000)천원 민간(1,022,000)천원 합계(2,998,000)천원			
연구책임자 1	성명	김문상	주민번호	540525-1026013
	근무기관 부서	한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터	E-mail	munsang@kist.re.kr
	직위/직급	책임연구원	전화번호	02-958-5623
실무연락책임자	성명	정우진	소속/부서	휴먼로봇연구센터
	직위/직급	선임연구원	E-mail	wjchung@kist.re.kr
	전화번호	02-958-5590	FAX	02-958-5629
	주소	(130-650) 서울 청량리 우체국 사서함 131		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

실내에서 신뢰성있고 정확하게 이동을 가능토록 하기 위하여 차륜을 사용하였고, holonomic, omni-directional 한 움직임을 실현할 수 있는 이동 메커니즘이다. 따라서, 자율주행의 경로계획이 대단히 용이해지며, 장애물을 감지하여 임의의 방향으로 회피하는 것에도 유리하다.

<기술적 특징>

(1) actuator의 속도 간섭을 없앤 기구학적 파라미터를 설계하여 효율적인 동작 가능.

(2) 위치 결정 정밀도가 높으며 내구성이 높아 신뢰할 수 있는 메커니즘 구현.

[용도 · 이용분야]

(1) 실내의 자율주행 서비스로봇의 이동메커니즘으로 모듈화된 형태로 적용 가능.

(2) 좁은 공간내의 동작에 유리한 전방향 휠체어 구성 가능.

■ 기술의 개발단계 및 수준

[기술의 완성도] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 기초, 탐색연구단계 : 특정용도를 위해 필요한 신 지식을 얻거나 기술적 가능성을 탐색하는 단계
	② 응용연구단계 : 기술적 가능성의 실증, 잠재적 실용화 가능성의 입증 등 실험실적 확인 단계
√	③ 개발연구단계 : Prototype의 제작, Pilot Plant Test 등을 행하는 단계
	④ 기업화 준비단계 : 기업화에 필요한 양산화 기술 및 주변 기술까지도 확보하는 단계
	⑤ 상품화 완료단계

[기술의 수명주기] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 기술개념 정립기 : 기술의 잠재적 가능성만 있는 단계
	② 기술실험기 : 기술개발에 성공했으나 아직 실용성, 경제성 등이 확실치 않은 단계
	③ 기술적용 시작기: 최초의 기술개발국에서만 활용되고 있는 단계
√	④ 기술적용 성장기: 기술개발국 및 일부 선진국에서 활용되고 있는단계
	⑤ 기술적용 성숙기: 선진국사이에서 활발한 기술이전이 일어나며, 기술의 표준화가 되어가는 단계
	⑥ 기술적용 쇠퇴기: 선진국에서 개도국으로 기술이전이 활발하게 일어나고, 선진국에서는 기술의 가치가 저하되나, 개도국에서는 아직 시장의 가치가 높은 기술

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
√	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

[첨부2]

기술 요약서 (3)

■ 기술의 명칭

- layered functionality, class, configuration으로 구성되는 제어구조설계.

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	M1-0017-01-0002			
과제명	이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술연구원	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	현대중공업(주), 현대자동차(주), 유진로보틱스(주)			
총연구기간	2000년. 9월. 1일. ~ 2002년. 8월. 31일. (24개월)			
총연구비	정부(1,976,000)천원 민간(1,022,000)천원 합계(2,998,000)천원			
연구책임자 1	성명	김문상	주민번호	540525-1026013
	근무기관 부서	한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터	E-mail	munsang@kist.re.kr
	직위/ 직급	책임연구원	전화번호	02-958-5623
실무연락책임자	성명	정우진	소속/부서	휴먼로봇연구센터
	직위/ 직급	선임연구원	E-mail	wjchung@kist.re.kr
	전화번호	02-958-5590	FAX	02-958-5629
	주소	(130-650) 서울 청량리 우체국 사서함 131		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

다양한 S/W와 H/W를 효율적으로 통합하고 운영하기 위한 제어구조로서, 특히 가변적인 환경에서의 자율주행을 위한 행동 조합 기능과 목적기능 달성을 위한 planning 기능을 효율적으로 통합하였음.

<기술적 특징>

- (1) layered functionality diagram으로 정보의 계층화, 통합적 관리를 구현.
- (2) class diagram으로 정보의 재사용 및 모듈의 재구성 가능성을 극대화 함.
- (3) configuration diagram으로 time domain상에서의 behaviour coordination 및 센서 및 제어 정보를 체계적으로 관리할 수 있음.

[용도 · 이용분야]

- (1) 자율주행 이동로봇의 효과적인 S/W 통합을 위한 제어구조 패키지.
- (2) 가변적 상황에서 주어진 목적 기능을 달성하기 위해 필요한 process의 해석 및 체계적 관리 가능.

■ 기술의 개발단계 및 수준

[기술의 완성도] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 기초, 탐색연구단계 : 특정용도를 위해 필요한 신 지식을 얻거나 기술적 가능성을 탐색하는 단계
	② 응용연구단계 : 기술적 가능성의 실증, 잠재적 실용화 가능성의 입증 등 실험실적 확인 단계
√	③ 개발연구단계 : Prototype의 제작, Pilot Plant Test 등을 행하는 단계
	④ 기업화 준비단계 : 기업화에 필요한 양산화 기술 및 주변 기술까지도 확보하는 단계
	⑤ 상품화 완료단계

[기술의 수명주기] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 기술개념 정립기 : 기술의 잠재적 가능성만 있는 단계
	② 기술실험기 : 기술개발에 성공했으나 아직 실용성, 경제성 등이 확실치 않은 단계
	③ 기술적용 시작기: 최초의 기술개발국에서만 활용되고 있는 단계
√	④ 기술적용 성장기: 기술개발국 및 일부 선진국에서 활용되고 있는단계
	⑤ 기술적용 성숙기: 선진국사이에서 활발한 기술이전이 일어나며, 기술의 표준화가 되어가는 단계
	⑥ 기술적용 쇠퇴기: 선진국에서 개도국으로 기술이전이 활발하게 일어나고, 선진국에서는 기술의 가치가 저하되나, 개도국에서는 아직 시장의 가치가 높은 기술

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
	③ 외국기술의 개선·개발단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
√	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

[첨부2]

기술 요약서 (4)

■ 기술의 명칭

- 다지로봇핸드

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	M1-0017-01-0002			
과제명	이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술연구원	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	현대중공업(주), 현대자동차(주), 유진로보틱스(주)			
총연구기간	2000년. 9월. 1일. ~ 2002년. 8월. 31일. (24개월)			
총연구비	정부(1,976,000)천원 민간(1,022,000)천원 합계(2,998,000)천원			
연구책임자 1	성명	김문상	주민번호	540525-1026013
	근무기관 부서	한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터	E-mail	munsang@kist.re.kr
	직위/직급	책임연구원	전화번호	02-958-5623
실무연락책임자	성명	정우진	소속/부서	휴먼로봇연구센터
	직위/직급	선임연구원	E-mail	wjchung@kist.re.kr
	전화번호	02-958-5590	FAX	02-958-5629
	주소	(130-650) 서울 청량리 우체국 사서함 131		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

손가락 힘감지 센서를 장착하고, 링크 구조를 이용한 수동 관절을 가지는 로봇 손가락의 설계 및 그를 이용한 로봇 핸드 메커니즘.

<기술적 특징>

(1) 물체 파지시 접촉점의 위치와 접촉력의 크기를 감지하여 파지력 제어를 가능토록 하는 힘감지 센서 설계.

(2) 하나의 능동관절과 하나의 수동관절을 이용하여 물체를 안정적으로 파지할 수 있는 로봇 손가락 설계.

(3) 3 손가락을 장착하여 다양한 물체를 파지할 수 있도록 설계한 로봇 핸드 메커니즘.

[용도 · 이용분야]

(1) 서비스로봇의 물체 조작을 위한 파지기구로서 활용.

(2) 산업현장에서 다양한 부품을 하나의 기구로 파지 가능한 도구로서 활용.

■ 기술의 개발단계 및 수준

[기술의 완성도] (1개만 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 기초, 탐색연구단계 : 특정용도를 위해 필요한 신 지식을 얻거나 기술적 가능성을 탐색하는 단계
	② 응용연구단계 : 기술적 가능성의 실증, 잠재적 실용화 가능성의 입증 등 실험실적 확인 단계
√	③ 개발연구단계 : Prototype의 제작, Pilot Plant Test 등을 행하는 단계
	④ 기업화 준비단계 : 기업화에 필요한 양산화 기술 및 주변 기술까지도 확보하는 단계
	⑤ 상품화 완료단계

[기술의 수명주기] (1개만 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 기술개념 정립기 : 기술의 잠재적 가능성만 있는 단계
	② 기술실험기 : 기술개발에 성공했으나 아직 실용성, 경제성 등이 확실치 않은 단계
	③ 기술적용 시작기: 최초의 기술개발국에서만 활용되고 있는 단계
√	④ 기술적용 성장기: 기술개발국 및 일부 선진국에서 활용되고 있는단계
	⑤ 기술적용 성숙기: 선진국사이에서 활발한 기술이전이 일어나며, 기술의 표준화가 되어가는 단계
	⑥ 기술적용 쇠퇴기: 선진국에서 개도국으로 기술이전이 활발하게 일어나고, 선진국에서는 기술의 가치가 저하되나, 개도국에서는 아직 시장의 가치가 높은 기술

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개만 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
√	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

[첨부2]

기술 요약서(5)

■ 기술의 명칭

다수의 그립 지점을 갖는 작업물 이송용 유연 그립퍼 장치

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	M1-0017-01-0002			
과제명	이동 기능을 갖는 로봇 조작 기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술연구원(KIST)	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	현대중공업(주), 현대자동차(주), 유진로보틱스(주)			
총연구기간	2000년. 9월. 1일. ~ 2002년. 8월. 31일. (24개월)			
총연구비	정부(1,976,000)천원 민간(1,022,000)천원 합계(2,998,000)천원			
연구책임자 1	성명	김문상	주민번호	571013-1024322
	근무기관 부서	휴먼로봇연구센터	E-mail	munsang@kist.re.kr
	직위/직급	책임연구원	전화번호	02-958-5623
실무연락책임자	성명	김승중	소속/부서	트라이볼로지 연구센터
	직위/직급	연구원	E-mail	sjongkim@kist.re.kr
	전화번호	02-958-5610	FAX	02-958-5659
	주소	(130-650) 서울 청량리 우체국 사서함 131		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

다량의 동일한 반복 작업에 의해 작업 도중 수시로 대상 작업물이 변경되는 기계 장치에서 사용되는, 대상 작업물을 파지하기 위해 각 작업 대상물마다 전용 파지 장치가 필요한 작업물 이송용 그립퍼 장치에 있어서, 각각의 그립퍼 위치가 자체적으로 3차원 공간 상에서 프로그램에 따른 임의의 위치로 이동이 가능한 그립퍼 장치를 개발하였다.

본 시스템은 다수의 파지점을 가지고 각 지점이 독립적으로 또는 일부 연동되어 3차원으로 위치를 조절할 수 있어서 대상 작업물의 변경 시 수동신호 또는 미리 입력된 프로그램에 따라 자동으로 대상물의 크기와 형상에 따라 그립퍼의 위치를 자유자재로 변경할 수 있다.

<기술적 특징>

- (1) 개별 그립퍼가 3차원 병진 운동 및 2 자유도 회전 운동이 가능함.
- (2) 별도의 브레이크 장치 없이 각나사 또는 워기어를 이용하여 역토크를 견디는 구조
- (3) 강도를 최대화하는 동시에 중량을 최소화할 수 있는 구조

[용도 · 이용분야]

- (1) 자동차 프레스 공장의 loader 및 unloader용 attachment 대체
(현재 현대.기아 자동차에는 5~6기의 프레스로 구성된 프레스 라인이 총 20개 정도가 있으며 생산 품목이 각 30가지라 가정할 때 6000~7000개의 attachment가 필요한데 이들을 동일한 장치로 대체 가능)

* '출원단계'란에는 출원, 공개, 등록 등을 선택하여 기재

■ 기술이전 조건

이전형태	<input type="checkbox"/> 유상 <input type="checkbox"/> 무상	최저기술료	천원
이전방식	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 협의결정	<input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 기타()	<input type="checkbox"/> 통상실시권
이전 소요기간	년 3 개월	실용화예상시기	2003 년도
기술이전시 선행요건	설계 및 제작 과정의 최적화 및 체계화 경험과 설계 능력을 갖춘 납품 업체 선정		

* 기술이전시 선행요건 : 기술이전을 위한 사전준비사항(필수 설비 및 장비, 전문가 확보 등)을 기술

* 실용화예상시기 : 기술을 활용한 대표적인 제품이 최초로 생산이 시작되는 시기를 기재

■ 기술의 개발단계 및 수준

[기술의 완성도] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 기초, 탐색연구단계 : 특정용도를 위해 필요한 신 지식을 얻거나 기술적 가능성을 탐색하는 단계
	② 응용연구단계 : 기술적 가능성의 실증, 잠재적 실용화 가능성의 입증 등 실험실적 확인 단계
√	③ 개발연구단계 : Prototype의 제작, Pilot Plant Test 등을 행하는 단계
	④ 기업화 준비단계 : 기업화에 필요한 양산화 기술 및 주변 기술까지도 확보하는 단계
	⑤ 상품화 완료단계

[기술의 수명주기] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 기술개념 정립기 : 기술의 잠재적 가능성만 있는 단계
√	② 기술실험기 : 기술개발에 성공했으나 아직 실용성, 경제성 등이 확실치 않은 단계
	③ 기술적용 시작기: 최초의 기술개발국에서만 활용되고 있는 단계
	④ 기술적용 성장기: 기술개발국 및 일부 선진국에서 활용되고 있는 단계
	⑤ 기술적용 성숙기: 선진국사이에서 활발한 기술이전이 일어나며, 기술의 표준화가 되어가는 단계
	⑥ 기술적용 쇠퇴기: 선진국에서 개도국으로 기술이전이 활발하게 일어나고, 선진국에서는 기술의 가치가 저하되나, 개도국에서는 아직 시장의 가치가 높은 기술

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
√	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술

[기술개요]

기술명	
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	

[첨부2]

기술 요약서(6)

■ 기술의 명칭

단일의 서보모터를 이용한 회전 2자유도 위치 조정 장치

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	M1-0017-01-0002			
과제명	이동 기능을 갖는 로봇 조작 기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술연구원(KIST)	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	현대중공업(주), 현대자동차(주), 유진로보틱스(주)			
총연구기간	2000년. 9월. 1일. ~ 2002년. 8월. 31일. (24개월)			
총연구비	정부(1,976,000)천원 민간(1,022,000)천원 합계(2,998,000)천원			
연구책임자 1	성명	김문상	주민번호	571013-1024322
	근무기관 부서	휴먼로봇연구센터	E-mail	munsang@kist.re.kr
	직위/직급	책임연구원	전화번호	02-958-5623
실무연락책임자	성명	김승중	소속/부서	트라이블로지 연구센터
	직위/직급	연구원	E-mail	sjongkim@kist.re.kr
	전화번호	02-958-5610	FAX	02-958-5659
	주소	(130-650) 서울 청량리 우체국 사서함 131		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

2 개의 서보 모터를 이용하여 중심선을 기준으로 상하 방향과 좌우 방향으로 2 자유도 회전 운동을 하는 종래의 위치 조정 장치들에 비해, 본 발명에서는 비용 절감과 소형/경량 구조를 목적으로 서보 모터 1 개만을 사용하는 회전 2 자유도 위치 조정 장치를 제안한다. 본 발명에 의하면, 1 개의 서보 모터에 연결된 2 종류의 토크 전달 경로가 있어서, 하나는 중심축을 중심으로 위치 조정자를 회전을 시키고 다른 하나는 상기 위치 조정자와 중심축이 이루는 각도를 저속으로 변화시켜 위치 조정자의 고도를 조절함으로써, 결국 위치 조정자의 끝단이 대상 표면을 나선형 궤적을 따라 스위핑(sweeping)하도록 한다. 따라서 서보 모터 1 개만으로 2 자유도 위치 조정 효과를 거둘 수 있다.

<기술적 특징>

- (1) 1개의 모터를 이용하여 2 자유도 회전 운동을 구현함으로써 반구상의 일정 위치를 pointing하는 것이 가능함.
- (2) 회전이 발생하여도 중공 중심축 내부로 통하는 전선 또는 공압 호스의 꼬임 현상이 발생하지 않음.
- (3) 감속 기어비를 증가시키거나 워엄 기어를 장착하여 역토크를 전달 수 있는 구조

[용도 · 이용분야]

- (1) 프레스 공장의 대상물 형상 적응형 진공컵.
- (2) 각종 조명 각도 조정 장치
- (3) 가정용 위성 안테나
- (4) 보안용 카메라 각도 조절 장치
- (5) 그 밖에도 조정 시간 및 조정 정밀도에 크게 구애받지 않으면서 저가, 소형화, 경량화가 요구되는 모든 분야

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개만 선택(√로 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
√	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술

[기술개요]

기술명	
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	

[첨부2]

기술 요약서(7)

■ 기술의 명칭

유연 나사 구동식 높이 조절 장치

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	M1-0017-01-0002			
과제명	이동 기능을 갖는 로봇 조작 기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술연구원(KIST)	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	현대중공업(주), 현대자동차(주), 유진로보틱스(주)			
총연구기간	2000년. 9월. 1일. ~ 2002년. 8월. 31일. (24개월)			
총연구비	정부(1,976,000)천원 민간(1,022,000)천원 합계(2,998,000)천원			
연구책임자 1	성명	김문상	주민번호	571013-1024322
	근무기관 부서	휴먼로봇연구센터	E-mail	munsang@kist.re.kr
	직위/직급	책임연구원	전화번호	02-958-5623
실무연락책임자	성명	김승중	소속/부서	트라이볼로지 연구센터
	직위/직급	연구원	E-mail	sjongkim@kist.re.kr
	전화번호	02-958-5610	FAX	02-958-5659
	주소	(130-650) 서울 청량리 우체국 사서함 131		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

휘어짐이 자유로운 유연 나사와 다단 가이드를 채용하여 간단하고 안정된 구조로써 최대/최소 높이 비율을 극대화할 수 있는 높이조절장치를 제안하였다. 본 기술에 의하면, 소형 DC 모터를 이용하여 구동 너트를 회전시킴으로써 스프링 형태의 유연 나사를 길이방향으로 진행시키는 한편, 수축 시 반대쪽으로 돌출되는 유연 나사 부를 옆으로 구부려 최소한의 수축 높이를 구현하고, 안테나식 다단 파이프 구조 또는 다단 삼발이 구조의 리니어 가이드를 장착함으로써, 구조가 간단하고 가볍고 최대/최소 높이 비율이 크며 최대 이완 시에도 높이 조절의 정밀성과 안정성을 유지할 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

<기술적 특징>

- (1) 유연 나사를 구부려 사용함으로써 장치의 최소 길이를 최소화함. 즉, 최대/최소 높이비율을 극대화함.
- (2) 강성을 최대화하는 동시에 소형화, 경량화할 수 있는 구조
- (3) 유연 나사의 내부 통로를 전선 및 공압 호스의 통로로 활용 가능.

[용도 · 이용분야]

- (1) 자동차 프레스 공장의 판넬 적응형 그립퍼(gripper)의 높이조절장치
- (2) 무인 카메라 높이조절장치
- (3) 각종 정밀 이송용 높이조절장치 등.

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
√	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술

[기술개요]

기술명	
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	

[첨부2]

기술 요약서(8)

■ 기술의 명칭

작업용 로봇, 작업용 로봇을 위한 엑츄에이터 및 그 제어방법

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	M1-0017-01-0002			
과제명	이동 기능을 갖는 로봇 조작 기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술연구원(KIST)	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	현대중공업(주), 현대자동차(주), 유진로보틱스(주)			
총연구기간	2000년. 9월. 1일. ~ 2002년. 8월. 31일. (24개월)			
총연구비	정부(1,976,000)천원 민간(1,022,000)천원 합계(2,998,000)천원			
연구책임자 1	성명	김문상	주민번호	571013-1024322
	근무기관 부서	휴먼로봇연구센터	E-mail	munsang@kist.re.kr
	직위/직급	책임연구원	전화번호	02-958-5623
실무연락책임자	성명	강성철	소속/부서	휴먼로봇 연구센터
	직위/직급	선임연구원	E-mail	kasch@kist.re.kr
	전화번호	02-958-5589	FAX	02-958-5629
	주소	(130-650) 서울 청량리 우체국 사서함 131		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

불규칙한 속도로 이송되는 대상체에 대한 자동 조립 작업을 가능케 하는 시스템으로 산업용 로봇과 로봇의 끝에 추가 액츄에이터를 포함하는 툴을 부착하고 그 툴에 작업 대상체의 이동 상황을 감지하는 카메라, 힘 센서를 부착한 기구를 구성 하였다. 컨베이어 동기를 위해 로봇은 대상체의 속도를 추종하고 툴은 대상체와의 위치 에러를 보정케 하였으며 각 시스템은 외부 제어기에 의해 제어되고 로봇은 로봇 컨트롤러 자체 기능인 컨베이어 동기 기능에 의해 자유도를 제약 하였다. 대상체의 진행 방향 외의 변위에 대해서는 실시간 이동 명령에 의해 그 편차를 보정케 하였고 충돌 등에 대한 유연성을 확보 하기위해 수동형 조인트를 사용 하였다.

<기술적 특징>

- (1) 불규칙한 속도로 움직이는 작업 대상체에 대한 조립 작업이 가능한 시스템.
- (2) 접촉 및 비 접촉 센서에 의해 원거리 및 근거리 추종이 가능한 시스템
- (3) 수동성을 갖는 툴과 그 수동성을 이용한 부하 감지 방식

[용도 · 이용분야]

- (1) 자동 조립 시스템은 공장 조립라인의 대대적인 변경/교체 없이 기존의 산업용 로봇을 사용하여 이동하는 물체에 대한 자동화 공정을 구축할 수 있도록 하여 자동차 공장과 같은 대단위 조립 시설의 자동화 비율을 높일 수 있다.

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√로 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
√	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술

[기술개요]

기술명	
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	

[기술을 도출한 과제현황]

과제관리번호	M1-0017-01-0002			
과제명	이동기능을 갖는 로봇 조작기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술연구원	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	현대중공업, 현대자동차, 유진로보틱스			
총연구기간	2년			
총연구비	합계 : (1,976)백만원 - 정부 : (1,022)백만원 민간 : (2,998)백만원			
연구책임자	소속	휴먼로봇연구센터	성명	김문상
	전화번호	02-958-5623	E-mail	munsang@kist.re.kr
연구개발 주요내용				

여 백

특정연구개발사업 연구결과 활용계획서

사업명	중사업명	중점국가연구개발사업			
	세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
과제명		지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발			
연구기관		한국과학기술원 (KAIST)	연구책임자	변증남	
총연구기간		2000년. 9월. 1일. ~ 2002년. 8월. 30일. (24개월)			
총 연구비 (단위 : 천원)		정부출연금	민간부담금	합계	
		890,000	426,000	1,316,000	
기술분야		기계자동화 기술, 시스템 기술			
참여기업		삼성 전자(주)종합기술원			
공동연구기관					
위탁연구기관					
연구결과활용 (해당항목에(√) 표시)		1. 기업화 ()	2. 기술이전 (√)	3. 후속연구추진()	4. 타사업에 활용()
		5. 선행 및 기초 연구()	6. 기타목적활용 (교육,연구)()	7. 활용중단(미활용)()	8. 기타()

특정연구개발사업 처리규정 제 31조(연구개발결과의 보고) 제 2항에 의거 연구결과 활용계획서를 제출합니다.

첨부 : 1. 연구결과 활용계획서 1부.
2. 기술요약서 1부

2002 년 7 월 31 일

연구책임자 : 변증남

연구기관장 : 홍창선

과학기술부장관 귀하



여 백

[첨부1]

연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

- 최종목표: 환자 및 장애인을 위한 휠체어 로봇 시스템의 개발.
 - 디자인이 향상된 인간 친밀형 한국인 표준 체형을 고려한 소프트 로봇 팔 개발.
 - 서비스 로봇에 핵심이 되는 각종 인간-로봇 상호작용기술 개발.
 - 사용자 의도 파악 기능 및 주변 환경 적응 능력을 갖춘 지능형 비주얼 서보잉 기술 개발.
 - 생체신호(EMG, 근전도 신호)를 이용한 로봇팔 제어 기술 개발.
 - 머리 및 눈동자의 움직임에 이용한 마우스 커서 제어가 가능한 아이마우스 기술 개발.
 - 몸의 움직임을 활용한 햅틱수트 제어 장치 개발.
 - 로봇제어용 Hand-held master의 개발.

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록 (총5건: 출원5건(국내3건,국외2건))

발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록)일자	발명자 (출원인)	출원국	비고
백래쉬를 방지하기 위한 감속기	10-2001-0003297	2001.1.20	장평훈	한국	
텐던 구동구조를 이용한 구동장치	2000-85816	2000.12.29	변증남, 송원경, 최정이	한국	
Backlash-free speed reducing device	미국-09/784,348	2001.2.16	장평훈	미국	
Optical fiber curvature sensor for measuring body motion and its adhesive method	미국-09/912,357	2001.7.25	권동수, 이규빈	미국	
눈 응시점 추정 방법	10-2002-0009346	2002.2.21	유동현, 김재현, 이영진, 김도형, 이방래, 정명진	한국	

나. 프로그램 등록목록

*해당사항없음.

다. 노하우 내역

- 장력 조절이 가능한 케이블 메커니즘 설계

- Real Time OS(QNX)기반의 제어 프로그램 설계
- 목적 지향 설계 방식에 따른 로봇의 기구학적인 해를 구하는 방법
- 텐던 구동 구조를 이용한 동력 전달 방법 및 기구부 설계.
- 아이-인-핸드 타입 비주얼 서보잉을 위한 소형/경량 스테레오 카메라 헤드 설계.
- 유/무선 TCP/IP 통신에 의한 시스템간의 통신 구조.
- 무선 근전도 증폭기 설계
- 의복에 부착 가능한 장력 측정 장치.

라. 발생품 및 시작품 내역

- 케이블 메커니즘을 이용한 6축 로봇 (1차/2차 시제품)
- 텐던 구동 구조를 이용한 소형/경량 스테레오 카메라 헤드 (1차/2차/3차 시제품 제작)
- 재활로봇 시스템을 위한 비주얼 서보잉 기능이 포함된 로봇팔 탑재 가능 이동로봇 (1차 시제품 제작)
- 시리얼 포트를 통한 제어가 가능한 제어기 모듈 (1차 시제품 제작)
- 아이-인-핸드 타입 비주얼 서보잉을 위한 소형 그리퍼 (1차 시제품 제작)
- 근전도 증폭기 (2차 시제품 제작)
- 근전도를 이용한 중증 장애인을 위한 휠체어 조종기 (2차 시제품 제작)
- 비장착형 Eye-mouse의 눈 추적 기구부 제작 (1차 시제품)
- 장착형 Eye-mouse의 착용 기구부(2차 시제품)
- 의복형태 조종기 시작품(2차/3차 시작품 제작)
- 머리 인터페이스 시작품

마. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적 (총 20건: 게재11건(국외6건,국내5건), 게재예정4건(국외3건,국내1건), 제출5건(국외3건, 국내2건))

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행 기관	국 명	SCI 게재 여부
International Journal of Control	A Generalized Iterative Learning Controller against Initial State Error	2000.10		Taylor & Francis	미국	Y
Artificial Life and Robotics	Some Aspects of the Human-Friendly Control of Movement-Helping Devices	2000	vol. 3	ISAROB	독일	N
Fuzzy Sets and Systems	Machine Intelligence Quotient: Its Measurement and Applications	2002	vol 127	Elsevier Science	네덜란드	Y
ASME J. of Dyn. Systems Measurement and Control	Concurrent Design of Continuous Zero Phase Error Tracking Controller and Sinusoidal Trajectory for Improved Tracking Control	2001	Vol.123 No.2	ASME press	미국	Y
ASME J. of Dyn. Systems Measurement and Control	Learning Input Shaping Technique for Non-LTI Systems	2001	Vol.123 No.1	ASME press	미국	Y
Artificial Life and robot	Wearable Master Device for Spinal Injured Persons as a Control Device of Motorized Wheelchairs	2001.11	Vol.4 No.4	ISAROB	일본	N
Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea	Human-Computer Interface using the Eye-Gaze Direction	2001	vol.38 no.6	대한전자공학회	한국	N
Transaction on Control, Automation and Systems Engineering	A Human-Robot Interface using Eye-Gaze Tracking System for People with Motor Disabilities	2001	vol.3 no.4	제어자동화시스템공학회	한국	N
International Journal of Human-Friendly Welfare Robotic Systems	A Computer Interface for the Disabled Using Eye-Gaze Information	2001	vol.2 no.3	HWRS	한국	N
대한전자공학회 논문지	소프트 컴퓨팅 기법을 이용한 근전도신호의 패턴 분류와 재활 로봇 팔 제어에의 응용	2000.11	vol. 37, no. 11	대한전자공학회	한국	N
Journal of Control, Automation and Systems Engineering	다중 입출력 시스템을 위한 음의 입력다듬기 기법의 개발	2000.12		제어자동화시스템공학회	한국	N
International Journal of Fuzzy Optimization and Decision Making	New Feature Set Extraction Algorithm based on Soft Computing TEchniques and Its Aplication to EMG Pattern Classification	accepted		Kluwer Academic Publisher	미국	N
Ergonomics Society of Korea	Correlation Between Subjective Preference of Essential Oils and EEG Response	accepted		대한인간공학연구회	한국	N
계: 13건수						

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행 기관	국 명	SCI게재 여부
Fuzzy Sets and Systems	Blend of soft computing techniques for effective human-machine interaction in service Robotic systems	accepted		Elsevier Science	네덜란드	Y
Journal of Soft Computing	Soft Computing based Intention Reading Techniques as a Means of Human-robot Interaction for Human Centered System	accepted		Elsevier Science	독일	N
IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	Design of Longitudinal Controller for Rear-End Collision Avoidance	submitted		IEEE press	미국	N
Autonomous Robots	Human-friendly Robotic Human/Machine Interaction System (KARES II) for the Disabled - Part I: System Overview and Subsystem Design	submitted		Kluwer Academic Publisher	미국	Y
Autonomous Robots	Human-friendly Robotic Human/Machine Interaction System (KARES II) for the Disabled - Part II: Realization and Clinical Evaluation	submitted		Kluwer Academic Publisher	미국	Y
대한전자공학회 논문지	TV 자막 신호를 이용한 한글 수화 발생 시스템의 개발	submitted		대한전자공학회	한국	N
대한전자공학회 논문지	눈의 응시 방향을 이용한 인간-컴퓨터간의 인터페이스에 관한 연구	submitted		대한전자공학회	한국	N
계: 7건수						

○ 학술회의 발표 실적 (총 46건: 게재39건(국외33건,국내6건), 게재예정2건(국외2건), 제출5건(국외2건,국내3건))

학술회의 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명
ICORR2001	Development of a Robotic Arm for Handicapped People: A Target-Oriented Design Approach	2001. 4. 27		IEEE press	프랑스
SMC2000	Visual Servoing for Human-Robot Interaction in the Wheelchair-based Rehabilitation Robot	2000.10.8-11		IEEE press	미국
8th National Conference on Fuzzy Theory and Its Application	Soft Computing Methods for Gesture Recognition and their Applications to Care-giving Service Robotic Systems	2000.12.1		TAMKANG press	중국
ICORR2001	Vision-based Control with Emergency Stop through EMG of the Wheelchair-based Rehabilitation Robotic Arm, KARES II	2001.4.26		IOS press	프랑스
FUZZ-IEEE2001	Effective Intention Reading Technique as a means of Human-Robot Interaction for Human Centered Systems	2001.12.2-5		IEEE press	호주
ICORR2001	An Eye-gaze Tracking System for People with Motor Disabilities	2001.4.26		IOS press	프랑스
CIDAM Workshop on Service Automation and Robotics	Cordless Micro Master and Locomotive Slave for Tele-operated Diagnosis and Surgery	2000.6		CityU press	홍콩
ICORR2001	Robots for Minimally Invasive Surgery: Review and New Vision Interface Development	2001.4		IOS press	프랑스
ACC2001	Commandless Input Shaping Technique	2001.6.27		ACC	미국
IROS2001	Design of a Hand-Held Master with Shared Control for Tele-operation	2001.10.29-11.3		IEEE press	미국
The 7th Mechatronics Forum International Conference and Mechatronics Education Workshop	Design of a Learning Input Shaping Technique for Suppressing Residual Vibration of an Industrial Robot	2000.9.6-8		IEE press	미국
RESNA2002	DEVELOPMENT OF A NOVEL TYPE REHABILITATION ROBOTIC SYSTEM KARES II	2002.6.27-7.1		RESNA press	미국
23th Colloquium of Automation in Salzhhausen	Development of A Wheelchair-based Robotic Arm System: KARES II and its Human-robot Interaction Technologies	2001.11.2-3		IAT	독일
CWUAAT2002	Development of A Novel Type Rehabilitation Robotic System KARES II	2002.3.25-27		Springer	영국
AFSS2002	Soft Computing-based Emotion/Intention Reading for Service Robot	2002.2.3-6		Springer	인도
계: 16건수					

학술회의 명칭	제목	계재연월일	호	발행기관	국명
Proc. of the 25th RESNA Annual Conference on Technology & Disability	Continuous Korean Sign Language Recognition using Gesture Segmentation and Hidden Markov Model	2002.6.27-7.1		RESNA press	미국
Proc. of FUZZ-IEEE 2002	Continuous Gesture Recognition System for Korean Sign Language based on Fuzzy Logic and Hidden Markov Model	2002.5		IEEE press	미국
Face and Gesture Recognition	Non-contact Eye Gaze Point Estimation System by Mapping of Corneal Reflections	2002.5		IEEE press	미국
The 2nd China-Korea Joint Workshop on Robotics	A Human-Computer Interface Using Eye-Gaze Tracking System	2002.6		RCCCAA Press	중국
ICRA2001	Wearable Master Device Using Optical Fiber Curvature Sensors for the Disabled	2001.5.21-26		IEEE press	한국
IROS2000	Sensors And Actuators of Wearable Haptic Master Device for the Disabled	2000.10.31-11.5		IEEE press	일본
IROS2001	Sensors And Actuators of Wearable Haptic Master Device for the Disabled	2000.10.31-11.5		IEEE press	일본
IIZUKA2000	New EMG Pattern Recognition based on Soft Computing Techniques and Its Application to Control of a Rehabilitation Robotic Arm	2000.10.1-5		KIT	일본
HWRS2001	Target-Oriented Design of a Robotic Arm for Physically Disabled People	2001. 1.		HWRS	한국
HWRS2001	Development of Eye-gaze tracking System for HCI	2001.1.16		HWRS	한국
HWRS2001	Effective Intention Reading in Rehabilitation Robots	2001.1.16		HWRS	한국
ICRA2001	Wearable Master Device Using Optical Fiber Curvature Sensors for the Disabled	2001.5.21-26		IEEE press	한국
ICRA2001	Visual Servoing for a User's Mouth with Effective Intention Reading in a Wheelchair-based Robotic Arm	2001.5.25		IEEE press	한국
HWRS2002	Concept for a Modified Hybrid Multi-Layer Control-Architecture for Rehabilitation Robots	2002.1.20-22		HWRS	한국
HWRS2002	The Human-Machine Cooperation in the Rehabilitation Robots based on the Design Principle and its Applications	2002.1.20-22		HWRS	한국
Workshop on Robotic and Automation Tools for Specific Human Assistance Tasks	Wheelchair-Based Robotic Arm System, KARES II, for the Disabled-A Robotic Arm and Visual Servoing	2001.5.22		IEEE press	한국
The 1st Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments	A Wheelchair Robot System and its Various Interface Methods for the Disabled Persons	2001.5.22		IARP/RAS	한국
계: 17건수					

학술회의 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명
대한전자공학회 추계학술대회	인간친화형 인터페이스를 위한 사용자 얼굴에서의 효과적인 의도 파악	2000.11.24-25		대한전자공학회	한국
2001 Spring Joint Conference of ICASE	A Comparison of the use of different wavelet basis function for the detection of the QRS Complex	2001.6.2		ICASE press	한국
대한전기학회 하계학술대회	각막 반사의 매핑을 이용한 비 접촉식 눈의 응시점 추정 시스템	2001.7.20		대한전기학회	한국
대한전자공학회 하계학술대회	퍼지 신경망과 강인한 영상 처리를 이용한 개인화 얼굴 표정 인식 시스템	2002.6.28-29		대한전자공학회	한국
ICCAS2001	Development of an EMG-based Powered Wheelchair Controller for Users with High-level Spinal Cord Injury	2001.10.17-21		ICASE press	한국
ICCAS2001	Classification of Arrhythmia Based on Discrete Wavelet Transform and Rough Set Theory	2001.10.17-21		ICASE press	한국
IROS2002	HMIs for a Wheelchair Robotics System for Handicapped Persons	accepted		-	스위스
ASCC2002	Human-Machine Cooperation for the Rehabilitation Robots based on the Design Principle	accepted		-	싱가폴
ICCAS2002	Supervisory control of a robotic wheelchair system	submitted		-	한국
ICCAS2002	Human-Friendly Interfaces of a Robot Manipulator Control System for handicapped person	submitted		-	한국
ICCAS2002	A Shared Control Method for a Novel Hand-held Master in Tele-Operation	submitted		-	한국
ROMAN2002	Image-based Personalized Facial Expression Recognition using Fuzzy Neural Networks	submitted		-	독일
SCIS&ICIS2002	Soft computing-based Intention Reading through the user's mouth for Human-friendly Human-Robot Interaction	submitted		-	일본
계: 13건수					

3. 연구성과

해당사항없음.

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

가. 당해연도 활용계획(6하원칙에 따라 구체적으로 작성)

장력 조절이 가능한 케이블 메커니즘은 기존의 기어 등을 이용한 동력전달 장치에 비하여 높은 backdrivability와 무시할만한 백래쉬, 작은 마찰력 등의 특징을 가지므로, 다양한 동력전달 장치에 활용이 가능하다. Real Time OS(QNX)를 이용한 제어 프로그램은 실시간 제어가 요구되는 어떤 제어기에도 사용이 가능하다. 목적 지향 설계방식을 이용한 로봇의 기구학적 해를 구하는 방법은

로봇 설계 소프트웨어를 제작하여서 체계적인 로봇 설계에 활용이 가능하다.

비전 기술에 기반한 인간-로봇 상호작용 기술은 비단 재활로봇 시스템 뿐만 아니라, 각종 인간-로봇 상호작용이 필요한 장소 및 시스템에 활용 가능하다. 예를 들자면, 지능형 주거 공간, 애완용 로봇, 인간형 로봇, 공공시설 내의 각종 도우미 로봇 등에 적합하다. 텐던 구동 구조를 이용한 구동 장치는 기존의 기어 중심의 구동 장치에 비해 많은 장점을 가지기 때문에 다양한 기구부 제작에 심분 활용될 것으로 기대된다.

생체신호(근전도)를 이용한 로봇 인터페이스 기술은 재활로봇을 포함한 각종 인간-기계 상호작용이 필요한 시스템에 활용될 수 있다. 가장 대표적인 것은 근전도를 이용한 의수의 제어이다. 또한 중증장애인을 위한 휠체어 제어, wearable computer를 위한 마우스 포인터 제어 등에 유용하게 사용될 수 있다.

Eye-mouse 시스템은 사용자의 머리와 눈동자의 움직임으로부터 컴퓨터와 주변 장치를 제어할 수 있도록 해 주는 인터페이스 장치로서, 척수 장애인이나 노약자뿐만 아니라 일반인에게도 편리한 입력 도구로서 활용 가능하다.

Body Motion을 이용한 로봇 인터페이스 기술은 장애인용 인터페이스뿐만 아니라 각종 컴퓨터 및 게임기용 인터페이스로서 활용 가능하다. 인터페이스에 지능을 부여하기 위해 개발된 인터페이스용 알고리즘은 인간-로봇 상호작용의 다양한 분야에 활용 가능하다.

Hand-held master의 연구결과는 신뢰성 및 인식능력을 높인 시제품 개발, 원격조종작업 로봇의 제어, 모바일 PC의 입력장치의 제어에 각각 활용할 예정이다. 또한, 센서의 각각의 성능과 센서퓨전했을 때의 전체 성능과의 대비 비교를 통한 시제품의 전체 시스템 설계에 활용가능하다.

나. 활용방법

장력 조절이 가능한 케이블 메커니즘은 관련 노하우를 로봇, 산업용 기계 업체등 보다 나은 동력 전달 체계를 원하는 업체와의 협의를 통하여 기존의 기어 등을 이용한 동력 전달 장치를 대체함으로써, 동력 전달 장치의 손실을 줄이고 성능 향상을 가져 올 수 있다. 실시간 운영 체계를 이용한 제어 프로그램은 역시 실시간 제어를 필요로 하는 관련 업체와의 협의를 통한 기술 이전 등의 방법을 통하여 공장 현장에 적용이 가능하다. 목적 지향 설계 방식을 이용한 로봇의 기구학적 해를 구하는 방법은 로봇 설계 소프트웨어를 제작하여서 체계적으로 로봇을 설계하고자 하는 업체와 협의 하에 기술 이전등의 방식으로 소프트웨어를 제공할 수 있다.

비전 기술은 관련기술 보유업체에 사전 협의를 통하여 기술이전 등을 통하여 추후 다양한 제품으로 생산 가능하며, 텐던 구동 구조 역시 관련 노하우를 기구부 설계관련 업체와의 협의를 통해 기존의 기어 기반 기구부를 대체함으로써, 성능 향상 및 경쟁력 상승, 원가 절감 등의 부대 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

개발된 무선 근전도 증폭기는 기존에 상용으로 판매되는 근전도 시스템에 비해 저가이며 고성능이므로 추후 제품 양산을 통한 이익을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

다양한 인터페이스 시스템의 개발과 이의 활용에 대한 연구가 활발한 현 시점에 비추어볼 때, Eye-mouse 시스템과 같이 시선 방향을 추출하는 편리하고 직관적인 인터페이스 시스템은 재활분야나 컴퓨터 및 게임 분야에서 사용자를 몰입시켜 흥미를 유발하는 새로운 방식의 프로그램을 만

드는 것이 가능하다.

머리 인터페이스의 경우 머리의 기울어진 정도를 측정할 수 있으므로 HMD의 기울각 측정 센서로 활용 가능하고 의복 형태 조종기의 경우 복잡한 작업을 수행하는데 있어서 손 이외에 어깨의 움직임을 명령으로 만드는데 사용할 수 있다. 예를 들면 수술을 집도하는 의사에게 어깨 움직임으로 수술 보조 장치를 움직이는데 이용할 수 있다. 지능형 인터페이스용 알고리즘은 각종 이동 로봇의 경로를 실시간으로 모니터링하고 이동 경로를 수정하는 작업에 활용할 수 있다.

Hand-held master는 원격조종 수술로봇, 조정밀 조립로봇, 극한작업용 로봇등의 각종 원격작업에서 사용자의 피로도를 줄이고 직관성을 줄여주는 입력장치로 활용 가능하다. 또한, 3D게임, 모바일 인터넷기기 등의 홈네트워크 솔루션에도 활용 가능하다.

다. 차년도이후 활용계획(6하원칙에 따라 구체적으로 작성)

한국과학기술원 측에서는 제작을 위한 연구결과를 관련업체(제작기술 보유기업)에 도면 혹은 시제품의 형태로 대여하고, 관련업체에서는 보유한 제작기술을 충분히 활용하여 필요 제작기간(6개월 이내)에 제품화를 완료하고 가능한 경우, 상품화를 통하여 국내·외 관련연구소 등에 납품함으로써 수익 발생을 꾀한다.

5. 기대효과

연구개발결과를 활용할 경우, 표 1과 같은 시스템들이 제품화될 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 과제가 종료되는 2003년 말경에는 지능형 인간-로봇 상호작용 기술 시장이 본격적으로 형성될 것으로 예상되며, 서비스 로봇 기술 분야에서 세계적으로 주도적인 위치를 확보할 것으로 예상된다. 본 과제가 실용화될 경우에 개발중인 시스템은 수입대체 및 원가절감 효과 이외에도 수출을 통하여 국제 경쟁력 강화에 도움이 될 것으로 예상되는 바이다. 각종 인간-로봇 상호작용 기술은 범용 서비스 로봇, Wearable PC, Mobile Internet 기기, Virtual Reality 등으로 적용 범위를 확장하여 개발될 가능성이 충분하다.

표 1. 제품화 가능한 시스템

제품	내용	주요용도
다용도 Eye-mouse 시스템	컴퓨터 인터페이스로서의 Eye-mouse 시스템	장애인을 위한 상호작용장치 가상 현실을 위한 상호작용장치
Body Motion을 이용한 다양한 인터페이스	의복 형태 햅틱 수트 Head Interface 2자유도 반응동 힘반향 조이스틱	로봇 조정 장치 가상현실/오락을 위한 상호작용장치 원격제어용 상호작용장치
지능형 휠체어 구동 시스템	장애물 감지 시스템 지능형 Supervisory 알고리즘	로봇 시스템에 인간의 지능을 접목시킬 수 있는 유용한 알고리즘
비주얼 서보잉을 위한 소형/경량의 스테레오 비전 시스템	물체 추적 장치 지능 시각 모듈	움직이는 물체에 대한 추적/잡기 사용자의 표정을 이용한 상호작용장치
생체신호에 의한 로봇 구동 장치	4 자유도 로봇 구동 장치 6 자유도 로봇 구동 장치	지능 로봇 제어 사용자 의도 파악
소프트 로봇 팔	6 자유도 로봇 팔 케이블 메카니즘을 이용한 Backdrivable 기능	사용자의 안전성(Safety)을 고려한 로봇 팔
로봇의 기구학 구조 결정 Software	격자방법 이용, 정의된 작업을 구현하는 로봇의 기구학 구조를 찾아줌	작업이 정의되어 있는 로봇의 설계시에 유용하게 사용됨
마이크로 입력장치	펜 형태의 6자유도 입력 장치	Mobile 인터넷과 Wearable PC에 사용
재활 로봇 시스템	지능적 인간-로봇 상호작용	환자/장애인의 재활

6. 문제점 및 건의사항(연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점을 기재)

[첨부2]

기술 요약서 (1)

■ 기술의 명칭

장력 조절이 가능한 케이블 메커니즘

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호				
과제명	지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술원 (KAIST)	기관유형	학술·비영리	
참여기관(기업)	삼성전자(주)종합기술원			
총연구기간	2000.9.1 ~ 2002.8.30			
총연구비	정부(890,000)천원	민간(426,000)천원	합계(1,316,000)천원	
연구책임자 1	성명	변 증 남	주민번호	431011 - 1006513
	근무기관 부서	전자전산학과 전기및전자공학전공	E-mail	zbien@ee.kaist.ac.kr
	직위/직급	교수	전화번호	042-869-3419
실무연락책임자	성명	김대진	소속/부서	전자전산학과 전기및전자공학전공
	직위/직급	박사과정	E-mail	djkim@mail.kaist.ac.kr
	전화번호	042-869-8019	FAX	042-869-8750
	주소	(305-701) 대전시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

장력 조절이 가능한 케이블 메커니즘은 케이블을 이용하여 동력을 전달하는 방법이다. 기존의 케이블을 사용하는 방법들이 장력 조절에 문제가 있었던 것에 비해서 본 기술은 간단한 조작으로 케이블의 장력 조절이 쉽게 가능하다.

<기술적 특징>

- (1) 케이블의 장력을 손쉽게 조절할 수 있음

- (2) 케이블을 감는 경우에도 별도의 장치 없이 손쉽게 감을 수 있음

- (3) 상용 worm 기어를 사용하여 경제적임

[용도 · 이용분야]

- (1) 로봇 등과 같이 동력 전달에 작은 마찰력과 무시할만한 백래쉬 특성이 요구되는 경우에 사용 가능

- (2) 동력 전달 체계에 backdrivability가 요구되는 경우 사용가능

- (3) 구동 장치와 구동부가 멀리 떨어져 있는 경우 동력 전달에 사용 가능

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√로 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
√	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

[첨부2]

기술 요약서 (2)

■ 기술의 명칭

<p>텐던구동구조를 이용한 스테레오 카메라 구동장치</p>

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호				
과제명	지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술원 (KAIST)	기관유형	학술·비영리	
참여기관(기업)	삼성전자(주)종합기술원			
총연구기간	2000.9.1 ~ 2002.8.30			
총연구비	정부(890,000)천원 민간(426,000)천원 합계(1,316,000)천원			
연구책임자 1	성명	변 증 남	주민번호	431011 - 1006513
	근무기관 부서	전자전산학과 전기및전자공학전공	E-mail	zbien@ee.kaist.ac.kr
	직위/직급	교수	전화번호	042-869-3419
실무연락책임자	성명	김대진	소속/부서	전자전산학과 전기및전자공학전공
	직위/직급	박사과정	E-mail	djkim@mail.kaist.ac.kr
	전화번호	042-869-8019	FAX	042-869-8750
	주소	(305-701) 대전시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원		

■ 기술의 주요내용

본 기술은 스테레오 카메라의 이접운동이 가능하게 하는 기구부의 설계에 관한 것으로, 더 상세하게는 스테레오 카메라를 이용하여 대상물체의 심도를 측정하기 위해 이접운동을 제어하는데 있어서 카메라의 회전이 가능하게 하는 부분과 이를 구동하기 위한 모터 사이의 동력 전달 방식에 관한 것이다. 앞에서 언급한 동력전달 방식이란 한 쌍의 케이블을 폴리에 감아 동력을 전달하는 구조로써 동력 전달과정에서 발생하는 백래시에 의한 제어오차를 감소시킬 수 있으며, 모터와 카메라의 배치가 자유로와 협소하고 복잡한 공간에 적용하기 쉽다.

본 기술은 스테레오 카메라의 이접운동 제어를 위한 구동장치에 있어서, 동력을 발생시키는 모터와 회전운동이 가능한 카메라에 각각 부착된 폴리와, 폴리에 감겨 동력을 전달하는 케이블과, 모터와 카메라의 회전축이 평행하지 않는 경우 회전방향을 변화시킬 수 있도록 케이블의 방향을 유도할 수 있는 케이블 유도장치로 구성이 된다.

본 기술은 로봇의 말단부에 카메라를 부착하여 로봇을 제어하는 경우와 같이 카메라를 구동하는 기구부의 경량화가 중요시되는 적용에서 경량의 카메라 구동장치를 개발함과 동시에 복잡하고 협소한 구조에도 쉽게 적용이 가능할 뿐만 아니라 동력전달 과정에서 발생하는 백래시를 감소하여 카메라 제어의 오차를 감소시키는 유용한 발명이다.

[용도 · 이용분야]

- (1) 로봇의 말단부에 카메라를 부착하여 로봇을 제어하는 경우와 같이 카메라를 구동하는 기구부의 경량화가 중요시되는 적용에서 경량의 카메라 구동장치 개발.
- (2) 복잡하고 협소한 구조를 갖는 각종 기구부에도 간단한 조정을 통해 쉽게 적용이 가능.
- (3) 동력전달 과정에서 발생하는 백래시를 감소하여 기구부 제어의 오차를 감소.

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개만 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
√	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

[첨부2]

기술 요약서 (3)

■ 기술의 명칭

무선 근전도 증폭 장치

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호				
과제명	지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술원 (KAIST)	기관유형	학술 · 비영리	
참여기관(기업)	삼성전자(주)종합기술원			
총연구기간	2000.9.1 ~ 2002.8.30			
총연구비	정부(890,000)천원	민간(426,000)천원	합계(1,316,000)천원	
연구책임자 1	성명	변 중 남	주민번호	431011 - 1006513
	근무기관 부서	전자전산학과 전기및전자공학전공	E-mail	zbien@ee.kaist.ac.kr
	직위/직급	교수	전화번호	042-869-3419
실무연락책임자	성명	김대진	소속/부서	전자전산학과 전기및전자공학전공
	직위/직급	박사과정	E-mail	djkim@mail.kaist.ac.kr
	전화번호	042-869-8019	FAX	042-869-8750
	주소	(305-701) 대전시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원		

■ 기술의 주요내용

본 기술은 생체 신호 중 근전도 신호를 측정하여 증폭하는 장치의 설계에 관한 것으로, 더 상세하게는 크기가 작은 입력신호에서 동상잡음을 제거하기 위한 차동 증폭기 부분과 전원 잡음을 포함한 각종 잡음을 제거하기 위한 Notch 필터 부분, 필요한 증폭도를 얻기 위한 증폭기 부분, 증폭된 신호를 무선으로 전송하기 위한 RF 부분에 관한 것이다.

본 기술은 중증 장애인은 물론 비장애인의 생체신호를 이용한 각종 인간-기계 상호작용에 있어서 유용하게 사용될 수 있으며 주요 응용예는 다음과 같다.

- (1) 의수의 지능제어
- (2) Wearable computer의 마우스 모인터 제어
- (3) 중증 장애인을 위한 전동 휠체어 제어기
- (4) 근전도 신호를 이용한 근육의 이상유무 검사

[용도 · 이용분야]

- (1) 의수의 지능제어
- (2) Wearable computer의 마우스 포인터 제어
- (3) 중증 장애인을 위한 전동 휠체어 제어기
- (4) 근전도 신호를 이용한 근육의 이상유무 검사

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적용시킴
√	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

[첨부2]

기술 요약서 (4)

■ 기술의 명칭

눈 응시점 추정 방법

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호				
과제명	지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술원 (KAIST)	기관유형	학술·비영리	
참여기관(기업)	삼성전자(주)종합기술원			
총연구기간	2000.9.1 ~ 2002.8.30			
총연구비	정부(890,000)천원	민간(426,000)천원	합계(1,316,000)천원	
연구책임자 1	성명	변 증 남	주민번호	431011 - 1006513
	근무기관 부서	전자전산학과 전기및전자공학전공	E-mail	zbien@ee.kaist.ac.kr
	직위/직급	교수	전화번호	042-869-3419
실무연락책임자	성명	김대진	소속/부서	전자전산학과 전기및전자공학전공
	직위/직급	박사과정	E-mail	djkim@mail.kaist.ac.kr
	전화번호	042-869-8019	FAX	042-869-8750
	주소	(305-701) 대전시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원		

■ 기술의 주요내용

본 기술은 사용자의 몸에 어떠한 장치의 부착도 없이 적외선 LED의 눈 표면에서의 반사(각막 반사 및 동공 반사)를 카메라로 측정하여 시선 방향을 측정하는 기술이다. 기존의 적외선 LED를 이용한 방법은 하나의 LED를 이용하며 눈의 위치, 카메라의 위치, 모니터의 위치 사이의 관계를 구하고 눈 응시 방향을 계산하기 때문에 카메라와 눈 사이의 거리를 측정하는 문제를 해결하기 위한 방법이 필요하다. 그러나 본 기술은 이와 달리 복수개의 적외선 LED를 사용한다. 본 연구에서 제시하는 방법은 기존의 방법에서처럼 눈의 응시 방향을 먼저 구하고 눈의 위치와 모니터의 위치에 따라 모니터 스크린의 어느 점을 보고 있는지 계산하지 않으며 바라보고 있는 점을 대응 방식에 의해 직접 추정한다.

전체 시스템은 한 개의 CCD카메라와 5개의 적외선 LED로 구성된다. CCD카메라는 사용자의 전면에 장착되어 있고 4개의 적외선 LED는 컴퓨터 모니터의 각 모서리에 설치되고 나머지 한 개의 적외선 LED가 카메라의 렌즈 중심 부분에 위치하고 있다.

[용도 · 이용분야]

- (1) 비 접촉식 컴퓨터 인터페이스 장치로서 시선에 의한 컴퓨터 모니터의 마우스 포인터를 움직일 수 있음
- (2) 손발을 쓰지 못하는 장애인의 컴퓨터 인터페이스 장치로서 재활 분야에 쓰일 수 있음
- (3) 컴퓨터의 게임이나 가상현실 장치에 접목하여 현실감 있는 프로그램을 만들 수 있음

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개만 선택(✓로 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적용시킴
	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
✓	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

[첨부2]

기술 요약서 (5)

■ 기술의 명칭

의복에 부착 가능한 장력 측정 센서

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호				
과제명	지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	서비스로봇 기술 개발			
연구기관	한국과학기술원 (KAIST)	기관유형	학술·비영리	
참여기관(기업)	삼성전자(주)종합기술원			
총연구기간	2000.9.1 ~ 2002.8.30			
총연구비	정부(890,000)천원 민간(426,000)천원 합계(1,316,000)천원			
연구책임자 1	성명	변 증 남	주민번호	431011 - 1006513
	근무기관 부서	전자전산학과 전기및전자공학전공	E-mail	zbien@ee.kaist.ac.kr
	직위/직급	교수	전화번호	042-869-3419
실무연락책임자	성명	김대진	소속/부서	전자전산학과 전기및전자공학전공
	직위/직급	박사과정	E-mail	djkim@mail.kaist.ac.kr
	전화번호	042-869-8019	FAX	042-869-8750
	주소	(305-701) 대전시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

본 '의복에 부착 가능한 장력 측정 센서'는 FSR(Force Sensitive Resister)를 이용한 간단한 형태의 장력 측정 센서이다.

<기술적 특징>

- (1) 센서부의 output은 저항치가 되기 때문에 간단한 voltage divider만으로 측정이 가능함
- (2) 소비 전력이 매우 작음
- (3) 사람의 의복 위와 같은 유연한 물체에 부착하기가 용이함
- (4) 강건한 구조로 되어 있음

[용도 · 이용분야]

- (1) 장애인용 휠체어 로봇 시스템의 입력장치
- (2) 컴퓨터 인터페이스
- (3) 산업용 입력 장치

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√로 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적응시킴
	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
√	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술

[기술개요]

기술명	
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	

[기술을 도출한 과제현황]

과제관리번호			
과제명	세부과제명		
사업명	중점국가연구개발사업		
세부사업명	서비스로봇 기술 개발		
연구기관		기관유형	
참여기관(기업)			
총연구기간			
총연구비	합계 : ()백만원 - 정부 : ()백만원 민간 : ()백만원		
연구책임자	소속		성명
	전화번호		E-mail
연구개발 주요내용			

- 위탁과제 -

여 백

이동로봇을 위한 자동 지도작성 및 위치측정 알고리즘의 개발

(고려대학교 송재복)

I. 연구개발의 목적 및 필요성

주변환경에 대한 표현은 자율 이동로봇의 주행에 있어서 매우 중요하다. 주변환경에 대한 일반적인 표현 방식으로 지도를 작성하는데, 이러한 지도에는 격자지도(grid map)와 토폴로지컬 지도(topological map)가 있다. 격자지도는 주변환경을 등간격으로 설정된 격자로 표현함으로써 물체의 절대적인 기하학적 위치에 기초하여 공간을 나타낸다. 즉, 각 격자는 대응되는 영역 내에 장애물이 존재하는지의 여부를 표시한다. 반면에, Thrun[1]이나 Kuipers[2]에 의해 제시된 토폴로지컬 지도는 격자지도에 비해 추상적인 표현법으로서, 어떤 절대적인 기준좌표를 도입하지 않고 주변환경의 특징 간의 관계만을 표현하게 된다. 따라서, 일반적으로 토폴로지컬 지도는 노드와 원호로 구성된 그래프를 통해 표현함으로써 간결한 지도를 얻을 수 있다. 격자지도는 센서의 불확실성을 감소시키며, 주변환경에 대한 비교적 정확한 모델링을 수행할 수 있다는 장점이 있지만, 메모리를 많이 차지하며, 어떤 기능을 수행하는 데 있어서 많은 시간이 소요된다. 이는 주변환경의 모든 상세한 부분까지 표현하기 위해서는 격자가 그만큼 세밀해야 하기 때문이다. 이에 비하여, 토폴로지컬 지도의 가장 큰 장점이 간결성이다[3]. 즉, 토폴로지컬 지도의 해상도는 주변환경이 얼마나 복잡한가(노드의 개수와 연결 관계)에 직접적으로 연관될 뿐이다. 토폴로지컬 지도는 격자지도와 비교할 때, 다음과 같은 세 가지 장점을 갖는다. 첫째, 신속한 경로계획이 가능하다. 둘째, symbolic planner와 problem-solver와 연결하기 쉽다. 셋째, 인간의 지시 혹은 추론이라는 측면에서 볼 때 더욱 자연스러운 인터페이스를 제공한다. 예를 들어, '이 길로 계속 가다가, 사거리를 만나면 거기서 왼쪽으로 꺾으면 나오는 장소'와 같은 표현법이 바로 토폴로지컬 지도인 것이다. 또한, 토폴로지컬 지도에서는 로봇의 정확한 위치를 알 필요가 없으므로, 드리프트(drift)와 미끄러짐(slippage)에 대해서도 우수한 성능을 보인다. 반면에, 격자지도에서는 이런 현상들을 지속적으로 감지하고, 보정하여야 한다. 물론 토폴로지컬 지도를 사용하게 되면, 순간의 센서 측정치에만 의존하므로 위치추적이 어렵게 된다는 단점도 있다.

II. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 격자지도와 토폴로지컬 지도, 이 두 기법을 조합하여 각 기법의 장점만을 활용하는 방식과[4] 궁극적으로 토폴로지컬 지도만을 활용하여 지도를 작성하기 위한 기본 연구를 추진하도록 한다. 토폴로지컬 지도를 작성함에 있어서 보로노이 선도를 활용하는 기존의 방식과 세선화를 사용하는 개선된 방식을 제시한다. 우선 보로노이 선도를 이용하는 방법에서는 격자지도를 확률기법을 이용하여 작성하고, 이 지도를 임계선(critical line)을 이용하여 인접지역(coherent region)으로 분리하는 방식을 통해 토폴로지컬 지도를 작성한다. 이 때, 임계선은 현관과 복도와 같은 좁은 통로에 해당된다. 이렇게 함으로써 적절한 크기와 복잡함을 지닌 환경을 모델링하고, 이를 유지하기에 수월하다는 격자지도의 장점과 신속한 계획과 문제 해결(problem-solving)이 가능한 토폴로지컬 지도의 장점을 모두 활용할 수 있게 된다. 물론 큰 메모리에 대한 요구와 정확한 위치추적과 같은 문제는 여전히 남아 있게 된다.

또한, 세선화(thinning)를 활용한 방법에 대해서도 연구하도록 한다. 일반적으로 토폴로지컬 지도를 작성하기 위해서는 보로노이 선도를 이용하는 경우가 많으나, 임의의 형상을 지닌 물체에 대해 적용하기 어렵고, 계산량이 많다는 단점을 가진다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 보로노이 선도의 대안으로 세선화를 활용하였다. 이렇게 작성된 토폴로지컬 지도의 효율성을 검증하기 위해 간단한 경로계획 문제에 적용하였다.

III. 연구개발 결과

1. 점유 격자지도(occupancy grid map)

초음파센서의 측정값들을 점유 격자지도를 통해 해석한다는 것은 개별 격자들의 점유 확률을 정의하는 것에 해당한다. 확률을 정의할 격자의 위치는 Fig. 1과 같이 (r, θ) 로 표현한다.

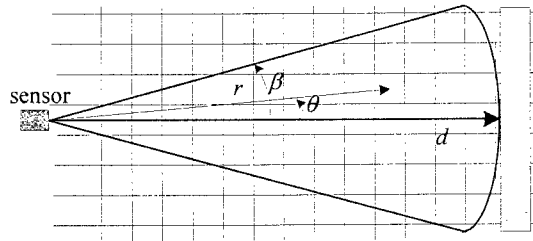


Fig. 1 Polar coordinates defined in the grid.

초음파센서가 거리 d 를 측정하였을 때, 각 격자까지의 거리 r 과 중심축과 격자간의 각도 θ 에 따른 격자의 점유 확률밀도함수(occupancy probability density function)를 다음과 같이 정의한다.

$$p(d, r, \theta) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(r-d)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

여기서, σ 는 격자 크기이다. 즉, 격자의 위치가 d 에 가까울수록 점유되었을 확률이 높다. 또한, 위치가 d 보다 큰 격자들에 대해서는 물체에 가려서 정보를 알 수 없다고 취급하여 0.5의 확률을 부여하며, 이 확률은 초음파센서의 중심축에서 일정 각도($\pm\beta$) 이내에서만 부여한다.

베이저안 확률 갱신식

격자의 점유확률은 시점 t 까지의 모든 측정정보의 집합인 $\{d\}_t$ 에 기초하여 격자가 점유되었을 확률 $P[S=OCC|\{d\}_t]$ 로 정의된다. 여기서, OCC 는 점유상태를 나타낸다. $P[S=OCC|\{d\}_t]$ 는 시점 $t-1$ 까지의 격자의 점유확률 $P[S=OCC|\{d\}_{t-1}]$ 와 시점 t 에서 측정된 확률밀도함수인 $P[\{d\}_t|S=OCC]$ 에 기초하여 결정된다. 즉, 베이저안 확률 갱신식(Bayesian probability updating formula)은 각 상태 S (점유(OCC) 혹은 비점유(EMP))에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P[S = OCC\{d\}_t] = \frac{p[d_t|o]P[S = OCC\{d\}_{t-1}]}{\sum_S p[d_t|S]P[S\{d\}_{t-1}]} \quad (2)$$

베이저안 확률 갱신식을 이용하면 격자의 과거 점유확률과 현재 시점에서 측정된 점유 확률밀도함수를 근거로 하여, 현재의 점유확률을 시간에 대해 재귀적(recursive)으로 구할 수 있다. 각 격자의 초기 확률값은 점유상태를 알 수 없으므로 0.5로 설정한다. 한편, 격자가 점유되어 있지 않을 확률은 점유되어 있을 확률의 여사건이라는 조건에 의해 쉽게 구할 수 있다.

2. 보로노이 선도를 이용한 토폴로지컬 지도의 작성

보로노이 선도(Voronoi diagram)[5]는 물체의 경계로부터 동일한 거리에 있는 점들의 자취이다. 이 선도는 물체들 사이의 공간이 물체 자체보다 더 중요하게 취급되는 자유공간 데이터 구조의 일종으로, 물체들이 존재하는 평면을 다각형 영역인 보로노이 영역(Voronoi region)으로 분할함으로써 만들어진다. 이 때, 각 영역은 주변의 어떤 점들보다 다각형 내의 기준점에 더 가까운 점들의 집합을 나타내고, 각 영역의 경계(보로노이 에지)는 이웃한 두 점 사이의 거리가 동일한 점들로 구성된다.

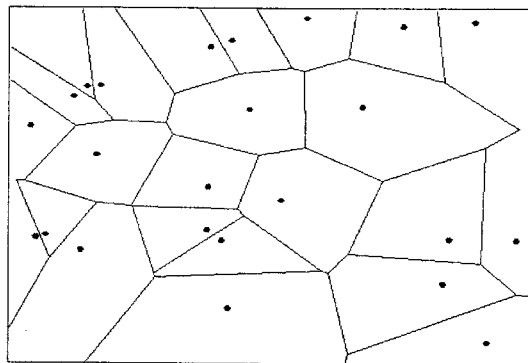


Fig. 2 Voronoi diagram in R^2 .

레이블드(labeled) 보로노이 선도

보로노이 선도를 이용한 토폴로지컬 지도는 많이 연구되어 있으나[7], 대부분의 경우 계산과정이 복잡하여 다양한 형태를 지닌 환경에 대해서는 적용하기 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 본 연구에서 사용된 격자지도의 특성을 잘 살릴 수 있으며, 알고리즘도 비교적 단순한 보로노이 선도 작성기법으로 레이블드 보로노이 선도를 사용하였다. 레이블드 보로노이 선도는 CA구조(cellular automata architecture)의 확장을 이용하여 보로노이 선도를 작성하는 기법이다.

레이블드 보로노이 선도를 작성하기 위해 사용된 CA구조에서, 격자 간의 국부적 연결관계는 Fig. 3과 같이 그 격자를 둘러싼 4-*nn*(4-nearest neighbors 또는 Von-Neumann neighborhood라고도 함)으로 제한된다.

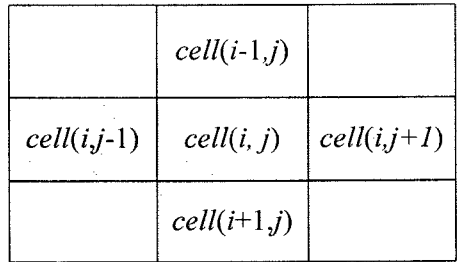


Fig. 3 Description of 4-*nn*.

레이블드 보로노이 선도의 작성 과정

점유된 격자는 1, 점유되지 않은 격자는 0으로 값이 정해진 이진지도(binary map)에 대해 물체의 경계를 검출하고, 이렇게 검출된 경계(소스, source)를 외부로 확장하면서 각 경계가 만나는 점을 보로노이 선도의 부분으로 인식하게 된다. 그렇게 되면 보로노이 선도는 각 물체의 중심에 위치하게 된다. Fig. 4는 시간에 따른 소스의 확장을 나타낸다. 그림을 통해 각 소스를 중심으로 확장이 동시에 수행되고 있으며, 확장을 통해 만나는 점(굵은 글씨로 표현한 2*V*)에서는 더 이상 확장이 진행되지 않고, 보로노이 선도의 일부가 된다.

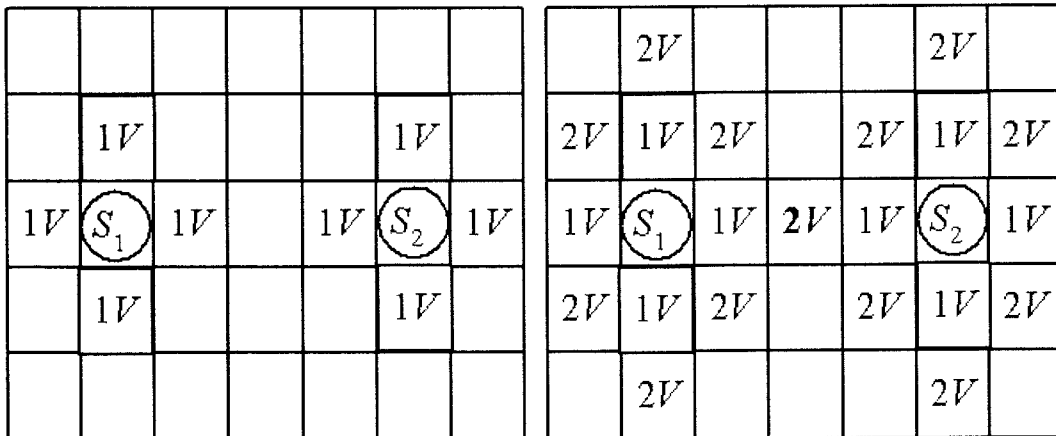
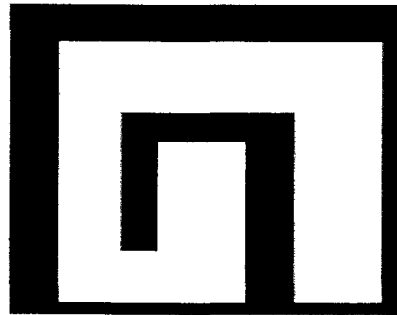


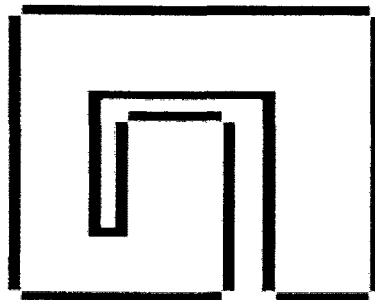
Fig. 4 Source expansion at time $t = 1$ and 2.

시뮬레이션 결과

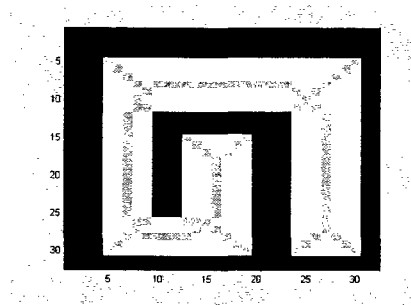
Fig. 5는 시뮬레이션을 위해 임의로 작성된 이진지도(Fig. 5a)를 이용하여 에지를 검출하고(Fig. 5b), 이를 확장하여 보로노이 선도를 작성하는 결과이다.



(a) Configuration of obstacles.



(b) Edge detection.



(c) Labeled Voronoi diagram.

Fig. 5 Simulation results.

임계점과 임계선

임계점은 물체와 물체 사이의 거리를 국부적으로 비교하였을 때 최소가 되는 보로노이

선도상의 점이다. 이 때, 임계점은 두 개의 기준점(물체와 물체 사이의 거리가 최소가 되는 경계점)을 가지게 된다. 또한, 임계선(critical line)은 임계점과 그 임계점을 선정하는데 사용된 두 기준점을 연결함으로써 생성되는 선이다. 이 선을 기준으로 자유 공간들이 토폴로지컬 영역으로 분할된다.

실험결과 및 고찰

토폴로지컬 지도 작성

Fig. 6은 초음파 센서를 통해 얻은 2진지도와 토폴로지컬 지도를 보여준다. 각 노드는 토폴로지컬 영역의 중점으로, 토폴로지컬 지도에는 각 노드간의 연결 관계와 인접한 노드까지의 거리정보를 포함하도록 하였다.

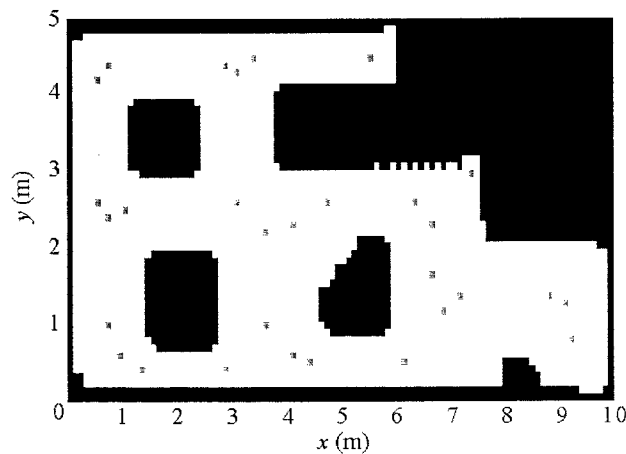
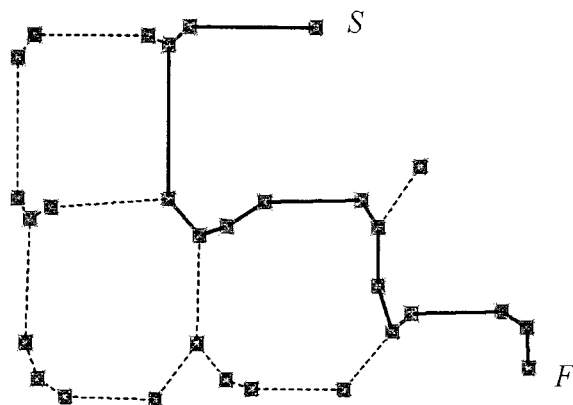


Fig. 6 Experimental results for binary map and its corresponding topological map building.

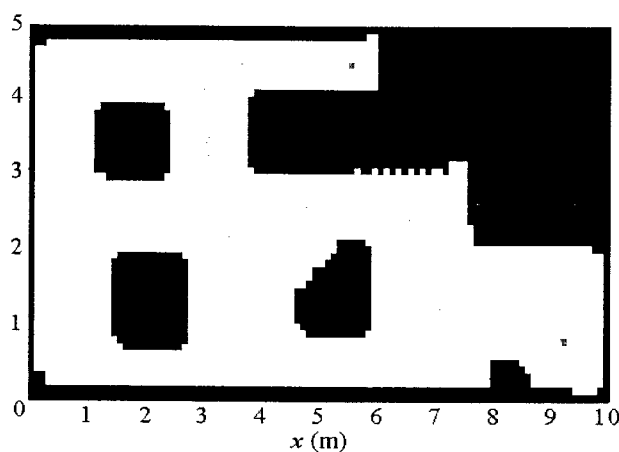
경로 계획 시뮬레이션 및 실험

작성된 토폴로지컬 지도의 효율성을 검증하기 위해, 간단한 전역 경로계획을 수행하였으며, 실제로 주행실험을 수행하였다. Fig. 7은 위에서 구한 토폴로지컬 지도를 이용해 경로계획을 수행한 결과이다. 효율성을 검증하기 위해, 출발노드(S)에서 도착노드(F)까지 여러 경로를 가질 수 있는 환경에서 실험을 수행하였다. 저장된 각 노드간의 연결관계를 통해 출발노드에서 도착노드까지의 모든 가능한 경로를 찾아내고, 이렇게 찾아낸 모든 경로에 대해 노드간의 거리를 비용으로 두고, A* 알고리즘을 통해 최적경로를 생성하였다. 결

과를 통해, 로봇이 현재 위치에서 목표하는 위치까지 도달하는 경로를 알고 있다고 하더라도, 최대 26m까지 주행하게 되지만, 최단 거리(12m)를 찾을 수 있게 된다(Fig. 7a 참조). Fig. 7b는 이렇게 생성된 경로를 로봇이 직접 추종하는 실험을 수행한 결과이다. 로봇은 전역 경로계획에 따라 설정된 노드를 따라가게 된다.



(a) All possible paths and optimal path.



(b) Experimental results for navigation from node S to F.

Fig. 7 Experimental results for finding all possible paths and optimal path and navigation.

3. 세션화를 이용한 토폴로지컬 지도의 작성

보로노이 선도를 적용함에 있어서, 만일 임의의 형상을 가진 장애물들이 존재하는 공간 내에서 보로노이 선도를 이용하는 경우 복잡한 알고리즘과 이에 따른 많은 계산을 필요로

하게 되며, 보로노이 선도를 경로로 사용하기 위해서는 부가적인 처리 과정이 필요하다.

토폴로지컬 지도를 작성하기 위한 또 다른 방법으로 영상처리 기법 중의 하나인 세선화(thinning) 방식이 있다. 세선화는 경로가 장애물로부터 멀리 떨어져 있어 장애물과의 충돌을 피할 수 있는 보로노이 선도의 장점을 가지고 있지만, 그 과정이 보로노이 선도보다 더 단순하다. 본 논문에서는 세선화에 의해 생성된 경로들로부터 최단거리의 경로를 구하기 위해 임계점(critical point)을 이용하는데, 이는 통로들의 연결 상태를 파악하고, 각 직선 통로의 길이를 결정하기 위해 사용된다. 임계점에는 경로계획을 위해 필요한 정보들이 저장되고[9], 이러한 정보들을 이용하여 기존의 경로계획 방법들이 최단경로만을 구해내는 것과 달리, 이동로봇이 출발점에서 목표점까지 이동할 수 있는 모든 경로를 탐색하며, 그 중에서 최단거리의 경로를 찾아낸다. 또한, 임계점에 각 통로의 정보가 저장되어 있으므로 같은 지도에서 출발점과 목표점이 변한다 해도 빠른 시간 내에 새로운 경로를 얻을 수 있다.

세선화

이동로봇의 주행경로의 생성에는 다양한 방법이 이용되는데, 이동로봇의 주행에 사용되는 격자지도도 하나의 이진영상으로 취급할 수 있기 때문에 영상처리 기법을 이용하여 경로생성에 활용할 수 있다. 주로 침식(erosion)이나 확장(dilation)을 다른 기법과 함께 사용하여 경로를 추출하기도 하나[10], 실내공간에서는 세선화(thinning)만을 사용하여도 충분히 명확한 경로를 추출할 수 있다. 세선화[11]는 Fig. 8에서 나타나 있듯이, 도형의 연결성은 변화시키지 않고 선으로 변화시키기 때문에, 그 결과에서 도형의 결합관계의 특징을 구할 수 있다.

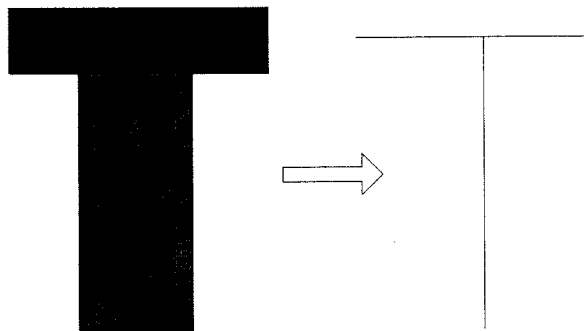


Fig. 8 Example of thinning.

세선화를 수행하는 알고리즘 중에 가장 기본이 되는 알고리즘으로 Suen의 세선화 알고리즘이 있다. 이 알고리즘은, 3×3의 이웃하는 격자(cell) 안에서 그 값들을 조사하여 각 영역이 세선화될 때까지 각 영역의 경계선을 차례대로 제거하는 것이다. Fig. 9는 세선화 알

고리즘에 사용하는 이웃 격자들의 배열을 마스크 형식으로 나타낸 것이다. 여기서 p_i 는 격자번호이다.

p_9	p_2	p_3
p_8	p_1	p_4
p_7	p_6	p_5

Fig. 9 Thinning mask.

이와 같은 세션화 알고리즘은 다음의 두 단계로 구성되어 있으며, 이들 단계가 반복되면서 모든 조건을 만족하는 격자만이 세션화 과정에서 삭제된다.

<단계 1>

- ① $2 \leq N(p_1) \leq 6$, ② $S(p_1) = 1$, ③ $p_2 \times p_4 \times p_6 = 0$,
- ④ $p_4 \times p_6 \times p_8 = 0$

$N(p_1)$: 0이 아닌 p_1 의 이웃 격자의 개수. 즉, $N(p_1) = p_2 + p_3 + \dots + p_9$.

$S(p_1)$: p_2, p_3, \dots, p_9 의 정렬된 순서에서 0에서 1로 바뀌는 횟수.

<단계 2>

- ①, ②는 <단계 1>과 동일
- ③ $p_2 \times p_4 \times p_6 = 0$
- ④ $p_2 \times p_6 \times p_8 = 0$

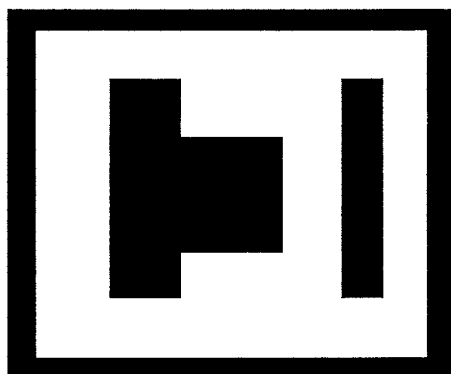
위의 두 단계의 조건 ①과 ②에 의해 끝점이나 영역 내부, 그리고 두 개의 영역을 연결하는 부분의 격자는 조건을 만족하지 않게 되므로 삭제되지 않고, 모든 조건을 만족하는 도형의 외곽선부터 차례대로 삭제된다. 세션화 알고리즘의 반복과정을 간단히 나열하면 다음과 같다.

- ① <단계 1>의 모든 조건을 만족하는 외곽의 격자들의 삭제,
- ② 남겨진 외곽의 격자들에 대해 <단계 2>를 적용하여 모든 조건을 만족하는 격자들의 삭제.

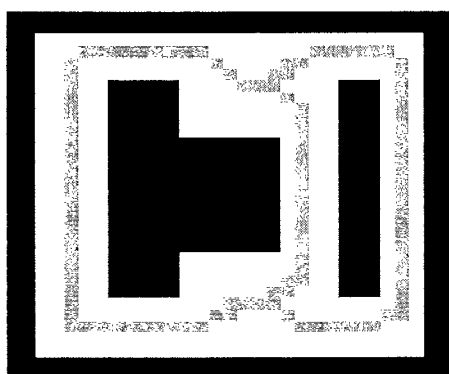
이러한 과정은 더 이상 삭제될 외곽의 격자가 없을 때까지 반복적으로 적용된다.

세션화 알고리즘을 이진지도의 통로 영역에 대하여 수행하면, 위의 과정이 모두 종료된 후에 통로의 중앙을 끊어짐 없이 표시하는 충돌회피 경로(collision-free path)를 얻을 수 있다. Fig. 10은 세션화를 이용해서 간단한 이진지도의 충돌회피 경로를 구한 예이다. 검은

부분이 물체가 있는 부분이고, 회색의 선이 세선화에 의해 구해진 경로이다.



(a) Binary map



(b) Collision-free path obtained by thinning.

Fig. 10 Binary map and collision-free path.

임계점의 선정

임계점은 경로에 포함되는 여러 점들 중에서 선택되는 기준점으로, 주변 통로의 연결상태와 거리정보가 저장되는 점이다. 임계점의 설정 지점과 수는 알고리즘의 실행속도와 정확도에 영향을 미치므로, 적절한 개수를 적절한 지점에 설정하는 것이 중요하다. 여기서는 경로의 코너지점과 끝점, 그리고 여러 갈래의 경로가 만나는 지점에 설정한다. Fig. 11에서는 임의의 이진지도에 대해 위와 같은 방법으로 설정된 임계점들을 보여준다. Fig. 11(b)에서 회색의 경로상에 검은 점으로 표시된 것이 경로계획을 위해 설정된 임계점이다.

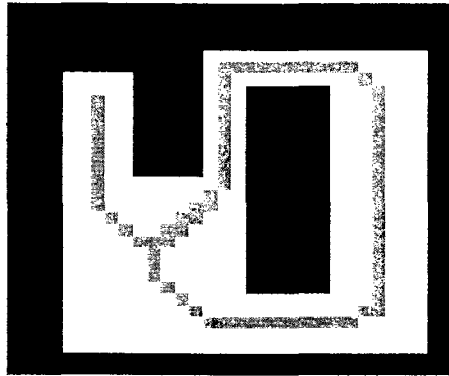


Fig. 11 (a) Collision-free path.

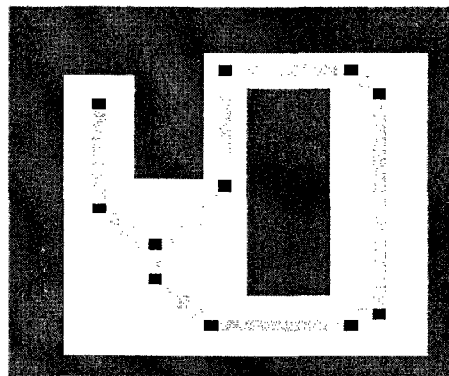


Fig. 11 (b) Critical points.

임계점을 이용한 경로 계획

경로계획 알고리즘은 크게 3가지 단계로 나타낼 수 있다. 첫 번째 단계에서는, 세선화를 통해 이동로봇이 장애물과 충돌하지 않고 이동할 수 있는 충돌회피 경로를 생성한다. 두 번째 단계에서는, 첫 번째 단계에서 생성한 충돌회피 경로를 바탕으로, 주어진 출발점에서 목표지점까지 이동로봇이 갈 수 있는 모든 경로를 찾는다. 세 번째 단계에서는, 두 번째 단계에서 생성한 모든 경로 중에 가장 거리가 짧은 경로를 선택한다. 알고리즘이 단순하여 실시간으로 수행할 수 있는 장점을 가진다.

시뮬레이션 결과

제시한 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. Fig. 12는 북서쪽의 임계점과 지도 중앙의 임계점을 각각 출발점과 목표점으로 설정하고 경로계획 알고리즘을 실행한 결과를 보여준다. (a)는 시뮬레이션을 수행하기 위해 설정된 임의의 환경에 세선화를 통해 구한 충돌회피 경로와 임계점들을 표시한 것이다. (b)에서 (g)까지는 이 환경에서 정해진 출발

점부터 목표점까지 이동로봇이 이동할 수 있는 모든 경로를 보여주는데, 이 6가지의 경로 중에 최단경로는 (b)의 경로이다.

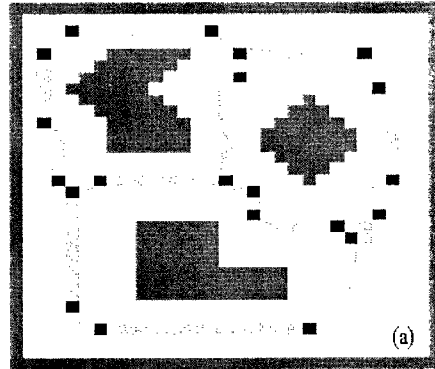


Fig. 12 (a) Collision-free path and critical points on binary map.

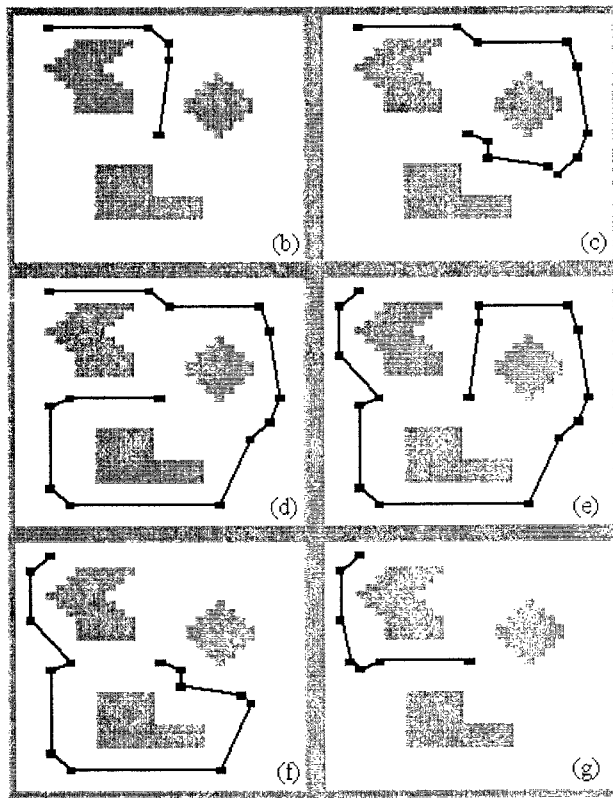


Fig. 12 (b) Optimal path from start to goal, and (c)-(g) other possible paths from start to goal.

IV. 참고문헌

- [1] Thrun, S., "Learning Maps for Indoor Mobile Robot Navigation," *Artificial Intelligence*, Vol. 1, pp. 21 - 71, 1999.
- [2] Kuipers, B and Byun, Y. T., "A Robot Exploration and Mapping Strategy Based on a Semantic Hierarchy of Spatial Representations," *IEEE J. of Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 8, pp. 47 - 63, 1991.
- [3] Ryu, B.S., and Yang, H.S., "Integration of Reactive Behaviors and Enhanced Topological Map for Robust Mobile Robot Navigation," *IEEE Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 29, No. 5, pp. 237 -250, 1999.
- [4] Simhon, S and Dudek, G. "A Global Topological Map formed by Local Metric Maps," *IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robot and Systems*, pp. 1708 - 1714, 1998.
- [5] 박종현, 송재복, 한창수, "로봇공학," 역서, 도서출판 기술, 1994.
- [6] Tzionas, P.G., Thanailakis, A. and Tsalides, P.G., "Collision-Free Path Planning for a Diamond-Shaped Robot Using Two-Dimensional Cellular Automata," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 13, Issue 2, pp. 237 - 250, 1997.
- [8] Choset, H. and Bardick, J, "Sensor Based Planning, Part I: The Generalized Voronoi Graph," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1649 - 1655, 1995.
- [9] B. S. Ryu, H. S. Yang, "An enhanced topological map for efficient and reliable mobile robot navigation with imprecise sensors," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 14, pp. 185-197, 1998.
- [10] J. L. Diaz de Leon, S., J. H. Sossa A., "Automatic Path Planning for a Mobile Robot Among Obstacles of Arbitrary Shape," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 28, pp. 467-472, 1998.
- [11] G. A. Baxes, *Digital Image Processing*, John Wiley & Sons, 1994.

이중 능동 유니버설 관절을 이용한 로봇 손가락 메커니즘 개발 (성균관대학교 최혁렬)

I. 연구개발의 목적 및 필요성

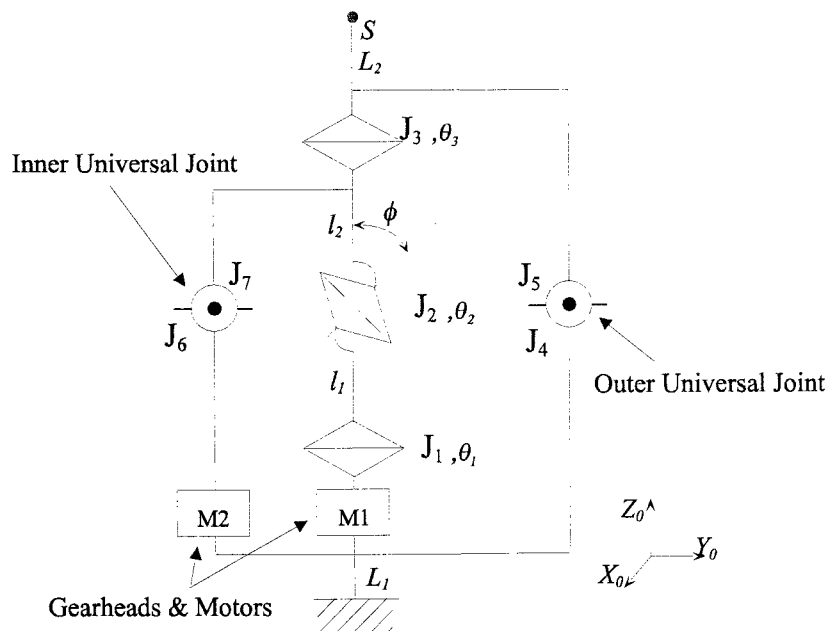
가. 당해 연도 연구개발 목표

우리들은 보다 인간형에 가까운 로봇 핸드를 제작하기 위하여, 새로운 개념의 메커니즘 개발을 수행한 바 있으며, 이것을 이중 능동 유니버설 관절(Double Active Universal Joint)이라 한다. 본 연구에서 사용하고자 하는 메커니즘은 특허출원 제 2000-29972호로 본 연구자가 보유하고 있으며, 이것은 기존의 메커니즘들이 갖는 단점을 보완할 뿐만 아니라, 인간형 관절을 완벽하게 모사 할 수 있는 관절 메커니즘이다.

따라서, 본 연구에서는 인간 운동을 자연스럽게 구현 할 수 있는

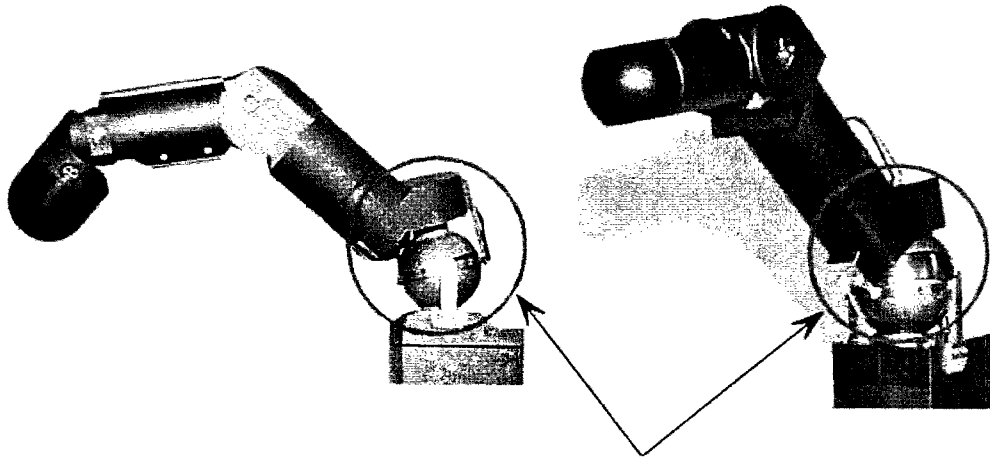
이중 능동 유니버설 관절을 이용한 로봇 손가락 메커니즘 개발

을 연구 목표로 한다.



[그림 1326] 이중 능동 유니버설 관절의 기구학적 개념도

그림 1은 이중 능동 유니버설 관절의 기구학적 개념도이며, 그림 2는 본 연구의 제안자가 이중 능동 유니버설 관절을 이용하여 기 개발된 인간형 로봇 손가락들을 보여준다.



Double Active Universal Joint

[그림 1327] 인간형 로봇 손가락

나. 과제별 연구개발 목표

이중 능동 유니버설 관절을 이용한 로봇 손가락 메커니즘 개발

- 자유도 : 3자유도(장폴 2자유도 + 손가락마디 1자유도)
- 자중 : 0.5kg 이내
- 크기 : 1차년도 로봇 손가락의 75% 내외로 축소한다.
- 손가락 끝단의 힘(fingertip force) : 250 - 300gf

II. 연구개발의 내용 및 범위

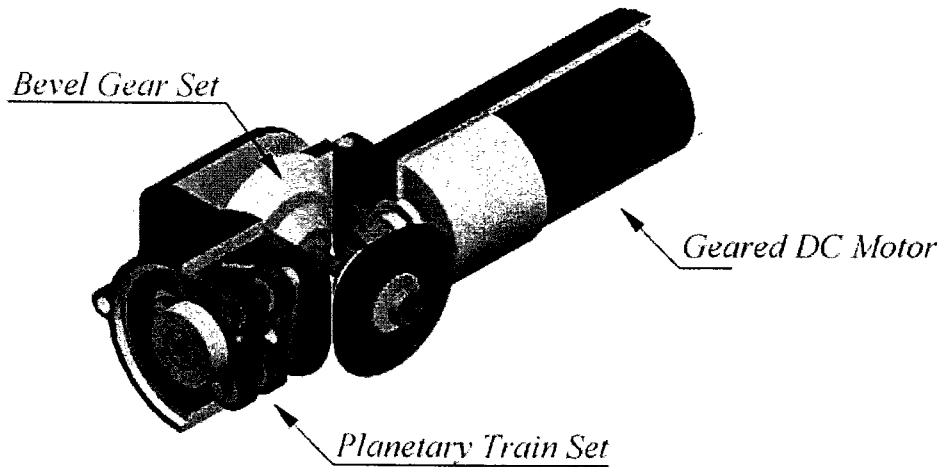
[표 292]

연구 범위	연구 수행 방법	구체적인 내용
이중능동유니버설관절을 이용한 3자유도 로봇손가락 메커니즘의 개발	<ul style="list-style-type: none"> -로봇손가락의 설계 -순/역 기구학 및 자코비안 방정식 유도 -기본적인 제어기법 확립 	이중능동유니버설관절을 장골관절로 채용한 3자유도(장골 2자유도 + 손가락마디 1자유도) 로봇 손가락 메커니즘 설계를 수행한다. 그리고, 설계된 로봇손가락의 순/역 기구학 및 자코비안 방정식을 유도하고 기본적인 제어기법을 확립한다.

III. 연구개발 결과

가. 로봇 손가락의 마디 관절

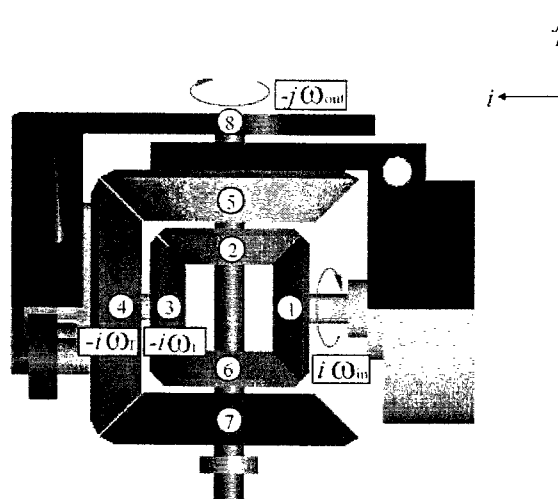
우리는 로봇 손가락의 개발에 있어서, 본 연구를 통한 결과물의 유지보수 문제와 그 응용 범위까지 고려한, 로봇 손가락의 개발에 착수하였다. 따라서, 손가락은 하나의 독립된 모듈로 구성되었으며, 기타 응용이 가능하도록, 로봇손가락의 무게를 최소화하기 위하여 그 주된 목적을 두었다. 로봇손가락의 링크들은 두께 1mm의 중공축을 사용하였으며, 구동부를 감싸는 부품과 손가락을 구성하는 기타 부품들 또한 두께 1mm 이내의 알루미늄합금을 사용하였다. 그 결과, 로봇 손가락 모듈 1개의 무게는 0.5kg 이하로 매우 가볍게 제작되었으며, 외부의 충격에 충분히 견딜 수 있는 구조를 갖게 하였다.



[그림 1328] 로봇 손가락 마디 관절을 위한 메커니즘

기존의 기어 조합을 사용한 로봇 손가락 마디 관절들은 손가락의 크기와 출력 토크 사이에 많은 제한이 따랐다. 즉, 손가락의 크기가 좀 더 작게 되려면 액추에이터의 크기를 감소 시켜야만 했고, 그 결과로 출력 토크가 현저하게 줄어들었다. 이러한 문제점의 주된 원인은 하나의 링크(proximal link)에 액추에이터와 외부 감속기어가 함께 위치하기 때문이다. 따라서, 본 연구자는 사용되지 않는 공간(distal link)을 활용하여 이러한 문제를 해결하였다.

그림 3은 로봇 손가락의 마디 관절(distal-proximal joint)을 위한 새로운 메커니즘을 보이고 있으며, 이것은 로봇 손가락의 크기를 줄임과 동시에 보다 강력한 출력을 얻을 수 있는 새로운 메커니즘이다.



[그림 1329] 손가락 마디의 속도 해석

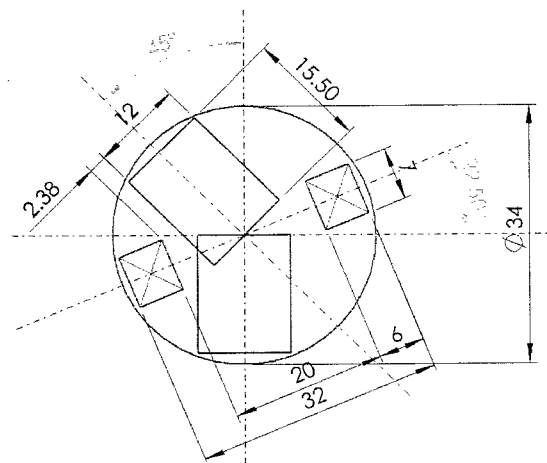
그림 4는 손가락 마디의 속도해석을 보이고 있으며, 그 결과는 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}\omega_t &= \omega_{in} + \omega_{out} \\ &= K\omega_T\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega_{out} &= \omega_T \\ K\omega_{out} &= \omega_{in} + \omega_{out}\end{aligned}\tag{1}$$

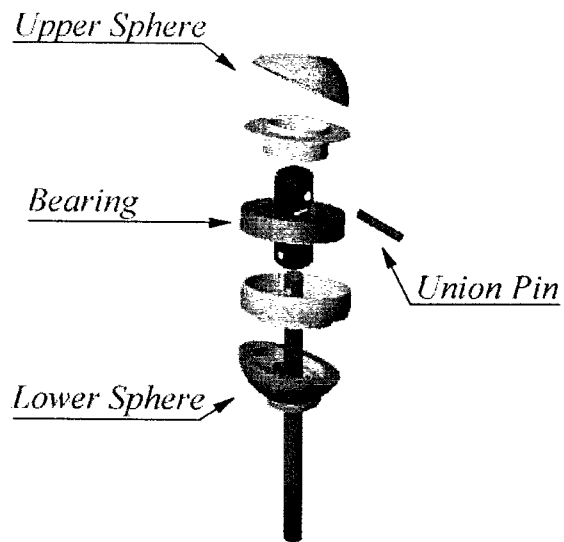
$$\therefore \omega_{out} = \frac{1}{K-1} \omega_{in}$$

나. 로봇 손가락의 장골 관절



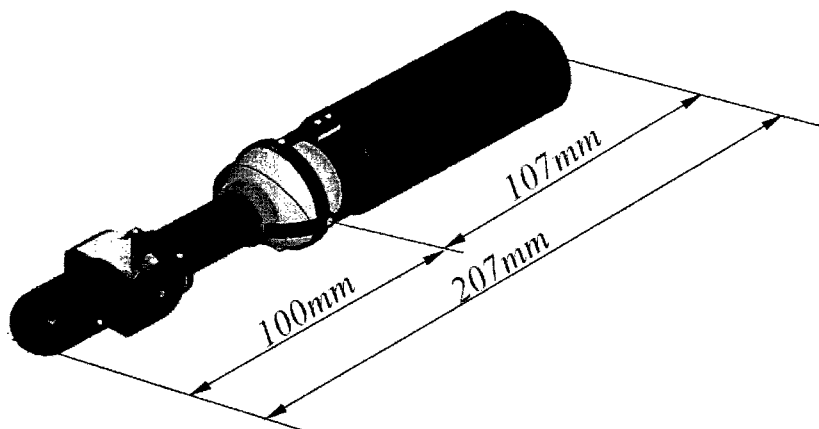
[그림 1330] 내부 유니버설 관절 결정

본 연구에서 장골 관절로 사용되는 이중 능동 유니버설 관절은 중량-출력 비 (weight-power ratio)가 매우 크다. 그러나, 보다 큰 출력을 내기 위해서는 장골 관절 메커니즘에 사용되는 내부 유니버설 관절의 보완이 필수적이다. 따라서, 본 연구자는 그림 5와 같은 제한된 공간 내에서 사용 가능한 내부 유니버설 관절의 최적화를 수행하였다.(직경 : 12mm, 결속 핀 직경 : 3mm)



[그림 1331] 장골 관절의 구성

다. 로봇 손가락의 설계



[그림 1332] 로봇 손가락의 외형

그림 7은 로봇 손가락의 전체 모습을 보이고 있다. 로봇 손가락의 개발에 있어서 모듈화는 로봇 손을 개발하기 위한 가장 기본적인 과정이며, 이것은 손가락 개수의 자유로운 증감을 유지할 수 있어야 할뿐만 아니라, 물체의 조작이나 강력한 잡기가 가능하여야 하

며, 여러 분야에서 응용이 가능하려면 로봇 손가락의 크기 또한 중요한 요소가 된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 요구조건들을 충족시킬 수 있는 새로운 손가락 마디 관절 메커니즘 개발과 이중 능동 유니버설 관절을 이용한 장골 관절 메커니즘 개발을 수행하였다.

로봇 손가락은 이중 능동 유니버설 관절을 구동하기 위하여 2.5w DC모터를 사용하고, 손가락 구동 부분에는 1.6w DC모터를 사용하고 있다. 로봇손가락은 단순 동작만을 모사하기 위해 제작된 것은 아니다. 모듈 1개는 대략 300 gf의 무게를 들어올릴 수 있을 만큼 강인한 구조를 갖고 있다.

라. 로봇 손가락의 기구학적 해석

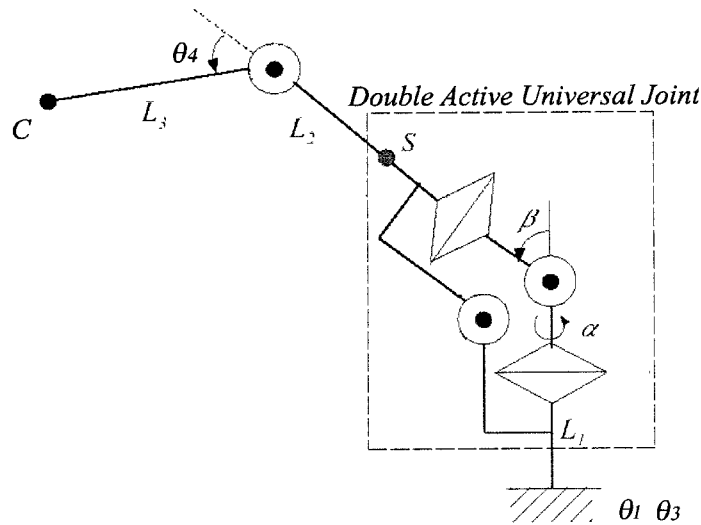


그림 1333. 로봇손가락의 기구학적 구조

우리는 앞선 연구에서 이중 능동 유니버설 관절에 대한 해석을 수행하였다. 따라서, 본 보고서에서는 이것에 대한 특별한 언급은 없을 것이며 그 결과만을 기술하기로 한다.

㉓ 이중 능동 유니버설 관절의 순 기구학

$$T_{03} = \begin{bmatrix} C_\alpha^2 C_\beta + S_\alpha^2 & C_\alpha C_\beta S_\alpha - S_\alpha C_\alpha & -C_\alpha S_\beta & 0 \\ S_\alpha C_\beta C_\alpha - C_\alpha S_\alpha & S_\alpha^2 C_\beta + C_\alpha^2 & -S_\alpha S_\beta & 0 \\ S_\beta C_\alpha & S_\beta S_\alpha & C_\beta & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

㉔ 이중 능동 유니버설 관절의 역 기구학

$$\alpha = \frac{\theta_1 + \theta_3}{2} + \pi \quad (3)$$

$$\beta = 2\text{Atan}(\tan \phi \cdot \cos \frac{\theta_3 - \theta_1}{2}) \quad (4)$$

단, $\phi = 22.5^\circ$ 는 이중 능동 유니버설 관절의 빗면 기울기각

이렇게, 이중 능동 유니버설 관절의 기구학적인 해석을 얻었으므로, 로봇 손가락은 단순한 3자유도 시스템으로 모델링 할 수 있다.

㊸ 로봇 손가락의 순 기구학

$$T_{05} = \begin{bmatrix} C_\alpha C_{\delta 4} & -C_\alpha S_{\delta 4} & -S_\alpha & L_2 C_\alpha C_\delta + L_3 C_\alpha C_{\delta 4} \\ S_\alpha C_{\delta 4} & -S_\alpha S_{\delta 4} & C_\alpha & L_2 S_\alpha C_\delta + L_3 S_\alpha C_{\delta 4} \\ -S_{\delta 4} & -C_{\delta 4} & 0 & -L_2 S_\delta - L_3 S_{\delta 4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

㊹ 로봇 손가락의 역 기구학

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{Atan2}(p_y, p_x) \\ \delta &= \text{Atan2}(S_\delta, C_\delta) \\ \theta_4 &= \text{Atan2}(S_4, C_4) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{Atan2}(p_y, p_x) \\ \delta &= \text{Atan2}(S_\delta, C_\delta) \\ \theta_4 &= \text{Atan2}(S_4, C_4) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{Atan2}(p_y, p_x) \\ \delta &= \text{Atan2}(S_\delta, C_\delta) \\ \theta_4 &= \text{Atan2}(S_4, C_4) \end{aligned} \quad (8)$$

단,

$$\begin{aligned} \delta &= 90^\circ - \beta \\ C_4 &= \frac{1}{2L_2L_3} [p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - L_2^2 - L_3^2] \\ S_4 &= \pm \sqrt{1 - C_4^2} \\ C_\delta &= L_3 S_4 p_x - (L_2 + L_3 C_4)(C_\alpha p_x + S_\alpha p_y) \\ S_\delta &= L_3 S_4 (C_\alpha p_x + S_\alpha p_y) + (L_2 + L_3 C_4) p_z \end{aligned}$$

IV. 참고문헌

- [1] A. Bejczy, "Distribution of Control Decisions in Remote Manipulation", Proc. of IEEE Conf. on Decision and Control, pp.81-89, 1975.

- [2] T. Stackhouse, "A New Concept in Robot Wrist Flexibility", Proc. of the Ninth Int. Symp. on Industrial Robots, pp.589-599, 1979.

- [3] S. Hirose, "Biologically Inspired Robot", Oxford Science Publication, 1993.

- [4] H. Ikeda and N. Takanashi, "Joint Assembly Moveable Like a Human Arm," United States Patent Number 4,683,406, 1987.

- [5] E. Paljug, T. Ohm and S. Hayati, "The JPL Serpentine Robot: a 12DOF System for Inspection," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3143-3148, 1995.

- [6] K. Asano, M. Obama, Y. Arimura, M. Kondo, and Y. Hitomi, "Multijoint Inspection Robot," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.IE-30, No.3, pp. 277--281, 1983.

- [7] M. Nilsson, "Snake Robot, Free Climbing," IEEE Control Systems, Vol. 18, No. 1, pp.21--26, 1998.

- [8] H. R. Choi, S. M. Ryew, "Anthropomorphic Joint Mechanism with Two Degrees of Freedom", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1525-1530, 2000.

여 백

서비스로봇 제어를 위한 시스템개발 및 그 기반 환경 구축

(경희대학교 이순걸)

가.Embedded Linux platform 구현 및 선정된 하드웨어 드라이버 구축

1. 임베디드 시스템의 개요

임베디드 시스템이란 어떠한 장치가 다른 시스템에 의존하지 않고 독립적으로 기능을 수행하는 것으로써 우리 생활에서 쓰이는 각종 전자기기, 가전제품, 제어장치가 단순히 회로로만 구성된 것이 아니라 마이크로 프로세서가 내장되어 있고, 그 마이크로 시스템을 구동하여 특정한 기능을 수행하도록 프로그램이 내장되어 있는 시스템을 가리키는 것이다.

이러한 임베디드 시스템은 다양한 응용분야를 가지고 있다. 산업분야, 가전분야, 사무분야, 군사용 등 임베디드 시스템은 다양한 응용분야에 적용되고 있다. 또한 구체적 적용 사례로는 핸드폰, PDA, 사이버 아파트의 홈 관리 시스템, 홈 네트워크 게이트웨이 장치, 교통관리 시스템, 주차 관리시스템, 홈 관리 시스템, 엘리베이터 시스템, 현금지급기(ATM), 항공 관제 시스템, 우주선 제어 장치, 군사용 제어 장치 등을 들 수 있다.

이러한 임베디드 시스템은 시간이 흐를수록 기능이 다양해지고 시스템의 크기가 날로 커져가서 임베디드 시스템을 운용하기 위해서는 이를 적절히 통제할 만한 운영체제가 필요하게 되었으며, 이러한 운영체제의 성능에 따라 시스템의 성능 및 확장성 등에 지대한 영향을 미친다.

임베디드 시스템에서의 OS는 시스템의 규모가 커짐에 따라서 Multi Tasking 등과 같은 복잡한 기능을 요구하며, TCP/IP, GUI, Audio, Video 등 Network이나 multimedia가 시스템의 기본으로 자리 잡고 있다. 임베디드 시스템이 해야 할 일이 많아지고 복잡해짐으로 인해서 단순히 순차적으로 운영되는 프로그램으로는 시스템을 운영하기가 어렵게 됨으로써 임베디드 시스템에도 운영체제의 개념이 필요하게 되었으며, 임베디드 시스템의 특성상 실시간이라는 요소 또한 중요한 요소로 자리 잡고 있으며 이를 만족시켜야만 하는 시스템도 늘어나고 있는 추세이다.

임베디드 시스템을 운용하기 위해 WinCE, pSOS, VxWorks, Palm OS 등 다양한 사용되고 있다. 이러한 OS 중에 하나로 Linux도 당당히 자리매김을 하고 있다.

다른 OS의 장단점은 생략하기로 하고 임베디드 Linux에 대하여 간략히 소개한다.

Linux의 장점은 다음과 같다.

- ① Open Source : 새S/W 연구·개발을 촉진 -> 운용체제 확장 가능
- ② No royalty : 가격 경쟁력
- ③ 안정적 : 오류가 포함될 가능성이 적다.
- ④ 품질 경쟁력 : 다양한 서비스 제공
- ⑤ 현존하는 거의 모든 프로세서와 시스템을 수용
- ⑥ 성장 가능성 : 다양한 응용

그 외에도 많이 있겠지만 생략하기로 하자. 반면에 Linux의 단점은 다음과 같다.

- ① 개발환경이 어렵다.
- ② 완전히 검증되지 않았다.
- ③ 특정 OS에 비해서 Web Browser와 Mutimedia 구현 능력이 떨어진다.

현시점에서 Linux가 Sever시장에서 성공을 거두었다는 것은 공인된 바이다. 이를 바탕으로 임베디드 Linux에서 바로 MS의 아성에 도전하였으나 winCE에 비해서 Web Browser와 Mutimedia 구현 능력이 떨어지는 이유로 현재 임베디드 Linux의 한계를 인식하였다. 그러므로 현시점에서는 통신시장과 FA시장에서 안정성과 경제성을 기반으로 한 Linux의 진가를 발휘하면서 다시 한번 IT에 접근하는 것이 바람직하다 생각한다.

2. 선정된 하드웨어 드라이버 및 인터페이스

2.1 CAN

2.1.1 개요

CAN(Controller Area Network)은 원래 자동차내의 각종 계측제어 장비들간에 디지털 직렬 통신을 제공하기 위하여 1988년 Bosch와 Intel에서 개발된 차량용 네트워크 시스템으로, 1993년도에 ISO에서 국제표준 규격으로 제정되었다. CAN은 다른 자동화 통신망들에 비하여 가격 대 성능비가 우수하며, 지난 수년간 차량내의 열악한 환경에서 성공적으로 동작되어 신뢰도가 검증된 통신망이다. CAN 칩(chip)은 이미 인텔, 모토롤러, 필립스, NEC, 히타치, 시멘스 등 많은 여러 회사에서 개발했다. CAN은 마스터/슬레이브(master/slave), 다중 마스터(multiple master), 피어 투 피어(peer to peer)등을 지원하는 매우 유연성 있는 네트워크이며, 공장의 열악한 환경이나 고온, 충격이나 진동, 노이즈가 많은 환경에서도 잘 견딜 수 있다. 이러한 장점들로 인하여 최근에 와서 CAN은 공장자동화와 공정의 분산제어등의 각종 산업설 비에서 제어 및 자동화 관련 장비들간에 데이터 교환을 위한 통신망으로 널리 사용되고 있다. CAN을 사용하는 대표적인 통신망으로는 DeviceNet, SDS, CAN Kingdom, CANopen/CAL 등이 있으며, 이들은 모두 데이터링크 계층으로 CAN을 사용하나 응용계층은 서로 다른 프로토콜을 채택하고 있다.

2.1.2 CAN 프로토콜(CAN Protocol)

CAN은 CSMA/NBA(Carrier Sense Multiple Access with Non-destructive Bitwise Arbitration)라는 메시지 전송 메커니즘(mechanism)을 가지고 있다. CAN의 데이터 전송 메커니즘은 IEEE 802.3 CSMA/CD 프로토콜과 유사하다. 즉, 각 노드는 데이터를 전송하기 이전에 버스의 상태를 감지하며, 버스의 상태가 비활성일때 준비된 메시지를 전송한다. CSMA/CD에서는 두 개 이상의 노드가 동시에 메시지를 전송하면 메시지 충돌이 일어나서 전송된 메시지가 모두 손실된다. 그러나 CAN에서는 전송되는 메시지가 11비트의 식별자(Identifier)를 가지고 있으며, 식별자를 통하여 우선 순위가 높은 메시지가 전송되도록 한다. 즉, 두 개 이상의 노드가 동시에 메시지를 전송하면 각 메시

지는 서로 식별자를 1 비트씩 비교하여 제일 높은 우선 순위의 메시지(즉, 가장 낮은 식별자 값을 가진 메시지)는 전송되고 낮은 우선 순위의 메시지들은 전송이 중단된다. 버스에서는 '0' 비트가 '1' 비트에 대해 우세한 성질을 가지고 있다. 즉 '0' 비트는 'dominant'한 값('d' 비트)이라고 하며 '1'은 'recessive'한 값('r' 비트)이다. 전송하는 노드는 한 비트를 보낼 때마다 버스를 모니터링한다. 어떤 노드가 'r' 비트를 보냈는데 버스를 모니터링한 결과 'd' 비트가 검출되었다면 이는 버스 내의 다른 노드가 자기보다 높은 우선 순위의 메시지를 전송하고 있는 것이므로 그 노드는 메시지의 전송을 즉시 중단하고 수신모드로 전환한다. 전송을 중단한 노드는 버스의 상태를 계속 감지하여, 버스가 다시 비활성 상태가 되면 자동적으로 다시 메시지의 전송을 시작한다.

CAN 프로토콜에는 여러 장점이 있는데, 첫번째로, 표준 통신 프로토콜이므로 다양한 업체에서 제작된 서브들을 공동의 네트워크에 인터페이스시키는 작업을 쉽고 경제적으로 수행할 수 있다.

두번째로 CAN 프로토콜은 수백만의 메시지 확인자를 지원하고 복잡한 메시지 방식을 사용할 수 있는 유연성을 가지고 있다. 또한 에러 발견과 응답은 CAN칩 자체에서 처리되므로 그에 따른 처리가 현저히 감소된다.

세번째로 CPU에서 주변기기로 통신작업이 이양되었기 때문에 CPU는 시스템 태스크만 전적으로 실행할 수 있다.

네번째로 다중 채널식 통신법이기 때문에 포인트간의 와이어 작업을 줄여 와이어 크기를 대폭 줄일 수 있다. 마지막으로 표준 프로토콜이므로 시장성이 뛰어나고 이로 인해 많은 업체들이 경쟁적으로 CAN칩을 제작하고 있으며, 비용 또한 비교적 저렴하다. CAN 프로토콜은 호스트 CPU에 인터페이스된 CAN 컨트롤러 칩이나, 호스트 CPU에 장착된 CAN 주변장치에서 실행된다.

2.2 PCMCIA

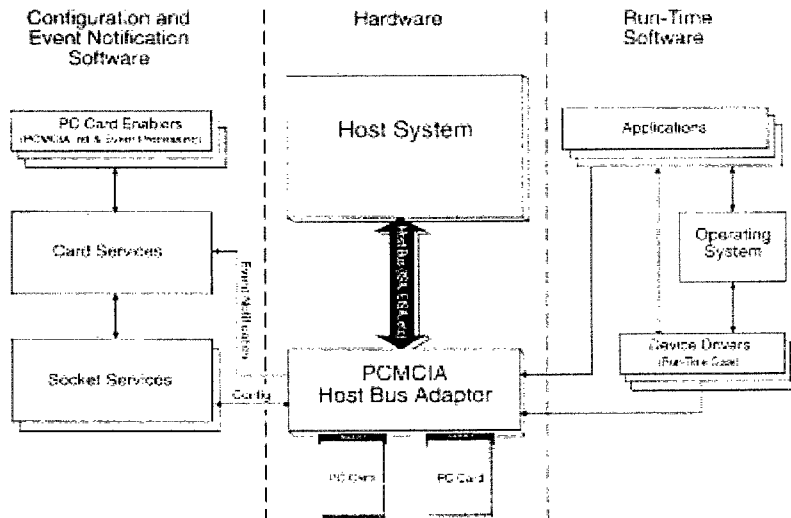


그림 1334 PCMCIA - 기본구조

2.2.1 PCMCIA 개요

Personal Computer Memory Card International Association의 약자로 개인용 컴퓨터에 연결할 메모리 카드의 국제협회로 1989년 설립하여 현재 540개가 넘는 회원사가 있음. PCMCIA는 모빌 컴퓨터를 위해 이동 중에도 사용할 수 있는 작고, 가벼운 메모리 카드를 만들자는 취지로 창립되었으며, 처음 발표된 PCMCIA규격은 외형에 대한 정의와 메모리 구조에 대한 것이 전부였음. 이때 만들어진 것이 Type I 이란 형태로 길이 85.6cm, 폭 54.0mm, 두께 3.3mm의 초소형 카드임. 68pin의 소켓 형태로 어댑터에 카드를 장착하면 P&P 기능으로 바로 인식하고, PC를 사용하는 도중에 연결해도 동작(Hot Plug 기능)함. PC카드는 업체와 종류가 모두 다르지만 소켓서비스와 카드 서비스라는 드라이버를 이용하여 어떤 제품이든 바로 인식 함.

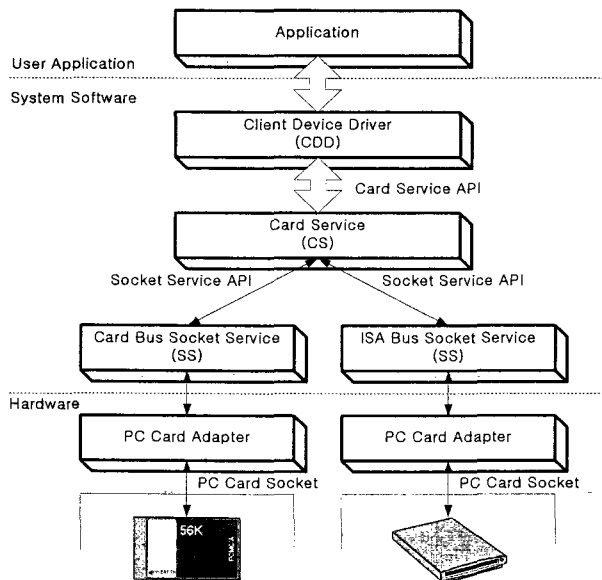


그림 1335 PCMCIA - 계층도

PCMCIA 슬롯은 그 두께에 따라서 규격이 나뉘어 집니다. Type-I과 Type-II, Type-III 방식의 세 가지로 나누어지는데 세 가지 방식 모두 카드의 넓이는 85.6mm, 54.0mm로 동일합니다. 두께는 각각의 Type에 따라서 type-I는 3.3mm, Type-II는 5mm, Type-III는 10.5mm입니다. Type-III 슬롯의 경우 대부분 Type-II 슬롯 두 개를 위아래로 겹쳐서 설계하는 것이 대부분이며 슬롯의 Type 간에는 하위 호환성이 있어 Type-III 방식의 슬롯에서는 Type-I과 Type-II 방식을 모두 사용 가능합니다.

PCMCIA의 규격은 두께에 따른 TYPE 규격 이외에도 두 가지가 더 있습니다. 바로 Card Bus 방식과 ZV방식이 그것입니다.

Card Bus 방식은 데이터의 전송을 32bit로 처리하는 것입니다. 예전의 PCMCIA의 경우 보통 16bit로 데이터를 전송했지요. Type-II Card Bus 방식 주변기기의 경우 16bit 방식의 제품과의 구

분을 위하여 슬롯이 가이드 부분이 조금 더 두껍습니다. 따라서 Card Bus를 지원하는 슬롯에는 16bit 방식과 Card Bus 방식의 주변기기를 모두 장착할 수 있지만 16bit 슬롯에는 Card Bus 방식의 주변기기를 장착할 수 없게 되어 있습니다.

각 전송 방식에 따른 속도

16-bit I/O Transfers (255 ns Minimum cycle)	
Byte mode	3.92 Mbytes/sec
Word mode	7.84 Mbytes/sec

16-bit Memory Transfers (100 ns Minimum cycle)	
Byte mode	10 Mbytes/sec
Word mode	20 Mbytes/sec

CardBus (32 bit burst mode)	
Byte mode	33 Mbytes/sec
Word mode	66 Mbytes/sec
DWord mode	132 Mbytes/sec

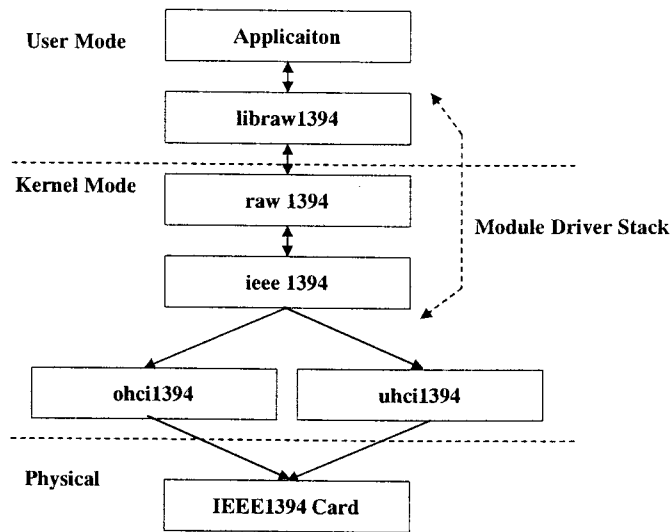
2.3 IEEE1394

2.3.1 IEEE1394 개요

IEEE1394의 개요 IEEE1394는 맥킨토시 컴퓨터를 제작하는 애플사와 통신과 관련된 칩셋을 주로 제작하는 텍사스 인스트루먼트사가 공동으로 제작한 Serial Bus Interface 규격으로서 1986년 "Firewire"라는 코드 네임으로 개발이 시작된 것에서 유래한다. 1995년 12월 미국전기전자기술자협회(IEEE)에서 공식협약 되었고, 이를 표준화한 것이 바로 IEEE1394이다. 현존하는 확장 버스나 인터페이스는 고성능 멀티미디어 시대로 접어든 현시점과 미래적인 관점에서 볼 때, 주변기기의 발전 속도에 비해 성능을 발휘할 수 없을 뿐더러 오히려 방해가 되는 어떠한 한계적인 상황에 직면한 것이다. 이미 우리가 느끼고 있듯이 CPU의 속도에 비해 주변 장치들의 속도가 맞지 않기 때문에 컴퓨터에 데이터 병목 현상이 발생하고 결국은 CPU의 최대 속도를 발휘해 볼 수 없는 것이 현시점에 부딪친 과제라고 볼 수 있다. 이러한 문제점을 완벽하게 해결할 수 있는 방식이 바로 IEEE1394가 추구하고자 하는 것이다. IEEE1394는 네트워크 PC와 휴대용 컴퓨터를 연결하기 위한 표준 버스 인터페이스의 규격이라고 말할 수 있다.

2.3.2 IEEE1394 for Linux

IEEE 1394는 USB와 비슷한 bus구조를 지니고, 디바이스들이 컴퓨터에 연결될 때 해당하는 드라이버를 loading해서 사용할수있도록 한다. IEEE1394에 대한 지원은 커널 2.2.X버전에 대한 patch에서부터 보이고Dlt다. 윈도우에대한 경우에는 WDM(Window Driver Model)을 사용해서 드라이버 스택(stack)이란 개념으로 각각의 해당하는 드라이버를 원할 때 즉각적으로 떠올수있도록하고있다. 리눅스에서도 유사하게 모듈화 된 드라이버드을 사용해서 드라이버 스택을 구현하고 있으며, 그림과 같은 구조를 지닌다.



드라이버의 계층 구조를 살펴보면, 그림은 PC상에서 리눅스로 IEEE1394의 구현을 보여주는 것으로 IEEE1394의 핵심은 IEEE1394모듈이다. 이 모듈이 전체 IEEE1394의 상하 레벨의 드라이버들을 관리하며, Transaction의 처리를 다루고 있으며, 사건(Event)의 triggering에 대한 메커니즘을 제공한다.

IEEE1394모듈의 아래에는 하위레벨의 하드웨어 드라이버 모듈이 있으며, 이에 대하여 3개의 드라이버 모듈이 존재한다. 각각은 아래와 같다.

- 1.aic5800 - Adaptec AIC-5800 PCI-IEEE1394 chip Driver
- 2.pcilynx - Texas Instruments PCILynx Driver
- 3.ohci1394 - 1394 Open Host Controller Interface Driver

이하에서는 OHCI호환 카드에 대한 것을 설명하기로 한다. 3개의 드라이버를 동시에 적재하여 활성화 시키는 것도 가능하다. 하위드라이버의 기본적인 최대수는 4개이며, 모든 하위레벨드라이버는 적어도 하나 이상의 카드를 제어한다.

IEEE1394 모듈의 위에는 상위레벨의 드라이버모듈이 오며, 이러한것의 예로서 raw1394가 있다. 이 모듈은 사용자 주소공간의 응용 프로그램들이 raw 1394 버스에 접근하는 인터페이스를 제공한다. 또 다른상위레벨의 드라이버로는 SBP2드라이버가 있는데, 이는 Mark Halte가 개발중에 있다. 사용자 공간에서 raw1394 버스에 접근하기 위해서는 응용프로그램은 반드시 libraw1394를 링크해야하며, libraw1394가 raw 1394상위 레벨 드라이버와의 통신을 처리하게된다.

~/driver/ieee1394 디렉토리에 있는 모든 파일은 아래와 같이 정리해서 볼수있다.

파일	설명
raw1394.*	상위레벨 드라이버로서 raw1394dp 관련된 파일을 가진다.
csr.*	상위레벨 드라이버로서 local CSR들에 대해서 read/write/lock을 처리한다.
highlevel.*	상위레벨 드라이버의 등록과 관리를 맡는다.
ieee1394_core.*	IEEE1394드라이버 구현의 핵심(Core)이다. 모든 패킷은 이곳을 통과하며, timeout을 다룬다.(handle)
ieee1394_transaction.*	일반적인 블록킹 read/write/lock 함수들과 Utility 함수를 가진다
events.*	Event handler 등록과 event의 처리(dispatch)를 맡고 있다
hosts.*	하위레벨 드라이버의 등록과 관리를 맡고이LT다.
ohci1394.*	1394 Open Host Controller 인터페이스 드라이버이다
aic5800.*	Adaptec AIC-5800 PCI-IEEE1394 chip 의 드라이버이다.
pcilynx.*	Texas Instruments PCILynx드라이버이다
ieee1394.h	일반적인 IEEE1394에 대한 정의를 가지고 있다. 예를 들어 transaction코드를 담고있다
ieee1394_types.h	여러 리눅스 헤더파일에 대한 include문과 사용하게될 타입의 정의를 담고있다.
ieee1394_syms.c	모듈의 사용을 위한 심벌들에 대한 export를 담고있다
Makefile,Config.in	커널의 컴파일을 위한 내용을 담고있다.

코드를 보게 될 때 나오는 "hpsb_"와 같은 형태의 이름들은 High Performance Serial Bus의 약자로 생각하면될것이다. 그리고 event.*로 시작하는 event의 처리와 관련된 기본골격은 현재 사용되지 않는다.

2.4 PC-104 Interface

2.4.1 PC-104 개요

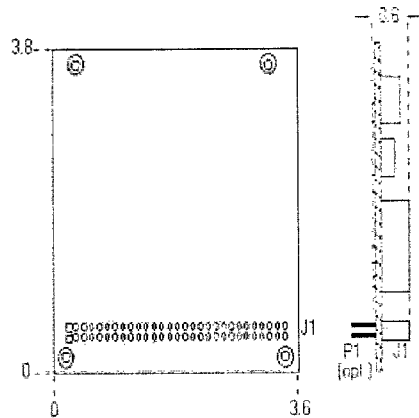


Figure 1. Basic Mechanical Dimensions (8-bit Version)

과거 십년간에, PC 아키텍처는 기존의 데스크탑 적용이상을 받아들인 플랫폼으로 되어왔다. Pc들은 실험실 기기 제어기으로서, 통신장치, 및 의학 장비 사용된다 .

넓게 적용된 PC 아키텍처 주변으로 하드웨어와소프트웨어를 표준화함으로써 임베디드 디자이너는 부가적으로 개발비, 위험, 및 시간을 감소할 수 있다 이것은 더 빠른 시간에 시장 및 적시에 제품을 소개함으로써 긴요하게 요구되는 시장에 명중 하는 능력을 의미한다.

PC 아키텍처를 사용하기에 또 하나 중요한 이 점은 그것의 하드웨어 및 소프트웨어에 의하여 표준

화하는 구성 요소가 넓게 적용된다는 것이다. 이 구성요소는 그리고 STD, VME, 및 Multibus으로서 전통 Pc 버스 아키텍처보다는 경제적이다. 이것은 더욱더 낮은 제품생산 비용을 의미한다.

이러한이유때문에, 그들의 제품의 안에 제어기로서 마이크로컴퓨터를 내장하는 회사들은 PC 아키텍처를 사용함으로써 자사 제품생산의 이득을 찾았다. 그런데, 표준 PC 버스 형패 인자(12.4" x 4.8")와 그것과 융합된 카드형태및 뒤판 은 대부분에 임베디드 제어기들에게는 너무 부피가 크고 (그리고 비쌌다).

PC/104은 이 필요에 응답안에 개발되었다. 그것은 PC 버스에, 그러나 Compact하며,(3.6 " x 3.8") 쌓을수 있는 단위안에 충분한 아키텍처, 하드웨어 및 소프트웨어 겸용성을 제안한다.

그러므로, PC/104은 임베디드 컨트롤러의 특별한 요구 - PC/104 기준에 기초를 두는 제품을 제조하는 160명의 회사에의 국제 그룹에 의하여-로 이상적으로 디자인되었다

나.Mobile-base의 통신 및 동영상 전달을 위한 제어기 실현

1.시스템 구성

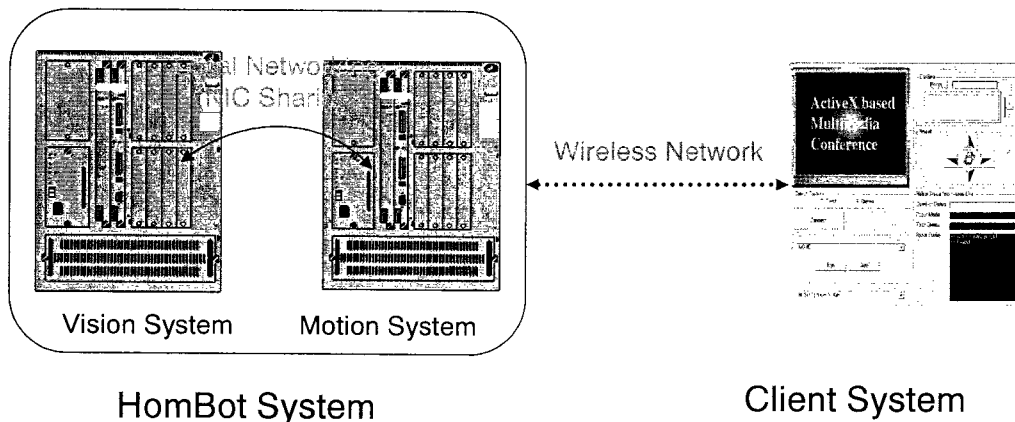


그림 1338 Video Transfer System based on Network

2. ActiveX

2.4.1 커스텀 컨트롤

커스텀 컨트롤(custom control)이란 개발자 스스로가 제작한 컨트롤로, Windows 운영체제에서 기본적으로 제공하는 표준 컨트롤(standard control)과 구별된다.

커스텀 컨트롤의 기원은 Windows SDK 커스텀 컨트롤(Windows SDK Custom Control)로 거슬러 올라가지만, 실제로 커스텀 컨트롤을 사용하기 시작한 것은 Visual Basic 개발팀이 Visual Basic 커스텀 컨트롤(VBX, Visual Basic Custom Control)의 개념을 소개할 때부터라고 할 수 있다. Visual Basic 커스텀 컨트롤은 주로 Visual Basic 어플리케이션에서 사용되며, 요즘의 ActiveX 컨트롤과 마찬가지로 속성과 메서드, 이벤트를 제공한다. 그러나, Visual Basic 커스텀 컨트롤은

VBX 확장자를 갖는 특수한 종류의 16비트용 DLL이므로, Windows 운영체제에서만 사용될 수 있다는 단점을 갖는다.

실제로 COM을기반으로하는 커스텀 컨트롤은 OLE2와 함께 소개된 OLE 컨트롤(OLE Control)이다. OLE 컨트롤은 VBX와는 달리 언어 중립적이므로 Visual Basic이아닌 다른 언어로 작성된 어플리케이션에서도 사용될 수 있으며, 16비트와 32비트 Windows 운영체제에서도 모두 사용될 수 있다.

인터넷이 확산되면서 OLE 컨트롤은 ActiveX 컨트롤이란 이름으로 옷을 바꾸어 입는다. 사실상 이전의 OLE 컨트롤은 표준으로 정의된 모든 인터페이스를 반드시 구현해 주어야 했다. 이것은 이전 파일의 크기를 크게 만드는 요인이 되고, 따라서 비교적 느린 네트워크 속도의 인터넷 상에서 웹 페이지에 포함된 OLE 컨트롤이 클라이언트에 다운로드되어야 할 때 문제가 될 수 밖에 없다.

결국 ActiveX 컨트롤은 인터넷 환경에 효율적으로 사용될 수 있도록 확장된 OLE 컨트롤의 상위 집합이 된다. 이것은 ActiveX 컨트롤이 인터넷 상에서만 사용될 수 있다는 것을 의미하는 것은 아니다. 오히려 그와 반대로, OLE 컨트롤을 사용할 수 있는 컨테이너라면 ActiveX 컨트롤을 사용할 수 있다.

OLE 컨트롤과 ActiveX 컨트롤 사이의 큰 차이점은 컨트롤이 지원하는 인터페이스 표준이다. 새로운 표준에 따르면 ActiveX 컨트롤은 IUnknown 인터페이스와 자기등록(self-registering) 기능을 지원하기만 하면 된다. 결국 이제 ActiveX 컨트롤이란 인-프로세스 서버로 구현된 단순한 COM 개체일 뿐이다. 물론, ActiveX 컨트롤은 IUnknown 인터페이스 외에도 다른 인터페이스를 지원해야 한다. 그렇지 않다면 해당 ActiveX 컨트롤은 아무런 기능도 제공해줄 수 없기 때문이다. 자기 등록(self-registering) 기능은 인-프로세스 서버와 마찬가지로 DllRegisterServer와 DllUnregisterServer 익스포트 함수를 통해 행해진다.

ActiveX 컨트롤에 대한 이러한 새로운 표준은 ActiveX 컨트롤이 필요한 인터페이스만을 지원하게 함으로써 가능한 한 가볍게 만들고자 하는데 있다. 그래야 느린 네트워크의 인터넷상에서도 효율적으로 사용될 수 있기 때문이다. 반대로, 이전의 OLE 컨트롤은 해당 컨트롤에 그 기능이 필요하든 그렇지 않든 간에 OLE 컨트롤이 필요로 하는 모든 표준 인터페이스를 지원해야 하므로, 당연히 무거워지게 되고 따라서 인터넷에서는 비효율적일 수밖에 없다.

2.4.2 ActiveX 컨트롤의 특징

일반적으로 ActiveX 컨트롤(이하, 컨트롤)은 컨트롤 컨테이너(이하, 컨테이너)에 포함되어 사용자 그래픽 인터페이스를 제공한다. 컨트롤이 사용자 그래픽 인터페이스를 지원하지 않는다면, 컨트롤은 인-프로세스 서버로 구현된 자동화 개체와 다를바가 전혀 없다. 사실상 컨트롤은 자동화 개체에 필수적인 IDispatch 인터페이스를 사용하므로, 자동화 개체와 마찬가지로 디스패치 인터페이스에 속성과 메서드, 그리고 이벤트를 정의한다. 컨트롤의 속성과 메서드, 이벤트는 자동화 개체와 마찬가지로 이중 인터페이스의 커스텀 인터페이스를 통해서도 구현될 수는 있다. 그러나, 자동화 개체와는 달리 컨트롤의 속성과 메서드, 이벤트는 디스패치 인터페이스를 통해서만 접근될 수 있다.

ActiveX 컨트롤 사양은 컨트롤이 선택할 수 있는 표준 속성(standard property)과 표준 메서드

(standard method), 표준 이벤트(standard event)를 정의한다. 그렇다고 해서 모든 컨트롤이 이들 표준 속성과 메서드, 이벤트를 제공해야 한다는 것을 의미하는 것은 아니다. 다만, 특정한 속성과 메서드, 그리고 이벤트가 정의 되어 있다는 것을 의미한 것일 뿐이다. 따라서 컨트롤에서는 이들 표준 속성과 메서드, 이벤트를 지원해야만 해당 기능을 제공할 수 있다.

또한, 이들 표준 속성과 메서드, 이벤트에는 미리 정의된 DISPID가 배정되어 있으며, OLECTL.H에는 DISPID_으로 시작하는 상수값이 정의되어 있다. 물론, 자동화 개체와 마찬가지로 컨트롤은 고유한 커스텀 속성과 메서드 그리고 이벤트를 제공한다.

2.4.3 ActiveX 컨트롤 표준 인터페이스

앞에서 언급한 바와 같이, 이제 컨트롤은 인-프로세스 서버로 구현된 단순한 COM개체이므로 IUnknown 인터페이스와 자기 등록(self-registering) 기능을 지원하기만 하면 된다. 그러나 대부분의 컨트롤은 컨테이너에 포함되어 사용자 그래픽 인터페이스를 제공하며, 메서드와 이벤트, 그리고 속성 등 많은 기능을 지원한다. 따라서 컨테이너가 컨트롤의 이러한 기능을 사용하게 하기 위해서는 서로 대화를 할 수 있어야 한다.

예를 들어 컨트롤이 사용자 그래픽 인터페이스를 포함하고 있다면, 해당 컨트롤은 자신이 위치할 장소를 컨테이너와 협의해야 한다. 또한, 컨트롤이 제공하는 속성을 컨테이너가 어떻게 저장할 것이며, 컨트롤이 비활성화 상태에 있을 때 컨테이너는 마우스 이벤트를 어떻게 컨트롤에 전달할 것인가 등의 사항에 대하여 컨트롤과 컨테이너는 서로 대화를 해야 할 필요가 있다. 따라서 컨트롤과 컨테이너 사이에는 이러한 사항이 정의된 표준 인터페이스가 필요하게 된다.

여기에서 간과하지 말아야 할 사항은 앞에서 언급한 바와 같이, 컨트롤이 이들 인터페이스 모두를 반드시 구현해야 할 필요는 없다는 것이다. 그러나, 컨트롤이 컨테이너와 커뮤니케이션하기 위해서는 컨테이너가 요구하는 인터페이스를 구현해야만 한다. 따라서, 컨트롤이 구현해야 하는 인터페이스에 대한 결정은 전적으로 컨테이너가 어떤 인터페이스를 요구하느냐에 달려 있다고 할 수 있다.

a. 포함 개체로서의 ActiveX 컨트롤 인터페이스

컨트롤에는 컨테이너가 OLE 다큐먼트 개체(OLE document object)를 포함(embedding) 또는 연결(linking)하는 것과 관련된 기술이 포함된다. 즉, 컨트롤은 일종의 포함 개체(embedded object)로서 컨테이너에 포함된다.

컨테이너는 IOleClientSite 인터페이스를 구현한 '클라이언트 사이트(client site)'를 제공함으로써 컨트롤이 컨테이너와 커뮤니케이션을 할 수 있게 한다. 클라이언트 사이트는 컨트롤이 컨테이너에 놓여지는 위치와 같은 컨텍스트 정보를 비롯하여 다른 컨테이너에 관련된 정보를 컨트롤에게 제공하며, 이를 위해 컨트롤은 IOleObject 인터페이스를 구현 또는 제공해야 한다.

이밖에도 컨트롤이 컨테이너 안에서 활성화 상태(In-Place Activation)가 될때 컨테이너와 커뮤니케이션하기 위해 필요한 IOleInPlaceObject, IOleInPlaceActiveObject IDataObject, IViewObject2, IRunnableObject, IOleCache2, IPersistStorage 등의 인터페이스를 구현 또는 제공해야 한다. 반면에 컨테이너에서는 IOleInPlaceUIWindow, IOleInPlaceFrame, IOleInPlaceSite, IAdviseSink 인터페이스

를 제공해야 한다.

컨트롤은 인사이드-아웃 활성화(Inside-Out Activation)을 지원해야 한다. 일반적으로 OLE 다큐먼트 포함 개체가 활성화될 때까지 활성화되지 않는다. 이와 같은 OLE 다큐먼트 포함 개체의 활성화 방법을 아웃사이드 인 활성화(Outside-In Activation)라고 한다. 이러한 방법은 컨트롤에서는 잘 작동하지 않는다.

사용자 관점에서 컨트롤은 컨트롤을 포함하는 컨테이너 어플리케이션의 일부분이 되기 때문에, 사용자가 컨트롤의 사용자 그래픽 인터페이스를 한 번만 클릭하여도 해당 컨트롤은 활성화 상태가 되어 반응할 수 있어야 한다. 이것을 인사이드-아웃 활성화라고 한다.

b. 자동화 개체로서의 ActiveX 컨트롤 인터페이스

앞에서 언급한 바와 같이 컨트롤은 자동화 개체가 사용하는 디스패치 인터페이스 메커니즘을 그대로 사용하여 메서드, 이벤트를 정의한다. 따라서, 자동화 개체와 마찬가지로 컨트롤은 IDispatch, IProvideClassInfo2, IConnectionPointContainer, IConnectionPoint 인터페이스를 구현해야 한다. 여기에서는 컨트롤의 속성에 대해서만 좀 더 자세하게 살펴보기로 한다.

일반적으로 컨트롤이 컨테이너 안에 처음 로드될 때 컨트롤의 속성은 초기값을 제공한다. 이러한 초기값은 어디에서 오는 것일까? 또한, 예를 들어 Visual Basic 어플리케이션의 폼에 컨트롤을 추가하고 해당 컨트롤의 어떤 속성에 값을 지정했다고 하자. 만약 컨테이너인 Visual Basic 폼이 이 속성값을 저장할 수 없다면, 아마도 다음에 Visual Basic 폼을 로드할 때는 다시 속성값을 지정하는 작업을 거듭해야 할 것이다. 이러한 문제를 어떻게 해결해야 할까?

이것을 해결하는 한 가지 방법은 컨테이너가 복합 문서(compound document)파일을 관하는 것이다. 컨테이너는 복합 문서 파일에 각의 컨트롤에 대하여 하나의 스토리지(storage) 또는 스트림(stream)을 할당하고, 해당 컨트롤의 속성을 저장하기 위하여 이 스토리지나 스트림을 사용할 수 있다. 이것이 가능하기 위해서는 컨트롤은 IPersistStreamInit 인터페이스를 제공해야 한다. 컨테이너는 이 인터페이스의 메서드를 사용하여 컨트롤에게 스트림 포인터를 넘겨주고, 컨트롤은 이 스트림 포인터를 통하여 속성값을 저장하거나 로드할 수 있다. 이때, IPersistStreamInit 인터페이스의 InitNew 메서드는 컨트롤이 제공하는 속성의 초기값을 지정하는데 사용된다.

또 다른 방법은 '속성 백(Property Bag)'이라고 하는 메커니즘을 사용하는 것이다. 컨테이너는 IPropertyBag 인터페이스를 구현함으로써 속성 백을 제공한다. 이 속성 백 즉, 속성 '가방'에는 해당 컨트롤의 속성값이 저장된다. 컨트롤은 IPersistPropertyBag 인터페이스 구현을 통하여 컨테이너의 속성 백에게 속성값을 받아들이거나 리턴하도록 요청하게 된다. 이들 방법이 '속성의 지속성(Persistent Property)'을 구현하는 메커니즘으로 사용된다.

이와 함께, 컨트롤은 '데이터 바인딩(data binding)'을 지원할 수 있다. 데이터 바인딩이란 컨트롤의 어떤 속성이 데이터베이스 테이블의 필드(field, 또는 컬럼)와 같은 데이터 소스(data source)에 밀접하게 연결되어 있는 것을 말한다. 따라서, 컨트롤의 데이터 바인딩 속성은 데이터베이스 테이블의 특정한 레코드의 필드값을 반영하며, 이 속성의 값이 변경될 때 변경된 값이 데이터베이스에 전달된다. 데이터 바인딩을 지원하는 컨트롤의 속성에는 형식 라이브러리 안에 두 가지 IDL/ODL 속성이 지정된다.

그 하나는 bindalbe 속성으로 컨트롤의 속성값이 변경될 때 IPropertyNotifySink::OnChange 메시지를 호출하여 컨테이너에게 그 사실을 통보한다는 것을 의미하며, 다른 하나는 requestedit 속성으로 컨트롤의 속성값이 변경되기 전에 컨테이너의 IPropertyNotifySink::OnRequestEdit 메시지를 호출할 것이라는 것을 나타낸다.

만약 IPropertyNotifySink::OnRequestEdit 메시지 호출에 대하여 컨테이너가 S_OK를 리턴한다면 속성값은 변경될 수 있으며, S_FALSE를 리턴한다면 해당 속성값은 변경될 수 없음을 나타낸다. 따라서, 컨트롤은 컨테이너가 S_FALSE를 리턴할 때 속성값 변경 작업을 취소하고 속성값을 변경되기 이전의 값으로 환원시켜야 한다.

c. ActiveX 컨트롤 고유의 인터페이스

컨트롤 사양은 컨트롤과 컨테이너가 좀 더 특별하게 커뮤니케이션을 할 수 있도록 두 개의 인터페이스를 정의한다. 하나는 컨트롤이 구현해야 하는 IOleControl 인터페이스이고, 다른 하나는 컨테이너가 구현해야 하는 IOleControlSite 인터페이스이다. 여기에서는 이들 인터페이스가 서로 전달하게 되는 정보 중에서 중요한 몇 가지 사항에 대해서만 살펴보기로 하자.

- 키보드 입력 정보 전달

컨트롤은 엑셀러레이터(accelerator) 테이블에 정의된 키 또는 액세스 키에 대한 정보를 컨테이너에게 자신이 어떤 키에 관심을 갖고 있는 지에 대한 정보를 넘겨 줄 수 있으며, 컨테이너는 자신에게 포함된 모든 컨트롤에 대하여 IOleControl::GetControlInfo 메시지를 호출하여 이 정보를 구성할 수 있다. 또한, 컨트롤 IOleControlSite::OnControlInfoChanged 메시지를 호출하여 이 정보가 동적으로 변경할 수 있으며, 이때 컨테이너는 해당 컨트롤에 대하여 IOleControl::GetControlInfo 메시지를 호출해야 한다. 이제 컨트롤이 관심을 갖고 있는 키가 눌러질 때 컨테이너는 IOleControl::OnMnemonic 메시지를 호출함으로써 컨트롤이 원하는 행위를 할 수 있도록 할 수 있다.

- 환경 및 확장 속성 전달

컨테이너는 IOleControl::OnAmbientPropertyChange 메시지를 호출하여 자신의 환경 속성이 변경되었다는 정보를 컨트롤에게 넘겨줄 수 있으며, 컨트롤은 IOleControlSite::GetExtendedControl 메시지를 호출하여 컨테이너에 포함된 확장 컨트롤의 IDispatch 인터페이스 포인터를 구하여 컨테이너의 확장 속성의 현재 값을 결정할 수 있다.

- 좌표계 변환

일반적으로 컨테이너는 서로 다른 방식의 좌표계를 사용하며, 더욱이 좌표계를 소유하는 것은 컨트롤이 아니라 컨테이너이기 때문에, 컨트롤의 속성에 저장된 좌표값은 컨테이너의 좌표값으로 변환되어야 필요가 있을 수 있다. 이때 컨트롤은 IOleControlSite::TransformCoords 메시지를 호출하여 컨테이너로 하여금 좌표계 변환 작업을 수행하게 할 수 있다.

- 이벤트 발생 제어

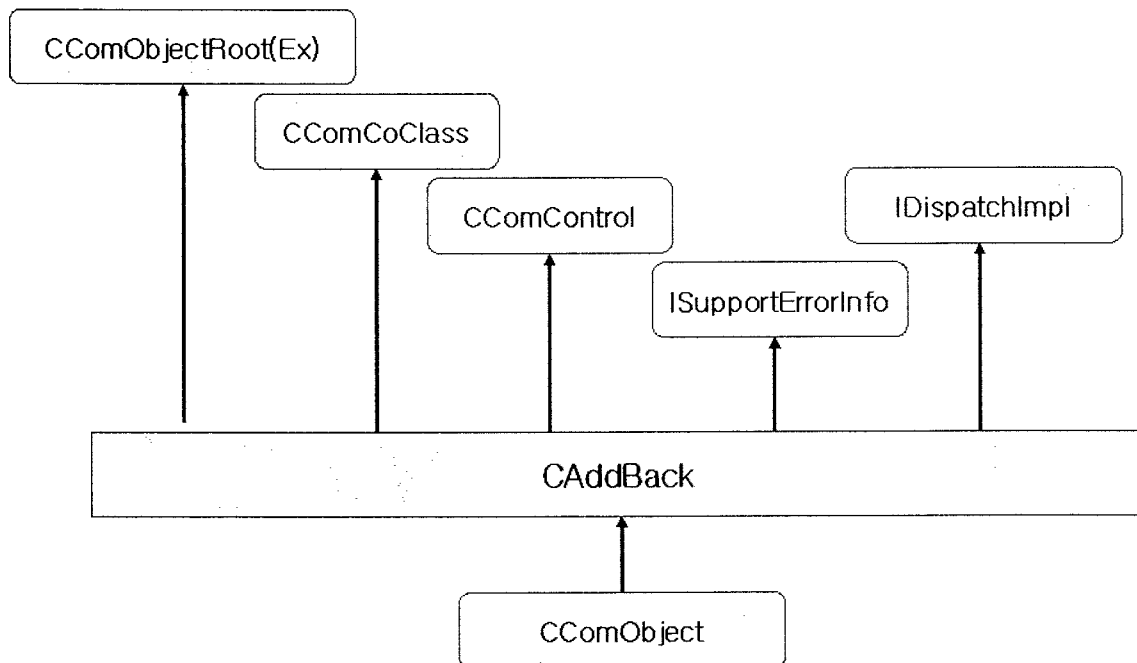
컨테이너는 IOleControl::FreezeEvents 메시지를 호출하여 컨트롤의 이벤트 발생을 제어할 수 있다. 컨테이너가 TRUE를 매개변수로 FreezeEvents 메시지를 호출할 때마다 컨트롤은

이벤트 발생 억제 카운터(freeze counter)를 증가시키고, FALSE를 매개변수로 FreezeEvents 메서드를 호출할 때 감소시킨다. 컨트롤은 이 카운터가 0이 될 때까지 컨테이너가 이벤트를 받아들일 수 없다고 인식하고 이벤트를 발생시키지 않아야 한다.

d. OLE 컨트롤 96 사양

지금까지 언급한 내용은 사실상 OLE컨트롤94사양(OLEControls94Specification)에 정의된 OLE 컨트롤의 기능을 설명한다. 이것만으로도 OLE 컨트롤은 이전의 Visual Basic 커스텀 컨트롤 보다는 훨씬 더 향상된 기능을 제공하지만 몇몇 부분에서는 문제점을 여전히 내포하고 있다. 예를 들어, 컨트롤에 화면에 나타날 때 활성화되는 옵션(OLEMISC_ACTIVATEWHENVISIBLE 세부 상태 비트)이 설정되어 있고, 컨테이너가 많은 컨트롤을 포함하고 있을 때, 당연히 이들 컨트롤이 로드되고 초기화 되는데 asg은 부하가 발생하게 도리 것이다. 이러한 문제점을 포함하여 크고 작은 문제점들을 해결하기 위해 마이크로소프트는 OCX 96이라고 하는 OLE 컨트롤 96사양(OLE Controls 96 Specification)을 발표하게 도니다. OCX 96에 포함되어 있는 주요 기능은 다음과 같다.

- 활성화 지연
- 윈도우 없는 컨트롤
- 그리기 최적화
- 빠른 활성화



2.4.2 ActiveX 컨트롤과 인터넷

앞에서 ActiveX 컨트롤이란 인터넷 환경에 효율적으로 사용될 수 있도록 확장된 OLE 컨트롤의 상위 집합이라고 하였다. 지금까지는 ActiveX 컨트롤의 일반적인 특징에 대하여 살펴보았으므로, 이제부터는 ActiveX 컨트롤이 인터넷 상에서 사용될 때 고려해야 하는 사항에 대해서 살펴보기로 하겠다.

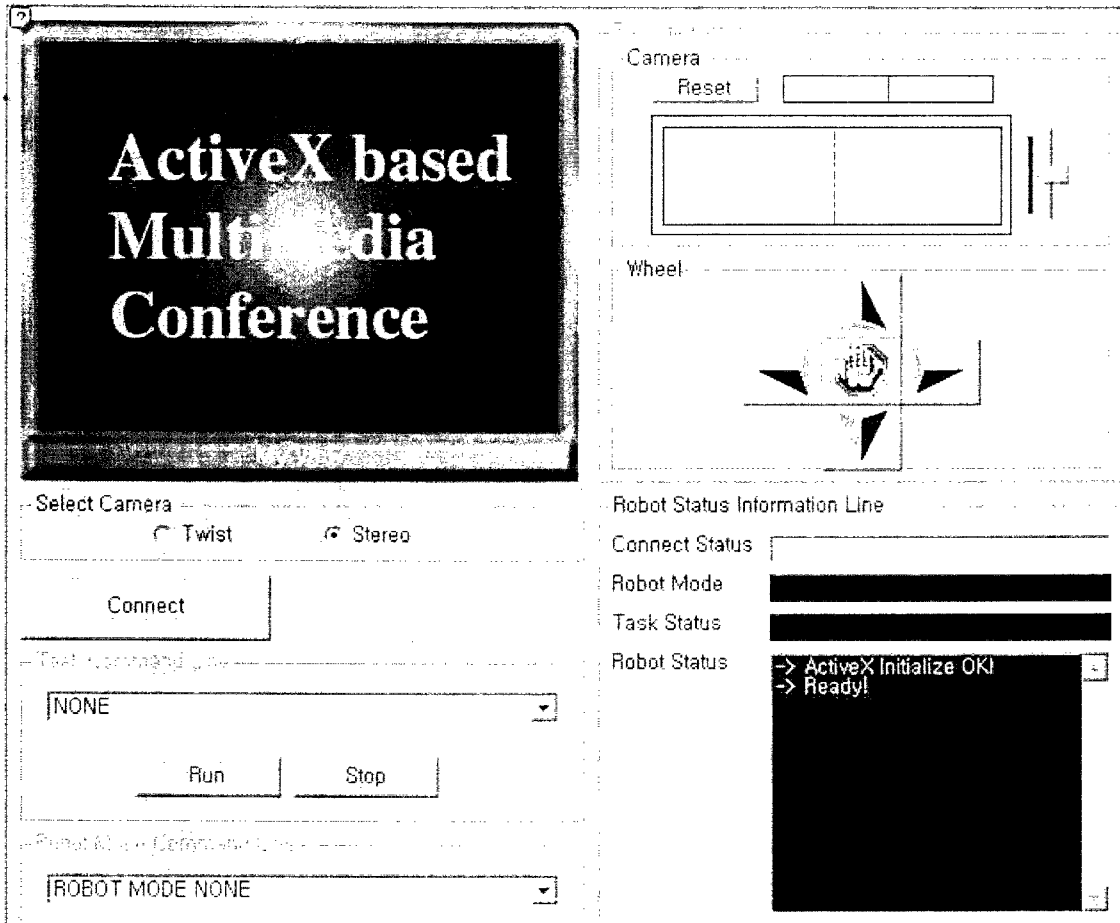
a. 웹 페이지에서의 ActiveX 컨트롤 사용

웹페이지에서 ActiveX 컨트롤을 사용하기 위해서는 웹 페이지에 ActiveX 컨트롤을 포함시켜야 한다. 각 ActiveX 컨트롤은 다음 예와 같이 <OBJECT> 태그 안에 포함된다.

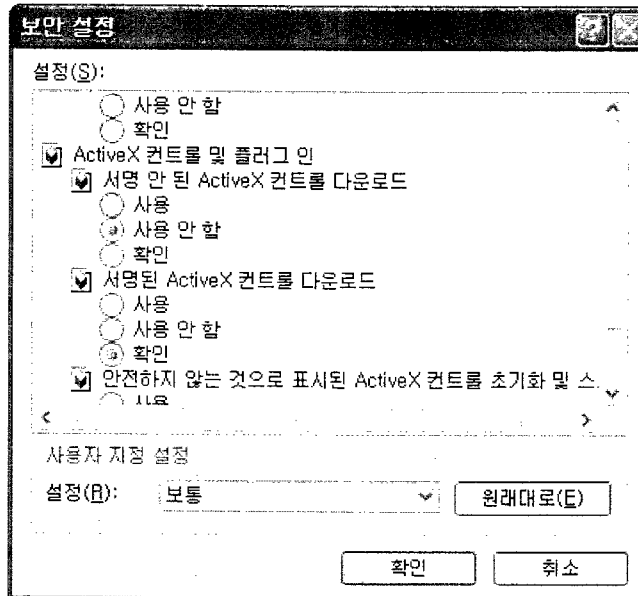
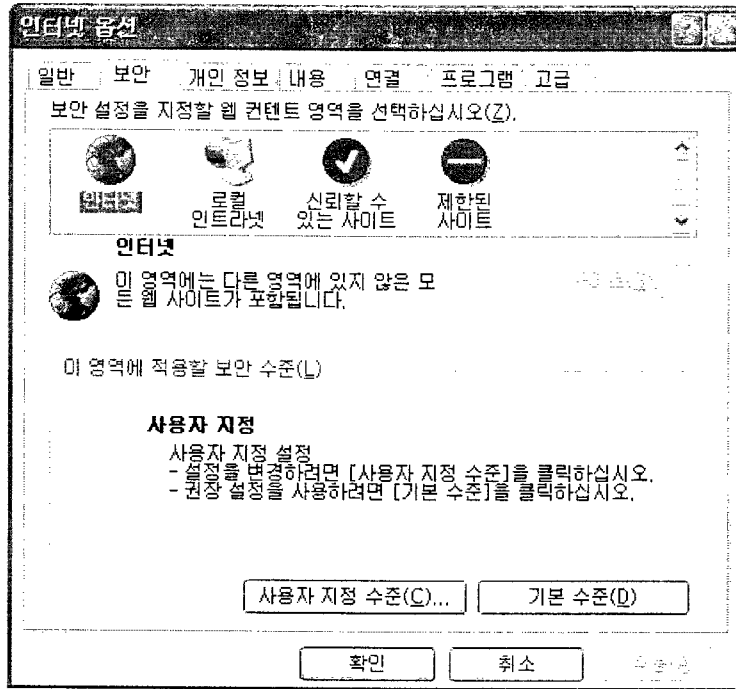
```
<OBJECT>ID="Image1"  
CLASSID="CLSID:D4A97620-8E8F-11CF-93CD-00AA00C08FDF"  
</OBJECT>
```

각 ActiveX 컨트롤은 CLSID로 식별되며, 각 웹 페이지에서 스크립트 코드가 참조할 수 있는 ID값을 갖는다. 위의 웹페이지 코드에서는 CLSID가 "D4A97620-8E8F-11CF-93CD-00AA00C08FDF"인 Microsoft ActiveX Image ActiveX 컨트롤을 포함하고 있다. 물론, 해당 CLSID는 클라이언트의 시스템 레지스트리에 등록되어 있어야 이 CLSID에 대응되는 ActiveX 컨트롤을 웹 브라우저에서 사용할 수 있다. 또한, 이 ActiveX 컨트롤이 포함되어 있는 웹페이지 안에 있는 스크립트 코드에서는 해당 ActiveX 컨트롤을 'Image1'이란 이름으로 참조할 수 있다.

위의 코드를 포함한 웹 페이지가 저장되고 Microsoft Internet Explorer와 같은 웹 브라우저에서 로드한다면 다음 그림과 같은 결과를 보여주게 될 것이다.



앞의 그림과 같은 결과를 볼 수 없다고 해도 크게 걱정할 필요는 없다. Microsoft Internet Explorer는 아마도 웹 페이지에 포함된 ActiveX 컨트롤이 보안 문제를 일으킬 수 있다고 판단한 듯하다. 여러분은 다음 그림과 같은 [인터넷 옵션] 대화상자의 [시스템 보안]에서 옵션을 변경시켜 줌으로써 보안 문제를 해결할 수 있다.



3.영상의 구현방법

3.1압축의 필요성

근래들어 고품질의 정보를 사용하려는 인간의 욕구증가와 더불어 사용 또한 급증하고 있다. 예를 들어 DOS의 커멘드 환경에서의 작업이 윈도우나 GUI(Graphic User Interface)화 된 프로그램 상에서의 작업으로 대체되

고있고, 내장된 스피커에서 나오던 소리대신에 MIDI들등을 통해 여러 가지 사운드를 증기는 경향이 이런 예이다. 즉 멀티미디어를 추구하게된 것이다. 그러나 멀티미디어 기술가운데 만족할만한 수준에 이른 것은 그리 많지않은 형편이다. 특히 종전의 텍스트와 달리 새로운 미디어들의 크기가 해결하기 어려운 문제로 남아 있는데, 오디오나 이미지등의 데이터는 아직까지는 저장매체나 전송매체의 기술발전에도 불구하고 그 크기가 너무나 크기 때문이다.

따라서 이들을 저장, 처리 전송하는데 있어서 압축기술은 필연적이라 할 수 있다.

3.2 영상 압축방법들

영상에는 상당한 양의 공간 중복성이 포함되어 있다. 이러한 공간중복성을 제거하는 것이 영상압축기의 기본이다. 압축기술은 크게 무손실 압축(Lossless Compression)과 손실압축(Lossy Compression)으로 분류할 수 있다.

무손실 압축은 PCX, GIF, TIFF 등에서 사용하고이 TSS 기술로 복원한후, 원래영상과 동일한 영상을 얻을수있다는 장점이 있는 반면에 압축률이 1/2이하이기 때문에 압출률 보다는 화질저하가 나타나서는 안되는 곳등에서 사용하고 있다.

이방법에는 예측부호화(Prediction Coding), 런랭스부호화(Run Length Coding), 허프만 부호화(Huffman Coding)등이 사용되고 있다.

손실 압축은 무손실압축과는 달리 손실을 허용하는 압축방법이다. 이 방법에서는 변환부호화(Transform Coding)기술을 사용하여 수십대 1의 압축률을 얻을수있기 때문에 MPEG(Moving Picture Experts Group) 이나 JPEG(Joint Phtographic Coding Expert Group)등에서 사용되고 있다.

이방법에는 많은 메모리와 시간이 요구되는 단점이 있긴하지만 데이터압축에 의해 얻어지는 이득은 이 단점을 보상해주고도 남는다. 또한 실제응용에서 수십대:1의 압축률을 필요로하는 경우에는 이방법외에는 다른방법이 없다.

변환부호에서 사용되는 변환에는 DFT(Discrete Fourier Transform), ST(Slant Transform), WHT(Walsh Hadamard Transform)등이 있는데, DCT가 가장 압축률을 높일수있는 것으로 알려져 있다.

3.3 영상캡처 및 전송

영상을 Capture 하기위해 타이머의 콜백함수를 쓴다. 이를 위해서는 먼저 일정시간을 간격으로 타이머 메시지가 발생할 수 있도록 타이머를 셋팅해 놓아야 한다. 그 이후에 일어나는 과정들은 모두 이 메시지가 발생할 때마다 순차적으로 이루어지게된다.

타이머 메시지가 발생하게 되면 처음에 Capture 콜백함수가 한화면의 영상을 Capture하게 된다. 다음으로 Capture한 화상데이터는 출력버퍼에 화상데이터는 출력 버퍼에 들어가게되고 버퍼에 들어있는 한 화면분의 영상데이터를 대상으로 영상압축이 이루어지게된다.

압축된 영상 데이터는 순차적으 네트워크를 통하여 Client로 전달되게 된다.

영상데이터를 받는 쪽에서서는 입력버퍼에 들어있는 데이터를 대상으로 압축된 데이터를 복호화하여 원상태로 만들어주고 한화면분의 영상데이터가 들어오면 그 영상데이터를 화면에 표시하게된다.

1. 화면을 Capture하기 위해서는 Capture 윈도우를 하나가지고 있어야하는데 그 윈도우를 생성해주는 VFW(Video For Window)함수가 CreateCaptureWindow(lpszWindowName, drawstyle, x, y, nwidth, nHeight, nWnd, nId)이다.
2. Capture 콜백함수를 설정해주어야 하는데, 그 역할을 해주는 함수다 CapSetCallbackOnFrame(hwnd, fpProc)인데, 이 부분에서 자기가 만들어 놓은 콜백함수를 적어주면 된다.
3. Capture 드라이버와 연결을 설정해주어야 하는데, 이 기능은 CaptureDriverConnect(hwnd, 0)이 해준다.
4. Capture 장비를 설정해 주어야 하는데 이것은 CapDriverGetCap(), capCaptureGetSetUp(), capCaptureSetup()등을 통하여 하면 무리없이 할 수가 있다.
5. 비디오 포맷을 설정해주어야하는데, 이것은 capSetVideoFormat(hwnd, psVideoFormat, wsize)를 이용하면 된다.
6. 더불어 Capture윈도우 사용이 끝났으면 반드시 윈도우를 제거해 주어야하는데 capDriverDisconnect (hwnd)를 이용하면된다.

4. Server / Client for Application

4.1 Server

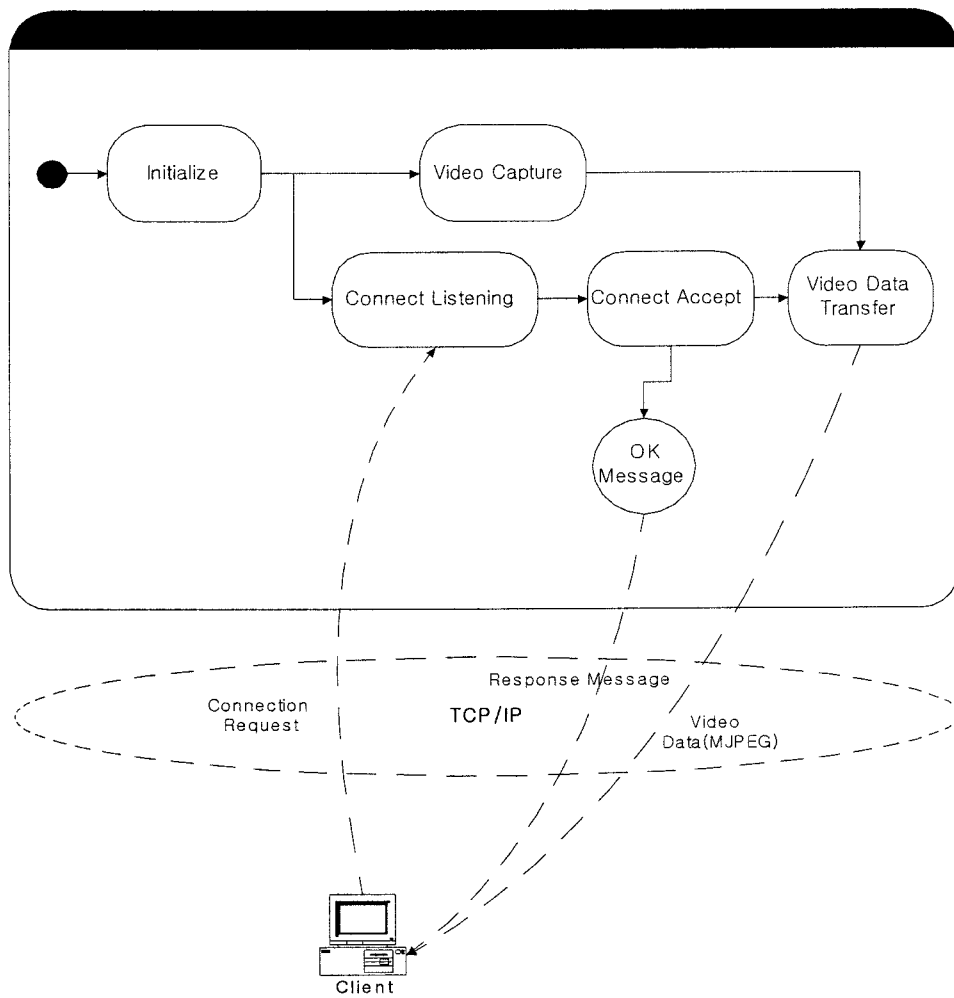
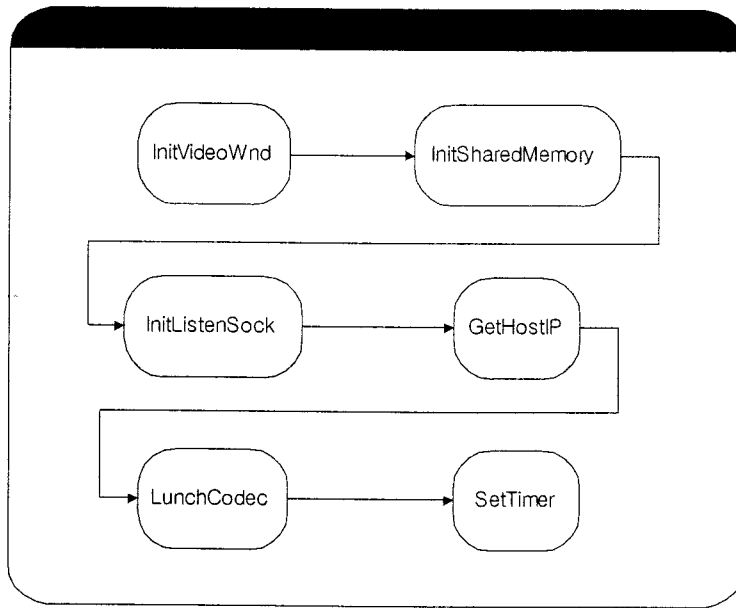


그림 1343 Server Structure



Description

InitVideoWnd
 비디오 캡처 윈도우 생성
 캡처링 시작
InitSharedMemory
 코덱 프로세스와 메인 프로세스간의 공유메모리 셋팅
InitListenSock
 리스 소켓을 생성
 상대방 연결 준비
GetHostIP
 로컬 아이피 주소 획득
LunchCodec
 코덱 프로세스 실행
SetTimer
 캡처되고 압축된 이미지 전송 타이머

그림 1344 First Step : Initialize

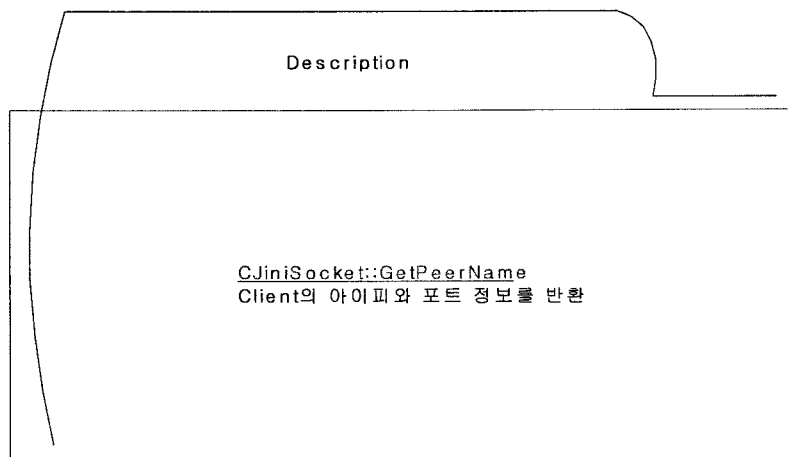
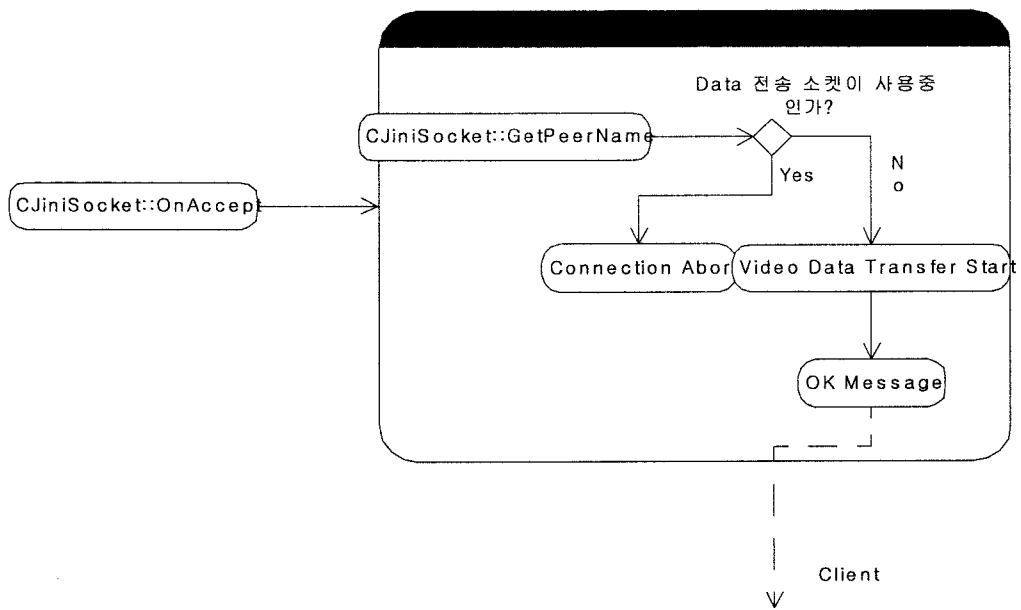


그림 1345 Second Step : Connecting

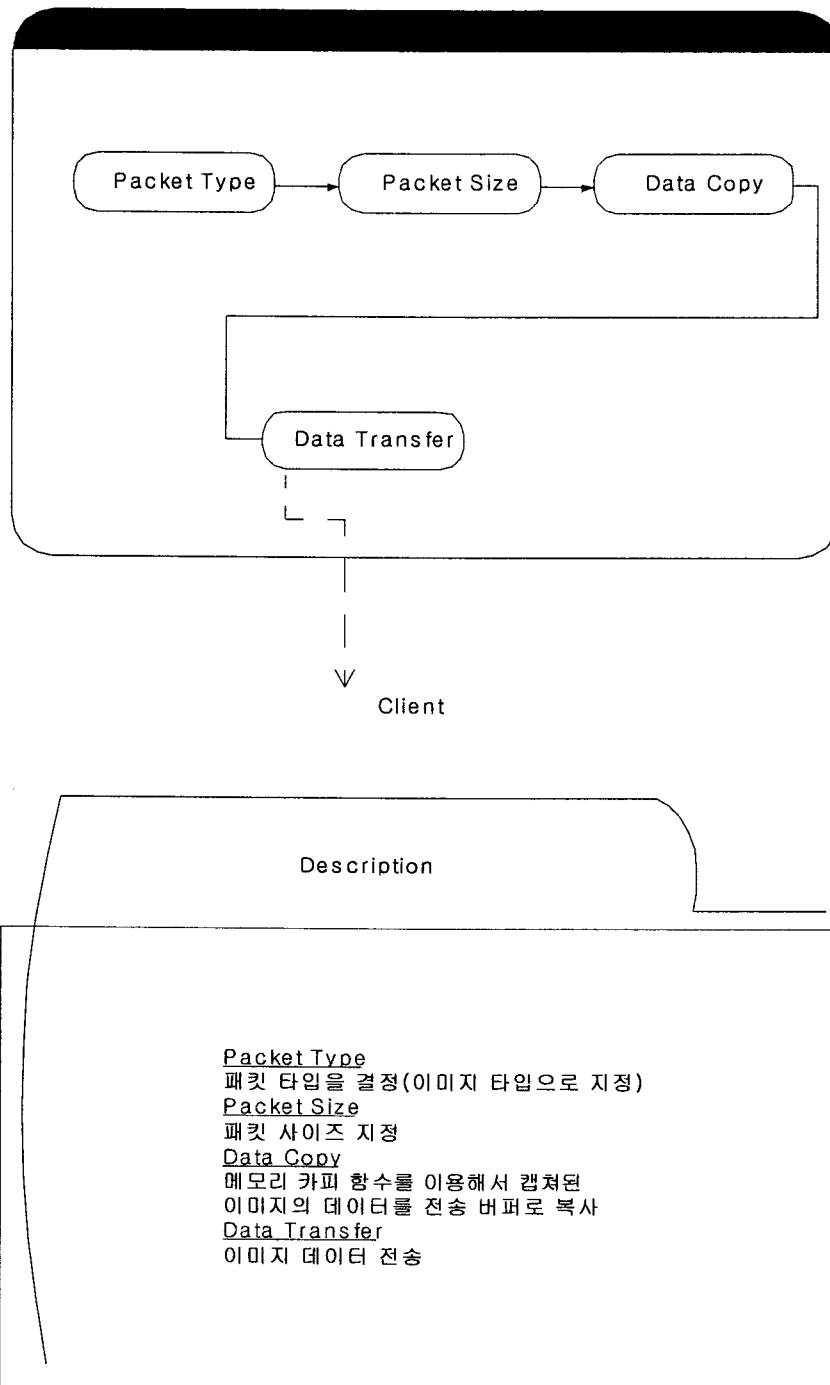


그림 1346 Third Step : Data Transfer

4.2 Client

Hombot을 무선 인터넷 환경을 이용하여 원격으로 사용자가 직접 제어할 수 있도록 한다. Hombot의 주변 상황을 Hombot으로부터 전송된 영상을 통해 사용자에게 보여준다.

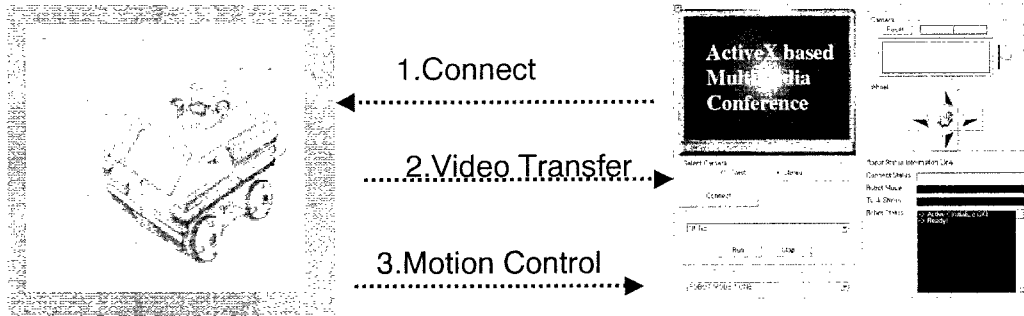


그림 1347 Server / Client 통신

GUI :

Hombot을 직접 제어하기 위해 사용자에게 제공하는 Interface

개발 속도를 향상시키기 위해 Visual Basic으로 제작

Video Component :

Hombot으로부터 전송된 영상을 수신하여 Hombot Client에 수신된 영상을 보여주는 역할

멀티미디어 프로그래밍 특성상 Visual C++로 제작

Message Component :

Hombot과 Motion Control을 위한 통신을 위해 제작

Hombot Motion Server의 특수한 통신 기능으로 인해 Visual C++로 제작

여 백

비전 시스템을 이용한 사람 인식 및 추적

(서울대, 박 종우 교수)

1. 연구개발의 목적 및 개요

이번 년도의 과제는 이동 로봇에 장착된 스테레오 카메라로부터 들어오는 영상 정보로부터 여러 명의 사람의 위치를 인식하고 추적함으로써 이동 로봇이 주변의 사람들과 능동적으로 상호 작용을 하게 하는 것이 연구의 최종 목적이 되겠다. 이와 같은 기능을 구현하기 위해서는 로봇의 시각 장치로부터 사람이 있는지를 인식하여야 하고 몇 명의 사람이 있는지를 알아야 하며 로봇이 원하는 사람의 경우는 추적이 가능하여야 하므로 시각적인 추적(visual tracking)이 가능하여야 할 것이다. 지난 해 수행하였던 과제와는 달리 이번 년도의 과제의 큰 목표는 사람의 얼굴 인식(face detection)이 아닌 사람 전체를 인식(human detection)하는 문제이고 로봇의 시야에 들어오는 사람들을 거의 대부분 인식할 수 있는 시스템을 개발하는 것이 주요 과제가 된다. 사람의 전체 형상을 인식하는 문제는 실제로 로봇이 사람을 추적할 때 사람의 뒤를 따라가는 경우 등 대부분 얼굴이 거의 보이지 않는 문제가 발생하기 때문이다.

사람을 인식하는 문제에 있어서는 로봇이 움직이기 때문에 background subtraction과 같은 human detection and tracking에서 가장 자주 이용되는 방법으로 접근하는 것은 바람직하지 못하다. 따라서 움직이는 물체를 걸러내는 것이 아니라 사람의 형상 정보를 이용하여 전체 영상 이미지 중에서 사람에 해당하는 영역을 검출해 내는 접근법이 타당하다고 생각된다. 형상 정보를 이용하는 방법에는 최근 연구된 패턴 인식 기법, template matching기법 등 몇 가지 접근법이 존재하지만 실시간 구현이 가능하게 하기 위해서는 유효 정보에 기초한 template matching기법이 최선의 방법이라 사료된다.

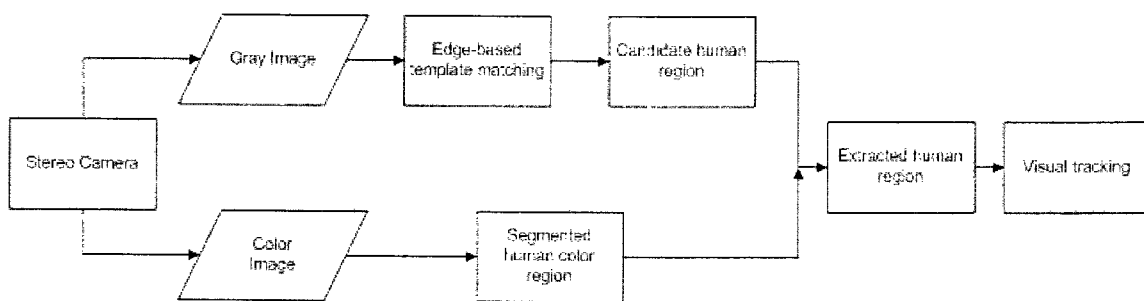
2. 연구 개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 사람의 형상 정보와 사람의 color를 이용하여 사람을 인식하고 추적할 수 있는 비전 시스템을 개발하였다. 이 두 가지 정보는 카메라의 움직임과 무관하게 사람의 위치를 찾는 단서가 된다. 또한 서로 상호 보완적으로 작용함으로써 형상 정보, color 정보 각각이 갖는 단점을 보완해주는 역할을 한다. 형상 정보만을 이용하였을 경우 이미 지 상에 투영된 사람은 고정된 형상이 없기 때문에 여러 자세에 대한 형상 정보가 아닌 하나의 고정 자세에 대한 형상 정보만을 이용할 경우 다양한 경우에 대해 인식이 힘든 단

점이 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해선 여러 자세에 대한 형상을 저장하여 이미지 상에서 이와 비교하여 인식하는 방법도 있을 수 있으나 이는 지나치게 연산 횟수가 많아지는 결과를 초래하여 실시간 구현이 불가능하게 한다. 따라서 본 연구에서는 인간의 다양한 자세에도 거의 변하지 않는 head-shoulder shape를 인식하는 문제로 문제 규정을 하였으며 이와 같은 정의시 head-shoulder shape와 거의 유사한 형상이 사람이 아님에도 존재할 수 있으므로 이를 보완해주는 방법으로 human color를 사용하였다.

2.1. 시스템 개요

시스템은 크게 human detection과 tracking 두 부분으로 나누어 진다. detection은 말 그대로 영상으로부터 사람의 위치를 찾아내는 과정이다. detection을 위해선 edge based template matching 기법을 사용하였다. 그리고 형상 정보를 이용하여 걸러진 후보 영역들 가운데 color정보를 이용하여 사람의 영역을 정확히 검출해 내도록 구현하였다. tracking은 detection과정에서 소모되는 많은 연산량과 연산 시간을 줄이고 연속된 영상 정보로부터 더욱 정확히 사람을 찾아내기 위한 과정으로써 Condensation 알고리즘을 이용한 tracking기법을 사용하였다. Condensation 알고리즘은 Kalman filter는 unimodal Gaussian distribution을 가정하기 때문에 tracking시 사람의 움직임을 잘 따라가지 못하는 경우가 발생하기도 하나 Condensation 알고리즘의 경우는 multimodal distribution에 기반하여 확률적으로 추적을 해나가는 알고리즘이므로 visual tracking문제에 더욱 적합하다 할 수 있다. 게다가 Kalman filter의 경우 Riccati equation을 풀어야 하므로 많은 연산시간이 소요되지만 Condensation알고리즘의 경우 연산량이 매우 적다.



<그림 2.1.1> System 개요

2.2. Human Detection

Human detection 과정에서는 크게 edge based template matching과 HSV color space 상에서의 skin color region extraction이 이용된다. 형상 정보를 이용하기 위해서는 사람

의 외곽 윤곽의 형상을 미리 저장하고 있고 저장된 형상 정보를 전체 이미지상에서 픽셀 단위로 훑어 가면서 correlation값을 계산하고 이 값이 Threshold value 이상일때 사람에게 해당할 수 있는 후보 영역이라 하였다. threshold value는 실험에 의해 결정하였다. edge template의 크기는 고정된 것이 아니라 이미지 상에서의 물체의 depth 정보를 알 수 있으므로 이를 이용하여 미리 정의된 head-shoulder template의 크기를 조절하였다.

2.2.1. Distance Transform

distance transform이란 edge image를 이용하여 이미지상의 모든 픽셀들이 자신으로부터 가장 가까이에 있는 edge feature까지의 거리를 그 값으로 갖도록 하는 변환이다. Distance transform을 사용한 이유는 edge based detection의 경우 human edge가 명확할 때만 detection이 되고 그렇지 않은 경우는 detection이 되지 않는다. 그러나 distance image상에서 template matching을 수행하면 human edge 가 불명확하더라도 matching이 가능하고 게다가 measure value(correlation value)가 이미지 전체에 대해서 smooth하게 나오므로 detection이 용이하다.(correlation value는 이미지상에서 template과 가장 유사한 지점이 어디인지를 알아내는 기준으로 이 값이 작을수록 사람의 형상과 가깝다는 것임)

Corelation 값의 계산

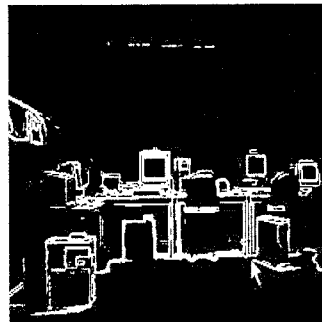
$$D_{chamfer}(T, I) = \frac{1}{|T|} \sum_{t \in T} d_t(t)$$

T : number of edge pixel in template

$d_t(t)$: distance between edge t in template(T) and closest edge pixel in image(I)



<그림 2.2.1> gray image



<그림 2.2.2> edge image using sobel edge detection

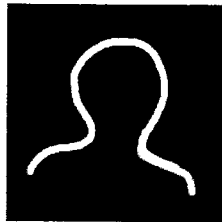


<그림 2.2.3> DT image from distance transform

Distance transform은 보통 edge image상에서 template matching을 수행하는 경우 미리 정의한 template을 전체 이미지 상에 훑으면서 template의 모든 pixel로부터의 이미지상에 있는 가장 가까운 edge pixel까지의 거리를 구하는 과정을 단순화하기 위하여 사용된다. edge image를 distance transform을 하여 DT image로 만들어 놓은 후 template의 각 pixel에 대응되는 image의 distance 값을 읽어 들이면 되기 때문이다.

2.2.2. Predefined template and template scale

사람의 형상 정보를 이용하여 이미지 상에서 사람을 찾기 위해서 본 연구에서는 미리 정의된 template으로 아래와 같은 head-shoulder template을 사용하였다.



<그림 2.2.4> head-shoulder template

위의 template을 이미지상에 matching시키는 과정에서 거리에 따른 크기 정보를 이용할 필요가 생기게 된다. 카메라로부터 가까이 사람이 있는 경우는 큰 template을 사용해야 하고 멀리 있는 경우는 작은 template을 사용해야 하므로 깊이에 따른 template scaling이 필요한데 이는 stereo camera로부터 입력되는 depth정보를 이용하여 계산하게 된다.

$$S = \frac{\text{disparity} \cdot A}{B \cdot b}$$

A : width of real human (meter)
 B : width of predefined template (pixel)
 b : baseline (meter)
 S : scale factor

2.2.3. Color

사람의 형상 정보만을 이용하여 이미지상에 존재하는 사람을 찾는 경우는 뒷 배경에 매우 복잡한 형상들이 있을 경우 다른 형상도 사람으로 인식하는 경우가 종종 발생한다. 사람이 다양한 자세를 취하더라도 거의 변하지 않는 형상인 head-shoulder template을 기준으로 하였기 때문에 이미지상에서 head-shoulder template과 유사한 형상이 나타나게 되면 사람이 아니더라도 사람으로 인식을 하게 된다. 이런 문제를 해결하고 더 나은 detection성능을 위해 사용한 것이 바로 Color정보이다. 작년도 연구에서 Color정보를 이용할 경우 HSV space의 칼라정보가 illumination에 가장 robust하다는 결과를 보여주고 있어서 작년도 연구의 결과를 활용하였다. 살색의 경우 입력된 R,G,B 값을 H,S,V값으로 변환한 후 살색에 해당하는 범위를 설정하여 형상 정보를 보완해 주는 정보로 이용하였다.

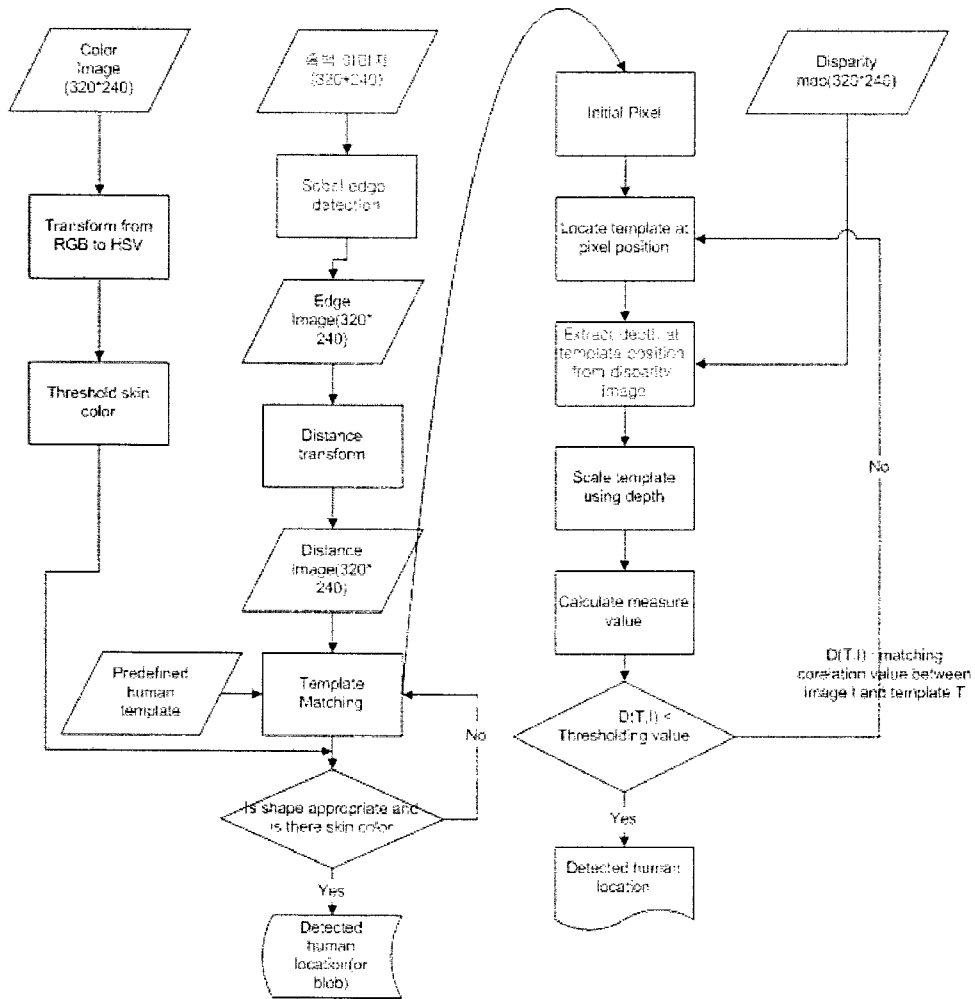
R,G,B를 H,S,V로 변환하는 식은 다음과 같다.

$$\text{Hue} = \cos^{-1} \frac{0.5[(R-G)+(R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2+(R-B)(G-B)}}$$

$$\text{Saturation} = 1 - \frac{3 \min(R, G, B)}{R+G+B}$$

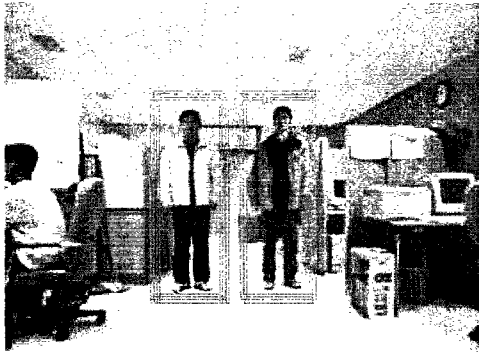
value = linear combination of R,G,B

2.2.4. Detection System Flowchart

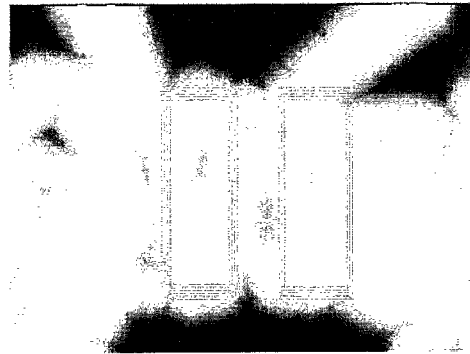


<그림 2.2.5> detection system flowchart

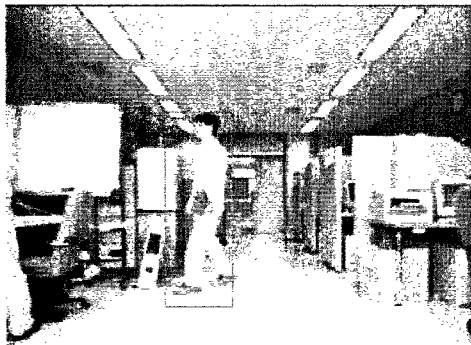
2.2.5. Detection 결과



<그림 2.2.6> two people detection



<그림 2.2.7> detection in DT image



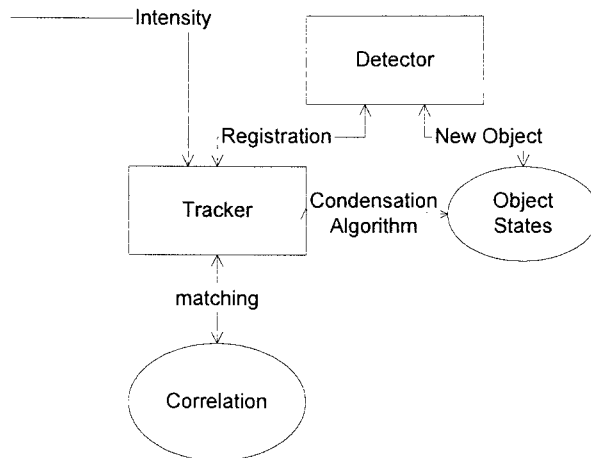
<그림 2.2.8> one people detection

2.3. Human Tracking using Condensation

정지된 영상에서 다수의 사람을 tracking하는 것에 비해 움직이는 platform 상에서의 tracking 문제는 상당히 어렵다. 우리는 이러한 moving platform 상에서의 다수의 사람을 tracking 할 수 있는 시스템을 구축하고자 한다. 사람을 tracking 하기 위한 방법으로 우선 Database를 생성한다. 이 DB에는 detection을 통해 찾아낸 사람의 위치정보와 이에 상응되는 대표값에 관한 정보들이 들어가게 된다. 이렇게 detection module을 통해 초기화된 database의 정보는 다음 detection module이 수행되기 전까지 tracking module을 통해 update된다. 우리는 정보 갱신을 위한 방법으로 probabilistic method(condensation algorithm)를 사용하였다. 이렇게 함으로써 우리는 빠르고 robust한 tracking 결과를 얻을 수 있었다.

tracking module에서 요구되는 기능으로 다수의 사람을 tracking할 수 있어야 하며, tracking database는 정보의 자유로운 접근(adding, estimation, deletion)이 가능해야

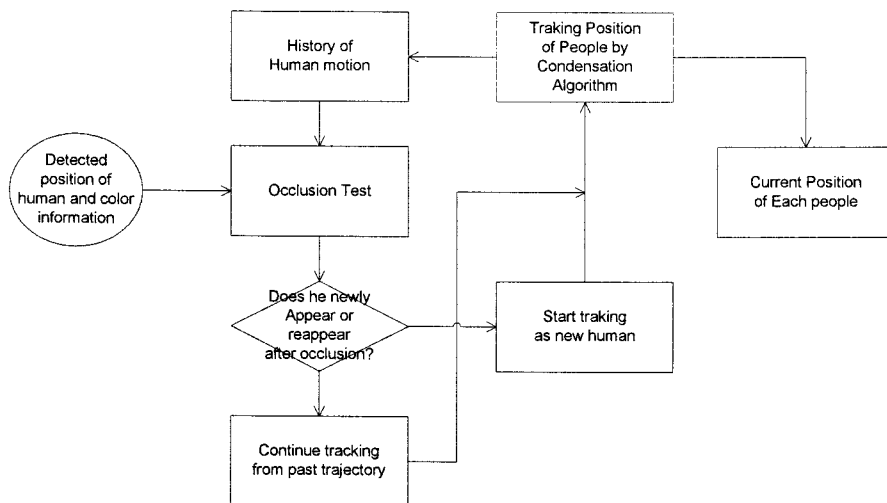
한다. 즉 detection을 통해 얻어진 정보를 database에 저장하고 database에 저장된 위치를 dynamic model로 가정 probabilistic method(condensation algorithm)을 이용 추정하게 된다. 또한 화면상에서 사라지거나 없어지는 경우 database에서 없애야 한다. 추후에 해결과제로써 화면상에서 사람이 겹침으로 detection을 통해 가린 사람의 위치를 얻지 못하는 occlusion을 해결되어야 한다.



<그림 2.3.1> tracking module 개요

2.3.1. Tracking system 구성

Tracking Flowchart



<그림> flowchart

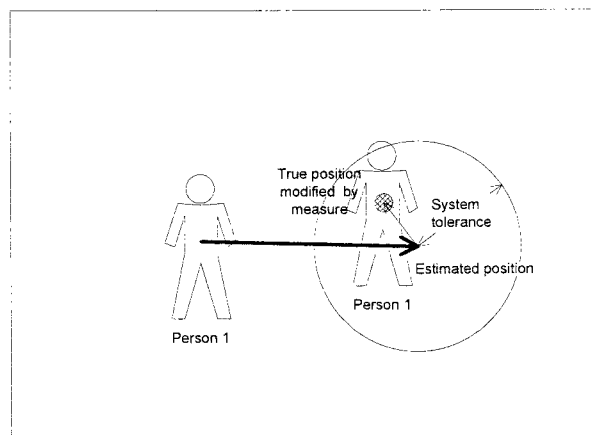
여기서는 단지 tracking module의 기능과 구조에 관심을 가지고 살펴본다. 처음 detection module을 통해 초기화된 사람의 위치와 그 위치에 대응되는 대표정보는 database(double linked list)에 저장된다. 이후 10frame은 tracking을 수행하고 다시 detection module이 수행된다. 다음에 detection이 수행될 때는 저장되는 위치정보와 DB에 저장된 정보와 비교하여 새로운 정보만 새로 DB에 추가된다. 즉 DB에 저장된 위치정보와 detection을 통해 알아낸 위치정보가 같다면 이는 같은 사람을 detection한 결과이기 때문에 추가될 필요가 없는 것이다.

이렇게 저장된 위치는 다음 프레임에서 system dynamics(constant velocity model)에 의해 추정되고, 추정된 샘플들의 위치에 measurement를 통해 weight를 부여 정확한 위치를 estimation하게 된다. 이 때 우리가 사용한 estimation method는 multi-modal tracking이 가능한 condensation algorithm이다. measurement를 위한 방법으로 초기 대표되는 color를 사용하고자 했으나, color라는 것이 주위환경에 민감하고 변화가 많기 때문에 대표값으로 의미가 크지 않았고, 실험결과 많은 오차를 나타내었다. 따라서 우리는 좀 더 사람임을 나타낼 수 있는 정확한 인자로서, template matching을 통한 weight 부여의 방법을 택하였다.

condensation algorithm에서 추정을 위한 process model은 중요한 의미를 갖고 있다. 그러나 우리는 사람의 움직임의 dynamics에 대한 충분한 정보를 알고 있지 못하기 때문에 사람의 움직임을 constant velocity model로 가정한다. 즉, 사람의 움직임상에서 급격한 변화는 없다는 것이다. 이렇게 가정함으로써 발생하는 오차는 정확도 면에서 큰 차이가 없기 때문에 가정의 타당성을 얻을 수 있다. 또한 사람 움직임의 가속도와 변화에 관한 term은 system noise로 가정된다.

$$\dot{x} = Ax + Bw$$

x : state, A : dynamic term, w : system noise



● 확률적 위치추적 방법(probabilistic estimation method : condensation algorithm)

여기서 우리는 위치 추정의 방법으로 condensation algorithm을 사용하였다. 매우 복잡한 배경하에서 물체를 추적하는 것은 매우 어려운 문제이다. 이러한 추정의 ambiguity를 해결하기 위한 방법으로 확률적인 방법을 사용하게 되는데, kalman filter와 우리가 논하게 될 condensation algorithm이 여기에 속하게 된다. condensation algorithm에 비해 kalman filter는 gaussian density와 unimodal이라는 제한이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 사용되는 방법이 Condensation algorithm이다.

$p_{t-1}(x_{t-1}|Z_{t-1}) \rightarrow p_t(x_t|x_{t-1}) \rightarrow p_{t-1}(x_t|Z_{t-1}) \rightarrow p(z_t|x_t) \rightarrow p_t(x_t|Z_t)$				
convolve with dynamics		multiply observation		

x_t : state of the modeled object at time t (configuration)

X_t : its history

z_t : the set of image features at time t (measurement)

Z_t : it history

우선 샘플을 image 상에 뿌리게 된다. 각 sample마다 system의 dynamic이 적용되고, 새롭게 위치가 추정된다. 이 sample마다의 추정위치가 정확한지를 measurement를 수행하여 정확도에 비례하여 weight를 부여하게 되고, 각 sample의 weight를 고려하여 현재의 추정 위치를 결정하게 된다.

2.3.2. 추적 과정

Input : person's 3D position

Output : person's estimated position

- (1) 초기화 : detection을 통해 사람의 위치가 찾아지고 그 위치값으로 초기화 된
- (2) 현재 위치값의 추정 : 전 frame에서의 위치, 속도 정보를 이용하여 현재 frame 상에서의 위치값을 추정한다.
- (3) 현재 위치의 확인 : 추정된 위치 근방에서 template matching을 통한 weight를 부여함으로써 정확한 위치를 계산한다.
- (4) 위치와 속도의 업데이트 : 계산된 값으로 현재의 위치와 속도를 업데이트한다.

구성(necessary class)

- (1) CPerson : person's parameter (3D position, velocity, 대표 칼라)
- (2) CTrackDB : management of the tracking database
- (3) CCondensation : implementation of the condensation algorithm

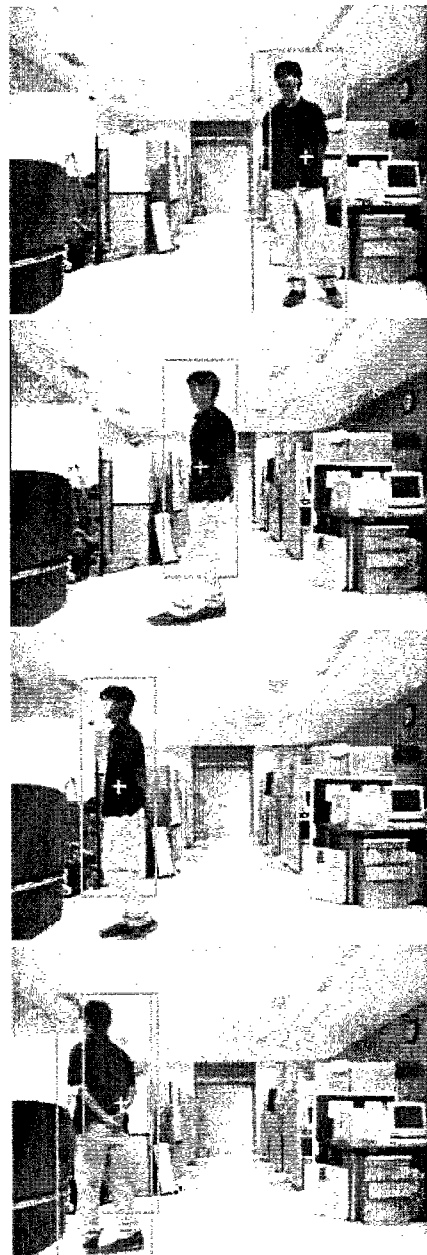
3. 연구개발결과

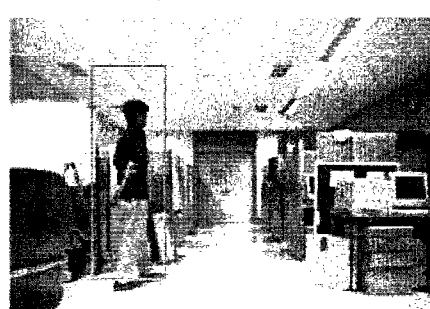
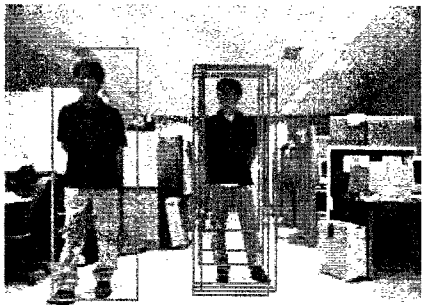
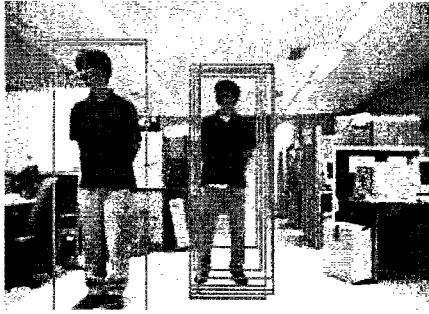
3.1. 실험 결과

3.1.1. Detection



Detection+Tracking





4. 참고문헌

- [1] D.M.Gavrila "Real-time object detection for SMART vehicles" In Proc. IEEE ICCV, volume 1, pages 87-93, 1999
- [2] G. Borgefors. "Hierarchical chamfer matching : A parametric edge matching algorithm". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 10(6): 849-865, 1988
- [3] A. Broggi , "Shape-based Pedestrian detection". Proceeding of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000, 2000
- [4] M. Oren . T. Poggio, "Pedestrian Detection using Wavelet templates", In Computer Vision and Pattern Recognition , Pages 193-199, 1997
- [5] C. Burges . "A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition." Proceedings of Data Mining and Knowledge Discovery, pages 1-43, 1998
- [6] C. Papageorgiou, T. Poggio, "A Trainable Pedestrian detection system", In Proceedings of Intelligence Vehicles, Stuttgart, Germany, 1998
- [7] M. Isard and A. Blake. "Condensation-conditional density propagation for visual tracking", International Journal of Computer Vision, 29(1): 5-28, 1998.
- [8] John MacCormick, "Probabilistic modeling and stochastic algorithms for visual localisation and tracking" Ph.D.'s Thesis, Department of Engineering Science, University of Oxford, 2000
- [9] Arnaud Doucet, Nando de Freitas, Neil Gordon , "Sequential Monte Carlo methods in practice ", Springer, New York, 2001

여 백

Stand alone type의 vision board를 이용한 Human Robot Interaction

(한국과학기술원 전자전산학과 김종환)

1. 연구개발의 목적

1.1 스테레오 카메라

스테레오 카메라(stereo head)는 동시에 좌우 2개의 영상을 획득하는 장치이다. 이렇게 획득된 영상으로부터, 실제 3차원 공간의 거리(depth) 정보를 계산할 수 있다. 이러한 스테레오 헤드는 이동 로봇 등에 장착되어 로봇 주행 등에 유용하게 사용된다. 대부분의 스테레오 헤드들은 소비전력이 크고 가격이 높은 CCD 카메라를 사용한다. 그리고, NTSC 같은 아날로그 영상신호를 출력하므로 컴퓨터에 별도의 frame grabber를 필요로 한다. 이러한 문제점을 개선하기 위해, 본 연구에서는 저전력 소비, 소형화, 효율적인 영상 전송이 가능한 스테레오 헤드를 개발하고자 한다.

1.2 얼굴 인식

1.2.1 얼굴 검출

얼굴 검출(face detection)은 영상에서 얼굴의 위치와 영역을 추출해 내는 기술로서, 얼굴 인식(face recognition)을 위해 반드시 필요한 전처리 과정이다. 얼굴 검출은 내용기반 영상검색, 화상회의, 보안 감시 시스템, 인간-컴퓨터 인터페이스 등에도 응용될 수 있다 [1]. 본 연구에서 개발되는 얼굴 검출 기법은 얼굴 인식에 필요한 효율적인 정면 얼굴 추출을 목적으로 한다.

1.2.2 얼굴 인식

얼굴 인식은 사람의 신원을 확인하는 기술로서, 입력 영상에서 얼굴 검출이 수행된 후 현재 얼굴이 데이터 베이스 안에 있는 여러 사람 중에서 누구인지를 판별하는 것이다. 정면 얼굴에 대해서 검출 및 인식을 통해서 로봇이 사람을 알아보게 하는 기술 개발을 목표로 한다.

2. 연구개발의 내용 및 범위

2.1 스테레오 카메라

2.1.1 CIS 영상획득 장치

2개의 CMOS 이미지 센서 (CIS)를 이용해, 동기화(synchronization)된 스테레오 영상을 얻는다. 스테레오 영상은 이미지 버퍼에 저장되고, RS-232나 IEEE1394 등의 시리얼 통신을 이용해 호스트 컴퓨터에 전달된다. I2C 통신 프로토콜을 이용해 CIS의 설정값 (영상 크기, white balancing 등)을 변경할 수 있다. 개발한 영상획득 장치의 주요 사양은 다음과 같다.

▣ CIS 영상획득 장치의 사양

- Image sensor: OmniVision사의 OV7620
- 320x240 YUV 4:2:2 format
- EPLD 로직을 이용한 양쪽 CIS의 동기화 구현
- I2C를 이용한 CIS 설정(electronic exposure/gain/white balancing/brightness 등)
- 넓은 FOV(field of view)를 갖는 렌즈 장착

2.1.2 IEEE 1394

이미지 센서로부터 얻어진 영상 정보를 호스트 컴퓨터로 실시간 전송하기 위해서는 대역폭이 넓은 통신 프로토콜을 사용해야 한다. 현재 사용되고있는 시리얼 통신 방법 중에서는 IEEE 1394가 가장 우수한 성능을 보이고 있다. IEEE 1394 시리얼 통신을 구현하기 위해서는 디바이스 내에 IEEE 1394 인터페이스 회로를 구현하고, 그 회로를 통신 규약에 맞도록 제어할 수 있는 펌웨어를 구현해야 한다. 또한 호스트 컴퓨터 측에는 디바이스를 인식하고 제어할 수 있는 디바이스 드라이버의 구현이 요구된다. 마지막으로 사용자가 윈도우용 응용 프로그램을 작성할 수 있도록 디바이스 드라이버와의 통신을 위한 라이브러리가 구현되어야 한다. 그림 1은 IEEE 1394 인터페이스 블록도이다.

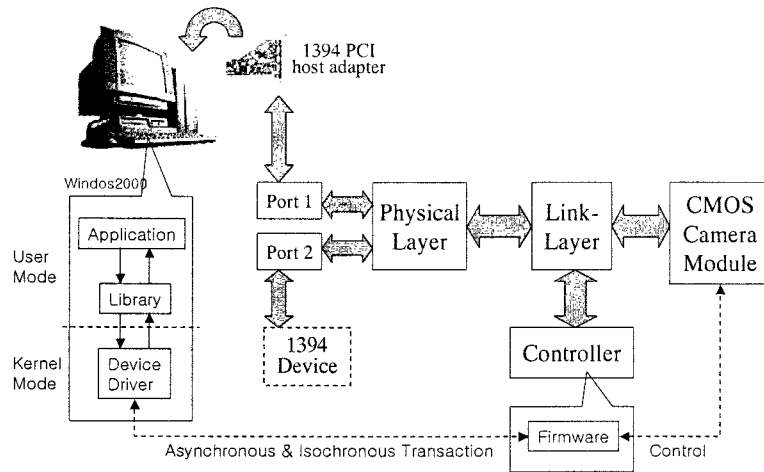


그림 1386 IEEE 1394 인터페이스

2.2 얼굴 인식

2.2.1 얼굴 검출

얼굴 검출 방법들은 크게 특징기반 방법(feature-based approach)과 영상기반 방법(image-based approach)으로 나눌 수 있다 [1]. 영상기반 방법들은 특징기반 방법에 비해 검출 속도는 낮지만, 20 x 20 크기의 작은 얼굴 영상에도 적용 가능한 장점이 있다. 빠른 검출을 위해서 색깔이나 움직임(motion) 등을 이용할 수 있지만, 적용 가능한 환경이 제한적일 수 있다. 넓은 적용범위를 위해 얼굴 검출 방법을 개발한다.

본 연구에서는 흑백 정지 영상(still gray image)에 대한 영상기반 방법을 개발하며, 얼굴 인식의 입력영상으로 사용된다. 자세한 사양은 다음과 같다.

▣ 얼굴 검출기의 사양

- 흑백 정지 영상에서의 검출
- Upright frontal face 검출($\pm 15^\circ$ in-plane rotation 허용)
- 환경: 실내 거주환경(가구, 책)의 복잡한 배경에서 normal한 조명 조건
- 검출 속도: 320x240 영상에서 초당 1번 이상의 검출
- 50x50 크기 이상의 얼굴 검출
- 눈 위치 검출 및 얼굴 영상 정규화(크기, 방향, 위치 정규화)
- 얼굴 인식기의 입력을 위해 얼굴 1개만 검출

2.2.2 얼굴 인식

검출된 얼굴과 미리 구축되어 있는 데이터 베이스의 얼굴 영상들과의 유사도(similarity)를 계산할 수 있다면, 가장 유사도가 큰 얼굴을 선택하므로써 인식 과정이 수행될 수 있다. 유사도의 결정을 위해서 검출단계에서 사용하는 것과 비슷하게 영상기반의 방법을 이용한다. 물론 비교하려는 두 영상은 적절한 포맷으로 정규화가 되어야 한다.

인식기의 데이터 베이스는 10명의 사람으로 구성되어 있고, 사람마다 5장의 이미지로 구성된다. 입력에 대해서 10명 중 한 사람일 경우에는 특정 사람임을 인식 결과로 내보내게 된다.

3. 연구개발결과

3.1 스테레오 카메라

3.1.1 CIS 영상획득 장치

CIS 영상획득 장치의 전체 구조를 그림 2에 나타내었다. 이것은 2개의 CIS와 렌즈, 동기화 신호를 위한 EPLD, 스테레오 영상을 저장하는 FIFO 메모리, I2C를 통해 CIS를 설정하는 MPU, 영상 전송을 위한 직렬 통신으로 구성된다. 전원이 on되면, MCU의 I2C 인터페이스를 통해 CIS의 제어레지스터 값들이 설정된다. EPLD에서는 동기화 신호를 발생하여 양쪽 CIS에 제공한다. CIS의 동기화된 두 영상은 EPLD를 거쳐 FIFO 이미지 버퍼에 저장된다. 시리얼 통신 장치는 FIFO에 저장된 2개의 영상을 차례대로 컴퓨터에 전송한다.

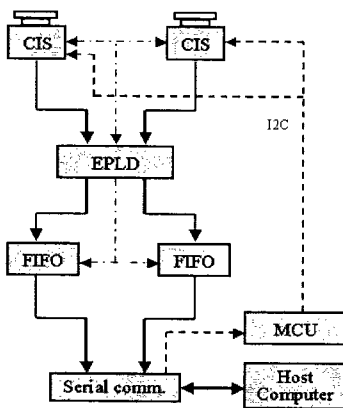


그림 1387 CIS 영상획득 장치의 구조

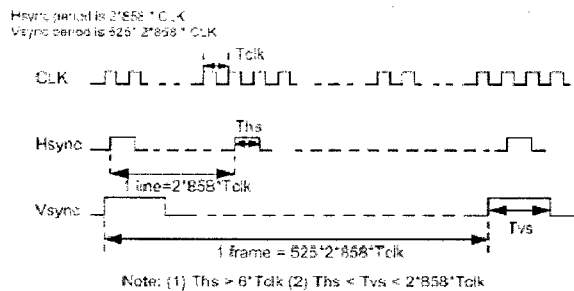


그림 1388 CIS의 동기화 신호

■ CIS: OV7620

OV7620은 VGA급 해상도를 제공하는 칼라 CMOS 이미지 센서로서, YUV 4:2:2, GRB 4:2:2 등의 포맷을 제공한다. I2C 인터페이스를 통해 여러 가지 설정값을 쉽게 바꿀 수 있으며, 120mW의 낮은 전력 소비를 갖는다 [2].

■ EPLD: EPM7128

EPM7128은 VHDL로 구현된 동기화 신호를 만들어 CIS에 제공한다. 또한, CIS에서 출력되는 영상을 FIFO에 저장하는 memory controller의 기능도 수행한다. 구현한 동기화 신호는 그림 3에 보여진다.

■ FIFO: AL422B

AL422B는 50MHz의 속도로 3Mbits까지 저장 가능한 FIFO(first-in first-out) 메모리로서, CIS의 영상을 일시적으로 저장하는 버퍼이다.

■ Serial comm.

Serial comm. 모듈은 FIFO에 저장된 영상을 호스트 컴퓨터에 전송한다. RS-232C나 IEEE1394를 이용할 수 있으며, IEEE1394는 실시간으로 고속 전송이 가능하다.

■ MCU: ATmega163

ATmega163 [3]은 I2C 인터페이스를 구현하여 CIS의 제어레지스터 값을 변경해 준다. 이때 ATmega163은 master-transmitter의 기능을 한다. 또한, RS-232C 직렬 전송의 기능도 담당한다.

제작된 CIS 영상획득 장치의 실물이 그림 4에 보여진다. 스테레오 헤드로 동작하기 위해서는 이와 유사한 보드가 하나 더 만들어진다. 이때, 동기화를 위해 EPLD에서 나오는 동기신호가 양쪽 CIS에 공유되어야 한다. 제작된 보드는 320x240 YUV 4:2:2 영상을 30 frames/sec의 성능으로 FIFO에 저장한다. 호스트 컴퓨터로의 전송은 사용한 직렬 통신 방법에 따라 다르며, RS-232C를 사용할 경우에는 1프레임을 보내는데 수 초가 걸린다.

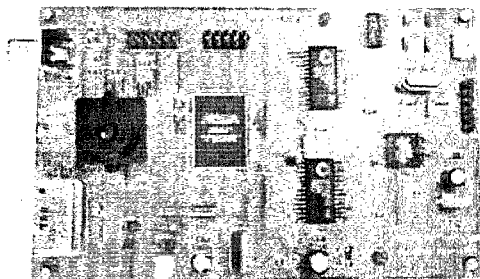


그림 1389 CIS 영상획득 장치

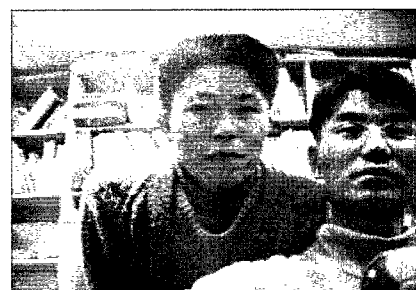


그림 1390 CIS로부터 얻어진 영상

CIS 영상획득 장치의 주요 회로도에는 그림 6에 나타내었다. 이 그림은 CIS 부분과 EPLD 부분의 회로도를 포함한다.

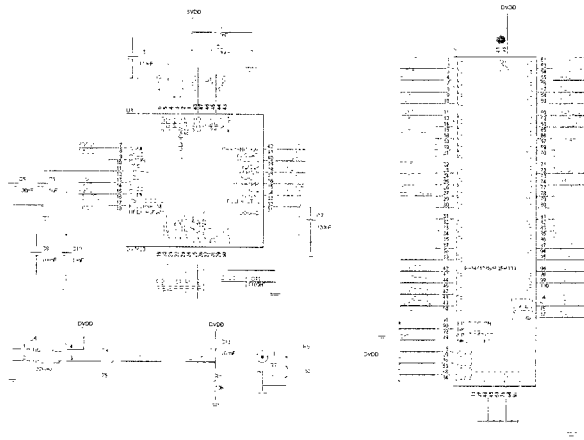


그림 1391 CIS 영상획득 장치 회로도

CIS 영상획득 장치를 이용해 얻어진 영상의 예를 그림 5에 나타내었다. CMOS 이미지 센서를 이용하였음에도 적은 pattern noise를 보이고 화질이 좋음을 알 수 있다.

3.1.2 IEEE 1394 인터페이스

3.1.2.1 회로 설계

IEEE 1394 인터페이스 회로는 PHY 칩과 LINK 칩, 그리고 컨트롤러로 구성된다. PHY 칩은 통신의 물리층으로서 패킷의 송수신을 담당한다. LINK 칩과 컨트롤러는 패킷의 논리적인 해석 및 장치 제어를 수행한다. 그림 7은 IEEE 1394 인터페이스 회로를 사용하여 구성한 스테레오 카메라의 블록도를 나타내고, 그림 8은 PHY-LINK 인터페이스 회로를 나타낸다.

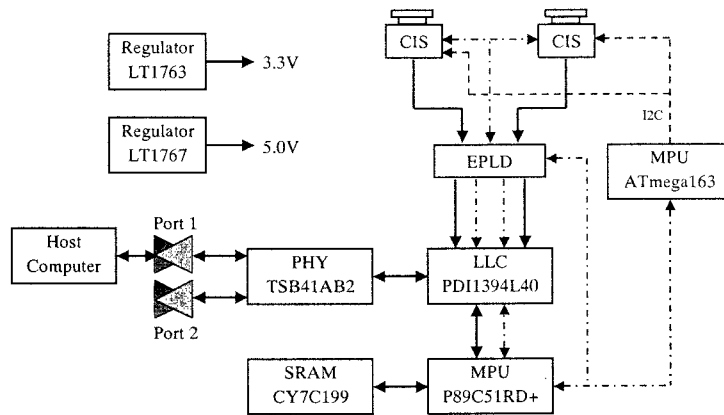


그림 1392 스테레오 카메라의 전체 블록도

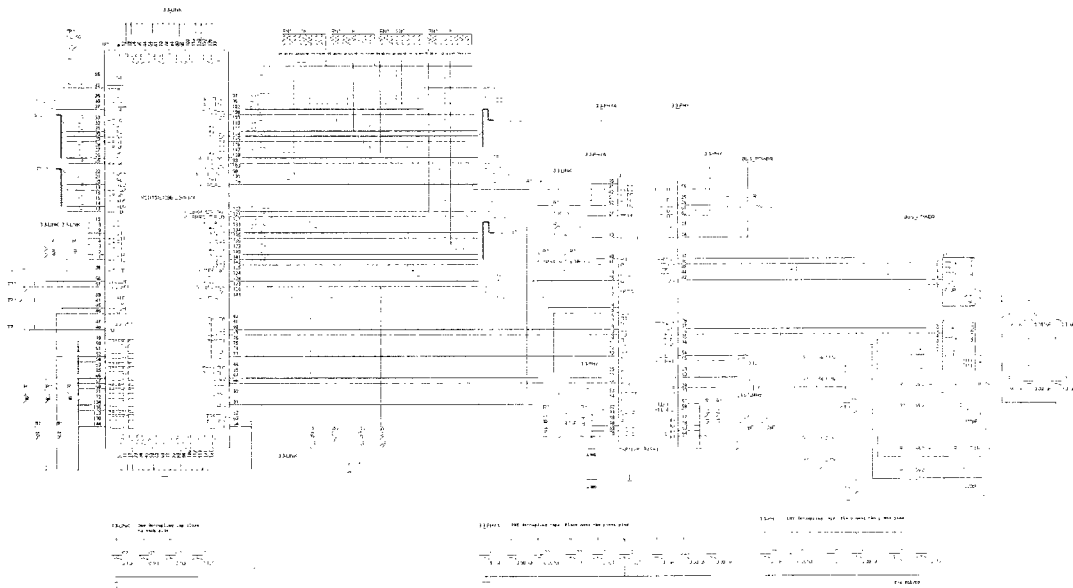


그림 1393 IEEE 1394 PHY-LINK 회로도

3.1.2.2 펌웨어

호스트 컴퓨터의 디바이스 드라이버와 장치의 컨트롤러(P89C51RD+) 간의 통신으로는 크게 asynchronous 전송 방식과 isochronous 전송 방식이 사용된다 [11]. Asynchronous 방식은 전송 여부가 보장되기 때문에 명령어를 전송할 때 사용되고, isochronous 방식은 전송 시간이 보장되기 때문에 이미지 데이터를 전송할 때 사용된다. 특히, 호스트 컴퓨터에서 디바이스 방향으로 asynchronous 패킷을 이용한 명령어 전달을 위해서는 이에 적합한 규약을 설정해야 한다. 그림 9는

실제로 사용한 asynchronous 명령 패킷의 구조를 나타낸다. 각 행은 quadlet, 즉, 4 바이트 단위로 이루어지며, 기본 패킷 구조는 IEEE 1394 asynchronous 패킷 구조를 따른다. 명령어는 command(4 byte)의 자리에 위치하고, 명령어에 따른 n개의 인자(argument)들이 바로 연결된다. n번째 인자가 끝나면 바로 인자들의 CRC 값이 위치하게 되고, 패킷을 수신하는 컨트롤러에서는 인자들의 CRC 체크가 가능토록 구현하였다. 명령 전송 시에는 block write request만을 허용토록 구현하여, 패킷의 tcode 값을 항상 1로 설정해 주었다. 그림 10은 펌웨어에서 asynchronous 명령 패킷을 받았을 경우, 패킷이 처리되는 과정을 나타낸다. 각 노드 이름은 펌웨어의 함수명을 나타낸다. 패킷을 처음 받으면 인터럽트가 발생하여 최종적으로 S1394RequestRxHandle() 함수에서 명령을 분석, 처리한다. 또한 응답 패킷 및 확인 패킷을 주고 받는 과정이 구현되었다.

destination_ID	tl	rt	tcode	pri
source_ID	rcode	reserved		
reserved				
data_length	extended_tcode (0000h)			
header_CRC				
command				
argument_1				
...				
argument_n				
argument_CRC				
data_CRC				

그림 1394 명령 전송 패킷의 구조

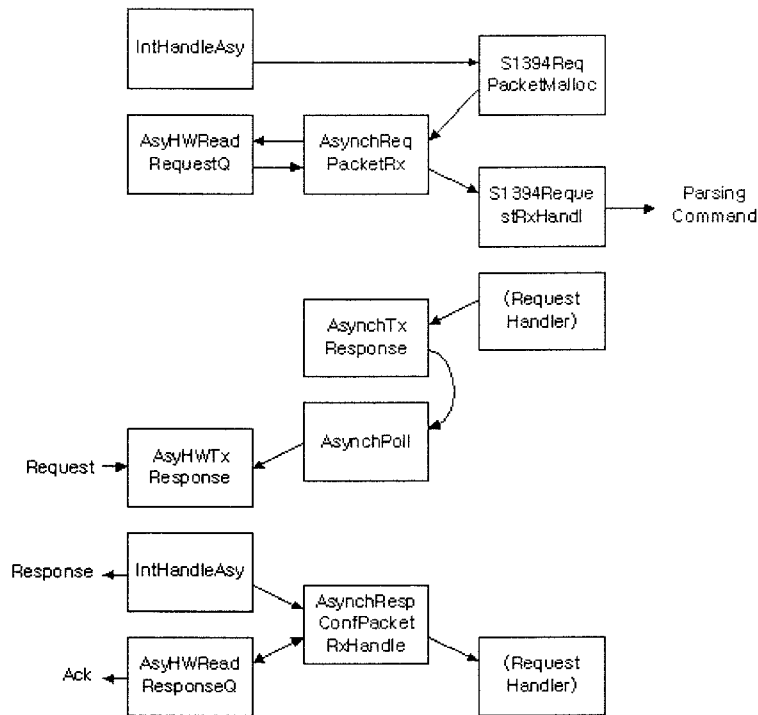


그림 1395 명령 패킷 송수신 흐름

3.1.2.3 디바이스 드라이버

호스트 컴퓨터에서 디바이스를 인식하고 제어하기 위한 디바이스 드라이버의 구현을 위해 WDM(Windows Driver Model) 모델을 이용하였다 [12, 13]. 디바이스 드라이버는 OS의 커널 모드에서 동작하고, 응용 프로그램은 사용자 모드에서 동작한다. 사용자가 작성한 응용 프로그램은 하드웨어를 직접 제어할 수 없기 때문에, IEEE 1394 통신을 하기 위해서는 반드시 디바이스 드라이버를 거쳐야 한다. 응용 프로그램과 디바이스 드라이버간의 통신은 IRP(I/O Request Packet) 패킷을 이용한다. 응용 프로그램에서 생성한 IRP는 OS의 I/O 매니저를 통해 상위 필터 드라이버, 펄스(function) 드라이버, 하위 필터 드라이버, 버스 드라이버를 차례로 거친다. 마지막으로 HAL(Hardware Abstraction Layer)을 거쳐 하드웨어로 전송된다. 실제 구현시 모든 기능은 펄스 드라이버에 구현하였다. 특히, IEEE 1394 통신을 위해서는 하위 드라이버에게 IRB 패킷을 생성하여 명령을 전달하도록 구현하였다.

IEEE 1394 통신을 위한 디바이스 드라이버의 경우, 읽기와 쓰기 명령을 이용하여 대부분의 통신을 수행할 수 있다. 하지만, 디바이스로 전달해야할 다양한 명령들의 처리를 위해서는 DeviceIoControl

의 추가 구현이 요구된다. 응용 프로그램에서 디바이스 드라이버를 제어할 때 사용할 수 있는 API 함수로는 크게 5가지를 생각할 수 있다. 드라이버 오픈을 위한 CreateFile, 드라이버 종료를 위한 CloseHandle, 읽기를 위한 ReadFile, 쓰기를 위한 WriteFile, 그리고 마지막으로 사용자 정의 명령을 처리하기 위한 DeviceIoControl 등이 있다. 즉, 5가지 API 함수는 응용 프로그램에서 쉽게 디바이스 드라이버를 접근할 수 있도록 도와주는 라이브러리의 구현에 이용된다. 그림 11은 디바이스 드라이버와 응용 프로그램간의 관계를 나타낸다.

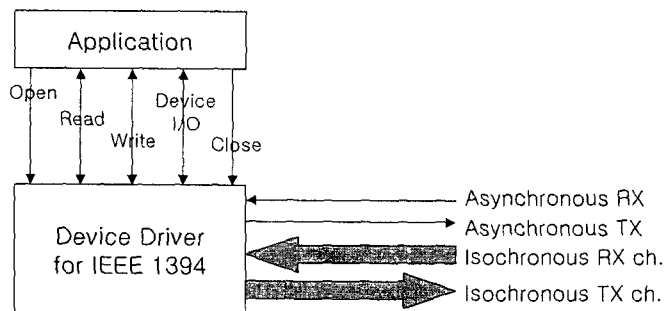


그림 1396 응용 프로그램과의 관계

3.2 얼굴 인식

3.2.1 얼굴 검출

개발된 정면얼굴(frontal face) 검출 방법은 coarse-to-fine 방법을 이용해 빠르게 실행된다. 얼굴 검출 방법의 전체 구성을 그림 12에 나타내었다. 입력 영상에 대해, Candidates Localization 모듈에서 얼굴 후보들의 위치를 찾는다. 이 때, 얼굴 후보들의 위치는 directional image를 이용한 타원의 위치 추정을 통해 얻어진다. Face Verification 모듈에서는 각 얼굴 후보들의 주변 영상을 검사하여 실제 얼굴이 있는지 검사하고, 검출된 얼굴에 대해 좌우 눈의 위치를 찾는다. 얼굴의 존재는 각 픽셀의 주변 영상에 대해 얼굴의 likelihood를 계산하여 임계값 이상이면 얼굴이 존재한다고 결정한다.

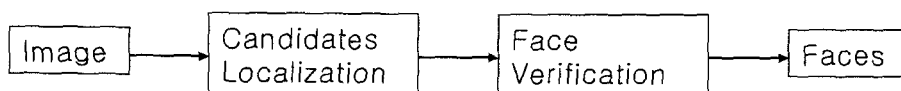


그림 1397 얼굴 검출의 구성도

3.2.1.1 Candidates Localization

본 연구에서는 Maio의 방법 [6]과 유사한 방법을 이용하여 얼굴 후보들의 위치를 빠르게 찾는다. 정

면 얼굴은 타원 형태의 모양을 갖는다. 이런 관찰을 이용해, 여러 가지 영상 스케일에 대해 이미지 피라미드를 만들고, 각각의 이미지 피라미드에서 타원의 위치를 찾는다. 타원의 위치 추정은 generalized HT [7]에 기반한 타원 검출 방법을 사용한다. 이 때 사용하는 타원의 에지 방향은 directional image의 방향 정보를 이용한다 [8]. Maio의 방법과의 차이점은 directional image의 크기(modulus)는 사용하지 않고 방향(direction) 정보만 이용한다, 그리고, non-maximum suppression을 이용해 여러 개의 local peak 위치를 찾아내 여러 개의 얼굴 후보 위치를 찾는다. 크기 정보를 사용할 경우에는, 얼굴보다 에지 크기가 큰 배경 성분들에 의해 얼굴을 잃어버리는 경우가 발생하기 때문에 바람직하지 않다.

Generalized HT를 이용한 타원의 위치를 찾기 위한 템플릿과 directional image의 예가 그림 13과 14에 보여진다.

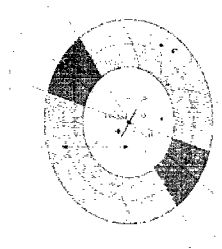


그림 1398 타원
템플릿

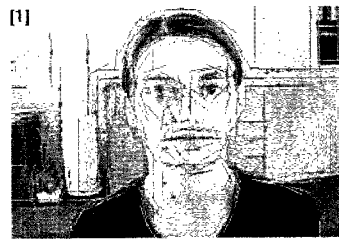


그림 1399 Directional
image

그림 15에는 이미지 피라미드별로 directional image와 얼굴후보 위치(사각형)들의 예가 보여진다. 실제 얼굴 위치를 포함해 몇몇 위치에 거짓 얼굴 위치들이 나타난다. 이것들에 대해서는 아래의 likelihood 방법으로 얼굴인지를 판별한다.

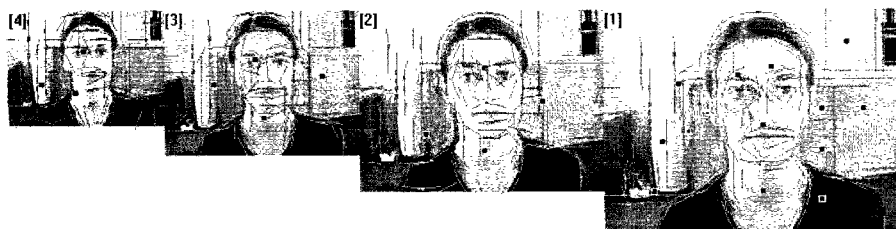


그림 1400 이미지 피라미드와 얼굴 후보들 위치

3.2.1.2 Face Verification

타원의 위치 찾기를 통해 얻어진 얼굴후보들은 다수의 false alarm을 가지고 있다. 실제 얼굴인지 판

별하기 위해 [9]에서 제안된 maximum likelihood 방법을 수정하여 사용하였다. 이것은 얼굴 영상들의 집합으로부터 얼굴들의 확률분포(probabilistic distribution)를 얻고, likelihood를 계산하여 얼굴인지 아닌지 판별하는 것이다. 얼굴들의 확률 분포를 얻기 위해 150개의 정면얼굴을 사용하였다. likelihood를 계산하기 위해 사용된 평균 얼굴(average face)과 얼굴 모델, 처음 5개의 eigenface가 그림 16에 보여진다. 사용한 face model의 크기는 35x39이다.



그림 1401 평균 얼굴과 처음 5개의 eigenface

얼굴 검증을 위한 자세한 알고리즘은 다음과 같다.

▣ face verification

- ① 각각의 얼굴 후보들의 주변 영상을 가져온다.
- ② 주변 영상을 스케일링하여 이미지 피라미드를 만든다.
- ③ 각 이미지 피라미드의 픽셀들에 대해 검색 윈도우를 움직인다.
- ④ 각 검색 윈도우의 히스토그램 평활화를 수행한다.
- ⑤ 검색 윈도우에 대해, 얼굴, 좌우 눈에 대한 maximum likelihood를 계산한다.
- ⑥ likelihood가 임계값 이상이고 최대인 검색 윈도우를 얼굴후보의 얼굴위치로 간주한다.

제안한 얼굴 검출 알고리즘은 320x240 영상에서 영상의 복잡도에 영향을 받으며, 초당 1~2번의 검출 속도를 갖는다. 타원 검출 템플릿의 중심타원 크기는 25x33으로 설정하였다. 1521개의 정면얼굴 영상을 가지고 있는 BioID database [10]에서 약 90%의 검출률을 나타낸다. false alarm rate를 줄이기 위해서는 non-face 영상들도 고려하는 신경회로망 등의 기법이 반영되어야 한다.

3.2.2 얼굴 인식

개발된 얼굴 인식 기법은 Principal Component Analysis(PCA)를 이용하여 영상의 차원을 줄인 후 입력영상과 데이터 베이스의 영상을 비교하여 가장 유사도가 큰 것을 찾는 방법이다. 유사도는 maximum likelihood 방법에 의해서 계산된다. 이를 위해서 실험실 환경에서의 사람 10명을 대상으로 데이터 베이스를 구축하고 테스트를 하였다.

3.2.2.1 PCA를 이용한 얼굴 표현

영상 그대로의 차원은 너무 높기 때문에 이를 그대로 처리하려면 많은 연산이 필요하고 효과적인 영상 비교를 할 수 없다. 따라서 영상의 특징(feature)를 효과적으로 뽑아낼 수 있다면 얼굴 영상의 특징을 비교하여 인식을 수행할 수 있을 것이다. 따라서 영상의 유사도를 비교하기 위해서 효과적인 특징을 추출하는 것이 중요하다. 이처럼 영상 기반 얼굴 인식에서 많이 쓰이는 방법이 PCA이다. PCA를 이용하여 영상의 차원을 줄이고 줄어든 특징값을 가지고 얼굴의 유사도를 계산할 수 있다[9].

크기가 N 인 영상 벡터를 x 라고 두면, 영상 벡터로부터 공분산 행렬 Σ 를 계산할 수 있다. 이 공분산 행렬의 고유벡터(eigenvector) 행렬과 고유값(eigenvalue) 벡터를 각각 Φ , λ 이라 한다.

얻어진 고유값을 큰 순서대로 정렬한 후 $N > M$ 을 만족하는 M 개의 고유값을 큰 순서대로 택하면 차원이 줄어든 선형 변환 행렬 Φ_M^T 를 얻을 수 있다. Φ_M 은 M 개의 고유값에 대한 고유 벡터들로 이루어진 행렬이다. 즉 $y = \Phi_M^T \bar{x}$ 과 같이 선형 변환을 하면 차원이 줄어든 벡터를 얻을 수 있다. 여기서 $\bar{x} = x - \bar{x}$ 로써 영상 x 을 평균으로 뺀 것이다. 이처럼 선형 변환 $y = T(x): R^N \rightarrow R^M$ 에 의해서 PCA가 수행된다.

이러한 변환을 KL 변환이라고 하는데 KL 변환을 할 경우 발생하는 오차는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\epsilon^2(x) = \sum_{i=M+1}^N y_i^2 = \|\bar{x}\|^2 - \sum_{i=1}^M y_i^2 \quad (1)$$

그림 17은 $M=30$ 일 때에 재구성된 영상의 예를 보여준다.

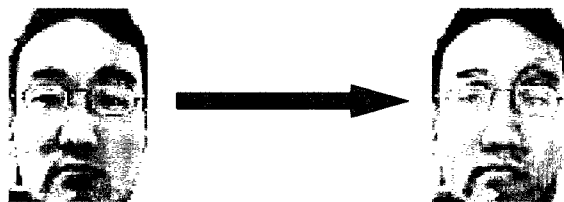


그림 1402 PCA를 이용한 영상 재구성

3.2.2.2 Maximum likelihood 방법을 이용한 얼굴 인식

영상 벡터 x 가 특정 클래스 Ω 에 속할 정도를 likelihood 함수로 나타낼 수 있다. 즉 식 (2)와 같이 다차원 가우시안 형태의 함수로 표현한다.

$$P(x|\Omega) = \frac{\exp[-\frac{1}{2}(x-\bar{x})^T\Sigma^{-1}(x-\bar{x})]}{(2\pi)^{N/2}|\Sigma|^{1/2}} \quad (2)$$

얼굴 인식을 위해서는 같은 사람의 얼굴에 대해서 영상의 차이 $\Delta = x_1 - x_2$ 를 구하고 이를 이용하여 공분산 행렬을 구성하여 PCA를 수행한다. 이렇게 하면 같은 사람의 얼굴 변화를 나타내는 클래스 Ω_i 에 대해서 영상 차이 Δ 를 보일 확률 $P(\Delta|\Omega_i)$ 를 구할 수 있다. 확률값이 클수록 두 영상이 같은 사람일 가능성이 크므로 입력 영상과 데이터 베이스의 영상을 비교하여 가장 적합한 사람을 인식할 수 있다. 인식을 위해서는 50x70 크기의 영상을 사용하였고 복잡한 배경과 조명이 특정 조건으로 조절되지 않은 일반적인 상황에서 인식을 수행하였다. 인식기의 입력으로 사용할 영상을 위해서 얼굴 검출 후 히스토그램 평활화를 수행하였다. 데이터 베이스는 10명의 사람으로 구성되어 있고, 한 사람 당 5장의 영상으로 구성되어 있다. 그림 18은 사용된 데이터 베이스의 예를 보여준다. 현재 입력 영상에서 검출된 얼굴도 데이터 베이스의 영상과 같은 규격으로 정규화 된 후 maximum likelihood 방법에 의해서 유사도가 결정된다. 구현된 인식기의 인식률은 82%이다.

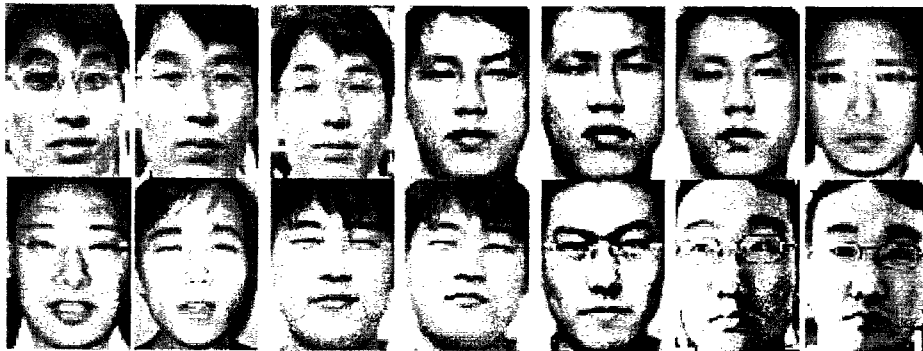


그림 1403 데이터 베이스의 예

얼굴의 크기 변화가 심하거나, 눈의 위치가 정해진 규격과 차이가 많을 경우 잘못 인식할 확률이 높고, 입의 벌어진 정도도 인식률에 영향을 미친다.

4. 참고문헌

- [1] E. Hjelmas, "Face Detection: A Survey," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 83, pp. 236-274, 2001.
- [2] <http://www.ovt.com/cc7620.html>

- [3] <http://www.atmel.com/atmel/acrobat/doc1142.pdf>
- [4] H. Rowley, S. Baluja, and T. Kanade, "Neural Network-Based Face Detection," *IEEE Trans. PAMI*, vol. 20, no. 1, pp. 23-38, 1998.
- [5] K.K. Sung and T. Poggio, "Example-Based Learning for View-Based Human Face Detection," *IEEE Trans. PAMI*, vol. 20, no. 1, pp. 39-51, 1998.
- [6] D. Maio and D. Maltoni, "Real-time face location on gray-scale static images," *Pattern Recognition*, vol. 33, pp. 1525-1539, 2000.
- [7] D.H. Ballard, "Generalizing the Hough Transform to detect arbitrary shapes," *Pattern Recognition*, vol. 3, pp. 110-122, 1981.
- [8] M.J. Donahue and S.I. Rokhlin, "On the Use of Level Curves in Image Analysis," *CVGIP: Image Understanding*, vol. 57, pp. 185-203, 1993.
- [9] B. Moghaddam and A. Pentland, "Probabilistic Visual Learning for object representation," *IEEE Trans. PAMI*, vol. 19, no. 7, pp. 696-710, 1997.
- [10] <http://www.bioid.com>
- [11] D. Anderson, *Firewire System Architecture*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1998.
- [12] W. Oney, *Programming the Microsoft Windows Driver Model*, Microsoft Press, 1999.
- [13] C. Cant, *Writing Windows WDM Device Drivers*, CMP Books, 1999.