

특징 자코비안을 이용한 인간형 머리-눈 시스템의 제어

Control of Active Stereo Head-Eye System Using Feature Jacobian

*유 승 목**, 황 보 명**, 서 일 흥*, 유 범 재**, 이 종 원**

* 한양대학교 전자공학과 (Tel : +82-345-408-5802, Fax : +82-345-408-5803, E-mail : smyou@amadeus.kist.re.kr)
** 한국과학기술연구원 (Tel : +82-2-958-5760, Fax : +82-2-958-5749, E-mail : ybj@amadeus.kist.re.kr)

Abstract : Recently, we have developed an active stereo head-eye system with vergence based on the analysis of human neck and eye movement on own visual behavior. Our system has 5 degree-of-freedom which has 2 DOF for a neck motion and 3 DOF for an eye motion like human beings. Also, the system has two color CCD cameras for visual sensing. For tracking a colored object which has movement in 3-Dim. cartesian space, we propose a new approach using stereo feature kinematics for reconstructing the object's 3-D position and Jacobian for obtaining its velocity. Finally, a simulation was done for validating the proposed method.

Keywords : Stereo Feature Jacobian, Vergence Control, Binocular Cameras, Head-Eye System, Color Image Processing

1. 서 론

인간의 복잡하면서도 자연스러운 동작과 각 신체 기능의 구현에 목표를 둔 인간형 로봇들에 대한 연구가 진행되면서 주위환경의 정보를 수용, 처리하여 로봇 제어에 필요한 정보들을 만들어 내는 가장 기본적이고 중요한 능동적인 머리-눈 시스템이 다양하게 제시되었다[3][6][12][14-15]. [3]과 [15]에서 개발된 인간형 머리-눈 시스템 HECter (Head-Eye system with Colored Stereo Vision)는 인간과 유사한 두 개의 칼라 카메라를 가지고 있다. 눈 부분은 독립적인 vergence 동작과 공통적인 elevation 동작을 수행 할 수 있는 3 개의 자유도를 가지고 있으며, 목에 해당하는 부분은 눈 부분 전체의 pan과 tilt를 할 수 있도록 (그림 1)과 같이 2 개의 자유도를 가지고 있다. 각 카메라는 칼라 영상을 입력받음으로써 흑백 영상을 사용하는 시스템보다 배경이나 조명의 영향을 덜 받으며, 많은 특징을 제공할 수 있다. 전체 시스템의 구조는 (그림 2)와 같다.

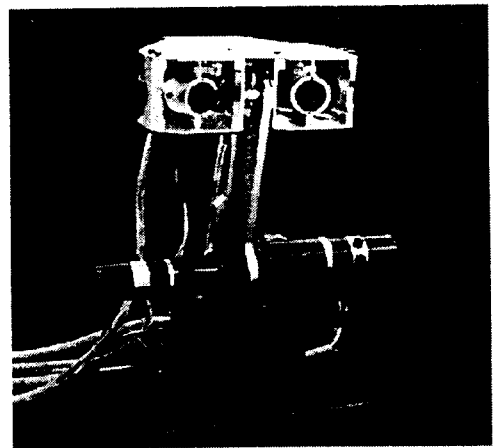


그림 1. KIST HECter의 외관
Fig. 1. KIST HECter

머리-눈 시스템의 전체적인 제어에 관하여, Olson 등[8]은 두 카메라의 vergence 제어에 좌, 우 영상의 위상관계를 cepstral disparity filter로 계산하는 방법을 정의하여 Rochester 로봇의 PD 제어기의 입력으로 사용하였으며, Kam 등[5]은 머리-눈 시스템을 인식, 판단 그리고 행동의 세 부분으로 나누어 제어하였다. Sharkey 등[13]은 로봇 머리 시스템의 일반적인 기구학, 역 기구학 및 자코비안을 소개하였지만 실험이나 시뮬레이션에 관한 언급은 없었다. 최근에는 Rivlin 등[10]에 의하여 눈의 운동을 saccade와 pursuit라는 두 가지 모드로 모델링하여 제어하는 방법이 소개되었으나 saccade 모델링에 복잡한 계산이 필요하였다. 시스템의 입력으로 사용되는 영상처리에 관하여, Bernardino 등[1]은 로봇 머리 시스템에 많은 시간을 요하는 cepstral filter의 위상관계를 계산하지 않고, 단순한 Log-polar 영상을 사용하여 시간을 줄였으며, Marefat 등[7]은 좌, 우 영상의 위상차를 제어 입력으로 사용하였고, 영상처리부와 로봇제어부의 샘플링 시간차를 독립적으로 제어하는 방법을 기술하였다. 또한 Rougeaux 등[11]은 가상의 horopter를 도입하여 두 카메라 제어의 입력으로 사용하였다.

중심을 구한 후 그 점에 대한 스테레오 특징 기구학과 이를 기초로 한 스테레오 특징 자코비안을 제시한다. 제시된 스테레오 특징 기구학과 역 기구학을 이용하여 3차원 공간상의 움직임을 갖는 물체의 위치를 계산하고 특징 자코비안과 역 특징 자코비안을 통하여 움직이는 물체의 속도를 추출하여 시스템의 각 구동부를 제어한다. 제안된 특징 기구학과 특징 자코비안은 3차원상에서 움직이는 물체의 추적에 대한 시뮬레이션을 통하여 검증되었다.

본 논문에서는 개발된 머리-눈 시스템의 제어를 위하여 두 카메라에서 얻어지는 칼라영상으로부터 특정한 색을 가진 물체의 질량

2. 칼라 영상 처리

일반적으로 사용되는 흑백 시스템은 영상처리가 간단하다는 장점을 제외하면 추종하려는 물체의 인식이 복잡한 배경이나 조도에 따라서 가변적인 경우가 많다는 단점을 가지고 있다. 이에 반하여 칼라 영상은 영상처리 시간이 길지만, 물체와 배경의 구별 및 인식이 용이하고, 조도의 영향도 흑백의 경우보다 줄일 수 있게 된다.

칼라를 표현하는 방법은 추가적인 변환이 필요 없는 RGB 값을 사용한다. 물체가 빛을 받았을 경우 상대적으로 밝은 부분과 어두

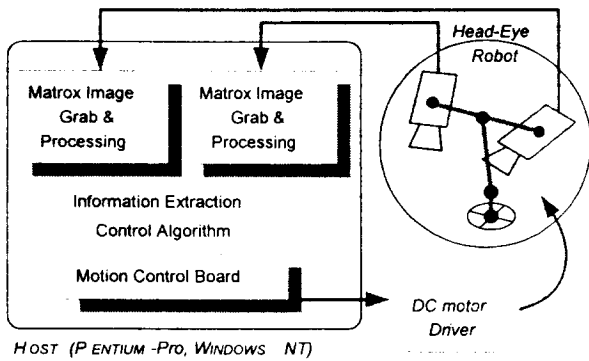


그림 2. 시스템의 구조
Fig. 2. The System Structure

운 부분이 나타나게 되는데 이것을 RGB 공간에 투영시켜 보면 타원모양의 분포를 나타낸다[9]. 이 타원 모양에 해당하는 값들을 Look-Up-Table로 만든 후 각 카메라로 얻은 영상들의 화소 값들을 LUT와 비교하여 추종하려는 물체인지를 구별 한 뒤 물체의 질량중심을 영상에 표시하고 제환 신호로 사용한다.

3. 스테레오 특징 기구학 및 자코비안

3.1 스테레오 특징 기구학

영상자료로 얻어진 물체의 중심을 그림 3에 나타난 좌표로 변환시킬 때 일반적으로 사용하는 관용 카메라 모델을 사용한다. 좌, 우 영상에 맺히는 물체의 위치를 각각 (u_l, v_l) , (u_r, v_r) 라고 하고, (R, z) 에 대한 물체의 3차원 좌표를 ${}^R P = ({}^R x, {}^R y, {}^R z)$ 라고 하자. 스테레오 영상에 대한 기구학은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$u_l = -\frac{f}{A_x} \frac{(B/2 - {}^R x) \cdot \cos q_l - {}^R z \cdot \sin q_l}{(B/2 - {}^R x) \cdot \sin q_l + {}^R z \cdot \cos q_l} = -\frac{f}{A_x} \frac{h_l}{g_l}$$

$$u_r = \frac{f}{A_x} \frac{(B/2 + {}^R x) \cdot \cos q_r - {}^R z \cdot \sin q_r}{(B/2 + {}^R x) \cdot \sin q_r + {}^R z \cdot \cos q_r} = \frac{f}{A_x} \frac{h_r}{g_r} \quad (1)$$

$$v_l = v_r = \frac{f}{A_y} \frac{{}^R y \cdot \cos q_e - {}^R z \cdot \sin q_e}{{}^R y \cdot \sin q_e + {}^R z \cdot \cos q_e} = \frac{f}{A_y} \frac{h_e}{g_e}$$

(여기서,

- f : 카메라의 초점거리, 7.5 mm 이고.
- A_x, A_y : 스케일 인자, 0.01 mm/pixel 이며
- B : 카메라 사이의 거리, 100 mm 이다.)

3.2 스테레오 특징 역 기구학

스테레오 영상에 대한 역 기구학은 좌, 우 영상에서 맺히는 물체의 위치 (u_l, v_l, u_r, v_r) 로 (R) 에 대한 물체의 3차원 좌표 $({}^R P)$ 를 구하는 과정이다. 식 (1) 과 같은 경우에는 재귀적으로 역 기구학을 구하여야 하며, 이 때에는 거리 정보 $({}^R z)$ 를 최소 사승법 (Least-Square Method) 에 근거하여 우선적으로 구한다[4]. 구한 거리 정보를 가지고 식 (2)와 같은 역기구학을 풀면 된다.

$${}^R x_l = \frac{B}{2} - \frac{{}^R z \cdot (f \cdot \sin q_l - u_l \cdot A_x \cdot \cos q_l)}{u_l \cdot A_x \cdot \sin q_l + f \cdot \cos q_l}$$

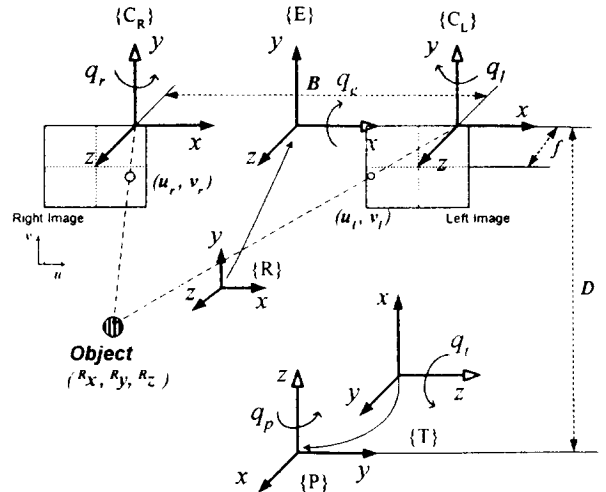


그림 3. 좌표계
Fig. 3. The Coordinates System

$${}^R x_r = -\frac{B}{2} \frac{{}^R z \cdot (f \cdot \sin q_r + u_r \cdot A_x \cdot \cos q_r)}{u_r \cdot A_x \cdot \sin q_r - f \cdot \cos q_r} \quad (2)$$

$${}^R x = ({}^R x_l + {}^R x_r) / 2$$

$${}^R y = -\frac{{}^R z \cdot (f \cdot \sin q_e + v_l \cdot A_y \cdot \cos q_e)}{v_l \cdot A_y \cdot \sin q_e - f \cdot \cos q_e}$$

3.3 스테레오 특징 자코비안

추적하려는 물체의 특징이 점(Point Feature)이기 때문에 일반적인 visual servoing에 사용되는 것과는 다르게 카메라에 대한 물체의 위치 변화 ${}^R P = ({}^R x', {}^R y', {}^R z')$ 만을 고려하면 된다. 따라서 구성된 스테레오 특징 자코비안은 식 (1)을 각 변수 ${}^R P$ 로 미분하여 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u_l \\ u_r \\ v_l \end{bmatrix} = F({}^R P, Q) \quad J = \frac{\partial \{F({}^R P, Q)\}}{\partial \{{}^R P\}}$$

$$\begin{bmatrix} u_l' \\ u_r' \\ v_l' \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} {}^R x' \\ {}^R y' \\ {}^R z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & 0 & J_{13} \\ J_{21} & 0 & J_{23} \\ 0 & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^R x' \\ {}^R y' \\ {}^R z' \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$J_{11} = -\frac{f}{A_x g_l} (-\cos q_l g_r + \sin q_l h_r) \quad J_{13} = -\frac{f}{A_x g_l} (-\sin q_l g_r - \cos q_l h_r)$$

$$J_{21} = -\frac{f}{A_x g_r} (\cos q_r g_l - \sin q_r h_l) \quad J_{23} = -\frac{f}{A_x g_r} (-\sin q_r g_l - \cos q_r h_l)$$

$$J_{32} = \frac{f}{A_y g_e} (\cos q_e g_r - \sin q_e h_r) \quad J_{33} = \frac{f}{A_y g_e} (-\sin q_e g_r - \cos q_e h_r)$$

이렇게 구하여진 스테레오 특징 자코비안 J 는 3x3 이므로 비특이행렬이 되어서 역 행렬이 존재하게 된다. 역 특징 자코비안은 영상에 맺힌 물체의 속도 (u_l', u_r', v_l') 를 입력으로 하여, $({}^R x', {}^R y', {}^R z')$ 를 알아 낼 수 있다.

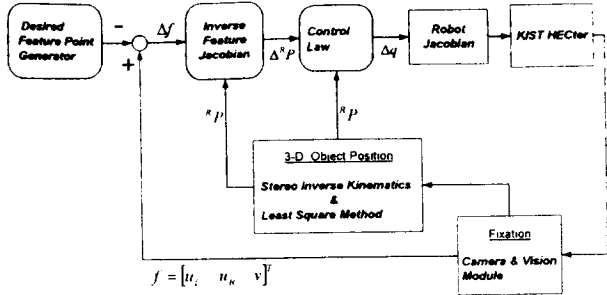


그림 4. 시뮬레이션 블럭도
Fig. 4. The Block Diagram for a Simulation

4. Control Law

양쪽 카메라의 광축(optical axis)이 추종하려는 물체에서 만날 때 즉, 물체가 양쪽 영상의 중심에 위치할 때, 물체 위치와 구동부들의 값의 관계는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} q_l &= \tan^{-1}\left(\frac{(B/2 - {}^R x)}{{}^R z}\right) \\ q_r &= \tan^{-1}\left(\frac{(B/2 + {}^R x)}{{}^R z}\right) \\ q_e &= \tan^{-1}\left(\frac{{}^R y}{{}^R z}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

이때 물체가 3차원공간에서 움직이기 때문에 식 (4)를 각각 시간으로 미분하면 체인 룰에 의하여 식 (5)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_l}{\partial t} &= \frac{\partial q_l}{\partial {}^R x} \frac{\partial {}^R x}{\partial t} + \frac{\partial q_l}{\partial {}^R z} \frac{\partial {}^R z}{\partial t} \\ \frac{\partial q_r}{\partial t} &= \frac{\partial q_r}{\partial {}^R x} \frac{\partial {}^R x}{\partial t} + \frac{\partial q_r}{\partial {}^R z} \frac{\partial {}^R z}{\partial t} \\ \frac{\partial q_e}{\partial t} &= \frac{\partial q_e}{\partial {}^R x} \frac{\partial {}^R x}{\partial t} + \frac{\partial q_e}{\partial {}^R z} \frac{\partial {}^R z}{\partial t} \\ q_l' &= \cos^2(q_l) \left[\frac{-{}^R x'}{{}^R z} - \frac{(B/2 - {}^R x) {}^R z'}{{}^R z^2} \right] \\ q_r' &= \cos^2(q_r) \left[\frac{{}^R x'}{{}^R z} - \frac{(B/2 + {}^R x) {}^R z'}{{}^R z^2} \right] \\ q_e' &= \cos^2(q_e) \left[\frac{-{}^R y'}{{}^R z} - \frac{{}^R y {}^R z'}{{}^R z^2} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

3.2에서 구한 추종하려는 물체의 3차원 위치와, 3.3에서 구한 역특징 자코비안의 결과인 물체의 3차원 속도를 근거로 하여, 식 (5)의 q_l' , q_r' 그리고 q_e' 를 결정하고, 이에 따라서 각 구동부를 제어한다.

5. 시뮬레이션

전체 시뮬레이션의 블럭도는 (그림 4)와 같다. 시뮬레이션에서는 추종하려는 물체가 {R}에 대한 x, y, z축의 3차원 공간을 각각 20초 미만($t < 20\text{sec}$)에서는 정현파의 연속적인 움직임을, 20초 이상($t > 20\text{sec}$)에서는 정지한다고 가정하였고(그림 5), 전체의 샘플링시간은 50 msec로 가정하였다. 각 축의 초기위치를 물체의 초기위치에 일치시켰다.

(그림 6)은 양쪽 영상 u축 및 v축의 시간에 대한 변화를 나타내

었다. 물체의 계속적인 움직임에 대하여서는 영상에서의 오차가 각 축에 대하여 12.5 pixel 미만이었고, 정지시에는 오차가 없었다. (그림 7)은 왼쪽 카메라 구동부(q_l)의 값, (그림 8)은 오른쪽 카메라의 구동부(q_r), (그림 9)은 카메라 광축의 elevation 구동부(q_e)의 이상값과 실제값을 나타내고 있다.

6. 결론 및 추후과제

본 논문에서는 인간형 머리-눈 시스템의 경우에 대하여 영상 특징 기구학 및 영상 특징 자코비안을 제안하였으며, 이를 사용하여 3차원 공간상을 움직이는 칼라 물체의 추종에 대한 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였다.

현재는 시스템이 가진 5 자유도 가운데서 눈 동작을 표현하는 3 자유도만을 사용하였지만, 인간과 유사한 동작을 하기 위한 목 동작에 관한 모델을 추가해야 할 것이다. 또한, 초기에 양 카메라를 물체에 일치시킨 점은 [10]에 의하면 smooth pursuit 모드에 해당하는 부분이므로, 물체가 영상 중심에서 정해진 값 내에 있지 않을 때인 saccade 모드도 고려되어야 할 것이다.

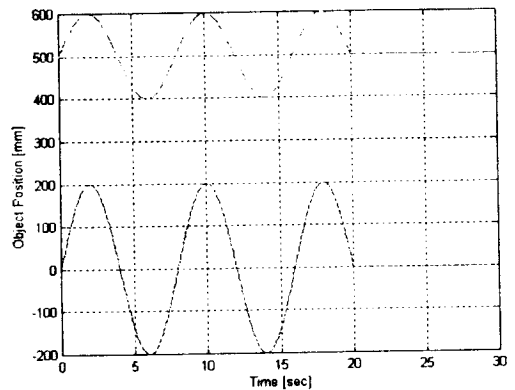


그림 5. 시간에 따른 물체의 위치
Fig. 5. The position of object vs. time
(Solid : x, Dotted : y, Dashed : z)

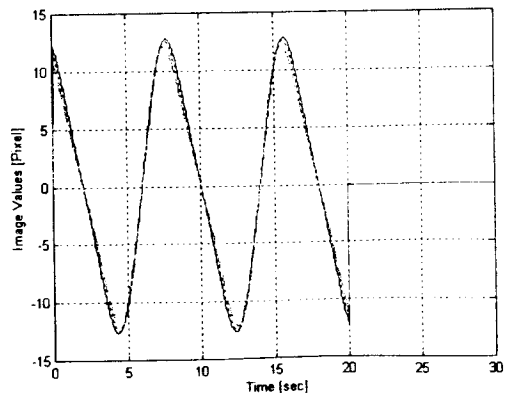


그림 6. 양쪽 영상의 u축 및 v축 (Pixel vs. Time)
Fig. 6. The u- & v- axis of Both Image
(Solid : Left u-axis, Dashed : Right u-axis, Dotted : Both v-axis)

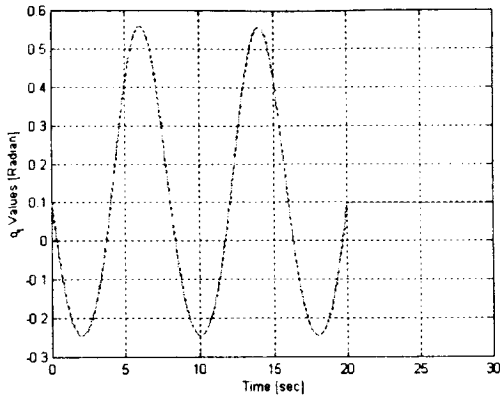


그림 7. 시간에 따른 q_1 값의 변화
Fig. 7. q_1 values vs. time
(Solid : Desired , Dotted : Actual)

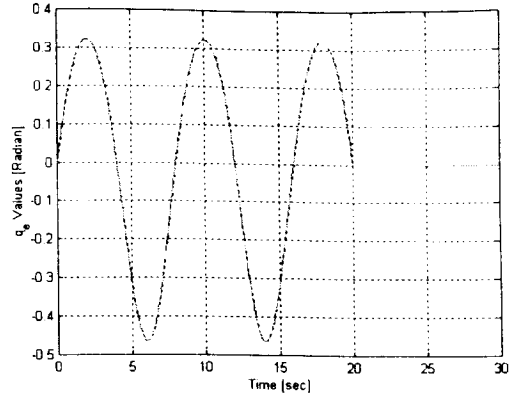


그림 9. 시간에 따른 q_e 값의 변화
Fig. 9. q_e values vs. time
(Solid : Desired , Dotted : Actual)

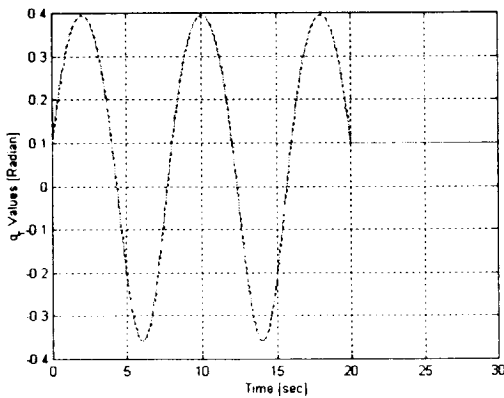


그림 8. 시간에 따른 q_r 값의 변화
Fig. 8. q_r values vs. time
(Solid : Desired , Dotted : Actual)

참고 문헌

- [1] J. Batista, P. Peixoto and H. Araujo, "Real-time Vergence and Binocular Gaze Control," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1348-1354, 1997.
- [2] A. Bernardino and J. Santos-Victor, "Vergence Control for Robotic Heads using Log-polar Images," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1264-1271, 1996.
- [3] M. Hwangbo, B. -J. You, S. -R. Oh and C. W. Lee, "Design and Redundant Motion Control of Active Stereo Head-Eye System with Vergence," accepted to *IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN'98)*, 1998
- [4] R. Jain, R. Kasturi and B. G. Schunck, *Machine Vision*, pp. 332-333, McGraw-Hill, Singapore, 1995
- [5] J. W. Y. Kam, "A Real-Time 3-D Motion Tracking System," in Tech. Report 93-16, Computer Science Lab. Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada.
- [6] A. Konno, K. Nagashima, R. Furukawa and K. Nishiwaki, "Development of a Humanoid Robot *Saika*," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 805-810, 1997
- [7] M. Marefat, L. Wu and C. Yang, "Gaze Stabilization in Active Vision-I. Vergence Error Extraction, -II Multi-Rate Vergence Control," in *Pattern Recognition*, Vol. 30, No. 11, pp. 1829-1853, 1997.
- [8] T. J. Olson and D. J. Coombs, "Real-time Vergence Control for Binocular Robots," in *Int. Journal of Computer Vision*, Vol. 7, No. 1, pp. 67-89, 1991.
- [9] C. Rasmussen, K. Toyama and G. Hager, "Tracking Objects By Color Alone," Tech. Report 1114, AI Lab., Yale Univ., Sep., 1996.
- [10] E. Rivlin, H. Rotstein and Y. Y. Zeevi, "Two-Mode Control: An Oculomotor-Based Approach to Tracking Systems," in *IEEE Trans. On Automatic Control*, Vol. 43, No. 6, June, 1998
- [11] S. Rougeaux, N. Kita, Y. Kuniyoshi, S. Sakane and F. Chavand, "Binocular Tracking Based on Virtual Horopters," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2052-2057, 1994.
- [12] P. M. Sharkey, D. W. Murray, S. Vandeveld, I. D. Reid and P. F. McLauchlan, "A Modular Head/Eye Platform for Real-time Reactive Vision," in *Mechatronics*, Vol. 3, No. 4, pp. 517-535, 1993
- [13] P. M. Sharkey, D. W. Murray, J. J. Heuring, "On the Kinematics of Robot Heads," in *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, Vol. 13, No. 3, pp. 437-442, June, 1997.
- [14] A. Takanishi, T. Matsuno and Isao Kato, "Development of an Anthropomorphic Head-Eye Robot with Two Eyes," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 799-804, 1997
- [15] 황보명, 유범재, 오상록, 이종원, "눈동자 운동이 가능한 컬러 스테레오 머리-눈 시스템의 개발," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2370-2372, 1998.