눈동자 운동이 가능한 컬러 스테레오 머리-눈 시스템의 개발

황 보 명*, 유 범 재*, 오 상 록*, 이 종 원°
*한국과학기술연구원 지능제어연구센터, °한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터

Development of a Color Stereo Head-Eye System with Vergence

Myung Hwang-Bo*, Bum-Jae You*, Sang-Rok Oh*, Jong-Won Lee°
*KIST Intelligent System Control Research Center, °KIST Advanced Robotics Research Center

Abstract - Recently we have developed an active stereo head-eye system with vergence, name it *KIST HECter*(Head-Eye System with Colored Stero Vision), based on the analysis of human's neck and eye motion at visual behavior. Our HECter is a five degree-of-freedom system composed of pan and tilt motion in neck part and independent vergence motion of binocular cameras and commonly shared elevation axis in eye part. And stereo vision provides two color image, which are processed by powerful each TMS32080 vision board. The shape and size are designed to be almost same as human face.

The ability to vergence has significant importance and gives many beneficial merits. On its mechanical implementation we adapt a non-parallelogram 4-bar linkage mechanism since it provides high accuracy in transfering motion and enables compact and flexible design.

1. 서 론

현재까지 인간의 신체 활동에서 볼 수 있는 복잡하면서도 자연스러운 움직임과 각 신체 기능의 구현에 목표를 둔 인간형 로봇들이 많이 개발되었다. 이러한 노력은 카메라를 통한 물체 인식 및 추종 분야에도 적용되어 인간과 유사한 시각 시스템을 구축하려는 많은 노력이 있어 왔다.

인간형 시각 시스템의 구축에는 움직이는 목표물에 능동적으로 대처하기 위한 다자유도 시스템과 실시간 영상 인식 시스템이 필요하며, 주로 인간형 로봇의 머리부분이나 이동로봇에 많이 적용되고 있다.

근래에 눈동자의 vergence 운동이 가지는 잇점에 주목하여 많은 스테레오 시각 시스템이 이를 활용하게끔 개발되고 있다. 기구적인 설계에서 보면 눈동자 부분에서 회전축을 모터와 같은 구동부와의 연결방식에 따라 전체적인 구조를 달리한다. PennEye, Medusa[1], ESCHeR[2]는 구동축에서 회전축이 직접 구동되는 방식으로 기구적인 설계가 간단하고 구현이 쉬우나 구동부의 크기와 설치 위치의 제약으로 인해 전체적인 구조가 획일화되어 있으며 인간형에 근접한 형태를 가지기 힘들다. 이와 달리 WE-3R[3]는 tendon을 사용하여 구동부와 회전부를 분리시킴으로써 인간형에 가깝게 설계하고 있다. 또한 AUG[4]와 MDOF head[5]에서는 focus, zoom 및 aperture를 조절할 수 있는 전동 카메라를 사용하며 카메라사이의 baseline 및 CCD cell의 각도를 조정 가능케 하는 등, 인간이 가지는 조절기능을 추가하기 위해 전체 자유도를 증가시키고 있다.

KIST에서는 머리와 눈의 기본적인 움직임을 포함하고 눈동자 운동이 가능한 5자유도 로봇을 인간 얼굴의 크기와 형태에 가깝게 설계함과 동시에, TMS32080 DSP를 이용한 컬러영상의 실시간 처리를 통하여 이동하는 시각 목표물을 추종할 수 있는 스테레오 시각 시스템 *HECter*를 개발하였다.

2. 인간의 시각 특성

2.1 눈동자의 망막 특성

인간의 망막은 빛을 받아들이는 시각세포들이 공간상에서 중심부분으로 갈수록 많이 분포되어 있는 형태를 이루고 있으며 이를 foveate system[6]이라 일컫는다. 따라서 인간은 시세포의 밀도가 가장 높은 망막의 중심 fovea에 물체의 상이 맺기 위해 양쪽 눈동자가 같이 시각 목표물을 바로 바라보도록 동시에 움직여 가능한 가장 많은 정보를 얻게 된다. 그림 1에서 보듯이 물체에 대한 시각 고정점을 바라보는 응시방향이 물체의 이동에 따라 바뀌면서 눈동자의 vergence 조절 및 seccadic shift를 하게 된다.

2.2 눈동자 운동(vergence)

Vergence란 양쪽 눈동자가 공간상의 같은 점을 응시하도록 눈동자 사이의 각을 조정하는 과정을 말한다. vergence의 조절은 응시방향으로 공간상의 물체 까지의 거리를 조정한다. 이 각도는 baseline의 길이와 더불어 목표물과의 거리에 직접적으로 관계되므로 3차원 상의 목표물 위치나 위치의 변화와 관계된 다른 정보는 vergence 조절에 매우 유용하다. 이러한 정보로 가장 널리 쓰이는 것은 시각 고정점이 양쪽 영상에 맺힐 때 중심에 대한 위치의 차이를 나타내는 disparity이며 초점오차, 목표물의 질감 및 음영 등 또한 이를 위한 정보로 쓰일 수 있다.

2.3 Sacadic Shift

눈동자의 단속적인 운동을 일컬으며 목표물에 대한 응시를 재빨리 다른 목표물로 바꾸는 운동이다. 공간상에 여러 물체가 있을 경우 응시점이 물체사이를 오갈 때나 순간적인 물체의 위치변화를 따라가는 경우에 발생하며 동시에 양 눈동자가 같은 방향으로 움직인다.

2.4. vergence 조절의 이점

현재 개발되는 camera에서 인간 눈동자의 특성인 fovea를 가지고 있지 않으므로 인간의 vergence 조절 목적이 바로 적용되지 않는다. 그러나 fovea가 없는 카메라를 이용한 시스템이라도 vergence 조절을 가능할 경우에는 다음과 같은 이점을 가질 수 있다.

첫째, 목표물에 대한 고정점이 양쪽 영상에서 모두 중심부 근처에 나타나게 되므로 이를 정사투영으로 대신할 수 있어 영상분석이 훨씬 손쉽게 된다. 둘째, 고정점 근처에서 disparity가 매우 작게 되므로 이런 특성을 이용한 스테레오 알고리듬을 이용하면 영상분석속도가 매우 빨라지며 스테레오에 의한 영상데이터 결합의 용이해진다. 이는 복잡한 시각 환경에서 disparity가 큰 부분에서 나타나는 영상특징요소들을 제외하고 현재 목표물 부근의 관심 있는 부분만을 끌어내는 filter로 사용된다. 셋째, 양 카메라에서 동시에 볼 수 있는 영역이 넓어져 스테레오의 특성을 훨씬 더 잘 이용할 수 있다.

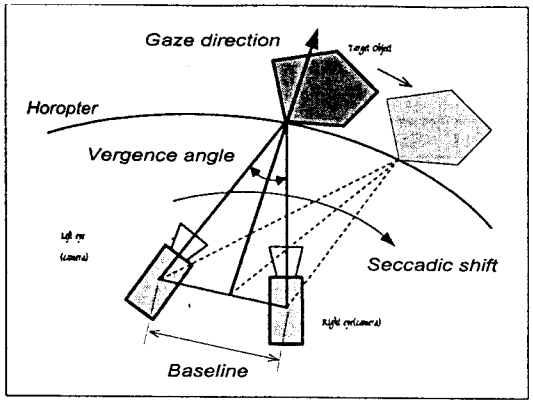

그림 1. 인간의 눈동자 움직임 특성

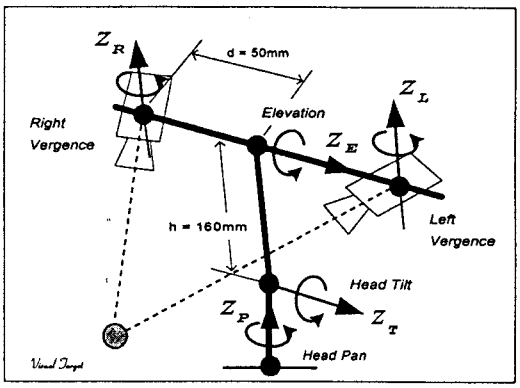

그림 2. HECter의 전체 5자유도 시스템의 구성

3. 스테레오 시각 시스템의 설계

인간이 물체를 볼 때 목과 눈동자의 움직임을 살펴보면 목을 통해 움직임의 변화가 큰 물체를 추적함과 동시에 양 눈동자를 조절하여 미세한 물체의 움직임을 따라잡고 또한 정확한 초점을 맞춘다. 양 눈동자는 물체의 움직임에 따라 수평방향의 위치가 다르지만 수직방향으로는 같은 운동을 한다. 그러므로 이전의 스테레오 시스템에 목의 움직임과 독립적인 눈동자 움직임을 고려하여 그림 2에서 보듯이 5-자유도 시스템을 구성하였다. 목에서는 swing 운동을 제외시키고 pan과 tilt 운동이 가능하게 하였고 눈부분은 양 카메라의 vergence 조절이 가능하며 공통 상하 회전축을 가진다. 각 눈동자가 독립적인 상하운동축을 가지지 않더라도 시각 운동의 표현에는 영향을 주지 않으며 구동축을 줄일 수 있는 장점이 있다.

3.1. 구동 mechanism의 설계

이전의 보편적인 시각 시스템의 경우 회전축과 구동축을 직접 연결하는 방법을 사용함으로 인해 아래방향으로 긴 모터가 카메라와 같은 축 상에 놓이게 되어 전체 로봇의 외관을 제한했다. 이를 극복하는 방법으로 그림 3과 같은 4절 링크기구를 눈동자부분의 vergence 및 elevation축 적용하여 서로 평행하게 떨어진 축 사이를 연결시키면서 정밀도를 확보하였다. 이 방식은 산업용 로봇팔 등에 이미 평행사변 4절기구로써 적용되고 있으며, 여기에서는 그와 달리 driver와 follower 사이의 길이비를 적절하게 설정하여 다음과 같은 효과를 가지게 한다.

(1) 구동 mechanism의 유연한 설계를 가능케 한다.
(2) 정확하고 빠른 운동을 전달할 수 있다.
(3) 구동축에 대한 회전축의 속도를 증가시킨다.
(4) 회전각이 일정한 각도내로 제한될때 적합하다.

vergence와 elevation운동은 연속적인 회전운동이 요구되는 것이 아니라 일정 회전범위내의 운동을 필요로 하므로 4절 링크의 적용이 가능하며, tendon을 사용할 때 고려해야 할 탄성에 의한 변형 역시 문제되지 않으므로 빠르고 정확한 운동을 전달할 수 있다. 그림 3에서 4절 링크는 l_2과 l_3 또는 l_3와 l_4가 일직선 상에 놓일 때 특이점(singular point)을 가지고 회전범위의 한계값이 된다. 이 특이점에서 회전축 driver와 구동축 follower의 각도는 다음 식(1)를 통해 구할 수 있다.

모터에 연결된 구동부(driver)가 회전하면 coupler를 통해 회전부(follower)로 운동이 전달되며 이 때 증폭되는 각속도비는 link길이 및 각의 함수로 식(2)와 같이 표현된다.

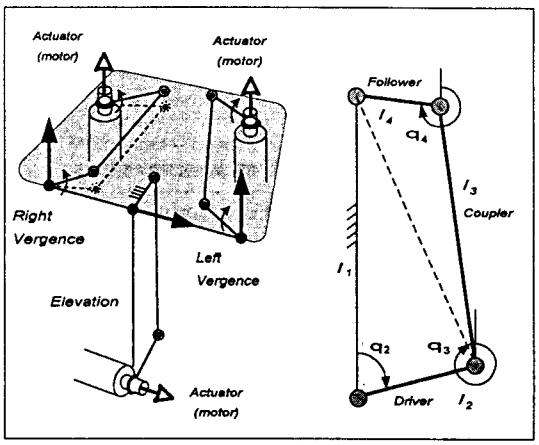

그림 3 눈동자 구동부의 4절 링크 적용

$$\theta_{2,\,singular} = \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + (l_2 \pm l_3)^2 - l_4^2}{2l_1(l_2 \pm l_3)}\right)$$
$$\theta_{4,\,singular} = \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + (l_3 \pm l_4)^2 - l_2^2}{2l_1(l_3 \pm l_4)}\right) \quad (1)$$

$$\omega_4 = -\frac{l_2 \sin(\theta_2 - \theta_3)}{l_4 \sin(\theta_3 - \theta_4)}\,\omega_2 \quad (2)$$

그러므로 필요한 회전범위 및 회전속도비에 따라 적절한 link들의 길이와 길이비를 설정해야 한다. 4절 링크에 대한 각속도비는 그림 4에서 보듯이 특이점에 가까이 갈수록 무한히 커지는 아래로 볼록한 포물선의 형태를 가진다. 이러한 특성은 카메라가 vergence축의 중심에 대해 멀리 벗어나는 물체에 대해 빠른 추종을 할 수 있도록 하며, 정면에서 회전각 제어에 높은 분해능을 가지게 한다. 각 회전축에서의 회전범위, 최대속도 및 분해능을 표 1에 정리하였다.

그 외에 목 부위의 pan 및 tilt 운동을 위한 구동부는 전체 시스템의 구성위치에서 하단부분에 위치하고 있으므로 회전축과 직접 연결하였다. 특히 pan은 모터와 축 사이를 직교 축 기어로 연결하여 모터를 수평방향으로 설치함으로써 전체 높이를 줄였다.

3.2. 구동 액츄에이터의 선정 및 전체 크기

구동 액츄에이터의 크기 및 중량은 로봇의 크기와 중량을 결정하며 고속의 움직임과 빠른 응답속도를 위해서는 높은 출력과 큰 토오크를 필요로 하다. 또한 위치 제어에 요구되는 정밀도는 카메라의 이미지 셀의 크기와

표 1. 로봇 각 축의 구동사양 및 적용된 4절링크의 길이

구동축	회전범위 [deg]	최대속도 [rpm]	분해능 [deg]	링크길이[mm]		
				l_2	l_3	l_4
Vergence	-60~65	180	0.0063	13	118	26
Elevation	-60~70	170	0.0072	20	163	30
Tilt	-70~70	100	0.0036			
Pan	-150~150	150	0.0090			

해상도에 좌우된다. 고 해상도의 카메라일수록 하나의 셀이 표현하는 공간상 목표물의 크기는 작아지게 되므로 영상에서 추출해 내는 정보가 카메라의 위치 및 방향의 정밀도에 민감해진다. 이러한 요구조건들을 수용하기 위해 DC 모터와 높은 기어비의 harmonic 기어를 사용하여 backlash를 제거하고 위치 정밀도를 향상시키며 토오크 출력을 증가시켰다.

또한 인간의 얼굴에서 두 눈동자 사이의 거리와 눈에서 목 사이의 거리를 측정으로 하여 시스템의 성능과 분석에 중요한 역할을 하는 다음 두 인자를 설정하였다.

- baseline의 길이(두 camera 사이) = 100 mm
- elevation 축과 tilt 축 사이의 거리 = 160 mm

로봇의 전체크기는 높이 337.5 mm, 정면너비 284.4 mm, 그리고 측면너비 249 mm로 설계되어 인간의 얼굴 크기와 비슷하다.

3.3. 컬러 영상 처리부

흑백시스템의 경우 영상처리가 간단하다는 장점을 제외하면 물체인식능력이 배경에 따라서 가변적인 경우가 많고 동일한 물체의 경우에도 조도의 영향을 많이 받게 되므로 배경과 조도의 변화에 적응성이 높은 컬러 시각시스템을 채택하였다. 컬러영상처리를 위해 TI사의 TMS320C80 다중프로세서 DSP를 이용한 Matrox 사의 PCI-bus Genesis 보드를 두 개 사용하여 각 카메라의 영상을 독립적으로 처리하도록 하였다.

3.4. 전체 시스템의 제어 및 구성

개발된 시각시스템의 전체 구성은 그림 5와 같이 구축되었다. 로봇의 구동에는 각 모터에 대하여 독립적인 제어를 전담하는 PMC사 DCX-200 제어보드를 사용하여 5축의 속도 및 위치제어를 한다. On-the-fly 기능이 내장되어 있어 연속적이고 부드러운 움직임이 가능하다.

그림 1에서 공간상의 한 점에 대해 고정시킬 경우 전체 5자유도에 대해 2개의 여유자유도가 생긴다. 예를 들어 θ_{tilt}, θ_{ele}와 vergence를 적절히 조합하여 물체와 카메라사이의 거리를 조절할 수 있고 응시방향은 θ_{pan}과 각 카메라의 각도에 따라 조절된다. 즉 목표물을 가깝게 또한 멀게 볼 수 있어 stereo matching을 여러 위치에서 적용할 수 있으므로 물체까지의 거리 측정을 정밀하게 할 수 있고 물체를 다양한 각도에서 볼 수 있어 면이나 모서리와 같은 물체의 특징을 훨씬 쉽게 파악할 수 있다.

4. 결론 및 추후과제

HECter는 전체 5자유도를 가지며 vergence가 가능하고 4절 링크에 의한 구동으로 전체 크기와 형상을 인간에 가깝도록 설계되었다. 또한 DSP32080을 이용한 두 개의 영상처리보드를 통해 스테레오 컬러 카메라의 영상을 통해 물체의 움직임을 분석하여 능동적으로 추종하도록 로봇의 위치를 제어한다. 위에서 언급한 여유자유도를 이용하고 이를 물체인식 및 추종에 이용할 수 있는 알고리듬 개발이 앞으로 필요하다.

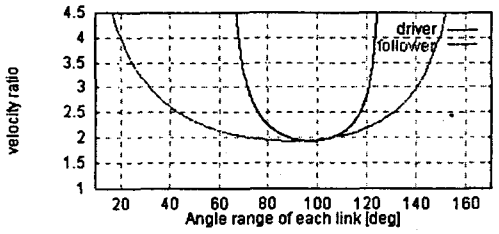

그림 4. 4절 링크의 구동부와 회전부의 범위 및 속도

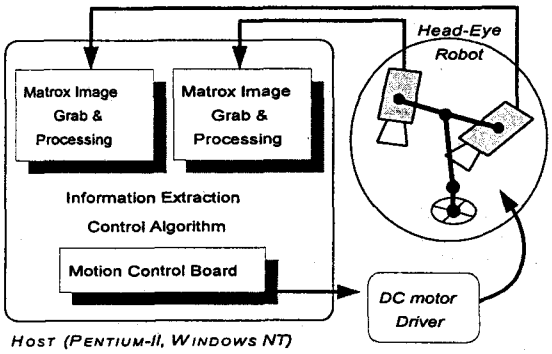

그림 5. HECter의 제어부 및 전체 시스템의 구성

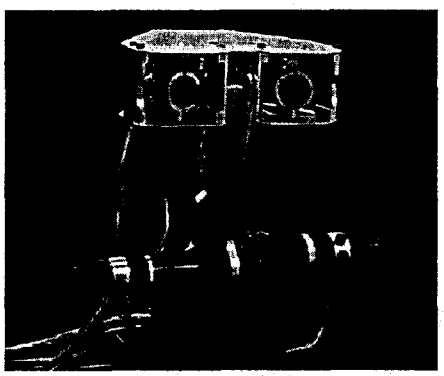

그림 6. 개발된 시각시스템 HECter의 외관

[참 고 문 헌]

[1] J. Batista, P. Pexixoto and H. Araujo, "Real-Time Vergence and Binocular Gaze Control", IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent robotic system, Sept., 1997.

[2] Y. Kuniyoshi, N. Kita, S. Rougeaux and T. Suehiro, "Active Stereo Vision System with Foveate Wide Angle Lenses", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerue, New Mexico, April, 1997.

[3] Atsuo Takanishi, Tadao Matsuno and Isao Kato, "Developement of an Anthropomorphic Head-Eye Robot with Two Eyes." Proc. IEEE/RSJ Int. conf. on Intelligent Robots and systems, pp.799-804, 1997

[4] H. I. Christensen, J. Horstmann and T. Rasmussen, "A Control Theoretical Approach to Active Vision", 2nd Asian Conf. on Computer Vision, Dec., 1995.

[5] J. Batista, J. Dias and H. Araujo and A. Almeida "The ISR Multi Degrees-of-Freedom Active ision Robot Head : design and calibration", M2VIP'95-Second Int. Conf. on Mech. & Machine Vision, Hong-Kong, Sept., 1995.

[6] T.J. Olson and D.J. Coombs, "Real-Time Vergence Control for Binocular Robot", Int. J. of Computer Vision, Vol. 7, 1991.