

여자유도를 갖는 능동시각시스템의 제어기 설계

김도윤, 유정래, 박현근, 정명진
한국과학기술원 전자전산학과

Controller Design of Active Head-eye System with Redundant Degree of Freedom

Do-Yoon Kim, Jung Rae Ryoo, Hyum-Keun Park, Myung Jin Chung
Department of Electrical Engineering & Computer Science, KAIST

Abstract - 능동시각시스템의 가장 큰 장점은 주어진 환경에 대해 능동적으로 반응할 수 있는 자유도가 있어 이를 활용하여 필요한 정보를 쉽게 추출할 수 있다는 점이다. 이를 위해서는 능동시각시스템의 시선을 원하는 위치로 이동시키는 것이 필요한데, 시스템의 여자유도 인해 해가 무수히 많이 존재하게 된다. 본 논문에서는 이러한 여자유도 문제를 기구의 동역학적 특성을 제한 조건으로 하여 최적의 해를 구하고 이를 이용해 각 관절을 제어하는 제어기를 설계하는 방법에 대해 소개한다. 설계된 제어기는 제작과 실험을 통해 고속으로 움직이는 물체를 실시간으로 추적하는 성능을 보였다.

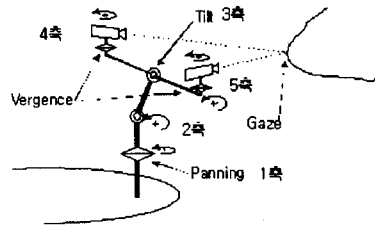


그림 1 설계한 능동시각시스템의 구조

1. 서 론

최근 로봇의 활동 영역을 작업대나 미리 약속된 영역과 같은 정적 환경에서 인간이 생활하는 동적 환경으로 확장 시도하면서 주위 환경의 정보를 처리하여 로봇 제어에 필요한 정보를 생성하는 고성능 시각 시스템의 필요성이 많이 언급되고 있다[1][7]. 시각 시스템이 작업 환경에서 움직이지 않고 고정되어 있는 기존의 수동 관측자 측면에서 컴퓨터 영상 처리는 비정규성, 비선형성, 불안정성들의 문제점들을 가지고 있다. 반면 능동 관측자 경우에는 이러한 문제점들이 정규성, 선형성, 안정화로 바뀌게 되어 문제 해결이 쉬워지기 때문에 능동시각시스템은 컴퓨터 영상 분야에서 매우 중요한 연구 분야로 자리잡아가고 있다[1][2][3].

대부분의 능동시각시스템의 연구는 인간의 생물학적 안구 운동 및 머리 운동 제어 시스템에 기반하여 연구가 진행되고 있다[1][4][5][6]. 인간이 3차원 공간상의 임의의 한 점으로 시선을 이동하는 경우에는 눈동자의 단속 운동(saccadic shift motion)이 발생하여 목표물에 대한 응시점을 빠르게 원하는 부분으로 이동시킨다. 이러한 운동은 외부환경의 특정한 물체를 탐지하기 위해 일어나는 고속 운동으로, 하나의 목표물에서 다른 목표물로 빠르게 움직이므로써 망막의 중심에 관심을 가지는 새로운 목표물을 위치시킨다. 이 때 양쪽 눈동자가 공간상의 같은 점을 응시하게 만들기 위해 눈동자 사이의 각도를 조정하는 과정이 같이 병행되는데, 이 과정을 양안 연동 제어(vergence control)라 한다. 눈동자의 단속 운동과 양안 연동 제어를 통해 3차원 공간상의 특정 물체를 응시하게 된 후 지속적으로 물체를 망막의 중심에 위치시키기 위해 안구와 머리는 물체의 움직임을 추종하는 운동을 하는데 이를 시추적(smooth pursuit)라 한다[1].

이와 같은 시각 운동을 구현할 수 있는 하드웨어를 제작할 경우 얻을 수 있는 이점은 여러 가지가 있지만 중요한 몇 가지를 언급하면 다음과 같다[3]. 첫째, 목표물이 항상 영상의 중심에 나타나게 되므로 양안 시차의 오차가 최소화되면서 3차원 정보 추출이 쉽고 어려움에 강인해진다. 둘째, 이미지는 중심에서 멀어질 수록 렌즈에 의한 왜곡이 심해지는데 이를 최소화 할 수 있다. 셋째, 움직이는 물체를 이미지 상에서 정지시킴으로서 물체 인

식에 유리하다. 넷째, 영상의 중심 부분에만 영상 처리 알고리즘을 적용함으로써 계산 시간을 크게 단축할 수 있다.

이와 같은 이점을 이용하기 위해 본 논문에서는 그림 1과 같이 5 자유도를 가진 능동시각 시스템을 설계하였다[3][7]. 두 대의 스테레오 카메라는 각각 좌우로 독립적으로 움직일 수 있으며(vergence, 4축,5축), 두 카메라의 상하 운동(eye tilting, 3축) 및 머리 부분의 앞뒤 운동(2축), 좌우 운동(panning, 1축)이 가능하도록 한, 인간의 머리부분을 모방하여 설계한 시스템이다. 본 논문에서는 2축의 운동을 안구 운동에 직접 관여하지 않기 때문에 고정시키고 나머지 4개의 자유도를 이용하여 인간의 시각 운동을 구현하는 제어기 설계를 목표로 한다. 이 경우 3차원 공간상의 임의의 한 점으로 시선을 고정하기 위해 역기구학을 구하면 여자유도로 인해 무수히 많은 해가 존재하게 된다. 따라서 여자유도를 갖는 능동시각시스템의 제어기 설계는 시스템의 역기구학의 여러 해 중에서 인간의 안구 운동과 유사한 움직임을 보일 수 있는 해를 찾고 이 값을 기준으로 각 축을 제어하는 제어기 설계 문제를 생각할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 위에서 언급한 여자유도 문제를 WLN(weighted least norm)를 이용하여 해결하고 설계된 능동시각시스템의 기계적 동역학 특성에 적합한 경로를 온라인으로 생성하는 경로 생성 방법에 대해 설명한다. 3장에서는 제작된 실제 시스템에 적용하여 제한한 제어기의 성능을 검증하고 결과를 분석한다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 추후 과제를 언급한다.

2. 능동시각시스템의 제어기 설계

2.1 WLN 방법의 소개

그림 1과 같은 구조의 능동시각시스템에서는 각 관절과 3차원 공간상의 한 점의 대응 관계를 다음과 같은 기구학 식으로 표현할 수 있다.

$$x = J(\theta) \dot{\theta} \tag{1}$$

이 때 x 는 선형 속도 성분을 나타내는 3×1 벡터이며, θ 는 관절의 속도 성분인 5×1 벡터이다. 단, 본 논문에서 2축은 고정시켜 두었으므로 4×1 벡터로 표현된다. $J(\theta)$ 는 자코비안 행렬로 3×4 공간을 갖게 되어

식 (1)을 만족시키는 관절 속도 벡터는 무수히 많이 존재한다. 이 문제를 해결하는 일반적인 방법은 $J(\theta)$ 의 가상 역행렬(pseudo inverse matrix) J^+ 를 도입하여 다음과 같이 관절의 속도를 계산하는 것이다.

$$\dot{\theta} = J^+ \dot{x} + (I - J^+ J) \phi \quad (2)$$

식 (2)는 식 (1)의 최저 노름 해(least-norm solution)이다. $(I - J^+ J) \phi \in N(J)$ 는 J 의 널 공간(null space)이며 식 (1)의 일반해(homogeneous solution)가 된다.

능동시각시스템의 추적 성능(tracking performance)을 향상시키기 위해서는 시스템의 동역학적 제한 조건을 이용하여 관절을 속도를 구해야 할 필요성이 있다. 특히 안구 운동을 모방하는 카메라의 움직임은 상대적으로 머리의 좌우 운동에 비해 매우 빠르기 때문에 움직이는 물체를 추적할 때는 초기에 카메라가 빠르게 움직여서 물체를 추적하고 그 후 머리가 움직이도록 하는 것이 추적에 적합하다. 이는 실제 인간의 경우에서도 움직이는 물체를 추적할 때 동일하게 일어나는 현상이다.

이러한 시스템 동역학적인 특성을 고려하여 해를 구하기 위해 본 논문에서는 WLN 방법을 적용한다. WLN 방법은 다른 여자유도 해결 방법에 비해 연산 시간을 많이 사용하지 않기 때문에 빠른 응답을 요구하는 시스템에서 여자유도 문제를 해결하는데 유용하다[10].

WLN 방법에서는 관절 속도 벡터에 가중치를 곱한 새로운 벡터의 2-노름 $|\dot{\theta}|_W$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$|\dot{\theta}|_W = \sqrt{\dot{\theta}^T W \dot{\theta}} \quad (3)$$

위 식에서 $W \in R^{4 \times 4}$ 행렬은 대각 행렬로서 대각 성분의 각 요소는 관절이 벌 수 있는 최대 각속도의 역수에 해당하는 값을 대입한다. 예를 들어 1축의 최대 각속도가 다른 축에 비해 현저히 느리다면 W 행렬의 1축에 해당하는 요소는 다른 요소에 비해 매우 큰 값으로 정의한다.

WLN 방법으로 해를 구하기 위해 다음과 같은 변환을 도입한다.

$$J_W = J W^{-1/2} \quad \text{and} \quad \dot{\theta}_W = W^{1/2} \dot{\theta} \quad (4)$$

식 (4)를 이용해 식 (1)과 식 (3)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{x} = J_W \dot{\theta}_W \quad (5)$$

$$|\dot{\theta}|_W = \sqrt{\dot{\theta}_W^T \dot{\theta}_W} \quad (6)$$

식 (5)의 LN 해(least-norm solution)는

$$|\dot{\theta}|_W = J_W^+ \dot{x} \quad (7)$$

과 같이 얻어지고 식 (4)를 이용하여 식 (1)의 WLN 해는 다음과 같다

$$\dot{\theta}_{Wm} = W^{-1/2} \dot{\theta}_W^* \quad (8)$$

위 식 (8)은 pseudo inverse 정의에 의해 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\dot{\theta}_{Wm} = W^{-1} J^T [J W^{-1} J^T]^{-1} \dot{x} \quad (9)$$

2.2 WLN 방법의 적용

식 (9)의 해는 각 관절의 속도 벡터이다. 이 값을 그대로 피드백 제어 시스템의 기준값(reference)으로 사용할 수도 있지만 모터에 장착된 센서는 엔코더로서 속도 정보에 비해 위치 정보를 상대적으로 정확히 얻을 수 있다. 따라서 다음과 같이 식 (9)를 수정하여 위치 정보

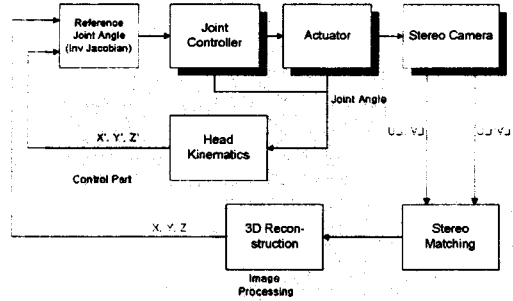


그림 2 설계한 제어기 구조

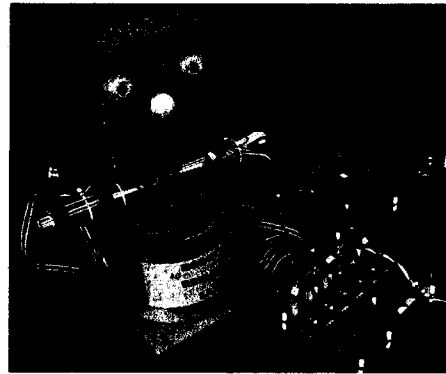


그림 3 제작된 능동시각시스템과 제어기(TMS320C32) 및 앰프 보드

로 제어를 하도록 한다.

$$\Delta \theta_{Wm} = W^{-1} J^T [J W^{-1} J^T]^{-1} \Delta x$$

(10)

$$\theta_{Wm}^* = W^{-1} J^T [J W^{-1} J^T]^{-1} (x_{target} - x_{kinematics}) + \theta_{Wm}$$

위 식(10)에서 x_{target} 은 목표점을 나타내고, $x_{kinematics}$ 는 엔코더 정보를 통해 기구학 식으로부터 얻어진 응시점을 나타낸다.

각 축에 장착된 모터의 최고 각속도는 다음과 같다.

	1축	3축	4축	5축
최대 각속도	500°/s	500°/s	1500°/s	1500°/s

이 값을 참조하여 눈동자의 움직임에 해당하는 3축, 4축, 5축은 가중치를 1로 설정하고, 1축은 가중치를 3으로 잡았다. 3축은 많은 토크를 필요로 하여 기어비의 상승으로 인해 최대 각속도는 1축과 동일하지만 물체를 추종할 때는 4축과 5축의 움직임과 가중치는 동일하므로 4축, 5축과 같은 값을 가지게 설계하였다. 따라서 가중치 행렬 W 는 다음과 같다.

$$W = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

그림 2에 제안한 제어기의 구조를 나타내었다.

3. 실험 및 결과 분석

3.1 실험 환경

제작된 전체 시스템의 사진을 그림 3에 제시하였다. 능동시각시스템은 스테레오 칼라 카메라를 장착하고 있

으며 각 관절의 액추에이터는 인크리멘탈 엔코더를 장착한 brush DC 모터를 사용하였다. 모터 제어 주기는 4kHz이며, PWM 주파수는 39kHz, 듀티비의 해상도는 10bit이다. 스테레오 칼라 카메라의 영상은 PC에서 각각 30frames/s의 속도로 실시간 캡처된다. PC에서는 3차원 복원을 통해 식 (10)의 x_{target} 을 계산하여 DSP TI320C32 보드에 직접 비동기 통신을 이용해 전송한다. DSP 보드에서는 4kHz 주기로 모터의 위치 정보를 엔코더로부터 읽어 역자코비안을 통해 식 (10)의 $x_{kinematics}$ 을 계산하여 에러를 구하고 이 값을 통해 PD 제어기로 PWM 듀티비를 생성한다. 이와 같은 구성은 제어 주기마다 경로가 새롭게 갱신되기 때문에 빠르게 움직이는 물체의 추종에 유용하다[7].

3.2 실험 결과

실험은 능동시각시스템의 전방 1.5m 앞에 응시할 물체가 3m/s의 속도로 지름 1m 원형을 비스듬하게 움직일 경우를 행하였다. 그림 4는 실험 결과를 출력한 것으로 각각 5축(오른쪽 카메라의 회전), 4축(왼쪽 카메라의 회전), 3축(카메라의 tilting), 1축(머리의 panning)의 각도를 시간 축에 대해 그린 것이다. 4축, 5축은 가장 빠르게 움직이는 눈동자에 해당하는 부분으로 주어진 궤적을 빠르게 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 1축은 4축과 5축이 응시점으로 빠르게 수렴한 후에 4축과 5축이 관절 제한에 걸리지 않도록 보상해주면서 제어가 되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 전체적인 운동은 설정한 가중치의 영향으로 우선 3축, 4축, 5축으로 움직이는 물체를 추적한 후 1축이 움직이는 물체 쪽으로 방향을 전환하여 움직이는 물체는 항상 이미지 중심에 위치하도록 한다.

그림 5는 3차원 공간상에서 움직인 물체의 실제 경로와 능동시각시스템이 추적한 응시점을 같은 공간에 투영한 그림이다. 전체적으로 원형의 궤적을 추종하는 것을 확인할 수 있으며 전체 경로에 대해 평균 자승 오차(mean square error)는 13.5cm가 나왔다.

4. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 능동시각시스템의 응시점을 3차원 공간상의 원하는 점으로 이동할 때 발생하는 여자유도 문제를 WLN 방법을 사용하여 해결하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 동역학적 특성을 제한조건으로 사용하여 시스템의 성능을 잘 활용할 수 있다. 제안된 방법은 실제 시스템을 통해 확인하였으며 3m/s의 고속으로 움직이는 물체의 추적의 에러에서 약 13.5cm 평균 자승 오차를 가지고 추적하는 것을 확인할 수 있다. 설계된 시스템은 총 5개의 자유도를 가지고 있으나 본 논문에서는 안구 운동에 직접 관여하지 않은 머리의 상하에 해당하는 관절은 고정시켰다. 추후 연구에서는 이 부분도 고려한 5 자유도를 갖는 능동시각시스템의 제어기 설계가 진행될 것이며, 칼라 필터와 같은 예측기(estimator)를 제어기에 부착하는 것도 추후 과제로 남는다.

(참 고 문 헌)

- [1] Andrew Blake and Alan Yuille, "Active Vision," The MIT Press, 1992
- [2] Jorge Bastista, Paulo Peixoto and Helder Araujo, "Real-Time Vergence and Binocular Gaze Control," Proc. IROS97, pp1348-1354, 1997
- [3] M. Hwang-Bo, B.-J. You, S.-R. Oh and C.-W. Lee, "Design and Redundant Motion Control of Active Stereo Head-Eye System with Vergence," 7th IEEE Workshop on Robot and Human Communication(ROMAN), pp.135-141, 1998
- [4] David Coombs, "Real-Time Binocular Smooth

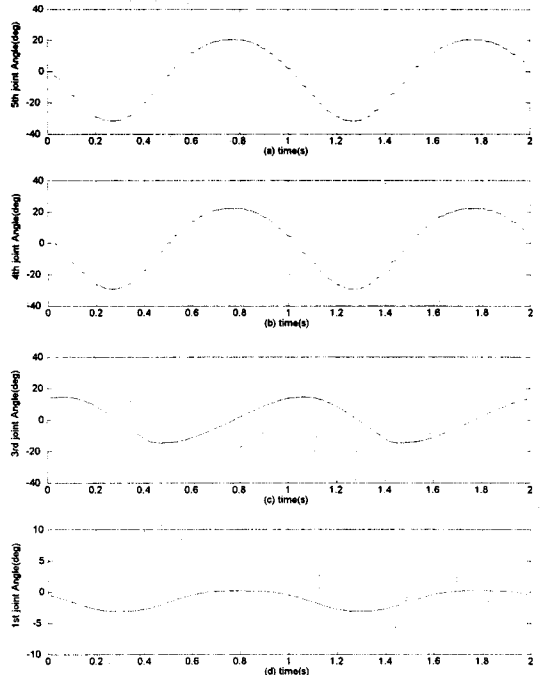


그림 4 움직이는 물체를 추적할 때 각 축의 각도 (점선 : 기준 경로, 실선 : 실제 경로)

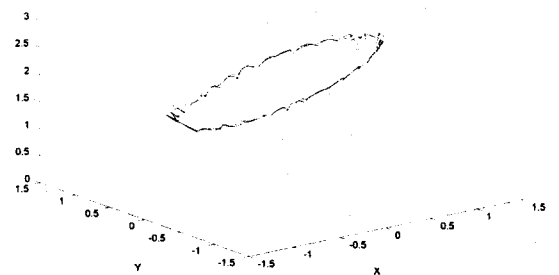


그림 5 실험 결과를 3차원 공간상에 투영한 그림 (점선 : 목표점, 실선 : 응시점)

- Pursuit," *International Journal of Computer Vision*, 11:2, 147-164, 1993
- [5] Y. Kuniyoshi, N. Kita, K. Sugimoto, S.Nakamura, and T. Suehiro, "A foveated wide angle lens for active vision," In Proc. IEEE int. Conf. Robotics and Automation, pp2982-2988, 1995
- [6] Carl-Johan Westelius, "Focus of Attention and Gaze control for robot vision," *Linkoping University Ph.D thesis*, 1995
- [7] J. R. Ryoo, D.-Y. Kim, and M. J. Chung, "An On-line Trajectory Generation for Control of Active Head-Eye System," will be presented in *Asian Control Conference*, Shanghai, China, 2000
- [8] Do-Yoon Kim, "On-Line Path Planning for Multiple mobile Robot," *KAIST Master thesis*, 1997
- [9] T. Yoshikawa, *Foundation of Robotics Analysis and Control*, Cambridge:MIT Press, 1990
- [10] T.F. Chan and R.V. Dubey, "A Weighted Least-Norm Solution Based for Avoiding Joint Limits for Redundant Joint Manipulators," *IEEE Trans. on Robot. and Auto.*, vol.11, no.2, pp.286-292, 1995