

# 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 2 권)

연구기관

한국과학기술연구원

과 학 기 술 부

Proceedings

# 2001 Service Robot Workshop

서비스 로봇기술의 신뢰성  
Dependable Service Robot Technology

일시 : 2001년 11월 30일 ~ 12월 1일

장소 : 보광 휘닉스파크 에머랄드 강의실



과학기술부 국가 중점연구개발사업  
Critical Technology-21



서비스로봇 기술개발 사업단  
Service Robot Technology Development Group

# 목 차

## Invited Talk

Toward autonomous mobile robots working in daily life environment Prof. Shin'ichi Yuta (Tsukuba Univ.).....	1
--	---

## Session 1 : 공공 서비스용 로봇

제1과제 소개 김문상 (한국과학기술연구원).....	27
공공서비스용 도우미로봇 PSR-1의 개발 정우진 (한국과학기술연구원).....	32
이동형 정보서비스 로봇 개발 김문상 (한국과학기술연구원).....	59
형상 적응형 Universal Hand 개발 황요하 (한국과학기술연구원).....	73

## Session 2 : 재활 / 복지용 서비스 로봇

Humanoid robot for research of Computational Neuroscience Prof. Shin Ya Kotosaka (Saitama Univ.).....	83
제2과제 소개. 변증남 (한국과학기술원).....	84
지능형 비주얼 써보잉과 근전도 신호 인식 기술을 이용한 재활로봇의 제어기술 변증남 (한국과학기술원).....	92

A Hand-Held Master with a Shared Control for Tele-operation 이석한 (삼성종합기술원).....	145
Implementation of Predefined Tasks for the Disabled By Using the Target-Orient-Designed Soft Robotic Arm 장평훈 (한국과학기술원).....	160
재활로봇을 위한 지능형 인간 로봇상호작용기술 권동수 (한국과학기술원).....	178
척수장애인의 HCI를 위한 시선방향 추적 시스템 정명진 (한국과학기술원).....	208
 <b>Session 3 : 토목건설용 서비스 로봇</b>	
수직철골 용접로봇 시스템의 개발 이호길 (한국생산기술연구원).....	229
Development of Tracking Algorithms for Robotic H-Beam Welding System At Construction Site 문승길 (세종대학교).....	247
 2002서비스로봇 SIG (Special Interest Group)워크숍 .....	251
-뇌신경정보학 사업단 연석-	

Invited Talk

“Toward autonomous mobile  
robots working in daily life  
environment”

Prof. Shin'ichi Yuta

여 백

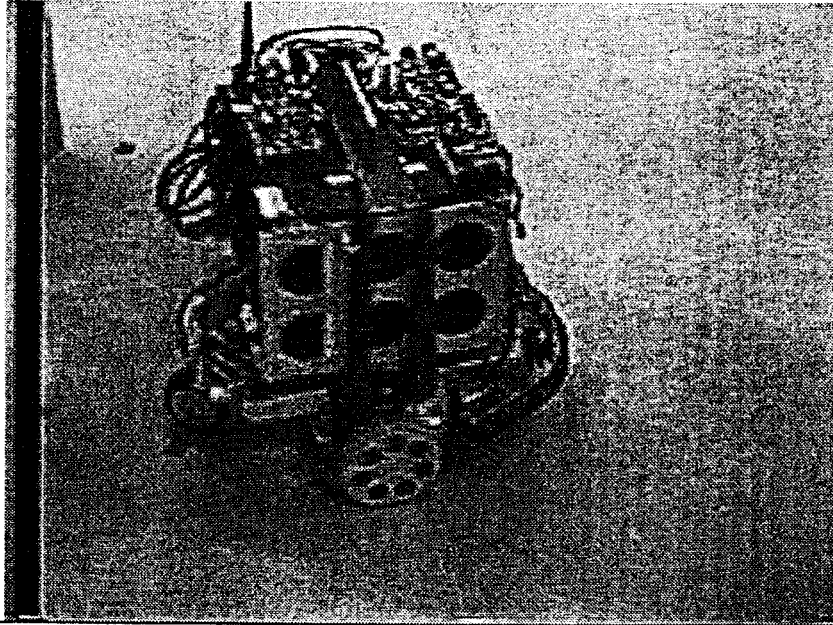
Towards Autonomous Robots  
Working in Daily Life  
Environment

Shin'ichi Yuta

Intelligent Robot Laboratory  
University of Tsukuba, JAPAN

An Example of  
Autonomous Mobile Robot  
- Navigation in Real World -

## Autonomous navigation in the laboratory



## Working Field for Autonomous Robot

- in building
  - office, shop, home
- in town
  - street, station
- in natural environment
  - field, forest



## Robotics Research

- Virtual Service ( in laboratory )



- Real Service ( in real world )

- real mission
- real environment
- real operating condition
- reasonable cost

## Real World

- Environment Under Physical and

Social Constraints

- Dynamic

- Changing Environment
  - Unexpected / Unscheduled

- Unstructured

- Uncertain

- Difficulty on Modeling



## Real World Task

- Mission/Task Under Physical and Social Constraints
- Limited Sensor and Perception
- Dynamical Characteristics
- Social Acceptance



## Expected Works for Autonomous Robots

- at place where human can not be
- replace of current human work
- new service for comfortable life

Autonomous robot needs mobility

## Size of Working Space

- Manipulator:  
almost same size with robot
- Mobile Robot:  
much wider than robot size

## Huge Size of Working Space



### Difficulty on Realizing Real Useful Robots

- various and complex environment
- difficult to keep tidy and clean
- difficult to have accurate model
- dynamically changing
- shortage of sensing power




difficult to know  
environment



## Key Issues for Real World Robotics


- Understanding Environment
- Understand Mission/Task
  
- System Integration
  - of Many Capabilities
  - Architecture for



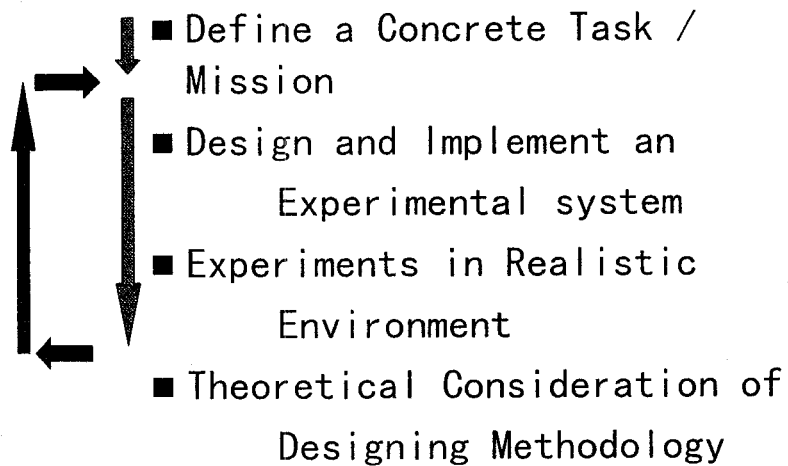
## Possible Research Procedure for Real World Problem

- Step-by-step Understanding of
  - Task
  - Environment
- Step-by-step Integration

= **Incremental Development**



## Proposal of Research Procedure for Real World Problem

- 
- Define a Concrete Task / Mission
  - Design and Implement an Experimental system
  - Experiments in Realistic Environment
  - Theoretical Consideration of Designing Methodology



### Basic Approaching Method:

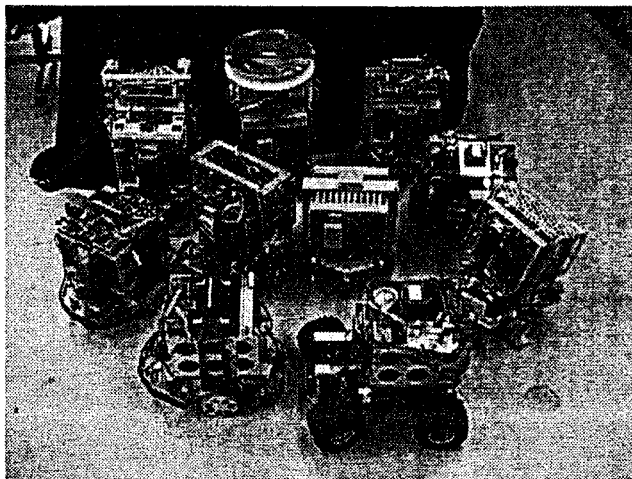
- Task / Mission Oriented Approach
  - vs. General Methodology
- Experiment-based Approach
  - to Understand Real World Problem

## Task-Oriented / Experimental Approach

- As a Scientific Research
  - vs. application oriented
- Needs Robot Platforms as Experimental Tools

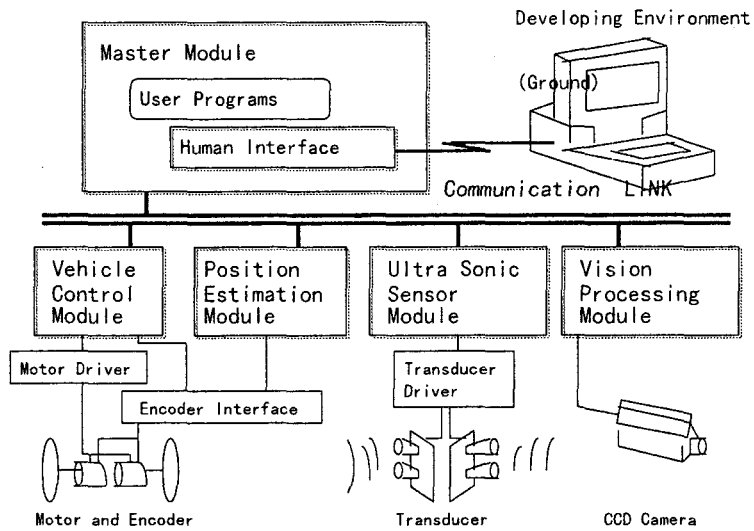
### “YAMABICO”

Autonomous Mobile Robot Platforms  
for Experimental Research

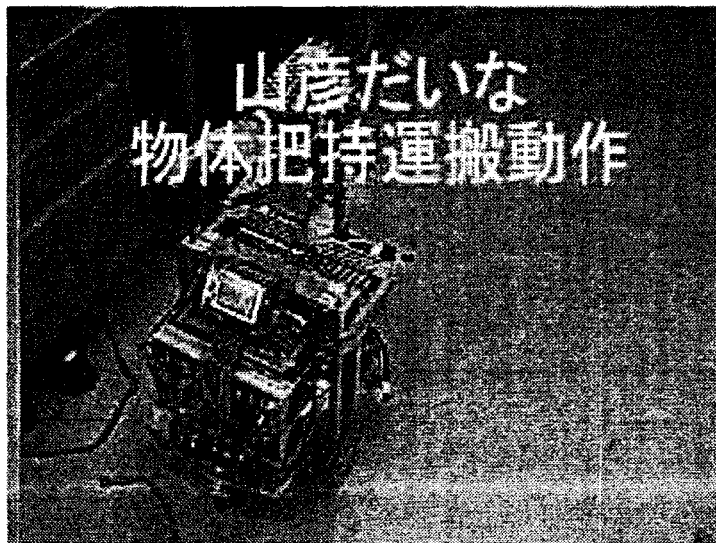


Yamabico  
Family  
at Univ. of  
Tsukuba

Architecture of Controller on YAMABICO Robot (std. set)




Example of Yamabico Robot:  
-- Mobile Manipulator Yamabico Dyna





## Navigation in Real Environment

- Move to Given Destination
- Basic Function for Autonomous Robot



## Strategy for Robust Autonomous Navigation

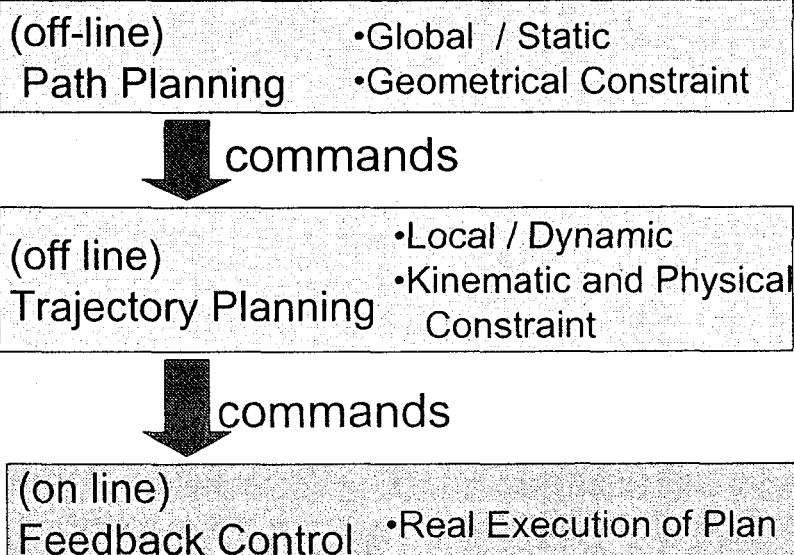
- Position Based Planning / Control
- Collaborative Use of Sensor and Pre-given (Map) Information
  - environment understanding
  - Position estimation
- Integration of:
  - Sensor Based Control
  - Map (Knowledge) Based Planning / Control



## Strategy for Navigation (cont.)

- Divide into:
  - Off-line Planning Stage
  - On-line & Real Time Control Stage
- For Nonlinear Problem:
  - Off-line Treatment at Planning Stage
  - Locally Linear Control at Real Time

## Strategy for Navigation (cont.)





## Strategy for Navigation (cont.)

### Commands

- Interface between Different Layers in Control
  
- Design of Command System



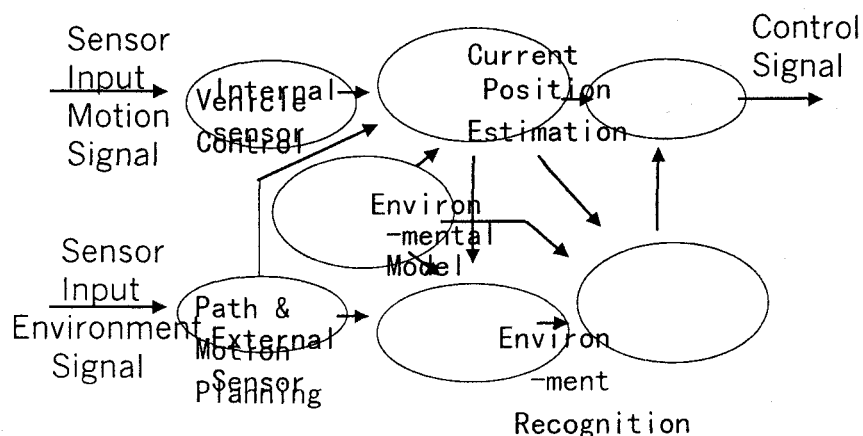
## Strategy for Navigation (cont.)

- Not Consider Much on
  - Learning
  - Behavior Based Approach
  - Emergent Methodology
  - Non-linear Control

## Position Estimation

- Estimate Robot Position and its Covariance (Uncertainty) in Real Time
- Continuous Use Internal Sensor (Dead Reckoning)
- Discrete and Asynchronous External Sensor Information
- Fuse Both Sensor Data by MLE (Extended Kalman Filtering)

## Architecture for Navigation





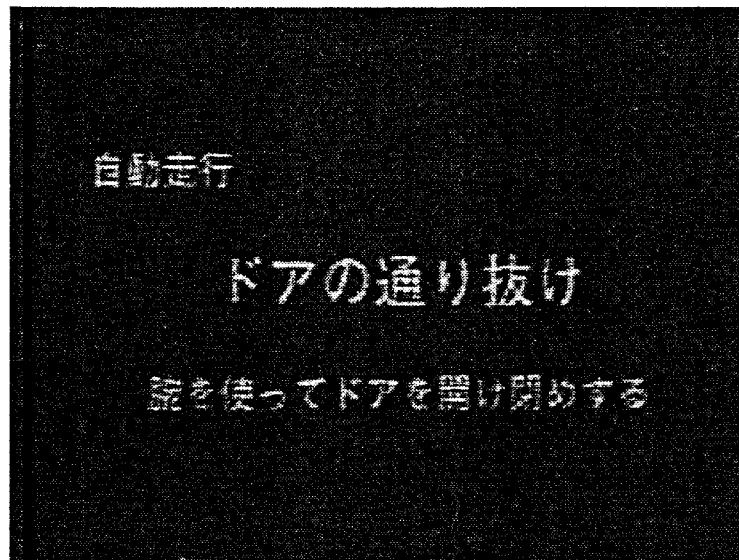
## Examples of Recent Yamabico Robot Experiments



### Mobile Manipulator

- Navigation with Opening Door and Passing Through
- System Integration

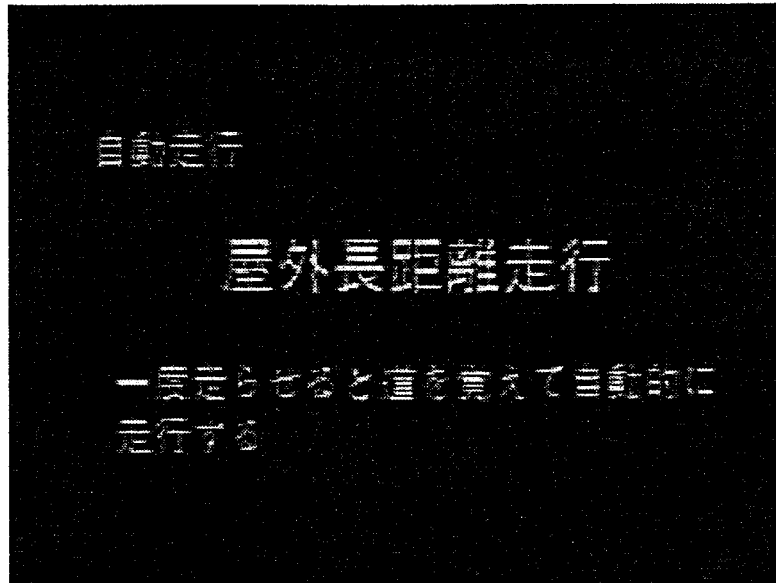
## Navigation Including Door Opening and Pass Through



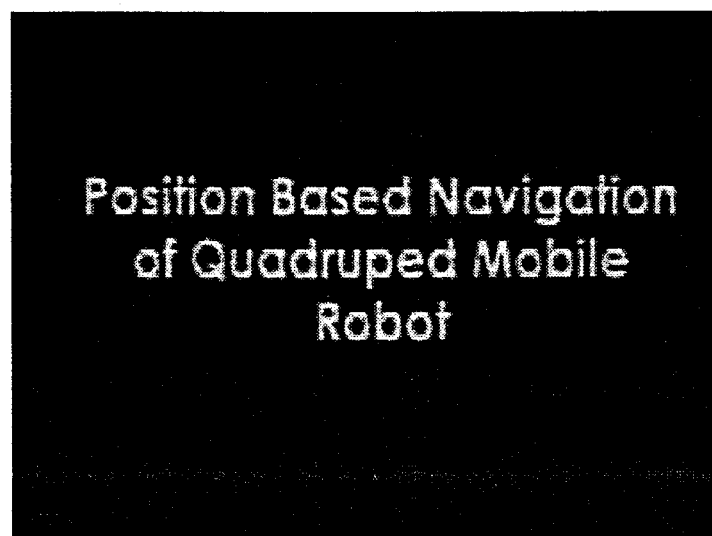
## Outdoor Long Distance Navigation by Teaching / Playback Scheme


- Teaching -- Joystick Control by Operator
- Make a Map of the Land Marks by Robot
- Use Street Trees and Hedges as Land Marks
- Play-back Autonomous Navigation

## Outdoor Navigation by Teaching/Playback Scheme



## Position Based Navigation of Four Legged Robot





## Inverse-Pendulum Control of Mono-Wheel Vehicle

- Novel Mechanism of Wheeled Vehicle
- Navigation While Keeping Balance
- Body Softness by Control

## Inverse-Pendulum Control of Mono-Wheel Vehicle

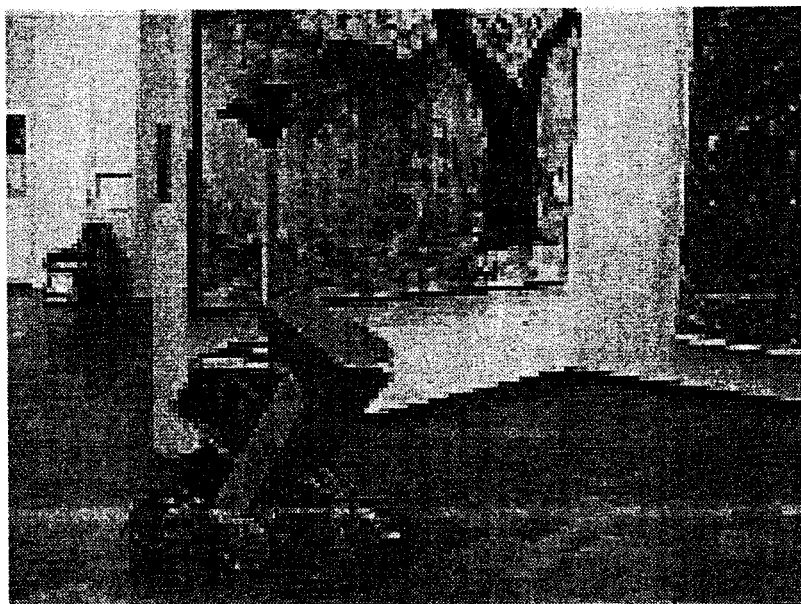


Line following  
by a novel unicycle

University of Tsukuba  
Intelligent Robot Lab.

Museum Robot  
Controlled via Internet

Museum Robot Controlled via Internet





Mobile Robot Base which can Climb  
a Step

操舵輪ユニット  
振り上げ装置

## Current Research Subject (1)

at Intelligent Robot Lab. , Univ. of Tsukuba

- Task / Mission Oriented Integrated Autonomous Robot System
  - Autonomy for Daily Life World
  - Long-Distance Autonomous Navigation in Indoor and Outdoor Environment
  - Long-Term Living in Various Situation




## Current Research Subject (2)

- Development of Autonomous Robot System as a Platform for Experimental Research
  - Wheeled mobile robot with Standard Function
  - Mobile manipulator



## Current Research Subject (3)

- Element Technology for Autonomous and Mobile Robots
  - Controller Architecture for Autonomous Robot
  - Mechanism of Wheeled Mobile Robot
  - Vehicle Control
  - Sensor and Environment Recognition
  - Position Estimation
  - Cooperation and Coordination of Multiple Mobile robot
  - Mobile Manipulator
  - Human Interface for Mobile Robot



## Important Research Subjects for Autonomous Robots

- Realize a Task which Decrease the Entropy in the Environment
- Long Distance Navigation
  - Which copes with Various Environmental Situation
- Alive Long Term
  - Survive in Unstructured Environment
  - Continuous Learning



## Summary

- Difficulty of Realizing Autonomous Mobile Robot
- Methodology for Research on Intelligent Machine which Works in Real World
- Introduction of Yamabico Robot
- Strategy for Robust Navigation
- Research Examples – Demonstrations

여 백

## Session 1

# 공공 서비스용 로봇

여 백

## 이동 기능을 갖는 로봇 조작 기술 개발

2001/8/14

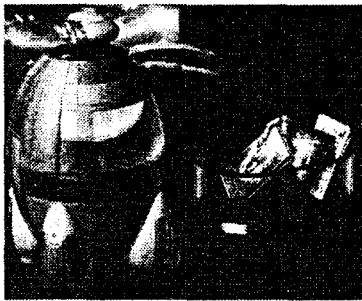
김 문상/이 충동

주관기관 : 한국 과학 기술 연구원

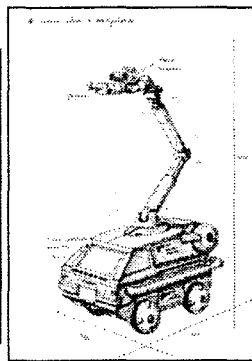
공동연구기관 : 현대 중공업

참여기업 : 현대중공업, 유진로보틱스, 현대자동차

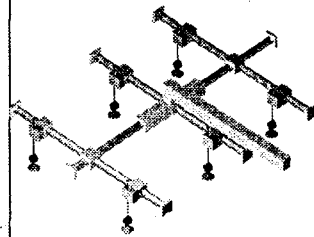
## 3차년도 과제 구성



빌딩용 도우미 로봇의 개발 (3/5)  
(공동연구기관/현대 중공업)



이동형 정보 service  
로봇의 개발(1/3)  
(참여기업 유진로보틱스)

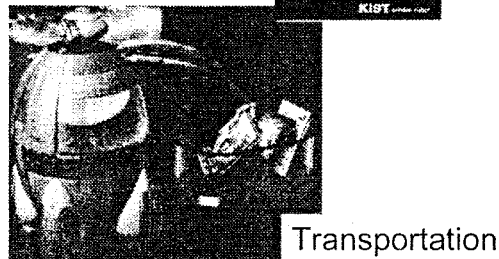
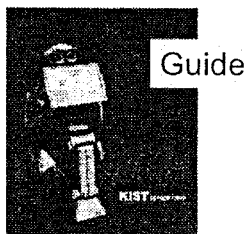
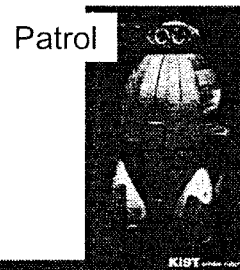
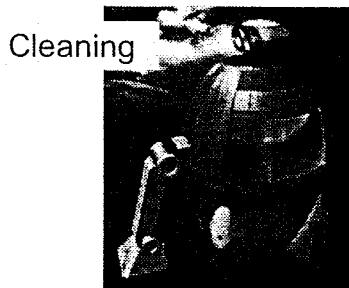


형상 적응형  
UNIVERSAL 핸드  
개발 (1/2)  
(참여기업 현대자동차)

## 핵심 기술들

- 경쟁력 있는 Mechanism
  - 실용적인 이동부 : 전방향 Mechanism, 문턱극복 Mechanism
  - 안정성이 확보된 로봇 팔과 조작성이 뛰어난 손 Mechanism : Passive compliance joint, dexterous hand mechanism with Force sensing
  - Tracking 성능이 뛰어난 Trailer design
- Navigation Technologies
  - Sensor Fusion에 의한 정확한 Localization 및 Path planning
    - Low cost Laser sensor 및 반응성이 뛰어난 IR sensor 개발
    - CMOS based IEEE 1394 통신 방식의 Stereo vision system 개발
    - 다양한 Navigation algorithm의 개발 : Stereo vision based navigation, 저가 sensing system을 이용한 Navigation, Laser 를 이용한
  - Human Robot Interface
    - Human feature tracking algorithm
    - Face detection and recognition
    - 음원 방향 및 음성 인식을 통한 communication

## 대형건물 내에서 사용되는 빌딩용 도우미 로봇의 개발







## 빌딩용 도우미 로봇의 연구개발의 최종목표

인간과 공존하는 빌딩내 환경에서 사용자의 요청에 따라  
물건을 원하는 곳으로 배달하는 로봇시스템을 개발.

- navigation의 효율화 및 mobile manipulation 을 효과적으로 수행하기 위한 omni-directional mobile base (최고속도0.5m/sec)및 손가락 힘감지 센서를 장착한 3손가락 인간형 로봇 손의 개발 (자중 2kg이하, 조작하중 1kg이상, 파지력 감지센서 장착). Manipulator (축별 각속도 60deg/sec이상, 조작하중 3kg 이상, 자중 40kg 이하)
- 인간이 공존하는 환경에서의 주위환경의 실시간 인식에 따른 dynamic navigation 기술 (인간과 같은 동적 장애물 감지 및 충돌회피 주행을 실현함으로써 인간의 주행상황에 근접한 자연적인 navigation 기술)
- stereo vision 기술을 이용한 문손잡이의 recognition과 로봇 manipulator를 이용한 문 여닫기 기능 구현.

## PSR 연구개발의 단계별 목표

### 3차년도

- 정적인 장애물 환경에서의 이동로봇의 자율적 실내주행
- hand 2차 버전 시제작
- 수요자 현장 조사 및 필요기능 분석

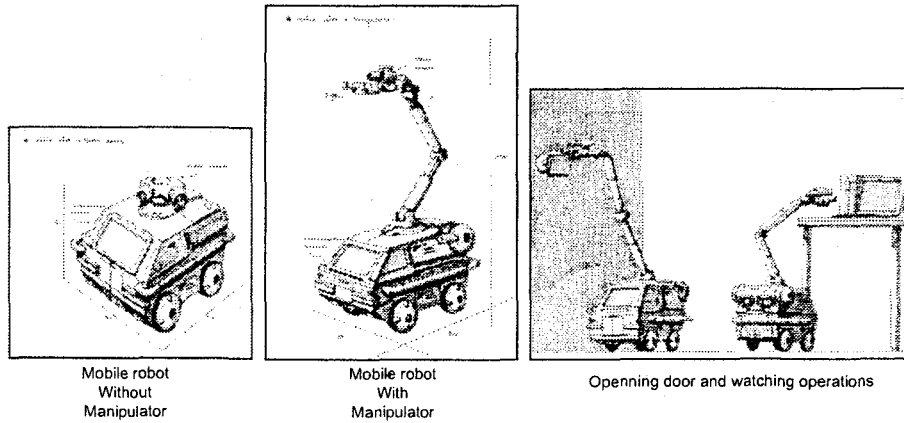
### 4차년도

- 개방형 도우미 로봇 제어구조 완성
- 이동중인 인간을 포함한 동적인 장애물 감지 및 회피주행 구현
- 이동 중 조작 기술 구현

### 5차년도

- 시스템의 신뢰성 및 안전성 확보
- 실제 대형건물 내에서의 주행/조작 기능 완성

## 이동형 정보서비스로봇 개발

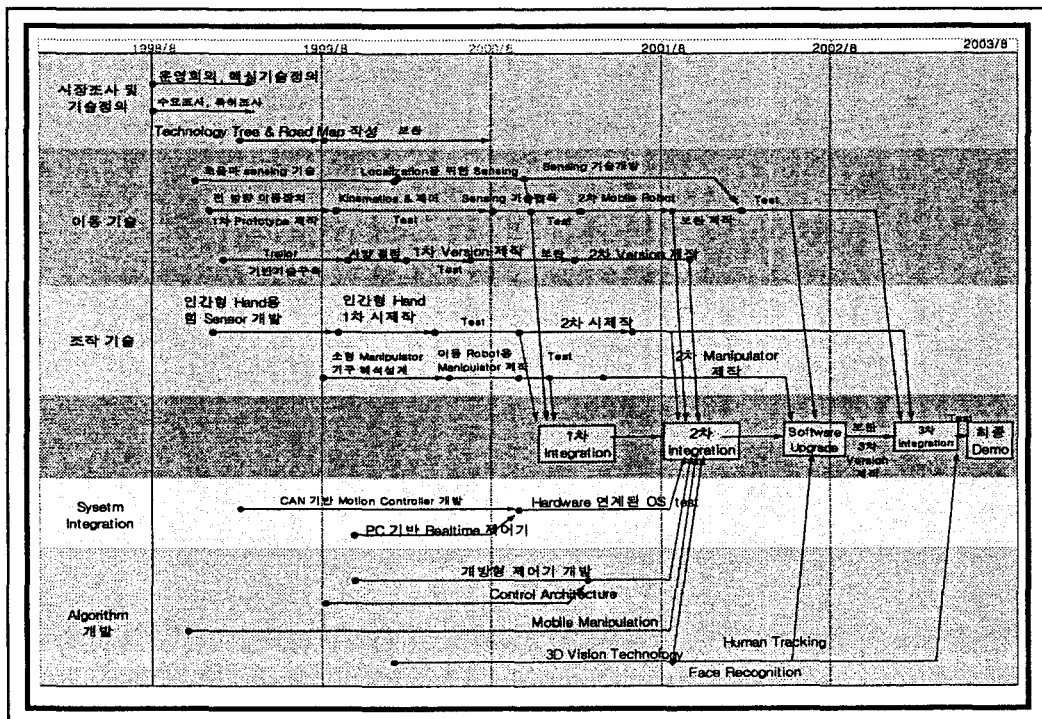


## 이동형 정보 서비스 로봇의 최종 개발 목표

- Hardware
  - 가정내에서 동작하는 Mobile robot
    - 소형 및 경량화
    - 문턱 극복 Wheel Mechanism 채용
  - CAN-based Modularity 지향
    - 모든 Motion module은 CAN-based networking 구현
  - 경량이면서 Compliance 기능을 갖는 Manipulator 개발
- Algorithm
  - 화상 인식 및 음성 인식에 의한 양방향 Communication 구현
    - 얼굴 및 음성 인식, 음성 응답
    - 비서 기능 (전화기, 리모콘, 화상메모 전달)
  - 비전 센서 기능에 의한 자동주행 능력 확보
    - Stereo Vision을 이용한 system
  - 학습 능력 확보
    - 얼굴 및 음성 인식 학습, 감정 모델 학습

## 2차년도(2001.9 ~ 2002.8) 개발 목표

- Hardware
  - Manipulator를 장착한 2차 시작품 제작
  - Stereo Camera의 개발 완성
  - Network based motion controller 장착
- Algorithm 개발
  - Navigation & Control
    - 자율적 주행기술 구현 및 system 적용
    - Internet-based 원격조정에 의한 집안 내 경비 Concept 제시
  - Intelligence
    - 얼굴 감지 및 인식 module의 적용
    - 음성인식에 의한 Task generation 구현
    - 인공지능에 의한 학습 기능의 구현 : 대상인물의 ID 학습, 경로 error 학습 등



# Development OF THE PUBLIC SERVICE ROBOT PSR-1

Woojin Chung, Donghee Lee, Changjoo Lee, Gunhee Kim, Hyungjin Lee,  
Kihwan Kim, Munsang Kim, Chongwon Lee

Advanced Robotics Research Center  
Korea Institute of Science and Technology  
Hawolgok-dong 39-1, Sungbuk-gu, Seoul 136-701, Korea  
wjchung@kistmail.kist.re.kr

## Abstract

*: It is shown how a holonomic and omni-directional mobile robot is developed towards indoor public services. Double offset orientable wheels with orthogonal velocity components are proposed. The proposed wheel provides precise positioning and reliable navigation performance as well as durability. Software structure is introduced. Finally, control experiment of the robot hand is presented.*

## 1. INTRODUCTION

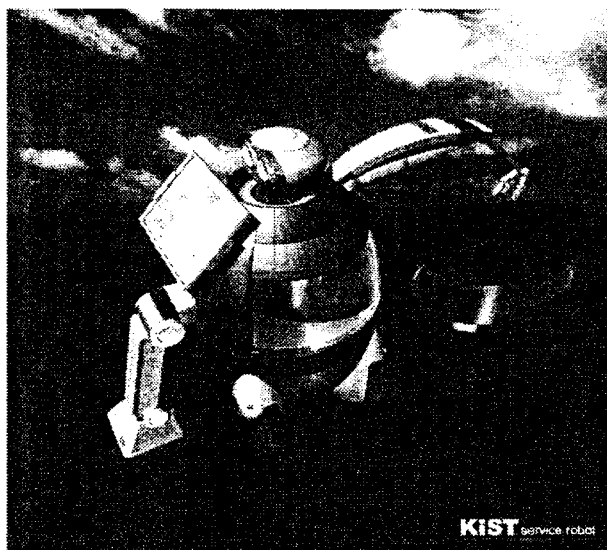


Fig. 1. KIST Indoor Public Service Robot

In recent years, there have been various trials to extend robotics technology to non-industrial applications, for

examples, surgery, rehabilitation, floor cleaning, building patrol and so forth. A variety of technological achievements have been accumulated owing to the fast development of personal computers, sensors, and information technologies. At the KIST (Korea Institute of Science and Technology), a new mobile robotic system is under development towards indoor public services, as shown in Fig. 1. Major components are a mobile robot, a manipulator, a hand and trailers. A key concept of the mechanism is a reconfigurability based on the modularity.

This paper mainly focuses on the development of the practical holonomic omnidirectional mobile robot. Among the many possible alternatives of the wheel mechanisms, the simplest one would be a differential steering nonholonomic mobile robot. In spite of the mechanical simplicity, control is difficult due to the nonholonomic mechanical constraint. A holonomic omnidirectional mobile platform provides control simplicity in various applications, such as autonomous navigation, mobile manipulation and trailer control. Easy development of control algorithm and the rich behaviour are major reasons why the holonomic omnidirectional mobile platform is desirable. Our target is limited to the indoor applications. The mobile robot will experience various kinds of floor conditions such as concrete, carpet, tile and so forth. Therefore, reliability and durability is significant.

So far, various kinds of omnidirectional wheel mechanism have been proposed. A typical approach is to use a universal wheel which is composed of a series of rollers along the rolling direction, for example, see (Muir and Neuman, 1987). Since using a universal wheel causes many problems such as vertical vibrations and inaccurate positioning due to the discontinuity of contact, there have been many challenges to solve the problems, for example, see (Pin and Killough, 1994). On the other

hand, omnidirectional movement also can be achieved by using a conventional wheel. Many of the AGV's wheel module possesses centered orientable wheels which provides nonholonomic and omnidirectional movement. On the contrary, off-centered orientable wheels (offset caster type) provide holonomic features, i.e, arbitrary translational and rotational motions are available without changing wheel configurations. Examples of such mechanism can be seen in (Hanebeck, *et al.*, 1999) and (Wada and Mori, 1996). Design issues of omnidirectional wheel mechanisms are well addressed in (Ferriere *et al.*, 1996) The rest part of this paper is organized as follows. Detailed illustration of the developed mobile robot will be given in section 2. A fabricated prototype and system configurations for the preliminary experiment will be introduced in section 3. Section 4 shows a result of the preliminary experiment. Finally, some concluding remarks and future works will be presented in section 5.

## 2. DESIGN OF THE KIST MOBILE ROBOT

Passive holonomic omni-directional mechanism, which was our motivation and the starting point, can be seen everywhere in real life. Fig.2 shows offset caster wheel that provides holonomic and omni-directional movement. The aim is to build an active wheel mechanism that is similar to the reliable and simple passive caster wheels.

The easiest way to build an active caster wheel would be to employ two motors, one for steering and the other for driving as shown in Fig. 3. A driving motor is attached to the steerable wheel module, and the input is transmitted through a set of spur gears. In order to achieve holonomic driving capability, a longitudinal offset is nonzero.

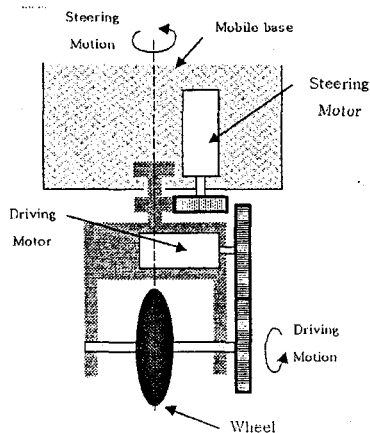


Fig 3. An active caster design (example A). (top : front view, bottom : side view)

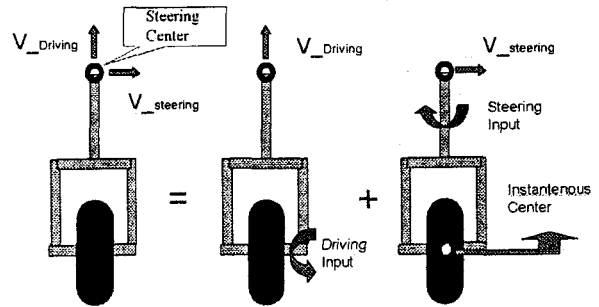


Fig. 4. Kinematic relations of an example A. Wheel offsets are seen from above.

Kinematic relationships between the inputs and the resultant velocities applied to the mobile base at the pivot point (*i.e.* steering center of the wheel module) can be easily understood by Fig. 4. In Fig. 4, resultant velocity at the steering center can be represented by the vector summation. It is clear that the two velocity components are orthogonal.

Although the mechanism is quite simple, there are several problems. Major drawbacks are as follows:

1. The joint range of steering is limited by the length of the cable that is connected to the motor.
2. A wheel becomes bulky due to the driving motor and large inertial torque is applied to the steering motor.

In this case, the robot motion should be carefully controlled because of the limited joint range of steering. In order to solve these problems, it is desirable to move the driving motor to the mobile base.

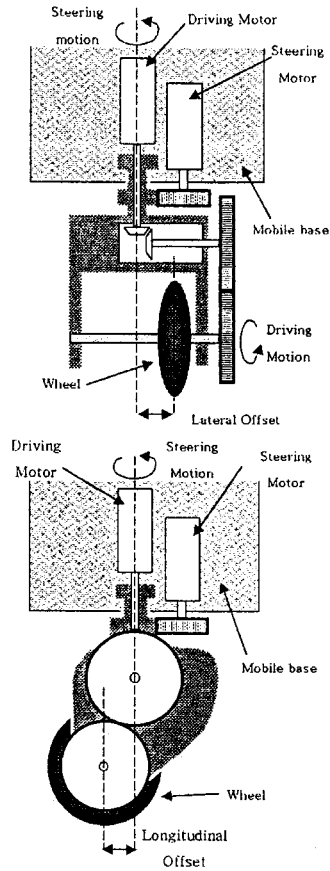


Fig. 5. An active caster design to move the driving motor to the robot base. (Zero lateral offset: example B. Nonzero lateral offset: example C)

An example of such design is presented in Fig.5. Angular velocity of driving is transmitted using the shaft which goes through the center of steering axis. Accordingly, the resultant angular velocity of the wheel  $\omega_d$  is obtained as a following equation.

$$\omega_d = k_g (\omega_{d\_motor} - \omega_s) \quad (1)$$

, where  $k_g$  implies gear reduction of driving,  $\omega_{d\_motor}$  is a driving motor input and  $\omega_s$  is a steering angular velocity. An equation (1) implies that the driving input  $\omega_{d\_motor}$  is coupled with the steering angular velocity  $\omega_s$ . Suppose that the lateral offset is equal to zero. Then, the kinematic relations can be represented as shown in Fig. 6.

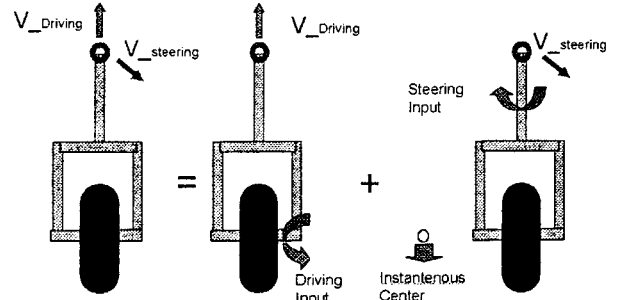


Fig. 6. Kinematic relations of the example B.

From Fig. 6, it can be seen that the two velocity components are not orthogonal any more. This fact implies kinematic ill-condition between the input space and the output velocity space. As the instantaneous center moves far away from the wheel position, both motors should make high speed rotation in order to achieve unit output velocity. Since it is not easy to increase maximum angular velocity of the motor, maximum speed of the mobile robot is decreased due to the velocity coupling between steering and driving inputs. The design issue is to decouple two velocity components, *i.e.* to make orthogonal resultant linear velocity of steering and driving by the appropriate design.

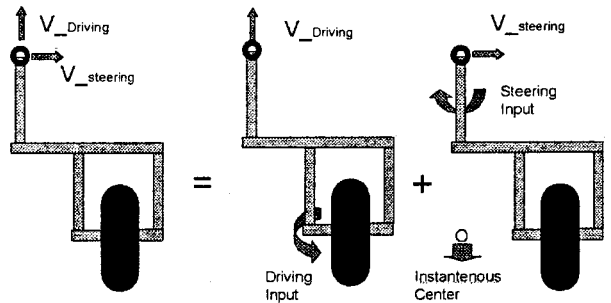


Fig. 7. Kinematic relations of the example C (Proposed design).

We propose a double offset orientable wheel mechanism as shown in Fig. 7. Mechanical structure is similar to the case of Fig. 5. Fig. 7 illustrates the kinematics of the steerable wheel with both longitudinal and lateral offsets. Suppose that the longitudinal offset and the lateral offset is represented by  $a$  and  $b$ , respectively.

Our purpose is to decouple two velocity components and the instantaneous center of rotation should be located at the point which can be seen in righthand of Fig. 7. In such a case, the angular velocity of the wheel is determined as

$\omega_d = -k_g \omega_s$ , from the equation (1). As a result, following equation can be obtained.

$$\begin{aligned}
 r\omega_d &= rk_g \omega_s = b\omega_s \\
 k_g &= b/r
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

, where  $b$  is a lateral offset and  $r$  is a radius of wheel. Notice that the two velocity components are orthogonal for the double offset wheel if the kinematic parameters satisfy the equation (2). This orthogonality implies well-conditioned kinematic model. With the limited maximum velocity of the motor, the double offset wheel mechanism can be driven faster than the other mechanisms. Kinematic model of the example A and C are exactly same. Using the double offset wheel mechanism, a mobile robot with two active orientable wheel is developed as shown in Fig. 8.

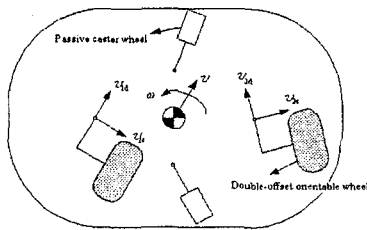


Fig. 8. A mobile robot with two double offset wheels.

There are two active wheels and two passive casters. Under the given translational and rotational velocities of the mobile robot, linear velocities at the pivot point which connects wheel and the mobile robot can be computed. Since we already have the single wheel kinematics, the kinematic model of the holonomic omni-directional robot in Fig. 8 can be derived easily. The minimum number of the wheel module is two. Additional active wheels can be added without any additional constraint.

### 3. PROTOTYPE

A prototype is fabricated as shown in Fig. 9. There are two active double offset wheels driven by brushless DC motors and two passive casters. Passive casters contain suspensions in order to assure stable contact with the ground. The maximum translational velocity is 1.5 m/sec. Control hardware includes onboard Pentium PC, customized signal interface boards and servo amplifiers. 18 ultrasonic sensors are equipped for detecting obstacles. Two ultrasonic sensor interface board are

employed and the required sampling time for scanning is less than 110msec.

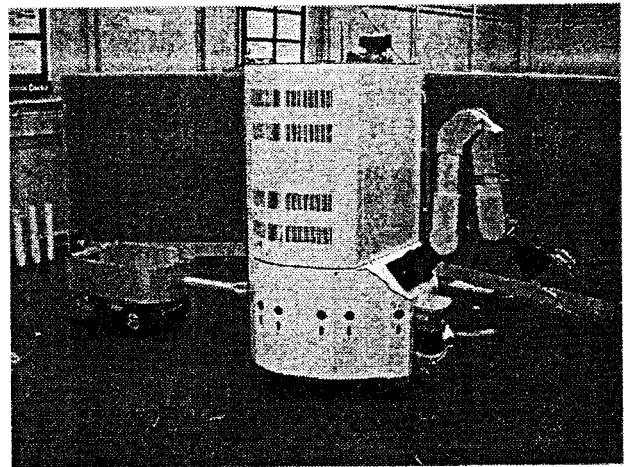
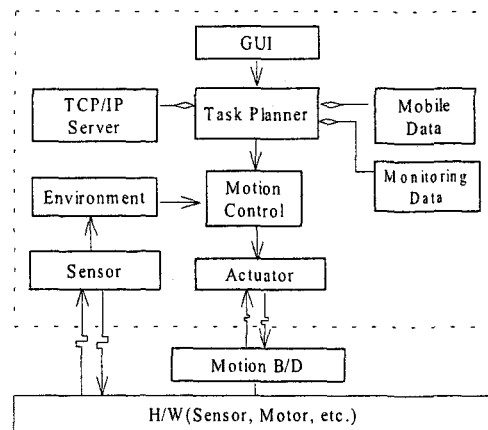


Fig 9. A prototype of the PSR-1

### 4. Software Structure of PSR-1



The S/W structure of the PSR-1 is designed based on the Behaviour based Robot Research Architecture.[Lindstrom et. Al] The control software for the service robot consists of "GUI", "Task Planner", "Sensor", "Environment", "Motion Control", and "Actuator". This software is closely interfaced with H/W such as various sensors, a DSP motion board, and actuators. We constructed the control architecture using Object-oriented approach to provide support for a simple integration of new components, a flexible modification and effective development of the system. The code is implemented by Visual C++ and running in MS-Windows 98, which is installed in the half-sized

Pentium3 CPU card with a PMAC DSP motion board embedding as a control hardware in the service robot.

The user commands received from the GUI or the remote controller are converted to a list of consecutive motion data by "Task Planner", and that list is transferred to "Motion Control". The information which "Environment" integrates from the multiple "Sensor" components is used for localization, map-building, and obstacle detection. "Motion Control" act as a tight coupling between "Sensor" and "Actuator". As soon as receiving the translational and rotational velocities from "Motion Control", "Actuator" transfer the direct actuator commands to the DSP Motion board by means of DPRAM handshaking. Because the system clock of MS-Windows has a great deal of variance, the clock of the DSP motion board is used instead to keep the control time interval of the S/W constant. The interval is set to 14ms.

The S/W architecture of our service robot consists of interface layer and reactive layer. The main objectives of the interface layer is to interpret and fulfill the commands from a operator through graphical user interface or network. "Mobile Control" component converts the commands to a list of consecutive motion data and transfers them to the reactive layer. In the reactive layer, "Motion control" component controls the robot behavior, which is closely related with "Sensor" components and "behavior" components. To develop the system effectively, the base framework of "Sensor" components is designed to be applicable to diverse types of the sensor. We use the PMAC DSP motion board to control the servo motors. "Actuator" component includes the API functions for the communication of the motion board. The system clock of the motion board is used for real-time performance and the data between the "Actuator" and the motion board is exchanged by DPRAM.

This S/W architecture is constructed using an object oriented approach and implemented by C++ language.

#### 5. Experiment of the robot hand

Stable grasping of an object is a major target application of the KIST service robot system. Target objects include door knob, handle, blocks and sometimes garbage. The robot hand should be able to maintain stable grasp under the disturbances.

In order to investigate grasping performances of the fabricated prototype, a preliminary experiment was carried out. The aim of the experiment is to maintain grasp under disturbances. In the experiment, disturbances correspond to arbitrary external forces applied by human to an object. The scope is limited to grasping an object using the fingertip.

In order to maintain contact between fingers and an object, a simple force controller was applied. Force controller implies the feedback controller to maintain constant contact forces.

Figure 10 illustrates contact configuration of one finger. It is assumed that there is only one contact point at the fingertip. A direction of the contact force is assumed to be orthogonal

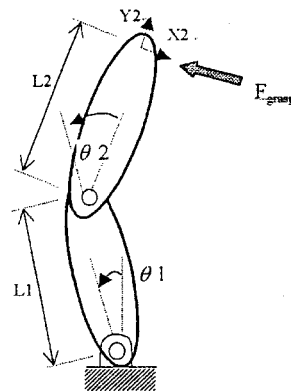


Figure 10 Fingertip grasping configuration.

with respect to the fingertip surface. Constraint equation of the joint angles can be approximated as a following equation:

$$\theta_2 = 2\theta_1 - 1.22$$

Then, the force controller can be simply written as a following equation:

$$\frac{dX_2}{dt} = k(F_{desired} - F_{estimated})$$

Above equation implies that the force controller is designed with respect to the second link frame. Therefore, controller output should be converted to the first joint angle and transformation equation can be written as a following equation:

$$\frac{d\theta_1}{dt} = -\cos(2\theta_1 - 1.22)(l_1 \cos \theta_1 + 2l_2 \cos(2\theta_1 - 1.22)) \frac{dX_2}{dt}$$



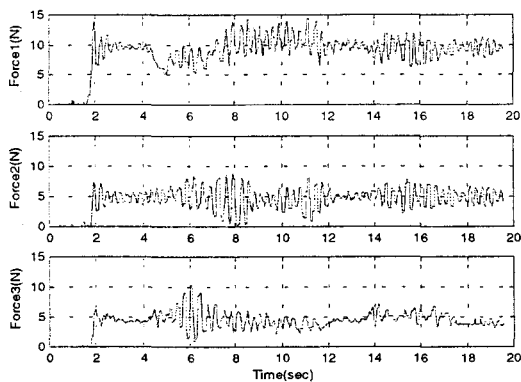


Figure 11 Estimated contact force.

The target object is a steel can which is cylindrical . Sampling time for the experiment is 19.9msec

Figure 11 shows resultant experimental contact forces. For the finger 1 (thumb), desired contact force was set to be 10N. For the finger 2 and finger 3, desired force was 5N. Fingers start to make contact from  $t = 2$  seconds. It is clear that the contact forces are precisely controlled to the desired forces. Figure 9 shows experimental joint angles of the finger joints. If the applied external forces are changed, the finger configuration move to new stable finger positions in order to maintain desired contact forces. In figure 143 finger motion is plotted with respect to time. ( z axis corresponds to time. ) It can be seen that the finger moves to the new stable grasping configuration according to the applied external forces.

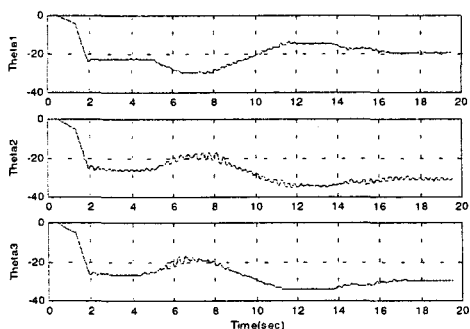


Figure 12 Experimental joint angles.

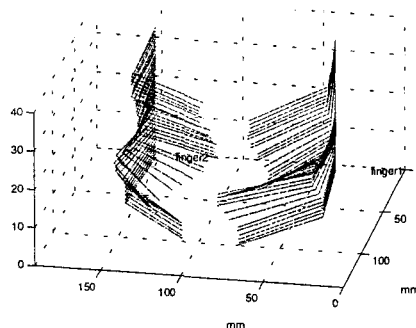


Figure 14 Experimental finger motions in  $R^2 X t$

## 6. CONCLUSION

Design issues of holonomic and omnidirectional mobile robot were presented. The double offset orientable wheel was proposed and it was shown that the proposed wheel mechanism has well conditioned kinematics. Prototype of the holonomic omnidirectional mobile robot was fabricated and introduced. A software structure of the PSR-1 is presented and implemented on the platform. Some experimental results of the previously developed robot hand is presented, and the result clearly shows the desired performance of the robot hand.

## REFERENCES

- Borenstein, J., Everett, H.R., Feng, L. (1996). *Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*, The University of Michigan, USA
- Ferriere, L., Raucant, B. and Campion, G. (1996). Design of omnimobile robot wheels. *Proc. of the 1996 IEEE International conference on robotics and automation*, pp. 3664~3670.
- Hanebeck, Uwe D., Saldic, Nihad and Schmidt, Gunther (1999). A Modular Wheel System for Mobile Robot Applications. *Proc. of the IROS'99*, pp. 17~22.
- Muir, P.F. and Neuman, Ch. P. (1987), Kinematic modeling of Wheeled Mobile Robots, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 4., pp. 281~340.
- Wada, Masayoshi and Mori, Shunji (1996). Holonomic and Omni-directional Vehicle with Conventional Tires. *Proc. of the 1996 IEEE International conference on robotics and automation*, pp. 3671~3676.
- Mattis Lindstrom, et al., BERRA: A Research Architecture for Service Robots, Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.3278~3283, USA, 2000

# 공공서비스용 도우미 로봇 PSR-1의 개발

정우진

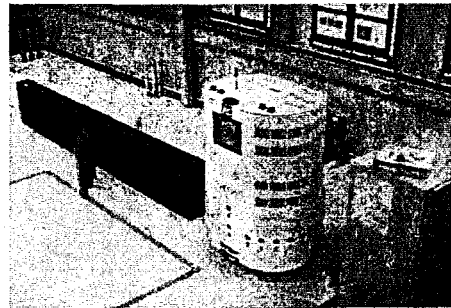
한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

## KIST Service Robot towards Indoor Public services



목적에 따라 시스템을 간단히 재구성 가능.

: Manipulator, Hand, Mobile Robot, Trailer 등으로 구성됨.



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

## Public Service Robot PSR-1

Mobile robot

KIST Korea Institute of Science and Technology Advanced Robotics Research Center

## Development of a Service Robot Technology

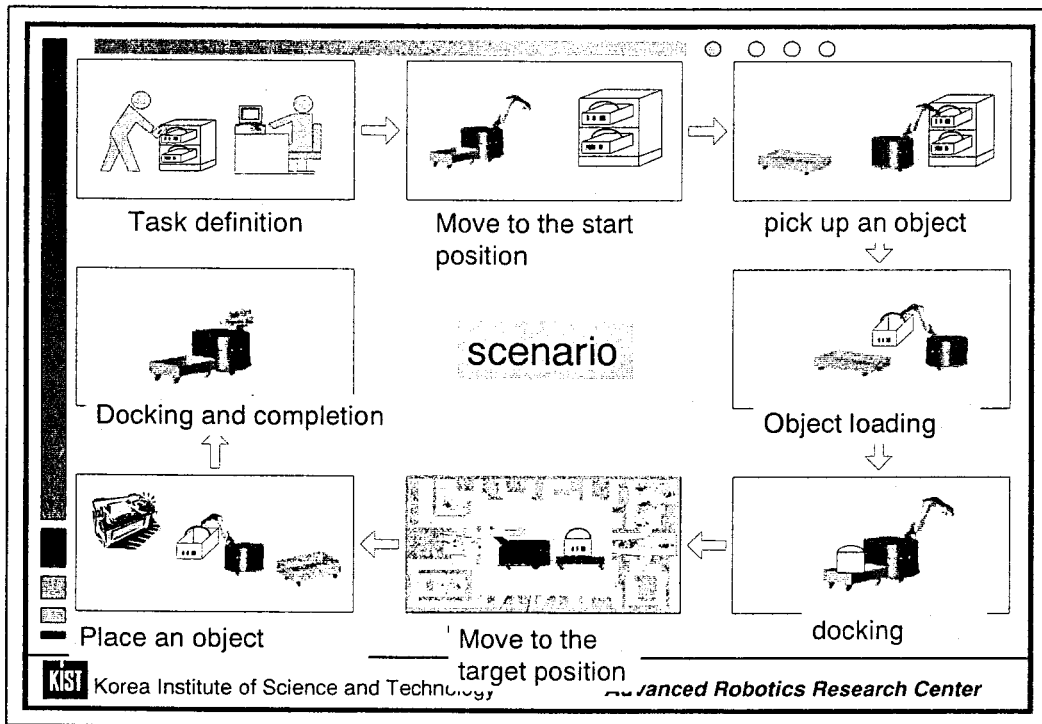
Cleaning

Patrol

Guide

Transportation

KIST Korea Institute of Science and Technology Advanced Robotics Research Center



## Service Robot Technology

**이동기술**

<b>Map Building</b>	Information / Grid / Topological Map, Local update
<b>Localization</b>	Monte Carlo Localization, landmark detection
<b>Path Planning</b>	Wall following, Gradient Method
<b>Sensing / detection</b>	Environment sensing, obstacle sensing
<b>Actuation</b>	Kinematics, servo control, modeling, motion control

KIST Korea Institute of Science and Technology Advanced Robotics Research Center

## PSR-1의 3가지 환경 map 구조

- **information map** : user interface를 위해

건물 내의 공간에 대한 실제 환경 정보를 포함한 지도.

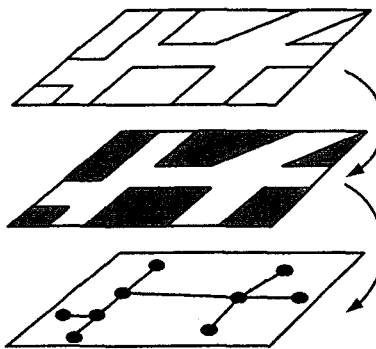
- **grid map** : 공간을 등간격의 격자로

나누어서, 각 격자에 물체가 존재할 확률을 부여. 정보지도를 시간에 따라 갱신함으로써 얻음.

- **topological map** : 주변환경 내의

특징(feature) 간의 관계만을 노드와 그래프를 이용하여 표현. 주어진

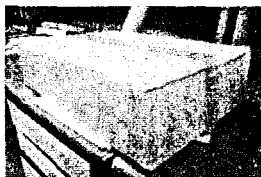
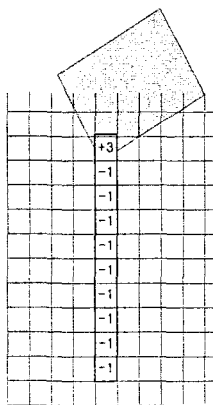
작업계획에 따른 대역적 경로계획을 수행.



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

## 격자 지도 (Histogram Grid)



- 확실성 격자(Certainty grid) 기법에 근거.
- 각 격자는 certainty value(CV)를 가지고 있어 그 위치에 장애물의 존재 여부에 대한 확신 나타냄.
- 레이저 스캐너로부터 물체까지의 모든 격자에 대해 CV를 가감함(증가분은 3, 감소분은 1).
- 최대 CV는 15이고, 최소 CV는 0.

Fig. 2 Certainty value for each grid.  
(Experimental result, scan 3 times)



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

## 토폴로지컬 지도

- 격자지도를 이용하여 토폴로지컬 지도를 작성하기 위한 중간 단계
- 보로노이 선도
  - 물체의 경계로부터 동일한 거리에 있는 점들의 자취.
  - 임의의 형상의 장애물들이 존재하는 공간 내에서는 복잡한 알고리즘과 이에 따른 많은 계산이 필요.
- 세선화
  - 도형의 연결성은 변화시키지 않고 선으로 변화시키기 때문에, 그 결과에서 도형의 결합 관계의 특징을 구할 수 있음.
  - 보로노이 선도의 장점을 가지고 있지만, 알고리즘은 더 단순함.
- 임계점을 통해 각 특징들간의 연결상태를 알 수 있음.



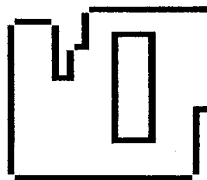
Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

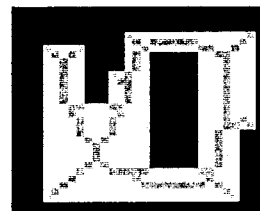
## Topological Map 작성



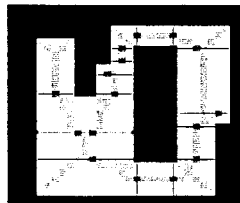
(a) Grid map(binary)



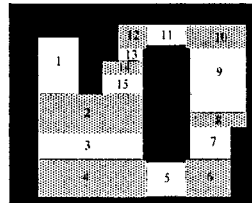
(b) Edge detection



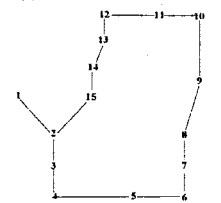
(c) Labeled Voronoi diagram



(d) Critical points and critical lines



(e) Topological region



(f) Topological graph

Procedures for constructing topological map (Simulation Results).



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

## 실험 결과

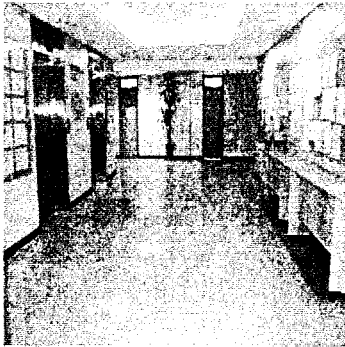


Fig. 3 Experimental environment.

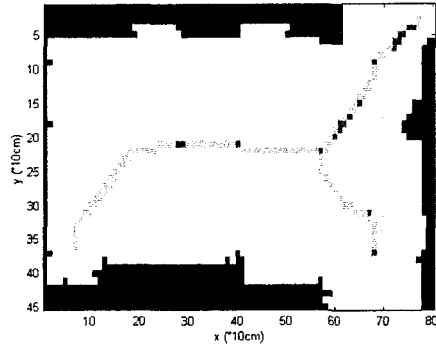
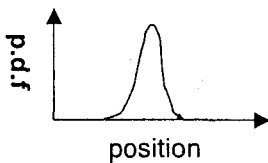


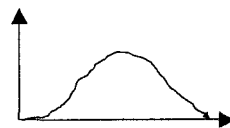
Fig. 4 Experimental results.

## Error propagation by dead-reckoning

Probability density function at the Initial position



Probability density function of robot action



Resultant Probability density function



$$f.p.d. \text{ position} + \text{p.d.f. of robot action} = \text{Resultant p.d.f.}$$

여기에서는 continuous function이 아닌 N개의 sampling point를 이용함.

## Motion model and localization

- Robot 운동 모델에 의한 위치추정오차의 증가
- **Error propagation of dead-reckoning**  
(robot의 **systematic calibration**을 수행한 후에 robot의 운동 모델을 실험적으로 구축한다.)
- 센서정보에 의한 **error**의 **shrinking**  
: 주로 **map matching**을 이용하여 로봇이 위치를 추정, **update**시킴.
- **Sensor**의 정확한 모델링이 중요.
- **MCL**은 **multi-modal**이므로 **global localization**이 가능.
- **asynchronous update**.



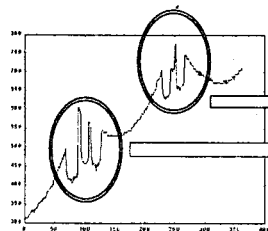
Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

## Artificial Landmark를 이용한 Localization

laser scanner와 landmark를 이용한 localization : 센서정보로부터 로봇의 위치를 실시간으로 update하여 로봇 위치오차를 감소

-> MCL을 구성하는 다양한 센서모델의 하나를 구축.



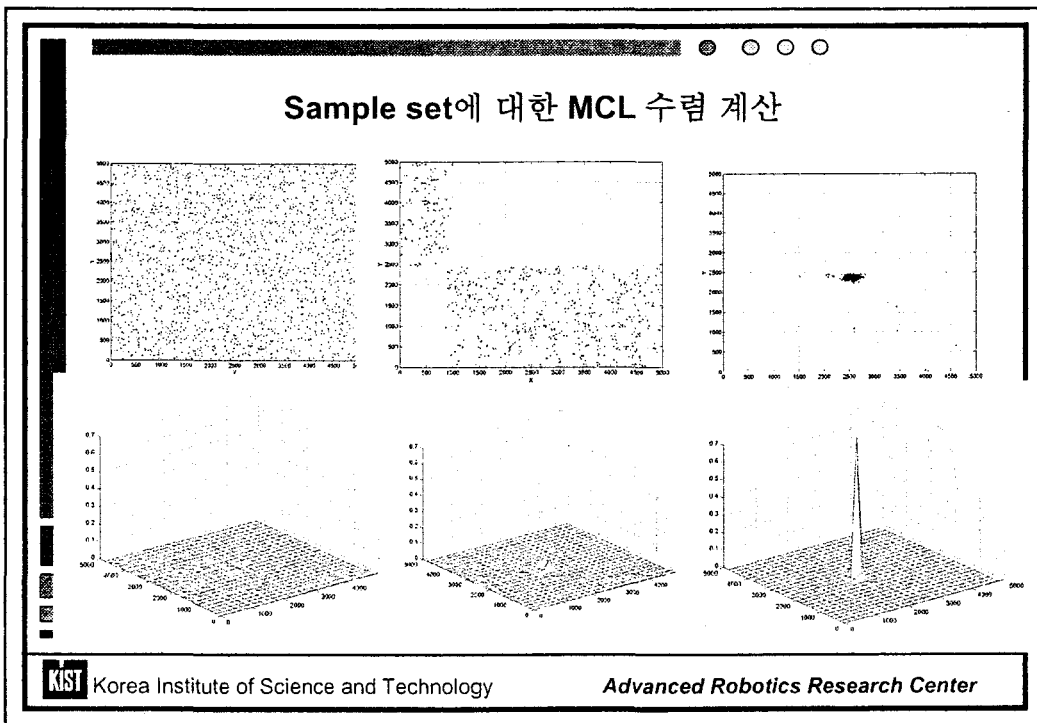
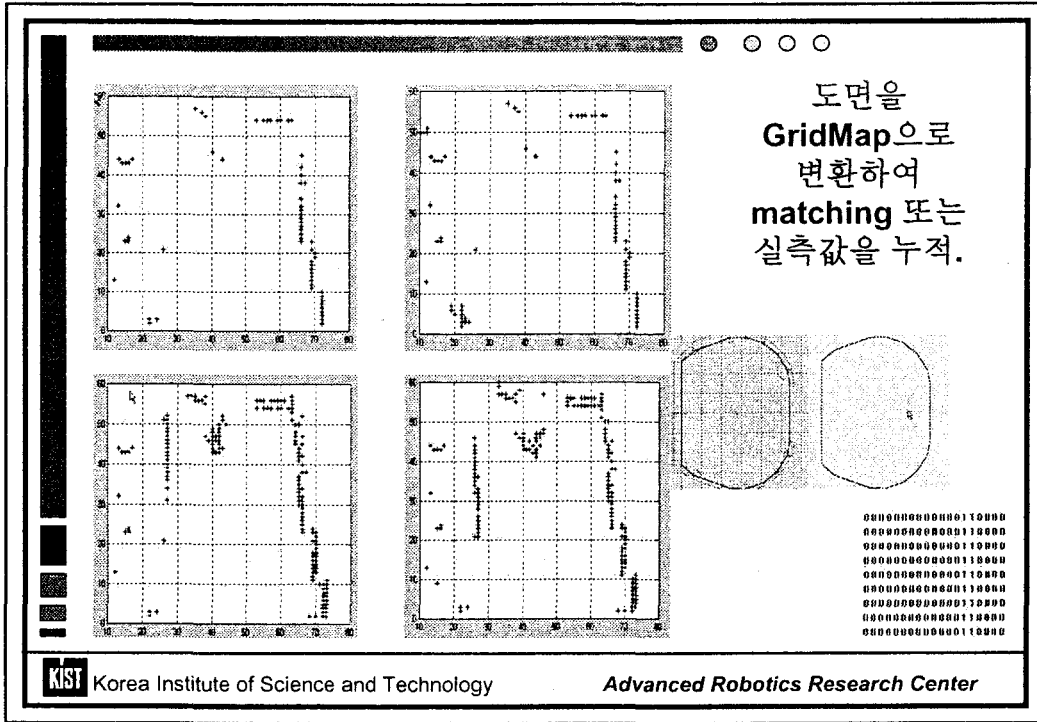
landmark



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center



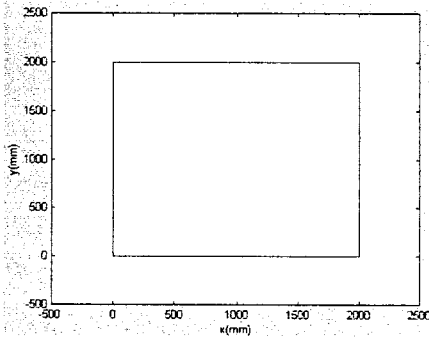


## Laser를 이용한 Localization 수행결과

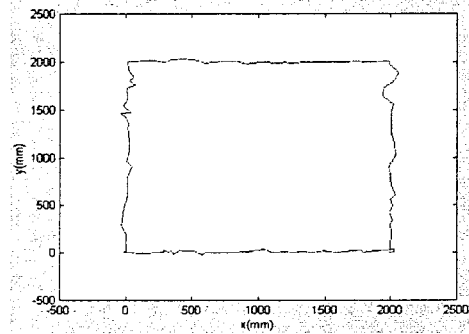
Odometry의 정보의 허용오차 : orientation=15(deg) distance=250mm

Localization 수행 정확도 : 최대 50mm의 오차

Reference trajectory



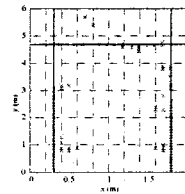
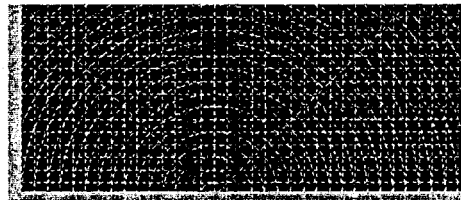
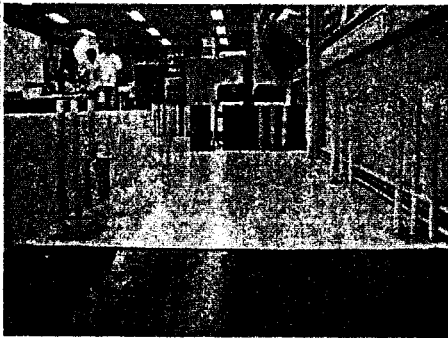
Estimated trajectory



**KIST** Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

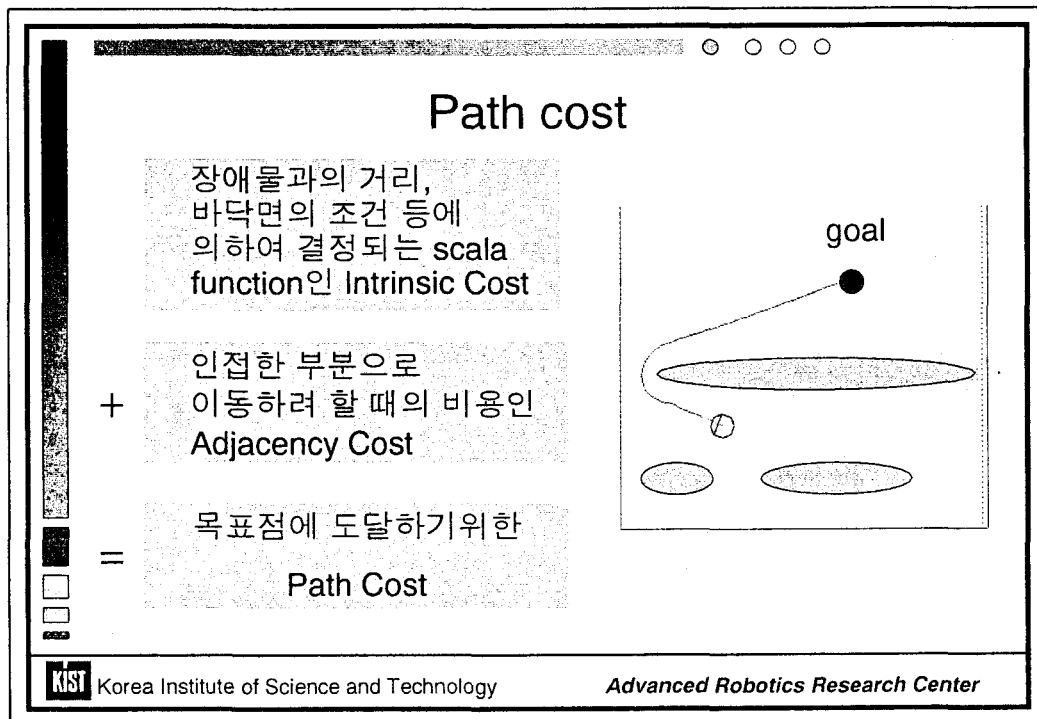
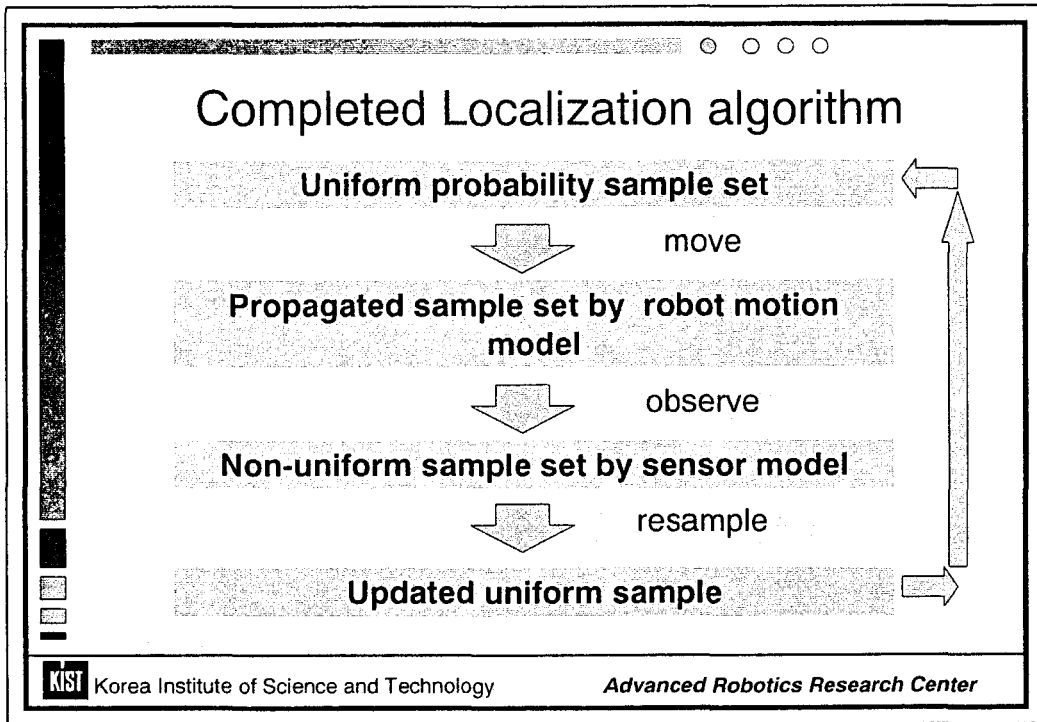
## Localization Using Hough Transform



복도나 벽 등의 기하학적 특징점을 추출하기 용이한 환경에서 Hough Transform을 이용하여 map matching을 통한 localization 수행.

**KIST** Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

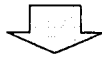


## Path cost에 의한 최적 경로 생성

주어진 환경에서의 Intrinsic Cost와 Adjacency cost를 설정



goal을 path cost 0으로 설정하고 주위의 path cost값을 순차적으로 계산. (단, 각 지점에서의 cost는 최소의 path cost값으로 설정.)



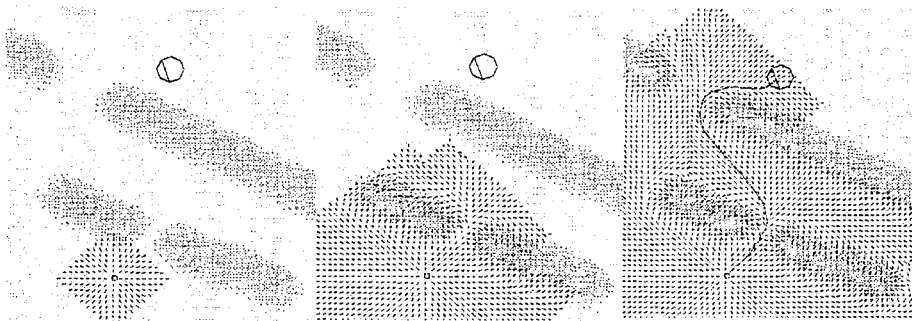
Path cost에 의한 global potential이 형성되면 로봇의 현재위치로부터 gradient방향으로 로봇의 경로 생성



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

## Wavefront Propagation

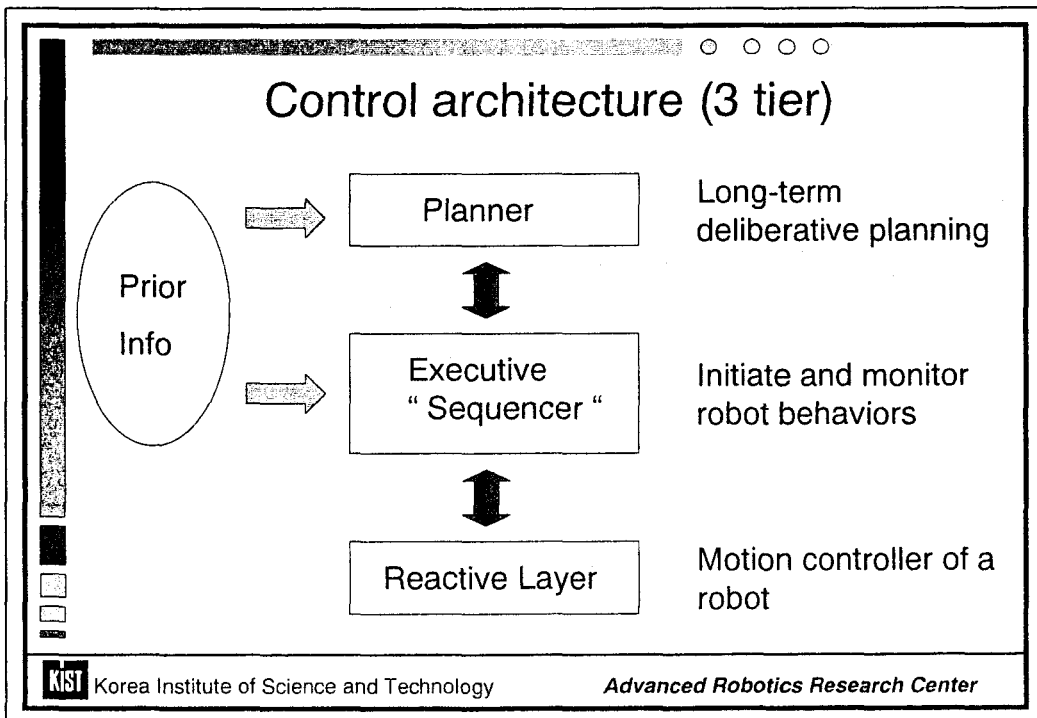
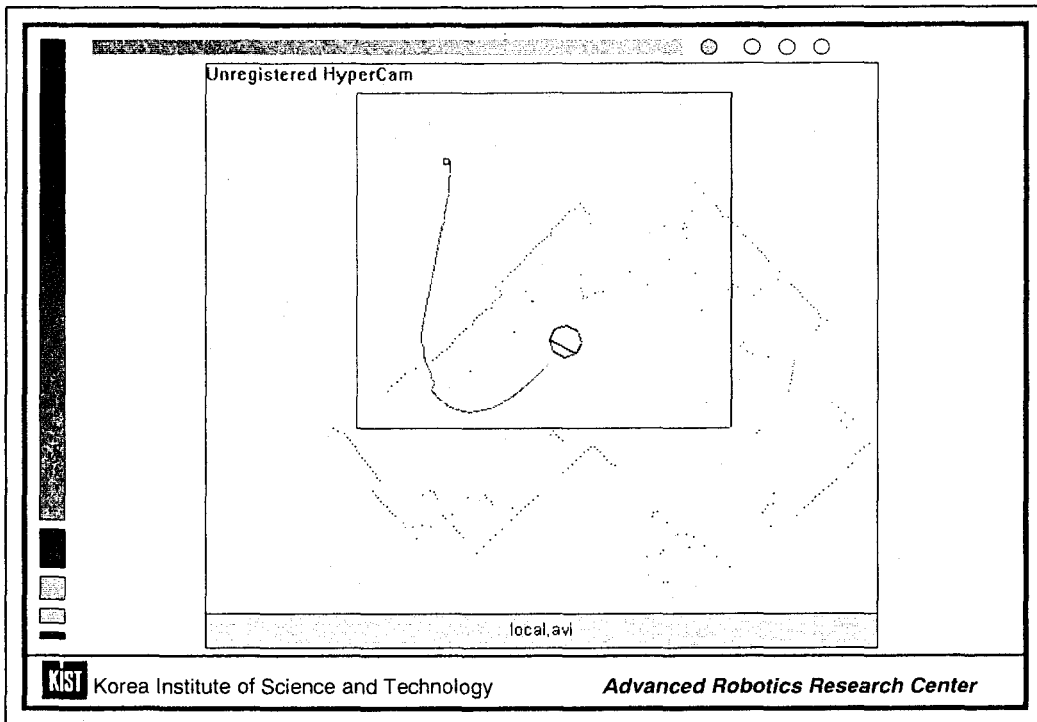


목표점에서 계산을 시작하여 각 점에서의 path cost의 계산으로 확장되는 모습.

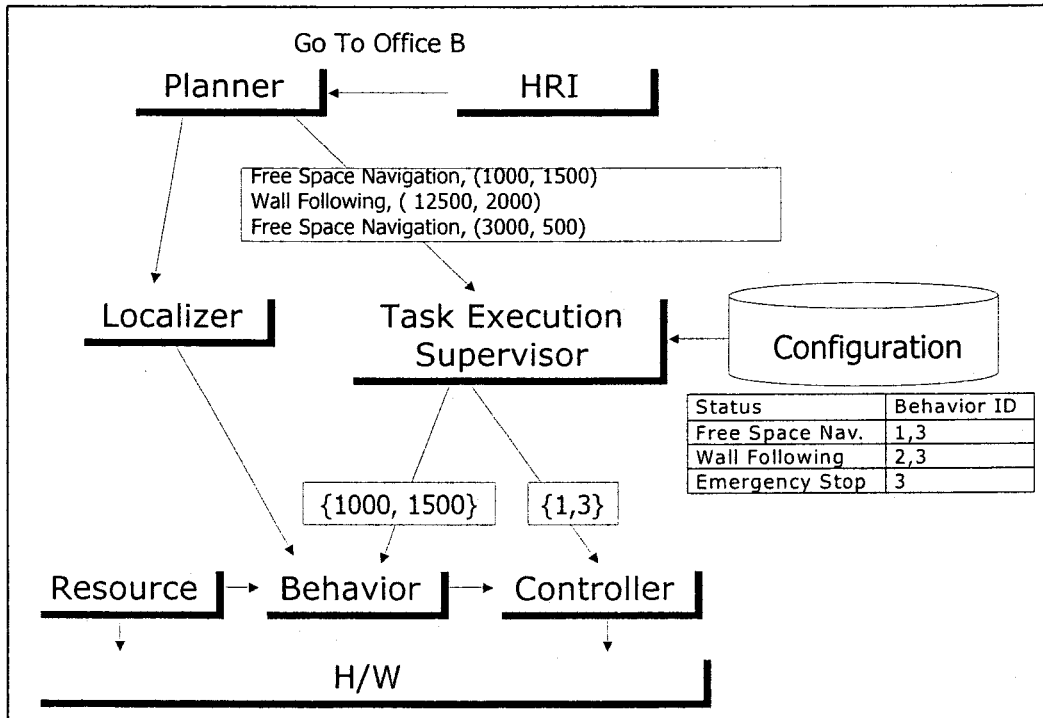
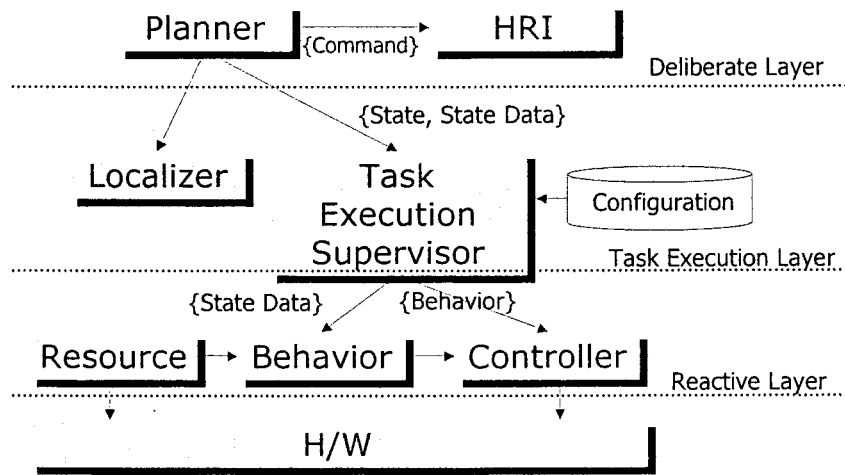


Korea Institute of Science and Technology

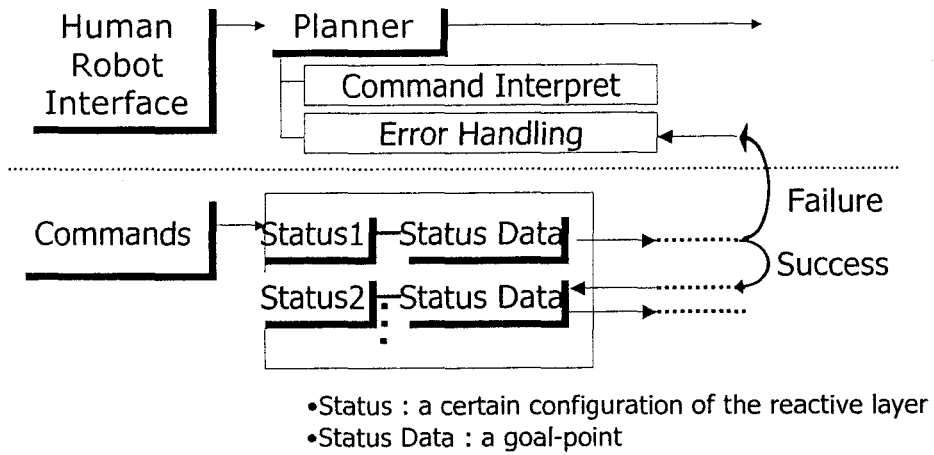
Advanced Robotics Research Center



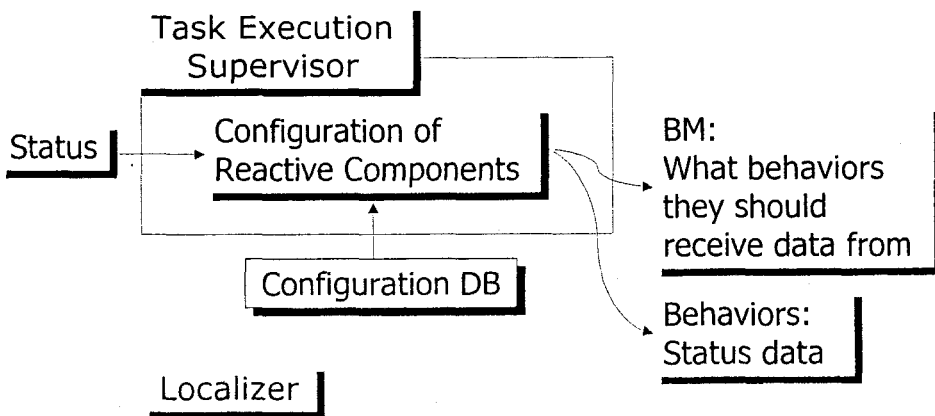
# BERRA : Behavior-based Robot Research Architecture



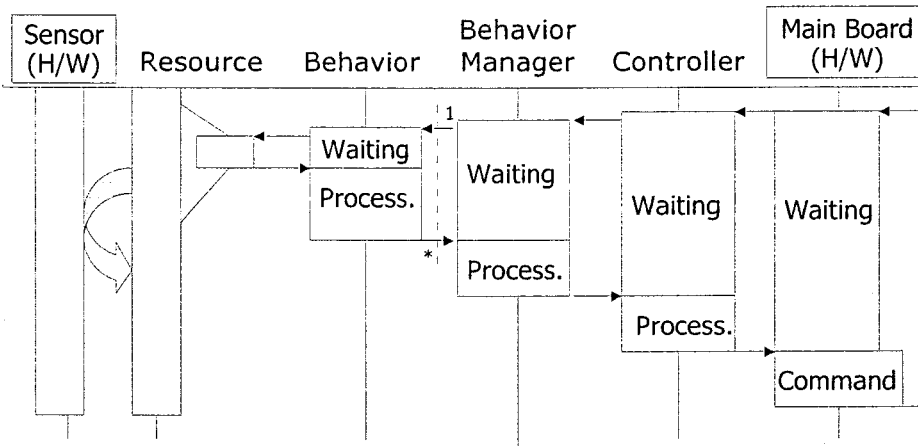
## Deliberate Layer



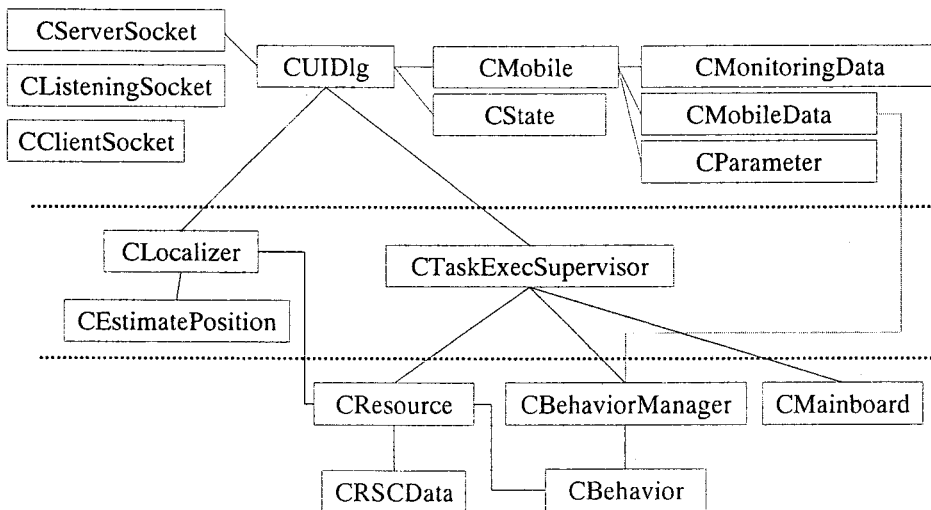
## Task Execution Layer



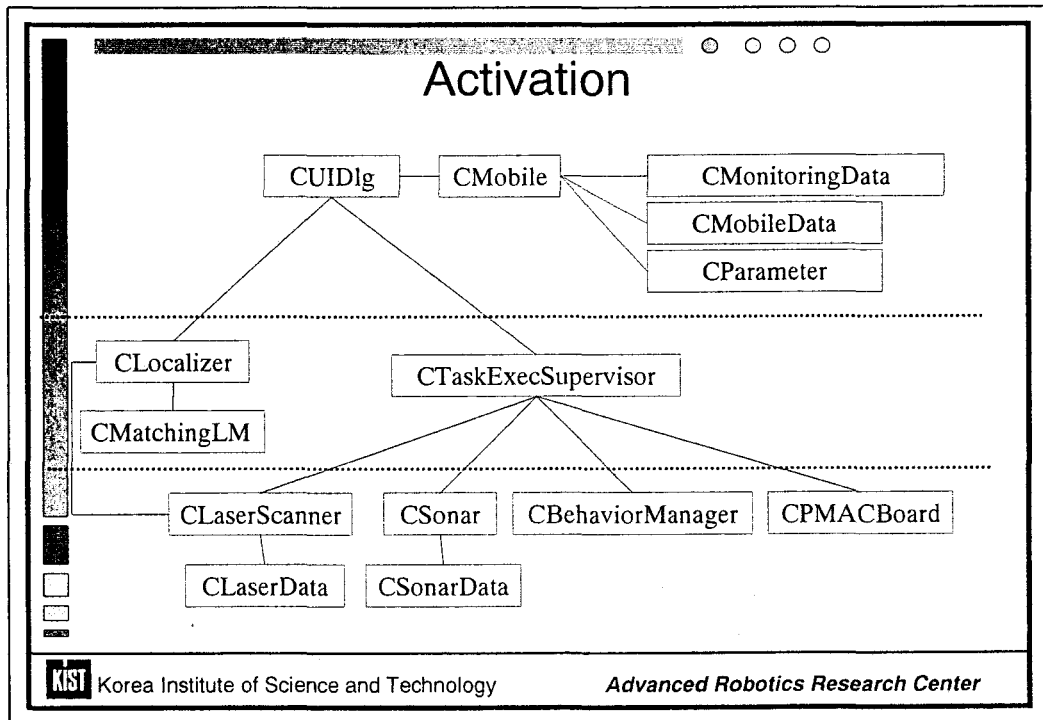
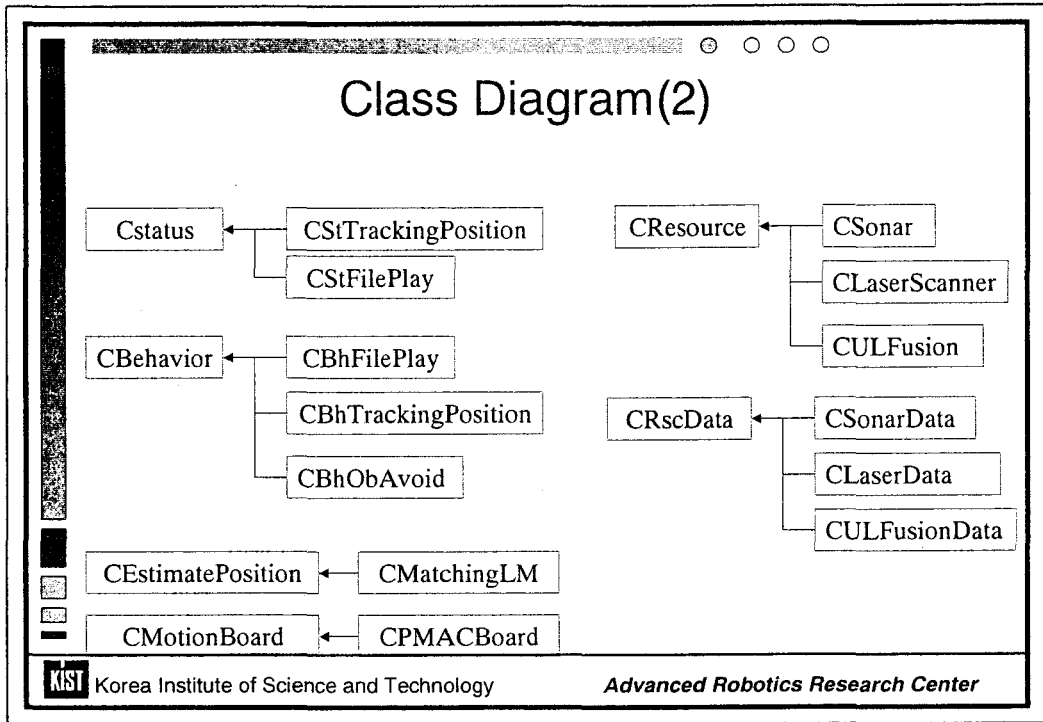
## Reactive Layer

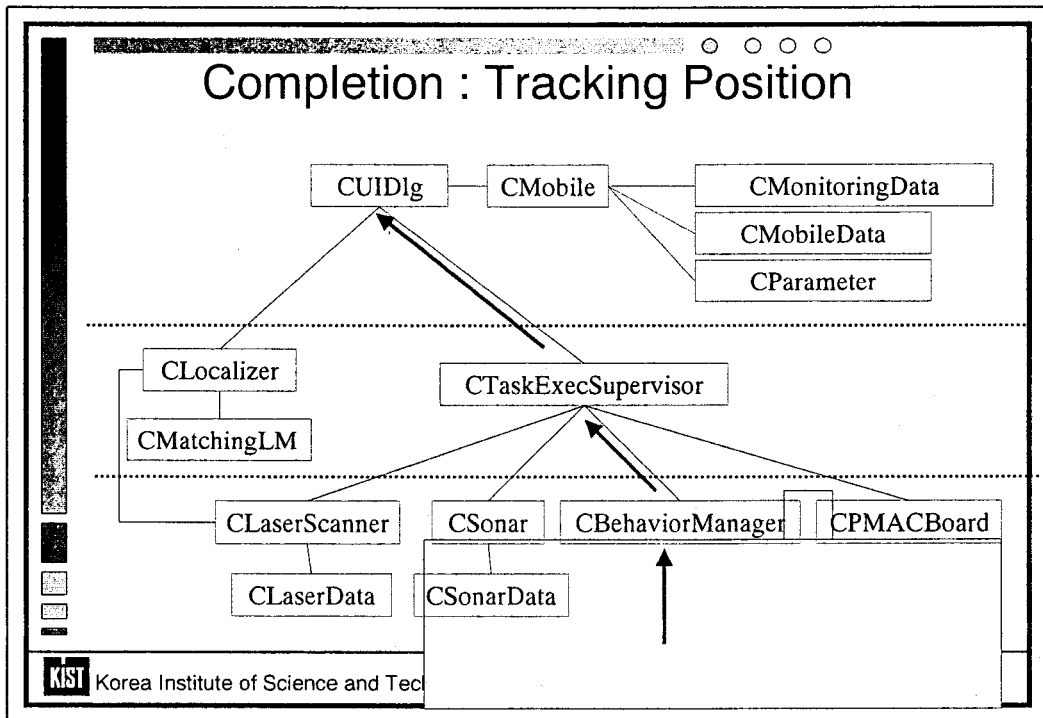
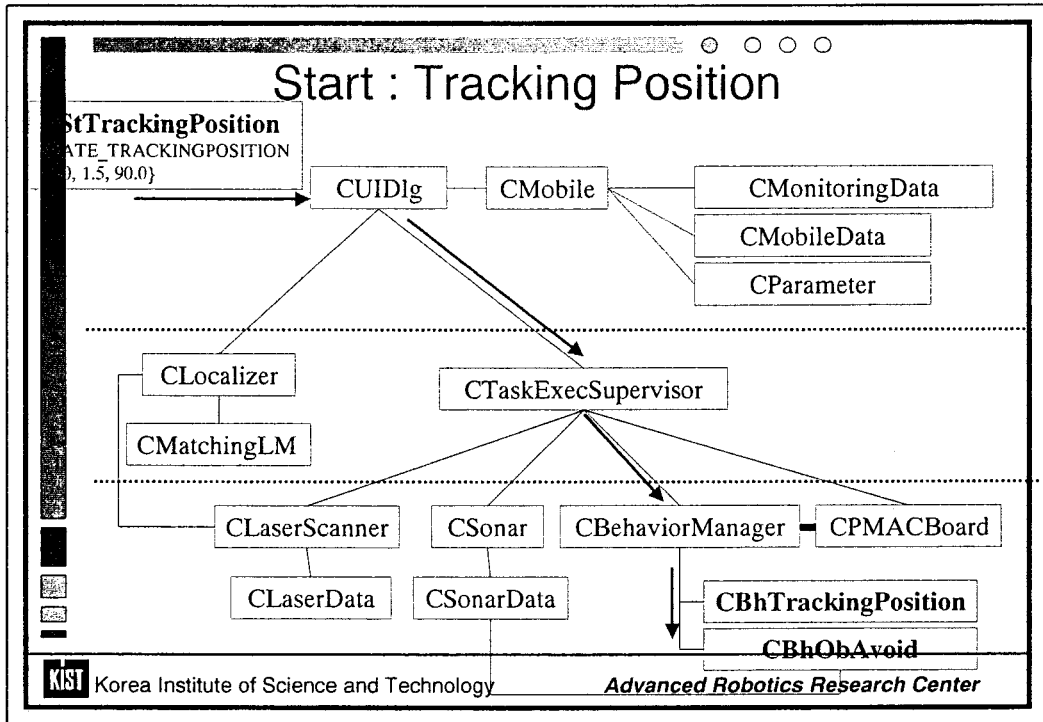


## Class Diagram(1)









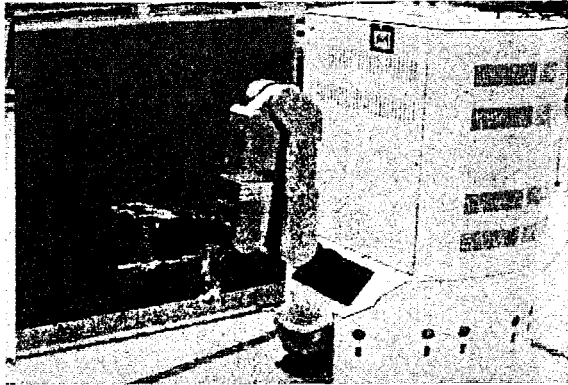
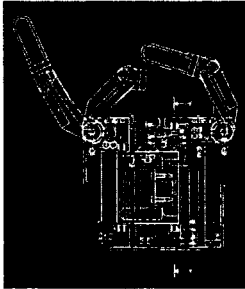
## Thread Management

- 독립적인 Thread를 갖는 Module:
  - Localizer
  - Behavior
  - Resource
  - Mainboard
  - Planner
- 각 Module간의 동기(synchronization)은 Windows Event를 이용한다.
- 각 Module간의 데이터 입출력 시 Critical Section을 이용하여 오류를 방지한다.

## 장단점 비교

장점	단점
1. Resource 와 Behavior Module 들의 개발 및 적용이 용이하다.	1. 높은 Computing Power를 요구한다.
2. 잘 정의된 Status를 이용하여 다양한 기능을 부가할 수 있다.	2. Framework의 변경이 어렵다.
3. 각 모듈의 수정이 용이하다.	3. Thread와 Data의 관리에 주의를 요한다.
4. 프로그램의 규모가 커져도 안정성을 유지할 수 있다.	

## Dexterous Robot Hand



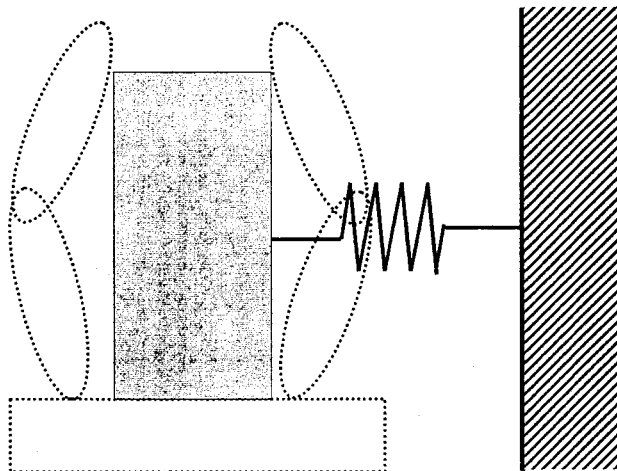
- 3 Fingers. 1 active, 1 passive joint for each finger module
- 중지와 검지의 파지길이가 조정 가능하여 다양한 물체를 핸들링
- 파지력 1.5kg, 자중 1.3kg의 초경량 핸드



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

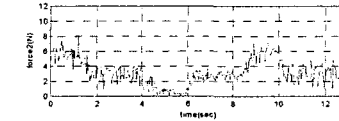
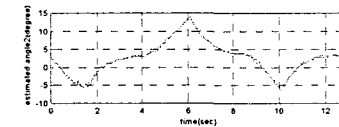
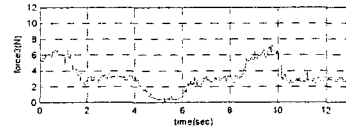
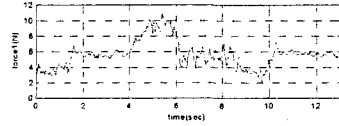
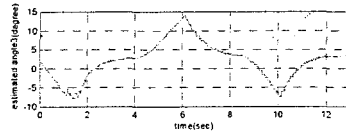
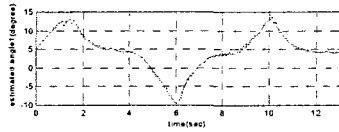
## 기하학적 해석을 이용한 안정적 물체 파지



Korea Institute of Science and Technology

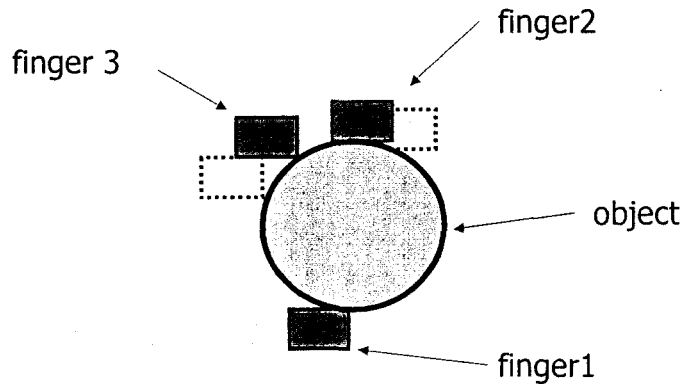
Advanced Robotics Research Center

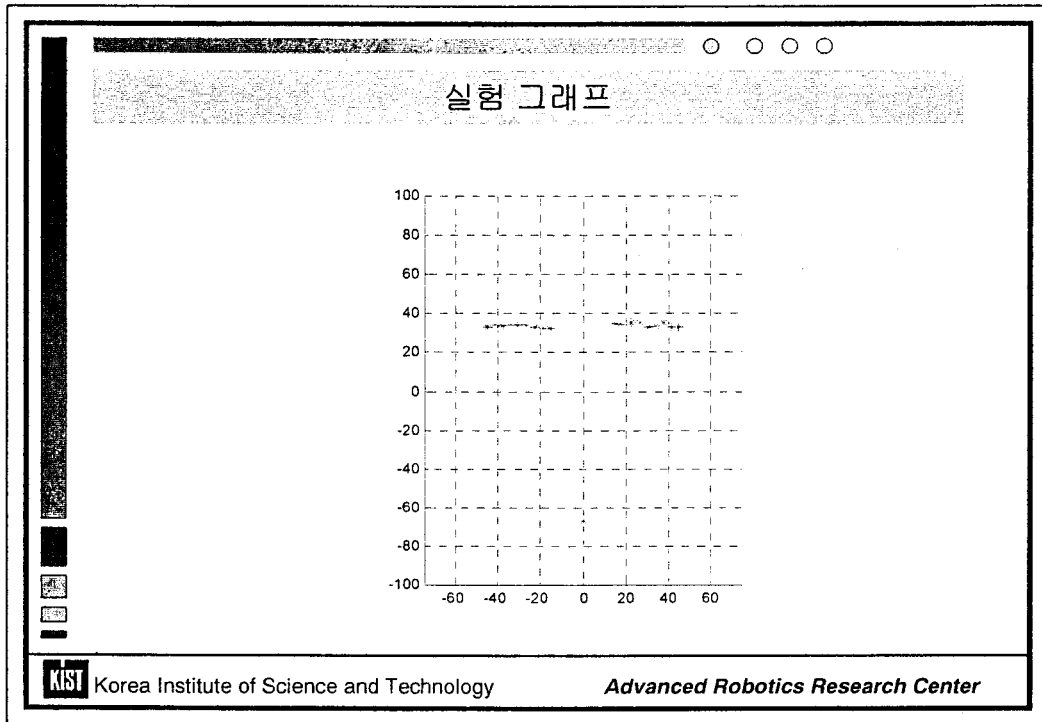
### 실험그래프



Desired force  
**Finger1 = 6N**  
**Finger2 = 3N**  
**Finger3 = 3N**

### 형상측정을 이용한 안정적 파지





## Passive compliant joint

-인간과 공존 공간에서 manipulation 이 가능하고,  
관절에 적절한 컴플라이언스를 부여함으로써 로봇과  
인간의 충돌로부터 인간의 안전성 확보

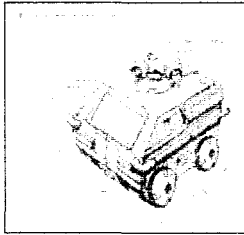
### 연구목표

- Passive Compliant Joint를 구현하기 위한 Torsional Low Stiffness  $K$  와 Viscous Damping  $B$ 를 갖는 Joint Mechanism의 개발
- 개념설계 메커니즘의 시뮬레이션 해석 및 제작시험을 통한 결과분석

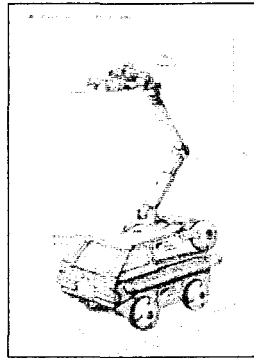
KIST Korea Institute of Science and Technology      *Advanced Robotics Research Center*

## 이동형 정보서비스로봇 개발

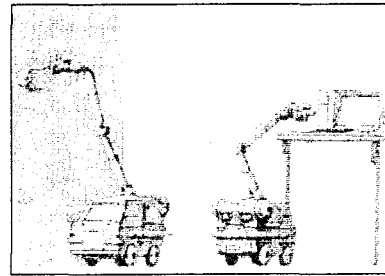
김문상/강성철



Mobile robot  
Without  
Manipulator



Mobile robot  
With  
Manipulator



Opening door and watching operations

## 개발 목표

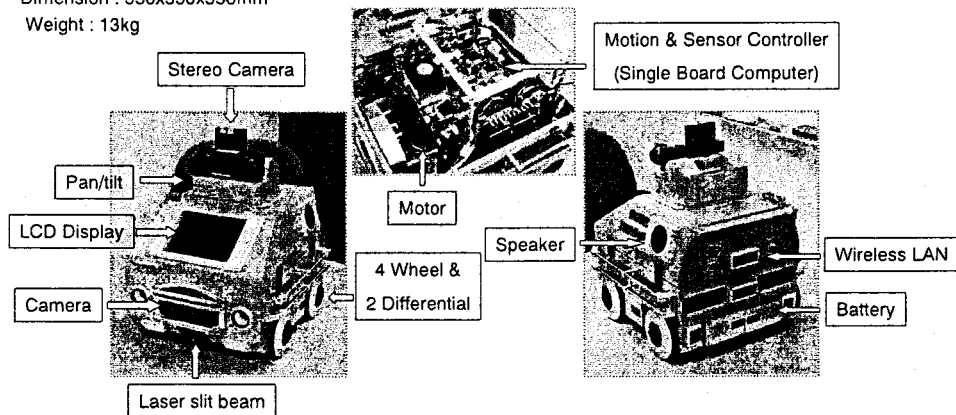
집안 내에서 동작하면서,  
사람과 Communication을 수행하며,  
정보 Service 및 경비 등의 작업을 수행 하는  
Mobile Robot System의 개발

## 최종 개발 목표

- Hardware
  - 가정내에서 동작하는 Mobile robot
    - 소형 및 경량화
    - 문턱 극복 Wheel Mechanism 채용
  - CAN-based Modularity 지향
    - 모든 Motion module은 CAN-based networking 구현
  - 경량이면서 Compliance 기능을 갖는 Manipulator 개발
- Algorithm
  - 화상 인식 및 음성 인식에 의한 양방향 Communication 구현
    - 얼굴 및 음성 인식, 음성 응답
    - 비서 기능 (전화기, 리모콘, 화상메모 전달)
  - 비전 센서 기능에 의한 자동주행 능력 확보
    - Stereo Vision을 이용한 system
  - 학습 능력 확보
    - 얼굴 및 음성 인식 학습, 감정 모델 학습

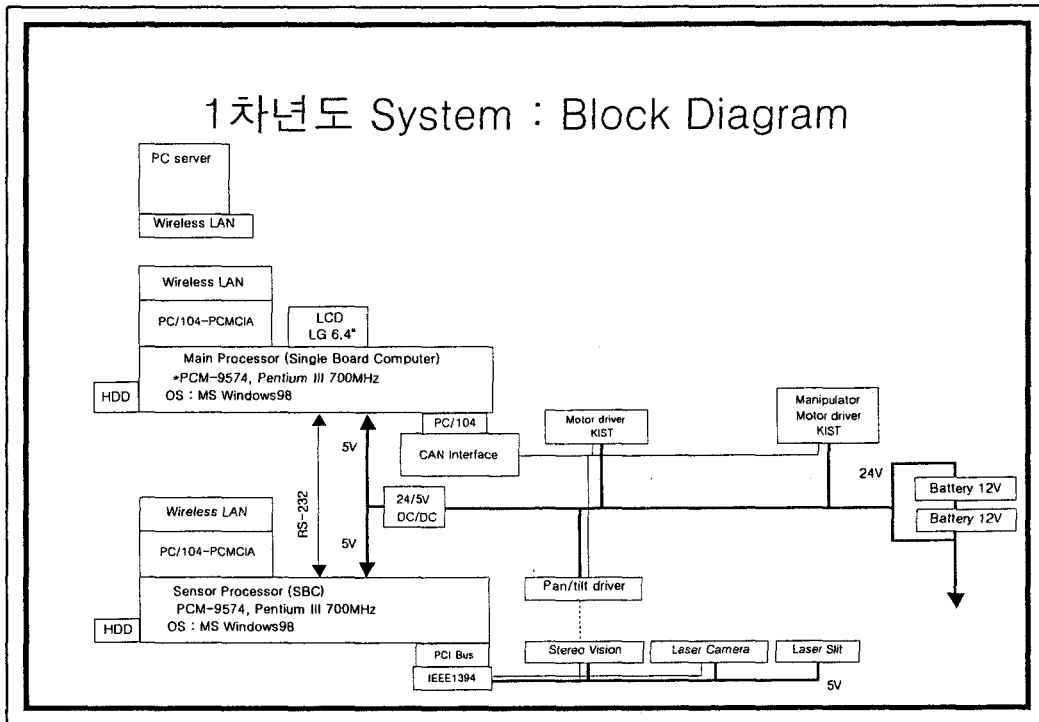
## 1차년도 System 구성

Dimension : 350x350x350mm  
Weight : 13kg





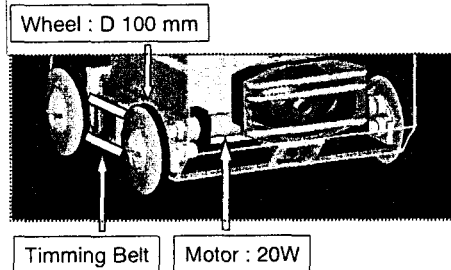
## 1차년도 System : Block Diagram



## 문턱 극복 Mechanism 설계

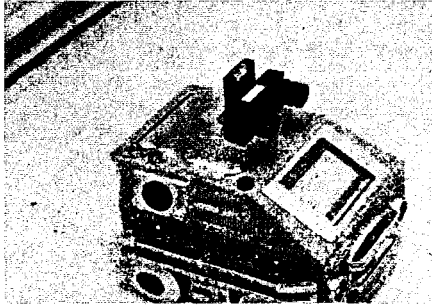
- 설계 고려 사항
  - 문턱 최대 높이 : 20mm
  - 안정적인 문턱 극복기능 보유 요망
  - 적은 수의 Actuator 사용
- 설계 사양
  - 기본 구조 : 4륜 바퀴 구동
  - 조향 방식 : 좌우 회전 속도 차이
  - Actuator : 2 Motors
  - 전후 wheel은 Belt 연결 구동

### •설계 구성도

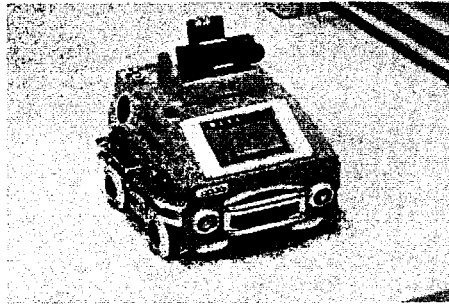


## Mobile Robot 동작 시연

- 기본 동작 및 문턱 극복 기능

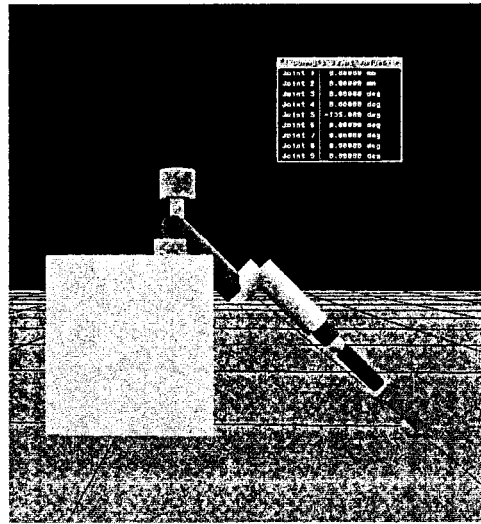
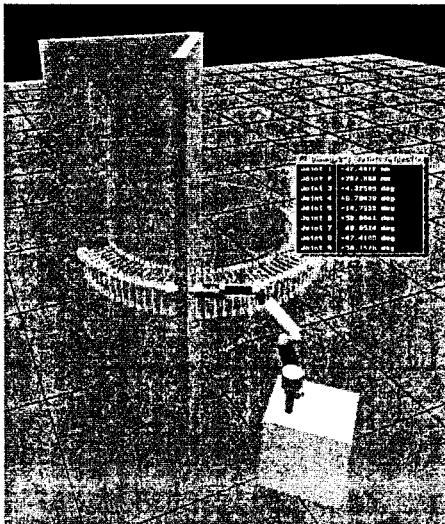


기본 동작



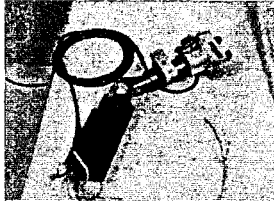
문턱 극복 기능

## 동작 simulation

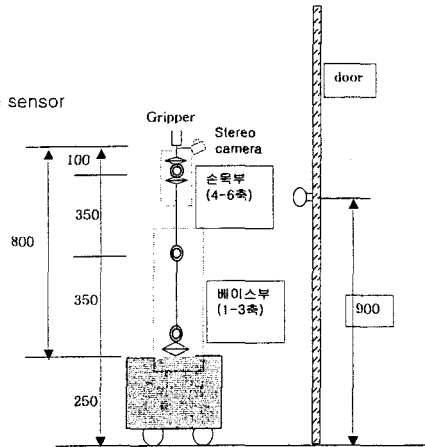


## Mobile Manipulator 개발

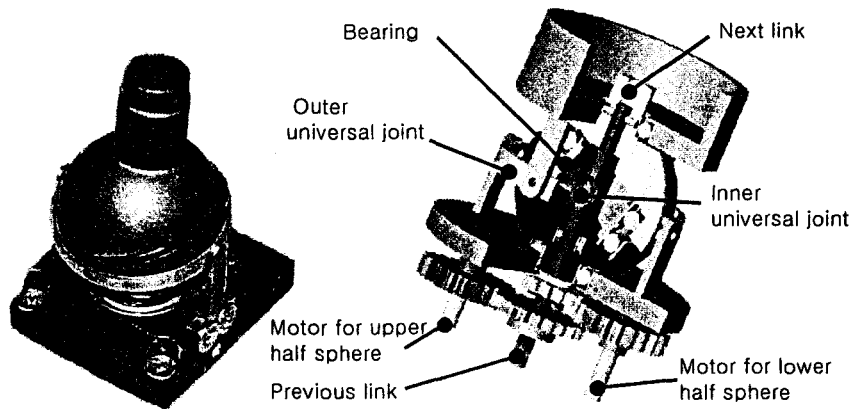
- 인간친화적 설계
  - Compact and slim
  - 곡선형외관 및 충돌 안전 보장 기능 : Torque sensor
  - 경량화 추구 (5Kg 내외 총 중량)
- 기본 사양
  - 축수 : 6축
  - Payload : 1.5 kg
  - 각축 최대 속도 : 50 deg/sec
  - 구동 Motor : DC servo



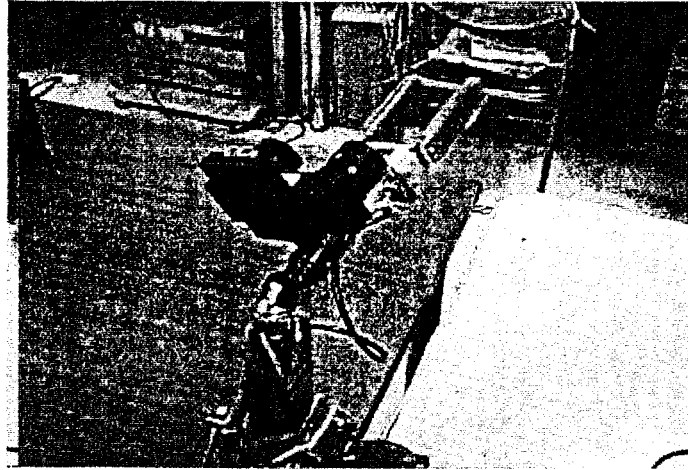
개발된 손목부 3축



## 이중능동유니버설관절(Double Active Universal Joint)을 이용한 로봇 핸드 개발

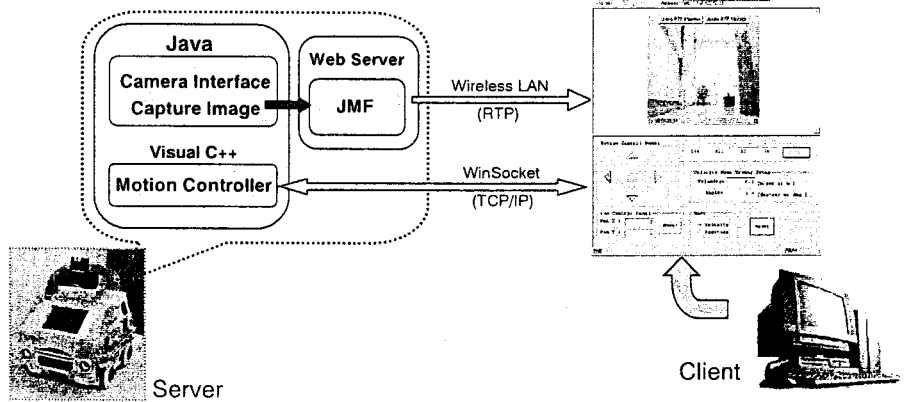


## Stereo vision 및 Gripper를 장착한 손목부



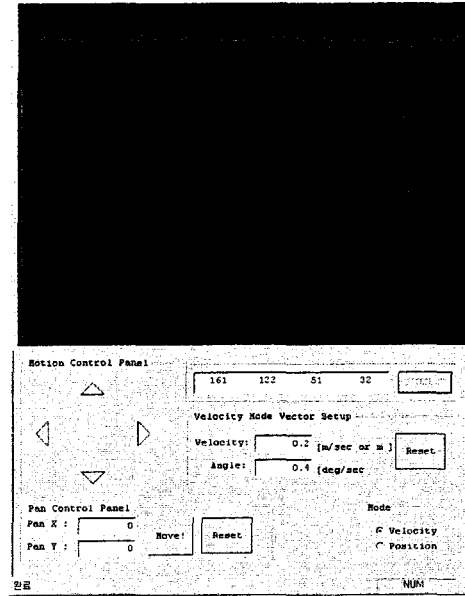
## Internet 기반 원격제어

특징 : JMF(Java Media Framework) 이용



※ RTP : Real-time Transport Protocol

## Internet 기반 원격제어 시연



30 frame/sec. (320\*240)

## Sensor 기반 Navigation 및 Detection

- Stereo sensing system
  - IEEE & CMOS based stereo vision system 개발
  - Stereo vision 을 이용한 Navigation 연구
  - Human Feature tracking
- Vision based face detection and recognition
  - Stereo 정보를 이용한 Face detection algorithm
  - Color and Appearance algorithm
  - PCA 를 이용한 face recognition algorithm
- Semi-conductor laser slit & CMOS camera 를 이용한 detection 용 sensing system
- Infra-Red Sensor를 이용한 근접 sensing system



# 3차원 Sensing을 통한 Human feature tracking



- Approaches**
- o Calibrated Stereo Camera
  - o Direct Method
  - o Robust Method

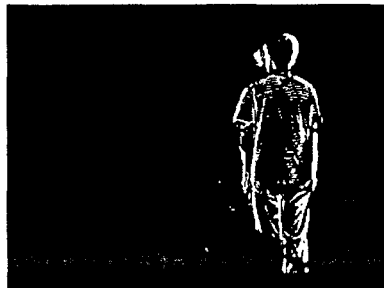
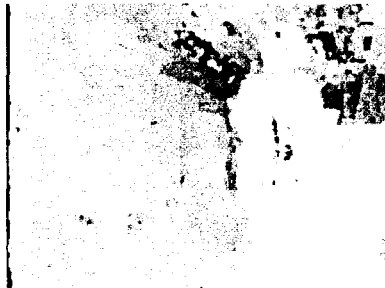


Depth recovery

+

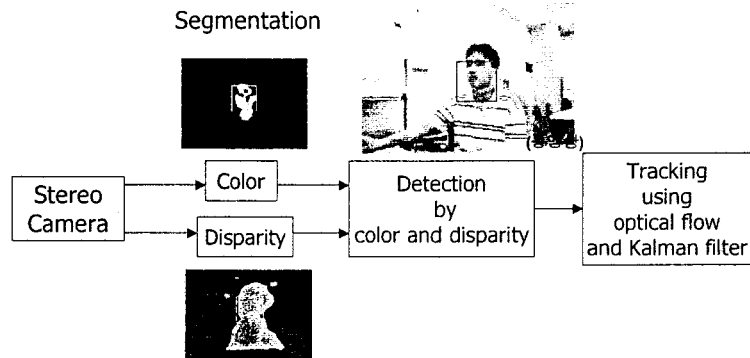


Moving object detection



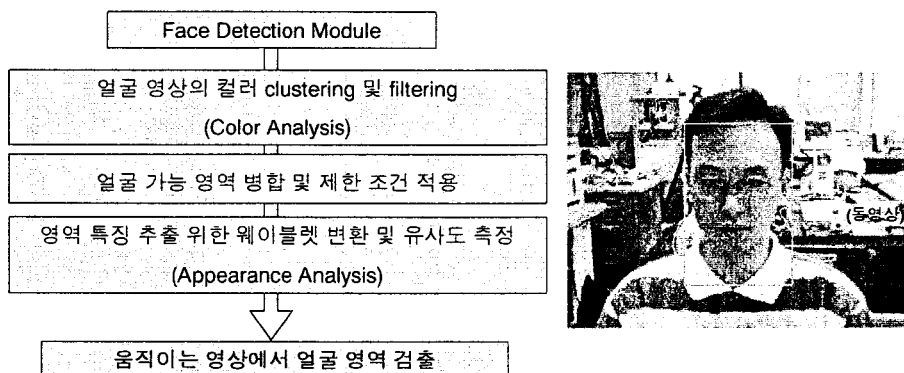
## Stereo 정보를 이용한 Face Detection Algorithm-I

- Color와 Stereo depth 활용 방법 제안 Detection



## Face Detection Algorithm-II

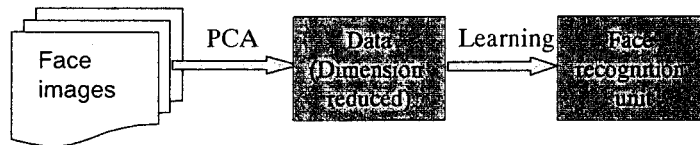
- Color and Appearance analysis





## Face Recognition Algorithm 개발

- 기반 연구 수행 Face recognition using PCA(Principal Component Analysis)



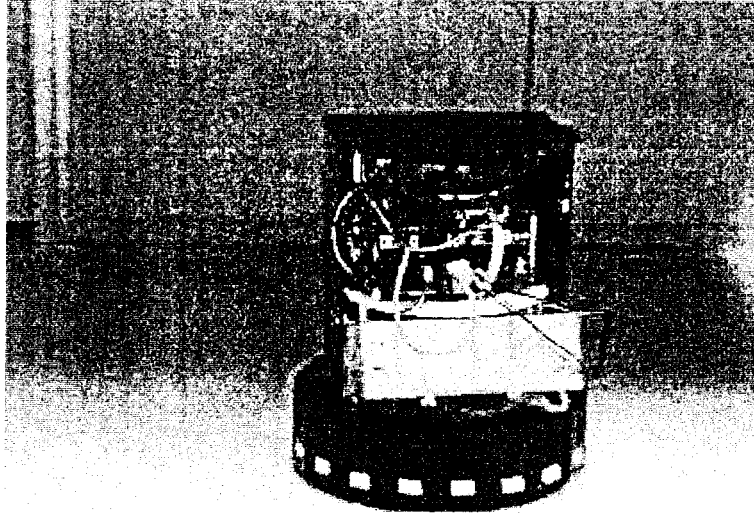
- Image representation by PCA
  - A set of 70 \* 100 images → a set of 7000\*1 vectors
  - Make eigenfaces for 8 persons ( 8 images per a person)
  - Select 30 eigenfaces
  - 256 gray image
- Classifier (Learning) : Minimum distance classifier

## Face Recognition Algorithm 개발(cont.)

- Results
  - It works well when faces are normalized and lighting variations are small
  - MIT database : more than 90% success rate (16 persons x 9 samples)
  - Example

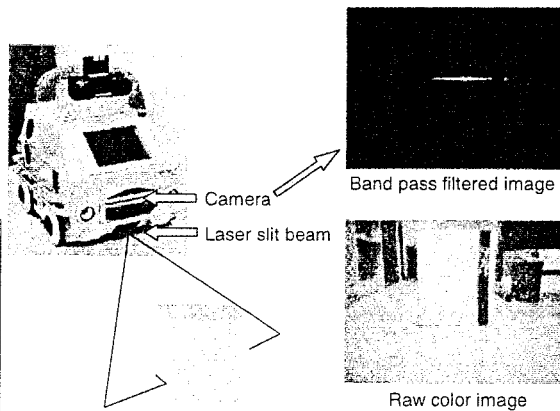
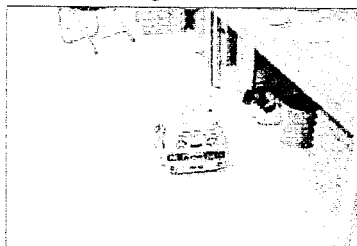


## IR sensor를 이용한 collision avoidance



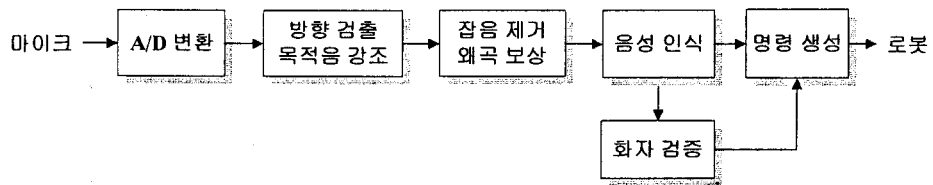
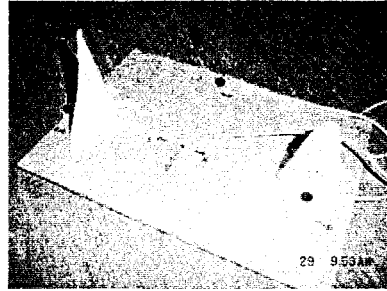
## Laser Slit Beam 이용 장애물 검지

- Laser slit beam +  
Band pass filter +  
Color camera
- Feasibility test 수행



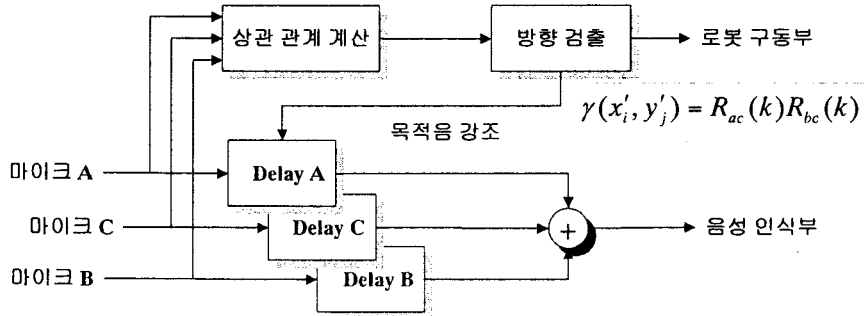
## 음성 시스템

- 기능 및 구성
  - 음성 인식
  - 음성 합성
  - 화자 인증 (검토중)
  - 음원 방향 검출
  - 원거리 집중



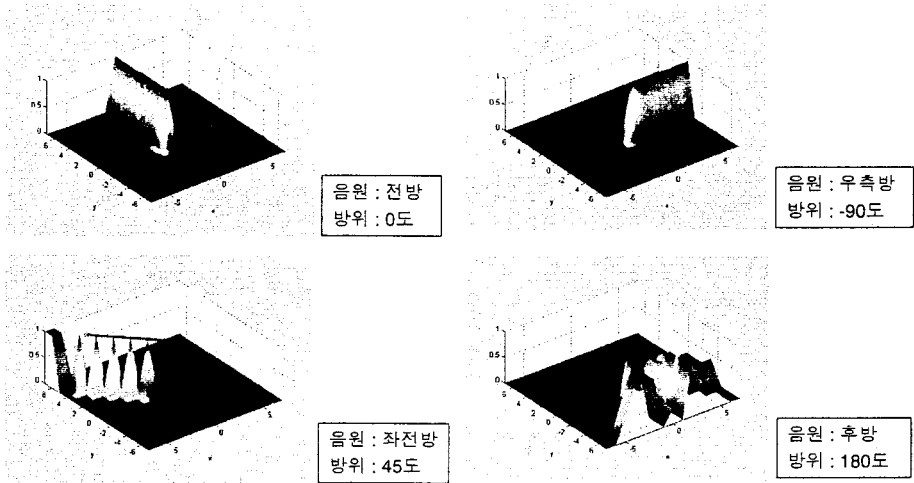
## 방향 검출부 및 목적음 강조부

$$R_{ac}(k) = \frac{\sum_{g=0}^{L-k} a(t_g - k)c(t_g)}{\sqrt{\sum_{g=0}^{L-k} a(t_g - k)^2} \sqrt{\sum_{g=0}^{L-k} c(t_g)^2}}, \quad R_{bc}(k) = \frac{\sum_{g=0}^{L-k} b(t_g - k)c(t_g)}{\sqrt{\sum_{g=0}^{L-k} b(t_g - k)^2} \sqrt{\sum_{g=0}^{L-k} c(t_g)^2}}$$



장점 : 전 방위(전후좌우)에 대한 방향 검출 가능, 연산이 간단

## 방향 검출 모의 실험



## 2차 년도(2001.9 ~ 2002.8) 개발 목표

- Hardware
  - Manipulator를 장착한 2차 시작품 제작
  - Stereo Camera의 개발 완성
  - Network based motion controller 장착
- Algorithm 개발
  - Navigation & Control
    - 자율적 주행기술 구현 및 system 적용
    - Internet-based 원격조정에 의한 집안 내 경비 Concept 제시
  - Intelligence
    - 얼굴 검지 및 인식 module의 적용
    - 음성인식에 의한 Task generation 구현
    - 인공지능에 의한 학습 기능의 구현 : 대상인물의 ID 학습, 경로 error 학습 등

# 형상 적응형 유연 그립퍼 개발

김승종 · 황요하 · 김문상

## Development of a Shape Adjustable Flexible Gripper

Seung-Jong Kim, Yoha Hwang, and Mun-Sang Kim

**Key Words :** Flexible Gripper(유연 그립퍼), Press-line Automation(프레스 공정 자동화), Shape Adjustment(형상 적응)

### ABSTRACT

This paper introduces development of a shape adjustable flexible gripper for the press line at the Hyundai Motor Co. The proposed system which consists of small high-speed DC motors, screws, and pipe guides, can set the suction cups to the pre-determined positions by itself within 3 minutes according to pre-taught information. So, it can be substituted for all attachments for various press panels that occupy wide area for their conservation and need some workers for their change. And it can also greatly contribute to increasing the productivity of the press line. Currently, performance of the prototype gripper and its control system are being reviewed at the simulator.

### 1. 서론

어려운 경제 여건에서 많은 산업 분야가 그렇듯이 자동차 공장에서도 기술과 생산성이 기업의 경쟁력을 좌우하는데, 원가적인 측면에서 고급 기술을 적용하기 부담스러운 중소형 자동차의 경우는 특히 생산성의 향상이 중요한 요소가 된다. 이미 이러한 업계 내의 경쟁은 오래 전에 시작되어 오늘날 대부분의 세계적인 자동차 회사들은 자동화 설비를 갖추고 있다. 그러나 여전히 개선의 여지가 있는 부분이 있는데, 프레스 공장 라인에서 금형 교환시 일일이 작업자가 함께 교환해주어야 하는 각 판넬 전용 Attachment 가 그 중 하나이다. Attachment 란 Fig. 1 에서 보이듯이 프레스 내로 진입하는 판넬의 종류에 따라 그 파지 위치와 개수를 미리 지정하여 제작해 놓은 보조 프레임으로서 취출 장비(Loader 또는 Unloader)의 Main Boom 과 신속 교체가 가능하도록 조립된다. 이들 중 무거운 것은 약 30kg 에 달하여, 한 사람이 신속하게 교체하기 버거우며, 이로 인하여 현재 8 분여에 이르는 금형 교환시간의 단축에 한계가 따른다. 또한, 예를 들어 한 개의 프레스 라인

에서 30 가지의 판넬을 찍고 공정이 4 회에 걸쳐 이루어진다면, 각 공정마다 Loader 측, Unloader 측에 각 30 가지의 Attachment 가 필요하므로 총 240 개를 제작하여야 하며, 그 보관 장소와 청결한 주위 환경 유지 등도 문제가 된다. 그리고, 하루 5~6 회에 불과한 금형 교환을 위해 작업자를 여럿 배정해야 하는 문제와 작업자가 느끼는 단순 반복 작업에 대한 불만, 안전 사고에 대한 우려 등도 개선의 동기를 제공한다.



Fig.1 A panel, its attachment, and main boom in a press.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 판넬의 종류에 따라 그 흡착캡의 위치를 스스로 변경하여 동작함으로써, Attachment의 교체 필요성을 근본적으로 제거한 유연 그립퍼(flexible gripper)를 개발한다. 이는 아직까지 세계 굴지의 자동차 회사에서도 개발된 바 없는 연구로서, 성공할 경우 생산성 향상은 물론 타 자동차 회사로의 기술 이전도 가능하리라 기대된다.

본 워크샵(workshop)에서는 유연 그립퍼의 구동 형식으로서 자기 유변(magnetic-rheological; MR) 유체를 이용하는 방법과 소형 모터, 워엄 기어, 그리고 볼나사(ball screw)를 이용하는 방법, 또한 소형 모터와 4 각 나사를 이용하는 방법 등을 검토하여 각각의 장단점을 살피고, 최종적으로 4 각 나사 방식으로 제작한 시작품을 소개한다. 또한 시작품을 이용한 간단한 시험 결과를 통해서 파악된 문제점과 그 개선 방법 등을 제시한다.

## 2. 기본 요구 사양

1 차 제작되는 시작품은 울산 현대 자동차 프레스 공장의 2A1 라인 1 공정 취출기(unloader)에 적용함을 목표로 하며, 고장을 대비하여 신속 교체가 가능한 탈착형으로 제작하는 것과 판넬 흡착 방식은 기존과 동일한 공압식으로 한다는 설계 조건을 만족하여야 한다. 그 밖에, 그립퍼 프레임은 최대한 경량화 함과 동시에 판넬을 파지한 상태에서 3 초 내외의 작업 주기를 큰 진동 없이 감당할 수 있는 강도를 갖추어야 하며, 기존 금형 설비에 적용할 때 타 장비와의 기계적인 간섭이 없이 작업이 가능한 형상 설계가 이루어져야 한다. 이를

Table 1 Specification for flexible gripper

요구 사항	요구 수준	비고
Presetting 방식	금형 교환 시 4 분 이내	작업중 재조정 불가
그립퍼 프레임 허용 중량	40 kg (한계중량 60kg)	현재 최대 30 kg
흡착캡	8 개, $\phi$ 100	최소 6 개
제어 자유도	5 자유도 (병진 3+회전 2)	회전 2 자유도는 수동형
판넬 최대 크기	$3.6 \times 1.5 \times 0.4 \text{ m}^3$	SM SIDE OTR
최대 가속도	3G	

비롯한, 시작품에 요구 되는 기본 사양을 Table 1 에 정리하였다.

## 3. 시스템 구상 및 장단점

본 연구에서는 상기 요구 사양을 만족하는 그립퍼 프레임을 제작하기 위하여 다양한 방법들을 구상하였고, 그 중 3 가지 방법을 구체적으로 검토하였다. 그러나, 현재 특허 출원을 준비 중에 있어 그 자세한 사항을 본 지면에 게재할 수 없는 관계로 그림 없이 간단히 기술하기로 한다.

### 3.1 MR 유체를 이용한 형상 고정 장치

MR 유체란 자기장을 걸어주었을 때 감쇠력이 변하는 유체로서 근래에 이르러 댐퍼 또는 브레이크에 응용이 증가하고 있다. 본 연구에서는 이를 이용한 유연 그립퍼가 처음 검토되었는데, 다양한 형태의 판넬에 대응하여 작업자가 초기에 적절히 그립퍼의 위치를 지정한 후 자기장을 발생시키면, 그 형상이 고정된 채로 작업을 수행할 수 있다. 이로써 판넬에 따라 그립퍼 프레임을 교환할 필요는 없어지지만, 자동 위치 전환 기능이 없으므로 작업자 또는 별도의 로봇이 위치를 지정해야 하는 보완점은 있다. 구조적으로는 비교적 제작 및 보전이 간단하고 다양한 형상의 판넬을 파지하는 것이 가능하지만, 누액, 오염 및 침전 가능성이 존재하고, 프레임을 자성체로 제작하여야 하므로 중량이 증가하는 단점이 있다. 만약, 중량을 줄이기 위한 설계를 하면 MR 유체에 의한 발생력도 감소하게 되어 설계 사양을 만족할 수 없다.

### 3.2 소형 모터, 워엄 기어 및 볼나사 구조

소형 고속 모터와 워엄 기어, 볼나사를 이용하는 유연 그립퍼의 구조에서는, 모터의 경량성과 높은 감쇠비, 워엄 기어의 높은 버팀 토크 및 볼나사의 고효율, 정밀성 등을 활용한 설계 개념을 갖는다. 이 시스템은 별도의 로봇이나 작업자 없이 스스로 위치 조정 능력을 갖는다는 큰 장점이 있다. 이 모델에 대한 한 개의 흡착캡 구동용 축소 모형이 실험실에서 제작된 바 있으며, 적용 가능한 수준의 구동 성능을 확인하였다. 제작된 모형의 각 요소 사양은 Table 2 에 나타내었다. 이를 바탕으로 한 설계 자료에 따르면, 취출 장치와 연결되는 사각 붐(boom)과 공압부를 제외한 중량이 약 32kg 이고, 위치 조정 시간은 약 3 분으로서 설계 요구 조건을 만족하며, 각 모터 유닛을

모듈 교환 방식으로 제작함이 가능하므로 보전성이 좋다. 그러나, 20 개가 넘는 수의 모터가 장착되므로 그 유지, 보수에 대한 대책 마련이 필요하며, 시스템의 제작비가 매우 비싼 단점이 있다. 모터와 볼나사의 예상 가격만 고려해도 3000 만 원에 달하므로, 전 프레스 공장에 이러한 유연 그립퍼를 적용하기 위해서는 반드시 제작 단가를 낮추기 위한 설계 변경이 필요하다.

Table 2. Design spec. of the ball-screw type prototype

	Horiz. Frame	Verti. Frame
Motor	Maxon, RE16 4.5 Watt, 14000 rpm	Maxon, RE13 3 Watt, 14000 rpm
Planetary gear	GP16A, 1:19	GP13, 1:67
Worm gear	1:40	1:30
Ball screw	THK, BNF1610	THK, BNS0812A
Max. speed	184 mm/min	125 mm/min

### 3.3 소형 모터 및 4 각나사 구조

4 각나사는 볼나사에 비해서 정밀성이 떨어지고 불순물, 나사부의 작은 찌그러짐 또는 처짐에 의해 끼임 현상이 발생할 가능성이 있는 단점이 있으나, 한편, 제작이 간편하고 가볍고 저렴하다는 장점이 있다. 게다가 역토크를 견디는 특성이 있어 워엄 기어가 없어도 역토크에 의한 모터 손상을 방지할 수 있다. 본 개발 대상 시스템이 그 사용 목적상 정밀한 구동보다는 중량과 제작 단가가 중요한 설계 사양이 되므로 4 각나사를 이용함으로써 그 장점을 살릴 수 있다. 한편, 볼나사를 이용하는 경우에 비해 프레임의 강도가 약하므로 보강 구조가 필요하다. 그리고, 볼나사 방식의 경우에도 마찬가지로 흡착컵이 높낮이 차가 큰 판넬을 파지할 경우 프레임의 진출입 시 수직축의 상단 끝이 위쪽 금형과 간섭을 일으키는 문제가 존재한다. 전체 모델 시제품은 이와 같은 단점들을 보완하여 제작되었고, 현대 자동차 공장 내의 시뮬레이터에서 구동 시험을 수행하였다. 일련의 보완 과정을 거쳐서 프레임의 강도 문제와 간섭 문제는 개선되었으나, 경량화와 급경사면 파지를 위한 흡착컵의 구동 방식 수정의 필요성이 대두되었다.

## 4. 진행 상황

현재는, 수직축에 대한 보다 가볍고 튼튼한 개량 모델과 흡착컵의 2-자유도 구동 메카니즘을 개발 중에 있다. 한편, 본 시스템에서의 학습과 위치 조정을 위한 제어 시스템은 PLC 를 기본으로 하는데 그 사양은 Table 3 에 정리한 바와 같다. 제어 시스템에 있어 한 가지 문제점은 도합 200 가닥이 넘는 모터 제어를 위한 전선과 센서 전선에 대한 처리 방법이다. 그에 대한 대안으로서 KIST 에서 개발한 각 모터와 센서 신호 처리 유닛을 직렬로 연결하는 CAN 방식 제어기의 적용을 검토 중이다.

Table 3. Specification for control system

제어 방식	PLC 제어 (A2SH CPU)
제어 모터 개수	20 개 동시 제어 (향후 28 개)
위치 검출 방식	Incremental encoder
위치 기억 방식	PLC Memory
학습 방법	Teaching controller (MDI-GP)
이상 검출 및 자기 진단 기능	있음
표시 방식	조작 판넬, GP-577R-TC11
위치 정밀도	1mm
공급 전원	주전원 - AC440V, 단상 60Hz, 제어 전원 - AC110V, DC24V

## 5. 맺음말

본 연구에서는 자동차 공장의 프레스 공정 자동화를 위한 유연 그립퍼 시스템을 개발하고 있다. 현재, 1,2 차 시제품 제작을 통하여 문제점을 파악하고 그 개선 작업을 지속적으로 수행 중이다. 중량과 강도를 함께 고려하여 프레임을 설계하는 작업이 마무리 단계에 있으며, 향후, 제어 시스템을 구성하고, 위치 정보에 대한 효과적인 학습 알고리즘과 신속한 흡착컵의 위치 변경용 소프트웨어를 완성하고, 실제 공정 라인에 투입하여 안정성과 보전성을 개선하는 작업을 수행할 예정이다.

## 형상적응형 Universal 핸드 개발

2001.11.30

트라이볼로지연구센터

황요하

한국과학기술연구원



## 연구 목표 및 개발 배경

### ● 연구 목표

- 현대자동차 프레스 라인 제품 이송용 유연 그립퍼의 개발

### ● 연구 개발 배경

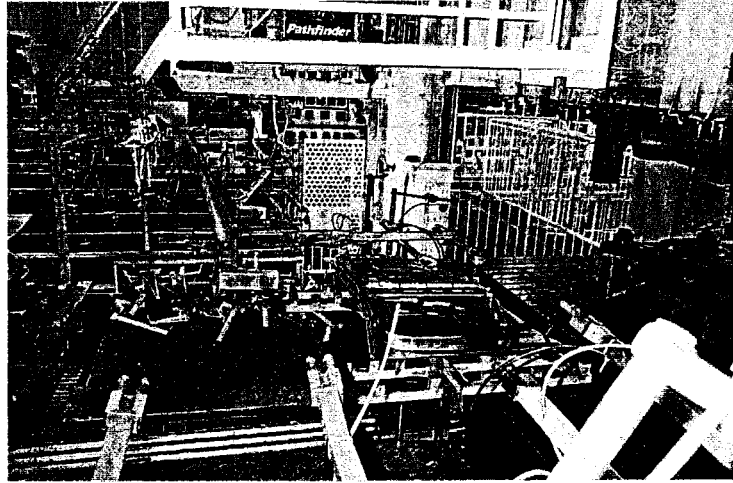
- 프레스 라인은 5~6개의 연속된 프레스로 이루어지며 각 프레스에는 loader, unloader가 설치된다.
- 프레스 제품마다 전용의 이송용 attachment(진공컵 부착)가 사용된다.
- 생산 제품용, A/S 용, 예비용 등을 포함하여 현장 관리의 어려움
  - 예) 2공장 A1라인의 경우 32개의 품목이 생산된다.  
이 경우 attachment 숫자:  $32 \times 2 \times 6 = 384$ 개
- 교체의 번거로움 및 교체시간 과다 소요로 다품종 소량 생산의 어려움 -> 생산성 저하

한국과학기술연구원





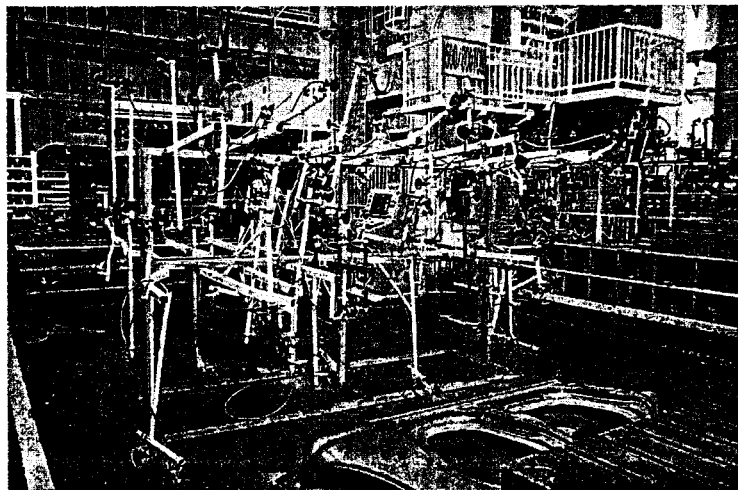
## Loader 작업 예



한국과학기술연구원



## 작업 대기중인 Attachment



한국과학기술연구원



## 개발 목표 및 기대효과

### ● 개발 목표

- Loader, unloader 당 한 개씩 설치되어 Suction Cup의 위치를 자동 조정, 다양한 대상체의 파지가 가능한 형상 적응 Gripper 개발

### ● 기대 효과

- 금형작업 라인의 완전 자동화
- 신속한 금형 교환 가능 (현재 9분 ->목표 :4분 이내)
- 자동화 및 생산 유연성의 확대로 재고 감소 및 작업성, 생산성의 획기적인 향상
- 현대, 기아차의 경우 프레스 라인이 약 20여기로 성공적인 개발 시 막대한 효과

한국과학기술연구원



## 요구 사양

요구 사항	요구 수준	비 고
Presetting 방식	금형 교환 시 4분 이내	작업중 재조정 불가
그립퍼 전체 중량	40 kg 이하	현재 최대 30 kg
Suction Cup 개수	8 개, 직경 100mm	최소 6개
Cup당 제어 자유도	최대 5 자유도 (병진 3, 회전 2)	Cup의 회전 2자유도는 option
최대 대상 판넬 크기	3.6x1.5x0.4 m <sup>3</sup>	SM-SIDE OTR
최대 버팀 토크	3G	급가감속을 고려

한국과학기술연구원



## 개발 방안

개발안	장점	단점	비고
MR이용(5축)	단순한 구조 제작 및 유지비 저렴	외부 포지셔닝 시스템 필요 무게 과다(약 130kg) 직선 유닛의 기밀성 문제	초기 검토 후 후보에서 제외
볼스크류(4축)+ 웹기어(1축)	기능성 최고 검증된 시스템	고가의 볼 스크류 사용 시스템 구성이 복잡	시제품 제작
각나사(3축)+ 볼조인트(회전 2축)	최소 외형 크기 저렴한 가격 가장 단순한 구조	경사면 작업시 작업성 불량	시제품 제작 성능시험 중
각나사(3축)+ MR(회전 2축)	저렴한 가격 경사면 작업성 향상	MR부품의 성능 검증 문제	설계 검토 중

한국과학기술연구원



## 향후 추진 방향

### ● 유연 그림퍼 구조

- 강성 보완 구조
- 주변 장치(공압 라인, 전선 등)의 처리
- 3축 구조(가위손, 안테나식 등)의 확정
- 진공컵의 자유도 보완(수동 방식의 보완, 모터 설치 방식)

### ● 제어기

- CAN 적용
- 산업용 PC를 이용한 제어기 구성
- SW 개발

한국과학기술연구원



여 백

## Session 2

# 재활/복지용 서비스 로봇

여 백

## *Humanoid robot for research of Computational Neuroscience*

Shin'ya Kotosaka

*Design Engineering Lab., Saitama University, Japan*

kotosaka@mech.saitama-u.ac.jp

Brain science has made remarkable advances in the twentieth century and has discovered numerous new insights into the functional and structural organization of nervous systems. It is important that not only neuro-biological research is needed for brain science, but also theoretical research, and, moreover, research that systematically combines both approaches in order to gain a system's level understanding of complex processes such as language, perceptuo-motor control, and learning. Based on these premises, The Kawato Dynamic Brain Project (was expired at Sept., 2001), JST, investigates higher-level brain function using theoretical approaches with neural models, psychophysical experiments with human subjects, and a humanoid robot. This research with the robot has two aspects. One is to provide a test bed for the validation of hypotheses of computational theories derived from computational neuroscience. The other aspect is to develop new algorithms for motor learning, trajectory generation, and perceptuo-motor control with the goal to explore physical, mathematical, and statistical limitations that are also relevant for brain science.

The project has developed a hydraulic anthropomorphic robot based on the research concept as above. In this talk, I will introduce this humanoid robot, called "DB" (2), and peripheral equipment and demonstrate some research topics with the humanoid robot.



Figure 1 Humanoid Robot DB

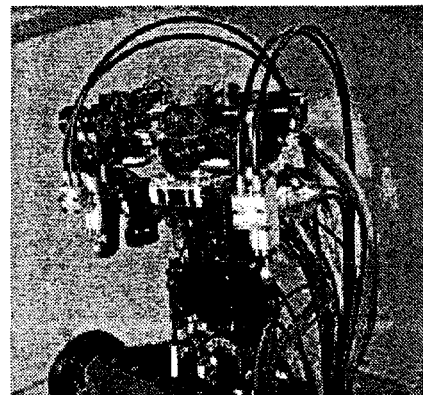


Figure 2 Binocular camera system on DB's head

## 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발 (Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology)

2001년 11월 30일  
KAIST/삼성전자  
이영준님

KAIST

CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

### 최종목표 및 현황

#### ■ 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.

#### ■ 현황

- 1차년도: 1998년 12월 1일 ~ 1999년 9월 30일 (590,000,000원)
- 2차년도: 1999년 10월 1일 ~ 2000년 8월 31일 (559,000,000원)
- 3차년도: 2000년 9월 1일 ~ 2001년 8월 31일 (590,000,000원)
- 4차년도: 2001년 9월 1일 ~ 2002년 8월 31일 (720,000,000원)
- 주관연구기관: 한국과학기술원
- 협동(공동)연구기관: 삼성전자㈜ 종합기술원
- 참여기업: 삼성전자㈜ 종합기술원

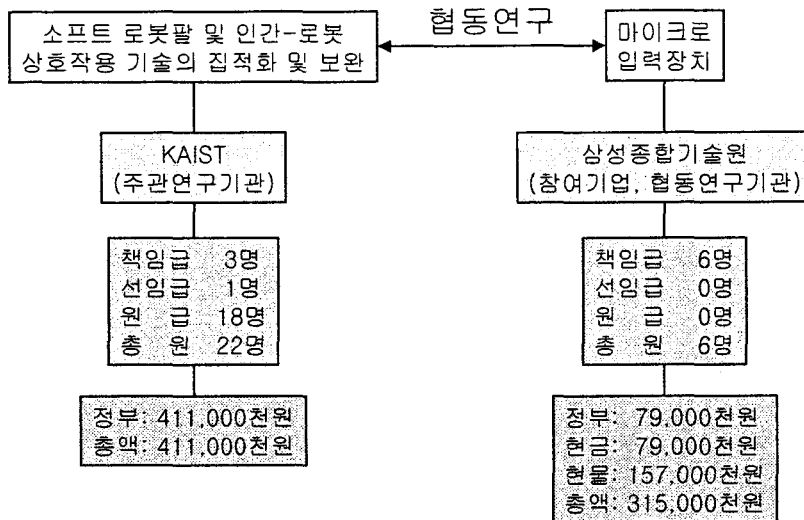
KAIST

CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

2

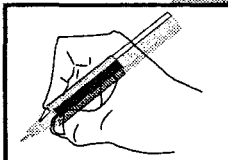


## 연구원 편성 (4차년도)



## System Integration

Visual Servoing,  
Bio-signal based Control



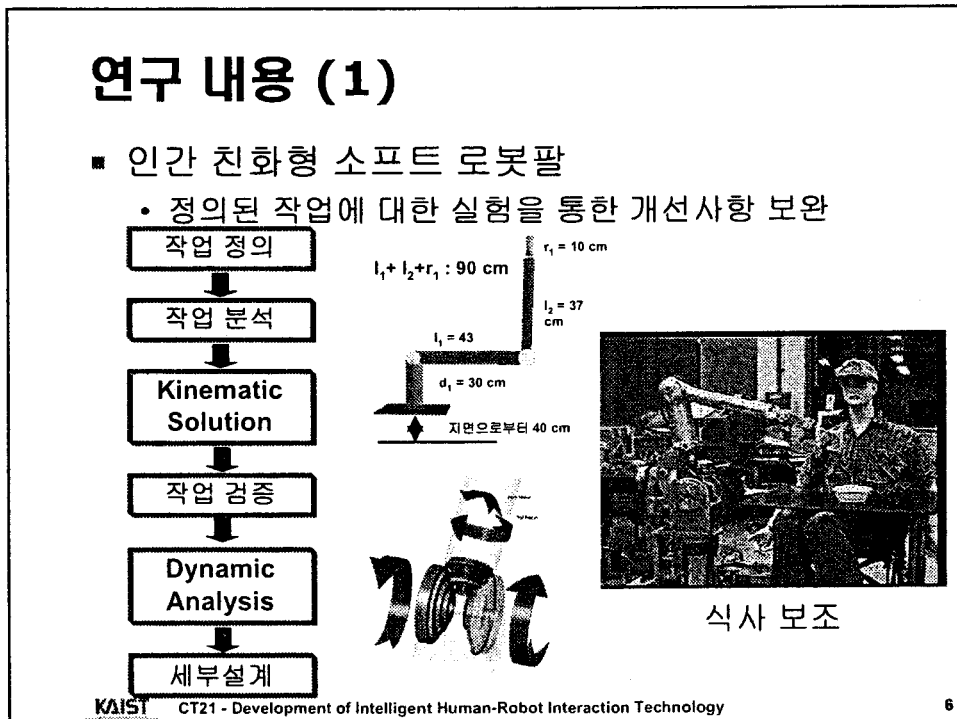
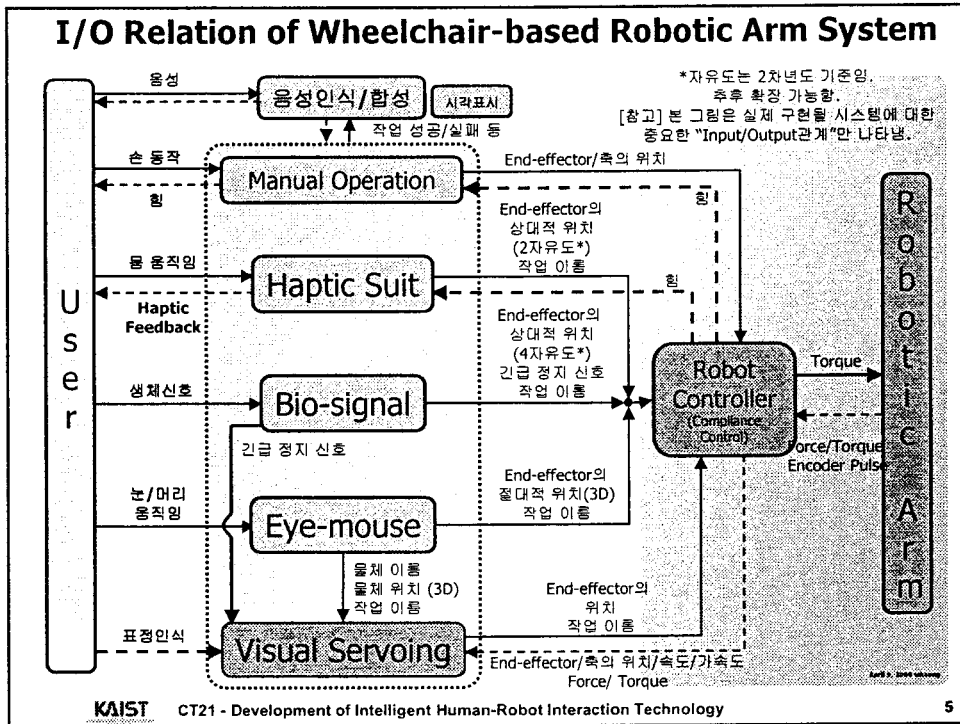
Hand-held Master Device



Eye Mouse

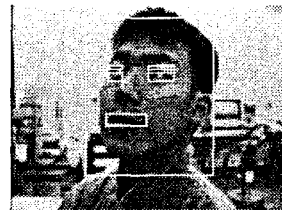
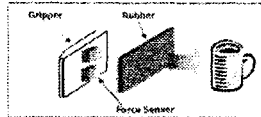
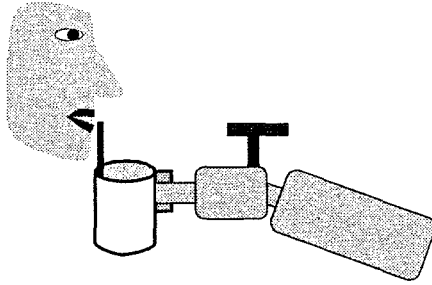
Haptic Suit,  
Mobile Robot

Robot Arm Design &  
Manufacturing, Motion Control  
(Soft Arm, Compliance)



## 연구 내용 (2)

- 인간 친화형 비주얼 서보잉(Visual Servoing) 기술
  - 소형 스테레오 카메라 헤드, 표정 인식 기술을 통한 사용자 의도 파악
  - 센서 융합 및 인간-로봇 공동작업 기능의 부여



## 연구 내용 (3)

- 생체 신호(EMG) 를 이용한 제어 기술
  - 힘 정보 추출을 통한 제어 기술의 심화 연구

Input  $M(t)$

Full wave Rectification:  $|M(t)|$

Log Transformation:  $\log(|M(t)|)$

Estimation  $S(k)$  using ICA algorithm where  $S(k) = \log(\sigma(F))$

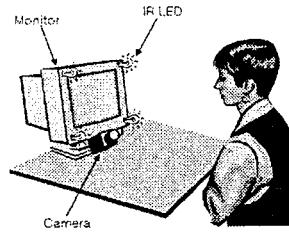
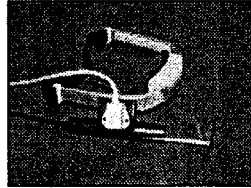
Calculation:  $\hat{\sigma} = \text{Exp}(S(k))$



## 연구 내용 (4)

### ■ 아이 마우스(Eye-mouse) 시스템

- 눈동자 및 머리의 움직임을 이용한 작업 기능



## 연구 내용 (5)

### ■ 햅틱 수트(Haptic Suit)

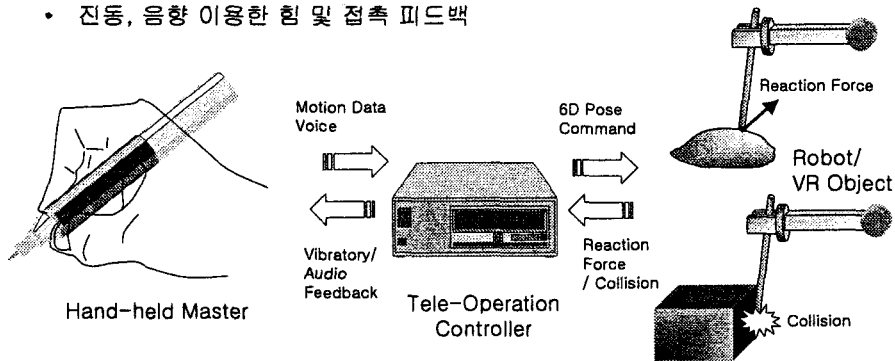
- 몸의 움직임을 이용한 제어기능



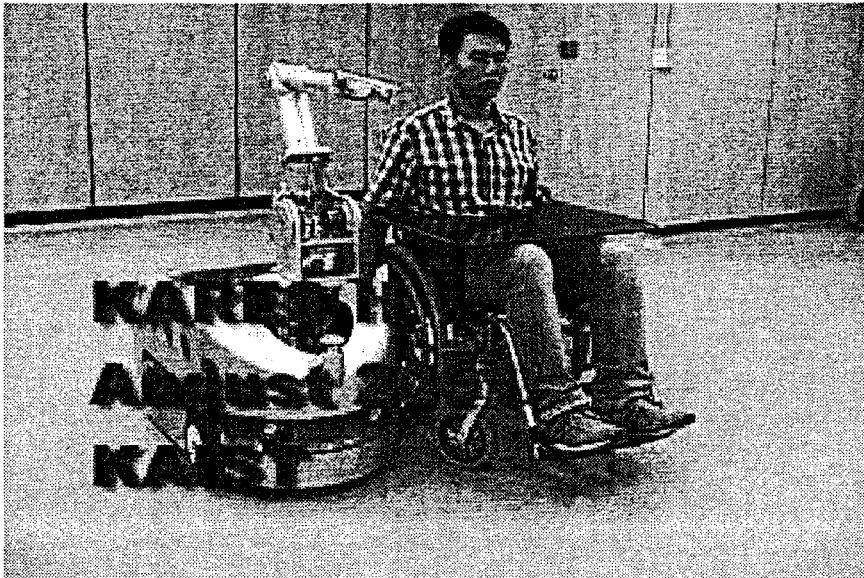
## 연구 내용 (6)

### ■ 관성센서 장착 휴대용 입력장치

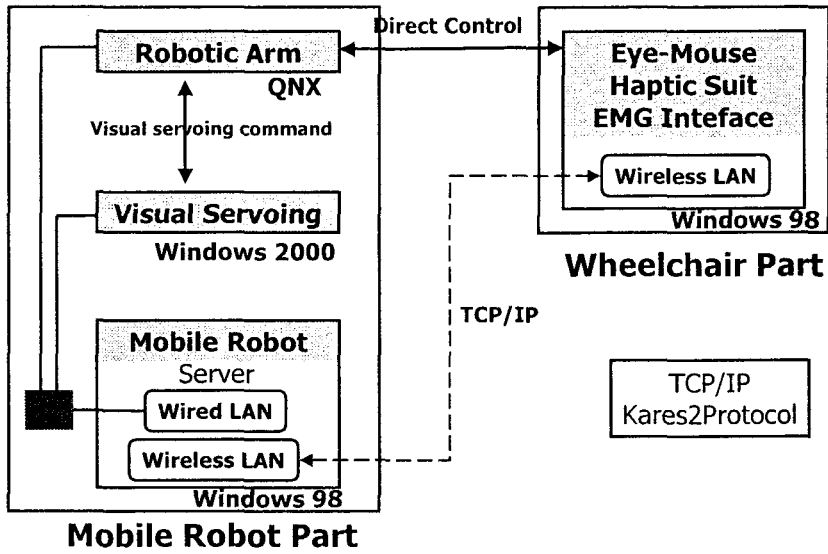
- 6차원 운동명령 가능, Intuitiveness 증가, 공간 및 구조제한 감소
- 소형화, 경량화, Pen형 외관
- 3축 가속도 센서, 3축 자이로 기본 이용
- 진동, 음향 이용한 힘 및 접촉 피드백



## 전체 시스템 외관

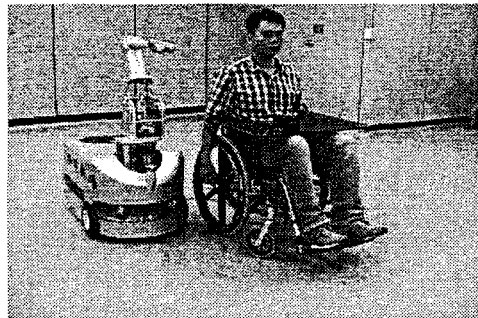


## 전체 시스템 개념도



## 이동 로봇 (로봇팔, 비주얼 서보잉)

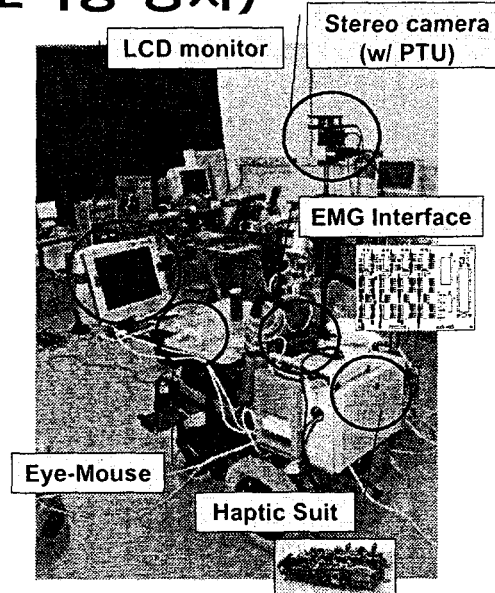
- 기능
  - 2 휠 메커니즘 (not omni-directional)
  - 원격제어 기능 (not autonomous)



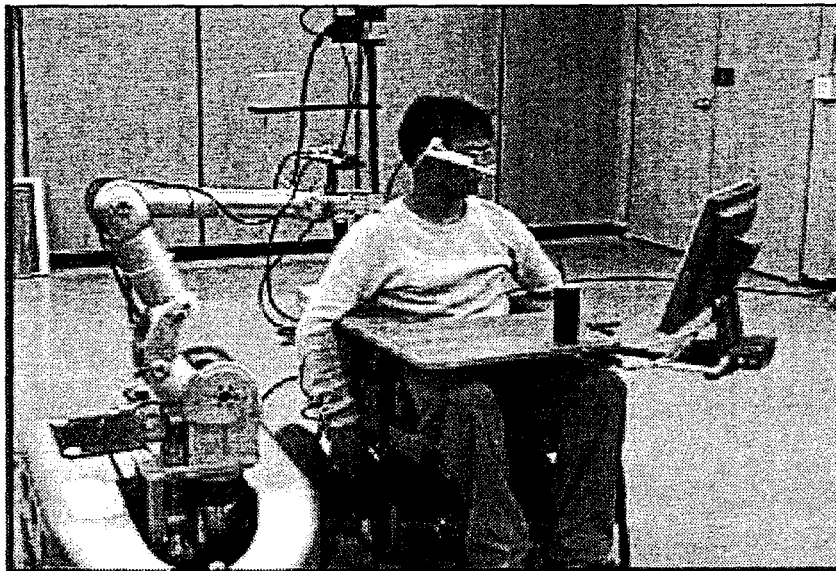
- 사양
  - 크기(mm): 536×500×920 (W×H×L)
  - 최대 적재가능량: 80kg
  - 전력소모: 2kWh (for Robotic Arm and PCs)
  - 최대 속도: 0.5m/sec

## 휠체어 (각종 상호작용 장치)

- 전동휠체어
  - 5 스위치 모듈 채용
- LCD 모니터 (Display)
- 스테레오 카메라
  - Pan-Tilt 기능
  - 3D 위치 추출
- 중앙 제어용 PC
- 각종 상호작용 장치
  - Eye-Mouse
  - EMG Interface
  - Haptic Suit



## 기본작업: 물마시기



## 지능형 비주얼 서보잉과 근전도 신호 인식 기술을 이용한 재활 로봇의 제어 기술

### Control of Rehabilitation Robot KARES II using Intelligent Visual Servoing and EMG signal recognition

변증남(Zeungnam Bien)<sup>1</sup>, 김대진(Dae-Jin Kim)<sup>1</sup>, 한정수(Jeong-Su Han)<sup>1</sup>,  
이형욱(Hyong-Euk Lee)<sup>1</sup>, 김종성(Jong-Sung Kim)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술원(KAIST), <sup>2</sup>전자통신연구원(ETRI)

Email: zbien@ee.kaist.ac.kr

#### 요약

This paper provides an introduction to the overall structure of a new wheelchair-based robotic arm system, KARES II, and its human-robot interaction technologies which assist independent life of the elderly and the disabled that have disadvantages to sensory and motor functions of their limbs. First of all, the tasks of a robotic arm are specified. Next, the input/output relation of several interaction technologies, such as an eye-mouse, a haptic suit, bio-signal recognition, and visual servoing, is described under two essential factors: one is intention reading of the user, and the other is autonomous capability of the robot. Among those technologies, we concentrate on visual servoing and bio-signal recognition. Visual servoing is a good solution for reducing the burden of a user in a wheelchair with a robotic arm. It is found that visual servoing using space variant vision has several merits in an eye-in-hand configuration. Object recognition for human faces and some objects is mentioned in space variant vision. For intelligent visual servoing, a capability to extract user's intention from facial expression is also included. A new small sized visual head with two miniaturized cameras for stereovision is designed and implemented to get depth information for visual servoing. In bio-signal recognition part, we propose new force extraction algorithm based on ICA (independent component algorithm) algorithm. We described the development of the powered wheelchair controller for the highly disabled person.

#### 1. 서론

재활 로봇은 증가되고 있는 고령자와 장애인의

재활을 위한 로봇 기술의 적용과 관련된다. 재활 로봇은 로봇공학(Robotics)과 재활공학(Rehabilitation Engineering) 사이에서 나타난 분야로, 로봇공학 측면에서 서비스로봇에 해당되며, 재활공학 측면에서는 보조장치(Assistive Device)중의 하나에 속한다. 재활 로봇은 고령자와 장애인의 매일의 일상생활을 보조하는 것을 목적으로 한다. 따라서, 재활 로봇의 주요한 역할은 고령자와 장애인의 삶의 질을 향상시키는 동시에 독립적 생활을 지원하는데 있다.

재활 로봇은 경제적인 이점을 가진다. 한국의 경우 65 세 이상의 인구가 2010년에는 전체 인구의 10%에 도달할 것으로 추정된다[NSO, 1996]. 유사하게, 후천적 원인에 의한 장애인도 교통 사고의 증가와 의료기술의 향상에 의하여 증가하고 있다. 대부분의 고령자와 지체 장애인은 일상 생활에 있어 보조자의 도움이 필요하다. 최근, 장애를 가진 인구의 증가와 함께 건강 간호(Health Care)를 위한 전체 비용이 증가되는 추세에 있다. 재활 로봇은 보조자의 역할을 대신함으로써 전체 건강 간호 비용을 줄일 수 있다. 그러므로, 산업용 로봇 시장이 포화 되는 추세에 있음에도 불구하고, 재활 로봇은 가까운 미래에 큰 시장규모를 형성하게 될 것이다.

재활 로봇은 이동성에 따라 작업장 기반 시스템(Workstation-based System)과 이동형 플랫폼/휠체어 기반 시스템(Mobile Platform/Wheelchair-based System)의 두 종류로 나눌 수 있다[Erlandson, 1995]. 작업장 기반 시스템은 컴퓨터에 의한 워드 프로세서 작업과 같은 일반적인 사무 환경을 돕는 데 주로 사용된다. 로봇과 다른 보조 장치가 특정한 작업 환경을 위하여 필요한 부분에 부착된다. 작업장 기반 시스템은 사용자에게 사무실과 비슷한 환경에서 직업의 기회를 갖도록 해 줄 수 있다. 단, 작업장 기반 시



시스템은 사용자에게 이동 능력을 제공해 주지 못하는 단점을 가지고 있다. 하지만, 로봇 팔이 장착된

서 사용자와 로봇이 함께 존재한다는 특징이 있다. 이러한 경우, 사용자는 로봇 팔과 편리하고 안전한

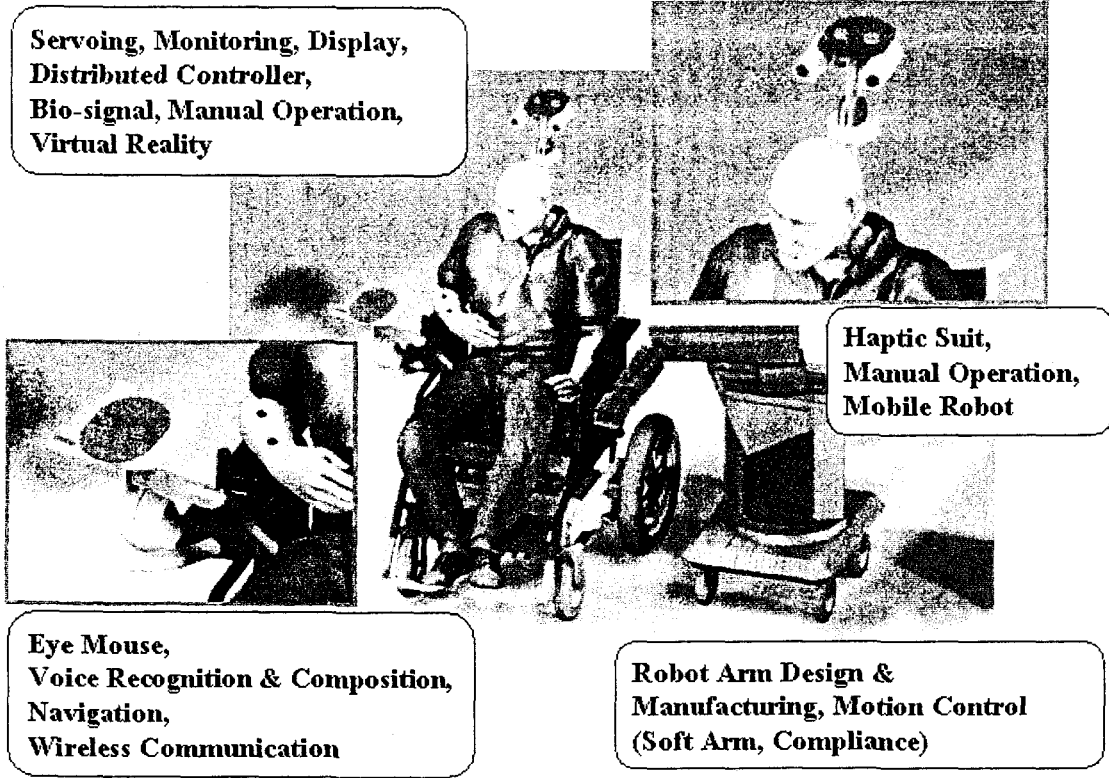


그림 1 휠체어 기반 로봇 팔 시스템과 인간-로봇 상호작용 기술

이동형 플랫폼/휠체어 등과 같은 이동형 플랫폼/휠체어 기반 시스템은 이동능력과 조작능력을 동시에 제공할 수 있다. 예를 들어, 휠체어 장착 로봇 팔인 MANUS[Kwee, 1998]는 1984년 네덜란드에서 연구 개발되기 시작하여, 1991년에 시작품(Prototype)이 만들어 졌으며, 현재 네덜란드의 Exact Dynamics 사에서 판매되고 있다. 또한, KARES (KAIST Rehabilitation Engineering Service system) [Dallaway, 1995]는 고령자 및 장애인의 보조자 없는 독립적인 일상생활을 돕기 위하여 1996년부터 개발되었다. KARES는 몇 가지 자율 작업을 반구조화 환경(Semi-structured Environments)에서 비전 센서와 힘 센서의 상호 보완적인 형태로 사용하면서 수행할 수 있다.

휠체어 기반 로봇 시스템(Wheelchair-based Robotic System)은 주로 팔과 다리의 감각과 운동 기능이 완전하지 않은 고령자와 장애인을 돕기 위한 것이다. 이런 시스템은 전동 휠체어와 로봇 팔로 이루어지며, 휠체어를 통한 이동능력과 로봇 팔을 통한 조작능력을 동시에 제공할 수 있으며, 동일한 환경 안에

방법으로 상호 작용하는 것이 필요하다. 그러나, 현존하고 있는 재활 로봇에서는 인간-로봇 상호 작용과 관련하여 다양한 문제점이 존재한다. 예를 들어, 지체 장애인은 세밀한 로봇 팔의 동작에 대해서 자유롭게 조이스틱 또는 버튼을 사용하고자 할 때 어려움을 느끼게 되며, 로봇 팔의 수동 제어는 상당한 인지적 부담을 가지게 된다[Song, 1999]. 더욱이, MANUS 평가 사용자에게 의하면, 재활 로봇을 사용하는 데 작은 로봇 움직임에 대하여 너무 많은 명령이 필요하고, 시작할 때 기억해야 기능이 너무 많다는 것을 불편한 점으로 제시하고 있다 [Efring, 1999]. 그러므로, 인간 친화적인 인간-로봇 상호작용 기술은 휠체어 기반 로봇 팔 시스템에서 핵심적인 기술중의 하나이다.

본 논문에서는 고령자와 장애인을 위하여 개발되고 있는 휠체어 기반 로봇 시스템을 살펴보고, 그림 1과 같은 여러 가지 인간-로봇 상호작용 기술의 연관 관계에 대하여 토의할 것이다. 인간-로봇 상호작용 기술 중에서 비주얼 서보잉, 근전도 신호 인식 등이 주요 논제로 다루어 질 것이다. 제 2 절에서는

새로운 휠체어 기반 로봇 팔 시스템인 KARES II (KAIST Rehabilitation Engineering Service system II)의 전체 시스템 구조를 기술하고, 로봇 팔의 작업을 정의할 것이다. 제 3 절에서는 비주얼 서보잉에 의한 인간-로봇 상호작용에 대하여 상술한다. 비주얼 서보잉은 로봇 팔에게 자율적인 능력을 부여한다. 비주얼 서보잉을 구현하는 데 존재하는 몇 가지 문제점에 대하여 공간변화비전을 이용하여 접근한다. 제 4 절에서는 근전도 신호를 이용한 로봇 팔 제어에 대하여 다룬다. 마지막으로, 제 5 절에서 결론을 맺는다.

## 2. 새로운 휠체어 기반 로봇 팔 시스템과 인간-로봇 상호작용 기술

앞에서 언급한 바와 같이, 휠체어 기반 로봇 시스템에서는 인간과 로봇 팔은 상호간에 밀접한 관계를 가지며 인간-로봇 상호작용 기술은 사용자와 로봇 팔의 작업에 의존한다. 따라서, 시스템의 실제 사용 대상자 및 새로운 휠체어 기반 로봇 팔 시스템을 위한 인간-로봇 상호작용 기술에 대하여 기술한다.

### 2.1 사용자

휠체어 기반 로봇 팔 시스템의 주요 사용자는 팔과 다리의 감각 및 운동 기능이 불편한 고령자와 장애인이다. 때때로, 필요에 따라 편마비(Hemiplegia)인 고령자가 휠체어 기반 로봇 팔 시스템의 사용자가 될 수 있다. 특히, 여러 종류의 장애인 중에서 척수손상 장애인(People with Spinal Cord Injury)이 주된 사용자가 될 수 있다. 척수손상의 의학적 정의는 손상이 발생한 위치와 완전 또는 불완전 손상과 같은 손상정도에 따른다[Nemire, 1994]. 완전 손상의 경우는 신경 충동(Nerve Impulse)이 손상된 영역을 전혀 통과 할 수 없는 경우를 가리키며, 불완전 손상의 경우는 척수의 일정한 지역으로는 신경 충동이 지나가고 다른 영역으로는 신경 충동이 지날 수 없는 경우를 가리킨다. 완전 손상의 장애인은 손상된 척수 위치 아래 쪽에 해당하는 운동 및 감각 기능을 가지지 못한다. 만약 척수의 윗부분인 목(Cervical 또는 C) 근처에서 손상이 일어난다면, 그 사람은 팔 뿐만 아니라 다리까지 움직일 수 없게 되며, 이를 사지 마비(Quadriplegia)라 한다. 예를 들어, C-5 부분에 손상이 있는 사람은 목과 어깨를 움직이는 것과 팔꿈치 구부리는 것만 가능하다. 어깨의 움직임으로 팔을 움직일 수는 있지만, 어깨로 큰

힘을 지탱할 수 없고, 가벼운 경련(Spasticity)이 일어날 수 있다. 또한, 손목, 팔목, 손가락을 펼 수 없고, 손가락을 굽힐 수도 없다. 특히, C-2 에서 C-4 척수 손상 장애인은 단지 눈, 얼굴, 입, 머리의 운동만을 할 수 있다. 그들은 손, 팔, 다리를 사용할 수 없다. 전통적인 재활 치료를 통하여 이러한 사람들에게 독립적인 능력을 부여하는 것은 몹시 힘들다. 그러므로, 삶의 질의 향상과 함께 독립성을 부여해 줄 수 있도록 재활 로봇과 같은 특수한 공학적 시스템이 필요하다.

### 2.2 로봇 팔의 작업

휠체어 기반 로봇 팔 시스템의 작업은 장애인 고용공단과 C-4 및 C-5 손상의 척수손상 장애인과의 인터뷰를 통하여 정해 졌다. 로봇 팔을 통하여 일상 생활에서 실제 필요한 13 가지 작업을 조사하였다.

- 복부 두드리기.
- 식사 하기.
- 음료수 마시기.
- 면도 하기.
- 수건으로 얼굴 닦기.
- 바닥에서 물건 줍기.
- 스위치 켜고 끄기.
- 문 열고 닫기.
- 게임하기
- 서랍속의 물건 꺼내기
- Printer, Fax 의 용지 제거
- CD 교환
- 차(Tea) 만들기

복부 두드리기는 종종 장애인의 소변 누는 것을 돕기 위한 작업이다. 수건으로 얼굴 닦기는 얼굴 근처의 가려움을 감소시키기 위한 것이다. 식사 및 음료수 마시는 음식을 먹거나 음료수를 마시기 위한 기본적인 작업이다. 바닥의 물건 줍기는 휠체어를 탄 상태에서 손의 움직임이 불편한 사용자에게 매우 어려운 일이며 사용자가 책상이나 입에서 물건을 떨어뜨렸을 때 자주 사용될 수 있다. 스위치를 켜고 끄는 것은 조명 기구의 스위치를 조작하는 데 도움이 된다. 로봇 팔을 통한 문 열고 닫기는 사용자에게 휠체어를 타고 여러 방을 방문할 때 사용될 수 있다. 만약 로봇 팔이 사용자에게 이러한 정의된 작업을 수행 할 수 있도록 도울 수 있다면, 고령자 및 장애인에게 부분적으로나마 독립성을 부여할 수 있을 것이다. 그 밖의 작업은 앞에서 정의된 작업의 조합을 통해 확장할 수 있다.

### 2.3 인간-로봇 상호작용 기술

지능적인 인간-로봇 상호작용 기술에서 사용자 의도 파악(Intention Reading)과 로봇 팔의 자율동작 능력(Autonomous Capability)은 두 가지 중요한 요소이다. 첫째, 사용자 의도 파악은 사용자에게 생체신호 또는 눈의 움직임 등을 이용하는 아이-마우스(Eye-mouse) 등을 통하여 로봇 팔에게 명령을 전달하는 것과 관련된다. 둘째, 로봇 팔을 제어하기 위한 자율동작 능력은 센서 피드백을 통하여 사용자의 명령을 수행하는 것과 관련된다. 특정한 작업에 대한 로봇 팔의 자율적인 동작은 사용자에게 재할 로봇을 쉽게 쓸 수 있도록 해 준다. 전형적인 예로서 비주얼 서보잉(Visual Servoing)과 순응 제어(Compliance Control)를 들 수 있다.

사용자의 의도는 소리, 음성, 손의 움직임, 몸의 움직임, 생체 신호, 눈의 움직임, 얼굴 표정 등의 다양한 수단을 통하여 파악될 수 있다. 현재 햅틱 슈트(Haptic Suit)[Lee, 2000], 생체신호 인식(Bio-signal Recognition)[Han, 2000], 아이-마우스[Yoo, 2000] 등의 다양한 인간-로봇 상호작용 기술을 개발하고 있다. 사용자의 장애 정도에 따라서 적절한 기술들은 상층적 또는 상보적인 방식으로 선택될 수 있다. 로봇 팔의 순응 제어는 사용자의 안전성을 보장하기 위한 것으로, 특히, 작업 도중에 사용자의 몸과 로봇

팔이 충돌하는 것을 막기 위한 목적으로 사용된다. 그 밖에 제 3 절에서 주로 다루어 질 비주얼 서보잉 기술은 시각 정보의 피드백을 이용하여 로봇 팔이 제어 될 수 있도록 하는 역할을 하고 있다.

그림 2 는 인간-로봇 상호작용을 위한 모듈 형태의 서브 시스템에 대한 입/출력 관계를 나타내고 있다. 예를 들어, 사용자에게 음식을 제공하는 작업은 다음과 같은 순서로 수행될 수 있다. 첫째, 아이-마우스는 사용자의 눈의 움직임을 통해 사용자의 의도를 파악하고 원하는 음식의 위치 등과 같은 필요한 정보를 비주얼 서보잉 모듈에 전달한다. 다음으로, 비주얼 서보잉 모듈은 로봇 팔을 제어하여 음식을 손가락을 이용하여 뜨고 사용자의 입 근처로 접근 시키게 된다. 결과적으로, 작업을 성공적으로 수행하기 위해서 사용자의 의도 파악 및 로봇 팔의 자율 능력이 적절하게 사용되었다.

### 3. 지능형 비주얼 서보잉(Intelligent Visual Servoing)

다양한 인간-로봇 상호작용 기술 중에서, 비주얼 서보잉은 시각 피드백을 이용하여 목표물에 대한 로봇 팔의 말단부(End-effector)의 자세(3 차원 위치와 방위)를 제어하는 것을 의미한다.

기존의 작업장 방식의 재할 로봇 시스템에서의

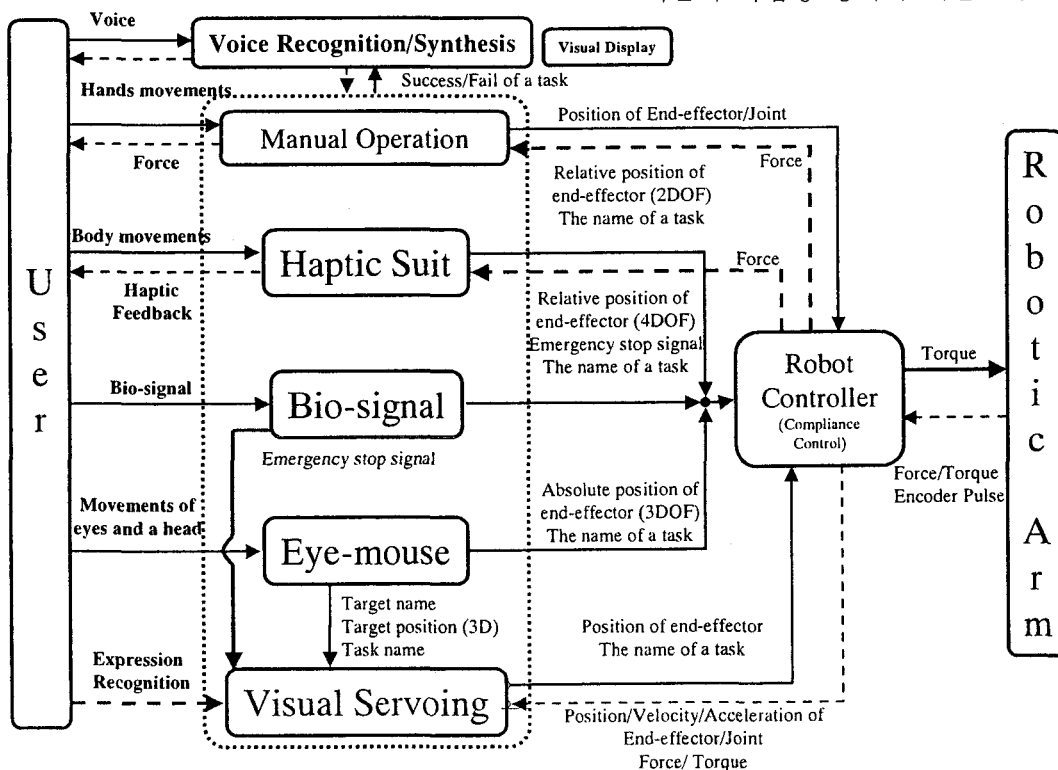


그림 2 인간-로봇 상호작용을 위한 서브시스템에서의 입출력 관계.

시각 기반 제어의 몇몇 사례를 찾아 볼 수 있다 [Peters, 1996][Chen, 1998][Tsotsos, 1998].

반면, 휠체어 기반 로봇 팔에서 비주얼 서보잉은 많은 어려운 점을 가지고 있다 [Song, 1999]. 몇 가지만 언급하자면, 실시간에 시각 정보를 처리 하기 어렵다는 점, 변화하는 조명환경에 둔감해야 한다는 점, 로봇 팔이 진동하는 상태에서 데이터를 처리해야 한다는 점 등이다.

본 논문에서 다루고 있는 재활 로봇 KARES II 는 생체 시각 시스템에 기인한 비전 시스템, 아이-인-핸드 구성(Eye-In-Hand Configuration) 카메라, 주변 환경 변화에 둔감한 영상 처리 기법 등을 이용하여 이러한 문제를 해결하고자 한다. 특히, 비전 센서를 이용한 로봇 팔의 자율제어 및 사용자 의도파악을 통하여 사용자에게 사용의 편의성 및 안전성을 제공하고, 이를 바탕으로 인간 친화적인 인간-로봇 상호작용이 가능하도록 하는 이른바 ‘지능형 비주얼 서보잉 기술’의 개념이 제안·적용되었다(그림 3).

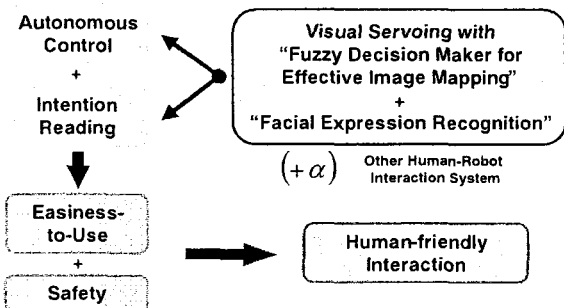


그림 3 지능형 비주얼 서보잉 기술의 개념도

생체 시각 시스템에 기인한 비전 기술은 공간 변화 비전(Space variant vision)에 근간을 두고 있다 [Schwartz, 1995]. 로그-폴라 매핑(log-polar mapping)은 공간 변화 비전에서 가장 보편적으로 쓰이고 있는 기술로서, 관심이 있는 영상 영역에 대한 고해상도 영상, 넓은 시야, 빠른 영상 처리 속도와 같은 장점을 가진다 [Bolduc, 1998]. 로그-폴라 매핑은 식(1)과 식(2)를 통하여 주어진 영상이 카테시안 좌표(Cartesian Coordinate) 시스템  $(x, y)$ 에서 로그-폴라 시스템  $(\zeta, \eta)$ 으로 매핑되는 것을 의미한다.

$$\zeta = \log_k \left( \sqrt{x^2 + y^2} \right) = \log_k \rho \quad (1)$$

$$\eta = \arctan(y/x) \quad (2)$$

그림 4 는 로그-폴라 매핑을 통하여 변환된 영상이다. 매핑된 영상의 크기가 상당히 작음에도 불구하고

하고 관심 있는 영역의 정보는 유지됨을 알 수 있다. 또한, 폴라 좌표 시스템의 위상학적 특징 때문에 크기와 회전에 대한 불변 특성을 가진다.

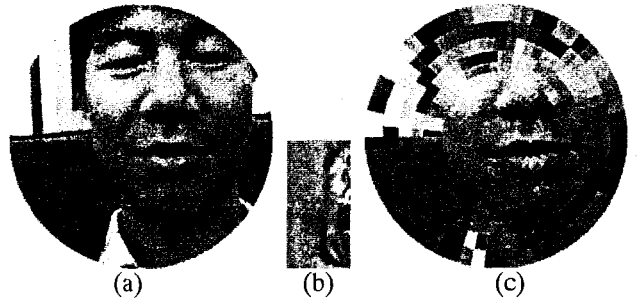


그림 4 로그-폴라 모델에 의한 영상의 변환 (a) 입력 영상(Retinal Plane, 180,916 pixel) (b) 로그-폴라 영상(Cortical Plane, 2,048 pixel) (c) 재구성된 로그-폴라 영상(Retinal Plane)

### 3.1 지능형 비주얼 서보잉을 이용한 휠체어 기반 로봇 팔의 핵심 작업

비주얼 서보잉의 정확한 적용을 위해, 앞의 제 2 절에서 정의된 13 가지 작업을 몇 가지 세부 작업으로 나누어 분석하였다 [Song, 2001]. 이러한 과정을 통해 비주얼 서보잉을 위한 가장 중요한 세부 작업은 “물체 잡기”와 “사용자의 입에 물체 접근 시키기”로 정하였다. 특히, “사용자의 입 근처로 컵 이동 시키기” 세부 작업의 경우, 로봇제어 및 시각정보 처리, 사용자 얼굴 표정 인식 기능 등이 복합적으로 작용하여 모든 작업을 수행함에 있어서 가장 핵심적이며 중요한 작업이다.

또한 “물체 잡기” 작업의 경우, 모든 작업의 선행 작업이 될 뿐만 아니라 인간-로봇 공동작업의 여지가 다분한 세부 작업이 된다. 본 논문에서는 지능형 비주얼 서보잉 구현을 위해 “물체 잡기” 작업에 있어서 추가적인 하드웨어 및 방법에 관해 기술한다.

### 3.2 시스템 구성

비주얼 서보잉에서 핵심적인 기능은 비접촉상태에서 외부환경으로부터 대상물체의 자세정보를 효율적으로 얻는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 아이-인-핸드 구성(Eye-in-hand Configuration)을 적용한 재활 로봇 KARES II 를 그 대상으로 한다 [Bien, 2000].

또한 두 개의 카메라를 사용하는 양안 시각

(Binocular Vision)은 일안 시각(Monocular Vision)을 사용하는 것에 비하여 많은 장점을 가지고 있다[Song, 2000a]. 현 시스템은 두 카메라로부터 들어오는 영상의 로그-폴라 변환 영상에서 칼라, 움직임, 정규화된 상호관계 등의 여러가지 정보를 이용하여 물체에 대한 정보를 추정하고 있다[Song, 2000b]. 물체 및 얼굴의 인식/추적 과정은 3.3 절에서 다루어질 것이며, 3.4 절에서는 아이-인-핸드 구성의 소형 카메라 헤드에 관해 언급할 것이다. 또한, 3.5 절에서는 센서 융합 및 인간-로봇 공동작업에 기반한 비주얼 서보잉 기술에 대하여 기술한다.

### 3.3 물체 및 얼굴 인식/추적

#### 3.3.1 물체 및 얼굴 인식

본 논문에서는 작업 대상 물체 및 얼굴 인식을 위해서 컬러 정보에 기반한 인식 방법을 사용하였다. 컬러 정보를 표현하기 위한 컬러 공간은 여러가지가 있으나, 본 논문에서는 작업 대상 물체의 인식을 위해서는 정규화된(Normalized) RGB 컬러 공간(rgb)을 사용하였다.

$$r = \frac{R}{R+G+B}, g = \frac{G}{R+G+B}, b = \frac{B}{R+G+B}$$

또한, 작업 대상 물체는 이러한 컬러 공간의 특성을 효과적으로 표현할 수 있도록 R, G, B 컬러를 이용하여 구성된다.

사용자 얼굴의 인식을 위해서 본 논문에서는 기존에 많이 사용되던 HSV(혹은 HLS) 컬러 공간 대신에 I1I2I3 컬러 공간을 사용한다[Ohta, 1980].

$$I1 = \frac{(R+G+B)}{3}, I2 = \frac{(R-B)}{2}, I3 = \frac{2G-(R+B)}{4}$$

이 경우, 기존의 다른 컬러 공간에 비하여 특별히 얼굴 영상 인식에 있어서 많은 이점을 얻을 수 있다. 표 1 은 다양한 얼굴 영상에 대한 피부색(Skin Color) 추출 성능 비교 실험 결과를 보이고 있다.

표 1 다양한 컬러공간에 대한 피부색 추출 결과

	rgb	HSL	I1I2I3	YCrCb
C (%)	88.4	88.4	91.8	91.7
SE (%)	2.5	3.1	3.0	2.9
NSE (%)	9.1	8.5	5.2	5.4

여기서, C(Percent Correct)는 정확히 구분된 픽셀(Pixel)의 퍼센티지(Percentage), SE(Skin Error)는 피부

가 아닌 픽셀이 피부로 구분된 퍼센티지, NSE(Non-skin Error)는 피부인 픽셀이 피부가 아닌 것으로 구분된 퍼센티지를 의미한다.

얼굴 영상의 경우, 컬러 정보를 다루기 위해서는 다양한 방법이 존재한다. 얼굴 영상에 대한 컬러 정보를 부분적으로 모델링하는 방법[Yang, 1997], 시간적 추이에 따라 컬러 정보의 변화량을 보간하는 방법[Raja, 1998] 등이 대표적이다. 본 논문에서는 이러한 기존의 방법들에서 장점을 잘 혼합한 새로운 방법으로써, 컬러 히스토그램 기반 적응형 임계치(Color Histogram based Adaptive Threshold; 이하 CHAT) 기법을 제안하고 이를 얼굴 영상의 인식에 적용하였다.

이 기법에서는 조명 변화가 심한 경우, 얼굴의 움직임은 거의 없다는 가정을 하고 있으며, 실제로 주변 조명의 급격한 변화에 대하여 사용자는 여러 가지 요인으로 인하여 거의 움직임을 보이지 않게 될 것이다. 그림 5 는 CHAT 기법에 대한 간략한 기술을 위한 것이다. 우선, 초기에 입력된 영상은 최초의 CHAT\_Mask 와 병합되어 초기 임계치를 결정한다(그림 5(a)). 이후, 연속적으로 입력되는 영상에 대하여 얼굴 분할에 오류가 없을 경우 현재 분할된 Mask 영상을 CHAT\_Mask 로 갱신하게 된다(그림 5(b)). 만약, 얼굴 분할에 오류가 있을 경우에는 CHAT 기법을 이용하여 새로운 임계치를 결정하게 된다(그림 5(c)).

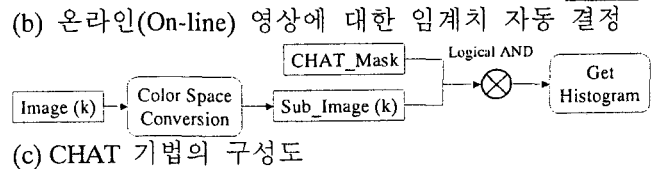
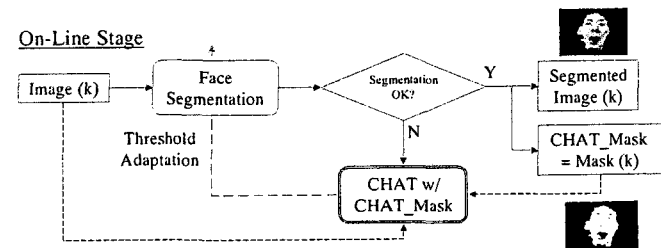
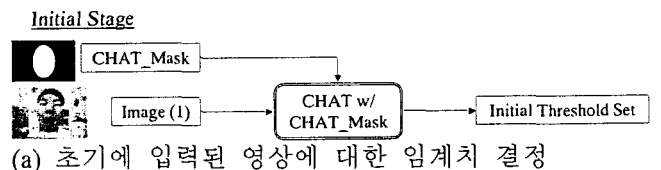


그림 5 CHAT 기법에 기반한 얼굴 영상 분할

제안된 CHAT 기법은 이미 추출된 얼굴 영상의 컬러 히스토그램 분석을 통해 간단한 과정을 이용하여 시간적으로 변화하는 컬러 정보의 모델링을 수행한다.

현재 움직임 정보의 추가를 통한 보다 효율적인 얼굴 영상 인식 기법에 대한 연구가 활발히 진행중이다.

3.3.2 물체/얼굴 영상의 센터링(추적)

본 논문에서는 물체/얼굴 영상의 센터링 및 추적을 위해 공간 변화 비전 및 Weiman 등이 제안한 알고리즘을 적용하였다.

Weiman의 알고리즘은 공간 변화 비전으로 매핑된 영상에서의 특징치(Dip 혹은 Bulge 특징)를 이용하여 카메라의 위치(본 논문에서는 로봇팔의 위치)를 조정함으로써 비주얼 서보잉 작업을 수행한다 [Weiman, 1989].

좀 더 효율적인 물체/얼굴 영상의 추적을 위해 본 논문에서는 새로운 공간 변화 비전 기술로써 개선된 로그-폴라 매핑(Modified Log-Polar Mapping) 기법을 제안한다 [Song, 2001]. 이 기법은 기존의 로그-폴라 매핑이 중심부 영상에 많은 가중치를 둔 것과 달리, 주변 영상에 많은 가중치를 두는 것이 특징이다. 이 경우, 물체/얼굴 영상의 빠른 움직임에도 효과적으로 대처할 수 있다(그림 6).

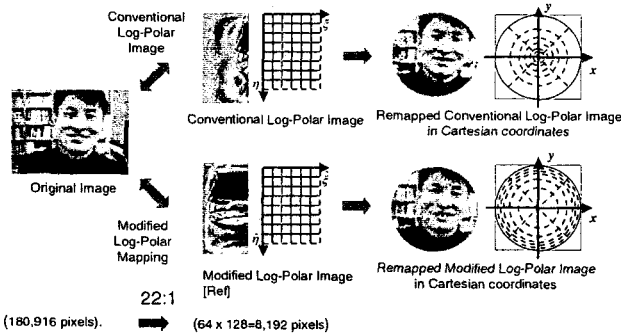


그림 6 LPM 영상 및 MLPM 영상의 비교

성공적인 비주얼 서보잉을 위해서는 로봇 제어, 영상 처리, 의사 결정(Decision Making)의 세 모듈의 조화가 필요하다(그림 7).

효율적인 영상 매핑을 위하여 퍼지 의사 결정기(Fuzzy Decision Maker)를 제안하고, 기존의 로그-폴라 매핑(LPM), 카메라에서 가까운 목표물을 다루기 위해 새롭게 제안된 개선된 로그-폴라 매핑(MLPM), 그리고 단순히 영상의 크기를 줄이는 균등 부샘플 매핑(Uniformly Subsampled Mapping: USM)을 상황에 맞게 효율적으로 적용하였다 [Song, 2001].

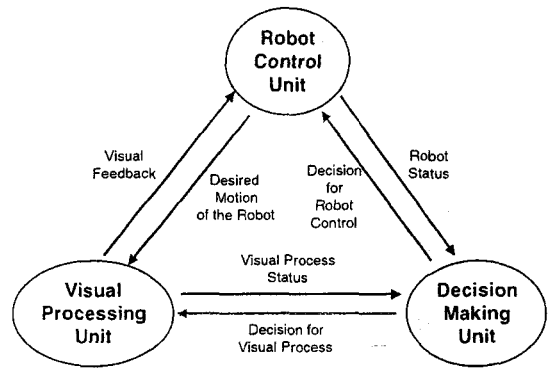


그림 7 로봇 제어, 영상 처리, 의사 결정 모듈

주어진 작업에 대한 정밀 분석 및 시뮬레이션을 통하여 표 2와 같은 퍼지 규칙을 얻을 수 있었다.

표 2 퍼지 의사 결정기를 위한 퍼지 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

퍼지 의사 결정기의 전건부 조건(IF condition)은 (1) Horn의 Optical Flow를 이용한 카메라에 대한 물체의 Velocity, (2) 전체 영상면적에 대한 피부색 컬러 면적의 비를 이용한 얼굴의 Detection Level (=얼굴영상면적/전체영상면적), (3) 이 접운동을 통한 초기 심도 정보를 기준으로 로봇 팔의 이동치를 이용하여 추정된 물체의 심도 정보가 사용되었으며, 후건부 조건(THEN condition)은 MLPM, LPM, USM의 세 종류의 매핑이 사용되었다 [Song, 2001].

퍼지 의사 결정기를 통한 비주얼 서보잉 기법을 정의된 시나리오인 '입 근처로 로봇 팔이 접근하는 작업'에 적용하였다. 비주얼 서보잉을 위한 Vision PC와 로봇 제어를 위한 Robot PC는 TCP/IP를 이용하여 연결되고 각 PC의 프로그램은 다중쓰레드(Multi-threads) 기법을 사용하여 구현하였다(그림 8).

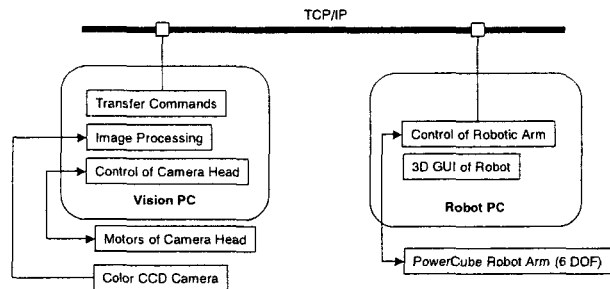


그림 8 비주얼 서보잉 시스템의 하드웨어 구성도

본 논문에서 실제 로봇의 제어는 영상 기반 비주얼 서보잉(Image-based Visual Servoing) 방법을 적용하였으며, 다음과 같은 가정을 근간으로 하였다.

- 실제 로봇 팔은 6 DOF 이지만 2 DOF 은 작업 대상 물체의 방위를 유지하기 위해서 사용되므로 나머지 4 DOF 만 주로 제어된다.
- Foreground Color 는 Background Color 에 비하여 다른 Color 를 가진다.
- 카메라 앞에는 장애물이 없어서 두 카메라는 비슷한 영상을 얻을 수 있다.
- 로봇 팔의 움직임은 특이점(Singular Points)이 없는 작업 공간 내로 한정된다.

제안된 방법을 이용하여 실제 사용자의 얼굴 및 얼굴 형상의 모형을 대상으로 한 비주얼 서보잉 실험을 수행한 결과(그림 9), Centering 작업에서  $\pm 10\text{mm}$  ( $=\pm 10$  pixel)이하의 오차를 얻을 수 있었다. 또한, 영상처리에 있어서도 15 frames/sec 이상의 고속 영상처리가 가능하였다.

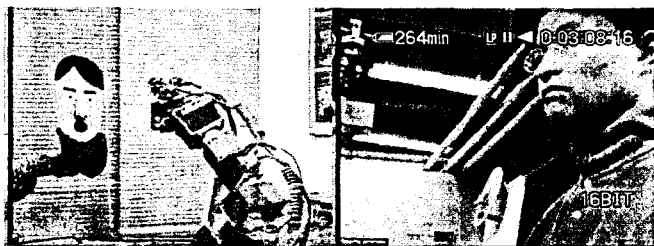


그림 9 사용자 얼굴 및 얼굴 모형을 대상으로 한 비주얼 서보잉 (얼굴 인식/추적 실험)

특히, 근접한 물체의 경우 LPM 을 이용한 경우에 비하여 MLPM 을 이용할 경우 더 자세한 정보를 얻을 수 있었다. 그림 10 은 얼굴 인식/추적 실험에 대한 결과를 보이고 있다.

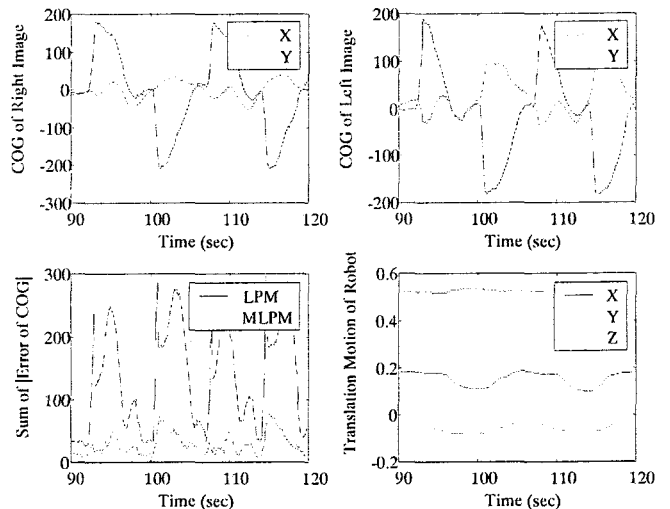


그림 10 얼굴 인식/추적 실험 결과

여기서, 좌상단은 오른쪽 영상에서의 무게중심(Center-Of-Gravity; 이하 COG), 우상단은 왼쪽 영상에서의 COG, 좌하단은 LPM, MLPM 을 각각 사용한 경우의 COG 오차합, 우하단은 3 차원 공간 상에서의 로봇팔의 움직임 경로를 보이고 있다.

### 3.3.3 사용자에 대한 얼굴 표정 인식

인식된 얼굴 영상을 바탕으로 사용자에 대한 얼굴 표정 인식을 행함으로써, 본 논문에서 다루고자 하는 비주얼 서보잉은 사용자와의 상호 작용을 구현할 수 있다.

즉, 사용자의 얼굴 표정에서 현재 진행중인 서비스에 대한 만족도 여부, 현재 사용자의 심리 상태, 경우에 따라서는 건강 상태 등의 모니터링(Monitoring) 기능이 구현되는 것이다. 이러한 모니터링을 통하여 로봇은 지능적으로 사용자에 대한 봉사 기능을 수행할 수 있는 것이다.

여기서는 특별히, 사용자의 입 모양에 따른 간단한 의도 파악 및 7 가지 얼굴 표정(무표정 및 6 가지 보편적인 얼굴 표정: 행복, 슬픔, 공포, 화남, 놀람, 역겨움)에 대한 인식 문제가 다루어졌다.

얼굴 표정 인식을 위해서는 앞 절에서 언급된 얼굴 영상 인식 과정을 통해 얼굴의 대략적인 위치가 파악된 후, 얼굴 요소 인식 및 특징 추출을 통해 표정 인식 과정이 수행된다. 얼굴 요소 인식을 위해서는 에지(Edge) 정보 및 투영(Projection) 정보에 기반한 요소 추출 기법을 사용하였으며(그림 11), 특징 추출을 위해서는 가버(Gabor) 필터 특징이 사용되었다. 이때, 얼굴 영상은 얼굴 요소가 모두 추출되는 범위, 즉 정면 얼굴 영상을 대상으로 하였다. 제안

된 방법을 적용한 결과 얼굴 요소 추출이 제대로 되는 것을 확인하였다(그림 12(a)).

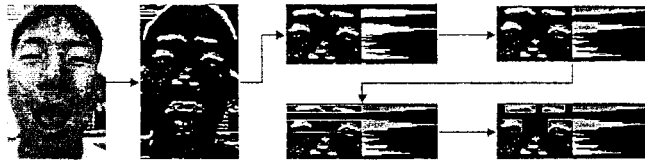
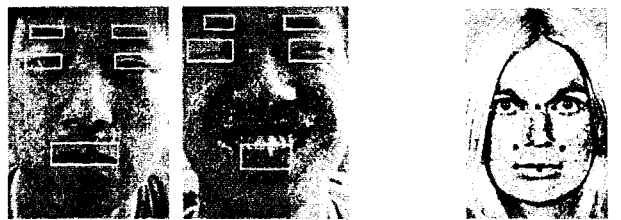


그림 11 수평/수직 투영 정보의 그룹화를 이용한 얼굴 요소 추출 방법



(a) 얼굴 요소 추출 결과 (b) 12 개 특징점 위치

그림 12 얼굴 요소의 추출 및 얼굴 특징점 위치

특징 추출을 위한 가버 필터는 그 크기와 방향에 따라서 다양한 응답을 얻을 수 있는데, 본 논문에서는 2 가지 크기(10×10, 13×13 픽셀), 4 가지 방향(0°, 45°, 90°, 135°)의 조합을 사용하였다(그림 12(b)).

이렇게 추출된 얼굴 특징을 이용한 표정 인식 실험을 위하여 얼굴 표정에 대한 표준 영상으로 많이 사용되는 Ekman's DB(110 가지의 얼굴 표정 영상 포함)를 이용하였다. 이것은 안정적인 표정 인식을 위하여 오프라인(Offline) 상에서 획득한 영상을 기반으로 인식 시스템 구성하고자 하는 의도이며, 제안된 방법의 가능성을 검토하고자 위함이다.

앞서 추출된 얼굴 특징(12 개의 특징점에 대한 각 8 개의 가버 필터 계수 = 96 개 특징)은 신경 회로망의 입력으로 사용되며, 신경 회로망은 96 개의 입력 노드, 7 개의 출력 노드 및 시그모이드(Sigmoid) 함수를 이용한 1 층의 은닉 노드(20 개)로 구성된다. 일반적으로 많이 사용되는 오차 역전파 학습 방법을 이용하였다.

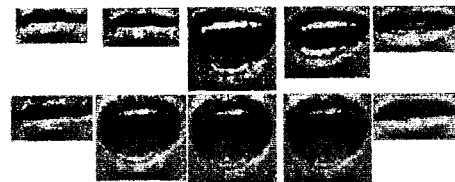
표 3 7 가지 표정에 대한 인식률

	행복	슬픔	공포	화남	놀람	역겨움	무표정
행복	13/18	1/0	0/0	2/0	0/0	1/0	1/0
슬픔	0/0	12/17	1/0	2/0	1/0	0/0	1/0
공포	0/0	0/0	11/15	1/0	2/0	0/0	1/0
화남	0/0	0/0	0/0	16/17	0/0	1/0	0/0
놀람	0/0	1/0	0/0	0/0	12/14	0/0	1/0
역겨움	0/0	1/0	0/0	0/0	1/0	13/15	0/0
무표정	0/0	0/0	1/0	1/0	0/0	0/0	12/14

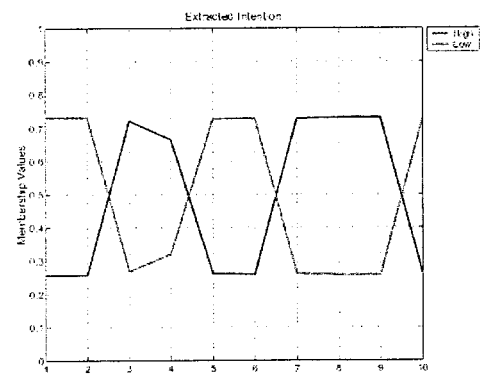
제안된 방법을 이용하여 7 가지 표정(무표정 및 Ekman 등이 제안한 보편적인 6 가지 얼굴 표정)에 대한 표정 인식 실험을 수행한 결과, 81.2%의 인식률을 획득하였다(표 3).

사용자 입 모양에 따른 의도 파악은 입의 개폐에 따라 현재 서비스에 대한 긍정/부정에 대한 정도를 추정하는 것이다. 이를 위하여 가버 필터 기반의 특징치가 제안되었으며, 퍼지 논리 및 신경 회로망 등이 이용되었다[Kim, 2001].

역시 제안된 방법을 이용한 긍정/부정에 대한 실험을 수행한 결과, 92.2%의 인식률을 얻을 수 있었다(그림 13, 표 4).



(a) 10 장의 연속된 입모양 영상



(b) 추정된 긍정/부정 의도 파악 결과

그림 13 연속된 10 장의 입모양 영상에 대한 긍정/부정 의도 파악 실험 결과

표 4 긍정/부정에 대한 인식 실험 결과

	긍정	부정
긍정	30/35	5/0
부정	1/0	74/75

### 3.4. 소형/경량의 카메라 헤드 설계 및 제작

#### 3.4.1 설계 요건

영상정보에 기반하여 물체를 추적하는 비주얼 서보잉(Visual Servoing)을 위해서는 목표 물체의 3 차원 공간상의 정보가 필요하다. 2 차원 평면 정보인 영상



으로부터 공간 정보를 얻기 위해서는 스테레오 카메라를 이용한 심도(Depth) 정보의 추출이 필수적이다. 여기서는 심도 추출이 가능한 이접운동용 카메라 헤드(Camera Head for Vergence)에 대해 살펴보기로 한다.

이접운동 제어가 가능한 기존의 카메라 헤드들의 경우 대부분 크고 무거워서 로봇 팔의 말단부(End effector)에 부착하는 아이-인-핸드 구성(Eye-in-hand Configuration)용으로 적합하지 못하다[Murray, 1992]. 따라서 주어진 목적에 맞는 카메라 헤드의 제작이 필요하다. 제작시 고려해야 할 사항들을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 경량/소형화 : 카메라를 비롯하여 움직임 장치의 무게가 증가하는 것은 로봇의 가반하중(Payload)의 감소를 야기시킨다. 아울러 크기의 증가는 로봇의 원활한 움직임을 저해하게 된다.
- (2) 최소의 백래시(Backlash) : 심도정보 추출시 정확도를 높이기 위해서 필수적인 사항이다.

### 3.4.2 기본적인 카메라 헤드의 제작

위의 사항들을 고려하여 이접운동과 틸트(Tilt) 운동이 가능한 움직임 장치 및 텐던(Tendon) 구동 구조를 채용한 다수의 카메라 헤드가 제작된 바 있다 [Choi, 2001].

이접운동과 틸트운동이 가능한 제품(그림 14)의 경우 카메라 고정부와 모터 연결부의 구조상 취약점, 영상 정보 획득의 불안정성, 백래시로 인한 이접운동의 부정확 등의 다양한 문제를 내포한다.

위와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로 새로운 텐던(Tendon) 구조의 카메라 헤드가 고안되었다(그림 15). 이것은 모터의 동력을 한 쌍의 와이어(Wire)를 이용하여 전달하는 방식이다[Ma, 1993]. 이와 같은 구조를 이용하는 경우 위에서 언급된 다양한 문제점들을 쉽게 해결 가능한 장점을 지닌다.

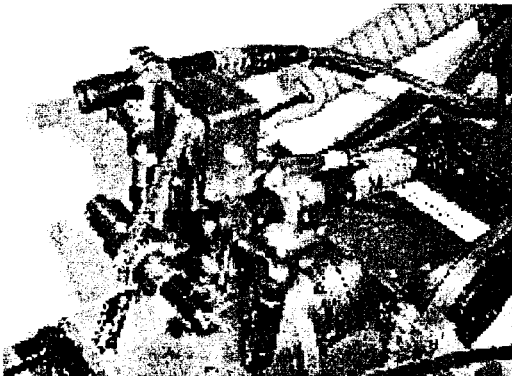


그림 14 이접운동 및 틸트운동을 위한 카메라 헤드

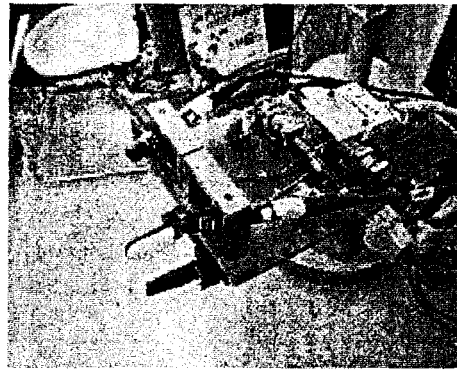
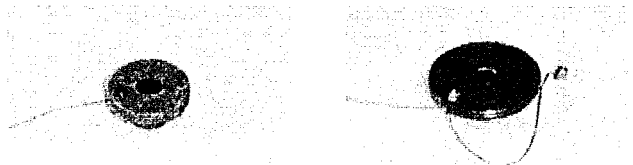


그림 15 텐던 구동 구조를 채용한 카메라 헤드

### 3.4.3 개선된 카메라 헤드의 제작

기존 카메라 헤드를 이용한 다양한 실험 및 고찰을 통하여 최근 제작된 새로운 카메라 헤드에서는 다음과 같은 점을 개선하였다.

케이블 장력이 약한 경우 동력전달과정에서 백래시로 작용하여 제어오차가 발생하므로 장력조절장치를 추가하였다. 기존 테스트베드의 경우 폴리에 세트스크류를 이용하여 케이블을 고정하는 방식을 사용하였으나(그림 16(a)), 이 방식에서는 케이블의 내구성 뿐만 아니라 정비성도 떨어지게 된다. 이를 해결하기 위하여 케이블 끝에 작은 금속을 고정하고 이를 폴리에 만들어 둔 홈에 고정하는 방식으로 케이블을 고정하였다(그림 16(b)).



(a) 세트스크류 고정방식 (b) 폴리에 고정부식

그림 16 케이블 고정 방식의 변화

또한, 모터와 카메라의 효과적인 배치를 통해 카메라 헤드의 전반적인 소형화/경량화를 구현하였다(표 5, 그림 17).



(a) 기존의 배치 (b) 개선된 배치

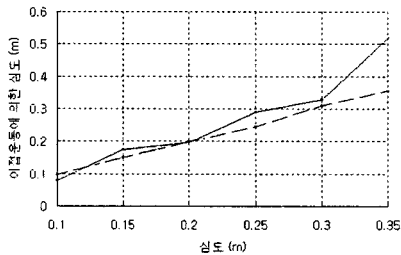
그림 17 모터/카메라 배치의 변화

표 5 카메라 헤드 최종 시제품 사양

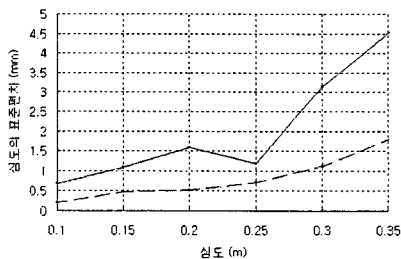
카메라 헤드 기구부	
구동구조	케이블을 이용한 텐던 구동구조
크기	110mm(W) x 110mm(L) x 35mm(H)
바닥에서 카메라까지 높이	15mm
중량	177g(모터 및 카메라 중량 포함)
이접운동 가능범위	-30~60 deg
이접운동 최대속도	180 deg
이접운동 분해도	0.0229 deg
모터 사양	
제품번호 및 제조사	1319-006S (1.5 Watt) / Faulhaber 사
최대속도	16300 rpm(무부하 속도)
중량	45 g
카메라 사양	
제품번호 및 제조사	JAI CV-M2350 (D=12mm) / JAI 사
중량	12 g

3.4.4 심도 정보 추출 실험

제안된 텐던 구동 구조를 적용한 스테레오 카메라 헤드는 장력 조절을 통해 카메라 이접운동의 정밀제어가 가능하며 실제 이접운동을 통해 대상물체의 심도추출 실험을 수행한 결과, 상당한 정확성을 확보할 수 있었다(그림 18). 그림 18에서 실선은 장력조절이 되지 않는 기존의 제품, 점선은 장력조절 기능이 포함된 새로운 제품에 관한 것이다.



(a) 추출된 심도 정보



(b) 추출된 심도 정보의 표준편차

그림 18 심도 정보 추출 실험 결과

제안된 텐던 구동 구조를 이용함으로써 동력의 전달방향을 쉽게 변화시킬 수 있으며, 동력전달 방향의 자유로운 변화를 이용하여 그리퍼 형태에 맞게 카메라 및 모터를 배치할 수 있다.

이러한 가능성을 통해 차후에는 그리퍼 형태를 고려한 카메라 헤드 구현을 통해 아이-인-핸드 구성에 적합한 카메라 헤드와 그리퍼의 결합 형태도 가능할 것으로 예상된다.

3.5 센서 융합 및 인간-로봇 공동작업을 이용한 비주열 서보잉

현재의 로봇 시스템은 크게 다음과 같은 세 가지의 이유로 인해, 인간-로봇 공동작업을 필요로 한다.

1) 로봇 지능의 불완전성

로봇의 지능은 현재 인간의 지능을 따라가지 못하며, 지각 능력 또한 센서부에 의존하는 범위 내로 한정되어 있다. 따라서 개발자의 프로그램 범위를 벗어나는 예기치 않은 상황에 대한 대처 능력이 떨어지며, 비 구조화된 상황에서의 적응력이 떨어진다

2) 공동 작업의 불가피성

로봇이 인간과 동등하거나 그 이상의 구동장치(manipulator) 및 지능을 가지고 있다고 하더라도, 작업의 종류에 따라 반드시 둘 이상의 개체(agent)가 같이 도와가며 일을 해야 하는 경우가 있다. 예를 들어 긴 책상을 운반하는 것 같은 것이 그러한 예이다.

3) 인간-로봇 공동작업의 작업 효율 상승 효과(Synergistic effect)

인간과 로봇은 각각의 장점을 활용함으로써 한정된 시스템 자원을 보다 효율적으로 이용하여 작업 효율 상승에 기여할 수 있다. 대표적으로 인간이 가지는 장점은 전체적인 정보 수집력과 이를 근거로 한 지능적인 판단력을 들 수 있으며, 예기치 않은 상황에 대한 대처 능력 등을 들 수 있다. 반면 로봇은 동작의 정확성과 반복성을 들 수 있다. 각각의 장점을 잘 융합해 줄 수 있는 연결고리가 있다면, 현재 개발되어 있는 로봇 시스템의 기능보다도 더 향상된 작업 수행 능력을 얻을 수가 있게 되는 것이다.

이러한 인간-로봇 공동 작업을 위해서는 로봇 시스템이 갖추어야 할 요소가 있다. 우선 하드웨어 측면에서는 사용자의 명령을 잘 수행할 수 있는 적합한 구동 장치(manipulator)가 있어야 하며, 변화된 주변 상황에 대해 정보를 인지할 수 있는 센서가 있어야 하며, 사용자로부터 정보를 제공받고, 주변의 정보

와 로봇의 상태를 제공해 줄 수 있는 인터페이스(interface)가 존재해야 한다. 이를 위한 요소 기술의 하나로, 3.5.1 절에서는 각 센서를 사용한 세부 기술에 대해 알아보고, 3.5.2 절에서는 인터페이스를 포함한 작업의 수행에 대해서 알아보도록 한다.

### 3.5.1 센서 융합 기술

사용자를 도와줄 수 있는 기본적인 작업의 하나로써 컵 잡기 작업을 생각할 경우, 작업의 순서에 따르는 적절한 센서 기술의 사용이 이루어져야 한다. 물체 근처에 접근했을 때의 물체와의 거리 검출 능력과, 물체를 적절한 힘으로 잡을 수 있는 능력, 그리고 로봇 팔의 움직임에 사용자의 의도를 반영할 수 있는 기능과 안전(Safety)을 보장할 수 있는 기술이 개발되어 이들 기술이 순차적으로 작업이 이루어질 수 있어야 한다. 이를 위한 세부 기술에 대한 내용을 보면 다음과 같다.

#### 1) 근접 거리 검출을 위한 PSD 센서 기술

Vision 을 근간으로 하는 Visual Servoing 기법에서는 물체 근처로 접근했을 경우, 물체가 카메라의 시야에서 벗어나기 때문에 물체의 정보를 얻기 힘들다. 때문에 근접 거리를 검출할 수 있는 센서부가 필요하며, 그리퍼와 연동이 되려면, 그리퍼의 끝부분(Finger-tip)에 붙일 수 있을 정도로 크기가 소형화되어야 한다. 이를 위해 PSD(Position Sensitive Device)를 사용하여 다음과 같은 구조의 센서부를 제작한다.

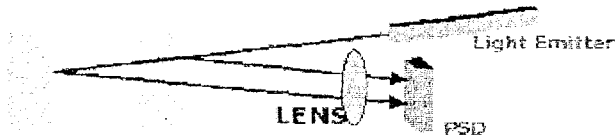
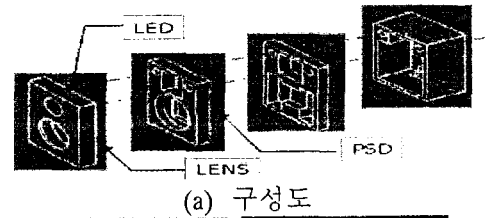


그림 19. PSD 센서 모듈 구조

PSD(Position Sensitive Device)는 빛이 들어오는 위치에 따라 다른 출력값을 내보내며, 적절한 광소자와 수신부의 각을 조절하면, 정해진 거리범위 내의 거리 검출을 할 수 있게 된다.

기존의 이러한 구조를 채택하는 방식은 3D Scanner 와 Laser 거리 검출기등에서 사용되었으나, 크기가 너무 크고 로봇 시스템에서 주어진 환경에 적합한 거리 검출(1-5cm 정도의 거리) 능력에서 차이를 보인다.

따라서, 다음과 같은 Device 를 사용하여 PSD 거리 측정 모듈을 제작하였다.



(a) 구성도



(b) 제작된 PSD 센서 모듈

그림 20. PSD 센서 모듈

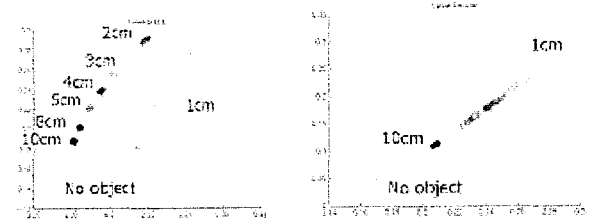
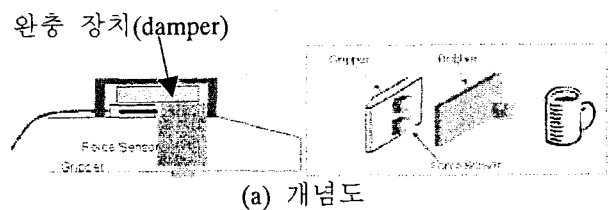


그림 21. 거리 검출 특성

그림 21 은 각 색깔별로, 1cm-10cm 까지의 등간격 거리군(group)을 나타내어 주어진 범위 내 및 범위 밖에서의 출력값으로 거리를 잘 구분하고 있음을 보여준다.

#### 2) 물체 잡기를 위한 힘(Force) 센서와 그리퍼(Gripper)

물체의 무게에 따른 물체 잡기 능력을 위하여, 그리퍼는 Force 센서를 장착하여 물체의 특성에 따라 물체를 잡을 수 있어야 한다. 이를 위해 그림 22 와 같이 그리퍼에 적절한 센서 배열(array)을 통하여 그리퍼를 제작하고 이를 물체 잡기에 적용해야 한다.



(a) 개념도



(b) 제작된 그리퍼 시제품

그림 22. 그리퍼와 힘센서 연동 구조도

제작된 그리퍼를 사용하여 물체가 미끄러지는 순간 발생하는 위와 아래 부분의 센서에서 발생하는 힘의 차이를 감지하고 이를 통해 물체 잡기에 적용하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

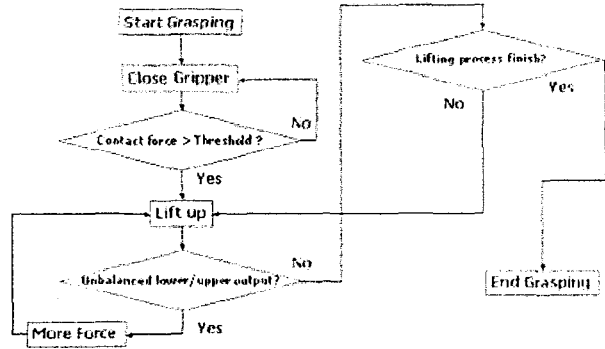


그림 23. Force Sensor 를 이용한 미끄러짐 방지 개념도

대상물체를 종이컵(4g), 빈캔(30g), 컵(또는 캔+음료수, 200g), 컵+음료수(500g)에 대해 테스트 결과 평균 성공률 77.5%의 잡기 성공률을 얻을 수 있었다.

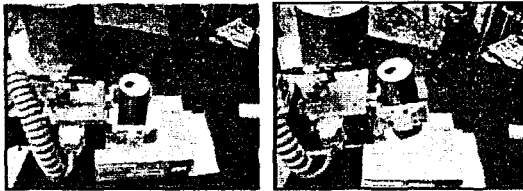


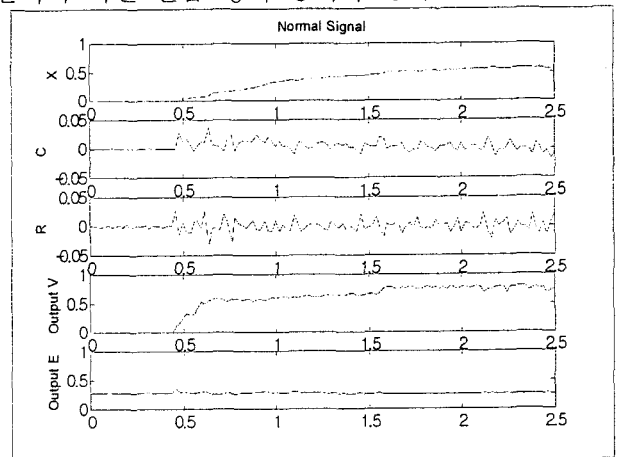
그림 24. 물체 잡기 작업

3) 순응 제어(Compliance Control)을 위한 6 축 힘-토크(force-torque 센서)

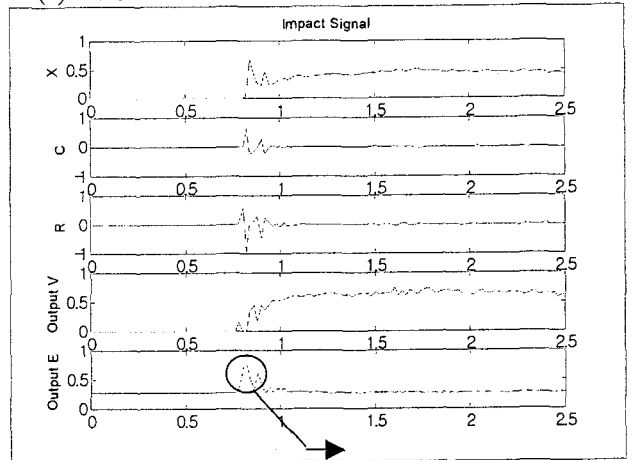
장애인 및 노약자를 돕기 위한 로봇 시스템에서 사용자의 안전성(Safety)는 중요한 문제 중의 하나이며, 로봇의 이상 상태를 감지하여, 긴급정지를 할 수 있는 기술의 적용은 필수적이다. 그리고, 로봇팔의 움직임을 사용자 인터페이스를 통해 줄 수 있는 기능도 중요하지만, 로봇에게 직접 힘을 가함으로써 움직임을 만들어내는 기술 또한 직관적인 방법으로 아주 유용한 로봇 구동방법 이라 할 수 있다. 이를 위해 6 축 힘-토크 센서를 사용한 순응 제어 기능을 구현하고, 퍼지 룰을 적용하여, 센서 입력의 변화를 바탕으로 사용자의 의도와 외부와의 충격력을 구분하여, 로봇의 동작 및 긴급 정지를 결정하는 동작을 구현할 수 있다.

사용자의 입력과, 로봇의 구동 시 발생하는 센서 신호의 변화량, 외부와의 충격력에 의해 발생하는

센서 신호를 바탕으로 센서의 X, Y, Z 축의 각 입력에 대해 F(Force), C(Abs(df/dt)), R(Abs(d<sup>2</sup>f/dt<sup>2</sup>))으로 입력 멤버쉽함수를 구현하고, 출력은 V(속도)와 E(상태, Normal or Emergency)에 대한 두 출력으로 한다. 로봇에게 큰 힘이 가해지더라도 사용자의 입력으로 인식이 되면 로봇의 구동상태가 되고, 충격력으로 인식이 되면 긴급 정지 상태가 된다.



(a) 사용자의 x 방향 입력에 대한 결과 그래프



(b) 방향 충격력에 대한 결과 그래프

그림 25. 사용자의 의도와 충격력의 구분

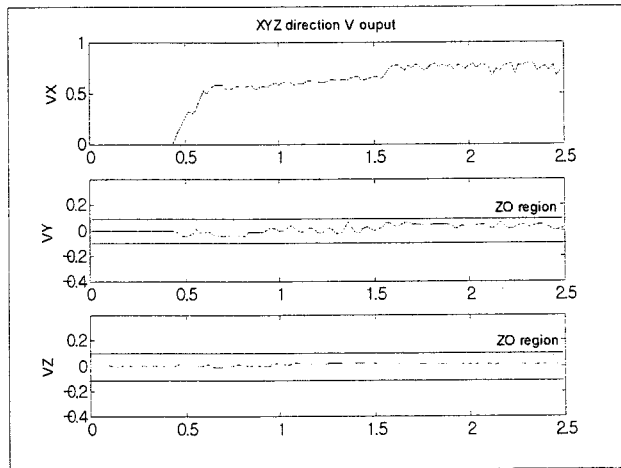


그림 26. x 방향 움직임에 대한 y,z 방향의 잡음 신호 분리 결과 그래프



그림 27. 순응 제어에 따른 로봇의 동작 결과

### 3.5.2 인간-로봇 공동작업 기술의 적용

인간-로봇 공동 작업을 구현하기 위하여, 적절한 인터페이스를 구현하여, 사용자의 명령 전달 도구로서의 역할 뿐만이 아니라, 사용자에게 정보를 전달해 줄 수 있는 기능을 구현해야 한다. 이를 위하여, 그림 28. 과 같은 사용자 인터페이스(GUI)를 구현하였다. 스테레오카메라로부터 들어오는 영상 정보를 화면에 표시하여 사용자에게 제공하고 우측의 컨트롤 패널로부터 로봇 제어 모드를 변경하여 로봇에게 명령을 전달할 수 있으며, 물체 인식 결과를 표시해 주고, 로봇 동작에 따르는 메시지를 전달해 준다.

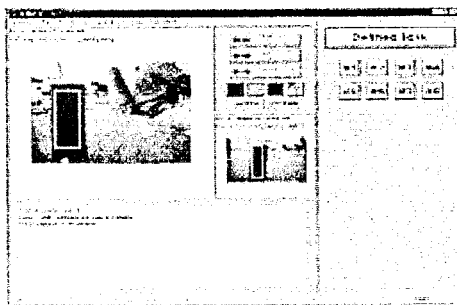


그림 28. 사용자 인터페이스(GUI)

이를 바탕으로 사용자에게 물체 인식의 결과 상

태를 제공해주고, 물체 인식에 실패했을 경우는 사용자의 입력을 기다린다. 실제 물체의 색깔 인식의 경우, 주변 조명 효과에도 상당한 영향을 받아 미리 학습된 물체의 경우도 인식을 못하는 경우가 발생할 수 있으나, 이 경우 사용자가 물체 범위를 사용자 인터페이스를 통해 지적해 줄 경우, 물체 범위의 RGB 정보의 평균, 분산 값을 Normalized RGB 값으로 환산하여 다시 물체 인식에 적용하게 된다.

물체 잡기의 경우도, 사용자가 물체에 대한 정보(물체의 무게, 재질(부드러움, 단단함)등)을 인터페이스를 통해 제공하게 되면, 이를 바탕으로 임계값(Threshold)를 재설정하여, 물체 잡기에 반영하게 된다. 이 경우, 3.5.1 절의 2)에서 다루어졌던 물체 잡기의 성공률은 80%로 증가한다.

순응 제어의 경우, 충격력에 의한 긴급상태 메시지를 사용자 인터페이스를 통해 사용자에게 전달하고, 사용자의 지시를 기다려 다음 동작에 반영하게 된다.

각 작업에 대해서, 사용자의 입력을 반영하고, 사용자에게 적합한 명령을 전달하기 위해서 제어 구조(Control Architecture) 및 명령 전달 체계를 구성하는 것 또한 중요한 부분이며, 이 시스템은 다음과 같은 구조를 가진다.

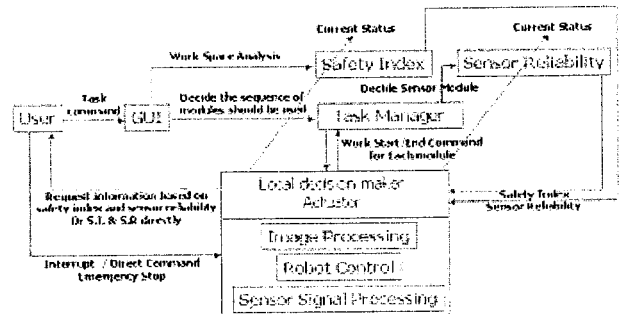


그림 29. 시스템 구조도

곧, 인간-로봇 공동 작업을 위한 시스템 구조는 각 모듈의 우수성도 중요하나, 이를 종합적으로 처리하여 사용자에게 적절한 정보를 줄 수 있고, 사용자의 개입을 허용하여 이를 동작에 반영할 수 있는 구조로 전환되어야 한다.

### 4. 지능적인 근전도 신호의 인식기술

본 장에서는 KARES II 의 인간-로봇 상호작용 기술 중에 하나인 생체신호(특히, 근전도) 인식에 대해서 논의한다. 사용자에게 보다 자연스러운 로봇 제어를 위해 필요한 힘 정보를 측정된 근전도 신호로부터 추출하는 과정과 중증 척수 장애인을 위해

개발된 소형의 휠체어 조이스틱 제어기에 대해서 언급한다.

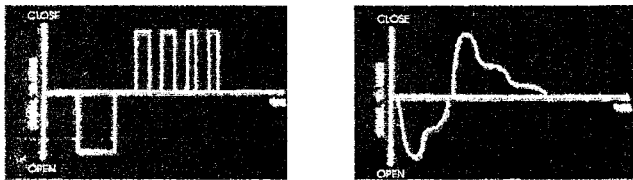
#### 4.1 비례제어(Proportional Control)를 위한 힘 정보 추출

미리 정의된 사람의 팔 동작에 따라 로봇 팔을 제어하는 문제는 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 첫째는 사람의 팔 동작을 분류하는 문제이고 둘째는 로봇 팔의 이동속도를 결정하는 부분이다. 로봇 팔의 이동 속도는 사람의 팔에서 측정된 힘 정보에 비례해서 제어하는 것이 사용자에게 자연스러운 느낌을 줄 수 있다.

그림 30의 (a)는 단순히 제어 입력의 ON/OFF 만을 제어했지만, 최근에는 (b)에서 볼 수 있는 것처럼 힘의 세기까지도 같이 제어하고 있다.

##### 4.1.1 기존의 연구결과

측정된 근전도 신호로부터 힘 정보를 추출하기 위한 많은 알고리즘들이 제안되었으며 대표적인 몇 가지 방법의 특징은 표 6와 같다.



(a) 기존의 ON/OFF 제어 (b) 비례 제어  
 그림 30. 기존의 ON/OFF 제어와 비례 제어의 개념

표 6에서 알 수 있는 것처럼 기존의 여러 방법들은 근전도 신호로부터 힘 정보를 추정하는 데 있어 S/N 비가 낮거나 시간 지연이 존재한다. 하지만 이러한 시간 지연은 사용자의 자연스러운 로봇 팔 제어에 있어서 반드시 해결되어야 하는 문제이다. 기존의 여러 연구 결과에 의하면 로봇 팔 제어 지연 시간은 300ms 초 이하여야만 사용자가 편안하게 로봇 팔을 사용할 수 있기 때문이다 [Francis, 2000]. 따라서 본 연구에서는 근전도 신호의 수학적 모델로부터 선형 Mixture 에서 원래의 입력신호원을 찾는 ICA (independent component analysis) 기법에 기반한 새로운 힘 추정 알고리즘을 제안한다.

표 6. 근전도 신호와 힘과의 상관관계를 연구한 대표적인 연구결과

이름	간략한 내용	장/단점
A full wave rectifier and low-pass filter	근전도 신호를 전파 정류기를 취한 뒤에 저역 통과 필터를 통해 근전도 신호의 힘 정보를 추출함.	- 가장 간단하게 힘 정보를 추출할 수 있음. - 사용자의 힘정보 패턴의 변화를 잘 추정하지 못함.
A linear minimum mean square error estimator [Park, 1984]	근전도 신호를 전파 정류기를 취한 뒤에 로그 변환을 통해 근전도 신호를 힘 정보와 노이즈 정보의 선형 조합으로 분리, Kalman filter 를 이용하여 힘 정보를 추출함.	- 정상상태 오차를 A full wave rectifier and low-pass filter 보다 10 배정도 향상시킴. - 노이즈 정보로 인해 추정된 힘 정보에 진동이 존재함.
A moving average root mean square estimator [Clancy, 1994]	$y(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=k-(N-1)}^k x^2(i)}$ 여기에서 $x(i)$ 는 시간 영역에서 근전도 신호, $y(k)$ 는 추정된 힘 정보, $N$ 은 sliding window 의 크기임.	- 위의 두 방법에 비해 좀 더 정확히 힘 정보를 추정 가능하며 진동 현상도 현격히 줄일 수 있음. - 추정된 힘 정보에 시간 지연이 존재함. 이 방법의 경우 sliding window 의 크기가 245msec 일 때 최적의 S/N 비를 보이는데 (논문상의 결과), 힘 추정 시간 지연이 길다는 단점이 있음.
Time varying autoregressive filter [Lhu, 1997]	근전도 신호의 초기 분산값을 입력으로 하는 Time-varying AR 필터를 이용하여 MARMS 의 S/N 비를 향상시켜 힘 정보를 추정함.	- 4 개의 방법 중 가장 높은 S/N 비를 나타냄. - MARMS 방법의 경우에서처럼 힘 정보 추정에 시간 지연이 존재함.

##### 4.1.2 근전도 신호의 수학적 모델

생리학적으로 발생하는 근전도 신호와 피부표면에서 측정된 근전도 신호는 상당히 다른 모양을 갖게 된다. 발생한 근전도 신호가 피부 표면에 도달하는 과정과 전극을 사용하여 근전도를 측정하는 과정에서 영향을 미칠 수 있는 여러 요소들은 그림 31 과 같이 모델링 할 수 있다 [Basmajian, 1985].

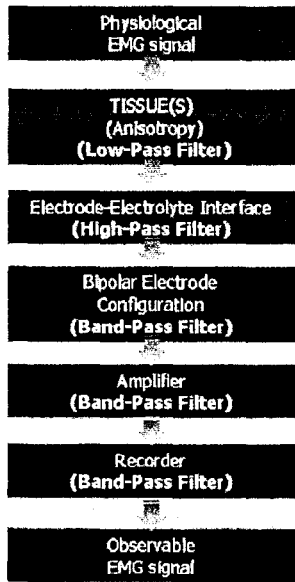


그림 31. 근전도 신호 측정시 영향을 미치는 주요 요소에 대한 블록도

그림 31의 여러 요소들을 고려하여 근전도 신호의 수학적 모델은 그림 32와 같다 [Hogan, 1980].

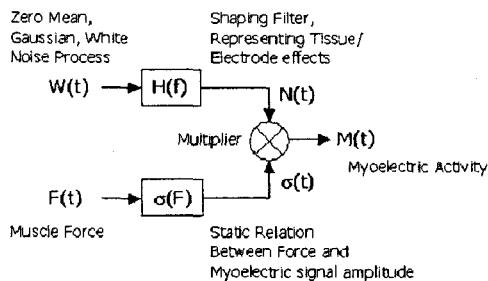


그림 32. 근전도 신호의 수학적 모델

그림 32에서 알 수 있듯이 근전도 신호는 힘 정보를 포함하는  $F(t)$ 와 가우시안 노이즈  $W(t)$ 의 곱으로 표현할 수 있다.

#### 4.1.3 힘 정보 추출을 위해 제안한 알고리즘

4.1.2 절에서 살펴본 바와 같이 근전도 신호는 힘 정보와 노이즈 신호의 곱으로 표시할 수 있다. 곱으로 표시된 근전도 신호를 로그 변환을 통해 힘 정보와 노이즈 신호의 선형합으로 표시한 뒤에 선형 mixture에서 입력 신호를 찾아내는 ICA (independent component algorithm) 알고리즘을 적용하여 힘 정보를 추출할 수 있다. 전체적인 과정은 그림 33과 같다.

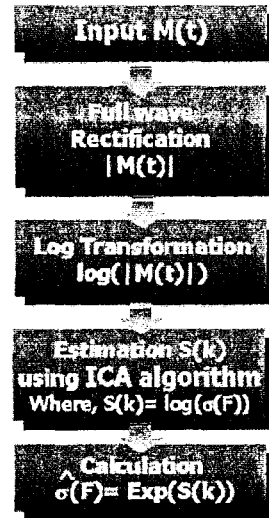


그림 33. ICA에 기반하여 제안한 힘 추정 알고리즘

ICA 알고리즘은 관찰된 다차원의 임의의 벡터로부터 통계적으로 독립적인 각 요소를 찾아내는 방법이다 [Hyvarinen, 2000][Lee, 1998].

$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]^T$ 를 관찰된 (혹은 측정된)  $m$  차원의 랜덤 변수,  $s = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n]^T$ 을 입력 소스 신호로  $n$  차원의 랜덤 변수라고 하자. ICA 방법은 측정된  $x$ 로부터  $s$ 를 찾는 통계적인 방법으로  $x, s$ 의 관계는  $s = f(x) = Wx$ 로 주어진다. 여기서  $W$ 는 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  $t_i$ 에서의 각 소스 신호가 통계적으로 독립적이라는 사실로부터 측정된 각 신호의 독립성을 측정, 이 값을 최대화 할 수 있는  $W$ 를 찾아내는 알고리즘이다.

제안한 알고리즘의 각 단계에 대해서 간략히 설명하면, 우선 입력 신호의 로그 변환을 위해 전파정류기를 거친다. 로그 변환을 통해 근전도 신호를 노이즈 신호와 힘 신호의 선형 mixture로 분리한다. ICA 기법을 적용하여 로그 변환된 힘 신호를 추정 한 다음  $\exp()$  함수를 통해 추정된 힘 신호를 복원할 수 있다.

#### 4.1.4 실험 결과

제안한 알고리즘의 유용성을 검증하기 위해서 기존의 여러 알고리즘과 힘 정보 추출 비교 실험을 하였다.

그림 34 는 근전도 신호와 근전도 신호 속에 숨겨진 힘 정보를 나타내고 있다.

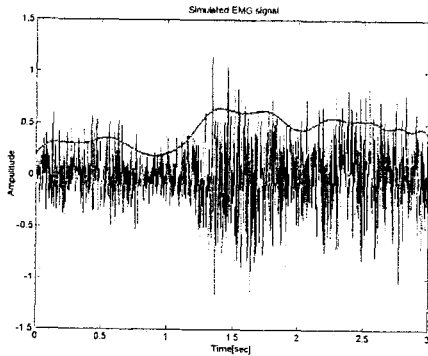


그림 34. 근전도 신호와 근전도 신호에 숨겨진 힘 정보 (Notice: 여기에서 굵게 표시된 선이 숨겨진 힘 정보임)

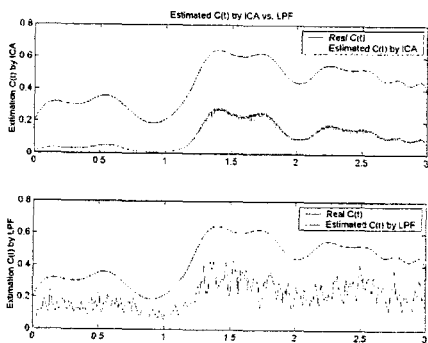


그림 35. 제안한 알고리즘과 LPF 를 이용해서 힘을 추정한 결과 (Notice: 실선으로 표시된 것이 추정해야 하는 힘 정보, 점선으로 표시된 것이 각각의 알고리즘으로 추정된 힘 정보)

그림 35, 그림 36 에서 알 수 있는 것처럼, 제안된 기법으로 힘 정보를 추출한 경우, 사용자의 힘의 변화 패턴을 정확하게 추정하고 있지만 다른 방법의 경우 힘의 변화 패턴을 정확하게 추정하지 못할 뿐만 아니라 시간 지연 현상까지 발생함을 알 수 있다.

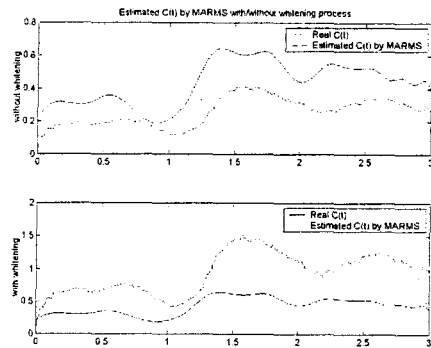


그림 36. MARMS 방법을 이용하여 힘을 추정한 결과

실험 결과 제안한 방법은 S/N 비가 탁월하며 힘을 추정하기 위한 시간 지연이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

#### 4.2 중증 척수 장애인을 위한 휠체어 제어기의 개발 [Han, 2001]

중증의 척수 손상 장애인의 이동성을 확보하기 위해 기존의 전동 휠체어에서는 다양한 입력장치를 사용하여 사용자의 명령을 얻는다. 가장 대표적인 것으로 사용자의 호흡 들이마시기와 내쉬기를 이용한 제어기 (sip and puff controller), 턱의 움직임을 이용한 제어기 [Seamone, 1979], 초음파 센서를 이용한 제어기 [Coyle, 1995], 머리의 움직임을 이용한 제어기 [Joseph, 1998], 음성을 이용한 제어기 [Rockland, 1998][Chauhan, 2000] 등이 있다. 하지만 호흡이나 턱의 움직임을 이용한 제어기의 경우에는 실제 사용하기에 불편하고, 초음파 센서를 이용한 제어기의 경우에는 다른 방식에 비해 동작 분류 성공율이 떨어진다. 음성을 이용한 경우에는 음성 명령에 대해 지연된 반응을 보일 뿐만 아니라 주위 환경이 시끄러울 경우 사용할 수 없다.

머리의 움직임은 자연스러운 제스처의 하나이며 특정 방향을 가리킬 때 사용할 수 있다. 중증의 척수 손상 장애인 (C3, C4)라 하더라도 머리의 움직임은 자연스럽다. 이런 머리의 움직임에서 측정된 근전도 신호를 이용하여 전동 휠체어 제어기의 입력 신호를 만들 수 있다.

##### 4.3.1 근전도 측정 위치의 선정

근전도를 이용한 제어기 설계에 있어서 가장 첫 번째 과정은 근전도 신호 측정 위치를 선정하는 것이다.



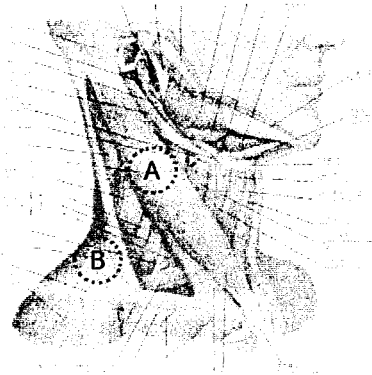


그림 37. 근전도 측정 후보 위치 (A: Sternocleidomastoid 근육, B: Trapezius 근육)

그림 37은 근전도 측정 후보 위치를 나타내고 있다. 위의 두 근육에서 사용자가 목을 앞으로 움직이기, 오른쪽으로 움직이기, 왼쪽으로 움직이기 동작을 했을 때 측정된 근전도 신호는 그림 38과 같다.

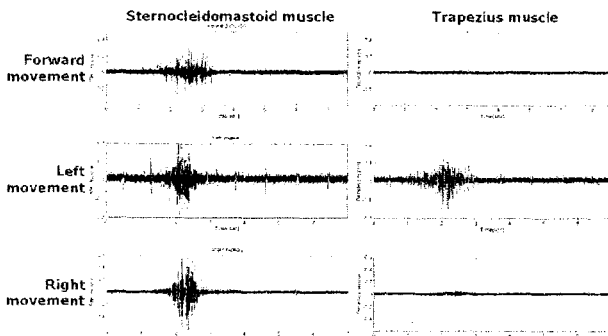


그림 38. 정의된 기본 동작 수행시 근전도 측정 후보 위치에서 측정된 일반적인 근전도 신호

그림 38에서 알 수 있듯이 근전도 측정 후보 위치 A 근육은 모든 동작에서 근육의 수축을 잘 보여주고 있지만, B의 경우에는 왼쪽 회전 동작에서만 근육의 수축을 보여주고 있다. 따라서, 근전도 측정 위치를 그림 39와 같이 정하였다.



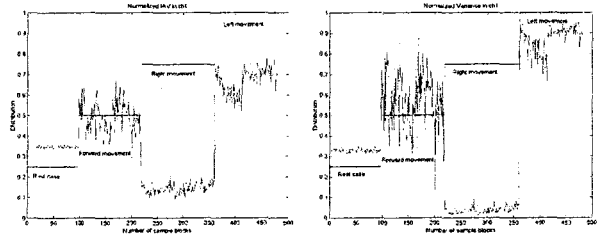
그림 39. 근전도 측정을 위해 선정된 전극 위치

### 4.3.2 특징 추출 (Feature Extraction)

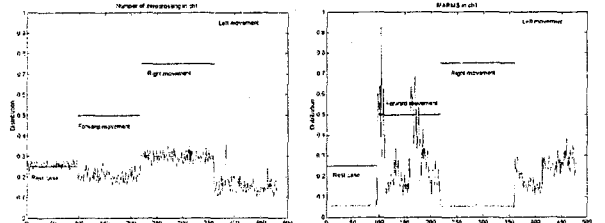
정의된 각 동작을 잘 분류하기 위해서 기존에 대표적으로 사용된 특징들을 추출하여 각 동작들간에 분리도를 비교하였다. 여기에서 사용한 특징은 절대적분치 (Integral absolute value, IAV), 분산 (variance, VAR), 영점을 지나는 횟수 (zero crossing, ZC), MARMS (moving average root mean square) 이다.

그림 40은 각 기본 동작에서 측정된 근전도 신호에서 추출된 특징 값이다. 여기에서 x 축은 샘플 블록의 수를 나타내고 y 축은 추출된 각 특징 값을 나타낸다.

그림 40에서 IAV, VAR의 경우 네 가지 기본 동작에 대해서 특징 값의 분리도가 높지만 ZC, MARMS는 분리도가 낮음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 채널 1과 채널 2에서 추출된 IAV, VAR을 패턴 분류를 위한 특징으로 사용하였다.



(a) 채널 1에서의 IAV (b) 채널 1에서의 VAR



(c) 채널 1에서의 ZC (d) 채널 1에서의 MARMS

그림 40. 채널 1에서 추출한 특징 값들

### 4.3.3 전동휠체어 제어기의 시뮬레이터

추출된 특징 값을 입력으로 사용하여 FMMNN (fuzzy min-max neural network)을 학습 시켰다. FMMNN은 지도 학습 신경망의 한 종류로서 근전도 신호와 같이 시간에 따라 변화가 심한 신호에 강한 적응력을 가진다. 학습 후 FMMNN은 입력된 근전도 신호를 분류한 결과를 출력한다. 이렇게 출력된 신호를 실제 휠체어 제어기에 적용하기 전 그림 41과 같이 개발된 시뮬레이터에 적용하였다.

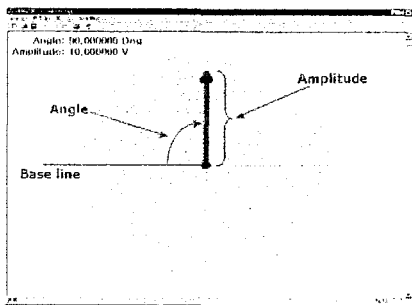


그림 41. 개발된 전동휠체어 제어기의 시뮬레이터

여기에서 전동 휠체어의 제어 입력에 해당되는 방향은 각 동작에 따라 0 도는 왼쪽으로 움직이기, 90 도는 직진하기, 180 도는 오른쪽으로 움직이기로 사상되었다. 전동 휠체어의 속도는 측정된 근전도 신호에서 힘 정보를 추출하여 사용하였다. 실험 결과 사용자의 목 운동의 방향과 시뮬레이터의 출력 화면이 일치하였으며 추출된 힘에 비례하여 시뮬레이터 화살표의 크기가 변함을 관찰할 수 있었다.

#### 4.3.4 실험결과

전체적인 시스템 구조는 그림 42 와 같다.

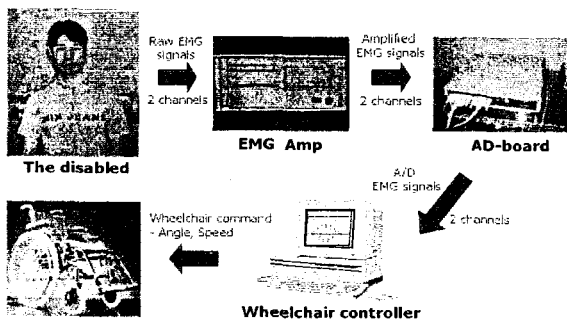


그림 42. 시스템의 전체적인 구조

실험 환경에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [Han, 2001]을 참조하기 바란다. 학습된 FMMNN 을 이용하여 학습 데이터에 대한 분류 성공율은 표 7 와 같다. 표 7 에서도 알 수 있는 것처럼 FMMNN 이 잘 학습되어 있음을 알 수 있다.

표.7 학습 데이터를 이용했을 때 분류 성공율  
(Note: 평균 분류 성공율은 98.75% (474/480\*100))

동작 분류결과	정지 상태	앞으로 움직이기	오른쪽 움직이기	왼쪽 움직이기
정지상태	96	5	0	0
앞으로 움직이기	0	117	0	1
오른쪽 움직이기	0	0	141	0
왼쪽 움직이기	0	0	0	120
평균 분류 성공율	96/96* 100= 100 %	117/122* 100= 95.9 %	141/141* 100= 100 %	120/121* 100= 99.2 %

표.8 테스트 데이터를 이용했을 때 분류 성공율  
(Note: 평균 분류 성공율은 91.2% (439/480\*100))

동작 분류결과	정지 상태	앞으로 움직이기	오른쪽 움직이기	왼쪽 움직이기
정지상태	96	7	0	0
앞으로 움직이기	0	114	4	29
오른쪽 움직이기	0	1	137	0
왼쪽 움직이기	0	0	0	92
평균 분류 성공율	96/96* 100= 100 %	112/122* 100= 93.4 %	137/141* 100= 97.2 %	92/121* 100= 76.0 %

표 8 은 테스트 데이터를 이용하여 동작을 분류했을 때 분류 성공율을 나타내고 있다. 평균 분류 성공율이 약 91.2%로 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

개발된 알고리즘을 소형 이동로봇에 적용하였다. 그림 43 은 사용자가 고개를 왼쪽으로 회전하였을 때 이동로봇도 왼쪽으로 회전하는 실험 결과이다.



그림 43. 이동로봇을 이용한 동작 분류 실험 결과

이상에서 사용자의 고개 움직임에 따라 측정된 근전도 신호를 이용하여 전동 휠체어를 사용자 의도대로 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 근전도 신호는 사용자 이상발생 유무를 쉽게 확인할 수 있으며 휠체어 운전이 필요한 속도정보 역시 쉽게 추출할 수 있는 장점을 갖는다.

## 5. 결론

본 논문에서는 새로운 휠체어 기반 재활로봇 시스템과 이를 위한 여러 가지 인간-로봇 상호작용 기술에 대하여 소개하였다. 특히, 지능형 비주얼 서보잉 및 근전도 신호 처리 기술을 통하여 재활로봇 시스템의 자율성과 사용자 의도 파악 기능에 초점을 맞추어 살펴보았다. 지능형 비주얼 서보잉의 경우, 얼굴 표정 인식 기능을 통한 사용자 의도 파악 기능의 향상, 새로운 공간 변화 비전 기법 및 이를 위한 퍼지 의사 결정기, 센서 융합 및 인간-로봇 공동작업 기능의 추가를 통한 전반적인 시스템의 성능 향상에 대하여 기술하였다. 또한, 생체신호(근전도 신호) 인식의 경우 ICA 기법을 이용한 근전도 신호에서의 힘 정보 추출, 4 자유도 로봇팔 및 휠체어 조종기로써의 응용 등 재활로봇 시스템을 위한 상호작용 장치로써의 가능성에 대하여 언급하였다.

앞으로 사용자의 안전성을 보장하기 위한 각종 안전성 관련 인자 및 안전 요인을 고려한 기술의 개발을 통해 제안된 방법들은 비단 재활 로봇 시스템에서 뿐만 아니라, 인간-로봇 상호작용 기술이 필요한 여타 분야에서도 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

[NSO, 1996] National Statistical Office, "The Future Estimated Population", Korea, 1996.  
[Erlandson, 1995] R.F. Erlandson, "Application of robotic/mechatronic systems in special education, rehabilitation therapy, and vocational training: a paradigm shift", IEEE Trans. Rehabilitation Engineering, vol. 3, pp. 22-34, 1995.  
[Kwee, 1998] H.H. Kwee, "Integrated control of MANUS manipulator and wheelchair enhanced by environmental docking", Robotica, vol. 16, no. 5, pp. 491-498, 1998.  
[Song, 1999] W.-K. Song, H. Lee, and 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, 1999.  
[Dallaway, 1995] J.L. Dallaway, R.D. Jackson, and P.H.A. Timmers, "Rehabilitation robotics in Europe", IEEE Trans. Rehabilitation Engineering, vol. 3, pp. 35-45, 1995.  
[Eftring, 1999] H. Eftring and K. Boschian, "Technical results from MANUS user trials", In Proc. Sixth Int. Conf. on Rehabilitation Robotics, pp. 136-141, 1999.  
[Nemire, 1994] K. Nemire, A. Burke, and R. Jacoby, "Human factors engineering of a virtual laboratory for students with physical disabilities", Presence, vol. 3, no. 3, pp. 216-226, 1994.

[Lee, 2000] K. Lee, D.-S. Kwon, "Application of optical fiber sensors for the wearable master device used by the disabled", In Proc. 1<sup>st</sup> International Workshop on Human-friendly Welfare Robotic Systems (HWRS2000), pp. 65-68, Jan. 2000.  
[Han, 2000] J.-S. Han, J.-S. Kim, W.-K. Song, H. Lee, and Z. Bien, "EMG pattern classification using soft computing techniques and its application to the control of a rehabilitation robotic arm", In Proc. 1<sup>st</sup> International Workshop on Human-friendly Welfare Robotic Systems (HWRS2000), pp. 45-53, Jan. 2000.  
[Yoo, 2000] D.H. Yoo, Y.J. Lee, G.W. Chu, J.H. Kim, D.H. Kim, and M.J. Chung, "Assistive Robot Control by an Eye-mouse System for the Disabled". In Proc. Fourth Biannual World Automation Congress, (WAC'2000), 2000.  
[Peters, 1996] 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.  
[Chen, 1998] 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.  
[Tsotsos, 1998] J.K. Tsotsos et. al, "A visually-guided robot for physically disabled children", Image and Vision Computing, vol. 16, pp. 275-292, 1998.  
[Schwartz, 1995] E.L. Schwartz, D.N. Greve, and G. Bonmassar, "Space-variant Active Vision: Definition, Overview, and Examples", Neural Networks, vol. 8, no. 7/8, pp. 1297-1308, 1995.  
[Bolduc, 1998] M. Bolduc and M.D. Levine, "A Review of Biologically Motivated Space-Variant Data Reduction Models for Robotic Vision", Computer Vision and Image Understanding, vol. 69, no. 2, pp 170-184, 1998.  
[Song, 2001] W.-K. Song, "Intelligent visual servoing using space variant vision with application for rehabilitation robots," Ph.D. Thesis, KAIST, 2001.  
[Song, 2000a] W.-K. Song, J.-S. Kim, and Z. Bien, "Visual Servoing based on Space Variant Vision for Human-Robot Interaction in Rehabilitation Robots", In Proc. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Navy Pier Convention Center, Chicago, USA. July 2000.  
[Bien, 2000] Z. Bien and W.-K. Song, "Novel Wheelchair-based Robotic Arm with Visual Servoing Capability for Human-Robot Interaction", In Proc. Workshop on Service Automation and Robotics, City University of Hong Kong, Kowloon Tong, Hong Kong, June 19-20, 2000.  
[Song, 2000b] W.-K. Song, J.-S. Kim, and Z. Bien, "Visual Servoing for Human-Robot Interaction in the Wheelchair-based Rehabilitation Robot ", In Proc. SMC 2000, Nashville, Tennessee, USA. Oct. 2000.  
[Ohta, 1980] Y. Ohta, T. Kanade and T. Sakai, "Color Information for Region Segmentation", Computer Graphics and Image Processing, vol. 13, pp.

222-241, 1980.

[Kim, 2001] D.-J. Kim, W.-K. Song and Z. Bien, "Effective Intention Reading in Rehabilitation Robots," In Proc. 2<sup>nd</sup> International Workshop on Human-friendly Welfare Robotic Systems (HWRS2001), 2001.

[Weiman, 1989] 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.

[Yang, 1997] J. Yang, L. Weier and A. Waibel, "Skin-color modeling and adaptation," TR CMU-CS-97-146, 1997.

[Raja, 1998] Y. Raja, S.J. McKenna and S. Gong, "Tracking and segmenting people in varying lighting conditions using colour," In AFG, 1998.

[Murray, 1992] D.W. Murray, F. Du, P.F. McLauchlan, I.D. Reid, P.M. Sharkey and M. Brady, "Design of Stereo Head", Active Vision, pp. 155-172, MIT Press, 1992.

[Choi, 2001] J.-Y. Choi, 입체 카메라 구동장치를 이용한 행동기반 제어기 설계와 서비스 로봇에의 적용, 한국과학기술원 석사 논문, 2001.

[Ma, 1993] S. Ma, S. Hirose and H. Yoshinada, "Design and experiments for a coupled tendon-driven manipulator", IEEE Control Systems Magazine Vol. 13, No. 1, pp. 30 - 36, Feb 1993.

[Seamone1979] Schmeisser G, Seamone W, "An assistive equipment controller for quadriplegics," Johns Hopkins Med. Journal, vol.143, no.3, pp.84-88, 1979.

[Coyle, 1995] Coyle E.D., "Electronic Wheelchair Controller Designed for Operation by Hand-operated Joystick, Ultrasonic Non-Contact Head Control and Utterance from a small Word-command Vocabulary," IEE Colloquium on New Developments in Electric Vehicles for Disabled Persons, pp. 3/1- 3/4, 1995.

[Joseph, 1998] Joseph T. and Nguyen H., "Neural Network control of wheelchairs using telemetric head movement," Proceedings of the 20th Annual Inter. Conf. of the IEEE Eng. in Medicine and Biology Society, vol. 20, no. 5, pp. 2731-2733, 1998.

[Rockland, 1998] Rockland, R.H., Reisman, S. "Voice activated wheelchair controller," Bioengineering Conference, Proceedings of the IEEE 24th Annual Northeast, pp. 128-129, 1998.

[Chauhan, 2000] Chauhan, S.; Sharma, P.; Singh, H.R.; Mobin, A.; Agrawal, S.S., "Design and development of voice-cum-auto steered robotic wheelchair incorporating reactive fuzzy scheme for anti-collision and auto routing," TENCON 2000. Proceedings, vol. 1, pp.192 -195, 2000.

[Han, 2001] Jeong-Su Han, Dimitar H. Stefanov, Kwang-Hyun Park, Hae-Beom Lee, Dae-Jin Kim, Won-Kyung Song, Jong-Sung Kim, and Z. Zenn Bien "Development of an EMG-based Powered Wheelchair Controller for Users with High-level Spinal Cord Injury," Accepted to ICCAS 2001 (International Conference on Control, Automation

and Systems), Jeju National University, Jeju, Korea, October 17-21, 2001

[Basmajian1985] John V. Basmajian, Carlo J. De Luca, Muscles Alive, Williams& Wilkins, 5th edition, 1985

[Hogan1980] N. Hogan and R. W. Mann, "Myoelectric Signal Processing: Optimal Estimation Applied to Electromyography- Part I: Derivation of the Optimal Myoprocessor," IEEE Tr. on Biomedical Eng., vol. 27, no. 7, pp. 382-395, 1980

[Park1984] 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

[Clancy1994] E.A. Clancy and N. Hogan, Single Site Electromyograph Amplitude Estimation,"IEEE Tr. on Biomedical Eng., vol. 41, no. 2, pp. 159-167, 1994

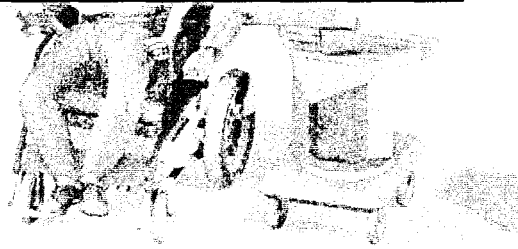
[Luh1997] J-J Luh, G-C Chang, C-K Cheng, J-S Lai, and T-S Kuo, "Using Time-Varying Autoregressive Filter to Improve EMG Amplitude Estimator,"IEEE-EMBC AND CMBEC, pp.1343-1344, 1997

[Hyvarinen2000] A. Hyvarinen and E. Oja, "Independent Component Analysis: Algorithms and Applications," Neural Networks, vol. 13, pp. 411-430, 2000

[Lee1998] Te-Won Lee, Independent Component Analysis: Theory and Application, Kluwer Academic Publishers, 1st edition, 1998

[Francis2000] Francis H.Y. Chan, Yong-Sheng Yang, F. K. Lam, Yuan-Ting Zhang, and Philip A. Parker, "Fuzzy EMG Classification for Prosthesis Control", IEEE Tr. on Rehab. Eng., vol. 8, no. 3, pp. 305-311, sep., 2000

## 요약 및 추후과제



KAIST

CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

## 요약

### ■ 인간-로봇 상호작용 기술의 보완

- 지능형 비주얼 서보잉 기술
  - 주위환경 변화에 적응가능한 영상 처리
  - 사용자 표정 인식에 의한 의도 파악 기능
  - 센서 융합 및 인간-로봇 공동작업을 통한 기계 지능 향상
- 생체신호(EMG) 인식 기술 심화
  - 힘 정보 추출에 의한 제어 성능 향상
  - 무선 EMG 신호 증폭기
  - 4자유도 로봇팔/휠체어 조종기로의 응용

KAIST

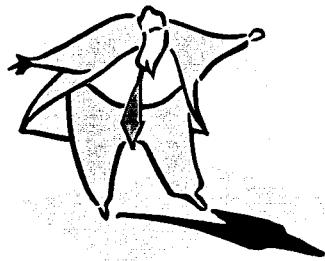
CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

18

## 추후과제

- 실사용자 (노약자, 지체 장애인 등) 를 대상으로 한 시스템 시연 및 평가 수집
- 각 요소 기술의 심화 연구를 통한 기능 향상
- 사용자 안전성의 강화
  - ‘안전성’에 관한 지수 제안
  - ‘안전성’을 고려한 시스템 구성 방안 확립

• ————— **Thank you** ————— •  
for your attention



## 지능형 인간-로봇 상호 작용 기술 개발 (Development of Intelligent Human- Robot Interaction Technology)

2001년 11월 30일

KAIST/삼성전자

변증남

KAIST

CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

### 최종목표 및 현황

#### ■ 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.

#### ■ 현황

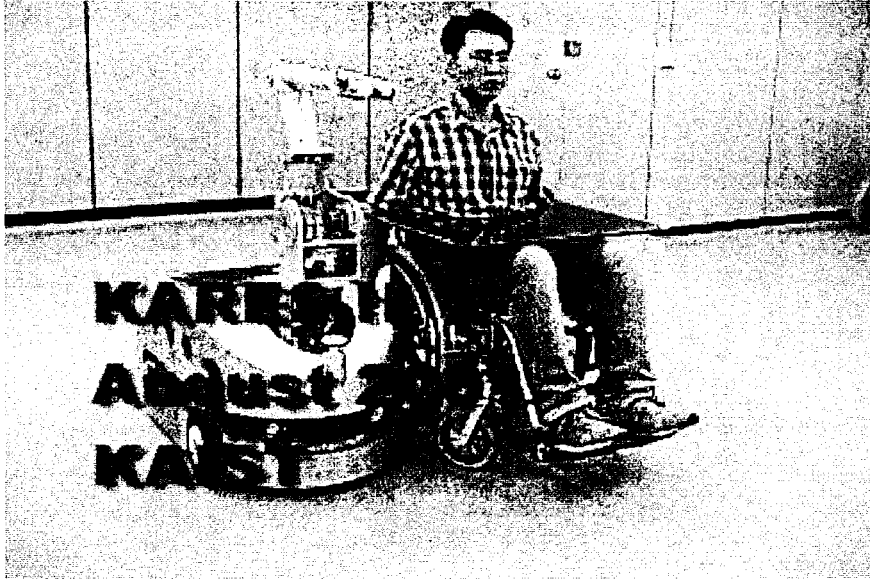
- 1차년도: 1998년 12월 1일 ~ 1999년 9월 30일 (590,000,000원)
- 2차년도: 1999년 10월 1일 ~ 2000년 8월 31일 (559,000,000원)
- 3차년도: 2000년 9월 1일 ~ 2001년 8월 31일 (590,000,000원)
- 주관연구기관: 한국과학기술원
- 협동(공동)연구기관: 삼성전자(주) 종합기술원
- 참여기업: 삼성전자(주) 종합기술원

KAIST

CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

2

## 휠체어 로봇 시스템



KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

3

## 차례

- I. 소프트 로봇 팔을 이용한 13개 작업의 응용 실험 및 2차 시제품 제작
- II. **Visual Servoing**과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어
- III. **Eye-Mouse** 시스템: 눈동자 추적에 의한 대상 물체 지적 및 3차원 정보 추출 시스템 개발
- IV. **Body Motion**을 이용한 원격제어장치
- V. 마이크로 입력 장치 개발
- VI. 요약

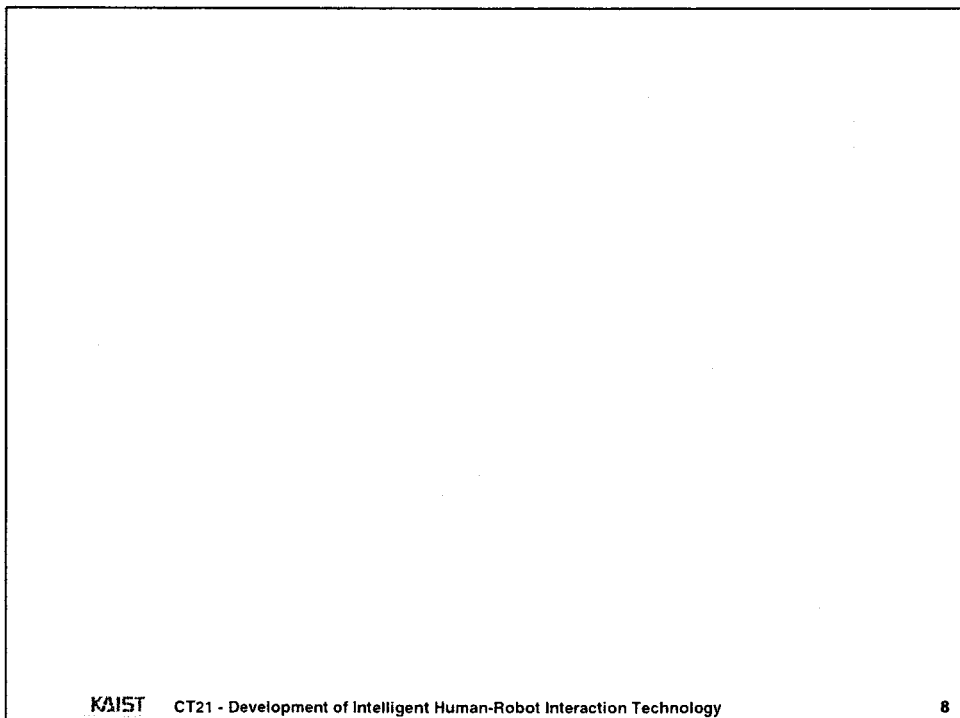
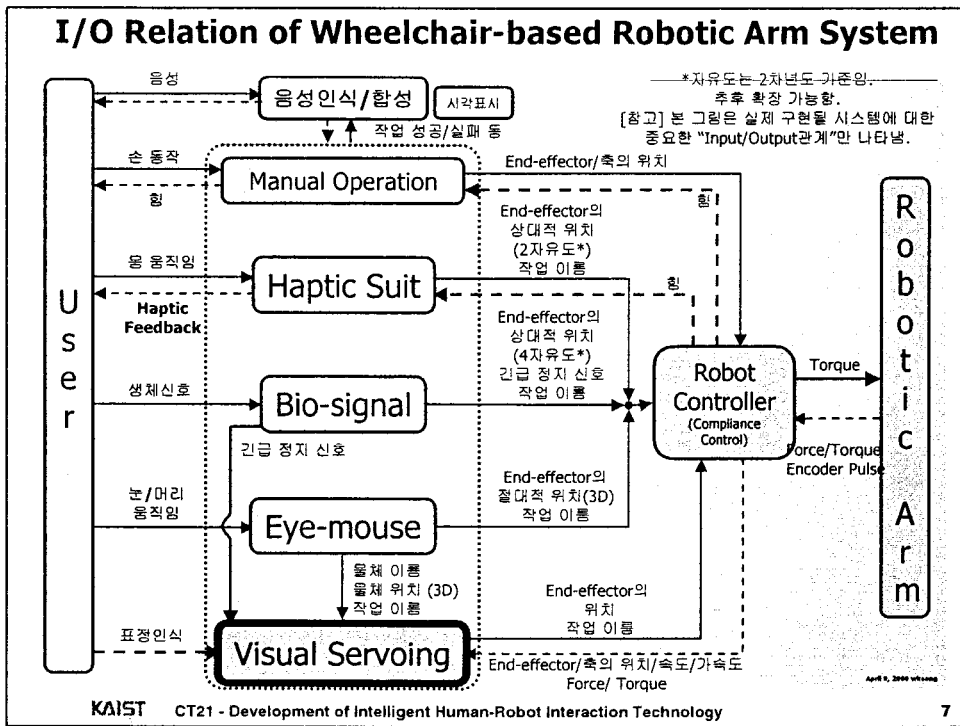
KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

4



# Visual Servoing과 생체신호를 이용한 로봇 팔 제어

변증남\*, 김대진, 한정수, 이형욱

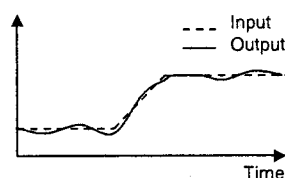


## 연구목표: Visual Servoing

- 주위환경적응이 가능하며 인간 친화적인 **Visual Servoing** 기술 통합/보완
  - 비전 정보 및 로봇 제어 기술 통합/보완
  - "센서 융합" 및 "인간-로봇의 공동작업"에 의한 주변 상황 대처 능력에 대한 기본 기술 확보
  - 고수준의 표정 인식을 통한 사용자 의도 파악 기술 향상

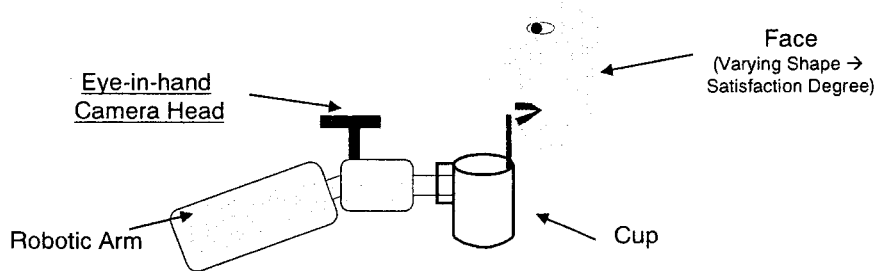
## Visual Servoing

- To control the pose of the robot's end-effector relative to a target using visual information.
- Difficulties of Visual Servoing in a Wheelchair-based Robotic Arm.
  - Processing visual information in real-time.
  - Coping with varying illumination.
  - Vibration of a robotic arm on a wheelchair or a mobile platform.
- Mimicking biological vision system.

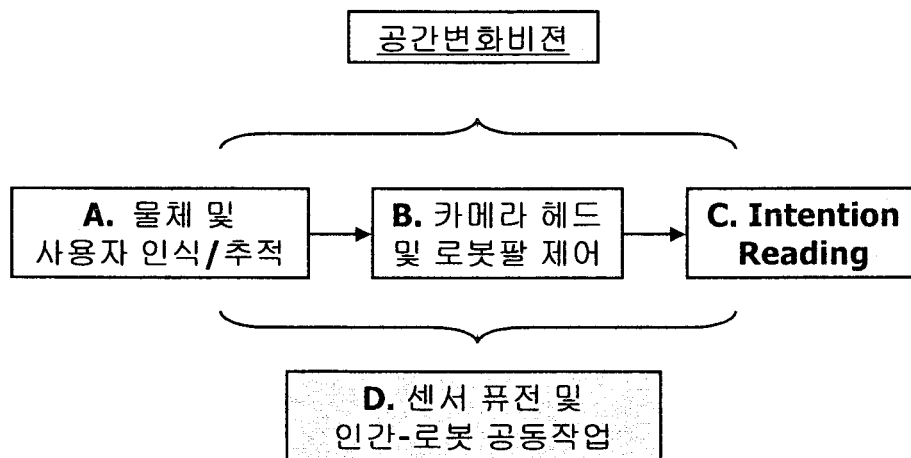


## 지능형 비주얼 서보잉

- 고정되거나 움직이는 목표물의 시각 정보를 효율적으로 다룰 수 있는 **Intelligent Visual Servoing** 기법을 제안함.
  - 로봇 팔에서 **Visual Servoing**의 작업을 분석하여, 핵심적인 시나리오로 “로봇 팔이 사용자의 입 근처로 접근하는 작업”을 선정함.



## Visual Servoing 전체 개념도



## A. 물체 및 사용자 인식/추적

- 물체/사용자 인식
  - 물체인식: **Normalized RGB** 컬러 정보 이용.
  - 사용자인식: **I1I2I3** 컬러 정보 이용.
- 물체/사용자 추적
  - 공간변화비전 기반 추적 알고리즘 적용.
  - 새로운 공간변화비전 기법 제안 및 추적 실험.

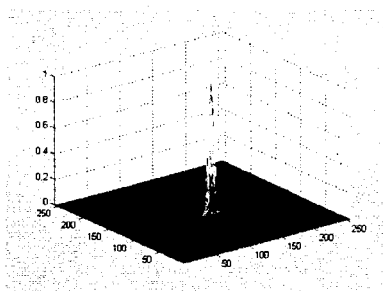
## 물체 인식

- **Normalized RGB** 컬러 공간 사용.
- 컬러 분할: **Otsu's Method** 사용.
  - 자동 영상 분할 가능.

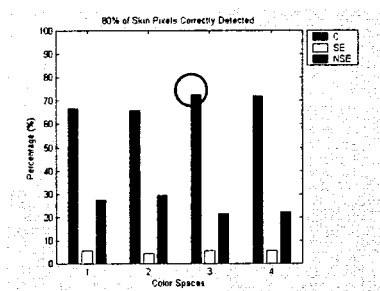


## 얼굴 인식

- I1I2I3 컬러 공간 사용.
  - $I1 = (R+G+B)/3$ ,  $I2 = R-B$ ,  $I3 = (2G-R-B)/2$
  - 피부색 분할을 위해 효과적인 컬러 공간.



Quarter view



Comparison with other color spaces:  
Normalized RGB, HLS, YCrCb

## 물체/얼굴 추적

- 공간변화비전
- 특징 [Weiman1989]
  - 해당 물체의 COG (무게중심) 정보.
  - 해당 물체의 외곽선(Contour) 정보.

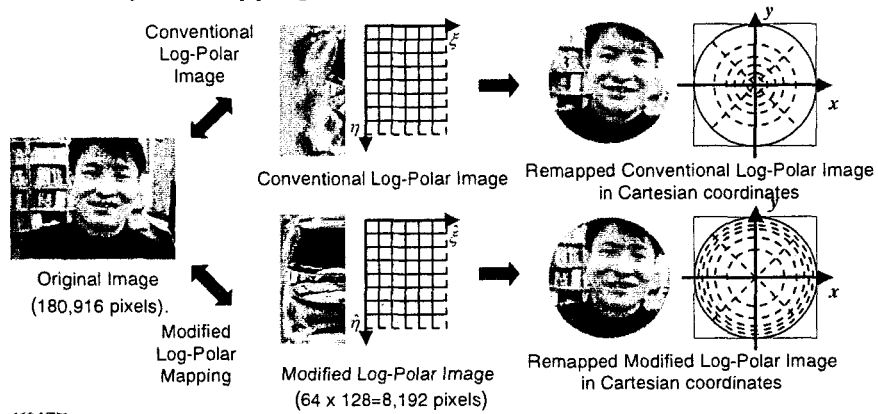
$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} \log(k) \cos(\eta) & -\sin(\eta)/q \\ \log(k) \sin(\eta) & \cos(\eta)/q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \xi \\ \delta \gamma \end{bmatrix}$$



[Weiman1989] 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.

## Space Variant Vision과 Fuzzy Decision Maker를 이용한 Visual Servoing

- Real-time Visual Processing을 포함하는 효율적인 시각 처리를 위해 Space Variant Vision 기술을 적용함.
- 가까이 있는 움직이는 물체를 다루기 위해 Modified Log-polar Mapping을 제안/적용함 → 정확한 물체 정보 획득 가능.

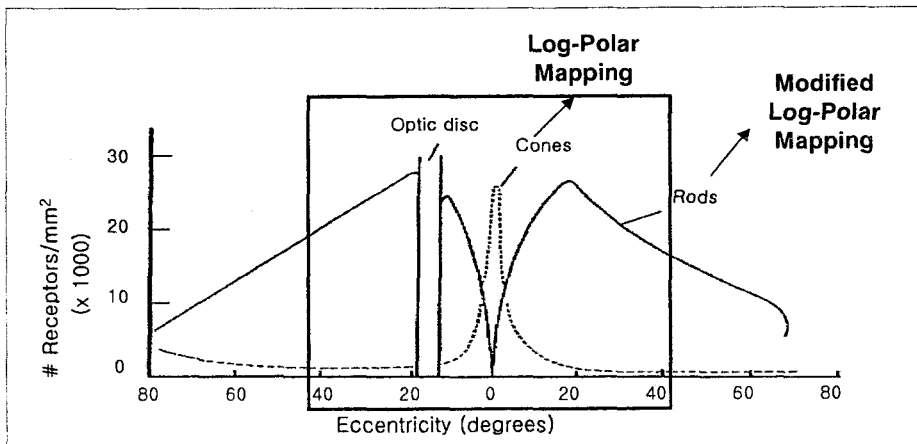


KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

17

## Space Variant Vision과 Fuzzy Decision Maker를 이용한 Visual Servoing

- Biological System에 근접한 접근 방법.  
Optical Receptor 분포와 유사.

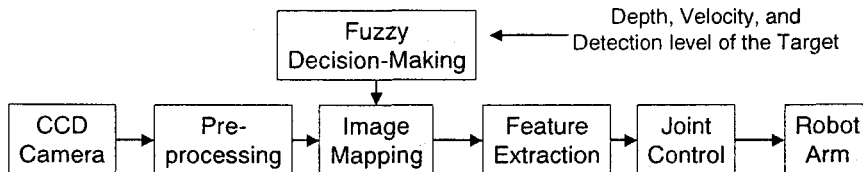


KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

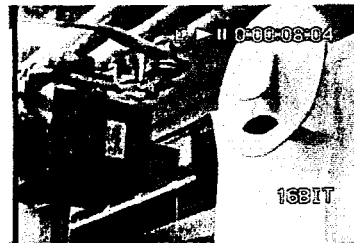
18

## Space Variant Vision과 Fuzzy Decision Maker를 이용한 Visual Servoing

- 작업 상황에 따른 효율적인 영상 매핑을 위하여 **Fuzzy Decision Maker**를 제안/적용함.



**Centering+Tracking**



**Approaching+Tracking**

KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

19

## B. 카메라 헤드 설계/제작/제어

### ■ 설계 고려 사항

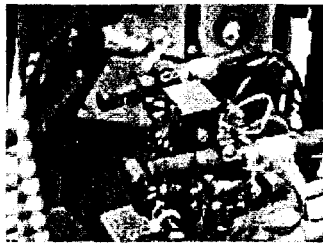
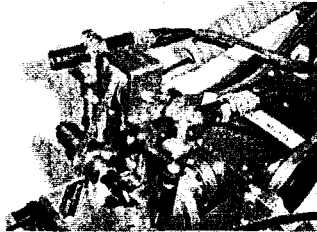
- 경량/소형화
  - 무게의 증가 → 로봇 팔의 **Payload**가 감소함.
  - 크기의 증가 → 장착이 힘들.
- **Backlash**
  - **Zero Backlash** 감속기를 사용함 (상용품).
  - **Tendon** 구조를 이용하여 동력 전달 시 발생하는 **Backlash**를 최소화 함.

KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

20



## 1차 제품의 설계

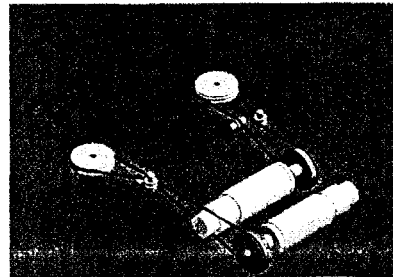


- 사양
  - 경량 (200~300g)
  - 소형
  - 적은 Backlash
- 이접운동(Vergence)
  - 범위: -30 ~ 45 degrees
  - 정밀도: 0.007 degrees
- 틸트운동(Tilt)
  - 근접한 목표물 관찰.



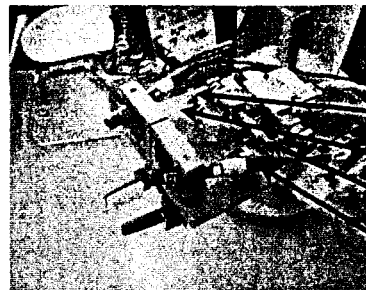
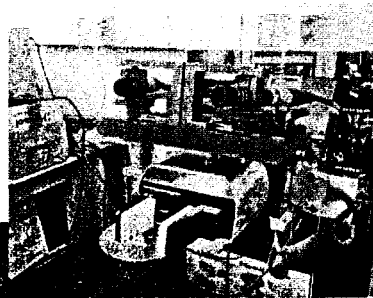
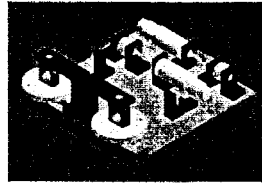
## 2차 제품의 설계

- Module화 : Vergence + Tilt
- 동력 전달 구조의 독창적 설계를 통한 특허 획득
  - Tendon 구동 구조를 이용한 경량, 소형화 추구
  - 구동축 (Motor), 종동축 (Camera) 사이의 비선형 회전 관계 구현



## Testbed 의 제작 (2차 제품)

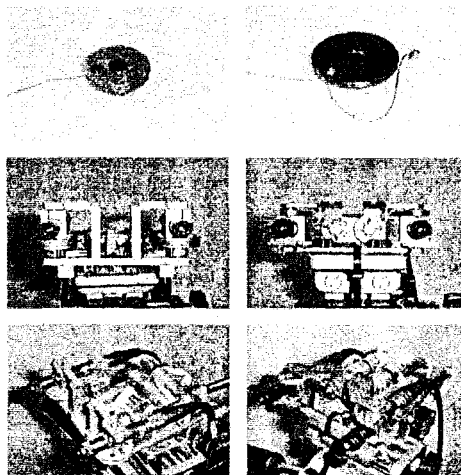
- Tendon구조의 테스트를 위한 제품 제작



Wire Guide  
Wire  
Motor  
Camera

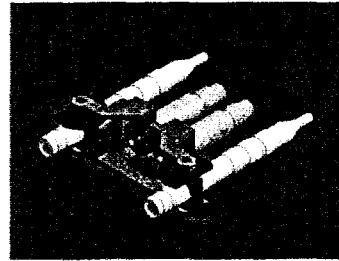
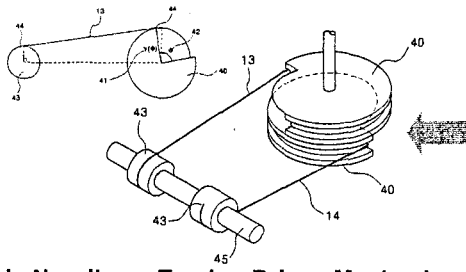
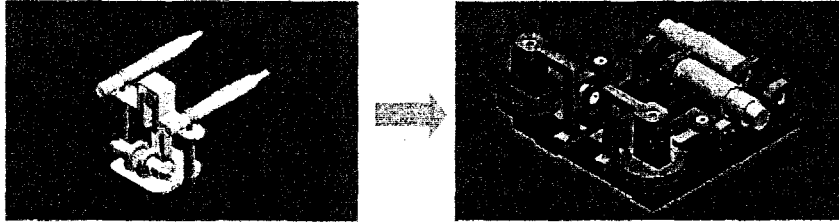
## 3차 제품의 설계

- 텐던 구조의 개선을 통해 소형, 경량화 가능.



사항	1차 제작품	2차 제작품
구동구조	텐던 구동구조	텐던 구동구조
크기	폭(mm)	110
	길이(mm)	135
	높이(mm)	57
카메라까지 높이	35	15
중량(g)	284	177
이접운동 가능범위	-30 ~ 45 deg	-30 ~ 60 deg
이접운동 최대속도	180 deg/sec	
이접운동 분해도	0.029 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	

## Stereo Camera Head: History



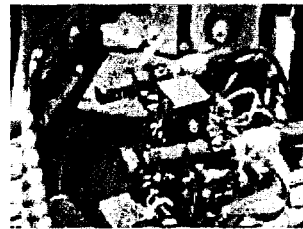
Noble Non-linear Tendon Driven Mechanism

KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

25

## 카메라 헤드의 제어

- 심도정보(Depth) 추출
  - 이점운동으로 쉽게 가능.
- 제어를 위한 시각정보
  - Normalized correlation
  - Optical flow
  - Color information
- MLPM (Modified LPM) 적용
  - 가까운 물체, 움직이는 물체 대응.

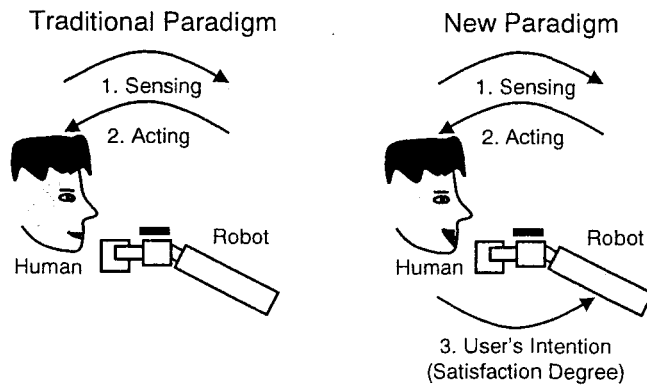


KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

26

## C. 표정인식을 이용한 사용자 의도파악

- 표정인식 기반 Intention Reading을 위한 기초연구
  - 긍정, 부정에 대한 구분
  - 7가지 표정인식 기술 연구



KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

27

## 얼굴 및 얼굴요소 추출

- 가정:
  - 실내 환경, 사용자의 정면 얼굴 영상을 대상.
  - 얼굴 근처에 사용자 얼굴과 색, 모양이 유사한 물체는 없음.

a. 얼굴위치추정 → b. 얼굴요소추출 → c. 표정인식을 위한 특징추출 → d. 표정인식수행

- a. 얼굴위치추정:
  - I1I2I3 컬러공간 사용
  - $I1 = (R+G+B)/3$ ,  $I2 = (R-B)$ ,  $I3 = (2G-R-B)/2$
  - 컬러히스토그램 기반.
- b. 얼굴요소추출:
  - 수평 에지(Horizontal Edge) 및 수직 투영(Vertical Projection) 등의 그룹화(Grouping) 이용.



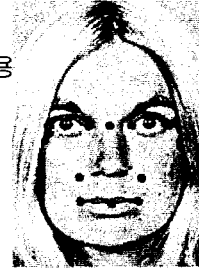
KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

28

## 신경망을 이용한 표정인식

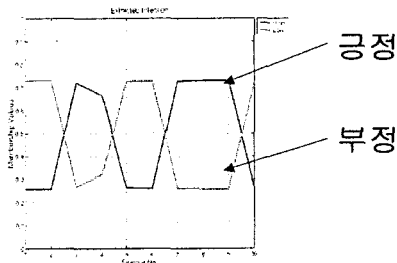
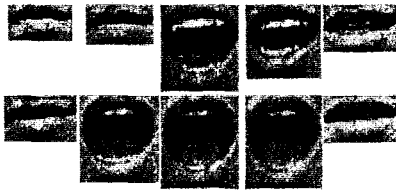
### ▪ c. 특징추출:

- 얼굴의 12개 특징점에 대한 가버(Gabor) 필터 적용
  - 커널크기: 2가지 (10×10, 13×13)
  - 커널방향: 4가지 (0°, 45°, 90°, 135°)



### ▪ d. 표정인식:

- 인공신경망 사용 (오차 역전파 학습법 기반)
- 7가지 표정 인식률: 81.2%
- 긍정/부정 인식률: 92.2%



## D. 센서 퓨전 및 인간-로봇 공동작업

### ▪ 센서 퓨전 기술의 개발

- 작업 수행을 위한 센서 기술 개발의 필요성
  - 물체 근처로 접근 했을 때 카메라가 물체를 인식하기 힘들(거리 인식)
  - 물체를 적절한 힘으로 잡는 기능이 필요
  - 주어진 시스템에 맞는 센서 모듈의 제작 필요

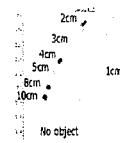
### ▪ 인간-로봇 공동작업

- 현재 로봇 지능의 한계점
  - 종합적인 판단력 및 예기치 않은 상황에 대한 대처능력 부족
- 두 객체(agent) 이상이 필요한 작업의 존재
  - 예) 긴 책상을 옮기는 것과 같은 작업
- 인간-로봇 공동작업으로 인한 상승(Synergy) 효과
  - 로봇: 정확한 움직임, 반복성
  - 인간: 종합적 정보 수집력, 지능적인 주변 상황 대처 능력

## 센서 퓨전 기본 모듈 개발

### ▪ 거리측정

- **Eye-in-hand** 카메라가 물체 가까이 접근했을 때, 물체를 보기 힘들
- **Gripper**에 연결을 위한 소형 **Sensor** 모듈 필요  
→ **PSD + Light Emitter**의 센서 모듈 제작



1cm-8cm 범위 거리 검출

### ▪ Force Sensor를 이용한 Gripper 시제품

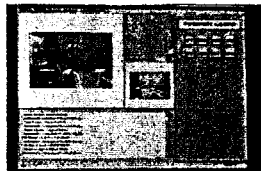


## 인간-로봇 공동작업 실험: 물체잡기

- 인간-로봇 공동 작업에 의한 작업 성공률 증가:  
**77.5% (Force Sensor 사용) → 80% (사용자가 로봇에게 잡을 물체에 대한 정보를 제공)**
- 로봇 이동 경로 수정 및 긴급 정지 명령으로 안전성 확보



→ 6축 힘-토크(Force-Torque)센서를 사용한 순응제어 : 로봇 방향 안내, 충격력에 대한 긴급 정지 가능



Visual Servoing을 이용한 물체 접근



GUI를 통한 명령 전달 및 인식 결과 제공



물체 잡기 작업

## 앞으로의 가능성: Visual Servoing

- 주변환경 적응 및 인간친화적 기술의 심화 연구를 통한 지능형 **Visual Servoing** 기술 구현 가능성.
  - 효율적인 시각 정보 처리 기술을 이용하여 경제성 있는 시제품 제작 가능함.
  - 관련 장치의 소형화를 통한 카메라 헤드의 제품화 가능함.
  - 센서 융합 기술의 심화 연구를 통한 장애인을 위한 지능형 **Gripper** 구현 가능함.
  - 표정 인식 기술은 다양한 인간-로봇 상호작용 시스템에 파급 효과가 클 것으로 예상됨.

## 연구목표: 생체신호(EMG) 제어기

- 생체신호를 이용한 4자유도 로봇팔 제어기
  - 4 자유도 로봇 팔 제어기 성능 향상
    - 비례제어 (**Proportional control**) 기법의 적용
      - 인간 친화적인 제어 알고리즘의 개발
  - 무선기능 추가된 생체신호 증폭기의 소형화, 모듈화

## 근전도를 사용한 비례제어의 힘 추출

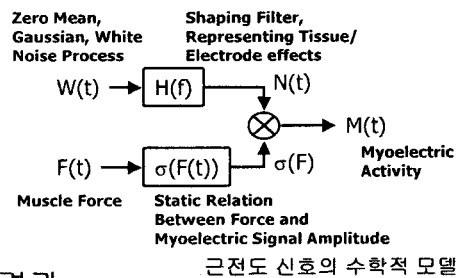
- 근전도를 사용한 비례제어: 사용자의 근육의 힘에 비례하여 로봇 팔의 속도 (혹은 각 조인트의 회전각)를 제어하는 방법
- 근전도 신호의 수학적 모델:  
곱셈 모델

$$M(t) = N(t) \times \sigma(F)$$

$M(t)$ : 근전도 신호

$N(t)$ : 영평균, 가우시안 노이즈 신호

$\sigma(F)$ : 힘 신호와 static 관계를 갖는 크기 신호

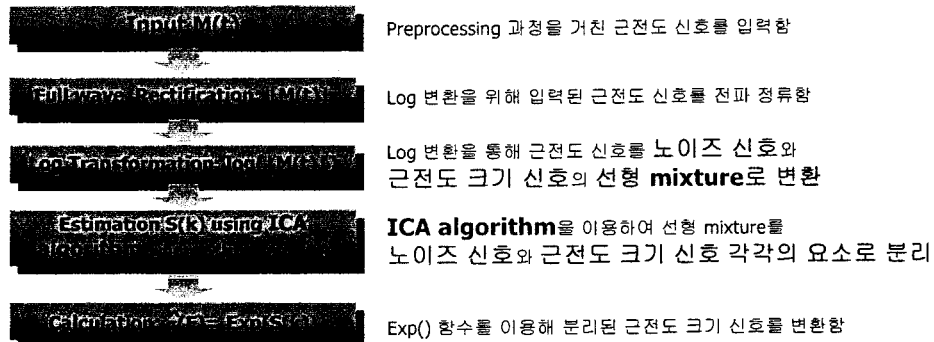


- 힘 추출에 관한 기존 대표 연구결과
  - 전파 정류기 및 저역통과필터를 이용한 방법
  - **MARMS (Moving Average Root Mean Square) estimator**를 이용한 방법 [Clancy1994]

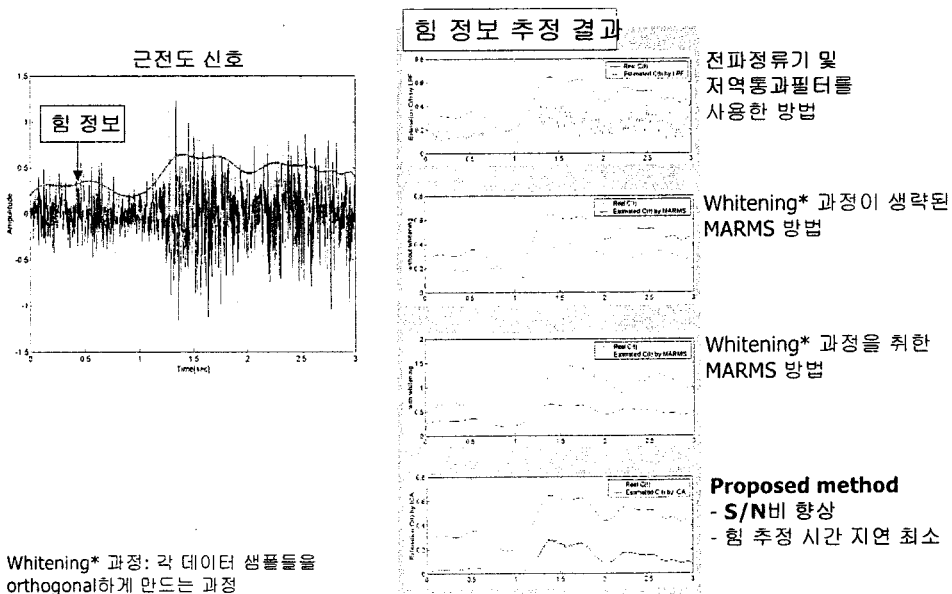


## 근전도를 사용한 비례제어의 힘 추출

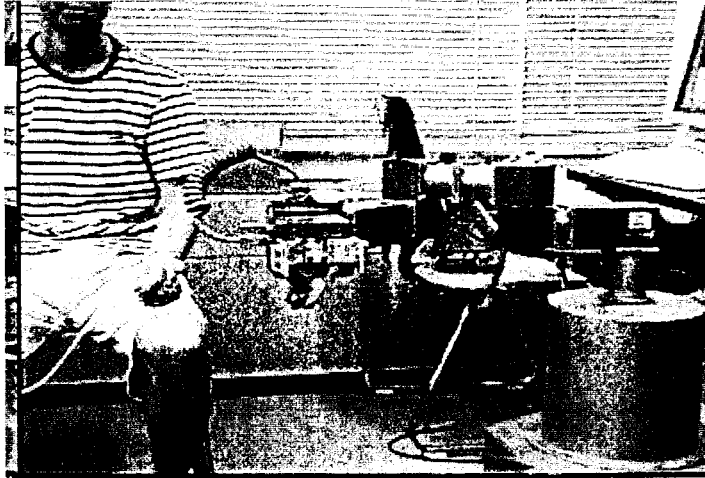
- ICA (Independent Component Analysis) 기법에 기반한 힘 추출 알고리즘 제안
  - 기존의 방법에 비해 S/N비가 향상됨.
  - 힘 정보 추출을 위한 시간 지연이 거의 존재하지 않음.



## 힘 추출 실험



## 근전도를 사용한 비례제어 실험

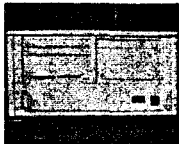


KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

39

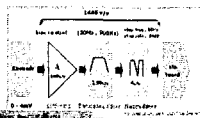
## Wireless EMG AMP의 개발

**[기존의 상용품]** 큰 크기와 고가의 가격으로 실제 장애인 사용 불가



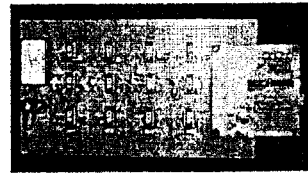
Size: 550\*370\*250 (mm)  
Polygraph AMP  
(EEG, EMG 등 측정 가능)  
Input range: -10 ~ 10V  
Gain: 50V/V ~ 20,000V/V  
다양한 주파수 범위의 filter  
내장

**[개발된 생체신호 증폭기]** Portable size와 저렴한 가격으로 근전도 제어 가능



Size: 120\*130\*10 (mm)  
(Portable size)  
EMG AMP  
Input range: -5 ~ 5V  
Gain: 1,360V/V  
60Hz notch filter  
(Biquad 2 level notch filter)  
23Hz ~ 470Hz bandpass filter  
Stop rate: -32.5dB at 60Hz

**[Wireless 생체신호 증폭기]**



사용자의 이동성 확보

송수신 주파수: 433.92MHz  
통신속도: 32,000 bps  
Size: 100\*100\*10 (mm)  
(Portable size)  
EMG AMP, 4채널  
Input range: -5 ~ 5V  
Gain: 1,360V/V  
60Hz notch filter  
(Biquad 2 level notch filter)  
23Hz ~ 470Hz bandpass filter  
Stop rate: -32.5dB at 60Hz

KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

40

## 근전도를 사용한 Wheelchair Controller의 개발

- 장애인을 위한 휠체어 조종기
  - 호흡, 음성, **Ultrasonic Head** 제어기, 조이스틱 등은 중증 척수 장애인 (**C4, C5**)이 사용하기에 힘든 경우가 많음.
  - 목근육의 근전도 신호를 이용한 휠체어 **Controller**의 개발

### ■ 근전도 신호에 기반한 휠체어 Controller

- 기본 명령어

목 운동	휠체어 명령
앞으로 숙이기	직진
오른쪽으로 움직이기	우회전
왼쪽으로 움직이기	좌회전
Normal state	정지



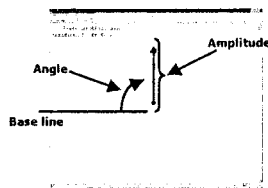
- 동작 분류 성공률: 평균 **91.04%** (437회 성공/480회 동작 테스트)

\* ICCAS 2001 (International Conference on Control, Automation and Systems): accepted  
KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

41

## 근전도를 사용한 Wheelchair Controller의 개발

Simulated Wheelchair controller



중증 척수 장애인과의 실험결과



직진하기

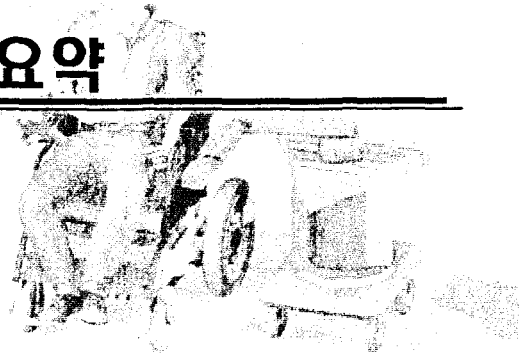
KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

42

## 앞으로의 가능성: 생체신호(EMG) 제어기

- **EMG(근전도) 기반 파생 기술 제품화 가능.**
  - 무선 **EMG** 측정 및 송수신 장비의 제품화 가능.
  - 중증 지체 장애인(**C4, C5**)을 위한 전동 휠체어 조종 장치의 제품화 가능.

# 요약



## 사용자에 따른 모듈화된 시스템

- 모듈화된 시스템의 조합을 통해 다양한 사용자에게 적용될 수 있음.

범례. O: 적합, ▲: 필요에 따라 적용가능, X: 부적합

모듈화된 시스템	척수장애인 C4	척수장애인 C5	척수장애인 C7	노약자	외과의사	일반인
로봇 팔	O	O	O	O	▲	▲
Visual Servoing	O	O	O	▲	▲	▲
EMG에 의한 제어	X	O	O	▲	▲	▲
Eye-Mouse	O	O	▲	▲	▲	▲
Haptic Suit	▲	O	O	O	▲	▲
수동 조정기	X	X	X	O	O	O
마이크로 입력 장치	X	X	X	O	O	O

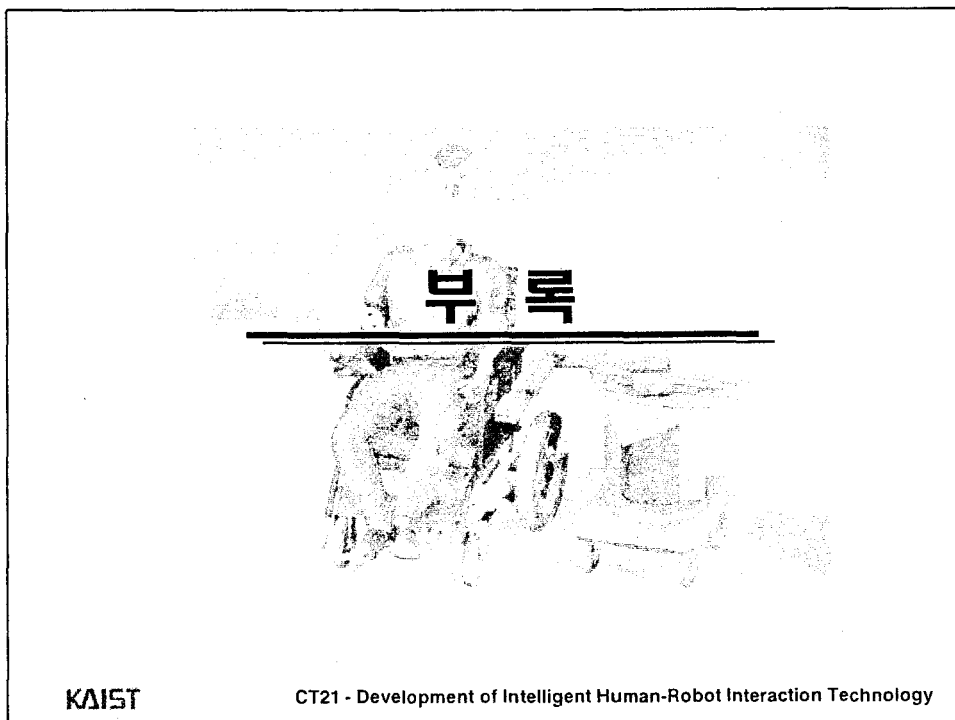
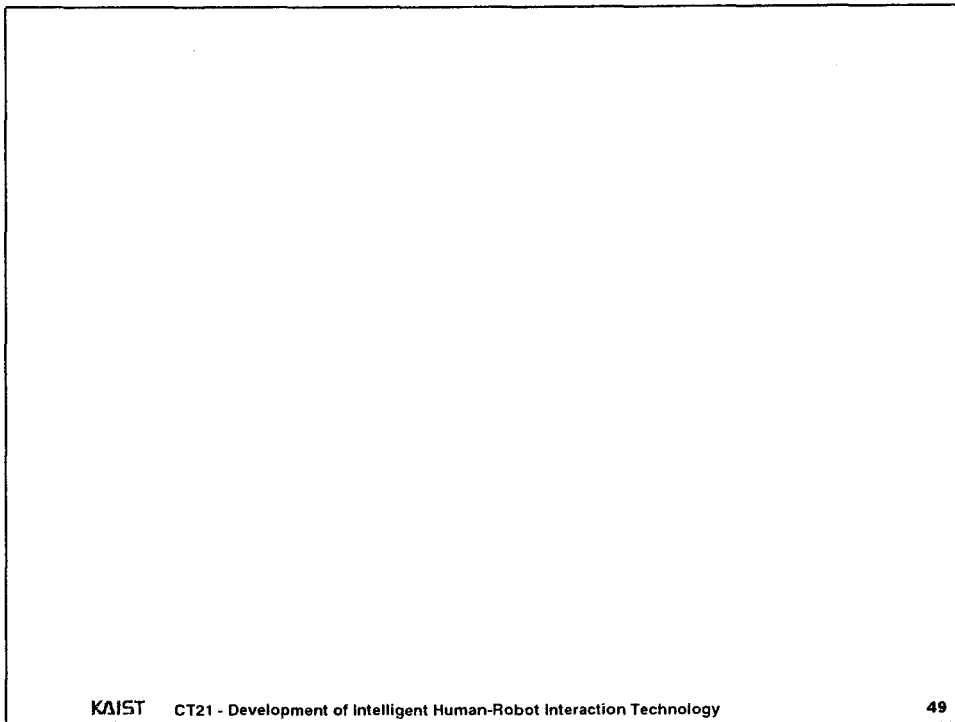
## 제품화 가능한 시스템

### 특허 획득을 통한 제품화 기반 마련

Products	Contents	Applications
Multi-purpose eye mouse	Eye tracking system Application software	Interaction device for the disabled Interaction device for virtual reality
Wearable haptic device	2 DOF haptic device 6 DOF haptic device	Robot manipulation device Interaction device for virtual reality/entertainment Interaction device for telemanipulation
Small & accurate stereo vision system for visual servoing	Object tracking device Intelligent vision module	Tracking and Grasping for a moving object Interaction with a user
Robot manipulation device by biosignal	4 DOF robot manipulation 6 DOF robot manipulation	Intelligent robot control Intention reading
Soft robot arm	6 DOF robot arm Cable mechanism with high-speed reduction	A robot arm for the user's safety
Cable-driven wrist	Low cost pre-tensioning mechanism, Small-sized cable differential	Backlashless robot design
Software for Robot Kinematic Structure Decision	Grid method based, Find robot kinematic structure based on defined tasks	A robotic arm design with defined tasks

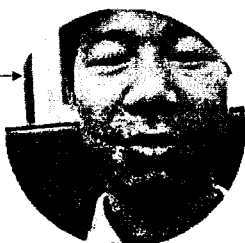
## 3차년도 공개 발표된 연구개발 성과

- 학위논문: 2편
  - 석사학위논문 1편, 박사학위논문 1편
  - 연구 중인 학위 석박사 논문: 6편
- 학술회의논문: 17편
  - 국제학술회의 16편 + 국내학술회의 1편
- 특허: 4건
  - 국제특허출원 1건
  - 국내특허출원 2건
  - 국내특허출원예정 1건
- 저널논문: 8편 = 5편(국제저널, 제출된 1편 포함) + 3편(국내저널, 제출된 1편 포함)



## 공간변화비전: Log-polar Mapping

Original Image  
(180,916 pixels)



Remapped Image II  
(64 x 128=8,192 pixels)



22:1

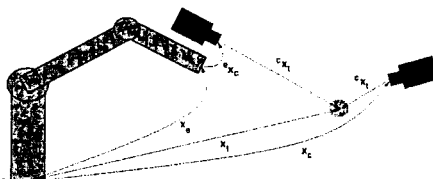
- Increasing attention of important parts in an images

### Advantages

- High resolution of the interest
- Wide field-of-view
- Fast processing speed

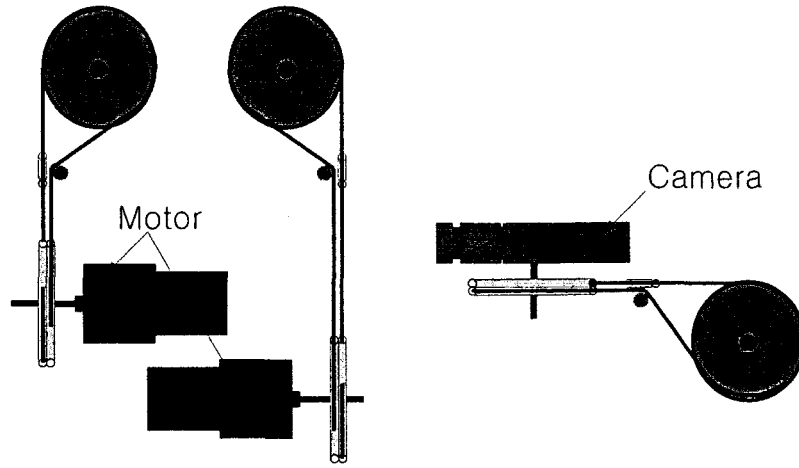
## A Camera Configuration for Wheelchair-based Robotic System

- Eye-in-hand configuration: images in the standpoint of a robotic arm
  - Easy calibration between a camera and an end-effector.
  - Various orientation and resolution images can be obtained.
  - Only a target is processed in images.
  - Camera mounting area can be reduced.





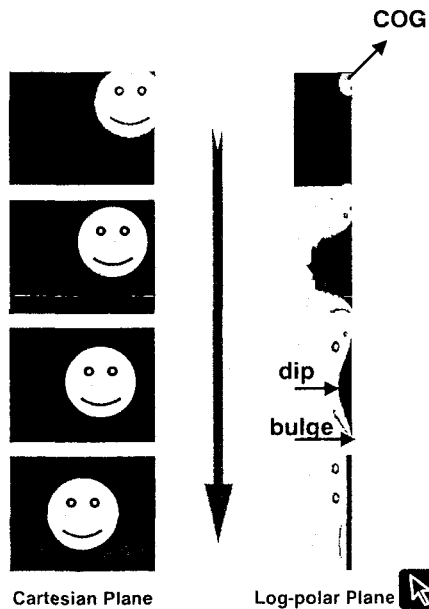
## Tendon 구동 구조



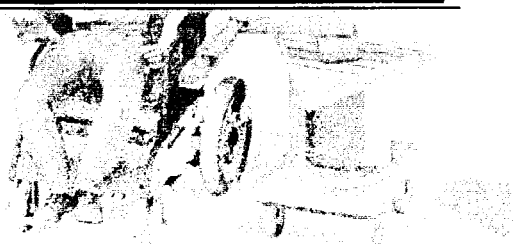
## 추적 알고리즘

### ■ Weiman's Algorithm

- COG(center-of-gravity) mode
  - Global centering and tracking
  - Usage of center-of-gravity features
- Bulge mode
  - Local centering
  - Usage of dip and bulge features
  - These features give more precise direction for centering.
    - "Bulge" denotes some acute part of object.



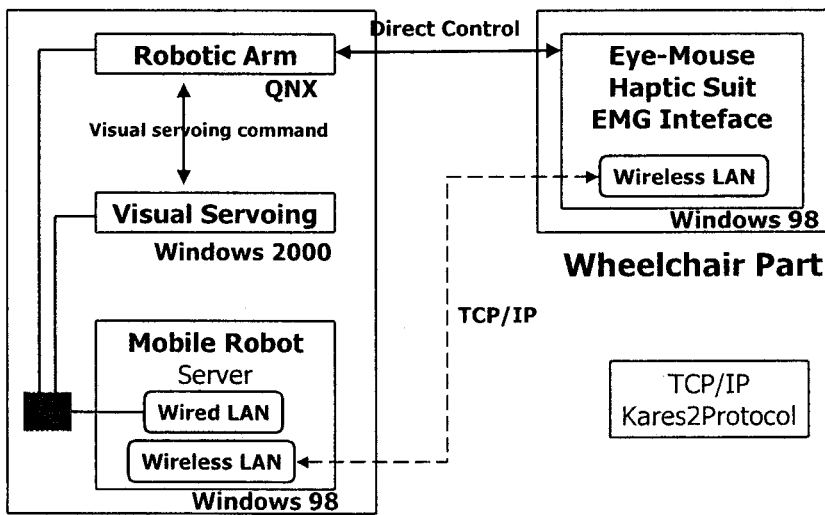
# 시스템 통합



KAIST

CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

## 시스템 통합: 개념도

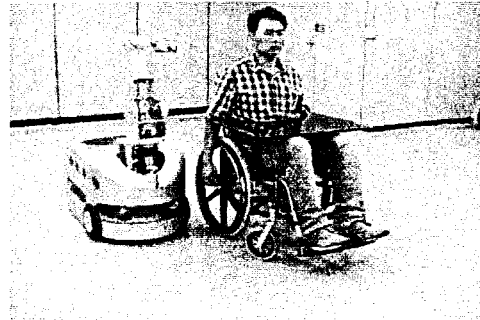


KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

56

## 이동 로봇 (로봇팔, 비주얼 서보잉)

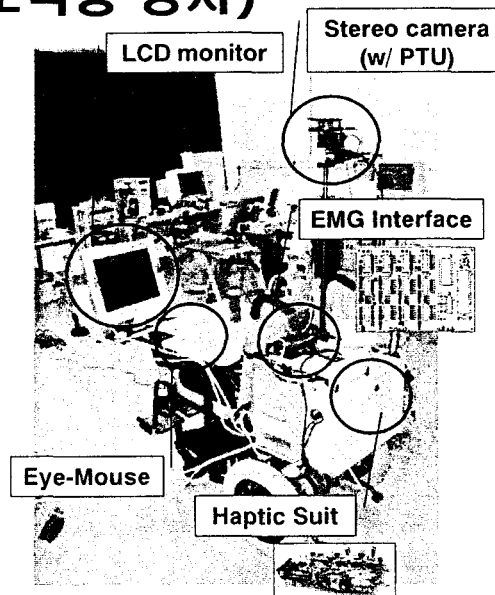
- 기능
  - 2 휠 메커니즘  
(not omni-directional)
  - 원격제어 기능  
(not autonomous)



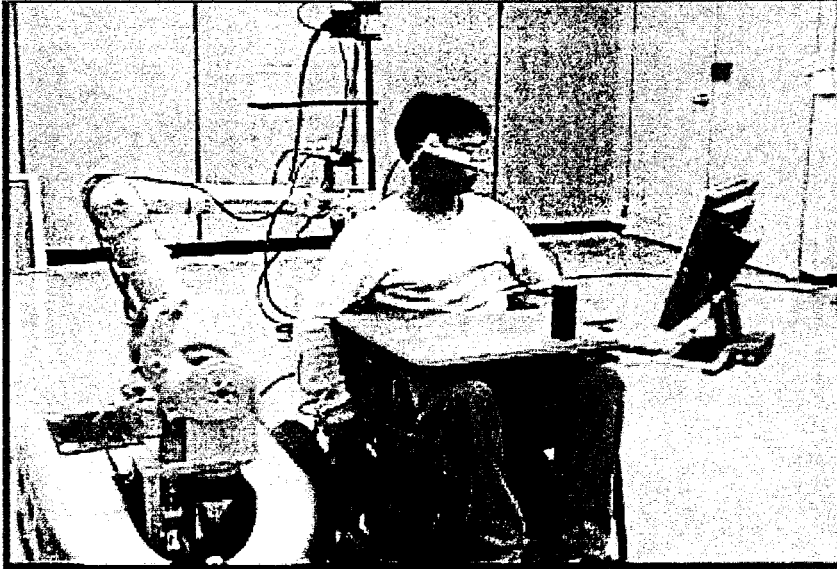
- 사양
  - 크기(mm): 536×500×920 (W×H×L)
  - 최대 적재가능량: 80kg
  - 전력소모: 2kWh (for Robotic Arm and PCs)
  - 최대 속도: 0.5m/sec

## 휠체어 (각종 상호작용 장치)

- 전동휠체어
  - 5 스위치 모듈 채용
- LCD 모니터 (Display)
- 스테레오 카메라
  - Pan-Tilt 기능
  - 3D 위치 추출
- 중앙 제어용 PC
- 각종 상호작용 장치
  - Eye-Mouse
  - EMG Interface
  - Haptic Suit



## 기본작업: 물마시기



KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

59

# A Hand-Held Master with a Shared Control for Tele-operation

Woong Kwon, Sukhan Lee

Samsung Advanced Institute of Technology(SAIT),  
Yongin-si, Kyungki-do, 449-712, KOREA.  
E-mail: {wkwon, lsh}@sait.samsung.co.kr

## Abstract

*This paper describes the outline of a hand-held portable master device that can be human-friendly used in tele-operation and virtual reality. The review on a variety of current input devices in tele-operation and virtual reality is presented. We propose a novel hand-held master input device which has some merit over traditional input devices. A prototype is designed to verify the sensing capability. We also propose a shared control method, called Force Accommodation Based Adaptive Reference (FABAR) Controller, to be employed in the tele-operation system with the proposed master. The control method combines force accommodation with reference adaptation for suitable mode switching and contact transition.*

## 1 Introduction

To perform a task in hazardous environment such as nuclear power plant, space, and marine, tele-operation is needed. Tele-operation is also employed in robotic surgery, micro assembly, etc., where totally automatic operation without human control is impossible. Tele-operation is implemented by an input device for a human operator to command and by a slave robot to achieve an end as shown in Fig. 1. In the tele-operation and virtual reality (VR) application performance of an input device as well as of a slave robot is a key point.

Input device is defined as 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. There have been a variety of input devices to be used in tele-robotic applications and VR environment[1][2][3]. The most widely used input devices in industrial areas are teach pendants, and in VR environments are joysticks. A master arm manipulator 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 in the market, particularly in surgical robot and VR. Glove

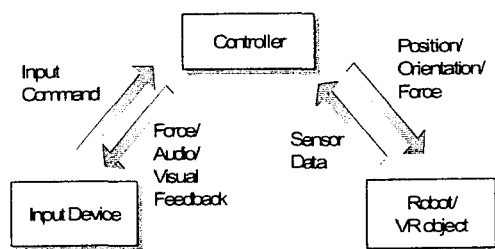


Fig. 1 Tele-operation System

type input devices are also widely used in VR, since commands are made very conveniently and there is little limit to the workspace. Pen type input devices are also developed to increase intuitiveness and to easily make input commands. Input devices equipped with inertial sensors have also been proposed recently.

The key factors of the input devices are the intuitiveness, cost, and the applicability to various fields. The portability of an input device 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 in such a way as 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 force accommodation deals with the general problem of changing from free motion to constrained motion in tele-operation. The adaptive reference control in tele-operation was originally proposed for extending the scope of compliance and re-

solving the unexpected time delay. With the FABAR control implemented in the tele-operation controller, the tele-operation system can be operated by the shared control 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.

This paper is organized as follows. In Section 2 the review on current input devices are presented, and in Section 3 the design of the hand-held master is proposed with comparative study. Section 4 describes the shared control method and finally conclusions are given in Section 5.

## 2 Review on Input Devices

There have been various input devices for use in industrial robotic applications including tele-operation, and in VR applications. Commercialized input devices for such applications are teach pendants, joysticks, master arms, glove masters, etc. The most widely used input devices in industrial areas are teach pendants which have a keypad for the operator to command the robot, an LCD panel for display, and a deadman switch. But, teach pendants have a potential safety problem in that, since an operator cannot intuitively control an object, they may lead to an unexpected collision and wrong trajectory of the object. In this paper the term *intuitiveness* implies that a human operator can make input commands as if he directly controls the real object, which can also be termed tele-presence. Although joystick is also widely used in VR environments such as graphical computer game, it also has a limit on intuitive control since three or more than dimensional command cannot be made. Moreover such input devices cannot produce force and/or tactile feedback from the slave robot or virtual objects, while they can utilize only indirect feedback information such as vision or audio.

On the other hand, a master arm, which is a multi axes manipulator whose joints are geared or tendon-driven, can exert generally three or more than dimensional, intuitive input command, and can reflect force and/or tactile feedback information. Therefore, master arms are widely used in remote controlled robot, tele-operation, and VR. Many master arms are put in the market, such as Phantom robot of Sensable Inc.[4], da Vinci surgical robot system of Intuitive Surgical Inc.[5], and ZEUS system of Computermotion Inc[6]. Master arms, however, have limited workspace because they must be fixed on the operation table, have very complicated mechanisms, are generally expensive, and

have some safety problems since human directly move the motorized joints.

Glove type input devices are widely used in VR, since commands are made very conveniently and there is little limit to the workspace. Commercial products of Virtual Technology Inc.[7] are Cyber Glove which has no feedback, Cyber Touch[8] and Cyber Grasp[9] which have force and/or tactile feedback using vibration and exoskeleton mechanism respectively. Rutgers Univ. also developed force feedback glove using pneumatic cylinder[10]. Glove input devices are very expensive and need complex mechanism for force and/or tactile feedback. Also, it is very difficult to make translational motion input command with glove input device.

Besides the commercialized input devices mentioned above, many input devices have been proposed to improve the performance. Pen type input devices are also developed to increase intuitiveness and easily make input command[11][12][13]. Toyoda Inc.[14] proposed the pen type robot teaching machine to command robot using measured position and angle of the input device. But it is difficult for these pen type input devices to be practically used since they should be fixed on the table, require complicated mechanical structure to support the input device, and have limited workspace.

In recent years, novel conceptual input devices equipped with inertial sensors such as accelerometers and gyros have been proposed. LaBiche et al.[15] proposed an input device with multiple accelerometers to obtain its translational and angular acceleration. It solves its position and orientation to be used as a motion input. Dynetics Inc.[16] also proposed a gyro-based three-dimensional wand where three gyros are installed perpendicularly with each other to make translational and angular command input. The directions of the input device and the robot coincide with each other as closely as possible to maximize the intuitiveness, and the motion of the input device is filtered and constrained to guarantee safety of the robot. But the fact that this input device cannot provide force feedback information leads to limit on the use in tele-operation. Additionally, the inherent drift error of gyros may induce fault of the input command.

In this section we surveyed a variety of input devices, whether commercialized or not, in robotic application and VR in terms of technological viewpoint and human factor. In the following section we propose a novel input device which is superior to current input devices in many aspects.

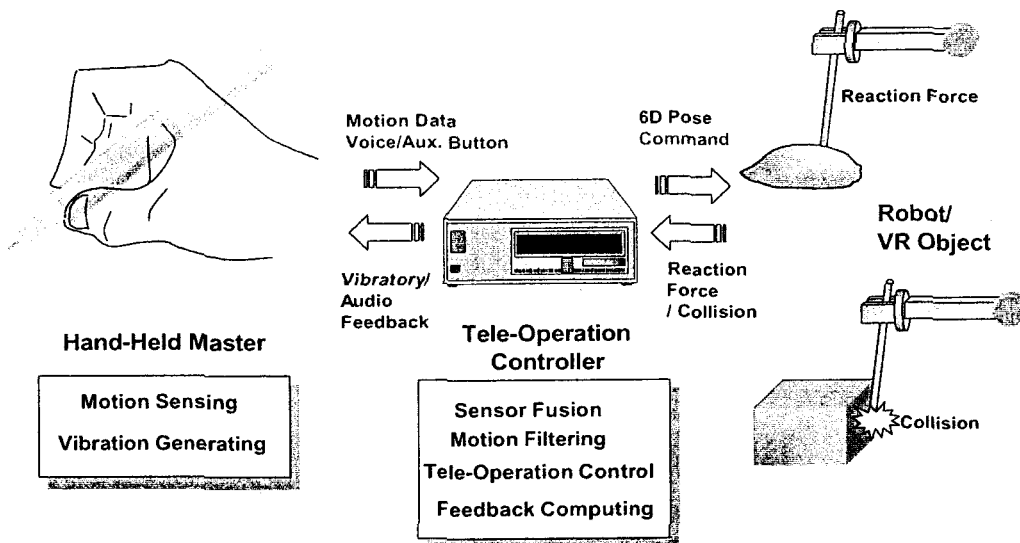


Fig. 2 Hand Held Master and Slave Robot

### 3 A Novel Hand-Held Portable Master

We propose a hand-held portable master which can be grasped like a pen by an operator's hand as shown in Fig. 2. Such grasp can increase the intuitiveness and thus finally can achieve tele-presence which means that the operator can manipulate the master as if he/she directly manipulates the slave robot, the surgical instruments, etc. The hand-held master can also be applied to the gesture command interpretation system, although it is originally intended for use in replicative or scaled motion application,

#### 3.1 Design of the Hand-Held Master

Since the master is only constrained by the operator's hand and fingers, the operation must be switched between the intended motion for input command and the other unintended motion owing to the tremor of the hand, change of the operator's posture, idle state of the task, etc. The mode switching can be implemented by the auxiliary button and/or the operator's voice command. Since the mode switching should be naturally done so that the slave robot is not affected, voice command may be preferable to auxiliary button as the switching command.

Fig. 2 illustrates the relation among the hand-held master, the tele-operation controller, and the slave robot. The master sends the motion data to the tele-operation controller where motion filtering and sensor fusion algorithm work for the exact recognition of the position/orientation - hereafter we call it pose - of the master. The controller commands the slave robot and receives the feedback information from the robot such as achieved pose and reaction force/moment - here-

after we call it force for convenience. Then, the feedback is sent the master via vibratory and/or auditory signal.

The concept diagram of the master, the controller, and the slave is depicted in Fig. 3. The master is composed of a 3 axes gyro, a 3 axes accelerometer, a ultrasonic or magnetic sensor and a piezo vibrator. Since these inertial sensors and magnetic sensor are fabricated by MEMS technique, the integration of all the components into a small pen type device is possible. The acceleration and angular velocity of the master obtained from the inertial sensors are filtered in the tele-operation controller to exclude high frequency noise and vibration feedback component. The drift compensation estimator solves the optimal estimate of the pose of the master using Kalman Filter[17] or Perception Net[18] with the aid of the ultrasonic or magnetic sensor data. The estimated pose of the master are used as the command in the shared controller, as will be explained in Section 4. The velocity output of inertial sensors can also be directly used in the controller.

Force/torque sensor and position sensor of the slave robot send the data to the controller for feedback. Vibratory feedback in a glove type input device was proposed by Virtual Technology Inc.'s Cyber Touch[8]. We employed a fuzzy logic rules for human friendly vibratory feedback. The fuzzy input variables are norm of reaction force and tilt angle and the fuzzy output variables are the frequency and time interval of vibration. Detailed description will be given in our future publication. The auditory feedback can be produced by the master or an external device though it is not shown in Fig. 3.

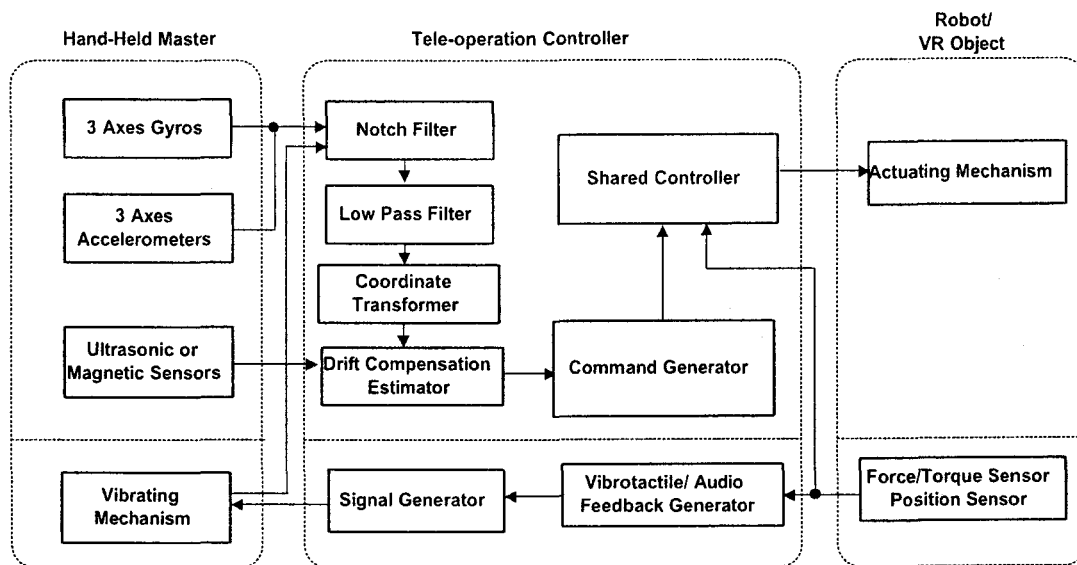


Fig. 3 System Overview with the Hand Held Master

The prototype was made to test the sensing capability, as shown in Fig. 4. The hardware descriptions of the prototype are as follows: the microprocessor is PIC microcontroller, the accelerometers are two ADXL205, the gyros are two Murata Enc03J, the ultrasonic sensors are six Polaroid Sigma 6500 series, and the magnetic sensors are Honeywell Hmc1001 and 1002. The resolution of the prototype is 1mm in translational component and 0.5 deg in angular component. The size of the prototype is currently 2cm  $\times$  2cm  $\times$  20cm which are yet large for portable manipulation. We omit the experimental results on pose estimation capability considering the limited space of this paper. In our future publication we will disclose the next prototype which incorporates vibratory feedback and shared controller.

### 3.2 Comparative Study

The proposed hand-held master has many advantages over traditional input devices as follows. It can replicate complete six dimensional - three translational and three rotational - motion, thus enabling an operator to make intuitive command for the slave robot, which results in tele-presence. This can not be achieved with a joystick or a master arm which has a fixed support base. The proposed master has a very simple structure consisting of only sensors and a vibrating actuator, while a master arm, glove input device and fixed support based pen input device should have complicated mechanisms. Considering the price of the accelerometer and gyro in the market, the proposed master can be produced at very low cost, when compared with the glove input device and the master

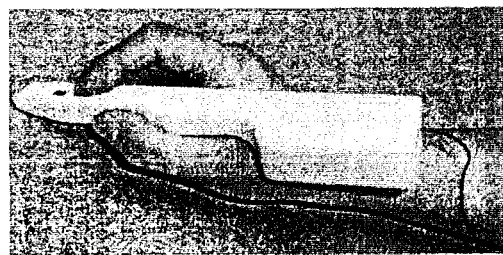


Fig. 4 The Prototype of The Hand Held Master

arm which cost at least hundreds of thousands of US dollars.

Moreover, there is no limit on the workspace of the proposed master, which is impossible for fixed support based input devices. The singular point problem does not exist in the hand held master, while it is critical in the master arm. It is evident that the proposed master has infinite manipulability measure value. The force and tactile feedback information is obtained via indirect method such as vibration and sound effect, which can also lead to simple and inexpensive product. And, other than current input devices, the proposed master can be applied in various fields such as VR, hazardous environment, micro surgery, wearable computing, 3D calibration, and so on.

## 4 Shared Control

To effectively control the slave robot in the tele-operation, a shared control technique is needed to com-



bine a user's motion command with an automatic positioning algorithm. In this section we propose a shared control, called Force Accommodation Based Adaptive Reference (FABAR) Control in order to use the hand held master in a tele-operation. The force accommodation proposed by Williams et al.[19][20] deals with the general problem of changing from free motion to constrained motion in tele-operation, termed the "phase transition problem" by Tarn et al[21]. The force accommodation was used in the Naturally-Transitioning Rate-to-Force Controller (NTRFC)[20] where the slave robot moves with rate control in free motion, while in contact with the environment the force exerted on the environment is controlled. We employ the force accommodation in our tele-operation system with the hand-held master, and combine it with the adaptive reference control. The adaptive reference control in tele-operation was proposed by Lee et al.[22] for extending the scope of compliance and resolving the unexpected time delay.

In a tele-operation environment the slave robot would be in either free motion or constrained motion states as illustrated in Fig. 5. In the free motion the slave robot freely moves after the master's command, like the trajectory towards  $C_1$  in Fig. 5, but in the constrained motion the slave robot contacts the environment or the object and the proposed hand-held master vibrates according to the rule base, like the trajectory from  $C_1$  to  $C_2$  in the figure.

The control diagram of FABAR controller is shown in Fig. 6. The filtered Cartesian velocity command  $\dot{x}_m$  from the hand-held master is adaptively adjusted to  $\dot{x}_a$  based on the output  $x$  of the slave robot, as is termed the reference adaptation. Then the adaptive reference command  $\dot{x}_a$  is compensated into  $\dot{x}_c$  with  $\dot{x}_f$  which denotes the force accommodation rate. It is assumed that the scale factor is 1 between the motion of master and slave without loss of generality. The detailed descriptions of the control method are as follows.

At first, suppose that reference adaptation algo-

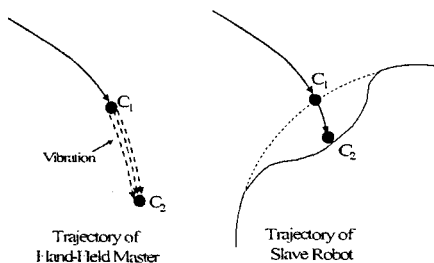


Fig. 5 Motion of the Master and the Slave

rithm is not incorporated in the loop. Then the Cartesian rate command of the human operator  $\dot{x}_m$  is directly used as the input of the controller, that is,  $\dot{x}_a = \dot{x}_m$ . In free motion, the pose of the master is mapped to the pose of the slave and there is no reaction force:  $f_R = 0$  and thus  $\dot{x}_f = 0$ . The control input  $\dot{x}_c (= \dot{x}_a)$  is used to solve the resolved rate equation  $\dot{\theta}_s = J^{-1}\dot{x}_c$ , where  $J$  means the Jacobian, at each control step. The computed joint rate  $\dot{\theta}_s$  is integrated to joint angle  $\theta_s$ . The servo controller of the slave robot continuously track the commanded  $\theta_s$  resulting in actual Cartesian pose output  $x$ . Many controller can also be used instead of the resolved rate controller, such as independent joint controller.

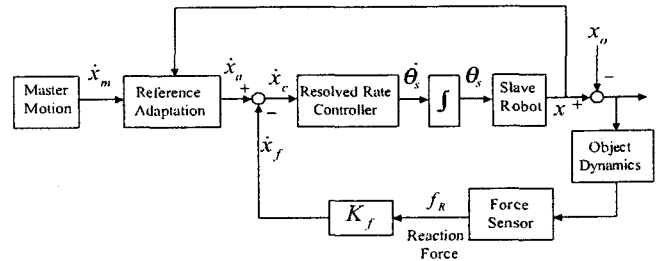


Fig. 6 FABAR (Force Accommodation Based Adaptive Reference Controller)

If the slave robot is in contact with the object or the environment such as peg-in-hole in assembly or dissection in surgery, there are constraints on the motion of the slave, denoted by  $x_o$  in the figure, and the reaction force  $f_R$  exists. The pose of the master is mapped to the force of the slave and the dynamics of the object and the reaction force should be considered. The force accommodation algorithm is introduced to automatically achieve zero force in order to minimize blind force of contact so as to prevent damage of the robot and the object during tele-operation[19]. The reaction force  $f_R$  is converted to a Cartesian space velocity so that the force accommodation rate in this controller is

$$\dot{x}_f = K_f f_R \quad (1)$$

where  $K_f$  is a diagonal gain matrix ensuring stability. Then the compensated input to the resolved rate controller is the difference of the master motion command and the force accommodation rate such that

$$\dot{x}_c = \dot{x}_m - \dot{x}_f. \quad (2)$$

As the master continues to move towards the object experiencing vibratory feedback, the slave robot attempts to exert increasing force on the object, but the force accommodation controller commands a reverse

motion to zero exerting force. In the equilibrium state, the displacement of the master pose is proportional to the exerted contact force. This controller in contact is analogous to an impedance controller with only a damping term. In free motion, the controller behaves like a rate controller.

On the other hand, due to the inherent characteristics of the hand-held master, real time mode switching between active mode and inactive mode is needed as discussed in Section 3. In the active mode the motion of the hand-held master is used as the motion command of the slave robot, while in the inactive mode the motion of the master does not affect the slave robot. Using this mode switching, a variety of posture of the slave can be implemented while some of them may not be commanded by traditional input devices. But, there is an unavoidable problem in mode switching of the hand-held master: discontinuity of the trajectory of the master may bring out unattainable motion of the slave with very large acceleration or force. In order to resolve this problem we employ the reference adaptation in the controller.

The reference adaptive controller was devised to deal with a large delay or time slack in trajectory tracking which may lead to undesirable robot behaviors[22]. The fundamental principle of the control is that the desired next state is determined based on the current state, not on the pre-planned trajectory. We inserted the reference adaptation algorithm between master command input and force accommodation in such a way as to give an adaptive reference input to the rate controller. The control law is dependent on the mode switching: if the master is in an active mode the control law is

$$\dot{x}_a(i+1) = \dot{x}(i) + [\dot{x}_m(i+1) - \dot{x}_m(i)] \quad (3)$$

where  $i$  means the current sampling time. The next command  $\dot{x}_a(i+1)$  is the sum of the rate of current output and the relative pose difference between the current master pose and the next master pose. In this equation (3) scale factor of the motion between the master and slave does not appear according to the assumption. If the master is in an inactive mode the motion command from the master should be regarded as constant like  $\dot{x}_m(i+1) = \dot{x}_m(i)$  and the desired next command is

$$\dot{x}_a(i+1) = \dot{x}(i). \quad (4)$$

By equation (3) and equation (4), the continuity of the command trajectory is guaranteed whenever a mode switching occurs. Since the velocity input is constant in the inactive mode, the force tends to increase when in contact with the environment or object, but crash

or damage will not arise because force accommodation and saturation controller, if needed, will be issued as the force increases. With the FABAR control implemented in the tele-operation controller, the tele-operation system can be operated by shared control 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. We will demonstrate the experimental result of this control method in our future publication.

## 5 Conclusions

This paper proposed a hand-held portable master device that can be human-friendly used in tele-operation. The existing input devices were discussed in terms of market trend and human factor. The proposed hand-held master integrates only MEMS inertial sensors and vibrating actuators. The master has many advantages over current input devices, mainly in the intuitiveness, the cost effectiveness and the portability. To control the tele-operation system with the hand-held master, a shared control technique - Force Accommodation Based Adaptive Reference (FABAR) Control - was also proposed. In this control, the force accommodation was used for natural free-constrained motion transition and the reference adaptation was used for active-inactive mode switching. The first prototype of the proposed hand-held master was experimentally tested and the improved version would be disclosed in our future publication.

## References

- [1] P. Fischer, R. Daniel, and K.V. Siva, "Specification and Design of Input Devices for Teleoperation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Automat.*, pp. 540-545, 1990
- [2] G.C. Burdea, "Invited Review: The Synergy Between Virtual Reality and Robotics," *IEEE Trans. on Robot. and Automat.*, vol. 15, no. 3, pp.400-410, 1999
- [3] G.C. Burdea, "Haptics Issues in Virtual Environments," *Proc. of Computer Graphics International*, pp.295-302, 2000.
- [4] SensAble Technologies, Inc., *Website* <http://www.sensable.com/>
- [5] Intuitive Surgical Inc. *Website* <http://www.intuitivesurgical.com/>
- [6] Computer Motion Inc., *Website* <http://www.computermotion.com/>
- [7] Virtual Technologies, Inc, *Website* <http://www.virtex.com/>

- [8] Virtual Technologies, Inc., *US Patent No. 6088017*, Tactile Feedback Man-machine Interface Device, 2000.
- [9] Virtual Technologies, Inc., *US Patent No. 6042555*, Force-Feedback Interface Device For The Hand, 2000.
- [10] Rutgers University, *US Patent No. 5354162*, Actuator System For Providing Force Feedback To Portable Master Support, 1994.
- [11] H. Iwata, "Pen-based Haptic Virtual Environment," *Proc. of Virtual Reality Annual Int. Symp.*, pp. 287-292, 1993.
- [12] T. Sato, J. Ichikawa, M. Mitsuishi, and Y. Hata-mura, "Micro-Teleoperation with Manual Task Execution Posture," *IEEE Control Systems Mag.* v.15 no.1 pp.22-29, 1995.
- [13] P. Buttolo and B. Hannaford, "Pen-Based Force Display for Precision Manipulation in Virtual Environments", *Proc. of Virtual Reality Annual Int. Symp.*, pp.217-224, 1995.
- [14] Toyada Koki Kabushiki Kaisha, *US Patent No. 6019606*, Robot Teaching Machine, 2000
- [15] LaBiche et al., *US Patent No. 4839838*, Spatial Input Apparatus, 1989
- [16] Dynetics, Inc., *US Patent No. 5617515*, Method and Apparatus for Controlling and Programming a Robot or Other Moveable Object, 1997
- [17] P.S. Maybeck, *Stochastic Models, Estimation, and Control, Volume 1*, Academic Press, 1979.
- [18] S. Lee, "Sensor Fusion and Planning with Perception-Action Network," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 19, no. pp.271-298, 1997.
- [19] 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.
- [20] R.L. Williams II, F.W. Harrison, and D.I. Soloway, "Naturally-Transitioning Rate-to-Force Controller for Manipulators," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robot. and Automat.*, pp.299-304, 1996.
- [21] T.J. Tarn, Y. Wu, N. Xi, and A. Isidori, "Force Regulation and Contact Transition Control," *IEEE Control System Magazine*, v. 16, no. 1, pp.32-40, 1996.
- [22] S. Lee, M.F. Jean, J.O. Park, and C.W. Lee, "Reference Adaptive Impedance Control: A New Paradigm For Event-based Robotic and Telerobotic Control," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelli. Robots and Syst.*, pp. 1302-1307, 1998.

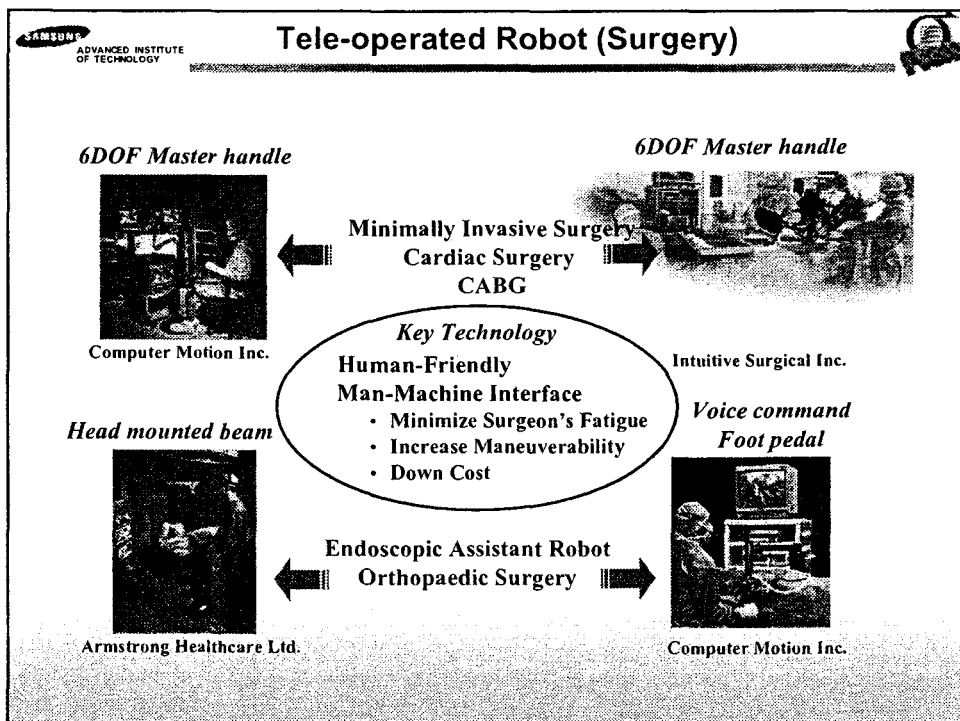
**SAMSUNG**  
ADVANCED INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

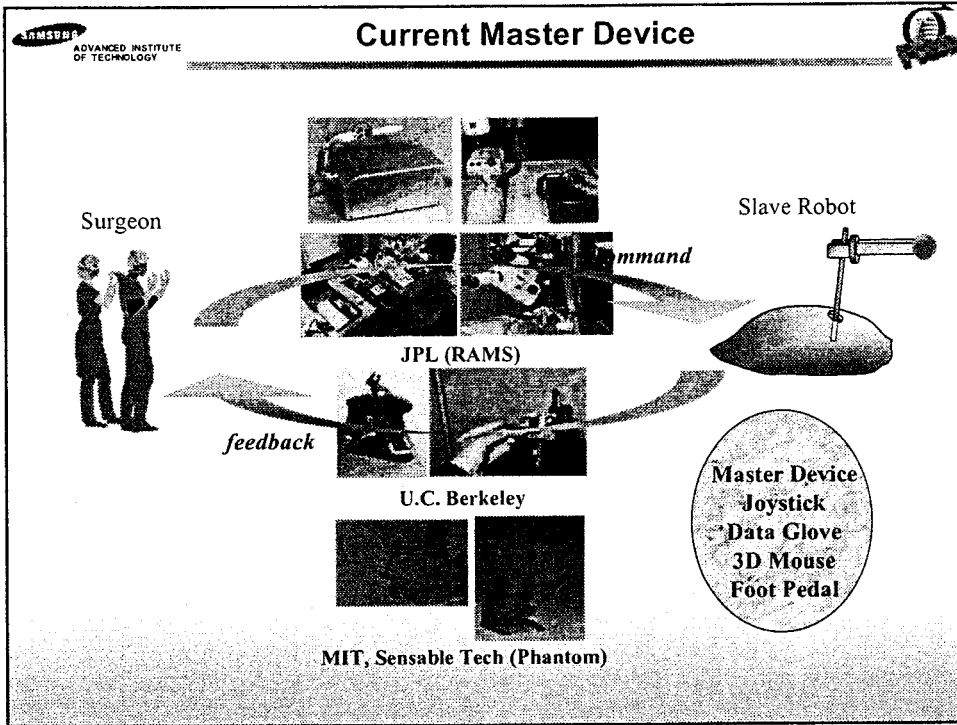
2001 Service Robot Workshop

## A Hand-Held Master with a Shared Control for Tele-operation





Woong Kwon, Sukhan Lee

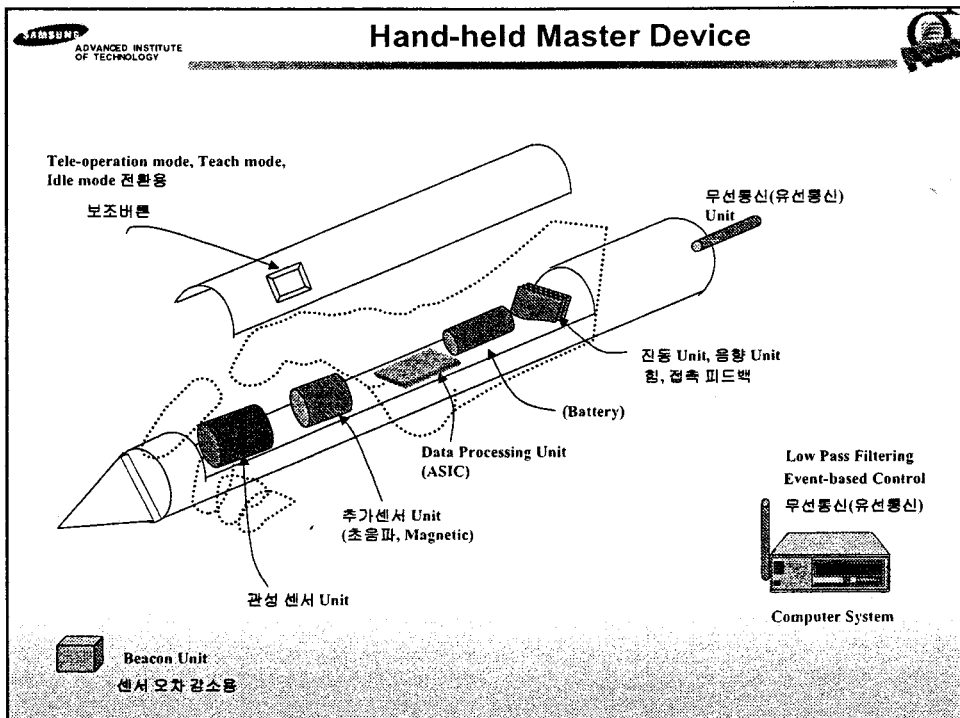
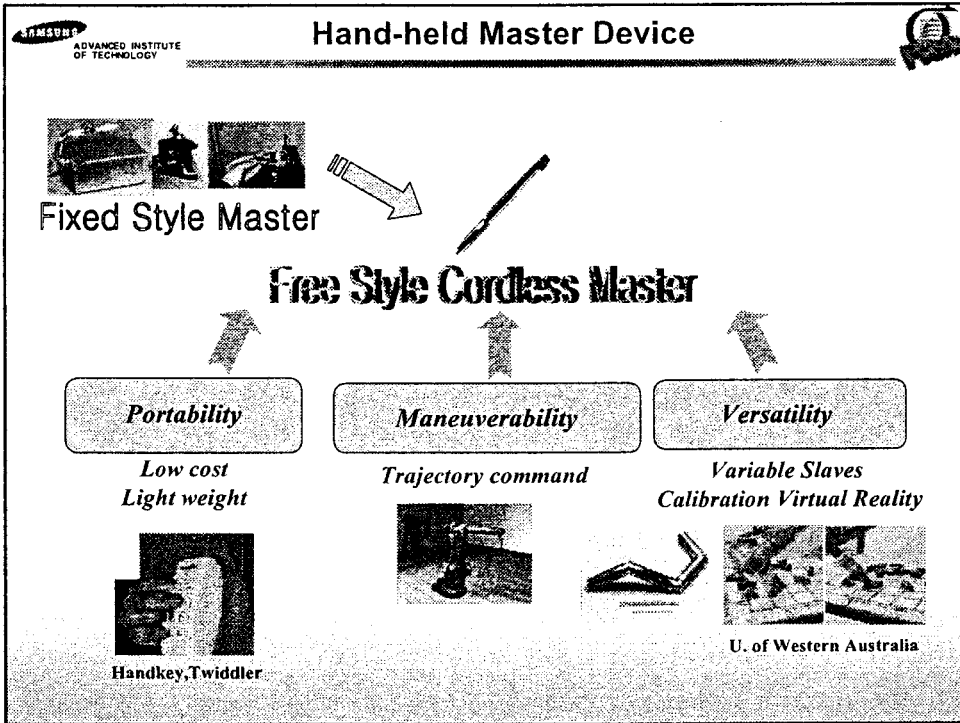
Samsung Advanced Institute of Technology






**Review : 기존 Input Device (Master)**

	특징	적용분야	단점 및 한계
<b>Teach Pendant (keypad)</b>	간단한 구조	산업용 로봇	명령의 직관성 부족 안전성에 문제 있음
<b>Joystick, Track Ball</b>	간단한 명령 입력가능 사용 편리함	가상현실, 게임기	3차원이상 복잡한 운 동의 입력불가 피드백정보 이용함
 <b>Master Arm</b> <small>Phantom (Sensable Inc.)</small>	Geared joint, tendon joint를 사용한 다관절 manipulator 형, 접촉 피드백정보제공	텔레로봇, 가상현실	작업공간 제한 복잡한 구조 고가격 시스템 안전성에 문제 있음
 <b>Pen Master</b> <small>TeknoGrip</small>	명령의 직관성 높음 조종 쉬움, 경량형	텔레로봇, 가상현실, 산업용 로봇	작업공간 제한 고정식 복잡한 구조
 <b>Glove Master</b> <small>CyberGrasp, CyberTouch (Virtual Tech.)</small>	명령의 직관성 높음 작업공간의 제한적용 진동, Exoskeleton 구조 이용한 형, 접촉 피드백가능	가상현실	로봇운동명령 어려움 고가격 시스템 피드백을 위한 복잡한 구조
 <b>관성센서 Master</b> <small>Dynamics</small>	가속도계, 자이로 이용하여 입력명령 산출 명령의 직관성 높음	텔레로봇, 가상현실, 서비스로봇	피드백정보 없음 센서오차로 인한 오작동 가능성




**Advanced Institute of Technology**

## New Input Device : Hand-held Master

**장점**

**구조적 측면**

- 6D 운동명령을 직접 내릴 수 있으므로 로봇 운동의 직관적인 지시가 가능함
- 작동이 쉽고 구조가 매우 간단함
- 가벼우므로 Inertia의 효과가 작음
- 고정되지 않으므로 작업공간의 제한이 적음
- 특이점이 없고 manipulability(조작성능도)가 매우 큼

**기능적 측면**

- 힘 및 접촉 피드백 정보 사용 가능
- 관성센서의 Drift오차를 줄이기 위해 추가센서 사용

**가격적 측면**

- 저가격화 가능

**적용 가능 분야**


- 로봇 수술
- 원격조종 수술
- 미세(Micro) 조립작업

텔레로봇

가상현실

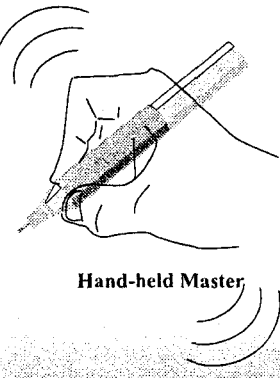
Wearable Computer

Calibration


**Advanced Institute of Technology**

## Hand-held Master Device Concept

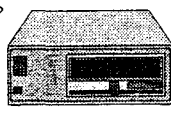
- 6차원 운동명령 가능, Intuitiveness 증가, 공간 및 구조제한 감소
- 소형화, 경량화, Pen형 외관
- 3축 가속도 센서, 3축 자이로 기본 이용
- 진동, 음향 이용한 힘 및 접촉 피드백



Hand-held Master

Motion Data  
Voice

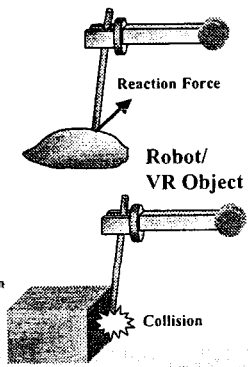
Vibratory/  
Audio  
Feedback



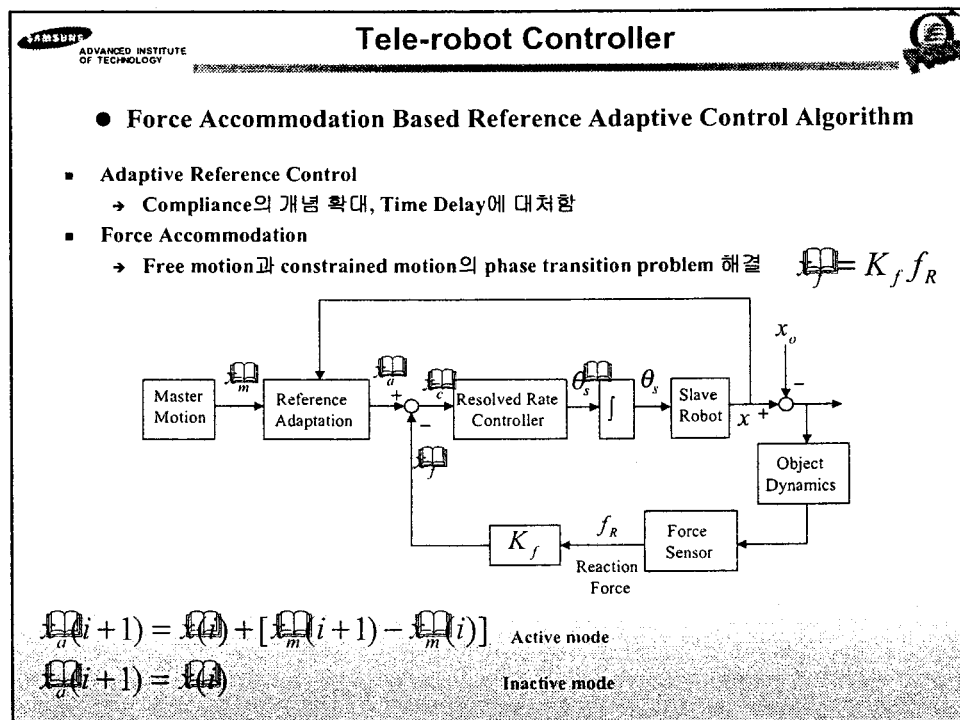
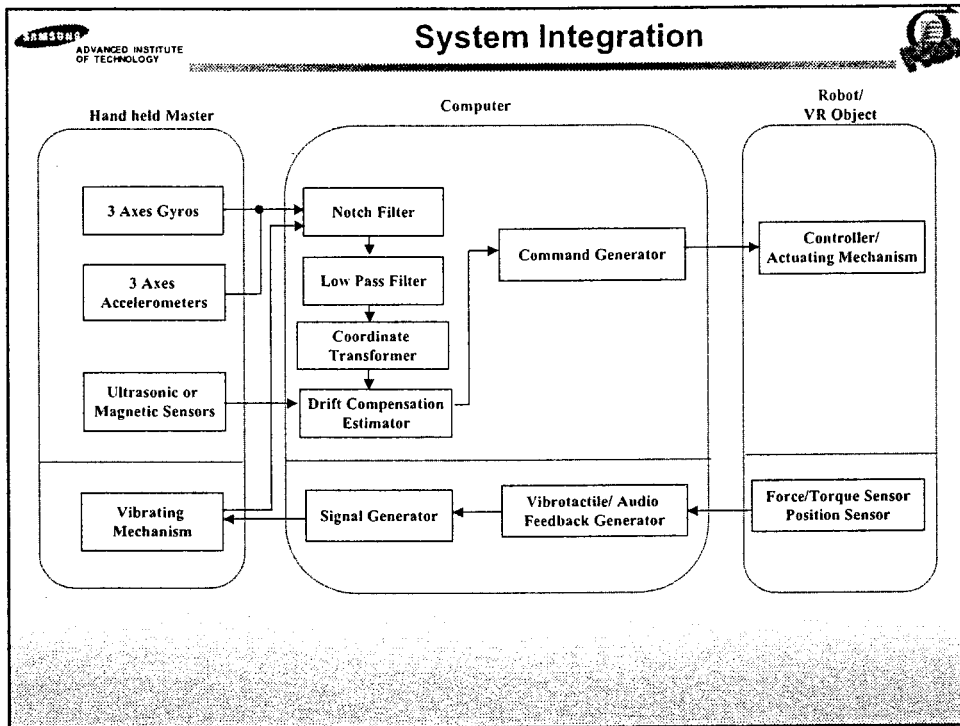
Tele-Operation  
Controller

6D Pose  
Command

Reaction  
Force  
/ Collision



Robot/  
VR Object





**Reference Adaptive Controller**

- Discontinuity of the trajectory of the master  
→ very large acceleration or force
- Desired next state is determined based on the current state, not on the pre-planned trajectory

Trajectory of Hand-Held Master

Trajectory of Slave Robot

**1st, 2nd Prototype**

- 1차, 2차 시제품 제작
- 1차 시제품 : 가속도센서(ADXL202), 자이로(Murata Enc05E), 초음파센서 모듈 (Polaroid Sigma 6500)

크기 : 100mm X 340mm X 56mm  
 작업공간: 1m X 1m X 1m  
 정확도 : 10mm이하, 1deg 이하  
 DSP 보드, Power 보드, IO 보드, 센서보드, TMS320C31

- 2차 시제품 : 가속도센서(ADXL205), 자이로(Murata Enc-03J)  
 Vibration Motor, Stereo Vision, Magnetometer (HMC1001 HMC1022)  
 초음파센서  
 크기 : 20mm X 20mm X 200mm  
 BW : 60Hz

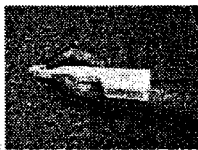
**Experimental Results**

- Hand-held Master 및 텔레로봇 제어알고리즘 통합 실험 환경
  - Hand-held Master의 출력 및 다른 입력장치의 출력을 사용
  - 임의의 로봇 동작 운동 표현 - Dynamics Simulation Required

**Motion Input**

Hand-held Master → Serial Port Data → Robot Kinematics → Robot Animation → Output

Dragging, Button

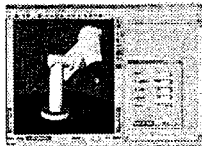


2차 시제품

**Output**

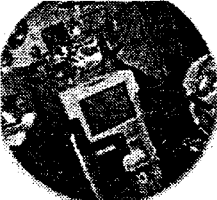
GUI

File (txt, avi)




Virtual Robot


**Hand-held Master : Application Examples**



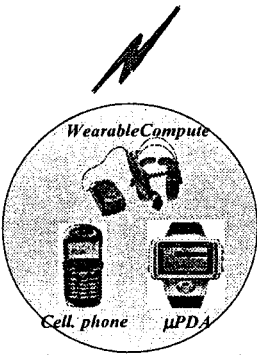
*CABG (Coronary Artery Bypass Surgery)*



*Endoscopic surgery assistant*



*Noninvasive diagnosis and surgery*



*Wearable Compute*  
*Cell. phone* *μPDA*

**Medical Application** **Hand-held Application**



● **Hand-held Master**

- 6차원 운동명령 가능, Intuitiveness 증가, 공간 및 구조제한 감소
- 소형화, 경량화, Pen형 외관
- 3축 가속도 센서, 3축 자이로 기본 이용
- 진동, 음향 이용한 힘 및 접촉 피드백

● **Tele-operation Control**

- Adaptive Reference Control
  - Compliant motion
  - Active - Inactive mode Switching
- Force Accommodation
  - Phase transition problem

# Implementation of Predefined Tasks for the Disabled By Using the Target-Orient-Designed Soft Robotic Arm

장 평훈, 박 형순, 서 명진, 강 상훈, 김 성태

한국과학기술원 (KAIST)

## 요 약

본 연구에서는 장애인들의 일상생활을 돕기 위하여 제작된 소프트 로봇 팔을 통해 로봇의 설계 목표였던 작업들을 구현함으로써 TOD (Target Oriented Design)의 효용성을 검증하였다. 그 과정 중에서도 로봇의 기계적 문제점과 문제를 해결하는 방법들을 기술하고, 로봇을 제어하는 방법들에 대해서 기술하고 있다. 또한 KARES II (KAist REhabilitation System II)의 다른 시스템들과의 통합작업에 대하여 기술함으로써, 장애인을 돕는 작업들이 어떻게 이루어지는가를 설명하였다. 로봇의 기계적인 성능 개선 방법들은 장애인을 돕는 로봇 뿐만 아니라, 다른 기계장치에 적용되어 유용하게 사용될 수 있으며, 제안된 제어방법들은 단순하고 강인한 성능을 보이므로 다른 곳에 응용 적용 가능하다.

## 1. 서론

본 연구에서는 서비스로봇 사업의 일환으로 제작된 로봇 팔을 이용하여 장애인들의 일상생활을 돕도록 미리 정의된 작업들을 구현하고자 한다.

KARES II (KAist REhabilitation System II)의 일원인 로봇 팔은 장애인들의 일상생활을 돕는 것을 목적으로, 미리 정의된 13가지 작업을 수행할 수 있도록 TOD (Target Oriented Design) 설계과정을 따라서 설계 제작되었다[1]. TOD에서는 먼저 장애인들의 의견을 반영하여, 로봇이 수행하여야 할 작업들을 정의하였으며, 그 작업들을 수행하기 위한 로봇 팔의 기구학적 구조를 격자구조를 이용하여 찾아 내었다[2]. 또한 동역학을 고려하여 구동기를 선정하였으며, 기계적 특성을 좋게 하고 센서없이 토크감지가 가능토록 하기 위하여 케이블 mechanism을 도입하여 로봇을 설계 제작하였다.

본 논문에서는 TOD를 따라 제작된 로봇이 설계 당시의 목표였던 작업들을 확실히 수행하는가를 확인하고, 작업들을 실제로 구현하는데 있어서 발생한 문제점들과 그 문제점을 해결하기 위한 방법들을 구체적으로 기술하고자 한다. 또한 작업을

구현하기 위하여 간단하고 강인한 제어방법인 TDC [3](Time Delay Control)를 적용하는 방법을 기술함으로써 다른 플랜트에 유사한 제어방법을 적용하는데 도움을 주고자 한다.

본 연구에서 제작된 로봇팔은 KARES II 시스템의 일원으로서 제작되었다. 따라서 궁극적으로는 다른 Module과의 통합이 이루어져야 한다. 통합시스템이 작업을 수행하는 방법을 기술하기 위하여 Mobile Base, Visual Servoing Module, Eye-Mouse System, Haptic Suit System과의 통합방법에 대하여 간단히 설명하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 제작된 로봇의 성능평가 및 기계적인 성능개선을 위한 제안방법에 대하여 기술하고, 3장에서는 로봇 팔의 목표 작업인 13가지 작업들을 구현하는 구체적인 제어방법에 대하여 기술한다. 4장에서는 KARES II의 다른 시스템들과의 통합방법에 대하여 기술하고, 끝으로 5장에서는 결론을 맺고 추후과제에 대하여 기술한다.

## 2. 소프트 로봇팔의 성능파악 및 구조개선

### 2.1 소프트 로봇팔의 성능파악

로봇팔의 1,2,3축 각 관절에서의 최소 감지가능한 토크(minimum detectable torque), 최대 토크(maximum torque), 최대 속도(maximum speed) 등 이 3가지에 대하여 로봇팔의 성능을 파악하였다.

#### 2.1.1 최소 감지가능한 토크 측정

로봇이 외부와 접촉할 때 모터축에 토크센서가 없이도 접촉힘을 감지할 수 있게 하기 위해 필요한 지수이다. 최소 감지가능한 토크가 작을수록 작은 접촉힘이라도 제대로 감지할 수 있다. 최소 감지가능한 토크의 측정방법은 Figure 1과 같이 로봇을 역구동 할 수 있는 최소토크를 측정함으로써 추정 가능하다.

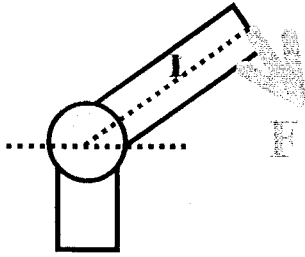


Figure 1: 최소감지가능 토크의 측정

로봇 팔의 1차 시제품에 대한 최소 역구동 토크는 Table 1과 같다.

	최소 역구동 토크
1축	0.3Nm
2축	1.2Nm
3축	0.4Nm

Table 1: 1,2,3축의 최소 역구동 토크

1축과 3축의 최소 감지가능 토크에 비하여 2축의 최소 감지가능 토크가 매우 컸다. 이는 2축에서 작은 접촉힘을 감지할 수 없다는 것을 의미하므로 능동 컴플라이언스 제어할 때 원하는 성능을 낼 수가 없다.

**2.1.2 최대 토크(maximum torque)**

1차시제품 로봇팔의 각 관절에서의 최대토크는 Table 2와 같다.

	모터정격토크	감속비	관절에서의 최대 정격 토크
1축	0.64Nm	16:1	10.2Nm
2축	0.93Nm	50:1	46.5Nm
3축	0.2Nm	90:1	18Nm
4축	5.44mNm	370:1	2.01Nm
5축	5.44mNm	157:1	0.854Nm
6축	5.44mNm	157:1	0.854Nm

Table 2: Maximum torque at each joint

13가지 작업에 필요한 최대 토크가 1축에서는 9.8Nm, 2축에서는 42Nm, 3축에서는 15Nm, 4축에서는 1.9Nm, 5,6축에서는 0.8Nm가 필요했으므로 주어진 13가지 작업을 로봇팔이 수행하는데는 문제가 없다.

**2.1.3 최대 속도(maximum speed)**

로봇팔을 최대로 뻗었을 때의 각 관절로부터 그리퍼까지의 거리는 1,2축은 90cm이고 3축은 47cm가 된다. 이때 각 축의 모터에서 낼 수 있는 그리퍼의 최대 속도는 Table 3과 같다.

	모터정격회전속력	감속비	그리퍼에서의 최대속도
1축	3000rpm	30:1	9.4m/s
2축	3000rpm	50:1	5.65m/s
3축	5000rpm	90:1	2.73m/s

Table 3: Maximum speed at end-effector

하지만, 로봇팔이 장애인을 대상으로 하는 작업을 수행하므로 이렇게 빠른 속도로 구동하지는 않고 그리퍼의 최대 속도가 0.3m/s정도가 되도록 로봇을 구동하기 때문에, 로봇의 최대속도는 작업을 하기에 충분하다는 것을 알 수 있다.

**2.2 1차 시제품의 문제점 및 해결**

1차 시제품의 경우, 최대 토크나 최대 속도면에서는 문제가 없었으나, 관절토크감지 성능을 결정하는 backdriving torque가 2축에서 크게 나타났기 때문에 문제점으로 나타났다. 또한 손목축 부분에 베벨 기어로 인한 백래쉬 존재, 조립시 케이블의 장력(tension) 조절이 어려움과 같은 문제점이 있었다. 2.2절에서는 1차 시제품에서 발견된 문제점들을 나열하고, 이러한 문제점들을 보완하는 2차 시제품의 설계와 제작에 대하여 언급하고자 한다.

**2.2.1 손목축 부분에 백래쉬 존재**

1차 시제품의 손목축 부분은 베벨 기어를 사용하여 제작하였다. 그러나 베벨 기어를 사용함으로써 백래쉬가 상당히 크게 나타났다. 그 이유로는 베벨 기어 가공의 정밀도와 관련이 있었다. 하지만 기어 가공을 정밀하게 한다고 하더라도 기어 자체가 가지고 있는 백래쉬를 없앨 수는 없기 때문에 2차 시제품에서는 손목축 부분을 케이블 구조로 바꾸는 것에 대하여 고려하였다.

케이블 매커니즘으로 구조를 변경할 때, 케이블의 장력을 조절하는 장치를 같이 고려해야 한다. 만일 그런 장치가 없어 케이블의 장력이 작아질 경우 백래쉬가 발생할 가능성이 발생하기 때문이다. 손목축 부분에 사용할 장력조절장치는 그 크기가 작아야 하는데 이를 위하여 상용 제품 중에 장력 조절장치에 응용할 수 있는 것을 찾아보았고, 그 결과 기타(guitar)에 사용하는 윈기어를 사용한 장력 조절장치를 고안하였다. 이러한 상용으로 대량 생산

되는 웜기어를 사용함으로써 제작비를 절감하는 효과를 거두었다. Figure 2는 케이블로 구동되는 손목축을 보여준다.

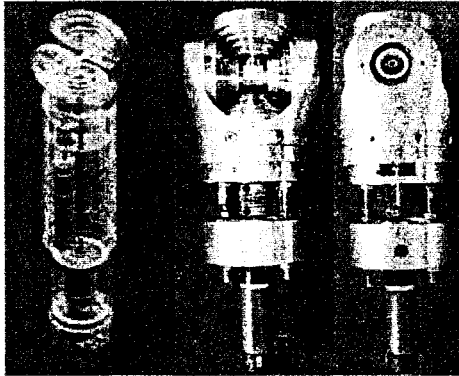


Figure 2: 케이블로 구동되는 손목축 설계 및 제작

### 2.2.2 2축 모터의 역구동성

2.1.1에서 언급한 것처럼, 2축 모터에서 최소 감지 가능 토크가 크게 측정되었다. 이로 인하여 2축의 역구동성이 좋지 않았는데 그 원인을 분석하여 본 결과 2축에 사용한 모터 자체에 내장된 3.5:1의 gear head의 마찰이 커서 발생한 것이었다. 그리하여 2축 역구동성의 개선을 위해 2축 모터를 감속기가 부착되지 않은 모터로 교체하였다. 최대 정격토크를 만족할 수 있는 DC Motor를 찾을 수 없었기 때문에, 보다 정격토크가 큰 AC Motor로 선정하여 교체하였다. 교체 결과 새로 구해진 1,2,3축의 최소 역구동 토크는 Table 4와 같다. 2축의 역구동 토크가 큰 폭으로 작아졌다는 것을 볼 수 있다.

	최소 역구동 토크
1축	0.3Nm
2축	0.4Nm
3축	0.4Nm

Table 4: 새로 측정된 최소 역구동 토크

### 2.2.3 케이블의 장력 조절의 어려움

로봇을 조립할 때 1,2,3축에서 가장 중요한 것은 장력이 만족할만큼 커지도록 케이블을 감는 것이다. 케이블의 장력이 작은 상태로 감기게 되면 백래쉬가 생길 가능성이 있고, 로봇을 제어할 때 진동을 발생시킬 소지가 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 장력을 조절할 수 있는 장치를 고안하여 추가하는 것이 필요하였다.

이러한 조건을 만족시킬 수 있는 부품을 찾아 본 결과 웜기어가 가장 적합하였다. 웜기어를 이용한 장력조절 장치는 웜기어의 회전방향이 동력전달 방향과 수직을 이루고 있다. 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 텐션 조절이 매우 용이해졌다. 하지만, 이 장치를 추가하기 위한 공간이 필요하고 구조가 복잡해지는 단점이 있다. Figure 3은 제작된 장력조절장치를 보여준다.

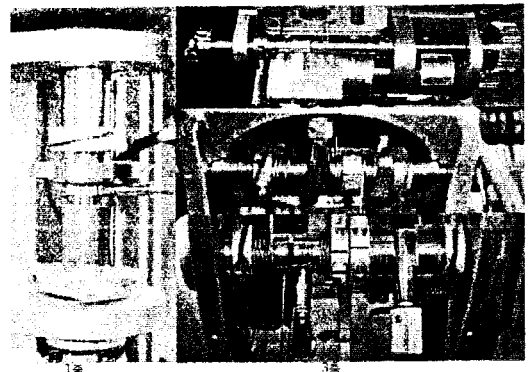


Figure 3: 1,3축에 장력조절장치를 장착한 모습

## 3. 13 가지 작업의 구현

이 장에서는 개선된 성능의 로봇 팔을 이용하여 미리 정의된 작업들을 구현하기 위한 제어 법칙과 실험결과들을 설명하고자 한다.

### 3.1 로봇 제어 법칙

본 연구에서는 로봇을 제어하기 위하여 TDC (Time Delay Control)의 Time Delay Estimation의 개념을 이용한 제어기법을 적용하여 주어진 작업들을 손쉽게 구현하였다. 6자유도 로봇과 같이 정확한 모델을 얻기 어렵고, 불확실성이 많이 존재하는 플랜트를 제어하기 위하여, 많은 강인제어 기법들이 제안되어 왔다. 그 중에서도 TDC는 적용하기에 단순하면서도 그 성능이 뛰어나기 때문에 여러 기계시스템, 특히 로봇 매니플레이터 같이 복잡한

시스템에서도 뛰어난 제어성을 보여왔다[4],[5],[6]. 본 연구에서는 이미 검증된 뛰어난 성능의 제어기를 적용함으로써, 실제 구현시에 접하게 될 많은 문제들이 발생할 가능성을 줄이고, 주어진 작업들을 보다 확실하게 구현할 수 있도록 하였다.

장애인들과의 설문조사를 통해 미리 정의된 작업들 중에는 로봇 End-Effector의 위치제어만을 요구하는 작업들과, 장애인 혹은 환경과의 접촉을 요구하는 작업들이 있다. 이를 위하여, 본 논문에서는 위치제어기법과 접촉상황에서의 컴플라이언스 제어기법을 모두 기술하고자 한다.

### 3.1.1 위치제어기법

일반적인 로봇 매니플레이터의 동역학식은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \tau_{ext} \quad (1)$$

여기서  $M(\theta)$ 는  $n \times n$  관성 행렬(inertia matrix),  $n$ 은 로봇 관절의 수,  $\theta$ 는  $n \times 1$  관절 변수 벡터,  $V(\theta, \dot{\theta})$ 는 코리올리(Coriolis)력과 원심력의  $n \times 1$  벡터,  $G(\theta)$ 는  $n \times 1$  중력 벡터,  $\tau_{ext}$ 는 외란(disturbance)과 같이 모델링 되지 않은 힘, 그리고  $\tau$ 는 관절에 가해지는  $n \times 1$  토크 벡터를 나타낸다.

만약 우리가 로봇 매니플레이터의 모든 동역학 양을 정확히 추정할 수 있다면 Computed Torque 제어 방식으로 제어를 할 수 있다. 하지만 로봇 매니플레이터의 동역학을 정확히 안다는 것은 상당히 어려운 일이다. 또한 외란이 존재할 경우에는 더욱더 불가능하다. 이들 불확실한 동역학과 외란을 추정해 내는 방법이 시간 지연 추정이다.

비선형 벡터  $H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ 를 다음과 같이 정의하면,

$$H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = (M(\theta) - \bar{M})\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \tau_{ext} \quad (2)$$

(2)는 다음과 같이 바꿔 표현될 수 있다.

$$\tau = \bar{M}\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (3)$$

이제 여기서 우리가 추정해 내야 되는 양은 로봇 매니플레이터의 모든 비선형 항들과 외력 항들을 포함한  $H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ 가 되었다.

비선형 벡터  $H$ 의 추정값  $\hat{H}$ 을 구하기 위하여 시간 지연 제어는 다음과 같은 시간 지연 추정 방법을 사용한다. 만일 시간지연(time delay)  $L$ 이 충분히 작다면, 다음과 같은 근사식이 성립한다.

$$\begin{aligned} H(t) &\equiv \hat{H}(t) \\ &= H(t-L) = \tau(t-L) - \bar{M}\ddot{\theta}(t-L) \end{aligned} \quad (4)$$

이를 바탕으로 Computed Torque Control 기법의 관점에 따라 시간 지연 제어 법칙을 구성하면 (5)와 같

이 구성된다.

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \tau(t-L) - \bar{M}\ddot{\theta}(t-L) \\ &\quad + \bar{M}(\ddot{\theta}_d(t) + K_D\dot{e}(t) + K_P e(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

$H$ 와  $\hat{H}$ 의 추정 값  $\hat{H}$  사이에  $\hat{H} = H$ 이 성립한다면, 폐루프(Closed loop)의 오차 동역학(error dynamics)은 식(6)과 같이 된다.

$$\ddot{e} + K_D\dot{e} + K_P e = 0 \quad (6)$$

만약  $\bar{M}$ 를 대각 상수 행렬로 선정한다면, TDC는 PD 게인과 대각 상수 행렬  $\bar{M}$ 만을 사용하는 독립된 조인트 제어기로서 Figure 4와 같이 쉽게 구현될 수 있다.

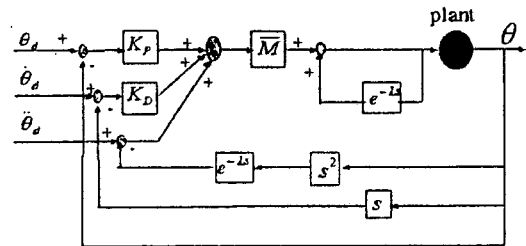


Figure 4: TDC의 Block Diagram

이제 Cartesian 좌표계에서 로봇 end-effector의 위치를 직접 제어하고자 하는 경우에 Cartesian control로서의 TDC의 적용 방법을 기술한다.

Cartesian control은 크게 역기구학을 풀어서 joint trajectory를 생성하여서 제어하는 방법과 forward kinematics를 사용하여 직접 제어하는 방법으로 나눌 수 있다. 그러나 inverse kinematics를 풀어가면서 제어하는 것은 많은 계산량을 요구하고, 역기구학을 푼 해가 여러 가지 값이 나올 수 있으며 로봇의 자유도가 늘어나면 풀기가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 Cartesian control을 하는 경우에는 역기구학을 풀지 않고 직접 end-effector의 좌표 값을 계산하여서 제어할 수 있는 방법을 사용하였다.

널리 알려진 바와 같이 관절공간과 Cartesian 공간의 속도 사이에는 (7)과 같은 관계가 성립하고 따라서 Joint 가속도와 Cartesian 가속도 사이에 (8)과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$\dot{X} = J\dot{\theta} \quad (7)$$

$$\ddot{X} = J\ddot{\theta} + \dot{J}\dot{\theta} \quad (8)$$

(8)을  $\ddot{\theta}$ 에 관하여 정리하면 다음과 같이 정리가 가능하다.

$$\ddot{\theta} = J^{-1}\ddot{X} - \dot{J}^{-1}\dot{J}\dot{\theta} \quad (9)$$

이에 따라 다음과 같이 관절공간에서 Cartesian 공간으로의 제어기 변환이 가능하다.

$$\tau(t) = J^T(t)J^T(t-L)\tau(t-L) - J^T(t)MJ^T(t)X(t-L) + J^T(t)\bar{M}J^T(t)(\ddot{X}_d(t) + K_d\dot{e}_t(t) + K_p e_t(t)) \quad (10)$$

이때  $\bar{M}$ 의 값은 joint control에서 사용하던 값을 사용하면 된다.

### 3.1.2 컴플라이언스 제어기법

KARES II에 적용되는 컴플라이언스 제어는 반복적인 작업에 대해서 행하여 지므로 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 (11)과 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.

$$\tau_{ext} = \tau - G(\theta) \quad (11)$$

또한 장애인과의 접촉 상황에서는 컴플라이언스 제어방법으로 간접적으로 접촉 힘의 크기를 제어하는 방식을 사용하는 것이 타당하다. 직접적인 힘 제어 방식은 힘 제어를 미리 정하여 주는 것이 필요하고 폰합 제어의 경우에는 위치 제어를 수행할 방향과 힘 제어를 수행할 방향을 결정해줘야 하지만 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 Figure 5와 같은 컴플라이언스 제어 전략이 가능하게 된다. 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 전략은 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.

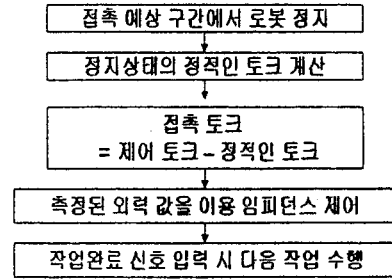


Figure 5: 미리 정해진 작업에 대한 컴플라이언스 제어 전략

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. 앞에서 언급되었듯이 6 자유도 로봇의 동역학을 모두 정확히 알아낸다는 것은 쉽지 않은 일이다. 하지만 대부분의 작업이 장애인 주변에서 정적인 작업이므로, 정적인 상황에서의 컴플라이언스 제어가 이루어지는 것 만으로도 미리 정의된 작업을 수행할 수 있기 때문에 정적인 상황을 유지하기 위한 중력 및 마찰력 값을 계산해 낼 수 있으면 된다. 따라서 제어 입력이  $\tau$ 라 할 때 환경과의 접촉 힘  $\tau_{ext}$ 는 다음 (12)과 같이 구해진다.

$$\tau_{ext} = \tau - G(\theta) \quad (12)$$

이와 같이 접촉 힘 측정이 이루어지면 3.1.1절에서 설명한 TDC 제어기의 오차 동역학을 (13)와 같이 수정 함으로서 임피던스 제어[7]가 가능하다.

$$\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e - K_r \tau_{ext} = 0 \quad (13)$$

원하는 임피던스는  $K_d$ ,  $K_p$ ,  $K_r$  각 이득 값을 조정 함으로서 얻을 수 있다.

### 3.2 작업 구현 실험결과

앞서 기술된 제어 기법들을 이용하여, 주어진 궤적을 추종하는 위치제어와, 접촉상황에서의 컴플라이언스 제어가 원활하게 이루어지는 것을 확인해 보았다. Figure 6의 결과에서와 같이 위치 제어에서 TDC는 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 또한 Figure 7에서 보듯이 외력 측정도 큰 오차 없이 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다.



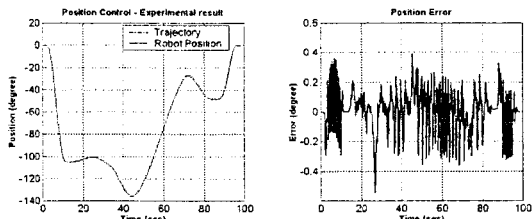


Figure 6: TDC를 사용한 로봇의 위치 제어 결과

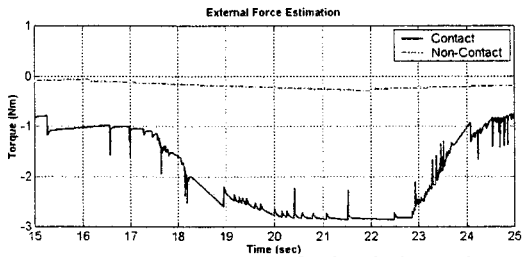


Figure 7: 접촉 힘 측정 실험 결과

#### 4. KARES II 시스템 통합작업

제작된 로봇팔은 KARES II시스템의 일원으로서 개발되었기 때문에, 궁극적으로 장애인을 돕기 위해서는 KARES II 시스템내의 다른 모듈들과의 통신을 통해 통합작업을 구현하여야 한다. 이를 위하여 대표적인 두가지 작업에 대하여 작업의 시나리오를 만들고 이를 토대로 각 모듈간의 통신을 통해 작업을 구현하도록 한다.

##### 4.1 KARES II 시스템의 통신체계

KARES II 시스템은 크게 두 부분으로 이루어진다. 장애인의 명령을 받아들이는 휠체어 부분에서는 Eye-mouse나 Haptic Suit같은 명령인식용 인터페이스들을 통해서 장애인의 의도를 파악한다. 주어진 명령을 직접 수행하는 로봇부분은 이동부와 로봇팔로 이루어져 있으며, 로봇팔은 Visual Servoing Module과 함께 작업을 수행하도록 되어있다. 휠체어부분과 로봇부분사이에는 무선의 LAN으로 통신이 이루어져 있으며, 로봇이동부에 장착되어 있는 server용 PC가 모든 통신을 관장하고 있다. Figure 8은 KARES II 시스템의 통신체계를 보여준다.

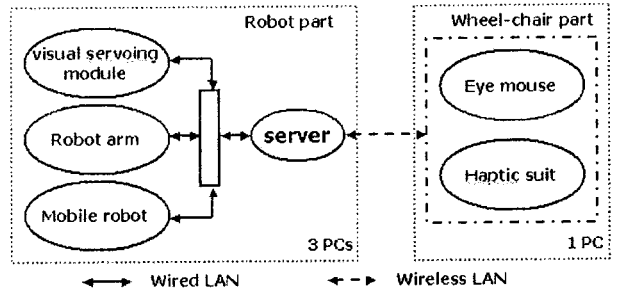


Figure 8: KARES II 통신 체계

휠체어에 장착되는 Eye mouse, Haptic suit등의 장치는 1대의 PC에 연결되어 있으며, 로봇에는 총 3대의 PC가 장착되는데, visual servoing module을 위한 PC, robot arm을 구동하기 위한 PC, server와 mobile robot 구동을 위한 PC가 된다. 3대의 PC는 유선LAN으로 연결되어 있다. 로봇팔의 TCP/IP통신을 위한 소프트웨어는 로봇팔 구동을 위한 소프트웨어와 데이터를 교환하며 서로 다른 프로세스를 수행하도록 함으로써, 통신 프로세스로 인하여 로봇팔 구동에 장애가 생기지 않도록 하였다. Figure 9는 로봇을 구동하기 위한 소프트웨어 구조를 보여준다. 로봇은 TCP/IP 통신 프로세스로부터 명령을 받고 구동을 위하여 주어지는 정보들은 공유 메모리상에 저장되어있는 데이터를 읽어서 사용하도록 되어있다. 예를 들어 Eye-Mouse로부터 특정 좌표로 이동하라는 명령이 들어오면, 통신 프로세스로부터 움직이라는 명령을 전달받고 목표지점에 대한 정보는 공유 메모리상에서 읽어서 알 수 있도록 하였다.

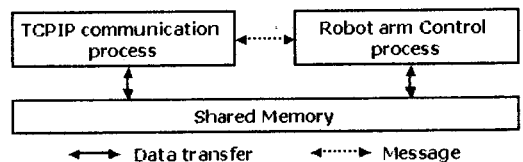


Figure 9: 로봇팔의 구동과 통신을 위한 소프트웨어 구조

##### 4.2 작업 시나리오

시스템의 통합작업은 현재에도 진행중이기 때문에, 본 논문에서는 대표적인 두가지 작업의 시나리오에 대하여 기술하도록 한다. 먼저 물마시기 작업의 경우, 작업 시나리오는 Figure 10의 순서도와 같이 이루어진다.

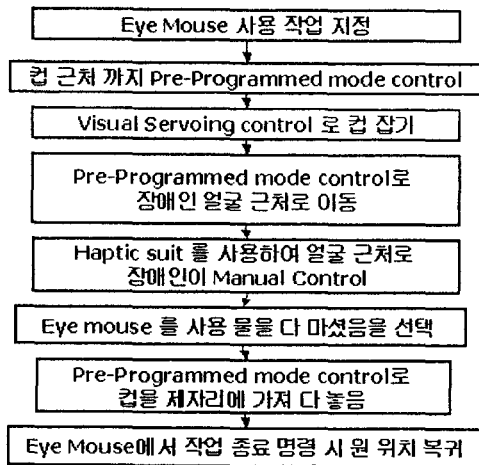


Figure 10: 물마시기 작업 순서도

물마시기 작업은 여러 가지 모듈의 조합을 테스트 할 수 있는 작업으로서, Eye mouse를 사용함으로써 장애인이 하고 싶은 일을 선택할 수 있게 하였고, Haptic suit를 이용하여 물을 마시다가 잠시 신체로부터 멀리 둘 수도 있게 하여 장애인의 의지를 로봇 움직임에 반영할 수 있도록 하였다.

다음으로 책꽂이의 서류를 집는 작업의 경우는 Figure 11과 같이 이루어진다.

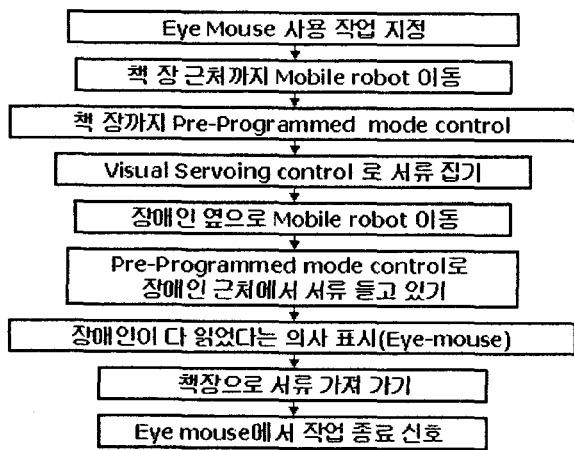


Figure 11: 서류 집는 작업 순서도

서류를 집는 작업은 멀리 떨어져 있는 서류를 장애인에게 가져다 주는 작업으로서, 정지된 상태에서 로봇팔의 작업공간에만 국한되는 것이 아니라, 이동로봇을 통해 이동성을 더함으로써 로봇의 작업공간의 극대화를 할 수 있다는 점을 보여준다. 그리고 이동로봇과 로봇팔의 연계된 동작의 구현가능성을 볼 수 있는 작업이다.

### 4.3 실험결과 및 문제점

실험결과 대체적으로 작업을 잘 수행함을 알 수 있었다. 그렇지만 Table 5와 같이 통합과정에서 문제를 발견할 수 있었다. 이러한 문제점들은 다음 version의 로봇을 설계하는데 반영될 것이며, 통합의 관점에서 보다 우수한 로봇팔의 설계 제작에 도움이 될 것이다.

	문제점
로봇팔 구동 관련	1. Battery의 불안 → 전원noise, encoder신호 이상, 제어입력의 불안 2. visual servoing module이 gripper의 상당히 많은 부분을 가리고 있기 때문에 물건을 잡는데 난점이 있다. → visual servoing module을 고려한 gripper의 설계 요망.
이동 로봇 관련	1. 이동로봇의 움직임이 급발진, 급제동이고 이동로봇의 바닥이 flexible하여 정지시 로봇팔이 심하게 흔들거림. → 제어 성능 저하 → 이동로봇의 trajectory 설계 필요. 2. 이동로봇의 덮개가 일체형으로 되어있어 로봇의 조립이 힘들. → 로봇의 공간 활용과 배선, 조립의 용이성을 고려한 이동로봇의 설계 필요.

Table 5: 통합과정 중 발생한 문제점

### 5. 결론 및 추후과제

장애인의 일상생활을 돕기 위하여 제작된 로봇은 TOD (Target Oriented Design)의 방법을 따라 제작되었으며 설계당시의 Target Task였던 13가지 작업들을 원활하게 수행할 수 있음을 확인하였다. 로봇의 기계적인 문제점들이 발견되어 보완되었지만, 기구적/동역학적으로는 처음에 계획했던 작업들을 최소한의 수정작업으로 수행할 수 있었다. 이는 TOD 설계방법의 효용성을 입증해주며 다른 목적의 로봇의 설계시에도 유용하게 이용될 수 있음을 시사한다.

로봇의 기계적인 성능을 개선하기 위하여 제안된 Pretensioning Mechanism과 Cable Bevel Gear는 기계부품의 백래쉬나 역구동성을 증가시키는데 좋은 성능을 보이며, 가격, 성능면에서 우수한 기계요소라고 생각된다. 이들은 다른 기계시스템에도

유용하게 적용될 수 있을 것이다. 또한 작업구현을 위하여 적용된 TDC를 이용한 로봇 제어법칙은 강인하면서도 간단하여 쉽게 적용될 수 있었다. 이러한 제어방법은 비단 로봇팔 뿐만 아니라 다른 기계장치들의 제어에도 손쉽게 적용될 수 있을 것이다.

KARES II 시스템은 여러가지 사용자 인터페이스와 로봇팔, 이동부, Visual Servoing Module 등 여러가지 첨단 기술들의 복합체이다. 따라서, 이들 간의 통합이 원활하도록 통신/소프트웨어 체계를 확립하는데 많은 노력이 이루어져야 하며, 궁극적으로는 장애인들이 사용하기에 편리한 시스템이 되도록 시스템을 개발해 나가야 할 것이다.

## 참고 문헌

- [1] Pyung H. Chang, et. al, "Development of a Robotic Arm for Handicapped People: A Target-Oriented Design Approach", Proceeding of ICORR' 2001 7<sup>th</sup> International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 84-92
- [2] 양정연, "로봇의 기구적 설계를 위한 격자방법에 대한 연구와 전산 설계 환경", MS. Thesis, Mechanical Engineering Department, KAIST, February 200
- [3] K. Youcef-Toumi and O. Ito, "Controller Design for Systems with Unknown Dynamics", ASME Journal of Dyn Sys. Meas. and Control, Vol. 112, pp. 133-142, 1990
- [4] T. C. Hsia, and L. S. Gao, "Robot Manipulator Control Using Decentralized Linear Time-Invariant Time-Delayed Joint Controllers", Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 2070-2075, 1990
- [5] 박석호, "강한 비선형성 (포화요소/마찰)을 갖는 시스템의 시간지연제어에 관한 연구", Master's Thesis KAIST, Dept. of Precision Engineering, 1995
- [6] Pyung H. Chang, et. al. "Robust Force/Position Control of a Robot Manipulator Using Time-Delay Control", Control Eng. Practice, Vol. 3, No. 9, pp. 1255-1264, 1995
- [7] N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I-Theory", ASME Journal of Dyn. Sys. Meas. and Control, Vol. 107, pp. 1-7, 1985

## Implementation of Predefined Tasks for the Disabled by Using the Target- Orient-Designed Soft Robotic Arm

장평훈, 박형순, 서명진, 강상훈, 김성태

KAIST

2001 Service Robot Workshop, November 30, 2001

## 연구 동기 및 목표

- 장애인의 일상생활을 돕는 로봇의 개발
  - 장애인들이 실제로 원하는 것이 무엇인가?
    - : Target Oriented Design
    - (ICORR 2001 논문발표: Development Of A Robotic Arm For Handicapped People: A Target-Oriented Design Approach)
  
- 인간친화형 로봇팔: A Soft Robotic Arm
  - 장애인의 안전성 보장: 작은 접촉힘을 감지하는 것이 가능한가?
    - : Sensorless Torque Sensing
    - Backdrivable Robotic Arm Using Cable-Driven Mechanism
    - (국내특허출원: 백래쉬를 방지하기 위한 감속기, 해외특허출원중)
  - 인간친화를 위한 장애인과의 접촉시 Active Compliance Control

KAIST

2001 Service Robot Workshop, November 30, 2001

2

## 연구내용

- 소프트 로봇팔을 이용한 Target Task의 구현
  - 로봇 성능 파악 및 성능 개선
    - 1st Version의 성능파악
    - 1st Version의 기계적 성능 개선, 조립이 용이하고 내구성이 개선된 Mechanism
  - Predefined Target Tasks의 구현
    - 장애인이 원하는 미리 정의된 작업의 구현
    - 위치/컴플라이언스 제어기법
    - 작업실험
  - KARES II 시스템의 통합을 통한 작업 구현

## Robotic Arm 의 성능파악/개선

### ▪ Max. Joint Torques

Axis	#1	#2	#3	#4	#5	#6
1st Version	1.6Nm	35Nm	18Nm	2.0Nm	0.9Nm	0.9Nm
2nd Version	9.8Nm	36Nm	18Nm	3.4Nm	1.6Nm	1.6Nm

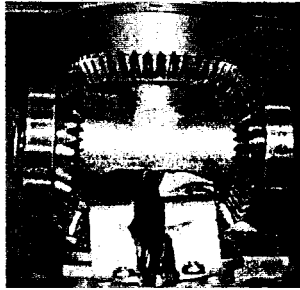
### ▪ 로봇의 유연성: Minimum Backdrivable Torque

Axis	#1	#2	#3
1st Version	0.4Nm	1.5Nm	0.4Nm
2nd Version	0.3Nm	0.4Nm	0.4Nm

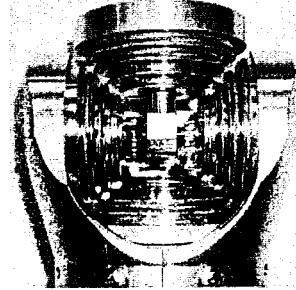
- Max. Speed: 0.5m/sec
- Position Resolution: 0.2mm
- Max. Payload: 2kg

## 2<sup>nd</sup> Version: Improving Mechanical Performance

- Backlash in Wrist Axis → Inherent Properties of Bevel Gears
- Designing Cable-Driven Bevel Gears → Zero Backlash Achieved!!



1<sup>st</sup> version

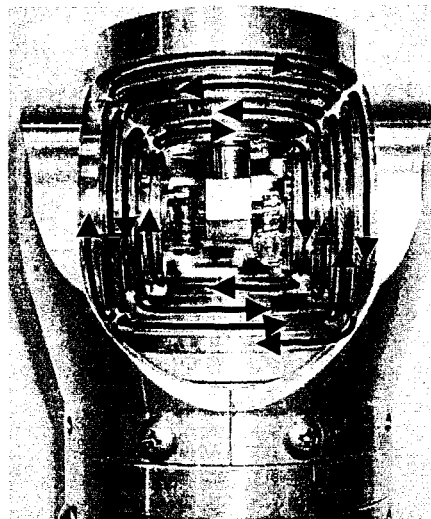


2<sup>nd</sup> version

KAIST 2001 Service Robot Workshop, November 30, 2001

5

## 2<sup>nd</sup> Version: Cable-driven Wrist



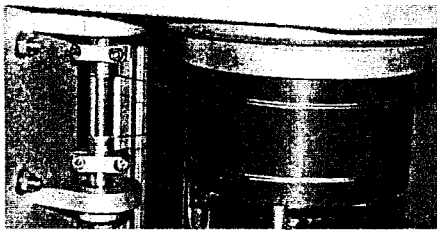
KAIST 2001 Service Robot Workshop, November 30, 2001

6

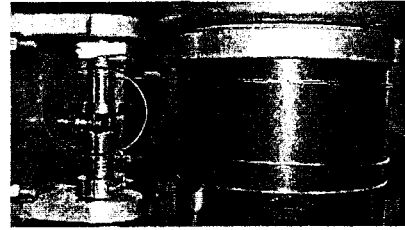
## 2<sup>nd</sup> Version: Improving Mechanical Performance

### ■ Pre-tensioning Mechanism

- 1<sup>st</sup> Version: Hard To Give Pre-tensions
- 2<sup>nd</sup> Version: Implementation Of Pre-tensioning Mechanism
  - Low Cost by Using Commercialized Worm Gears For Guitars



1<sup>st</sup> version

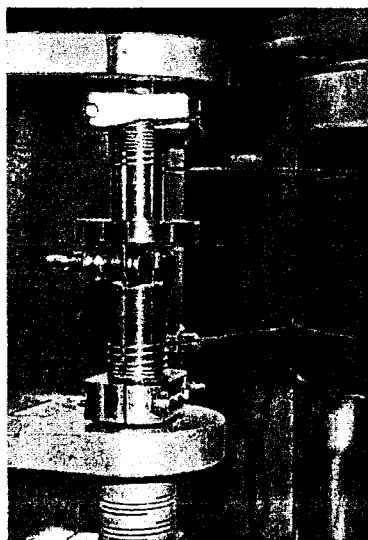


2<sup>nd</sup> version

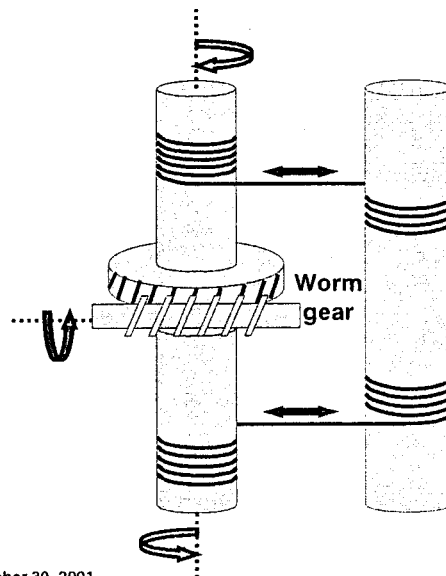
KAIST 2001 Service Robot Workshop, November 30, 2001

7

## Efficient Pre-tensioning Mechanism



KAIST 2001 Service Robot Workshop, November 30, 2001

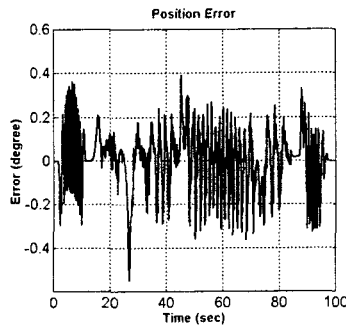
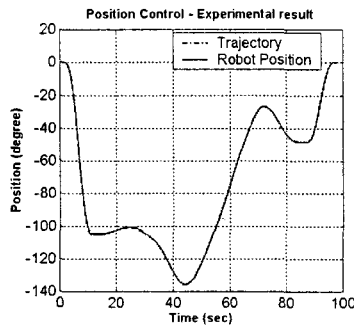


8

# 위치제어기법

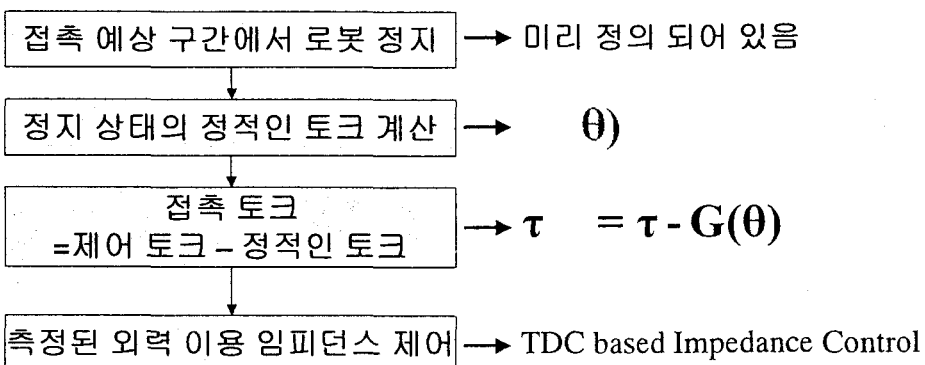
## ■ 위치제어

- TDC(Time-Delay-Control)을 이용한 Joint Control, Cartesian Control
- 강인하고 단순하여, 적용이 쉽고 Gain Tuning이 용이



# Compliance 제어 전략

## ■ 미리 정의된 작업에 대한 compliance 제어 전략





# Compliance 제어 기법

## ■ Compliance 제어 기법

- Force-torque sensorless Compliance Control

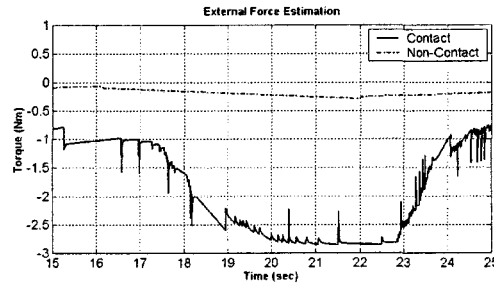
- TDE(Time-Delay-Estimation)을 이용한 접촉 힘 추정

- Experiment

- Task : 면도 보조 작업

- 실험 방법

- 400g 정도의 추를 사용하여 비접촉 시와 접촉 시 외력 측정의 정확도 실험



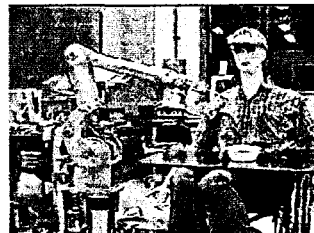
KAIST 2001

11

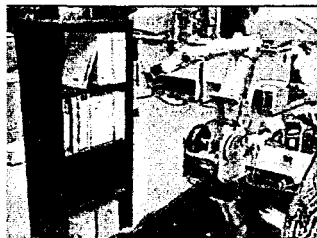
# 작업구현 실험



음료수 마시기



식사 보조



책집기



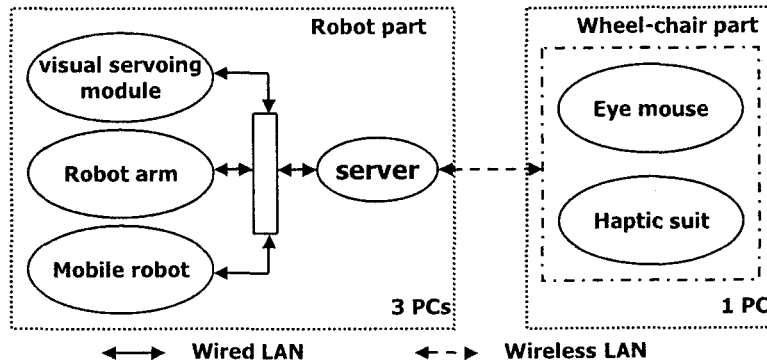
면도

KAIST 2001 Service Robot Workshop, November 30, 2001

12

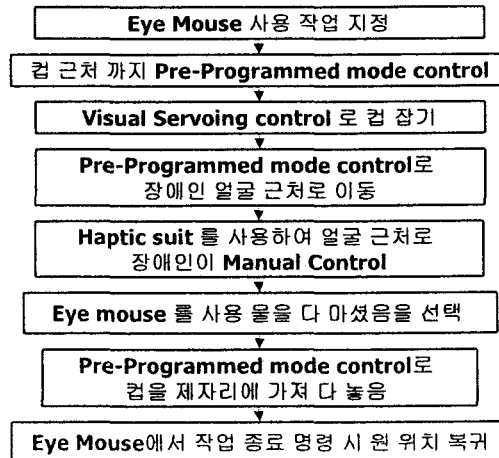
# KARES II 시스템의 통합

## 통신체계



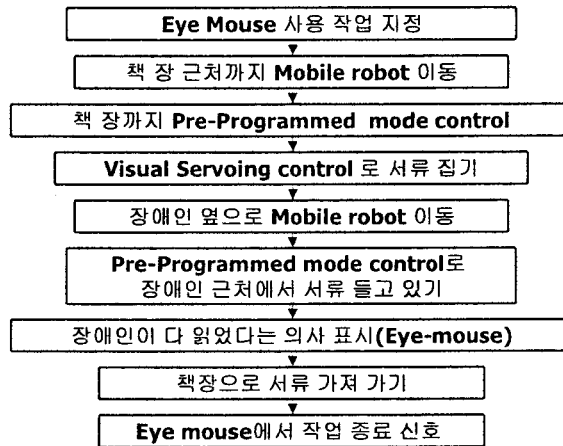
# KARES II 시스템 통합

## 작업 시나리오: 물마시기



## KARES II 시스템 통합

### 작업시나리오: 서류집기



## 통합시 문제점

### 로봇 구동 관련

- **Battery**의 불안 (전원 **noise**발생) → **encoder** 신호 이상, 제어 입력의 불안 초래.
- **Visual Servoing module**이 **gripper**의 상당 부분을 가림 → 물건을 잡기가 곤란 → **Visual Servoing module**의 위치를 고려한 **gripper**의 설계 요망.

### 이동 로봇 관련

- 이동로봇 급발진, 급제동 → 로봇팔 심하게 흔들림 → 제어 성능 저하 → 이동로봇의 **trajectory**설계 필요.
- 이동로봇의 일체형 덮개 → 로봇의 조립이 힘들 → 공간 활용과 배선, 조립의 용이성을 고려한 이동로봇의 설계 필요.

## 결론

- **TOD worked!**
  - 최소의 수정으로 주어진 작업구현 가능
  - 효율적이므로 다른 분야의 설계에도 적용가능
- **개선된 Mechanism**
  - **Pretensioning Mechanism**
    - 조립이 용이하고, **Cable Mechanism**의 **Backlash** 감소
    - 값싸게 구현가능하여 여러 기계장치에 적용가능
  - **Cable Driven Bevel Gear**
    - **Bevel Gear**의 백래쉬문제 해결
- **위치/컴플라이언스 제어**
  - 강인하고, 단순한 구조 → 효과적으로 쉽게 적용가능

## 추후과제

- 통합작업 구현 진행
- 장애인 임상실험
  - 국립재활원
  - 문제점 파악 → 수정/보완
- 개선된 **version**의 로봇 설계/제작

## 앞으로의 가능성

### ■ Sensorless Active Compliance Control

- 기존의 연구: **Direct Drive Arm**에 대하여만 이루어짐
- 장애인을 돕는 작업에의 적용 및 **Gear Ratio**가 있는 로봇에 적용함으로써 개발된 로봇의 우수성 검증

### ■ Cable-driven Wrist

- 상용화된 소형 **Worm Gear**의 사용: 비용절감, 소형의 **Backlash** 없는 **Wrist** 제작이 가능  
→ 특허 출원 예정

### ■ Pre-tensioning Mechanism

- 여러가지 기계장치의 **Backlash**를 감소시키는데 유용하게 사용 가능함

# 재활 로봇을 위한 지능형 인간-로봇 상호작용 기술: Body Motion 을 이용한 사용자 인터페이스를 중심으로

## Intelligent Human-Robot Interaction Technologies for Rehabilitation Robots: Haptic Masters with Various Body Motion

권동수(Dong-Soo Kwon)<sup>1</sup>, 안진웅(Jinung An)<sup>1</sup>, 이규빈(Kyoobin Lee)<sup>1</sup>,  
민재웅(Jaewoong Min)<sup>1</sup>, 임수철(Soocheol Lim)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술원(KAIST),

Email: kwonds@mail.kaist.ac.kr

### 요약

This paper describes three types of the master device that can be selected according to degrees of disability of spinal injured persons. The head motion interface is a two-degrees-of-freedom angle sensor that has two FSRs (Force Sensitive Resistors). An experimental result with a prototype shows the feasibility as an angle sensor that can measure the head-tilting angle. The shoulder motion interface is a wearable haptic master device that has two string sensors composed of strain gages and two vibrotactile actuators. Wheelchairs can be controlled with the wearable haptic master device. The hand motion interface is a joystick that has two magnetic brakes as actuators. Simple test objects are modeled as a benchmark test of the system's performance. The force-reflecting joystick is capable of simulating forces in a variety of virtual environments.

### 1. Introduction

본 연구과제가 목적으로 하는 척추 장애인들은 손상된 척추의 부위에 따라 움직일 수 있는 신체 부위가 서로 다르며 손상 정도에 따라서도 움직임의 정도가 달라지게 된다. 그러므로 장애인을 위한 사용자 인터페이스는 장애인의 장애 정도에 맞추어 사용 부위를 서로 다르게 해 주어야 한다. 본 연구에서는 척추 장애인의 손상에 따라 움직일 수 있는 상체의 부위를 크게 머리, 어깨, 손으로 세 부분으로 나누고 각각의 부위에 가장 적합한 센서와 액추에이터를 선정하여 인터페이스를 개발하였다.

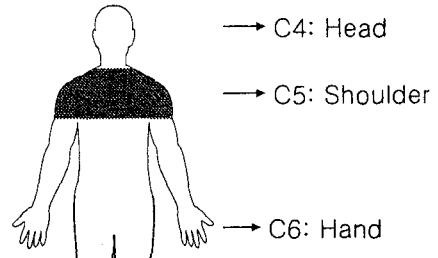


그림 1.1 손상된 척추 번호에 따른 입력 방법

머리 움직임을 이용하는 인터페이스는 머리를 앞, 뒤, 좌, 우로 기울이는 움직임을 측정하고, 어깨 움직임을 이용하는 인터페이스는 어깨를 위, 아래, 앞, 뒤로의 움직임을 측정하며, 손의 움직임을 이용하는 인터페이스는 기존의 조이스틱과 같은 구조에 자기 브레이크를 이용한 액추에이터를 부착하여 힘을 가할 수 있도록 하였다.

### 2. 머리 움직임을 이용한 사용자 인터페이스

#### 2.1. 개요

본 인터페이스의 목적은 손발을 자유롭게 쓸 수 없는 C4(척추장애정도)이상의 척추 장애인을 위한 머리 움직임을 이용하는 인터페이스 장치 개발에 있다. 기존의 헤드컨트롤 유닛은 비전 시스템을 이용해 머리운동을 파악하는 방식[2.1]과 초음파 센서[2.2]를 사용하는 방식, 그리고 머리 뒤에 붙인 조이스틱에 머리 받침대를 붙여 구동하거나 스위치 배열을 머리 뒤에 부착하는 기계적인 mechanism 을 [2.3] 장착한 것들이 있다. 우리는 여기에서 좀더 가능하면 실용적이고 부피가 크지 않은 그리고 사용

함에 있어 큰 힘을 들이지 않고도 신호를 발생시킬 수 있는 사용자 중심의 인터페이스 장치를 만들고자 하였다. 머리의 움직임(flexion)을 통해 2 자유도의 input signal 을 발생시켜 컴퓨터와 인터페이스를 하기 위해 FSR(Force Sensing Register)을 사용하고자 한다.

### 2.2. 머리 움직임 분석

사람의 목에 운동(flexion)에 대한 workspace 를 보면 다음과 같다.

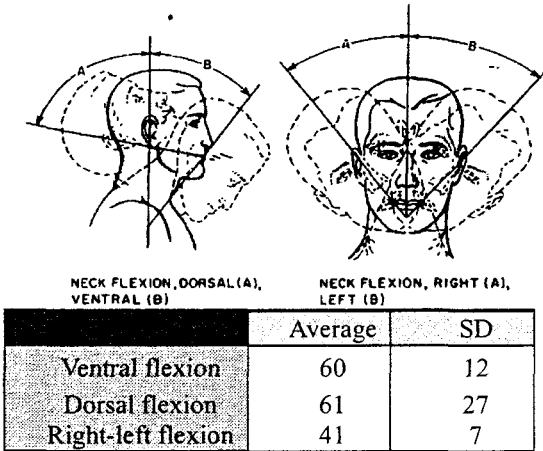


그림 2.1 Range of Movement at the Neck Joint(Male civilians) \*Glanville and Kreezer[2.4]

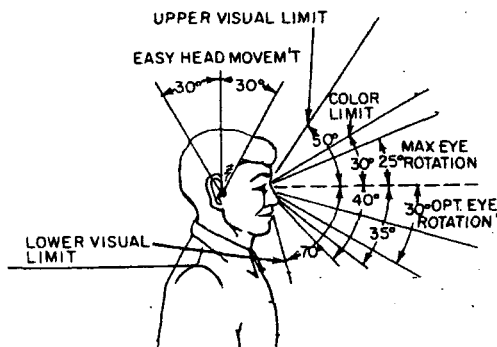


그림 2.2 Visual field with the eye motionless[2.5]

좌우 운동의 경우 최고 평균이 41° 이고 이때를 전후해서 센서에서 나온 값을 사용하더라도 시야는 항상 앞을 바라볼 수 있으므로 전방 시야를 확보하는데 아무런 문제가 없다. 다음으로 상하 운동의 경우 적어도 전방 3m 앞의 장애물을 항상 확보해야 된다고 가정했을 때 휠체어의 의자높이가 바닥에 대해 600mm 이고 엉덩이에서 눈까지의 거리가 평균적으로 750mm 정도[2.4] 가 되므로 수평에 대해서

$\theta = -\tan^{-1}(1.35/3) = -24.2^\circ$  를 주시해야 된다는 결과를 얻는다. 그러나 사람 눈의 upper visual limit 가  $50^\circ$  가 되므로 수평선에 대해 최대한 숙였을 경우에도  $-60^\circ + 50^\circ = -10^\circ$  가 되므로 전방시야확보에 충분하다. 반대로 뒤로 완전히 젖혔을 경우( $60^\circ$ )에도 lower visual limit 가  $70^\circ$  이므로  $60^\circ - 70^\circ = -10^\circ$  를 확보할 수 있으므로 시야확보에 충분하다. 따라서 머리의 움직임이 가능한 영역에서 시야확보는 문제가 되지 않는다는 결론을 내릴 수 있지만 machine 을 동작시키기 위한 신호를 최대 움직임 영역에서 낸다는 것은 사용자에게 workload 를 부담시키기 되므로 바람직하지 않게 된다. 그림 2.2 에서 보듯이 머리의 상하운동은  $\pm 30^\circ$  범위에서는 쉽게 움직일 수 있는 반면[2.5] 사용자의 의도와 무관하게 machine 에게 교시를 내리는 신호가 나올 수 있으므로 신호를 발생시키는 target point 는 최대각( $\pm 60^\circ$ ) 과의 사이값인  $\pm 45^\circ$  에서 교시 신호가 발생하도록 하는 것이 타당하다. 그리고 좌우신호역시  $\pm 41^\circ$  보다 작은  $\pm 35^\circ$  를 목표로 삼겠다.

### 2.3. FSR(Force Sensing Register)을 이용한 머리 움직임 측정용 센서

FSR(Force Sensing Register)은 가해진 힘에 따라 저항이 변화하는 transducer 로써 3 개 층의 Polymer Thick Film(PTF)으로 구성되어있다. 그림 2.3 에 보듯이 상층부에는 반도체 성분이 PTF 표면에 인쇄되어있고 중간층은 상층과 하층 사이의 미세한 공간을 확보하기 위한 spacer 이며 하층부는 두개의 분리된 전극이 인쇄되어 있는 active area 이다.

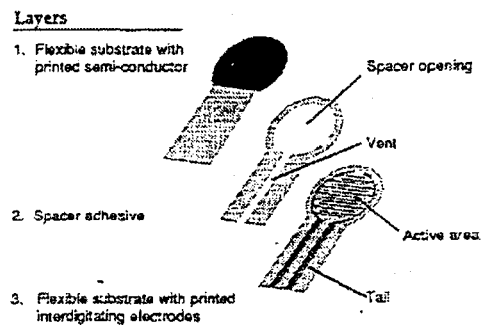


그림 2.3 FSR Construction[2.6]

동작원리는 active area 에 힘이 가해지면 상층부의 면이 flexible 하므로 외력에 따라 하층부와 접촉이 발생하는 면적이 변화하게 되어 결국 하층부의

active area 에서 전기적으로 연결되는 면적이 변하게 된다. 힘이 커질수록 접촉면적 또한 커지게 되어 두 전극사이의 전기적 저항값이 감소하게 되는 것이다. 외력과 저항값 사이의 관계를 그림 2.4 에 나타내었다.

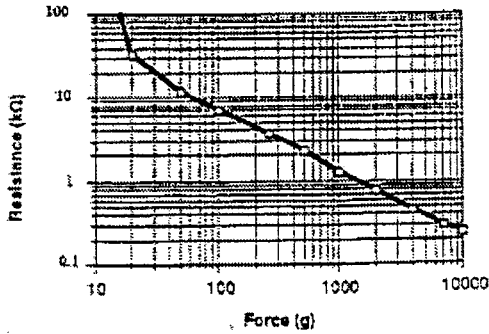


그림 2.4 Force vs. Resistance[2.6]

그래프에서처럼 force 측정은 20g 에서 10kg 영역에서 가능하고 resolution 은 전영역에 0.5%의 오차를 가진다. 분해능은 우수하나 가격이 저렴한 만큼 반복도가 ±15%에서 ±25%정도인 단점이 있다.

#### 2.4. 머리 움직임 측정용 센서의 개발

2.2.에서 말한 머리의 2 자유도 angle 변화를 FSR 을 이용하여 측정하기 위해 그림 2.5 와 같은 모양의 prototype device 를 만들었다. 내부를 깎은 정육면체 안쪽 두면에 FSR 를 각각 하나씩 붙였고 그 안에 금속 구를 넣은 후 플라스틱 필름을 이용하여 항상 일정한 힘이 FSR 에 가해지도록 하였다. 그렇게 되면 축 방향의 각도변화에 따라 각면에 붙어있는 센서에 가해지는 힘이 달라지게 되고 이에 따른 저항의 변화를 통해 머리가 기울어진 각도를 측정이 가능하게 된다. 헤어밴드나 그외 다른 머리부착물에 그 장치를 붙여서 사람이 사용할 수 있게끔 하고자 하였다.

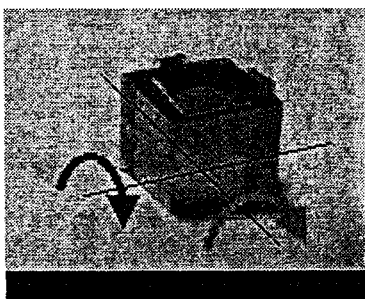


그림 2.5 Prototype of Sensing device

동작원리에 대해 자세히 살펴보기 위해 우선 그림 2.6 을 통해 1 자유도의 힘 평형 방정식을 구해보았다.

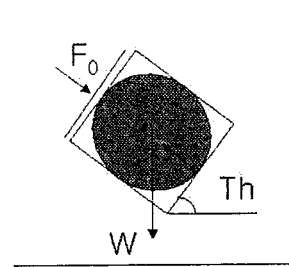


그림 2.6 Equilibrium of Force

평형방정식은

$$F = W \cos(Th) + F_0$$

(2.1)

과 같고 앞의 그림 2.5 의 데이터를 추출하여 Curve-Fitting 해서

$$R(\Omega) = \frac{6309.573447}{F(N)^{0.8}}$$

(2.2)

의 함수를 얻었다. 저항값의 변화를 voltage divider 를 사용하여 식(2.3)에서처럼 전압의 변화로 바꾸게 된다.

$$V = \frac{R_m \times V_{cc}}{R_m + R}$$

(2.3)

여기에서  $R_m=10000 \Omega$ , 공의 무게  $W=1N$ , 필름에 의한 외력=2N, 그리고  $V_{cc}=5V$  일 때 식(2.1)과 식(2.2)를 식(2.3)에 넣게 되면 결국 각도변화와 전압의 관계가 다음과 같이 된다.

$$V = \frac{50000}{10000 + \frac{6309.573447}{(\cos(Th) + 2)^{0.8}}}$$

(2.4)

그리고 각도변화에 대한 전압변화의 sensitivity 는

$$S = \frac{\partial(V)}{\partial(Th)} = \frac{-0.25238^2 \times \sin(Th)}{(10000 + \frac{6309.573447}{(\cos(Th) + 2)^{0.8}})^2 (\cos(Th) + 2)^{1.8}}$$

(2.5)

와 같다. 식(2.4)와 식(2.5)에 대한 결과를 그래프로 나타내어 보면 그림 2.7 과 그림 2.8 과 같다.

상하 교시신호 발생의 target point 영역인



$\pm 45^\circ$  (수평상태가  $90^\circ$  이므로  $45^\circ \sim 135^\circ$  가 되고  $0.785 \sim 2.356\text{rad}$  이다.) 와 좌우 교시신호 발생 영역인  $\pm 35^\circ$  ( $0.96 \sim 2.182\text{rad}$ )에서는 linear 함을 알 수 있고 또한 sensitivity 역시 우수함을 알 수 있다.

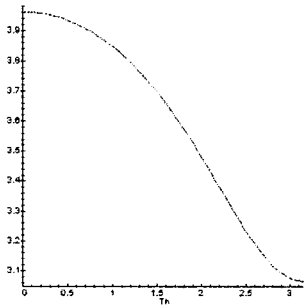


그림 2.7 각도(rad)-전압(V)의 관계

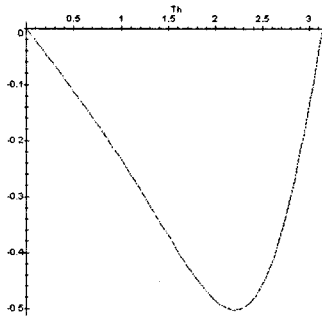


그림 2.8 각도(rad)-sensitivity의 관계

### 2.5. Experiment

제작된 device 에 대해 1 자유도 실험을 수행해본 결과 그림 2.9 와 같은 데이터를 얻게 되었다.

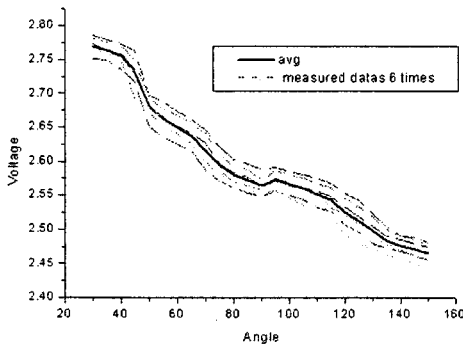


그림 2.9 각도(deg)-전압(V)의 실험 데이터

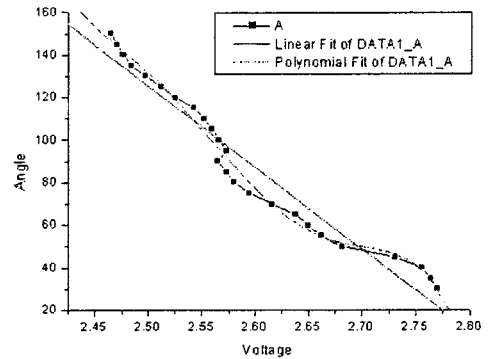


그림 2.10 Linearization of experiment data

얻은 데이터들의 평균값에 대해 선형화 시킨 결과  $\text{Angle}(\text{deg}) = 1083 - 383 \times \text{Voltage}(\text{V})$  의 관계를 얻었고, 표준편차는  $8.88^\circ$  였다. 그러나 5 차의 polynomial curve-fitting 을 하면 표준편차가  $4^\circ$  가 되었다. 목표를 둔  $\pm 45^\circ$  의 상하운동과  $\pm 35^\circ$  의 좌우운동을 교시하는데 있어  $9^\circ$  라면 오차가 약 20%~25%정도가 된다는 것이다. FSR 센서 자체가 정확하게 선형성이 보장되지 않고 repeatability 역시 앞서 말했듯이 우수한 센서는 아니지만(오차가  $\pm 25\%$ ) 머리를 아래로 했을 때  $45^\circ \pm 9^\circ$  에서의 전압값 즉  $2.77\text{v}(36^\circ)$  이상의 값에 대해 시간에 대한 low pass filtering 처리를 해서 사용하게 되면 문제가 없을 것으로 사료된다.

또한 10bit A/D converter 에서(PIC16F873 microcontroller) reference voltage 를 2~3V 로 두게 되면 resolution 이  $1\text{V}/1024 = 1\text{mV}$  이므로 그 값은 정확히 측정할 수 있다.

### 2.6. 요약

머리 움직임을 이용한 input device 를 만들고 1 자유도에 대해서 실험 수행을 통하여 교시 작업을 위한 타당성을 검증하였다. 앞으로 2 자유도에 대한 실험을 마친 뒤 직접 사용할 장애인들에 대해 필드 테스트를 거쳐 new interface 에 대한 효용성을 feedback 받으려 하고 있다. 또한 연속적인 교시모션으로 인해 발생하는 workload 를 줄일 수도 있는 휠체어의 auto-navigation 과 연계시킨 시스템을 구축하고자 한다.

## 3. 어깨 움직임을 이용한 햅틱 장치

### 3.1. 개요

어깨는 다른 신체 부위에 비해 움직일 수 있는 범위가 작은 편이지만 손을 움직일 수 없는 장애인의 경우 어깨를 움직여 원하는 작업을 수행할 수 있다면 상당히 도움이 될 것이다. 머리의 움직임은 어깨의 움직임 보다 운동 범위가 넓고 움직임도 자유롭다는 장점과 함께 시선을 고정된 채로 작업을 수행하지 못한다는 단점도 가지고 있으므로 어깨의 움직임으로 시선을 고정된 채로 작업을 수행할 수 있도록 도와줄 수 있다. 본 연구에서는 의복 형태로 만든 햅틱 장치를 입은 채로 어깨의 움직임을 입력 받아 작업을 수행하고 의복에 붙어 있는 진동 모터를 이용하여 적절한 피드백이 가능하도록 하는 조종기를 다루며 이미 여러 학회에서 발표된 바 있는 기존의 장치[3.1][3.2][3.3]의 개선된 부분을 중점적으로 다루고자 한다.

### 3.2. 어깨 움직임 측정용 의복 형태 조종기의 개발

기존의 의복 형태 조종기[3.1][3.2][3.3]는 광섬유를 의복의 옷감에 부착하여 굴곡을 측정하는 방식을 채택하였다. 이러한 방법은 광섬유 굴곡센서가 가볍고 의복에 부착하기 용이하다는 장점을 가지고 있는 반면, 광섬유 굴곡 센서를 부착할 의복의 구김에 의하여 교정(Calibration)값을 더 이상 사용할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 단단히 조이는 재질의 옷감을 사용하였으나 사용자가 일상생활에서 사용하기에는 불편하다는 결론을 내리고 센서를 교체하였다.

새로이 개발된 센서는 스트레인게이지를 얇은 알루미늄 판에 부착하여 알루미늄 판의 휘어진 정도를 측정하도록 하는 구조를 가지고 있으며 알루미늄 판의 끝에는 탄성을 가진 줄을 연결하여 측정 길이를 증가시켰다(그림 3.1).

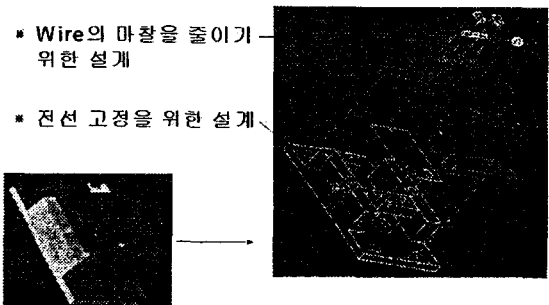


그림 3.1 길이 측정용 센서 설계도

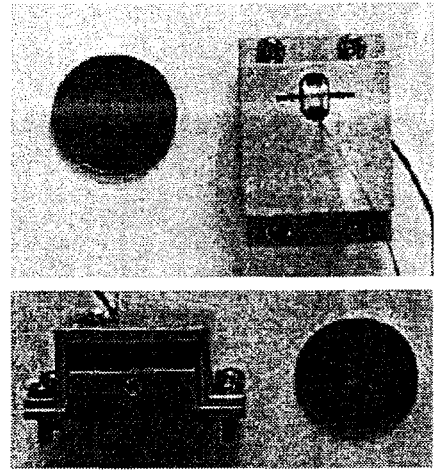


그림 3.2 제작된 센서

제작된 센서는 그림 3.3 과 같이 허리띠에 부착되며 허리띠로부터 어깨까지의 길이를 측정하는 데 사용된다.

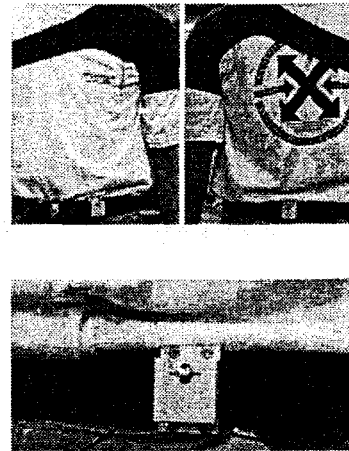


그림 3.3 센서의 부착 위치

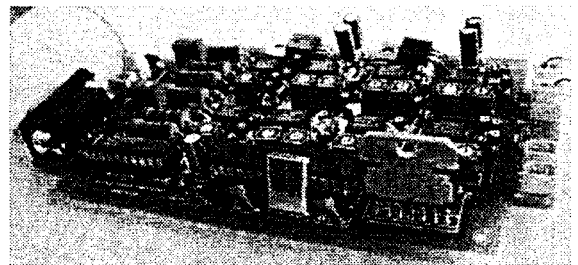


그림 3.4 센서용 독립 제어기의 제작

센서에 부착된 스트레인게이지의 저항의 변화량을 독립제어기를 그림 3.4 와 같이 제작하였다. 이 제어기는 자체 증폭하여 PC 로 전달하는 역할을 하는 전원을 사용 가능하며 마이크로 컨트롤러를 내

장하여 간단한 연산과 PC 와는 RS232 통신이 가능하다. 그리고 진동 모터를 PWM 신호로 제어할 수 있는 모터 제어기 2 개를 포함하고 있다.

### 3.3. 교정(Calibration) 및 사상을 위한 함수 개발

기존의 교정 및 사상 함수는 교정점(Calibration Point)이 최대 9 개로서 센서 좌표에서 어깨 좌표로의 사상에 어느 정도 왜곡이 존재함을 피할 수 없는 구조로 되어 있었고 특히 인공 신경망을 이용하는 사상 함수는 학습 시간과 계산량이 많은 단점을 가지고 있었다. 새로이 개발된 교정 및 사상 함수는 교정점의 개수를 증가시키면서 계산량을 줄일 수 있도록 하였다. 이를 위하여 먼저 교정을 위한 어깨 움직임을 점 단위로 고정시키지 않고 어깨를 원운동 하는 방식을 채택하였다.

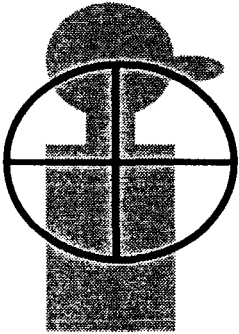


그림 3.5 어깨의 원운동과 상하전후운동을 통한 교정

그림 3.5 와 같이 어깨를 원운동하여 얻어진 교정 점을 극좌표로 나타내면 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

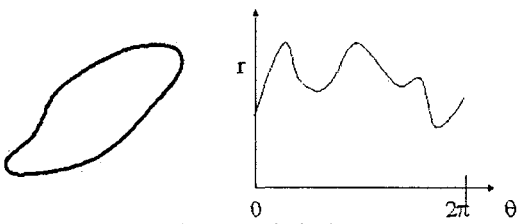


그림 3.6 극좌표로 나타낸 교정 정보

위와 같이 얻어진 교정 정보는 센서 좌표와 어깨 좌표 사이에 r 값에 대한 왜곡 정보를 담고 있다. 이어서 어깨의 상하전후 움직임으로부터 각도 영역의 왜곡 정보를 다음 그림과 같이 얻는다.

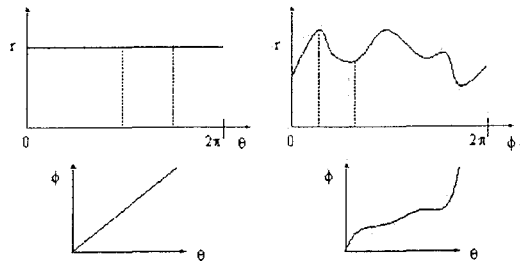


그림 3.7 상하전후의 움직임으로부터 각도 영역의 왜곡 정보를 얻음

얻어진 왜곡 정보는 다음의 수식과 같은 연립방정식을 풀어 어깨 좌표의 각도 영역으로 쉽게 사상할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \phi_1^2 & \phi_1^4 & \phi_1^3 & \phi_1^2 & \phi_1^1 & 1 \\ \phi_2^2 & \phi_2^4 & \phi_2^3 & \phi_2^2 & \phi_2^1 & 1 \\ \phi_3^2 & \phi_3^4 & \phi_3^3 & \phi_3^2 & \phi_3^1 & 1 \\ \phi_4^2 & \phi_4^4 & \phi_4^3 & \phi_4^2 & \phi_4^1 & 1 \\ \phi_5^2 & \phi_5^4 & \phi_5^3 & \phi_5^2 & \phi_5^1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$a\phi^5 + b\phi^4 + c\phi^3 + d\phi^2 + e\phi + f = \theta \quad (3.2)$$

위의 수식에서 미지수가 6 개가 되는 이유는 4 개의 교정점의 처음과 끝이 같은 각도가 되면서 1 차 미분이 같도록 만들기 위해서이다.

각도 사상이 끝나면 다음 그림과 같이 반지름 좌표에 대한 사상도 센서의 교정 정보에서 어느 각도에 대한 반지름과 측정된 반지름의 비를 이용하여 간단히 수행 가능하다.

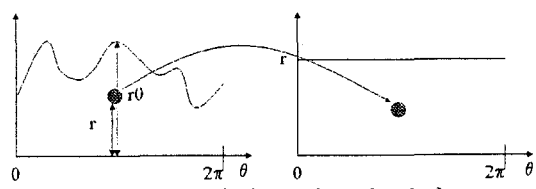


그림 3.8 반지름 좌표의 사상

일반적으로 교정 정보에는 사람이 어깨를 원운동할 때 발생하는 시작각과 끝각의 불일치 현상이 일어나게 된다(그림 3.9).



Sensor Values Position Command  
 그림 3.9 교정 정보의 시작각과 끝각의 불일치 현상

위와 같은 불일치 현상은 교정 정보에 다음과 같은 scaling 함수를 곱함으로써 간단히 해결할 수 있다(그림 3.10).

$$f_s = 1 + \frac{R_1 - R_2}{R_2} \frac{\theta}{2\pi} \quad (3.3)$$

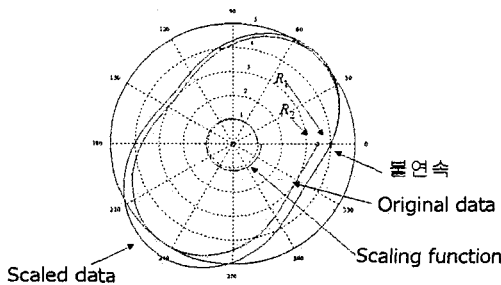


그림 3.10 불연속 구간의 처리 방법

### 3.4. 휠체어 제어 실험

개발된 어깨 움직임 측정용 의복 형태 조종기를 휠체어 조종에 적용하여 보았다. 사용된 휠체어는 국내의 전동 휠체어 제조사인 (주)대세메디케어의 PARTNER P/W 6000 을 이용하였고(그림 3.11) Dynamic 사의 5 Switch Module 을 이용하여 간단한 전기스위치 조작을 통해 전후 직선 운동과 좌우 회전운동이 가능하다.

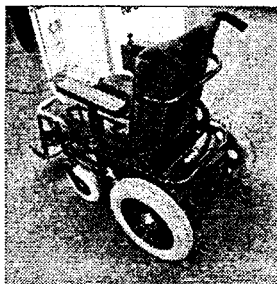


그림 3.11 사용된 전동 휠체어

어깨를 위로 움직이면 전진, 어깨를 아래로 움직이면 후진, 어깨를 앞으로 움직이면 좌회전, 어깨를 뒤로 움직이면 우회전을 하도록 제어 방법을 택했다. 어깨의 자연스런 움직임으로 전동 휠체어를 자유롭게 움직일 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 그림 3.12 과 같이 휠체어의 뒷부분에는 초음파 센서가 부착되어 사용자가 감지하지 못한 장애물이 나타났을 때 의복 형태 조종기에 부착되어 있는 진동 모터가 작동되어 사용자에게 장애물이 있음을 알리게 된다.

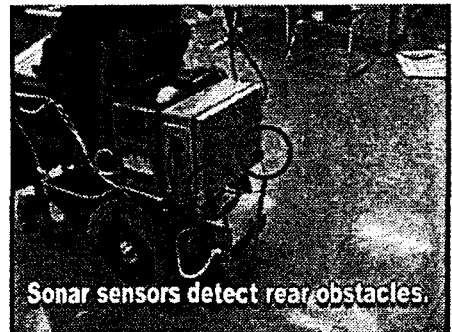


그림 3.13 초음파 센서가 장애물을 감지하면 진동 모터가 작동함

실험 동영상은 다음의 주소에서 확인할 수 있다.  
[\[http://robot.kaist.ac.kr/project/wheelchair/wheelchair-contrl.jpg\]](http://robot.kaist.ac.kr/project/wheelchair/wheelchair-contrl.jpg)

### 4. 손의 움직임을 이용한 햅틱장치(Manual Haptic Master)

손가락과 손목을 자유롭게 움직일 수 있는 휠체어 사용자는 조이스틱을 이용하여 휠체어를 손쉽게 원하는 방향으로 움직이게 하거나, 로봇을 조종하여 원하는 작업을 수행할 수 있다. 만일 조이스틱을 통해 휠체어 사용자에게 외부환경에 대한 정보를 촉감이나 다른 방법을 이용하여 전달해 줄 수 있다면, 시야가 가려진 위치에 놓인 장애물을 회피할 수 있거나 로봇이 접촉하는 물체의 촉감이나 무게와 같은 물리적 특성들을 사용자가 느낄 수 있게 하여 보다 자연스러운 작업을 할 수 있을 것이다. 이러한 목적에 부합하는 인간-로봇 상호작용 기술은 힘이나 촉감을 사람에게 제공하는 조이스틱 기술이라고 할 수 있으며, 햅틱 입력장치라고 통칭하고 있다. 햅틱 입력장치는 그 응용 분야가 다양해서 위험하고 멀리 떨어진 환경을 탐사하거나, 정교한 작업이 요구되는 의료수술이나, 장애인 재활 등에 이용되고 있

다.

휠체어 사용자가 햅틱 입력장치를 조종기로 쓰고자 할 때 쉬운 조작성이나 친근감 뿐만 아니라 무엇보다 우선되어야 하는 것은 햅틱 입력장치가 사용자에게 위험을 끼치지 않는다는 안전성의 보장이 중요하다. 환경에 대한 촉감이나 힘을 느끼게 하기 위해서는 햅틱 입력장치에 이들을 만들어 줄 수 있는 구동기가 반드시 포함되어야 한다. 현재까지 알려진 대부분의 햅틱 입력 장치들은 구동기로서 모터와 같은 능동형 구동기를 사용하고 있다. 그러나 햅틱 입력 장치가 벽과 같은 굉장히 딱딱한 표면을 구현하기 위해서는 반드시 이에 상당한 큰 저항력을 발생시켜야 하는데 이 때 사용되는 구동기는 굉장히 빠른 응답 시간과 무제한의 토크를 낼 수 있어야 한다. 이러한 특성에 맞추기 위해서는 햅틱 입력장치에 사용될 모터는 그 크기가 굉장히 커져야 할 것이다. 또한 능동형 구동기의 가장 큰 문제는 시스템을 불안정하게 하여 사용자에게 위험을 초래할 수도 있다는 것이다. 이러한 불안정 문제로 인해 능동형 구동기만으로는 어느 한계 이상의 점성과 강도를 구현할 수 없다[4.2]. 따라서 딱딱한 표면을 구현할 수 있는 다른 구동기인 수동형 구동기가 햅틱 조이스틱에 이용되고 있다. 이러한 수동형 구동기에 대한 연구로는 자기 입자 브레이크[4.7][4.9], 자기유변 유체 브레이크[4.1] 등이 있으며, 이들은 모두 모터와 마찬가지로 전류를 조절해서 토크를 만들어 내지만, 브레이크의 쿨롱 마찰 특성으로 인해 저항 토크만을 만들어 낸다. 그러므로 이 브레이크들은 시스템의 에너지를 단지 소산 시키기 때문에 본질적으로 안정하다. 이것이 이 브레이크들을 햅틱 입력장치에 사용하는 주된 이유이다. 게다가 동일한 크기로 비교할 때 모터에 비해 더 큰 토크를 만들어 낼 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 브레이크의 에너지 소진 특성으로 인해 스프링과 같은 에너지 저장 요소를 구현할 수가 없다. 또한 모터의 경우에도 스틱 슬립과 같은 마찰 요소를 구현하기가 쉽지 않다. 따라서 햅틱 입력장치에 브레이크와 모터를 함께 사용하여 다양한 대상물들을 구현할 수 있다. 본 연구에서는 모터/브레이크를 함께 사용한 하이브리드 구동기에 대한 대상물의 구현 성능을 파악하기 위해 1 자유도 힘반향 조이스틱을 설계 제작하고 다양한 대상물의 실험을 통하여 모터/브레이크 하이브리드 구동기의 적용 가능성을 파악하였다. 또한 휠체어에 장착하여 사용자가 쓸 수 있도록 자기 브레이크를 구동기로 장착한 2 자유도 수동형 햅틱 조이스틱을 설계 제작하였다.

## 1 자유도 햅틱 조이스틱의 설계 및 제어

햅틱 조이스틱의 설계는 적용 대상에 따라서 고려되어야 할 설계 요구 조건들이 다르고 이 조건들에 대한 논의가 많이 이루어져 왔다[4.4][4.5][4.6]. 그러나 이러한 연구에서 공통적으로 주장하는 두 가지의 기본적인 설계 요구 조건이 있다. 이 두 가지의 조건으로는 먼저 햅틱 조이스틱이 어떠한 물체와도 접촉하지 않는 자유 공간에서는 사용자가 어떠한 물체도 없는 것처럼 느낄 수 있어야 한다는 것이며, 다음으로는 강성이 큰 딱딱한 물체와 접촉하는 환경에서는 사용자가 그 물체의 딱딱함을 있는 그대로 느낄 수 있어야 한다는 것이다. 본 연구에서는 이 두 가지의 조건을 설계 지침으로 삼아 1 자유도 햅틱 조이스틱을 설계 제작하였다.

첫번째로 자유공간과 같은 임피던스가 낮은 환경을 자연스럽게 느끼게 하기 위해서는 조이스틱의 동역학을 최소화 시킬 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다. 조이스틱의 물리적 댐핑이나 관성은 어느 정도까지는 제어에 의해 없앨 수 있지만, 이 요소들은 본래의 설계 조건에는 부합하지 않는다. 따라서 제어에 의해 보상 시킬 수 있는 수준으로 조이스틱의 관성과 댐핑을 줄여 주도록 설계하여야 한다. 또한 비선형 요소인 마찰은 조이스틱의 역구동성과 어드미턴스를 악화시키기 때문에 적합한 베어링의 선정, 부품 간의 조립성, 그리고 우수한 구동 전달 기구의 설계가 요구된다. 본 연구에서는 조이스틱의 대부분의 부품을 고강도를 갖는 6061 알루미늄으로 가공하였고, 특히 조이스틱의 관성을 줄이기 위해 손잡이를 고강도 복합재료인 탄소섬유를 증착하여 가공된 파이프를 사용하여 손잡이 무게를 최소화하였으며, 구동 전달 기구부의 무게를 줄이는 방향으로 형상을 가공하였다. 둘째로 관성이나 댐핑과는 달리 강성도가 큰 딱딱한 물체를 딱딱한 정도 그대로 느낄 수 있도록 하기 위해서는 조이스틱이 낮은 컴플라이언스를 갖도록 설계되어야 한다. 큰 질량을 갖는 시스템이 낮은 컴플라이언스를 갖을 수는 있지만, 질량이 커지면 첫번째의 설계 조건을 만족시키기 힘들다. 또한 구동 전달 기구를 백래쉬나 마찰이 없도록 설계하여야 한다. 본 연구에서는 모터 구동축과 손잡이와 연결된 축들을 알루미늄의 강도보다 큰 강철로 가공하여 구동기가 토크를 발생시킬 때 조이스틱의 컴플라이언스를 최소화하도록 하였다. 또한 구동 전달 기구를 케이블 구동 메커니즘을 사용하여 백래쉬와 마찰이 없도록 하였다. 그림 1 에 1 자유도 햅틱 조이스틱 장치의 모습을 나타낸다.

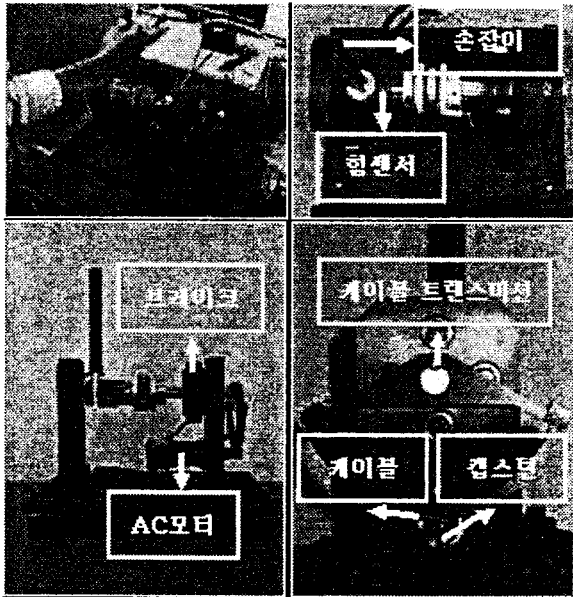


그림 4.1 1자유도 힘반향 조이스틱 장치

그림에서 캡스틴 구동부는 벨트 구동과 마찬가지로 백래쉬가 없고 마찰이 적은 장점과 함께 케이블이 구동축 베어링에 아무런 힘을 주지 않도록 함으로써 조이스틱의 역구동성을 향상시킨다. 1 자유도 힘반향 조이스틱의 작업공간은 144deg 이며, 구동 전달 기구부의 감속비는 10/1 이며 손잡이 끝에 가할 수 있는 최대 힘이 58N 이 되도록 설계하였다.

그림에서 보는 바와 같이 능동형 구동기로는 정격 토크가 0.319Nm 인 AC 서보 모터를 사용하고, 수동형 구동기로는 자기유변 유체 브레이크를 사용하였다. 이 자기유변 유체 브레이크는 가해지는 전류의 세기에 따라 저항 토크를 만들어 내는 것으로 다른 자기 입자 브레이크나 자기 히스테리시스 브레이크에 비해 내구성과 토크/중량비가 큰 장점이 있다. 본 연구에서는 Lord 사의 MRB-2107-3 을 사용하였으며, 0 ~ 1A 전류 인가에 대해 최대 6Nm 의 저항 토크를 만들어 낸다. 구동기축들의 위치를 측정하기 위해서 AC 모터에 장착된 2048pulse 엔코더를 4 체배하여 최대 8192counts/rev 가 되도록 사용하고, 사용자와 대상환경과의 접촉 토크를 측정하기 위해 손잡이와 구동축 사이에 50lb-in 의 측정 능력을 갖는 토크 센서를 장착하였다. 1 자유도 힘반향 조이스틱의 제어는 실시간 운용체제인 QNX 4.20 을 기반으로 구축한 제어 컴퓨터(Pentium MMX 166MHz)에서 ISA BUS 의 입/출력 포트를 이용하여 AD, DA, Counter 보드에 접근하는 방식으로 이루어

진다. 제어 시스템의 구성은 그림 4.2 에 나타낸다.

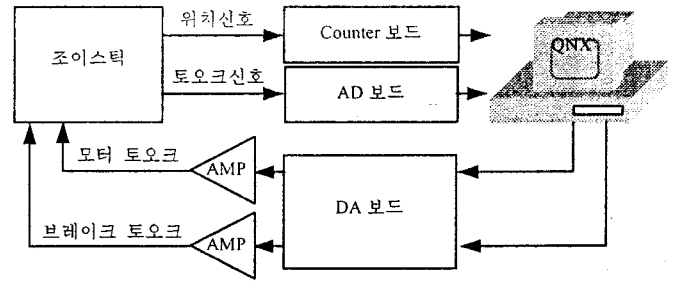


그림 4.2 1 자유도 힘반향 조이스틱의 제어 시스템 구성

이들 보드들은 제어기 내의 ISA 슬롯에 장착되어 각각 모터와 연결되어 있는 엔코더 신호와 토크 센서의 신호를 읽어 들여서 제어 신호를 발생시키는 역할을 한다. 전체 제어 루프는 1kHz 로 동작하게 함으로써 사용자가 연속적인 힘을 느끼도록 하였다. 자기유변 유체 브레이크의 토크를 발생시키기 위해 양방향 전류 증폭기를 제작 사용하였다.

#### 4.1.1 자유도 힘반향 조이스틱의 햅틱 실험

##### 4.2.1. 실험 개요

햅틱 디바이스의 성능을 평가하는 데 있어서 가장 어려운 문제는 사용자가 느끼는 “실감”을 정량적으로 표현하는 것이다. 햅틱 성능 평가에 대한 다양한 방법론들이 햅틱 디바이스의 기구적 혹은 물리적 관점에서 소개되어 왔지만, “실감”에 대한 보다 구체적인 성능 평가에 대한 연구가 답보 상태에 있다. 그러나 실감 있는 힘반향 구현에 대한 몇 가지의 경험적인 법칙들이 존재하며, 말하자면 나무 막대기를 흔드는 느낌(관성), 벽돌로 된 벽을 미는 느낌(강성도), 고무자석이 냉장고 문 위에서 미끄러지는 느낌(쿨롱 마찰), 방문손잡이의 꼭지버튼을 누르는 느낌(스프링) 등이 그것이다. 본 연구에서는 이러한 실감 재현의 경험적인 법칙들을 평가하기 위해 가상 벽, 유체, 버튼 및 스틱 - 슬립 등의 모델을 만들어 실험함으로써 모터/브레이크를 함께 사용한 햅틱 조이스틱의 성능을 보이고자 하였다. 또한 모터나 브레이크만으로는 구현하기 힘든 대상물을 현실감 있게 구현하기 위해 실제 대상물의 힘-위치 프로파일을 측정하고 이를 기반으로 대상물들의 햅틱 모델을 만들어 1 자유도 힘반향 조이스틱으로 실험하였다. 실험 대상물로는 레고블록, 스티로폼을 선정하였다. 실제 대상물의 힘-위치 프로파일의 측

정은 그림 4.3의 측정 시스템을 사용하였다.

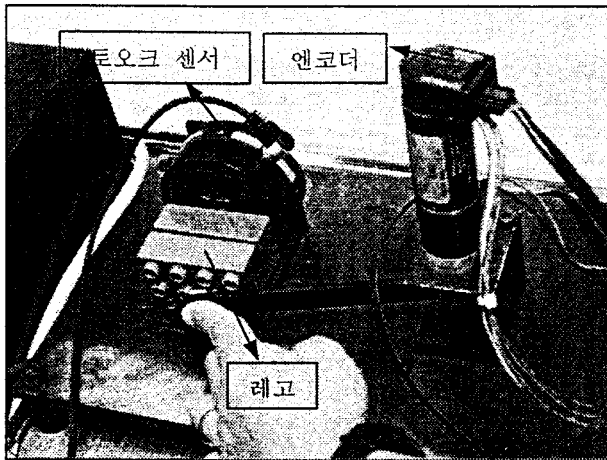


그림 4.3 실제 대상물의 힘-위치 프로파일 측정 시스템

#### 4.2.2 가상 벽, 유체, 버튼 및 스틱-슬립의 구현 실험

가상 벽 구현 실험은 높은 임피던스 특성(벽과 접촉할 때)과 낮은 임피던스(벽과 접촉하지 않을 때) 특성을 모두 갖는 대표적인 햅틱 실험으로 [4.2][4.8] 벽에 접촉하는 순간이나 벽으로부터 이탈하는 순간을 얼마나 안정하게 구현할 수 있는지를 평가함으로써 그 햅틱 디바이스의 성능을 파악할 수 있다. 일반적으로 모터만을 사용한 햅틱 디바이스에서는 이러한 순간적인 전환 위치에서 불안정하게 되어 심한 진동을 발생시키게 되지만, 브레이크를 사용한 햅틱 디바이스에서는 벽 위치에서 큰 저항력을 만들어서 딱딱한 벽을 느끼게 할 수 있으며, 이탈하는 순간에 속도의 방향이 바뀌는 것을 이용하여 아무런 저항 없이 안정하게 벽으로부터 떨어지게 할 수 있다. 그림 4.4에 나타난 바와 같이 20deg 위치에 있는 벽을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

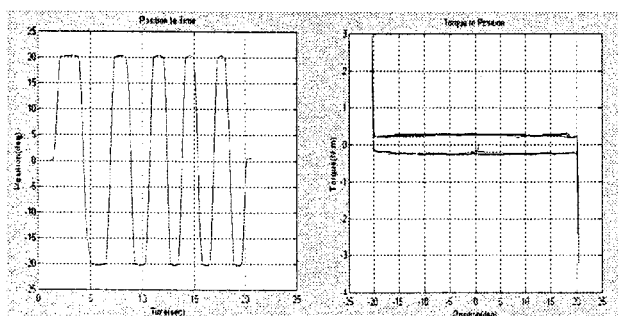


그림 4.4 가상 벽 구현 실험

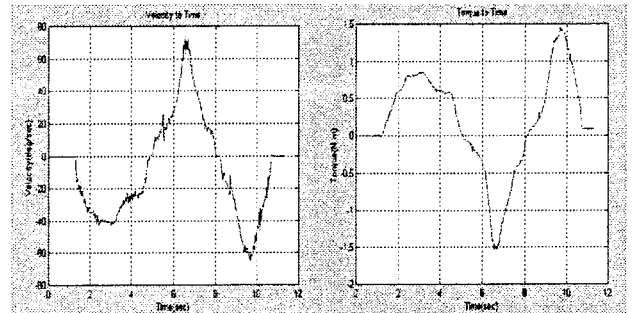


그림 4.5 가상 유체 구현 실험

댐핑 구현 실험으로 0.2N.m/deg/s의 점성을 가지는 유체 속을 느낄 수 있는지를 실험하였다. 모터를 사용하는 조이스틱의 경우 가상 환경의 댐핑이 클수록 시스템이 불안정해진다 [4.2]. 브레이크는 전류에 따라서 토크를 바꾸므로 조종기의 속도에 따라서 흐르는 전류를 변화시키면 안정되게 댐핑을 구현할 수 있다.

그림 4.5는 실험결과로서 속도를 변화시키면서 조이스틱에서 느껴지는 힘을 측정함으로써 힘은 속도에 따라 변하고 있으며 그 사이의 계수가 0.2N.m/deg/s로 거의 일정하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이 실험을 통해 브레이크를 이용해서 물체의 댐핑을 매우 안정되게 구현할 수 있음을 확인하였다.

방문을 잠그기 위해 손잡이 꼭지 버튼을 누른다면, 처음에는 버튼 내부의 복원 스프링(K)이 압축되면서 저항력이 증가되는 것을 느끼게 되고, 어떤 위치(m)에 이르게 되면 딸각하는 소리와 함께 문이 잠기면서 아주 적은 힘(F<sub>r</sub>)으로 미끄러지는 것을 느끼게 되며, 만일 계속해서 누르게 되면 버튼이 더 이상 진행할 수 없는 상태(n)가 되어 딱딱한 벽(F<sub>b</sub>)을 미는 것처럼 느낄 것이다. 이러한 버튼을 구현하기 위해서는 스프링에 의한 느낌은 모터로 구현하고, 미끄러지는 느낌과 벽을 미는 느낌은 브레이크로 구현할 수 있다. 이에 대한 햅틱 모델을 수식으로 표현하면,

$$F = Kx(1 - u_m) + F_r u_m + F_b u_n \quad (4.1)$$

이며, u<sub>m</sub>과 u<sub>n</sub>은 각각 위치 x < m, x < n 일 때 "0"을 갖는 단일함수(unit function)이다. 실험결과를 나타내는 그림 4.6(a)에서 보는 바와 같이 모터와 브레이크

를 함께 이용하여 버튼을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

냉장고 문 위에서 고무자석을 미끄러지게 하는 스틱-슬립 마찰은 모터만을 이용한 햅틱 디바이스로는 결코 구현할 수가 없다. 브레이크는 그 자체가 쿨롱 마찰 특성을 지니고 있기 때문에 이를 구현하기란 매우 쉬운 일이다. 일반적으로 카르노 모델(Karnopp's model)이 스틱-슬립을 표현하는 가장 좋은 모델로 널리 사용되고 있으며[4.3], 본 연구에서도 이 모델을 이용하여 스틱-슬립을 구현하였다. 카르노 모델에서는 상대 속도가 아주 미소한 구간( $-D_v, D_v$ )에 존재할 때, 시스템이 "스틱(stick)"되어 구동력(driving force)이 "스틱"을 깨뜨리는 항복력(break-free force)을 넘어서지 않는 한 이 구동력을 정확하게 제거 시킨다. 만일 구동력이 항복력 수준을 넘어서면, 물체는 가속되고, 상대 속도의 크기도 순식간에  $D_v$  보다 커지게 된다. 이 때부터 물체는 "슬립(slip)" 상태에 들어서고 전체 마찰력은 쿨롱과 점성 마찰력의 합으로 표현된다.  $F$  를 마찰력,  $v$  를 상대속도,  $F_h$  를 항복력 그리고  $u_i$  를 구동력이라고 하면 카르노 모델은 다음으로 표현된다.

$$F = F_{stick} + F_{slip}$$

$$|v| < D_v \text{ 이면,}$$

$$F_{stick} = \max(F_h, \min(F_h, u_i)), F_{slip} = 0$$

$$|v| > D_v \text{ 이면,}$$

$$F_{stick} = 0, F_{slip} = F_s \text{sign}(v) + B_m v \quad (4.2)$$

식 (4.2)를 1 자유도 햅틱 조이스틱에 적용하여 구현한 결과를 그림 4.6(b)에 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 브레이크만을 이용하여 스틱-슬립 현상을 잘 모사할 수 있음을 알 수 있다.

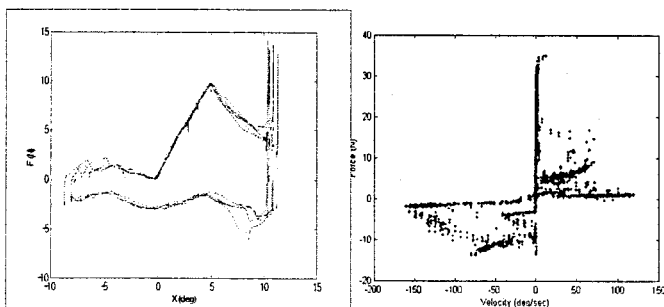


그림 4.6 가상 버튼(a) 및 가상 스틱-슬립(b)의 구현

### 4.3 실제 대상물의 구현 실험

#### 4.3.1 레고블록

주변에서 쉽게 경험할 수 있는 레고블록을 가상으로 구현한다면, 요철(凹凸) 한 쌍의 레고블록을 서로 끼워 맞추는 것으로 요블록의 입구에서 철블록이 쉽게 미끄러지기 시작해서 끼워지는 표면적이 넓어지면서 힘이 더 들게 되고, 철블록이 요블록 바닥에 완전히 닿으면 양 손을 서로 미는 느낌을 주게 될 것이다. 또한 철블록을 요블록으로부터 빼낼 때 순간적으로 큰 힘을 주어 잡아 당기면 쉽게 분리될 것이다. 그림 4.7 과 같이 레고블록을 응력이 길이 방향에 따라서 전파되면서 생기는 마찰로 모델링하였다. 보는 바와 같이 단위길이당( $\Delta x$ ) 블록 접촉면에서 발생하는 응력( $\sigma$ )에 의한 힘( $F_\sigma$ )과 접촉면의 마찰로 인해  $F_f$ 란 힘을 만들고, 따라서 블록을 미는 힘( $F$ )는 다음 수식으로 표현된다.

$$F_\sigma = \sigma \Delta x$$

$$F_f = \mu F_\sigma = \mu \sigma \Delta x$$

$$F = F_f \frac{x}{\Delta x} = \mu \sigma x \quad (4.3)$$

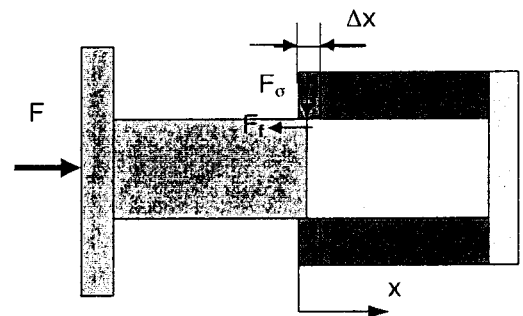
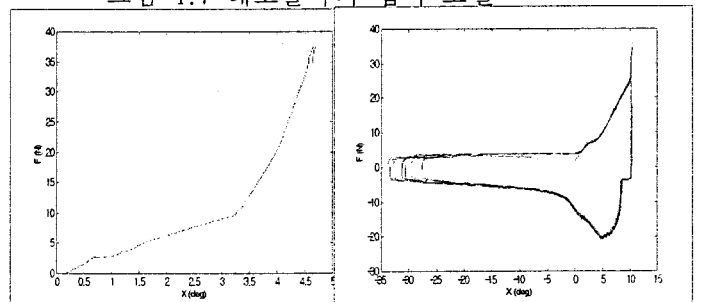


그림 4.7 레고블록의 햅틱 모델



(a) 실제 실험 (b) 구현 실험  
그림 4.8 레고블록의 실제 실험 및 구현 실험



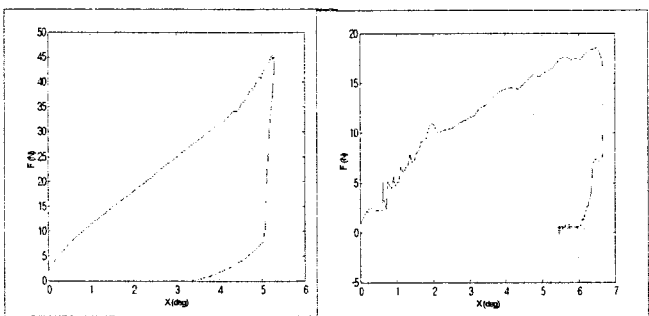
그림 4.8 에서 보는 바와 같이 측정된 실제 레고 블록의 프로파일과 햅틱 모델로 구현한 실험 결과를 비교해 볼 때, 상당히 유사하며 따라서 브레이크만으로 레고블록을 표현할 수 있음을 입증하였다.

### 4.3.2 스티로폼

스티로폼을 누르는 경우, 처음에는 댐퍼(B)를 누르는 것처럼 느껴지나, 어떤 위치( $x_r$ )에 이르러서는 계속 힘을 가해 누르게 되면 스프링(K)을 미는 느낌을 주게 된다. 스티로폼을 누르던 손을 떼게 되면 스티로폼은 누르기 전의 형태와는 달리 찌그러지거나 누른 자국이 생기는 영구 변형이 일어나게 된다. 만일 스티로폼을 햅틱 디바이스로 구현한다면, 스티로폼의 특성인 탄성변형과 소성변형을 모두 고려한 햅틱 모델을 만들어야 하며, 만일 모터만을 이용한 햅틱 디바이스로 스티로폼을 구현하기란 매우 어려운 일일 것이다. 본 연구에서는 모터/브레이크를 함께 이용하여 스티로폼을 구현하고자 한다. 스티로폼의 햅틱 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 F &= Bv, F < F_r \\
 F &= F_r + K(x - x_r), F > F_r
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

식에서  $F_r$  은 영구변형을 구현하기 위한 배경 댐핑력이다. 그림 4.9 에 나타낸 바와 같이 측정된 실제 스티로폼의 프로파일과 햅틱 모델로 구현한 실험 결과의 특성이 매우 일치함을 알 수 있다.



(a) 실제 실험 (b) 구현 실험  
그림 4.9 스티로폼의 실제 실험 및 구현 실험

### 4.4 휠체어용 2 자유도 수동형 햅틱 조이스틱

휠체어에 사용되는 햅틱 조이스틱은 휠체어 사용자에게 거부감이 없어야 할 뿐만 아니라, 장치를 사

용할 때 안전하다는 느낌을 주어야만 한다. 따라서 햅틱 조이스틱의 외형을 일반 전동 휠체어에 사용되는 조이스틱과 닮은 모양으로 디자인 하고, 휠체어나 로봇을 조종할 때, 외부의 환경에 대하여 환경의 임피던스가 아닌 접촉력 만을 피드백하게 하여 환경에 접촉했는지의 여부와 대상물에 대한 힘반향의 느낌을 재현하는 것으로 한정함으로써 안전성을 극대화시킬 수 있다. 따라서 능동형 구동기를 사용하지 않고, 수동형 구동기만으로도 이를 구현할 수 있다. 1 자유도 실험 장치에서 사용한 자기유변유체 브레이크는 전류조절을 쉽게 할 수 있는 장점이 있지만, 기성 제품으로서는 그 크기가 크고 무거운 약점이 있다. 따라서 본 연구에서는 펄스폭변조(PWM) 신호를 이용하여 전류제어 신호를 생성시킴으로써 자기 브레이크를 구동하게 할 수 있으므로, 소형 경량의 자기 브레이크를 수동형 구동기로 채택하였다.

2 자유도 운동을 만들어 내기 위해서 기구부는 카던 관절 기구를 사용하였고, 위치 신호 검출을 위해 포텐시옴터(potentiometer)를 사용하였다.

그림 4.10 에 설계 제작된 2 자유도 수동형 조이스틱과 상대적인 비교를 위해 자기유변유체 브레이크와 자기 브레이크를 나타내었다.

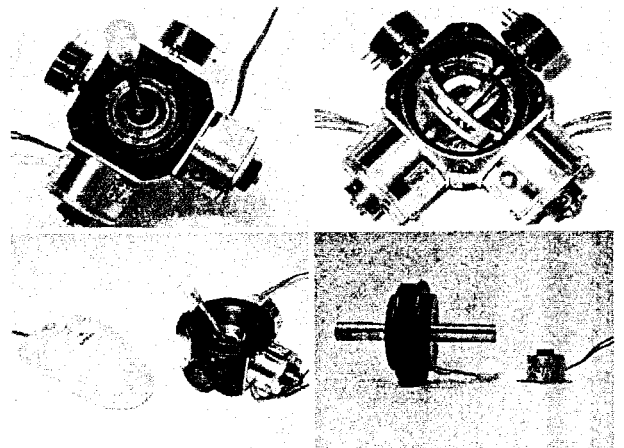


그림 4.10 2 자유도 수동형 햅틱 조이스틱

그림에서 보는 바와 같이 휠체어용 2 자유도 수동형 조이스틱의 작업공간은 핸들 중심 위치로부터 전방향(omnidirectional)으로  $\pm 35\text{deg}$  이며 전체무게는 약 540g 정도이고 핸들 높이까지 고려한 전체크기는 80X80X95mm 정도이다. 장착된 포텐시옴터의 회전 허용각은 60deg 이며, 핸들 끝에서 가할 수 있는 최대 힘이 15N 이 되도록 설계하였다.

#### 4.5 결론 및 고찰

모터/브레이크를 함께 이용한 하이브리드 구동기의 햅틱 디바이스에의 적용 가능성을 입증하고자 1 자유도 힘반향 조이스틱을 햅틱 기구의 요구 조건에 맞게 설계하고 이에 하이브리드 구동기를 장착하여 다양한 가상환경을 구현할 수 있도록 하였다. 일반적인 햅틱 성능을 평가하기 위해 가상 벽, 유체, 버튼, 및 스틱-슬립 모델을 실험으로 구현하였으며 또한 실제적인 대상물인 레고블록과 스티로폼에 대하여 실제의 힘-위치 프로파일을 측정하고, 이를 기반으로 햅틱 모델을 만들어 구현하였다. 본 연구에서는 대상물에 대한 시각 정보를 배제하고 순수한 햅틱 관점에 실험을 수행함으로써 모터/브레이크 하이브리드 구동기의 햅틱 성능을 표현하고자 하였다. 또한 사용자의 안전성과 친근감을 고려하여 소형 경량의 휠체어용 2 자유도 수동형 햅틱 조이스틱을 설계 제작하였다.

#### 5. 5. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 척추 장애인의 장애 정도에 따라 머리, 어깨, 손의 움직임을 측정하는 다양한 형태의 햅틱 장치를 개발하였다. 머리의 움직임을 측정하는 햅틱 장치는 FSR 을 이용하여 간단하고 저렴한 비용으로 어깨의 2 자유도 움직임을 측정할 수 있다. 어깨의 움직임을 측정하는 의복 형태 조종기는 센서의 제설계를 통하여 보다 강건한 구조로 개선되었고 극좌표계를 이용하는 교정 및 사상 함수의 사용으로 정확도의 개선과 계산량을 줄이는 효과를 얻을 수 있었다. 자기유변유체 브레이크와 같은 수동형(passive) 햅틱 장치는 기본 기술 연구를 통하여 가상의 물체를 표현하는 제어 기법을 개발하였고 휠체어 조종기로 사용할 수 있는 소형의 2 자유도 힘반향 조이스틱을 개발하였다. 향후 연구할 사항으로, 개발된 시스템들을 실제 장애인에게 적용하여 개선점들을 모색하고 각각의 시스템들을 독립적으로 사용할 수 있는 독립 제어기를 개발하며 로봇팔 및 휠체어 시스템과 원활한 협동 작업을 수행할 수 있는 제어 구조를 구축하는 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

[2.1] 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  
 [2.2] Jaffe DL. 'Ultrasonic head controlled wheelchair/interfaced case study in development and technology transfer.' Proc RESNA 13th Ann Conf, Washington, DC, 1990.  
 [2.3] 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  
 [2.4] Hertzberg, H.T.E., "World diversity in human body size and its meaning in American aid programs" OAR Research Review, 1968b, 7, No.12  
 [2.5] Woodson, W.E., Conover, D.W. "Human engineering guide for equipment designers(2nd)  
 [2.6] FSR film sensor datasheet(1998) [online]. Available: <http://www.techstorm.co.kr>  
 [3.1] Kyoobin Lee, Dong-Soo Kwon, "Sensors and Actuators of Wearable Haptic Master Device for the Disabled" Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS), pp.371-376  
 [3.2] Kyoobin Lee, Dong-Soo Kwon, "Wearable Master Device Using Optical Fiber Curvature Sensors for the Disabled" Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Seoul, May 21-26 vol.1 pp.892-896  
 [3.3] Kyoobin Lee, Dong-Soo Kwon, "Wearable Master Device for Spinal Injured Persons as a Control Device of Motorized Wheelchairs" Journal of Artificial Life and robot, Vol.4 No.4, pp. 182-187, 2001  
 [4.1] J. An and D.S. Kwon, "Modeling of a Magnetorheological Fluid(MRF) Actuator using a Magnetic Hysteresis-based Model" Proc. of 14th Korean Automatic and Control Conference, Yongin, Korea, Vol. C, pp.219-222, 1997  
 [4.2] J.E. Colgate, P.E. Grafing, M.C. Stanley and G. Schenkel, "Implementation of Stiff Virtual Walls in Force-Reflecting Interfaces" IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, Seattle, WA, pp.202-207, 1993  
 [4.3] X. Hu, "On Control of Servo Systems Affected by Friction Forces" IEEE Proc. of 33rd Conference on Decision and Control, Lake Buena Vista, FL, pp.472-473, Dec. 1994  
 [4.4] H.R. Jex, "Four Critical Tests for Control-Feel Simulators" 23rd Annual Conference on Manual Control, Cambridge, Massachusetts, 1988  
 [4.5] D.A. Lawrence and J.D. Chapel, "Performance Trade-Offs for Hand Controller Design" Proc. of the 1994 IEEE Conference on Robotics and Automation, San Diego, CA, pp. 3211-3216, 1988

- [4.6] T.H. Massie, Design of a Three Degree of Freedom Force-Reflecting Haptic Interface, SB Thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, M.I.T., May 1993
- [4.7] S. Munir, L. Tognetti and W.J. Book, "Experimental Evaluation of a New Braking System for Use in Passive Haptic Displays" Proc. of the American Control Conference, San Diego, California. pp. 4456-4460, Jun. 1999
- [4.8] L.B. Rosenberg and B.D. Adelstein, "Perceptual Decomposition of Virtual Haptic Surfaces" IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, San Jose, CA, pp.46-53, 1993
- [4.9] M. Russo and A. Tadros, "Controlling Dissipative Magnetic Particle Brakes in Force Reflective Devices" ASME Winter Annual Meeting, Anaheim, California. pp. 63-70, 1992

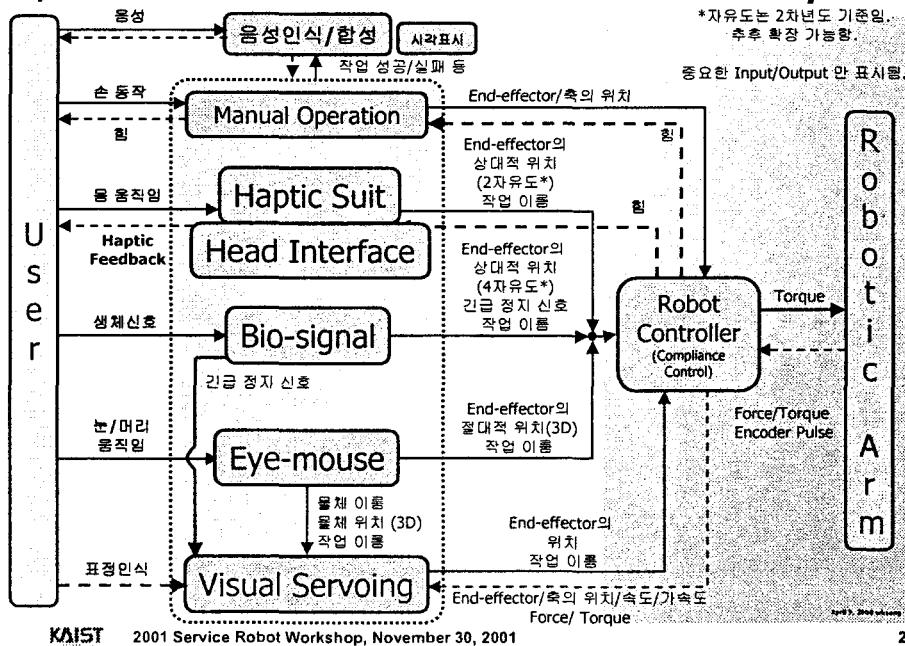
# Intelligent Human-Robot Interaction Technologies for Rehabilitation Robots: Haptic Masters with Various Body Motion

권동수, 안진웅, 이규빈, 민재웅, 임수철

KAIST

2001 Service Robot Workshop, November 30, 2001

## I/O Relation of Wheelchair-based Robotic Arm System



연구 동기

## Body Motion을 이용한 원격 제어

- 수족이 불편한 장애인이나 노약자가 로봇팔이나 휠체어를 원격 제어를 할 수 있도록 함
- C4 척추 손상자의 경우 목이나 어깨의 움직임을 측정하여 제어 신호로 사용할 수 있음
- 장애인의 장애 정도에 따라 머리, 어깨, 손의 움직임을 선택할 수 있도록 다양한 인터페이스를 제작



머리 움직임 측정용 센서

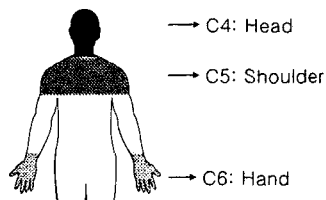


어깨 움직임 측정용 의복 센서



장애인을 위한 방향 조이스틱

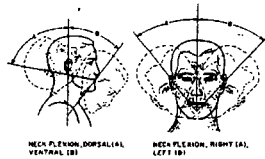
## Contents



1. 머리 움직임을 이용한 사용자 인터페이스
2. 어깨 움직임을 이용한 햅틱 장치
3. 손의 움직임을 이용한 햅틱 장치

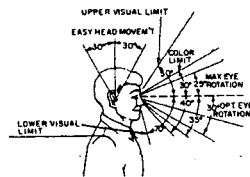
# Analysis of Head movement

## Range of movement at the Neck joint



Ventral flexion	60	12
Dorsal flexion	61	27
Right-left flexion	41	7

## Visual field with the eye motionless

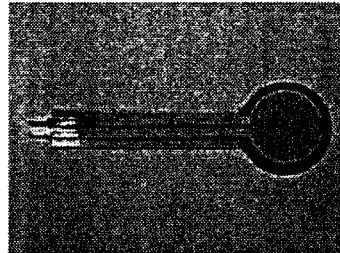
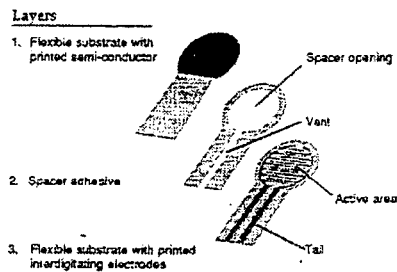


# 교시신호 발생영역

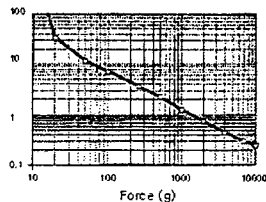
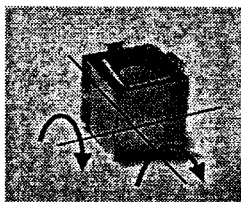
- Assume: 전방 3m 의 장애물의 시야확보
- 좌우 flexion-전방시야 확보와 무관
  - 최대가 41deg (표준편차 7deg) 이므로 35deg이상 일 때 교시 신호 발생
- 상하 flexion-지면에서 눈까지 평균 높이 135cm
  - 3m전방주시각=  $\theta = -\tan^{-1}(1.35/3) = -24.2^\circ$
  - Visual limit=50deg ~ -70deg 이므로 확보가능
  - Maximum movement 인  $\pm 30^\circ$  일때 교시신호가 발생 하도록 함

## FSR (Force Sensing Register)

- FSR is a polymer film device, which exhibits a decrease in resistance in the force applied to the active surface.



## Development of FSR Proto Type



$$V = \frac{Rm V_{cc}}{Rm + R}$$

$$R = \frac{6309.573447}{F^{1.8}}$$

$$F = W \cos(\theta) + F_0$$

$$Rm = 10000$$

$$W = 1$$

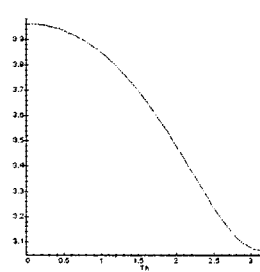
$$F_0 = 2$$

$$V_{cc} = 5$$

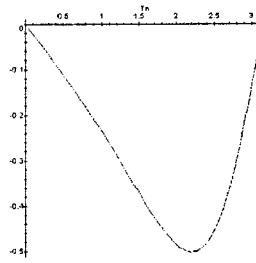
$$V = \frac{50000}{10000 + \frac{6309.573447}{(\cos(\theta) + 2)^{1.8}}}$$

$$S = -2.523829379 \cdot 10^9 \frac{\sin(\theta)}{\left(10000 + \frac{6309.573447}{(\cos(\theta) + 2)^{1.8}}\right)^2 (\cos(\theta) + 2)^{1.8}} \quad (\text{sensitivity})$$

## Development of FSR Proto Type



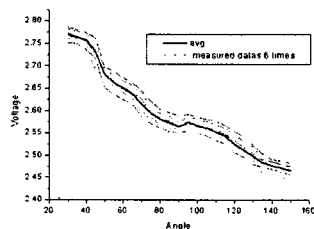
Angle-Voltage curve



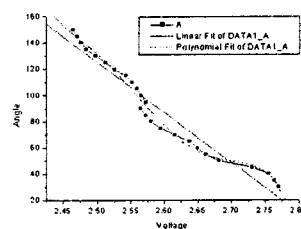
Angle-Sensitivity

- 90도 전후로 해서 Voltage변화와 sensitivity변화가 우수하다.
- 2자유도의 angle을 독립적으로 detect할 수 있다.
- Proportional control 이 가능하다.

## Experiment



각도(deg)-전압(V)의 실험 데이터



Linearization of experiment data

- By curve-fitting
  - $\text{Angle(deg)} = 1083 - 383 * \text{Voltage(V)}$
  - 표준편차는 8.88 deg
- 20% 오차범위 내에서 선형성을 보장하는 결과이므로 정밀제어가 아닌 교시작업에는 충분히 사용할 수 있는 가능성이 있다.

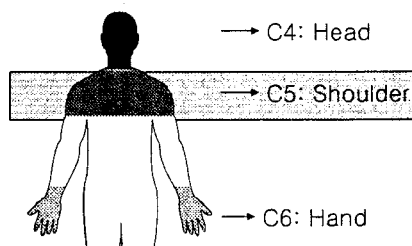


## Demonstration of FSR Sensor

GT21

FSR Angle Sensor  
Prototype

## Contents



- 1. 머리 움직임을 이용한 사용자 인터페이스
- 2. 어깨 움직임을 이용한 햅틱 장치
- 3. 손의 움직임을 이용한 햅틱 장치

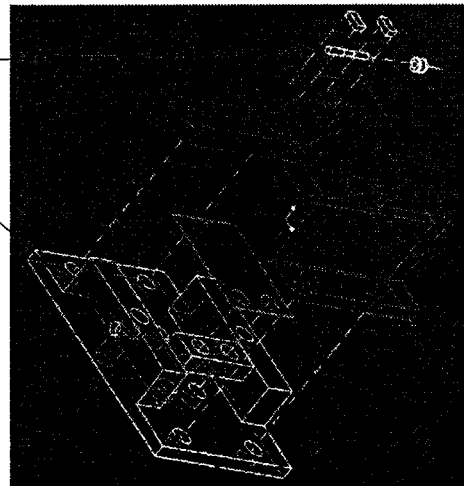
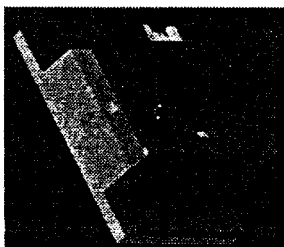
## 개선된 2차 시작품의 개념 설계

- 허리띠 고정 → Repeatability 증가
- Sensor
  - String 형태의 길이 측정 센서
  - 허리띠에 센서 회로부 장착
- 어깨 부분은 고정을 위한 의복 필요
- 안감과 걸감을 입혀 최종 의복 완성

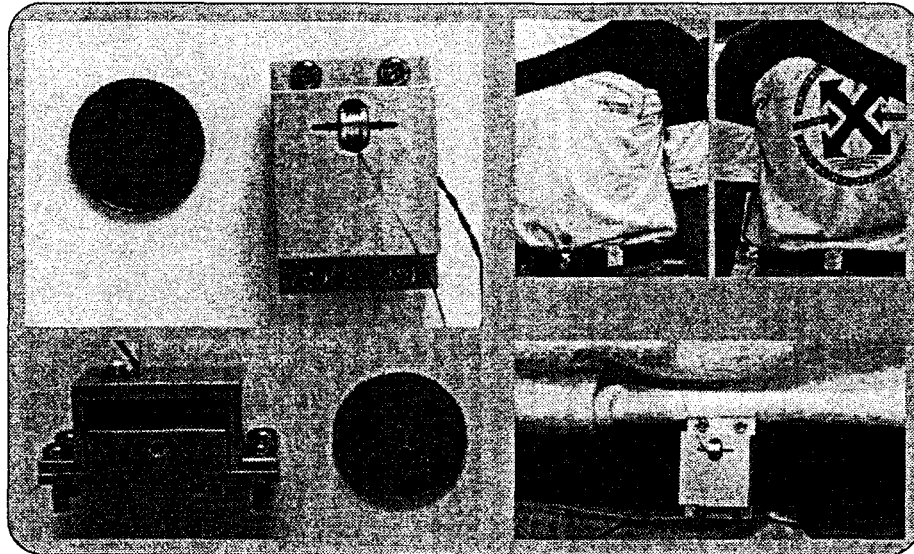


## New String Sensor

- Wire의 마찰을 줄이기 위한 설계
- 전선 고정을 위한 설계



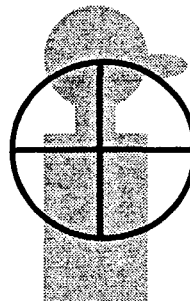
## New String Sensor Module



## New Approach of Calibration and Mapping Function

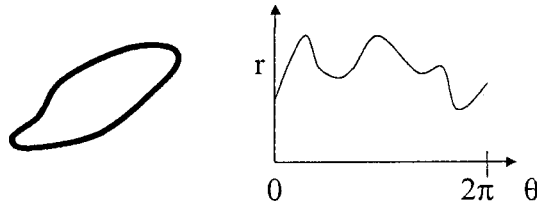
- 사람의 어깨로 만들 수 있는 **calibration reference** 중에서 가장 믿을 만 한 움직임을 다음과 같이 정의하고 이 움직임에 해당하는 모든 점을 **calibration**에 이용

- 원 운동
- 상하 운동
- 앞뒤 운동

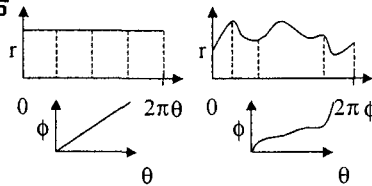


## Representation of the Boundary Circles with Polar Coordinates

- 극좌표로 나타낸 교정 정보



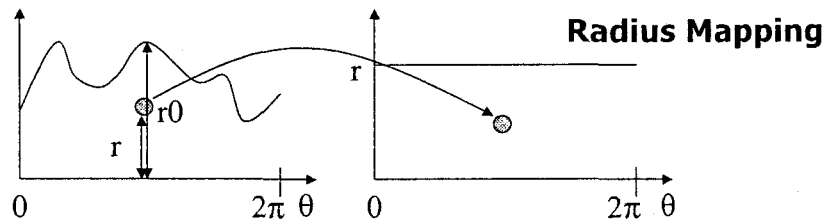
- 상하전후의 움직임으로부터 각도영역의 왜곡 정보를 얻음



## Mapping Procedure

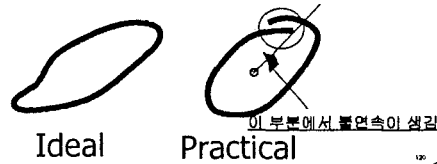
$$\begin{bmatrix} \phi_1^5 & \phi_1^4 & \phi_1^3 & \phi_1^2 & \phi_1^1 & 1 \\ \phi_2^5 & \phi_2^4 & \phi_2^3 & \phi_2^2 & \phi_2^1 & 1 \\ \phi_3^5 & \phi_3^4 & \phi_3^3 & \phi_3^2 & \phi_3^1 & 1 \\ \phi_4^5 & \phi_4^4 & \phi_4^3 & \phi_4^2 & \phi_4^1 & 1 \\ \phi_5^5 & \phi_5^4 & \phi_5^3 & \phi_5^2 & \phi_5^1 & 1 \\ 5(\phi_1^4 - \phi_5^4) & 4(\phi_1^3 - \phi_5^3) & 3(\phi_1^2 - \phi_5^2) & 2(\phi_1^1 - \phi_5^1) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Angle Mapping}$$

$$a\phi^5 + b\phi^4 + c\phi^3 + d\phi^2 + e\phi + f = \theta$$



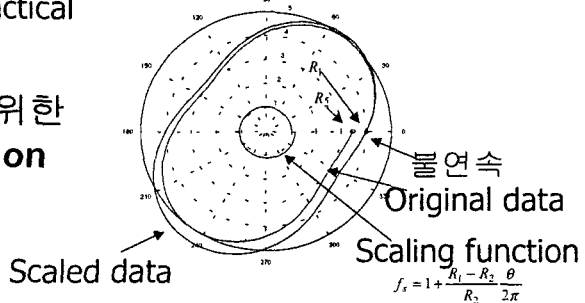
## 시작각-끝각의 불연속의 해결 방법

- 실제로 Calibration시, 사람은 시작과 끝점을 정확히 일치시킬 수 없음



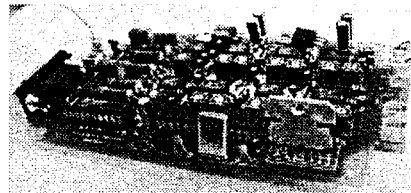
- 불연속 해결을 위한 Scaling Function

$$f_s = 1 + \frac{R_1 - R_2}{R_2} \frac{\theta}{2\pi}$$

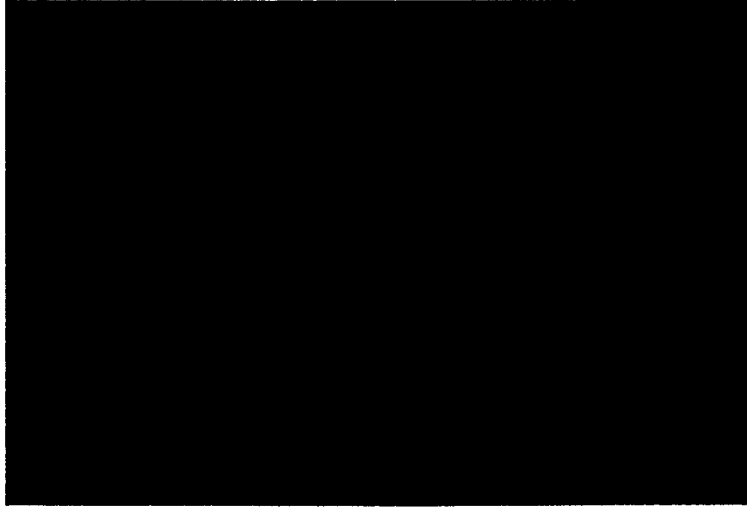


## Haptic Suit 독립 제어기 제작

- 9V 독립 전원 사용
- 10bit Analogue-Digital Converter
- Microcontroller 내장으로 독립 제어 가능
- RS232으로 PC와 통신
- 센서 신호 300배 증폭 및 노이즈 제거 회로
- Vibrotactile Actuator 구동 회로 2개
- 휠체어 제어 회로



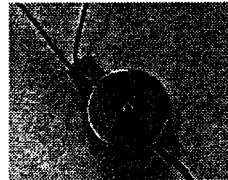
## Demonstration of Haptic suit



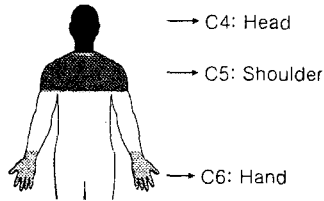
## Vibrotactile Actuator를 이용한 햅틱 피드백

GT21

Usage of  
Vibrotactile Actuators



# Contents



- 1. 머리 움직임을 이용한 사용자 인터페이스
- 2. 어깨 움직임을 이용한 햅틱 장치
- 3. 손의 움직임을 이용한 햅틱 장치

## 3. Manual interface

# Passive Actuator 제어 기법의 기본 기술 연구

가상 벽

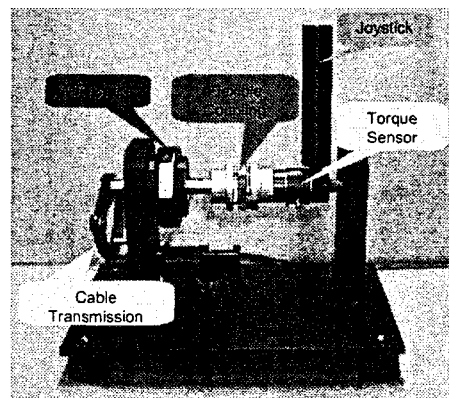
유체

버튼

스틱-슬립

레고 블록

스티로폼

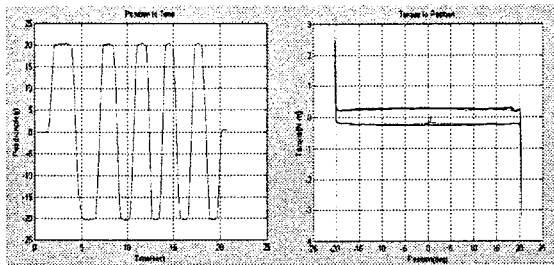


기본 기술 연구용 실험 장치

# 1자유도 햅틱 조이스틱의 햅틱실험

- 가상 벽
- 유체
- 버튼
- 스틱-슬립
- 레고 블록
- 스티로폼

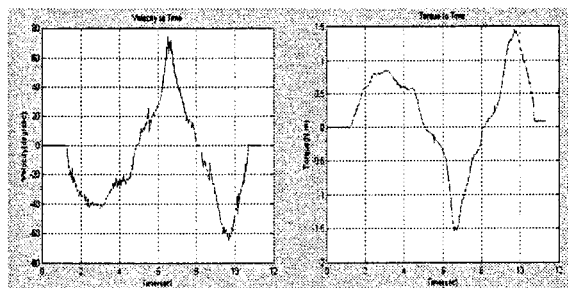
- 브레이크를 사용한 햅틱 device
  - 벽위치에서 딱딱한 벽 느끼게 함



# 1자유도 햅틱 조이스틱의 햅틱실험

- 가상 벽
- 유체
- 버튼
- 스틱-슬립
- 레고 블록
- 스티로폼

- 댐핑 0.2N.m/deg/s 로 구현
- 전류에 따른 토크 변화로 인해 모터보다 안정되게 나타남





# 1자유도 햅틱 조이스틱의 햅틱실험

가상 벽

유체

버튼

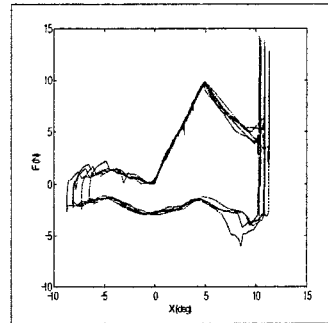
스틱-슬립

레고 블록

스티로폼

- 방문 잠그기 위한 손잡이 꼭지 버튼 구현

$$F = Kx(1 - u_m) + F_r u_m + F_b u_n$$



# 1자유도 햅틱 조이스틱의 햅틱실험

가상 벽

유체

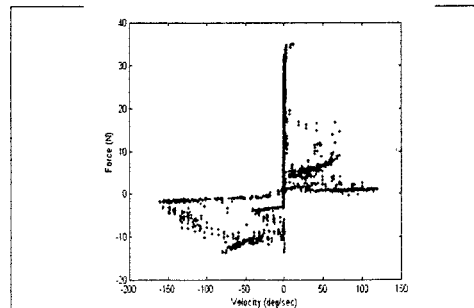
버튼

스틱-슬립

레고 블록

스티로폼

- 냉장고 문 위에서 고무자석 미끄러지는 힘 구현
  - 모터만으로는 구현 힘들
  - 쿨롱 마찰 특성 가진 브레이크로 가능



# 1자유도 햅틱 조이스틱의 햅틱실험

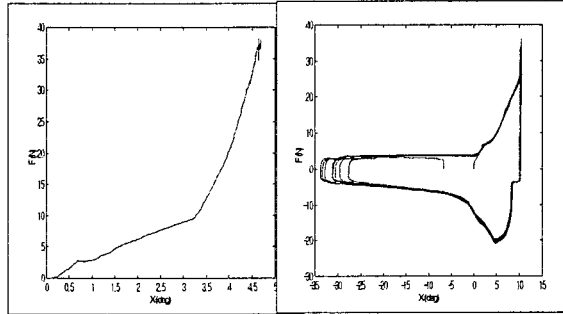
- 가상 벽
- 유체
- 버튼
- 스틱-슬립
- 레고 블록**
- 스티로폼

■ 레고 블록을 끼우는 작업 구현

$$F_{\sigma} = \sigma \Delta x$$

$$F_f = \mu F_{\sigma} = \mu \sigma \Delta x$$

$$F = F_f \frac{x}{\Delta x} = \mu \sigma x$$



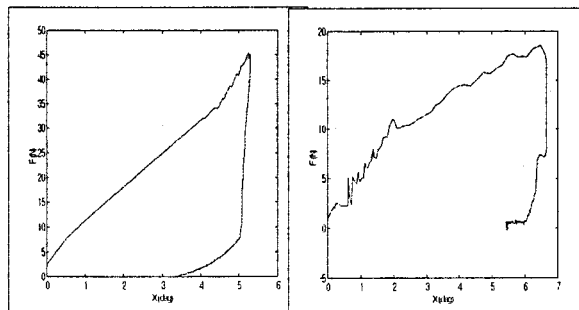
# 1자유도 햅틱 조이스틱의 햅틱실험

- 가상 벽
- 유체
- 버튼
- 스틱-슬립
- 레고 블록
- 스티로폼**

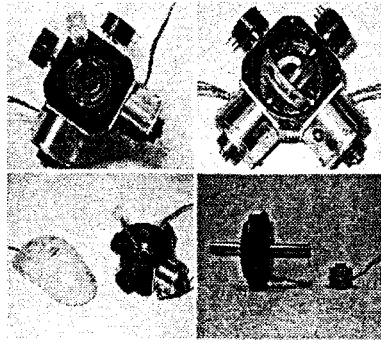
■ 스티로폼을 누르는 힘 구현

$$F = Bv, F < F_r$$

$$F = F_r + K(x - x_r), F > F_r$$



## 휠체어용 2자유도 수동형 햅틱 조이스틱



- Spec
  - 크기 : 80×80×95 mm
  - 작업공간 : 전방향 ±35deg
  - 최대 힘 : 15N
  - 무게 : 540g
  - Potentiometer 회전허용각 : 60deg
- 기구부
  - 카던 관절 기구 사용
  - 위치 신호 검출
    - Potentiometer
- 자기 브레이크 구동
  - Pwm 신호를 이용한 전류제어

## Summary

- 척추 장애인의 장애 정도에 따른 다양한 인터페이스의 연구
  - 머리의 움직임
    - FSR을 이용한 각도 측정 센서 제작 및 해석
  - 어깨의 움직임
    - 의복 형태 조종기 2차 시제품 제작 완료
    - 휠체어 조종 실험 완료
  - 손의 움직임
    - Passive Actuator의 제어 기법 연구
    - 2자유도 초소형 힘반향 조이스틱 제작



# 척수 장애인의 HCI를 위한 시선방향 추적 시스템

정 명진\*, 김 재현, 이 영진, 유 동현, 이 방래

한국과학기술원 전기 및 전자공학과 로봇연구실

## 요약

본 논문은 eye-mouse 시스템의 개발과정을 발표했던 논문[1]의 실험결과를 기반으로 하여 이 연구에 대한 수정 및 보완 내용을 다루고 있다. eye-mouse 시스템은 손과 발을 자신의 의지대로 움직이기 어려운 장애인들이 손, 발의 사용 없이 전동 휠체어나 로봇 팔과 같은 보조 장치를 사용할 수 있도록 하는 시스템이다.

본 연구에서는 장애인의 의도 파악을 위해 장애인의 시선의 방향을 이용하고자 하며 시선방향을 검출하기 위해 장애인이 장착하는 시스템과 장착하지 않고도 쓸 수 있는 시스템을 개발하려 한다. 시선의 방향을 검출하기 위해서는 장착형의 경우, 눈동자의 움직임과 머리의 위치와 방향을 측정하는 기술이 필요하다. 이전의 실험에서는 눈동자의 움직임을 찾기 위해 눈동자의 이미지만을 이용했으나 정밀도의 문제를 극복하기 위해 본 연구에서는 적외선 소자를 이용한다. 그리고 비장착형 시스템에서도 적외선 소자를 이용하여 시선의 방향을 얻는 방법을 제시한다. 그리고 검출된 시선의 방향을 통해 마우스 입력 장치를 구동하여 보조 장치들을 구동 시키는 것을 목표로 한다.

## 1. 서론

손이나 발이 불편한 장애인들을 위해 손을 대신해 줄 수 있는 로봇 팔이나 발을 대신해 줄 수 있는 전동 휠체어 등을 보다 쉽고 편하게 이용하기 위한 기술들이 개발되고 있다. 여기에는 안전하고 인간 친화적인 로봇 팔의 개발과 간단한 조작만으로 장애자가 원하는 작업을 쉽게 수행할 수 있도록 하는 지능적인 제어 기법에 관한 연구가 많이 이루어지고 있으며 전동 휠체어에도 이동 로봇의 기술을 접목시키려는 시도가 나타나고 있다.

척추나 경추 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 장애인의 시선의 움직임을 외부에서 판단하여 전달하고자 하는 내용을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 장애인의 의도 파악을 위해 장애인의 시선의 방향을 검출하는 eye-mouse 시스템의 개발을 다룬다.

본 논문은 eye-mouse 시스템의 개발과정을 발표했던 논문[1]의 실험결과를 기반으로 하여 이 연구에서 발견됐던 문제점과 정밀도의 한계를 파악하여 방법의 수정 및 보완 내용을 다루고 있다. eye-mouse 시스템은 손과 발을 자신의 의지대로 움직이기 어려운 장애인들이 손, 발의 사용 없이 전동 휠체어나 로봇 팔과 같은 보조 장치를 사용할 수 있도록 하는 시스템이다. 시선의 방향을 검출하기 위해서는 장착형의 경우, 눈동자의 움직임과 머리의 위치와 방향을 측정하는 기술이 필요하다. 이전의 실험에서는 눈동자의 움직임을 찾기 위해 눈동자의 이미지만을 이용했으나 정밀도의 문제를 극복하기 위해 본 연구에서는 적외선 LED를 이용한다. 그리고 비장착형 시스템에서도 적외선 LED를 이용하여 시선의 방향을 얻는 방법을 제시한다. 그리고 검출된 시선의 방향을 통해 마우스 입력 장치를 구동하여 보조 장치들을 구동 시키는 것을 목표로 한다.

또한 작업 대상에 대한 위치 정보를 추출하여 eye-mouse 시스템과 서비스 로봇의 작업 수행 능력을 향상시켜 주는 스테레오 카메라 시스템의 개발에 있어서 대응점 추출의 강인성을 확보하는 방법을 제시한다.

## 2. 전체 시스템의 구성

전체 시스템은 2개의 모듈로 구성되어 있다[그림 1]. 눈동자와 머리의 움직임을 측정하여 그 정보로 화면상의 마우스를 움직이는 eye-mouse 시스템과 작업 대상 물체에 대한 3차원 정보를 추출하여 작업의 효율을 증가시키고자 하는 3차원 정보 추출 시스템으로 구성되어 있다.

전동 휠체어에는 작업 환경을 모니터링할 수 있는 스테레오 카메라 시스템과 작업 환경을 관찰하고 작업 명령을 내릴 수 있는 스크린상의 인터페이스가 있다. 조작자는 손으로 마우스를 조작하듯이 eye-mouse 시스템을 이용하여 눈동자의 움직임과 머리의 움직임으로 마우스를 움직여서

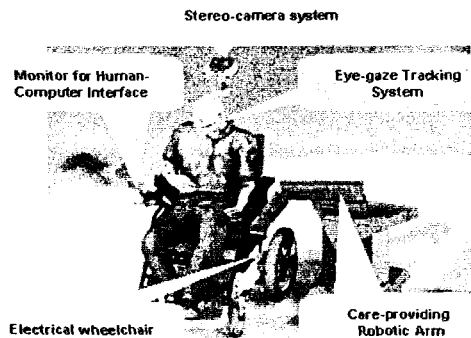


그림 1. 전체 시스템의 구성

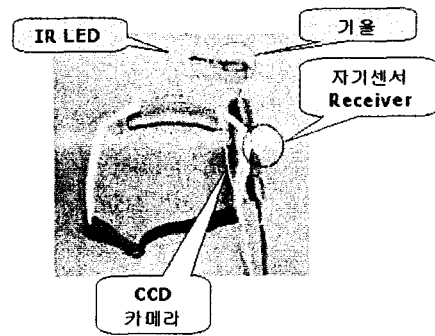


그림 2. 장착형 eye-mouse 시스템

화면상의 원하는 작업 메뉴를 선택하게 된다. 교시된 작업 명령은 원격 이동로봇에 전달되고 그 위에 부착된 로봇 팔을 이용하여 필요한 작업 전체를 자율적으로 수행시키거나 혹은 여러 차례의 작업 명령을 통해 단계적으로 작업을 수행하도록 한다.

### 3. 장착형 눈 응시방향 추적 시스템

이전의 연구는 홍채의 경계를 이미지 처리만으로 찾아 내었다. 그러나 이 방법은 정밀도에서의 문제가 발견되어 적외선 LED 를 이용하여 동공의 중심을 찾는 것으로 수정하였다. 적외선 LED 를 CCD 카메라의 광축과 어긋나게 조사하면 동공 부분이 눈동자 중에서 더욱 어둡게 되는 현상이 발생한다. 이 영상을 CCD 카메라를 이용하여 연속적으로 받아들여서 동공의 중심을 찾아낸다. 또 자기센서를 이용하여 머리의 움직임을 알아낸다. 두 가지 정보를 이용하면 눈의 응시방향을 알아낼 수 있다. 이 연구에서는 동공을 추출하는 방법을 제안하였다. 제작한 장착형 eye-mouse 시스템은 그림 2 와 같다.

#### 3.1 동공 추출 방법

눈의 영상을 이용한 동공 추출 방법은 아래와 같은 순서를 거친다.

- (1) 눈의 영상 중에서 수직 방향으로 탐색 영역을 설정한다.
- (2) (1)에서 얻은 수직 방향의 탐색 영역 내에서 수평 방향의 탐색 영역을 설정한다.
- (3) 탐색 영역 내에서 동공영역을 찾아낸다
- (4) (3)에서 얻은 동공 영역을 확장해서 정확한 동공 영역을 얻는다

#### 3.2 수직방향 탐색 영역 설정

영상의 처리 속도를 높이기 위해서는 탐색 영역을 줄이는 것이 중요하다. 수직 방향의 탐색 영역 설정은 눈동자의 영상 값이 입력 영상 중에서 가장 어둡다는 사실을 이용한다. 눈동자 중에서 홍채가 동공을 포함하고 있으므로 먼저 홍채 부분을 찾아서 수직 방향의 탐색 영역을 결정한다 외부 조명에 강인하기 위해서 자동으로 Threshold 값을 찾아주는 P-Tile Thresholding 기법과 Component Labeling 기법을 이용하여 홍채 부분을 얻어낸다.

#### Double P-Tile Thresholding 방법

동공을 포함하는 홍채 부분을 찾아내기 위해서는 변형된 P-Tile Thresholding 기법을 이용한다. P-Tile 기법은 입력 영상에서 관심을 갖고 있는 대상의 크기 정보와 밝기 정보를 알고 있을 때 적용하는 기법이다. 입력 영상에서 동공의 밝기 값은 가장 어두운 부분에 해당되고 그 크기도 알고 있는 값이다. 따라서 밝기 값이 가장 낮은 부분부터 찾아내어 전체 영상 크기의 P1 퍼센트에 해당하는 밝기 값에서 Thresholding 을 하면 그 부분이 동공 부분을 나타낸다. 처음 Thresholding 한 밝기 값에서부터 다시 영상을 찾아내어 전체 영상 크기의 P2 퍼센트에 해당하는 부분을 찾으면 그 부분이 홍채 부분에 해당된다.

#### Component Labeling 방법

Component Labeling 알고리즘은 4-connectivity 를 이용한 sequential connected component algorithm 이다. 그림 3 은 이 알고리즘을 간단하게 설명해 놓은 것이다. 알고리즘의 순서는 다음과 같다.

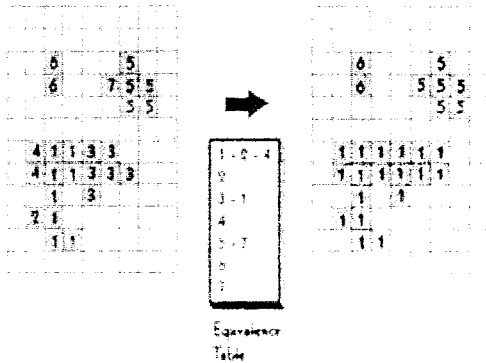


그림 3. Blob Coloring 알고리즘

- (1) 전체 영상의 픽셀을 왼쪽에서 오른쪽으로, 그리고 위에서 아래로 검색한다.
- (2) 현재 검색 대상인 픽셀이 255 이면 다음 중 하나의 과정을 거치게 된다.
  - ① 위나 왼쪽에 있는 픽셀 중에 하나에만 레이블 되어 있으면 그 레이블을 사용한다.
  - ② 위나 왼쪽에 있는 픽셀의 레이블이 같으면 그 레이블을 사용한다.
  - ③ 위와 왼쪽에 있는 픽셀의 레이블이 다르면 위에 있는 픽셀의 레이블을 쓰고 왼쪽의 레이블과 위의 레이블이 같음을 equivalence 테이블에 표기한다.
  - ④ 위의 3 가지 경우가 아니면 새로운 레이블을 쓰고 이것을 equivalence 테이블에 넣는다.
- (3) 레이블을 써야 할 픽셀이 더 있으면(2)로 간다.
- (4) Equivalence 테이블에서 같은 레이블인 것으로 표기된 레이블들(equivalent set)은 그 중에서 가장 작은 레이블을 찾는다.
- (5) 다시 한번 전체 이미지의 픽셀들을 조사하여 각각의 equivalent set 에서 가장 작은 레이블로 픽셀의 레이블을 바꾼다.

Component Labeling 을 한 다음에는 가장 큰 홍채와 동공의 Object 를 찾아내어 홍채의 Object 가 동공 Object 를 포함하도록 수직 방향의 탐색 영역을 결정한다. 그림 4 는 입력영상과 수직 방향의 탐색 영역을 나타내고 있다.

### 3.3 수평방향 탐색 영역 설정

수평 방향의 탐색 영역은 수직 방향 탐색 영역 내에서 설정한다. 눈의 흰자위 부분을 P-Tile

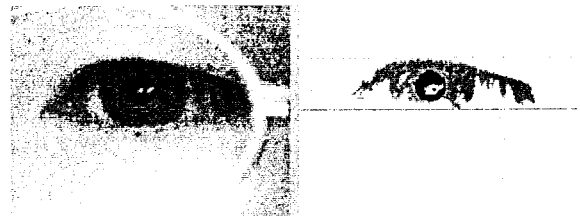


그림 4. 입력영상과 수직방향 탐색영역 설정

기법을 이용해서 찾아낸다. 눈의 영상에서 동공, 홍채, 흰자위 부분에 서로 다른 count 값을 할당해서 수평방향의 탐색 영역을 결정할 수 있다. 눈의 동공과 홍채, 흰자위를 구분한 영상에서 수평 방향으로  $x$  위치에 있는 모든 픽셀의 count 값을 합해서  $f(x)$  로 둔다.  $f(x)$  를 이용해서 수평방향의 탐색 영역의 중심을 구한다(식 (1)). 수직 탐색 영역 안에서 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 그 수식을 정리한 것이다. 그림 5 는 수평 방향의 탐색 영역이 설정된 것을 나타낸다.

$$f(x) = \sum_{y=bottom}^{top} count$$

$$count = \begin{cases} c_p & \text{if Pupil pixel} \\ c_i & \text{if Iris pixel} \\ c_w & \text{if white of Eye} \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad c_p > c_i > 0 > c_w$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n f(x_i)x_i}{\sum_{i=1}^n f(x_i)} \quad (x\text{-search region: } (\bar{x}-d) \sim (\bar{x}+d)) \quad (1)$$

### 3.4 탐색 영역 내에서의 동공 부분 추출

탐색 영역 내에서는 P-Tile 기법과 Component

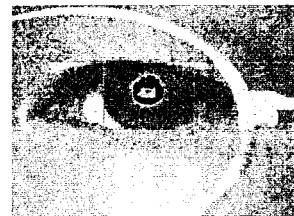


그림 5. 수평방향 탐색영역 설정

Labeling 기법을 이용해서 가장 크기가 큰 동공 Object 를 찾아낸다. 이 것의 중심을 찾아서 초기 동공의 중심 위치로 선택한다. 동공의 반지름도 계속해서 계산한다. 계산된 초기 동공 중심으로부터 거리가 동공의 반지름 보다 작은 영역을 살펴보고 이 영역 내에서 밝기 값이 현저히 큰 경우는 corneal Reflection 된 위치가 동공 영역과 겹친 경우이므로 동공부분으로 할당한다. 이렇게 하면 동공의 중심 위치가 약간 바뀌게 된다. 속눈썹이 긴 사람의 경우에는 속눈썹의 밝기 값이 동공과 흡사하므로 동공 영역과 구분하기가 어렵다. 따라서 새로이 찾은 동공 영역의 외부에 있는 부분을 무시하면 속눈썹의 영향은 사라진다.

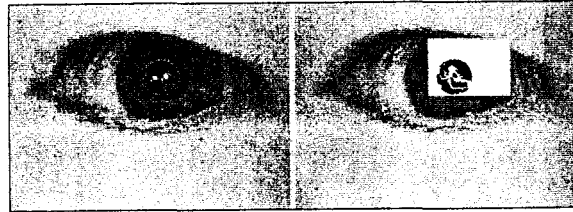


그림 6. 초기 동공 영역



그림 7. 찾아낸 최종 동공 영역

### 3.5 확장된 동공 영역을 이용한 동공의 중심 찾기

P-Tile 기법과 Component Labeling 기법을 이용해서 동공의 중심을 찾는 방법은 조명에 강인하게 Threshold 값을 찾아내는 방법이지만 동공의 영상이 일부 훼손된 경우가 많다. 이런 이유로 동공의 중심은 정확한 값이 아니다. 이 논문에서는 초기에 찾은 동공 영역을 확장해서 그 내부에서 입력 영상을 이용하여 동공의 중심을 찾는 방법을 제안한다. 사람의 속눈썹 중에서 눈의 아래에 있는 속눈썹은 그 방향이 위로 향하지 않아서 탐색 영역 안에 거의 나타나지 않는다. 사람에 따라 정도의 차이는 있지만 눈의 윗부분에 있는 속눈썹은 아래로 향하는 경우가 많다. 따라서 입력 영상의 탐색 영역 내에서 동공과 겹쳐져서 동공 영역을 찾을 때 오차의 원인이 된다. 입력 영상에서 확장된 동공 영역은 처음의 동공 중심 윗부분은 변하지 않고 아래 부분만 크기를 확장한 것이다. 확장된 동공 영역 내에서 새로이 동공의 중심을 찾는 방법은 아래와 같은 순서를 따른다.

- (1) 입력 영상을 밝기 값을 기준으로 여러 단계의 그룹으로 나눈다.
- (2) 각 그룹의 영상의 중심 위치를 찾는다.
- (3) 밝기 값이 낮은 그룹은 weight 값을 크게 주고 밝기 값이 큰 경우는 weight 값을 작게 준다.
- (4) 밝기 값이 낮은 그룹부터 시작해서 그룹 내의 픽셀 수를 더한다. 그 값이 동공 크기가 될 때까지 각 그룹의 중심위치와 weight 값을 곱해서 동공의 중심 위치를 찾는다.

동공의 중심 위치는 그 이전 값들과 mean filtering 해서 구한 값을 선택한다. 그림 6 과 그림 7 은 초기에 얻은 동공 영역과 확장된 동공

영역을 이용해서 다시 얻은 동공 영역을 나타낸다.

### 3.6 시선방향 검출

동공의 중심을 찾았으므로 이것을 통해 눈동자의 움직인 정보를 알아낼 수 있다. 눈동자의 움직임과 머리에 장착한 자기센서의 정보를 통합하여 시선 방향을 검출하는 방법은 [2]의 내용을 사용하였다. 구체적인 보정 과정과 시선 추출과정은 참고문헌을 참고하기 바란다.

### 3.7 실험 결과

실험은 Intel Pentium IV 1.4 GHz 프로세서를 탑재한 PC를 이용하였다. image grabber 는 320×240 크기의 영상을 초당 30 프레임의 속도로 받아들인다. 이러한 영상을 가지고 제안된 알고리즘을 구현하면 처리시간이 20~ 25 ms 정도 된다. 따라서 image grabber에서 받아들인 초당 30 프레임의 영상을 실시간으로 계속해서 처리할 수 있다. 장착형 eye-mouse 시스템을 이용한 시선방향추적 결과는 그림8과 같다. 이 실험결과와 오차는 표1과 같다. 이전 연구[1]에 비해 눈의 특징점을 정밀하게 추출하고 있으므로 더욱 정밀한 실험 결과를 얻었다.

## 4. 비 장착형 눈 응시방향 추적 시스템

장착형 눈 응시점 추정 시스템은 사용자의 머리에 부착하여야 하기 때문에 사용자에게 불편을 야기할 수 있다. 따라서 비장착형 시스템에 대한 개

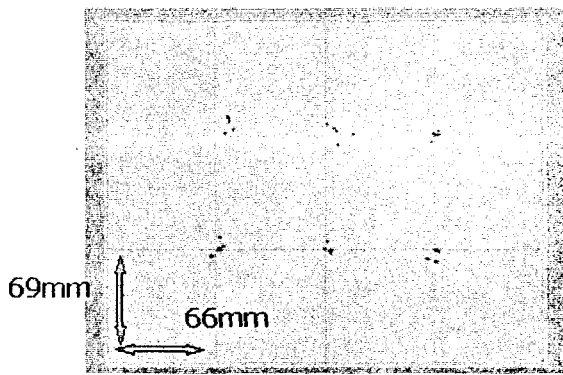


그림 8. 장착형 eye-mouse 시스템의 눈 응시방향 추적 결과 (모니터와의 거리 50cm)

표 1. 장착형 eye-mouse 시스템의 시선 방향 추출오차

오차 (mm)	최대	최소	평균	표준 편차
가로	17.7	-4.2	3.75	2.85
세로	7.5	-10.5	-0.75	4.56

발이 필요하다. 하지만 비장착형은 일반적으로 카메라와 같은 센서를 이용해서 원거리에서 눈의 움직임을 관찰하기 때문에 장착형에 비해 정밀도가 낮다. 우리가 개발하고자 하는 비장착형 눈 응시방향 추적 시스템의 대략적인 구성은 그림 9 와 같다. 눈동자의 이미지로부터 눈의 응시 방향을 추적하기 위해서 가능한 눈을 크게 입력 받을 필요가 있다. 화면상에서 눈동자의 움직임이 크게 관측되지 않기 때문에 분해능을 높이기 위해 가능한 눈을 크게 입력 받는다. 하지만 그러한 경우 고개가 조금만 움직여도 카메라의 가시영역에서 눈동자가 벗어나게 된다. 따라서 얼굴 전체를 관찰하는 카메라가 하나 더 필요하게 된다. 이 카메라는 얼굴을 관찰하면서 눈의 위치를 찾아서 눈 부분만을 바라보는 카메라에게 알려준다. 본 논문에서는 이러한 눈의 확대된 영상이 있을 때의 시선 방향을 얻는 방법에 대해 기술한다. 그러므로 눈의 위치를 찾아 확대된 영상을 얻는 연구가 차후에 이루어 질 것이다.

현재까지 제안된 방법 중에서는 적외선 LED 와 CCD 카메라를 이용한 방법이 비교적 좋은 성능을

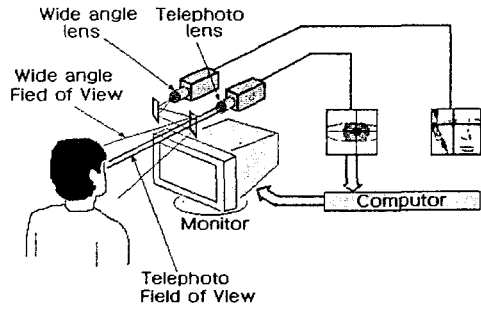


그림 9. 비장착형 눈 응시방향 추적 시스템 개념

보이고 있다. 이 방법은 처음 Mason[3]에 의해서 제안되었는데 한 개의 적외선 LED 를 이용하여 눈의 각막에서 적외선이 반사가 일어나도록 하고 이를 카메라로 관찰하면 카메라로부터 얻은 영상에는 적외선 LED 에 의한 밝은 점(glint)이 나타나는 현상을 이용한다. 입력 영상에서 이 각막 표면의 밝은 점과 동공의 중심 위치를 찾아내어 두 점의 상대적인 위치가 눈의 응시 방향에 따라 변하는 성질을 이용하여 응시 방향을 추정하였다. 이와 같은 방법은 영상에서 동공의 위치와 각막 반사의 위치의 정확도가 중요한데 동공의 경우 동공의 색이나 주변의 검은자위의 색과 유사하기 때문에 동공의 위치를 찾기 어렵다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 Hutchinson[4]은 적외선 LED 가 카메라의 광축에 가까이 있을 때 눈의 동공이 밝게 빛나는 현상 (Bright-eye)을 이용하여 동공을 더 정밀하게 찾아내는 방법을 제시하였다. Cleveland[5]는 동공의 중심과 각막 반사에 의한 밝은 점의 상대적인 위치와 눈의 응시 방향 사이의 관계를 수식적으로 정형화하고 캘리브레이션을 통해 수식의 계수를 구하였다. 하지만 이 방법에서는 눈의 응시 방향을 필요로 하게 되는데 거리를 구하기 어렵기 때문에 식을 근사화하여 사용하였다. 따라서 머리의 움직임이 큰 경우에는 오차가 커지는 단점이 있다. Sugioka 등[6]은 이러한 문제를 해결하기 위해서 초음파 센서를 이용해 카메라로부터 눈의 거리를 측정하고 응시 방향 추정에 이용하였다. 하지만 이러한 방법들의 문제는 눈의 기하학적인 형태와 카메라의 위치, 적외선 LED 의 위치 사이의 관계를 정확히 모델링하기 어렵다는 것이다.

본 논문의 전체 시스템은 한 개의 CCD카메라와 5개의 적외선 LED로 구성된다(그림10). CCD카메라는 모니터의 아래 부분에 장착되어 있고 4개의 적외선 LED는 컴퓨터 모니터의 각 모서리에



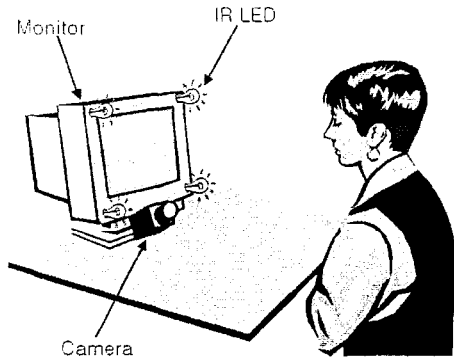


그림 10. 비장착형 눈 응시점 추정 시스템(모니터의 각 모서리에 부착된 네 개의 IR LED와 중심에 IR LED가 부착된 CCD 카메라)

설치되고 그림에는 나타나있지 않지만 나머지 한 개의 적외선 LED가 카메라의 렌즈 중심 부분에 위치하고 있다. 카메라의 중심에 위치한 적외선LED와 모니터 모서리의 적외선 LED를 독립적으로 구동하기 위해서 컴퓨터의 병렬포트를 통해 제어신호를 전달한다.

#### 4.1 응시점 추정 방법

본 논문의 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 바로 모니터의 스크린의 바라보고 있는 점(이하 응시점)을 직접 추정한다.

모니터의 각 모서리에 위치한 적외선 LED 들을 켜고 카메라에 부착된 적외선 LED 는 켜지 않을 때 눈의 각막에서 적외선이 반사되어 4 개의 밝게 빛나는 점(glint)으로 나타내게 된다(그림 11(a)). 이와 같은 반사를 각막 반사(corneal reflection)라고 한다. 적외선 LED 가 모니터의 각 모서리에 붙어있기 때문에 각막 반사에 의한 밝은 점들을 꼭지점으로 하는 사각형은 그림 12 처럼 모니터의 스크린이 투영된 사각형이라고 생각할 수 있다. 그러면 사용자가 모니터를 바라보고 있을 경우에 동공의 중심(그림 12의 P 점)은 이 사각형 안에서 움직이게 된다. 따라서 사각형 A'B'C'D'는 사각형 ABCD 가 투영된 것이라 할 때 P 점으로 투영되기 위한 P'의 좌표를 계산할 수 있고 이 점이 추정된 응시점이 된다.

##### 4.1.1 특징점 추출 방법

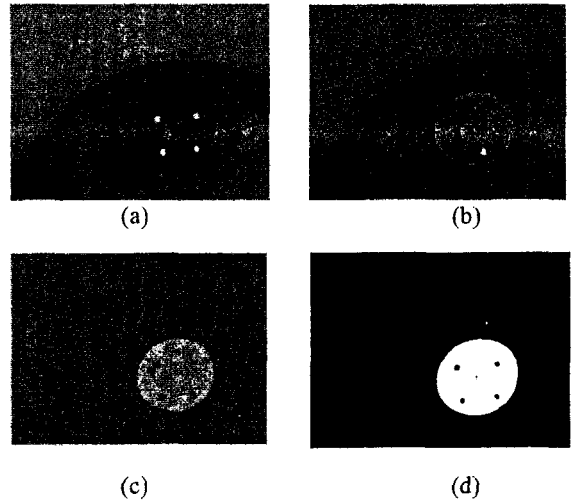


그림 11. (a) 각막 반사와 Dark-eye 현상 (b) 동공 반사와 Bright-eye 현상 (c) 차 영상 (d) 추출된 동공 영역과 중심 위치

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 임계값에 의한 영역 분할(segmentation)을 하고 각 영역의 중심을 찾아서 구할 수 있다. 반면 동공의 중심 위치는 동공의 색이 그 주변과 유사하기 때문에 분할하기 어렵다. 본 논문에서는 이 문제점을 해결하기 위해 Ebisawa[7]의 방법을 사용하였다. 카메라의 중심에 위치한 적외선 LED 를 켜고 모니터 모서리의 적외선 LED 들은 끈 상태에서 영상을 받아들이면 동공이 밝

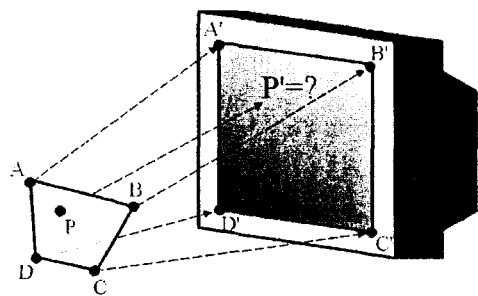


그림 12. IR LED(A', B', C', D')와 밝은 점(A, B, C, D) 사이의 관계. P 는 영상에서 동공의 중심 위치이고 P' 는 눈의 응시점이다.

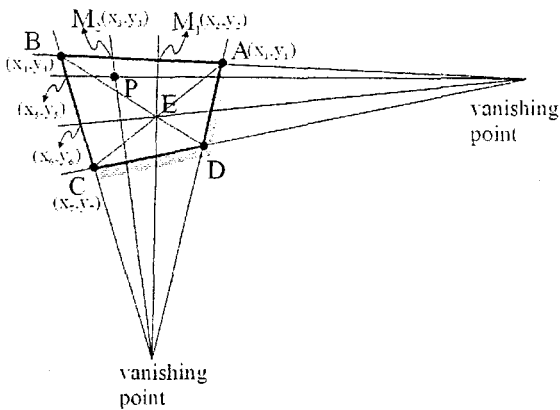


그림 13. 영상에서 cross ratio 의 계산. A, B, C, D 는 영상에서 나타나는 밝은 점들이고 P 는 동공의 중심 위치이다. E 는 두 대각선의 교차점이다.

계 빛나는 그림 11(b)와 같은 영상(Bright eye)을 얻게 된다. 그리고 카메라의 중심에 위치한 적외선 LED 는 끄고 모니터 모서리의 적외선 LED 들을 모두 켜면 각막 반사가 일어나면서 이번에는 동공이 오히려 어둡게 나타나는 현상(Dark eye)을 볼 수 있다(그림 11(a)). 따라서 짧은 순간에 모니터 모서리의 적외선 LED 와 카메라 중심의 적외선 LED 를 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 11(c)). 그러므로 임계값에 의한 영역분할을 한 후 영역의 중심을 구하여 동공의 중심 위치를 찾는다(그림 11(d)).

#### 4.1.2 Cross ratio를 이용한 응시점 추정

그림 13 과 같이 각막에 나타나는 밝은 점들을 꼭지점으로 하는 사각형(ABCD)과 모니터의 스크린에 해당하는 직사각형 (A'B'C'D')이 있을 때 동공의 중심 위치(P)에 해당하는 모니터 스크린 상의 점(P')을 추정하기 위해서 cross ratio 를 사용한다. 그림에서 점 E 는 사각형의 두 대각선의 교점이고 점 P 는 동공의 중심 위치이다. 그리고  $(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, \dots, 7$ )는 영상에서의 좌표이다.

$(\hat{x}, \hat{y})$  을 추정된 응시점의 스크린 상의 좌표라고 할 때 x 좌표값은 다음과 같이 구한다. 먼저 직선  $\overline{AB}$  와 직선  $\overline{BC}$  를 이용해서 소실점을 구하고 두 점  $M_1, M_2$  의 좌표를 구한다.  $M_1$  은 소실점과 E 점을 잇는 직선이  $\overline{AB}$  와 만나는 점이고  $M_2$  는 소실점과 P 점을 잇는 직선이  $\overline{AB}$  와 만나는 점이다.

네 점 A,  $M_1, M_2, B$  에 의한 cross ratio 는 다음과 같다.

$$CR_x = \frac{(x_1 y_2 - x_2 y_1)(x_3 y_4 - x_4 y_3)}{(x_1 y_3 - x_3 y_1)(x_2 y_4 - x_4 y_2)}$$

이 cross ratio 는 스크린 좌표계 상에서도 같은 값으로 유지되기 때문에 응시점의 x 좌표는 다음과 같다.

$$\hat{x} = \frac{w \cdot CR_x}{1 + CR_x}$$

이 때, w 는 스크린의 가로 길이이다.

같은 방법으로 응시점의 y 좌표를 구해보면

$$CR_y = \frac{(x_4 y_5 - x_5 y_4)(x_6 y_7 - x_7 y_6)}{(x_4 y_6 - x_6 y_4)(x_5 y_7 - x_7 y_5)}$$

$$\hat{y} = \frac{w \cdot CR_y}{1 + CR_y}$$

이 된다. 이 때, h 는 스크린의 세로 길이이다.

#### 4.2 실험 결과

실험에서는 칼라 CCD 카메라를 사용하였고 영상의 크기는  $640 \times 480$  픽셀이다. 적외선 LED 는 875nm 파장의 HDSL-4400 을 사용하였고 펜티엄 II-400MHz 컴퓨터와 17 인치 모니터에서 실험하였다.

모니터의 스크린을  $6 \times 4$  의 블록으로 나누고 사용자가 모니터로부터 30cm~40cm 정도 떨어진 일반적인 상황을 가정하고 실험하였다. 사용자가 각 블록의 중심을 바라 본 상태에서 영상을 얻고 앞에서 설명한 알고리즘에 따라 눈의 응시점을 추정하였다. 알고리즘의 성능을 분석하기 위한 정확한 실제 응시점과 추정된 응시점의 거리 오차를 구할 수는 없었고 추정된 응시점이 실제로 바라보고 있는 블록 안에 들어오는지를 확인하였다. 그 결과는 그림 14 와 같고 성공률은 91.6%이다.

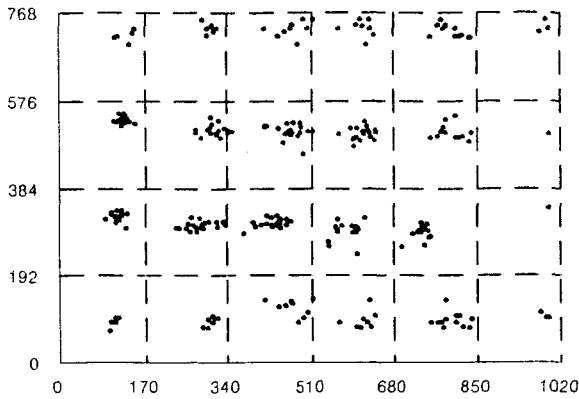


그림 14. 실험 결과. 스크린의 해상도는 1024x768 이고 6x4 의 블록으로 나누어져 있다.

표 2. 시선 방향 추출 오차의 평균, 표준편차, 최대값

오차 (pixel)	평균	표준편차	최대값
가로	22.7	17.1	81.2
세로	17.1	13.5	79.8

위 실험의 오차는 표 2 와 같다. 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 정확 하게 찾는가에 달렸다. 각막 반사의 경우 비교적 찾기가 쉽지만 동공의 중심 위치의 경우는 주변 조명의 변화 등의 원인에 의해서 부정확한 결과를 얻는 경우가 발생한다. 두 번째 문제점은 모니터, 카메라, 사용자의 눈의 위치에 따라 각막 반사에 의한 밝은 점의 위치가 달라진다는 것이다. 세 번째, 우리는 눈동자의 표면을 평면이라고 가정하였다. 하지만 실제로는 굴곡이 있기 때문에 정밀한 결과를 얻어야 할 경우에는 눈동자의 굴곡을 무시할 수 없을 것이다. 그리고 마지막으로 실험할 때 사용자가 가능한 블록의 가운데를 쳐다보려고 하였지만 눈은 무의식적으로 계속 움직이기 때문에 중심이 아닌 다른 곳을 쳐다봤을 가능성도 있다.

## 6. 스테레오를 이용한 작업 대상 물체의 위치 추정 시스템

휠체어에 장착된 스테레오 카메라 시스템은 두 가지 용도로 사용된다. 먼저 작업 환경에 대한 모니터링 기능을 제공한다. 거동이 불편한 장애인의 경우 가시 영역이 제한될 수 있는데 스테레오 카메라를 장착한 팬-틸트 구동 장치를 앞에서 언급한 인터페이스를 이용하여 구동함으로써 보다 넓은 가시영역을 확보할 수 있다. 두 번째 기능은 작업 대상 물체에 대한 정보를 제공하는 기능이다. 물을 마시기 위해 컵을 집는 작업 명령을 교시하고자 할 때 컵의 위치를 로봇에게 알려줌으로써 로봇의 작업 수행 능력을 향상시킬 수 있다.

작업 대상 물체에 대한 3 차원 위치 정보를 얻기 위해서는 캘리브레이션, 대응점 추출, 3 차원 위치 추정 등의 3 가지 과정을 거쳐야 한다.

캘리브레이션 과정은 카메라 모델을 구하는 작업이며 카메라를 통해 얻어지는 물체에 대한 2 차원 좌표와 실제 3 차원 좌표사이의 변환관계를 구하는 과정이다[15]. 그림 15 와 같은 캘리브레이션 패턴을 이용하여 카메라 모델을 구할 수 있다.

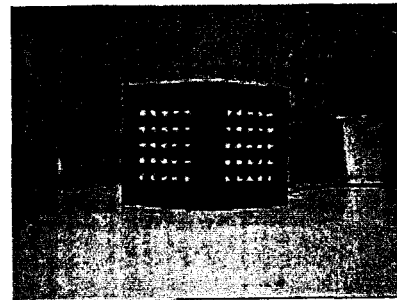


그림 15. 캘리브레이션 패턴

대응점 추출 과정은 한쪽 카메라에서 얻어진 영상의 특정 좌표가 다른 카메라에서 얻어진 영상에서는 어떤 좌표에 해당하는지를 알아내는 과정이다 이것은 주어진 좌표 영역과 가장 유사한 영역을 다른 쪽 영상에서 찾아내는 search 문제와 같다. 이때 캘리브레이션을 마친 2 대의 카메라는 상호 위치 관계를 알 수 있기 때문에 epipolar geometry 를 이용하여 search 영역을 상당히 줄일 수 있다. 특히 작업 영역이 미리 어느 정도 알려져 있다면 작업 대상 물체의 depth 정보를 미리 제한 할 수 있다. 이것은 search 영역을 더욱 제한할 수 있어서 대응점

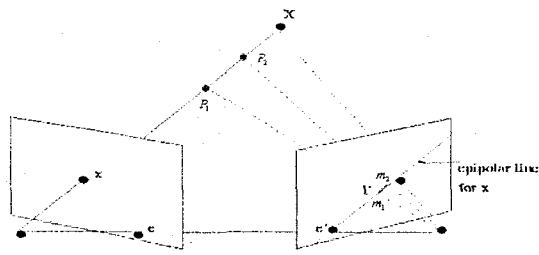


그림 16. epipolar geometry



그림 17. 대응점 추출을 위한 스테레오 영상

추출에 필요한 계산시간을 줄일 수 있다. 그림 16 에서와 같이 왼쪽 영상의 점  $x$  에 대응하는 오른쪽 영상에서의 점은 오른쪽 전체 영상에서 찾을 필요가 없다. 단지 epipolar line 이라고 불리는 직선 위에서 찾으므로 된다. 특히 작업 영역이 미리 제한되어 있는 경우, 즉, 그림 16 에서와 같이  $P_1$  과  $P_2$  사이에 대상 물체가 있는 것으로 가정할 경우 오른쪽 영상에서는  $m_1$  과  $m_2$  를 연결하는 선분 위에서만 대응점이 존재할 수 있다.

양쪽 영상에서의 두 영역이 얼마나 유사한가를 결정하기 위해서 밝기 정보와 edge 정보의 SSD(Sum of Square Difference)를 사용하였다. SSD 가 작을 수록 두 영역이 유사한 것으로 간주된다.

그림 17 은 SSD 를 이용한 대응점 추출의 결과를 보여주고 있다. 그림 17.의 왼쪽 영상에서 A 부분을 마우스로 지시해 주면 오른쪽 영상의 B 부분이 대응점으로 추출된 결과이다.

그림 18 의 첫번째, 두번째 그림은 그림 17 의 두 영상에서 epipolar line 을 추출한 후 그 위의 픽셀들의 밝기 정보를 나타낸 것이다. 세번째 그림은 밝기 정보의 SSD 이며 네번째 그림은 edge 정보의 SSD 이다. 다섯번째 그림은 밝기 정보의 SSD 와 edge 정보의 SSD 를 합한 total SSD 를 표시한 것이다. 수직선으로 표시된 부분이 SSD 값이 가장 작은 부분이다. 마지막으로 여섯번째 그림은 작업 영역이 카메라 시스템의 전방 1m 에서 10m 범위에 있다

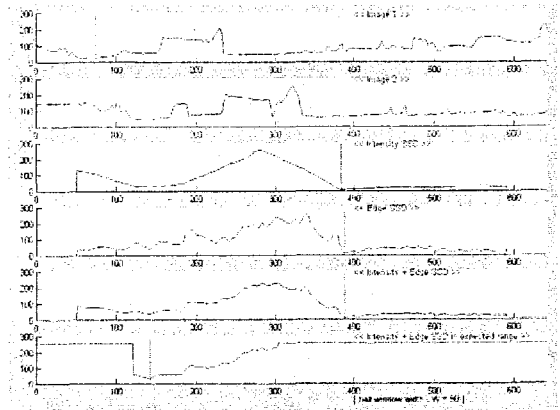


그림 18. 그림 17 에서 얻어진 SSD

고 가정한 상태이다. 이 경우 search 영역이 더욱 제한되게 되서 약 100 에서 300 픽셀 범위에서만 SSD 의 최소값을 찾게 된다. 이 범위에서 최소가 되는 위치가 역시 수직 선분으로 표시되어 있으며 이 위치가 그림 17 에서 찾아진 대응점이 된다.

3 차원 위치 추정 과정은 찾아진 영상에서의 대응점의 위치와 캘리브레이션 결과로 얻은 두 카메라 모델을 기반으로 실제 3 차원 좌표를 추출하는 과정이다. 기본적으로 삼각법을 기반으로 하며 구체적인 수식은 참고문헌[15]에 자세히 수록되어 있다.

카메라 사이의 간격이 6cm 인 스테레오 시스템에서 8mm 렌즈를 이용하여 2m 에서 3m 정도 떨어진 물체에 대한 3 차원 위치 정보를 추출한 결과 평균 2cm 의 오차를 보였다. 이와 같은 결과만 이용하면 로봇 팔이 작업을 수행하기에는 부족하지만 휠체어 위의 스테레오 카메라 시스템에서는 대략적인 위치 정보를 제공하고 로봇 팔에 부착되어 있는 카메라에서 작업에 필요한 보다 정확한 정보를 획득함으로써 원하는 작업을 수행할 수 있다.

## 7. 결론

본 논문은 [1]의 실험결과를 기반으로 하여 이 연구에 대한 수정 및 보완 내용을 다루고 있다. 시선의 방향을 검출하기 위해서는 장착형의 경우, 눈동자의 움직임과 머리의 위치와 방향을 측정하는 기술이 필요하다. 이전의 실험에서는 눈동자의 움직임을 찾기 위해 눈동자의 이미지만을 이용했으나 정밀도의 문제를 극복하기 위해 본 연구에서는 적외선 LED 를 이용하여 그 한계를 극복하였다. 그리고 비장착형 시스템에서도 적외선 LED 를 이용하여 시

선의 방향을 정밀하게 얻는 방법을 제시하였다. 또한 작업 대상에 대한 위치 정보를 추출하여 eye-mouse 시스템과 서비스 로봇의 작업 수행 능력을 향상시켜 주는 스테레오 카메라 시스템의 개발에 있어서 대응점 추출의 강인성을 확보하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서 제시하는 eye-mouse 시스템은 손, 발이 불편한 장애인들이 일상적인 작업들을 다른 보조자의 도움 없이 수행할 수 있게 하는데 꼭 필요한 요소로서 장애인의 복지 향상에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 본다.

## 참고문헌

- [1] 정명진, 김제현, 이영진, 추길환, 유동현, 김도형, "척수 장애인을 위한 eye-mouse 시스템의 구현", In Proc. 2000 Service Robot Workshop, Ichon, Korea July 2000.
- [2] Do-Hyoung Kim, Jae-Hean Kim and Myung Jin Chung, "An eye-gaze tracking system for people with motor disabilities", Proc. of ICORR 2001, pp249-255, Every, France, Apr. 25-27, 2001
- [3] K. A. Mason, " Control Apparatus Sensitive to Eye Movement" , U.S.Patent 3,462,604, August, 1969.
- [4] 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.
- [5] D. Cleveland, "Method and Apparatus for Locating Image Features", U.S.Patent 5,231,674, July, 1993.
- [6] A. Sugioka, Y. Ebisawa, and M. Ohtani, "Noncontant Video-based Eye-gaze Detection Method Allowing Large Head Displacements", IEEE Int. Conf. on Medicine and Biology Society, pp.526-528, 1996.
- [7] Y. Ebisawa, "Improved Video-Based Eye-Gaze Detection Method", IEEE Trans. on Instrument and Measurement, Vol. 47, No. 4. pp.948-955, 1998.
- [8] 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.
- [9] J. Liu, "Determination of the Point of Fixation in a Head-Fixed Coordinate System",
- [10] C. H. Morimoto, et. al. "Keeping an Eye for HCI", 1999.
- [11] R. Jain, R. Kasturi, and B. G. Schunck, "Machine Vision", McGraw-Hill, 1995
- [12] 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
- [13] A. Azarbayejani, T. Starner, and B. Horowitz, and A. Pentland, "Visually Controlled Graphics", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Inteligence, Vol. 15, No. 6, pp.602-605, 1993.
- [14] 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.
- [15] O. Faugeras, Three-Dimensional Computer Vision, The MIT Press, London, 1996.

# 척수 장애인의 HCI를 위한 시선 방향 추적 시스템

Eye-Mouse 시스템 :  
눈동자 추적에 의한 대상물체 지적 및  
3차원 정보 추출 시스템 개발

KAIST

CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

## 개발 동기

### ■ Eye-mouse System

- 눈의 응시 방향 추정으로 마우스 포인터를 구동
- 손발을 쓸 수 없는 척수 장애인의 주변장치와의 **Interface** 장치 개발 필요
- 마우스는 컴퓨터의 가장 보편적인 입력 장치

### ■ Depth Extraction System

- 물체에 대한 위치 정보를 **Visual Servoing** 등의 상위 모듈에 전달함으로써 상위 모듈의 작업 효율 향상

KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

2

## 응시 방향 추정 시스템 (장착형)

### 장착형 눈의 응시 방향 추적 시스템 구성

- 자기 센서를 이용한 Head Tracking
- IR LED 및 CCD 카메라를 이용한 Eye Tracking



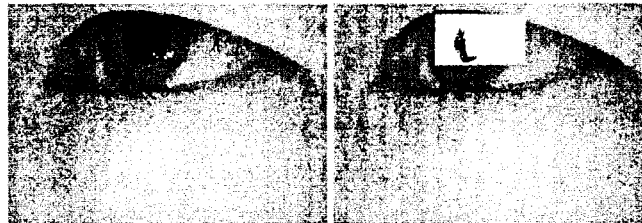
KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

3

## 응시 방향 추정 시스템 (장착형)

### Eye-tracking 시스템의 결과

- 수행 환경 - PC (Pentium IV 1.4 GHz)
- 수행 시간 - 약 33ms (30frames/sec)
- Dark Eye Image를 이용한 동공 영역 실시간 추적
  - IR LED에 의한 Dark Eye Image 생성



동공 추적 결과

탐색 영역 추출 결과

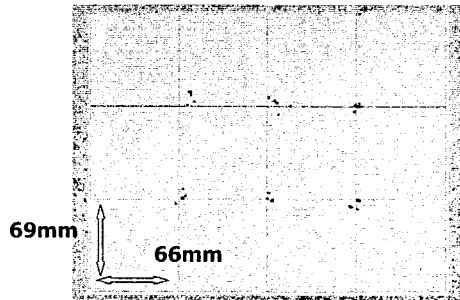
KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

4

## 응시 방향 추정 시스템 (장착형)

### ▪ Eye Tracking과 Head Tracking 의 통합

- 사용자와 모니터의 거리 50cm



- 15인치 모니터  
12X14 영역구분  
가능

<오차>

(단위: mm)	최대오차	최소오차	평균	표준편차
x	17.7	-4.2	3.77	2.85
y	7.5	-10.5	-0.75	4.56

## 응시 방향 추정 시스템 (장착형)

### ▪ 장착형 Eye-mouse를 이용한 작업지시

- 메뉴 및 버튼을 바라봄으로써 로봇에게 작업지시

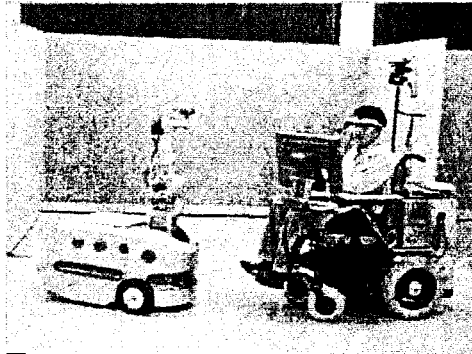


- 원하는 작업 종류 선택
- Click 동작은 추가적인 'OK' 버튼 이용
- 물건의 위치와 작업 종류를 주변기기에게 전송
- 팬-틸트 구동으로 원하는 물건 지시



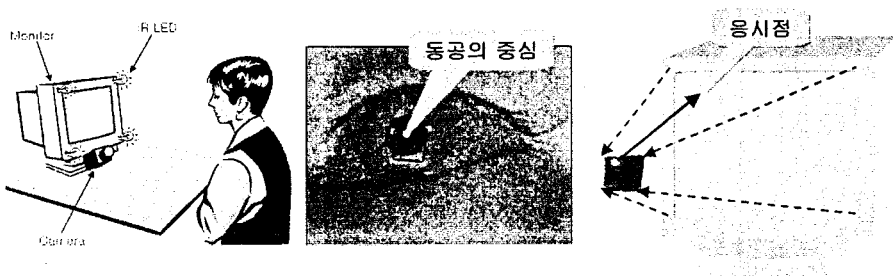
## 응시 방향 추정 시스템 (장착형)

- 장착형 Eye-mouse를 이용한 Robot 이동
  - 메뉴 및 버튼을 바라봄으로써 Robot의 움직임 지시



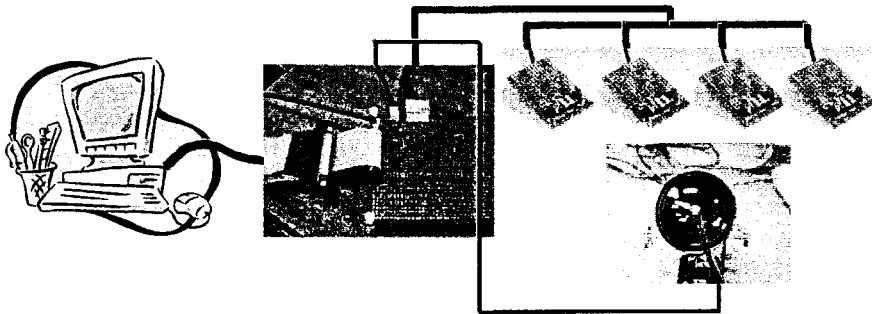
## 응시 방향 추정 시스템 (비 장착형)

- 응시 방향 검출 시스템 구성
  - 5개의 적외선 LED
    - 모니터 각 모서리에 하나씩 (각막 반사)
    - 카메라의 렌즈 중심에 하나 (동공 반사)
  - Zoom 카메라
  - 동공의 중심과 각막 반사에 의한 밝은 점들 사이의 위치관계 이용



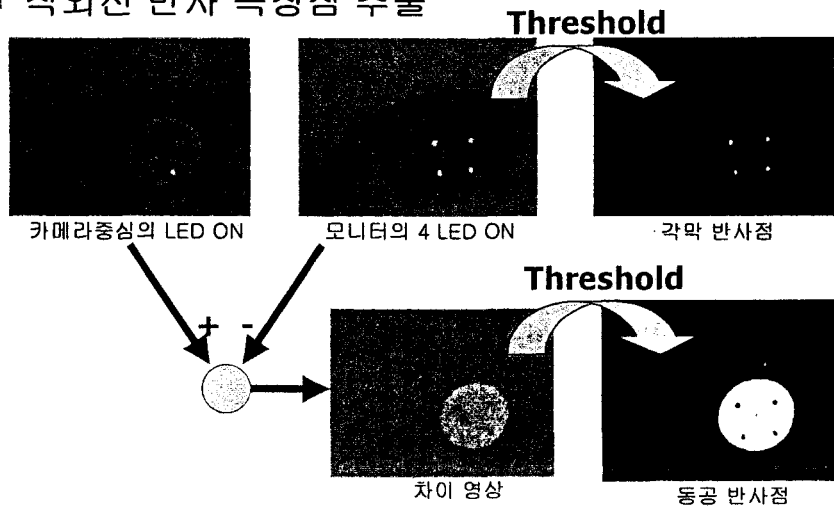
## 응시 방향 추정 시스템 (비 장착형)

- 적외선 LED의 구동
  - 모니터의 적외선 LED와 카메라의 적외선 LED를 순차적으로 구동
    - PC의 병렬 포트를 이용
  - 적외선 LED의 구동과 영상 캡처의 동기화



## 응시 방향 추정 시스템 (비 장착형)

- 적외선 반사 특징점 추출



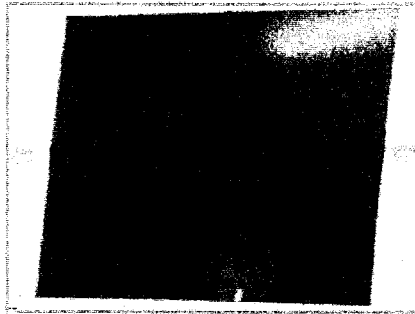
## 응시 방향 추정 시스템 (비 장착형)

### ■ 실험 결과

- 눈의 영상의 크기 : 640×480
- 17인치 모니터  
9×12 영역구분 가능
- PC : Pentium IV 1.4 GHz
- 수행시간 : 200msec

### <오차>

(mm)	평균	표준편차	최대	최소
X	0.4	8.9	25.4	-22.6
Y	-2.5	6.3	11.6	-24.9



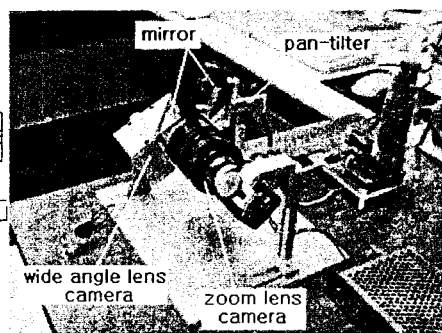
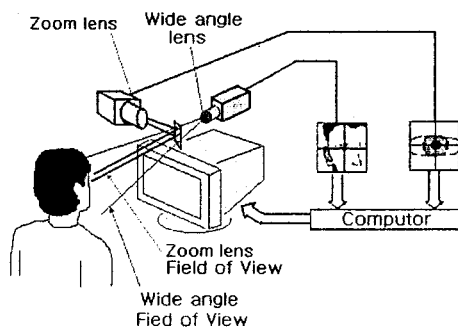
반사점 Tracking  
및  
응시방향 계산실험

- 응시방향 계산 실험
  - Target 영역 : Blue
  - 계산된 응시 영역 : Red

## 응시 방향 추정 시스템 (비 장착형)

### ■ 비장착 Eye-mouse의 머리 움직임 보상시스템

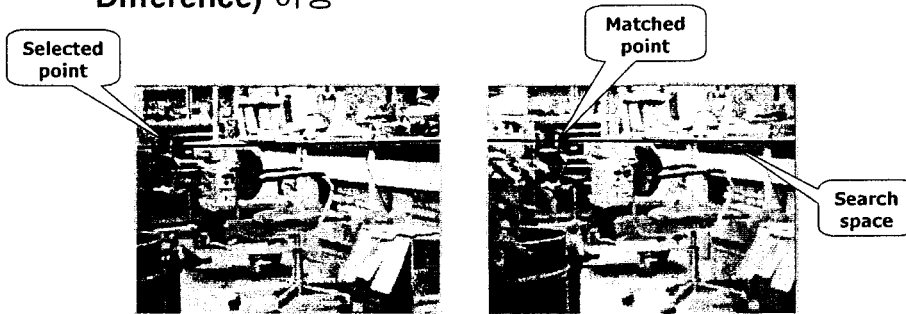
- Face Detection 및 Head Tracking 필요
- 기구부 제작 완료 및 구동 부분 개발



## 3D 정보 추출 시스템

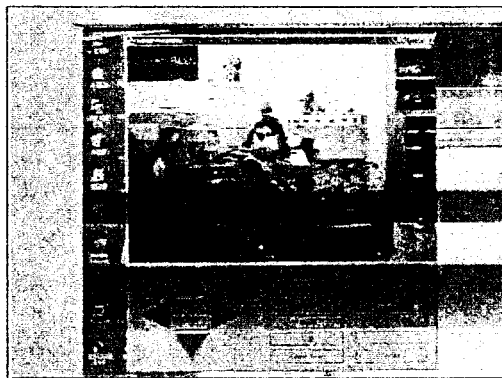
### ▪ Depth Extraction을 위한 Stereo Matching 기법 구현

- Camera 상호 위치 정보를 이용한 Search 영역 축소
- 영상의 밝기 정보와 Edge 정보의 SSD(Sum of Square Difference) 이용



## 3D 정보 추출 시스템

### ▪ Matching 및 Depth 추출 실험



- 작업 대상 물체 지시
- 대응점 추출 및 Depth 추출 알고리즘 실행

## 추후 과제

- **장착형 Eye-mouse**시스템의 구현
  - 장착부위의 인간 친화적인 디자인
  - 해상도 (17인치 모니터,70cm전방) : 12X14를 유지하는 안정성 확보
  - 장애인과의 임상실험을 통한 편리성 확인
- **비장착 Eye-mouse** 시스템의 구현
  - 머리 움직임 보상 시스템의 눈 추적 동작 구현
  - 전체 시스템의 인간 친화적 디자인
  - 해상도 (17인치 모니터,70cm전방) : 9X12를 유지하는 안정성 확보
  - 장애인과의 임상실험을 통한 편리성 확인

## 추후 과제

- 로봇팔, 휠체어 및 주변 기기 구동을 위한 인터페이스 메뉴 완성
- 자동화된 3차원 정보 추출 시스템 개발
  - 실제환경 대응점 추출의 성공률 90%이상 확보

## 앞으로의 가능성

- 장착형 **Eye-mouse** 시스템 기술의 국산화로 수입 대체효과.
  - 기존 제품에 비해 저렴한 시스템 구현 가능
- 비장착형 **Eye-mouse** 시스템의 5개 적외선 이용 방법은 기존 방법의 단점을 극복하여 특허 가능성 있음.
  - 기존 방법은 하나의 적외선을 사용하는 대신 사용자까지의 거리를 측정하여 시선 방향을 보정하는 장치 필요함
- **Eye-mouse** 시스템은 척수 장애인의 사회적 활동을 도울 뿐만 아니라 일반인을 위한 편리한 입력 도구로서 상용화 가능성 있음.

## Session 3

# 토목건설용 서비스 로봇

여 백



# 수직철골 용접로봇 시스템의 개발

이호길, 황성호, 손웅희, 김진영(한국생산기술연구원)  
김종형, 홍성진(삼성전자), 문승빈(세종대학교)

## Development of Robot System for Vertical Steel Column Welding

H.G. Lee, S.H. Hwang, W.H. Shon, J.Y. Kim (Korea Institute of Industrial Technology)  
J.H. Kim, S.J. Hong (Samsung Electronics), S.B. Moon (Sejong University)

### ABSTRACT

Recently, steel welding in construction site is reaching a critical stage due to the increasing thickness of steel members in megastructures and the increasing size of steel structures. In this environment, to achieve high quality of welding and resolve the shortage of skilled welders, steel welding robot is highly required to be developed. In this paper, various types of steel welding robots are examined and a practical steel welding robot system is proposed, especially designed for working on H-shaped column structures which are known to be the most difficult for automatization. Practical aspects of building process and conditions of construction sites are studied and applied to this system design. The prototype of welding robot system is constructed which has a capability of arc-welding as moving around a column and it can perform the multi-pass welding.

**Key Words** : Construction robot (건설 로봇), Welding robot (용접 로봇), Steel column (철골주), Rail moving carrier (레일 주행 캐리어), Arc welding (아크 용접), Multi-pass welding (다층 용접)

### 1. 서론

21세기에는 로봇이 산업분야뿐만 아니라 비산업분야 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, 3]. 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.

건설 분야의 로봇 자동화에 대한 수요 조사에 의하면 철골 구조물에 대한 자동 용접 로봇의 필요성이 가장 크게 나타났다[4, 5]. 이 결과

는 업계의 주요 관심사가 유자격 기능공의 절대 부족과 더불어 가혹한 3D 노동조건의 해소 임을 반증하는 것으로 보이며, 국내에서도 조만간 이에 대한 수요가 발생되리라 예상이 된다. 최근, 건축 구조물이 대형화, 고층화되면서 후판에 대한 철골 용접 작업이 늘어나고 있으며, 이에 따른 용접 시공의 고능률화, 용접 품질의 안정화 및 숙련 작업자의 부족 대처 방안으로서 용접 로봇의 필요성이 대두되고 있다.

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 로봇 산업의 관점에서 건설토목 분야의 관련시장과 로봇개발 현황을 개괄적으로 고찰하고[6], 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 기능 구현(로봇 이동 주행 및 용접 기능)에 중점을 두고 1차 시제품을 개발하였으며, 안정성, 편리성 및 신뢰성에 대한 기능적인 면에서의 보완을 수행하고 용접 기능 향상을 위한 연구를 수행하여 2차 시제품을 설계, 제작하였다. 향후, 상용화에 대한 연구를 보다 중점적으로 수행한다면 점차 확대되고 있는 건설 토목 분야의 자동화/로봇화에 대한 국가경쟁력을 높이고, 나아가 관련기술의 파급으로 자동화 기술의 선진화를 유도할 수 있을 것이다.

## 2. 철골용접 로봇 시스템의 H/W 설계 및 제작

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 용접시는 erection piece가 장애물이 된다. 따라서, 용접자세의 실현, 장애물 회피를 위해서 적어도 6개 이상의 자유도가 요구된다. 용접작업은 플랜지부와 web부를 각각 독립적인 용접구간으로 하여, 기동을 따라 이동하면서 용접하게 되며, 기동 주위에는 레일을 설치, 고정하는 메커니즘이 필요하다. 본 연구에서는 H-beam의 크기와 종류에 따라 주행 가이드 레일의 설치가 용이하

도록 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 그림 1과 같이 클립 레버 타입의 접철식 레일 조립 방법으로 수정 보완하였다.

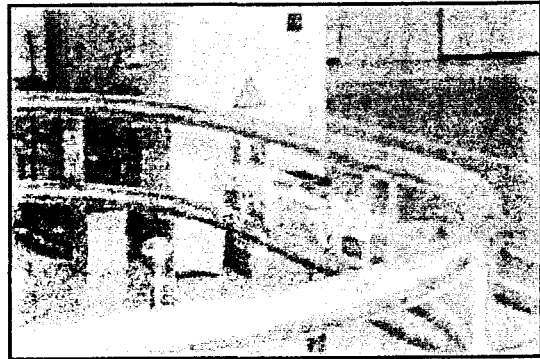


그림 1 접철식 레일 구조

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 용접로봇 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 캐리어(그림 2)는 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 구동롤러와 가이드 레일간의 일정한 선속도를 유지하도록 한 것이 특징이며, 곡선부 주행시 회전중심에 따라 자기 위치 복원이 자연스럽게 이루어지도록 장치를 구성하였다.

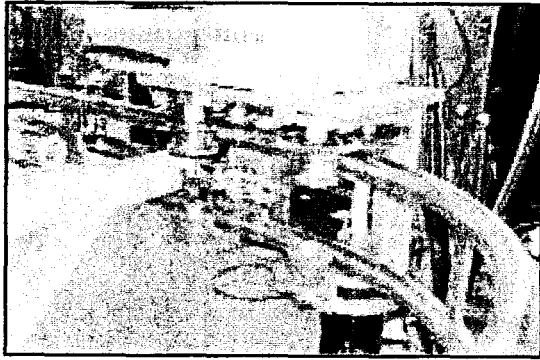


그림 2 주행 캐리어

주행캐리어 시스템은 철골을 용접하는 용접로봇의 주행을 위해서 200W DC 서보 모터를 사용하였으며, 중공 구동축과 구동 롤러를 1축으로 구성하고 가이드 레일을 중심으로 상대방에 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 썸타입의 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 개발한 주행 캐리어 시스템의 특징이다. 또한 곡선 주행시 일정한 선속도를 유지하고 자기 원위치 복원을 위해서 가이드 레일의 중심선상에 설치한 오일리스 베어링 등으로 구성하여 가이드 레일의 내 외측면의

압력차에 의해 자연스럽게 가이드 레일의 곡선반경에 대한 접선방향으로 놓여지게 한 것이 특징이다.

또한, 용접의 현장성과 효율성을 높이기 위해서 로봇 설치대에 다양한 부가 부착물을 부착하였는데, 레이저 비전 센서, 와이어 커터, 앤티스퍼터 유닛 등을 용접로봇의 작업 공간내에 부착할 수 있도록 별도의 지그를 제작하여 설치하였다. 그림 3은 전체적으로 개조된 2차 시제품을 나타낸다.

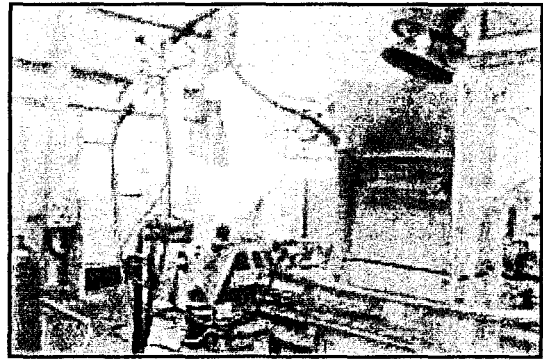


그림 3 용접로봇 시스템 2차 시제품

### 3. 철골용접로봇 시스템의 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 현장 상황에 빨리 적응할 수 있고 최대한 사용자가 편리하게 사용할 수 있는 S/W의 개발에 중점을 두었다. 즉, 용접로봇의 정밀한 최초용접위치의 교시는 사용자가 하위로봇제어기의 teaching pendant를 사용하여 직접교시하고 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.

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 연구에서는 수직철골용접 로봇 시스템을 보다 직관적이고 용접작업을 일관성 있게 관리 및 처리하기 위해서 그림 4와 같이 별도의 상위제어기를 설치하였다.

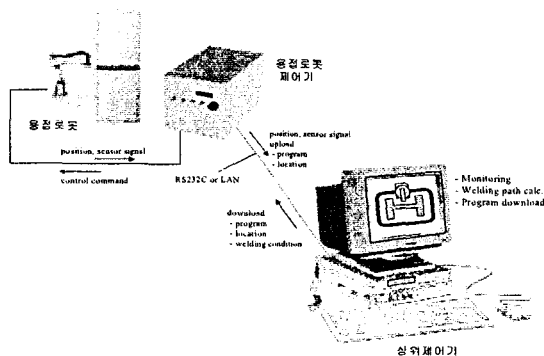


그림 4 상위제어기 구성도

상위제어기는 휴대성이 용이한 노트북 PC를 사용하여 작업 모니터링, 용접 경로 생성 및 용접로봇제어기와 통신 등의 주요기능을 구현하였다. 용접로봇 제어기와 통신은 RS232C의 protocol을 사용하였으며 향후 LAN통신을 추가 사용할 수 있도록 하였다.

상위제어기에서는 그림 5와 같이 용접 공정 진척도, 용접작업 현황, 용접작업 위치 및 로봇의 위치 및 자세각을 실시간으로 모니터링한다. 용접 공정 진척도는 현재 몇 번째 층을 용접하고 있고 작업경과 시간 및 남은 시간을 실시간으로 표시한다. 용접 작업 현황은 용접조건, 즉, 로봇의 용접자세각, 용접전압, 용접전류, 용접속도 등을 각 층별로 표시한다. 용접작업 위치는 현재 로봇의 작업 beam의 어느 부위를 용접하고 있는지를 실시간으로 표시하며 로봇의 위치는 현재까지 완료된 로봇의 작업 위치점을 표시한다.

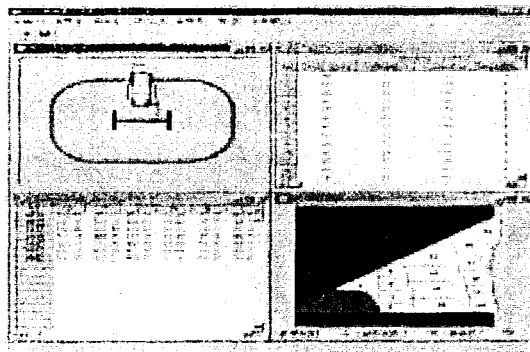


그림 5 상위제어기의 모니터링 화면

#### 4. 용접로봇 시스템의 용접작업 구현

로봇 자동용접[7]은 사람이 용접 GUN을 사용하여 용접하는 반자동 용접에 비하여 연속작업이 가능하므로 작업 효율이 높고, 용접상태가 일정하며, 유해한 환경조건에 적합하고, 인건비 감소의 효과 등과 같은 많은 장점을 가지고 있다. 한편, 자동용접의 단점으로는 교시(Teaching) 시간이 오래 걸리며, 용접 부재의 위치가 틀어진 경우 용접선 추적이 어렵고, 일시 투자비용이 필요하다는 점 등이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 일련의 부가적인 Software 및 Hardware를 개발하려는 노력이 로봇 제작자들에 의하여 행하여져 왔다. 자동용접에서의 용접선 추적방법에는 주로 아크센서[8, 9, 10] 또는 레이저 센서[11]를 사용하여 보상하는 방법이 있다.

그러나 아크센서는 위빙모션 (weaving motion)에서만 사용가능하므로, 위빙(weaving)을 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.

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 다층 경로(multi-pass)를 거쳐 용접이 이루어져야 하며, 용접대상물의 두께와 개선각에 따라 자동적으로 다층 경로를 생성하는 기능을 구현하였다. 이렇게 자동 생성된 다

층 경로의 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 데이터를 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, 개선각 45도의 후판으로 시험 시편을 만들어 옆보기 용접을 수행하였다. 실제 건설 현장의 철골주는 Half-V Groove 형태로 다층 경로 용접이 요구되며, 특히, 용접대상물의 두께가 증가함에 따라서 요구되는 용접 경로의 수가 크게 증가된다. 숙련공

에 의한 반자동 용접의 경우에는 용접 결과에 따라서 경로수를 조정하게 되나, 본 연구에서는 용접 대상 부재에 따라 경로가 자동 계산되도록 기능을 구현하였다. 용접성 시험을 위하여 모재의 두께를 30mm, GAP을 2mm로 하고 용접을 진행하였으며, 용접은 FCAW(Flux Cored Arc Welding)를 시행하였다. 그림 6은 시험 부재에 대해 생성된 다층 경로 데이터 정보를 그림으로 나타낸 것으로, 모두 6개의 Layer로 19개의 경로가 필요함을 보여주고 있다. 이때, 용접 Torch 접근각, 전류 등의 값을 적당히 하지 않으면 홀러내림 현상 발생하게 되며, 이러한 기초 데이터를 기준으로 하여 용접 파라미터를 자동으로 조정하는 기능을 구현하였다. 표 1은 시험 시편에 대해 실시한 용접 조건을 보여준다.

표 1 Multi-pass Welding Condition (Half-V Groove)  
Plate thickness: 30mm, Bevel Angle: 45.°, Root Gap: 2mm

Pass No.	Torch angle [deg]	Welding condition			Crater condition		
		Voltage [V]	Current [A]	Speed [mm/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

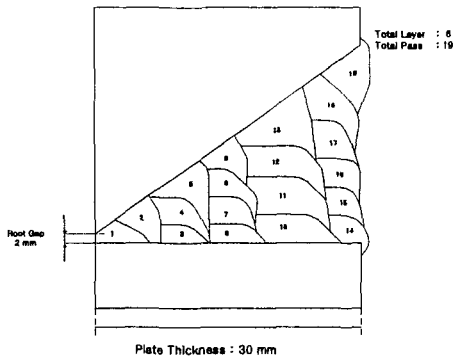


그림 6 생성된 multi-pass

그림 7은 이상과 같은 조건으로 실부재에 용접 작업을 수행하는 장면을 보여준다.



그림 7 Multi-pass 용접 시험 장면

다층 경로 용접 시험한 시편을 한밭대학교 용접공학센터에 의뢰하여 평가를 수행하였다. 2차 시편은 2종류로 분류된다. 그 하나는 back-bead type과 다른 하나는 non-back-bead type이다. 본 분석에서는 back-bead 시편을 sample 1로 표시하고 non-back-bead 시편을 sample 2로 표시한다.

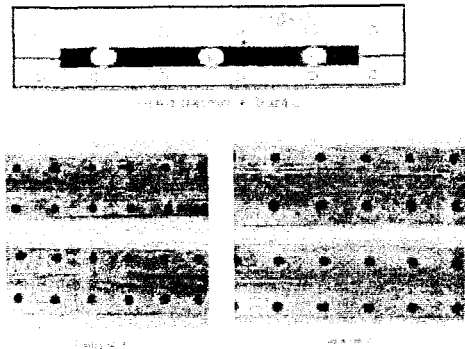


그림 8 용접 시편

그림 9는 back-bead 용접 시편의 용착부 및 모재의 조직, 용착부의 upper, middle 및 lower 위치에서 용착부 금속 조직을 나타내고 있다. 용착부 macro 단면에는 육안으로 식별이 가능한 용접 결함이 나타나 있다.

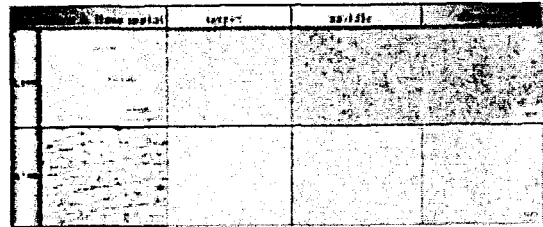


그림 9 시편 1의 1-A 용접부 현미경 조직

그림 10은 non back-bead 용접 시편의 용착부에서의 금속조직을 나타내고 있다. 위 2개의 시편 모두에서 middle 및 lower (deeper로 표시됨) 위치에서는 일단 형성된 martensite 조직이 뒤이은 용접 경로에 의하여 재결정 조직이 일어난 것을 관찰 할 수 있다.

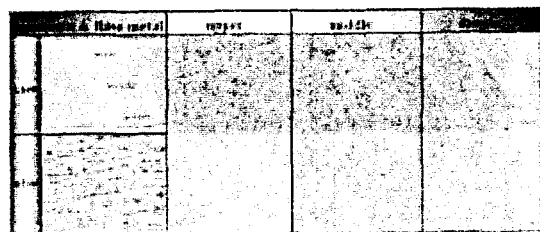


그림 10 시편 2의 2-A 용접부 현미경 조직

시편에 대한 평가 결과 비교적 양호한 용착부 상태를 보여주고 있다. 그러나 우수한 표면 비드와 뒷면 비드를 얻기 위해서는 용접속도와 용접 전압을 약간 바꿀 때 좋은 용접부가 얻어질 수 있다. 특히 뒷면에서 우수한 비드를 얻기 위해서는 토치의 지향 각을 고려한 홈(groove) 설계가 필요하다. 용착금속 중에는 porosity나 slag inclusion 등의 용접 결함이 관찰되는 바 적정 전류와 용접 속도로 용접을 시행하여 가급적 비드가 넓게 퍼지도록 하고 또한 slag를 중간에 제거하도록 한다.

이상과 같이 개발된 수직철골 용접로봇 시스템을 사용하여 다층 경로 용접을 수행한 시편에 대해 육안 검사 및 단면 조직 검사를 한 결과 용접부는 대체적으로 양호하다는 결론을 도출하였으며 세부적인 평가는 표 2와 같다.

### 5. 결론

철골주의 형태는 다양하지만 로봇용접 대상으로는 대형 H-beam, 사각주, 원형주가 주종이다. 각 용접 접합부는 후판 옆보기 용접자세로 다른 용접자세에 비해 용접이 까다로우며, 용접 접합부의 경로를 따라 용접 비드를 다층 적층

시켜 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 연구에서는 수직철골 용접로봇의 기술을 보유하고 있는 일본에서도 난이도가 높아, 아직 실용화가 되어있지 않은 H-beam철골의 용접문제를 해결하기 위한 연구에 착수하였다. 철골 구조물 시공 및 작업 조건 등에 대한 기초 조사를 토대로 개념설계를 수행하고 1차, 2차 시제품 개발을 통하여 실제 작업에 활용 가능하도록 하였다. 작업장 이동과 설치용이성을 고려한 설계를 토대로 6축 소형 용접 로봇을 주행 매커니즘과 함께 레일 위에 탑재하여 레이저 센서를 이용한 자동 용접작업이 가능하도록 시스템을 구성하였다. 2차 시제품에서는 1차 시제품에서 발생된 주행 중 흔들림 문제점 등을 보완하였다. 즉, 주행 캐리어 시스템의 무게 중심

표 2 로봇 용접부의 세부 항목에 대한 평가

	세부 항목	평가	결과
비드 외관	스패터 부착	스패터 부착이 적음	양호
	덧살 높이	3mm이하	우수
	표면 비드의 윤곽	높낮이차 1.5mm이하	양호
	표면 비드 언더컷	부분적 언더컷	양호
	표면 비드 오버랩	없음	우수
	비드 over/under fill	부분적 underfill	양호
	뒷면 비드 윤곽	대체적으로	양호
	뒷면 비드 언더컷	부분적 언더컷	양호
	뒷면 비드 오버랩	없음	양호
내부 결함	균열(중 및 횡. 내부 균열)	균열 없음	우수
	융합 불량	부분적 융합 불량	양호
	슬래그 혼입	부분적 혼입	양호
	기공	약간의 기공	양호
금속 조직	용접부 금속 조직	연강의 용착금속 조직	우수
	용접부 경도	용착금속 경도 60Rc	우수

을 낮게 설계하였으며, 3방향(roll, pitch, yaw)의 모멘트 지지 구조로 하여 주행 중에도 용접이 가능하도록 제작하였다. 또한, 구동부와 가이드 부를 일정한 거리 간격을 두었고 편심 가이드 롤러를 설치하여 예압을 조정할 수 있게 하여 안정적인 동적 특성을 지닐 수 있게 하였다. 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, 건설 시공 업체와의 협의를 통해 철골 시공에 자동화가 용이하도록 공법 변경에 대한 노력도 기울여야 할 것이다.

*Man Cyber.*, pp. 714-728, 1989. (Laser sensor tracking: Servo Robot)

## 6. 참고문헌

1. 建設用ロボット, *日本ロボット學會誌*, 제8권, 2호, 1990.
2. 荻原忠治, *et al.*, 鐵骨丸柱現場横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.
3. 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.
4. 김종필 외, *건설공사 자동화 방안 연구*, 과학기술처, 1992.
5. 이호길 외, *Construction Robot 개발을 위한 기획사업*, 통상산업부, 1997.
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. Y. Kiyohara, "Application of latest arc welding robot with synchromotion and sensor," *Robot*, pp. 37-43, vol. 102, Jan. 1995.
8. 허장욱, 김재웅, 나석주, 이승영, "혼합가스 GMA 용접용 아크신호를 이용한 용접선 추적에 관한 연구," *대한용접학회지*, pp. 23-30, 1990.
9. 문승빈, 윤명균, 홍용준, 홍성진, 황찬영, 김동일, "6축 로봇을 이용한 자동용접에서의 Arc Sensor 개발," *대한용접학회 춘계학술 발표*, pp. 15-18, 1995.
10. 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)
11. P. Sicard and M. D. Levine, "Joint recognition and tracking for robotic arc welding," *IEEE Trans. Syst.*



중정국가연구개발사업: 서비스 로봇 제3세부 과제

## 수직철골 용접로봇 시스템 개발

주 관 기 관: 한국생산기술연구원(이호길)  
공동연구기관: 삼성전자㈜(김종형)  
위탁연구기관: 세종대학교(문승빈)  
참 여 기 업: 삼성전자㈜

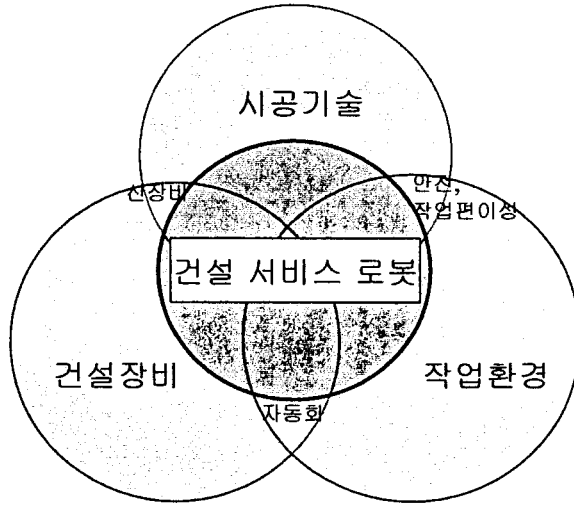


### 발표순서

1. 연구 배경
2. 연구개발 목표
3. 연구개발 추진체계
4. 최종 목표 대비 연구 결과 비교표
5. 연구개발 내용 및 실적
  - 5.1 개념 정립 및 기본 설계
  - 5.2 H/W 설계 및 제작
  - 5.3 S/W 개발
  - 5.4 용접성능 시험평가
  - 5.5 3차년도 연구 실적
  - 5.6 연구 성과물
6. 사업화 계획



## 1. 연구 배경(건설 생산성 향상)



- 건설시장규모 :  
국민총생산의 약 20%
- 건설로봇시장 :  
로봇시장의 10%  
(2005년경 일본예측)
- 로봇화 우선순위:  
1위: 철골용접로봇
- 뉴 패러다임 :  
작업자 중심/ 로봇기술

## 2. 연구개발 목표(최종)

국내 독자적인 기술로 수직철골 용접 로봇 시스템을 개발한다.  
나아가서, 건설로봇기술을 국가적인 전략적 산업분야로서 중점  
육성하여 국제경쟁력을 높이고, 관련기술의 파급으로 자동화기술  
의 선진화를 유도한다.

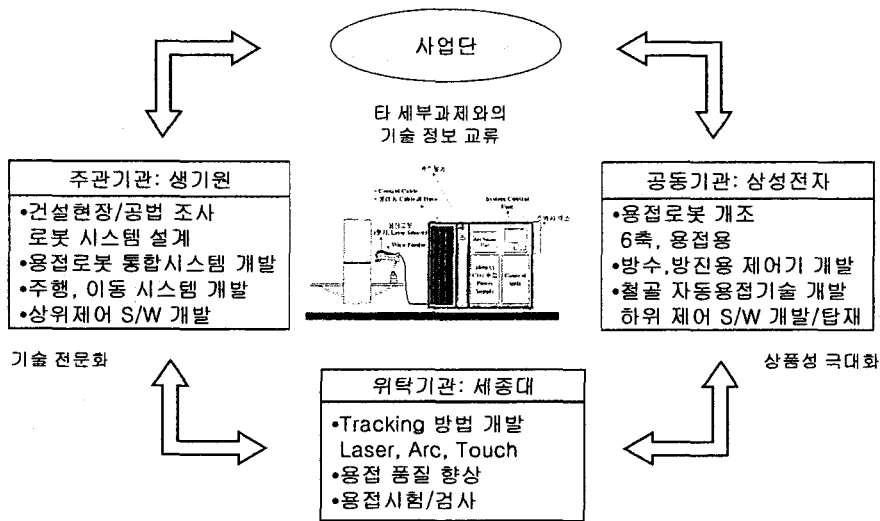
### 철골 용접 로봇 시스템 사양

- 적용 범위: 각주, 환주, H빔 [기동치수(각주의 경우): 550 ~ 1000 mm]
- 로봇 이동 방식: 레일 주행 방식
- 중량: 로봇 50kg이내, 레일 50kg이내
- 용접품질 향상 기능: 센서를 통한 용접위치 검출 및 용접 상태 검사 확인 기능
- 토치 위치제어 및 검사기능: 위치 정밀도 ±0.5mm
- 작업 편이성: 설치, 이동의 간편성 (설치시간 5분이내)
- 로봇 제어장치 및 용접장치 운반 기능

### 단계별 목표

- 제 1 단계 (1998 ~ 2000) : 시제품 개발
- 제 2 단계 (2000 ~ 2001) : 시스템 통합 및 성능시험

### 3. 연구개발 추진체계

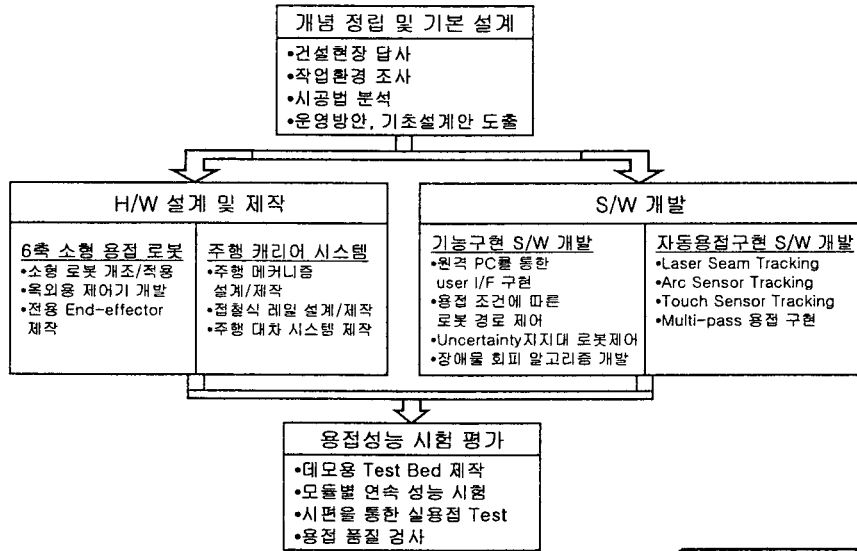


### 4. 최종 목표 대비 연구결과 비교표

항목	목표 사양	연구 결과	비고
적용 범위	각주, 환주, H-beam [기동 치수: 550-1000mm]	가장 난이도가 어려운 H-beam을 대상 분할식 레일구성: 다양한 치수 철골주 용접 가능	KS 규격품 이용 [600X300mm]
로봇 이동 방식	레일 주행 방식	Single arm type 레일 주행 구현 주행 캐리어 메커니즘 제작	3방향 지지 메커니즘
중량	로봇: 50kg이내 주행장치: 50kg이내	로봇: 37kg 주행장치: 47kg 용접부가장치: 10kg	제어장치, 용접기, 가스 등은 별도 설치
용접품질 향상기능	센서를 통한 용접선 검출 및 보정	Laser seam tracking Arc sensor tracking Touch sensor tracking	Multi-pass 용접구현 열보기 용접구현
토치위치 제어 및 검사기능	위치 정밀도: ± 0.5mm	로봇 자체 정밀도: ± 0.04mm	Laser Tracker를 이용한 측정준비중
작업 편의성	설치시간: 5분 이내	설치시간 10~12분 소요 (현장에서 설치시간비중이 높지않음)	주행리프트, 점철식 레일방식
운반 기능	로봇 제어장치 및 운반장치 이동 기능	운반 설치용 이동리프트 시스템 제작 통합 조립식	수동식 높낮이 조절 기능



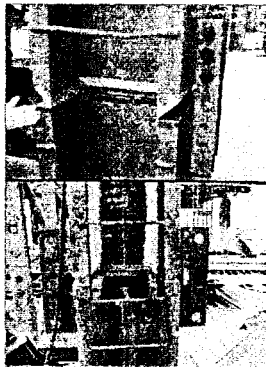
### 5. 연구개발 내용 및 실적



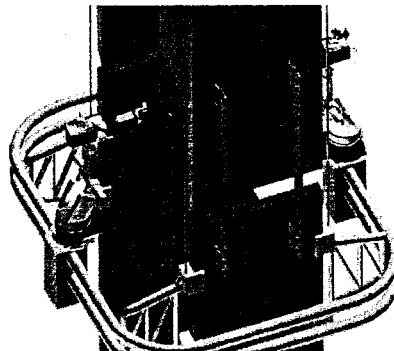
### 5.1 개념 정립 및 기본 설계

- ❖ 철골 건설 현장 답사 및 작업 환경 조사
- ❖ 시공법 분석(시공법 변경 없는 로봇 도입방법 연구)
- ❖ 용접로봇 시스템 개념설계
- ❖ 작업조건, 운영방안, 기초설계안 도출

영종도 현장  
[16시간/인]

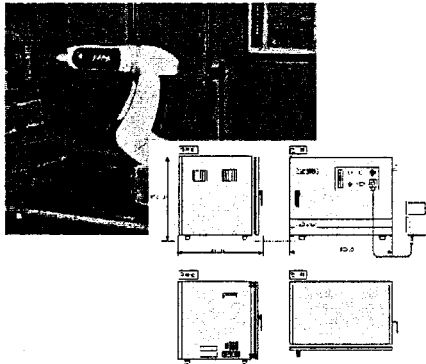


도곡동 현장  
[8시간/인]

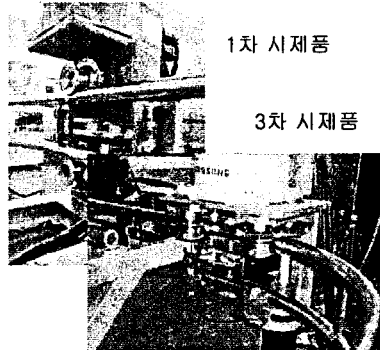


### 5.2 H/W 설계 및 제작

- ❖ 소형 용접로봇 개조/적용
  - 6축 수직다관절
  - 옥외용 제어기 설계
  - 고성능 로봇제어기(펜티엄급) 개발

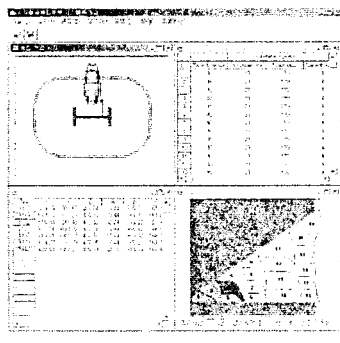


- ❖ 주행 레일 및 캐리어 시스템 개발
  - 설치 용이성 향상: 접철식레일
  - 주행 안정성 향상: 3방향 모멘트 지지구조

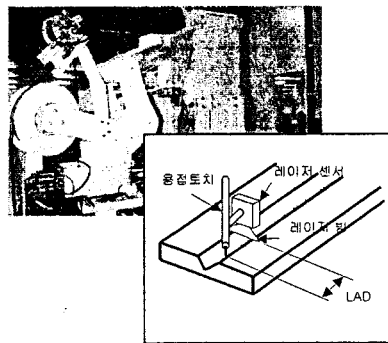


### 5.3 S/W 개발

- ❖ 기능 구현 S/W 개발
  - 원격 PC를 통한 user I/F 구현
  - 용접조건에 따른 로봇경로 제어
  - 제어알고리즘 개발: 1축로봇구현
    - Uncertainty 지시대 로봇 제어
    - 장애물 회피 알고리즘

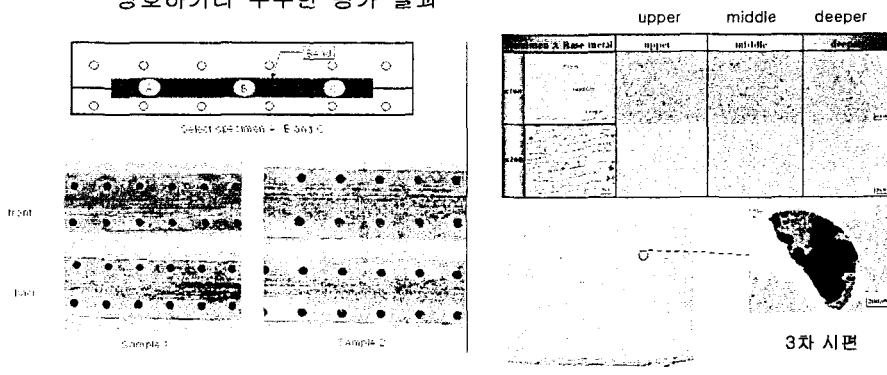


- ❖ 자동용접 구현 S/W 개발
  - 초기점: Touch sensor tracking
  - Optional: Root path search
    - Laser seam tracking
    - Arc sensor tracking
  - Multi-pass 용접 구현



### 5.4 용접성능 시험평가

- ❖ 한밭대학교 용접공학센터에 시험 의뢰
  - ⊙ 1차,2차,3차 시편 검사 의뢰: ISO 5817에 의거 평가
  - ⊙ 비드외관, 내부결함, 금속조직에 대한 평가 수행
  - > 부분적으로 슬래그가 혼입되거나 기공이 발생되기는 하였으나 양호하거나 우수한 평가 결과

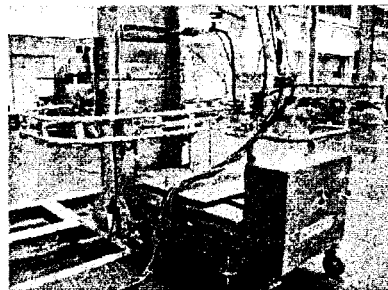


### 5.5 3차년도 수행 실적(I)

- ❖ 시스템 운반 메커니즘 설계: 사용자 편의성 향상

⊙ 접철식 레일 설계/제작

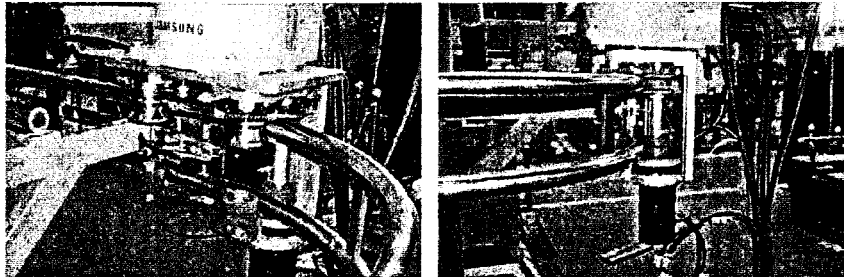
⊙ 이동 리프트 시스템 보완 (attach 부분 개조)



### 5.5 3차년도 수행 실적 (II)

#### ❖ 주행 시스템의 안정성 향상

- ⊙ 주행 캐리어 개조: 3방향 모멘트(roll, pitch, yaw) 지지 구조
- ⊙ 슬립방지용 구동 기어, 편심 가이드 롤러 이용 -> 슬립방지, 자기 위치 복원성 향상, 중심거리 조정
- > 특허 출원: 수직철골 용접로봇의 주행 캐리어 시스템

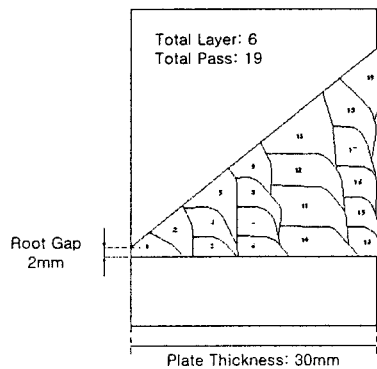
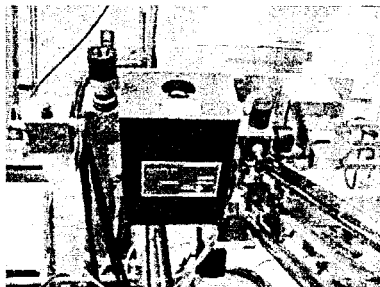


### 5.5 3차년도 수행 실적 (III)

#### ❖ 용접 작업 기능

- ⊙ 와이어 커터 및 앤티스퍼터 장착: 매 pass마다 자동수행

- ⊙ Multi-pass 용접기능 구현
- ⊙ Root path search 기능: touch sensor 이용

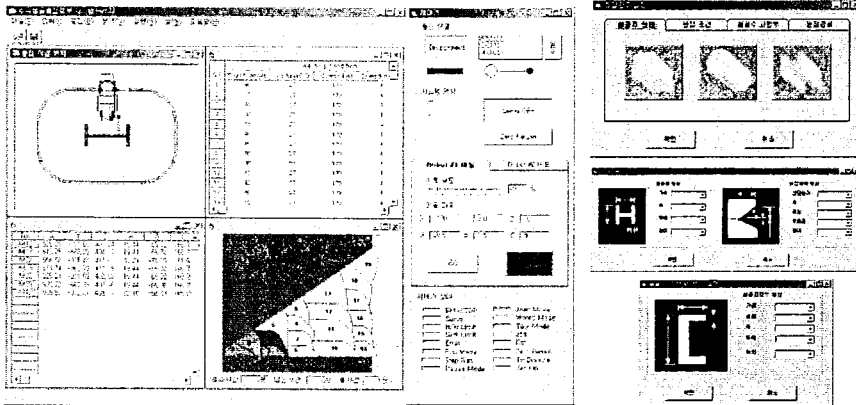


### 5.5 3차년도 수행 실적(IV)

#### ❖ User I/F S/W 개발

- ⊙ 사용자 편의성 고려
- ⊙ 시스템 모니터링

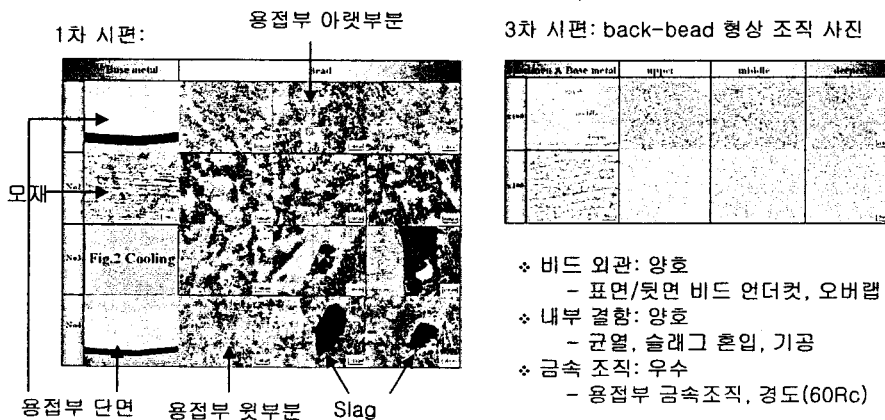
- ⊙ 용접조건에 따른 용접변수 자동 조절 기능



### 5.5 3차년도 수행 실적(V)

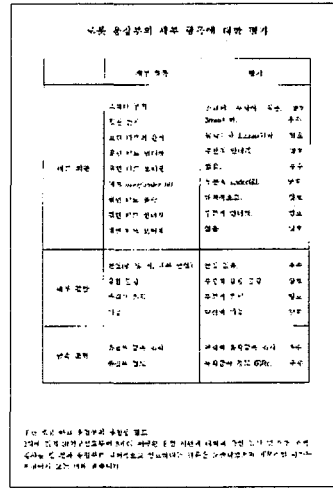
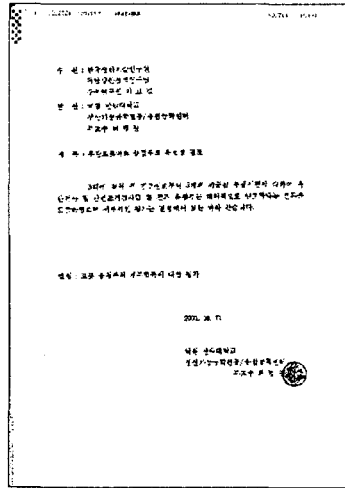
#### ❖ 용접성능 시험평가: ISO 5817에 의거

- ⊙ 한밭대학교 용접공학센터에 의뢰





## 용접시편 시험 검사서

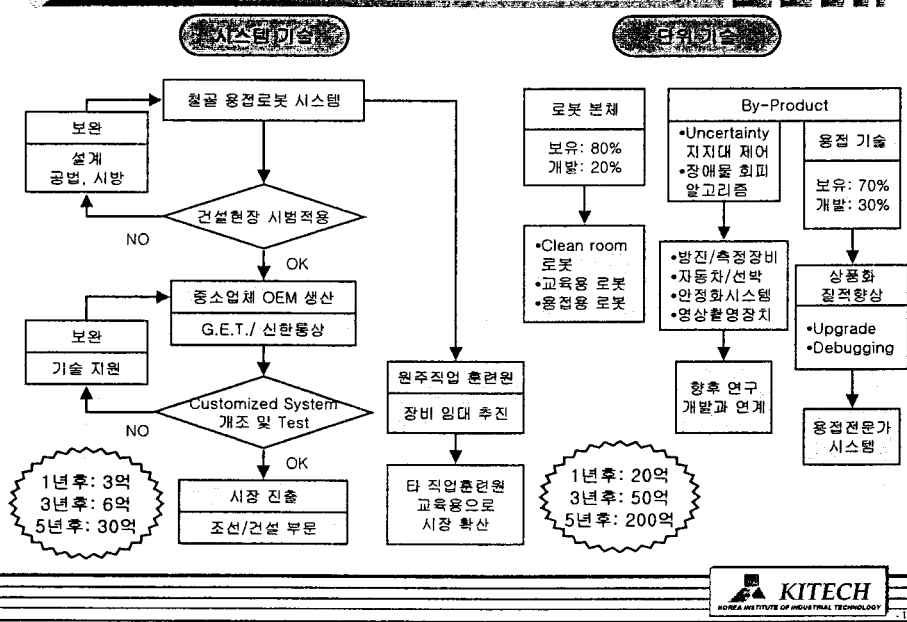


## 5.6 연구 성과물

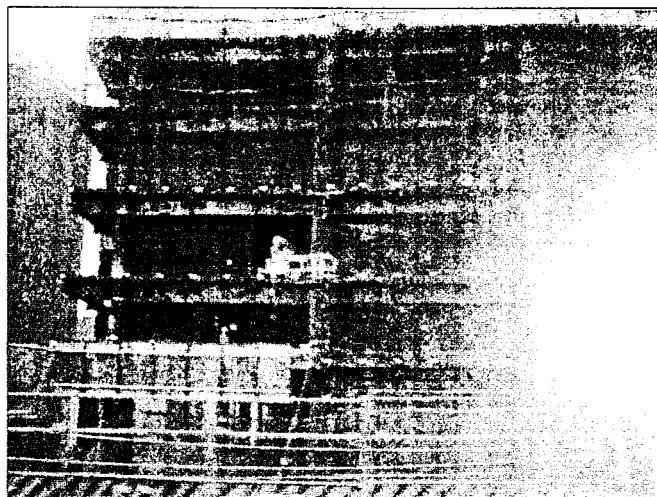
- ❖ 특허: 등록 1건, 출원 5건, 출원중 2건
  - 외부통신을 통한 로봇 Path 실시간 추적 제어
  - 용접상태 실시간 검출 및 응용기법
  - 용접로봇 시스템
  - 용접로봇 교시위치 설정방법 및 그 용접로봇 시스템
  - 용접로봇의 위방모션 제어방법
  - 로봇 제어시스템 및 그 제어방법
  - 외계센서와 근사자코비안 연산자를 이용한 로봇의 위치 제어
  - 수직철골 용접로봇 주행캐리어 시스템
- ❖ 논문: 국내학회논문집 3편, 국내학술대회 2편, 국제학술대회 1편, Workshop 4편
- ❖ 기술지원: 2건
  - IRAM쪽에 용접용 로봇 시스템 기술 지원
  - G.E.T.에 제어기 통신 기술 지원



## 6. 사업화 계획



## 일본 건설 현장 적용 사례



(2001년 7월 촬영)

# Development of Tracking Algorithms for Robotic H-Beam Welding System At Construction Site

Joocho Shin<sup>1</sup>, Seungbin B. Moon<sup>1</sup>, Sung-Ho Hwang<sup>2</sup>, Ho-Gil Lee<sup>2</sup>, Sungjin Hong<sup>3</sup>, Yeon Taek Oh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Computer Engineering, Sejong University, Korea

<sup>2</sup>Korea Institute of Industrial Technology, Korea

<sup>3</sup>Samsung Electronics Co., Ltd, Korea

## Abstract

Most of H-beam welding at construction sites is currently performed by manual welding by expert workers. H-beam welding is a very difficult work in a sense that workers are required to be in hazardous environment for more than hours continuously. Typically the thickness of welding joint is from a few millimeters to hundreds millimeters. We have developed automatic welding system that uses multi-axis robot and a traversal unit to carry out autonomous welding. Multi-axis robot is used to position the robot torch, and a traversal unit is to move the robot along the H-beam welding joint.

In order to compensate any teaching point errors due to inaccurate information, we have developed both arc sensor tracking and laser sensor tracking algorithms. Arc sensor tracking algorithm is most effectively used in root pass finding, since the weaving operation gives us accurate current changes. Laser sensor tracking algorithm can be applied to the case where precise tracking is required. Both algorithms have been successfully implemented in a test bed.

## 1. Introduction

Application of robots in building construction has been attempted in many areas. They typically include welding, coating, transporting, painting, finishing, inspection and dismantling of construction materials[1]. Steel beam welding at construction sites is known to be very difficult since it requires hours of continuous welding by skilled welders in addition to harsh environment. Typically the thickness of welding joint is from a few millimeters to hundreds millimeters. Currently almost all steel beam welding at building construction site is done manually in Korea. Previous researches on automation of steel beam welding at construction site studied on box type steel beam welding.[2,3]

In this study, we designed an automatic welding system for joining H-beam at construction site. Generally, H-beam welding is more complicated than box type beam welding

because the side column of H-beam itself acts as an obstacle to welding path. In order to cope with this difficulty we had to employ articulated manipulator rather than simple style Cartesian robot as in previous research on box type beam welding.[2,3] We have designed an automatic welding system which have an articulated robot supported by a traversal unit. The system is also equipped with both laser sensor[4] and arc sensor[5,6,7] tracking algorithm.

This paper is organized as follows. In section 2, the design of automatic steel beam welding system is presented. The arc sensing and laser sensing tracking algorithm used in the system is introduced in section 3. The conclusion and future work are discussed in the last section.

## 2. Automatic Steel Beam Welding System

The typical joint of H-beam for building construction is shown in Fig. 1. The joint type is Half-V groove, where only one side has a bevel angle of 45 degrees. The thickness of H-beam is usually from a few millimeters to hundreds millimeters. In order to reach the inside of H-beam for welding while avoiding any collision with side of H-beam, the robot must have 5 degrees of freedom or more to achieve high flexibility.

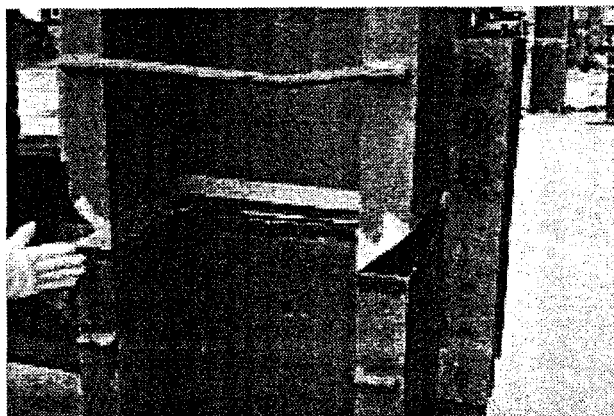


Figure 1. Typical Steel Beam Welding Joint

We have employed 5 degrees of freedom articulated robot mounted upon the traversal unit. Since the welding paths are around the H-beam, we must traverse the perimeter of steel beam. We have designed a traversal unit around the beam, using the dual steel pipe rail, as shown in Fig. 2. The set of traversal unit and robot is anchored by steel rope from the top of H-beam, where an eye bolt is installed.

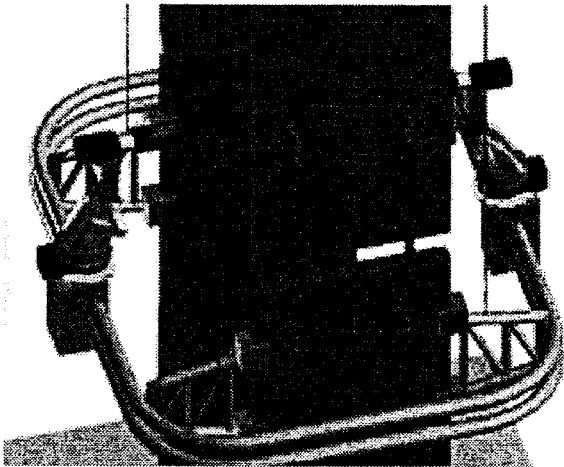


Figure 2. Schematic Diagram of Traversal Unit

Although we first designed a dual robot system where two robots are installed at opposing directions, sharing welding work about half, we installed only one robot for demonstration purpose. The completed overall system is shown in Fig. 3. The controller, along with welding power source, shield gas, and laser box, is shown in one place.



Figure 3. Overall Welding System

### 3. Application of Tracking Algorithms

We have employed a laser sensor in order to track the root pass of the given joint. The type of joint was Half-V groove, where the bevel angle is 45 degrees. We have employed laser sensor, MSPOT-280 model of ServoRobot, to track the welding center line. Since the use of laser sensor is rather restricted because of its size and existence of side wall in H-beam, we will only use this laser sensor in the side panel welding only.

The configuration of welding torch attached by laser sensor is depicted in Fig. 4, where LAD(Look Ahead Distance) is the distance between laser sensor and torch.

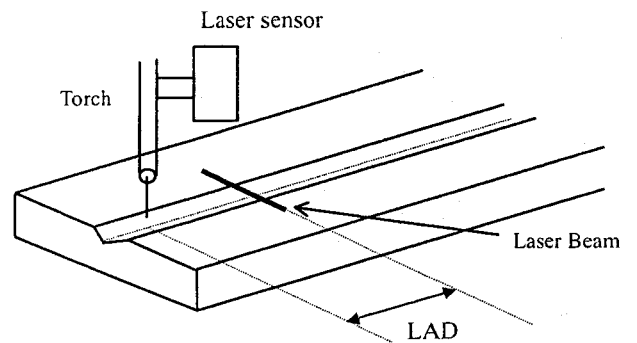


Figure 4. Laser sensor tracking  
LAD = Look Ahead Distance

Since the measurement of welding joint is made LAD distance before the torch location, we have to adjust the offset value, denoted  $d$  in Fig. 5, which is obtained measuring welding center line difference after LAD distance advancement. The adjusting of this offset is important in robotic application of laser sensor for precise tracking.

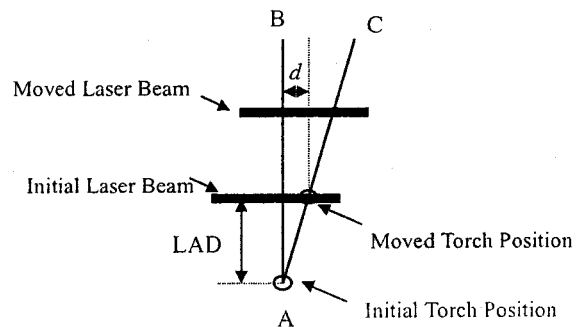


Figure 5. Offset of a Laser sensor  
 $d$  = offset, LAD = Look Ahead Distance,  
AB = Laser center line, AC = Robot Path

Fig. 6 shows overall system with laser sensor attached ahead of welding torch. As one can easily see, the side wall of the H-beam can collide with laser sensor. Thus the use of laser sensor is restricted to the side panel only. When there are erection pieces to fasten the H-beam initially, it should be removed after welding at opposite or side panel first. Otherwise, the erection piece will also interfere with welding line of robot torch.

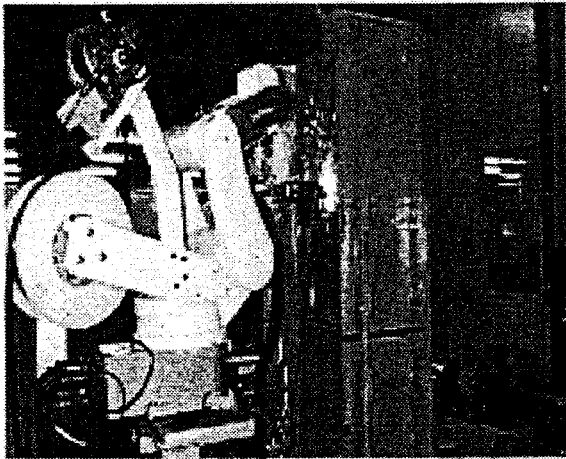


Figure 6. Welding system with laser sensor attached

Also, we tested the arc sensor tracking for finding the root pass of given joint. We have concluded that the arc sensor can be successfully applied for root pass finding in our application. In order to apply the arc sensing, we have to apply the weaving action as in Fig. 7.

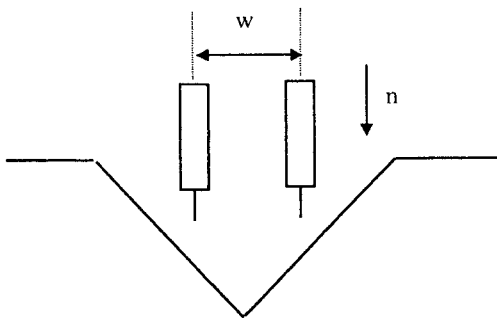


Figure 7. Weaving Pattern of Welding Torch

$w$  = Weaving Direction,  $n$  = Normal Direction

Welding torch is supposed to move along weaving direction at given frequency, and then welding current is resulted according to torch location, as in Fig. 8. By comparing the welding current curve, we may decide the torch location. In Fig. 8, if the torch is on the center of welding joint, that is, there is no shift, then welding current is shown as solid line. If torch is shifted to left, then the resulting current is shown as dotted line. When torch is shifted to right, which is the case not shown in the figure, the opposite pattern of current is expected.

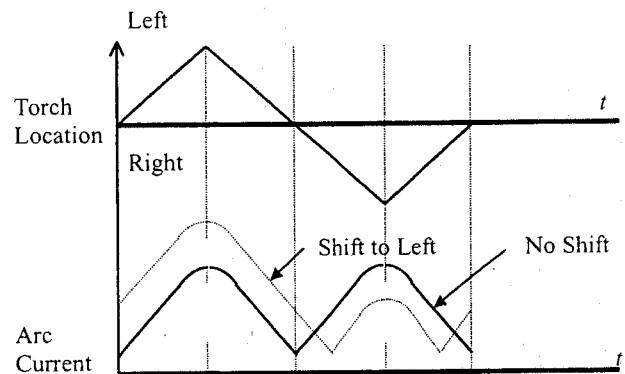


Figure 8. Current Pattern according to Torch Location

#### 4. Conclusion and Future Work

Automatic robotic welding system for joining H-beam at the building construction site is proposed. The difficulties of beam welding may be reduced by introduction of this automatic welding system, resulting that a worker can manage several beam welding by himself. Both laser sensor tracking and arc sensor tracking algorithm are successfully applied to find welding center line at the root pass.

Currently, the multi-pass welding is yet to be performed to finish the welding of H-beam. Since the thickness of H-beam usually requires tens of pass, it is very important to obtain optimal welding condition.

Since the developed system will be used at the construction site, the easiness to install this system is very important. The effort is under way to move and install all system by human workers in a relatively short period of time.

## 5. References

- [1] Japan Robot Association, *The Specifications and Applications of Robots in Japan - Non-Manufacturing Fields*, pp. 4-243, 1997.
- [2] M. Sugata, Y. Maruoka, K. Hasimura, K. Aoyama, C. Hagiwara, A. Suzuki, T. Fujii, H. Hosino and I. Matunaga, "Robotic field-welding of steel frame", *Proc. The 5th Symp. on Construction Robotics in Japan*, pp.433~438, July, 1995.
- [3] N. Okuyama, K. Koshida, Y. Yabe and Y. Yoshida, "Development and Application of a Welding Robot System on Construction Site", *Proc. The 3rd Symp. on Construction Robotics in Japan*, pp.237~242, July, 1993.
- [4] P. Sicard and M. D. Levine, "Joint recognition and tracking for robotic arc welding", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, pp.714-728, 1989.
- [5] Y. Kiyohara, "Application of latest arc welding robot with sychromotion and sensor", *Robot*, pp.37-43, vol.102, Jan.1995.
- [6] S. B. Moon, M. K. Yoon, Y. J. Hong and S. J. Hong, "The Development of Arc Sensor for Automatic Welding Using 6-Axis Robot", *Spring Conf of Korean Welding Society*, pp.15-18, 1995.
- [7] 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.

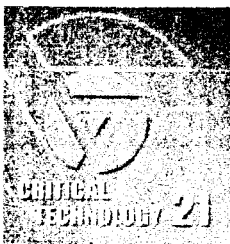
**Proceedings**

**2002 서비스로봇 SIG (Special Interest Group) 워크숍**

- 뇌신경정보학 사업단 연석 -

**일시 : 2002.6.24 - 2002.6.25**

**장소 : 용평리조트**



**과학기술부 국가중점연구개발 사업**

**Critical Technology - 21**

**주최 : 서비스로봇 기술개발 사업단**

**후원 : 뇌신경정보학 사업단**

여 백



## 워크숍 요약

### 모시는 글

안녕하십니까? 국가 중점 연구개발 과제인 서비스 로봇기술 개발 과제가 총 5차년도 중 4차년도를 마무리하는 시점에 이르렀습니다. 그동안 개발된 기술의 공유와 표준화를 도모하기 위하여 2002 서비스 로봇 SIG 워크숍을 개최합니다.

특히 이번 워크숍에서는 뇌신경정보학 사업단을 초청하여, 지능 로봇과 뇌과학 연구 간의 협력과 교류를 위한 장으로 활용하려고 합니다.

무더운 날씨지만, 각계 전문가 분들께서는 많이 참여하셔서 한국의 서비스 로봇 기술 개발을 위한 귀중한 자리를 만들어 주시기 바랍니다.

이 종원  
서비스로봇 기술개발 사업단장

6월 24일 일정	
2:00 - 4:30	개별 SIG Meetings (3개 group별 parallel sessions)
5:00 - 6:00	뇌신경정보학 사업단 발표 및 토의
7:00 - 9:00	전체 Workshop Meeting (각 group들의 토의결과 발표 및 전체 토의)
6월 25일 일정	
9:00 - 11:00	서비스로봇 사업단과 뇌신경정보학연구사업단의 협력방안 회의

SIG (Special Interest Group)는 서비스로봇기술개발사업에 참여하는 연구원간의 공통된 연구주제에 관한 기술교류 및 공유를 위하여 2001년 서비스로봇 워크숍에서 결성되었다. 현재 Control Architecture, Vision, Compliance Control 등 3개의 그룹이 있으며, 사업단내 다양한 연구기관의 관련 분야 연구인력이 참여하고 있다. 향후에는 뇌신경정보학 사업단과도 기술적 교류 및 협력을 확대할 계획이다.

여 백

## 목 차

### Session 1 : Control Architecture

SW architecture of PSR-1. 김건희, 정우진, 김문상 (한국과학기술연구원)..... 259

A Control Architecture In Service Robotic System – Rehabilitation Robot, KARESII.

김대진, 변증남 (한국과학기술원) ..... 280

### Session 2 : Vision

Vision Applications 박성기, 김문상 (한국과학기술연구원) ..... 309

A Human-computer Interface using Eye-gaze Tracking System

유동현, 정명진 (한국과학기술원).. ..... 324

### Session 3 : Compliance Control

Compliance for Service Robot Arm 강성철, 김문상 (한국과학기술연구원) ..... 349

Passive Compliant Joint 를 갖는 서비스로봇 암 디자인

윤성식, 강성철, 김문상 (한국과학기술연구원), 김영환, 여인택 (현대중공업) ..... 358

Field Evaluation of Compliant Robotic Arm for the Disabled. 강상훈, 장평훈 (한국과학기술원) 365

### Invited Session : 뇌신경정보학 사업단 연구 소개

Brain Neuroinformatics : Artificial Auditory System. 이수영 (한국과학기술원)..... 377

Flexible Inference and Learning Based on Brain Information Processing. 김명원 (숭실대)..... 406

뇌정보처리 메커니즘에 기반한 인공시각시스템연구. 김호준 (한동대학교), 양현승 (한국과학기술원).....	413
뇌정보처리 메커니즘에 기반한 인간행동 시스템 연구. 최진영 (서울대학교).....	427
워크숍 논의사항과 토의사항 및 논평 .....	464
서비스로봇 사업단과 뇌신경정보학 사업단간의 협력방안 논의 결과 .....	469

## **Session 1**


# **Control Architecture**

여 백

# SW Architecture of PSR-1

June. 24, 2002


Kim, Gunhee  
Advanced Robotics Research Center  
Korea Institute of Science and Technology

 Korea Institute of Science and Technology

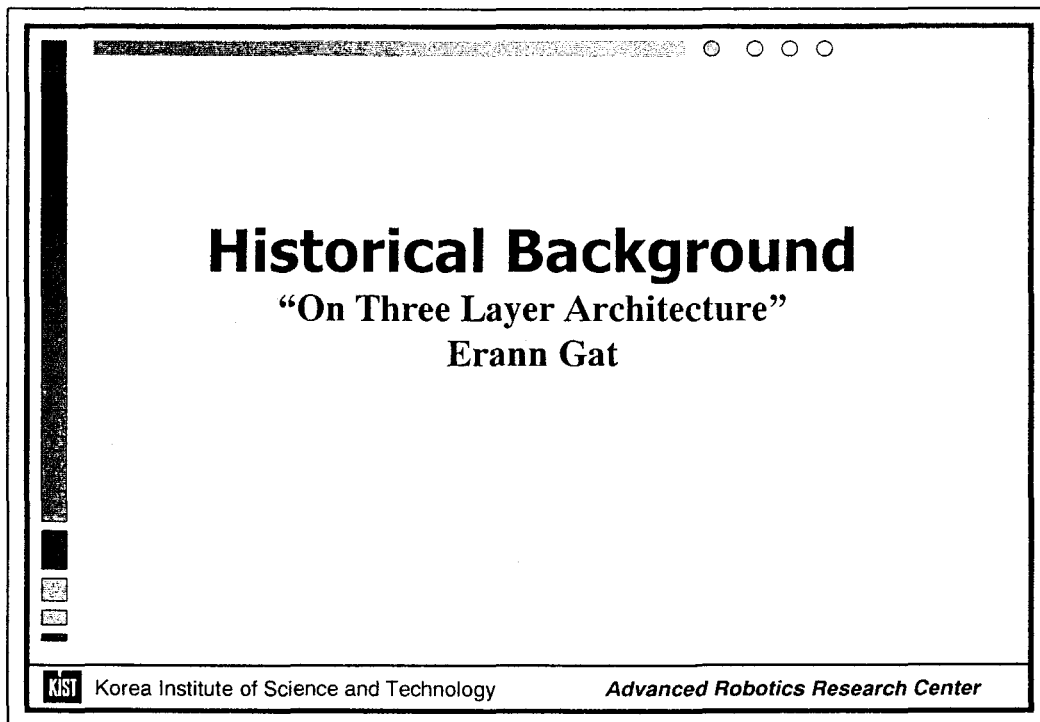
*Advanced Robotics Research Center*

## Contents

- Historical Background
- Survey
- Control Architecture of PSR-1
- Example
- Conclusion

 Korea Institute of Science and Technology

*Advanced Robotics Research Center*

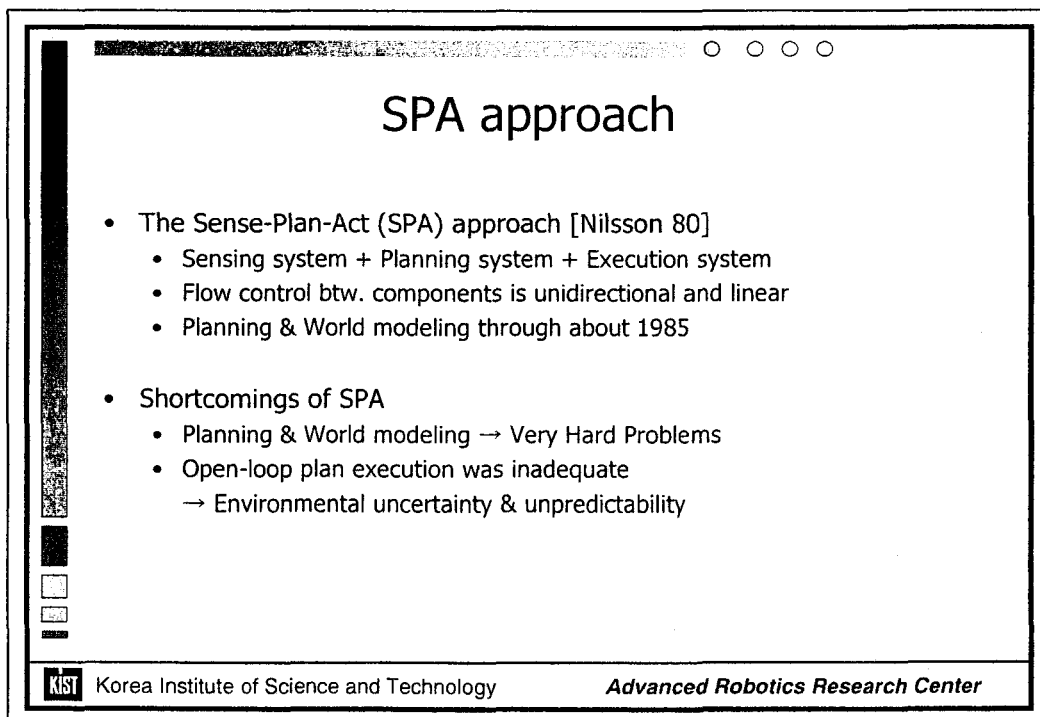


# Historical Background

## “On Three Layer Architecture”

Erann Gat

**KIST** Korea Institute of Science and Technology *Advanced Robotics Research Center*



# SPA approach

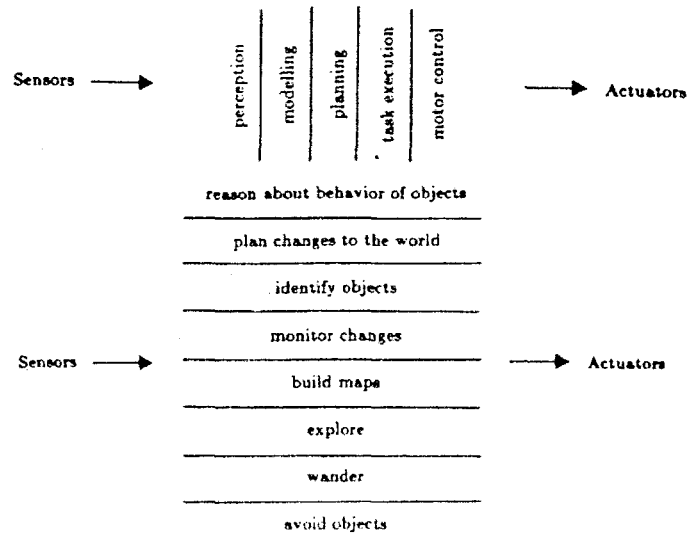
- The Sense-Plan-Act (SPA) approach [Nilsson 80]
  - Sensing system + Planning system + Execution system
  - Flow control btw. components is unidirectional and linear
  - Planning & World modeling through about 1985
- Shortcomings of SPA
  - Planning & World modeling → Very Hard Problems
  - Open-loop plan execution was inadequate
    - Environmental uncertainty & unpredictability

**KIST** Korea Institute of Science and Technology *Advanced Robotics Research Center*



## Subsumption architecture (1/2)

- Subsumption architecture [Brooks 96]
  - Complex behavior → NOT complex control, rather reflection of a complex environments
  - Traditional decomposition : A series of functional units
  - Brooks' decomposition : Level of competence



## Subsumption architecture (2/2)

- Subsumption Architecture
  - Higher level competence → specific desired class of behaviors
  - Control mechanism → Suppression of inputs or inhibition of outputs
  - Layering complex task-specific control programs (= behavior)
- Shortcomings of Subsumption architecture
  - Lacks mechanism for managing complexity
  - Not sufficiently modular  
(small changes to low-level behavior → redesigning the whole controller)
  - Very similar states of world mean different thing depending on the context.
  - Subsumption of low-level Bh by high-level Bh is not always appropriate.



## Three-layer (Hybrid) Architecture

- Three-layer (Hybrid) architecture
  - [Connell91] : SSS, [Gat 91] : ATLANTIS, [Bonasso 91] : 3T
  - Reactive control mechanism + Deliberative planner + Sequencer
- Why independently designed architecture turn out a similar structure ?
  - Problems of two approaches.
    - 1) Classic SPA : Planning(or world modeling) is time-consuming,  
Unexpected outcome from execution of a plan step
    - 2) Subsumption : Error handling
  - ⇒ Manage stored internal state information
  - Reactive part : minimize the use of internal state as much as possible
  - Planning part : extracting reliable information using internal state



## Three Layer Architecture (1/4)

- Three components
  - A reactive feedback control mechanism
  - A reactive plan execution mechanism
  - A mechanism for performing time-consuming deliberative computations
- Terminology
  - In 3T, skill layer + sequencing layer + planning layer
  - In ATLANTIS, controller + sequencer + deliberator



## Three Layer Architecture (2/4)

- Controller
  - One or more threads of computation (feedback control loops)
  - Tightly coupling sensors to actuators
  - Primitive behaviors ex. wall-following, moving to a destination
- Important Architectural Constraints of Controller
  - Computing one iteration should be constant-bounded time (small enough)
  - Never fail to detect a failure, but always fail recovery. (sequencer, deliberator)
  - Use of internal state should be avoided whenever possible.
  - Behavior should be continuous function w.r.t internal state.  
(Sequencer manages transitions between regimes of continuous operation)



## Three Layer Architecture (3/4)

- Sequencer
  - Select which behavior(s) the controller should use at a given time
  - Supply parameters for the behavior
  - Include constructs for responding to contingencies
  - Manage multiple parallel interacting tasks
- Important Architectural Constraints of Sequencer
  - Should not perform computations that take a long time for behavior



## Three Layer Architecture (4/4)

- Deliberator
  - Planning & other time-consuming computations
  - Interface to the rest of the system : 1) produce plans for the sequencer 2) response to specific queries from the sequencer
- Result
  - Not derived from theoretical considerations, Instead, derived from empirical observations



# Survey

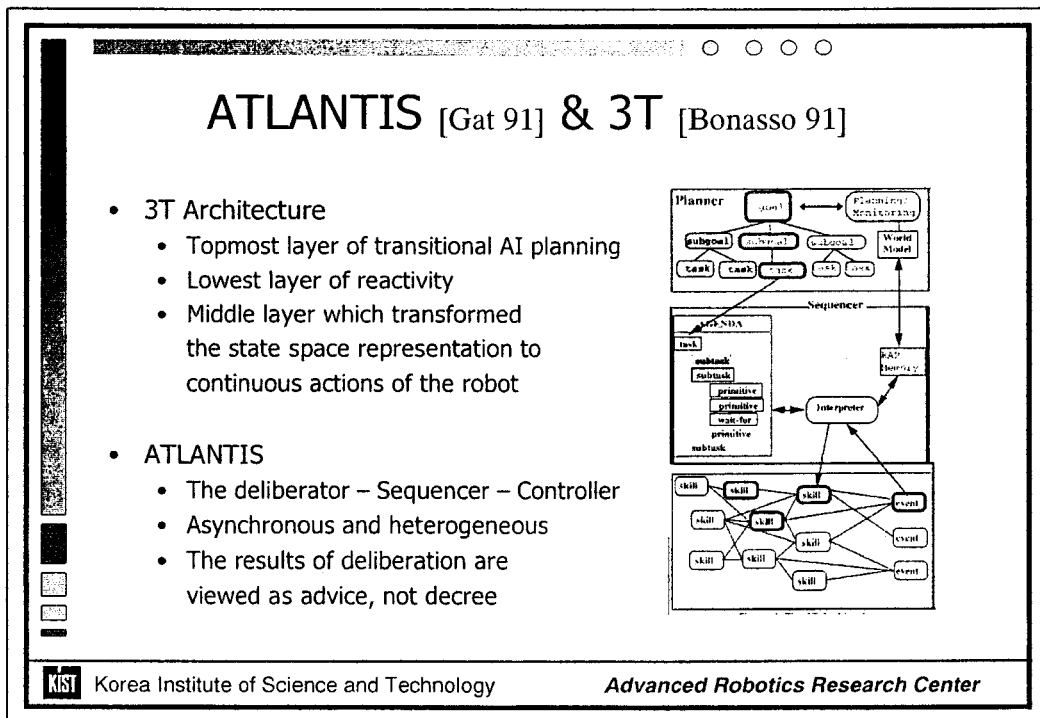
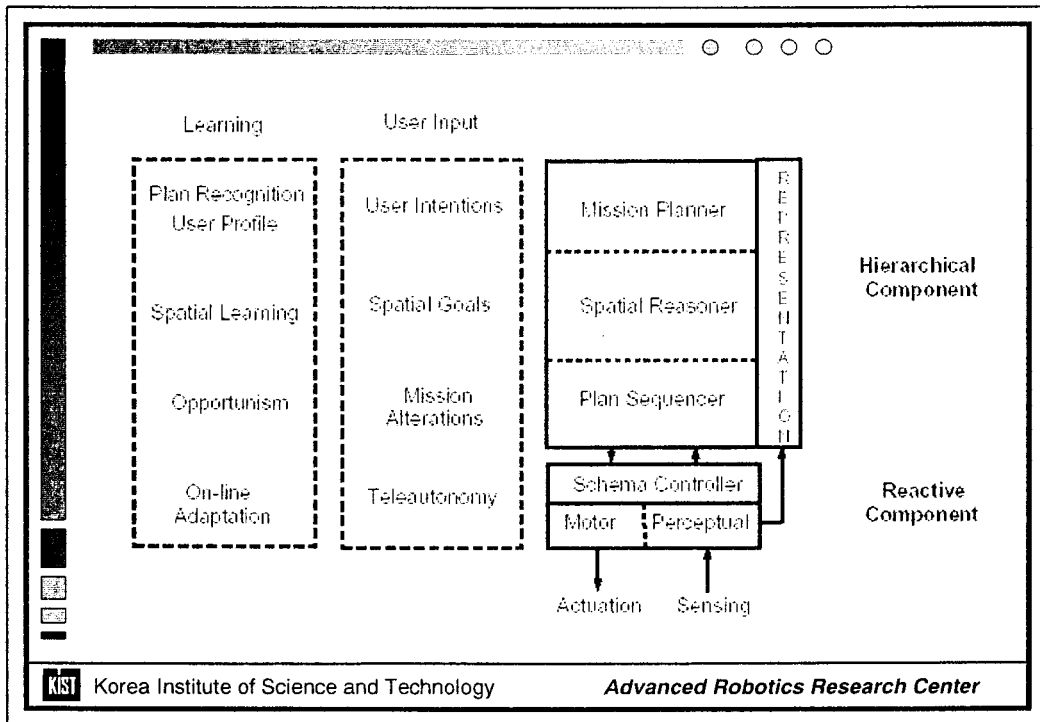
KIST Korea Institute of Science and Technology      *Advanced Robotics Research Center*

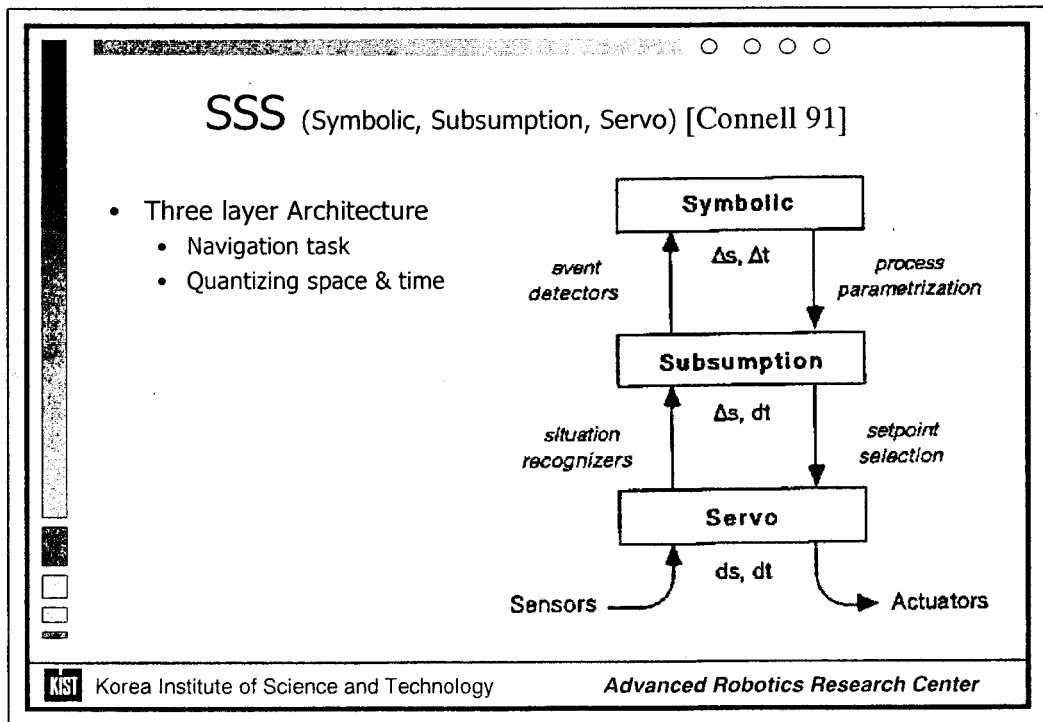
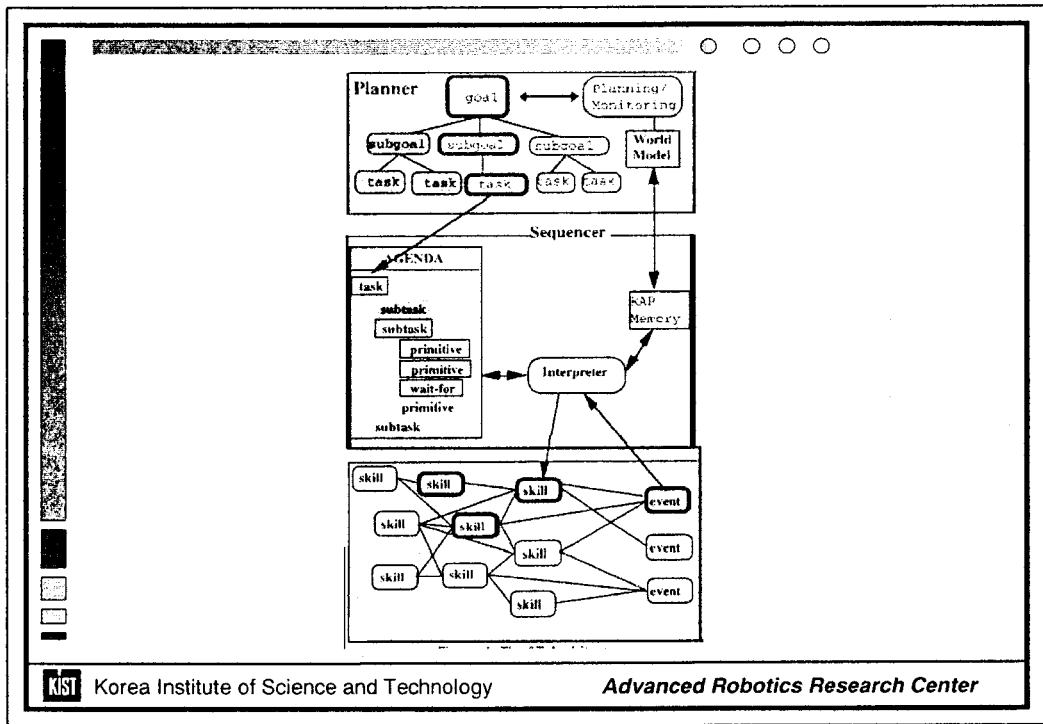
## AuRA (Autonomous Robot Architecture) [Arkin 90]

- Hybridization
  - Deliberative hierarchical planner + Reactive controller
  - Configuration that integrate behavioral, perceptual, and a priori environment
  - Deliberation and Reactive execution don't operate simultaneously

The diagram illustrates the AuRA architecture. It is divided into four main sections: Learning, User Input, Hierarchical Component, and Reactive Component. The Learning section includes Plan Recognition, User Profile, Spatial Learning, Opportunism, and Online Adaptation. The User Input section includes User Intentions, Spatial Goals, Mission Allocation, and Task Priority. The Hierarchical Component consists of Mission Planner, Spatial Reasoner, and Plan Sequencer. The Reactive Component includes a Dynamics Controller, Motor, and Propulsion. Arrows indicate the flow of information and control between these components.

KIST Korea Institute of Science and Technology      *Advanced Robotics Research Center*





○ ○ ○ ○

## TCA (Task Control Architecture) [Simmon 93]

- Facilities
  - Distributed inter-process communication
  - Task trees and temporal constraints
  - Resources allocation and management
  - Monitors - detect environment changes
  - Exception handling
- Mechanism for deliberation
  - Hierarchical representation of tasks
- Mechanism for reactivity
  - Monitoring & Exception handling

Korea Institute of Science and Technology

*Advanced Robotics Research Center*

○ ○ ○ ○

## MINERVA [CMU,RI 96]

- Four layer architecture
  - 20 distributed modules
  - Hybrid approach
  - Breakdown according to functionality
  - Concentrate on Navigation & HRI
  - Communication across multiple layer boundaries

**high-level control and learning**  
(mission planning, scheduling)

---

**human interaction modules**  
("emotional" FSA, Web interface)

---

**navigation modules**  
(localization, map learning, path planning)

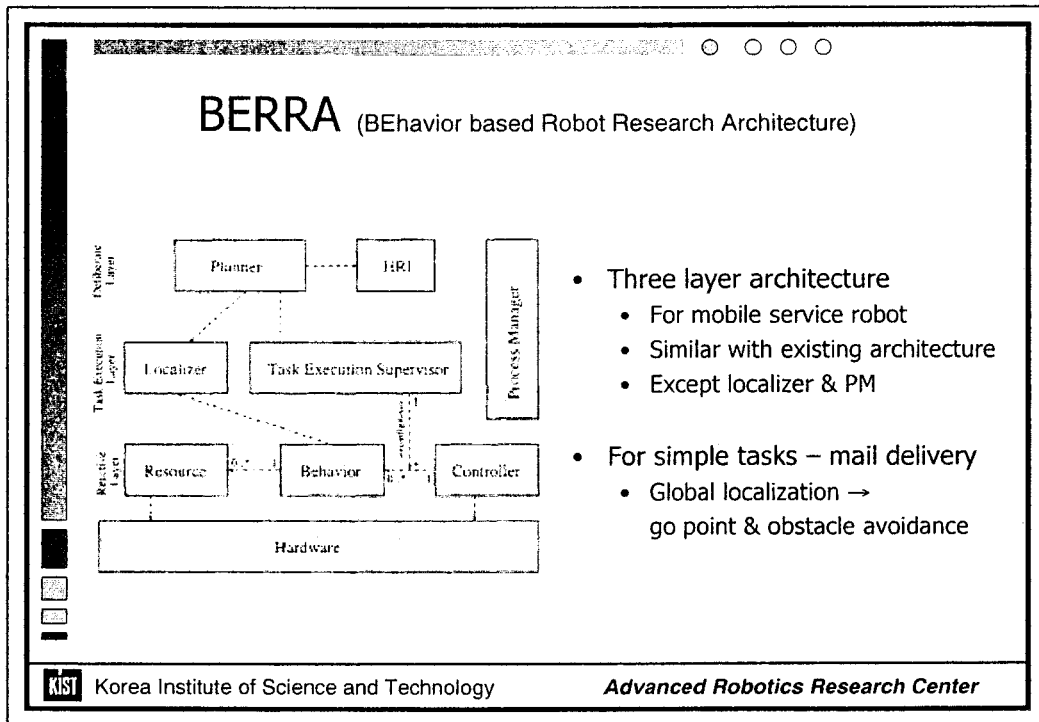
---

**hardware interface modules**  
(motors, sensors, Internet)

Korea Institute of Science and Technology

*Advanced Robotics Research Center*





# Control Architecture of PSR-1

(This slide contains the title and logos but no diagram or text content.)

**KIST** Korea Institute of Science and Technology *Advanced Robotics Research Center*

## Design Goals

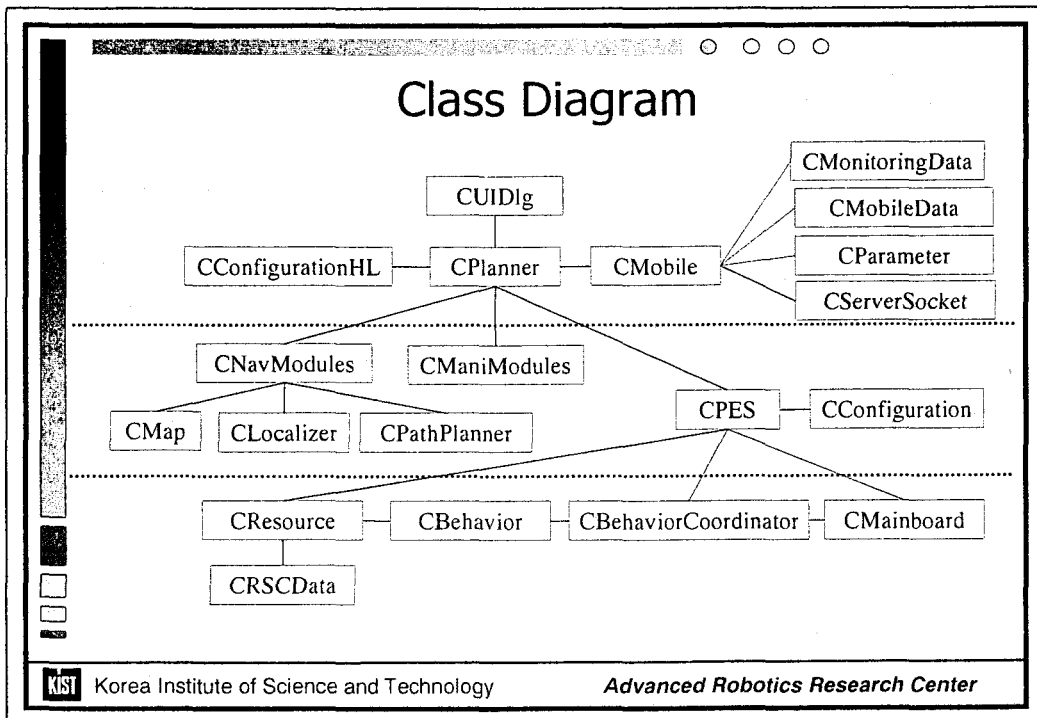
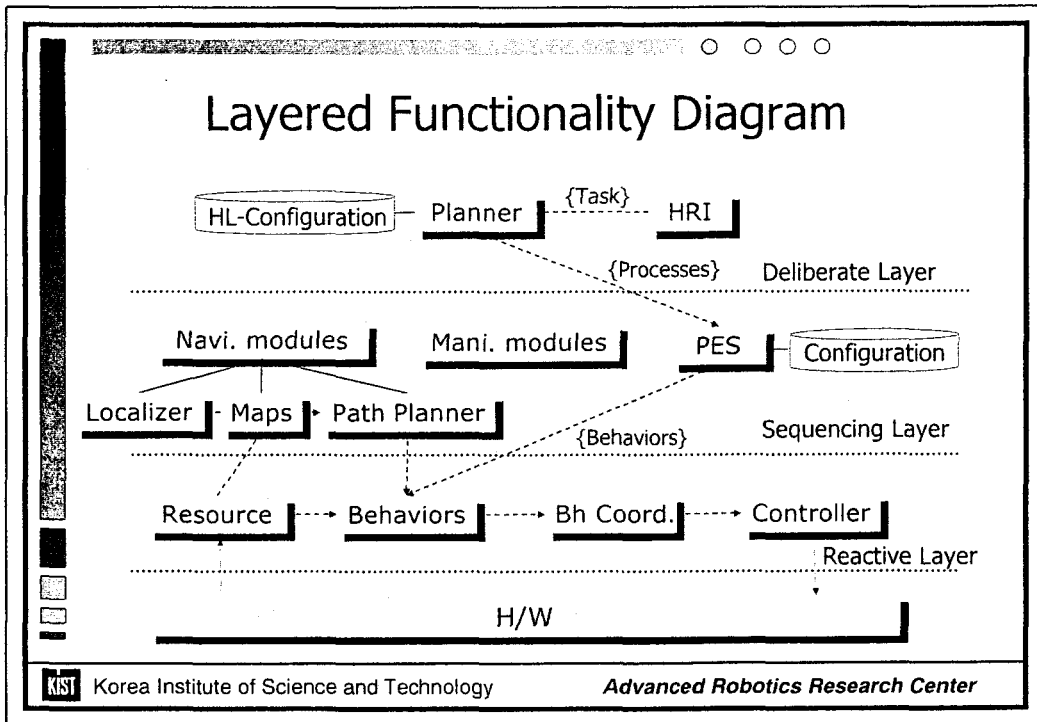
- Hybrid Deliberate/Reactive Approach
  - Practical approach, NOT philosophical
  - Converge to similar structure
- Autonomy
  - Execute a given task without human intervention
  - Planning as configuration strategy
  - Fault recovery
- Reliable Navigation & Manipulation
  - Various types of maps, localizers, and path planners
  - Mobile base + manipulator



## Control Architecture of PSR-1

- Layered Functionality Diagram
  - Conceptual diagram
  - Classify key components into three layers
  - Connectivity & Information flow
- Class Diagram
  - Implementation considering scalability & reusability
  - Instantiation & hierarchy
- Configuration Diagram
  - Planning
  - Relation between processes or behaviors
  - Error recovery





## Class Hierarchy

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 }

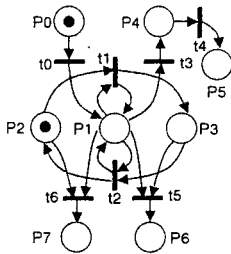


## Design and Modeling of Configuration

- The activities on the configuration level
  - Discrete possible state
  - event-driven
  - Flow chart, Automata, AND/OR-Nets and Petri-Nets
- Petri-Nets
  - Modeling and design of control logic
  - Graphical tool – 1) Visualization of control logic 2) Checking the states of robot 3) Error Recovery
  - Mathematical tool – 1) Set up mathematical models 2) analyze the designed logics



## Example – Process *AutoMove* (1/2)



PL / TR	Description
PL_AUTO_INIT (P <sub>0</sub> )	Standby
PL_AUTO_BH_AUTO (P <sub>1</sub> )	Execute behavior <b>BhAutomove</b>
PL_AUTO_NOGOALCHANGED (P <sub>2</sub> )	State : Goal has NOT been changed.
PL_AUTO_GOALCHANGED (P <sub>3</sub> )	State : Goal has been changed.
PL_AUTO_FLT_NOPATH (P <sub>4</sub> )	Fault : No path to goal exists
PL_AUTO_EMERSTOP (P <sub>5</sub> )	Stop behavior <b>BhAutomove</b> in emergency
PL_AUTO_FLT_GOALOCC (P <sub>6</sub> )	Fault : Fail to reach Original goal
PL_AUTO_END (P <sub>7</sub> )	Completion of given Process without Failure
TR_AUTO_START (t <sub>0</sub> )	Start
TR_AUTO_RETRYOCCU (t <sub>1</sub> )	Change original goal, then Re-try path planning.
TR_AUTO_OBSTREMOVED (t <sub>2</sub> )	The obstacle in original goal removed , and the goal is restored.
TR_AUTO_FLT_NOPATH (t <sub>3</sub> )	Conclude No path to goal exists.
TR_AUTO_EMER_STOP (t <sub>4</sub> )	Robot stopped moving because of fault.
TR_AUTO_FLT_GOALOCC (t <sub>5</sub> )	Conclude Reaching original goal is failed.
TR_AUTO_BH_AUTO_TRUE (t <sub>6</sub> )	Behavior <b>BhAutomove</b> completed successfully.

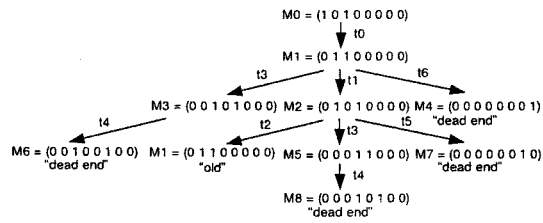
(t<sub>0</sub>: 내부, t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, t<sub>3</sub> : PP, t<sub>4</sub>, t<sub>5</sub>, t<sub>6</sub> : Bh)



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

## Example – Process *AutoMove* (2/2)

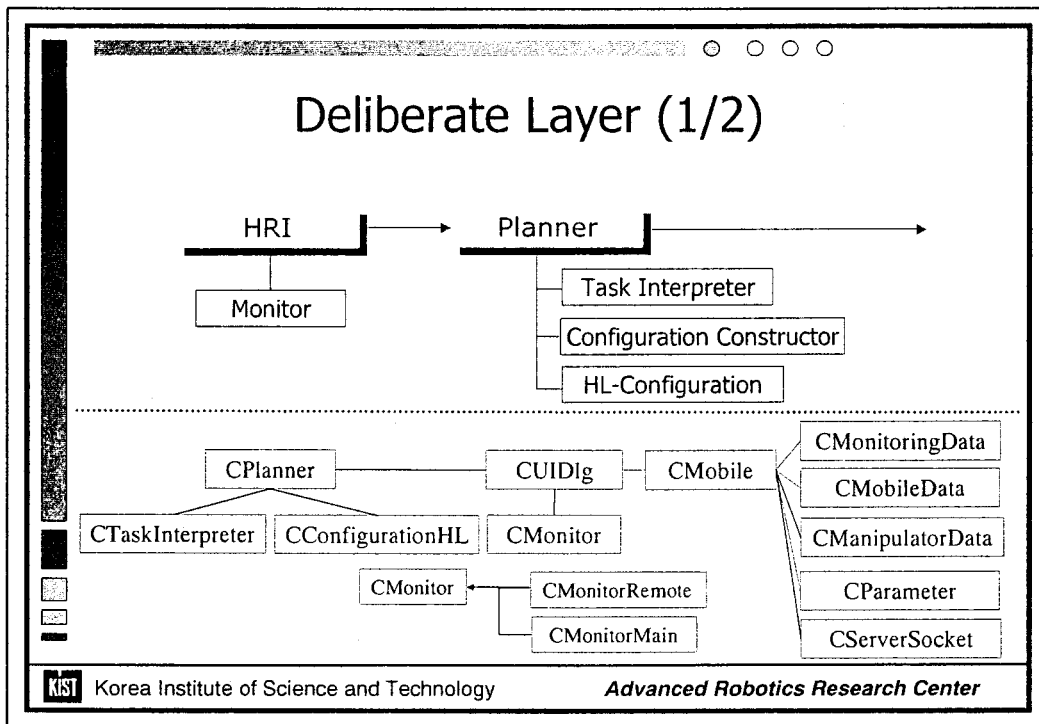


Symbol	Name	Symbol	
M0	MK_AUTO_INIT	M5	MK_AUTO_OCC_EMER_STOP
M1	MK_AUTO_BH_AUTO	M6	MK_AUTO_FLT_NOPATH
M2	MK_AUTO_OCC_BH_AUTO	M7	MK_AUTO_FLT_GOALOCC
M3	MK_AUTO_EMER_STOP	M8	MK_AUTO_OCC_FLT_NOPATH
M4	MK_AUTO_END		



Korea Institute of Science and Technology

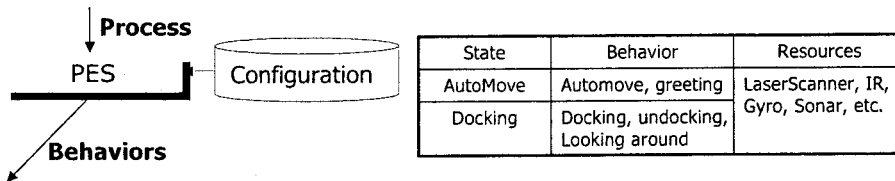
Advanced Robotics Research Center



- ## Deliberate Layer (2/2)
- Task interpreter
    - Interpret a given task to internal process
    - Automatic construction of configuration
    - Set process data from task data
  
  - Configuration
    - 주어진 task에 대하여 변환된 process들의 정보를 가진 database
    - Process들의 순서 관계, Exception handling에 대한 logic
    - Peti-nets model
  
  - Monitor
    - Display internal states of a robot and process of a task to Remote Center
- KIST Korea Institute of Science and Technology Advanced Robotics Research Center

## Process Execution Layer

- Process Execution Layer
  - Planer로부터 계획된 process를 수행하기 위한 Low - level control
  - Reactive layer 관리
  - Behaviors 및 resource 생성, 관리, 소멸.
- Configuration
  - 각 status에 대한 Behavior, Resource들에 관한 정보.
  - 순서 관계, Exception handling 도 포함.



## Navigation module

- Navigation module의 역할.
  - Long-term information 관리 - Information, Topological, Grid map
  - Localization Algorithm 관리 - MatchingLM, MonteCarlo
  - 다양한 level의 Path planner 관리 - Local, Topological Path planning
- TES Layer에 위치하는 이유
  - Long-term information, not reactive
  - Contains different level of map information



## Maps

- Types
  - Information map - 사용자가 인지할 수 있는 형태의 map ex. 본관 당직실.
  - Topological map - Node상의 connectivity ex. 지하철노선도
  - Grid map - Global & Local grid map
- Local grid map
  - HIMM 방법 이용. 10 X 10 (m) 크기
  - (Input) Laser scan data, Current position from Localizer
  - 0.2 sec 마다 update

## Localizer & Path planner

- Localizer – Where am I ?
  - Map의 level에 따라 수행.
  - Odometry + Monte Carlo Localization
  - (Input) Global & local grid map, Laser & Gyro data, current position
  - (Output) Current Position
- Path Planner
  - Map의 level에 따른 path planning
  - Wavefront algorithm.
  - Path planning + Trajectory generation
  - (Input) Goal position from behavior, Grid map from Local grid map
  - (Output) path Set to behavior



## Reactive layer (1/2)

- Behaviors
  - One or more threads of computation (feedback control loops)
  - Tightly coupling sensors to actuators
  - Accept behavior data from TES, inform TES of success or failure
- Behavior Coordinator
  - Behavior Fusion – 복수의 behavior로부터 복수의 속도 명령들을 받아 통합하여 controller에 연결한다.
  - Reactive layer 상의 Event detector – flow를 돌고 있으므로



## Reactive layer (2/2)

- Resources
  - Framework for facilitation the sharing of different kinds of sensor data
  - Fusing mechanism
  - Laser scanner, Vision modules, infra-red, Ultrasonic, Joystick, Encoder, Gyro
- Controller
  - Direct sending commands from Bh. Coord. To Robot's actuator
  - Mobile base, Manipulator, Hand.



# Examples

KIST Korea Institute of Science and Technology      *Advanced Robotics Research Center*

## Carrying a Document Box (1/2)

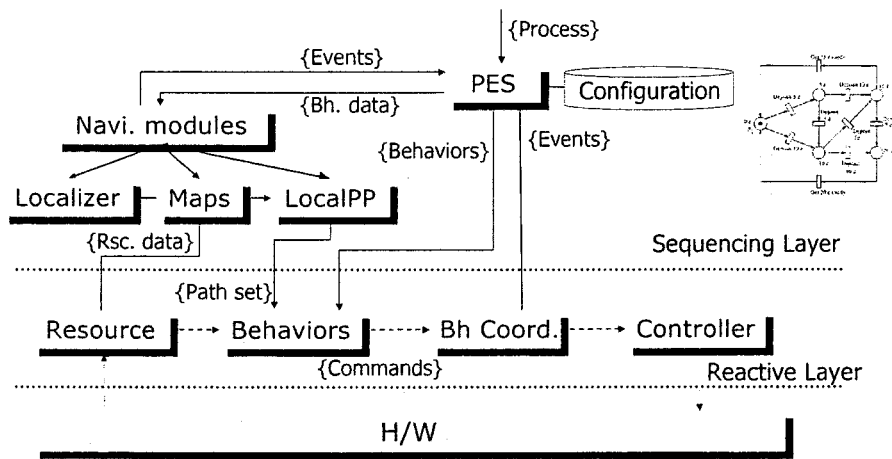
1. Interpret task  
2. Construct configuration

Deliberate Layer

방 A      방 B      방 C

KIST Korea Institute of Science and Technology      *Advanced Robotics Research Center*

## Carrying a Document Box (2/2)



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

## Conclusion

- Conclusion
  - Three-layer hybrid architecture paradigm
  - Development from Practical view
  - Reusability & Flexibility
  - Efficient run-time performance
- Future Works
  - Construct manipulation modules, high level mapping & path planning
  - Integration with manipulation
  - Improve Planner and HRI



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

# **A Control Architecture in Service Robotic System - Rehabilitation Robot, KARES II**

2002년 6월 24일  
CT21 Team, KAIST

## **Contents**

- Introduction
- Previous Works on Rehabilitation Robots
- Control Architecture of KARES II
- Future Prospects of KARES II
- Concluding Remarks

# Introduction

KAIST

CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

## Motivation

- **Grand Challenges for the IEEE Robotics and Automation Society**
  - Human-Robot Interfaces
  - Modularity
  - System Issues
  
- **System Issues**
  - **What is needed is an architecture for coherently combining all resources into an integrated system!**

J.D. Crisman and G. Bekey, "Grand challenges for robotics and automation: The 1996 ICRA panel discussion,"  
IEEE Robotics and Automation Magazine, 3(4): 10-16, Dec. 1996.

R.T. Pack et al., "A Software Architecture for Integrated Service Robot Development," IEEE Int'l Conf. on SMC, pp. 3774-3779, 1997.

KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

4

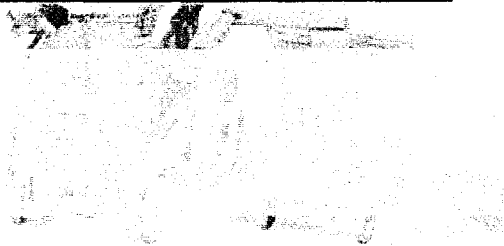
## Motivation

- **Difficulties in developing of KARES II**
  - There are various components for KARES II
    - Soft robotic arm
    - Eye-mouse
    - Haptic suit
    - EMG signal-based control system
    - Visual servoing system
  - How to integrate them into an integrated H/W platform?
  - After integration of H/W, how to extend its ability for twelve predefined tasks in efficient way?

## Objective

- **In view of control architecture...**
  - Previous works on rehabilitation robots are exemplified,
  - Currently implemented KARES II is mentioned,
  - Future prospects of KARES II is discussed.

## **Previous Works on Rehabilitation Robots**

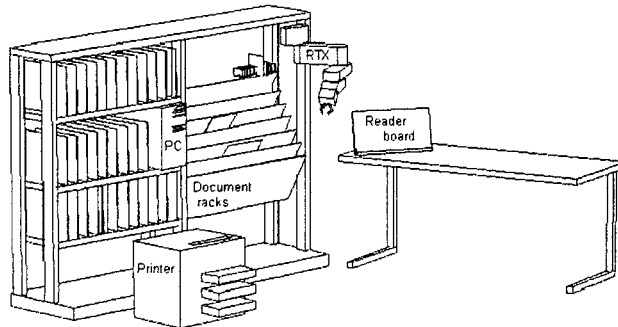


## **Rehabilitation Robots**

- **Workstation fixed system**
  - DeVAR
  - RAID\*
  - ISAC\*
  - AFMASTER
- **Mobile platform system**
  - Walky
  - MoVAR
  - Helpmate\*
- **Wheelchair-based system**
  - Wessex & Weston Robot
  - KARES I\*
  - FRIEND\*
  - RAPTOR

## RAID: Robot for assisting the integration of disabled people

- Provide manipulative assistance to severely physically disabled individuals within office environments
- Upgraded RTX robot arm mounted on a linear track
- An additional page-turning gripper



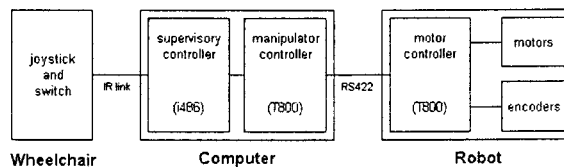
Dallaway JL, Jackson RD, Timmers PHA (1995) Rehabilitation Robotics in Europe. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering. 3. 35-45.

**KAIST** CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

9

## RAID: Robot for assisting the integration of disabled people

- The control architecture
  - Transputer-based motor control board to improve the resolution and repeatability of arm motion.
  - Enhanced manipulator-level control
  - Supervisory control
    - The MASTER language allows direct and pre-programmed control of the arm.
  - Communication between the operator and the PC
    - Infra Red (IR) link between a wheelchair-mounted joystick and workstation-mounted mouse emulation hardware.



Dallaway JL, Jackson RD (1993) The RAID workstation for office environments. Proceedings of the RESNA 93 Annual Conference. 504-506

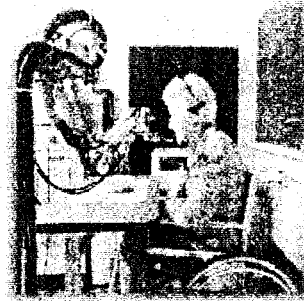
**KAIST** CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

10



## ISAC: Intelligent Soft Arm Control

- To insure ease of use, safety and flexibility of the system, integrated several sensors such as vision, voice, touch and ultrasonic ranging.
- The user interacts with the ISAC in natural language commands such as feed me soup.
- The Soft Arm (a prototype manipulator using actuators called Rubbertuators)



[http://eecs.vanderbilt.edu/CIS/IRL/html/intelligent\\_soft\\_arm\\_control\\_isac.html](http://eecs.vanderbilt.edu/CIS/IRL/html/intelligent_soft_arm_control_isac.html)  
KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

11

## ISAC: Intelligent Soft Arm Control

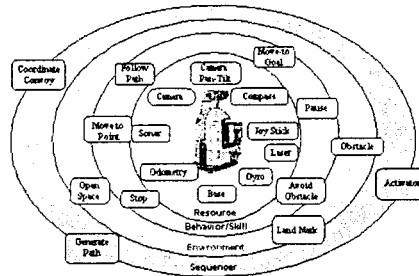
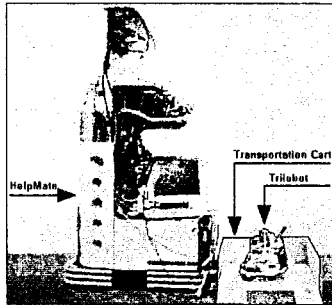
- Distributed object-oriented architecture
  - Blackboard scheme to communicate among system modules
  - Task planner
  - Parallel control
  - Reflex control
  - Voice system
    - Phonetic Engine 500 from Speech Systems, Inc.
  - Real-time face tracking
  - Object recognition

[http://eecs.vanderbilt.edu/CIS/IRL/html/intelligent\\_soft\\_arm\\_control\\_isac.html](http://eecs.vanderbilt.edu/CIS/IRL/html/intelligent_soft_arm_control_isac.html)  
KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

12

# HelpMate

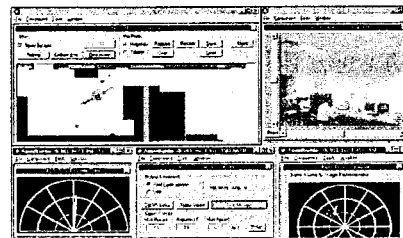
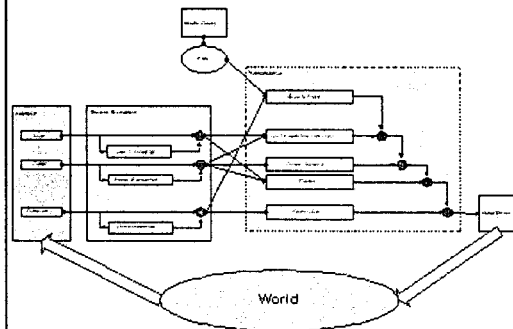
- An active LCD monitor with a 2-port switch kit
  - A Lidar sensor for navigation
  - A vision system, stereo cameras and two PCI color-frame grabbers
  - New control software, based on IMA2
  - Connection to the Internet via wireless Ethernet
- Intelligent Machine Architecture, IMA
    - Combination of local autonomy and user direction, enabling Helpmate to navigate hallways and rooms to accomplish tasks.
    - Based on behavior-based, Subsumption architecture



[http://eecs.vanderbilt.edu/CIS/IRL/html/helpmate\\_mobile\\_robot.html](http://eecs.vanderbilt.edu/CIS/IRL/html/helpmate_mobile_robot.html)

# HelpMate

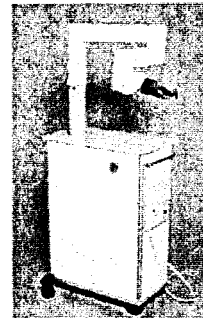
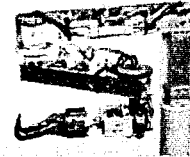
- Brook's Subsumption architecture
- Under the IMA architecture, HelpMate is designed to make use of user-centered interface as a means of designing Graphical User Interface (GUI) for display and control of mobile robots including their sensors.



[http://eecs.vanderbilt.edu/CIS/IRL/html/helpmate\\_mobile\\_robot.html](http://eecs.vanderbilt.edu/CIS/IRL/html/helpmate_mobile_robot.html)

## The Wessex Trolley Mounted Robot

- **Mobility**
  - Our solution to this has been to mount a manipulator on a wheeled trolley, which may be moved by a helper from room to room.
- **Low cost / Low volume manufacture.**
  - Bearing in mind the financial limitations of both state and individual in the UK, we are aiming at a target price of £6000.
- **Aesthetics**
  - The system is designed to provide an attractive and 'professional' appearance.
- **Safety**
  - Use of low powered motors as part of an inherently safe mechanical and electrical design.



<http://www.bath.ac.uk/bime/projects/robot/index.htm>

KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

15

## The Wessex Trolley Mounted Robot

- **User Control Strategies**
  - The system will operate both under the direct control of the user and the automatic replay of a previously programmed sequence of movements. These operations may be set up by the user to perform regularly needed tasks. Control may be by a simple switch input (e.g. hand switch, suck/puff switch or joystick) to a scanning menu system.

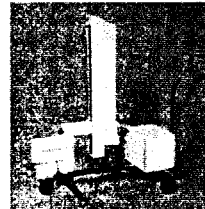
<http://www.bath.ac.uk/bime/projects/robot/index.htm>

KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

16

## The Weston Wheelchair Mounted Robot

- Potential users
  - Powered wheelchair users, with very little, or no use, of upper limbs, and weakness in trunk muscles.
- Benefits
  - The robotic manipulator replaces lost ability to interact with environment, giving increased independence and reduced reliance upon carer. Because it is mounted on the user's wheelchair freedom of mobility is maintained, thereby enhancing the usefulness of the robot.
- Specification
  - Be able to safely perform precise manipulation tasks close to face.
  - Be able to pick objects off the floor.
  - Not interfere with the daily use of the wheelchair (e.g. access, transfers, stability).
  - Have an appearance that is acceptable to the user.
  - Be priced under £15 000.
  - Based on the Wessex Robot



<http://www.bath.ac.uk/bime/projects/robot/index.htm>

**KAIST** CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

17

## The Weston Wheelchair Mounted Robot

- Mounting the arm on a wheelchair requires some different components, particularly a new vertical actuator to allow a much greater vertical range, and a suitable mounting point to the wheelchair. The control interface is being re-written for a joystick type input device.
- Developments on the Weston robot will be incorporated into the Wessex robot, particularly the design of a new gripper and improvements to the software and processor specification.
- Evaluation
  - Initial user evaluations were completed, with the manipulator mounted onto a trolley. This enabled users to gain experience of using the manipulator without it being actually mounted to their wheelchairs.

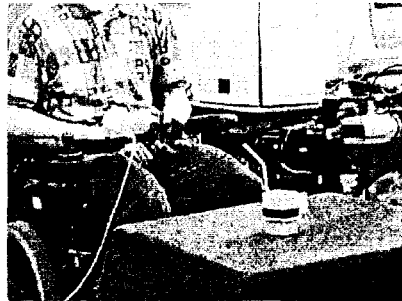
<http://www.bath.ac.uk/bime/projects/robot/index.htm>

**KAIST** CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

18

# KARES\* I

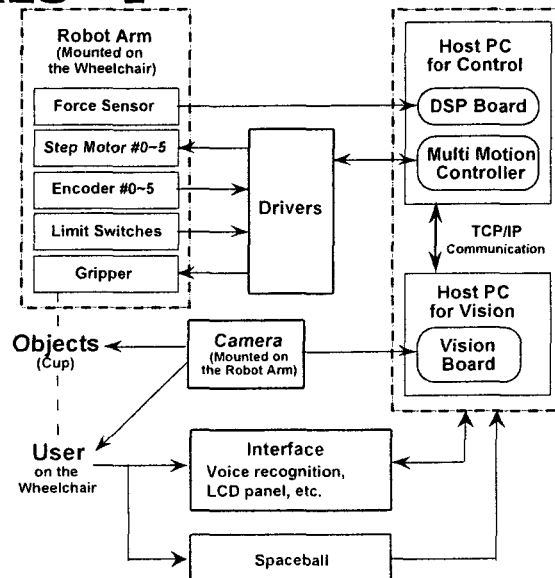
- May, 1996 ~ April, 1998.
- A wheelchair-mounted robotic arm.
- Assist the disabled and the elderly for the independent livelihood without any assistance.
- Sensors
  - Vision sensor(CCD camera)
  - Force/Torque sensor
  - Voice command
  - 6D input device



\*KARES: KAIST Rehabilitation Engineering Service System

KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

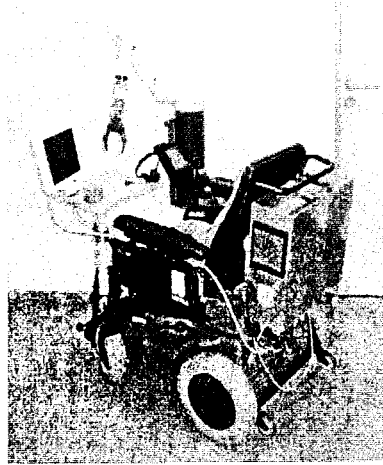
# KARES\* I



KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

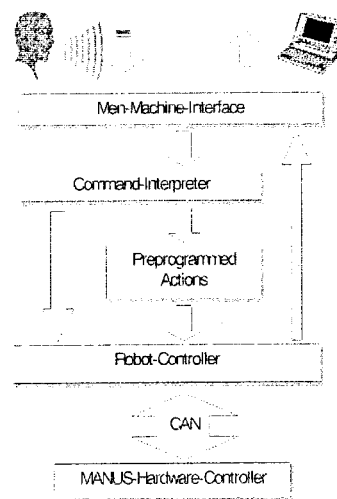
# FRIEND: A Functional Robotic Arm with User-Friendly Interface for Disabled People

- Electric wheelchair (Meyra germany)
- 6 DOF robot arm MANUS (Exact Dynamics - Holland)
- Dual Pentium 500 MHz with CAN-Interface
- Hand mounted miniature camera
- Pan-Tilt unit with mounted CCD-camera
- 12" flat LC-display mounted on a tray
- Speech Interface (IBM)
- ATX power supply



# FRIEND: A Functional Robotic Arm with User-Friendly Interface for Disabled People

- User commands via voice
- Commands transformed by an Interpreter
  - directed to the robot-controller (low-level)
  - Activation of pre-programmed actions (high-level)
- State of the system observable on flatscreen



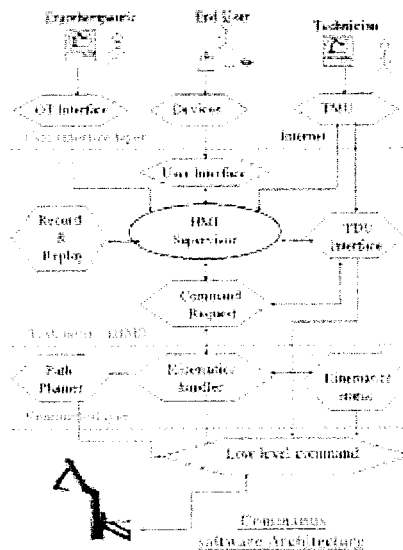
# COMMANUS Project

- Software & electronic design and evaluation of the open-structured rehabilitation robot MANUS
  - an R&D project which is supported by the Biomed 2 CRAFT research program of the EU
  - Nov. 1998~Nov. 2000
- *New user interfaces* are new features in this project are.

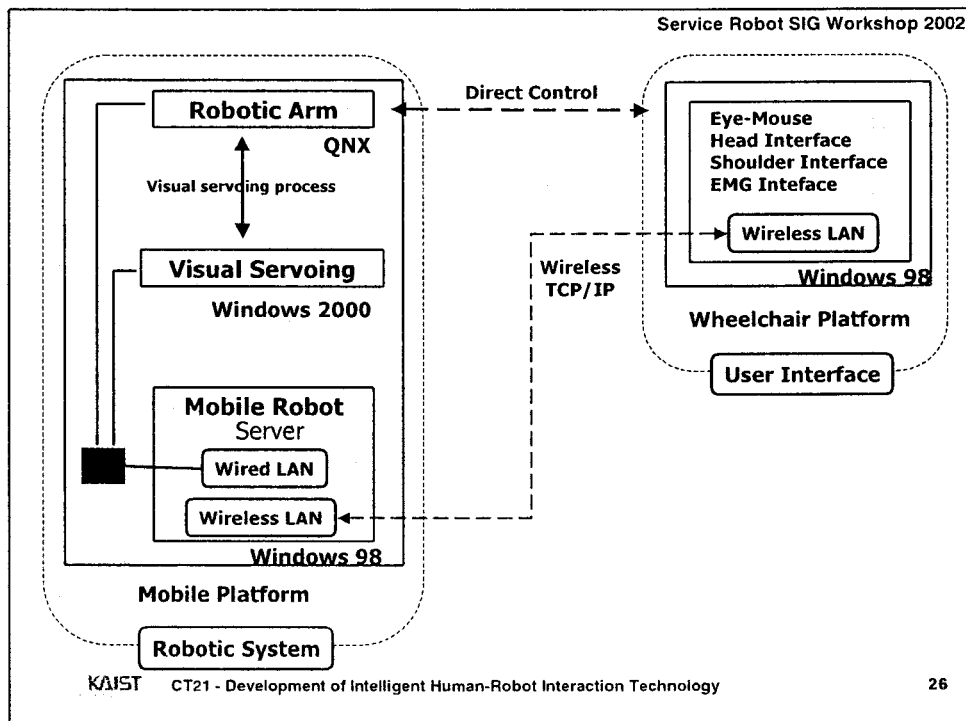
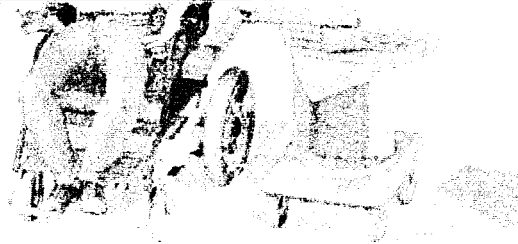


# COMMANUS Project

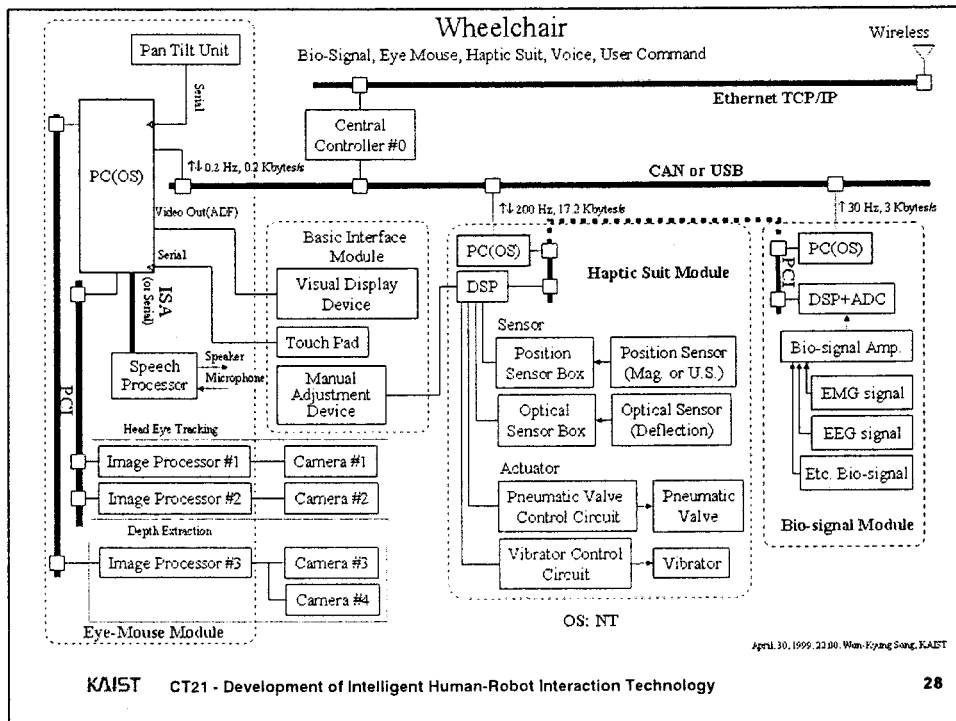
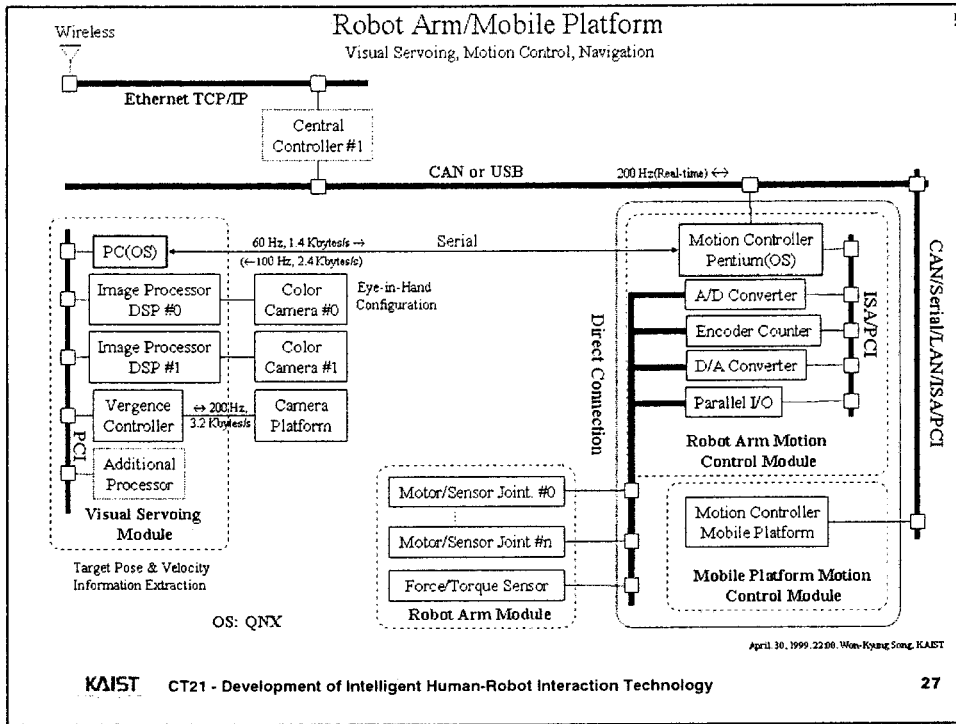
- User interface level
- Command system level
- Remote-maintenance and Tele-diagnostic

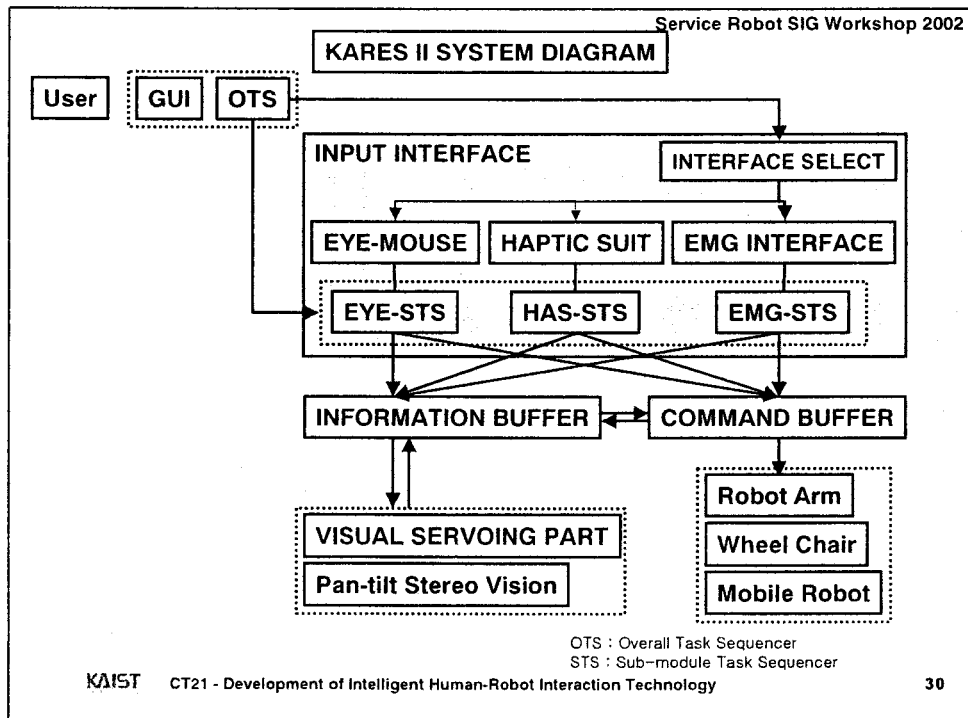
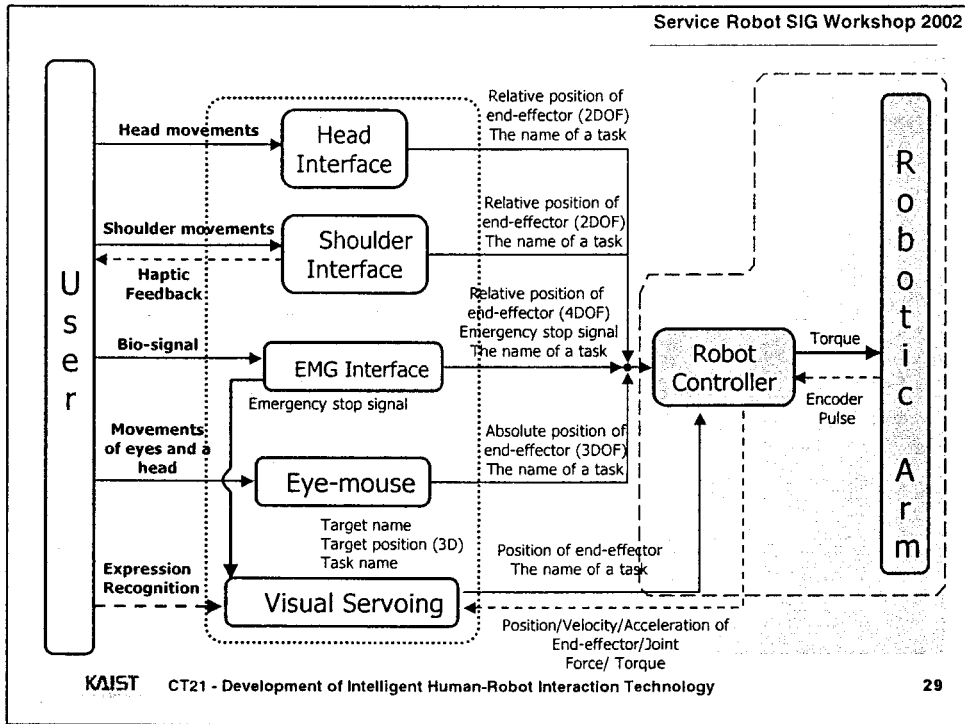


# Control Architecture of KARES II









# Server/Client Programming

- Objective
  - Refinement of conventional S/W structure
    - Efficient command combination and execution is not easy due to complicated structure.
    - Expansion and modification of tasks is hard job because of sequential structure of each task.
  - Necessary functions
    - Tolerant for communication problems itself (e.g. server/client disconnection)
    - Self diagnosis for fault
  - Modification (or refinement) of communication protocol is necessary.
  
- On-going status
  - Redefinition of communication protocol
    - Command sequence for twelve scenarios are proposed.
    - First version of communication protocol is constructed based on inter-module communication for predefined twelve tasks.
  - Pre-program test will be done according to each task.



# Server/Client Programming

## Command Set & Data Structure

Primitive	Command #1	Command #2	Command #3
SET	TASK_NAME PROCESS_START PROCESS_STOP  MOVE	CONT_REQUEST PROCESS POSITION VELOCITY PREPROGRAM	
REQUEST	INFO  STATUS	POSITION VELOCITY PROCESS_RESULT	ONCE CONTINUOUS
RETURN	INFO  STATUS	POSITION VELOCITY PROCESS_RESULT WORK_END EMERGENCY	given set command
NOTIFY	INFO  STATUS	POSITION VELOCITY PROCESS_RESULT WORK_END EMERGENCY	given set command

```

Struct Kares2Protocol{
    char StartParity;
    char Priority;
    unsigned int SendID;
    unsigned int ReceivedID;
    unsigned int command;
    int tag[3];
    float Param[6];
    char StopParity;
}
            
```

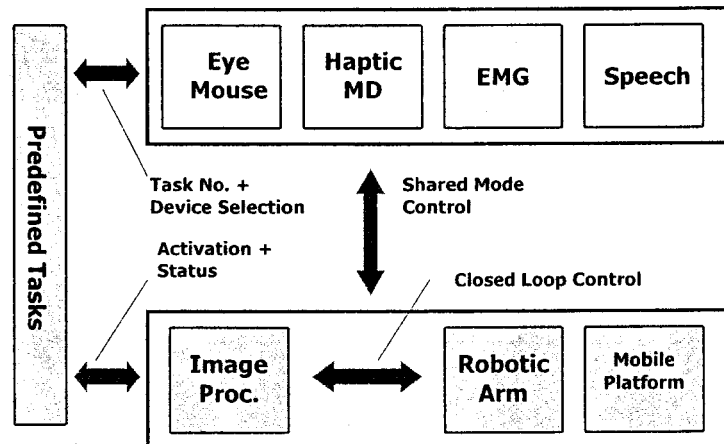
Error detection parity check  
 Command priority check  
 Command - main  
 Command - detail  
 Command - parameter

Tag[3]=[target/abs(res)/coordinates]  
 or [task no./work no.]  
 or detail tag corresponding command set

# Future Prospects of KARES II



## Current Architecture KARES II \*\*Logical View\*\*



## Things to be done!

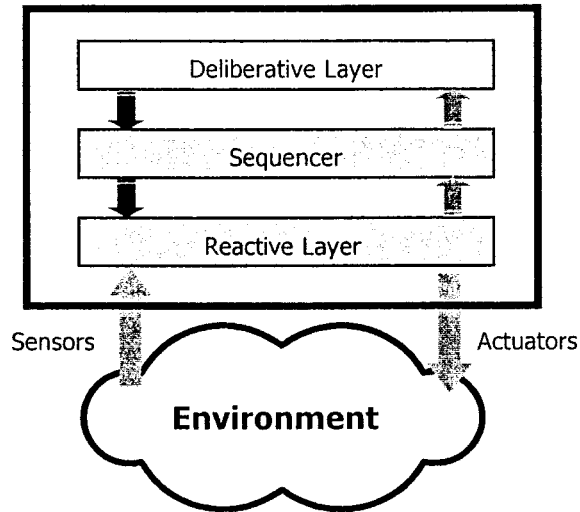
- Interruptible and Flexible Execution
  - Make low-level services interruptible (already possible in principle)
  - Make list of operators in preprogrammed task procedure interruptible → create “Sequencer”
- Modular HMI approach
  - Encapsulate HMI components
  - Introduce layer for HMI command interpretation and context switches
  - Define uniform protocol to activate tasks, to control low-level services, ...

## “Evolutionary Transformation” into Multi-Layer Architecture

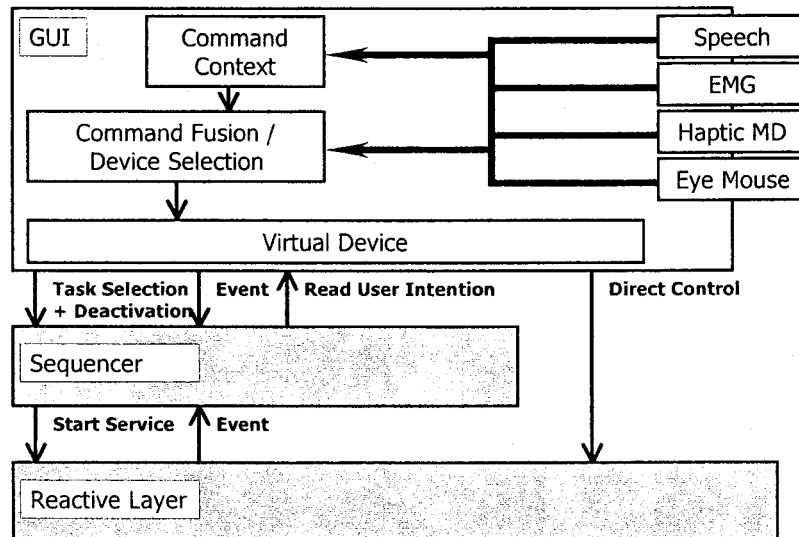
Control architecture is necessary but only as  
“tool”and not as “subject for investigation”

- Transformation into Multi-Layer Architecture
  - Well known principles
  - High level abstraction system description
  - “Natural” way of encapsulation
- Evolutionary approach
  - Re-use of software components
  - Acceptance
  - Experience
  - “Never touch a running system” ☺

# The Multi-Layer Architecture

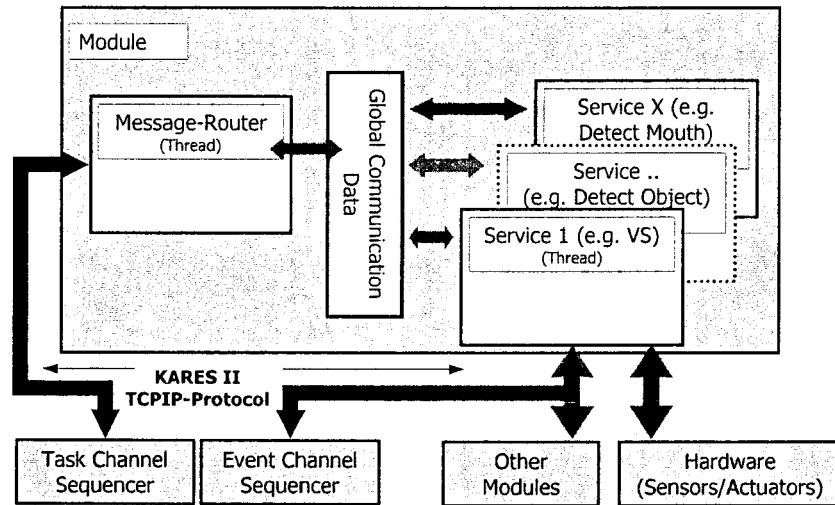


# "HMI Layer"

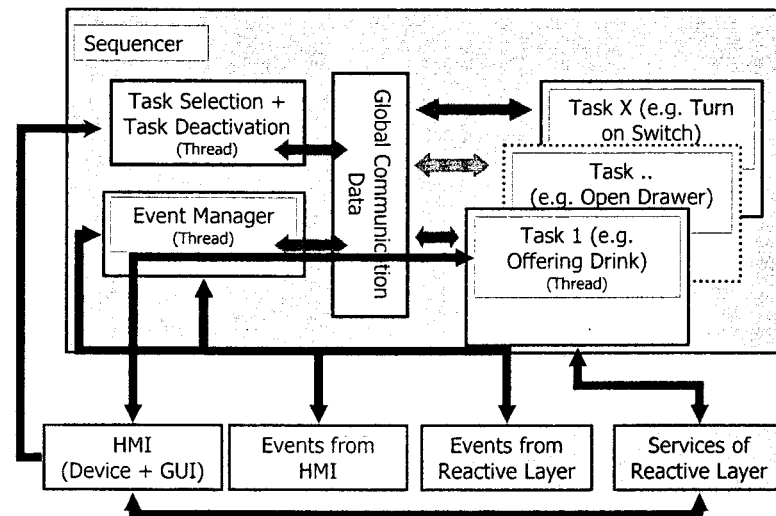


C. Martens et al., "Concept for a Modified Hybrid Multi-Layer Control-Architecture for Rehabilitation Robots," Int'l Workshop on HWRS2002, Jan. 2002.

# "Reactive Layer"



# "Sequencer"



# Example Task: Serve a drink

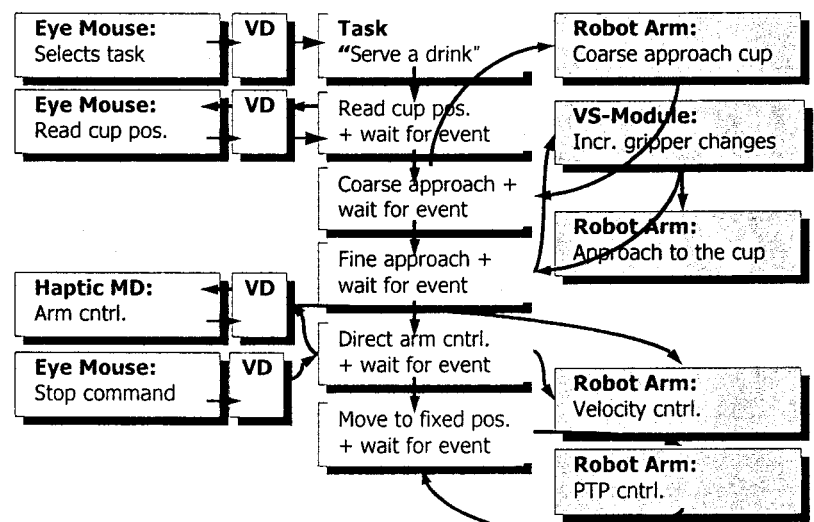
## What has changed??

- Eye-mouse:** Deciding Task No., Extract the rough information of the object(position)
- Robot Arm:** Approach to the cup (just nearby the cup)
- Image Processing Module:** Centering the object (velocity move command to the arm)
- Robot Arm:** Grasping a cup and approach to the mouth
- Haptic suit:** Arm control (positive, negative or stop intention)
- Eye-mouse:** Stop Command
- Robot Arm:** Move to the initial Pos.

Task Sequence

# Example Task: Serve a drink

## What has changed??





## **Concluding Remarks**



## **Summary**

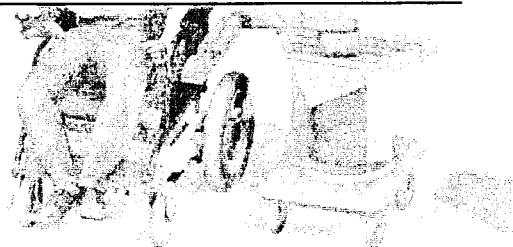
- In this talk, we mention about the control architecture problem in view of rehabilitation robot, KARES II.
- Current architecture of KARES II should be modified to enable flexible expansion of possible tasks.
  - Interruptable
  - Modular HMI
  - Distributed architecture

## Further Works

- Redefinition of appropriate communication protocol (or data structure)
- Separation of complex structure for each subsystems
- Implementation for predefined twelve tasks of KARES II

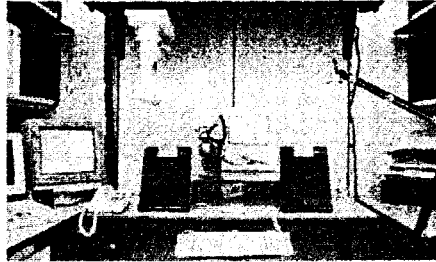
## Appendix

---



## DeVAR: Desktop Vocational Assistant Robot (1989-1994)

- Desktop vocational environment
- Use the robotics technology in a vocational training context
- PUMA-260 manipulator
- The track allowed the small manipulator to have a large working volume, including side shelving, the work surface, and an approach to the user.
- The Otto-Bock prosthetic Greifer(TM), modified for servo-control, provided the proper mix of esthetics and function at a reasonable weight.



H.F.M. Van der Loos, VA/Stanford Rehabilitation Robotics Research and Development Program: Lessons Learned in the Application of Robotics Technology to the Field of Rehabilitation. IEEE Trans. Rehabilitation Engineering, Vol. 3, No. 1, March, 1995, pp. 46-55.

**KAIST** CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

47

## DeVAR: Desktop Vocational Assistant Robot (1989-1994)

- Lessons Learned
  - Tasks became "operational environments" for interdependent actions
  - The workstation robot was viewed by users as an appliance
  - Do not turn robot users into robot programmers
  - Work with the robot's capabilities, not against them
  - Technical documentation is a key to productization
  - The developer needs to stay in the loop during and after the technology transfer

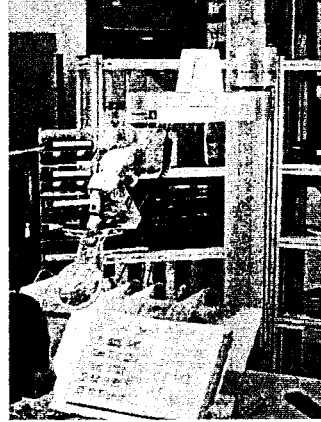
H.F.M. Van der Loos, VA/Stanford Rehabilitation Robotics Research and Development Program: Lessons Learned in the Application of Robotics Technology to the Field of Rehabilitation. IEEE Trans. Rehabilitation Engineering, Vol. 3, No. 1, March, 1995, pp. 46-55.

**KAIST** CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

48

## AFMASTER

- Those who will benefit from this equipment
  - Those concerned by a lack of autonomy who have a pronounced or chronic physical disability (tetraplegic, paraplegic, stroke, loss of use limbs)
  - Adolescents and adults
  - Absence of the need for prior training
  - Absence of psychological problems and neuropsychology
  
- The commands are given by :
  - mouse (or other control device- joystick, infrared head-movement detector)
  - or by voice recognition
  - The selection of the command is helped by an icon menu showing the programs and actions available.



<http://www.afma-robots.com/pages/welcome.htm>

**KAIST** CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

49

## AFMASTER

- The computer supervision\* allows :
  - The control of the users environment (domestic), the office and tele-working
  - recreation and other domestic tasks.

\*can be sold separately, independent of the robot.  
 This system integrates the software AFMASTER, allowing the control of the environment, and permits in the future the addition of complimentary elements to the AFMASTER cell.

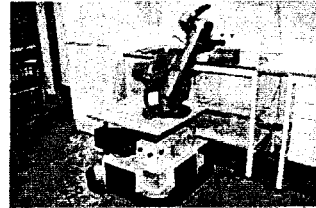
<http://www.afma-robots.com/pages/welcome.htm>

**KAIST** CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

50

## WALKY

- Mobile robot system designed to assist physically disabled people to work in a chemical laboratory
- THE DESIGN OF THE MOBILE ROBOT SYSTEM
  - The outside dimensions of WALKY's base are 700 x 750 mm and the maximum height is 1350 mm (when the elbow is in the upper position) and WALKY consists of the following main components:
  - Mobile base, Labmate, with a sensor system and local network.
  - 5-axis robot, Scorbot ER VII.
  - Wireless radio modem.
  - Communication computer



Dallaway JL, Jackson RD, Timmers PHA (1995) Rehabilitation Robotics in Europe.  
 IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering. 3. 35-45.  
<http://www.certec.lth.se/doc/walkyan/>

KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

51

## Mobile Vocational Assistant Robot (MoVAR): 1983-1988

- 3-wheeled omni-directional base with a PUMA-250
- A telemetry link to a console received commands and sent position and status information.
- The mobile base
  - bumper-mounted touch sensor system to provide autonomy in the face of obstructions
  - wrist-mounted force sensor and gripper-mounted proximity sensors to assist in manipulation
  - camera system to display the robot's activities and surroundings to the user at the console
- keyboard, voice, and head-motion inputs for command and cursor control, and voice output.



H.F.M. Van der Loos, VA/Stanford Rehabilitation Robotics Research and Development Program: Lessons Learned  
 in the Application of Robotics Technology to the Field of Rehabilitation.  
 IEEE Trans. Rehabilitation Engineering, Vol. 3, No. 1, March, 1995, pp. 46-55.

KAIST CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

52

## Mobile Vocational Assistant Robot (MoVAR): 1983-1988

- Lessons Learned
  - A mobile robot needs to have subsystem-level redundancy to be safe
  - The 9-DoF system required more computer power than could be placed on-board
  - Without AI capability, interface complexity increases with robot capability
  - Task and motion preview capability avoids unneeded robot motion
  - A mobile robot needs to be able to pick things off the floor

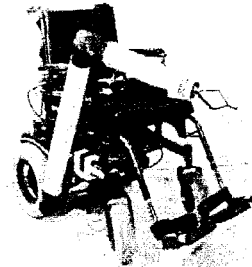
H.F.M. Van der Loos, VA/Stanford Rehabilitation Robotics Research and Development Program: Lessons Learned in the Application of Robotics Technology to the Field of Rehabilitation.  
IEEE Trans. Rehabilitation Engineering, Vol. 3, No. 1, March, 1995, pp. 46-55.

**KAIST** CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

53

## Raptor

- The Raptor provides unprecedented levels of independence and access to the environment for individuals with severe disabilities.
  - Joystick, keypad, or sip-and-puff interface
- Safe and easy to use.
- Standard Features
  - Raptor Manipulator
  - RX200 Control Interface
  - Chair Mounting Bracket
  - Choice of joystick, keypad, or sip-and-puff control device.
  - Fast and Slow Mode Selector
  - Protective Sleeve



<http://www.wheelchairrobot.com/>

**KAIST** CT21 - Development of Intelligent Human-Robot Interaction Technology

54

## **Session 2**

### **Vision**


여 백



SIG Workshop


# Vision Applications

KIST, Advanced Robotics Research Center  
2002. 6 .24~25

 Korea Institute of Science Technology *Advanced Robotics Research Center*


## Contents

- Robot-Environment Interface
  - Visual Navigation
  - Visual Servoing (Door Open)
  - Object Recognition
  
- Robot-Human Interface
  - Face Recognition
  - Human Detection

 Korea Institute of Science Technology *Advanced Robotics Research Center*


○ ○ ○ ○

- Robot-Environment Interface
  - Visual Navigation
  - Visual Servoing (Door Open)
  - Object Recognition


 Korea Institute of Science Technology
Advanced Robotics Research Center

Survey - Depth & Line


Feature Map-rep	Depth	Line
Grid-based	1) 1999, ICRA , U of British Columbia, Little (Spinoza) 2) 1990, IEEE SMC, Asada (layered 2D)	
Topology		
3-D Model	1) 1989, IEEE R&A, Binford : Vertical edge & stereo	1) 1995, IROS, Kriegman 2) 2000, ISER2000, SRI, Konolige : 3D plane model

 Korea Institute of Science Technology
Advanced Robotics Research Center

Survey - Landmarks		
	Artificial Landmark	Natural Landmark
Grid-based		
Topology	1) 2000, IROS Devy : learning planar poster 2) 1997, JRS, Tummala : circular 3D landmark	1) 1997, IROS , Hellas, Garavelos : automatic landmark selection 2) 1998, IEEE R&A, Kriegman 3) 1997, IEEE R&A, Hager : image-based prediction 4) 2001, IROS, Yuta : using appointed landmark
Etc	1) 1995, PR , Aggarawal : simple geometrical pattern	


 Korea Institute of Science Technology
 *Advanced Robotics Research Center*

Survey – Image-based		
	Image-based	
Grid-based		
Topology	1) 1996, ICRA , U of Tokyo, Inoue : image sequence	
	1) 1996, AAI, CMU, Thrun : Mosaic of ceiling image 2) 1998, TR-CMU, Hebert : edge-map based, outdoor 3) 2000, IROS, CMU, Kelly : Mosaic of floor image	

 Korea Institute of Science Technology
 *Advanced Robotics Research Center*

Research Focus

- Natural
  - Using Natural landmark
- Low computational cost
  - Using 2D based visual information

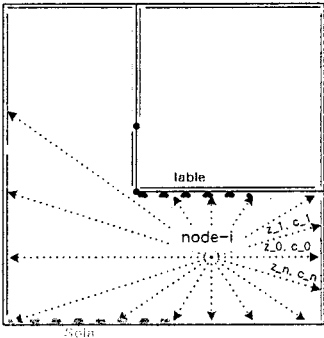
 Korea Institute of Science Technology
Advanced Robotics Research Center


Map representation

- Feature
  - Pixel depth
  - Pixel color

Room-2

Room-1



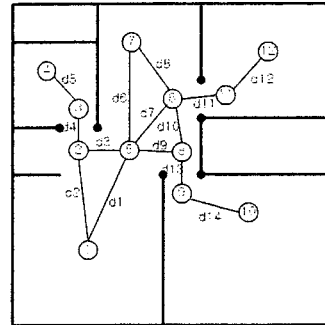
 Korea Institute of Science Technology
Advanced Robotics Research Center

## Map representation (cont'd)

- Multi-node : Graph theory
  - d1~d14 : distance between two nodes
  - Adjacent matrix

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



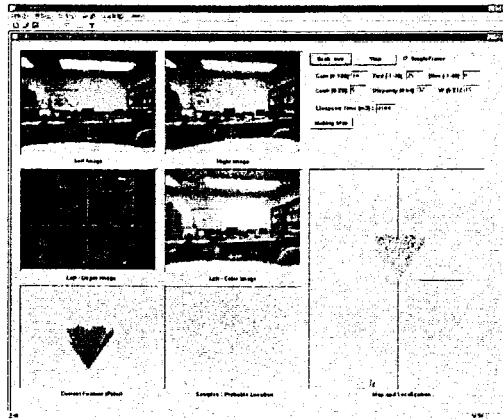
- Using multiple local coordinate system
- NOT using global coordinate system!

## Map building process

- Step-1 : Select Initial position.
- Step-2 : Making node-data during camera panning.
  - Node name, Depth, Color, Descriptive information
- Step-3 : Moving robot and stop.
  - Select nodes which need to connect present node
  - Estimate translation and rotation w.r.t selected nodes
  - Do Step 2
- Step-4 : Do step-2 and step-3 until the environment is well defined.

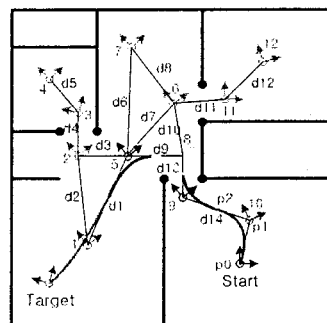
## Localization

- Condensation method



## Path planning

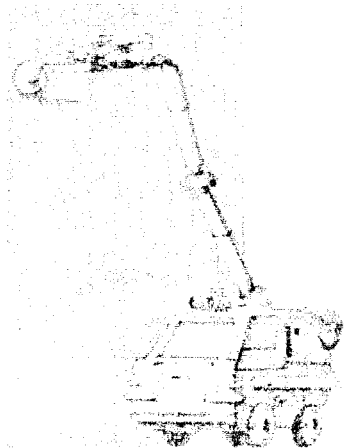
- Path following : Curved-type local path
  - Find intersection points between adjacent nodes.
  - Using 3 points Bezier curve
 
$$\mathbf{p} = (1-u)^2 \mathbf{p}_0 + 2u(1-u) \mathbf{p}_1 + u^2 \mathbf{p}_2$$
  - Making tracking points w.r.t relative coordinates



- Robot-Environment Interface
  - Visual Navigation
  - Visual Servoing (Door Open)
  - Object Recognition

## Visual servoing for door opening

- Previous door opening
- Previous examples
- Our method



## Previous door opening

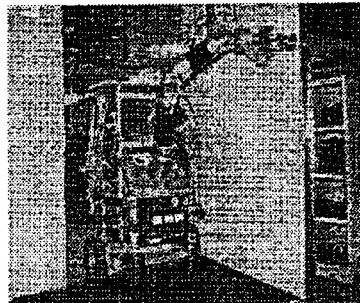
- Using mono vision
  - Known target is required
- Eye-in-hand(EOL system) configuration
  - Positioning errors cannot be observed by the system
- Image based control
  - Hard to control visual feedback

## Previous example

- University of Tsukuba
  - Manipulator's initial position is in front of the knob
  - Image cue : Knob as an ellipse.
    - Depth information – from major axis length
    - Position of the hand – from the ellipse center



Knob image




Yamabico




○ ○ ○ ○

## Previous example

- Royal Institute of Tech(Sweden)
  - Manipulator's initial position is in front of the knob
  - Using mono vision



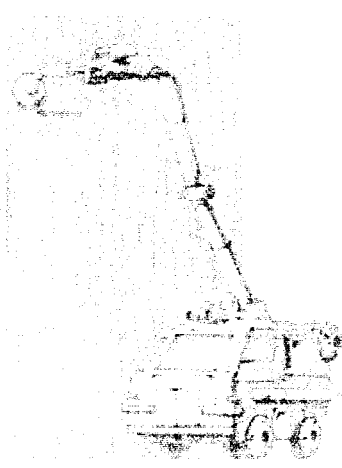
Knob image


 Korea Institute of Science Technology *Advanced Robotics Research Center*

○ ○ ○ ○

## Our Method

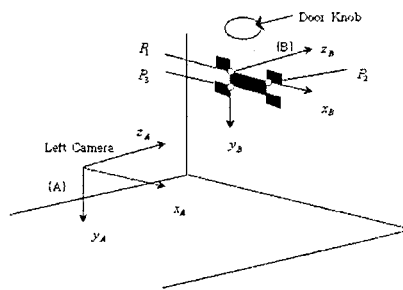
- system configuration
  - Using stereo vision
  - Eye-to-hand configuration (ECL system)
  - Position based control
  - Using landmark



 Korea Institute of Science Technology *Advanced Robotics Research Center*

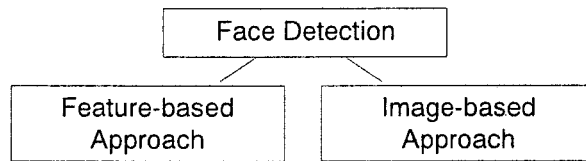
## Our Method – cont'd

- Stereo system
  - No prior knowledge!
- Modified landmark
  - Useful for finding subpixel corner points



- Robot-Human Interface
  - Face Recognition
    - Survey of FD
    - Survey of FR
    - Our Vision system
    - Our method – FD & FR
    - Experimental results
  - Human Detection

## Previous Face Detection Method

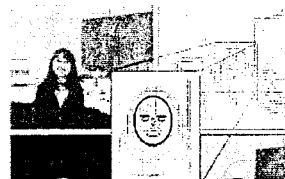


- Priori information of face
- Low level features
- Classical approach (early as 1970s)
- Using image itself
- Training scheme needed

Ref.) A Face Detection Survey, 2001CVIU (Hjelmas et al.)

## Feature-based Approach

- Low level analysis
  - Edge, Gray-levels, Color, Motion
    - ex1) edge operators, corner detection
    - ex2) eye features, more dark than face area
    - ex3) color space segmentation
    - ex4) optical flow in video sequence
- Feature analysis
  - Feature searching, Constellation analysis
    - ex1) two eyes, possible location
    - ex2) statistical shape, directional image
- Active shape models
  - Snake, Deformable template, PDM(Point distribution model)
    - ex1) active contour, energy minimization technique
    - ex2) PDM : compact parameterized description of shape based on statistics



## Image-based Approach

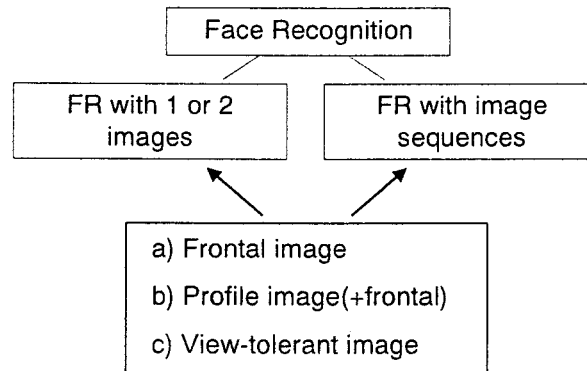
- Linear subspace methods
  - PCA(principal component analysis) , LDA(linear discriminant analysis), ...
    - Images of human faces lie in a subspace of overall image space
    - ex1) measure of "faceness" by DFFS [Pentland,1991]
    - ex2) Fisher's linear discriminant [Song,ICPR 2000]



< eigenfaces >

- Neural network ex) [Rowley, Kanade, 1998, PAMI]
- Statistical approaches ex) SVM(support vector machine) [Osuna,1997 CVPR]  
Bayes decision rule [Kanade, CVPR 2000]

## Previous Face Recognition Method



ref.) Face Recognition: A Literature Survey , W.Zhao, et.al

## FR with Single Image

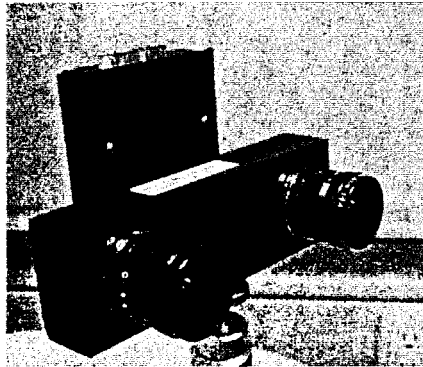
- Statistical approach
  - FR using Eigenpictures(eigenfaces)
    - Also face detection and identification [Pentland, CVPR,1994]
  - FR using Fisher discriminant analysis
    - [Swets, PAMI, 1996], [Belhumeur, PAMI, 1997]
  - Holistic FR based on subspace LDA
    - [Zhao, CVPR, 1998]
- Neural network approach
  - Two HyperBF network, Dynamic Link Architecture (DLA) , Elastic Bunch Graph Matching, [Wiskott, PAMI, 1997] ...

## FR with Sequence

- Video-based FR
  - 2 layer RBF(radial basis function) : Neural Network
  - Monte Carlo, posterior probability [Isard, ECCV, 1996]
  - Multimodal (audio+video+HMM)

## Our Stereo System

- Stereo camera system for indoor navigation
- $f = 6\text{mm}$
- $2/3$  inch CMOS
- Quite small face  
(below 5% of  
entire image)



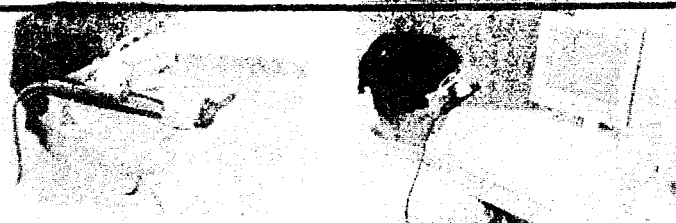
## Our method of FD & FR

- Face Detection
  - Coarse to fine method
  - Coarse : Wavelet and facial color
  - Fine : Generic-shape model + modified PCA
- Face Recognition
  - Probabilistic density estimation algorithm
  - EM multimodal density

# Experimental results



# A Human-computer Interface using Eye-gaze Tracking System



Myung Jin Chung, Bang Rae Lee, Jae-Hean Kim,  
Dong Hyun Yoo, Do Hyoung Kim and Young Jin Lee

Department of Electrical Engineering and Computer Science  
Korea Advanced Institute of Science and Technology

KAIST

## KARES II (Assistant Robot Developed in KAIST)

Servoing, Monitoring, Display,  
Distributed Controller,  
Bio-signal, Manual Operation,  
Virtual Reality



Haptic Suit,  
Manual Operation,  
Mobile Robot



Eye Mouse,  
Voice Recognition & Composition,  
Navigation,  
Wireless Communication

Robot Arm Design & Manufacturing, Motion  
Control(Soft Arm, Compliance),  
Mobile Robot

KAIST

2



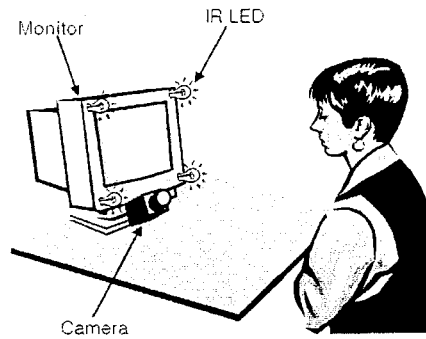
## **Contents**

- **Non-intrusive Eye-gaze Tracking System**
- **Intrusive Eye-gaze Tracking System**
- **3D Depth Extraction System**

## **Non-intrusive Eye-gaze Tracking System**

## 전체 시스템 구성

- 시스템 구성
  - 5개의 적외선 LED
    - 모니터 각 모서리에 하나씩 (각막 반사)
    - 카메라의 렌즈 중심에 하나 (등공 반사)
  - 카메라

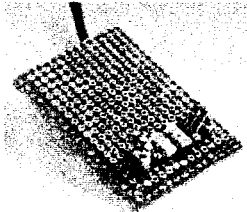


KAIST

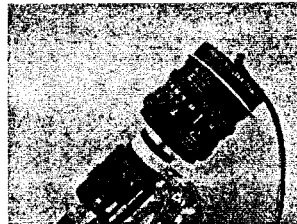
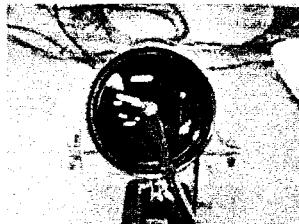
5

## 전체 시스템 구성

- 모니터에 부착된 적외선 LED



- 카메라와 적외선 LED

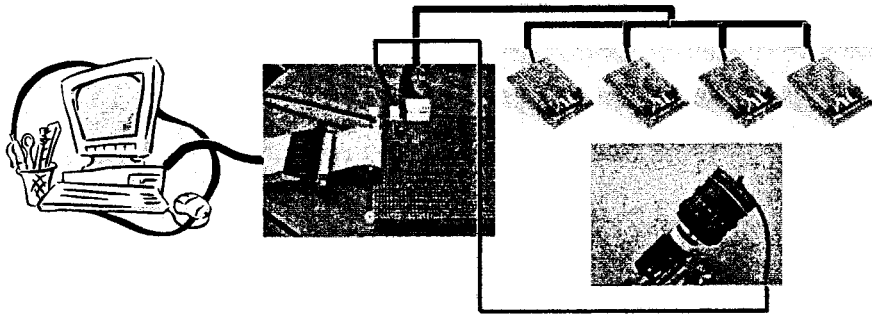


KAIST

6

## 전체 시스템 구성

- 적외선 LED의 구동
  - 모니터의 적외선 LED와 카메라의 적외선 LED를 순차적으로 구동
  - PC의 병렬 포트를 이용하여 IR LED를 스위칭
  - 적외선 LED와 영상 캡처의 동기화



KAIST

7

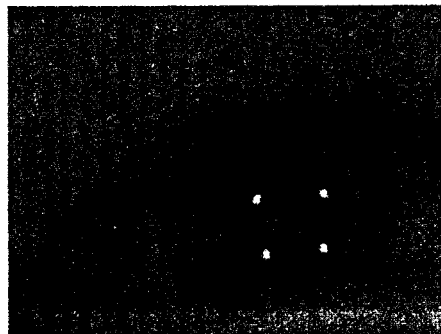
## 특징점 추출

- 각막 반사(Corneal reflection)
  - Mason(1969)
  - 눈의 각막 표면에서 발생하는 반사
  - 각막에 밝은 점(glint)이 나타남.

Thresholding

Labeling

Centroid



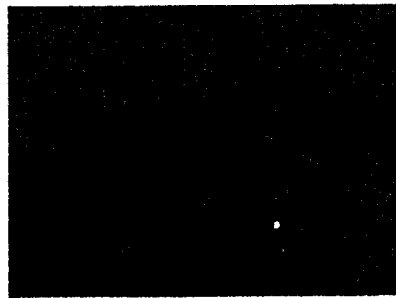
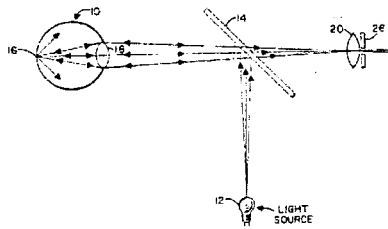
KAIST

8

## 특징점 추출

### 동공 반사(Pupil reflection)

- Hutchinson(1989)
- 적외선이 눈의 동공으로 들어가 망막에서 발생하는 난반사
- 적외선 발광부가 카메라의 광축에 위치하여야 함
- Bright eye현상



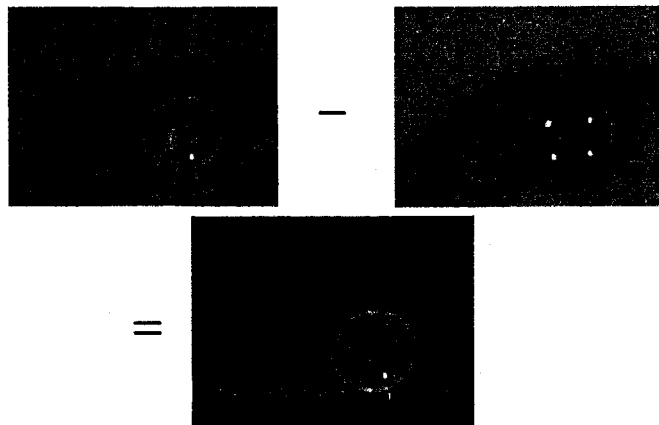
KAIST

9

## 특징점 추출

### 동공 반사

- Bright eye와 Dark eye의 차영상 이용

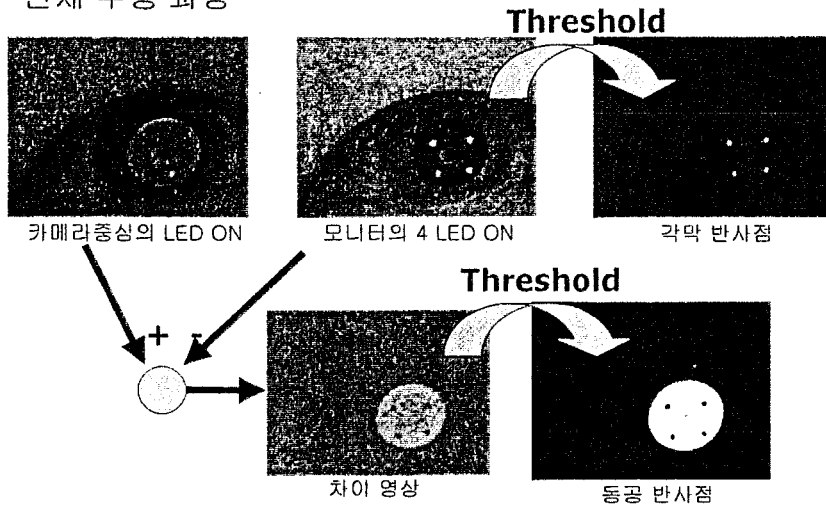


KAIST

10

## 특징점 추출

전체 수행 과정

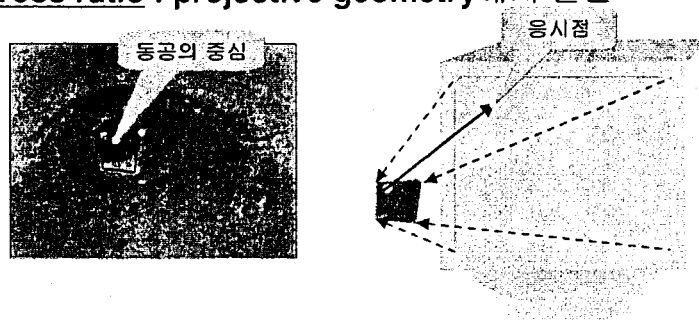


KAIST

11

## 응시점 추정

- 동공의 중심과 각막 반사에 의한 밝은 점들 사이의 위치관계 이용
- 각막 반사에 의한 밝은 점은 모니터의 네 모서리가 투영된 것
- **Cross ratio** : projective geometry에서 불변

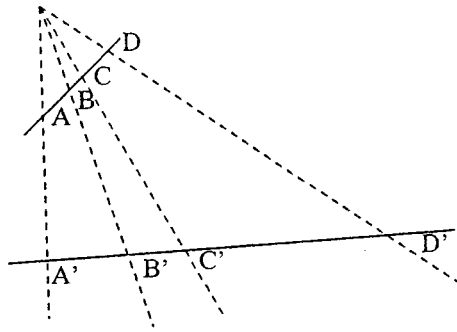


KAIST

12

# 응시점 추정

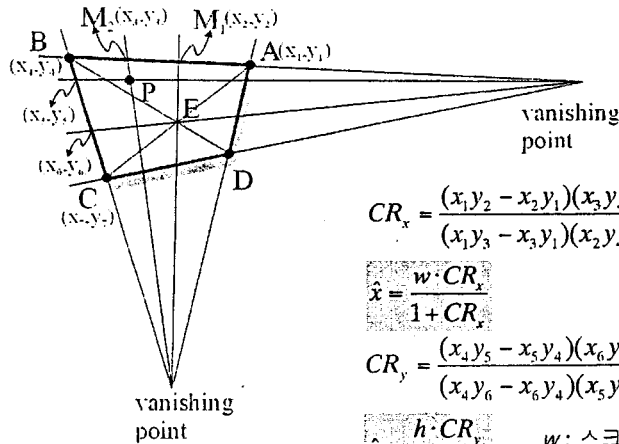
## ▪ Cross ratio



$$CR = \frac{(A-C)(B-D)}{(A-D)(B-C)}$$

# 응시점 추정

## ▪ 응시점 추정



$$CR_x = \frac{(x_1 y_2 - x_2 y_1)(x_3 y_4 - x_4 y_3)}{(x_1 y_3 - x_3 y_1)(x_2 y_4 - x_4 y_2)}$$

$$\hat{x} = \frac{w \cdot CR_x}{1 + CR_x}$$

$$CR_y = \frac{(x_4 y_5 - x_5 y_4)(x_6 y_7 - x_7 y_6)}{(x_4 y_6 - x_6 y_4)(x_5 y_7 - x_7 y_5)}$$

$$\hat{y} = \frac{h \cdot CR_y}{1 + CR_y}$$

$w$ : 스크린의 가로 길이  
 $h$ : 스크린의 세로 길이

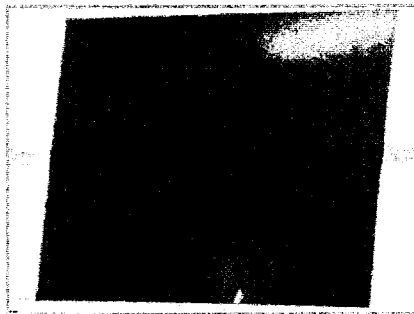
## 실험 환경

### ■ 실험 결과

- 눈의 영상의 크기 : 640×480
- 17인치 모니터  
9×12 영역구분 가능
- PC : Pentium IV 1.4 GHz
- 수행시간 : 200msec

### <오차>

(mm)	평균	표준편차	최대	최소
X	0.4	8.9	25.4	-22.6
Y	-2.5	6.3	11.6	-24.9



반사점 Tracking  
및  
응시방향 계산실험

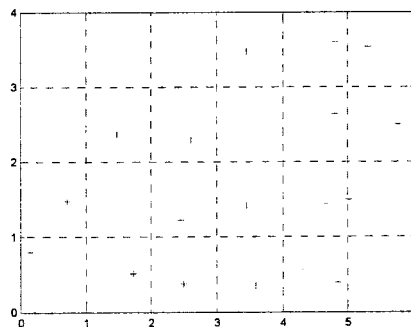
- 응시방향 계산 실험
  - Target 영역 : Blue
  - 계산된 응시 영역 : Red

KAIST

15

## 실험 결과

### ■ 추정 결과



### ■ 오차의 원인

- 특징점 추출
- 각막의 곡률
- 카메라, 머리, 적외선 LED의 상대적인 위치
- 카메라 캘리브레이션

KAIST

16

## 결론 및 추후과제

### ■ 결론

- 5개의 적외선LED를 이용
- 각막 반사와 동공 반사의 상대적인 위치 정보
- **Cross ratio**를 이용한 응시점 추정
- 간단하고 수행 시간이 짧음
- 인터페이스로 사용 가능

### ■ 추후과제

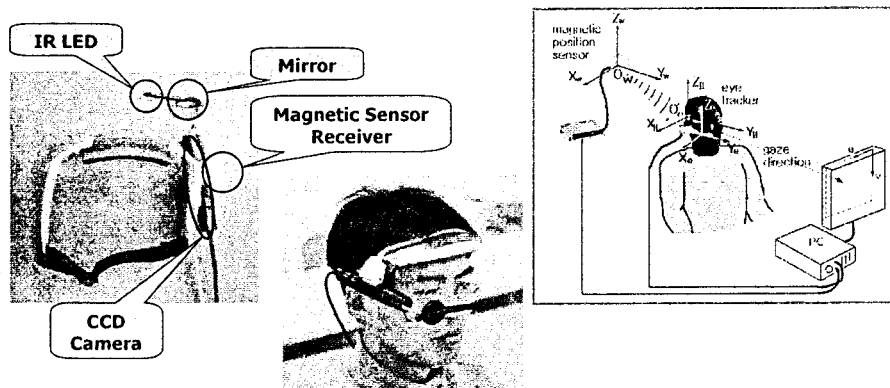
- 정확한 특징점 추출
- 정밀도 향상을 위한 비선형 특성 분석
- 머리의 움직임에 따른 변화 고려
- 얼굴 추적 시스템과의 통합

## Intrusive Eye-gaze Tracking System



## Eye-gaze Tracking System

- Eye motion tracking system (CCD camera)
- Head pose tracking system (magnetic sensor)



KAIST

19

## Problems

- **Robustness**
  - Eye-gaze tracking system should be working well for variable illumination condition
- **Free head motion**
  - Free head motion should be allowed
- **Processing time**
  - Calculation of eye-gaze direction within 200ms
    - Head movement tracking
    - Eye movement tracking

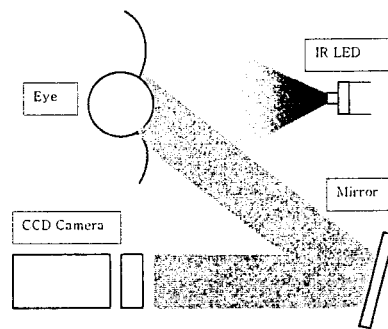
KAIST

20

## Eye Motion Tracking System

Head mounted structure is adopted

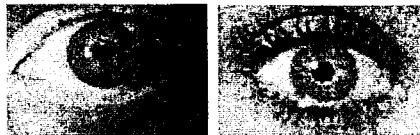
- Eye image can be obtained independently to head movements
- Images can be obtained continuously using a mirror and a CCD camera



KAIST

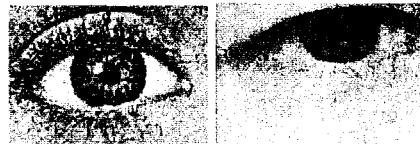
21

## Why IR LED ?



### Blue iris

- Easy to detect pupil



### Brown or dark-brown iris

- Difficult to detect pupil

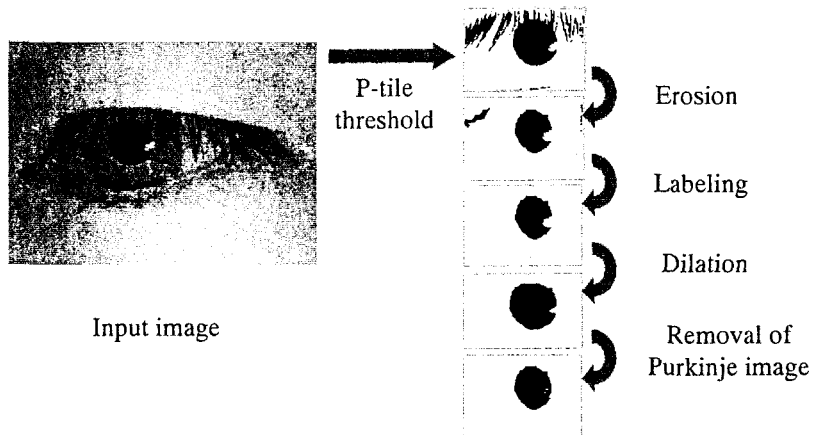


### Dark eye image with IR rays

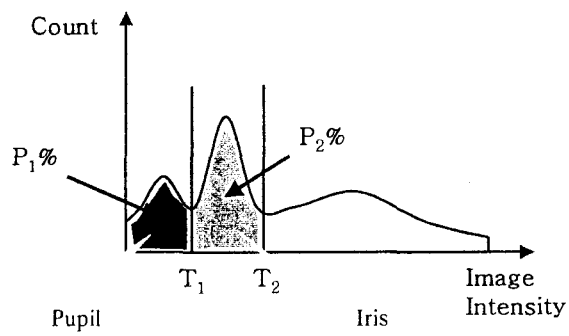
KAIST

22

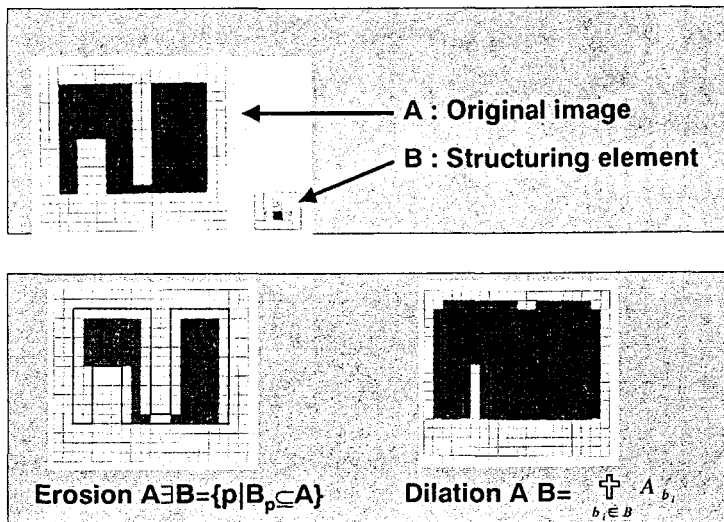
# Pupil Detection



## 1) P-tile Thresholding and Labeling



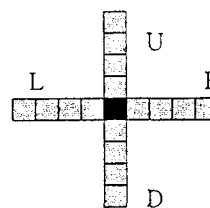
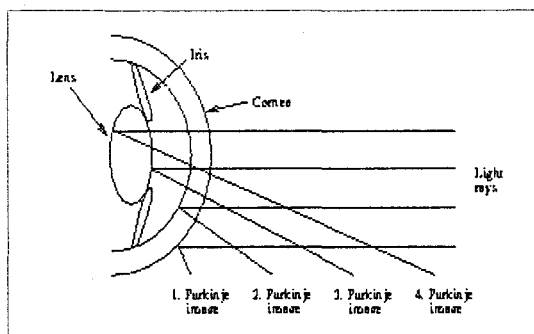
## 2) Morphological Operators



KAIST

25

## 3) Removal of Purkinje Image



### In the pupil region

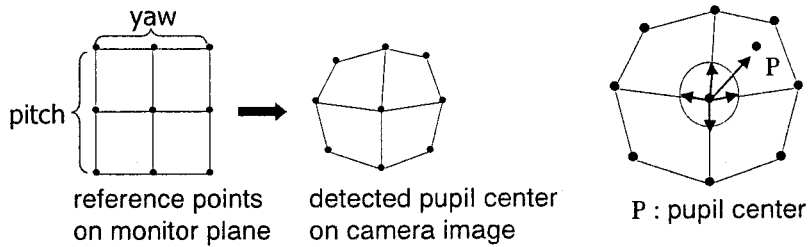
- Distinguish glint
- Modified dilation ( $A^C \otimes B$ )
  - L, R, U, D (OR operation)
  - If more than three directions is true, the result is true

KAIST

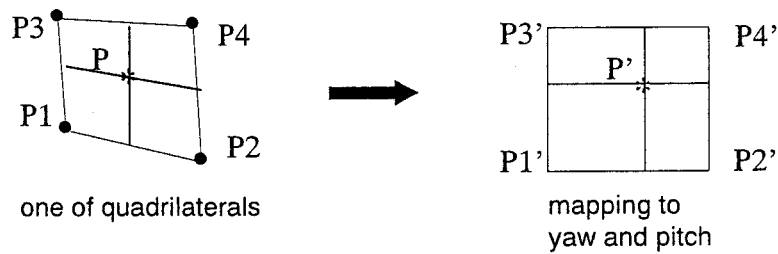
26

## Rotational Angle of Eye (Calibration)

**Mapping pupil displacement in the image to yaw and pitch of an eye**



- Step 1 : Calculate the 4 unit vectors (Up, Down, Left, Right)
- Step 2 : Determine the quadrilaterals
- Step 3 : Calculate yaw and pitch of an eye

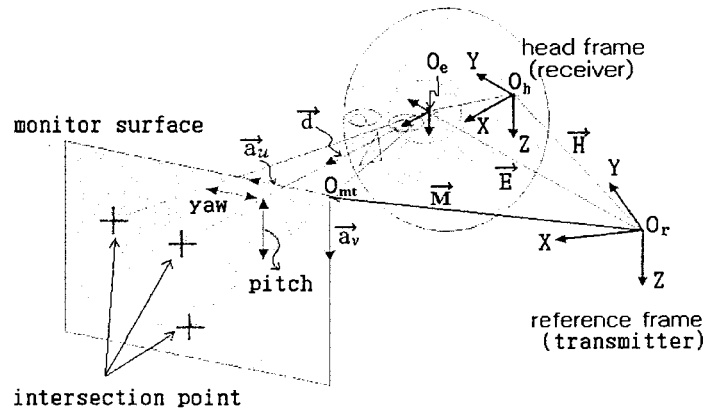


$$\begin{aligned} \text{upper side} &= u \times P4 + (1-u) \times P3 \\ \text{lower side} &= u \times P2 + (1-u) \times P1 \\ v \times \text{upper side} + (1-v) \times \text{lower side} &= P \\ \text{where } u, v &\in [0,1] \end{aligned}$$

$u, v = 0$  : yaw and pitch = 0  
 $u, v = 1$  : yaw and pitch = predefined maximum degree

# Eye-gaze Direction

## Extraction of eye-gaze point on a monitor



$$\begin{bmatrix} u & v & l \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \square & \square & \square \\ a_u & a_v & -d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \square & \square \\ E & -M \end{bmatrix}$$

$(u, v)$  : intersection point on monitor

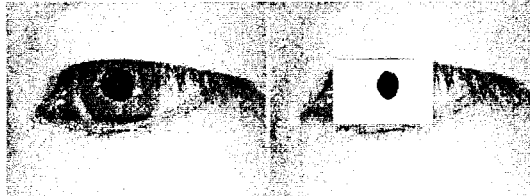
$l$  : distance between eye and monitor

# Experimental Results

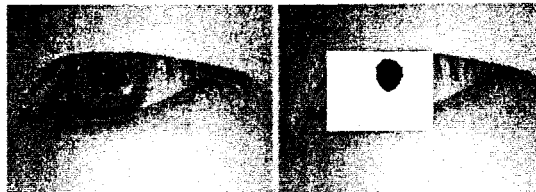
- **Experimental environment**
  - Pentium IV 1.4 GHz processor
  - Image grabber update rate
    - 30 frame/sec (33msec)
- **Image processing time**  
20~25msec
- **Eye-gaze extraction processing time**  
21~27msec
- **Maximal processing speed**  
30 frame/sec (33msec)

## Pupil Tracking

- Pupil tracking



- Robustness to illumination

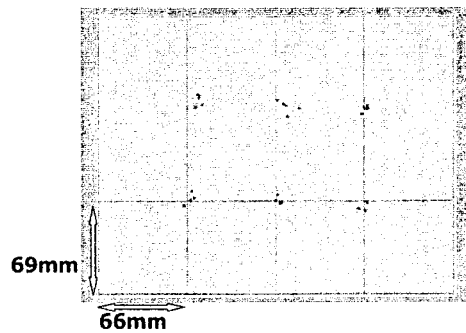


KAIST

31

## Eye-gaze Extraction

- Distance between user and monitor : 50cm



(mm)	Max error	Min error	Mean error	Std
x	11.7	0.30	4.56	2.98
y	26.2	0.30	5.29	4.61

⇒ Possible resolution for 15 inch monitor : 12X14

KAIST

32

## Conclusions

### ■ Conclusions

- Development of a real-time eye-gaze tracking system ( 30 frames/sec )
- Free head movement within 2 meters distance
- Robustness to illumination

### Further work

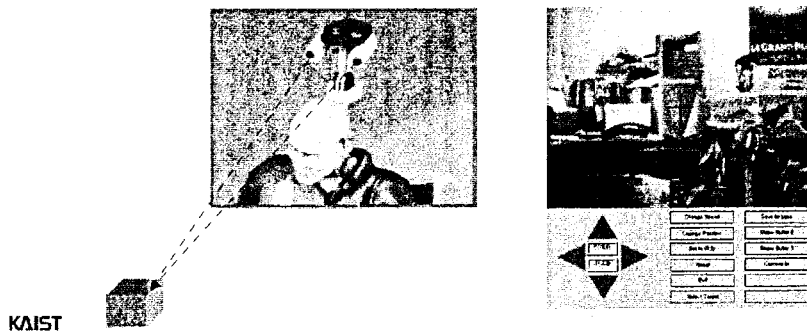
- Improvement of calibration procedure

## 3D Depth Extraction System



## 3D Depth Extraction System

- Task monitoring
  - LCD + Vision sensor + PTU
- Depth extraction
  - Triangulation with stereo camera system



## Depth Extraction

- Camera Calibration
  - Finding out the relationship between 2D image points and 3D points
  - Estimating camera projection matrix
- Stereo Matching
  - Finding out a corresponding point for a given point using SSD
- Depth Calculation

# Camera Calibration

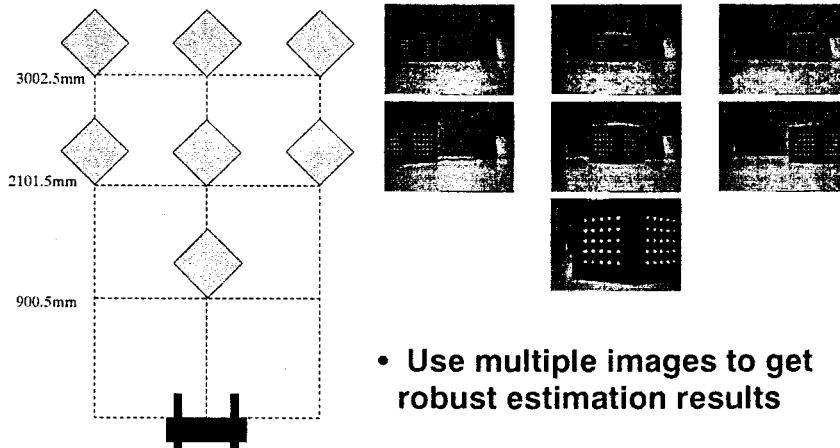
- Calibration

= finding P matrix using known 2D points and 3D points

Camera model

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ S \end{bmatrix} = P \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} u &= U/S \\ v &= V/S \end{aligned}$$

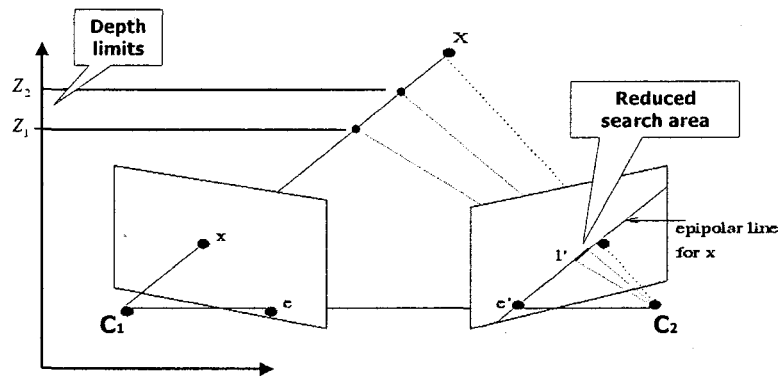
# Camera Calibration



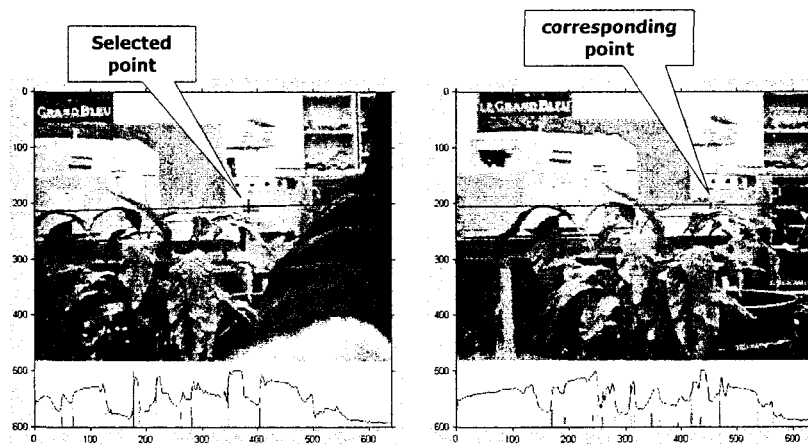
- Use multiple images to get robust estimation results

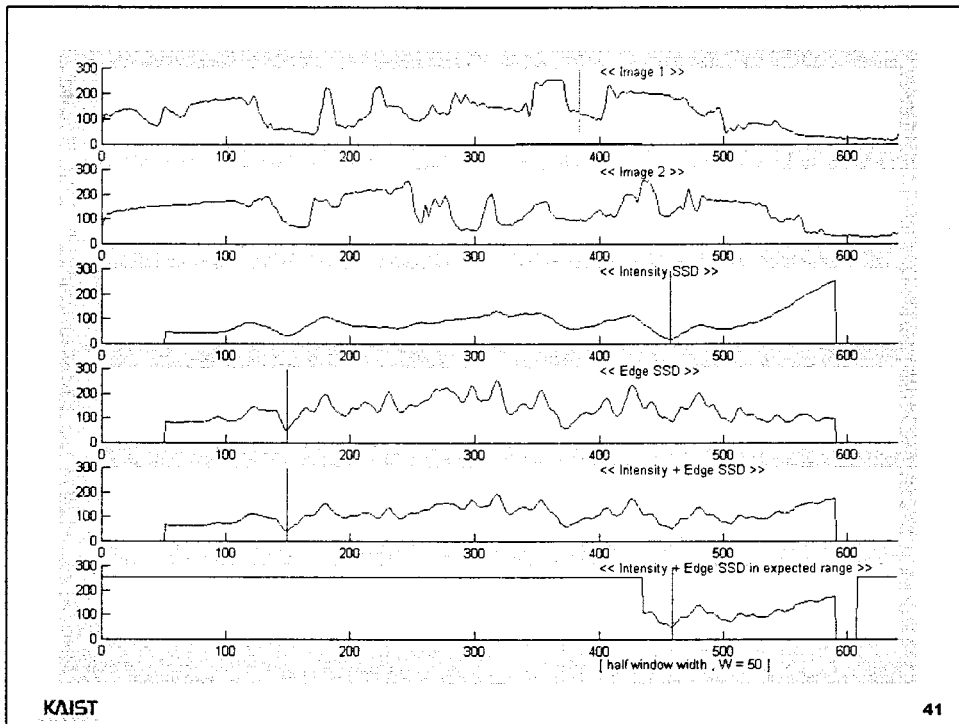
# Stereo Matching

- Search space reduction using epipolar line and depth limits

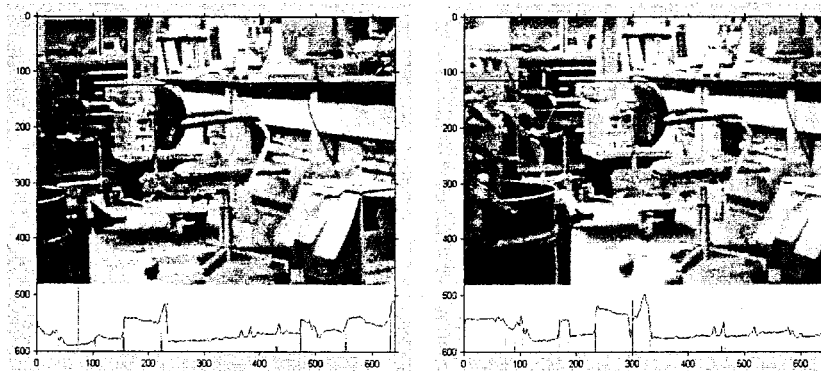


# Experimental result for matching





## Experimental result for matching (II)



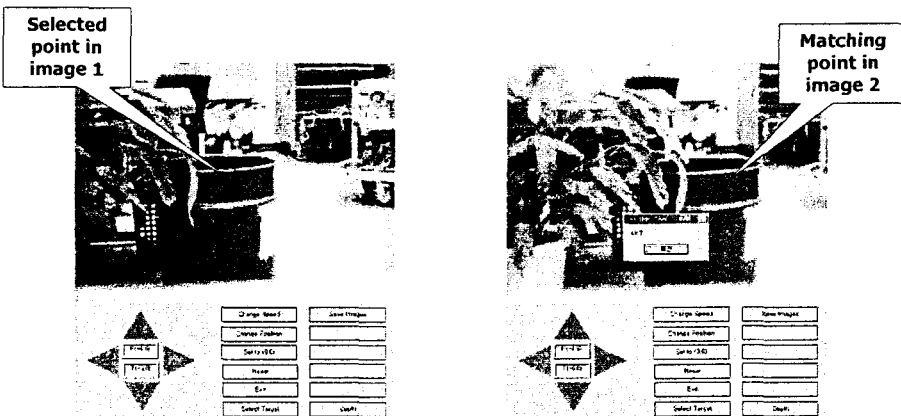
## Depth Calculation

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ S_1 \end{bmatrix} = P_1 \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} U_2 \\ V_2 \\ S_2 \end{bmatrix} = P_2 \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

Given  $P_1, P_2, U_1, V_1, S_1, U_2, V_2, S_2$

estimate  $x_w, y_w, z_w$

## Depth Calculation



# Depth Calculation



Depth estimation results

[x]	=	2147.240043
[y]	=	-166.210767
[z]	=	-219.417463

OK

## **Session 3**

# **Compliance Control**

여 백



○ ○ ○ ○

# Compliance for Service Robot Arm

- Introducing KIST's Compliance Control Research -

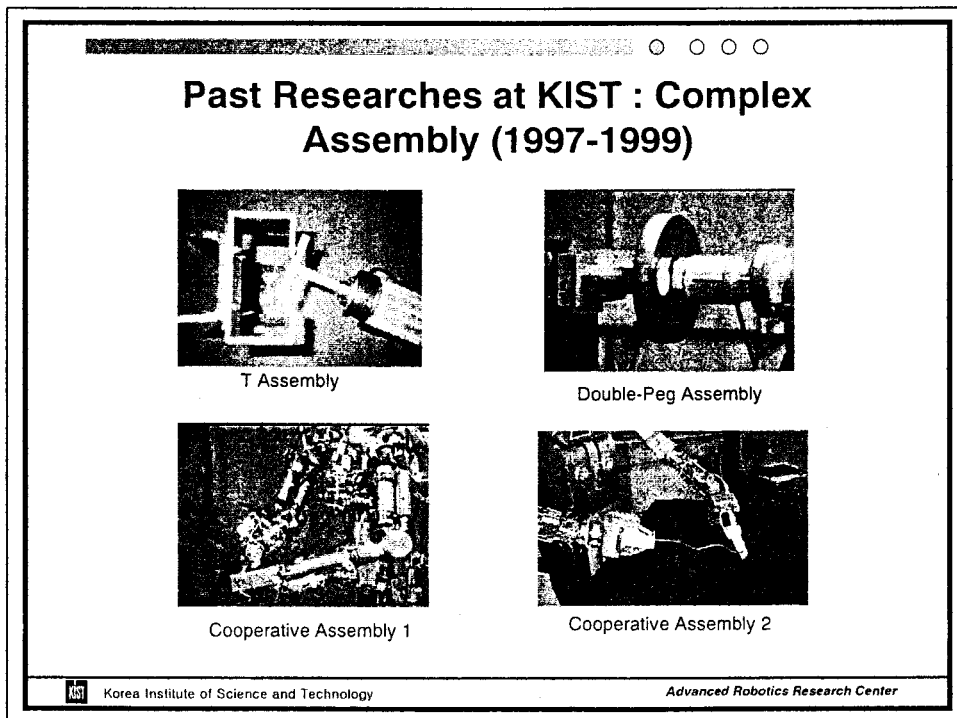
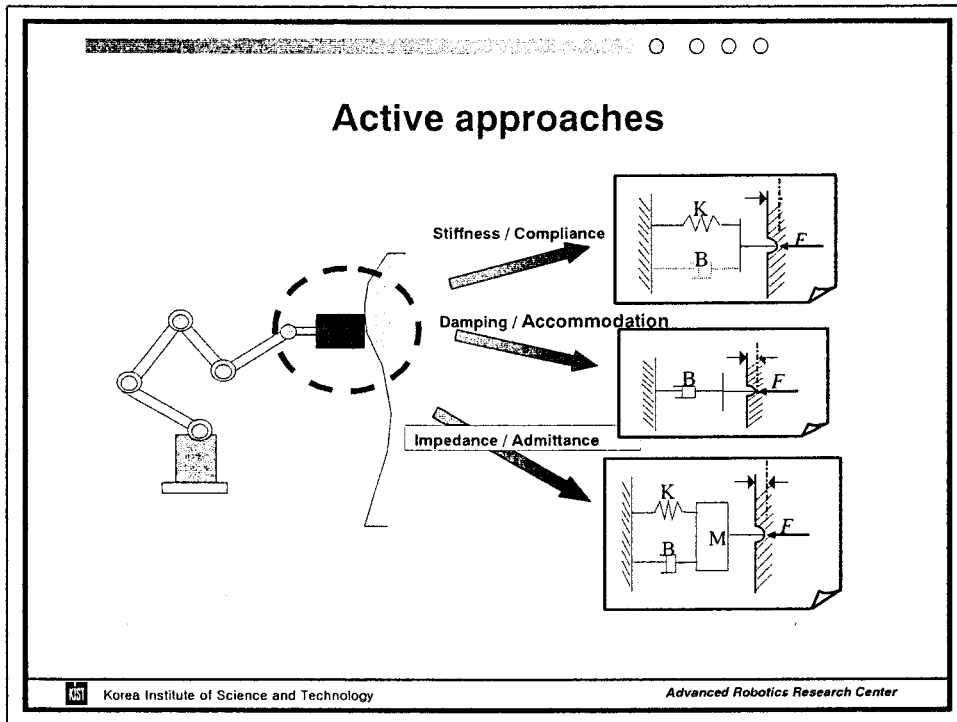
Jun 24, 2002

강 성철  
KIST 휴먼로봇센터

○ ○ ○ ○

## Researches on Compliance Control

- **Passive approaches**
  - Using mechanical devices (spring, damper, etc.)
  - RCC, Cobot (Northwestern univ.)
  - Low flexibility and programability
  - No electrical malfunction
- **Active approaches**
  - Using force/torque sensor feedback at arm's joint or end-effector
  - Flexible by programability
  - Not so reliable



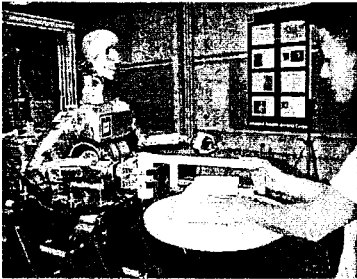
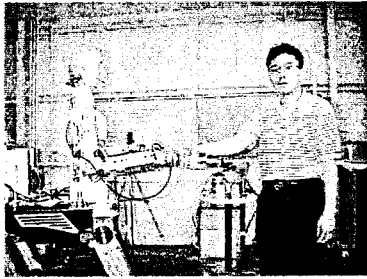
⊙ ○ ○ ○

**Movie**

**KIST** Korea Institute of Science and Technology *Advanced Robotics Research Center*

⊙ ○ ○ ○


**Past Researches at KIST : Human-Robot  
Interaction (1999)**

	
Cooperative Sawing	Hand shaking

**KIST** Korea Institute of Science and Technology *Advanced Robotics Research Center*

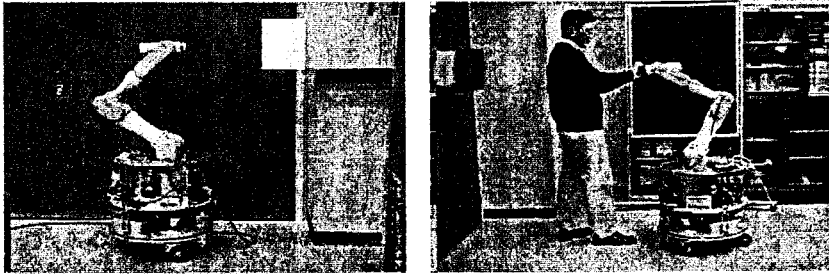
○ ○ ○ ○


**Movie**

 Korea Institute of Science and Technology *Advanced Robotics Research Center*

○ ○ ○ ○

**Interaction with Mobile Manipulator (2000) :  
Minimum Inertia Posture for Safety**



 Korea Institute of Science and Technology *Advanced Robotics Research Center*

○ ○ ○ ○

## Direct Teaching for Path Generation on Free Surface : Die Induction Hardening Application (2002)




○ ○ ○ ○

## Movie

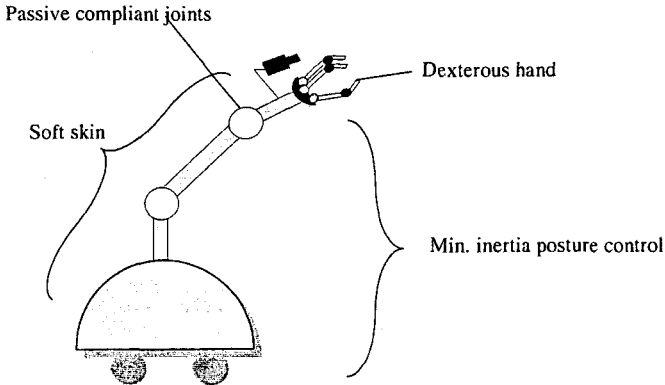
○ ○ ○ ○

## Compliance for Service Robot Arm

 Korea Institute of Science and Technology *Advanced Robotics Research Center*

○ ○ ○ ○

## Final Goal




Passive compliant joints

Soft skin

Dexterous hand

Min. inertia posture control

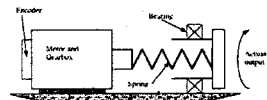
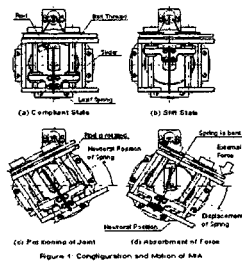
 Korea Institute of Science and Technology *Advanced Robotics Research Center*

## 연구배경 및 목적

- 연구 배경
  - 인간공존형 서비스 로봇 암은 고속, 고정도의 작업성능 보다는, 안전 및 인간과의 원활한 **interaction** 성능이 중요하다.
  - **End-effector**에 **force-torque sensor** 를 부착하여 사용하는 **active compliance control approach** 보다 암의 모든 부위에서 **compliance** 성능을 갖는 암 필요
  - 전기적인 오동작시에도 인간, 로봇 모두를 보호하는 안전의 신뢰성을 높이는 방안 필요
- 연구목적
  - **Passive compliant joint(PCJ)**와 **visco-elastic covering** 을 갖는 **soft arm** 을 설계, 제작, 제어 함으로써 **compliance** 발생의 신뢰도를 높이고, 이를 통해 서비스로봇 암의 안전성과 **interaction** 성능을 높인다.

## 관련 연구

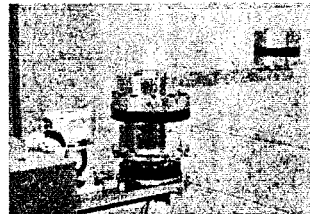
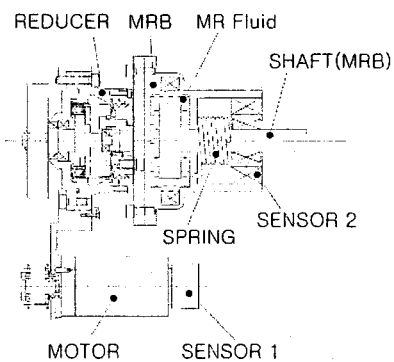
- **Mechanical Impedance Adjuster: MIA (Waseda Univ.)**
  - Variable stiffness spring
  - Break 방식의 damper
- **MIT COG Joint**
  - 감속기단과 링크사이에 **spring** 장착
  - 충격시 로봇 액추에이터 보호
  - 접촉시 **Spring** 변위제어에 의한 **position-based force control**
- **COBOT (North Western Univ.)**
  - **CVT(Continuously variable transmission)** 원리 이용한 **nonholonomic constraint** 발생
  - **Serial arm** 보다는 **Haptic** 장치에 적합



## Passive Mechanical Compliance

- 장점 :
  - 외부 충격시 Joint 의 motor, 감속기 보호 가능
  - Contact transient control 시의 instability(bouncing) 문제 제거
  - No delay in response
- 단점 :
  - Low programmability
  - Complicated design

## PCJ Design





## PCJ 의 특징

- **Basically passive mechanism**
- **Programmable damping by MR fluid**
  - Rotational damper
  - 3 modes : M-K, M-B-K, M
  - Coulomb or viscous friction damping
- **Joint torque sensing by spring displacement**
- **Simple and modular design : M-B-K are compactly integrated at joint**
- **Heavy due to MR weight**



Next...



# Passive Compliant Joint 를 갖는 서비스 로봇 암 디자인

2002. 6. 24.

**KIST** 휴먼로봇센터  
현대중공업 기전연구소

Service Robot Technology

## 발표내용

- 연구배경 및 목적
- 안전 지수 및 방안
  - 안전 지수
  - 충돌 모델링 및 안전 방안
- 커버의 선정
  - 접촉 모델
  - 커버의 평가 및 선정
- PCJ Compliance Parameters
  - 암의 사양
  - 각 축의 B, K 파라미터 선정
  - 제작된 3번축 자기유변 (magneto-rheological) 댐퍼
  - 댐퍼 성능 실험 결과
- 향후 연구 계획
- 참고문헌

Service Robot Technology

## 연구배경 및 목적

### • 연구 배경

- 인간공존형 서비스 로봇 매니플레이터는 고속, 고정도의 작업성능 보다는, 안전 및 인간과의 원활한 interaction 성능이 중요하다.
- End-effector에 force-torque sensor 를 부착하여 사용하는 active compliance control approach 보다 compliance 성능의 신뢰성을 더욱 높이는 방안 필요

### • 연구목적

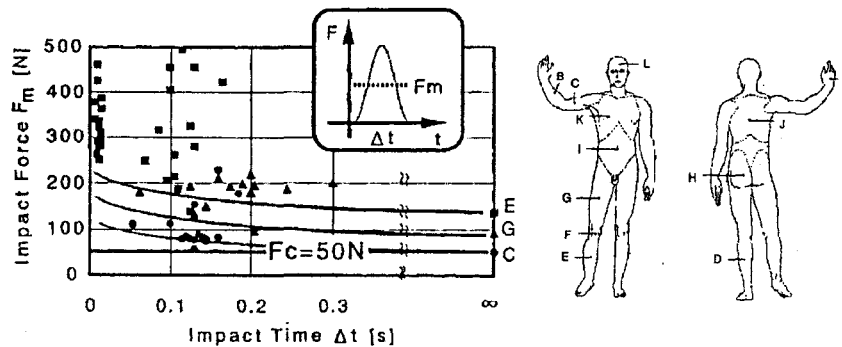
- Passive compliant joint(PCJ)와 visco-elastic covering 을 갖는 soft arm 을 설계, 제작, 제어 함으로써 compliance 발생의 신뢰도를 높이고, 이를 통해 서비스로봇 암의 안전성과 interaction 성능을 높인다.

Service Robot Technology

## 안전 지수 및 방안

### □ 안전 지수 (Yamada et. al, 1997)

- 힘:  $F \leq 80 N$  (평균 고통 한계치)(가정:접촉직경44mm이상)



Service Robot Technology

## 안전 지수 및 방안 (계속)

- 충돌 모델링 및 안전 방안
  - 충돌 동특성 (Yoshida et. al, 1995)

$$H\Delta\dot{\theta} + T = J^T F\Delta t \iff M_e \Delta v + J^{-T} T = F\Delta t$$

여기서  $H$  : Inertia

$T$  : Effect due to a joint torque and a friction

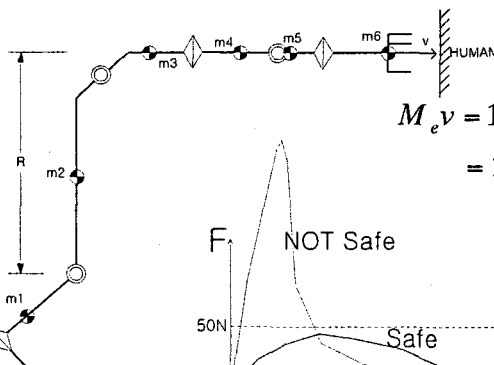
$M_e$  : Effective mass

$J$  : Jacobian matrix

Service Robot Technology

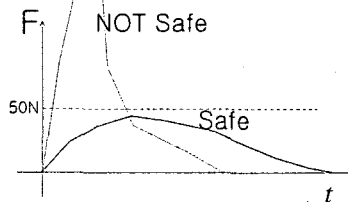
## 안전 지수 및 방안 (계속)

- 예제:



$$M_e v = 10.7 \text{Kg} * 0.25 \text{m/sec}$$

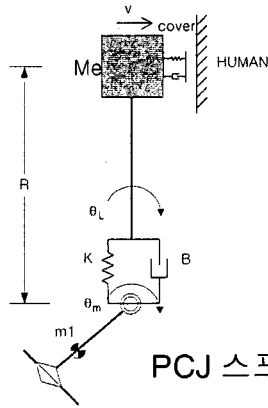
$$= 2.7 \text{N sec} (\text{충격량으로 환산})$$



Service Robot Technology

## 안전 지수 및 방안 (계속)

### □ 안전 방안



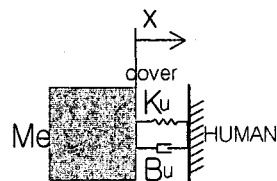
충격힘 F 요인	안전 대책	예상 결과
$M_e \Delta v$	5mm viscoelastic covering	50% 흡수
	$v \propto \frac{1}{M_e}$	50% 흡수
$T$	PCJ	대부분 흡수

PCJ 스프링변화  $\Rightarrow$  충돌감지  $\Rightarrow$  STOP 후 경로변경

Service Robot Technology

## 커버의 선정

### □ 접촉 모델



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

여기서  $x$  : 커버의 압축변위

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

Service Robot Technology

## 커버의 선정 (계속)

□ 커버의 평가 및 선정

- 시뮬레이션 조건

$M_e$	$v$	운동량
10.7Kg	0.125m/sec (속도계획 후)	1.35Nsec

- 평가 및 선정

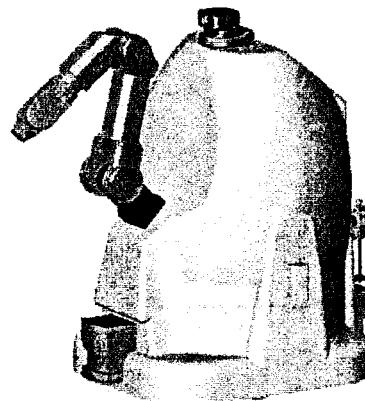
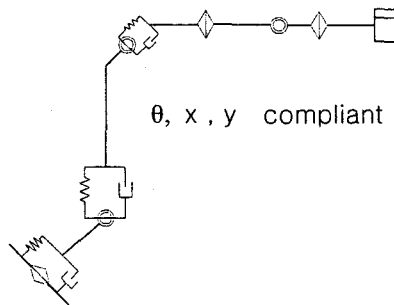
Urethan Foam(INOAC,Co.)	운동량 흡수율	평균 힘
EGR-2	49%	16N
HR-80	64%	21N
SR-S-24	100%	38N

Service Robot Technology

## PCJ Compliance Parameters

□ 암의 사양

- 무게 20Kg, 가반하중 3Kg



Service Robot Technology

## PCJ Compliance Param. (계속)

- 각 축의 B, K 파라미터 선정

$$K = 1.5T_g / \theta_{\max} [Nm / rad]$$

$$B_{\max} = 2\zeta_{\max} \sqrt{JK} [Nm * sec / rad]$$

여기서  $T_g$  : 중력 토크

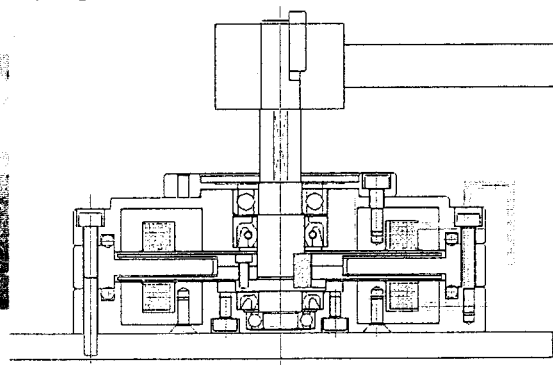
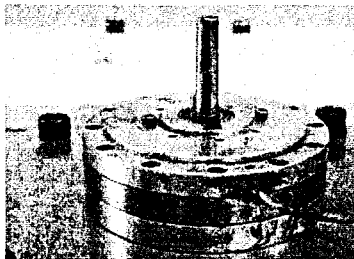
$$\theta_{\max} = 15[\text{deg}]$$

$$\zeta_{\max} = 0.42$$

Service Robot Technology

## PCJ Compliance Param. (계속)

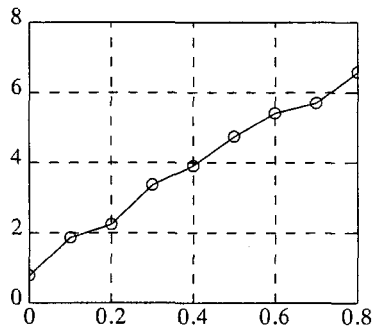
- 제작된 3번축 자기유변 (magneto-rheological) 댐퍼



Service Robot Technology

## PCJ Compliance Param. (계속)

- 댐퍼 성능 실험 결과



$$\text{Current} = \frac{B}{\text{기울기}} \theta$$

$$\begin{aligned} \text{Torque} &= \text{기울기} \times \text{Current} \\ &= B \theta \end{aligned}$$

Service Robot Technology

## 향후 연구계획

- PCJ와 커버가 동시에 고려된 6축 암 동력학 시뮬레이션을 통한 종합적 안전 해석
- 안전 평가 실험
- 제어기 설계 연구

## 참고 문헌

- Yoshida et. al, "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.
- Yamada, et. al, "Human-robot contact in the safeguarding space", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 2. no. 4, pp.230-236, 1997.
- Ikuta and Nokata, "General evaluation method of safety for human-care robots," Proc. IEEE Robotics & Automation, pp. 2065-2072, 1999.
- Ikuta, et. al, "Safety evaluation method of human-care robot control," IEEE Int. Symposium on Micromechatronics and Human Interface," pp. 119-127, 2000

Service Robot Technology





## **Field Evaluation of Compliant Robotic Arm for the Disabled**

---

**세부책임자: 장평훈**

**학생연구원: 이성욱, 강상훈, 김성태, 김종현**

**KAIST**

2002 Compliance Control SIG Workshop, June 24, 2002



## **Preview**

---

**KAIST**

2002 Compliance Control SIG Workshop, June 24, 2002

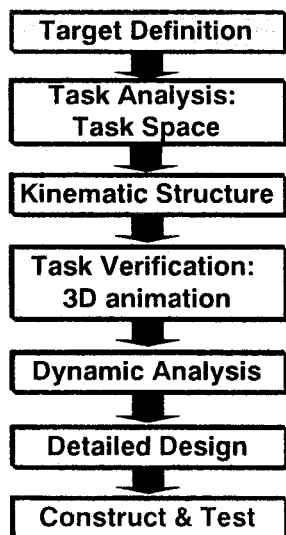
# Target Oriented Design

## ■ 7 Habits of Highly Efficient People (Steven Covey)

- Climbing a Ladder to Wrong Roof
- 1<sup>st</sup> Order Issue:  
Clarity of Goal and Objective
- 2<sup>nd</sup> Order Issue  
Speed, Efficiency



# TOD for Robotic Arm



## ■ Predefined 12 Tasks

- |                  |                       |
|------------------|-----------------------|
| 1. 식사보조          | 7. 문 여닫기              |
| 2. 물 마시기         | 8. Making tea         |
| 3. 면도            | 9. 서랍을 열고 물건운반        |
| 4. 얼굴 닦기         | 10. Games (chess)     |
| 5. 물건집기          | 11. Tape/CD/floppy 교체 |
| 6. Switch On/Off | 12. Printer/Fax 종이 운반 |

## ■ Softness

- For User-friendliness to the User
- By Active Compliance Control

## Why Active Compliance Control ?

구분 비교 방법	Passive	Active
구현 방법	Mechanical device → 각 Joint에 설치 공간 필요	Feed-back Control → Robot t조에 변화 없음
Compliance 크기	설계 후 조절 불가능	사용자 원하는 대로 조절 가능
작업 수행 성능	Joint flexibility로 진동 유발	필요한 상황에서만 효과적 사용 가능

### Active Compliance Control 이 더 타당함

## Why Sensorless torque sensing?

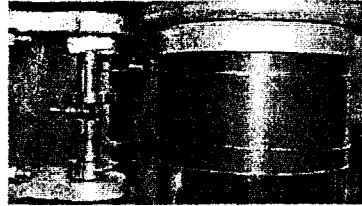
- Robot Cost 상승 → 사용자인 장애인들에게 큰 부담
- Design 및 제작이 복잡 → 오 작동 및 고장의 원인
- Joint Flexibility 증가 → 진동 발생으로 인한 제어 성능 저하

### Compliance Control without F/T Sensor

# Cable Transmission Mechanism

## Mechanical Advantages

- High Backdrivability
- Negligible Backlash
- Low Friction



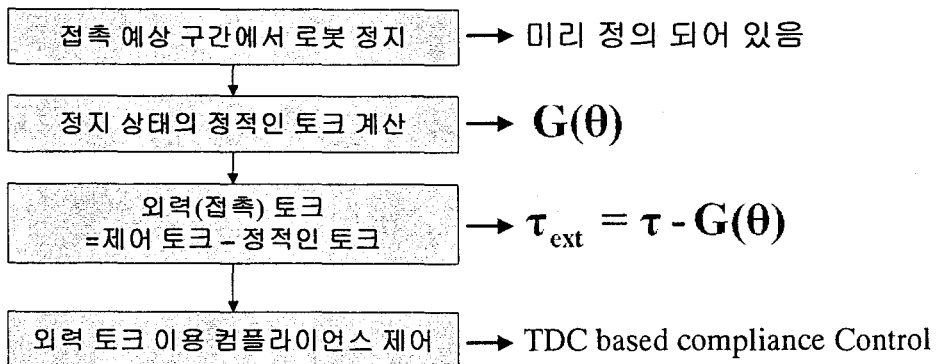
Backdrivability → Detect Small Contact Force

축	1	2	3
최소 역 구동 토크	0.4Nm	0.4Nm	0.5Nm
20cm 떨어진 곳에서 감지 가능한 최소 힘	2N	2N	2.5N

200~250g 이상의  
접촉 힘 측정 가능

# Compliance Control Algorithm

## ▪ 작업이 미리 정의된 사실을 활용



## Results of Proposed Algorithm

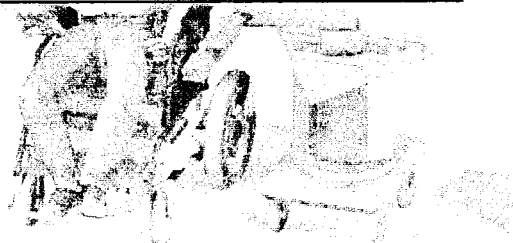
- Joint Level Sensor-less Compliance Control is realized.



- Usefulness of the algorithm is verified.



## Field Evaluation



## Necessity of Field Evaluation

- Final goal of KARES II
  - To assist daily life of the disabled.
- User feedback
  - Verify the usefulness of proposed algorithm in real situation
  - Survey the preference of the disabled about the magnitude of compliance of each task

## Experiment Condition

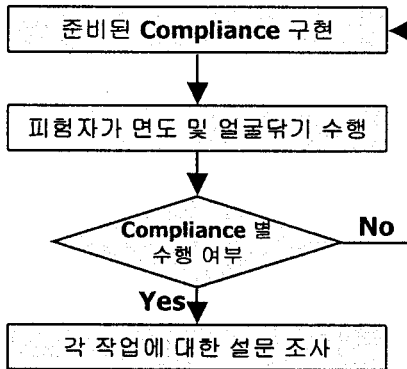
- Tasks
  - 면도
    - 자동 면도기 이용
  - 얼굴 닦기
    - 수건으로 감싼 스폰지 이용
- 실험 대상자
  - 척수 손상 장애인 (C4,C5)
  - 목 이하로 거동이 자유롭지 못함



Contact between the disabled & robot



# Experiment Procedure



## Compliance Level

- 3가지 Level compliance

[Hiroaki Gomi et al., 1997]

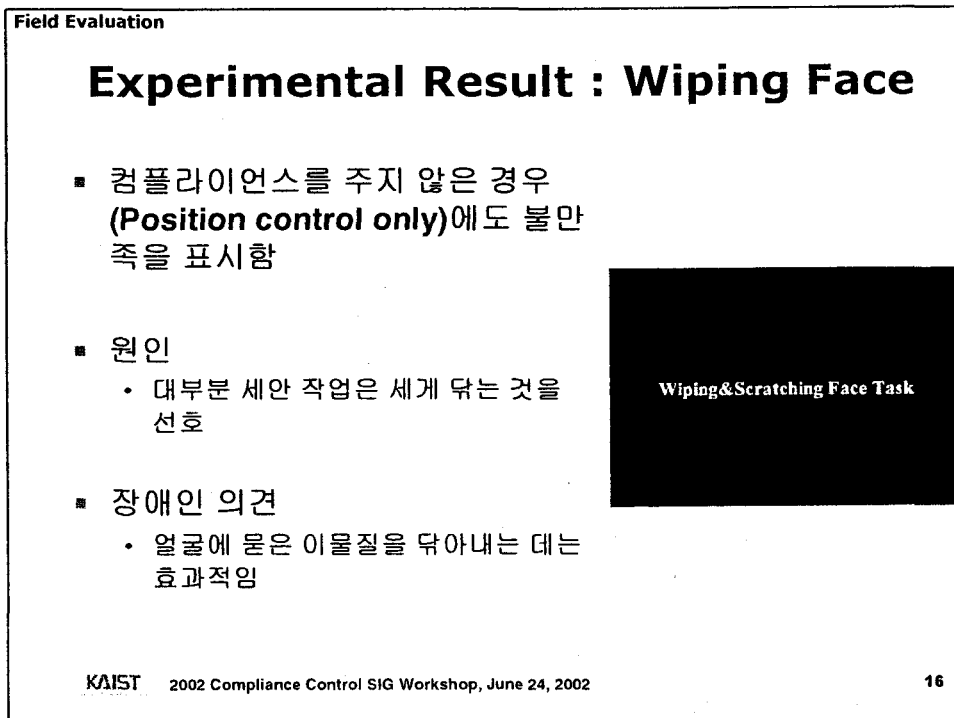
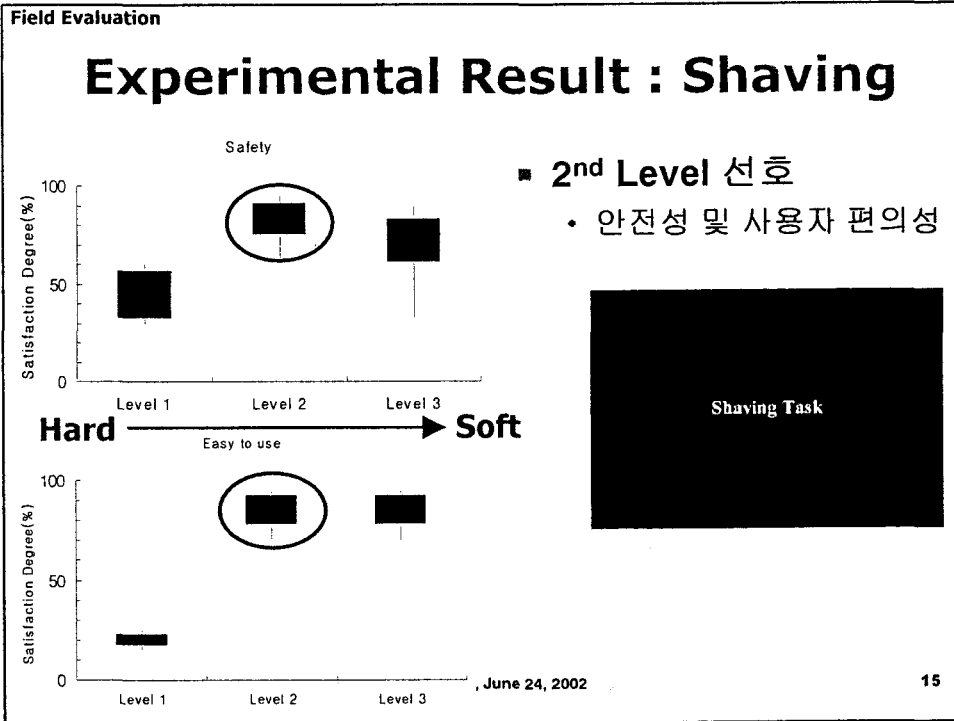
Three Levels of Compliance [deg/Nm]

Axis	Level1	Level 2	Level 3
1	1.232	2.053	4.017
2	0.782	1.303	2.610
3	0.131	0.218	0.436

# 설문 조사 내용

## 적합한 compliance 크기 측정

- 어느 경우가 가장 안전하다고 느껴집니까?
- 느낌이 가장 좋았던 것은 셋 중 어느 경우입니까?
- 그 경우에 면도(세안)은 만족스럽게 이루어졌습니까?
- 만족스럽지 않았다면 어느 경우에 만족스럽게 이루어졌습니까?





## Conclusion

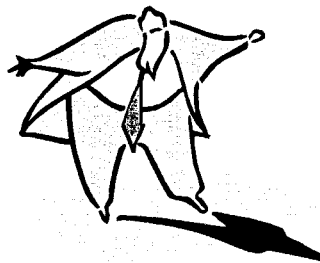
### 1. Proposed Algorithm Works!

- Algorithm reliably works in real situation.

### 2. User's preference of compliance is obtained.

- Based on degree of safety and ease of use
- Real user's preference data is obtained.
- An index for rehabilitation engineering.

**Thank you**  
for your attention



여 백

## Invited Session

### 뇌신경정보학 사업단 연구 소개

여 백

# **Brain Neuroinformatics: Artificial Auditory System**

**Soo-Young Lee**

**Brain Science Research Center  
Department of BioSystems  
Korea Advanced Institute of Science and Technology  
<http://bsrc.kaist.ac.kr>**

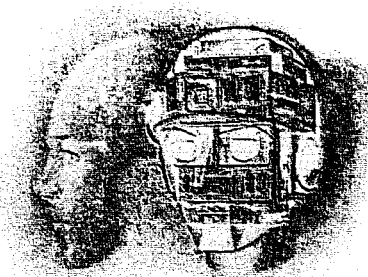
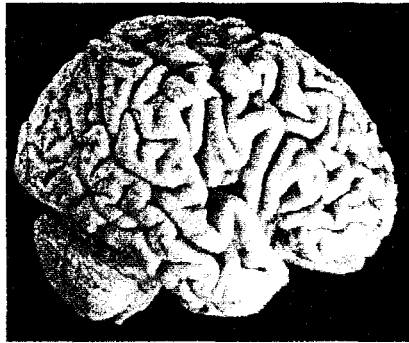
1

## **Contents**

- **Korean Brain Neuroinformatics Research Program**
- **Artificial Auditory Systems**
  - **Auditory Model**
  - **Binaural Processing**
  - **Selective Attention**

# Brain: The Final Frontier!

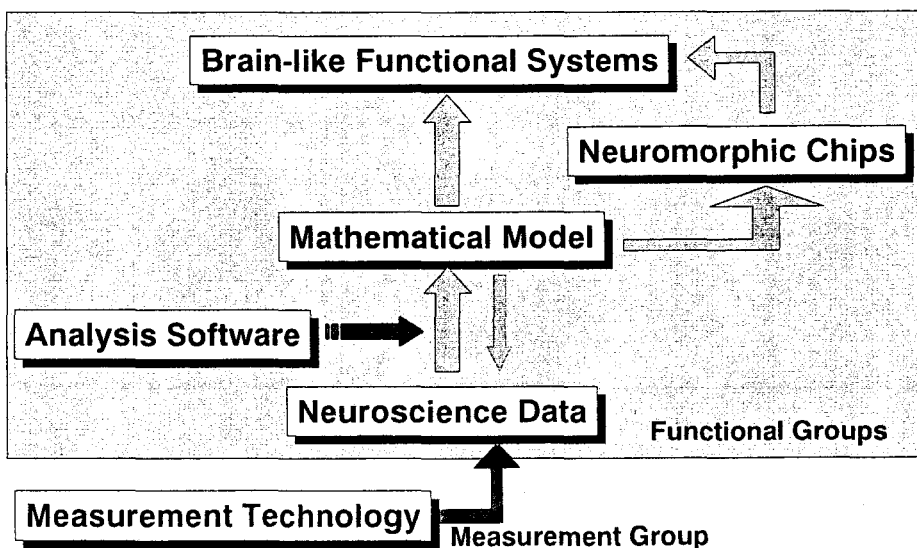
Intelligence to Machine!  
Freedom to Mankind!  
From Biology to Hardware!



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

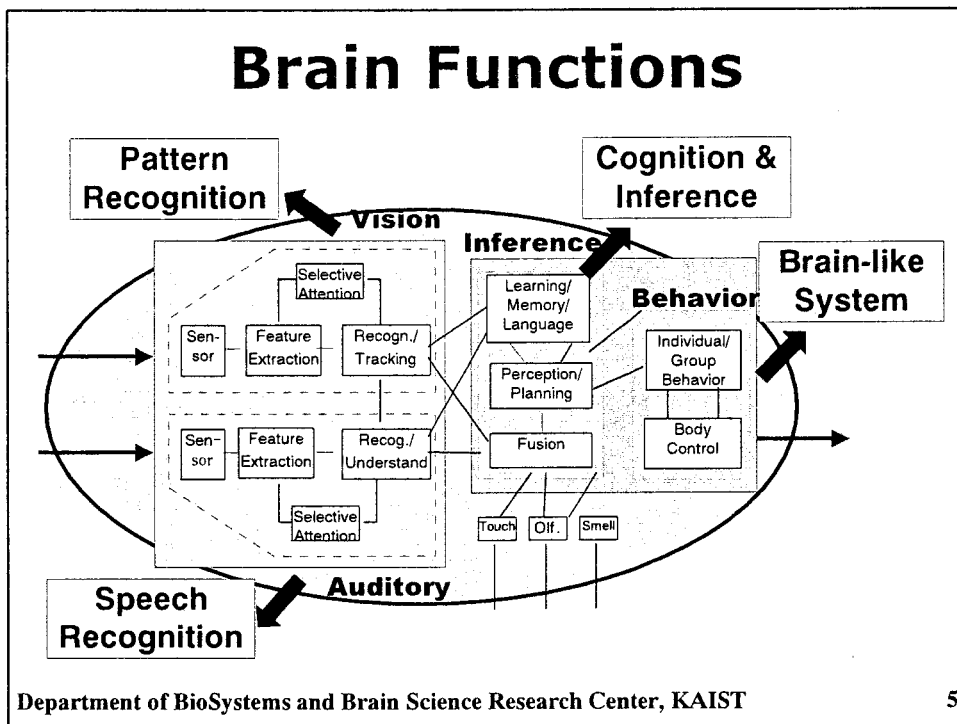
3

## Brain Neuroinformatics



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

4



# Artificial Auditory System

- Noise-Robust Speech Processing
- Cocktail party problem

The illustrations show a violin, a person with a question mark, and a person shouting into a megaphone, representing the challenges of noise-robust speech processing and the cocktail party problem.

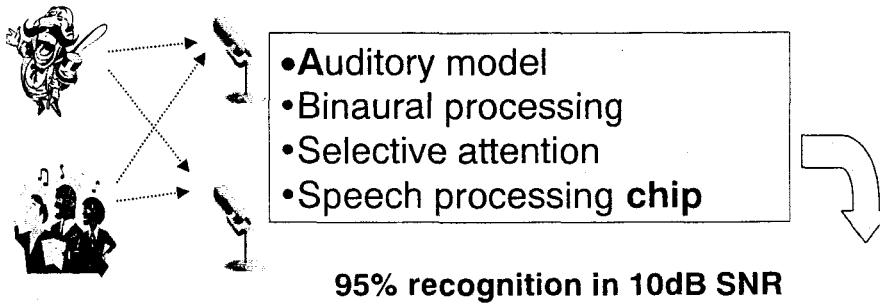
Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

6

## Artificial Auditory System

Based on Human Cognitive Mechanism

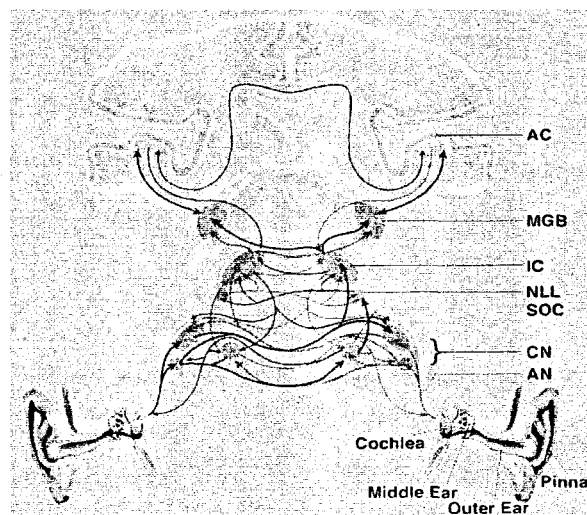
- Develop mathematical model and auditory chip
- Develop Continuous speech recognition system



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

7

## Auditory Central Nerve System

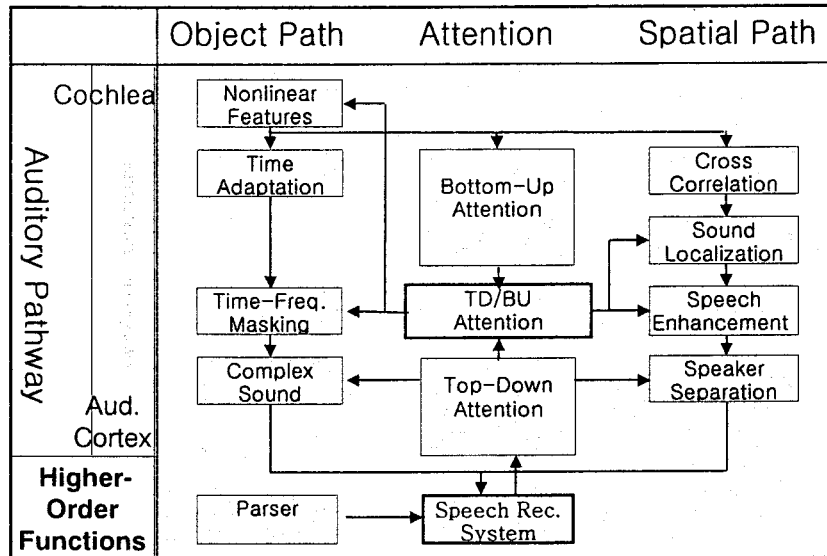


Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

8



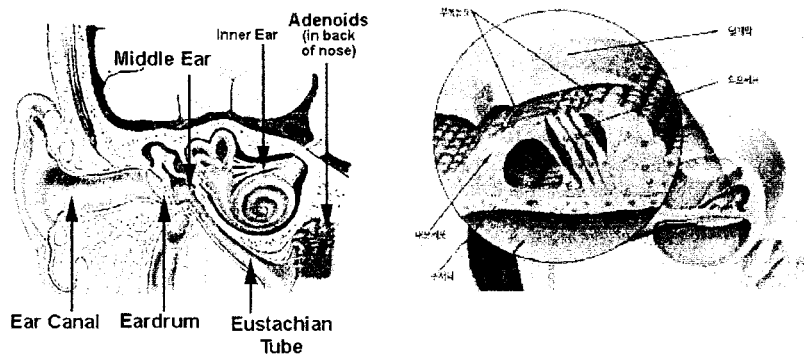
## Research Scopes



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

9

## Human Auditory System

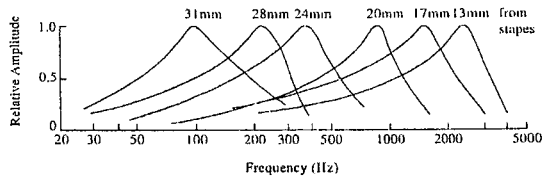


Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

10

# Auditory Model

- bandpass filtering (logarithmic scale in frequency) at basilar membrane

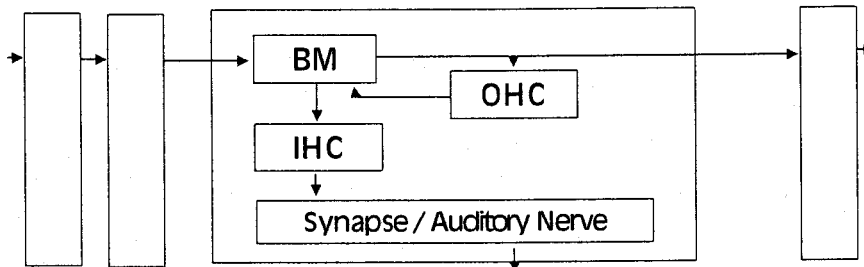


- Nonlinear processing at inner hair cell (short-term adaptation, synchronization, etc.)

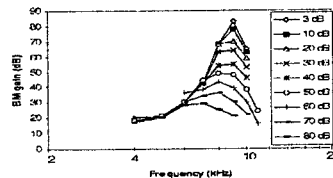
Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

11

# Auditory Model



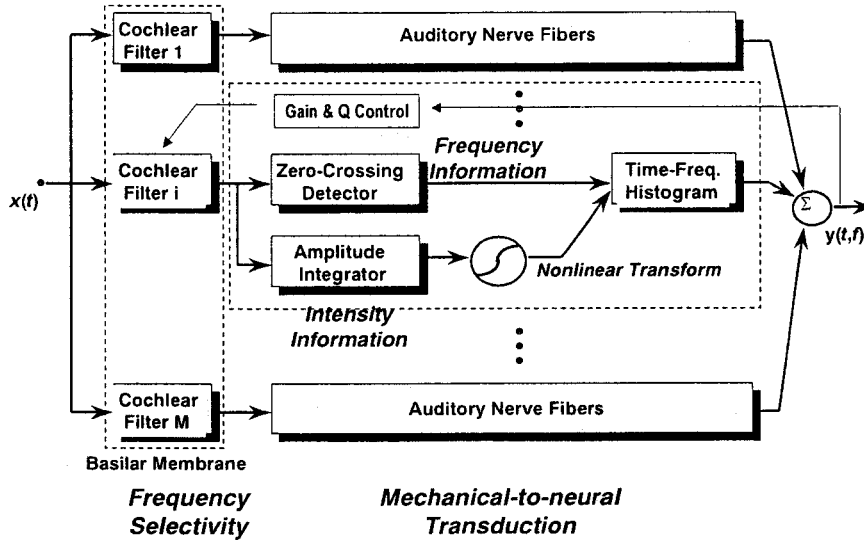
Automatic Gain Control of Outer Hair Cell



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

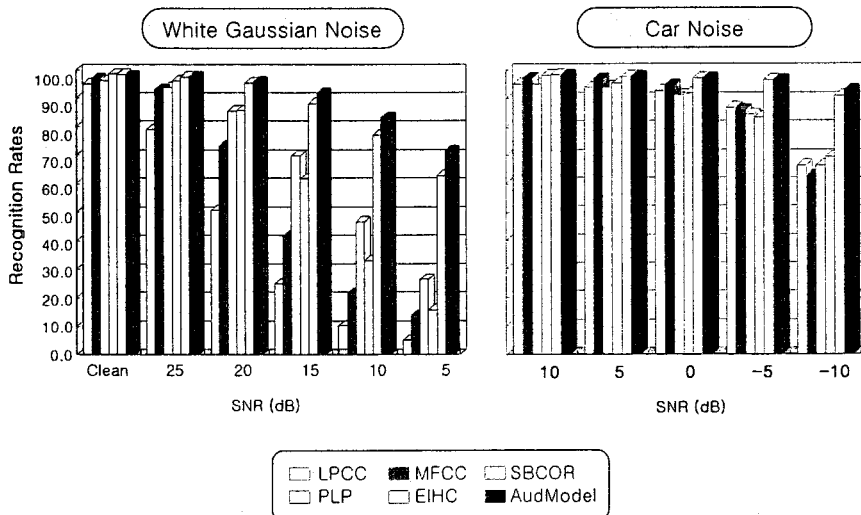
12

# Auditory model



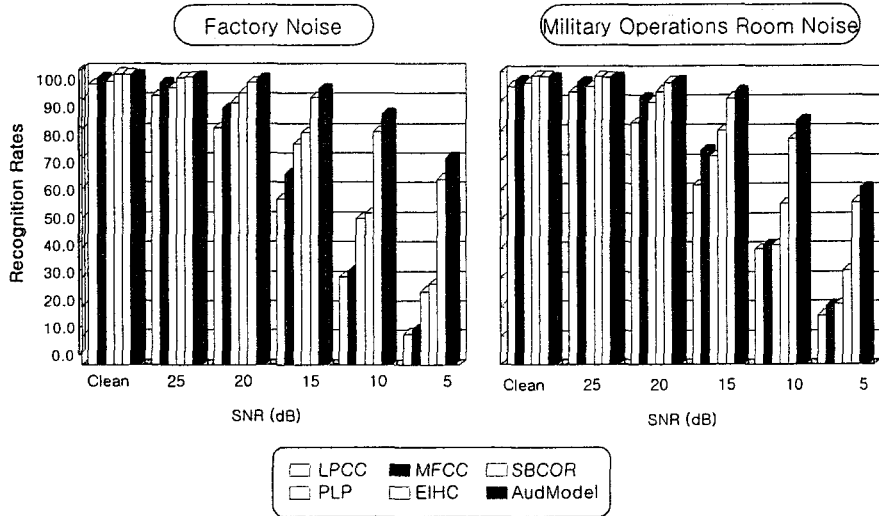
Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

# Recognition Results with Noise



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

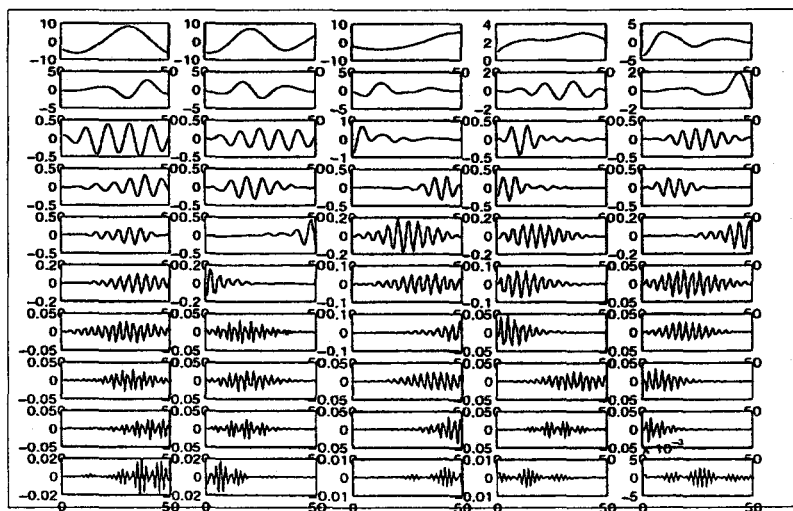
## Recognition Results with Noise



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

15

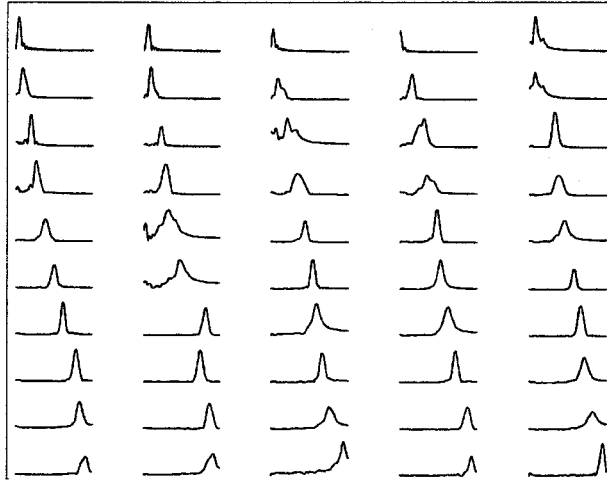
## ICA-based Speech Features : Time



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

16

## ICA-based Speech Features : Freq.

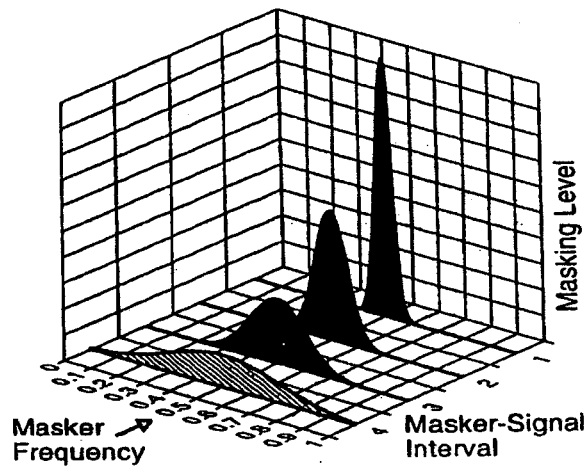


Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

17

## Time-Frequency Masking

- Lateral Inhibition



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

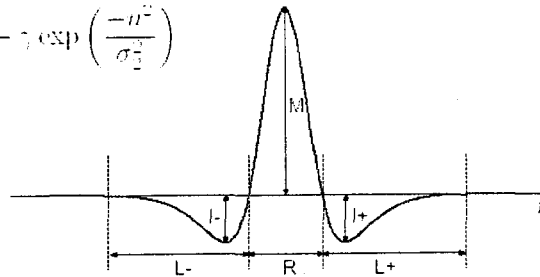
18

## Masking using Lateral Inhibition

- ✓ Lateral Inhibition by Convolutional Filtering
- ✓ Filtering Domain
- ✓ Filter Shape
  - Mexican hat from difference of Gaussian

$$w(n) = \exp\left(\frac{-n^2}{\sigma_1^2}\right) - \gamma \exp\left(\frac{-n^2}{\sigma_2^2}\right)$$

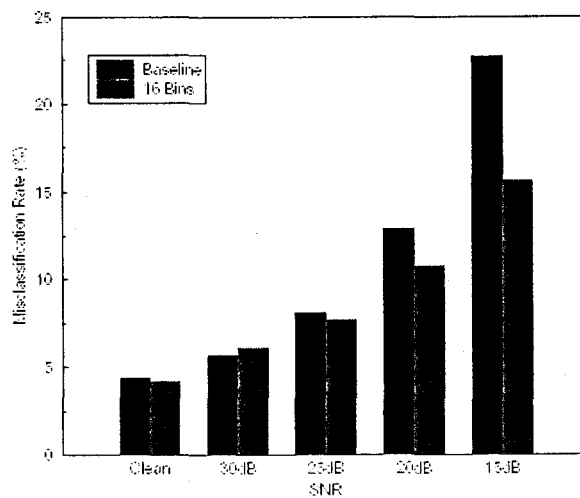
where,  $\sigma_1 < \sigma_2$ ,  $\gamma < 1$



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

19

## Isolated Word Recognition Rates

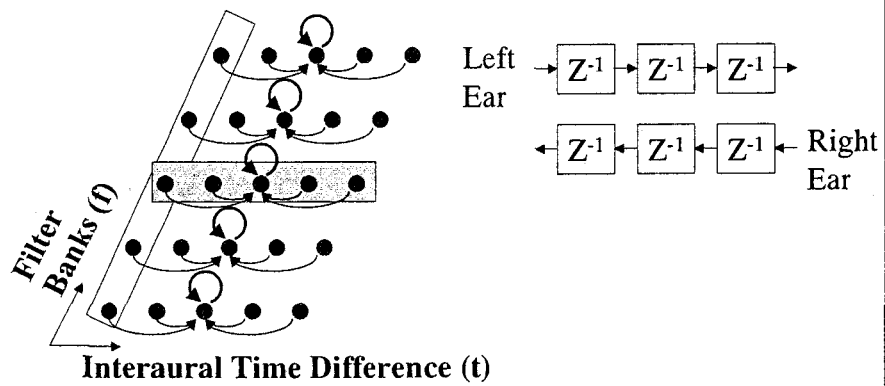


Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

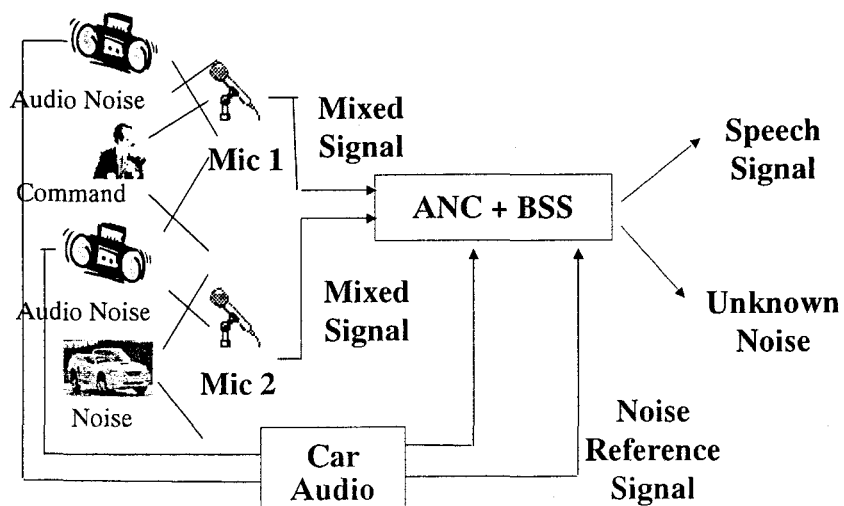
20

## Binaural Hearing

- (1) Summation for all BP filters
- (2) Winner-Take-All on ITD

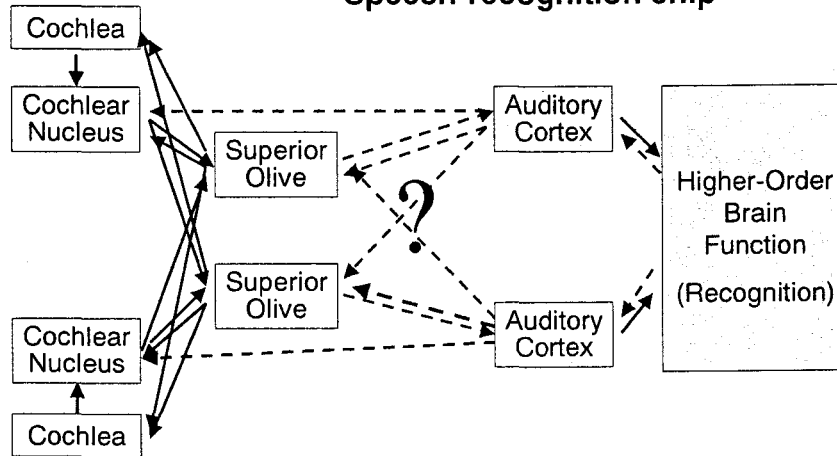


## Simultaneous ANC and BSS

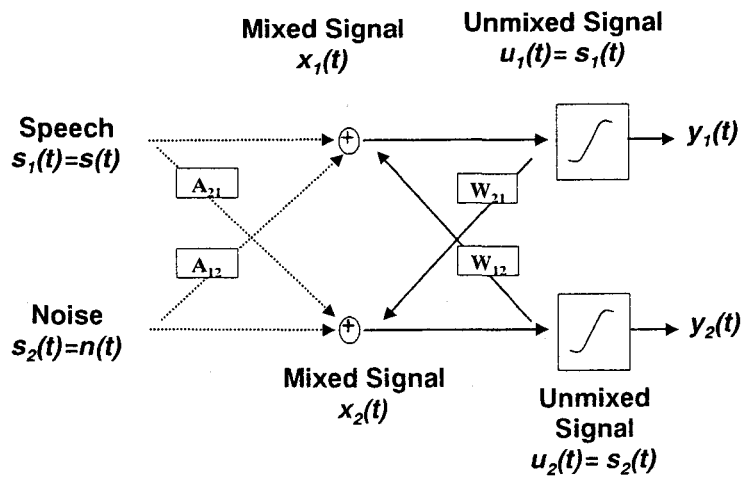


# Auditory Pathway

- Improvement of Cochlea model
- Binaural hearing model
- Top-Down attention
- Speech-recognition chip

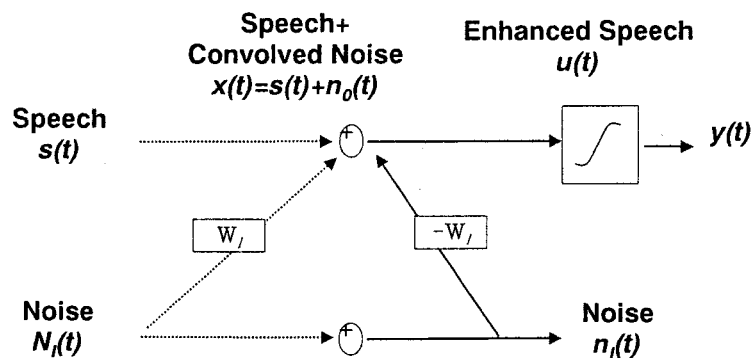


# Blind Signal Separation





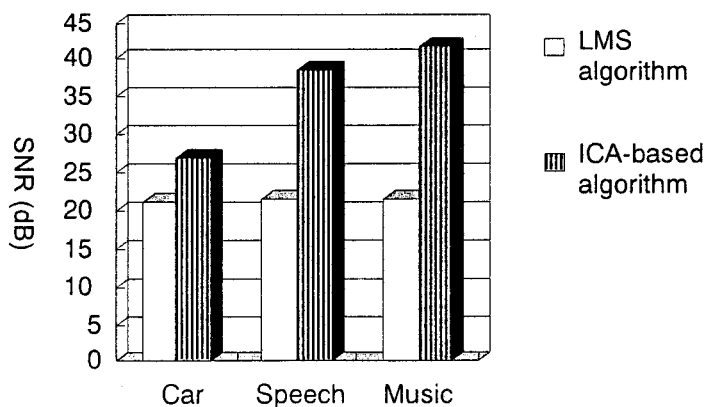
# Active Noise Canceling



$$u[j] = s[j] + n_o[j] - \sum_{l=1}^L \sum_{k=0}^K W_{lk} n_l[j-k]$$

# Independent Component Analysis

- LMS: second-order statistics only
- ICA: statistical independence

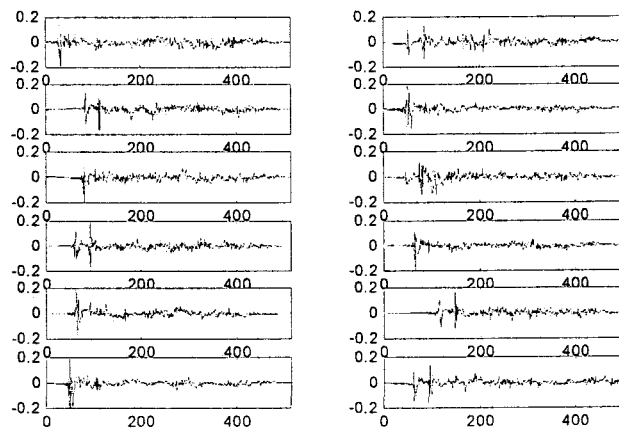


## NESS processor

- 4 input buffer, 6 weight vector
  - 12 KHz, 12 bit sampling
  - 512 time delays
  - Memory Requirement
    - Input buffer :  $2 \times [ 2 \times 512 \times 12 ]$  : 12 MHz
    - Weight vector :  $2 \times [ 3 \times 512 \times 30 ]$  : 36 MHz
  - Function
    - 4 ANC
    - 2 BSS + 4 ANC
    - 3 BSS
  - Gate count
    - 20,000

## Simulation (1)

- Artificial mixing using room response filter

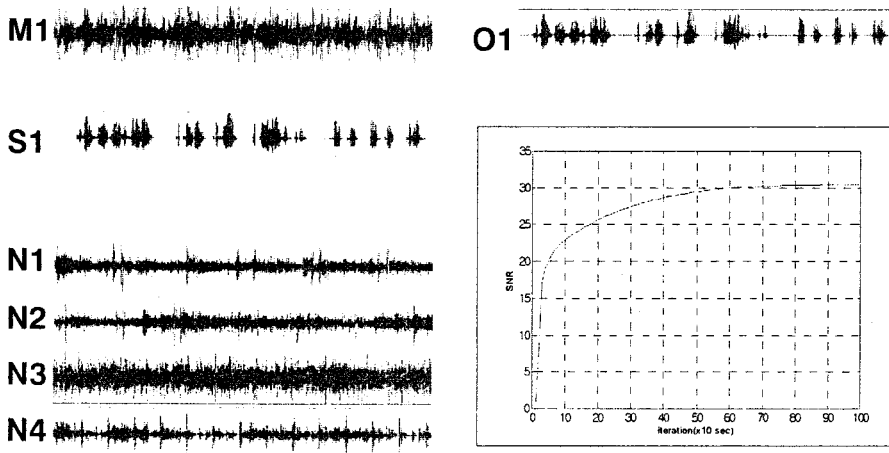


## Simulation (2)

- Simulation Tasks

<b>TASK</b>	<b>I</b>	<b>1 ch ANC [1 chip]</b>
	<b>II</b>	<b>4 ch ANC [1 chip]</b>
	<b>III</b>	<b>2 ch BSS [1 chip]</b>
	<b>IV</b>	<b>2 ch BSS + 2 ch ANC [1 chip]</b>
	<b>V</b>	<b>2 ch BSS + 5 ch ANC [2 chips]</b>

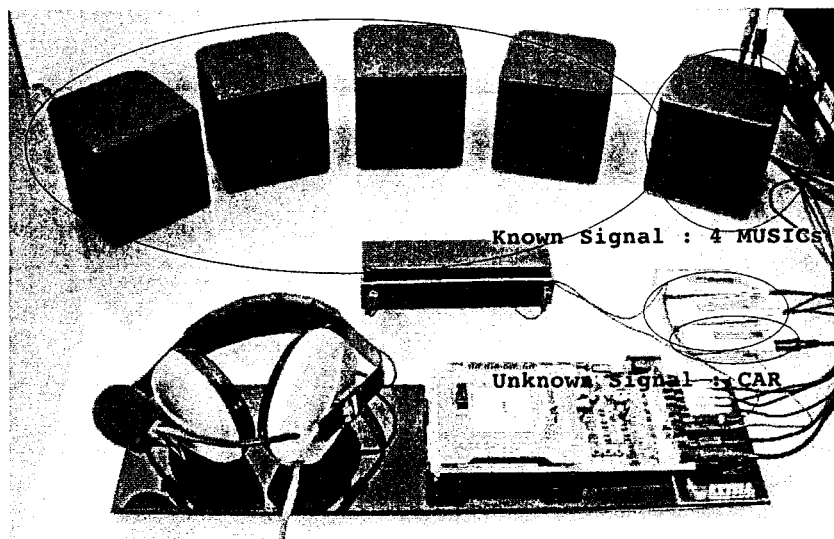
## TASK II : 4 ch ANC



## Simulation Result

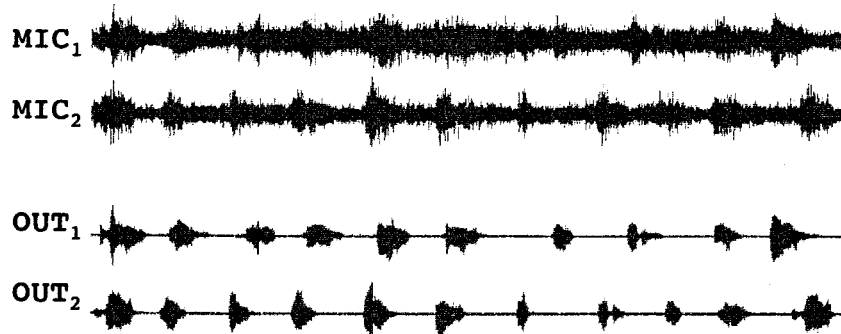
TASK	Init SNR	Final SNR	SNR Enhancement
1-channel ANC	-2.2	30.5	+32.7
4-channel ANC	-7.0	21.4	+28.4
2-channel BSS	3.8,0.4	15.8,16.1	+12.0,+15.7
2 BSS & 2 ANC	-5.1,-4.3	15.5,15.3	+20.6,+19.6
2 BSS & 5 ANC	-8.5,-7.5	12.9,14.0	+21.4,+21.5

## Demo System



## 2-BSS + 4-ANC Channels

- 4 audio music
- 1 male voice
- 1 female voice



## Recognition Test (1)

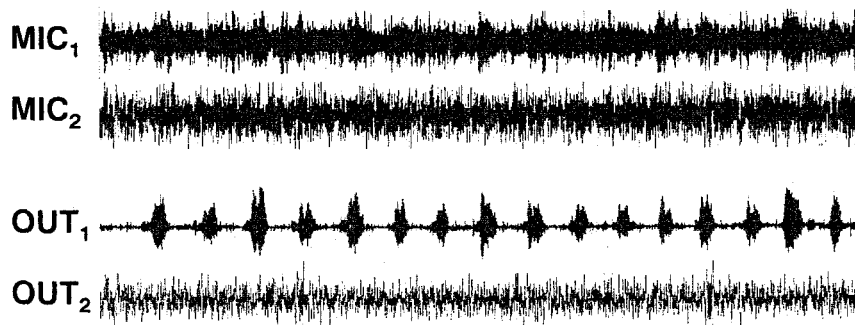
- Training
  - TI DIGIT training set : men only
    - 794 utterance
  - Clean DB only
  - ESR700 Development Tool
    - Network size : automatically constructed by ESR700 tool
      - Input : 256
      - Hidden : 20
      - Output : 10

## Recognition Test (2)

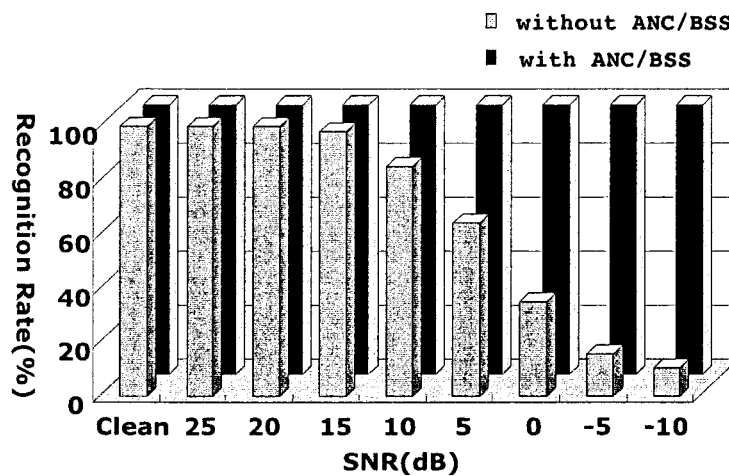
- Test
  - TI DIGIT test set : men only
    - 1267 utterance
  - Artificial mixing by room response
    - 2 BSS + 4 ANC
      - BSS : Test DB + car noise [NOISEX CD]
      - ANC : 4 MUSICs

## Recognition Test (3)

- Case Example
  - SNR : - 10 dB



## Recognition Rates



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

37

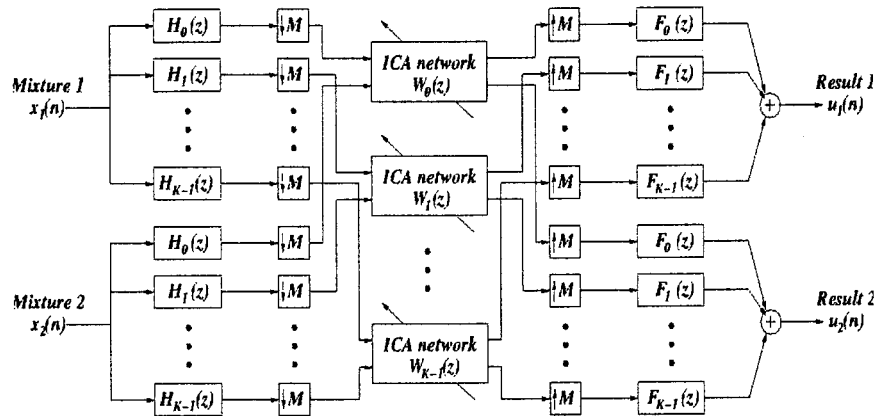
## Recognition Test (4)

SNR	Without NESS	With NESS	
		Recognition Rate	Final SNR
Clean	99.84	99.84	-
25 dB	99.84	99.68	19.37 dB
20 dB	99.84	99.76	19.33 dB
15 dB	98.26	99.84	19.23 dB
10 dB	85.08	99.84	18.96 dB
5 dB	64.40	99.84	18.20 dB
0 dB	35.28	99.84	16.32 dB
-5 dB	15.78	99.84	12.86 dB
-10 dB	10.73	99.84	7.99 dB

Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

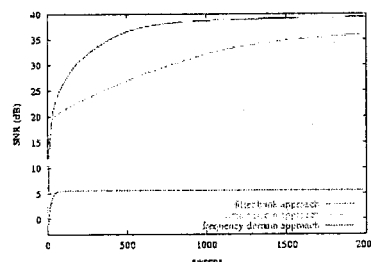
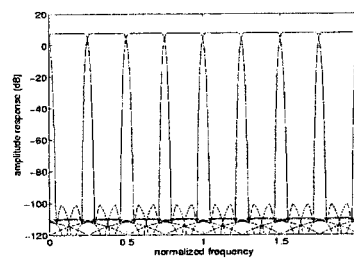
38

## ICA-based ANC with Filter Bank



## ANC Results with Filter Bank

- Filter bank design
  - Eight-channel oversampled filter bank  $M = 6$
  - Prototype filter with 192 taps
- Learning curves
  - Signal and noise: speech
  - Mixing filter
    - A measured filter in a normal office room with 1000 taps
  - Performance limitation of the freq. domain approach
  - The filter bank approach
    - Much faster convergence speed than the time domain approach

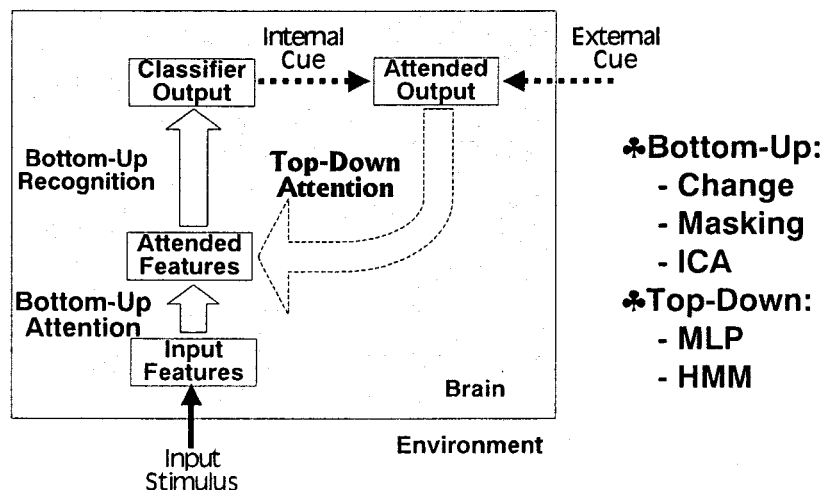




## Conclusion

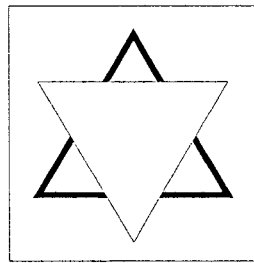
- FPGA implementation of ICA-based simultaneous ANC and BSS
  - unified theory for ANC and BSS
  - high memory bandwidth
  - max 3 BSS channels and 32 ANC channels
  - about 18 dB SNR improvement
- Speech recognition in real-world noisy environment
  - hands-free in running cars

## Selective Attention



## Top-Down Selective Attention

- **Confusing/Occluded patterns**
- **Overlapped patterns**



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

43

## Background

- **1958: Broadbent, "Early filter" theory**  
The brain temporarily retained information about all stimuli but that the information faded, unless attention had been turned quickly to a particular memory trace.
- **1960: Treisman**  
"the filter merely attenuates"
- **1971: Broadbent**  
"selection on the basis of semantic properties"
- **1988: Fukushima: "Neocognitron" model**  
selective attention and switching for the recognition of superimposed binary patterns

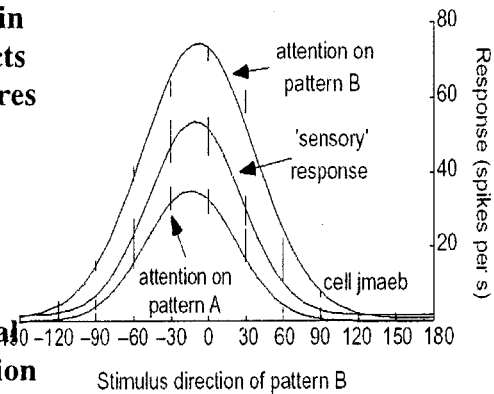
Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

44

## Feature Similarity Gain Model

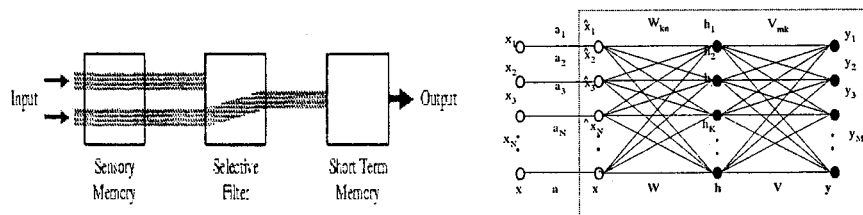
- S. Treue & J.C.M. Trujillo, Nature 1999, pp. 575-579.

- The regulation of the gain of a sensory neuron reflects the similarity of the features of the currently behaviourally relevant target and the sensory selectivity of the neuron.
- The relevant target features include the spatial location, direction of motion and presumably others.

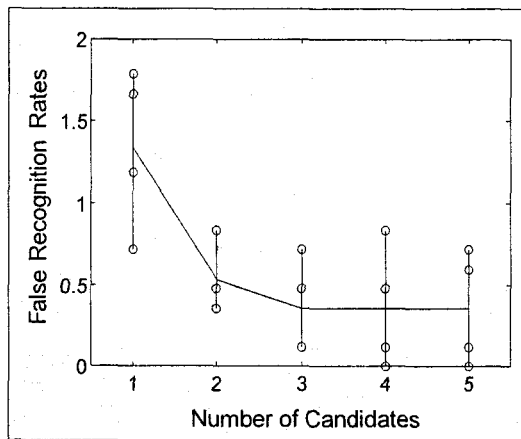


## Proposed Neural Model

- ♣ Early filtering: “feature-based” attention
- ♣ Attention cue at test phase: external cue to a class (focus at recognition only, not training)
- ♣ Top-Down expectation: Gradient-based EBP algorithm using trained knowledge in an MLP



## Noisy Patterns Recognition Small Database



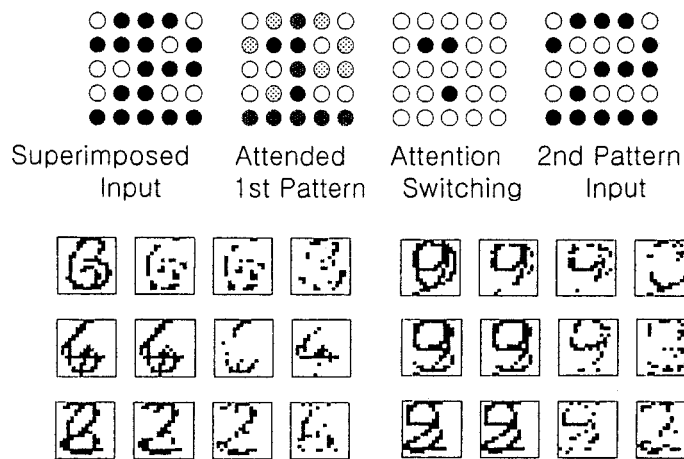
Handwritten,  
16 x 16 pixels,  
10 characters x  
28 people,  
4 experiments

Pixel inversion  
probabilities is 0.05.

## Attention Switching

- For sequential recognition of superimposed patterns,
  - (1) Classify with the SA algorithm.
  - (2) Remove attention from the attended pixels (Set  $a_k=0$ ), and go to (1).\* only for highly-confident pixels ( $a_k=1$ ).

## Superimposed Numerals Small Database



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

49

## Superimposed Numerals Small Database

### Recognition Rates of the first and second patterns

•	First Pattern	Second Pattern
• Top 2 Output Activation	91.3%	62.7%
• Selection Attention & switching		
• - Top 1 candidate	91.3%	75.4%
• - Top 2 candidates	95.4%	76.9%
• - Top 3 candidates	95.9%	77.4%

Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

50

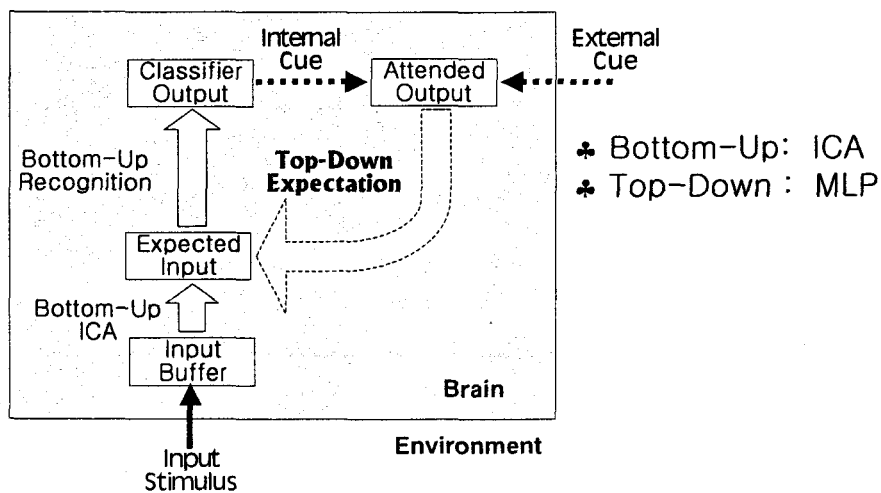
# Conclusion

- **Top-Down Selective Attention**
  - biological feature-similarity gain model
  - EBP to calculate top-down expectation
  - improves confidence of recognition
  - attention switching for sequential recognition of overlapped patterns.

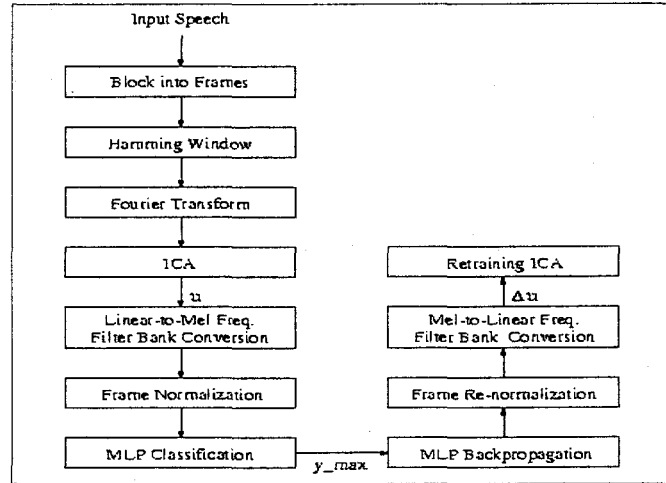


**Applicable to real-world applications!**

## Bottom-Up and Top-Down Processing



## Signal Flow Chart



## Recognition Results

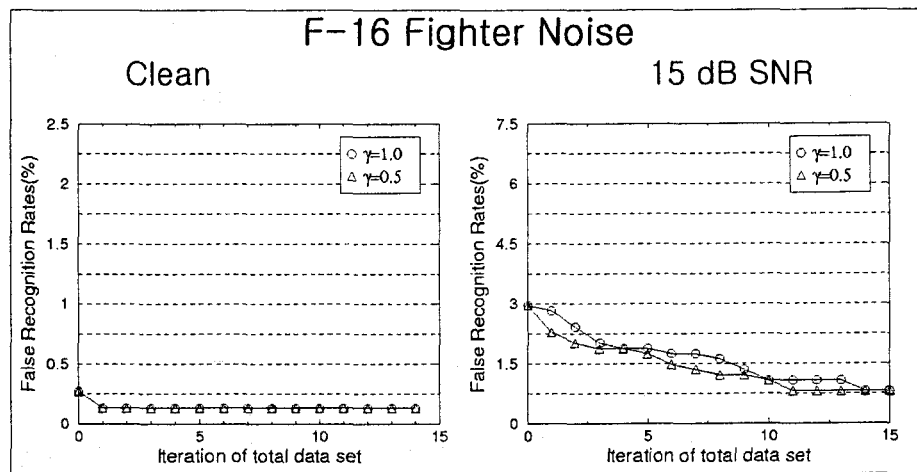
Table 1: The recognition rates of noisy speech recorded with F-16 fighter noise (%)

SNR	Training data				Test data			
	Clean	15dB	10dB	5dB	Clean	15dB	10dB	5dB
MLP	99.87	93.27	73.49	42.80	96.10	84.79	62.99	36.74
ICA	99.73	97.04	91.92	78.73	93.94	90.58	85.60	68.91
<b>The proposed algorithm</b>	<b>99.87</b>	<b>99.33</b>	<b>94.48</b>	<b>80.62</b>	<b>96.10</b>	<b>93.54</b>	<b>86.27</b>	<b>71.06</b>

Table 2: The recognition rates of noisy speech recorded with speech babbling noise (%)

SNR	Training data				Test data			
	Clean	15dB	10dB	5dB	Clean	15dB	10dB	5dB
MLP	99.73	88.56	61.51	32.57	96.77	82.91	64.47	38.49
ICA	98.52	95.15	91.92	76.45	91.66	88.56	85.06	73.22
<b>The proposed algorithm</b>	<b>99.73</b>	<b>97.71</b>	<b>92.46</b>	<b>76.72</b>	<b>97.17</b>	<b>93.14</b>	<b>87.35</b>	<b>73.35</b>

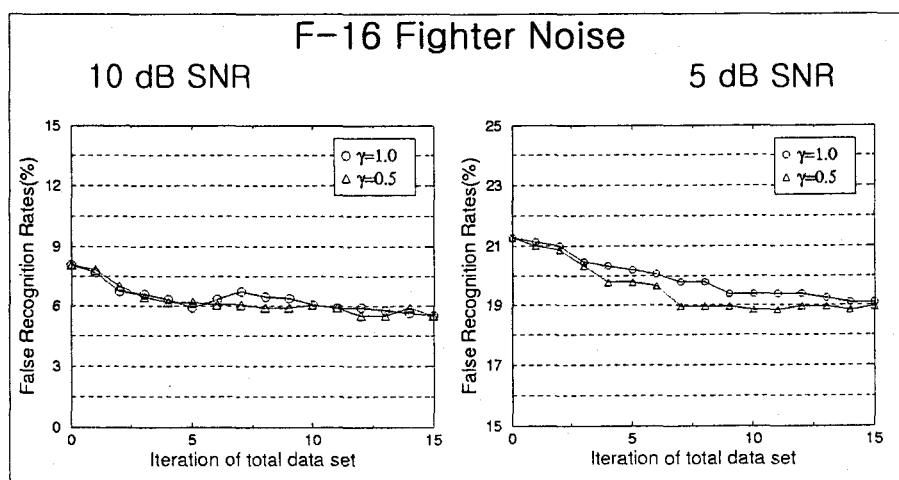
## False Recognition Rate vs. Learning Epoch



Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

55

## False Recognition Rate vs. Learning Epoch



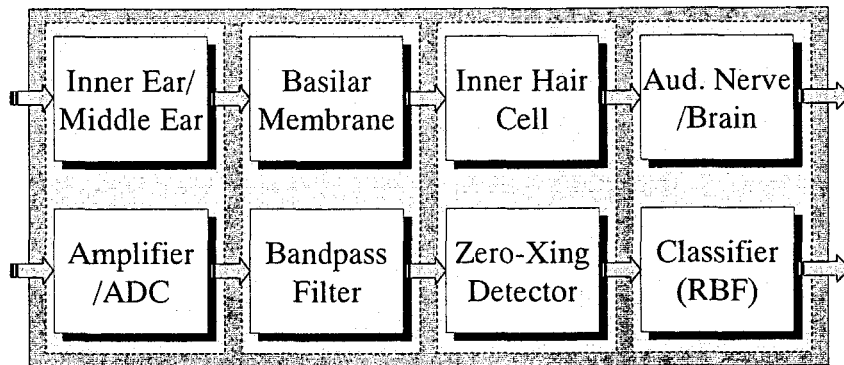
Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

56



# Auditory Chip

## Biological System



## Artificial System

Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

57

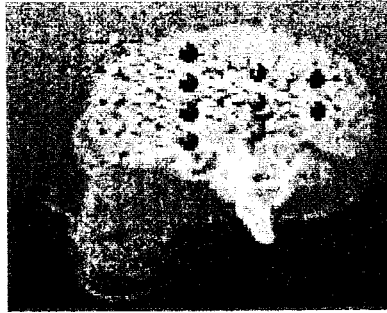
# Conclusion

- **Learn from mother nature!**
- Artificial auditory systems
  - auditory model
  - binaural processing (ICA)
  - selective attention
  - ASIC

Department of BioSystems and Brain Science Research Center, KAIST

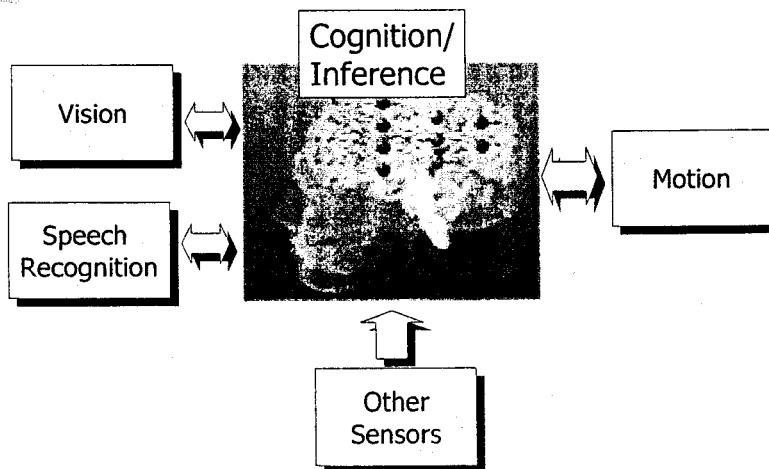
58

# Flexible Inference and Learning Based on Brain Information Processing



Myung Won Kim  
Soongsil University

## Relations to Other Research Areas



2

## Research Goals

- Understanding and modeling mechanisms of human cognitive functions
  - Memory, learning
- Developing efficient and flexible inference and learning technology based on neural networks.
- Intelligent information search
- Developing application systems.

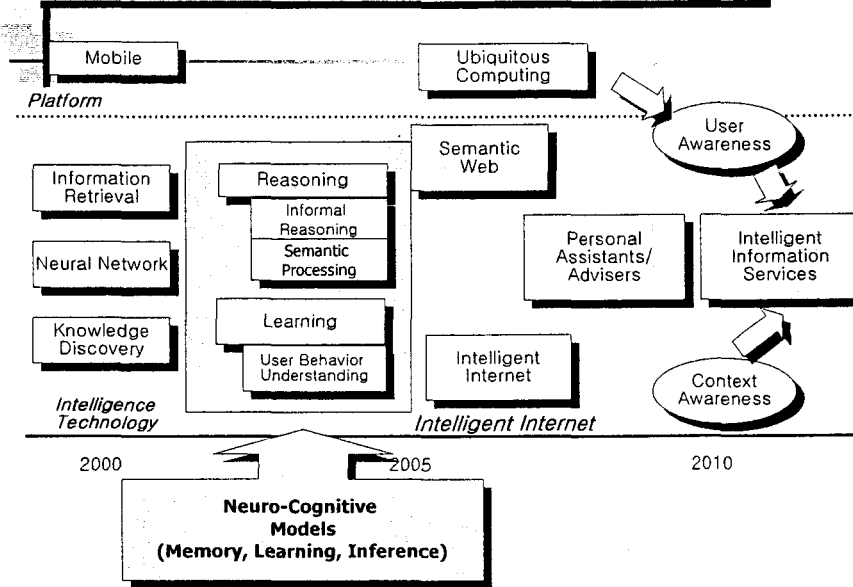
3

## Motivations

- More intelligent information services are required in the future.
- Personalization to reduce information overload.
- Pervasive computing, semantic Web.
- Conventional inference systems:
  - Brittleness: symbolic and logic based.
  - Lacking human informal reasoning

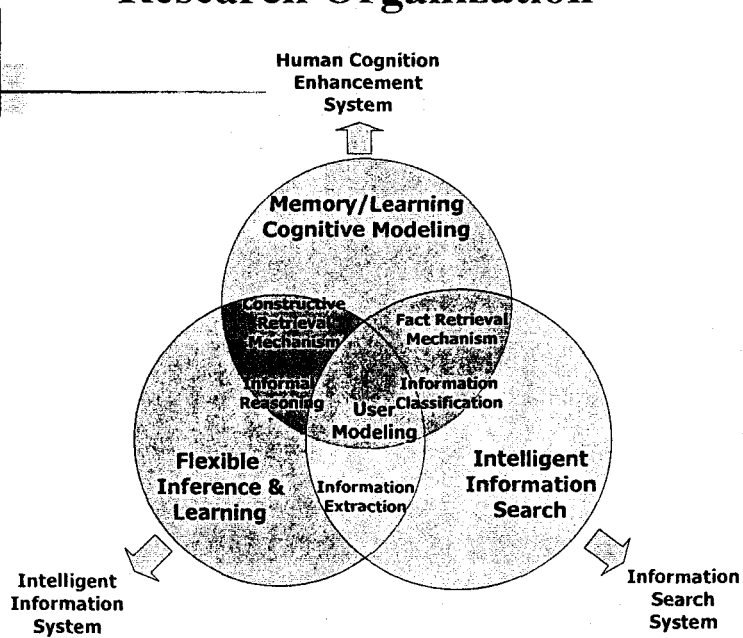
4

## Technology Trends in Information Services



5

## Research Organization



6

## Research Results – 1<sup>st</sup> Stage (1)

### 1st Stage(1998–2000)

- Memory and knowledge representation
  - Brain functions in memory representation and retrieval: fMRI studies
  - The interaction between perceptual and semantic representation systems
  - Types of conceptual knowledge and differences in representations
  - Experimental analysis of hypermnesia
  - Mechanisms of encoding and retrieval in memory
- Human informal reasoning model
  - Effects of relevance on conditional reasoning
  - Perspectives on preference
  - Informal ways of probability judgment
  - Judgment of causality

7

## Research Results – 1<sup>st</sup> Stage (2)

- Neuro-symbolic inference architecture
  - SymCSN: hybrid inference architecture
  - Similarity and association analyzed as semantic building components.
  - Context processing
- Combining structure of multiple expert modules
  - Effective generation of modular neural networks by speciation methods
  - Combining of structure adaptive self-organizing maps (SASOM)
  - Dynamic action selection by behavior networks

8

## Research Plan – 2<sup>nd</sup> Stage (1)

- 2nd Stage(2001–2003)
  - *Memory and learning*
    - Interactive mechanisms of encoding & retrieval, and basic factors of memory decline
    - Mechanisms of face-to-face and computer-mediated collaborative learning, and behavior analysis of Internet users
    - Components of hypermnesia, and strategies of memory elaboration, developmental pattern of hypermnesia, and working memory mechanism
  - *Human informal reasoning model*
    - Basic models of informal reasoning mechanism: object-dependent and property dependent inference mechanism classifying types of spontaneous inference
    - Parameters of inference making
    - Development and application of user models of inference

9

## Research Plan – 2<sup>nd</sup> Stage (2)

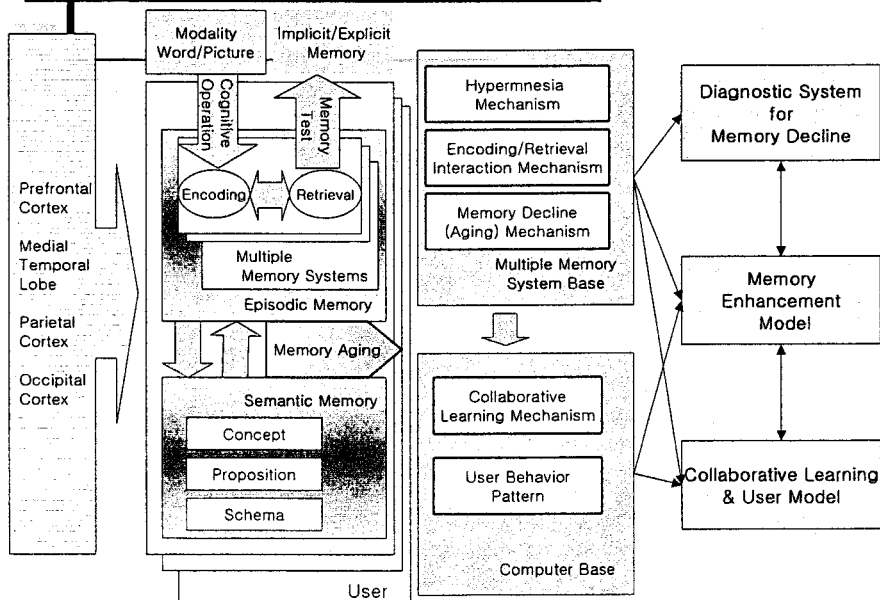
- *Personalization*
  - Neural network based collaborative recommendation
  - Integration of NN and symbolic rules for personalization
  - Integration of human behavior and multiple sources of information
- *User modeling*
  - User modeling by neural networks
  - Non-static inference: dynamic selection and ethology
  - Practical application of user modeling
- *Intelligent information search*
  - Text Mining based on Latent Variable Models
  - Web Mining based on Neural Networks
  - The Mechanism of Information Classification and Categorization Inherent in Human

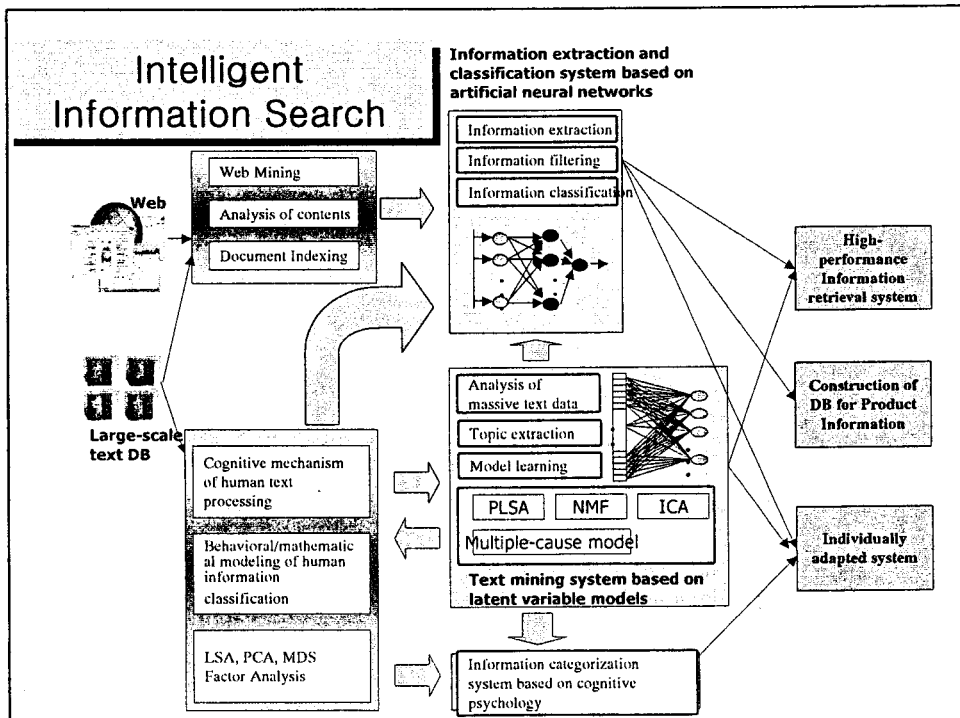
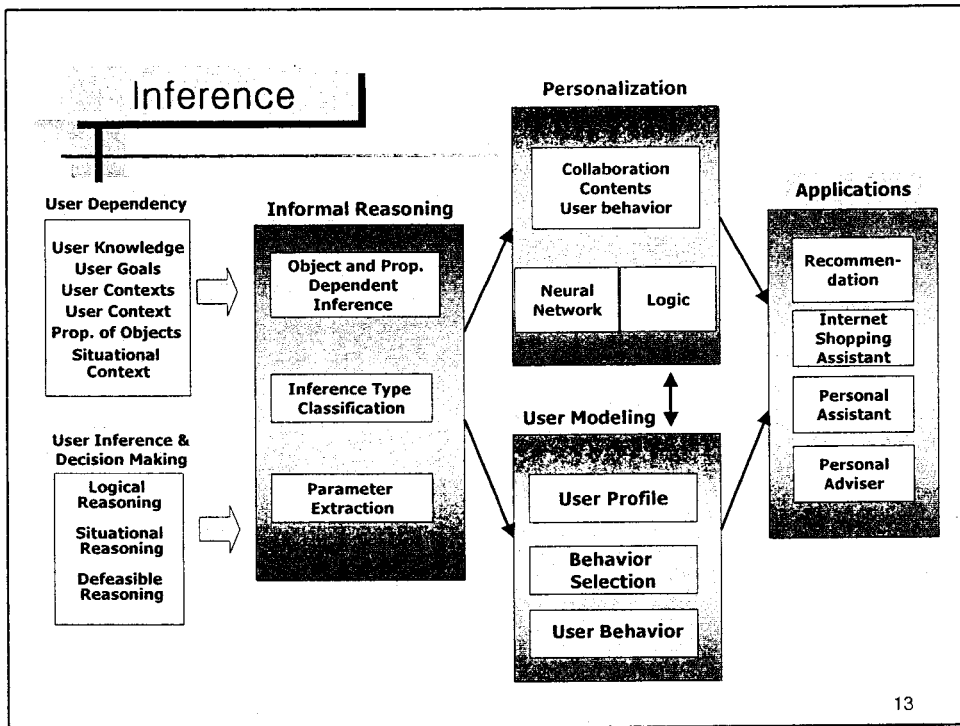
10

# Research Plan –3<sup>rd</sup> Stage

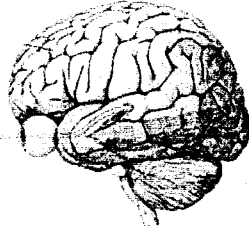
- 3rd Stage(2004–2007)
  - Integrated human-like flexible inference technology
  - Adaptive learning technology
  - Development of application systems: personal assistants/advisers.

## System of Memory/Learning Project









# 뇌정보처리 메커니즘에 기반한 인공시각시스템 연구

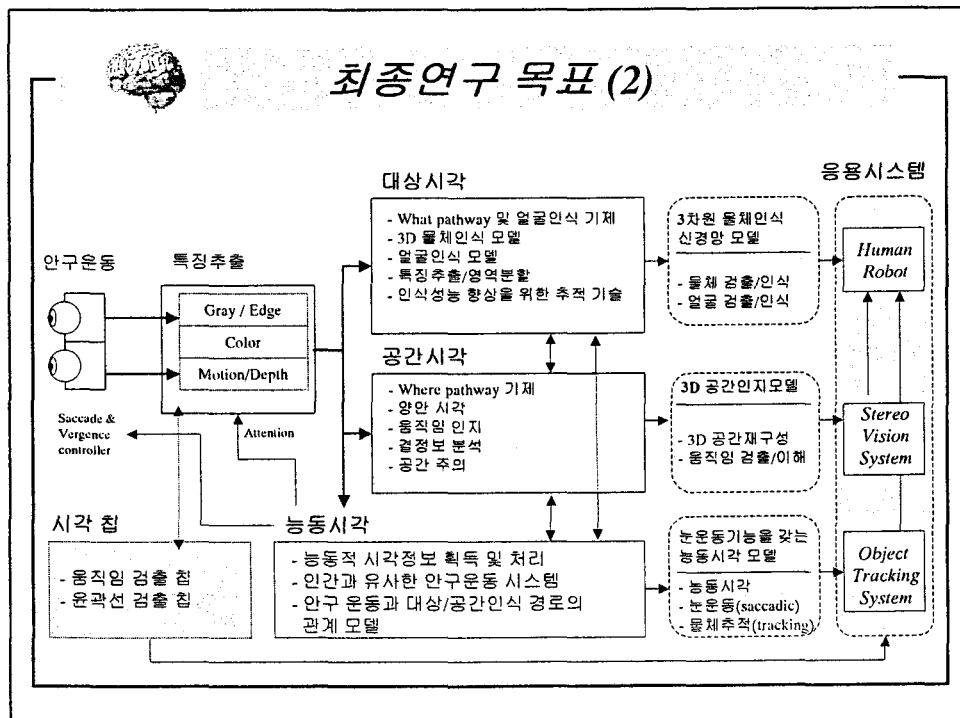
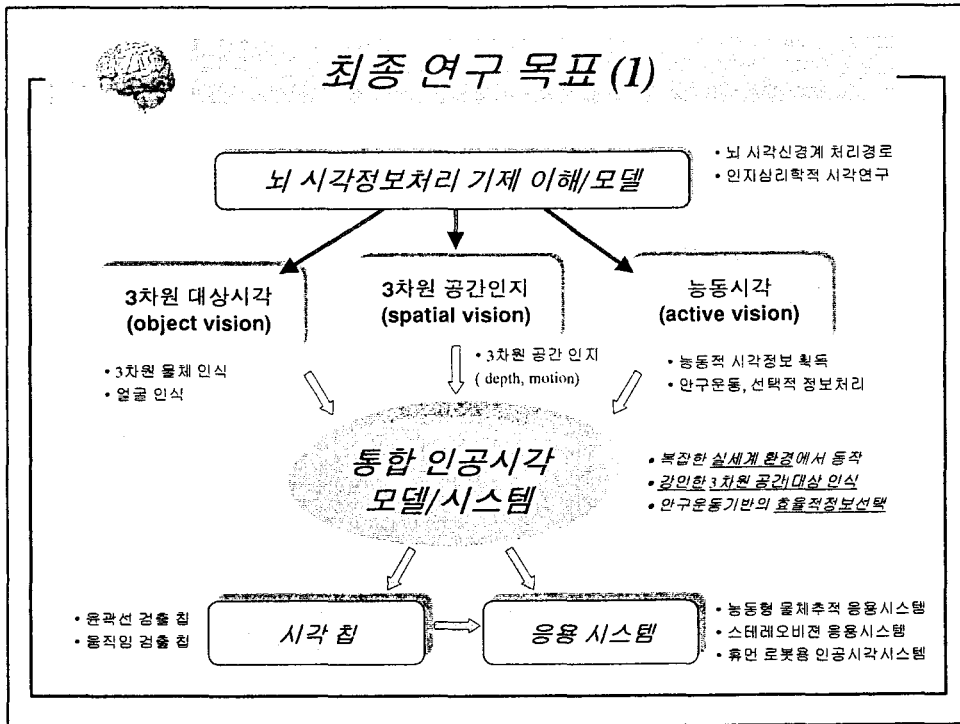
양 현 승

KAIST 전자전산학과  
뇌과학연구센터(BSRC)



## 목차

- 연구의 개요
  - 연구 목표
  - 분야 구성 및 내용 요약
- 연구 내용 및 결과
  - 대상 시각
  - 공간 시각
  - 능동 시각
  - 시각 칩
  - 응용시스템





### 최종 연구 목표 (3)

**통합 시각모델**  
3D 대상인식, 공간지각, 능동시각 기능이 합쳐진 통합 시각 모델 프로토타입

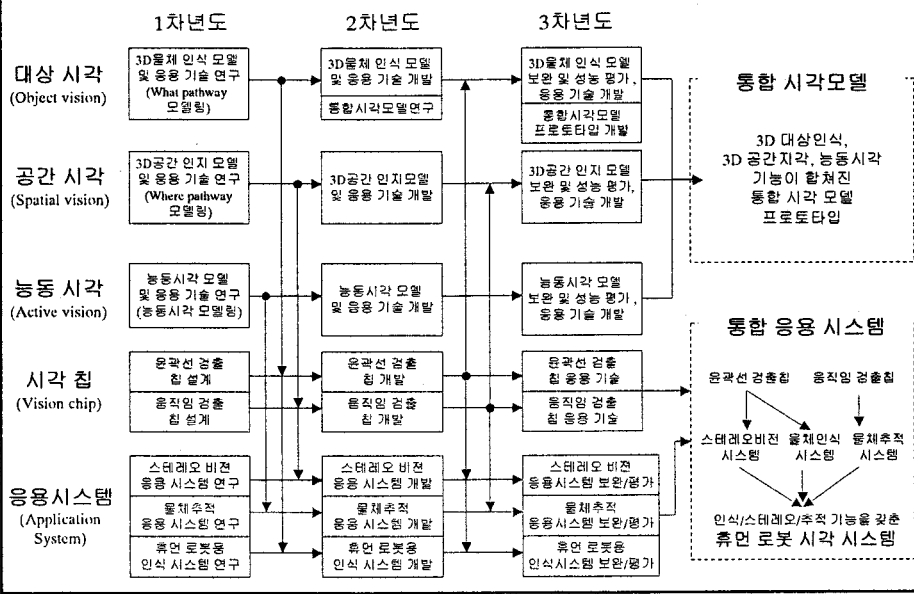
**통합 응용 시스템**  
원거리 감출침, 움직임 감출침  
↓  
스테레오비전 시스템, 물체인식 시스템, 물체추적 시스템  
↓  
인식/스테레오/추적 기능을 갖춘 휴먼 로봇 시각 시스템

- 대상 시각 기술
- 공간 시각 기술
- 능동 시각 기술
- 시각 칩
- 능동형 추적 시스템
- 스테레오비전 시스템
- 휴먼로봇 시각 시스템

- 3D 물체감출/인식률 90% (복잡한 배경, 동형상)
- 얼굴감출/인식률 90%
- 공간구조 정보 복원률 95%
- 이동표적 탐지/인식률 90%
- 3차원 안구제어 모델
- 인공 안구 (부피: 300cm<sup>3</sup> 이하, 속도: 300deg/fs) (3자유도 안구운동)
- 움직임을 감출 칩 (256x256)
- 움직임을 감출 칩 (256x256) (On chip 프로세싱으로 소형화) (속도 30 fps, 수광범위 100dB 이상)
- 능동형 추적 응용시스템 (인간 추적 운동과 유사성 90%)
- 착용형 맹인 안내 시스템 (반귀 측정 정확도 0.5 pixel) (전방 장애물 인지도 80%이상)
- 대상/공간/능동 시각 통합-가사작업 및 안내 (혼합된 인식기 인식률 80% 이상)



### 연구 내용 및 추진체계



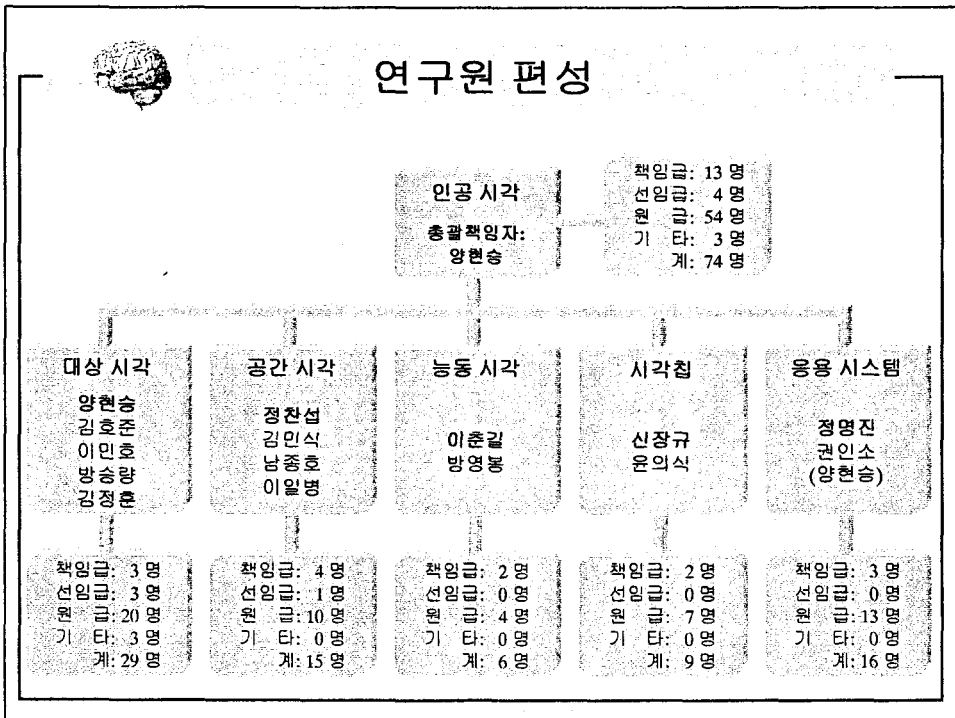


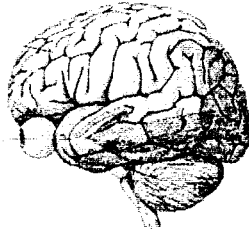
## 분야별 연구 내용 (요약)

	1차년도	2차년도	3차년도
<b>대상 시각 (Object vision)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3D물체인식 모델 및 응용기술 연구</li> <li>- What pathway 및 얼굴인식 기제 연구</li> <li>- 3D 물체인식 모델 연구</li> <li>- 얼굴인식 신경망 모델 연구</li> <li>- 시각피질 구조 신경망 모델 연구</li> <li>- 물체 인식위한 선택적 주의 기술 연구</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3D물체인식 모델 및 응용기술 개발</li> <li>- What pathway 및 얼굴인식 모델 개발</li> <li>- 3D 물체인식, 얼굴인식을 위한 시각피질 구조 신경망 모델 개발</li> <li>- 물체 인식위한 추적 기술 개발</li> <li>- 통합 시각 모델 연구</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3D물체인식 모델 보완/평가, 응용기술 개발</li> <li>- 3D 물체/얼굴인식 신경망 모델 보완 및 응용기술 개발</li> <li>- 시선이동을 통한 효율적 물체인식 시스템</li> <li>- 공간시각, 능동시각과 통합</li> <li>- 통합 시각 모델 프로토타입 개발</li> </ul>
<b>공간 시각 (Spatial vision)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3D공간 인지 모델 및 응용 기술 연구</li> <li>- Where pathway 및 공간인지기제 연구</li> <li>- 공간구조 복원 모델 연구</li> <li>- 운동 탐지 모델 연구</li> <li>- 주의기반 선택적 공간정보처리 모델 연구</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3D공간 인지 모델 및 응용기술 개발</li> <li>- Where pathway 및 공간인지 모델 개발</li> <li>- 공간구조 복원 모델 개발</li> <li>- 운동 탐지 모델 개발</li> <li>- 주의기반 선택적 공간정보처리 모델 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3D공간 인지 모델 보완/평가, 응용기술 개발</li> <li>- 3D 공간인지 모델 보완 및 응용기술 개발</li> <li>- 운동 탐지 모델 보완 및 응용기술 개발</li> <li>- 대상인식, 능동시각과 통합</li> </ul>
<b>능동 시각 (Active vision)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>능동시각 모델 및 응용 기술 연구</li> <li>- 능동적 시각정보 획득 및 처리 연구</li> <li>- 안구운동의 인지신경 기제 연구</li> <li>- 인간의 3차원적 시선이동 패턴 연구</li> <li>- 안구운동의 3차원 동역학 모델 연구</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>능동시각 모델 및 응용 기술 개발</li> <li>- 능동적 시각정보 획득 및 처리 기술개발</li> <li>- 안구운동신호의 시각계 통합 연구</li> <li>- 고속안구 운동의 제어 모델 개발</li> <li>- 인공지능 적용을 위한 소형 고효율 Actuator 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>능동시각 모델 보완/평가, 응용기술 개발</li> <li>- 고속안구 운동 제어 모델 보완 및 응용기술 개발</li> <li>- 고속 운동 가능한 인공지능 개발</li> <li>- 공간시각, 대상인식 기능과 통합</li> </ul>
<b>시각 칩 (Vision chip)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>윤곽선 검출 칩 설계</li> <li>움직임 검출 칩 설계</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>윤곽선 검출 칩 개발</li> <li>움직임 검출 칩 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>윤곽선 검출 칩 응용 기술</li> <li>움직임 검출 칩 응용 기술</li> </ul>
<b>응용시스템 (Application System)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>스테레오 비전 응용 시스템 연구</li> <li>물체추적 응용 시스템 연구</li> <li>휴먼 로보틱 인식 시스템 연구</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>스테레오 비전 응용 시스템 개발</li> <li>물체추적 응용 시스템 개발</li> <li>휴먼 로보틱 인식 시스템 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>스테레오 비전 응용시스템 보완/평가</li> <li>물체추적 응용시스템 보완/평가</li> <li>휴먼 로보틱 인식시스템 보완/평가</li> </ul>



## 연구원 편성





## 분야별 연구 내용

- 대상 시각
- 공간 시각
- 능동 시각
- 시각 칩
- 응용 시스템



## 대상 시각

**목표 : What pathway 기제 이해 및 이에 기반한 3차원 물체 인식 모델 및 응용기술 개발**

- |                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| • 3차원 물체 검출 및 인식 | : 정확성 90% 이상 (1차년도 80%) |
| • 얼굴 인식 및 검출     | : 정확성 90% 이상 (1차년도 80%) |
| • 표준영상에서 특징 추출   | : 오류 10% 이내             |
| • 추적에 의한 인식성능향상  | : 성능 향상 5% 이상           |

1차년도 2001

↓ 3D 대상시각 모델 연구

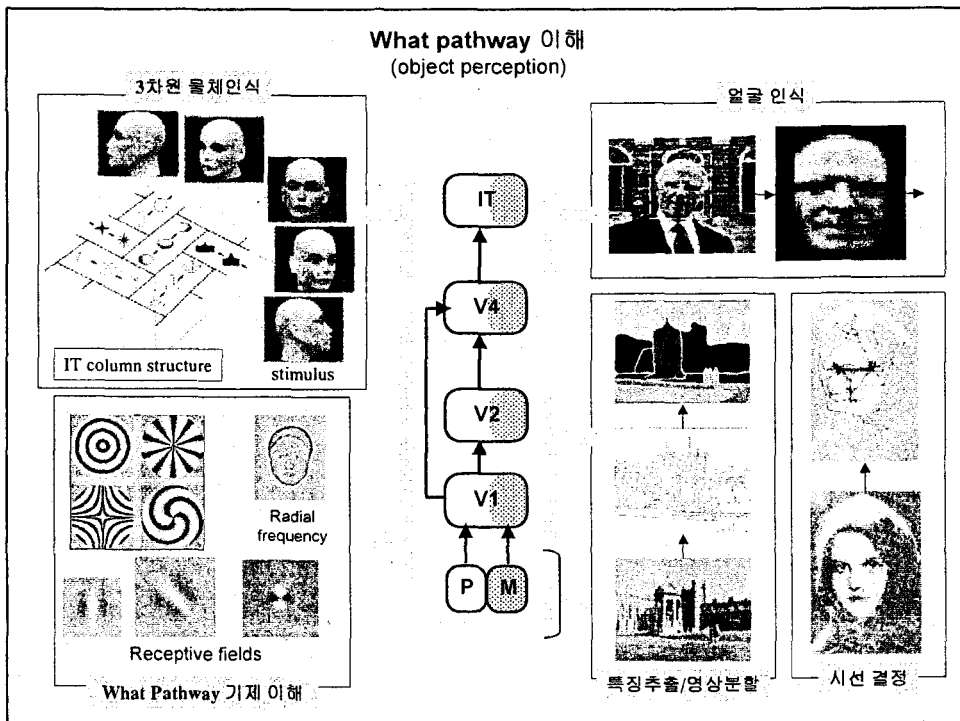
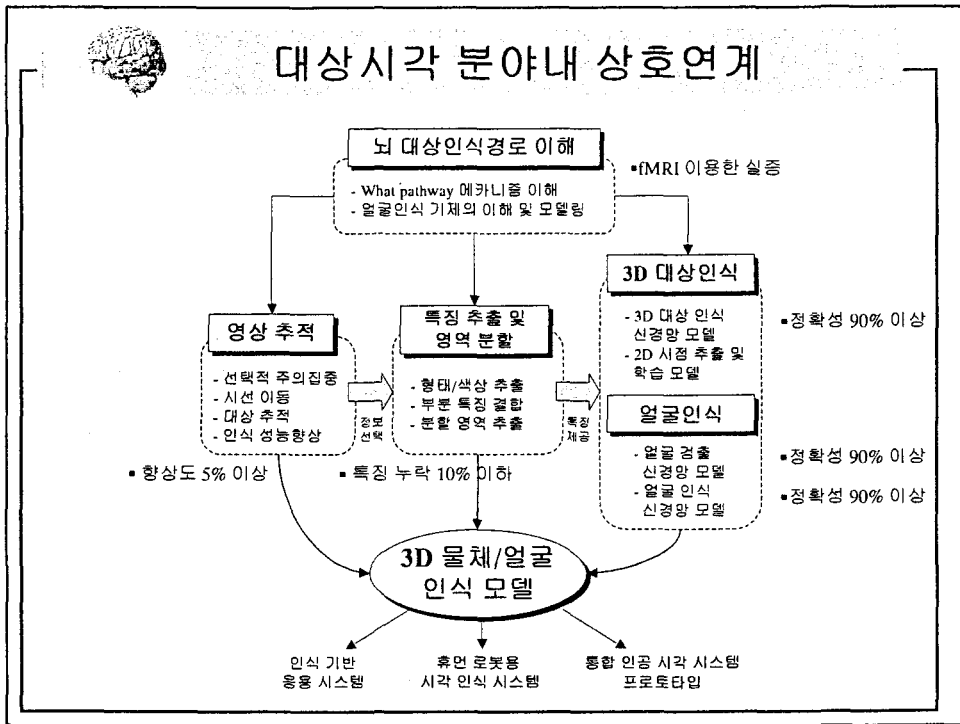
2차년도 2002

↓ 3D 대상시각 모델 개발

3차년도 2003

3D 대상시각 모델 보완,  
통합 및 응용 개발

- What pathway 기제 및 얼굴인식 기제 연구
- 신경망 기반의 3차원 물체인식 모델 개발
- 특징 추출 신경망 모델 개발 (색상, 형태, 위치 정보 추출 연구)
- 얼굴 검출 신경망 모델 개발
- 상향식 주의에 기반한 시선결정 모델





# 공간 시각

목표 : Where pathway 기제 이해 및 그에 기반한  
공간구조/변화 표상 모델 및 인식기술 개발

- 공간구조 (색/밝기, 결 구조) 복원률 95%
- 이동 표적 탐지 및 인식을 90%
- 선택적 주의기제에 의한 공간정보처리 능력 개선 25%

1차년도 2001

↓ 공간구조/변화 표상 원리 분석

- 공간구조분석을 위한 영상 전처리 연구 (색/밝기 복원, 결 속성)

2차년도 2002

↓ 공간구조/변화 표상 모델 개발

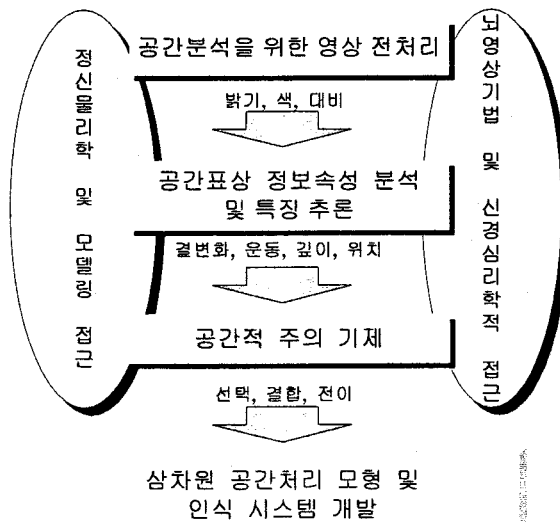
- 깊이, 운동 정보 표상 원리 규명
- 공간주의기제 특성 분석
- 색상정보에 의한 주의기반 공간 특징요소의 국소적인 결합 및 구성 방법 연구.

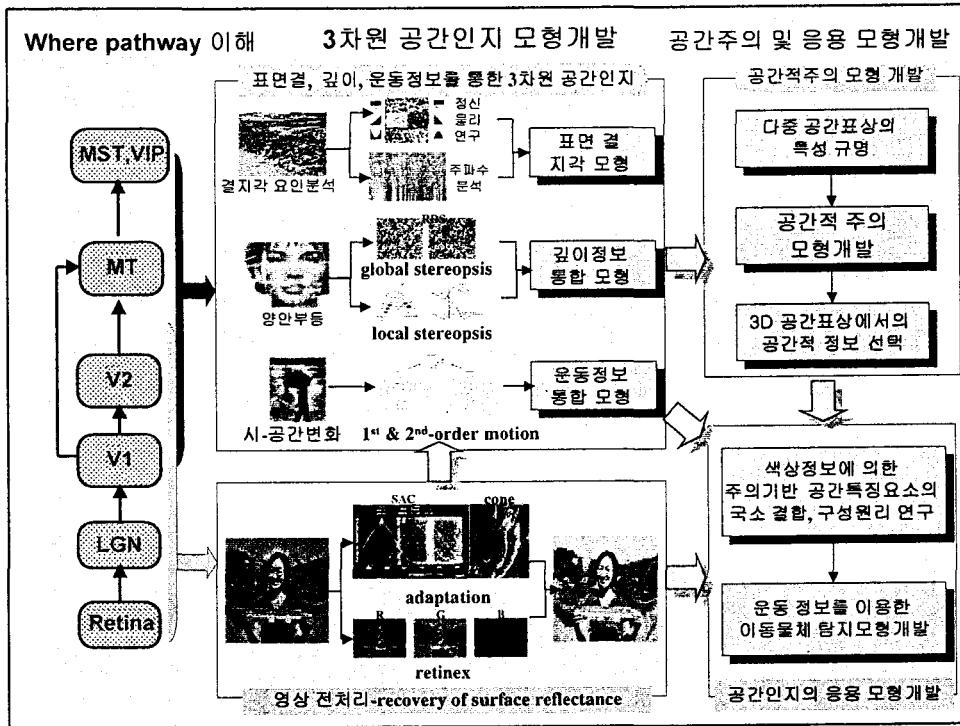
3차년도 2003

공간시각 모듈 보완/통합  
및 응용 시스템개발



# 공간시각 분야 내 상호연계





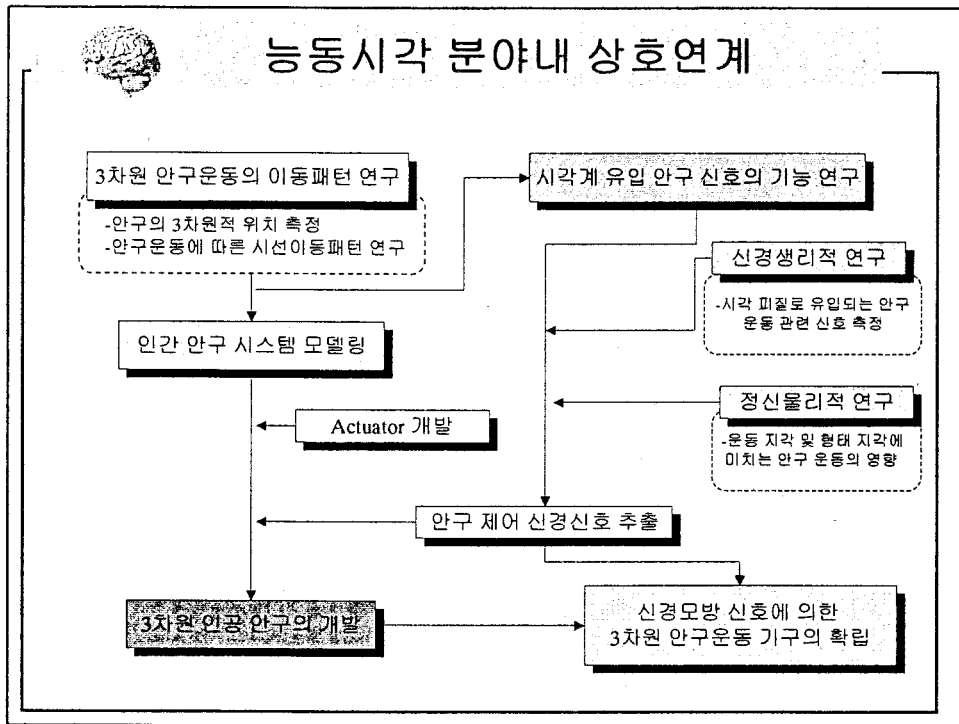
## 능동 시각

**목표 : 인간 3차원 안구운동을 모방하는 인공안구 개발과 안구 운동신호의 시각계 통합에 따른 시각기능의 조절 연구**

- 체적 300 cm<sup>3</sup>, 속도 300deg/s 사양의 3차원 안구운동기구 개발
- 3차원 안구 운동과 시각 신경계의 상호작용 이해

<p style="text-align: center;"><b>1차년도 2001</b></p> <p>↓ 인간 안구 시스템의 인지신경 기전 및 3차원 동역학적 모델 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 동역학 모델링을 위한 인간의 3차원 안구위치 측정</li> <li>• 인간의 3차원적 시선 이동 패턴의 이해</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>2차년도 2002</b></p> <p>↓ 안구운동에 따른 시각 신경계의 역동적 조절과정 연구와 소형 고효율 actuator 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 인체 안구 시스템의 동역학적 모델링</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>3차년도 2003</b></p> <p>3차원 인공안구의 개발 및 신경신호에 의한 제어 연구</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고속 안구운동에 따른 시각의 역동적 조절</li> </ul>





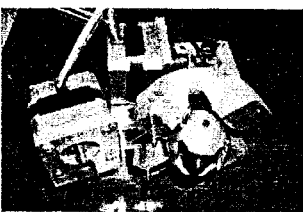
### [능동시각] 반영본

#### 시신경신호에 기반한 안구운동기구 개발

#### 연구 배경 및 연구내용

**안구운동 시뮬레이터 개발**

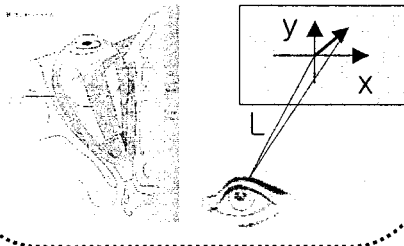
인간의 안구는 3자유도를 가지고 움직임,  
-안구의 회전과 안근육의 움직임을 표현하는 모델이 필요  
-3자유도를 갖는 시뮬레이터 요구  
시뮬레이터의 제작  
-회전식 모터의 사용  
실제 안구의 구조와 상이함  
시스템이 커짐  
-라니어 모터의 사용



실제 안구를 모델로 한 안구운동 시뮬레이션

안구의 직경: 23.5mm 구  
무게: 0.007kg  
외직근의 길이: 40mm  
상사근길이:  
안구에서 trochlea: 28mm  
trochlea 에서 zinn: 32mm  
하사근의 길이: 37 mm

스크린 까지 거리: L





# 시각 칩

목표 : **윤곽선 검출 시각 칩 개발 (256\*256),  
움직임 검출 시각 칩 개발 (256\*256)**

- **256\*256 윤곽선 검출 시각 칩**  
(저전력, 광적응, 국소적응 개념 도입, 응용기술 개발)
- **256\*256 움직임 검출 시각 칩**  
(이동 물체 탐지 및 추적 용도, 응용기술 개발)

### 1차년도 2001

↓ 윤곽선 검출 시각 칩 설계  
움직임 검출 시각 칩 개발

- 효율적 수광소자의 설계
- 광적응, 국소적응 회로의 설계
- 주변회로의 집적화

### 2차년도 2002

↓ 윤곽선 검출 시각 칩 제조 및 평가  
움직임 검출기능 구현

- 최소전력소비에 대한 연구
- 현 집적회로 기술상 문제분석
- 영상센서 설계 및 구현

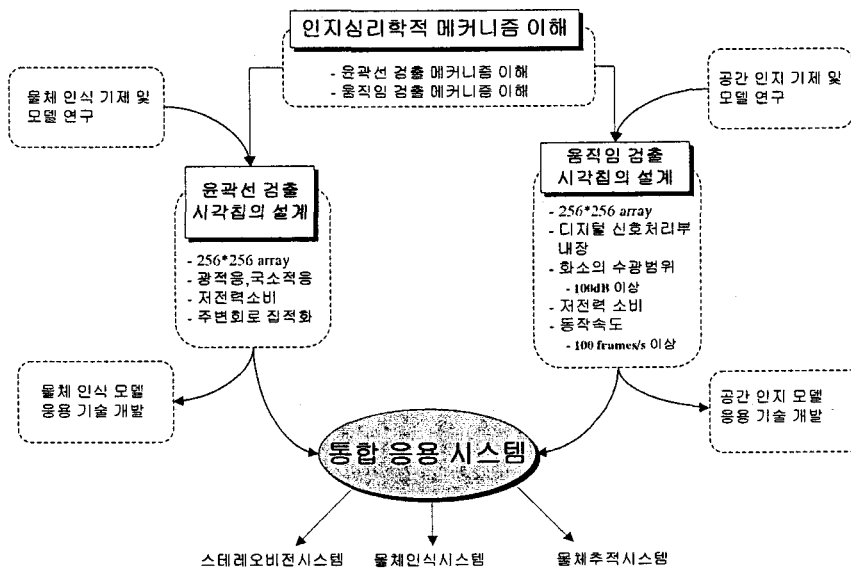
### 3차년도 2003

윤곽선 검출 칩 응용기술 개발  
움직임 검출 칩 응용기술 개발

- 256 x 256 이상의 Array



# 시각 칩 연구 추진체계



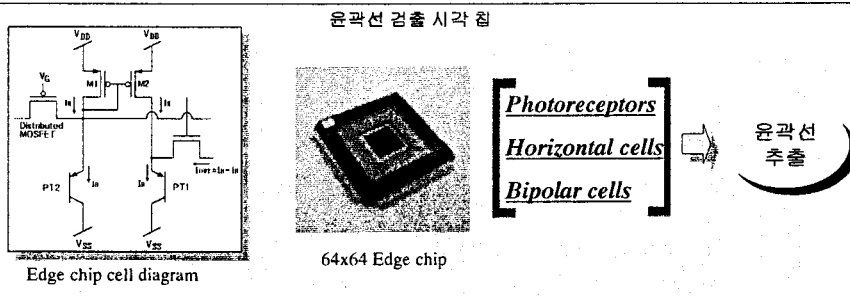


## 윤곽선 검출 시각 칩 개발

[시각 칩]  
신장규

### 연구내용

- 32\*32 방사형 전류출력 시각 칩 설계 및 측정
- 64\*64 정방형 시각 칩 설계
- Dynamic range 향상을 위한 광 적응 회로 제안 및 128\*128 시각 칩 설계
- 주변회로의 집적화  
- 6\*64 decoder 설계

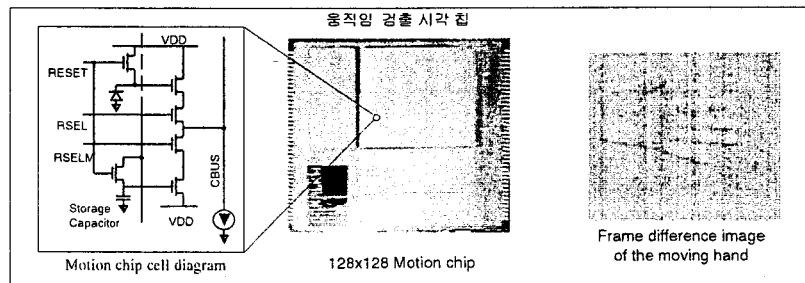


## 움직임 검출 시각 칩 개발

[시각 칩]  
윤의식

### 연구내용

- Motion 검출칩의 Pixel Design
  - CMOS technology scaling
    - ✓ Some problems appear in pixel design such as high leakage current, poor spectral response and so on.
    - ✓ These result in poor sensitivity of the Imaging sensor.
  - Factors of sensitivity (V/lux)
    - ✓ Quantum efficiency
    - ✓ Conversion gain (V/e)





# 응용 시스템

## 목표 : 뇌 시각 기술에 기반한 응용 시스템 개발

- 능동형 물체 추적 시스템 : 인간의 시각 모델에 기반하여 물체를 인지하고 추적하여 적절한 감성을 표현하는 시각 응용 시스템 개발 (6자유도 Head/Eye 시스템)
- 스테레오시각 응용시스템 : 양안 시각을 이용한 3차원 정보추출 모듈 개발 및 이를 이용한 착용형 시각 안내 시스템 개발 (변위 추정 오차 0.5 pixel 이내, 명인 안내 데모)
- 휴먼 로봇용 인식시스템 : 휴먼로봇에 탑재될 뇌공학 기반 시각인식기술 통합 시스템의 설계 및 구현과 이를 통한 인식기술 응용 (가사 및 안내 데모)

1차년도 2001

응용 시스템 연구

- 인간 시각 시스템의 구동 능력 모델링 및 이를 바탕으로한 능동 물체 추적 시스템의 설계

2차년도 2002

응용 시스템 개발

- 양안시각 HW 구성 및 특징량 추출 연구

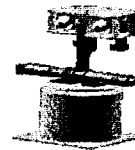
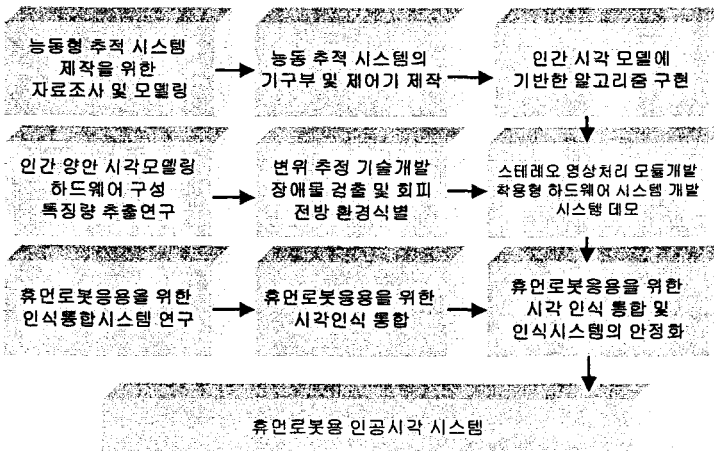
3차년도 2003

응용 시스템 보완/통합

- 시각 인식기술의 휴먼로봇 응용을 위한 인식통합시스템 설계 및 구현



## 응용 시스템 연구 추진체계





## 능동형 추적 응용 시스템

[응용시스템]  
정명진

### • 연구내용

구분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위
1차년도 (2001.8 ~ 2002. 5)	능동 시각 시스템 제작을 위한 자료 조사 및 모델링	- 기존 시스템 성능 향상을 위한 자료 조사 - 인간 시각 시스템의 구동 능력 모델링 - 모델링된 인간 시각 시스템을 바탕으로 한 능동 시각 시스템의 세부 사항 결정 - 3D 그래픽물을 이용한 움직임 영역 검사
2차년도 (2002.6 ~ 2003. 5)	능동 시각 시스템의 기구부 및 제어기 제작	- 능동 시각 시스템의 기구부 및 구동부 제작 - 능동 시각 시스템의 제어기 제작
3차년도 (2003.6 ~ 2004. 5)	인간 시각 모델에 기반한 알고리즘 구현	- 인간 시각 모델에 기반한 능동 시각 시스템의 알고리즘 구현 - 구현된 알고리즘의 적용



## 스테레오 비전 응용 시스템

[응용시스템]  
권인소

### • 연구내용

구분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위
1차년도 (2001.8 ~ 2002. 5)	- 하드웨어 구성 - 인간 양안 시각 모델링 - 특징량 추출 연구	- 스테레오 비전 시스템 기구부 구성 (2001.8.-2002.2.) - 인간 양안 시각 작용에 대한 기존의 연구 결과 조사 (2001.8.-2002.2) - 인간의 양안 시스템에서 일어나는 양안 변위를 이용한 거리 인지 과정 모델링 (2001.8.-2002.2) - 특징량 연구 및 신경망을 이용한 특징량 추출 알고리즘 개발 (2001.12.-2002.5)
2차년도 (2002.6 ~ 2003. 5)	- 변위 추정 기술 개발 - 장애물 검출 및 회피 - 전방 환경 식별	- 신경망을 이용한 대응점 정합 기술 개발 - 전방의 장애물 존재 유무 및 회피 경로 결정 - 신경망 학습을 통한 전방 환경의 형태를 인식 연구
3차년도 (2003.6 ~ 2004. 5)	- 스테레오 영상 처리 모듈 개발 - 착용형 하드웨어 (wearable hardware) 시스템 개발	- 개발된 알고리즘의 통합 - 범용 스테레오 영상 처리 모듈 개발 - 자율 주행 로봇의 주행 실험을 통한 시스템 검증 - 개발된 모듈을 이용한 시각 장애자를 위한 착용형 안내 시스템 개발



# 휴먼 로봇용 인식 시스템

[응용시스템]  
양현승

## • 연구내용

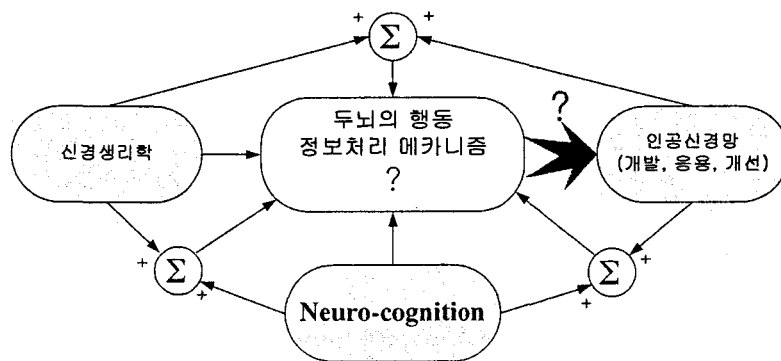
구분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위
1차년도 (2001.8 ~ 2002. 5)	휴먼로봇응용을 위한 인식통합시스템 연구	- 뇌공학기반 인식기술의 통합을 위한 연구 - 인식기술의 휴먼로봇 응용을 위한 인식통합시스템 설계 - 인식통합시스템의 구현
2차년도 (2002.6 ~ 2003. 5)	휴먼로봇응용을 위한 인 식시스템 통합	- 휴먼로봇 응용을 위한 시각인식통합 - 인식통합시스템의 안정화 및 성능개선
3차년도 (2003.6 ~ 2004. 5)	휴먼로봇용 인식시스템 통합 및 보완/평가	- 인식통합시스템에 기반한 인식기술 통합 - 통합된 시각인식시스템의 성능향상 및 안정화

## 뇌정보처리 메커니즘에 기반한 인간행동 시스템 연구

중앙대학교, 서울대학교, 포항공대  
전종태, 최중호, 오세영

### 연구개발의 목표

- ❖ 뇌 행동 기작 원리 규명
- ❖ 행동 기능의 인공적 구현
- ❖ 연구결과의 활용

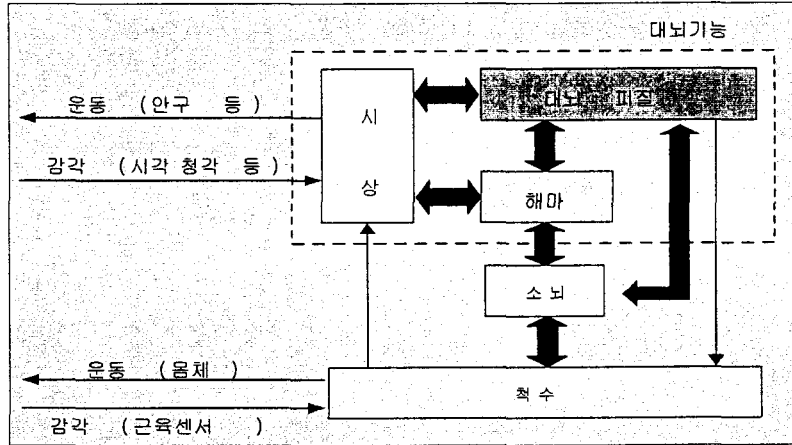


2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 배경

❖ 행동 기작을 발현하는 생물학적 뇌 구조

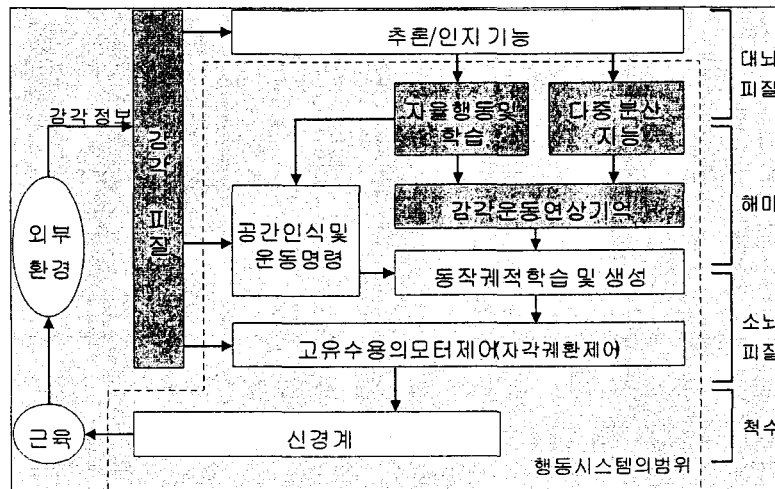


2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 배경

❖ 뇌 행동 신경계의 기능적 구성



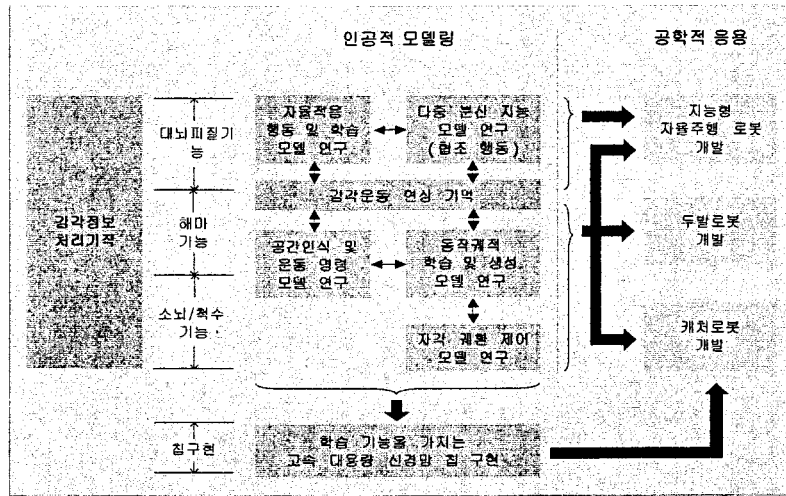
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업



## 연구 내용

### ❖ 연구체계



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용

### ❖ 세부 연구 내용

#### 자율 학습 및 다중 분산 지능 모델 모듈

- 대뇌피질과 해마를 공학적으로 모델링하고, 자율 학습 및 다중 분산 지능 시스템을 구현하는 것을 최종 목표로 함.
- 특히, 지능적 자율성, 학습 및 적응성, 협조적 분산 지능을 토대로 모듈화 된 신경회로망, 셸라 연상 메모리, 강화 행동학습 시스템을 연구 개발함.

#### 감각 운동 학습 및 제어 모델 모듈

- 뇌의 시상-해마-소뇌-척수로 이어지는 뇌의 감각운동제어 기능의 규명 및 이에 기반으로 한 감각운동제어모델의 공학적 구현을 최종 목표로 함.

#### 자율 주행 시스템 모듈

- 다양한 센서 융합과 환경인식 및 지능 알고리즘에 기반으로 한 주행 hardware / Software의 개발을 통하여 사회에 도움이 되는 가치를 창출할 수 있는 서비스 로봇의 개발을 최종 목표로 함.

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용

### ❖ 1차년도 연구 목표

연구기간	연구개발목표
	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ 대뇌피질 정보처리 메커니즘의 공학적 모델링을 통한 기능별 모듈구성과 학습 알고리즘 개발</li> <li>❖ 해마의 기억학습 및 연상작용 모델에 의한 셀룰라 신경회로망 자율학습 알고리즘 개발</li> <li>❖ 협조적 분산 지능의 강화 학습에 관한 연구</li> </ul>
2001. 8. -	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ 색이 운동에 미치는 영향규명</li> <li>❖ 감각정보의 특징추출 및 상황인지 방법제시</li> <li>❖ 동작계획 및 자각 귀환 운동제어 메커니즘 규명</li> </ul>
2002. 5.	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ 감각운동제어모델 하드웨어 설계</li> <li>❖ 센서 특성 및 정보 추출 방법에 대한 연구</li> <li>❖ 센서융합 기법에 대한 연구</li> <li>❖ 지능형 Local Path Planning 알고리즘 연구</li> <li>❖ Landmark 추출 및 인식</li> <li>❖ Landmark을 이용한 경로 결정 알고리즘 연구</li> </ul>

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

### 주관과제 : 자율학습 및 다중분산 지능모델 연구

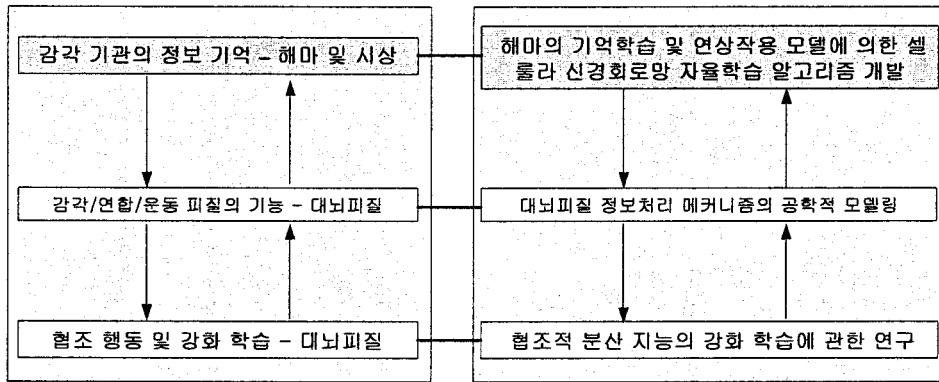
연구책임자 : 전홍태 (중앙대학교)

연구원 : 심귀보 (중앙대학교)

강 훈 (중앙대학교)

## 연구 내용 - 주관기관 (중앙대)

### 자율학습 및 다중분산 지능모델 연구 모델 구조

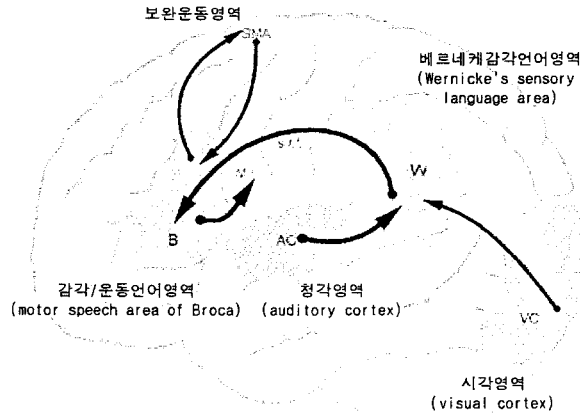


2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 결과 - 주관기관 (중앙대)

### 대뇌피질 정보처리 메커니즘의 공학적 모델링



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 결과 - 주관기관 (중앙대)

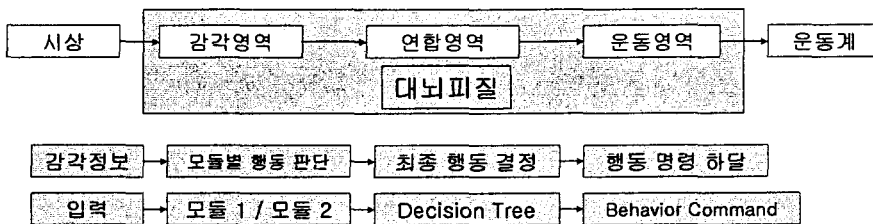
### 대뇌피질 정보처리 메커니즘의 공학적 모델링

대뇌피질 정보처리 메커니즘의 공학적 모델링을 통한 기능별 모듈구성과 학습 알고리즘 개발



감각 정보의 처리 메커니즘을 Hierarchical Module 구조를 통해 모델링하여 대뇌 피질에서의 행동 판단 구현

### 대뇌피질 기능 및 영역 정의

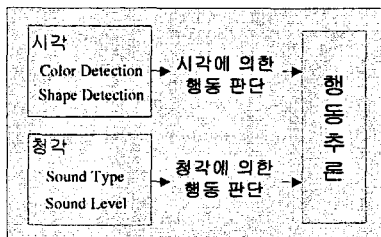
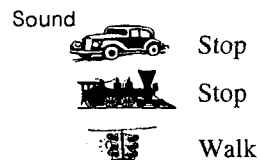
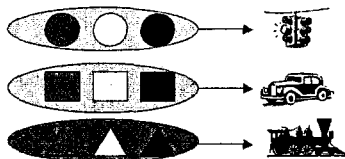


2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 결과 - 주관기관 (중앙대)

### 학습 알고리즘



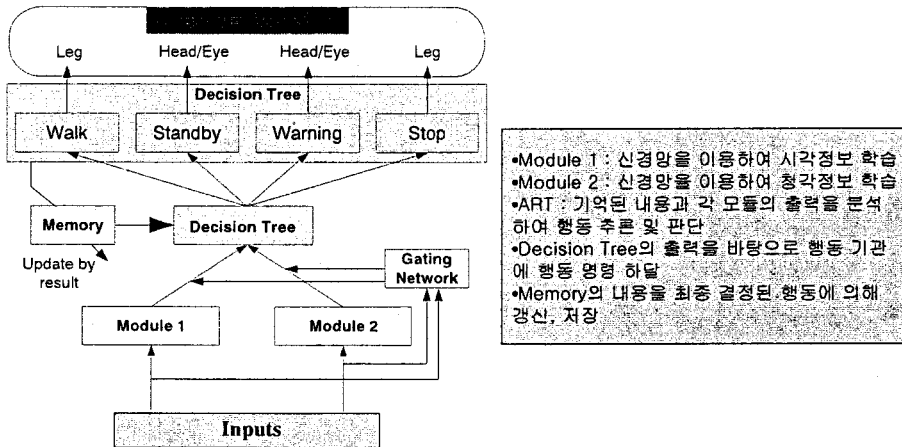
시각		청각		Decision
Color	Shape	Type	Level	
Red	Circle	Car	High	Stop(Watch)
Blue	Circle	Signal	High	Walk
Blue	Triangle	Car	Medium	Warning(Watch)

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 주관기관 (중앙대)

### Modular Network Structure

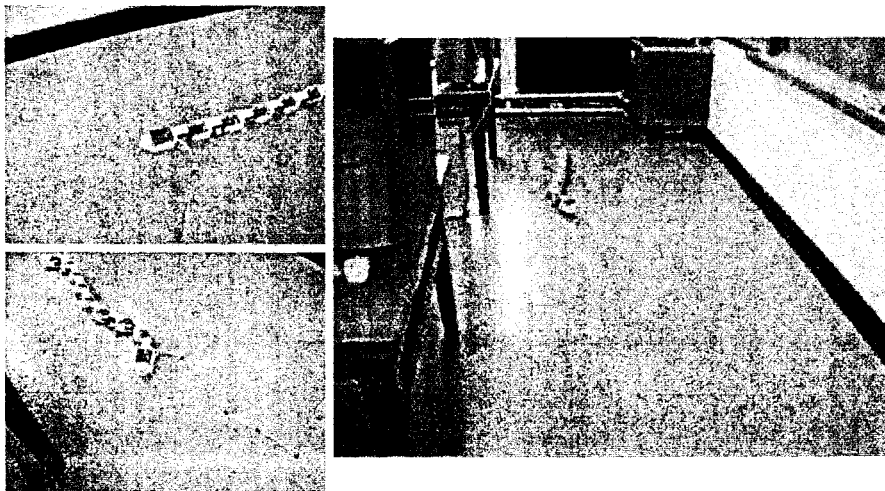


2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 주관기관 (중앙대)

### 훈련-억제 메커니즘 규명을 위한 뱀 로봇 제작 (연구목표 외 성과)



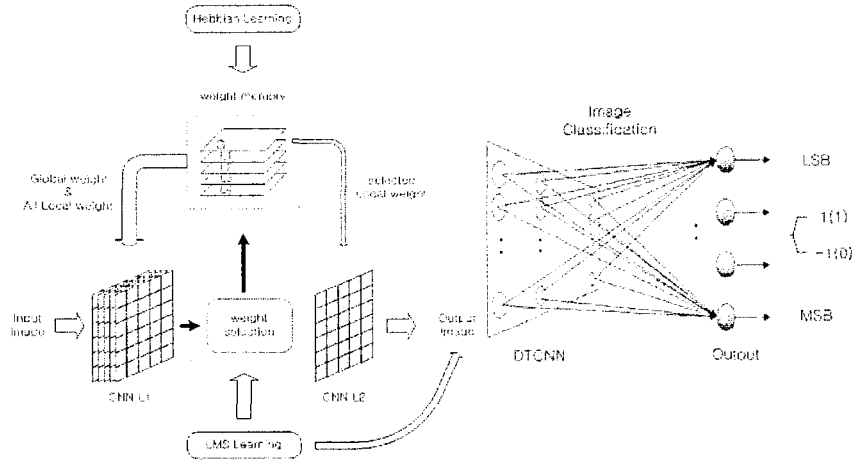
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 주관기관 (중앙대)

❖ 해마의 기억학습 및 연상작용 모델에 의한 셀룰라 신경회로망 자율학습 알고리즘 개발

### AM with CNN



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 주관기관 (중앙대)



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

- > 셀룰라 신경회로망을 이용하여 학습과 패턴매칭을 통한 영상의 분류와 인식
- > 2진 이미지(숫자이미지)와 그레이 이미지(표지판 이미지)에서 적용
- > Weight 선택을 통한 Hebb 학습 방법의 한계 극복
- > 심하게 왜곡된 이미지 복원 가능
- > 인간 두뇌의 기억 방법에 적용 가능
- > 다수의 weight 선택으로 한글 문자인식 가능

## 연구 내용 - 주관기관 (중앙대)

◇ 협조적 분산 지능의 강화 학습에 관한 연구

인공연역계 기반 자율분산로봇시스템의  
협조전략과 군행동

항원과 항체 정의

주변 환경(항원)	전 략 ( 항 체 )	
밀도 높음	집합	집단의 개체들이 정해진 거리를 유지하며 모인다.
밀도 중간	탐색	밀도의 방향으로 움직이며 적압을 찾는다.
밀도 낮음	확산	집단의 개체들이 정해진 거리를 설정, 유지하기 위해 퍼진다.
밀도 없음	귀향	특정한 지역이나 위치를 찾아간다.

자율분산로봇 시스템과 연역 시스템의 관계

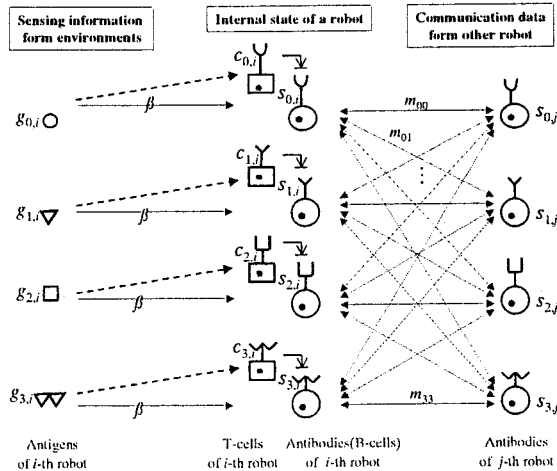
자율분산로봇 시스템	연역 시스템
로봇의 주변환경	항원
행동 전략	항체 (B-세포)
제어 변수	T-세포
적합	자극
부적합	억제
우수한 로봇	활성세포 (클론)
열등한 로봇	비활성화된 세포

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 주관기관 (중앙대)

T-세포 및 B-세포 모델을 포함한 연역 네트워크 모델



2002. 4. 24.

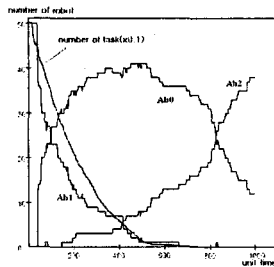
뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 주관기관 (중앙대)

### 실험 조건

- 10(m)\*10(m)의 작업공간에 직경이 50(mm)인 50대의 로봇이 흩어져 있으며, 시스템의 목적은 작업영역에 흩어져 있는 500개의 작업을 찾아 수행
- 작업의 밀도를 계산하기 위한 환경의 평가시간을 40초로 설정
- 이 때, 로봇은 1초동안 방향을 바꾸거나 25(mm)를 이동할 수 있으며, 1회의 통신을 할 수 있음
- 작업 하나의 수행시간은 15초
- 파라미터는  $\alpha=0.3$ ,  $\beta=0.05$ ,  $k=0.002$ 로 설정
- Ab0: 집합, Ab1: 탐색, Ab2: 확산, Ab3: 귀향 등의 행동 전략을 선택

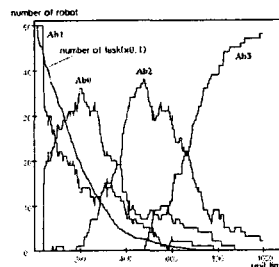
### 실험 결과 1 : B-세포 모델(only)



2002. 4. 24.

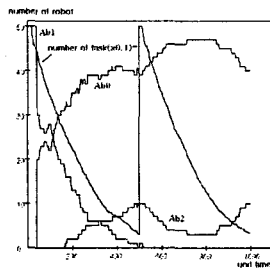
뇌신경정보학 연구사업

### 실험 결과 2 : B-세포 및 T-세포 모델



## 연구 내용 - 주관기관 (중앙대)

### 실험 결과 3 : 환경 변화 경우 (B-세포 모델 only)



### 제 목

- T-세포 모델이 추가된 면역알고리즘이 환경변화에 대한 적응성을 개선
- 실제의 적용문제에 있어서 로봇의 적응 능력이 바로 시스템 성능의 개선으로 나타난다면 제안한 알고리즘은 큰 효과를 거둘 수 있을 것으로 기대됨
- 로봇의 다양한 적용분야에서 다수의 소형 마이크로 로봇에 의한 오염물질의 정화와 같은 군집형 로봇 행동의 경우, 로봇 집단의 효율적인 의견 조정 및 관리를 위해서는 자율적인 로봇의 판단과 집단 전체의 의견을 조정할 수 있는 알고리즘이 필요

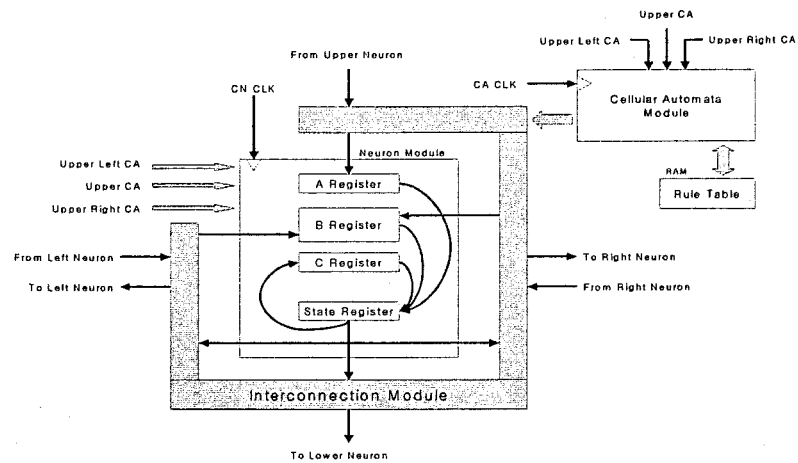
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업



## 연구 내용 - 주관기관 (중앙대)

### 진화신경망의 하드웨어 구현 - FPGA상에서 진화신경망 셀 설계



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

### 제 1 공동과제 :

## 감각운동 학습 및 제어모델 연구

연구책임자 : 최종호 (서울대학교)

연구원 : 최진영 (서울대학교)

이종호 (인하대학교)

김남균 (전북대학교)

## 연구 내용 — 공동기관1 (서울대)

### 감각 운동 학습 및 제어모델 연구

#### 인지실험 연구

- 감각-운동 협응의 인지적 실험에 대한 연구



#### 인공 모델링

- 감각정보 특징 추출 및 목표물 감지방법 연구
- 시공간적 상황정보 학습모델 연구
- 동작궤적의 학습 및 기억방법 연구



#### 구현

- 두발로봇 제작
- 캐처로봇 제작 -고속 신경망 칩 응용

2002. 4. 24.

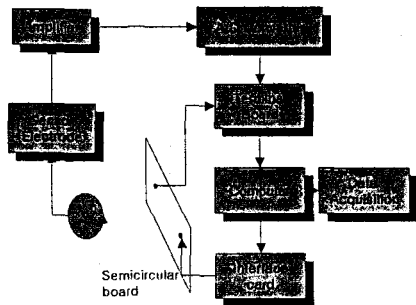
뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 — 공동기관1 (서울대)

### 인지실험 연구 • 감각-운동 협응의 인지적 실험에 대한 연구

#### 기존연구

- 대부분의 인지 실험은 단순 반응시간 및 EEG의 주파수 분석만을 행함.



#### 기존연구의 문제점

- 감각 운동 협응의 정확한 측정 방법의 부재
- 기존 주파수 분석의 인지 측정의 부정확함
- 3차원 공간상의 단순 지시 및 반응 운동 외 인지의 측정 방법의 어려움

#### 연구목표

- 다양한 색 자극 제시 후 인간의 반응시간 및 ERP에 관한 연구
- 3차원 공간에서 시청각 자극 제시 후 SOA 및 cue에 따른 반응 시간 측정
- 자극 제시 후 ERP 연구에 따른 자극별 인지 영역의 검출

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 — 공동기관1 (서울대)

### 연구결과

- 3차원 색 자극 장치 구축
- 반응시간 측정 장치 개발
- ERP 검출 및 분석 시스템 마무리 작업



### 향후 연구계획

- 실험 시스템의 완성
- 피험자를 대상으로 다양한 색 자극 제시 후 반응시간 및 ERP에 관한 실험

2002. 4. 24.

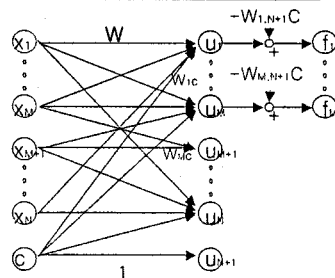
뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 — 공동기관1 (서울대)

인공 모델링 • 감각정보 특징 추출 및 목표물 감지방법 연구

### 기존연구

- 기존의 얼굴인식을 위한 특징 추출 방법:  
PCA (Eigenface),  
LDA (Fisherface)



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

### 기존연구의 문제점

- Orthogonal한 특징만을 추출  
PCA: Class label을 이용하지 않음  
LDA: Mean-difference가 큰  
Gaussian 분포에만 적용

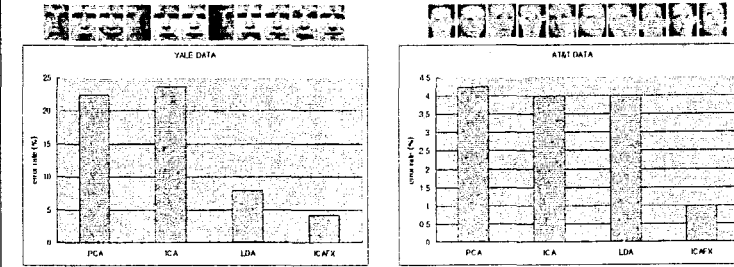
### 연구목표

- 분류 문제를 위한 특징 추출 방법 제시 및 얼굴 인식에의 적용
- Higher order statistics를 이용
- Supervised learning
- 기존의 ICA 알고리즘 이용
- 높은 분류 성능

## 연구 내용 - 공동기관1 (서울대)

### 연구결과

- ICA-FX (Feature Extraction based on ICA) 알고리즘 제시
- Yale database



### 향후 연구계획

- Multi-class 에 대한 ICA-FX의 이론적 뒷받침
- 자동으로 얼굴부분을 감지하고 인식하는 전반적인 시스템의 구축

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 공동기관1 (서울대)

### 인공 모델링

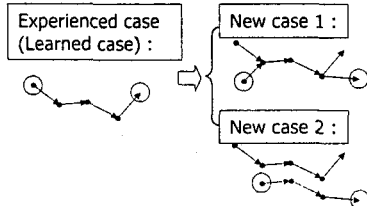
### • 시공간적 상황정보 학습모델 연구

#### 기존연구

기존의 학습 방법은 주어진 개별적인 상황을 학습하는 데에 적합함  
이전 학습에서 얻어지는 정보(경험)를 활용하지 않음

#### 기존연구의 문제점

다수의 상황을 학습하는 경우에 비효율적  
중복된 상황을 반복해서 학습  
많은 수의 자료와 학습시간이 필요



#### 연구목표

다수의 상황을 학습하는 경우에 효율적인 학습방법 개발  
이전 학습에서 얻어지는 정보를 재활용함  
이전에 얻어진 정보를 분해, 재결합하여 새로운 정보를 학습하는 데에 이용

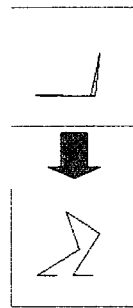
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 — 공동기관1 (서울대)

### 연구결과

- 학습 알고리즘을 부분적으로 개발
- 간단한 경우에 대해 실험
  - 낮은 자유도를 가진 단순한 이족로봇의 Stand-up motion 학습 실험
    - : 다수의 넘어진(fall-down) 상태가 존재
    - : 개별적인 경우 각각에 대해 일어서는 방법을 학습하기 곤란
  - 적은 수의 경우에 대해 학습하고, 학습된 경험을 재사용하여 다양한 경우의 stand-up motion task를 학습



### 향후 연구계획

- 부분적으로 개발된 학습 알고리즘을 통합
- 계획생성 알고리즘 연구와의 결합 시도

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 — 공동기관1 (서울대)

### 인공 모델링

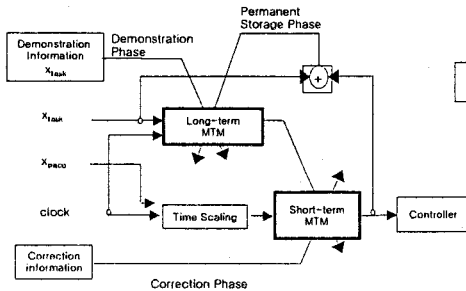
### • 동작계획적의 학습 및 기억방법 연구

### 기존연구

- 대부분의 기존 연구에서 궤적은 역기구학에 기반하여 생성됨.

### 기존연구의 문제점

- 정확한 수학적 모델이 필요
- 기구학이 복잡할수록 수학적 모델이 부정확함
- 실시간 궤적생성이 어려움 (기억의 부재)



### 연구목표

- 학습에 의한 동작계획적의 기억 및 생성 모델 제시
  - 역기구학을 계산할 필요없음
  - 적은 수의 궤적을 학습하여 다양한 궤적을 생성함
  - 실시간 동작 궤적 교정이 가능한 모델

2002. 4. 24.

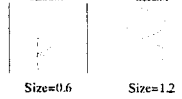
뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 — 공동기관1 (서울대)

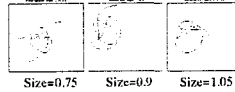
### 연구결과

- 동작계획메모리 구조 제시
- 크기가 다른 글자를 쓰기 위한 궤적의 학습 및 생성 실험

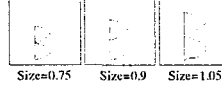
1) 크기 0.6과 1.2에 대해 학습



2) 크기 0.75, 0.9, 1.05에 대한 결과



3) ST-MTM에 의한 수정



LT-MTM은 여러 크기의 글자를 쓸 수 있는 궤적을 생성

### 향후 연구계획

- 시공간적 상황정보 학습 모델과의 연동 연구
- 다양한 task에 적용가능하도록 task coding 방법을 연구

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 — 공동기관1 (서울대)

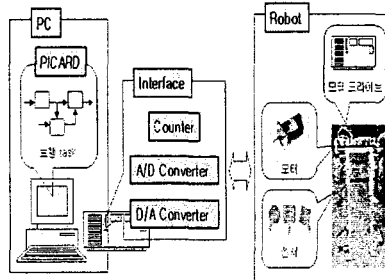
구현 • 두발 로봇 제작

### 기존연구

- COG, ZMP를 이용하여 안정성 판단
- 보행, 계단 오르기

### 기존연구의 문제점

- 로봇의 하드웨어 구조에 의존적
- 로봇의 정확한 수학적 모델 필요
- 복잡한 모델로 인한 속도 향상의 한계



### 연구목표

- 두발 로봇 제어 시스템의 구축
- 연구되고 있는 감각운동 학습 및 제어 모델의 적용
- 두발 로봇의 안정적 보행

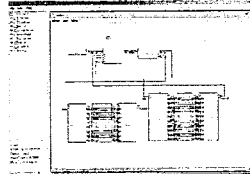
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 — 공동기관1 (서울대)

### 연구결과

- 로봇의 설계/제작
- PICARD를 이용한 실시간 제어 시스템 구축
- 로봇의 보행 실험



### 향후 연구계획

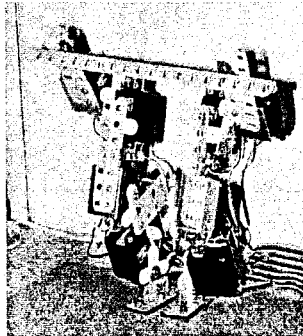
- 센서정보를 이용하여 로봇의 기구학 모델을 보정하는 방법 연구
- 실시간으로 기구학 모델을 보정하며 보행

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 — 공동기관1 (서울대) 참고자료

### ❖ 2000년

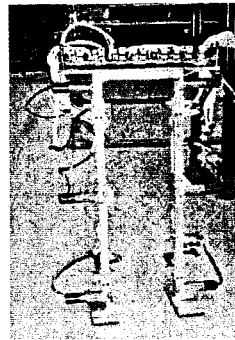


- 구성 : 상체가 없는 10 자유도 ( height : 25cm )
- 구동 actuator : 서보 모터(HS-615M)를 이용
- 모터 제어 : 196 controller를 이용
- 인터페이스 : PC와 serial interface
- 보행 방법 : 정적 보행

2002. 4. 24.

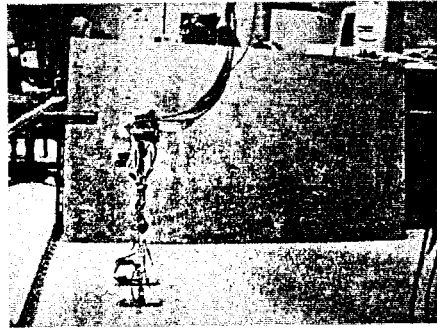
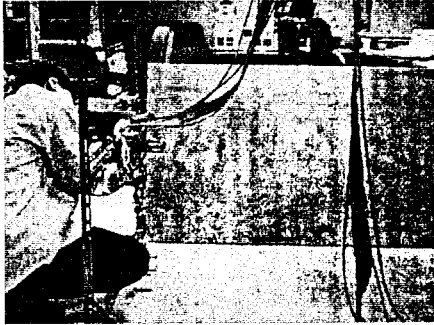
뇌신경정보학 연구사업

### ❖ 2001년~



- 구성 : 상체가 없는 10 자유도 ( height : 50cm )
- 구동 actuator : DC-micro motor(minimotor 2224)를 이용
- 모터 제어 : PC-based control
- 인터페이스 : PCI-8136 board(DI,DO,AD,DA,Counter)→ PCL727(DA), PCL833(Counter), PCL815(AD)를 이용
- 보행 방법 : 정적 보행

연구 내용 — 공동기관1 (서울대) 참고자료-동영상



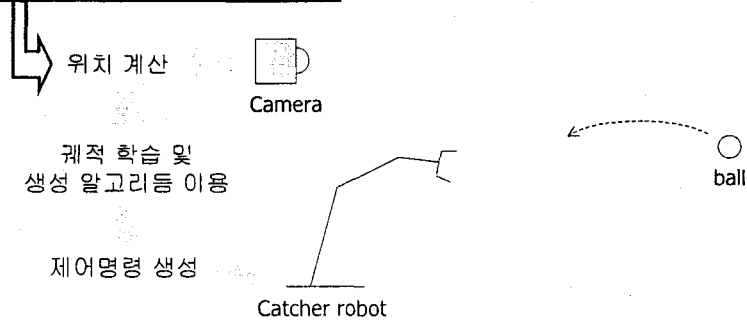
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

연구 내용 — 공동기관1 (서울대)

- 구현
- 캐처로봇 제작 -고속 신경망 칩 응용
  - 학습 알고리즘 구현에 사용하게 될 hardware의 성능 시연

- 빠른 처리 필요  
- 고성능 신경망 칩을 이용하여 구현



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업



## 연구 내용 - 공동기관1 (서울대)

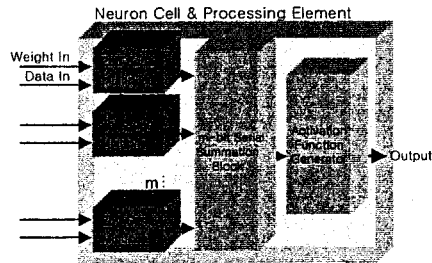
### 연구 배경

- 적용분야에 구애받지 않는 구조 변경이 가능한 FPGA 기반의 디지털신경망의 유용성
- 대용량 칩의 필요(영상 처리등)
- 실시간의 고속처리

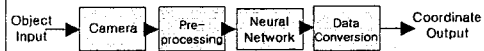
### 연구 목표

- 실시간 공간 위치 인식 시스템을 위한 디지털신경회로망의 설계
  - 대규모로 확장 가능하며, On-Chip 학습이 가능한 고속 영상처리용 신경회로망 칩의 설계
  - 2차원 위치인식 시스템 모델 설계

### • 디지털신경망을 위한 Neuron 기본구조



### • 2D 실시간 공간 위치 인식 시스템 구조



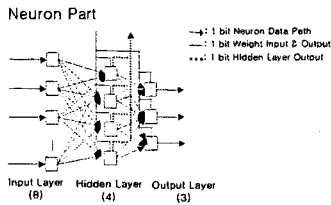
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 공동기관1 (서울대)

### 연구결과

- 신경회로망 하드웨어 설계  
(확장가능, Off-chip 학습, FPGA 기반)



- 공간위치인식 시스템 설계  
(16X16Pixel 규모의 Processing Element의 설계  
=> 출력 값을 Neuron의 학습패턴으로 사용)

- Specification of Block Matching PE
  - Search Window Size : 31\*31 Pixel
  - Pixel Depth / Structure : 8 Bit / Pipeline Structure
  - No. of PEs / Detect Range : 16 EA / -8~7
  - Maximum Searching Time : 270 Clock(1 window)
- Implementation Result
  - Target Device : Xilinx FPGA Virtex 800
  - Number of External GCLKIOBs : 2 out of 4 (50%)
  - Number of External IOBs : 16 out of 166 (9%)
  - Number of SLICES : 405 out of 9408 (4%)
  - Number of GCLKs : 2 out of 4 (50%)

### 향후 연구계획

- 공간 위치 인식을 위한 네트워크구조의 재설계
- On-Chip 학습의 하드웨어 & 병렬 Block Matching을 위한 대규모 시스템의 설계
- Preprocessing 및 Data Conversion 알고리즘 개발

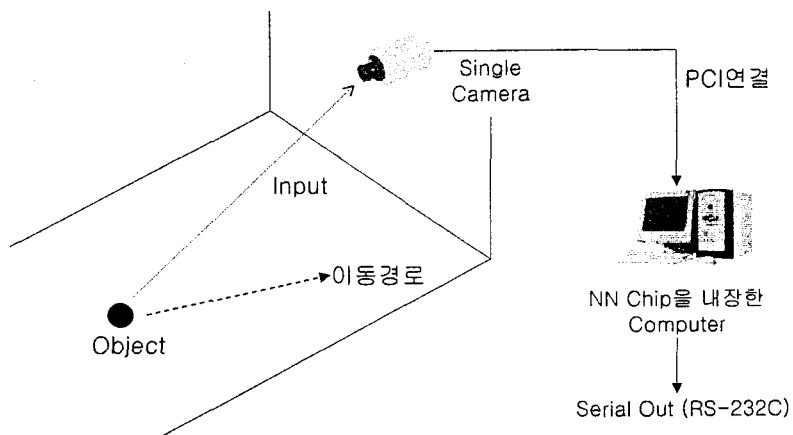
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 공동기관1 (서울대)

### 1차년도 목표를 위한 실험 환경

- ❖ 2D 좌표상의 움직이는 물체에 대한 Real-time 공간 위치인식



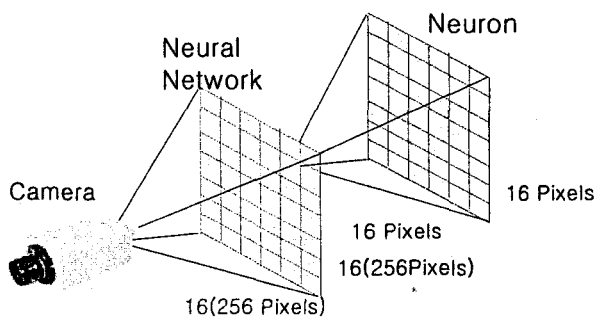
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 공동기관1 (서울대)

### System Diagram

- ❖ Neural Network을 이용한 공간위치인식방법
  - 16x16의 입력을 갖는 Neuron을 16x16개 사용하여 256x256의 영상에 대한 실시간 Visual Tracking
  - 기존의 Block Matching보다 빠른 출력 제공 예상



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 공동기관1 (서울대)

### 현재까지 연구 개발 내용

- ❖ Neural Network Hardware
  - 사용 가능한 Digital Neuron Model의 조사
  - 확장 가능한 Digital Neuron 설계 (Verilog Coding)
  - 외부 학습 기반의 BP(error Back Propagation) MLP(Multi Layer Perceptron) 신경회로망의 설계
  - FPGA를 기반으로 하여 구조의 변경이 가능함
- ❖ 공간 위치 인식 시스템
  - 16x16 Pixel 규모의 Block Matching 전용 Processing Element의 설계 및 구현 (Verilog Coding)
  - Processing Element를 이용한 공간위치인식에 대한 FPGA 설계
  - PE의 출력 값을 Neuron의 학습 패턴으로 사용

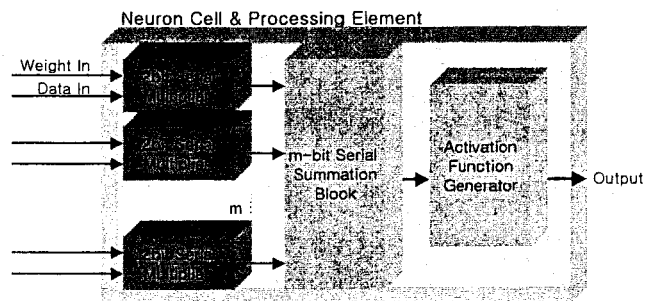
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 공동기관1 (서울대)

### Digital Neuron Model 1

- ❖ Neuron 구조
  - Neuron의 기본구성요소인 Synapse, Sigma Unit, Activation Function을 그대로 구성
  - 모든 데이터 표현형은 16bit serial Fixed point
  - Serial Data Adder, Multiplier를 이용하여 구성



2002. 4. 24.

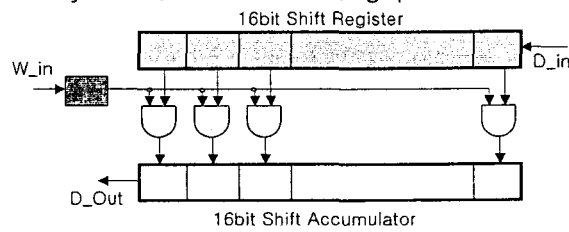
뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 공동기관1 (서울대)

### Digital Neuron Model 2

#### ❖ Synapse Multiplier

- Weight 값은 LSB 부터 입력되고 Neuron Data는 MSB부터 입력
- 일반적인 Serial Multiplier의 경우 n-bit의 Data의 곱셈에 대해서 데이터 입력 완료후 2n clock(총 3n clock)이 걸리지 만 제안된 구조는 데이터 입력과 동시에 연산이 종료(총 n clock)
- Latency 16:clock      Throughput :16 Clock



2002. 4. 24.

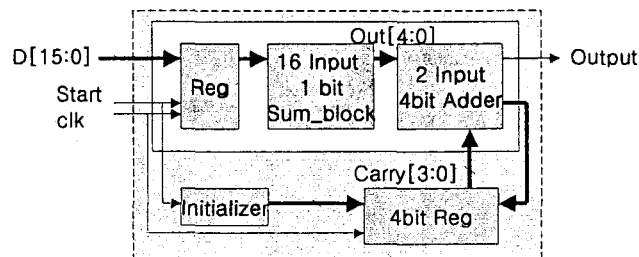
뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 공동기관1 (서울대)

### Digital Neuron Model 3

#### ❖ Summation Unit

- n-bit Serial Adder를 m개의 data에 대해 확장
- 최대 31개의 16bit의 데이터를 덧셈
- 31개 이내에서는 개수에 대해서 연산시간이 영향을 받지 않음
- Latency : 16clock      Throughput : 1clock(Pipeline)



2002. 4. 24.

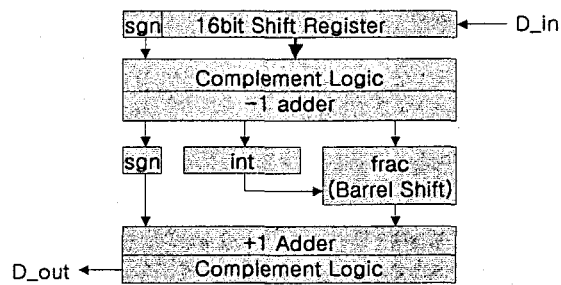
뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 공동기관1 (서울대)

### Digital Neuron Model 4

#### ❖ Activation Function Generator

- 입력된 Summation Data에 대한 Sigmoid Approximation값 계산
- Shifter와 Adder를 이용한 구성
- 전체 계산 소요시간  $n+2$  clock



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

제 2 공동과제 :

자율 주행 시스템의 구현

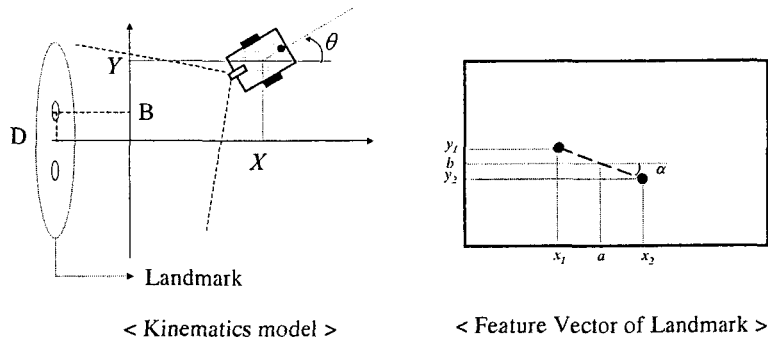
연구책임자 : 오세영 (포항공대)

연구원 : 이진수 (포항공대)

연구 내용 — 공동기관2 (포항공대)

Image Based Visual Servoing (IBVS)

❖ System Configuration



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

연구 내용 — 공동기관2 (포항공대)

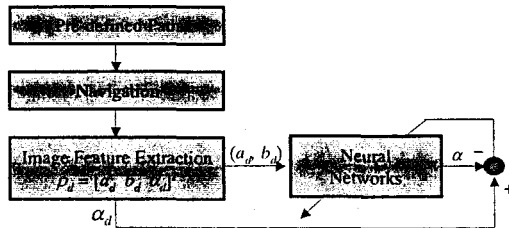
Image Based Visual Servoing (IBVS)

❖ Trajectory Learning and Planning in Image Space

Problems in Image Plane Based Trajectory Planning

- ☞ Sub-optimal workspace trajectory
- ☞ Non-holonomic mobile robot can't follow the planned trajectory

❖ Trajectory Learning using Neural Network



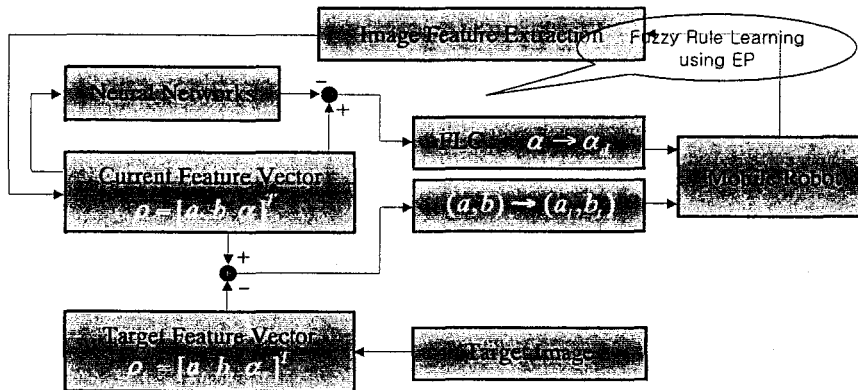
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

연구 내용 - 공동기관2 (포항공대)

Image Based Visual Servoing (IBVS)

- ❖ Overall Schematic Diagram of Proposed IBVS Algorithm (Neural Network + Fuzzy Logic + Evolutionary Programming)



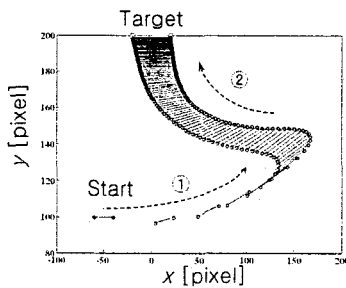
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

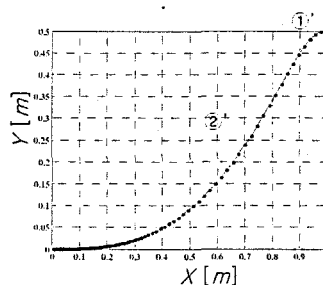
연구 내용 - 공동기관2 (포항공대)

Image Based Visual Servoing (IBVS)

- ❖ Experimental Results (1)
  - ✓ Sampling rate = 33Hz
  - ✓ Path ① : Landmark move until  $(\alpha = \alpha_d)$
  - ✓ Path ② : Landmark move until  $(a, b) = (a_d, b_d)$



(a) Trajectory of Landmark



(b) Trajectory of Robot

< Simulation Result when  $P_t = [0 \ 0 \ 0]^T$ ,  $P_s = [1 \ 0.5 \ 0]^T$  >

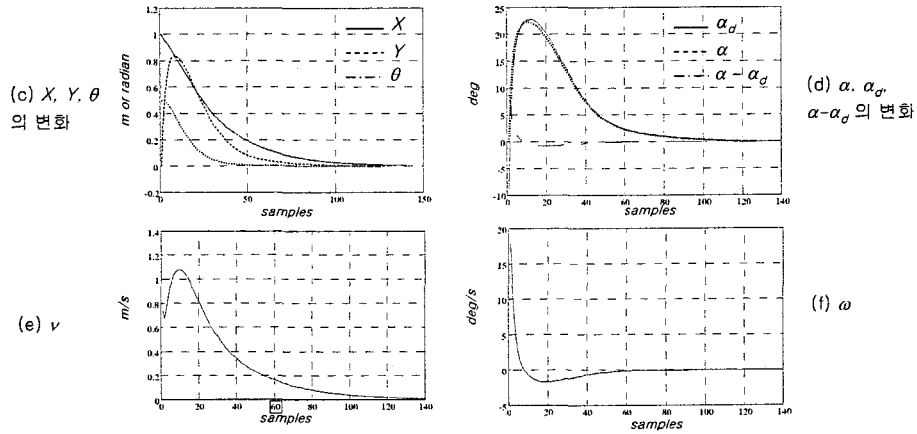
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

연구 내용 - 공동기관2 (포항공대)

Image Based Visual Servoing (IBVS)

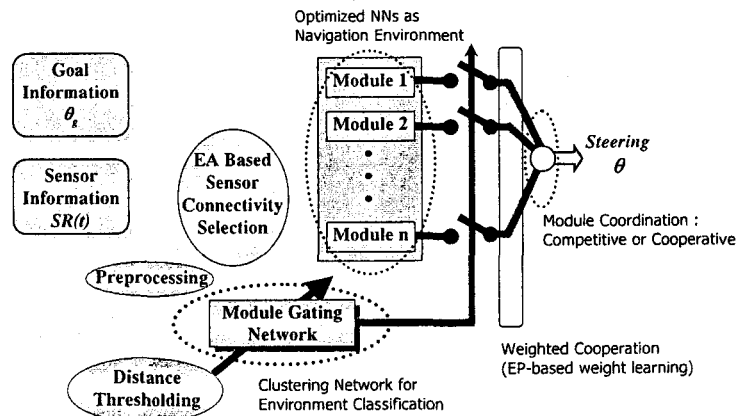
❖ Experimental Results (2)



< Simulation Result when  $P_t = [0 \ 0 \ 0]^T, P_s = [1 \ 0.5 \ 0]^T$  >  
 2002. 4. 24. 뇌신경정보학 연구사업

연구 내용 - 공동기관2 (포항공대)

Neural Network Based AMR Navigator



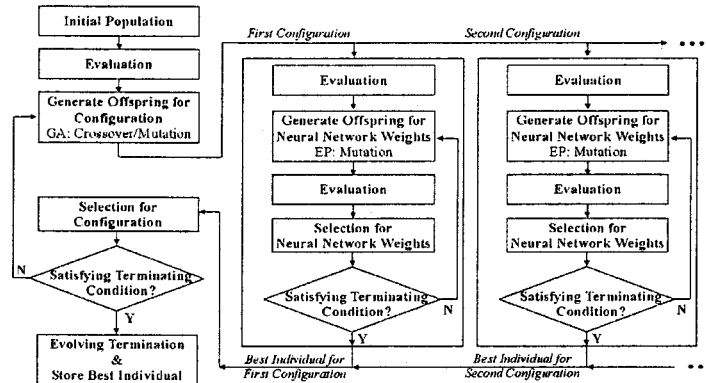
< Overall Navigation System using Modular Neural Network >

2002. 4. 24. 뇌신경정보학 연구사업



## Neural Network Based AMR Navigator [ Cooperative Module Coordination ]

❖ Neural Network Module Learning using Hierarchical Evolution



< Diagram of Hierarchical Evolution >

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## Neural Network Based AMR Navigator [ Cooperative Module Coordination ]

❖ The competitive module coordination may cause noise sensitivity problem and module transition crosstalk. To solve these problem, cooperative module coordination can be used.

❖ Two Key Issues

❖ *how to select the relevant modules*

→ *by threshold a neural network based environment classification results*

❖ *how to combine the outputs of the selected modules*

→ *EP based weight learning*

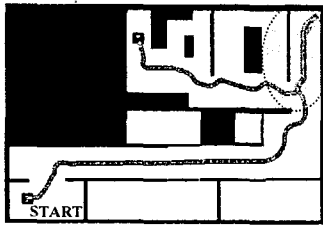
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

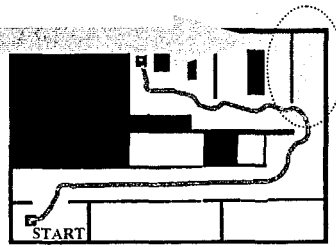
연구 내용 — 공동기관2 (포항공대)

## Neural Network Based AMR Navigator [ Cooperative Module Coordination ]

❖ Simulation Results



Navigation Results using Competitively Coordinated Modular Network



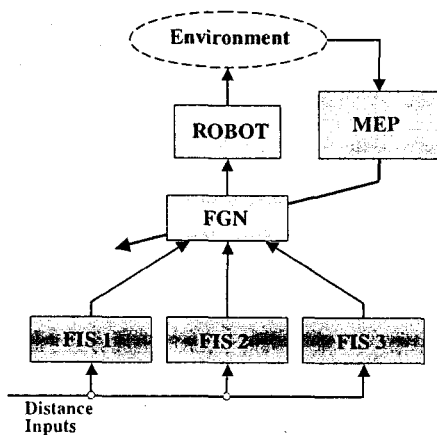
Navigation Results using Cooperatively Coordinated Modular Network

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

연구 내용 — 공동기관2 (포항공대)

## Fuzzy Cooperative Decision Module 의 구조



Three Steps for constructing FCDM

1. Modularization of fuzzy rules for basic behaviors
2. Coordination of each module
3. Optimization of the parameters in fuzzy coordination rule bases

FISs are categorized by the standard of robot motion

FIS Group	Robot Motion
FIS 1	Move Forward
FIS 2	Move Left
FIS 3	Move Right

MEP 는 FGN (Fuzzy Gate Network)의 Parameter들을 최적화함

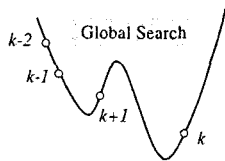
2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

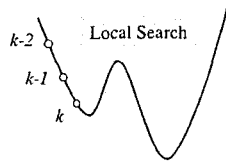
연구 내용 — 공동기관2 (포항공대)

## MEP를 이용한 FCDM 의 FGN 최적화

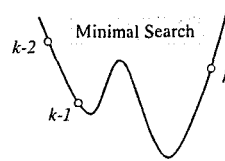
The MEP(Multi-Thread Evolutionary Programming) method consists of global, local, and minimal search routine, each of which is utilized depending on the particular situation as below and is used to update the individuals.



- Random search based on stochastic operation
- Updated by using the Cauchy mutation operator
- Used in the initial stage of search



- Current directions of the parameters lead them all the way to the optimum solutions
- Mutated by the direction of descent with adapted probability distribution



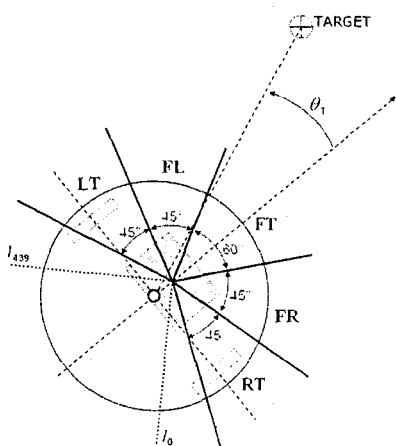
- Near the minimum point, this is applied to search for the minimal individual
- If this routine is used repeatedly, the algorithm moves with a good chance to the global minimum

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

연구 내용 — 공동기관2 (포항공대)

## 자율이동 로봇, Alive2 와 센서 구조



레이저 거리 측정기를 이용한 로봇 주위 270 영역을 스캔  
Fuzzy Rule 을 위한 거리 입력을 5개의 영역으로 나눔  
목표 지점과의 각도와 5개의 거리 입력을 이용하여 Fuzzy Rule 이 구현됨

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## Fuzzy Logic System for Mobile Robot

Fuzzy IF-THEN Rule 의 예

IF  $d_{FR}$  is FAR,  $d_{FL}$  is FAR,  $d_{FR}$  is NEAR,  $d_{LR}$  is FAR,  $d_{RT}$  is NEAR,  
and  $\theta_T$  is FT, THEN steering command is small

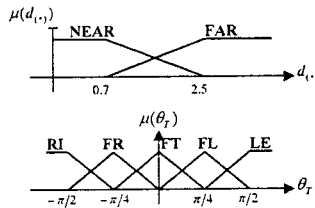
: the difference angle between the heading direction of the robot and direction of the target

where

$$d_{RT} = \sum_{i=28}^{97} l_i \quad d_{FR} = \sum_{i=98}^{170} l_i \quad d_{FL} = \sum_{i=171}^{243} l_i \quad d_{LR} = \sum_{i=244}^{316} l_i \quad d_{LT} = \sum_{i=317}^{390} l_i$$

Fuzzy Set Values for input variables and Its Membership Functions

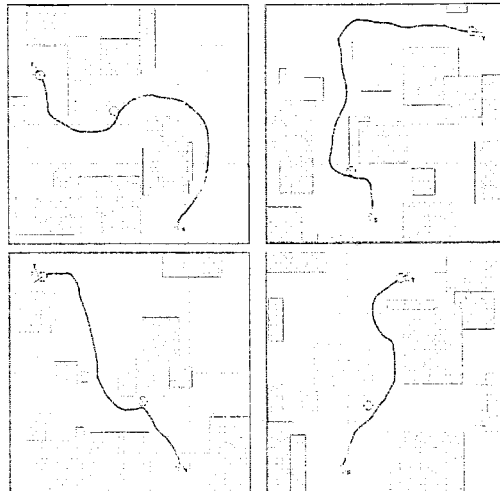
$d_{(*)}$	$\theta_T$
NEAR Near	LE Left
FAR Far	FL Front Left
	FT Front
	FR Front Right
	RI Right



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## Simulation Results



— : 초기값으로 주행  
— : 학습 후 주행

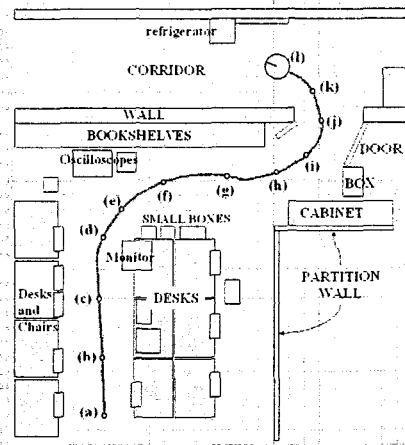
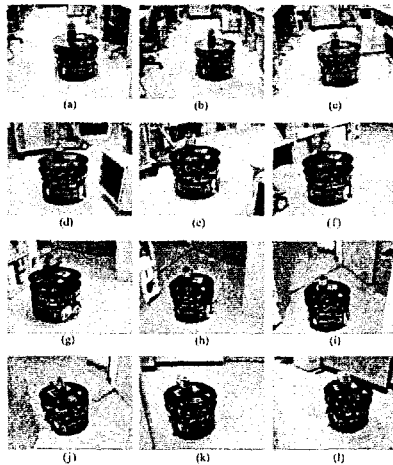
여러 가지 환경에 대해서 학습을 하여 FGN의 Parameter 들을 최적화함

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 공동기관2 (포항공대)

### 실제 주행 결과



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구 내용 - 공동기관2 (포항공대)

### 결론

- 내용1
  - A new IBVS method using neural network and fuzzy evolutionary algorithm was proposed
  - Verification using computer simulations
- 내용2
  - Cooperative coordination leads to performance enhancement of modular neural network controller for AMR navigation
- 내용3
  - Fuzzy Rule 을 동작에 따라 모듈화하고 Hierarchical 구조로 연결시킴
- 내용4
  - FGN 을 도입하여 학습시킬 변수들을 대폭 줄임
  - MEP 를 이용하여 효율적이고 빠른 최적화를 실현
  - 실제 자율 이동 로봇에 적용하여 성공적으로 주행

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구개발 목표 달성도

목표	달성도	내용
행동추론 및 판단을 위한 모듈라 신경회로망 구현	100%	- 대뇌피질 기능정의 - 모듈라 신경회로망을 이용한 행동 추론 및 판단 구현
휴먼-역제 메커니즘에 기반한 학습 알고리즘 개발	90%	- 휴먼-역제 메커니즘 마련 - 범 로봇을 이용한 학습 알고리즘 구현
셀룰라 신경회로망에 의한 연상메모리 구조 설계 및 연구	100%	- 셀룰라 신경회로망에 의한 연상메모리 알고리즘 개발
해마의 기억 및 연상 메커니즘에 기반한 자율학습 알고리즘 개발	100%	- 해마의 기억, 연상 알고리즘 개발 - 자율 학습 알고리즘 개발
협조적 분산 지능을 위한 조건적 진화기반 강화학습시스템 개발	100%	- 연역 시스템 모델링 - 인공 연역계에 기반한 협조 행동 알고리즘 개발
감각정보 특징추출 방법 개발	100%	- ICA기반 특징추출방법(ICA-FX) 제안 및 안정도 증명 - 얼굴인식 문제에 적용
색 분포를 이용한 목표물 감지 방법 개발	100%	- 색 분포 이용한 빠른 목표물 감지 알고리즘 구현

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구개발 목표 달성도(계속)

목표	달성도	내용
시공간적 상황 정보의 학습 모델 개발	90%	- 시간 정보를 포함/결합하여 저장하는 알고리즘 제안 - 시뮬레이션 진행, 타당성 여부 분석
동작계획 메모리와 운동체의 동특성 학습/적응제어기법 개발	100%	- 동작계획 학습/수정 용이한 동작계획 메모리 개발 - 운동체의 동특성 학습/적응제어 위한 다양한 방식 개발 - 두팔로봇 자세 제어를 위해 경로를 생성하는 센서 기반 알고리즘 제안 및 적용
학습기능을 갖는 대용량 신경망 칩 설계	90%	- 모듈 형태의 확장가능 대용량 신경망 칩 설계도 완료
센서특성 및 정보추출 방법에 관한 연구	95%	- Laser와 Sonar 센서의 특성 이용한 환경의 Stochastic모델을 추출하는 알고리즘 구현
센서융합 기법에 관한 연구	100%	- Sonar-Encoder 및 Laser-Sonar의 특성에 기초한 각 센서 값을 상호 보완할 수 있는 융합기법 구현
지능형 Local Path Planning 알고리즘 연구	100%	- Hierarchical Evolution기법 이용 신경망 Path Planner 학습 - MEP를 이용 Local Path 생성 방법 구현
Landmark 추출 및 인식	90%	- Landmark 추출 / 인식 위한 영상 처리 알고리즘 개발
Landmark를 이용한 경로 결정 알고리즘 연구	90%	- 인식된 Landmark 이용한 경로 결정 알고리즘 개발

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

## 연구개발 성과

구분		건수
특허출원 / 실용 신안 / 의장 / 규격 등 (마그넷 스팟 가이드를 이용한 AGV의 주행 시스템)		1
내 容 적 성 적	국제 논문지 (IEEE Tran. On Neural Network, Lecture Note in Computer Science, etc)	5
	국내 논문지 (대한 전자공학회 논문지, 한국퍼지 및 지능시스템학회 논문지, 의공학회지)	9
	국제 학술대회 (ICCAS, CEC2002, IJCNN2002, FIRA2002, ICSMC, etc)	13
	국내 학술대회 (한국퍼지 및 지능시스템학회 학술대회, 대한 의용생체공학회, 한국감성과학회)	10
	기술이전 실적 (AGV 학습 위치 데이터 공유 기법)	1

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

### 2002년도 2차년도 계획 (주관과제)

## 자율학습 및 다중분산 지능모델 연구

### 연구목표

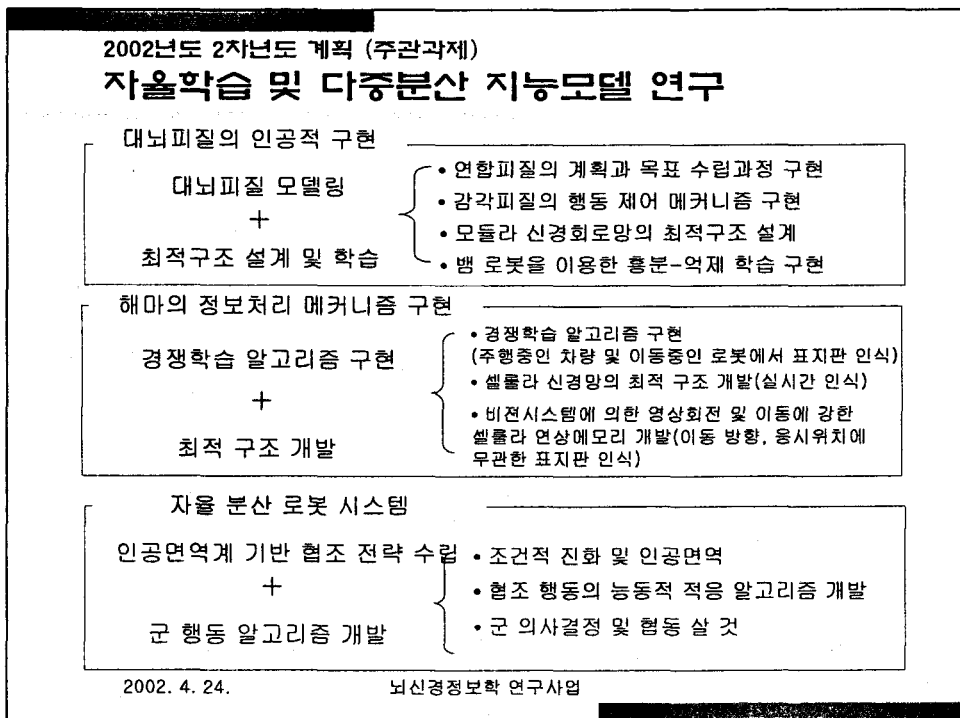
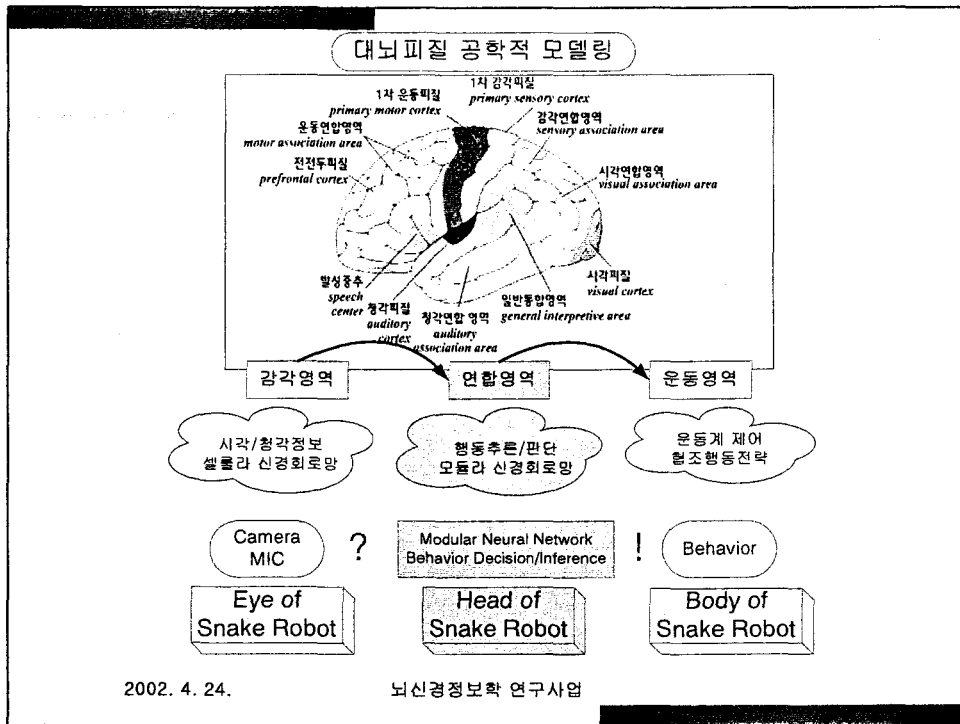
- 대뇌 피질(연합피질, 운동피질)의 인공적 구현
- 모듈라 자율 신경회로망 최적 구조 설계 및 학습 알고리즘 개발
- 해마 정보처리 메커니즘에 기반한 경쟁학습 알고리즘 및 최적구조 개발
- 인공 면역계 기반 자율 분산 로봇 시스템의 협조 전략과 군 행동 알고리즘 개발

### 연구 내용 및 범위

1. 감각 피질의 재감각에 의한 행동 제어 메커니즘 연구
2. 뱀 로봇을 이용한 행동 제어 실험 (홍분-역제 알고리즘 구현)
3. 모듈라 자율 신경회로망 최적 구조 설계 알고리즘 개발
4. 셀룰라 신경회로망의 경쟁 학습 알고리즘 및 최적 구조 개발
5. 비전 시스템에 의한 영상회전 및 이동에 강한 셀룰라 연상 메모리 알고리즘 개발
6. 비전 시스템에 응용하는 모의 실험
7. 조건적 진화 실험
8. 인공 면역에 의한 협조 행동 구현 실험

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업





2002년도 2차년도 계획 (제1공동과제)

## 감각운동 학습 및 제어모델 연구

### 연구목표

- 스트레스 제시 후 감각정보가 운동에 미치는 영향 평가
- 상위수준 운동 계획 및 명령 모델 제시
- 동작계획 및 자각제한 운동제어 모델 제시
- 감각운동제어모델의 하드웨어 제작

### 연구 내용 및 범위

1. 스트레스에 따른 색 자극 및 시청각 인식의 기본 메커니즘 규명
2. 가상현실을 이용한 공간적인 시청각 자극에 대해 EP 및 ERPs 측정  
- Brain Coding 관계를 규명
3. 강화학습을 이용한 시공간적 운동 명령 생성 모델 연구
4. 감각 정보로부터 관심 정보를 추출하는 방법 연구
5. 이동 목표를 추적 및 3차원 공간 위치 인식 방법 연구
6. 동작 계획의 학습/기억/생성 메커니즘의 모델링 연구
7. 자세균형 메커니즘 모델링
8. 운동체의 동특성 학습 및 적응제어 메커니즘 모델링 연구
9. 감각 운동 기능개발 환경 구축
10. 학습 기능을 갖는 대용량 신경망 칩 구현

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

2002년도 2차년도 계획 (제1공동과제)

## 감각운동 학습 및 제어모델 연구

### 감각정보가 운동에 미치는 영향 평가

색 자극 및 시청각인식의  
기본적인 메커니즘 규명

- 시청각 자극 장치 구축
- 스트레스 제시 후 감각이 운동에 미치는 영향 관계를 연구
- 가상현실을 이용하여 공간적인 시청각 자극에 대한 EP 및 ERPs를 측정하여 brain coding 관계를 규명.

### 상위수준 운동 계획 및 명령 모델 제시

이동목표를 인식방법 제시

+

시공간적 운동 명령 생성  
모델 제시

- 감각정보로부터 관심있는 정보를 추출하는 방법 연구
- 이동목표를 추적 및 3차원 공간 위치 인식 방법 연구
- 강화학습을 이용한 시공간적 운동 명령 생성 모델 연구

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

2002년도 2차년도 계획 (제1공통과제)

## 감각운동 학습 및 제어모델 연구

동작계획 및 자각제한 운동제어 모델 제시

동작계획의 학습/기억/생성  
메커니즘의 모델링 연구

+

운동체의 동특성 학습 및  
적응제어 메커니즘 연구

- 동작계획메모리 모델 구현
- 자세균형 메커니즘 모델링  
- 자세와 안정성의 관계 고려
- 적응제어 메커니즘 모델링 연구

감각운동제어모델의 하드웨어 제작

감각운동 기능개발 환경구축

+

학습기능을 갖는 대용량  
신경망 칩 구현

- 로봇 하드웨어 제작
- 신경망 칩의 학습 알고리즘 개발

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

2002년도 2차년도 계획 (제2공통과제)

## 자율 주행 시스템의 구현

### 연구목표

- 진화연산에 기반한 지능형 자율 주행 알고리즘 개발
- 동적 장애물의 감지 및 충돌 회피 알고리즘에 대한 연구
- 다양한 환경에 대한 알고리즘의 강건성 획득
- 목표 대상물에 대한 추적 알고리즘 연구
- Global Path Planning과 Map Building에 대한 뇌 정보처리 방식에 대한 이해
- Data Fusion에 의한 환경인식, 환경모델 저장, 환경모델 갱신 알고리즘 개발

### 연구 내용 및 범위

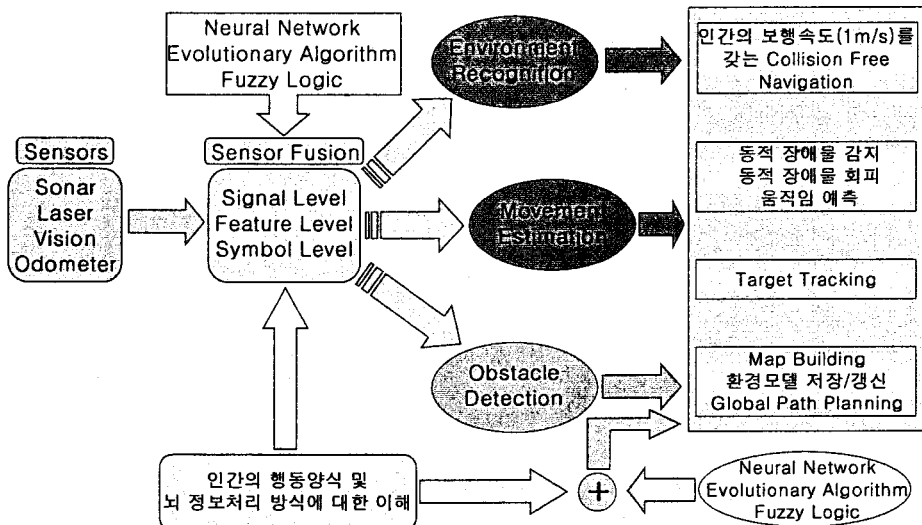
1. 인간의 보행속도(1m/s)를 갖는 Collision Free Navigation
2. 동적 장애물의 감지를 위한 데이터 처리 알고리즘 구현
3. 동적 장애물과의 충돌 회피를 위한 신경망 기반의 예측과 그에 따른 경로 생성
4. 정적 및 동적 목표 대상물에 대한 추적 실험
5. Global Map 작성과 뇌 정보처리 방식 간의 관계 해석
6. 다양한 환경 인식, 환경 모델 구성 및 실험

2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

2002년도 2차년도 계획 (제2공통과제)

### 자율 주행 시스템의 구현

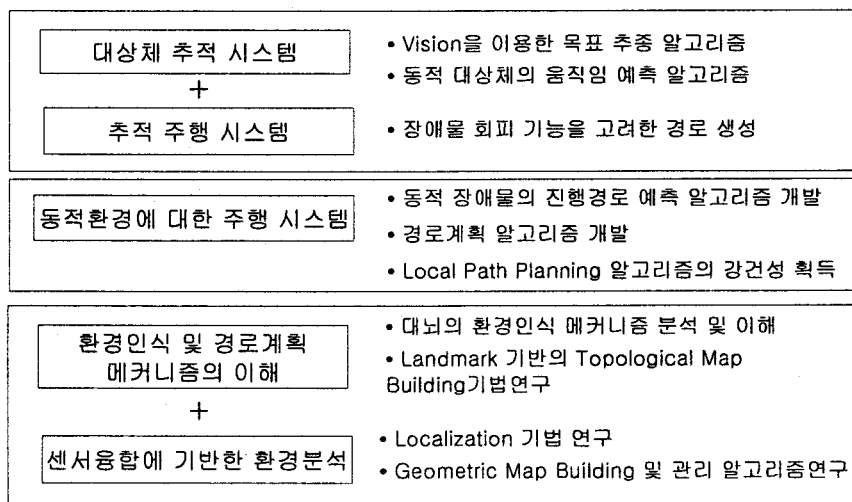


2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업

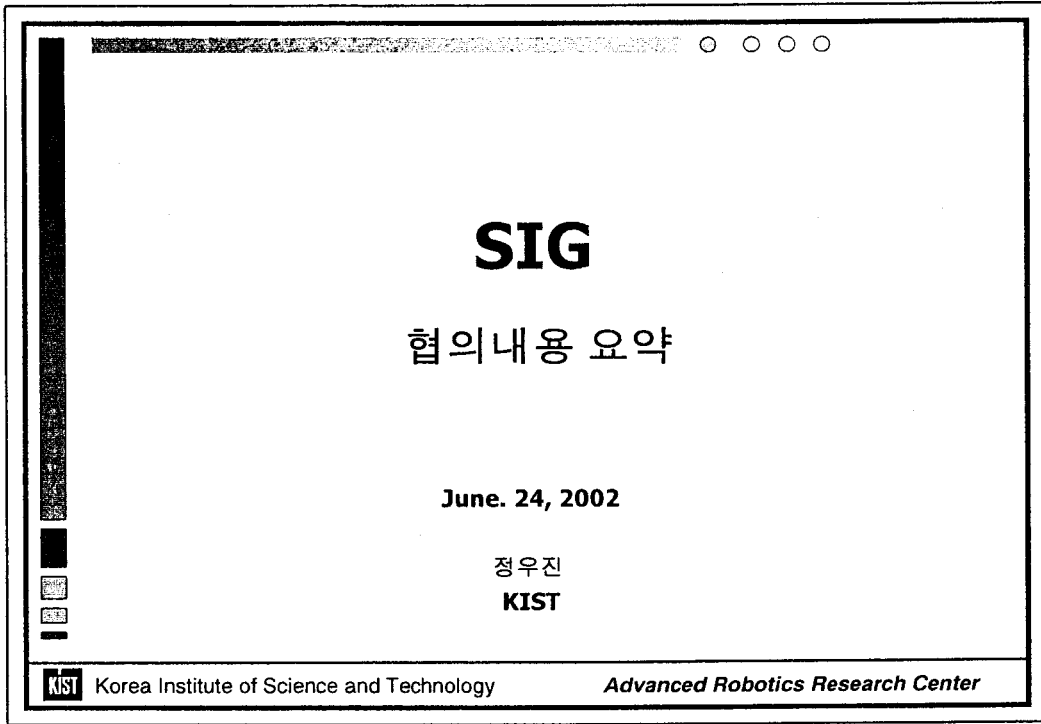
2002년도 2차년도 계획 (제2공통과제)

### 자율 주행 시스템의 구현



2002. 4. 24.

뇌신경정보학 연구사업



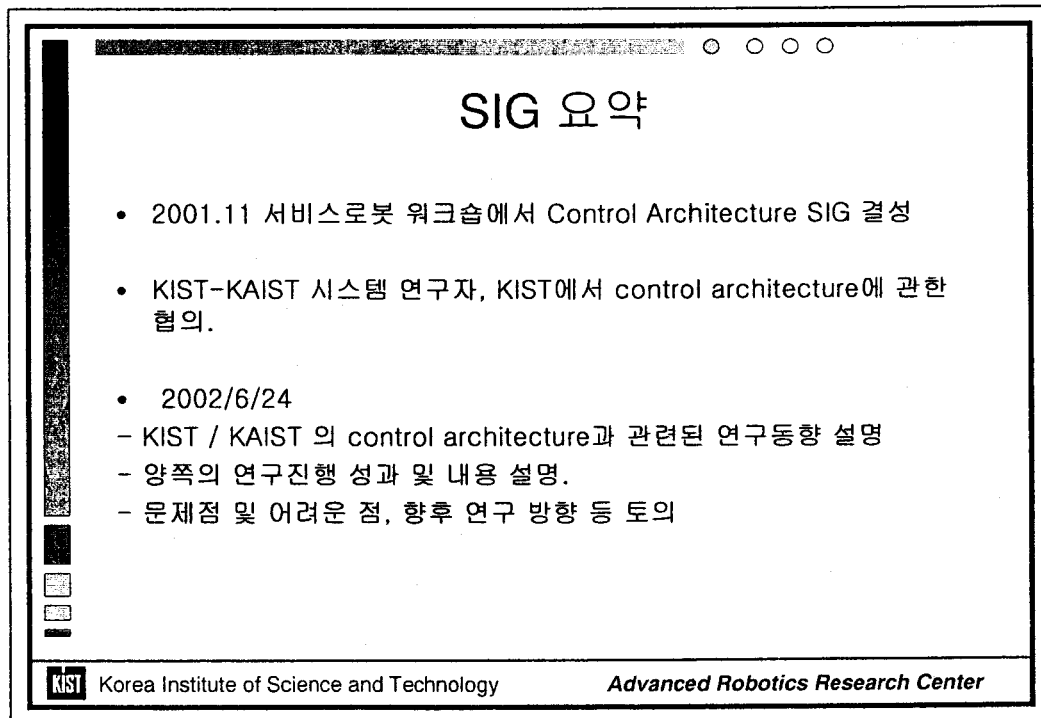
**SIG**

**협약내용 요약**

**June. 24, 2002**

정우진  
**KIST**

**KIST** Korea Institute of Science and Technology *Advanced Robotics Research Center*



**SIG 요약**

- 2001.11 서비스로봇 워크숍에서 Control Architecture SIG 결성
- KIST-KAIST 시스템 연구자, KIST에서 control architecture에 관한 협의.
- 2002/6/24
  - KIST / KAIST 의 control architecture과 관련된 연구동향 설명
  - 양쪽의 연구진행 성과 및 내용 설명.
  - 문제점 및 어려운 점, 향후 연구 방향 등 토의

**KIST** Korea Institute of Science and Technology *Advanced Robotics Research Center*

## 공통된 연구 목표

- 다양한 기능을 수행하는 H/W, S/W module의 효율적 통합이 필요.
- 정의한 목적 기능 달성을 보장하여야 하는 시스템.
- 사람과 공존하는 환경에서 사람과 교류하며 기능을 수행하는 시스템.
- 가변적인 상황에 실시간으로 대처할 수 있고, dependability, safety를 보장하여야 하는 시스템.



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

## KIST 연구내용의 특징

- Layered functionality diagram, class diagram, configuration diagram의 3가지 밑그림을 가지고 통합.
- 가변적인 환경에서의 Autonomy 구현 -> 불확실성에 대처하고 exception handling을 위한 전략이 중요.  
ex) 두리번 거리며 목표물을 찾는다. 동적 장애물 회피, 경로 폐쇄 상황 등에 대응.
- 아주 간단한 user command를 process로 재구성, 목적기능 달성 보장.



Korea Institute of Science and Technology

Advanced Robotics Research Center

## KAIST 연구내용의 특징

- 다양한 user의 intention에 따른 동작 수행.  
-> user input + reaction의 direct connection 도입.
- 3가지 OS (Windows 98, 2000, QNX)와 controller 등으로 구성  
-> command set과 parameter의 효율적이고 명확한 정의가 중요.



## 향후 계획

- 상호 연구성과의 교류 및 협력  
-> diagram을 바탕으로 한 system integration 전략 협의.  
효율적인 user interface 및 command 처리.
- 기술의 표준화  
-> 상호 보완적인 연구 분야 및 내용을 협의를 통하여 도출.  
특허 및 지적 소유권 등의 문제 해결  
개발 결과 및 연구 성과의 공유



## 전체 Discussion 결과

- Service to human
  - Implementation 방법은 공유, 구체적 알고리즘은 계속적 개발
  - 연구자들의 실제적 경험 (문제점, 개선점) 들을 취합, 정리.
  - Service to human의 관점에서 새로운 advanced architecture의 제안.
  - 분명한 목표를 가지고 연구를 추진하는 것이 바람직함.
- 
- 계획
    - 실제 연구경험과 연구성과를 정리한 책 발간.
    - Section 별 국내 전문가의 의견 취합.
    - SIG를 학회의 organized session으로 발전시키는 방안 검토.
    - 연구자 상호간의 연구자료를 공유하여 서로의 결과를 인용하고, 초청 세미나를 개최하는 등의 교류를 활발히 함.



여 백



# 서비스로봇사업단과 뇌신경정보학 사업단의 협력방안 회의 요약

작성 : KIST 휴먼로봇연구센터 정우진

## 1. 사업단간 협력 방안

### 1) Joint Workshop 개최

- "뇌공학과 지능로봇" 제목으로 가을에 joint workshop 을 개최함.
- 11 월 8 일/9 일 (금요일 오후, 토요일 오전의 1 박 2 일) 잠정 결정.
- 장소는 안면도를 우선 검토.
- program committee chairs : Prof. 권동수, Dr. 김문상 (이상 SR), Prof. 양현승, Prof. 최진영 (이상 뇌과학)
- SIG 별 session 을 구성, oral session 의 발표자는 엄선하여 충분히 시간을 주고, poster session 에서 많은 내용을 발표함.
- 연구자간의 실질적인 교류를 추구함.
- 과제 전체적인 개요 발표도 포함.
- 김종환 교수님쪽 로봇교육센터와 연계하여 내용을 기록, 공개하고 경비 후원 등의 구도를 검토하기로 함.

### 2) 기타 협의 사항

- 사업단 행사의 이메일 공지 수신리스트에 양측의 대표자를 포함함.
- 연구 결과보고서를 상호 공개하여 회람.
- 금번 SIG 워크샵 발표자료를 두 사업단 모두 취합하여 proceeding 으로 발간.

## 2. 분야별 협력 방안

- 1) 시각 : 공통된 연구 주제가 많으므로 조기에 협력을 추진함. KAIST 정명진 (서비스로봇), 양현승(뇌과학), 권인소(ERC) 교수님을 중심으로 그룹을 결성하여 vision workshop 부터 개최

하는 등의 방안을 추진.

2) 청각 : KIST 휴먼로봇센터와 KAIST 이수영 교수님 팀이 sound localization 등 공통 관심사에 관하여 교류하기로 함.

3) 인지추론 : 가장 기초적 연구분야로서 현 단계에서 성과의 직접적 활용은 어려우나 향후에 지속적으로 교류, 연구내용을 파악하여 협력 방안을 모색하기로 함.

4) 행동 : 뇌신경사업단은 부분적 algorithm 개발, 서비스로봇사업단은 시스템 구현에 초점이 맞추어져 있는 상황이나, 공통의 관심사를 지속적으로 협의해나가기로 함. (예 - 뇌신경은 brain 입장, 로봇은 기계입장에서의 접근. 공통의 목표를 설정하고 분담)