

과제번호 M1-0107-08-0003

뇌정보처리 메카니즘에 기반한 인공 시각 시스템 연구
Research on Artificial Vision based on
Understanding of Brain Mechanism

뇌정보처리 메카니즘에 기반한 능동 시각연구
**Active Vision System based on Brain Information
Processing Mechanisms**

서울대학교 심리학과

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “뇌정보처리 메카니즘에 기반한 인공 시각 시스템 연구”과제 (세부과제 “뇌 정보처리 메카니즘에 기반한 능동 시각 연구”) 의 보고서로 제출합니다.

2004. 3.

주관연구기관명 : 서울대학교

주관연구책임자 : 이 춘 길

연 구 원 : 방 영 봉
" : 서 효 정
" : 이 준 열
" : 황 재 원
" : 류 기 정
" : 이 정 아
" : 신 부 현
" : 백 규 진

보고서 초록

과제관리번호	M1-0107-08 -0003	해당단계 연구기간	2001. 8. 1 ~ 2004. 5. 31	단계 구분	2 / 3
연구사업명	중 사업명	국책연구개발사업			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명	뇌정보처리 메카니즘에 기반한 인공 시각 시스템 연구			
	세부(단위)과제명	뇌정보처리 메카니즘에 기반한 능동 시각 연구			
연구책임자	이 춘 길	해당단계 참여연구원수	총 : 9 명 내부 : 2 명 외부 : 7 명	해당단계 연구비	정부: 186,800 천원 기업: 천원 계: 186,800 천원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 심리학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
128면					
<p>1. 안구운동신호의 시각계 통합연구</p> <p>가. 시각피질 시각반응과 도약안구운동 신호의 상호작용 도약 안구 운동 신호가 자극에 대한 시각 피질 세포의 반응에 영향을 미칠 뿐만 아니라 세포에 따라 자극에 대한 반응을 억제시키거나 흥분시킴으로써 활동을 조절하는 가능성을 발견</p> <p>나. 운동지각에 미치는 도약안구운동의 영향 도약안구운동이 실행될 때, 시각계의 처리 기능이 역동적으로 조절되고 있음을 발견</p> <p>다. 운동지각을 위한 안구운동신호의 통합에서 주의의 역할 안구운동의 신호가 통합되는 gain을 주의가 조절하고 있음을 시사</p> <p>2. 인공안구의 개발 3자유도 회전 병렬기구 방식의 안구 운동 기구 개발</p> <p>3. 인공안구의 신경제어 심리화적인 원리를 적용시킨 새로운 형태의 신경회로망을 설계</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	도약안구운동, 시각피질, 주의, 인공안구, 신경회로			
	영 어	Saccade, Visual Cortex, Attention, Artificial Eyeball, Neural Circuit			

요 약 문

본 과제는 능동시각의 특성을 인지신경과학적 방법으로 연구하고 인공안구를 개발하는 것을 내용으로 하였음.

1. 안구운동신호의 시각계 통합연구

능동시각의 인지신경과학적 연구를 위해서 안구운동신호가 시각계에 유입되는 방식을 세 개의 실험적 연구를 통해서 수행하였음.

가. 시각피질 시각반응과 도약안구운동 신호의 상호작용

- (1) 고양이 시각피질 세포들이 시각 자극에 대해서 보이는 반응이 안구운동이 발생한 직후에 조절되는 방식을 신경생리적 방법으로 결정.
- (2) 안구 운동 직후에 자극을 제시했을 때 시각피질세포의 활동이 안구를 고정된 상태에서의 자극에 대한 반응보다 감소한 경우가 많았음.
- (3) 세포가 위치한 방향(좌,우 뇌)으로 발생하는 도약 안구 운동 직후 제시된 자극에 대한 반응은 통제 조건과 비교하여 감소하는 경우가 많았고, 반대방향의 경우, 자극에 대한 반응이 증가하는 세포가 더 많음.
- (4) 이 결과들은, 도약 안구 운동 신호가 자극에 대한 시각 피질 세포의 반응에 영향을 미칠 뿐만 아니라 세포에 따라 자극에 대한 반응을 억제시키거나 흥분 시킴으로써 활동을 조절하는 가능성을 시사

나. 운동지각에 미치는 도약안구운동의 영향

- (1) 정신물리적 실험을 수행하여 안구운동의 실행이 시각운동의 방향 지각을 조절하는 방식을 연구.
- (2) 도약안구운동의 직후에 제시된 시각운동은 안구운동의 반대 방향으로 왜곡되어 지각됨을 발견.
- (3) 이 왜곡은 안구운동의 직후에 가장 컸으며, 약 25ms의 시간상수로서 이후 100ms에 걸쳐 감소.
- (4) 이 결과들은, 도약안구운동이 실행될 때, 시각계의 처리 기능이 역동적으로 조절되고 있음을 나타냄.

다. 운동지각을 위한 안구운동신호의 통합에서 주의의 역할

- (1) 시각운동의 지각을 위한 안구운동 신호의 통합 과정에서 주의의 역할을 실험적으로 검토.

- (2) 지각 왜곡의 현상이 전체시아에서 균일하게 나타나지 않고, 자극의 운동 방향에 따라 체계적으로 변함을 발견.
- (3) 운동자극에 주어지는 주의의 양을 변화시킨 실험 조건에서 주의가 주어지는 양에 따라 지각의 왜곡정도가 반비례하여 운동의 방향을 복원하는 과정에서 안구운동의 신호가 통합되는 gain을 주의가 조절하고 있음을 시사.

2. 인공안구의 개발

- 가. 인간의 3자유도 안구 운동의 동역학적 해석 및 시뮬레이션을 수행.
- 나. 소형 Voice Coil Motor 개발과 이를 이용한 소형 고속 3자유도 안구 운동 기구의 개발, 이를 구동하기 위한 제어기 개발, 성능 실험결과 500 deg/s 이상의 속도로 좌우 ± 30 도 상하 ± 30 도 토션 ± 15 도 회전 가능, 체적 400 cm³ 이하.
- 다. 3자유도 회전 병렬기구 방식의 안구 운동 기구 개발, 기구학 해석, 이 기구를 구동하기 위한 제어기 개발, 좌우 ± 30 도 상하 ± 30 도 토션 ± 30 도 회전 가능, 체적 200 cm³ 이하, 성능 실험 결과 정확한 위치 결정 및 인간의 안구 움직임에 상응하는 움직임이 가능.

3. 인공안구의 신경제어

- 가. 심리학적인 원리를 적용시킨 새로운 형태의 신경회로망을 설계하여 시간적 연상기억, STM과 LTM의 구분, 가변적인 hidden layer 구조, 학습-시행의 동시성을 획득.
- 나. 이 신경망을 본 과제에서 개발된 인공안구의 운동 조절에 적용하여 53%정도의 위치 에러를 감소시키는 결과를 얻음.

S U M M A R Y

Human visual system is active in the sense that: 1) visual information is selectively sampled at each fixation and processed, and 2) visual system not only receives retinal input but also integrates information regarding attentional and behavioral context such as eye movements. Accordingly, for example, it has been widely assumed that combining the eye movement signal with the retinal image is both sufficient and necessary for recovering the true direction and speed of visual motion. Thus, in order to engineer an active human visual system, basic mechanisms of the human system need to be understood and based on these understanding human-like vision model (compact, high speed, 3-dimensional) is better developed.

This project consisted of two specific aims. 1) Understanding the cognitive and neural mechanisms of active human visual system, and 2) development of an artificial eyeball simulator based on them. During three-year project period (2001.8.1~2004.5.31), 1) a facility that would allow us precisely measure human eye movements in 3-dimension was installed, and 2) roles of eye movement signal and attentive processes on visual motion perception were determined using psychophysical paradigm, 3) roles of saccadic eye movements on the neural activity of the awake cat visual cortex, 4) hardware models of bio-morphic ophthalmotrope were developed. More detailed account of main results follows.

Roles of saccadic eye movements on visual motion perception: We found that execution of a saccadic (rapid) eye movement in the dark systematically biased subsequent perceptual judgment of the direction of visual motion (200 or 1000 deg/s) in the direction opposite to the saccade. This non-veridical motion perception reached a maximum immediately after saccade offset, and then decayed in approximately 100ms. These results suggest that the oculomotor signal interacts with central mechanisms related to motion and possibly form perception, as well as spatial vision as documented with mislocalization of visual objects at the time of saccades.

Roles of attentive processes for visual motion perception: In this study, we examined the roles of attentive processes in integrating eye movement signal for motion perception. Human subjects viewed a display of two targets moving in near

orthogonal directions and were instructed to ocularly follow one e.g., pursue a horizontally moving target while the second moving in near vertical directions. Subjects reported the perceived direction of the second target. Each of the two targets briefly changed in shape or color during movement. In 'inattentive' condition, subjects were also asked to report the number of times the pursued target changed, whereas in 'divided attention' condition, subjects were also asked to report the number of times the second target changed. In 'inattentive' condition, the perceived direction of the second target motion was close to the direction of its retinal image, not compensating for the pursuit eye movements and thus resulting in a large judgment error, whereas in 'divided attention' condition, the perceived error was smaller than 'inattentive' conditions, but larger than 'attentive' where the same target was pursued and counted. In 'inattentive' condition, the magnitude of perceptual error was not related to the locus of judged target with respect to the tracked target, as predicted by space-based attention. These results suggest that once a tracked target is selected by attention, eye movement information is not available for unattended moving targets.

Eye movement simulator: In this study, a final goal is to develop an eyeball simulator that has the velocity of over 300 deg/s and the volume under 300 cm³, movable in three dimensions. We developed two simulators. The first one is a gimbal type eye movement simulator. The gimbal type simulator is actuated by three voice coil motors solely developed for this simulator. The other one is a parallel mechanism type simulator, in which a CCD camera is rotated by three sets of rotational parallel links. The simulators mimic human oculomotor performance in terms of rotational freedom and velocity. Various tests confirmed the possibility of the developed simulator for using in humanoid heads.

C O N T E N T S

Ch. 1. Project Outline	
Par. 1. Necessities of Proposed Study	9
Par. 2. Specific Goals and Scope	10
Ch. 2. Current State	
Par. 1. Current Research Trends	11
Par. 2. Prospects	14
Ch. 3. Contents and Results	
Par. 1. Integration of Eye Movement Signal	15
1. Interaction between Visual Signal and Saccade	15
2. Influence of Saccade to Movement Perception	38
3. Role of Attention	46
Par. 2. Development of Bio-mimetic Ophthalmotrope	59
Par. 3. Neuronal Controls of the Ophthalmotrope	99
Ch. 4. Accomplishments and Contributions	
Par. 1. Accomplishments	117
Par. 2. Contributions	118
Ch. 5. Applications	
Par. 1. Future Research Plans	120
Par. 2. Expected Applications	121
Ch. 6. Related Information	
Par. 1. Current Works	122
Ch. 7. References	123

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	
1절 연구의 필요성	9
2절 연구의 목표와 범위	10
제 2 장 국내외 기술개발 현황	
1절 국내외 연구 동향	11
2절 향후 기술발전 전망 및 기대성과	14
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	
1절 안구운동신호의 시각계 통합 연구	15
1. 시각피질 시각반응과 도약안구운동 신호의 상호작용	15
2. 운동지각에 미치는 도약안구운동의 영향	38
3. 운동지각을 위한 안구운동신호의 통합에서의 주의의 역할	46
2절 인공안구의 개발	59
3절 인공안구의 신경제어	99
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	
1절 연구 목표 달성도	117
2절 관련분야 기술 발전 기여도	118
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	
1절 향후 연구 계획	120
2절 기대 성과 및 활용 계획	121
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	
1절 국외 기술현황	122
제 7 장 참고문헌	123

제 1 장 연구개발과제의 개요

1절 연구의 필요성

1. 연구개발의 과학기술, 사회경제적 중요성

가. 기술적 측면

인간 뇌의 시각정보처리체계는 복잡한 시각계에서의 정보를 일괄적으로 처리하는 대신에, 응시점을 이동시켜가면서 필요한 정보를 선별적으로 또한 순차적으로 처리하는 효율적인 정보처리 메카니즘을 갖고 있다. 따라서, 복잡한 실세계 영상에서 응시점을 이동시키는 인간 뇌의 안구 운동을 모방한 능동 시각 시스템을 개발하면 보다 효율적인 대상 물체의 검출 및 영상 인식 시스템의 구현이 가능하며, 새로운 영상 처리 방법의 패러다임을 제공할 수 있다. 또한 인간의 시각계는 망막을 통한 시각 입력 정보만을 처리하는 것이 아니라 안구의 위치와 운동에 대한 정보를 통합하여 처리한다는 것이 알려지고 있으며 특히 이러한 정보는 공간 시각의 역동적인 조절과 깊은 관련이 있다는 것이 확인되고 있다. 인공시각을 구현하기 위해서는 인간 시각계가 안구운동의 정보를 통합하는 인지 신경기제를 이해하고 이에 기반한 인공안구의 개발이 필수적으로 요구된다. 구체적으로 인간 시각체계를 모방한 인공시각을 구현하기 위해서는 소형이면서 고속의 3차원 회전 운동이 가능한 인공안구의 개발이 필요하며 이와 더불어 고속의 안구운동에 따른 운동제어 오류의 보정과 시각기능의 조절이 이루어지는 기체에 대한 이해가 필수적이다.

나. 경제·산업적 측면

인간의 시선이동 원리를 모방한 능동 시각 시스템은 시각 기능이 필요한 단순, 반복 작업이나 복잡한 영상이해를 요하는 작업을 인간의 시각기능과 대등한 정도로 수행할 수 있는 로봇 또는 인공 대리인이 수행하도록 활용되는 등 여러 가지 생산 시설의 최첨단 자동화를 이루는데 기여할 수 있다. 또한 21세기 인간의 시각 기능을 가진 인공 눈의 제작에 필요한 지능형 적응 제어 시스템을 제공함으로써, 인간의 시선만으로도 작동 및 제어가 가능한 21세기형 첨단 컴퓨터와 여러

가지 가전 제품에서부터, 무인 방범/경비 시스템, 첨단 방위 산업 및 군수 용품, 각종 시각보조장치 및 대체 의료 장비 등에 이르기까지 다양한 분야의 새로운 산업을 파생시킬 수 있다. 이와 관련된 기술은 다른 선진국에서도 아직 초보적인 응용 단계이므로, 향후 개발 성과에 따라 미래형 산업에 국가의 우선권을 확보할 수 있고, 다양한 아이디어 상품에 의한 수출 증진효과도 막대할 것으로 기대된다.

2절 연구의 목표와 범위

1. 연구의 목표

- 가. 3차원 안구 운동과 시각신경계의 상호작용 이해
- 나. 체적 300 cm³ 속도 300 deg/s의 사양을 가지는 3차원 안구 운동 기구 개발.

2. 연구의 내용과 범위

구분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위
1차년도 (2001. 8. 1 - 2002. 5. 31)	○인간 안구시스템의 인지신경 기전 연구	-안구운동의 인지신경기전연구 -3차원 안구운동 측정설비 -인간 3차원 안구운동의 이동 패턴 이해
능동 시각 모델 및 응용기술 연구	○3차원 동역학적 모델 개발	-인간안구의 동역학 모델 연구 -인간 3차원 안구운동의 동역학 모델 개발
2차년도 (2002. 6. 1 - 2003. 5. 31)	○고속 3차원 안구운동에 따른 시각신경계의 역동적 조절과정 연구	-안구운동신호의 시각계 통합연구 -운동지각에 미치는 도약안구운동의 영향
능동 시각 모델 및 응용기술 개발	○고속 3차원 안구운동 위한 소형 고출력 actuator 개발	-인간안구의 동역학 모델 확립 -인공안구 적용을 위한 소형 고출력 actuator의 개발
3차년도 (2003. 6. 1 - 2004. 5. 31)	○안구 운동의 신경신호에 의한 제어 연구	- 3차원 안구위치제어신호 추출 - 시선 위치 코딩과 운동 발생을 통합하는 시스템에 대한 연구
능동 시각 모델 보완/평가 및 응용기술 개발	○3차원 인공안구 개발	- 인공안구 개발, 부피: 300cm ³ 이하, 최고속도: 300deg/s - 신경모방신호에 의한 인공안구제어

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1절 국내외 연구 동향

1. 지금까지의 연구개발 실적

- 가. 인간 시각계의 기능은 3차원 안구운동과 깊은 연관이 있다. 가령, 고속의 안구운동 전후에 시공간의 위치 지각이 왜곡되는 것이 확립되어 있으며, 시각운동의 지각도 왜곡되는 것이 밝혀졌다. 또한 고속 안구운동제어의 오류를 시각 피드백에 의해서 적응적으로 보정하는 기능이 소뇌에 의해서 수행되고 있음이 알려져 있다.
- 나. 인간의 안구운동은 수평, 수직, 비틀림(torsion) 회전을 일으키는 3축 근육에 의해 위치와 운동이 제어된다. 인간 안구의 위치는 시선을 중심축으로 무한한(비틀림) 위치의 가능성이 있으나, 한 위치만 선택되고 있다. 이를 Donders의 법칙이라 부른다.
- 다. 안구의 3차원적 위치 제어는 망막(시각피질)-상구-뇌간-동안신경핵-외안근의 신경회로가 담당한다. Listing의 법칙으로 알려진 제약에 의해 비틀림의 크기가 결정되며, 이 제약을 구현하는 신경회로가 뇌간 회로에 있는 것으로 생각되고 있으나, 이 법칙이 구현되고 있는 방식은 정확히 알려져 있지 않다.
- 라. 기존의 인공안구의 대표적인 모델로는 미국의 MIT Artificial Intelligence Laboratory 에서 Cog Project 의 일환으로 개발된 것을 비롯하여 국내 경북대학교 전자 전기공학부 지능로봇 실험실에서 소형 매니플레이터를 개발하는 과정에서 형상 기억 합금을 이용하여 개발된 기구 등이 있다.
- 마. Saccadic motion 등 안구 운동을 모방한 추적제어에 대한 연구는 국외에서 90년대 후반부터 연구를 시작해서 아직까지 시스템의 상품화 단계에 이르지 못하고 기초연구 수행 단계 연구와 시스템화 연구가 병행적으로 이루어지고 있다. 특히, 미국, 일본과 같은 선진 연구 기관에서의 연구는 뇌연구의 일환으로 수행되고 있으나, 국내연구는 병 진단 등과 관련한 의과학적 측면에서의 saccadic 안구 운동의 분석에 관한 연구가 간혹 있는 실정이다.
- 바. California Institute of Technology의 Dr. T.K. Horiuchi, Dr. Christof

Koch는 Analog VLSI Circuits for Visual Motion-Based Adaptation of Post-Saccadic Drift에 관한 연구를 토대로 안구의 Saccadic motion을 위한 아날로그 집적회로 구현에 관한 연구를 활발히 수행 중에 있다. 또한, 일리노이 주립 대학 내에 활발한 학제간 연구를 수행해 오고 있는 Beckman Institute for Advanced Science and Technology내의 N. Srinivasa(University of Illinois)와 R.Sharma(Pennsylvania State Univ.)는 Active vision에서의 saccades 실행을 위한 neurocontroller에 대한 연구를 수행하여 1997년 IEEE Control Systems Magazine에 최신 연구 결과를 발표하였다. 그러나, 이들 연구들은 실제 인간의 안구 운동에 대한 동역학을 전혀 고려하지 못하고 있고, CCD 카메라 2대를 이용한 Stereo 비전 기술을 이용하고 있어, 인간의 시신경 기능을 구현한 망막 칩에 의한 안구 운동 모델 등의 개발은 아직 시도되고 있지 못하다.

사. RIKEN 연구소의 T. Yagi 교수는 안구 운동에 대한 Biologically-inspired active vision system 연구를 수행해 오고 있고, Shizuoka Univ.의 Y. Ebisawa는 Characteristics of eye tracking movements와focal attention과의 관계에 관한 연구를 수행하고 있음. 또한, Nagoya Univ.의 Dr. N. Sugie와 Uchikawa교수는 RIKEN에서 제공한 연구 수탁과제로 Real time visual tracking system mimicking saccadic movements에 대한 연구결과를 발표한 바 있지만, 아직 시스템 수준의 연구는 진행되고 있지 못하다. 또한, Toyohashi대학의 Yonezu교수는 인간의 시신경 세포의 신호 전달 동특성을 모방한 MOSFET를 이용한 반도체 인공 망막 칩을 개발하고 있고, 같은 대학의 Shiro Usui교수는 인간의 시신경의 신호 전달 메카니즘을 분석한 생체 공학적 접근 방법으로 시신경과 뇌기능과의 관계 이해를 밝히고자 노력하고 있다.

아. 독일에서는 Univ. of Freiburg의 Dr. B. Fischer가 Saccadic motion등 Eye movements와 관련한 Optomotor system에 관한 연구를 수행중이고, 영국에서는 Univ. Caledonian in Glassgow의 Dr. P.C. Knox가 Express eye movements, vestibular control of eye movement, extraocular 및 muscle afferent signals and the visuomotor system에 관한 연구를 수행 중이다.

2. 현기술상태의 취약성

- 가. 현재의 인식 시스템은 대부분 고정된 카메라를 가정하고 있어, 넓은 시야에서 들어오는 대량의 영상 정보를 우선순위 없이 한꺼번에 처리해야 하는 부담을 갖고 있다. 그러나, 인간의 경우, 안구운동을 통해 우선순위에 따라 정보를 선택적으로 받아들임으로써 한번에 처리되는 정보량이 제한된다. 또한 움직이는 물체의 경우에도 안구의 추적 운동에 의해 인식이 가능하다. 따라서 다양한 환경에 적용 가능한 인공 시각을 개발하기 위해서는 이러한 능동 시각 기법이 인공 시각 시스템에도 도입될 필요가 있다.
- 나. 인간의 안구 운동을 모방한 인공 안구 운동 제어 시스템에 대한 연구는 뇌연구의 한 부분으로 수행되고 있는 연구로서 현재까지는 기초 연구를 수행하고 있는 수준이다. 특히, 이 분야는 인간의 안구 운동 매카니즘에 대한 생체 신호학적 이해 및 분석이 선행되어야 하므로, 전기 전자 컴퓨터 외에 의학이나 신경 생물학 등을 포괄하는 다양한 학제간 연구의 수행이 반드시 필요하지만, 현재까지 국내에서의 연구는 다양한 학제간 연구가 힘든 실정이었으며, 이는 현재 이 분야에 대한 국내 연구 수준이 초보적인 단계에 머물게 된 원인이기도 하다.
- 다. 미국 MIT Artificial Intelligence Laboratory 의 경우 로봇과 인간과의 사회적 접촉을 증진시키기 위한 인간 얼굴을 설계하고 제작하는 것을 목표로 로봇 Cog를 개발하였다. 하지만, 실제의 안구와 달리 그 크기가 두부 전체를 차지할 정도로 크다.
- 라. 인간의 안구운동을 모방하는 기존의 구동기(actuator)들은 대체로 수평, 수직의 2차원 추적 운동을 수행한다. 따라서, 비틀림 위치가 왜곡된다. 또한, 기존의 구동기를 사용하면 인간의 안구와 같은 고속의 움직임이 불가능하거나 구동부의 크기가 몹시 커지게 된다. 따라서, 3차원 인공안구를 만들기 위해서는 소형이면서도 고속(300deg/s) 움직임을 실현하는 구동기의 개발이 요구된다.

2절 향후 기술발전 전망 및 기대성과

1. 앞으로의 전망

가. 안구운동신호에 의한 운동지각, 공간지각, 형태지각의 조절에 관한 기전이 수 년 내에 확립될 것으로 전망된다.

나. 신경 신호의 검출을 통해 안구 결손 환자의 인공안구를 제어하는 보철 시스템에 사용이 가능할 것이다.

2. 기대 성과

가. 기술적 측면

(1) 운동 시스템 중 하나인 안구 운동 시스템에 대한 이해는 인간의 다른 운동 시스템에 대한 이해를 확장시킬 수 있으며, 안구 운동 시스템의 원리에 기반한 안구운동모델의 개발은 시각 정보 처리에 대한 새로운 측면에서의 연구 방법을 제공할 것으로 기대된다.

(2) 인공안구 적용을 위해서 개발되어질 소형 엑츄에이터는 소형임에도 불구하고 고출력을 내는 장치이기 때문에 안구 운동 시스템 뿐 아니라 적은 공간을 차지하면서 고출력이 요구되는 여러 다양한 분야에서의 사용이 가능하다.

나. 경제·산업적 측면

(1) Human Robot의 시각 system에 적용이 가능하다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1절 안구운동신호의 시각계 통합 연구

1. 시각피질 시각반응과 도약안구운동 신호의 상호작용

가. 개요

시각 피질은 외부의 시각 자극에 대한 정보를 망막으로부터 입력 받는데, 이와 함께 안구의 움직임과 관련한 정보도 입력받고 있다. 특히 도약안구운동(saccadic eye movement)의 종료 후 약 63ms 시점에서 시각피질 세포들의 활동이 증가한다(Park & Lee, 2000). 이 시기는 대략 시각자극에 대해서 시각피질이 반응을 보이는 시기와 일치하므로 도약안구운동과 관련한 신호가 시각반응과 상호작용하게 될 가능성을 시사한다. 본 연구에서는 시각 피질로 입력되는 시각 자극에 대한 신호와 도약 안구 운동 종료 직후 나타나는 시각 피질 세포의 활동이 어떠한 방식으로 상호 작용하는지를 분석하여 시각 피질에서 시각 자극에 대한 정보를 처리하는 방식을 명확히 이해하고, 일차 시각 피질에서 발견되는 도약 안구 운동 신호의 역할이 무엇인지 알아보려고 하였다. 구체적으로 시각 피질 세포의 활동 특성 중 하나인 기울기선택성(orientation selectivity)이 도약 안구 운동 직후에 변화하는가를 알아보기 위한 연구의 첫 단계로서 도약 안구 운동 직후 제시된 기울기 자극에 대한 반응이 도약 안구 운동 신호에 의해 어떻게 변화하는지를 알아보기 위하여 실험을 수행하였다.

점 자극을 향하여 도약 안구 운동을 수행하도록 훈련된 고양이의 일차 시각 피질에 2개의 미세 전극을 삽입하여 도약 안구 운동 직후 제시된 일정한 기울기의 자극에 대한 세포의 활동을 채집하였다. 도약 안구 운동 직후에 특정한 기울기의 자극을 제시하였을 때, 시각 피질 세포가 보이는 반응과 안구를 중앙에 고정된 상태에서 같은 시각 자극을 제시하여 나타나는 반응을 비교하여 기울기 자극에 대한 반응이 도약안구 운동 직후 얼마나 변화하였는지를 변화지표(change index)를 이용하여 정량적으로 분석하였다. 또한 이러한 반응의 변화가 어떠한 요인과 연관되어 나타나는지를 알아보았다. 실험 결과, 도약 안구 운동 직후에 시

각 자극을 제시하였을 때 시각 피질 세포의 활동은 안구를 고정된 상태에서 시각 자극을 제시했을 때의 세포의 활동에 비해 더 작아지는 세포들과 커지는 세포들을 발견하였다. 전반적으로, 안구 운동 직후에 자극을 제시했을 때 세포의 활동이 안구를 고정된 상태에서의 자극에 대한 반응보다 감소한 경우가 많았다. 이러한 세포 활동의 변화가 어떠한 변인과 관련이 있는지를 알아보기 위하여 여러 변인과 변화지표를 연관지어 분석해 보았다. 변화지표와 활발한 반응을 보인 자극의 기울기와의 관계를 분석해 본 결과 제시된 기울기에 따라 세포 활동이 변화하는 정도는 크게 차이를 보이지 않았다. 또, 세포가 위치한 깊이와의 관계를 분석해 본 결과, 세포의 위치가 깊어질수록 도약 안구 운동 직후 자극을 제시하였을 때, 활동이 증가한 경우가 간혹 있었으나 뚜렷한 경향성은 발견되지 않았다.

도약 안구 운동의 방향에 따라 시각 자극에 대한 활동의 변화 정도가 달라지는지를 분석하기 위하여, 도약 안구 운동의 방향과 시각 피질 세포의 위치와의 관계를 기준으로 도약 안구 운동의 방향과 세포의 위치가 일치하는 경우와 서로 반대인 경우로 나누어 변화지표를 비교하였다. 그 결과, 도약 안구 운동의 방향과 세포의 위치가 일치하는 조건(ipsiversive saccade condition)에서는 도약 안구 운동 직후 제시된 자극에 대한 반응이 통제 조건과 비교하여 감소하는 경우가 많았고, 도약 안구 운동의 방향과 세포의 위치가 반대인 조건(contraversive saccade condition)에서는 도약 안구 운동 직후 자극에 대한 반응이 증가하는 세포가 더 많이 나타났다.

이러한 결과는 도약 안구 운동 신호가 자극에 대한 시각 피질 세포의 반응에 영향을 미칠 뿐만 아니라 세포에 따라 자극에 대한 반응을 억제시키거나 흥분시킴으로써 활동을 조절하는 가능성을 시사하는 것이라고 할 수 있다.

나. 시각 피질에서 관찰되는 도약 안구 운동 활동

시각 자극이 없는 완벽한 암흑 상태에서 실험동물이 도약 안구 운동을 하였을 때, 일차 시각 피질에서 도약 안구 운동과 관련한 활동을 보인다는 증거는 Park 과 Lee(2000)의 연구에서 찾아볼 수 있다(그림 1).

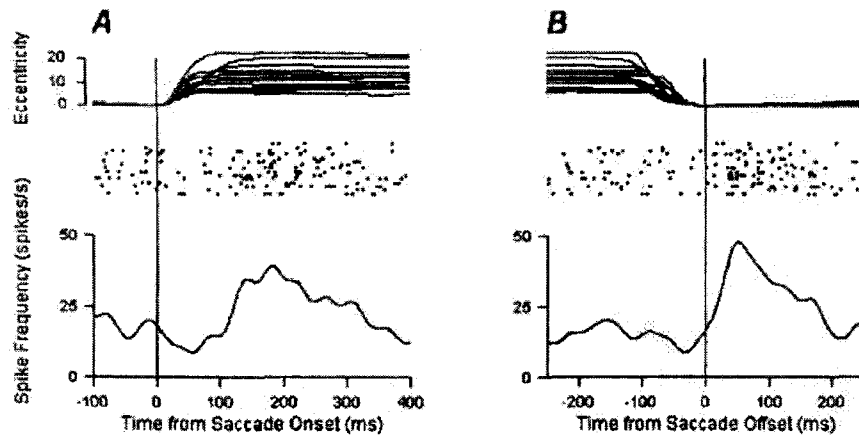


그림 1. 도약 안구 운동과 관련한 시각 피질 세포의 활동(Park & Lee, 2000). 완벽한 암흑 상태에서 실험 동물로 하여금 자발적으로 도약 안구 운동을 하도록 유도하였을 때, 세포의 활동을 정렬한 것으로 A에서는 세포의 활동을 도약 안구 운동의 개시 시점에 정렬하여 나타낸 것이고, B는 세포의 활동을 도약 안구 운동의 종료 시점을 기준으로 정렬한 것이다. 이러한 결과로 볼 때, 일차 시각 피질에서 도약 안구 운동과 관련한 신호를 입력 받고 있으며, 그 신호는 도약 안구 운동의 종료 시점에 기준하였을 때, 더 명확하게 나타나는 것으로 보아 종료 시점에 즈음하여 전달되고 있다고 할 수 있다.

시각 피질이 외부의 시각 자극을 어떻게 처리하는지에 관해 이루어진 지금까지의 연구들은 대부분 시각 자극과 그에 대한 시각 피질의 반응을 중점적으로 다루었다. 즉, 시각 피질 세포의 수용장에 자극이 제시하였을 때, 그 자극에 대한 시

각 피질의 반응을 연구의 대상으로 한 것이다. 그러나 실제로 외부의 시각 자극을 보게 되는 상황에서 안구는 초당 두 세 번 정도, 빠른 속도로 끊임없이 움직이게 된다. 그러므로 망막에 맺히는 자극의 위치 또한 급격하게 움직이게 된다. 그리고 시각 자극에 대한 이러한 연구와 함께, 시각 피질이 여러 가지 다른 정보들, 예를 들면, 주의(Moran & Desimone, 1985), 안구 운동과 위치 정보(Toyama, Komatsu & Shibuki, 1984; Park & Lee, 2000)도 함께 받고 있다는 연구도 꾸준히 이루어져 왔다. 그러나 이러한 연구들은 시각 피질에서 시각 자극 이외의 다른 정보들도 입력되고 있다는 주장을 뒷받침하기 위한 연구들로서 이러한 정보가 시각 자극을 처리하는데 어떠한 영향을 미치는지에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 물론 시각 피질에서도 상위 피질에 속하는 V4 영역이나 V3A 영역에서는 주의나 안구 운동과 관련한 정보들이 시각 자극에 대한 반응을 어떻게 변화시키는지에 관한 연구들(Nakamura & Colby, 2000, 2002; Moore, Tolia & Schiller, 1998)은 꾸준히 있어왔다. 그러나 일차 시각 피질에서 안구 운동과 관련한 신호가 시각 자극에 대한 반응에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 아직까지 이루어져 있지 않다. 안구 운동과 관련한 신호가 일차 시각 피질에서도 발견되었기 때문에, 이 신호가 일차 시각 피질에서 어떠한 역할을 하는지에 대해 알아보는 것이 이후의 연구 과제라고 할 수 있다.

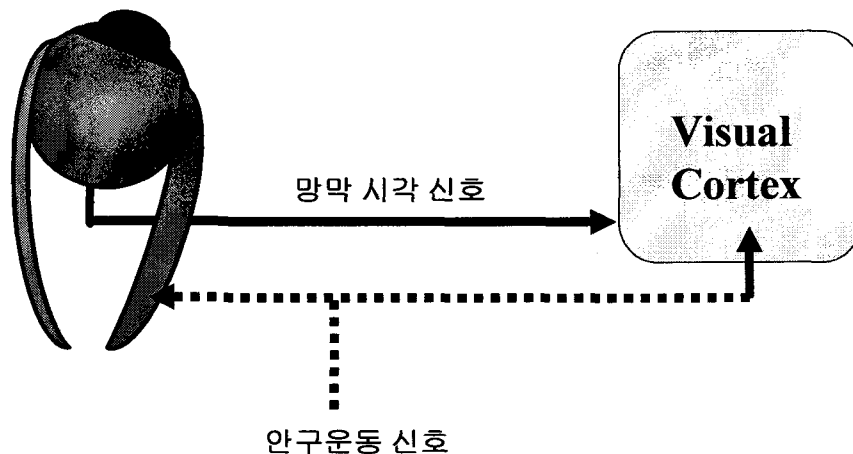


그림 2. 시각 피질에서 시각 신호와 안구 운동 신호의 통합의 문제. 일차 시각 피질은 외부의 자극과 관련하여 망막으로부터 시각 신호를 입력받게 된다. 그러나 이러한 정보와 함께 안구의 움직임과 관련한 신호 역시 입력받게 된다. 이전 연구에 의하면 도약 안구 운동 신호는 안구운동 종료 직후 63ms에 나타났으며(Park & Lee, 2000), 시각 반응이 나타나는 시간은 59ms였다(Ringach, Hawkin, & Shapley, 1997). 이렇게 시간상으로 시각 피질이 시각 신호를 받는 비슷한 시간에 안구 운동과 관련한 신호도 함께 입력받는다면, 이 두 신호가 어떻게 시각 피질에서 상호 작용하여 나타나는지 알아볼 필요가 있다.

그러므로 본 연구에서는 기본적으로 도약 안구 운동의 신호가 일차 시각 피질에서 어떠한 역할을 하는지에 관하여 알아보고자 하였다. 이전의 연구에서는 실험 동물이 마취, 마비된 상태로 눈의 움직임이 전혀 없었다. 그러나 실제 상황에서는 안구는 끊임없이 움직이고 있고, 이러한 안구의 움직임과 관련한 활동이 일차 시각 피질에서도 발견되었다. 또한 상위의 시각 피질 영역에서는 안구의 움직임에 따라 세포의 반응 패턴이 달라지기도 한다. 그러므로 본 연구에서는 우선 일차 시각 피질에서 안구 운동 이후에 제시된 시각 자극에 대한 반응이 눈을 고정된 상태에서의 시각 자극에 대한 반응과 얼마나 달라지는지를 알아보고자 하였다. 즉, 안구 운동 직후에 시각 자극을 제시했을 때, 그에 대한 반응이 눈을 고정된 상태에서 자극을 제시했을 때의 자극에 대한 반응과 비교하였을 때, 반응이 증가하는지, 감소하는지를 알아보았다. 그리고 자극에 대한 반응이 변화한 정도가 어떠한 변인과 관계가 있는지 살펴보았다. 이러한 분석 과정을 통해서 시각 자극을 처리할 때, 일차 시각 피질에서 보이는 안구 운동 신호의 역할이 무엇인지 알아보고자 하였다.

다. 연구 방법

2마리의 성장한 고양이가 2주 이상의 실험실 내 적응기간을 거친 후 안구 운동과 뇌 내 신경세포활동의 측정을 위해 준비되었다. 첫 번째 수술에서는 안구의 위치를 파악하기 위해 코일을 삽입하고, (Judge, Richmond, & Chu, 1980) 동물의 머리를 고정하기 위한 고정 장치와 세포 활동 측정을 위해 실린더를 부착하였으며, 절차는 다음과 같았다. 동물을 케타민(ketamine hydrochloride, 50mg/ml, 2cc, 유한양행)으로 안정시킨 후 아트로핀(atropin sulfate, 0.5mg/ml, 0.2cc, 광명약품)을 근육에 주사하였다. 동물이 진정된 후 장시간의 수술 시간 동안의 마취를 위해 한 쪽 대퇴 혈관에 폴리에틸렌 관을 삽입하여 소듐 디오펜탈(sodium thiopental, 0.5~0.6cc/kg/h, 중외제약)을 주사하였다. 스테인레스 강으로 제작된 고정 장치를 동물의 두개골에 인공관절 고정용 시멘트와 6~8개의 수술용 나사를 이용하여 부착하였으며, 스테인레스 강으로 제작된 원통형 실린더를 Horsley-clarke AP 0 지점을 중심으로 하여, 인공관절 고정용 시멘트(Palacos-R, 40g, Heraeus Kulzer GmbH & Co.KG)로 고정하였다. 이 때, 시멘

트에 수술 부분 주위의 감염을 막기 위해 항생제(Vancomycin, 500mg)를 섞은 후 사용하였다. 사용한 인공실린더의 내경은 17mm 였다. 안구의 위치를 파악하기 위해 테플론으로 절연된 40G 스테인레스 강선(Cooner Wire Co., California, #AS632)을 직경 20~22mm의 원형으로 세 바퀴 감아 만든 탐지 코일(search coil)을 안구 주위의 공막(sclera)과 결막(conjunctiva) 사이에 위치시키고 봉합하였다(Judge, Richmond, & Chu, 1980). 코일의 저항은 두 동물에서 각각 70.6, 59.5 Ω 이었다. 수술 후 감염을 방지하기 위해 소량의 항생제(황산가나마이신, 0.7cc, 동아제약)를 일주일동안 투약하였고, 이후 3~4일간 하루 1회 소량의 소염진통제(ketoprofen, 0.1mg/kg, 유니화학)를 주사하여 동물의 회복을 도왔다.

1~2주의 회복기간을 통해 동물이 완전히 회복된 후 실험 과제를 수행하기 위한 훈련이 실시되었다. 실험동물이 수행할 과제로는 시각적으로 유도된 도약 안구 운동 과제가 사용되었으며, 동물의 식수를 박탈하여 물을 과제에 대한 보상으로 사용하였다. 1~2개월의 훈련을 통해 실험 과제에 대해 어느 정도 학습이 이루어진 후 두 번째 수술이 시행되었다. 이 수술은 첫 번째 수술로 동물의 머리에 부착된 실린더의 안쪽 두개골을 제거하는 수술로, 케타민을 이용해 마취한 상태에서 이루어졌다. 수술 후 실린더를 멸균된 테플론 마개로 막아 노출된 뇌 부위와 외부와의 접촉을 차단했으며, 실린더의 내부는 멸균된 식염수와 미량의 항생제(chloramphenicol sodium succinate, 종근당)에 의해 유지되었다.

안구 운동의 측정 안구의 위치 측정은 자기유도원리를 이용한 공막탐지코일 기법(scleral search coil method)을 통하여 이루어졌다(Robinson, 1963). 이 기법은 자기장 속에 원형의 코일이 존재할 경우 이 코일이 일정 축을 따라 회전하게 될 때 코일에 의해 형성된 원을 통과하게 되는 자속의 양이 변화하게 되고, 이에 따라 코일에 유도되는 유도 전류의 크기가 달라지는 현상을 이용한 것이다. 이 실험에 사용된 안구 위치 측정 장치는 Remmel(1984)이 구현한 장치에 근거하여 제작되었다. 두 쌍의 사각 Helmholtz 코일에 의해 각각 50kHz, 75kHz의 수평 수직 자기장이 생성되고, 이 수평 수직의 자기장에 의해 탐지 코일에서 유도된 전류는 위상탐지회로를 거쳐 수평 수직의 안구위치신호로 분리되었다. 이렇게 얻어진 안구위치신호는 250Hz의 비율로 표집되어 12bit로 A/D 변환(Lab Master card, Tecmar Inc.)되는 한편, 25KHz의 비율로 표집되어 12bit로 A/D 변환(PCI-6023E, National Instrument)된 후 두 대의 컴퓨터(IBM-pc)에 각각 저장되었다.

세포 활동의 측정 독립적으로 구동할 수 있는 2개의 미세 전극을 이용하여 세포 외부 전위(extracellular potential)를 측정하였다. 사용된 전극은 주문 제작(ESI2ecpg, Thomas Recording)된 것으로 석영(quartz)과 유리로 절연된 백금-텅스텐(90%-10%) 합금으로 이루어졌다. 절연체를 포함한 전극의 지름은 80 μ m였으며, 전극의 저항은 2~4M Ω 이었다. 각각의 전극은 마이크로 드라이브(System Eckhorn MM05, Thomas Recording, Germany)를 이용하여 독립적으로 구동되었으며, 유도관(guide tube)을 통하여 이동하였다. 실험이 시작될 때, 먼저 유도관이 시각 피질의 표면으로부터 2~3mm 더 깊이 들어가게 하여 세포의 활동을 안정적으로 채집할 수 있도록 하였다. 그리고 이 지점에서부터 전극을 이동시켰는데, 전극의 이동을 제어할 때에는 유선 리모콘과 컴퓨터의 제어 소프트웨어를 통하여 0.01 μ m의 정밀도로 이루어졌다. 전극 간의 간격은 610 μ m였고, 기록된 세포 활동은 두 번의 증폭 과정(gain 20, 1000, preamplifier VVMini05 and single unit activity filter, SUA-01)을 거친 후 대역통과여과기(500Hz to 2KHz, SUA-Filter)를 거쳐 여과되었다. 이렇게 얻어진 신호는 25KHz의 비율로 표집되어 12bit로 A/D 변환(PCI-6023E, National Instrument)된 후 컴퓨터(IBM-pc Pentium)를 통해 저장되고 표시되었다.

시각 피질에 대한 확인은 Horsley-Clarke 좌표체계에 따른 해부학적인 위치를 고려하였으며, 2개의 전극이 유도관(guide tube)을 통해 피질 표면에서 2~3mm 더 깊이 들어간 상태에서 시각 피질의 표면으로부터 600~1500 μ m 떨어진 위치에서 각각의 전극에 의해 세포활동이 기록되었다.

피험 동물들은 식수를 보상으로 하여 시각적으로 유도된 도약안구운동 과제(visually-guided saccade task)를 수행하였으며 실험은 주 1~3회의 비율로 3~6개월 간 이루어졌다. 실험 상황에서는 식수가 박탈된 고양이를 구금주머니에 넣어 신체 운동을 구속하고 동물의 머리가 자기장 틀의 중앙에 위치하도록 고정시켰다. 이후 실린더 마개를 열어 뇌를 노출시키고, 전극을 전진시키면서 행동 과제를 시작하였다. 실험은 전자기장 차폐실(shield room)에서 이루어졌고, 실험실 내부는 모니터의 잔광으로 인해 희미하게 빛이 있는 상태였다.

도약 안구 운동 과제를 수행하기 위한 실험 조건에서는 모니터의 잔광으로 인하여 희미하게 빛이 있는 상태에서 진행되었으며, 눈 움직임에 대한 신호가 있는지 확인하기 위한 시행은 모니터를 끄고 완벽한 암흑 상태에서 진행되었다. 시각 자극은 24인치 모니터(Sony GDM-W900, 482 \times 304mm)와 컴퓨터(Pentium IBM

pc)를 이용하여 100Hz의 비율로 제시되었다. 모니터와 피험 동물 사이의 거리는 38cm 였으며, 모니터는 동물의 수평 시각 $\pm 32^\circ$, 수직 시각 $\pm 22^\circ$ 범위를 차지하고 있었다. 실험에서 제시된 자극은 흰색과 검은색으로 이루어진 Gabor 조각이었다. 아래 (1)에 따라 Gabor 자극의 밝기를 정의하였다. 전달(carrier) 공간주파수(spatial frequency)는 0.5 cycle/degree을 사용하였는데, 이 주파수는 고양이 시각피질 영역 17과 18 세포들이 동시에 강한 반응을 보인다는 사실이 이전 연구에서 알려져 있다(Issa, Trepel, & Stryker, 2000).

$$L(x, y) = Lm[1 + C_p \cos(2\pi x f_c) \times \exp[\frac{1}{2}(\frac{x}{\sigma_x})^2 - \frac{1}{2}(\frac{y}{\sigma_y})^2]] \quad \text{-----}(1)$$

여기서, Lm은 모니터의 평균 밝기이며 Cp는 Gabor의 최대 대비이고, fc는 패턴의 공간주파수이고, σ_x 와 σ_y 는 가우스 필터의 가로, 세로 방향의 크기를 나타낸다.

사용된 Gabor 조각의 예를 그림 3에서 볼 수 있다. Gabor 조각을 사용한 것은 세포가 자극의 모서리에 반응하거나 모니터 주변의 잔광에 반응하는 것을 방지하기 위한 것이었다.

실험은 크게 두 부분으로 나누어 진행되었다. 먼저 통제 조건은 다음과 같은 방식으로 시행하였다. 시행의 개시를 알리는 부저 소리(1kHz sine wave)가 울리고, 500ms 이후 모니터의 중앙에 시각 0.5도 인 점 자극이 제시되었다. 중앙에 제시된 자극 주변에 $4^\circ \times 4^\circ$ 크기의 가상의 윈도우가 형성되고, 동물이 이 윈도우 안으로 시선을 이동하여 자극에 일정 시간(500ms)동안 시선을 고정하게 되면, 그 자극이 꺼지고, 55ms 동안 암흑 상태가 지속된 후에, 0° , 45° , 90° , 135° 의 방향을 가지는 자극 중 하나가 무선적으로 선택되어 100ms 동안 제시되었다. 자극이 제시되는 동안 눈을 움직이지 않은 상태가 유지되었을 경우에만 보상을 주어 자극이 제시되는 동안에는 피험 동물이 눈을 움직이지 않도록 하였다. 하나의 시행이 종료되면 매 시행에서의 세포의 활동은 대역 통과 여과기(band-pass filter)와 전위 변별기(window discriminator)를 거친 디지털 신호(TTL pulse)로 실험 프로그램을 구동하는 컴퓨터에 입력되어 실험자에게 보여 지는데, 이때 보여 지는 세포의 활동과 세포 활동을 증폭시킨 소리를 통하여 네 가지 방향을 가지는 자극 중 가장 반응이 활발하게 나타나는 자극을 판단하였다.

이러한 시행을 거쳐 전극에 채집된 세포들이 가장 반응을 활발하게 하는 자극의 방향이 결정되면, 그 이후에 실험 조건이 되는 시행을 진행하였다. 실험 조건에서도 부저 소리가 울리면 시행이 시작되었다. 부저 소리가 울리고 나서 500ms의 시간이 지난 후 왼쪽 12°, 오른쪽 12°, 중앙, 세 위치 중 하나를 무선적으로 선택하여, 그 위치에 점 자극(0.5°)을 2000ms 동안 제시한다. 그리고 그 시간 안에 피험 동물이 제시된 점 자극을 중심으로 한 4°× 4° 크기의 가상의 윈도우 안에 눈을 이동시키고, 일정 기간(500ms)동안 고정하게 되면, 그 자극이 꺼지면서 중앙에 점 자극이 제시되었다. 처음에 제시된 자극에 동물의 시선이 2000ms 이내에 고정되지 않을 경우 그 시행은 취소되었으며, 그 자극에 성공적으로 시선을 고정하고, 이후 중앙에 자극이 켜지고 이 위치로 1500ms 이내에 안구를 이동하게 되면, 중앙에 자극이 꺼지고, 55ms이 지난 후, 앞의 실험에서 가장 활발한 반응을 보인다고 판단된 기울기를 가진 정현파 자극이 100ms 동안 제시되었다.

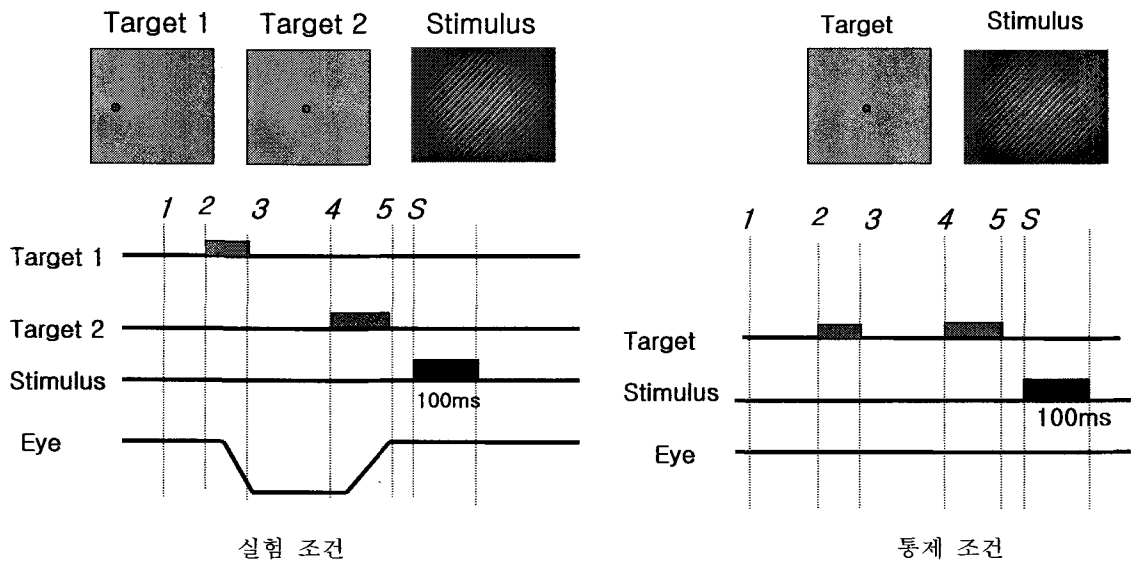


그림 3. 시행의 시간적 구조. 실험 동물이 보게 될 화면과 각 자극이 켜지고 꺼지는 시간, 그리고 실험 동물의 눈의 위치를 보여주고 있다. 실험 조건에서는 실험 동물이 왼쪽, 혹은 오른쪽 12도 지점에서 중앙으로 도약 안구 운동을 하도록 유도하고, 동물이 성공적으로 도약 안구 운동을 수행하여 눈이 중앙에 고정되면 정현파 자극을 제시한다. 통제 조건에서는 실험 동물이 중앙에 눈을 고정하고 움직이지 않게 하고, 정현파 자극을 제시하는데, 이 때 자극의 기울기를 달리하여 어떤 기울기의 자극에 대해 가장 활발한 반응을 보이는지를 조사하게 된다. 1: 시행의 시작, 2: 점 자극의 제시, 3: 점 자극 주위의 창(window)에 들어간 시간, 4: 목표 자극의 제시, 5: 목표 자극 주위의 창(window)에 시선이 들어간 시간, S: 시각 자극이 제시되기 시작한 시간.

세포의 분류(spike sorting) 각각의 전극에서 채집된 세포활동은 본 실험실에서 작성된 주성분분석(principal component analysis, PCA)을 기반으로 한 세포분류알고리즘(Matlab, Mathworks, 2001)을 통해 2~7개의 세포들로 분류되었고, 또한 이 과정을 통해 동물의 움직임 등에 의해 유발되는 잡음(noise)이 제거되었다(그림 4). 세포분류과정은 다음과 같다. 우선 일차적으로 각 전극에서 나온 신호 중 일정 역치를 넘는 부분만을 추출했으며, 활동 전위(action potential)의 최고점에서 좌로 0.35ms, 우로 0.85ms, 총 1.2ms에 해당하는 시간을 추출해 활동 전위에 대한 파형자료로 삼았다. 동시에 각 활동전위의 최고점이 나타나는 시간을 기록하였다. 세포분류는 이렇게 추출된 활동전위의 파형자료를 이용하여 이루어졌는데, 우선 주성분분석을 통해 파형자료의 분산을 95%까지 대표해주는 주성분들을 추출해 내었다. 그런 후 이 주성분들을 축으로 하는 공간상에 각각의 활동전위를 위치시키면 활동전위파형의 패턴에 의해 군집(cluster)이 형성되는데 이렇게 형성된 군집의 개수에 의해 세포의 수가 결정되었다. 실험자에 의해 선택된 정수 범위 내에서 최적의 군집 개수가 MLE(maximum likelihood estimation)기법을 통해 결정되었으며, 여기에서 사용된 MLE 기법은 Yu의 방법을 따랐다(Yu, 1999). 각 군집의 중심점에 대한 결정은 LVQ(learning vector quantization) 알고리즘을 이용하여 이루어졌다. 특정 활동전위의 파형이 어느 군집에 속하는지의 여부는 주성분(principal component)들을 축으로 하는 공간상에서 각 군집의 중심점과 특정 활동전위파형 사이의 거리를 비교함으로써 이루어졌다(Lewicki, 1998; Yu, 1999, 그림 4).

세포 활동의 분석 먼저, 채집된 세포가 어떠한 기울기를 가지는 자극에 가장 활발하게 반응하는지를 알아보기 위하여 이루어진 시행들은 각 자극에 대한 세포의 발화 빈도를 조사하였다. 각 시행마다 자극이 제시되기 시작한 시점으로부터 50ms 이후부터 200ms의 기간을 대상으로 그 기간 동안 나타난 세포의 발화 빈도를 계산하였다. 그 후, 제시된 자극에 따라 분류하여, 각 자극에 대해 세포가 보이는 평균 발화 빈도수를 계산하여, 각 세포마다 기울기 반응 곡선(orientation tuning curve)을 만들었다. 도약 안구 운동 이후에 제시된 자극에 대하여 시각 피질 세포가 보이는 반응의 패턴을 조사하기 위한 분석에서는 먼저 도약 안구 운동의 개시와 종료시점을 정의할 필요가 있었다. 그래서 도약 안구 운동의 개시와 종료 시점은 수평 안구 위치를 기준으로 벡터 위치의 순간 운동 속도가 15deg/s를 통과하는 시점으로 정의하였다. 각 조건 간의 세포의 활동 정도를 비교하기

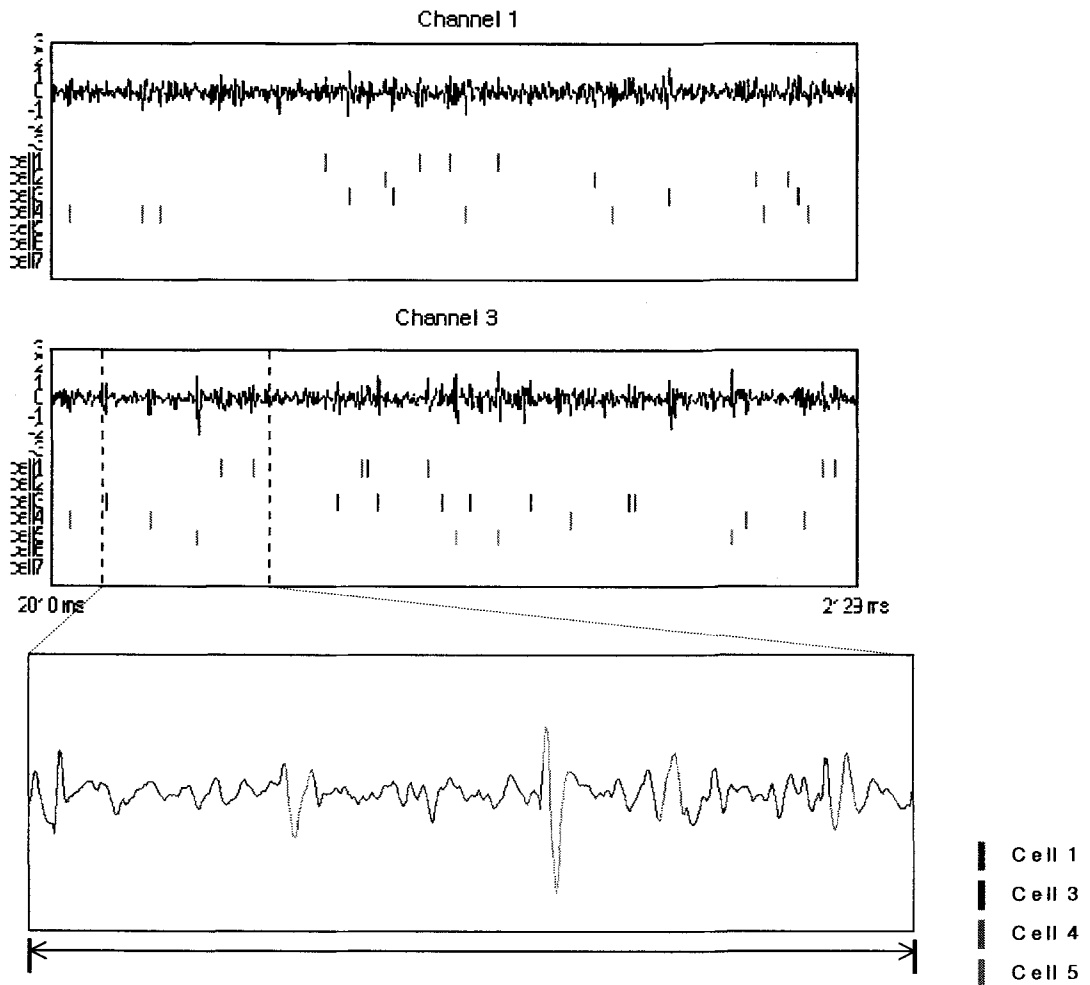


그림 4. 활동 전위의 분류(wave extraction). 전극으로부터 나온 세포 활동의 기록은 전위의 형태적인 특성에 근거하여, 2-4개 정도의 세포로 분류될 수 있다. 이러한 세포의 분류는 본 실험실에서 작성된 주성분분석(principa component analysis, PCA)을 기반으로 한 세포분류알고리즘(Matlab, Mathworks, 2001)에 의해 이루어졌다.

위해서 자극이 제시된 시점을 기준으로 자극 제시 이전 200ms에서 자극이 제시된 이후 300ms까지 총 500ms 기간 동안의 세포의 활동을 분석의 대상으로 하였다. 세포 활동의 시기 및 활동 정도를 객관적으로 평가하기 위하여 가우스 함수(gaussian function)를 사용한 활동 전위 밀도 추정법(spike density estimation)을 적용하였다. 이 방법은 각 활동 전위가 일어나 시점을 일정한 폭의 가우스 곡선으로 대체하여 모든 시점에 대하여 합산한 뒤, 발생한 모든 활동 전위의 개수를 고려하여 정상화함으로써 확률밀도를 추정하는 기법이다(Silverman, 1986).

도약 안구 운동의 효과 분석 도약 안구 운동이 발생한 직후에 시각 자극을 제시하였을 때의 시각 피질 세포의 활동과 눈을 중앙에 고정된 상태에서 시각 자극을 제시하였을 때의 세포의 활동이 어느 정도의 차이를 보이는지를 분석하기 위하여 두 조건간의 활동의 차이를 나타낼 수 있는 지표가 필요하였다. 그래서 먼저 분석 대상이 되는 자극 제시 이전 200ms에서 자극 제시 이후 300ms까지 총 500ms 기간 동안의 세포의 활동을 나타낸 확률 밀도 함수에서 가장 활발한 반응을 보이는 지점의 활동 빈도를 조사하였다. 그리고 두 조건에서 나타난 활동 빈도의 차이를 다음과 같은 수식을 통하여 하나의 값으로 정량화하였다.

$$\text{변화지표(Change Index, CI)} = \frac{\text{Exp} - \text{Con}}{\text{Exp} + \text{Con}}$$

Exp : 도약 안구 운동 직후 자극을 제시하였을 때 세포의 활동 크기

Con : 눈 움직임이 없는 상태에서 자극을 제시하였을 때 세포의 활동 크기

이렇게 하여 얻어진 값이 음수 값을 가진다면, 그것은 도약 안구 운동 직후 제시된 자극에 대한 시각 피질 세포의 반응이 눈 움직임이 없는 상태에서 자극을 제시하였을 때 세포의 활동 정도보다 감소하였음을 나타내고, 양수 값을 가진다면, 도약 안구 운동 직후 제시된 자극에 대한 반응이 통제 조건이 되는 눈이 고정된 상태에서 자극을 제시했을 때의 활동보다 증가하였음을 나타낸다.

라. 연구 결과

도약 안구 운동 과제를 훈련한 두 마리의 실험동물로부터 총 126개의 단일 신경세포 활동을 기록하였다. 기록된 세포 활동 자료 중에서 자극이 제시될 때 안구가 중앙에 고정되지 못하고 미끄러짐으로 인해서 자극이 제시되는 동안 눈의 위치가 0.5도 이상 차이가 나는 시행은 제외하였다. 이렇게 제외한 이후 조건간의 차이를 조사할 수 있을 정도의 충분한 시행 수를 가진 총 69개의 세포를 분석 대상으로 하였다. 모니터를 통해 제시된 자극에 따라 도약 안구 운동을 성공적으로 수행하고, 도약 안구 운동 직후에 정현파 자극을 제시하였을 때, 시각 피질 세포가 보이는 활동의 대표적인 예가 그림 6에 제시되어 있다.

도약 안구 운동 직후 시각 반응을 통제 조건에서의 시각 반응과 비교하여 두 조건 간의 활동의 차이를 분석하였다. 그 결과, 실험 조건에서의 자극에 대한 반응이 통제 조건에서의 자극에 대한 반응보다 증가한 경우도 있었고, 감소한 경우도 있었다. 그림 7은 도약 안구 운동 직후의 자극에 대한 반응이 통제 조건에서의 세포의 활동보다 감소한 경우에 해당하는 한 시각 피질 세포의 활동을 조건별로 나타낸 것이다. 먼저 눈이 중앙에 고정된 상태에서 4가지 종류의 기울기 자극을 무선적으로 제시하였을 때, 90도 기울기의 자극에 가장 활발한 활동을 보였기 때문에 이후의 실험 조건에서도 90도 기울기의 자극을 제시하였다. 그리고 여러 번의 시행을 반복한 후에 각 조건에서의 세포 활동의 차이를 알아보기 위해 그림 7과 같이 확률 밀도로 나타내었다. 이 세포는 통제 조건에서 자극을 제시하기 시작한 후 47ms에 가장 활발한 반응을 보였으며, 그 때의 활동 빈도는 53.639 spike/sec였다. 그리고 오른쪽 방향으로 도약 안구 운동을 한 직후에 자극을 제시하였을 때, 세포의 반응은 자극을 제시한 후 46ms에 가장 활발한 반응을 보였으며, 이 때의 활동 빈도는 20.377 spike/sec였다. 그리고 비교를 위하여 도약 안구 운동 직후에 자극을 제시하지 않은 조건에서는 자극이 제시되지는 않았으나 자극이 제시된 시점에 정렬하였을 때, 자극 제시 후 40ms에 가장 활발한 반응을 보이는 것으로 나타났다. 도약 안구 운동 직후에 자극을 제시하였을 때 이 세포의 반응은 안구를 중앙에 고정한 상태에서 자극을 제시하였을 때의 자극에 대한 반응과 비교할 때 감소하였다. 전체 분석 대상이 되는 세포 중에서는 40개의 세포가 도약 안구 운동 직후의 자극에 대한 반응의 정도가 통제 조건에서의 자극에

대한 반응보다 더 작았으며, 평균적으로 눈을 고정한 상태에서 자극을 제시했을 때의 세포의 반응에 비해 63% 정도의 활동을 보였다.

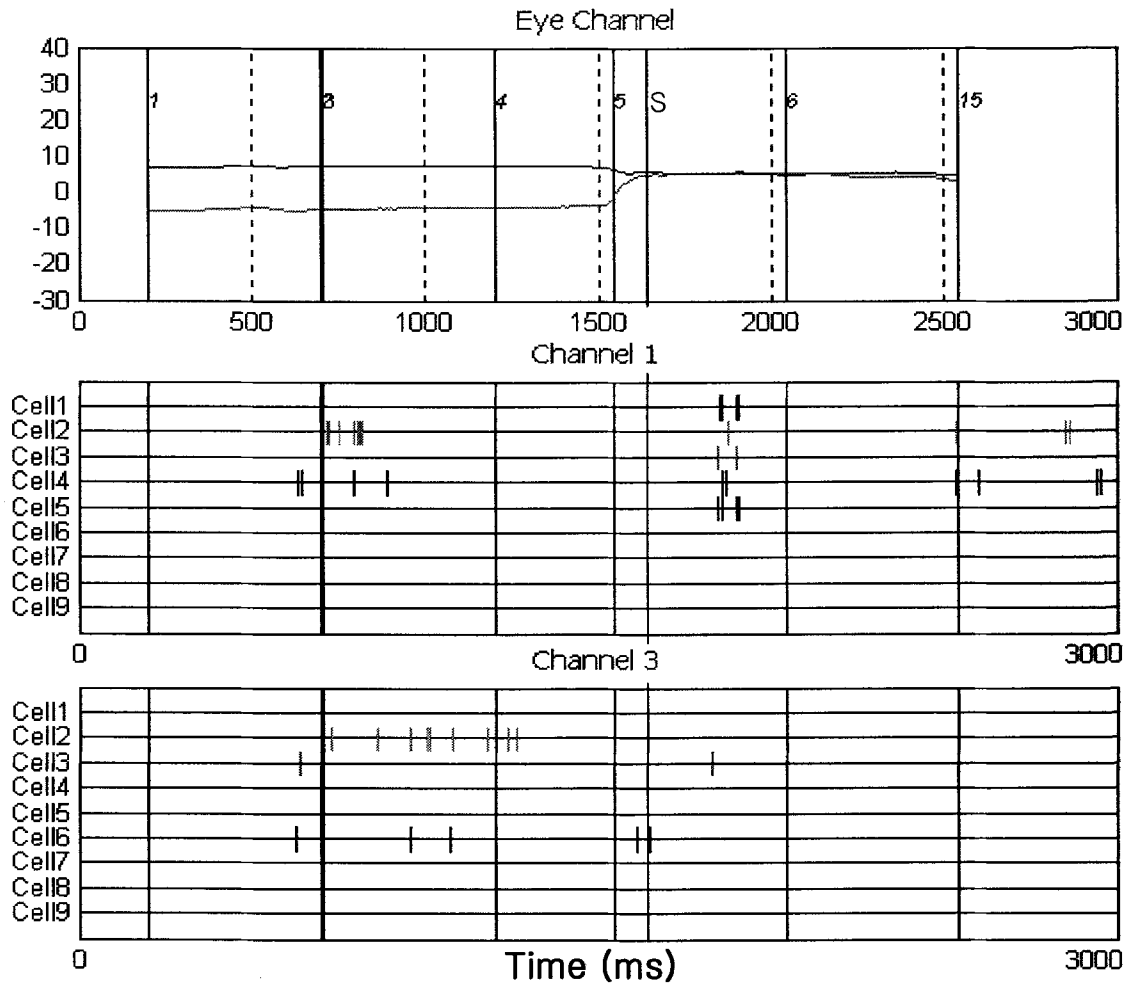
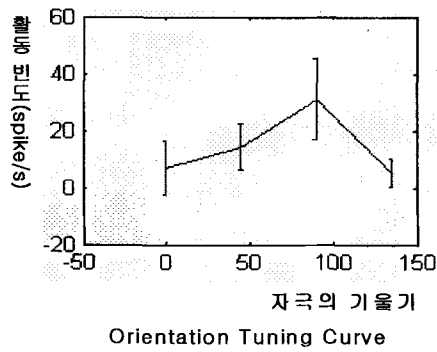


그림 6. 실험 조건에서 시각 피질 세포가 보이는 활동의 대표적인 예. 도약 안구 운동을 유도하기 위한 점 자극이 왼쪽 12도 지점에 제시됨으로써 오른쪽 방향으로 도약 안구 운동을 유도하였다. 가장 위의 그림은 실험 동물의 안구의 수평과 수직 위치를 표시한 것이다. 그리고 성공적으로 도약 안구 운동을 한 직후 자극을 제시하였을 때, 각 전극에서 채집된 세포의 활동을 표시한 것이다.

A.



B. 통제 조건 실험 조건 안구 운동 조건

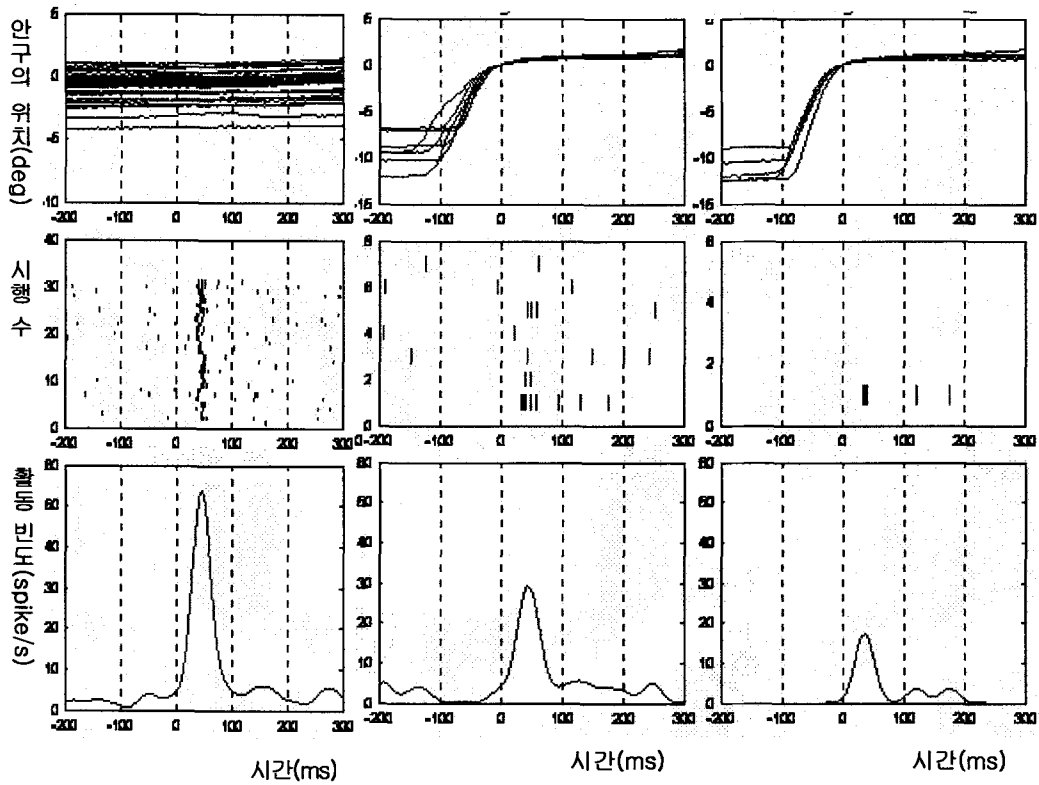
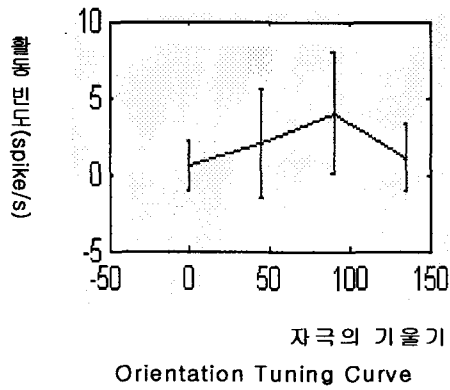


그림 7. 도약 안구 운동 직후 자극에 대한 반응이 감소한 세포의 예. A. 눈을 중앙에 고정된 상태에서 여러 기울기의 자극을 제시했을 때, 자극에 대한 평균적인 반응 크기와 편차를 표시한 것이다. 이 세포는 90도 기울기의 자극에 대하여 활발한 반응을 나타내었다. B. 각 조건에서 안구의 위치와 각 시행에서의 세포의 활동 전위, 그리고 각 조건에서의 평균적인 활동을 자극 제시 시점으로 밀도 함수로 표시한 것이다. 통제 조건에서는 활동 전위 밀도의 최대치는 47ms에서 53.6 spike/s이고, 실험 조건에서는 46ms에서 20.3 spike/s이다.

A.



B.

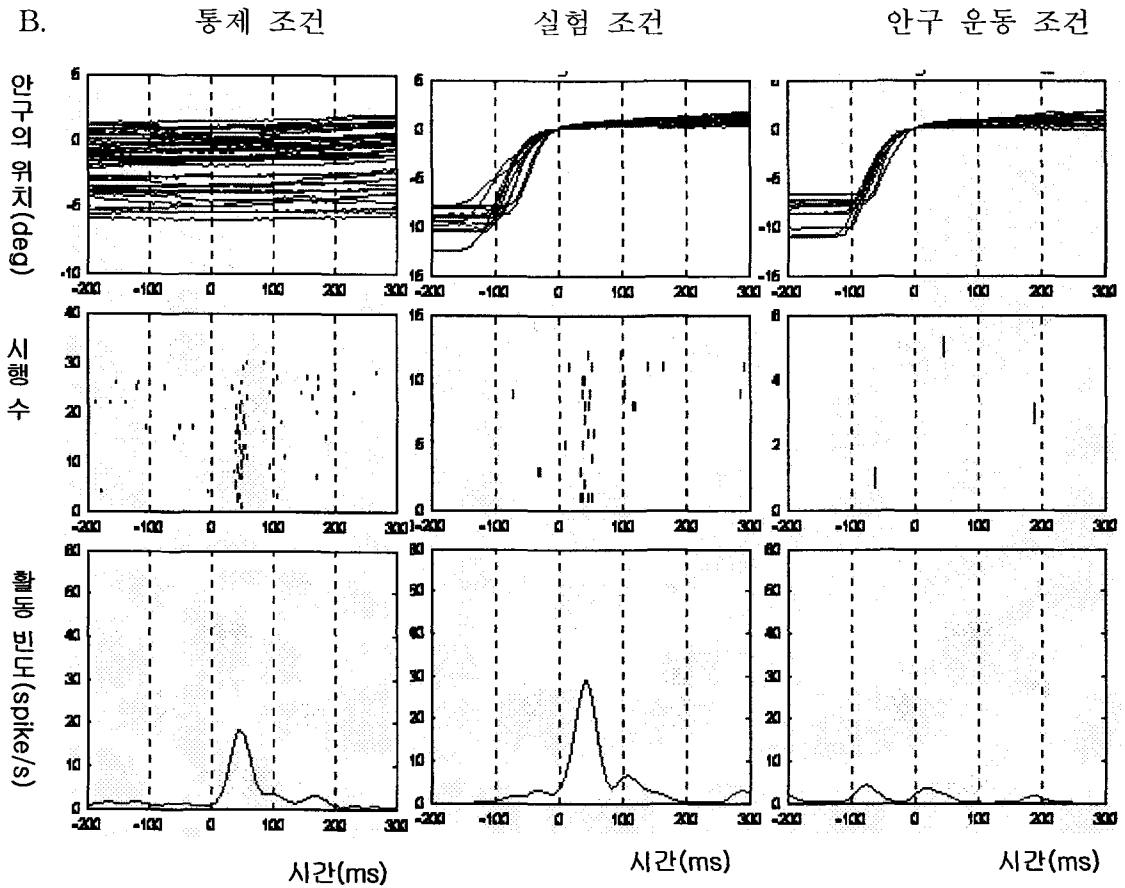


그림 8. 도약 안구 운동 직후 자극에 대한 반응이 증가한 세포의 예. A. 눈을 중앙에 고정된 상태에서 각 기울기의 자극에 대한 평균적인 활동과 표준편차를 나타낸 것이다. B. 각 조건에서 눈의 위치와 각 시행에서의 활동 전위, 평균적인 밀도 함수를 표시한 것이다. 이 세포는 통제 조건에서 활동 전위 밀도의 최대치는 49ms에서 18.3 spike/s이었고, 실험 조건에서는 44ms에서 28.7 spike/s였다.

이와는 다르게, 실험 조건에서 시각 자극에 대한 반응이 통제 조건에서 나타난 시각 반응보다 증가한 세포도 있었으며, 이러한 세포의 예가 그림 8에 제시되어 있다. 앞에서 제시한 세포와 마찬가지로 그림 8에 제시된 세포도 안구를 중앙에 고정하고 움직이지 않은 상태에서 4가지의 기울기 자극을 무선적으로 제시하였을 때, 수직 방향의 자극에 가장 활발한 반응을 보였다. 그러므로 각 조건에서 수직 방향의 자극을 제시하였다. 눈을 중앙에 고정한 상태에서 수직 방향에 대한 이 세포의 활동 빈도는 18.34 spike/sec였으며, 자극을 제시한 후 49ms에 활발한 반응이 나타났다. 그리고 실험 조건에서는 자극을 제시한 후 44ms에 28.766 spike/sec의 반응을 나타내었다. 이 세포는 비록 도약 안구 운동 이후 자극을 제시하지 않은 조건에서는 세포의 활동이 활발하게 나타나지 않았으나, 도약 안구 운동 직후 수직 방향의 자극을 제시하였을 때, 세포의 반응은 눈의 움직임이 없는 상태에서 자극을 제시하였을 때 반응보다 더 크게 나타나서 통제 조건에 비해서 도약 안구 운동 직후 자극을 제시하였을 때 세포의 반응이 156% 증가하였다. 이렇게 실험 조건에서 세포의 활동 빈도가 증가한 경우는 전체 분석 대상이 되는 세포들 중에서 29개가 그러했으며, 전체적으로 통제 조건에 비해 실험 조건에서 평균적으로 172% 활동이 증가하였다.

실험 조건에서 세포의 활동 정도가 통제 조건에서 보인 세포활동의 정도와 어느 정도 차이가 있는지를 알아보기 위하여 변화지표(change index)라는 지표를 사용하여 전체 세포에서의 조건간의 차이를 표시하였다. 분석 대상이 되는 전체 세포에 대하여 변화지표를 조사해 보면 그림 9와 같았다. 분석 결과, 앞에서 언급한 바와 같이 변화지표가 음의 값을 가지는 세포의 수가 양의 값을 가지는 세포의 수보다 많았다. 그러므로 분석 대상이 되는 전체 세포들 중에서 실험 조건에서 반응이 감소한 경우가 증가한 경우보다 더 많았음을 알 수 있다. 그런데 변화지표의 히스토그램을 보면 변화지표의 분포가 양수 값을 갖는 세포 집단과 음수 값을 갖는 세포 집단에서 각각 한 개의 최빈치를 갖는 분포(bimodal distribution)를 따르는 것이 아니라 변화지표가 0인 지점 근처에서 최빈치가 나타나고, 그 값을 중심으로 하는 하나의 분포(unimodal distribution)로 나타나 있다. 또한 변화지표가 음의 값을 가지는 세포들 가운데, 28개의 세포는 그 값이 -0.2보다 커서 감소한 정도가 크지 않아서, 전체적으로 음의 값을 갖는 세포와 양의 값을 갖는 세포의 분포 정도는 비슷하게 나타났다. 그러므로 전체적으로 볼 때, 도약 안구 운동 직후 제시된 자극에 대한 반응이 증가하는 세포 집단과 감소

하는 세포의 집단은 전혀 다른 모집단으로부터 나온 것이라고 할 수 없으며, 도약 안구 운동 신호가 시각 자극에 미치는 영향은 세포마다 다르지만, 하나의 분포를 갖는다고 생각할 수 있었다. 안구운동의 방향에 따라 활성화되는 정도가 다른 뉴런들이 발견되는 것을 볼 때 (그림 10), 안구운동의 영향이 세포에 따라 다양하게 작용하고 있음을 알 수 있었다.

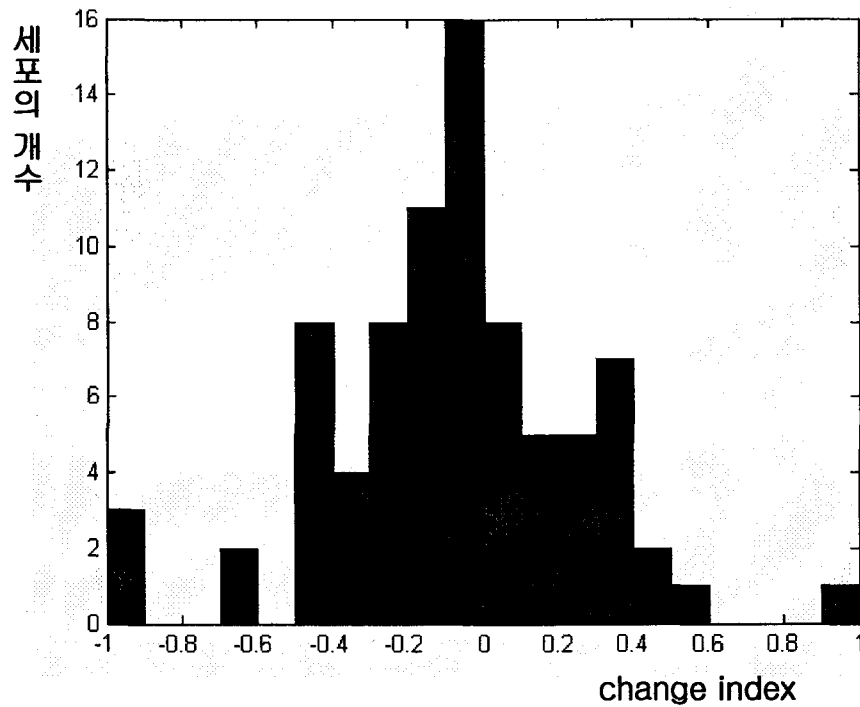


그림 9. 분석 대상이 되는 전체 세포의 변화지표(change index)의 분포. 실험 조건과 통제 조건에서의 자극에 대한 반응의 차이를 변화지표로 나타내어 히스토그램으로 표시한 것이다. 그래프에서 색이 다른 것은 다른 실험 동물로부터 나온 세포들을 표시한 것이다.

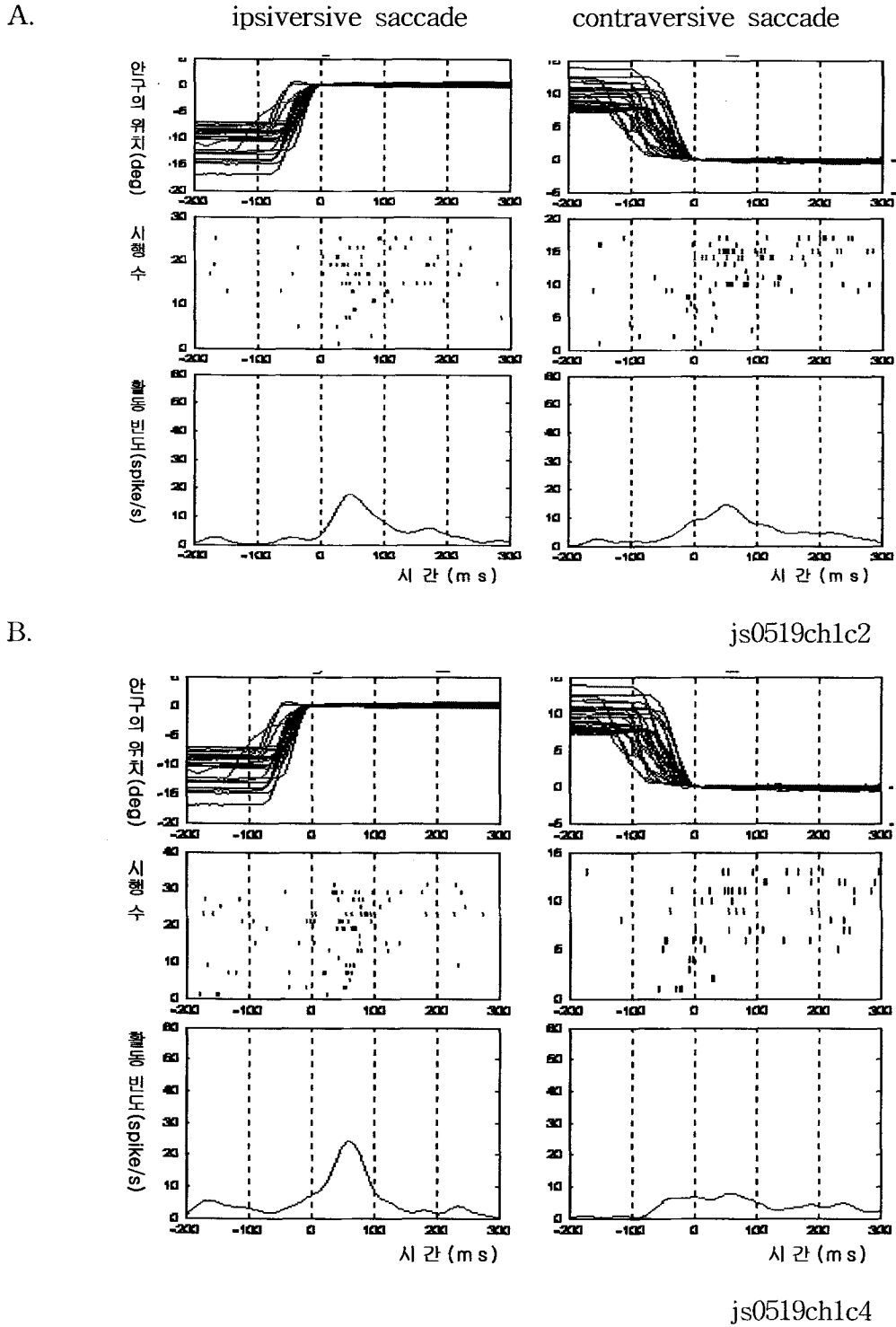


그림 10. 도약 안구 운동의 방향에 따른 도약 안구 운동 신호의 예. A. 두 방향에서 도약 안구 운동 신호의 차이를 보이지 않았던 세포의 활동을 보여주는 것이다. B. 두 방향에서 통계적으로 유의미하게 도약 안구 운동 신호의 차이가 나타났던 세포의 활동을 보여주는 것.

요약하면, 도약 안구 운동 직후 시각 자극을 제시하였을 때 시각 피질 세포의 반응을 안구를 중앙에 고정한 상태에서 같은 시각 자극을 제시하였을 때 나타나는 반응의 크기와 비교하였을 때, 반응의 정도가 증가한 세포도 있었고, 감소한 세포도 있었다. 전체 분석 대상이 되는 세포들 가운데, 실험 조건에서 반응이 증가하는 세포보다는 감소하는 세포가 약간 더 많았으나 반응이 감소한 정도가 크지 않은 세포들이 많아서 전체적으로 볼 때, 반응이 증가한 세포와 감소한 세포의 분포는 비슷한 양상으로 나타났다(그림 8). 이러한 결과로 미루어 볼 때, 도약 안구 운동과 관련된 신호가 일차 시각 피질로 입력되고, 그 신호는 시각 자극에 대한 정보를 처리함에 있어 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다.

도약 안구 운동과 관련한 세포의 활동은 이전의 연구(Park & Lee, 2000)에서 종료 후 63ms에 최대의 반응을 나타냈으며, 이러한 결과는 본 연구에서도 확인되었다. 또한 시각 반응도 자극이 제시되기 시작한 시점으로부터 평균 48ms에 최대의 반응을 나타내었다. 그러므로 도약 안구 운동과 관련된 정보는 시각 자극에 대하여 반응하는 시간과 비교하였을 때, 비슷한 시간 경로를 가지고 전달된다고 할 수 있다. 그러므로 도약 안구 운동 직후 자극을 제시하였다면, 도약 안구 운동 신호와 시각 자극에 대한 반응이 비슷한 시간에 나타날 것이므로, 두 신호는 시각 피질 세포 내에서 어떤 방식으로든 통합되어 시각 정보를 처리하는데 이용될 것이다. 만약 도약 안구 운동 신호가 시각 자극에 대한 반응에 직접적으로 영향을 미친다면, 세포내로 전달되는 도약 안구 운동 신호가 크면 클수록, 시각 자극에 대한 반응의 변화 정도가 더 커질 것이다. 연구 결과, 시각 피질 세포는 도약 안구 운동 직후에 제시된 자극에 대하여 그 반응이 통제 조건에 비하여 증가하거나 감소하였는데, 이러한 증가나 감소의 정도는 도약 안구 운동 신호의 크기와 직접적인 관련이 나타나지 않았다. 그러므로 도약 안구 운동 신호가 직접적으로 시각 반응에 영향을 미친다고 할 수 없다.

본 연구에서는 실험 조건과 통제 조건에서의 세포의 활동의 차이가 어떠한 변인과 연관되어 있는지를 알아보기 위하여, 여러 가지 다른 변인과 조건 간 활동의 차이를 비교, 분석하였다. 이러한 결과 중에서도 가장 두드러진 결과는 도약 안구 운동의 방향과 시각 피질 세포의 위치와의 관계에 따라 분류한 조건 간에 변화지표의 분포에서 차이를 보인 것이라고 할 수 있다. 이러한 결과는 도약 안구 운동 직후 시각 자극에 대한 반응이 변화하였을 때, 구체적으로 도약 안구 운동의 어떠한 변인과 연관되어 나타나는 것인지를 보여주는 것이다. 분석 결과, 도

약 안구 운동의 방향과 세포의 위치가 일치하는 경우에는 분석 대상이 되는 세포들 가운데 실험 조건에서 세포 활동이 감소하는 세포들이 많이 나타났고, 도약 안구 운동의 방향과 세포의 위치가 반대인 경우에는 실험 조건에서 세포 활동이 증가하는 세포들이 많이 나타났다. 이러한 결과는 상위 영역에서 도약 안구 운동 신호의 역할을 조사한 이전의 연구와 비교하여 생각할 수 있다. 이전의 연구(Moore, Tolia & Schiller, 1998; Moore & Armstrong, 2003)에서는 도약 안구 운동의 방향과 세포의 수용장의 위치와의 관계를 분석하여 도약 안구 운동의 방향이 세포의 수용장이 있는 방향일 경우, 자극에 대한 반응이 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 실험의 한계로 인해서 세포의 수용장을 조사하지는 않았으나, 이러한 결과와 연관시켜 본다면, 일반적으로 좌반구에 위치한 시각 피질 세포들은 시각장의 오른쪽에 위치한 자극에 대한 정보를 받게 되고, 우반구에 위치한 시각 피질 세포들은 시각장의 왼쪽에 위치한 자극에 대한 정보를 받는 것으로 알려져 있다. 그러므로 만약 우반구에 위치한 세포의 반응을 조사할 때, 오른쪽 방향으로 도약 안구 운동을 하였다면, 도약 안구 운동으로 인해서 왼쪽의 시각장(hemifield)으로부터 멀어지게 된다. 그리고 같은 세포에 대해 왼쪽 방향으로 도약 안구 운동을 하였다면, 결과적으로 왼쪽 시각장으로 향하게 되는 것이라고 할 수 있다. 그러므로 이전의 연구와 비교하여 생각해 봤을 때, 도약 안구 운동의 방향과 세포의 위치가 일치하는 경우에는 그 세포가 정보를 받는 시각장으로부터 멀어지는 것이므로 도약 안구 운동 직후 자극에 대한 반응이 감소하고, 반대인 경우에는 그 세포가 정보를 받는 시각장을 향하여 도약 안구 운동을 한 것이기 때문에 실험 조건에서의 반응이 증가한 것이라고 생각할 수 있다. 또한 상위 영역의 세포를 대상으로 한 이전의 연구와 비교하여 생각할 수 있는 것은 이전의 연구에서 보면 수용장 내부에 자극이 존재하지 않을 경우에는 도약 안구 운동의 방향에 따른 차이를 발견할 수 없었다는 점이다. 본 연구에서 이러한 방향에 따른 조절 지표의 차이가 방향에 따라 도약 안구 운동 신호의 크기가 차이가 나는 것이기 때문인지 알아본 결과, 방향에 따라 도약 안구 운동 신호의 크기가 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과는 상위 영역에서와 마찬가지로 도약 안구 운동을 한 직후에 자극을 제시하지 않았기 때문일 수 있다. 그러므로 일차 시각 피질에서도 역시 도약 안구 운동의 방향에 따라 이후에 제시되는 시각 피질 세포의 자극에 대한 활동에서 차이를 보이는 것은 자극이 제시된 상태에서만 나타나는 것이라고 할 수 있으며, 결국 도약 안구 운동 신호는 자극에 대한 반응을 조

절하는 역할을 하는 것이라고 생각할 수 있다.

마. 후속연구를 위한 제안

도약 안구 운동 신호가 일차 시각 피질 세포의 기울기 자극에 대한 반응을 증가시키거나 감소시킨다는 결과는 기울기 반응 곡선이 도약 안구 운동 신호에 따라 달라질 수 있는 가능성을 시사한다. 본 연구에서는 실험 동물에게 여러 기울기의 자극을 제시하지 못했기 때문에 기울기 반응 곡선이 이동하는지에 대해서는 알아볼 수 없었다. 그러나 이전의 연구들(Gilbert & Wiesel, 1989; Dragio, Sharma, Miller & Sur, 2002)에 의하면, 시각 피질 세포의 기울기 반응 곡선은 여러 요인들, 예를 들면 수용장 주변에 위치한 자극의 기울기나 혹은 자극이 제시되기 이전에 수용장에 존재하는 자극의 기울기 등에 의하여 역동적으로 변화하였다. 그러므로 도약 안구 운동 신호가 기울기 반응 곡선에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보는 것은 필요할 것이다. 자극에 대한 반응이 도약 안구 운동 직후에 변화하였을 때, 그 세포가 자극의 기울기와는 상관없이 다양한 자극에 대하여 일관적으로 감소시키거나 증가시켜서 전체적으로 반응의 정도가 변화할 뿐 기울기 반응 곡선에 대해서는 영향을 미치는 않을 수도 있다. 그러나 다른 한편으로는 자극의 기울기에 따라 도약 안구 운동 신호가 영향을 미치는 정도가 달라져서 기울기 반응 곡선이 변화할 가능성도 배제할 수 없다. 일차 시각 피질은 아니지만, 이전의 연구(Moore, Tolia & Schiller, 1998)를 보면, 상위 영역의 세포들은 도약 안구 운동 신호에 의해 기울기 반응 곡선이 5도 정도 이동한 것으로 나타났다. 그러므로 여러 기울기의 자극을 도약 안구 운동 직후 제시하여 도약 안구 운동에 따라 기울기 반응 곡선이 어떻게 변화하는지를 살펴보는 것이 필요할 것이다.

그리고 도약 안구 운동 직후 시각 자극에 대한 반응이 변화하는 것은 도약 안구 운동과 관련한 신호에 의해서 나타난 것일 수도 있으나 도약 안구 운동에 의해서 다른 변인이 변화하여 일어나는 것일 수도 있다. 이전의 연구들(Moore & Armstrong, 2002; Tolia, Moore, Smirnakie, Tehovnik, Siapas, & Schiller, 2001)에서 도약 안구 운동과 관련한 세포의 활동보다는 눈을 움직임으로 인해서 일어나는 주의의 이동이나, 수용장의 변화에 의해서 세포의 반응이 달라지는 결과가 제시되었다. 그러므로 일차 시각 피질 세포의 반응의 변화가 도약

안구 운동 신호에 의한 것인지를 확인하기 위해서 세포의 수용장을 알아보고, 수용장의 위치가 변화하는지를 조사해 볼 필요가 있다. 즉, 안구를 중앙에 고정된 상태에서 화면의 여러 부분에 자극을 제시하였는데, 도약 안구 운동 이후에 수용장의 위치가 변화하는지를 알아보는 것이 필요하다.

2. 운동지각에 미치는 도약안구운동의 영향

가. 연구 방법

시자극의 운동 방향과 속도를 원래대로 복원하기 위해서는 망막 신호와 안구운동 신호를 통합하는 것이 필수적으로 요구된다 (그림 1).

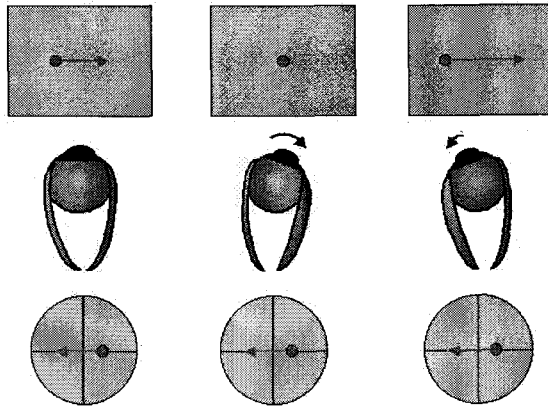


그림 1. 망막 영상운동의 불충분성. 위의 사각형은 시야를 나타내고 아래 원은 망막을 표시. 왼편의 장면에서 우로 이동하는 자극을 정지하고 있는 눈이 볼 때, 좌로 이동하는 망막영상이 발생. 이와 동일한 망막 영상은 가운데 그림처럼 정지하는 물체를 운동하는 눈이 볼 때도 마찬가지로 발생하며 혹은 오른편의 그림과 같이 자극의 운동과 안구의 운동이 적절히 조합될 때도 발생. 망막의 영상운동은 물체의 운동에 대해 신뢰로운 정보를 제공하지 못하여 물체의 운동을 복원하기 위해서는 망막 정보에 추가하여 안구운동의 정보가 동시에 필요함. 인간은 이 세 경우를 구별하는데 전혀 어려움을 느끼지 않는다.

그림 1의 내용은 안구운동의 신호가 시각계에 유입됨을 나타낸다. 본 연구는 인간을 대상으로 일련의 정신물리적 실험을 수행하여 안구운동의 실행이 시각운동의 방향 지각을 조절하는 방식을 연구하였다. 좀 더 구체적으로 시운동 자극의 제시 시기가 도약 운동의 종료 시기에 결부되는 운동 지각 과제를 사용하여 다

양한 벡터의 도약 안구 운동을 유발하고, 도약 운동의 종료 시기로부터 다양한 지연 후에 시운동 자극을 제시함으로써 선행 안구 운동의 벡터와 운동 종료로부터의 지연 시간에 따라 시운동 자극에 대한 인간 피험자의 운동 방향 지각이 조절되는 방식을 평가하려는 것이었다. 이 연구의 결과는 이미 출판되었기 때문에 여기서는 주요 내용만을 간략히 정리하였다.

실험의 방법은 다음과 같았다. 시자극의 제시는 표적 자극과 적색 레이저 빔의 위치를 적교하는 두 개의 거울로 제어하면서 후방 투사 스크린에 비추었다. 스크린의 크기는 2×2m이었으며 피험자의 안구로부터의 거리는 115cm였다. 스크린에 투사된 레이저 표적 자극의 크기는 직경이 4mm이었고 시각 0.2도를 차지하였다. 이 빛 자극은 도약안구운동(saccade)의 표적으로 사용되었고, 또, 시각운동 자극으로도 사용되었다. 시운동 자극은 800 deg/s의 속도로 시각 10도를 움직였다. 본 연구에서는 안구 운동 종료 후 0~100ms의 지연 후에 시운동 자극을 45~135 도의 방향으로 제시하였다.

피험자의 반응, 즉 지각된 운동 방향에 대한 보고는 다음과 같다. 시운동 자극 제시 후 스크린에 고속으로 왕복 운동하는 레이저 빔으로 구성되는 레이저 선분을 제시하고, 참가자는 반응 선택용 조그/셔틀 스위치를 조절하여 주관적으로 지각한 운동 방향과 일치하도록 제시된 레이저 선분의 각도를 변화시킨다. 이 운동 자극의 제시 시점을 on-line으로 탐지된 안구 운동의 종료 시점에 의하여 결정되도록 프로그램을 구성하였다.

전체 실험은 시선을 고정된 상황에서 시자극이 제시되는 시선 고정 조건과 시야 외곽(좌/우 15도)에서 중앙(0도)으로의 도약 안구 운동을 일으킨 후 시자극이 제시되는 도약 안구 운동 조건으로 구성되었다. 시행의 시작을 알리는 500ms의 부저소리가 종료함과 동시에 좌우 15도 중의 하나에 위치를 알리는 외곽 도약 표적이 제시되고 안구의 위치가 이 지점을 통과하는 시간으로부터 700~1200ms 후에 외곽 도약 표적이 꺼지고 동시에 중앙 도약 표적이 50ms 동안 짧게 점멸하였다. 피험자는 가능한한 빠르고 정확하게 중앙 표적에 제시되었던 위치로 도약 안구 운동을 하도록 지시 받았으며, 안구 위치가 중앙 표적 주변을 통과하는 시점에서 일정 시간 이후에 시운동 자극이 제시되었다. 시자극이 제시된 후 1.5초 후에 시자극이 움직인 크기와 같은 시각 10도 길이의 레이저 선분이 무선적인 각도로 제시되고 피험자는 조그/셔틀 스위치를 조절하여 반응을 보고하였다. 시선 고정 조건에서는 시행의 시작과 동시에 중앙(0도)에 레이저 표적 점이 제시되

고 피험자가 일정 시간 이 표적 점에 고정하면, 이 점이 시선 이동 조건에서와 마찬가지로 방식으로 움직였다. 시 자극의 운동 방향을 45도에서 5도 간격으로 135도까지 모두 19방향 중 각 시행마다 무선적으로 결정되었다. 피험자의 반응, 즉 지각된 운동 방향에 대한 보고는 자극의 이동 방향과 비교하여 운동 지각의 오류를 계산하였다.

나. 연구 결과

- (1) 실험 조건에서 운동지각역(threshold for motion perception)은 대개 200~250deg/s이었다. 시운동 자극의 속도를 1000, 250, 200, 150 deg/s으로 조절하여 target의 motion을 보고하도록 하였다. 250deg/s에서는 4명의 참가자들이 각각 시행의 63%, 57%, 71%, 54%에서 motion을 지각하고 200deg/s에서는 90%, 79%, 70%, 71%가 motion을 지각함으로써 이 자극에서 운동지각역은 200~250deg/s로 결론을 내렸다.
- (2) 운동지각역 위에 있는 1000deg/s의 자극 운동 속도의 경우에도 자극이 응시점에서 출발하면 강한 운동감을 느끼게 하였다. 이 현상은 Hikosaka 등 (Hikosaka et al., 1993)에 의해 처음으로 보고되고 이후 반복적으로 검증된 'line-motion 효과'와 흡사하였다.
- (3) 도약안구운동의 직후에 제시된 시각운동은 그 방향이 안구운동의 반대 방향으로 왜곡되어 지각되었다 즉, 왼쪽에서 오른쪽으로 시선 이동한 이후에는 시각 자극의 운동 방향을 시선이 실제보다 왼쪽 방향으로 움직인 것으로 오지각하였으며, 오른쪽에서 왼쪽으로 시선을 이동한 경우에는 보다 오른쪽으로 움직인 것으로 오지각하였다. 이러한 효과는 도약 안구 운동의 방향에 따라 전체 자료를 평균하였을 때 모든 피험자에 대해 일관성있게 관찰되었다(그림 2).
- (4) 이 왜곡은 안구운동의 직후에 가장 컸으며, 약 25ms의 시간상수로서 이후 100ms에 걸쳐 감소하였다 이러한 효과는 안구 운동의 방향과 관계없이 모든 방향의 도약 안구 운동에 대해 나타났다. SOD가 커짐에 따라 지각 오차의 크기가 지수 함수로 감소하였으며, 한 개의 시간 상수가 가지는 지수 함수로

최적화 하였을 때, 시간 상수는 대개 20~40ms 정도였다(그림 3). 따라서 시각계로 입력되는 안구 운동 신호는 도약 안구 운동 종료 후 100ms 이내의 기간에 걸쳐 운동 지각에 영향을 미치는 것으로 여겨진다.

- (5) 안구운동의 효과는 실제 운동이건 착시에 의한 운동이건 관계없이 관찰되었다. 실험 상황에서 실험 실 내부는 도약 운동을 유도하는 표적 자극과 시운동 자극을 제외하고는 일체의 시자극이 없는 암흑 상태로 유지되었다. 이러한 상황에서 순간적으로 제시된 시운동 자극의 잔상이 특정한 각도의 선분으로 남아 안구의 운동 방향에 따라 움직이는 잔상 운동 착시가 발생할 수 있다. 그러나 잔상 운동이 발생하더라도 그것은 잔상 전체의 직선적 운동의 형태로 나타날 것이며, 잔상의 각도가 변화되리라고 기대할 수 없다. 그러므로 잔상 운동 착시도 본 실험에서 관찰된 운동 방향 지각의 왜곡을 설명할 수 없다.
- (6) 이 효과는 도약운동에 따른 말초적 원인(Deubel & Bridgeman(1995)가 보고한 렌즈의 순간적 운동, Lee et al.(2000)이 보고한 안구의 비틀림, Collewij et al.(1988)이 보고한 수렴각의 변화 등)에 의한 것이 아니라, 안구 운동의 발생을 신호하는 중추적 원인에 의한 것으로 보였다. Straumann, Zee, Solomon, Lasker와 Roberts (1995)는 도약 안구 운동 직후에 일시적인 비틀림 안구 운동이 발생함을 보고하였다. 이러한 비틀림 운동이 사라지는 시간 상수는 본 연구에서 관찰된 것보다 크며, 비틀림 크기도 최대 1-2도에 불과하여 본 연구에서 관찰된 것의 크기 (5도)와 비교되지 않는다. 따라서 본 연구에서 관찰된 운동 방향 지각 왜곡 현상이 안구 운동의 기계적 영향에 의해 발생하는 효과가 아니라고 말할 수 있다.
- (7) 운동 자극의 제시 시간 동안 eye drift 또는 corrective saccade의 효과와 convergence velocity의 효과는 유의미하지 않다. 대표적인 피험자로부터 무선적으로 추출한 단일 session에서 대부분 eye drift 속도는 30deg/s보다 작다. eye drift의 결과로 지각 오류는 drift velocity에 따라 증가한다. 그러나 지각적 오류와 eye drift velocity 사이에는 어떤 관계도 없었다. 또한 두 눈 간의 velocity profile의 차이가 판단 오차의 방향과 크기에 공헌하는지 알아보기 위해 최대 vergence velocity를 계산하였다. 두 명의 대표적인 피험자에서 vergence velocity는 drift velocity보다 작고 두 눈 사이의 비대칭적인 vergence velocity는 무시할 만하다. 따라서 비대칭적인 vergence velocity는 지각 오류에 아무런 영향을 미치지 못한다.

- (8) 안구운동의 발생에 따른 운동지각의 조절과 관련한 중추적 원인은, 형태지각, 주의, 기억 과정의 개입 가능성이 있었다.
- (9) 운동지각의 오류를 분석한 결과는, 운동 지각에 미치는 안구운동의 효과가 운동벡터의 평균을 계산하는 과정에 안구운동 벡터가 더해져서 발생하는 것이 아니라, 시각 운동의 지각에 기여하는 형태지각 과정(Geisler, 1999)에 의해서 발생함을 시사하였다. 안구 운동 신호는 공간 위치 지각에서와 마찬가지로 운동 지각에 대해서도 정확한 지각을 촉진하기 보다는 시지각을 왜곡시키는 영향을 미쳤다. 그러나 도약 안구 운동에 대한 운동 지각의 운동 왜곡 방식은 공간 지각에서와는 다른 방식으로 발생하였다. 공간 위치화와 관련한 연구들은, 도약 안구 운동의 개시 전에 제시된 시자극의 위치는 안구 운동의 방향으로 편향되고, 도약 안구 운동의 종료 이후에는 안구 운동의 반대 방향으로 편향시킴을 보고하였다(Martin & Pearce, 1965; Martin, Martin & Pola, 1969; Martin & Pola, 1970; Honda, 1990; Honda, 1991; Cai, Pouget, Schlag-Rey & Schlag, 1997). 시운동 자극을 시간에 걸쳐 제시되는 일련의 점 자극으로 가정할 수 있을 것이다. 도약 안구 운동의 방향이 왼쪽에서 오른쪽으로 진행되었고, 시운동 자극의 방향은 수직이라고 하면, 시운동 자극의 시작 지점 즉 가장 아래쪽에 제시된 점 자극은 도약 안구 운동과 시간적으로 가장 가깝기 때문에 안구 운동과 반대 방향으로 가장 많이 편향될 것이고, 이런 방식으로 수직으로 움직인 자극의 위쪽으로 갈수록 편향이 감소되어 결국 운동 방향은 오른쪽으로 왜곡되어야 할 것이다. 그러나 연구 결과는 그 반대인 왼쪽으로 왜곡되었다. 따라서 도약 안구 운동 신호가 운동 지각에 영향을 미치는 방식은 공간 위치 지각에서와 다르다고 말할 수 있으며, 느린 안구 위치 신호의 입력에 의해서 설명될 수 없다.

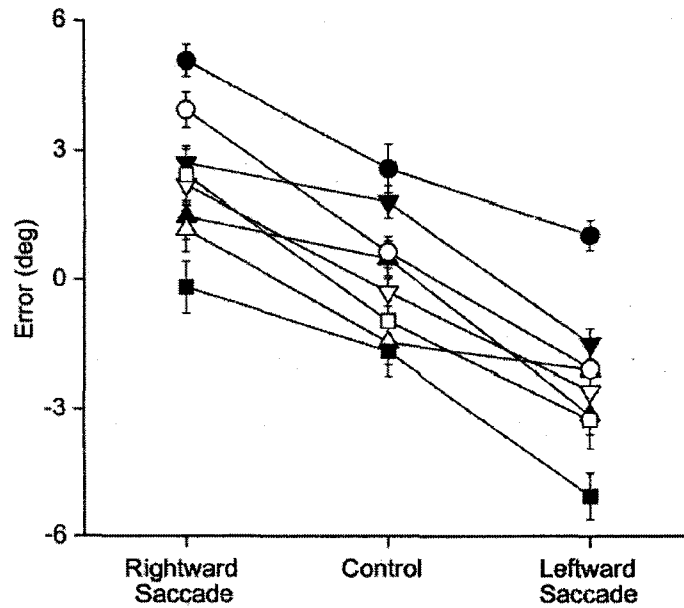


그림 2. 도약안구운동의 실행에 따른 운동지각의 오류. 심볼은 실험에 참가한 7명의 결과를 각각 나타낸다. Control은 안구운동이 발생하지 않은 상태에서 스크린의 중앙을 응시하는 동안 제시되는 운동자극의 방향을 판단하는 경우, 우측, 좌측 방향의 도약안구운동 조건은 좌측, 혹은 우측에서 시작하여 스크린의 중앙을 향해서 도약안구운동을 실행하고 난 직후에 제시되는 동일한 운동자극에 대해서 운동의 방향을 판단한 오류. 도약안구운동의 실행 직후에 오류가 커지며 도약안구운동의 방향에 따라서 오류의 방향도 체계적으로 달라짐을 볼 수 있다.

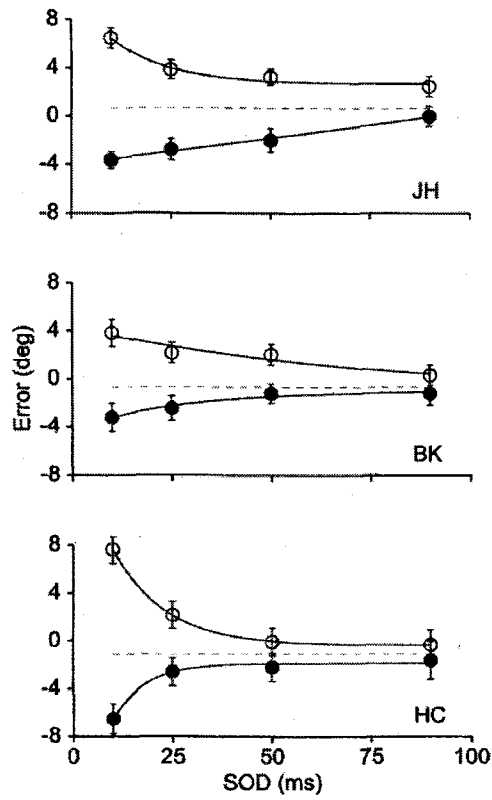


그림 3. 운동지각 오류의 시간 경과. 시각운동의 방향을 판단하는 오류는 도약안구운동의 종료시점 (SOD=0) 부근에 제시되는 운동자극에 대해서 가장 크며, 나중에 제시될 수록 오류가 감소하여 100ms 정도 지나면 안구운동이 운동지각을 왜곡하는 영향은 거의 소멸한다. 이 효과는 지수적 감소를 보이며 시간상수는 약 25ms이었다.

다. 결론

이 결과는, 도약안구운동이 실행될 때, 시각계의 처리 기능이 역동적으로 조절되고 있음을 나타내며, 또한 시각운동 기전에 의해서 형태지각이 가능한 것처럼, 그 역으로 형태지각 기전에 의해서 시각운동의 지각이 조절될 수 있음을 보여준다. 얻어진 결과는 그 동안 보고되었던 안구운동 실행시 시공간의 위치 왜곡(Honda,1989; 혹은 이 현상에 관한 개관으로서 Ross et al., 2001)과는 다른 기전을 통해 시각운동의 지각이 왜곡됨을 발견하였다.

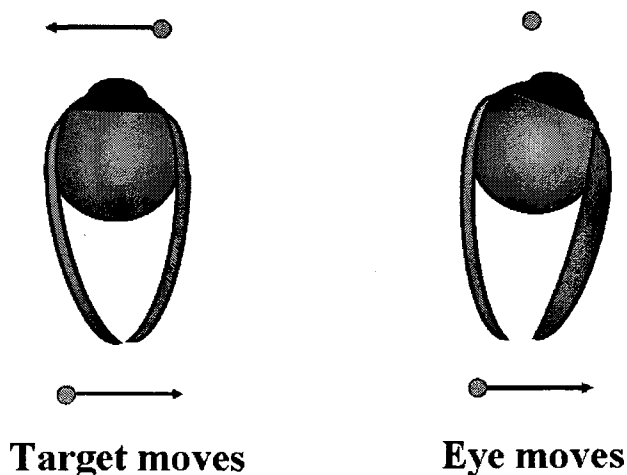
3. 운동지각을 위한 안구운동신호의 통합에서의 주의의 역할

가. 개요

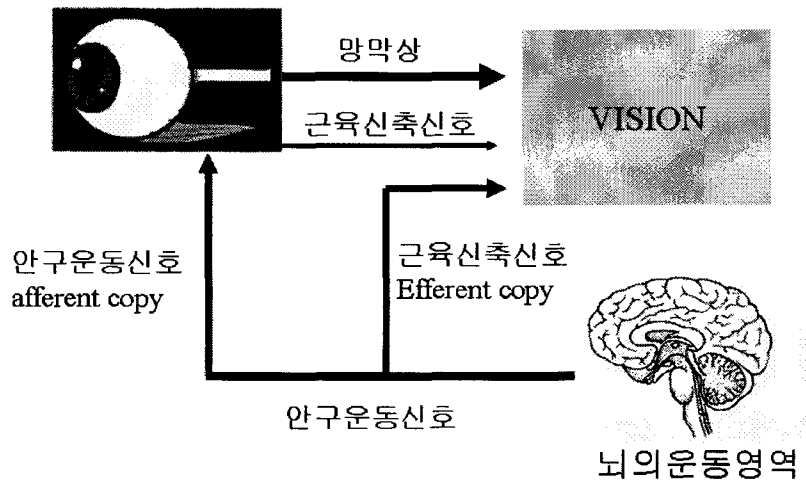
시각운동의 지각을 위한 안구운동 신호의 통합 과정에서 주의의 역할을 실험적으로 검토하였다. 주의의 정도를 조작한 실험 조건에 따라 안구운동의 신호가 통합되는 정도가 변하였다. 본 연구에서 얻어진 결과들은, 시각 운동의 지각에 있어서 주의 과정이 안구운동 신호의 통합을 조절하고 있음을 시사한다.

나. 연구 배경

헬름홀츠 이래로, 물체 운동의 방향과 속도를 복원하기 위해서는 망막의 영상 운동과 안구의 운동신호를 통합하는 것이 필요 충분 조건인 것으로 가정되어 왔다. 또한, 안구 운동의 신호가 운동 지각에 통합되고 있음을 보이는 실험적 결과들이 있다(Park, J., Lee, J., & Lee, C, 2001). 그러나, Filehne illusion(눈이 연속적으로 움직이고 있을 때 정지하고 있는 대상이 눈 움직임의 반대 방향으로 운동하는 것처럼 지각) 등의 지각 현상이 시사하듯이 안구의 운동 신호가 통합되는 정도가 모든 상황에서 일정하지 않은 듯이 보인다. 본 연구는, 추적안구운동을 하고 있는 상황에서 제시된 시각 자극의 운동 방향을 판단하는 과제에서 주의의 역할을 실험적으로 평가한 것이다.



위와 같은 두 가지 상황에서, 눈이 고정되고 물체가 이동하는 경우(좌측), 물체가 고정되고 눈이 움직이는 경우(우측)에서 맺히는 망막상은 동일하지만 우리는 눈의 운동여부를 스스로 알기 때문에 눈이 움직이는 것과 물체가 움직이는 것을 혼동하지 않는다. 이는 안구의 운동정보가 운동지각에 통합되기 때문이라고 생각된다.



지각을 일으키는데 통합되는 망막상과 안구운동신호의 모식도.

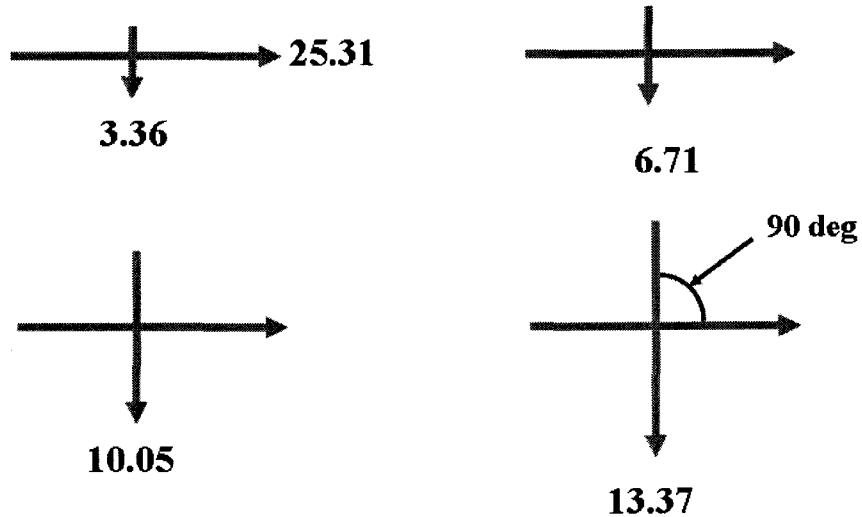
추적안구운동을 할 경우, 추적하고 있는 대상은 항상 망막의 중앙에 고정됨에도 불구하고 안구운동정보를 활용함으로써 이동중이라는 것을 지각하지만, 제 2의 움직이는 대상이 나타날 경우에는 거의 망막상에 나타나는 그대로를 운동방향으로 지각하는 왜곡이 일어난다. 즉, 추적하고 있는 대상에 대해서는 안구운동 신호가 통합되어 운동을 지각하지만, 그렇지 않은 대상에 대해서는 안구운동 신호가 통합되지 않은 채 운동지각이 발생하는 것 같다. 이러한 현상을 고찰하기 위하여 다음과 같이 실험하였다.

나. 연구 방법

정상 시각을 가진 자원자들이 24" 평면 모니터(100Hz)에 제시된 자극의 운동 방향을 판단하였다. 모니터에 제시된 두 개의 운동 자극 가운데 하나는 추적 자극으로서, 피험자가 이를 눈으로 추적하게 하였으며, 이 과정에서 두번째의 운동 자극이 제시되었다. 피험자의 과제는 이 두번째 자극의 운동 방향을 보고하는 것이었는데, 자극 제시가 종료된 후 모니터에 제시되는 선분의 방향을, 지각된 자극의 운동 방향과 일치하게 회전시키도록 지시하였다.

(1) 실험 1

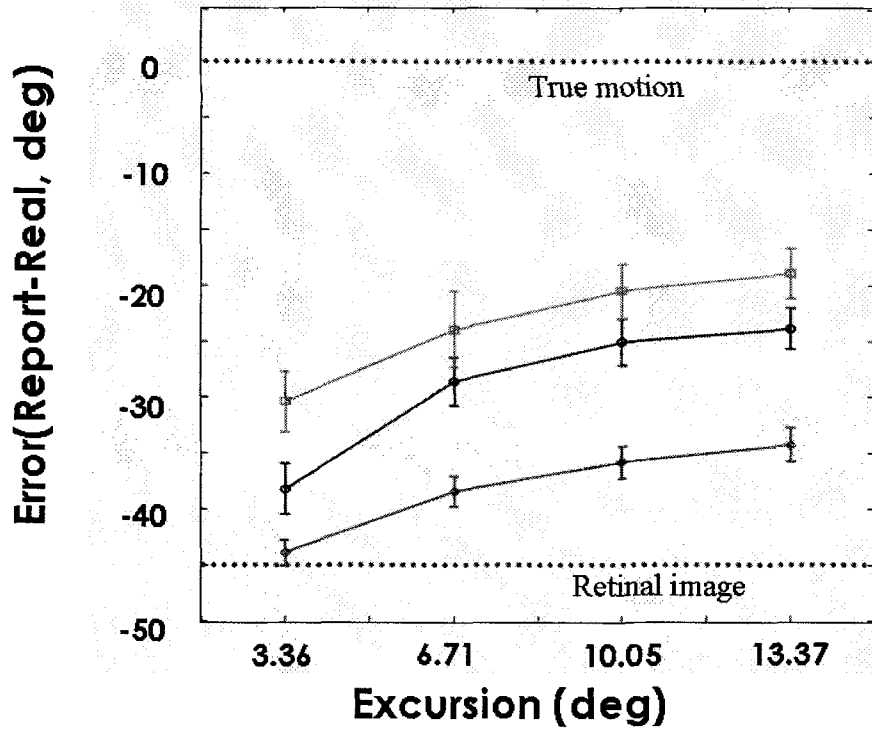
(가) excursion 에 의한 왜곡의 차이



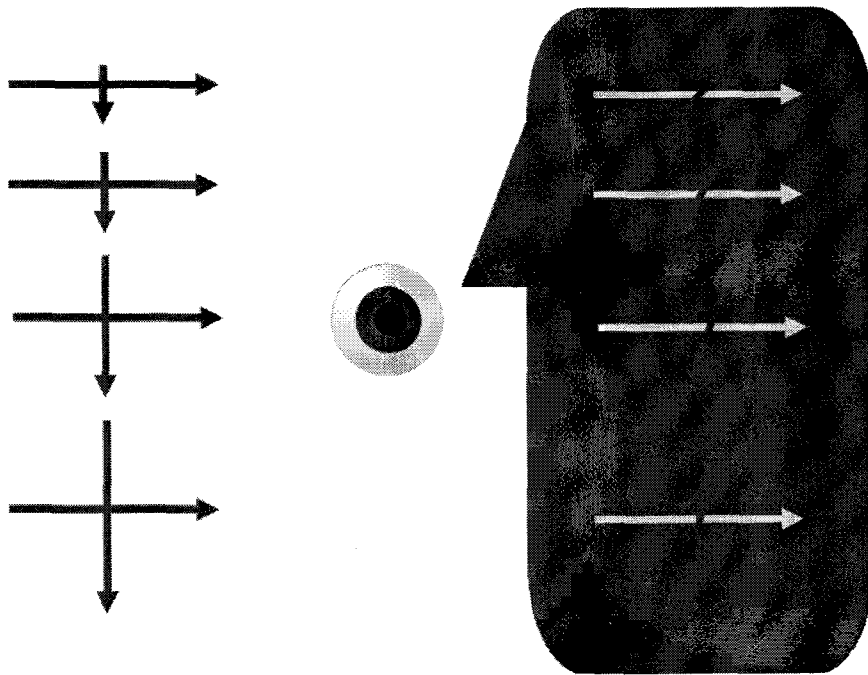
Excursion에 의한 운동 지각의 왜곡을 보기 위한 네 가지 조건

피험자는 우측으로 움직이는 물체(P-target)를 추적하고(푸른선 방향), 낙하자극(T-target)은 일정한 각도범위 내에서(90도를 중심으로) 각도를 달리 하며 낙하한다. 이들 두 물체는 중앙에서 교차하게 된다. 이 때 피험자는 낙하자극의 운동방향을 보고하게 된다. 낙하자극은 그 낙하길이(Excursion)에 따라 3.36도, 6.71도, 10.05도, 13.37도로 주어졌으며, 모든 경우에 움직이는 물체들의 이동속도는 동일(25도/초)하였다.

(나) 실험 1의 결과



낙하자극의 Excursion 차이에 따른 운동 지각의 왜곡의 변화. 가로축은 Excursion을, 세로축은 피험자가 지각한 운동방향과 실제 운동방향의 차이, 즉 왜곡의 정도를 나타낸다. 만약 전혀 왜곡하지 않았다면 에러는 0이 될 것이며(위쪽의 점선, true motion), 완전히 망막상에 나타나는 대로 지각하였다면 에러는 약 45도가 될 것이다(아래쪽 점선 Retinal image). 실제 왜곡은 이들의 중간 정도로 나타나며, excursion이 클수록 - 낙하자극의 낙하거리가 길수록 - 왜곡은 보다 줄어들음을 보인다. 세 개의 선은 각각 세 명의 피험자를 표시한다.

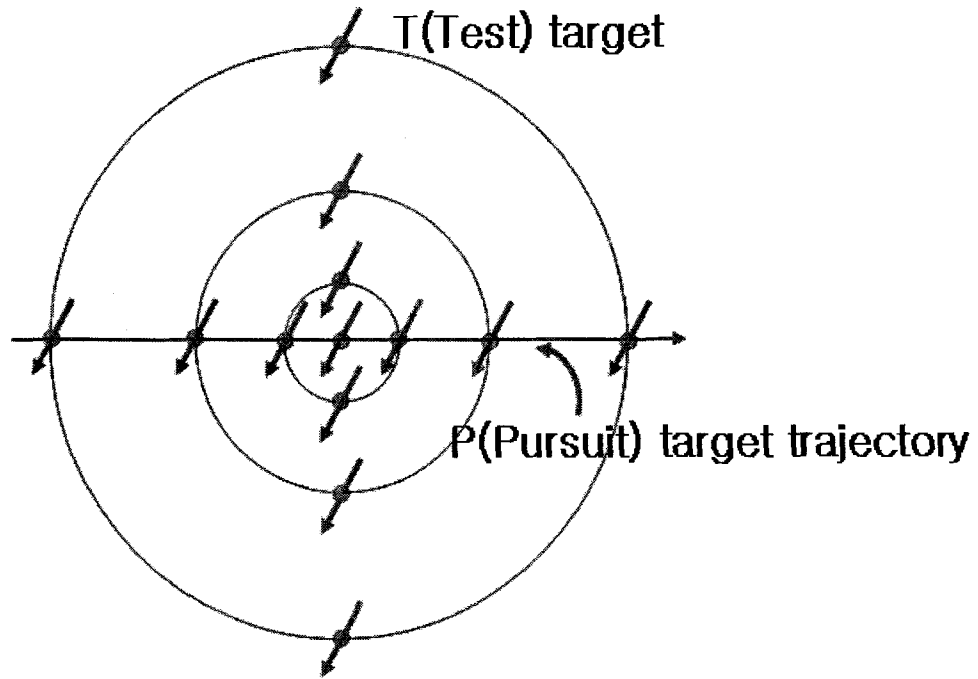


excursion에 의한 운동지각 왜곡의 개념도. excursion이 크면 클수록, 피험자는 낙하자극의 운동방향을 덜 왜곡하여 인지한다.

이러한 결과는 지각 왜곡의 현상이 전체시야에서 균일하게 나타나지 않고, 망막의 중심부에서 더 크게 일어나고 있음을 시사한다. 그러나 excursion을 크게 했을 경우에, 이와 같은 결과가 망막의 위치에 관련한 것인지, 혹은 자극전체의 이동 크기에 관련한 것인지, 혹은 자극의 제시시간(길게 낙하한 경우에는 제시시간이 비례하여 길어진다.)에 관련한 것인지 판단하기 어렵게 된다.

(2) 실험 2

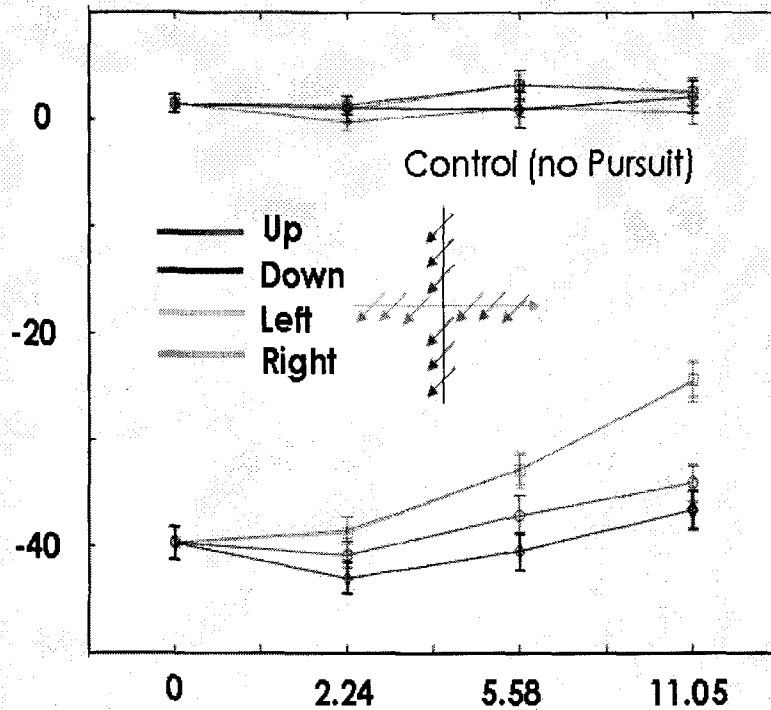
(가) spatial locus에 의한 운동지각 왜곡의 경향



실험2(spatial locus)에 의한 운동지각 왜곡의 정도를 보기 위한 자극.

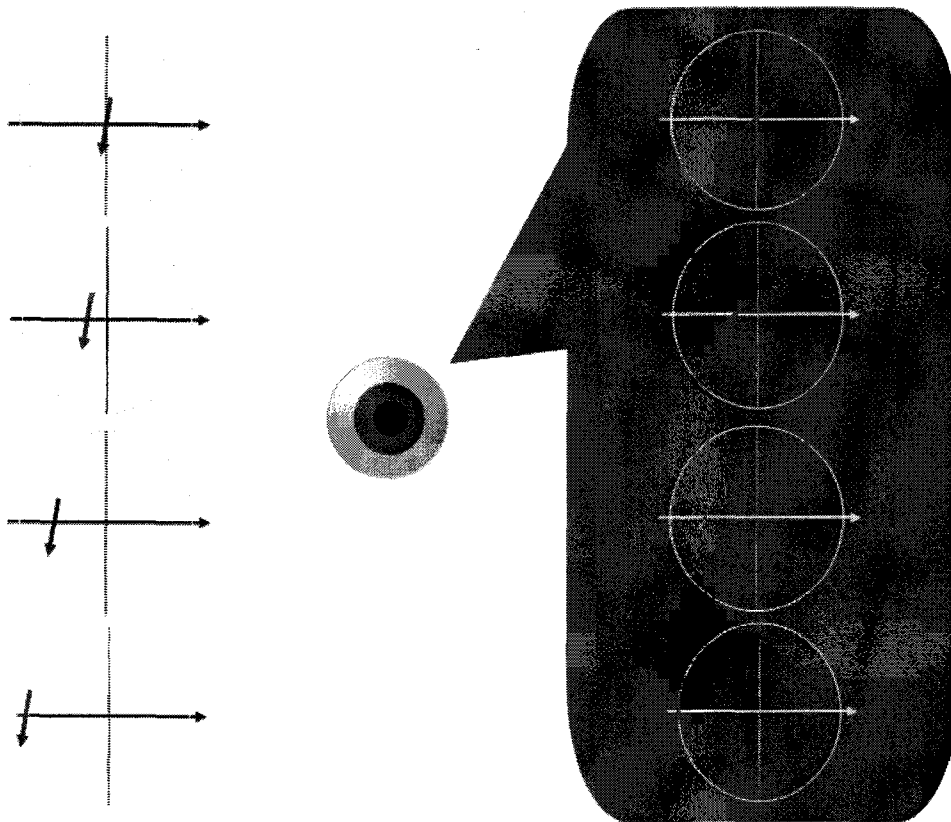
피험자는 P-target을 추적하고(푸른 화살표), 낙하자극(T-target)은 다양한 위치에서 일정한 속도와 excursion을 가지고 낙하한다. 모든 낙하자극은 P-target이 중앙을 통과할 즈음에 제시되며, 그 위치는 상하좌우 네 방향으로 중심으로부터 2.24도, 5.58도, 11.05도의 13방향(중앙포함) 중 한 곳이 된다. 실험에서 푸른색 동심원은 표시되지 않는다.

(나) 실험 2의 결과

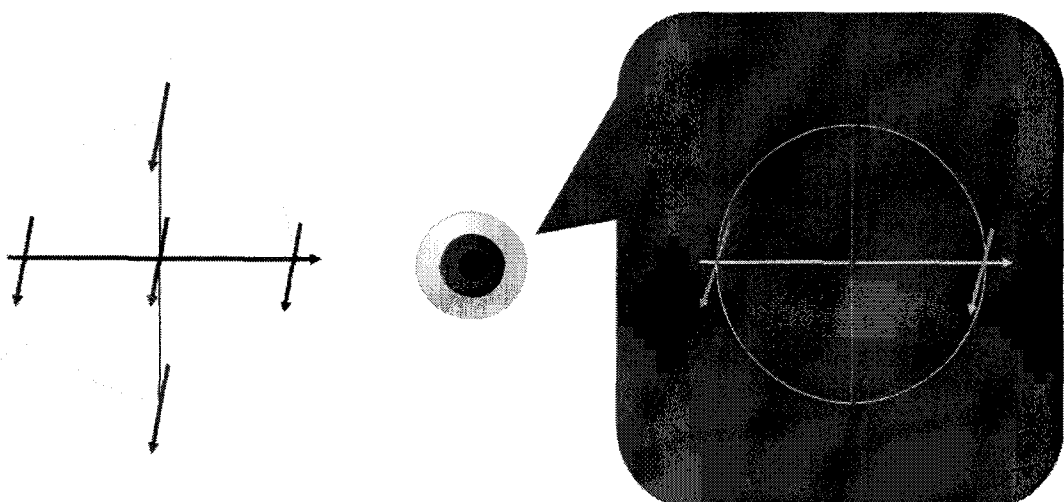


spatial locus에 의한 운동지각의 왜곡의 정도를 보인 결과

가로축은 망막의 중앙으로부터의 거리이며, 세로축은 지각 오차(보고한 각도 - 실제 각도)이다. 네 개의 선은 각각 상하좌우의 방향을 나타낸다. 위쪽의 control 조건(시선을 중앙에 고정시킨 경우)에 있어서는 어느 방향이나 위치로도 거의 운동지각 왜곡이 없는 반면, 추적안구운동을 할 경우(아래쪽 그래프들)은 망막의 중심에서 외곽으로 벗어날 수록 운동지각왜곡이 적어짐을 알 수 있다. 또한 흥미롭게 관찰되는 것은, 낙하자극이 좌우측에 제시된 경우(하늘색/연두색)보다, 상하측(빨강/파랑)에 제시되는 경우에 더 지각왜곡이 크다는 점이다.



spatial locus에 의한 운동지각의 왜곡의 개념. 피험자는 망막의 중심에서 더 외곽에 낙하자극이 제시될 수록 지각왜곡을 적게 느낀다.



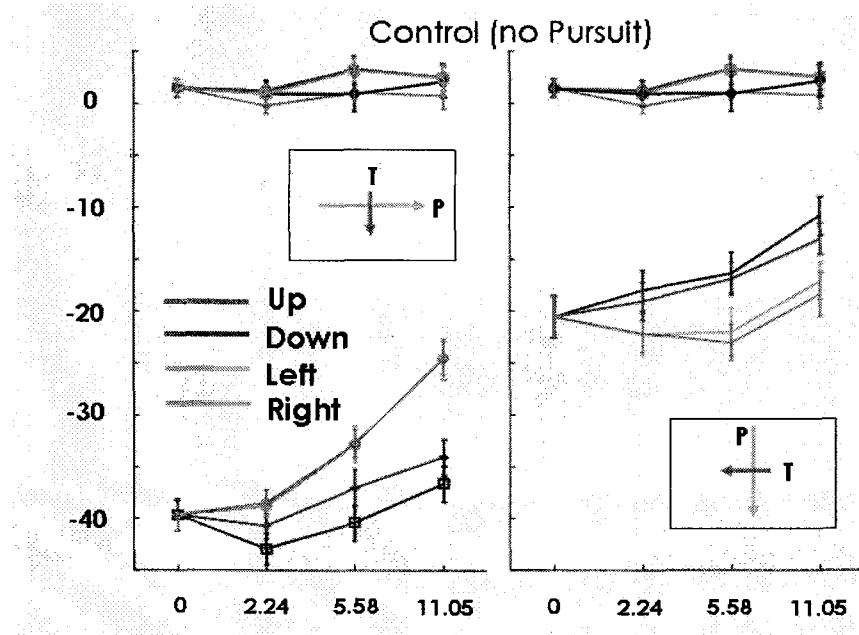
상대적인 안구운동방향에 의한 운동지각 왜곡의 개념. 피험자는 수평방향 추적안구운동을 할 경우, 좌우측에 제시된 경우보다 상하측에 제시된 경우에 더 지각 왜곡을 보고한다.

(3) 실험 3

(가) 안구운동과의 상대적 방향에 따른 지각 왜곡의 정도

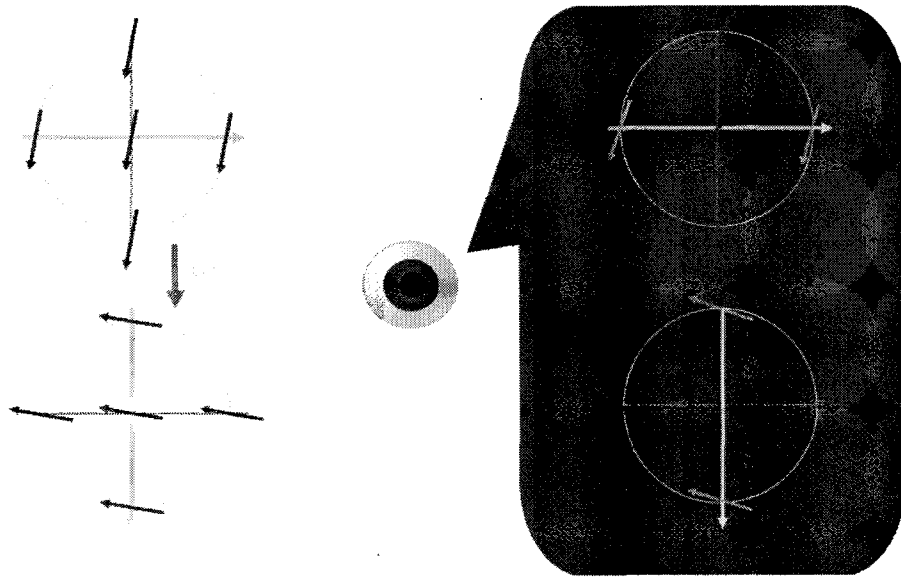
수평방향이 아니라 수직방향으로 추적안구운동을 할 경우의 지각왜곡은 약간 다른 양상을 보인다.

(나) 실험 3의 결과



상대적인 안구운동의 방향에 따른 지각왜곡의 크기

왼쪽은 실험 2에서 보였던 수평방향의 안구운동의 경우 spatial locus에 따른 지각 왜곡을 보여준 것이며, 오른쪽은 수직방향(눈이 위에서 아래로, 낙하 자극은 우에서 좌로)의 안구운동의 경우를 보여준다.(모든 실험조건이 시계방향으로 90도 회전한 경우이다) 이 경우, 전체적으로 지각왜곡이 적으며, 상하/좌우 방향에 따른 왜곡의 정도의 차이가 역전되는 것처럼 보인다.



안구운동방향에 대한 상대적 위치에 의한 운동지각 왜곡을 보기 위한 조건과 그 결과이다. 눈이 수직/수평 방향으로 움직일 경우, 시선의 궤적에서 벗어나 있을 수록 왜곡이 더 심하게 일어나는 것 같다.

(4) 실험 4

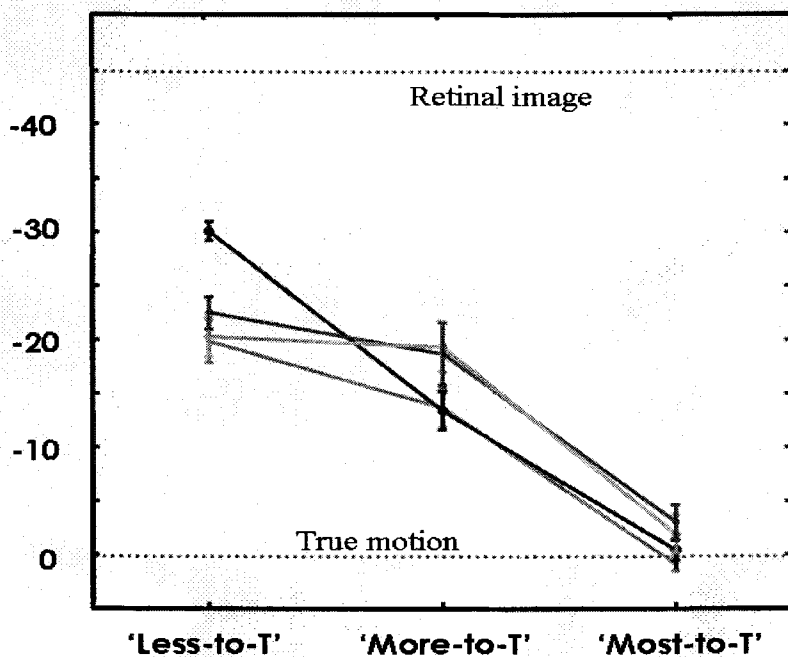
(가) 주의 attention에 의한 운동지각의 왜곡의 정도.

이러한 차등적인 운동지각 왜곡이 일어나는 이유로서, 추적하고 있는 물체에 주어진 주의의 양이, 안구운동신호의 통합여부에 관여하는 것이 아닐까 하는 추측으로부터, 움직이는 물체에 대한 주의 과정의 양을 조절하여 검증하고자 하였다.

주의 과정의 조작은 다음과 같이 하였다. 두 운동 자극은 임의의 시간에 색이나 형태가 변하도록 하였다. '비주의 most-to-T' 조건에서 피험자는 첫번째 자극을 눈으로 추적하면서, 첫번째 자극이 변한 회수를 보고하도록 하였다. '분산주의 more-to-T' 조건에서 피험자는 눈으로 첫번째 자극을 추적하면서 두번째 자극이 변한 회수를 보고하도록 하였다. '주의 most-to-T' 조건에서 피험자는 방향 판단을 하게 될 자극을 눈으로 추적하면서 그 자극이 변

한 회수를 보고하도록 하였다. 정확하게 보고하지 않은 시행은 전체의 10% 미만이었으며 이 시행들은 분석에서 제외하였다. 안구의 위치는 적외선추적 장치(Skalar IRIS)를 이용하여 측정하였으며 측정된 위치를 1kHz/s로 저장하여 조건에 따른 안구운동 패턴의 비교와, 망막 상의 영상 운동 벡터를 계산하는데 사용하였다.

(나) 실험 4의 결과



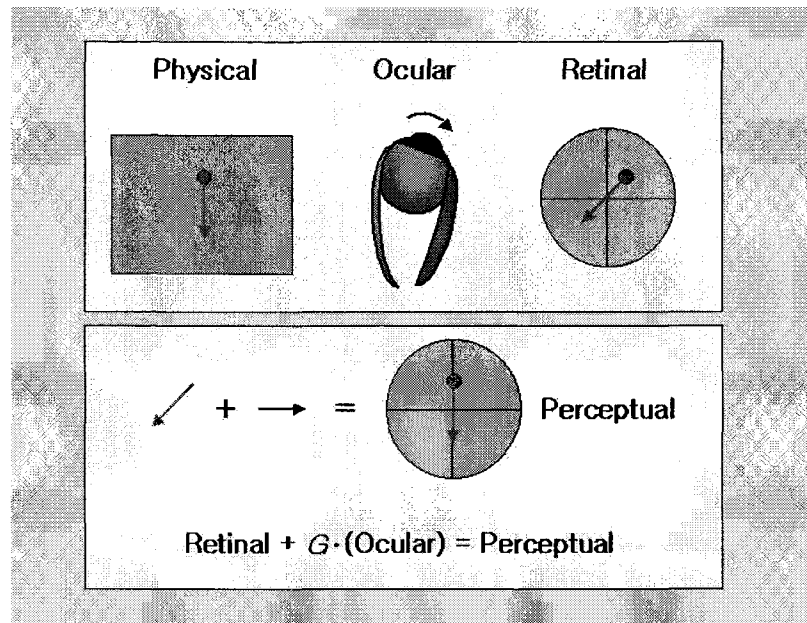
주의의 양에 따른 운동지각 왜곡의 양

가로축은 각각 낙하자극(T-target)에 주어진 주의과정의 양의 차이를 말한다 (most-to-T : 낙하자극을 추적하고, 낙하자극에 주의를 기울임. more-to-T : 추적자극을 추적하고, 낙하자극에 주의를 기울임. less-to-T : 추적자극을 추적하고, 추적자극에 주의를 기울임. 즉, 우측으로 갈수록 낙하자극에 주어진 주의과정의 양이 많다고 생각된다.) 세로축은 지각 오차의 크기이며, 각 선은 네 명의 피험자를 표시한다. 낙하자극에 보다 많은 주의과정이 주어질수록, 지각왜곡의 양이 줄어드는 것 같다.

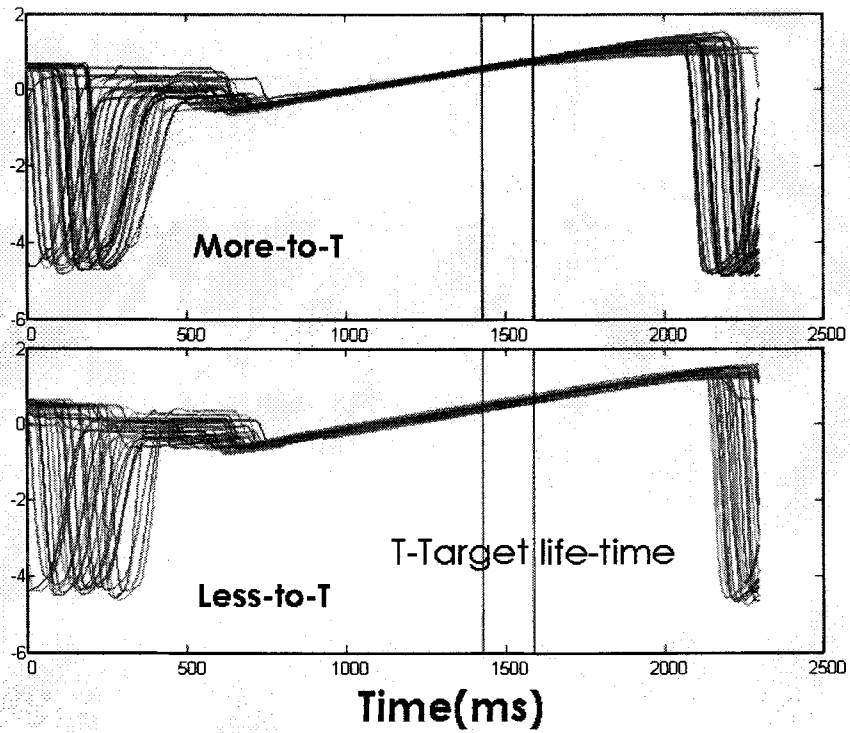
나. 연구 결과

주의의 정도를 조작한 실험 조건에 따라 안구운동의 신호가 통합되는 정도가 체계적으로 변함을 관찰하였다. 즉, '주의' 조건에서는 안구운동의 신호가 충분히 통합되어 시각 운동의 방향 판단이 실제 자극의 운동 방향에 가까웠으며, '비주의' 조건에서는 시각 운동의 방향의 판단이 망막의 영상 운동 방향에 가까워서, 큰 판단 오류를 포함하였으며, 따라서 안구운동의 신호가 통합되지 않는 결과를 보였다. '분산주의' 조건에서는 방향 판단의 오류가, '비주의' 조건에 비해서는 작았지만, '주의' 조건에 비해서는 컸다. 이 차이들은 모두 통계적으로 유의미하였다. 이 결과는, 시각 운동의 지각에 있어서 주의 과정이 안구운동 신호의 통합을 조절하고 있음을 나타낸다.

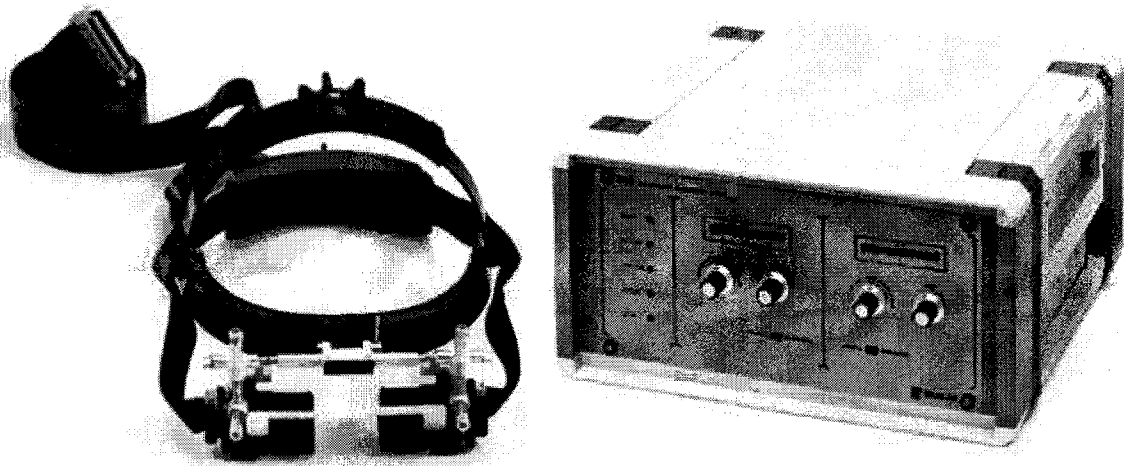
이 결과를 토대로, 아래 그림에서 도식적으로 보인 과정을 제안한다. 시각운동('Physical')의 방향에 관한 지각적 판단('Perceptual')을 형성하기 위해서 망막 영상운동('Retinal')과 안구운동의 신호('Ocular')가 통합될 때, 주의의 역할은 안구운동 신호가 통합되는 정도(gain, G)를 조절하는 것을 제안한다.



망막상과 안구운동 신호가 통합되어 원래의 운동을 지각하는 과정. 여기에서 주의과정과 같은 것이 통합의 정도 gain에 관여하여 지각왜곡을 조절한다.



적외선 tracker를 사용하여 측정된 추적안구운동의 수평방향 움직임(오른쪽 눈). 위의 패널은 주의가 분산되어 있을 때이고, 아래 패널은 주의가 추적자극에 집중된 경우이다. 두 경우에 있어서 안구운동은 일정하게 유지되었음을 확인할 수 있다. 가로축은 시간이며, 세로축은 수평방향 안구의 위치(상대적인 전압값)이다. 낙하타겟(T-target)이 보여지는 구간은 두 개의 푸른 세로선으로 표시하였다.



적외선 다이오드를 이용한 안구추적기. Skala사의 IRIS모델.

2절 인공안구의 개발

1. 서론

가. 도입

시각계의 기능은 망막을 통한 시각 정보 뿐 아니라 안구의 위치와 운동에 대한 정보를 통합하고 있음이 알려지고 있으며 시각계의 기능, 특히 공간 시각이 역동적으로 조절되고 있음이 확립되고 있다. 인공 시각을 구현하기 위해서는 인간의 시각계가 안구운동의 정보를 통합하는 인지 신경기전을 이해하고 이에 기반한 인공안구의 개발이 요구된다. 인간을 모방하는 인공 시각을 구현하기 위해서는 소형이면서 고속의 3차원 회전 운동이 가능한 인공안구의 개발이 필요하다. 더불어 고속의 안구 운동에 따른 운동제어의 오류 보정과 시각 기능의 조절이 이루어지는 메커니즘에 대한 이해가 필요하다.

인간의 안구 운동은 수평, 수직, 비틀림(torsion) 회전을 일으키는 3축 근육에 의해 위치와 운동이 제어된다. 인간의 안구의 위치는 시선을 중심축으로 무한한(비틀림) 위치의 가능성이 있으나 한 위치만 선택되고 있다. 이를 Donders의 법칙이라 부른다. 망막(시각피질)-상구- 뇌간-동안신경핵-외안근의 신경회로가 안구의 3차원적 위치를 제어한다. Listing의 법칙으로 알려진 제약에 의해 비틀림의 크기가 결정되며, 이 제약을 구현하는 신경회로가 뇌간 회로에 있는 것으로 생각되고 있다. 그러나, 이 법칙이 구현되고 있는 방식은 정확히 알려져 있지 않다.

이를 이해하고 응용하기 위한 3자유도 인공 안구 운동기구에 시각계에서의 신경 메커니즘에 기반한 안구의 운동을 실험하여 여러 가지 가능성을 발견할 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 이를 로봇이나 기타 여러 능동 시각 분야에 적용할 수 있을 것이다. 인간의 안구운동을 구현하기 위하여 안근육의 움직임에 대한 동역학적 해석이 필요하다. 그리고 안구 속도가 500 deg/s 이상이며 가속도는 20000 deg/s² 에 이르고 있어 이러한 성능을 나타내는 안구 운동기구가 필요하다.

인간 안구의 움직임에 관해서는 오래 전에 연구가 되어왔다. 그러나 인간의 안구의 근육과 함께 고려되어 해석한 결과는 많지 않다. 최근 연구로는 Pamela Lockwood-Cooke 과 Clyde F.Martin, Lawrence Schovanec의 연구(1999)가 있다 (A Dynamic 3-d Model of Ocular Motion). 이 연구에서는 안구의 회전각도에 대해 안근육을 스프링과 댐퍼로 구성하여 근육에 걸리는 힘을 동역학 관계식으로 풀어내었다. 비전시스템에 대한 연구는 광범위하게 이루어지고 있다. 여러 연구 기관에서 다양한 기구의 양안 비전 시스템을 개발하여 연구 중 이다. 그러나 안구에 해당하는 카메라의 움직임이 3자유도를 갖는 경우는 드물다. 양안 비전 시스템에서 카메라가 3자유도를 갖는 연구로는 Michael Jenkin 등의 연구(1993)가 있다 (A binocular robotic head system with torsional eye movements). 그러나 이 연구에서 개발된 시스템은 사람 안구의 움직임에 비해 상당히 느리다. 인간의 안구 운동이 최고 800 deg/s 까지 이르는 반면 이 시스템은 54 deg/s에 머무르고 있다. 양안이 아닌 한 쪽 안구운동에 대한 연구는 Clement M.Gosselin과 Jean-Francois Hamel의 연구(1994)가 있다 (Agile eye, 그림 1). 이는 회전 병렬기구 방식을 이용한 것으로 독특한 구조로 3자유도 회전을 이루고 있다. 이 안구운동기구의 회전속도는 사람의 안구운동에 필적할 만하나, 링크기구의 조인트가 안구 회전중심보다 앞으로 나와 있어서 휴머노이드 등의 머리에 장착될 수는 없다.

휴머노이드 로봇에서 안구의 움직임은 사물을 인식하고 감정을 표현하고 사람과 대화하는데 중요한 기능을 한다. 이의 연구를 위해서 개발된 로봇으로 MIT에서 개발한 Kismet과 Waseda 대학에서 개발한 Waiban 이 있다. 그러나 이러한 로봇 대부분의 경우 설계의 어려움으로 인해 안구 움직임은 모두 2자유도를 가지고 있다.

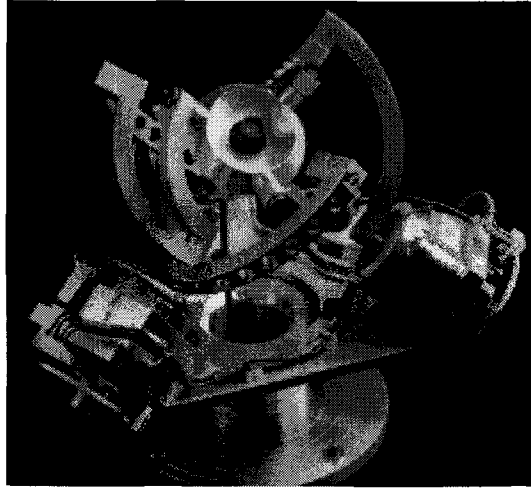


그림 1. The Agile eye

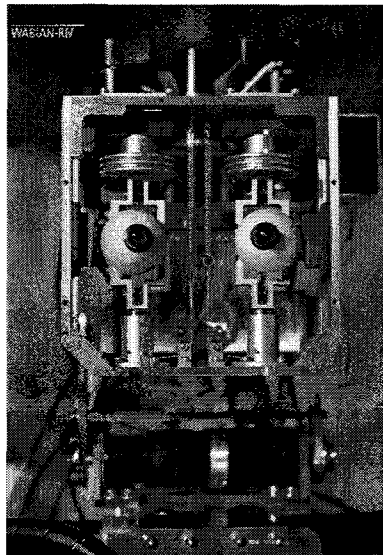


그림 2. Waseda 대학에서 개발한 Wabian

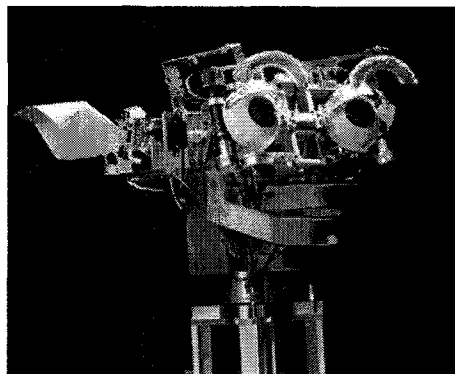


그림 3. MIT에서 개발한 Kismet

나. 이론적 배경

(1) 인간 안구의 구조

인간의 안구는 3자유도를 가지고 움직인다. 그 최고속도는 800 deg/s에 이르고 가속도는 20,000 deg/s²에 이르는 고속 움직임을 보인다. 인간의 안구의 최대 가동범위는 좌우 60 deg 상하 60 deg 정도이며, 25 deg 이내의 운동이 전체 안구운동의 98%가 된다. 비틀림 축의 회전각도는 다른 두 축의 회전각도에 의해서 결정되는 것으로 알려져 있고, 이를 Listing의 법칙이라고 한다.

인간 안구의 구조는 그림 4와 같다. 안구 주위의 4개 근육이 상하 좌우 움직임을 만들어내고, 그 상태에서 안구를 비틀게 하는 2개의 안근육이 존재하여 총 6개의 안근육이 있다.

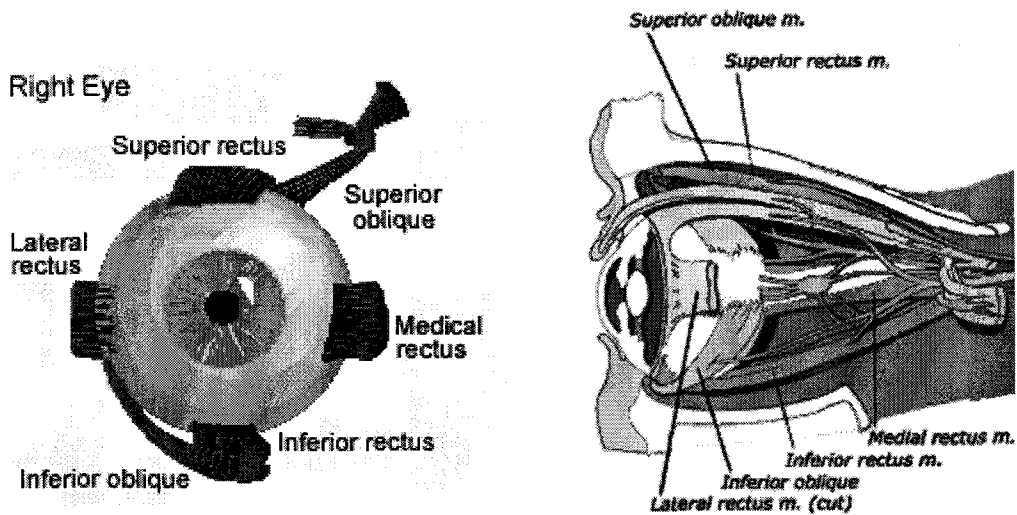


그림 4. 인간 안구의 구조

(2) 인간 안구운동의 기구학적 해석

그림 5에 나타난 것과 같이 2개의 좌표계를 사용하여 각각의 점을 표현한다.

고정좌표계 : 4개의 외직근과 상사근이 모이는 점을 원점으로 한다. 안구를 위에서 내려다본다고 가정하며, 이때 안구는 그 평면에서 북쪽을 향한다. X축의 방향은 아래에서 위를 향하는 방향, Y축은 동쪽방향,Z축은 북쪽방향이 된다.

상대좌표계 : 안구에 부착된 좌표계로 안구의 중심이 원점이 되고 방향은 안구가 중립상태일 때 고정좌표계와 동일하다.

이 경우 다음과 같은 점들의 좌표를 결정해야 한다.

안구의 중심(고정좌표계)

하사근이 고정된 위치(고정좌표계)

상사근이 걸치게 되는 점(고정좌표계)

근육이 안구에 부착된 부분(상대좌표계)

이를 위해 가상안구가 다음과 같다고 설정한다.

안구의 직경: 23.5 mm 완전한 구

안구의 무게: 0.007 kg 균일한 밀도

외직근의 길이: 40 mm, 4개 모두 동일하며 한점에서 모인다.

상사근의 길이: 안구에서 trochlea(편의상 폴리)까지 28 mm

폴리에서 zinn(편의상 고정점)까지 32 mm

하사근의 길이: 37 mm

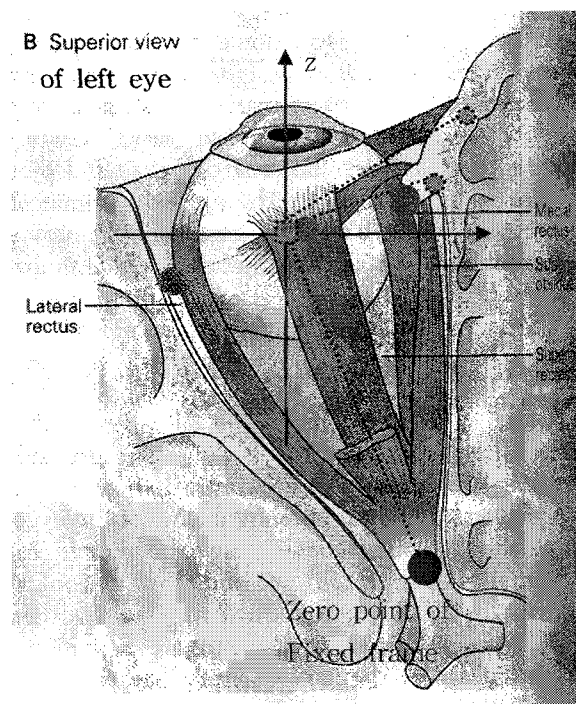


그림 5. 안구에서의 좌표

추가로 근육은 다음과 같은 기하학적 조건을 만족한다고 가정한다.

- i) 근육은 두께와 너비가 없는 직선이다.
- ii) 근육은 위의 그림 5와 같은 형태로 점접촉을 하고 있다.
- iii) 상사근과 하사근은 외직근과 15도의 각도를 이루면서 부착되어있다.
- iv) 안구는 구의 중심과 고정점을 잇는 직선에 대해 23도 어긋나 있다.

위의 자료를 이용하여 기하학적 관계를 풀면 다음과 같은 좌표를 얻을 수 있다.

안구 중심의 위치(고정좌표계) $(0, -14.94, 35.20)$

폴리 $(16.1, 21.756, 17.037) + (0, -14.94, 35.20)$

하사근 고정점 $(0, 11.05, 8.62) + (0, -14.94, 35.20)$

근육의 안구 부착점(상대좌표계)

맨 위쪽의 점부터 반시계 방향으로

$(r,0,0) (0,-r\cos23,-r\sin23) (-r,0,0) (0,r\cos23,r\sin23)$

여기서 r 은 안구의 반경이다.

이 때 안구가 원하는 점으로 이동하고자 할 때 필요한 근육의 길이를 계산해 보자. 안구의 viewpoint로부터 거리가 L 떨어진 곳에 스크린이 있다고 하고, 안구가 중립상태일 때 보이는 스크린 상의 점을 스크린의 원점으로 한다. 스크린의 오른쪽을 향하는 방향이 x 방향, 왼쪽을 향하는 방향을 y 방향이라 한다. 또한 보고자 하는 물체가 있는 좌표를 스크린 상의 좌표계로 (x,y) 라 한다. 해석의 편의를 위해 안구가 이동해야 할 위치를 오일러 각으로 표현하여 $roll(ro)$ $pitch(pt)$ $yaw(yw)$ 각을 구한다.

그림 6에서

$$ro = \arctan\left(\frac{x}{L}\right)$$

$$pt = \arctan\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + L^2}}\right) \text{ 이 되고,}$$

yw 각은 물체의 각도를 바로 잡는데 필요하며,
실제의 안구에서는 다음과 같은 관계로 종속되어 있다.

$$yw = \arccos\left(\frac{\sin ro \cdot \sin pt}{1 + \cos ro \cdot \cos pt}\right)$$

이렇게 구한 3개의 각도 값을 나타내면 안구의 회전 후 근육의 길이를 구할 수 있다.

3번의 회전이동이 행하여진 후 상대좌표계와 고정좌표계의 새로운 관계를 구한 후 근육의 안구 부착점의 새로운 절대좌표를 구한다. 이 점들의 좌표와 근육의 고정점 사이의 거리를 구하면 그 값이 근육의 길이가 된다.

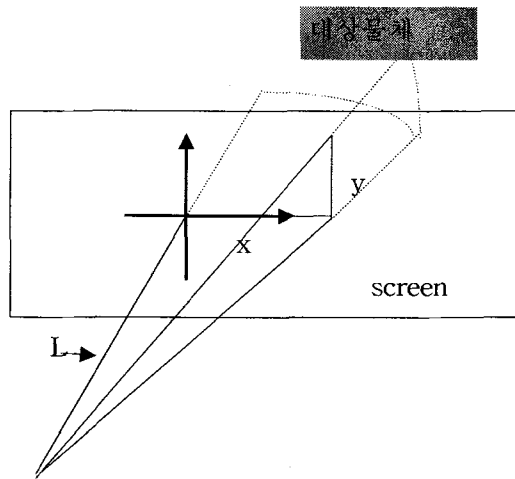


그림 6. 시선과 상과의 관계도

관계식을 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cR & -sR \\ 0 & sR & cR \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} cP & 0 & sP \\ 0 & 1 & 0 \\ -sP & 0 & cP \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} cY & -sY & 0 \\ sY & cY & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -14.94 \\ 35.20 \end{bmatrix}$$

$$R_{\text{Helmholtz}} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_H) \cos(\phi_H) & -\sin(\theta_H) \cos(\phi_H) + \sin(\phi_H) \sin(\psi_H) & \sin(\theta_H) \cos(\phi_H) \sin(\psi_H) + \sin(\phi_H) \cos(\psi_H) \\ \sin(\theta_H) & \cos(\theta_H) \cos(\phi_H) & -\cos(\theta_H) \sin(\phi_H) \\ -\cos(\theta_H) \sin(\phi_H) & \sin(\theta_H) \sin(\phi_H) \cos(\psi_H) + \cos(\phi_H) \sin(\psi_H) & -\sin(\theta_H) \sin(\phi_H) \sin(\psi_H) + \cos(\phi_H) \cos(\psi_H) \end{bmatrix}$$

(x,y,z)에 근육 부착점의 상대 좌표를 대입한다.

그 결과를 (X,Y,Z) 라 하면 각 외직근의 길이는

$\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}$ 이다. 단 이때 근육이 안구를 타고 돌면서 길이의 변화가 생기는 것은 무시하였다.

상,하사근 의 경우는 몇 가지 가정이 필요하다.

외직근과 동일한 가정이 들어있으며, 동시에“상사근의 경우 폴리에서 고정점까지의 길이는 변화가 없다.”,“하사근의 경우 근육의 시작점이 2번 점이 아니라 3번점(하부부착점)이다.”라고 가정한다.

이 경우 상사근의 길이는

안구에서 폴리까지의 거리 (X,Y,Z 는 1번 점의 좌표)

$$\sqrt{(X-16.1-0)^2+(Y-21.756-(-14.94))^2+(Z-17.037-35.20)^2}$$

폴리에서 고정점까지의 거리

$$\sqrt{0^2+14.94^2+35.20^2}$$

또한 하사근의 길이는 (X,Y,Z는 3번점)

$$\sqrt{(X-0)^2+(Y-11.05-(-14.94))^2+(Z-8.62-35.20)^2}$$

이 된다.

이를 계산하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7은 이때 안구의 움직임, 그림 8 - 그림 10은 각 근육의 길이 변화를 나타낸다.

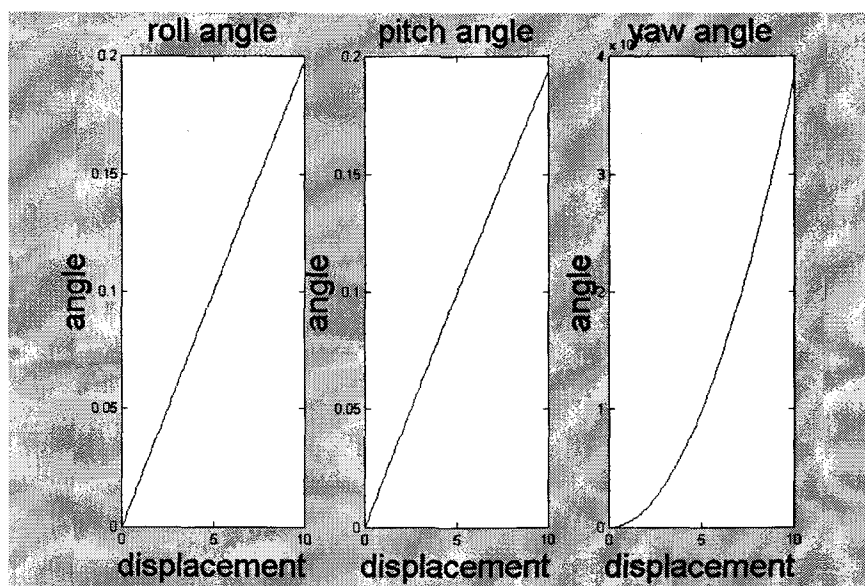


그림 7. 비스듬한 곳을 쳐다볼 때의 안구의 회전각도

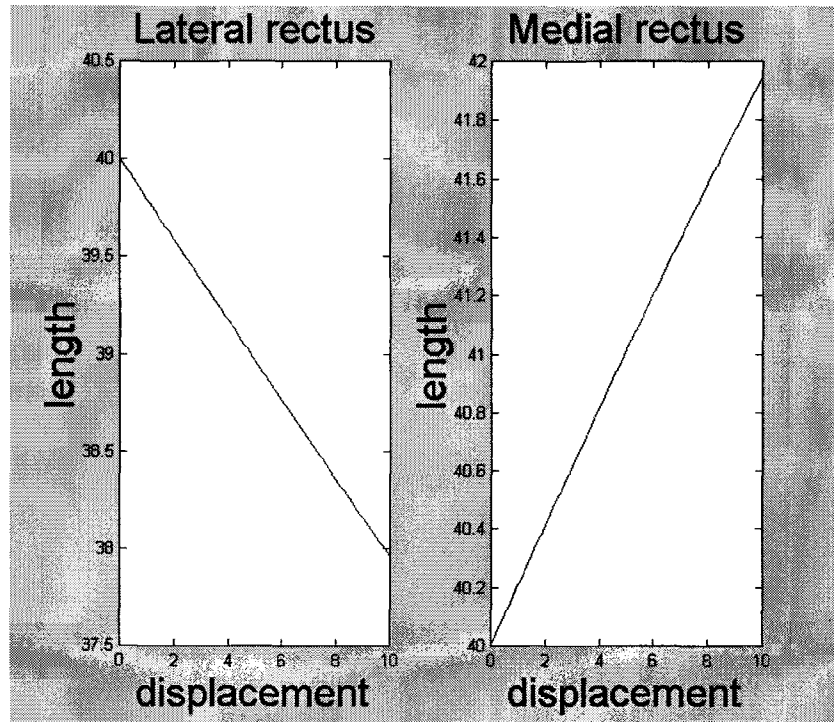


그림 8. Lateral rectus 와 Medial rectus의 길이 변화

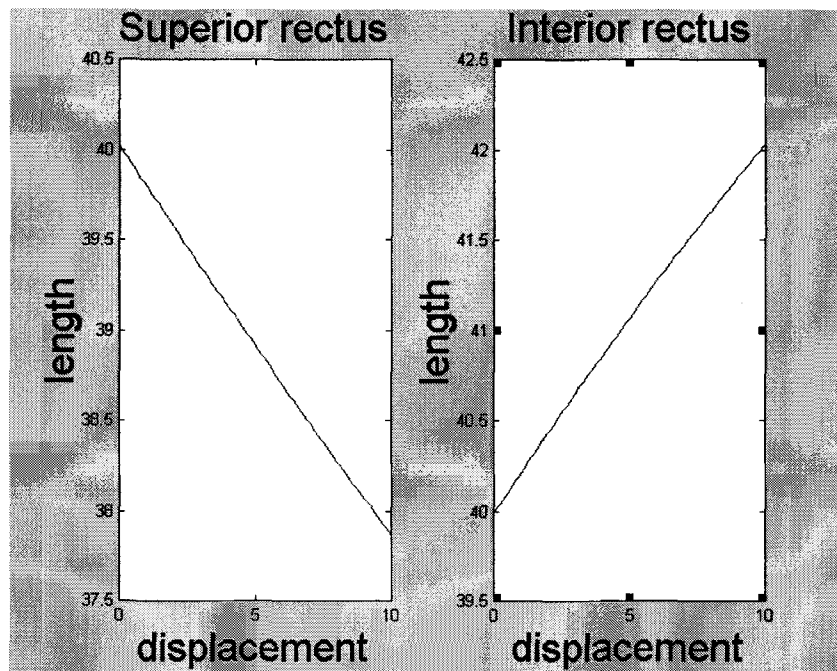


그림 9. Superior rectus 와 Interior rectus 의 길이 변화

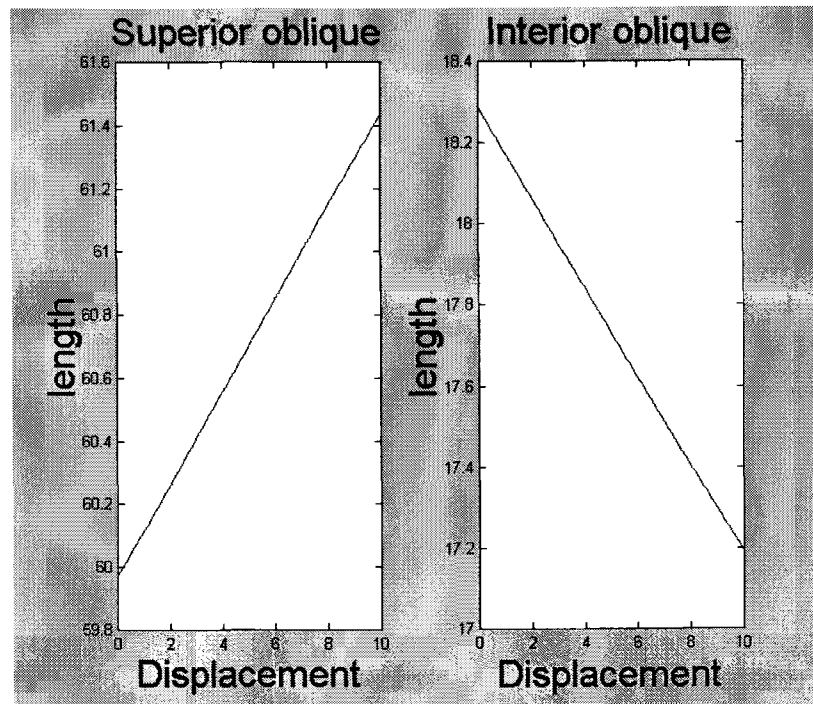


그림 10. Superior Oblique 와 Interior Oblique 의 길이 변화

2. VCM을 이용한 3 자유도 안구운동기구의 개발

가. 기구적 설계

사람의 안구 운동 시스템을 모방할 때 여러 가지 요소들이 고려되는 데 실제로 안구의 메커니즘과 기구적인 측면에서 얼마나 가깝게 접근할 수 있는지가 중요하다. 이것이 안구운동 시뮬레이터의 목적이다. 우리의 목표는 정적으로나 동적으로나 사람의 눈에 가장 근사한 움직임을 묘사할 수 있고 또한 휴머노이드에 장착 가능할 정도의 작은 크기를 갖는 안구운동기구(시뮬레이터)를 개발하는 것이다. 그래서 안구에 해당하는 카메라 앞쪽으로 어느 부분도 나오지 아니하도록 고려하였다. 그리고 2개를 설치하였을 때 사람의 눈의 간격을 유지하도록 하였다. 두개의 안구가 각각 동작하여도 간섭이 서로 없도록 하였으며 어느 파트도 카메라의 앞쪽으로 나오지 아니한다. 그리고 회전의 중심은 사람의 안구의 회전 중심과 같이 망막에서 13.5 mm 뒤에 위치한다.

안구의 위치를 기술하는 데는 아래에 정리한 바와 같이 크게 두 가지의 체계가 있다. 일반적으로 Euler 각도를 사용하는 Fick, Helmholtz, Lising 좌표 체계들이 사용되고 있다. 이 체계에서는 안구의 3차원적 위치가 위계적으로 배열된 회전축의 순서에 따라서 두 번 (Lising 좌표) 혹은 세 번 (Fick, Helmholtz 체계)의 순차적인 회전의 크기로서 표현된다. 그러나 실제로 안구와 같이 3차원에서 회전 운동을 하는 물체의 경우, 이 물체가 향하는(위치하는) 임의의 한 방향에서 다른 임의의 방향으로의 이동은 한 회전으로 가능하다(Euler, 1775). 안구의 3차원적 위치도 기준 위치에서 출발한 단일 회전으로 기술이 가능한데 이를 표현하는 수학 체계로서 rotation vector, quaternion이 있다.

Fick과 Helmholtz 좌표 체계는 세 회전 축 가운데 하나가 머리에 고정된 것으로 간주하고, 기준위치에서 시작하여 세 차원을 따르는 세 번의 회전에 안구의 임의의 위치를 표현한다. 세 회전축은 독립적으로 배열되지 않고 위계적으로 배열되어 있다. Fick 좌표계는 수직축([그림 11]의 z축)이 머리에 고정되어서 (흔히 지구표면에 북극과 남극이 고정되어 있듯이) 먼저 수직축을 중심으로 하는 회전으로 longitude가 결정되고 결정된 경도를 따라 수평축을 중심으로 회전하여 latitude가 정해진다. 먼저 회전하는 수직축을 따라서 수평축([그림 11]의 y축)도 그만큼 회전하기 때문에 수평축이 수직축에 독립되어 있지 않고 위계적으로 묻혀 있다. 전망대에 설치된 망원경은 Fick 좌표계에 따라 움직인다. 망원경의 상하 위치는 좌우 회전이 먼저 이루어진 다음에 결정된 것이다. Fick 좌표계의 마지막 세 번째의 회전은 앞서 두 회전축의 회전과 함께 이동하는 회전축([그림 11]의 x축)을 중심으로 비틀림이 이루어지는 것이다.

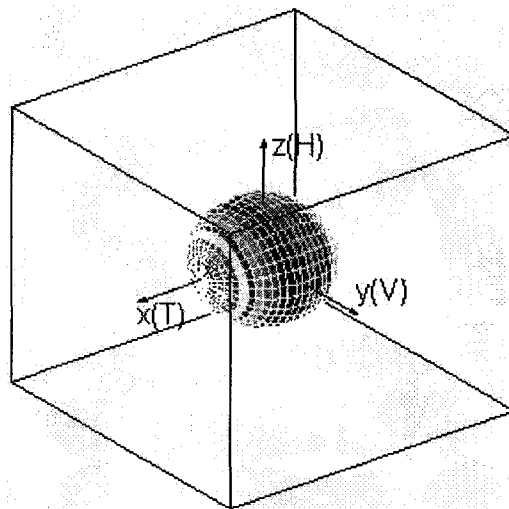


그림 11. 안구의 좌표계

Helmholtz 좌표계는 수평축이 머리에 고정되어 있어서 수평축을 중심으로 하는 회전이 먼저 이루어져서 elevation이 결정되고 이어서 첫 회전을 따라서 이동하는 수직축을 중심으로 하여 azimuth가 결정된다. Fick 체계와 마찬가지로 비틀림이 마지막으로 이루어진다.

양안의 위치를 표현할 경우 Helmholtz 좌표계는 결정적인 이점을 가진다. 이 좌표계에서는 이미 결정된 elevation을 따라 azimuth가 결정되기 때문에 정상안의 경우, 양안의 수평 회전축은 머리에 고정된 동일한 축이기 때문에 양안의 elevation은 동일하다. 따라서 양안의 교차각 (vergence angle)은 양안의 azimuth의 차이이다. 그러나, Fick 좌표계에서는 latitude가 longitude에 따라 결정되기 때문에 양안의 위도가 경도에 따라서 다르다. 따라서 3차 위치에 양안을 고정하면 Helmholtz 체계에서 양안의 elevation은 동일하지만 Fick 체계에서 양안의 latitude는 동일하지 않아서 수직 방향의 양안 교차각을 이루고 이로 인해 양안의 교차각을 기술하기가 간단하지 않다.

그러나 실제 안구 모델의 제작에 있어서는 Helmholtz 체계의 경우 수직축의 액추에이터가 다른 2개의 액추에이터를 회전시켜야 하고 중력방향으로 회전하므로 지속적으로 강한 힘이 필요로 하게 된다. 그렇게 되면 액추에이터의 크기가 커지고 관성이 늘어나서 동적인 성능이 나빠진다. 소형으로 높은 성능을 유지하기 위해서는 Fick 체계가 더 효율적이다. 양안의 경우에 Fick의 경우 계산과정이 조금 더 복잡해지는 단점이 있으나 이는 컴퓨터의 처리속도에 의해 보상될 수 있는 문제라고 생각된다.

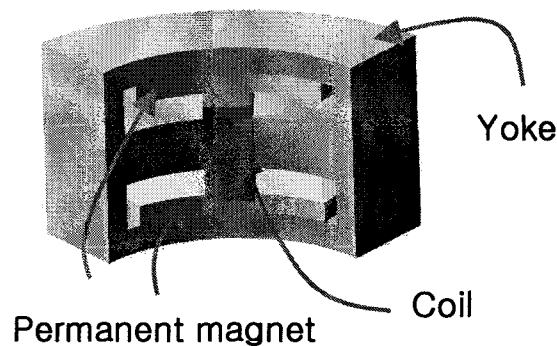
나. Voice Coil Motor의 제작

실제 제작에 있어서 안구 모델을 구동하기 위한 소형 고성능 액추에이터는 드물다. 상용 DC servomotor의 경우는 감속기를 사용해야하며 이 경우에는 기어로 인한 백러쉬가 생겨서 정밀도에 손상을 입게 된다. 또한 위치를 검출하기 위해서 엔코더를 사용해야 하고 전체적으로 구조가 커지는 경향을 갖게 된다. 기구를 직접 구동하기에는 상용 액추에이터는 적합하지 않다고 생각된다. 따라서 원하는 성능을 갖는 소형 고성능 액추에이터를 개발하기로 한다.

Voice coil motor (VCM)은 간단한 구조이면서도 고속 고정밀하게 움직일 수 있다. 따라서 하드디스크드라이브와 CD-ROM 디스크의 광센서의 구동에 널리

쓰이고 있으며, 여러 가지 고속 정밀 구동 장치에 사용되고 있다. 보이스코일모터의 발생력은 플레밍의 왼손법칙에 간단하게 계산될 수 있다. 그러나 영구 자석을 사용하므로 전체적으로 자속의 손실을 줄일 수 있는 설계가 요구된다.

자체로 개발한 액추에이터의 구조를 그림 12에서 보인다. 코일을 통과하는 자속밀도를 높이기 위해서 네오뎴 자석을 이용하였고 요크재료는 탄소성분이 0.15%인 S15C를 사용하였다 (탄소강에서 탄소의 함유량이 적을수록 포화자속밀도가 높아진다). 코일이 위아래 양쪽에서 교차함으로 발생추력을 높였고 자석의 두께 그리고 요크의 폭 그리고 코일의 두께 그리고 코일의 직경 그리고 코일과 자석 사이의 간격 그리고 코일에서의 발열을 모두 고려하여 최적화된 설계 변수를 찾았다. 전체의 관성을 고려하여 적절한 힘을 구하여 그 힘을 발휘할 수 있도록 설계하였다. 또한 직접 회전을 하기 위하여 액추에이터의 형상을 부채꼴 모양으로 구부러지게 설계하였다.



Voice coil motor

그림 12. 제작한 voice coil motor

다. VCM을 이용한 3 자유도 안구운동기구

VCM을 이용한 3 자유도 안구운동기구의 전체적인 구조를 그림 13에 나타낸다. 3개의 보이스코일모터가 사용되었다. 각각의 모터가 수평 수직 그리고 비틀림 운동을 만들어 낸다. 앞에서도 회전 프레임이 카메라 앞으로 나오지 아니하도록 설계되었다. 회전각의 절대 위치를 검출하기 위해서 퍼텐쇼미터를 이용하였다.

퍼텐쇼미터에서는 회전각에 비례한 전압이 출력되며, 이를 측정하여 환산하면 안구의 절대적인 위치를 알 수 있다. 모든 회전축에는 회전을 원활하게 하기 위해서 구름볼베어링이 사용되었다. 모든 프레임은 경량 고강도의 알루미늄 합금 (A7075)을 사용하여 가볍고 튼튼하게 제작하였다.

전체적인 구조는 상하 ± 30 deg 좌우 ± 30 deg 비틀림 ± 15 deg를 움직일 수 있도록 설계되었다. 그림 14에서 보듯이 인물의 사진 뒤에 장착이 가능하고 회전도 가능하다. 전체적인 크기는 82 mm x 82 mm x 105 mm 이다.

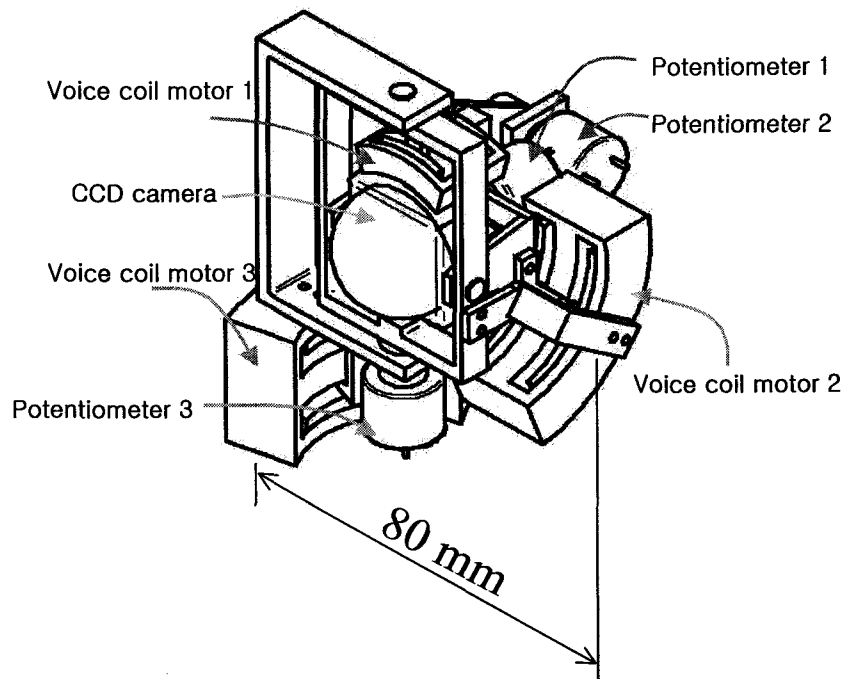


그림 13. VCM을 이용한 3자유도 안구운동기구

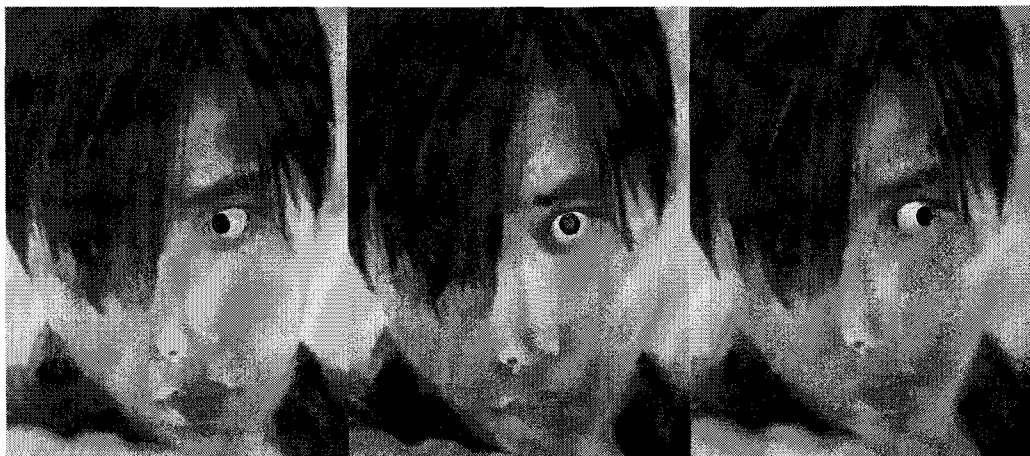


그림 14. 안구운동기구가 평판(사진) 뒤에 장착되어 움직이는 모습

라. 제어 시스템

제작된 안구운동기구를 구동하기 위하여 제어기를 제작하였다. 간단히 구성할 수 있고 응답성이 좋은 아날로그 제어기를 제작하였다. OP-Amp를 이용하여 PD 제어계를 구성하였고 이를 모터 구동 amplifier 에 연결하여 voice coil motor를 구동하였다. 이에 대한 회로를 그림 15에 보인다. 입력신호는 컴퓨터에서 DA convertor 로 보내어지고 실제의 위치가 퍼텐쇼미터를 통하여 전압신호로 제어기에 입력된다. 이 두 신호의 오차 신호가 제어기를 통하여 모터에 전달된다.

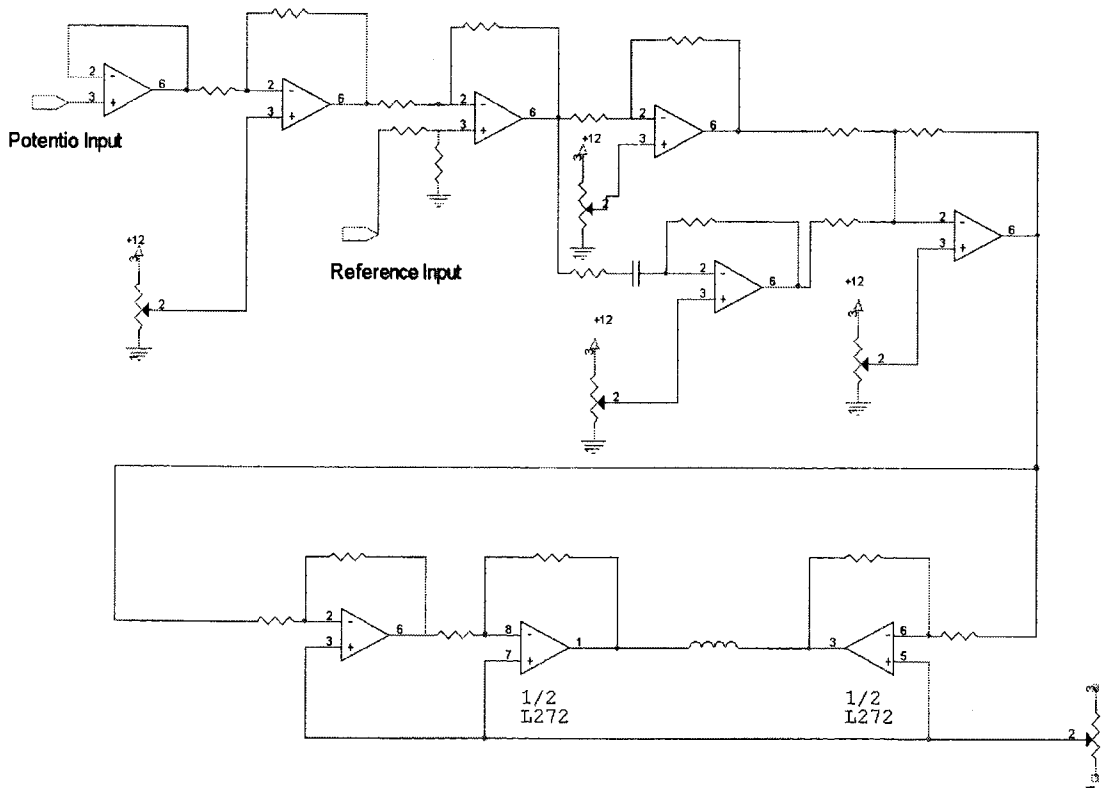


그림 15. 보이스코일모터 제어회로

마. Step Response

동적인 성능 테스트를 위해서 각 축에 step 펄스를 인가하였다. 비틀림에 대하여는 9 deg 상하 좌우에 대하여는 18 deg 에 해당하는 신호를 step 펄스로 입력 신호로 인가하였다. 이에 대한 각 축의 응답 특성 실험결과를 그림 16 - 그림 23에 나타낸다.

그래프에서 알 수 있듯이, 비틀림 운동에 대해서는 890 deg/s, 상하 운동에 대해서는 1380 deg/s, 좌우 움직임에 대해서는 560 deg/s 의 최고속도를 나타낸다. 이는 인간의 안구 운동이 800 deg/s 임에 비해 볼 때, 좌우 움직임을 제외하고는 근접하거나 상회하고 있음을 알 수 있다. 실제의 안구운동에서 95% 이상이 500 deg/s 이하에서 이루어짐을 감안하면 좌우 움직임 또한 충분히 인간의 안구 운동에 근접함을 알 수 있다.

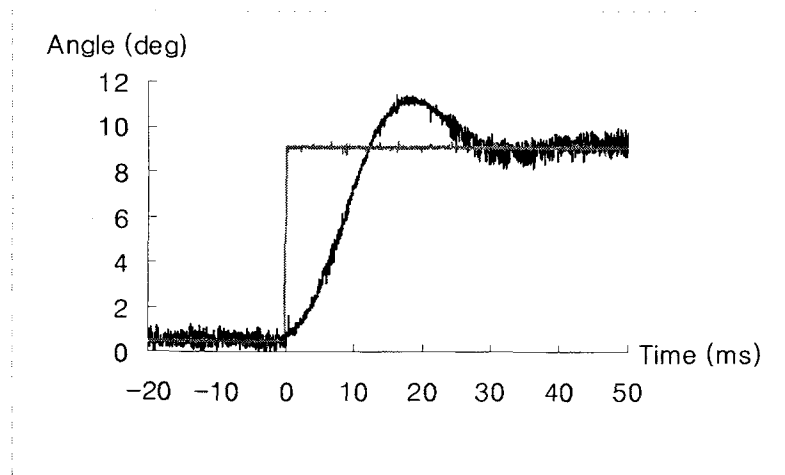


그림 16. 비틀림 운동에 대한 각도

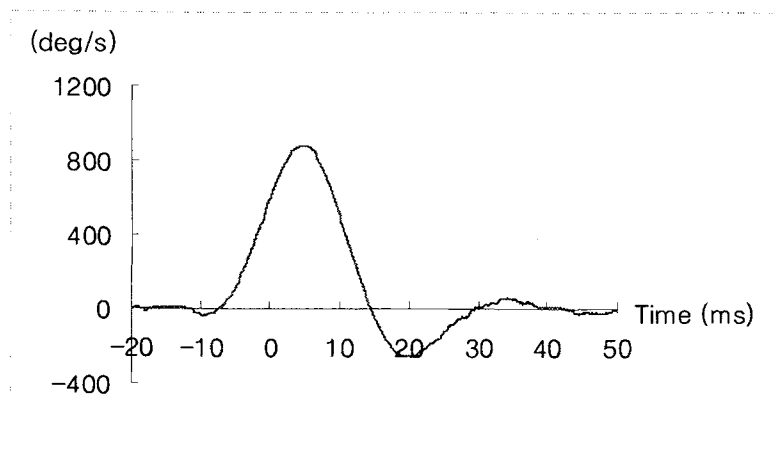


그림 17. 비틀림 운동에 대한 각속도

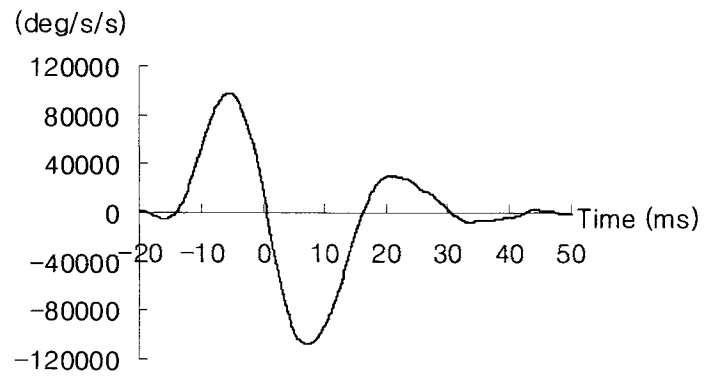


그림 18. 비틀림 운동에 대한 각가속도

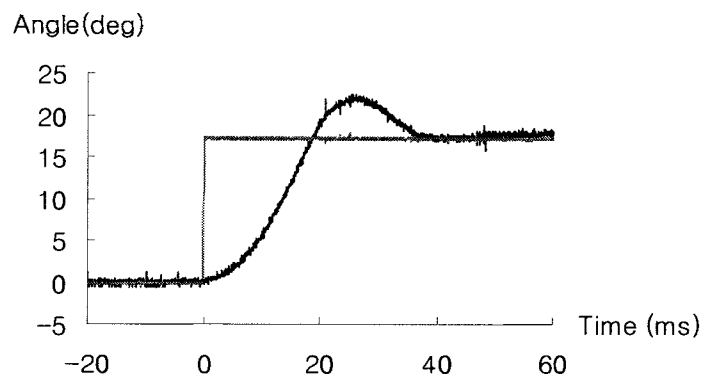


그림 19. 상하 운동에 대한 각도

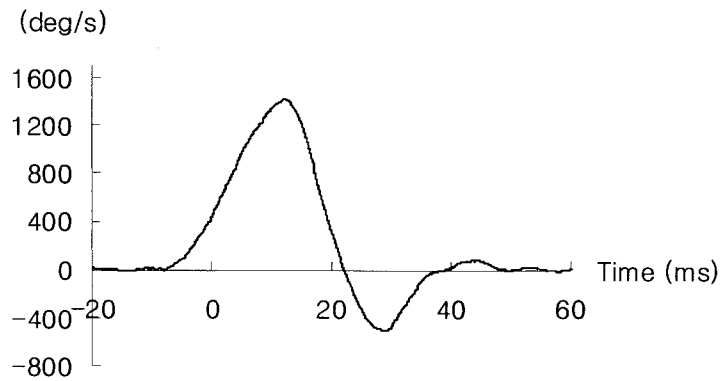


그림 20. 상하 운동에 대한 각속도

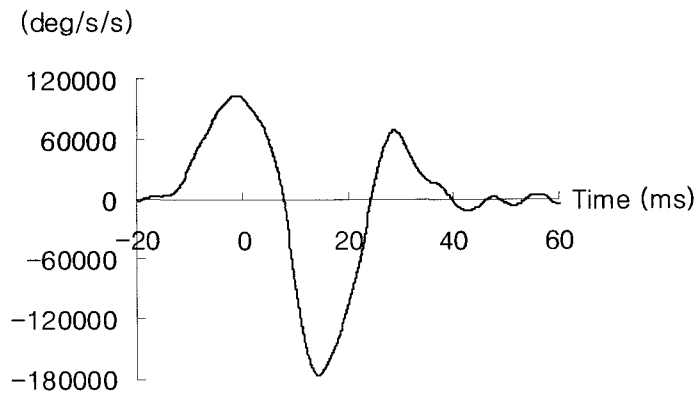


그림 21. 상하 운동에 대한 각가속도

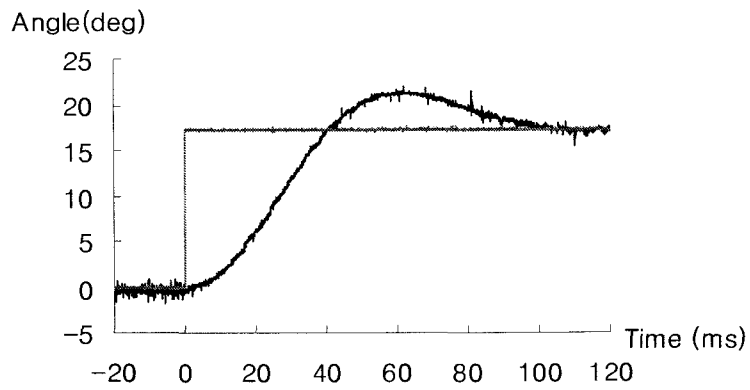


그림 22. 좌우 운동에 대한 각도

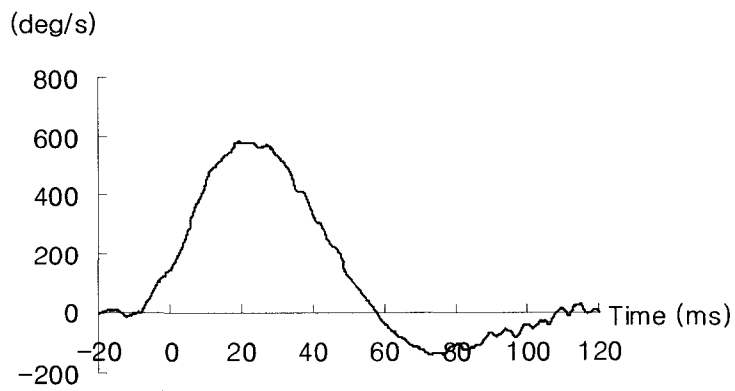


그림 23. 좌우 운동에 대한 각속도

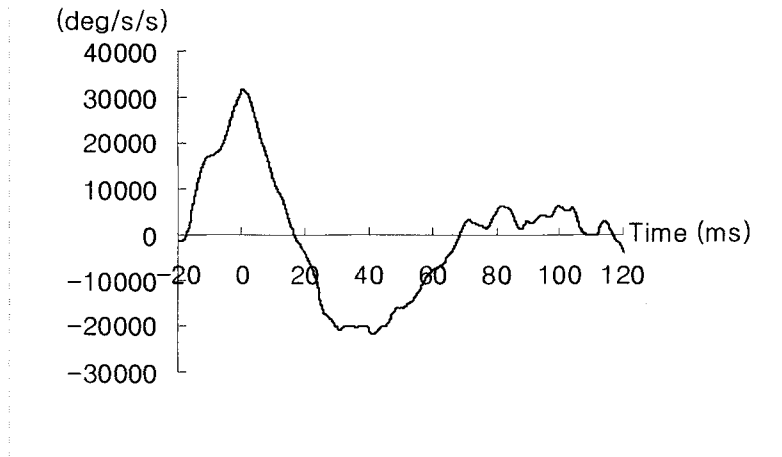


그림 24. 좌우 운동에 대한 각가속도

각 축마다 다소의 오버슈트가 존재하는데 이는 제어방식의 고도화에 의해서 해결될 수 있으리라 생각된다. 각 축의 최대 각속도와 최대 각가속도를 보면, 제일 바깥에 있는 좌우 회전축의 값이 가장 작음을 알 수 있다. 이는 gimbal 시스템의 특징으로 제일 바깥 자유도에서 회전 관성이 가장 커지기 때문이다. 본 연구에서 이 gimbal 모델 다음으로 개발한 회전식 병렬기구의 경우에는 액추에이터가 모두 베이스 프레임에 고정되므로 안쪽 자유도를 회전시키는 액추에이터의 질량이 바깥쪽 액추에이터의 회전관성으로 작용하여 회전관성이 누적되는 일이 없어진다.

바. Tracking test - 인터넷 신문을 읽는 안구의 움직임

그림 25에 인간의 안구의 움직임을 측정하는 방법을 소개하고 있다. 콘택트 렌즈에 코일을 감아서 이를 인간의 눈에 착용하고 자기장이 흐르는 공간에서 움직이면 콘택트렌즈 속의 코일에서 신호가 나와 위치를 검출할 수 있다. 이러한 방법으로 측정한 안구의 움직임이 그림 26에 나타난다. 이는 인터넷을 볼 때의 안구의 움직임이며, 각 신호의 주기는 2ms이다.

인간 안구의 움직임 데이터를 추종해야 할 목표값으로 입력하여 시뮬레이터에 적용하여 보았다. 실험결과를 그림 27에 나타낸다. 오버슈트의 영향이 약간 있으나 (특히 수평축), 전체적으로 근사한 움직임을 보이고 있고, 본 연구에서 개발한 안구운동기구가 인간 안구의 움직임을 추종하고 있음을 알 수 있다.

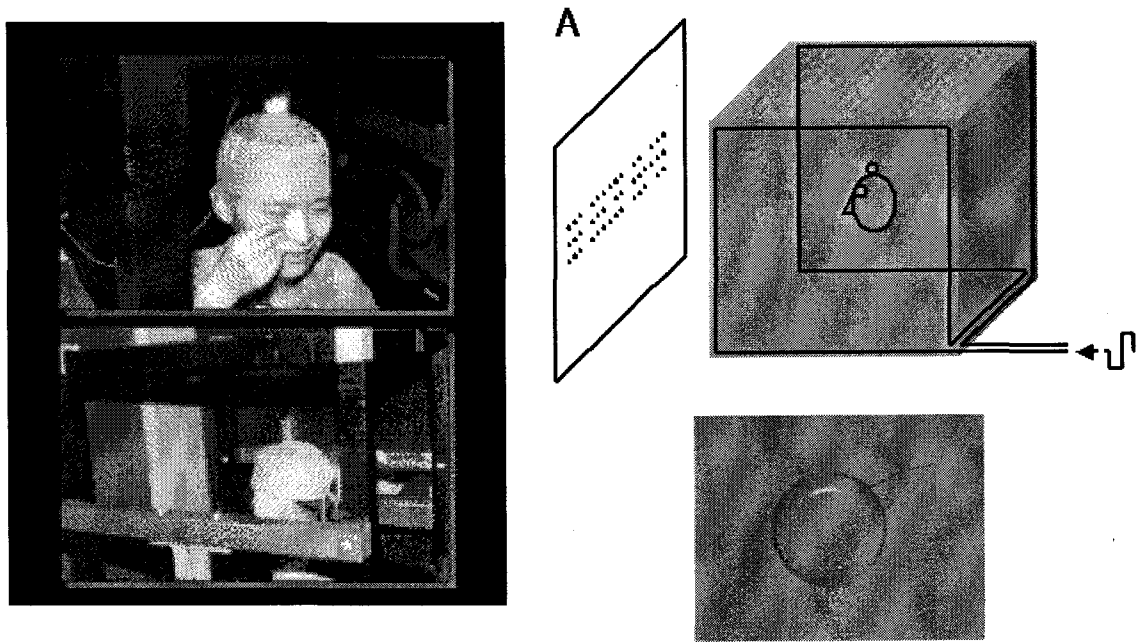


그림 25. 교류 자기장을 이용한 인간의 안구의 위치 측정 방법

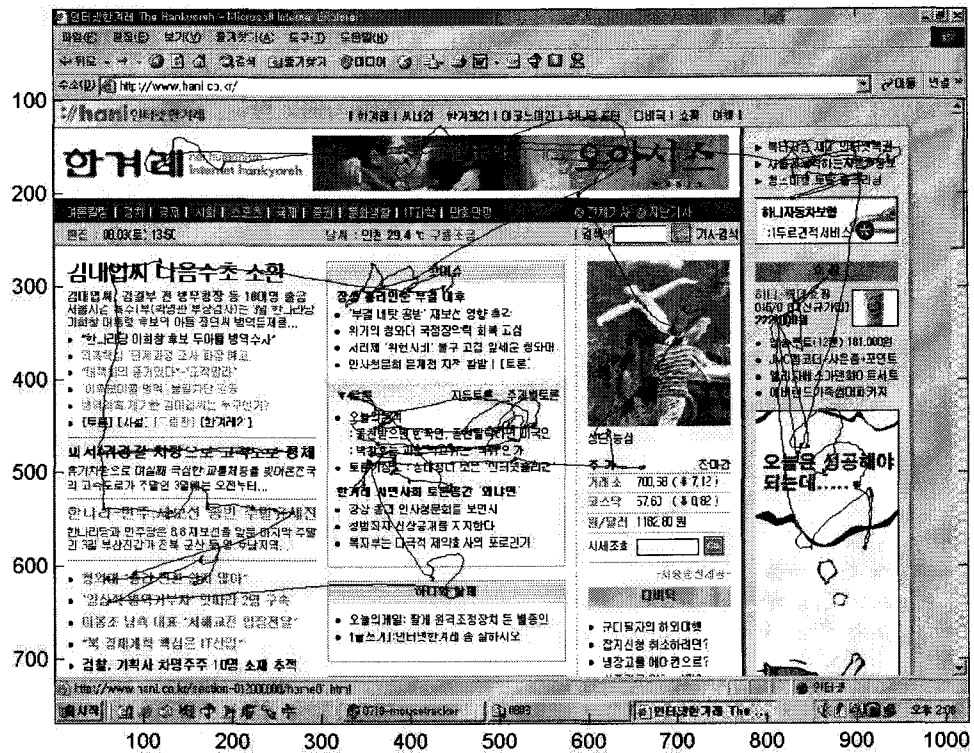


그림 26. 인터넷을 볼 때의 안구의 움직임

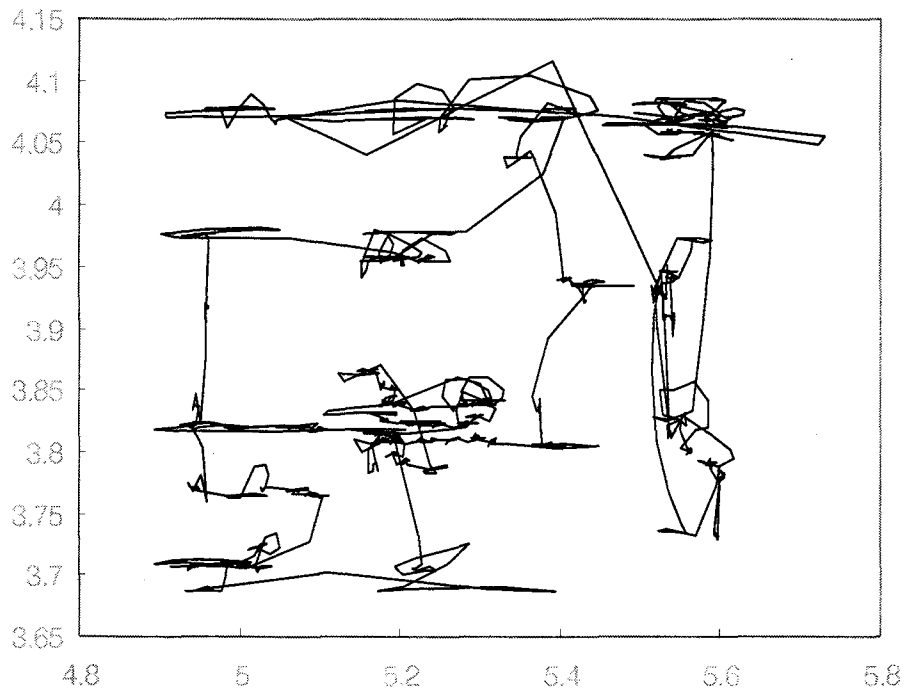


그림 27. 안구 운동을 모방한 시뮬레이터의 움직임

3. 회전 병렬 기구 방식의 3자유도 운동 기구

가. 기구적 설계

앞에서 언급한 것과 같이 gimbal 식 안구기구에서는 바깥 자유도로 갈 수록 관성질량이 커지는 단점이 있었다. 관성질량이 누적되는 것을 배제할 수 있는 회전기구로서 회전식 병렬기구가 있다. 이 회전식 병렬기구를 안구운동기구에 적용하려는 연구가 행해졌으나, 이 시스템은 크기가 휴머노이드에 적용하기에는 다소 크며 카메라 앞으로 회전 링크들이 나와 있는 구조로 휴머노이드에 적용할 수는 없다. 휴머노이드에 적용하기 위해서는 크기가 더 작고 구조상 카메라 앞으로 돌출되는 프레임이 없어야 한다.

본 연구에서는 이러한 조건에 맞는 3자유도 회전 병렬기구 구조를 고안하였다. 그림 28이 기구의 연결구조를 나타낸다. 그림에서 보듯이 3개의 액츄에이터

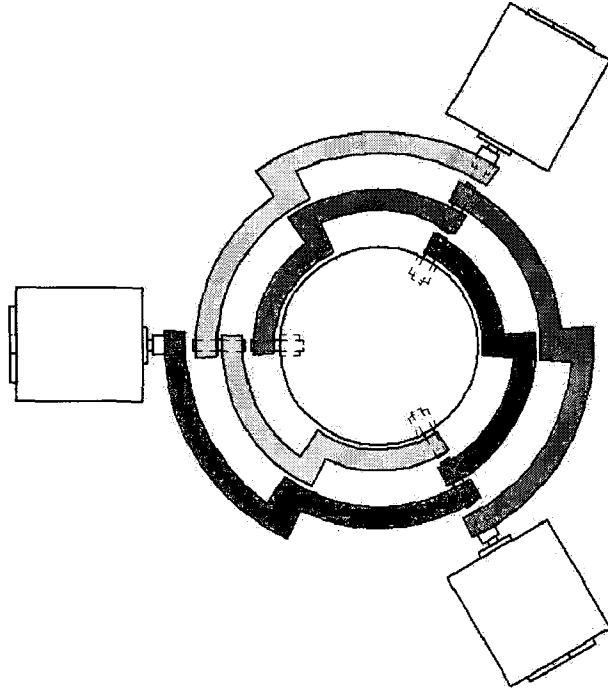


그림 28. 링크의 연결 구조

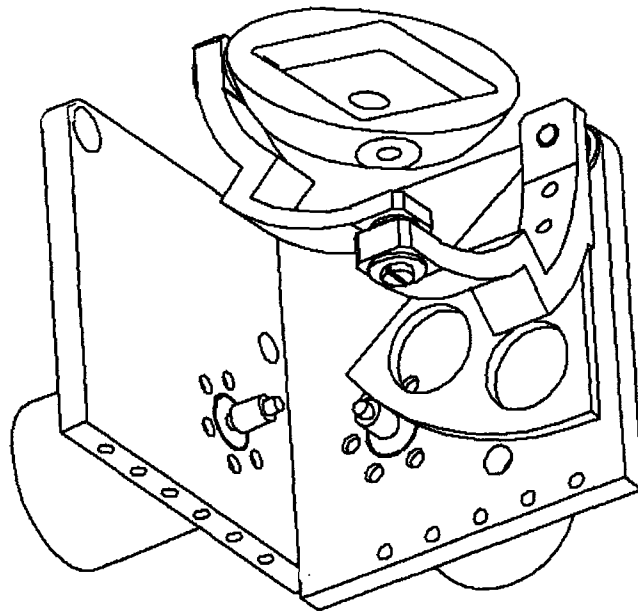


그림 29. 한 개의 링크 조합

와 6개의 링크로 구성되어 있다. 1개의 모터와 2개의 링크가 하나의 기본 연결구조로 되어져있고 그 링크 조합은 모두 안구의 역할을 하는 카메라 프레임에 연결되어 있다. 하나의 링크 조합의 구체적인 구조를 그림 29에 나타낸다. 바깥 링크는 모터에 의해서 구동되는 스퍼기어에 연결되어 있고 안쪽 링크는 컬러 CCD를 고정하는 프레임에 고정이 된다. 이러한 링크 조합이 3개가 존재한다.

각각의 링크들이 적절하게 서로 움직여야지만 안구의 위치가 정확하게 결정이 된다. 그리고 모터를 안구의 회전중심 뒤로 배치할 때 각 링크가 부딪히는 것을 피하기 위해서 링크를 구부려 계단식으로 설계하였다.

나. 역기구학

(1) P.O.E 방법

기구학을 서술함에 있어서 여러 방법이 존재한다. 널리 쓰이는 방법으로는 D-H parameter를 이용하는 방법이 있다. 이 방법에는 몇 가지 단점이 존재한다. 회전 좌표계의 설정에 있어서 사용하는 사람마다 조금씩 다르다는 점이다. 따라서 이해하는 데 약간의 어려움이 존재한다. 이를 해소하는 새로운 방법으로 P.O.E 방법이 있다. 이는 수학적으로 행렬의 지수를 이용하는 방법으로 수학적으로 까다롭기는 하지만 회전 좌표계가 직관적으로 주어진다는 점에서 장점이 있다. 초기 위치에서의 회전축의 방향으로 회전을 표시할 수 있어서 각 관절마다 좌표계를 설정하는 D-H parameter 방법에 비해서 간편하게 이용할 수 있다.

그림 30에서 보듯이 회전축의 방향이 ω 이고 회전각이 θ 라고 하면 이에 대한 회전 행렬을 표현하면 다음 식과 같다.

$$\vec{\omega} = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix}$$

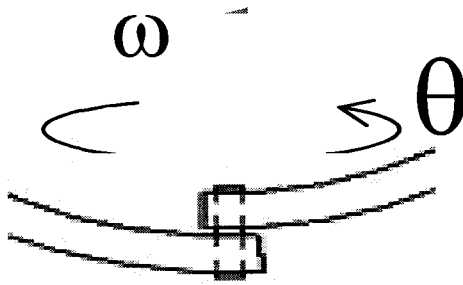


그림 30. 회전축과 각도

라고 하면 회전행렬은 다음과 같이 행렬의 지수 형식으로 나타난다.

$$R = e^{\hat{\omega} \cdot \theta}$$

여기서 $\hat{\omega}$ 는 skew symmetric 행렬이다.

$$\hat{\omega} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & \omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{pmatrix}$$

이를 풀어쓰면 다음과 같다.

$$R = \begin{pmatrix} \omega_1^2 \cdot v_\theta + c_\theta & \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot v_\theta - \omega_3 \cdot s_\theta & \omega_1 \cdot \omega_3 \cdot v_\theta + \omega_2 \cdot s_\theta \\ \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot v_\theta + \omega_3 \cdot s_\theta & \omega_2^2 \cdot v_\theta + c_\theta & \omega_2 \cdot \omega_3 \cdot v_\theta - \omega_1 \cdot s_\theta \\ \omega_1 \cdot \omega_3 \cdot v_\theta - \omega_2 \cdot s_\theta & \omega_2 \cdot \omega_3 \cdot v_\theta + \omega_1 \cdot s_\theta & \omega_3^2 \cdot v_\theta + c_\theta \end{pmatrix}$$

여기서 $v_\theta = 1 - \cos\theta$ $c_\theta = \cos\theta$ $s_\theta = \sin\theta$ 이다.

이 방법을 하나의 링크 조합에 적용하면 다음과 같다. 각 축에 대한 부분은 그림 31에서 보인다. 각 축에 대한 회전 행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_1 = e^{\hat{w}_1\theta_1}$$

$$R_2 = e^{\hat{w}_2\theta_2}$$

$$R_3 = e^{\hat{w}_3\theta_3}$$

여기서 $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \hat{w}_3$ 는 초기 위치에서의 회전축에 대한 skew symmetric 행렬이다. 그리고 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 은 각 축에 대한 회전 각도이다.

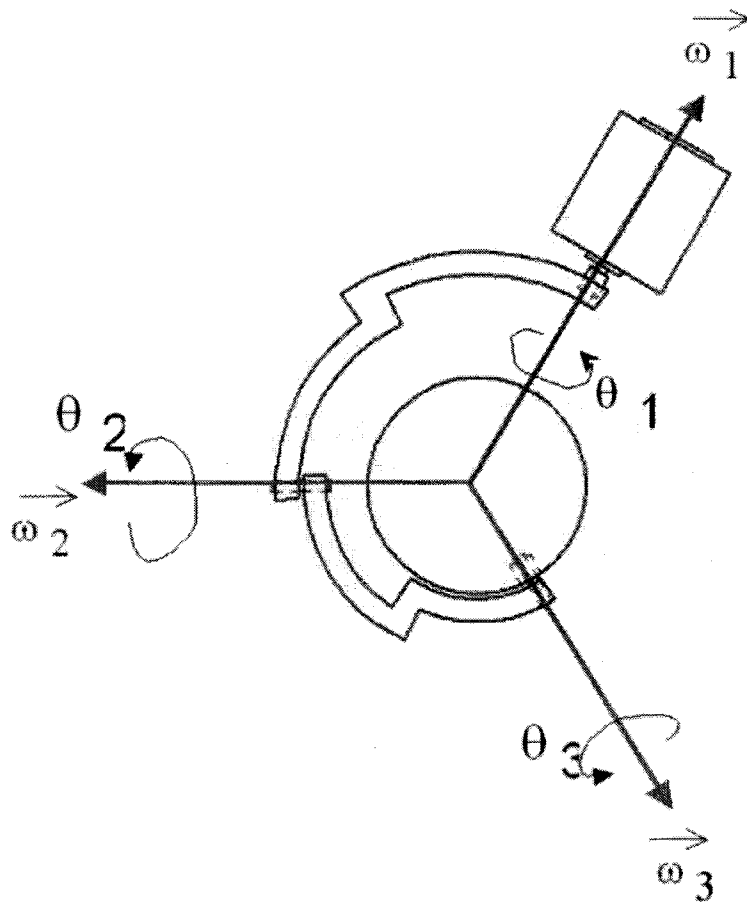


그림 31. 하나의 링크 조합에 대한 회전축과 회전각도

(2) 초기 위치 좌표의 결정

그림 32에서 좌표계에 대하여 표현하고 있다. 안구의 시선 방향을 X, 좌우 방향에 대한 회전축을 Z, 상하방향에 대한 회전축을 Y라고 한다. 이에 대해 모터와 연결한 바깥 연결 축의 방향을 각각 i, j, k 라고 한다. 이때 i, j, k의 방향 벡터의 값은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \end{bmatrix}$$

각 링크 조합에서 바깥 링크에서 모터와 연결되는 부분의 축을 w_1 라고 하고 두 링크가 연결되는 부분의 축을 w_2 라고 한다. 그리고 안구에 해당하는 카메라를 지지하는 축에 연결되는 안쪽 링크의 축을 w_3 라고 한다. 이러할 때 각 축의 방향 벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} w_{1Ao} \\ w_{2Ao} \\ w_{3Ao} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} w_{1Bo} \\ w_{2Bo} \\ w_{3Bo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j \\ k \\ i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} w_{1Co} \\ w_{2Co} \\ w_{3Co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \\ i \\ j \end{bmatrix}$$

이들이 각각 초기위치에서의 방향 벡터가 된다. 하나의 링크의 각 축이 90 deg를 이루고 있으므로 위와 같이 주어지게 된다.

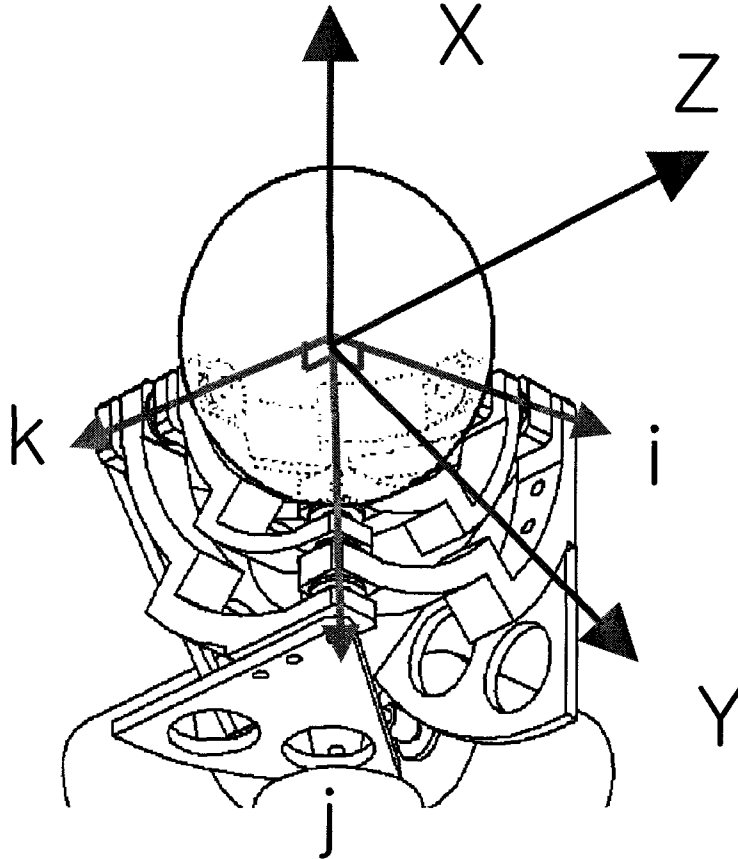


그림 32. 좌표계 설정

(3) 기하학적 조건과 모터의 회전각도 계산

병렬기구 는 하나의 링크 조합으로 각각을 나누어 계산하게 된다. 이를 적용 하면 다음과 같다. 두 링크가 교차하는 회전축인 w_2 는 다음과 같이 계산된다.

$$w_2 = e^{\hat{w}_{1o} \theta_1} w_{2o}$$

여기서 θ_1 이 모터의 회전 각도가 된다.

w_3 는 안구에 해당하는 카메라에 붙은 회전축으로 안구에 해당하는 카메라가 회전하면 같이 회전하는 벡터이다. 따라서 주어진 안구의 위치에서는 정해진 값을 갖는다.

여기서 기하학적 조건을 이용한다. 각 링크의 축들은 서로 90 deg를 이루고 있으므로 이를 적용하면 다음과 같다.

$$w_2 \bullet w_3 = 0$$

여기에 위에서 구한 w_2 를 적용하면 w_3 는 이미 알고 있는 값이므로 위 식은 θ_1 에 대한 값으로 주어진다. 이 식과 삼각함수의 일반식인 다음의 식을 적용하면 2차 방정식으로 주어진다.

$$\sin \theta_1^2 + \cos \theta_1^2 = 1$$

이렇게 계산된 θ_1 의 값은 4개가 존재하게 된다. 하지만 각 링크의 구조를 조합하여 보면 2개의 값으로 줄어든다. 이에 대해서 링크들이 카메라 바깥으로 나오는 경우를 제하면 원하는 값을 정할 수 있다.

이런 방법으로 3개의 링크 조합에 적용하면 안구의 회전 각도에 대해 각각 모터의 회전 각도를 구할 수 있다. 이를 시뮬레이션으로 적용하여 보면 안구의 회전 각도를 그림 33에서 보이고 이에 대한 각 모터의 각도 변화를 그림 34에서 보인다.

여기에서 비틀림은 Listing의 법칙을 적용하였다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\Psi_{\text{Fick}} \approx \frac{\theta_{\text{Fick}} \phi_{\text{Fick}}}{100}$$

식에서 볼 수 있듯이 비틀림 회전각도는 상하, 좌우의 회전 각도에 의존하여 정해진다.

(4) 시뮬레이션

시뮬레이션에서의 움직임은 안구가 원형 궤도를 그리도록 하였다. 여기서 계산된 각 모터의 회전값은 실제 안구 운동기구에 적용되어 질 것이다.

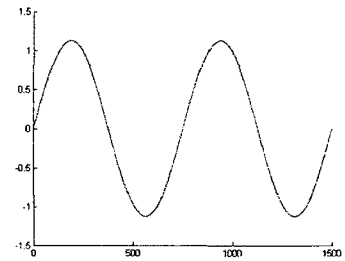
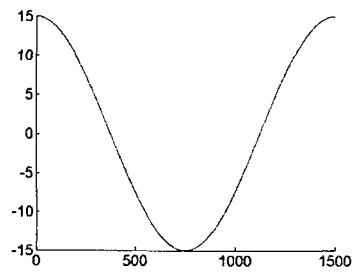
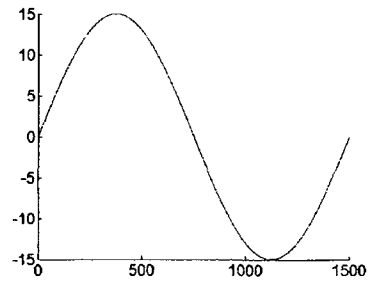
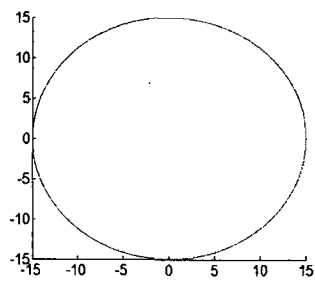


그림 33. a) 안구 시선의 원형 궤도
c) 좌우 회전각도

b) 상하 회전각도
d) 비틀림 회전각도

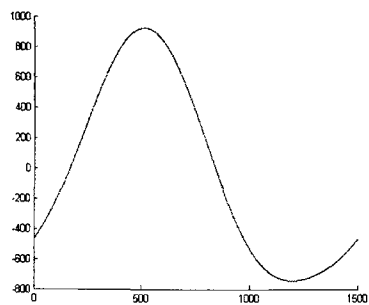
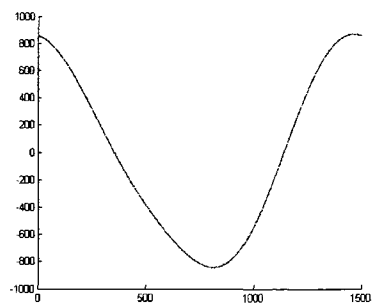
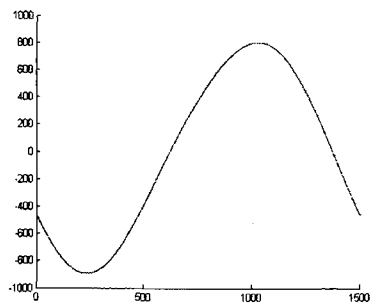


그림 34. 각 모터의 회전각도



그림 35. a) 비틀림 움직임
b) 아래로 향하는 움직임

이를 검증하기 위하여 동역학 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 그 결과를 그림 35에서 나타낸다.

이러한 시뮬레이션을 통하여 움직임의 범위를 계산하였다. 그 결과를 그림 36과 그림 37에서 나타낸다. 그림 36에서는 비틀림이 있는 경우와 없는 경우에서의 결과를 보여준다. 그림 37은 bias 비틀림을 준 결과이다.

이 결과를 통하여 본 연구에서 설계된 병렬식 안구기구는 상하 좌우 ± 33 deg의 작동범위를 가지며, bias 비틀림을 가할 경우 그 작동범위를 확장할 수 있음을 (± 41.5 deg) 알 수 있다.

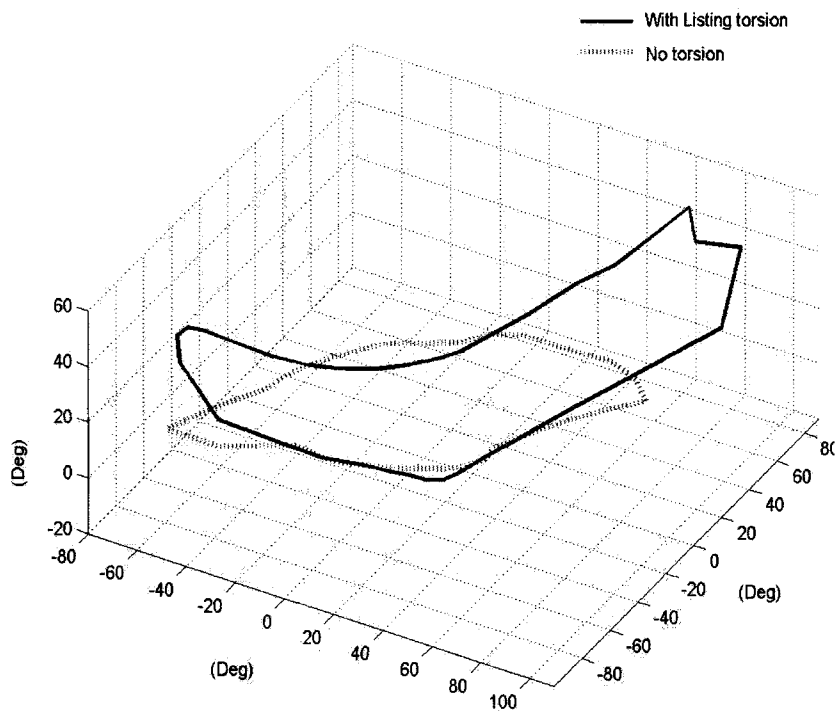


그림 36. 안구의 회전 영역

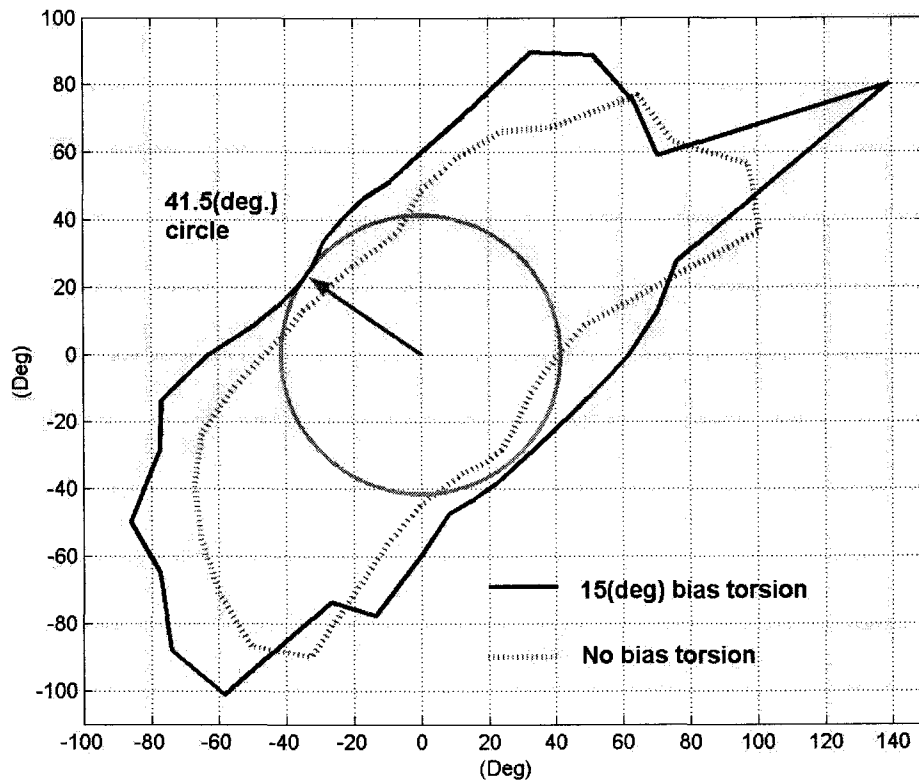


그림 37. Bias 비틀림이 있을 경우 안구의 회전 영역

(5) Ptototype 제작

3자유도 회전식 병렬구조의 안구운동기구의 prototype을 제작하였다. 그림 38에 prototype을 나타낸다. 작동 중에 링크가 안구 앞으로 돌출되지 않도록 모든 회전 링크들과 프레임 그리고 액추에이터가 안구의 역할을 하는 카메라 뒤에 위치하도록 되어 있다. 각 링크들은 회전축으로 연결되어 있고 각각 수직을 이루도록 하였다. 회전 중심은 인간의 안구의 회전과 같이 카메라 렌즈에서 13.5 mm 뒤에 위치하도록 하였다. 각 액추에이터는 프레임에 고정되고 각 링크 조합이 회전하여 안구의 역할을 하는 카메라를 구동하게 된다.

각 축의 위치를 고정하고 회전을 원활하게하기 위하여 모든 축에는 구름 볼베어링을 장착하였다. 또한 무게를 가볍게 하기 위하여 모든 프레임을 고강도 알루미늄합금(A7075)으로 제작하였다. 액추에이터로는 상용 DC 서보모터를

이용하였다. 회전부가 가벼우므로 큰 토크를 요하지 않으므로 DC 서보모터를 이용하였다. 그러나 DC 서보모터는 회전속도가 크고 감속을 필요로 하게 된다. 백러쉬를 최대한 줄이고 고속으로 안구를 움직이기 위해서 1단 감속을 하였다. 회전각도를 검출하기 위해서 모터에 장착되어 있는 엔코더를 이용하였고 (512 pulse/rev), 이를 feedback 신호로 받아들여서 모터를 제어하게 된다. 영상 입력을 위해서 CCD 카메라를 장착하였다. 광각의 25만 화소의 컬러 CCD 카메라로 22 mm x 22 mm x 22 mm 이다.

전체적인 폭이 72.5 mm 정도로 휴머노이드의 머리에 장착 가능한 크기이다. 2개를 붙였을 때도 링크의 간섭없이 각각 움직임이 가능하다. 사람 머리카기의 가면에 장착했을 경우를 그림 39에서 나타낸다. 제작한 안구운동기구의 체적은 약 180cm³로 본 연구에서 목표로 했던 300 cm³보다 충분히 작은 크기이다.

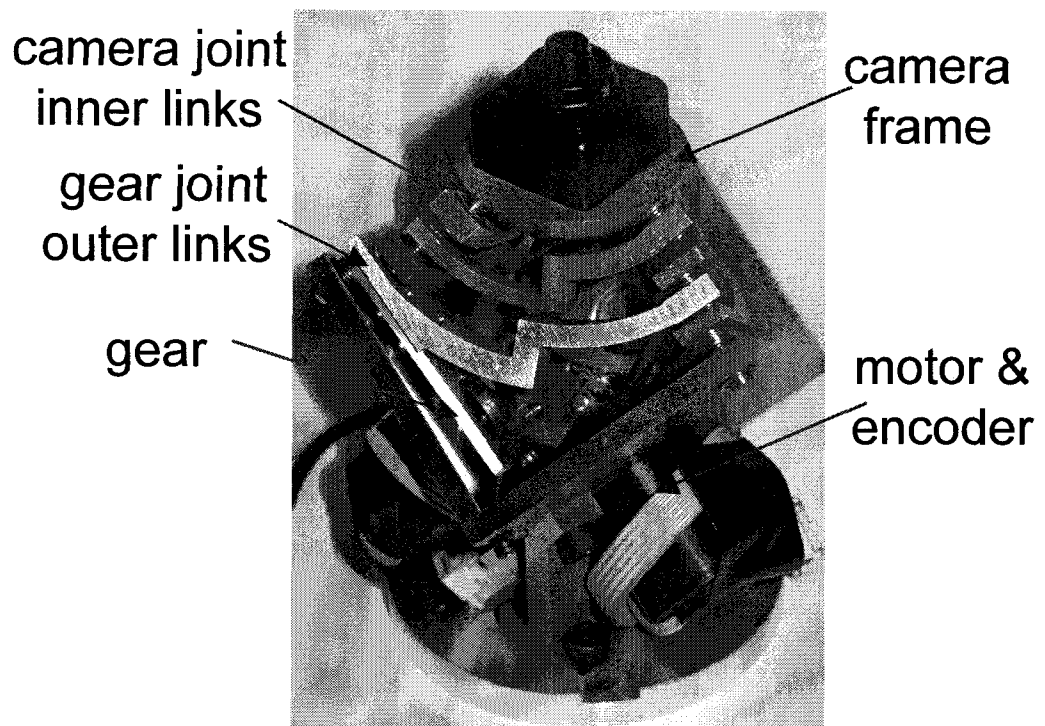


그림 38. 3자유도 회전 병렬구조의 안구 운동 기구 prototype

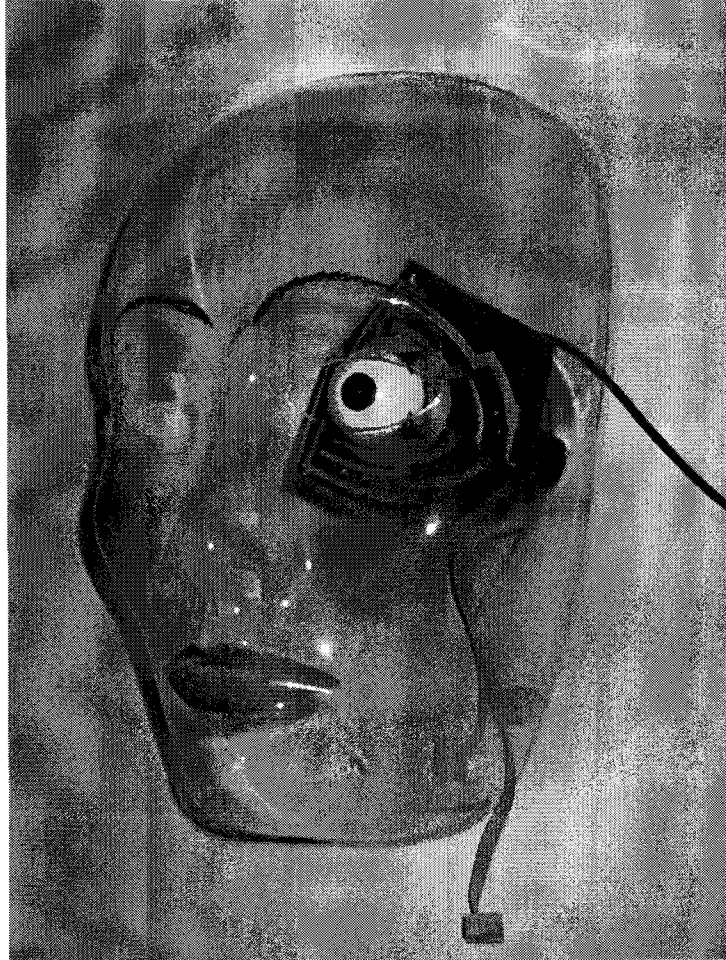


그림 39. 사람 얼굴 크기의 가면 뒤에 놓여진 경우

(6) 제어

3개의 DC 모터를 제어하기 위한 제어기를 제작하였다. DC 모터는 PWM 신호를 이용하여 구동하게 되는 데 PWM 신호를 발생하기 위하여 DC 모터 구동 칩을 사용하였다. LM629 는 프로그램이 가능한 범용 DC 모터 구동 칩이다. 이 칩은 엔코더 신호를 받아들여 입력된 회전 각도와 속도 그리고 가속도 값을 이용하여 모터 구동 신호를 PID 필터를 거쳐 PWM 신호로 내보내게 된다. 이 PWM 신호를 모터에 구동시키기 위한 H-Bridge 모터 구동 앰프 칩을 이용하였다. 모터 앰프인 LM18200를 사용하여 DC 서보 모터를 구동하였다.

LM629는 32비트 프로그램이 필요하다. 그래서 컴퓨터에서 PCI 타입의 DIO 보드를 이용하여 LM629에 모터의 회전각도와 속도와 가속도 그리고 필요한 변수 값을 입력하여 주었다.

(7) 정적 test

실제의 회전을 검출하기 위하여 CCD 카메라로부터 영상을 입력받아서 확인하였다. 현재 좌우 ± 30 deg 상하 ± 30 deg, 비틀림 ± 30 deg에 대하여 영상 입력을 받아서 회전각도를 확인하였다. 그에 대한 결과가 그림 41과 그림 42 그리고 그림 43에 보인다. 각 회전 방향에 대하여 정확하게 움직임을 확인할 수 있다. 영상 입력의 결과 중 15 deg에서의 모습이 그림 44에 보인다.

상하 움직임

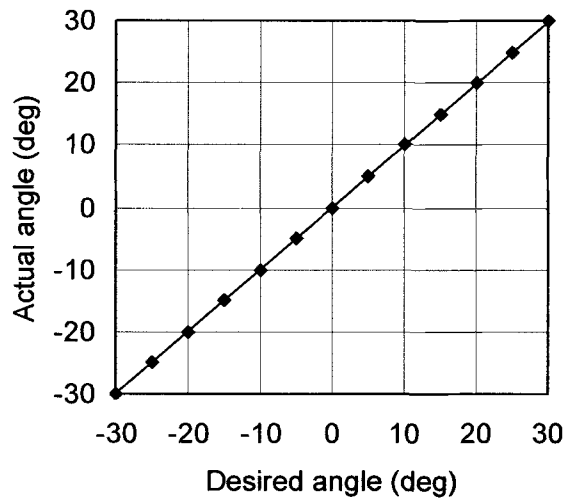


그림 41. 상하 움직임 test

좌우 움직임

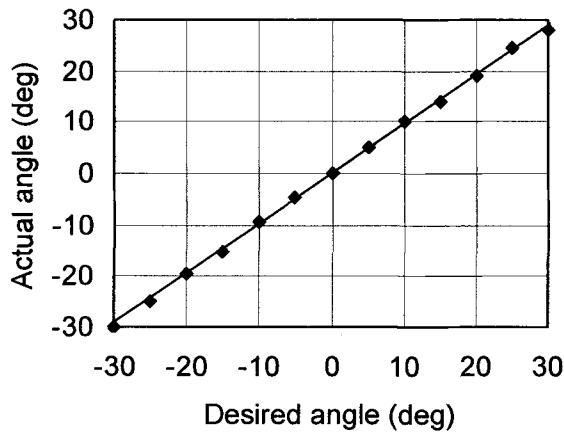


그림 42. 좌우 움직임 test

비틀림 움직임

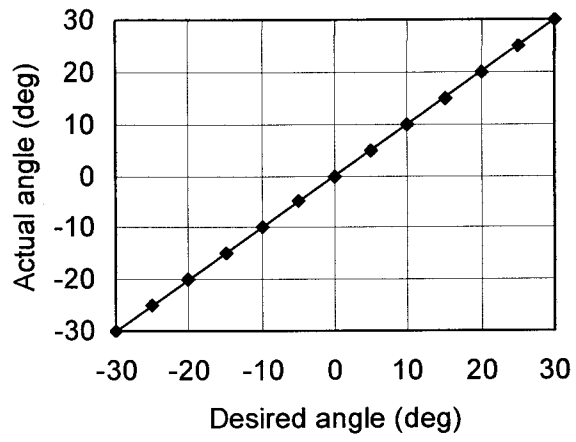


그림 43. 비틀림 움직임 test

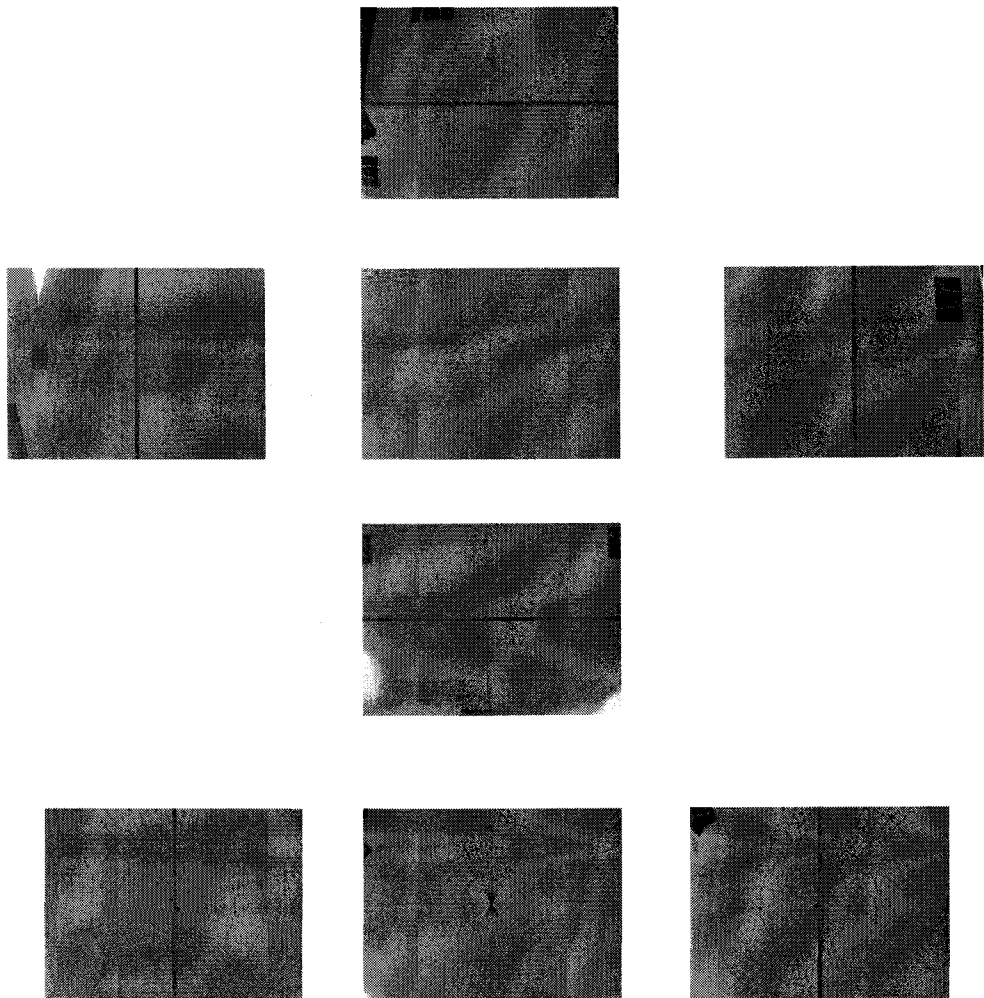


그림 44. 정적 움직임 test의 결과 영상

(8) 동적 test

인터넷을 읽을 때의 인간의 안구의 움직임을 앞에서 보였다. 동일한 test를 3자유도 회전 병렬 구조 안구 운동 기구에도 적용하였다. 각 모터에 인가된 신호와 모터의 엔코더 신호를 받아들여 값을 각 모터에 대하여 그림 45 - 그림 47에서 볼 수 있다. 두 신호를 비교하여 보면 개발된 안구운동기구는 목표 위치를 잘 추종함을 알 수 있다.

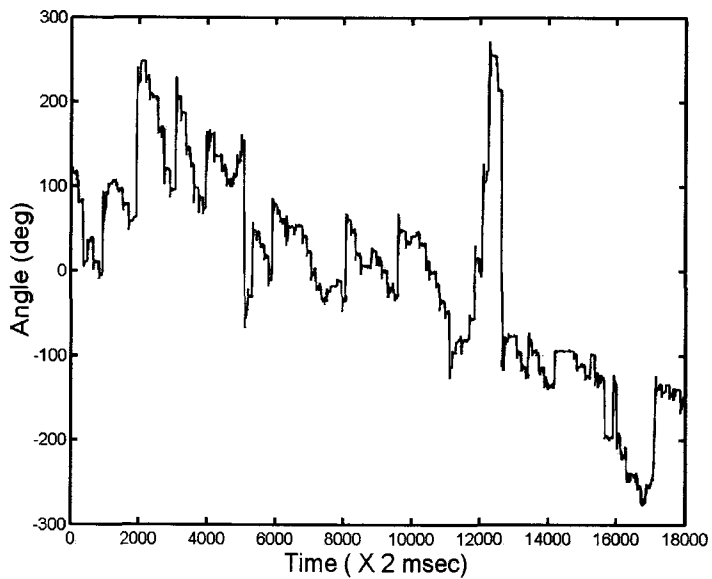
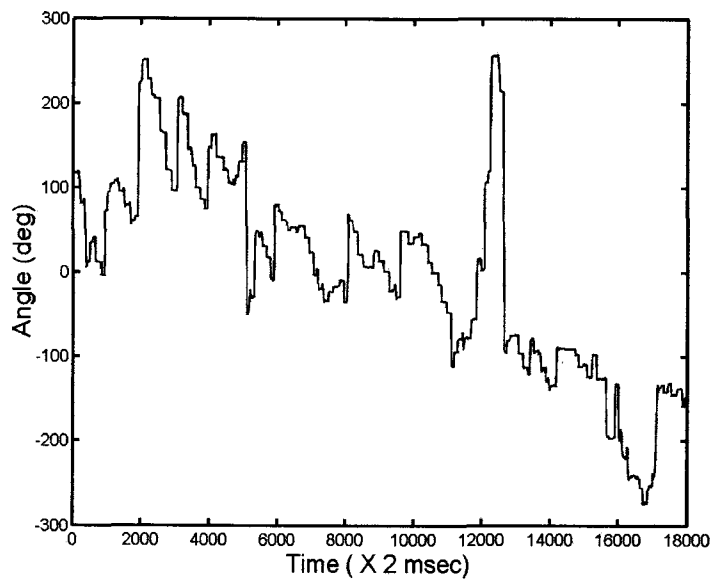


그림 45. a) 모터 1에 대한 입력신호
b) 모터 1의 엔코더 출력

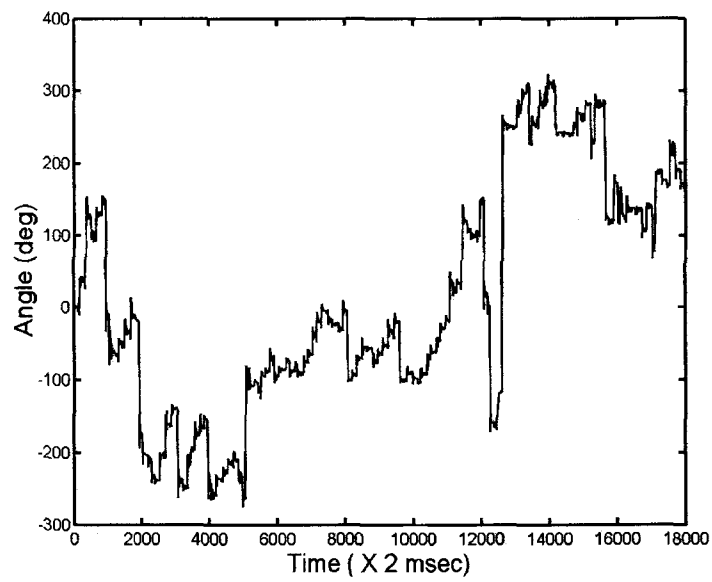
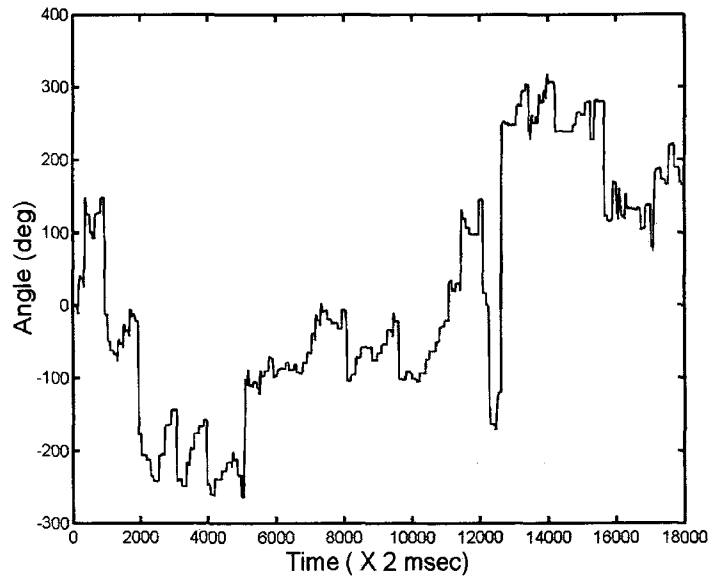


그림 46. a) 모터 2에 대한 입력신호
b) 모터 2의 엔코더 출력

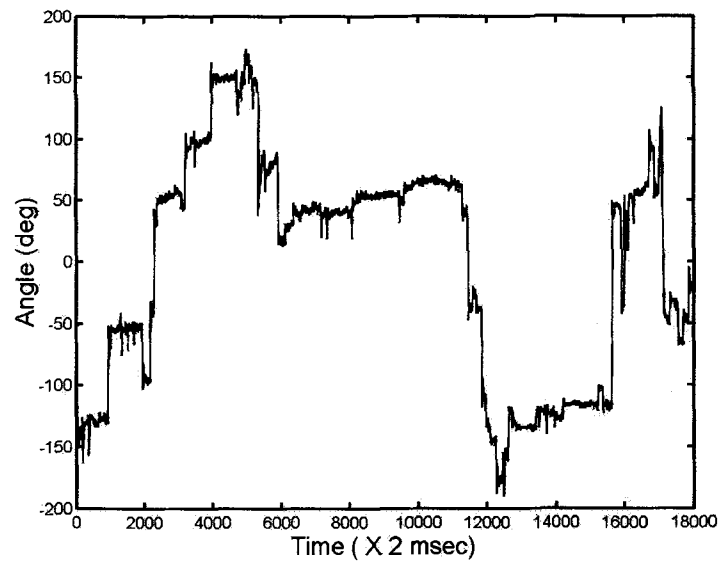
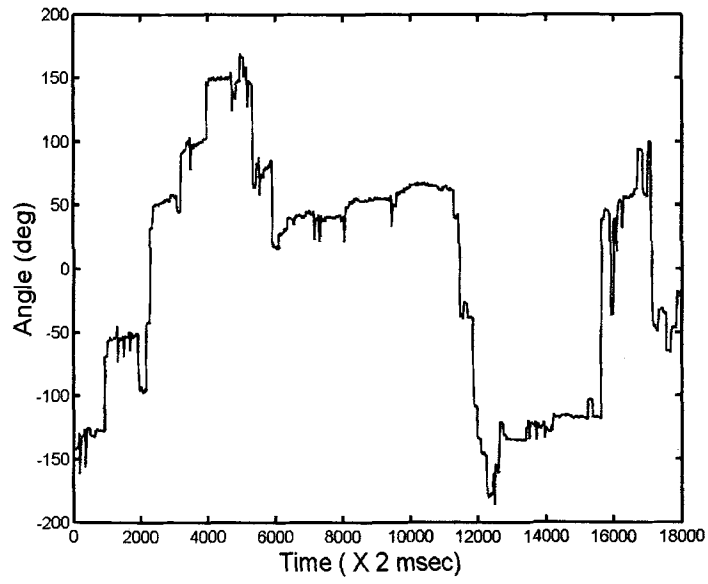


그림 47. a) 모터 3에 대한 입력신호
b) 모터 3의 엔코더 출력

4. 결론

본 연구의 개발 목표는 1차년도에 안구의 동역학적 모델을 구성하고 2차년도에 소형 액추에이터를 개발하고 3차년도에 300 cm³의 체적에 300 deg/s의 속도를 갖는 3자유도 안구운동기구를 개발하는 것이다.

1차년도에는 안구의 실제위치와 각 안근육의 실제 위치를 적용하여 안구의 움직임에 대해 안근육의 길이 변화 관계식을 유도하였고 시뮬레이션을 행하였다. 인간의 안근육 자체의 특성을 모델링하는 것(비선형 탄성체로서 모델링 하는 것)은 본 과제에서 제안했던 범위를 넘어서는 부분으로, 본 연구에서는 안구의 회전 운동에 중점을 두고 모델링하였다. 안구의 움직임을 이해하고 3자유도 운동기구를 제작하는 데 충분한 결과를 얻었다.

2차년도에는 안구운동기구에 사용할 소형 액추에이터를 개발하는 것이 목표이다. 이에 소형 고성능 voice coil motor를 개발하였고 이를 적용하여 3자유도 안구 운동기구를 제작하였다. 제작된 VCM을 이용한 3자유도 안구운동기구의 운동성능은 최종목표인 300 deg/s를 상회하고 인간 안구 운동성능에 근접하였다. 스텝응답으로 고속 회전운동을 할 때 오버슈트 다소 발생하였으나 제어장치를 개선함으로써 해결될 수 있는 문제라고 생각된다.

3차년도에는 3자유도 안구운동기구를 제작하는 것이 목표이다. 본 연구에서는 회전식 병렬기구의 구조를 갖는 3자유도 안구 운동기구를 제작하였다. 당초 목표인 300 cm³의 체적에 300 deg/s에서 속도의 부분은 2차년도에 제작된 안구운동기구로도 만족한다. 하지만 체적의 부분에 있어서는 조금 못 미치고 있다. 3차년도에 제작된 안구 운동 기구는 200 cm³ 이하의 체적으로 체적조건도 충분히 만족하고 있다.

본 연구에서는 인간의 안구운동에 대한 기구학적 해석을 하였다. 안구운동기구에 사용할 수 있는 소형 액추에이터를 개발하는 노하우를 축적하였고, 회전식 병렬기구에 대한 기구학적 해석과 구동 및 설계에 관련된 기술을 축적하였다. 또한 안구운동기구를 구동하는 제어기를 구성하고 제작하는 것에 관련된 기술을 축적하였다.

본 연구에서 개발된 3자유도 안구운동기구는 시신경 및 신경신호 처리회로와 연결하여 신경 생물학적 실험장치로서 사용될 수 있다. 또한 개발된 3자유도 안구운동기구는 휴머노이드의 머리에 장착되는 고성능 시각입력장치로서 사용될 수 있다.

3절 인공안구의 신경제어

1. 심리학적 원리를 적용시킨 인공신경망을 이용한 3차원 평행구조 인공안구의 움직임 보정

가. 개요

신경세포의 생리적 특성을 모방한 신경회로망은 특유의 융통성과 범용성으로 인하여 여러 분야에 연구 적용되어 왔으며 최근에는 신경생리, 유전학, 진화학, 카오스 이론, 인공생명 등 보다 생물학적인 원리를 도입시킨 신경회로망의 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 동물의 학습 및 행동판단에 있어서 심리학적인 원리를 적용시킨 새로운 형태의 신경회로망을 설계 및 제작하였다. 본 신경망은 감각계(입력)로부터 발생하는 신호를 스트레스로 간주, 스트레스의 증감에 따라 쾌/불쾌의 감정이 발생하며, 감정에 의하여 일정기간의 감각상황의 기억을 증진시키는 구조를 채택함으로써 1)시간적 연상기억, 2)STM과 LTM의 구분, 3)가변적인 hidden layer 구조, 4)학습-시행의 동시성 등의 특성을 획득하였다. 테스트로 서울대학교 기계항공공학부 메카트로닉스 연구실(교수 방영봉)에서 제작한 평행구조 3차원 인공안구의 운동 조정에 일부 적용시켰으며, 목표지점까지 계산식에 의해 곧바로 이동하는 것이 아니라, 알고 있는 중간지점을 연결시켜 이동하는 것을 학습함으로써 약 53%정도의 위치 에러를 감소시켰다.

나. 연구배경 및 원리

인공 신경회로망(Artificial neural network, ANN 또는 NN, 신경망)은 동물의 신경세포(neuron)를 일종의 논리적 소자로 간주하고, 이를 모방하여 수많은 세포들 간의 적당한 연결을 통해 특정 기능을 수행하고자 하는 계산학적 모델을 말한다.(McClouch & Pitts, 1949)

신경망은 그 특성상 명확하게 정의되기 어려운 문제공간에서의 최적해 optimal solution 를 적응적 adaptive 인 방식을 통해 찾아내는 과제에 적합하기 때문에,

다양한 변수가 복잡하게 복합적으로 적용되는 문제 - 패턴분류, 문자인식, 주가 예측, 신용판단 등의 분야에 적용되어 왔다.

초기의 신경망이 커넥셔니즘(connectionism : 연결주의)에 기반한 일종의 연산 알고리즘의 하나로써 발전해 왔지만, 점차 보다 실제의 동물 시스템에서 얻어진 생리학적인 사실들을 적용시키려는 시도들이 나타났다. 단순히 on 과 off 로만 표현되던 초기의 신경세포와는 달리, 실제의 신경세포의 발화패턴을 흉내 내거나 (Hodgkin & Huxley, 1952) 몇몇 특정한 신경세포의 흥분패턴을 적용시키기도 하였다. 그런가 하면 세포의 발화 특성보다는 보다 거시적인 규모에서의 생물학적 특성을 모방하기도 하였는데, Grossberg는 기존의 신경망이 일정한 패턴을 학습한 후, 새로운 패턴을 재 학습하려면 기존의 정보가 지워진다는 것이 인간의 기억구조와 유사하지 않다고 판단하여, 새로운 지식을 자동적으로 전체 지식베이스에 일관성 있는 방식으로 통합하여 추가 저장할 수 있는 ART (Adaptive Resonance Theory)와 같은 신경망을 제안하기도 하였다.(Grossberg, 1981) 그는 차후 basal ganglia와 lamina cortex등의 뇌 구조를 모방한 급속안구운동 saccade eye movement를 제어하는 신경회로를 설계하기도 하였고, albus는 CMAC(Cerebellar Model Articulation Controller)라는 이름으로 소뇌 cerebellum 의 기능을 모방하는 신경회로망을 발표하였다.(Albus, 1975)

인간의 기억에 관한 원리가 조금씩 알려지면서, 단기기억(STM : Short Term Memory)와 장기기억(LTM : Long Term Memory)가 존재하며, 학습이라는 것이 이 단기기억이 장기기억으로 전환되는 과정이란 사실이 제안되자 M. Tsukada 는 해마 hippocampus 에서의 STM이 LTM으로 전환되는 과정에 관하여 시간적으로 일정한 크기의 '창'으로 통해 이루어지는 계산적 모델을 제안하였는데, (M. Tsukada, 1992) 이는 독자적이기는 하나 본 논문에서 고안한 모델과 부분적으로 유사한 개념이기도 하다.

이러한 시도들은 비단 신경망과 뇌구조간의 접합 뿐 아니라, 인공생명이나 셀룰라 오토마타(CA : cellular Automata), 진화연산, 유전자 알고리즘(GA : Genetic Algorithm)등을 다양하게 접목시키는 시도도 있어왔는데, de Garis는 생물의 유전자와 표현형 사이의 유전학적 연관관계에 착안하여 셀룰라 오토마타로 이루어진 유전자에 의해 생성되는 인공뉴런들로 이루어진 신경망을 제안하기도 하였으며,(H. de Garis, 1996, 1997) 셀룰라 오토마타 머신(CAM)을 기반으

로 한 인공 두뇌(artificial brain)를 제안하였다. 현재 2차원 및 3차원 CAM-Brain 모델을 발표하였고 반도체 하드웨어로도 구현하였다(H. de Garis, 1994). 여기에 유전자 알고리즘 GA 을 가미시킨 모델들이 조성배 교수 등에 의해 제안되었으며,(cho,2001) 이러한 특성을 가진 카오스적 펄스 뉴런 신경망 ECANS(Evolving Cellular Automata Neural Systems)이 심귀보 교수에 의해 설계되기도 하였다.(Sim, 1998) 이러한 유전자 - 세포 수준에서의 신경망은 살아 있는 세포 그 자체의 원리를 도입하기도 하였는데, 세포의 신진대사를 이용한 세포의 분화모델을 이용한 연구가 Kitano에 의해 이루어졌다. 이 모델은 주변의 세포에 의하여 영향을 받은 한 세포의 내부 상태가, 특정한 문턱값을 넘으면 분열하는 세포들로 이루어진 신경망으로 이루어진다.(gitano, 1994) 이러한 시도들은 신경망이 단순히 하나의 연산 방법론이 아니라, 실제의 두뇌구조와 특성을 모방함으로써, 그러한 기능까지 모방, 혹은 창발할 수 있기를 기대하는 것이며, 이런 기대는 그대로 로보틱스나 인공지능 시뮬레이션 등에 적용되어진다.

이처럼 신경망 자체에 대해서도 생물학적인 개념들이 도입되어 연구되기도 하였지만, 망 수준을 넘어서 전체적인 제어 아키텍처에 있어서도 기존의 if-then 의 프로그램 방식과는 다른, 생물학적 원리가 도입된 모델들이 제안되어 왔다. 예컨대 로봇의 행동판단 및 학습에 있어서 Sutton의 TD(Temporal Difference)(Sutton, 1988)법 및 이것의 발전된 형태인 Watkins의 Q-learning(Watkins, 1992)등이 제안되었다. TD법은 현재 행동의 결과 및 미래에의 영향을 예측하여 강화신호를 생성하고 이것을 신경망에 가해 학습시키는 방법이고 Q-learning은 문제의 상태 및 행동공간을 Q-table로 만들고 그 상태에 대한 행동의 적합도를 Q-value로 가지며 행동에 따른 결과로 이 값을 갱신함으로써 학습을 하는 방법이다. 이러한 형태는 단순히 주어진 조건에 대해 기계적으로 반응하는 것이 아니라, 자신이 한 행동을 평가하고 기억함으로써 더 나은 행동양식을 스스로 학습하게 된다. 이러한 자기행동 평가에 신경망적 요소를 도입한 연구로는 Ackely의 연구가 있는데, 이는 로봇(agent)의 제어기를 행동망(action network)과 평가망(evaluation network)으로 나누어 신경망으로 구성하여 평가망은 유전 알고리즘에 의한 진화를 시키고 행동망은 평가망의 강화신호에 의해 학습을 하게되는 구조의 ERL(Evolutionary Reinforcement Learning) 알고리즘이다.

하지만 이렇게 다양한 최신의 기법들을 접목시키는 시도도 중요하겠지만, 정작 인간의 뇌는 거의 뉴런이라는 유사한 특성을 갖는 기능적 단위들의 복합체로 구성되어 있으며, 진화의 법칙은 매우 단순한 원리로부터 시작되어 그 위에 점차 확장시켜나간다는 사실 등을 고려한다면 지나치게 복잡하고 다양한 원리의 접목 보다는 단순하면서도 범용일 수 있는 구조로부터 확장시켜나가는 모델이 더욱 유용하리라 여겨진다.

그렇기 위해서는 보다 생물학/심리학적 원리에 입각한 신경망이 필요하며, 그 신경망이 실제 동물의 신경계에서 일어나는 현상의 아날로지이기 위해서는 기존에 밝혀진 중요한 심리학적인 원리들과 어느 정도 부합되어야 할 것이므로, 동물의 학습 / 행동판단에 있어서 기본이 될 수 있는 원초적인 현상에서부터 그 원리를 얻어야 할 것이다.

본 신경망의 구성 원리에는 몇 가지 널리 알려져 있는 심리학적, 신경생리학적 내용들이 참고되었다. 특히 본 신경망에서는 감정의 특성과 역할에 관하여 새로운 관점을 취하고 있는데, 이와 유사한 방식의 접근은 연구된 바가 없다. 물론 많은 경우 감정에 기반한 행동 결정을 연구하고 있으나(감정기반 로봇 emotional based robotics), 그것은 감정이라는 몇몇 내부상태 inner state를 설정해 놓고, 특정 상황에 대하여 기계적으로 매칭시키는 방식이 대부분이기 때문에(예컨대, 로봇 강아지의 머리를 쓰다듬어 주면 '행복'포인트가 올라가며, 로봇은 꼬리를 흔드는 행동을 일으킬 확률이 높아짐), 생물학적 의미에서의 본질적인 감정과는 별로 연관이 없다고 할 수 있다. 또한, 행동의 원인이 되는 정동 motive 에 관해서도 센서의 입력에 대해 무조건적으로 반응하거나, 혹은 프로그램되어진 항상성 homeostasis을 유지하기 위한 경우가 대부분이다.

다. 심리학적 신경망의 구조

불만족스러운 상황이 야기하는 내부신호(예컨대, 에너지의 저하나 물리적 충격)과 감각신호들은 그 자체로써 일종의 신경에너지(충동)를 만들어 내고, 이 신호는 동물의 내부에 쌓여 운동을 일으키는 원동력, 즉 긴장(스트레스)가 된다. 높은 상태의 스트레스는 불쾌로 인식되어 이 긴장을 운동이라는 방식으로 방출시키려는 것이 동물의 기본적인 행동양식임을 설명한 것이 프로이트의 긴장완화이론인데, 여기에서도 이를 본따 감각신호의 누적을 스트레스로, 스트레스의 급격한 증가 /

감소를 감정으로 정의하였다. 이처럼 스트레스의 발생이 크게 변화하는 상황, 즉 외부 환경이 크게 변화하는 상황은 유기체에게 매우 중요한 상황이며, 유기체는 이러한 상황에 이르게 된 앞뒤정황을 기억하는 것이 생존에 유리하기 때문에, 평상시보다 감정적으로 고양된 상태에서의 기억이 보다 강하게 이루어진다. 본 신경망에서도 이처럼 감정이 발생하는 순간에, 강제적으로 일정기간의 상황기억을 형성하도록 링크를 강화시키는 전략을 채택하고 있다.

일반적인 신경망이 입력신호 x , 가중치 행렬 w , 은닉층 p , 그리고 출력층 y 를 갖는 구조와는 달리, 본 신경망은 입력신호와 출력신호, 그리고 은닉층에 해당하는 층이 단 하나의 벡터로 구성된다. 이는 본 신경망의 특성상 입력층-은닉층-출력층으로 순차적으로 구성되지 않고, 가변적이고 보다 일반화된 구조를 가지고 있기 때문인데, 이는 층 layer 라는 개념보다는 풀 pool 의 개념에 가깝다. 물론 입력과 출력을 담당하는 노드는 따로 존재하므로 전체 셀들을 포현하는 벡터인 B 는

$$B = S + I + M$$

으로 구성된다.(S = 입력셀, I =중간 셀, M = 출력셀). 이들의 상세한 구조는 다음과 같다.

입력벡터 S : 자신을 중심으로 목표점이 존재할 수 있는 위치를 표상하는 30개의 셀, 직전에 움직인 방향을 표시하는 8가지 셀, 감정의 발생 여부를 표상하는 1개의 셀로 총 39개의 셀을 입력 벡터 P 로 하였다. 여기서는 스트레스의 값은 입력으로 사용되지 않았다. P 의 값은 0/1이다.

출력벡터 M : 8가지의 방향으로의 움직임에 대하여 8개의 셀을 벡터 M 으로 하였다. M 의 값은 0/1이며, 문제의 특성상 중앙에서는 8개의 방향으로 모두 이동 가능하지만, 다른 곳(예컨데, 45도 방향 15도 지점)에서는 2가지(전진, 후진)의 운동만이 허용되었다. 매 스텝 당, 가장 활성이 높은 셀 하나가 승자 전취 winner-take-all 방식으로 강제 선택된다.

중간벡터 I : 여기에서는 단기기억의 길이가 1이기 때문에(바로 직전의 상황만을 기억함). 입력 S에 대하여 같은 수의 셀을 벡터 I로 하였다. 역시 0/1 의 이진 값을 갖는다.

가중치 행렬 W : 위의 총 86개의 셀을 나타내는 전체 벡터 $B = S + I + M$ 은 서로 방향성 있는 연결이 가능하므로, $86 * 86$ 의 2차원 행렬 W가 가중치를 표현하였다. 초기 가중치는 무작위 값으로 채워졌다. S에서 S로의 연결이나 I나 M에서 S로의 연결은 없으며, M에서 다른 셀로의 연결은 없다. 이 가중치는 연결된 셀 간의 활동 전파가 없는 한(사용되지 않는 한) 한 스텝 당 0.02% 씩 자연 감쇠하기 때문에, 유용하지 못한 연결의 경우에는 자연스럽게 소멸된다.

반사 Reflex : 필요에 따라 타고나는 반사작용을 넣을 수 있다. 예컨대 S의 셀과 M의 셀 사이의 가중치를 임의로 높인다면, 특정 입력에 대해 특정출력으로 연결된다. 이들 반사는 다른 학습에 의하여 압도될 수 있으며, 사용되지 않으면 (W의 감쇠에 의해) 퇴화된다.

stress : 목표에 도착하지 않는 한, 매 스텝 당 일정량의 stress가 계속 누적 증가한다. (감각자체가 스트레스이다.)

emotion : stress가 급격히 떨어지면 발생. 여기서 목표에 도달하면 발생된다. 감정이 발생하면, 활성이 남은(activation이 1 이상인) 셀들 사이의 W를 강화한다. 이 때 활성이 작은 쪽(0.5)에서 큰 쪽(1)으로의 연결이 강화된다. 이는 더 오래된 상황(활성이 0.5)에서 최근의 상황 쪽으로 방향성을 주기 위해서이다.

활성 Activation : 역치를 넘은 세포는 연결된 다른 셀로 활성을 전파하며 전체 셀들의 풀인 $B' = W * evaluation(B)$ 로 update되고, 자신의 활성은 스텝 당 - 0.5 로 감쇠한다. (활성은 단 1회만 전파하며, 활성이 남은 셀은 재 활성화가 억제 activate inhibition 되어 두 개의 연결된 셀들에 의하여 환형 circuit 으로 되먹임 되지 않는다.) 그러므로 시간 t 에 대하여 셀 풀인 B는

$$B_k(t) = f\left(\sum_{l=1}^N W_{lk}(t-1) * B_l(t-1)\right)$$

으로 주어지며 (N은 전체 셀의 수, k는 셀의 번호, W는 가중치)
평가함수 $f(x)$ 는

$$f(x) = 1, \text{ if } B_k(t) \geq 1$$

로 주어진다.

구해진 활성화는

$$B(t) = B(t-1) - 0.5$$

로 선형적으로 linear 감소하며, (활성이 없는 셀은 적용되지 않는다.)
매 순간의 스트레스는 감각 입력과 운동 출력으로부터

$$stress(t) = stress(t-1) + R_1 * \sum_{k=1}^{N(S)} S_k + R_2 * S_{emotion} - R_3 * \sum_{k=1}^{N(M)} M_k$$

로 얻어진다. (N(S)는 S(입력신호)벡터의 크기, N(M)은 M(운동신호)벡터의 크기, S emotion 은 S 중에서 emotion을 코딩하는 셀, R1과 R2는 각 입력신호가 생성하는 스트레스의 크기를 조절하는 상수이다. 스트레스는 감각입력보다는 과제 수행 여부 - 여기서는 감정의 발생 여부 - 에 크게 의존하여 발생하기 때문에 R1의 크기는 작다. R3는 운동신호로 인해 스트레스가 감소되는 양을 조절한다. 스트레스는 운동에 의해서 제거될 수 있다.)

감정이 발생하게 되면

$$W(t)_{lk} = \forall W(t-1)_{lk, B \geq 1} * 1.2$$

로 활성이 남아있는 셀 사이의 가중치는 강화된다. 이 때 W_{kl} 는 B_l 에서 B_k 로 연결되는 방향성 있는 가중치이며, $B_l - B_k > 0$ 이라면(최근의 경험에서 오래된 경험으로의 연결이라면) 가중치는 강화되지 않는다. 이러한 특성으로 인하여 시간적으로 연상되는 기억을 구현하게 된다.

만약 두 셀 간의 연결이 전혀 사용되지 않는다면,(활성이 전파되지 않아서) 두 셀 간의 가중치는

$$W_{kl} = W_{kl} * 0.98$$

로 자연감쇠 auto-decay 한다.(감쇄율 0.98은 경험적으로 얻어진 것이다.) 본 신경망은 셀 간의 가중치를 약화시키는 알고리즘이 따로 없기 때문에, 이러한 자연감쇄에 의해서 가중치가 선택적으로 강화되게 된다.

이러한 신호 전파에 의하여 출력벡터인 M 이 활성화되고, 활성화된 M 중에서 가장 강한 활성을 가진 셀의 운동신호가 외부로 방출된다.

$$MS = \max(M_k)$$

MS 는 모터 신호이다.

결국 입력신호 S 에 대하여

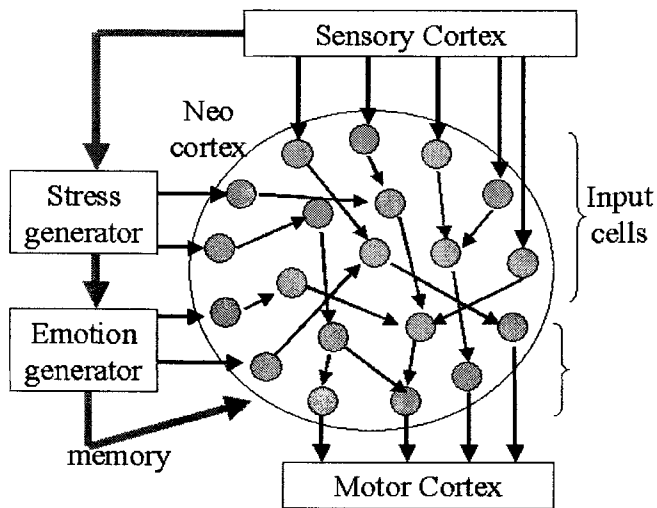
$$M(t) = \max((W * B(t-1))_M)$$

$$B = S + I + M$$

로 출력신호가 주어진다. (\max 는 M 에 대해서만 적용)

본 신경망의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 감정에 의한 학습 : 감정발생시에만 가중치 강화
- 2) 단기 기억의 형성
- 3) Stress 에 의한 비교사 학습
- 4) 가중치의 자동 감쇠
- 5) 시간적 연상 기억
- 6) 시행과 학습의 병행 Run & Learn
- 7) 유동적 층구조 Cell-Pool



스트레스-감정-학습 이론을 도식적으로 나타낸 그림. 입력된 감각으로부터 스트레스를 생성하고, 그 스트레스로부터 감정을 생성하여 기억을 일으킨다. 감각기관으로부터의 입력과 스트레스, 감정 정보는 입력 셀을 통해 풀 pool로 유입되고, 이들 신호는 내부적으로 전파되다가 출력 셀을 만나면 pool 밖으로 방출된다.

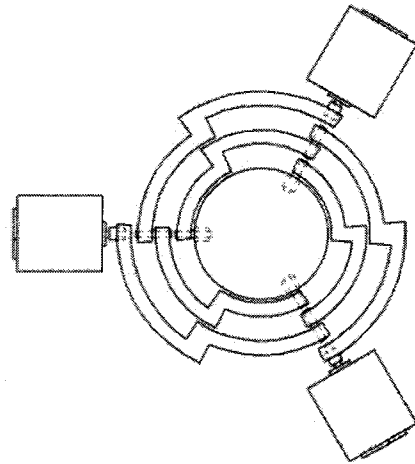
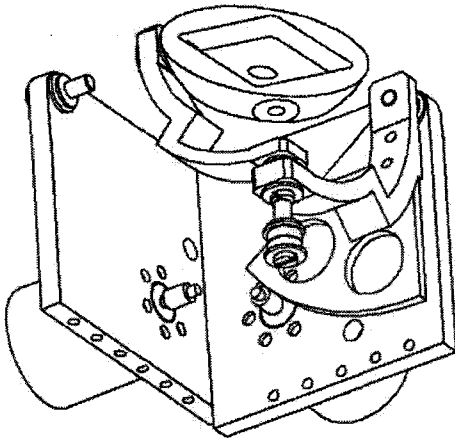
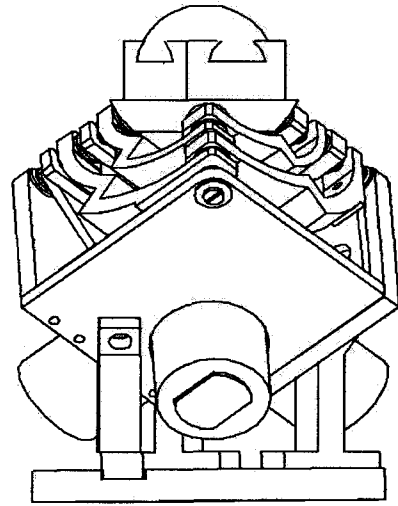
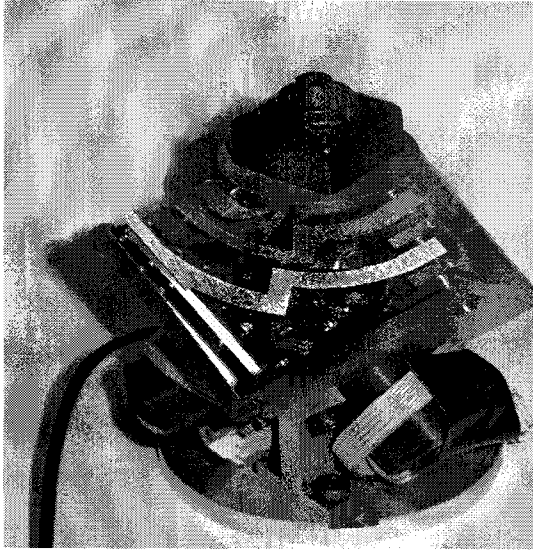
라. 3차원 평행구조 인공안구 기구

기본적으로 안구는 기준위치로부터 3 방향의 직선 운동과 3 방향의 회전 운동으로 기술 될 수 있으나, 안구가 회전하는 동안 안구의 회전 중심(각막 표면으로부터 13.5mm 뒤)는 비교적 일정하게 유지되기 때문에 직선운동을 무시한 3개의 자유도를 갖는 회전운동으로 기술할 수 있다. 즉, 수평방향의 운동 horizontal, 수직방향 운동 vertical, 그리고 뒤틀림 운동 torsion or cyclo-torsion 이 바로 그것이다. (Carpenter 1988) 전통적으로 3 개의 자유도를 가진 회전 시스템은 서로 직교하도록 배치되는 세 개의 모터로 구성되는데, 이 때 세 개의 모터에 걸리는 부하는 동등하지 않다.

이에 대하여 동일한 세 개의 링크를 갖는 평행한 기어구조가 제안되었는데 (C. M. Gosselin, 1996), 이는 각 액추에이터에 걸리는 부하의 균등함이라는 점에서는 실제의 안구근육이 안구를 제어하는 방식과 비교적 가깝다고 말할 수 있다.

그러나 이러한 평행구조 구동의 경우, 특정한 위치로의 이동에 대한 각 액추에이터의 작동방식은 매우 복잡하게 되며, 대개 비선형이 된다.(C. M. Gosselin, 1993). 즉 하나의 액추에이터의 동작은 다른 액추에이터의 움직임과 잘 맞물려 이루어져야 하는데, 근육의 경우에도 하나의 근육이 수축하기 위해서는 다른 근육들 모두가 적당한 크기로 수축, 혹은 이완되어야 움직임이 일어날 수 있다.

평행구조의 구동방식에 관해서는 주로 로봇팔의 어깨관절과 같은 3자유도를 갖는 자유로운 구동에 대해 연구되었으며(D. Stein 2000), 최근에는 구면 모터 spherical motor 를 활용한 여러 가지 형태의 평행구조 구동이 제안되었다(S. Chirikjian, 1999) 특히, 이러한 구조에 카메라를 장착한 agile eye가 제안되어 있다(C. M. Gosselin, 1996). Agile-eye는 마치 자동차 동력 축의 universal joint와 유사한 방식으로, 하나의 축이 중간에 두 개의 다른 수직 축에 대하여 자유롭게 회전을 허용하는 회전 축을 제공함으로써, 초기 위치에서 한 축이 회전한 후, 또 다른 축의 움직임이 발생하더라도 기존의 축의 위치를 유지할 수 있기 때문에, 평행하게 장착된 세 개의 수직 축이 서로의 움직임을 방해하지 않고 자유롭게 구동할 수 있다.



평행구조의 3차원 인공안구. 위의 두 개의 그림은 평행 구조 링크의 원리를 보여주고 있다. 하나의 모터로부터 나온 기어가 중간에 두 개의 회전부를 가진 채 270도를 회전하여 안구에 부착되어 있다. 이런 구조로 인하여 하나의 축에 대하여 다른 축이 회전하더라도 위치를 지킬 수 있다. 아래의 그림은 베이스에 장착된 인공안구의 그림과 실제 사진

서울대학교 공과대학 기계항공공학부 메카트로닉스 연구실(교수 방영봉)에서 제작한 평행구조의 3차원 인공안구는 laval 대학의 agile-eye를 기본형으로 하여 개선한 형태이다. 이 인공안구는 3개의 DC모터를 사용하며, 모든 링크부가 카메라의 후방에 위치함으로써(agile eye는 링크의 일부가 카메라보다 앞쪽으로 튀어나온 구조이다. 그림 3 참조) 인간형 로봇의 얼굴부에 장착하기에 보다 적합하다. potentiometer는 설치되어 있지 않다.

또한 보다 소형화된 크기로서, 높이는 약 106mm, 폭은 72.5 mm이고, 두랄루민 합금으로 링크부와 베이스가 제작되었으며, 감시용 소형 CCD 카메라(일명 바늘구멍 카메라. KT&C사의 KPC-S20C모델)를 장착하였다. 카메라는 가로 22 mm, 세로 22 mm, 높이 22 mm이며, 소니사의 Super had 1/4" CCD(R)를 장착한 250,000 화소의 NTSC방식의 RGB칼라 영상을 제공한다 (AVI 방식). 카메라의 유효 가시범위는 약 가로 -22 ~ 22 도이며, 세로는 약 +- 18도이고, 곡률 약 7 %의 광각 영상을 받아들인다.(외곽으로 가면 가운데가 약간 블록하게 보여진다.) 1/60 - 1/100,000sec Auto의 electronic shutter를 갖는다.

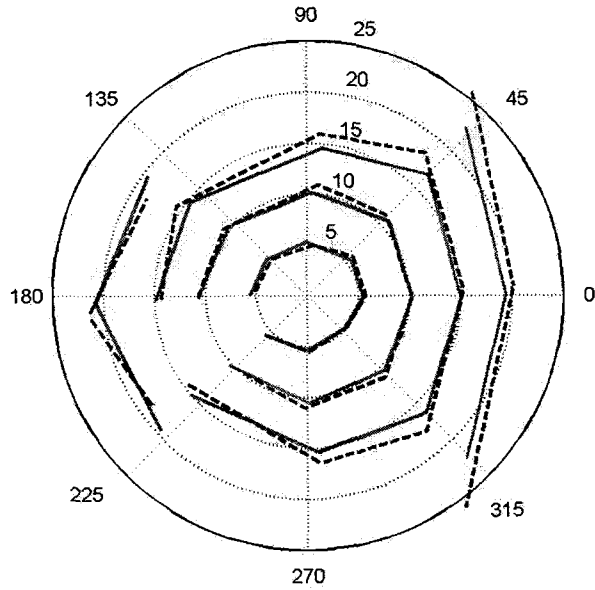
촬영된 영상은 S-video input을 갖는 대만 Aver Media사의 Image capture board인 EZ-Capture(R)를 사용하여 30 frame / sec으로 입력되었다. 입력된 영상은 가로 320픽셀, 세로 240 픽셀의 24 bit RGB 영상으로, Microsoft사의 프리웨어 vision연구용 SDK인 Microsoft VisionSDK(R) ver 1.0을 사용하여 image processing하였다. 영상 데이터의 분석과 학습에는 MATHWORKS 사의 MATLAB 6를 일부 이용하였다.

마. 실험 결과

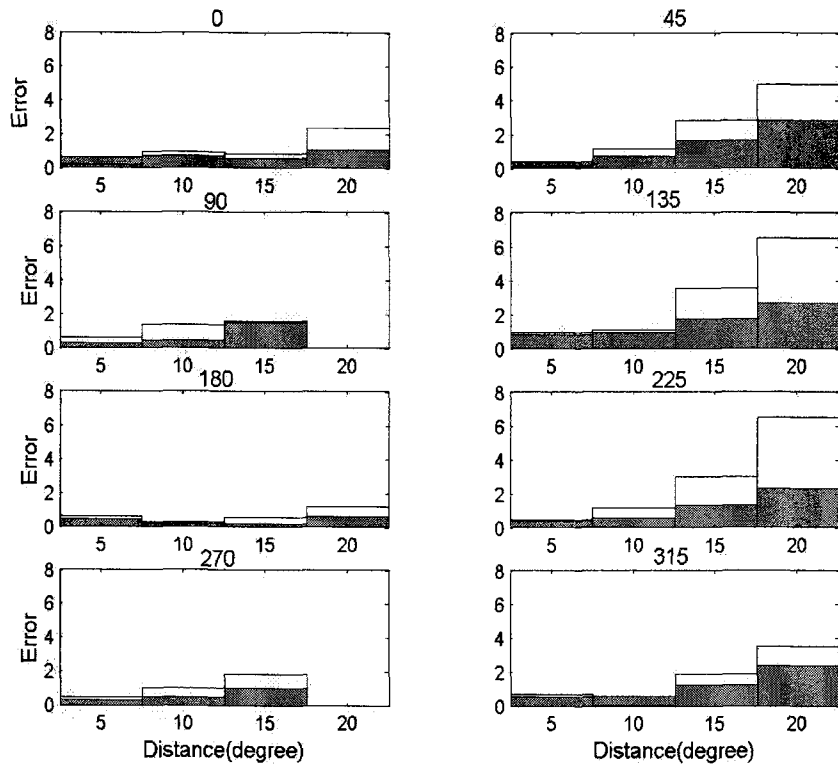
각각의 도착점들은 원래의 목표점에 대하여 구해진 기하학적인 거리를 오차로 구하였으며, 이렇게 구해진 오차로부터

$$\text{성능의 향상도} = \frac{\text{학습전의 평균오차} - \text{학습후의 평균오차}}{\text{학습전의 평균오차}} * 100$$

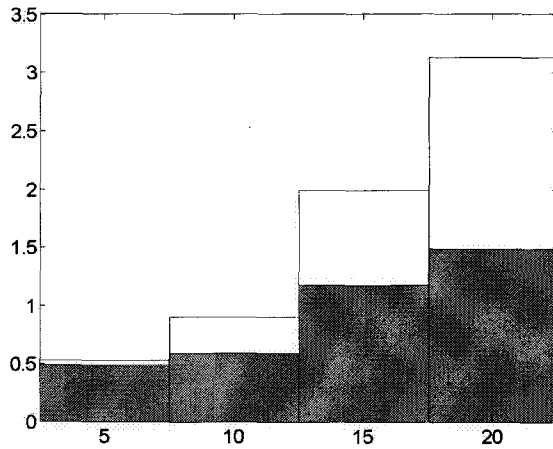
로 하여 약 53% 정도의 성능 향상을 확인하였다.



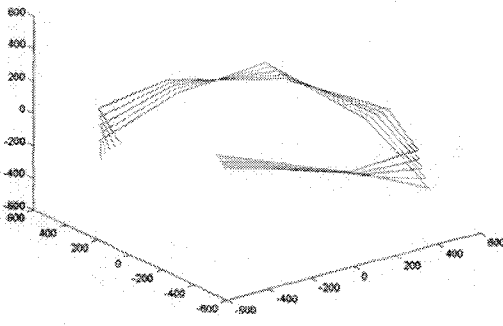
학습을 하기전과 한 후의 성능의 비교. 점선은 학습이 이루어지기 전이고, 실선은 학습이 이루어진 후의 결과이다. 거리가 가까운 곳에서는 거의 차이가 보이지 않지만, 거리가 멀어질수록 수행결과가 나아짐을 보인다. 90도 방향과 270도 방향의 경우, 카메라의 세로 시야범위가 약 ± 18 도 였기 때문에, 20도 방향에 대해서는 시도되지 않았다.(위치 파악을 중심으로부터 하기 때문에, 중심이 시야에서 벗어나 버리면 에러를 측정할 수 없다.) 오차범위 내에서, 안구는 전체적으로 오른쪽으로는 벌어지는 특성을 보였다.



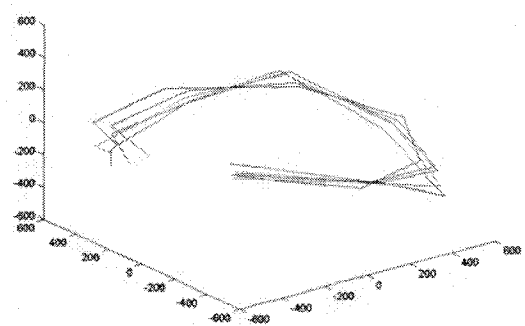
각 방향별로 학습전과 학습 후의 시행을 비교한 것. 각 그래프는 0도부터 45도 단위로 315도까지의 8방향을 표시한다. 가로축은 중심으로부터의 거리(5, 10, 15, 20도)이며, 세로는 오차(카메라의 이동후 시야중심과 목표까지의 거리)이다. 색깔 있는 그래프가 학습 후의 오차이며, 흰색의 그래프는 학습 전의 오차이다. 전체적으로 학습 후 오차는 줄어들었으나, 상하좌우의 방향보다 대각선 방향에서 오차가 크게 줄었음을 알 수 있다.



방향에 대하여 오차를 평균한 값. 가로축은 중심으로부터의 거리이며, 세로축은 오차를 나타낸다. 흰색 그래프는 학습전의 오차이고, 색깔있는 그래프는 학습 후의 오차이다. 전체적으로 53% 향상된 성능을 보여주었다.



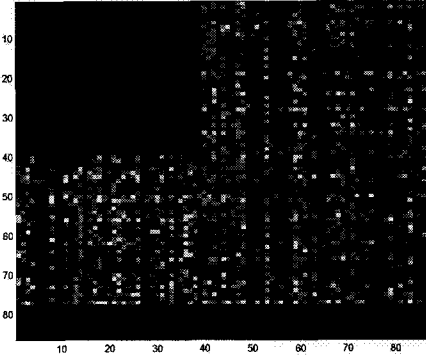
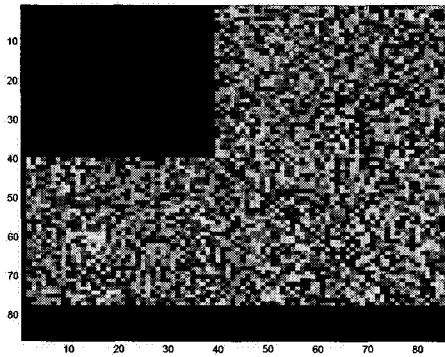
Before learning



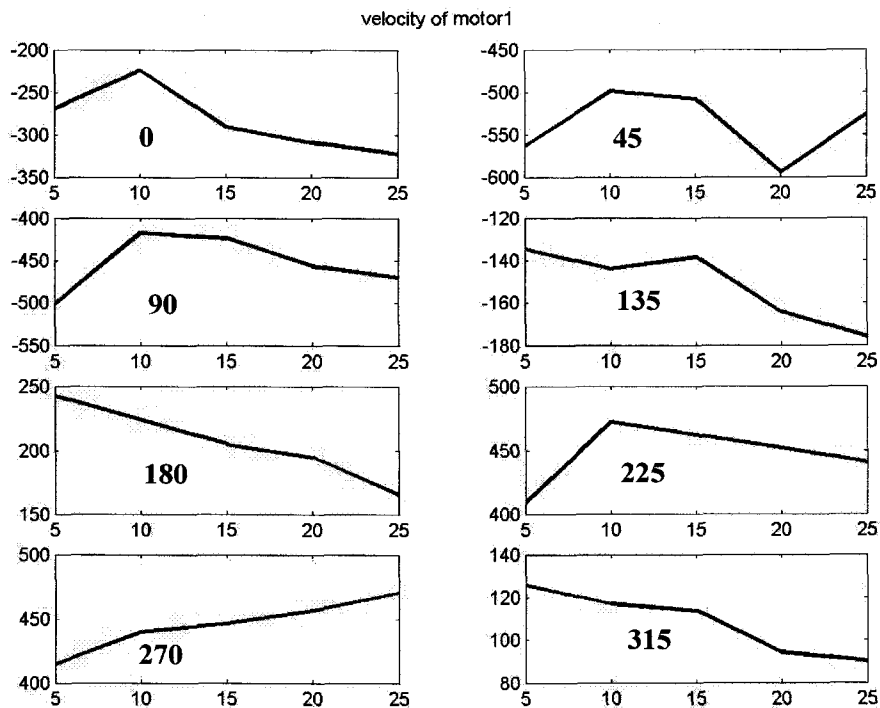
After learning

좌측그림 : 기구학적 계산으로 구해진 모터 맵. 각 축은 모터 1, 2, 3의 회전량(도)를 나타내며, 보라색 선은 0도에서 5도로, 하늘색 선은 5도에서 10도로, 붉은색 선은 10도에서 15도로, 녹색 선은 15도에서 20도로, 파란색 선은 20도에서 25도로 이동할 때의 모터값들이며. 각 선은 8 방향에 대응하는 값(한 선 내에서 시계방향으로 0도, 45도, ..., 315도)들을 연결한 것이다. 가까이 분포하는 5개의 점들은 같은 방향으로 같은 거리(5도)만큼 이동하는 것이지만 0도에서 5도로 움직일 때와 5도에서 10도로 움직일 때에 요구되는 모터 회전량은 다르다.

우측그림 : 학습이 이루어진 후의 모터 맵. 보다 불규칙적인 배열이 되었다.



학습이 일어나기 전과 일어난 후의 가중치 행렬 W 의 변화. 처음(좌측)에는 무작위 적인 값으로 채워져 있었으나 학습이 일어난 후(우측)에는 특정한 값들만 연결이 형성되고 있다. 색이 어두워진 부분의 링크는 학습이 일어나지 않아 자연감쇄되어 사라진 것이다.



세 개의 모터중 하나의의 속도변화 양상. 각 그래프는 8방향을 나타내며, 각 그래프의 가로축은 중심으로부터의 거리(도)이며, 세로축은 모터의 회전수(도)이

다. 실제로는 학습된 모터 맵의 모터 회전수이지만, 걸린 시간이 일정하기 때문에 속도는 모터회전수에 비례하므로 속도변화 그래프로 볼 수 있다. 기울기가 변화하는 것은 안구가 외곽으로 5도씩 이동할 때마다 요구되는 적절한 속도가 일정하지 않음을 알 수 있다.

바. 토의 및 제안

3차원 인공안구를 보다 정확하게 움직이게 하는 과제에 대해 국소지점에서의 이동은 반복적 시행착오법으로, 각각의 지점으로 이동하는 단계들을 연합하는 과정에는 생리학적 / 심리학적인 원리로부터 힌트를 얻은 신경망의 적용을 통하여, 오차를 약 반(47%)으로 줄이는 학습효과를 거두었다. 그러나 기구의 특성상 안구의 움직임을 초래할 수 있는 모터값들의 조합이 제한되어 있어, 탐색을 통한 학습을 이용하여 보정하기는 어려운 점이 많다. 이는 인간의 근육 움직임에 있어서도 두 개의 길항적인 근육, 즉 굴근과 신근이 함께 적절하게 움직여 주어야 관절에서의 움직임이 이루어질 수 있는 것과 유사하나, 여기서는 세 가지 모터의 값이 모두 감안되어야 하기 때문에 훨씬 탐색공간이 늘어나게 된다. 게다가 다른 두 개의 모터값의 변화에 의하여 하나의 모터가 돌아가야 하는 양도 변화하기 때문에, 마치 천문학에서의 3체 문제 3-body problem(3개 이상의 천체에 대한 역학풀이)와 유사하다. 그러므로 보다 용이하게 제어를 하기 위해서는, 자유도를 하나 줄여 수평/수직 방향으로만 움직이게 하고, 뒤틀림에 대해서는 작은 모터를 탑재하거나, 혹은 영상처리 기법을 통하여 소프트웨어적으로 화면을 회전시켜 뒤틀림의 효과를 얻는 방법이 효과적일 것이다.

학습에 사용된 신경망의 경우, 4 단계로 이어지는 움직임에 대하여 연상을 학습하였다고는 하나 과제가 매우 간단하였기 때문에, 보다 복잡하고 일반적인 경우에 대해서도 적용시킬 수 있는지에 대한 추가적인 검증이 필요하다. 이는 이동 로봇과 같이 보다 활동범위가 넓고 복잡한 문제에 적용되어 보아야 할 것이다. 특히 본 실험의 경우에는 단기기억을 단지 1회로 제한하였기 때문에, 실질적인 수준에서 단기기억으로서의 역할을 할 수 있을지는 확인되지 못하였다. 그러나 1회의 단기기억이 네 차례 연결됨으로써 긴 기억을 형성하였기 때문에, 유사한 방식으로 더 확장이 가능할 것이다. 또한 본 실험에서는 심리학적 신경망이 학습도구로서 작용할 수 있는지만을 확인한 것일 뿐, 기존의 다른 신경망에 비하여 속

도나 규모 면에서 어느 정도의 성능 차이를 보이고 있는지 알 수 없다. 이 문제는 보다 명확하고 보편적인 테스트를 통하여 체계적으로 검증해 보아야 할 것이다.

시각적 피드백을 이용하기 위한 영상정보의 경우, 도약안구운동에서의 blur 문제를 해결하기 위해서 보다 유연하고 빠른 데이터 입력 제어가 필요할 것이며, 기준점의 크기와 영상의 해상도 문제로 인하여 이미 어느 정도 초기 위치 결정의 에러를 내포하고 있는 것이므로, 적어도 초기위치에 대해서는 논의에서 전술한 바와 같이 기계적인 해결책이 보완되어야 할 것이다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1절 연구 목표 달성도

1. 1차년도 연구 목표

목 표	달성도	내 용
<ul style="list-style-type: none"> ○ 인간 안구시스템의 인지신경 기전 연구 - 안구운동의 인지신경기제연구 - 3차원 안구운동 측정설비 - 인간 3차원 안구운동의 이동 패턴 이해 	90%	<ul style="list-style-type: none"> - 도약안구운동 신호에 의한 운동지각의 오류 현상에 대한 연구 - 3차원 안구 운동 측정을 위한 하드웨어 개발 - Psychophysics 실험을 통한 안구운동신호의 시각피질유입현상 연구
<ul style="list-style-type: none"> ○ 3차원 동역학적 모델 개발 - 인간안구의 동역학 모델 연구 - 인간 3차원 안구운동의 동역학 모델 개발 	80%	<ul style="list-style-type: none"> - 안구의 회전과 6개의 근육길이의 변화 모델링 - 안구의 회전의 다양한 고찰 - 3차원 안구운동 모델 시작품 개발

2. 2차년도 연구 목표

목 표	달성도	내 용
<ul style="list-style-type: none"> ○ 인간 안구시스템의 인지신경 기전 연구 - 안구운동신호의 시각계 통합 연구 	80%	계획된 실험과 관련한 자료의 수집은 완료한 상태. 자료를 분석하는 과정에서 안구운동신호에 의한 시각세포의 방향선택성의 조절여부를 결정하는 실험이 추가적으로 필요할 것으로 판단되어 3차년도에 계속.
<ul style="list-style-type: none"> ○ 3차원 동역학적 모델 개발 - 인공안구 적용을 위한 소형 고효율 actuator 개발 	90%	3차원 인간안구운동을 모방하면서 체적 및 최고 각속도는 목표 사양을 만족. 그러나 3개의 회전축이 nest된 상태에서 구동하기 때문에 각 축의 모터 출력이 동일하지 않음. 이 문제를 해결할 수 있는 추가적인 설계가 3차년도 과제의 일부.

3. 3차년도 연구 목표

목 표	달성도	내 용
○ 인간 안구시스템의 인지신경 기전 연구 - 도약안구운동에 의한 시각 기능의 조절	80%	시각계의 시각반응 및 방향선택성 조절
○ 3차원 동역학적 모델 개발 - 원격 시각운동 시스템	90%	3자유도 회전이 가능한 머리에 탑재되는 3자유도 회전의 2 개의 인공 안구시스템개발. 실제 계측되는 인간의 안구위치 신호를 구동신호로 사용.

2절 관련분야 기술 발전 기여도

2단계 3년의 연구를 통해 얻은 학술적 성과물을 정리하면 다음과 같다.

구분	논문게재			학술발표			특허출원			특허등록			기업화	기술료 수입		
	국내	국제	계	국내	국제	계	국내	국제	계	국내	국제	계	건수	건수	금액 (억원)	
1차년도 ('01)		1	1	2	1	3										
2차년도 ('02)	1	1	2	2	3	5										
3차년도 ('03)				2		2										
총계	1	2	3	6	4	10										

1. 논문게재

* 국제 학술지

논문제목	저자	학술지명	발행년도 권호	발행기관	SCI여부 (0/X)	주요내용
Non-veridical visual motion perception immediately after saccades	이준열 이준길	Vision Research	2001 41	Elsevier Science Ltd.	0	Oculomotor signal interacts with central mechanisms related to motion and possibly form perception.
Head-free reading of horizontally- and vertically-arranged texts	서효정 이준길	Vision Research	2002 42	Elsevier Science Ltd.	0	The coupling strength between eye and head movements is variable depending on the direction of gaze shift and cognitive context

* 국내 학술지

논문제목	저자	학술지명	발행년도 권호	발행기관	SCI여부 (0/X)	주요내용
주성분분석에 기초한 세포외활동 전위신호의 분류	이준열 서효정	한국심리학 회지: 생물 및 생리	2002 14	한국심리 학회	X	주성분분석과 k-means 알고리즘에 기반한 세포활동전위 분류법

2. 학술발표

* 국제 학회 발표

학술회의명	학술발표제목	발표 장소	일시	국명
Proceedings of Asian Conference on Vision	Gaze control in reading horizontally and vertically arranged texts	Hayama	2001	일본
Proceedings of Asian Conference on Vision	Expansion of visual space after saccadic eye movements	경주	2002	한국
European Conference on Visual Perception	Attentive processes gate integration of eye movement signal for visual motion perception	Glasgow	2002	영국
11th International Conference on Advanced Robotics	A Biomorphic Simulator of Three-dimensional Eye Movement	Coimbra	2003	포르투갈

* 국내 학회 발표

학술회의명	학술발표제목	발표 장소	일시	주요내용
한국심리학회	도약안구운동에 따른 시각운동 지각의 조절	성균관 대학교	2001	
한국뇌학회	운동지각을 위한 안구운동신호의 통합에서 주의의 역할	서울 대학교	2002	
HCI학회	인간의 시선이동 패턴과 특성	평창	2002	
한국심리학회연차학술대회	Cell-assembly의 생리학적 증거: superior colliculus 세포들의 상관된 시각 반응	영남 대학교	2002	
한국뇌신경생물학회연차대회	Eye Movement and Visual Perception	서울 대학교	2003	
Nano-bio system international workshop	Visual Perception at the Time of Saccadic Eye Movements	서울 대학교	2003	

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1절 향후 연구 계획

도약 안구 운동 신호가 일차 시각 피질 세포의 기울기 자극에 대한 반응을 증가시키거나 감소시킨다는 결과는 기울기 반응 곡선이 도약 안구 운동 신호에 따라 달라질 수 있는 가능성을 시사한다. 본 연구에서는 실험 동물에게 여러 기울기의 자극을 제시하지 못했기 때문에 기울기 반응 곡선이 이동하는지에 대해서는 알아볼 수 없었다. 그러나 이전의 연구들(Gilbert & Wiesel, 1989; Dragio, Sharma, Miller & Sur, 2002) 에 의하면, 시각 피질 세포의 기울기 반응 곡선은 여러 요인들, 예를 들면 수용장 주변에 위치한 자극의 기울기나 혹은 자극이 제시되기 이전에 수용장에 존재하는 자극의 기울기 등에 의하여 역동적으로 변화하였다. 그러므로 도약 안구 운동 신호가 기울기 반응 곡선에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보는 것은 필요할 것이다. 자극에 대한 반응이 도약 안구 운동 직후에 변화하였을 때, 그 세포가 자극의 기울기와는 상관없이 다양한 자극에 대하여 일관적으로 감소시키거나 증가시켜서 전체적으로 반응의 정도가 변화할 뿐 기울기 반응 곡선에 대해서는 영향을 미치는 않을 수도 있다. 그러나 다른 한편으로는 자극의 기울기에 따라 도약 안구 운동 신호가 영향을 미치는 정도가 달라져서 기울기 반응 곡선이 변화할 가능성도 배제할 수 없다. 일차 시각 피질은 아니지만, 이전의 연구(Moore, Tolia & Schiller, 1998)를 보면, 상위 영역의 세포들은 도약 안구 운동 신호에 의해 기울기 반응 곡선이 5도 정도 이동한 것으로 나타났다. 그러므로 여러 기울기의 자극을 도약 안구 운동 직후 제시하여 도약 안구 운동에 따라 기울기 반응 곡선이 어떻게 변화하는지를 살펴보는 것이 필요할 것이다.

그리고 도약 안구 운동 직후 시각 자극에 대한 반응이 변화하는 것은 도약 안구 운동과 관련한 신호에 의해서 나타난 것일 수도 있으나 도약 안구 운동에 의해서 다른 변인이 변화하여 일어나는 것일 수도 있다. 이전의 연구들(Moore & Armstrong, 2002; Tolia, Moore, Smirnakie, Tehovnik, Siapas, & Schiller, 2001)에서 도약 안구 운동과 관련한 세포의 활동보다는 눈을 움직임으로 인해서 일어나는 주의의 이동이나, 수용장의 변화에 의해서 세포의 반응이 달라지는 결과가 제시되었다. 그러므로 일차 시각 피질 세포의 반응의 변화가 도약 안구 운동 신호에 의한 것인지를 확인하기 위해서 세포의 수용장을 알아보고, 수용장의 위치가 변화하는지를 조사해 볼 필요가 있다. 즉, 안구를 중앙에 고정된 상태에서 화면의 여러 부분에 자극을 제시하였는데, 도약 안구 운동 이후에 수용장의 위치가 변화하는지를

알아보는 것이 필요하다. 이 실험은 현재 진행 중에 있다.

인간의 안구운동을 충실히 모방하는 인공안구를 개발하기 위해서는 인공근육의 개발이 필수적으로 요구된다. 현재 근육의 역동을 모방하는 인공근육이 개발되어 있지 않으므로 본 연구에서는 소형 액추에이터나 DC 모터를 사용하였다. 인간의 안구 근육 자체의 특성을 모델링하는 것(비선형 탄성체로서 모델링 하는 것)은 본 과제에서 제안했던 범위를 넘어서는 부분으로, 본 연구에서는 안구의 회전 운동에 중점을 두고 모델링하였다. 안구의 움직임 이해하고 3자유도 운동기구를 제작하는 데 충분한 결과를 얻었다. 개발된 인공안구를 위한 전용의 소형 고성능 voice coil motor 를 개발하였으며 이를 적용하여 3자유도 안구 운동기구를 제작하였다. 제작된 VCM 을 이용한 3자유도 안구운동기구의 운동성능은 최종목표인 300 deg/s를 상회하고 인간 안구 운동성능에 근접하였다. 스텝응답으로 고속 회전운동을 할 때 오버슈트 다소 발생하였으나 제어장치를 개선함으로써 해결될 수 있는 문제라고 생각된다. 3차년도에 수행된 3자유도 회전식 병렬기구의 구조를 갖는 안구 운동기구는 200 mm 이하의 체적으로 인간 크기의 모조 머리에 충분히 적용 가능하였다.

2절 기대 성과 및 활용 계획

안구운동의 신호가 시각계에 유입되는 결과와 운동지각을 조절하는 방식에 관한 결과는 시각계의 능동성을 이해하는 추후 실험들과 이론 개발에 중요한 결과이다. 향후 안구운동의 실행 전에 제시되는 운동자극에 대한 지각의 조절 현상에 관한 실험과 더불어 안구운동과 운동지각의 상호작용 방식을 확립하는데 필수적인 지식으로 활용할 것이다.

개발된 인공안구는 능동시각 연구의 실험장치나 시선이 이동하는 범용 시각입력 장치로 사용될 수 있으며, 특히 휴머노이드로봇의 시각 입력장치로 활용할 계획이다. 개발된 안구운동기구는 소형이며, 안구의 회전중심이 인간의 안구와 같이 전면에서 13.5 mm 뒤에 위치하고, 안구 전면에 기구가 돌출되지 않으므로, 인간과 같은 크기의 머리를 갖는 휴머노이드로봇 등의 시각 입력장치로 적용할 것이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1절 국외 기술현황

1. 미국(UCLA의 Dr. Schlag 그룹, Harvard Univ.의 Dr. Hubel 그룹, 등), 일본(Kyoto Univ.의 Dr. Toyama 그룹 등) 등에서 안구운동 신호의 시각기능 통합에 관한 연구가 진행되어 오고 있다.
2. 미국 MIT Artificial Intelligence Laboratory 의 경우 로봇과 인간과의 사회적 접촉을 증진시키기 위한 인간 얼굴을 설계하고 제작하는 것을 목표로 로봇 Cog를 개발하고 이에 적용하기 위한 인공안구를 개발하고 있다.
3. 과제 제안서에 정리한 위 내용 이후 특기 사항이 없다

제 7 장 참고문헌

- 강 인철, 이 춘길 (1995). 고양이 상구의 신경 생리적 연구: 시각 반응의 개시 시기와 최고 시기의 추정. *한국심리학회지: 생물 및 생리*, 7, 58-77.
- 심귀보 외. (2000). 강화 학습에 기반한 자율 이동 로봇의 행동 진화, 2000년도 제어계측·자동화·로보틱스 연구회 합동 학술 발표회 논문집, 1-6.
- Angelucci, A., Levitt, J. B., Walton, E. J. S., Hupe, J. M., Bullier, J., & Lund, J. S. (2002). Circuits for local and global signal integration in primary visual cortex. *The Journal of Neuroscience*, 22(19), 8633-8646.
- Ashton, J. A., Boddy, A., & Donaldson, I. M. (1984). Directional selectivity in the responses of units in cat primary visual cortex to passive eye movement. *Neuroscience*, 13, 653-662.
- Buisseret, P., & maffei, L. (1977). Extraocular proprioceptive projections to the visual cortex. *Experimental Brain Research*, 28, 421-425.
- Chakraborty, S., Tumosa, N., Lehmkuhie, S. (1998). Visually evoked cortical potentials in awake cats during saccadic eye movements. *Exp. Brain Res.* 122(2). 203-213.
- Chapman, B., Godecke, I., & Bonhoeffer, T. (1999). Development of orientation preference in the mammalian visual cortex. *Journal of Neurobiology* 41. 18-24.
- Dragoi, V., Rivadulla, C., & Sur, M. (2001). Foci of orientation plasticity in visual cortex. *Nature*. vol 411. 80-86.
- Dragoi, V., Sharma, J., Miller, E.K., & Sur, M. (2002). Dynamics of neuronal sensitivity in visual cortex and local feature discrimination. *Nature neuroscience*. vol 5., no 9. 883-891.
- Ego-Stengel, V., Bringuier, V., & Shulz, D. E. (2002). Noradrenergic modulation of functional selectivity in the cat visual cortex: an in vivo extracellular and intracellular study. *Nueroscience*. 111(2). 275-289.
- Ferster, D., & Miller, K. D. (2000). Neural mechanisms of orientation selectivity in the visual cortex. *Annu. Rev. Neurosci.* 23. 441-471.

- Ferster, D., Chung, S., & Wheat, C. (1996). Orientation selectivity of thalamic input to simple cells of cat visual cortex. *Nature*, *380*, 249-252
- Fu, Y., Djupsund, K., Gao, H., Hayden, B., Shen, K., & Dan, Y. (2002). Temporal specificity in the cortical plasticity of visual space representation. *Science*, *296*, 1999-2003.
- Gawne, T. J., & Martin, J. M. (2002). Responses of primate visual cortical neurons to stimuli presented by flash, saccade, blink, and external darkening. *Journal of Neurophysiology*, *88*, 2178-2186.
- Gilbert, C. D. & Wiesel, T. N. (1979). Morphology and intracortical projections of functionally identified neurons in cat visual cortex. *Nature*, *280*, 120-125.
- Gilbert, C. D. & Wiesel, T. N. (1989). Columnar specificity of intrinsic horizontal and corticocortical connections in cat visual cortex. *Journal of Neuroscience*, *9*, 2432-2442.
- Gilbert, C. D. & Wiesel, T. N. (1990). The Influence of contextual stimuli on the orientation selectivity of cells in primary visual cortex of the cat. *Vision research*, *30(11)*, 1689-1701.
- Gilbert, C. D. (1998). Adult cortical dynamics. *Physiological Reviews*. *78(2)*, 467-485.
- Gosselin, C. M. & Hamel, J-F. (1994) The Agile Eye: a high performance three-degree-of-freedom camera-orienting device. *IEEE International Conference*, 781 -786.
- Gosselin, C. M., Pierre, E., & Gagne, M. (1996) On the Development of the Agile Eye. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, *17*, 29-37.
- Hubel, D. H. & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of physiology*, *160*, 106-154.
- Jenkin, M., Milios, E., Tsotsos, J., & Down, B. (1993). A binocular robotic head system with torsional eye movements. *International Journal of Pattern Recognition and AI*, *7(1)*, 51-68.

- Judge, S. J., Richmond, B. J., & Chu, F. C. (1980). Implantation of magnetic search coils for measurement of eye position: an improved method. *Vision Research*, 20, 535-538.
- Issa, N. P., Trepel, C., & Stryker, M. P. (2000). Spatial frequency maps in cat visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 20(22), 8504-8514.
- Kim, D., Duong, T. Q., & Kim, S. (2000). High-resolution mapping of iso-orientation columns by fMRI. *Nature neuroscience*, 3(2), 164-169.
- Kimura, M., Komatsu, Y., & Toyama, K. (1980). Differential responses of "simple" and "complex" cells of cat's striate cortex during saccadic eye movements. *Vision Research*, 20, 553-556.
- Lamme, V. A.F., Super, H., & Spekreijse, H. (1998). Feedforward, horizontal, and feedback processing in the visual cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, 8, 529-535.
- Lewicki, M. S. (1998). A review of methods for spike sorting: the detection and classification of neural action potentials. *Network*, 9, R53-78.
- Lockwood-Cooke, P., Martin, C. F., & Schovanec, L. (1999) A Dynamic 3-d Model of Ocular Motion *Proceedings of the 38th Conference on Decision & control*, pp 405-409.
- Lund, J. S. (1988). Anatomical organization of macaque monkey striate visual cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 11, 253-288.
- Moore, T., & Armstrong, K. M. (2003). Selective gating of visual signals by microstimulation of frontal cortex. *Nature*, 421, 370-373.
- Moran, J., & Desimone, R. (1985). Selective attention gates visual processing in the extrastriate cortex. *Science*, 229, 782-784.
- Nakamura, K., & Colby, C. L. (2000). Visual, saccade-Related, and cognitive activation of single neurons in monkey extrastriate area V3A. *Journal of Neurophysiology*, 84, 677-692.
- Nakamura, K., & Colby, C. L. (2002). Updating of the visual representation of monkey striate and extrastriate cortex during saccades. *Proc Natl Acad Sci*, 99, 4026-4031.

- Park, J., & Lee, C. (2000). Neural discharge coupled to saccade offset in the cat visual cortex. *NeuroReport*, *11*(8), 1661-1664.
- Park, J., Lee, J., & Lee, C. (2001) Non-veridical visual motion perception immediately after saccades. *Vision Research*, *41*, 3751-3761.
- Rommel, R. S. (1984). An inexpensive eye movement monitor using the scleral search coil technique. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *31*, 388-390.
- Ringach, D. L., Hawkin, M. J., & Shapley, R. (1997). The dynamics of orientation tuning in macaque V1. *Nature*, *387*, 281-284.
- Robinson, D. A. (1963). A method of measuring eye movement using a scleral search coil technique. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *BME-10*, 137-145.
- Roelfsema, P. R., & Spekreijse, H. (2001). The representation of erroneously perceived stimuli in the primary visual cortex. *Neuron*, *31*(5), 853-863.
- Sengpiel, F., Stawinski, P., & Bonhoeffer, T. (1999). Influence of experience on orientation maps in cat visual cortex. *Nature neuroscience*. *2*(8). 727-732.
- Sillito, A. M., Grieve, K. L., Jones, H. E., Cudeiro, J., & Davis J. (1995). Visual cortical mechanisms detecting focal orientation discontinuities. *Nature*, *378*, 492-496.
- Silverman, B.W. (1986) *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman & Hall, London.
- Sompolinsky, H., & Shapley, R. (1997). New perspectives on the mechanisms for orientation selectivity. *Current Opinion in Neurobiology*. *7*. 514-522.
- Stone, J. & Dreher, B. (1973) Projection of X- and Y-cells of the cat's lateral geniculate nucleus to area 17 and 18 of visual cortex. *Journal of Neurophysiology*. *36*. 551-567.
- Tehovnik, E. J., & Slocum, W. M. (2003). Microstimulation of macaque V1 disrupts target selection: effects of stimulation polarity. *Exp Brain Res*.

148, 233-237.

- Tolias, A. S., Moore, T., Smirnakie, S. M., Tehovnik, E. J., Siapas, A. G., & Schiller, P. H. (2001). Eye movements modulate visual receptive fields of V4 neurons. *Neuron*, *29*(3), 757-767.
- Toyama, K., Komatsu, Y., & Shibuki, K. (1984). Integration of retinal and motor signals of eye movements in striate cortex cells of the alert cat. *Journal of Neurophysiology*, *51*, 649-665.
- Vidyasagar, T. R., Pei, X., & Volgushev, M. (1996). Multiple mechanisms underlying the orientation selectivity of visual cortical neurons. *Trends Neurosciences*, *19*, 272-277.
- Wu, L., Thier, P., & Wehrhahn, C. (2000). Contextual influence on orientation discrimination of humans and responses of neurons in V1 of alert monkeys. *Journal of Neurophysiology*, *83*, 941-954.
- Yu, A. J. (1999). *Classification of extracellular microelectrode recordings from the human brain*. Caltech Summer Undergraduate Research Fellowship.

[첨부1]

연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

인간 뇌의 시각정보처리체계는 복잡한 시각계에서의 정보를 일괄적으로 처리하는 대신에, 응시점을 이동시켜가면서 필요한 정보를 선별적으로 또한 순차적으로 처리하는 효율적인 정보처리 메카니즘을 갖고 있다. 또한 인간의 시각계는 망막을 통한 시각 입력 정보만을 처리하는 것이 아니라 안구의 위치와 운동에 대한 정보를 통합하여 처리한다는 것이 알려지고 있으며 특히 이러한 정보는 공간시각의 역동적인 조절과 깊은 관련이 있다는 것이 확인되고 있다. 인공시각을 구현하기 위해서는 인간 시각계가 안구운동의 정보를 통합하는 인지 신경기제를 이해하고 이에 기반한 인공안구의 개발이 필수적으로 요구된다. 본 과제는 인간 안구시스템의 인지신경 기전 및 3차원 동역학 모델에 기반하여 고속 3차원 안구를 개발하고 안구운동이 인간의 시각계에 미치는 영향을 연구하여 대상 인식 및 공간인지기능의 성능을 향상시킬 수 있는 방법론을 제시하고자 한 것이다. 구체적으로 두 가지의 내용으로 구성되었다.

- 1) 안구 운동과 시각신경계의 상호작용 이해
- 2) 체적 300cm³ 속도 300deg/s 사양을 가지는 3차원 안구 운동 기구의 개발.

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록)일자	발명자 (출원인)	출원국	비고

나. 프로그램 등록목록

프로그램 명칭	등록번호	등록일자	개발자	비고

다. 노하우 내역

라. 발생품 및 시작품 내역

시작품: 3자유도 회전 병렬식 인공안구기구

마. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적(필요시 별지사용)

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명	SCI게재 여부
Vision Research	Non-veridical visual motion perception immediately after saccades	2001년	41	Elsevier Science Ltd.	미국	○
Vision Research	Head-free reading of horizontally- and vertically -arranged texts	2002년	42	Elsevier Science Ltd.	미국	○

한국심리학회지:생물 및 생리	주성분분석에 기초한 세포의활동 전위신호의 분류	2002년	14	한국심리학회	한국	X
계: 3						

○ 학술회의 발표 실적(필요시 별지사용)

학술회의 명칭	제목	개재연월일	호	발행기관	국명
Proceedings of Asian Conference on Vision	Gaze control in reading horizontally and vertically arranged texts	2001			일본
Proceedings of Asian Conference on Vision	Expansion of visual space after saccadic eye movements	2002			한국
European Conference on Visual Perception	Attentive processes gate integration of eye movement signal for visual motion perception	2002			영국
11th International Conference on Advanced Robotics	A Biomorphic Simulator of Three-dimensional Eye Movement	2003			포르투갈
한국심리학회	도약안구운동에 따른 시각운동 지각의 조절	2001			한국
한국뇌학회	운동지각을 위한 안구운동신호의 통합에서 주의의 역할	2002			한국
HCI학회	인간의 시선이동 패턴과 특성	2002			한국
한국심리학회연차학술대회	Cell-assembly의 생리학적 증거: superior colliculus 세포들의 상관된 시각 반응	2002			한국

한국뇌신경생물학회 연차대회	Eye Movement and Visual Perception	2003			한국
Nano-bio system international workshop	Visual Perception at the Time of Saccadic Eye Movements	2003			한국
계: 10					

3. 연구성과

1) 안구운동신호의 시각계 통합연구

가. 시각피질 시각반응과 도약안구운동 신호의 상호작용

고양이의 시각피질에서 도약 안구 운동을 발생시키는 신호가 시각 자극에 대한 시각 피질 세포의 반응에 영향을 미칠 뿐만 아니라 세포에 따라 자극에 대한 반응을 억제시키거나 흥분시킴으로써 활동을 조절하는 결과를 얻었음.

나. 운동지각에 미치는 도약안구운동의 영향

도약안구운동이 실행될 때, 운동지각이 왜곡됨을 발견하였음. 이 결과는 시각계의 처리 기능이 역동적으로 조절되어 매번 도약안구운동이 실행될 때 시각계 기능의 재편이 이루어짐을 발견.

다. 운동지각을 위한 안구운동신호의 통합에서 주의의 역할 분석

성공적인 운동지각을 위해서 안구운동의 신호가 통합될 때, 주의 과정이 이를 조절하여 자극에 따라서 운동 지각의 왜곡이 일어남을 발견.

2) 인공안구의 개발

계획된 사양을 초과 달성하는 3자유도 회전 병렬기구 방식의 안구 운동 기구 개발

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

가. 당해연도 활용계획

도약 안구 운동 신호가 일차 시각 피질 세포의 기울기 자극에 대한 반응을 증가시키거나 감소시킨다는 결과는 기울기 반응 곡선이 도약 안구 운동 신호에 따라 달라질 수 있는 가능성을 시사한다. 본 연구에서는 실험 동물에게 여러 기울기의 자극을 제시하지 못했기 때문에 기울기 반응 곡선이 이동하는지에 대해서는 알아볼 수 없었다. 연구의 결과가 시사하는 바에 따라, 2003-4년에 걸쳐 석사과정 연구원으로 참여한 황재원이 고양이의 시각피질에서 도약안구운동에 따라 기울기 반응 곡선이 변화하는 패턴을 책임연구자의 실험실에서 연구할 계획이다. 시각 피질 세포의 기울기 반응 곡선은 시각이 이루어지는 과정에 대한 가장 직접적인 이해를 제공해 왔던 성질로서, 대뇌 피질 전체를 통틀어서 대뇌 세포의 대표적인 특징으로 꼽힌다. 기울기 반응은, 수용장 주변에 위치한 자극의 기울기나 혹은 자극이 제시되기 이전에 수용장에 존재하는 자극의 기울기 등에 의하여 역동적으로 변화하는 예들이 있어 왔다. 그러므로 도약 안구 운동을 전후하여 시각이 능동적으로 조절되는 과정에서 시각피질 세포들이 기울기 반응 곡선이 어떠한 방식으로 조절되는지를 밝히는 것은 중요한 작업이다. 그리고 도약 안구 운동 직후 시각 자극에 대한 반응이 변화하는 것은 도약 안구 운동과 관련한 신호에 의해서 나타난 것일 수도 있으나 도약 안구 운동에 의해서 다른 변인이 변화하여 일어나는 것일 수도 있다. 이전의 연구들(Moore & Armstrong, 2002; Tolia, Moore, Smirnaki, Tehovnik, Siapas, & Schiller, 2001)에서 도약 안구 운동과 관련한 세포의 활동보다는 눈을 움직임으로 인해서 일어나는 주의의 이동이나, 수용장의 변화에 의해서 세포의 반응이 달라지는 결과가 제시되었다. 그러므로 일차 시각 피질 세포의 반응의 변화가 도약 안구 운동 신호에 의한 것인지를 확인하기 위해서 세포의 수용장을 알아보고, 수용장의 위치가 변화하는지를 조사해 볼 필요가 있다. 이 실험은 현재 진행 중에 있다.

나. 활용방법

본 과제에서 개발된 기법 적용. 여기에는 안구운동신호와 망막신호의 상호작용을 분석할 수 있는 안구위치 의존적인 자극제시기법, 분석 방법을 적용.

다. 차년도이후 활용계획

인간의 안구운동을 충실히 모방하는 인공안구를 개발하기 위해서는 인공근육의 개발이 필수적으로 요구된다. 현재 근육의 역동을 모방하는 인공근육이 개발되어 있지 않으므로 본 연구에서는 소형 액추에이터나 DC 모터를 사용하였다.

인간의 안근육 자체의 특성을 모델링하는 것(비선형 탄성체로서 모델링 하는 것)은 본 과제에서 제안했던 범위를 넘어서는 부분으로, 본 연구에서는 안구의 회전 운동에 중점을 두고 모델링하였다. 차후, 현실적으로 적용 가능한 인공 근육이 개발되면, 본 과제에서 적용한 3자유도 운동기구를 제작할 수 있는 토대를 이용하여, 안구운동기구가 800 deg/s를 상회하면서 3자유도 회전식 병렬기구의 구조를 가지면서 인간 크기의 모조 머리에 충분히 적용 가능한 안구운동기구 개발에 활용할 것이다.

5. 기대효과

안구운동의 신호가 시각계에 유입되는 결과와 운동지각을 조절하는 방식에 관한 결과는 시각계의 능동성을 이해하는 추후 실험들과 이론 개발에 중요한 결과이다. 향후 안구운동의 실행 전에 제시되는 운동자극에 대한 지각의 조절 현상에 관한 실험과 더불어 안구운동과 운동지각의 상호작용 방식을 확립하는데 필수적인 지식으로 활용할 것이다.

개발된 인공안구는 능동시각 연구의 실험장치나 시선이 이동하는 범용 시각입력 장치로 사용될 수 있으며, 특히 휴머노이드로봇의 시각 입력장치로 활용할 계획이다. 개발된 안구운동기구는 소형이며, 안구의 회전중심이 인간의 안구와 같이 전면에서 13.5 mm 뒤에 위치하고, 인간 안구와 같은 고속의 회전운동을 수행하며, 안구 전면에 기구가 돌출되지 않으므로, 인간과 같은 크기의 머리를 갖는 휴머노이드로봇 등의 시각 입력장치로 적용할 것이다.

6. 문제점 및 건의사항

[첨부2]

기술 요약서

■ 기술의 명칭

※기술이란? 과제 수행결과 확보된 신기술, 산업재산권, 기술적 노하우 등 개발된 성과중 수요자에게 공급할 수 있는 형태의 기술을 의미함

3자유도 회전 병렬기구 방식의 안구 운동 기구

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	M1-0107-08-0003			
과제명	뇌정보처리 메카니즘에 기반한 인공 시각 시스템 연구			
사업명	국책연구개발사업			
세부사업명	뇌신경정보학사업			
연구기관	서울대학교 심리학과	기관유형	대학	
참여기관(기업)	없음			
총연구기간	2001. 8. 1 ~ 2004. 5. 31			
총연구비	정부(186,800)천원 민간()천원 합계(186,800)천원			
연구책임자 1	성명	이 춘 길	주민번호	
	근무기관 부서	서울대학교 심리학과	E-mail	cklee@snu.ac.kr
	직위/직급	교수	전화번호	02-880-6440
연구책임자 2	성명		주민번호	
	근무기관 부서		E-mail	
	직위/직급		전화번호	
실무연락책임자	성명	고미자	소속/부서	서울대학교 사회과학대학
	직위/직급	직원	E-mail	mj@snu.ac.kr
	전화번호	02-880-6306	FAX	02-871-0971
	주소	(151-742)서울시 관악구 신림동 서울대학교		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

인간의 안구는 3자유도 회전운동을 하고 있다. 이는 일반적인 카메라 시스템이 2자유도 회전운동을 하는 것에 비해서 시선방향의 회전 자유도가 추가된 것이다. 또한 인간의 안구는 고속 운동을 하며 안구의 회전중심이 망막에서 단지 13.5 mm 뒤에 위치한다. 기존의 gimbal 기구 방식으로 3자유도 회전을 구현하기 위해서는 회전관성이 커지고 기구를 작게 만드는 것도 용이하지 않다. Gosselin 등은 병렬식 안구기구를 고안하였으나 기구의 조인트 부분 등이 회전 중심 밖으로 벗어나는 것을 피할 수 없고, 이에 따라서 휴머노이드의 머리에 장착될 수는 없었다. 본 연구에서 개발한 안구 운동 기구는 독특한 링크 배치에 의해서 회전 기구 부분들이 안구 (22 mm 각의 컬러 CCD 카메라) 뒤에 위치하도록 되어 있어서 휴머노이드의 머리에 장착될 수 있는 크기와 형상을 가지며 인간의 안구와 같은 고속 운동이 가능하다.

<기술적 특징>

- (1) 체적 300 cm³ 이하의 소형 3 자유도 회전 운동 기구
- (2) 관성부하를 줄일 수 있는 병렬기구를 채용함에 의해서 순간 속도 500 deg/s 이상의 고속 회전 가능
- (3) 안구의 회전 중심이 인간의 안구와 같이 망막면(CCD 카메라 선단)에서 13.5 mm 뒤에 위치하므로 인간의 눈 움직임과 같은 자연스러운 눈 움직임이 가능
- (4) 링크와 조인트 등의 모든 기구들이 안구보다 뒤에 있으므로 휴머노이드의 머리에 장착 가능

[용도 · 이용분야]

- (1) 로봇(특히 휴머노이드)의 비전 시스템
- (2) 인간 안구 운동을 모방하는 각종 실험
- (3) 3자유도 회전 운동이 필요한 곳

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술

[기술개요]

기술명	
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	

[기술을 도출한 과제현황]

과제관리번호			
과제명			
사업명			
세부사업명			
연구기관		기관유형	
참여기관(기업)			
총연구기간			
총연구비	합계 : ()백만원 - 정부 : ()백만원 민간 : ()백만원		
연구책임자	소속		성명
	전화번호		E-mail
연구개발 주요내용			

과제관리번호			
과제명			
사업명			
세부사업명			
연구기관		기관유형	
참여기관(기업)			
총연구기간			
총연구비	합계 : ()백만원 - 정부 : ()백만원 민간 : ()백만원		
연구책임자	소속		성명
	전화번호		E-mail
연구개발 주요내용			