

LQG 시각추종제어기를 이용한 로봇매니퓰레이터의 제어

* 임태현* , 전항식** , 최영규* , 김성신*

*부산대학교 전기공학과 **대우중공업(주) 항공사업부

Control of Robot Manipulators Using LQG Visual Tracking Controller

* Tai-Hun Lim*, Hyang-Sig Jun**, Young-Kiu Choi*, Sungshin Kim*

*Dept. of Electrical Engineering in Pusan National Univ.

**Dept. of Aerospace Division, Daewoo Heavy Industries Co., Ltd

Abstract - Recently, real-time visual tracking control for a robot manipulator is performed by using a vision feedback sensor information. In this paper, the optical flow is computed based on the eye-in-hand robot configuration. The image jacobian is employed to calculate the rotation and translation velocity of a 3D moving object. LQG visual controller generates the real-time visual trajectory. In order to improving the visual tracking performance, VSC controller is employed to control the robot manipulator. Simulation results show a better visual tracking performance than other method.

1. 서론

시각 센서를 이용한 로봇 매니퓰레이터의 제어가 최근에는 많이 수행되고 있으며, 특히 카메라를 이용하여 입력된 영상정보로부터 다양한 환경에서의 로봇 매니퓰레이터의 제어가 수행되고 있다. 일반적으로 이러한 카메라를 이용한 제어에서는 카메라의 영상정보를 이용한 외부 시각서보 루프와 로봇의 제어를 위한 내부 서보루프로 구성된다. 두 개의 루프를 이용한 시각추종제어는 비전시스템의 빠른 샘플링 시간을 요구하지 않고 만족할 만한 성능을 구현할 수 있기때문에 이를 이용한 연구가 많은 분야에서 응용되고 있다(3,4,5,7).

이중루프구조의 시각추종제어에 있어서 시각서보제어기로 기존의 상태 피드백 제어를 이용한 제어는 영상정보의 잡음과 외란에 적절한 보상이 어려우므로 로봇 매니퓰레이터의 정확한 기준입력을 생성하기 어려운 점이 있다. 따라서 본 논문에서는 외부 시각서보제어기로 입력 영상정보의 잡음과 시스템 외란을 고려한 LQG 시각제어기를 구성하고, 로봇 매니퓰레이터의 내부 서보루프 제어기는 로봇의 외란이나 파라미터의 불확실성등에 강인한 VSC제어기를 적용하고자 한다.

LQG 시각제어기의 입력은 영상평면상에서의 물체의 운동정보인 광류(optical flow)나 속도값을 이용하고, 시각 추종제어를 수행하기 위하여 eye-in-hand 환경하에서 로봇 매니퓰레이터가 움직이는 물체를 추종하도록 전반적인 제어를 수행하고자 한다.

2. 시각 제어기

3차원 공간상에서 임의의 점 P에 위치한 물체가 평면상에서 움직일 때 이 점 P의 원근 투영에 의한 영상평면에서의 좌표가 p이고 p점 주위의 이웃 영역을 Ω_w 라고 할 때, 2D 시각추종은 영상평면상의 원점을 중심으로 한 영역 Ω_w 에서 임의의 영역 Ω_w 를 일정하게 유지하기 위한 카메라 프레임에서의 선속도 (T_x, T_y) 및 회전속도 (R_x, R_y) 를 카메라 프레임에 대해서 구하는 것으로 정의할 수 있다. 영상 평면상에서 어떤 시간 kT에서 점 p의 속도 성분인 광류(optical flow)는 다음과 같이 나타낼 수 있다(5).

$$u(kT) = u_o(kT) + u_c(kT) \tag{1}$$

$$v(kT) = v_o(kT) + v_c(kT) \tag{2}$$

위의 식(1)(2)에서 $u(kT), v(kT)$ 는 측정되는 시간 kT에서의 광류성분이며 $u_o(kT), v_o(kT)$ 는 물체의 운동에 의한 특징점에 서의 광류 성분이다. $u_c(kT), v_c(kT)$ 는 카메라의 추종운동에 의한 광류 성분이고, T는 비전의 샘플링 시간이다. 그리고 광류는 다음과 같은 식이 성립하므로

$$u(k) = (x(k+1) - x(k))/T \tag{3}$$

$$v(k) = (y(k+1) - y(k))/T \tag{4}$$

여기서 (x, y)는 영상좌표값이다.

식(3)과(4)를 이용하여 식(1)과(2)를 상태공간형[5]으로 나타내면 다음과 같다.

$$p(k+1) = Ap(k) + Bu_c(k) + Ed(k) + Hv(k) \tag{5}$$

$$y(k) = Cp(k) + w(k)$$

여기서 $A = H = I_2, B = E = TI_2, p(k) \in R^2,$

$u_c(k) \in R^2, d(k) \in R^2, v(k) \in R^2, C = I_2$ 이고,

$p(k) = (x(k), y(k))^T$ 는 상태벡터,

$u_c(k) = (u_c(k), v_c(k))^T$ 는 제어입력 벡터,

$d(k) = (u_o(k), v_o(k))^T$ 는 외부 외란 벡터,

$v(k) = (v_1(k), v_2(k))^T$ 는 백색잡음 벡터,

$w(k) = (w_1(k), w_2(k))^T, w(k) \sim N(0, W)$ 는 백색 잡음벡터

로봇 매니퓰레이터가 3차원 평면상에서 운동하는 물체를 시각추종하는 경우 앞의 시각추종의 정의에서 단지 물체의 선속도 성분 (T_x, T_y) 과 평면에 수직인 z축 주위의 회전속도인 R_z 성분만이 존재함을 알 수 있다. 따라서 식(5)를 시각추종제어기를 설계하기 위한 수학적인 이산시간 상태공간방정식(5)으로 근사화하면 다음과 같다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu_c(k) + Ed(k) + Hv(k) \tag{6}$$

$$y(k) = Cx(k) + w(k)$$

여기서 $x(k) = (x(k), y(k), \theta(k))^T$

$y(k) = (y_1(k), y_2(k), y_3(k))^T$ 이다.

따라서 위의 상태공간방정식에서 기준입력을 0으로 두고 물체의 움직임에 의한 광류를 외란으로 두어 다음과 같은 오차벡터를 최소화 하도록 적절한 제어입력 $u_c(k)$ 를 구하면 된다.

$$e(k) = (x(k) - 0, y(k) - 0, \theta(k) - 0)^T \tag{7}$$

시스템의 백색잡음을 고려한 LQG 제어기의 제어법칙은 다음과 같다.

$$\mathbf{u}_n(k) = -G\hat{\mathbf{x}}(k) \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{u}_n(k) = \mathbf{u}_c(k) + \mathbf{d}(k)$, $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 는 추정상태 벡터이다.

따라서 실질적인 시각제어기에 있어서의 제어입력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\hat{\mathbf{u}}_c(k) = -G\hat{\mathbf{x}}(k) - \hat{\mathbf{d}}(k) \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{J}} = E \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} [\mathbf{x}^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{x}(k) + \mathbf{u}_n^T(k) \mathbf{R} \mathbf{u}_n(k)] \right\} \quad (10)$$

여기서 $\hat{\mathbf{d}}(k)$ 는 외란의 추정벡터이다.

시스템의 가격함수는 위와 같이 설정하여 가격함수의 평균비용을 최소화하는 최적의 상태 피드백 제안을 다음과 같이 구한다.

$$\mathbf{G} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \quad (11)$$

여기서 \mathbf{P} 는 대수 Riccati 행렬방정식의 해이다.

다음은 식(9)의 추정벡터를 구하기 위하여 Kalman 필터를 구성하고 6개의 상태벡터를 추정해야하므로 다음과 같은 새로운 상태벡터를 정의한다.

$$\mathbf{x}_M(k) = (x(k), y(k), \theta(k), u_c(k), v_o(k), w(k))^T \quad (12)$$

따라서 Kalman 필터 방정식(5)은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{x}}_M(k+1) = \mathbf{A}_M \hat{\mathbf{x}}_M(k) + \mathbf{B}_M \mathbf{u}_c(k) + \mathbf{K}_e (y(k) - \mathbf{C}_M \hat{\mathbf{x}}_M(k)) \quad (13)$$

여기서 $\mathbf{K}_e = \mathbf{A}_M \mathbf{P}_e \mathbf{C}_M^T [\mathbf{C}_M \mathbf{P}_e \mathbf{C}_M^T + \mathbf{R}_e]^{-1}$ 이고,

\mathbf{P}_e 는 대수 Riccati 행렬방정식의 해이다.

3. 로봇 매니퓰레이터의 제어기

로봇은 시각제어기에서의 출력을 기준입력으로 하여 원하는 궤적을 정확히 추종하는데 목적이 있으므로 로봇 동역학의 비선형성과 외란 파라미터 불확실성 등에 강인한 VSC 제어기를 적용한다.

일반적으로 VSC에서 시스템의 상태가 스위칭면 밖에서 시작하게 되면 파라미터의 변동이나 외란에 영향을 받게 된다. 따라서 상태벡터가 스위칭면으로 점근적인 수렴을 가지게 되어, 결과적으로 긴 도달시간을 발생시킨다. 시스템의 상태가 이러한 시간적 지연에 기인한 도달모드를 가지게 되면 VSC의 대표적 특성인 강인성이 보장될 수 없다. 따라서 이 논문에서는 이런 도달모드의 단점을 좀 더 극복하면서 제어기 자체의 채터링을 줄이는 방향으로 제어법칙을 적용하고자 한다. 우선 VSC 제어기를 설계하기 전에 일반적인 비선형 시스템의 상태방정식 및 스위칭면으로 수렴하기 위한 스위칭함수를 정의하기로 한다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{a}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}(\mathbf{x}) \mathbf{u} \quad (15)$$

$$\mathbf{s}(\mathbf{x}) = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (16)$$

여기서 (15)는 비선형 시스템의 일반적인 상태방정식이고 \mathbf{C} 는 상수 벡터이다.

도달모드에서 시스템의 상태벡터가 스위칭면으로 수렴하기 위한 조건으로 스위칭함수의 미분방정식을 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{\mathbf{s}} = -\mathbf{Q} \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) - \mathbf{K} \mathbf{s} \quad (17)$$

여기서 $\mathbf{Q} = \operatorname{diag}[q_1, \dots, q_m]$, $q_i > 0$

$$\operatorname{sgn}(\mathbf{s}) = [\operatorname{sgn}(s_1), \dots, \operatorname{sgn}(s_m)]^T$$

$$\mathbf{K} = \operatorname{diag}[k_1, \dots, k_m], \quad k_i > 0.$$

$$\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_m]^T$$

일반적인 관절 좌표계에서 m -링크 로봇 매니퓰레이터의 동역학은 다음과 같다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{p}, t) \quad (18)$$

여기서 $\mathbf{q}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{f}$ 는 m 차원을 가지는 벡터이다.

$\mathbf{q} \in R^m$ 는 로봇 관절의 일반화된 좌표이고 $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in R^{m \times m}$ 는 양의 한정인 관성행렬이며, $\mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^m$ 는 구심력 및 코리올리(coriolis)력, 중력을 나타내는 벡터이고 $\mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{p}, t)$ 는 로봇의 진동과 크기가 유계(bounded)된 외란벡터이며 $\boldsymbol{\tau}$ 는 로봇의 입력 토크 t 는 시간변수이다. 그리고, 식(15)에서 외부의 외란을 고려한 상태방정식으로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{a}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}(\mathbf{x}) \mathbf{u} + \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) \quad (19)$$

여기서 \mathbf{p} 는 uncertainty 파라미터 벡터, \mathbf{v} 는 외부외란 벡터이다.

로봇 매니퓰레이터의 동역학에서 $2m$ 차원의 상태를 정의한다.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

식(19)는 다음식으로 정리된다(6).

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x}) \mathbf{n}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}^0(\mathbf{x}) \\ \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x}) \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x}) \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

오차벡터를 다음과 같이 정의하여 로봇이 원하는 궤적을 추종하도록 한다.

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}^d - \mathbf{x}_1 \\ \dot{\mathbf{q}}^d - \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

따라서 m 차원의 스위칭함수는 다음과 같다.

$$\mathbf{s}(\mathbf{e}) = \mathbf{C} \mathbf{e} = [\Lambda \quad \mathbf{I}] \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \end{bmatrix} = \Lambda \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 \quad (23)$$

식(21)과 식(23)을 미분하여 대입하면 다음의 제어입력을 구할 수 있다(6).

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M} \{ \mathbf{Q} \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) + \mathbf{K} \mathbf{s} + \Lambda \dot{\mathbf{e}}_1 + \ddot{\mathbf{q}}^d \} + \mathbf{n} - \mathbf{f} \quad (24)$$

식(24)에서 \mathbf{f} 는 미지의 외란이기 때문에 제어입력을 결정할 수 없으며 따라서 적절한 도달모드를 보장할 수 있도록 알고 있는 랑 \mathbf{f}_c 로 대체하여 제어법칙을 결정하도록 한다.

\mathbf{f}_c 가 알고 있는 값으로 유계되어 있을 때 그 경계치의 최소, 최대값을 정하여 이 값을 도달모드가 보장될 수 있도록 스위칭시켜 최종적인 로봇 매니퓰레이터의 입력토크를 구하도록 한다.

4. 전체 제어기 구성

시각제어기는 비전시스템을 통하여 얻은 정보를 바탕으로 물체의 움직임에 대한 로봇이 추종할 수 있는 궤적명령을 영상평면에서의 속도값으로 출력한다. 이러한 속도값들은 영상자코비안(7)을 이용하여 실질적인 카테시안 좌표값으로 변형되고 로봇은 바람직한 궤적명령에 의해서 평면상에서 움직이는 물체를 추종하게 된다. 이런 일련의 과

정을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

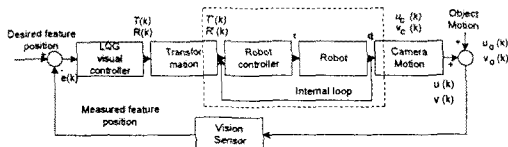


그림 1. 전체 시각추종 제어 시스템의 블럭선도

5. 시뮬레이션

시뮬레이션은 산업용으로 널리 쓰이는 SCARA 로봇 매니플레이터에 적용해 수행하였으며, CCD카메라는 SCARA 로봇의 2축 끝에 장착되었다고 가정했다. 실제 실험적으로 구현시에는 카메라를 통한 물체의 영상평면 속도값 계산이 전체 추종성능에 큰 영향을 미치지만 여기서는 비전 샘플링 시간이내에 물체의 속도값이 가능하면 이상적으로 계산된다고 가정했다.

물체의 궤적은 x 방향으로는 $-0.14 \cos(t)[m]$, y 방향으로는 $0.08 \sin(t)[m]$ 값을 주었다. 또한 3차원 평면상으로 물체가 운동하기 때문에 평면에 수직인 방향에 대한 회전성분은 0로 간주하였고 비전 샘플링 시간은 $80ms$, 로봇 매니플레이터는 $1ms$ 로 4초 동안 시뮬레이션을 수행하였다.

로봇 매니플레이터의 파라미터로는 $Q = \text{diag}[3, 5.5]$ 로 주었고, $K = \text{diag}[3, 6.5]$, $A = \text{diag}[1, 1]$ 로 설정하였다. 그리고 로봇의 초기위치는 1축이 $0.851[\text{rad}]$, 2축은 $1.489[\text{rad}]$ 로 주었다. 여기서는 일정한 외란 및 영상잡음이 있는 경우에 상태 피드백을 이용한 시각제어기를 사용했을 때와 LQG시각제어기를 사용했을 때의 응답을 각각 비교해 보았다.

상태 피드백 제어기에서의 게인은, $[12.4805, 12.4805, 0]^T$, LQG 시각제어기에서의 게인은 상태 피드백 제어기에서의 게인과 동일하게 설정하였다. 그리고 Kalman 필터의 게인은 $K_e = [\text{diag}[0.4701, 0.4701, 0], \text{diag}[1.8508, 1.8508, 0]]^T$ 이고, 카메라와 물체와의 거리(depth)는 $1m$ 로 설정하였다.

그림2는 상태 피드백을 사용한 시각 제어기의 응답이고, 그림4는 LQG시각제어기를 사용했을 때의 응답이다. 여기서 시스템의 영상정보에 대한 백색잡음은 최대 20%범위로 주었고, 그림3과 그림5의 위치오차에서 LQG시각제어기가 외란 및 영상잡음에 전체적으로 좀 더 강인한 성능을 보여줌을 알 수 있다.

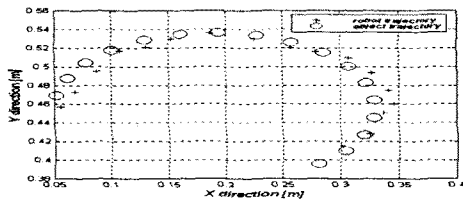


그림 2. 상태 피드백을 이용한 시각 제어기의 응답

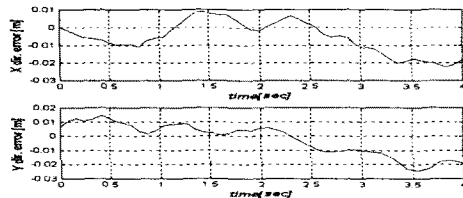


그림 3. 상태 피드백을 이용한 시각 제어기의 위치오차

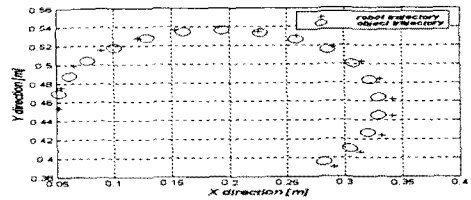


그림 4. LQG시각 제어기의 응답

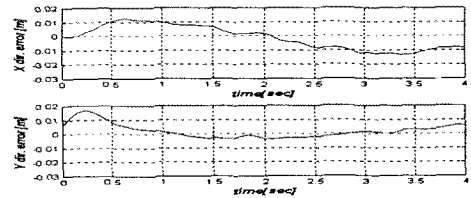


그림 5. LQG 시각제어기에서의 위치오차

6. 결론

실제 시각 추종시스템에서는 영상정보의 획득 및 계산시간 지연이 고려되어야 하고, 따라서 실험에서는 느린 비전 샘플링 시간에서도 만족할 만한 성능을 얻을 수 있도록 영상면에서의 움직이는 물체에 대한 예측이 고려되어야 한다. 또한 로봇의 작업영역에서 전체 구간에 대한 최적화된 상태 피드백 계수를 튜닝하여 전반적으로 로봇의 시각추종 성능을 향상시킬 필요가 있다.

[참고 문헌]

- J. T. Feddema and O. R. Mitchell, "Vision-Guided Servoing with Feature-Based Trajectory Generation," *IEEE Tran. Robotics and Automation*, Vol.5, No.5, pp. 691-700, 1989.
- J. Y. Hung, Weibing Gao, James C. Hung, "Variable Structure Control: A Survey," *IEEE Tran. Industrial Electronics*, Vol.40, No.1, pp.2-22, February 1993.
- L. E. Weiss, A. C. Sanderson, C. P. Neuman, "Dynamic sensor based control of robots with visual feedback," *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol.RA-3, No.5, pp.404-417, 1987
- D. B. Westmore, W. J. Wilson, "Direct dynamic control of a robot using an end-point mounted camera and Kalman filter position estimation," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.2376-2384, 1991
- N. P. Papanikolopoulos, P. K. Khosla, T. Kanade, "Visual Tracking of a Moving Target by a Camera Mounted on a Robot: A Combination of Control and Vision," *IEEE Tran. Robotics and Automation*, Vol.9, No.1, pp.14-35, 1993
- W. B. Gao and J. C. Hung, "Variable Structure Control of Nonlinear System: A New Approach," *IEEE Tran. Industrial Electronics*, Vol.40, No.1, 1993
- S. Hutchinson, G. D. Hager, P. I. Corke, "A Tutorial on Visual Servo Control," *IEEE Tran. Robotics and Automation*, Vol.12, No.5, 1996
- S. W. Wijesoma, D. F. H. Wolfe, R. J. Richards, "Eye-to-Hand Coordination for Vision-Guided Robot Control Applications," *International Journal of Robotics Research*, Vol.12, No.1, 1993
- P. K. Allen, A. Timcenko, B. Yoshimi, and P. Michelman, "Automated tracking and grasping of a moving object with a robotic hand-eye system," *IEEE Tran. Robotics and Automation*, Vol.9, No.2, pp.152-165, 1993
- D. H. Ballard, C. M. Brown, *Computer Vision*, P-H, 1982