

적분기를 포함하는 시각계환 강인제어기를 사용한 로봇 제어

Control of Robot Manipulators Using Robust Visual Feedback Controller with Integrator

지민석*, 김진수**, 이강웅***
(Min Seok Jie, Chin Su Kim, Kang Woong Lee)

Abstract - In this paper, we propose a robust visual feedback controller with integral action for tracking control of n -link robot manipulators in the presence of constant bounded parametric uncertainties. The proposed control input has robustness to the parametric uncertainty and reduces tracking error in the steady-state. The stability of the closed-loop system is shown by Lyapunov method. The effectiveness of the proposed method is shown by simulation results on the 5-link robot manipulators with two degree of freedom.

Key Words : robust control, visual feedback, integral action, camera in hand, robot manipulator

1. 서론

로봇이 불확실한 환경에서 작업을 수행하기 위해 영상 기반의 로봇 제어에 대한 연구가 증가하고 있다. 시각 계환을 이용한 연구는 로봇 매니플레이터의 위치 및 자세제어에 적용되고 있다. 시각 구동 시스템은 카메라의 위치에 따라 다음의 두 가지로 분류된다. 'fixed camera' 구조는 카메라가 작업 공간상에 고정되어 있는 경우이고, 카메라가 로봇 매니플레이터의 말단부에 장착되어 있는 구조를 'camera in hand' 환경이라 한다[1],[2]. 'camera in hand' 환경에서 카메라는 작업 공간에서 목표물의 시각 정보를 제어기로 제공한다. 시각 계환을 이용한 제어 시스템의 목적은 로봇 매니플레이터를 카메라로부터 획득한 목표물의 위치를 영상 평면상의 기준위치로 이동시키는 것이다.

시각 계환 루프는 로봇 비전 시스템의 동역학 제어부와 상호 작용이 없어 빠른 속도가 요구되는 작업에서는 만족스러운 결과를 얻을 수 없다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 제어기에 로봇 매니플레이터의 동역학 특성이 포함되어야 한다[3]. 그러나 로봇 동역학 제어부는 부하 변동과 외란에 의한 파라미터의 불확실성을 포함하고 있다. 따라서 시각 구동 제어기는 이러한 파라미터 불확실성과 외란에 강인한 동역학 제어부를 포함하여야 한다. Kelly[4]는 'camera in hand' 로봇 환경에서 이미지 기반의 시각 구동 제어기를 제안하였는데, 제어입력에 동역학 특성이 포함되지 않은 단순한 구조이다. Zergeroğlu[5]는 카메라 회전에 대한 불확실성을 보상하는 강인 제어기를 제안하여 균일 최종한계를 만족함을 보였다.

강인 제어기법은 로봇 관절의 추종오차를 줄이기 위해 높은 계환 이득이 요구된다. 하지만 실제적으로 높은 계환 이득은 하드웨어의 디지털화, 액츄에이터 포화 및 속도 측정시

포함되는 잡음과 같은 문제로 제한적이다. 계환 이득의 제한은 로봇 관절의 커다란 추종오차를 야기시킨다. 이와 같은 문제점은 적분 제어로 극복할 수 있다[6].

본 연구에서는 부하 변동이나 외란에서 야기되는 파라미터의 불확실성을 보상하고 로봇 관절의 추종오차를 줄이기 위해 적분작용이 포함된 시각 구동 강인제어기를 제안하고자 한다. 동역학 특성을 포함한 제어기의 안정성은 Lyapunov 판별법을 적용하여 입증한다. 5-링크 2 자유도를 가지는 로봇을 대상으로 컴퓨터 모의실험과 실험을 통해 제안된 시각 구동 강인제어기의 성능을 입증하고자 한다.

2. 로봇 모델과 카메라 모델

본 논문에서 고려하는 로봇의 말단부에 카메라가 장착된 시스템은 로봇 동역학 모델과 카메라 모델로 구성된다.

마찰과 외란이 고려되지 않은 n -링크 강체 로봇의 동역학 방정식은 다음과 같다[7].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

식 (1)의 동역학 방정식은 다음과 같은 성질을 가진다.

성질 1 : 식(1)은 미지의 파라미터 벡터 θ 에 대해 다음과 같이 선형으로 나타낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \tau \quad (2)$$

여기서 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in R^{n \times n}$ 은 기저의 축차행렬이다.

식 (1)의 동역학 방정식은 $\tilde{q} = q - q_d$ 로 정의된 로봇 관절의 추종오차의 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\tilde{q}} = M^{-1}(q)[-M(q)\ddot{q}_d - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) + \tau] \quad (3)$$

여기서 q_d 는 연속이고, 미분 가능한 원하는 관절 궤적이다.

제어기에 적분 작용을 포함시키기 위해 다음과 같은 새로운 상태벡터를 정의한다.

$$\sigma = \int_0^t \tilde{q}(\tau) d\tau \quad (4)$$

여기서 $\sigma = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \dots \ \sigma_n]^T$ 이다.

확장 상태 벡터 $\zeta = [\sigma^T \ \tilde{q}^T \ \dot{\tilde{q}}^T]^T$ 를 포함하는 확장 상

저자 소개

*韓國航空大學 航空電子工學科 博士課程

**韓國航空大學 航空電子工學科 碩士課程

***韓國航空大學 航空電子工學科 正教授 · 工博

태 방정식은 다음과 같다.

$$\zeta = A\zeta + BM^{-1}(q)[-Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta + c] \quad (5)$$

로봇의 관절 속도 \dot{q} 와 로봇의 말단부 선속도 v_c 와 각속도 ω_c 와 관계는 다음과 같다[8].

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = J_s(q)\dot{q} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} J_A(q)\dot{q} \quad (6)$$

여기서 $J_s(q)$ 는 기하학적 자코비안, $J_A(q)$ 는 해석적 자코비안이며 $T(q)$ 는 로봇 말단부의 회전을 나타내는 행렬이다.

카메라 좌표계의 원점에서 목표물까지의 위치 벡터 ${}^c p_o = [X \ Y \ Z]^T$ 는 다음과 같다.

$${}^c p_o = {}^c R_w ({}^w p_o - {}^w p_c) \quad (7)$$

여기서 ${}^c R_w$ 는 카메라 좌표계에서 정의된 로봇 좌표계의 방향을 나타내는 회전행렬이다.

${}^c p_o$ 벡터를 영상평면에 원근 투영시키게 되면 영상 평면상의 특징점 좌표 $\xi = [x \ y]^T$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\xi = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{bmatrix} X & Y \\ \alpha & \beta \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

여기서 f 는 카메라의 초점거리이고, α, β 는 각각 영상 평면상의 X, Y 축의 단위 화소당 미터 비례 계수이다. 또한 $Z > 0$ 는 로봇 말단부에서 목표물까지의 거리이다.

식 (7), (8)을 시간에 대해 미분하여 정리하면 영상 특징점 좌표의 운동을 카메라 속도 함수로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\xi} = J_{img}(\xi, Z) \begin{bmatrix} {}^c R_w & 0 \\ 0 & {}^c R_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 $J_{img}(\xi, Z)$ 는 영상 자코비안 행렬로 다음과 같다.

$$J_{img}(\xi, Z) = \begin{bmatrix} -\frac{f}{\alpha Z} & 0 & \frac{x}{Z} & \frac{\beta xy}{f} & -\frac{f^2 + \alpha^2 x^2}{\alpha f} & \frac{\beta y}{\alpha} \\ 0 & -\frac{f}{\beta Z} & \frac{y}{Z} & \frac{f^2 + \beta^2 y^2}{\beta f} & -\frac{\alpha xy}{f} & -\frac{\alpha x}{\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (6)을 식 (9)에 대입하면 영상 평면상의 특징점 속도는 로봇 관절의 속도로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\xi} = J(q, \xi, Z)\dot{q} \quad (11)$$

여기서 $J(q, \xi, Z)$ 는 다음과 같다.

$$J(q, \xi, Z) = J_{img}(q, \xi, Z) \begin{bmatrix} {}^c R_w & 0 \\ 0 & {}^c R_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} J_A(q) \quad (12)$$

시각 궤환을 이용한 로봇 제어에 있어서 제어 목적은 로봇의 위치와 목표물을 영상 평면상의 특징점으로 표현한 후 두 특징점을 원하는 오차 범의 안에서 일치하도록 로봇 말단부의 위치를 제어하는 것이다. 원하는 영상 특징점을 ξ_d 라 하면 영상 특징점의 오차함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\xi = \xi - \xi_d \quad (13)$$

식 (13)을 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{\xi} = J(q, \xi, Z)\dot{q} = J(q, \xi, Z)(\dot{q} + \dot{q}_d) \quad (14)$$

원하는 관절 속도 \dot{q}_d 를 다음과 같이 설계하도록 한다.

$$\dot{q}_d = -J^+(q, \xi_d, Z)K_c \xi \quad (15)$$

여기서 $J^+(q, \xi_d, Z) = [J^T(q, \xi_d, Z)J(q, \xi_d, Z)]^{-1}J^T(q, \xi_d, Z)$ 는 의사 역행렬이고, K_c 는 양한의 대칭행렬이다.

식 (15)을 식 (14)에 대입하면 다음의 관계를 만족한다.

$$\dot{\xi} = J(q, \xi_d, Z)\dot{q} - J(q, \xi_d, Z)J^+(q, \xi_d, Z)K_c \xi \quad (16)$$

3. 시각 궤환 강인제어

적분 작용을 포함하는 제어기를 다음과 같이 정한다.

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\theta_0 - M_0(q)K\zeta + J^+(q, \xi_d, Z)K_i \xi + \tau_N \quad (17)$$

여기서 K 와 K_i 는 설계이득 행렬로 양한이며 대칭이고, τ_N 은 유한한 파라미터 불확실성을 보상하기 위한 비선형 항으로 구성된 제어 입력이다. 또한 $M_0(q)$ 는 $M(q)$ 의 공칭행렬이고 θ_0 는 미지의 파라미터 벡터 θ 의 공칭값이며 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\theta_0$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\theta_0 = M_0(q)\ddot{q}_d + C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q) \quad (18)$$

여기서 $C_0(\cdot), G_0(\cdot)$ 은 각각 $C(\cdot), G(\cdot)$ 의 공칭행렬이다. 식 (17)의 제안된 입력 토크 방정식을 식(5)에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{\xi} = & (A - BK)\zeta + BM^{-1}(q)[-Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\theta \\ & + M(q)K\zeta + J^+(q, \xi_d, Z)K_i \xi + \tau_N] \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 $\theta = \theta_0 - \theta$, $M(q) = M(q) - M_0(q)$ 이며 이득 행렬 K 는 $(A - BK)$ 가 Hurwitz 이도록 정한다. 제어기의 안정도 해석에 필요한 가정을 다음과 같이 하기로 한다.

가정 1 : 다음 행렬들의 놈(norm)이 아래의 조건을 만족하면 한정된다.

$$\begin{aligned} \lambda_m \leq \|M^{-1}(q)\| \leq \lambda_M, \lambda_j \leq \|J(q, \xi, Z)\| \leq \lambda_J, \lambda_r \leq \|J^+(q, \xi_d, Z)\| \leq \lambda_J, \\ K_m \leq \|K\| \leq K_M, K_{0m} \leq \|K_0\| \leq K_{0M}, K_{cm} \leq \|K_c\| \leq K_{cM} \end{aligned} \quad (20)$$

가정 2 : 다음을 만족하는 상수 $\alpha_M, \alpha_C, \alpha_G \geq 0$ 가 존재한다.

$$\|M(q) - M_0(q)\| \leq \alpha_M \quad (21)$$

$$\|C(q, \dot{q}) - C_0(q, \dot{q})\| \leq \alpha_C \|\dot{q}\| \quad (22)$$

$$\|G(q) - G_0(q)\| \leq \alpha_G \quad (23)$$

가정 3 : 다음을 만족하는 상수 $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \geq 0$ 가 존재한다.

$$\|Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\theta\| \leq \beta_1 + \beta_2 \|\dot{q}\| + \beta_3 \|\dot{q}\|^2 \quad (24)$$

여기서 $\beta_1 = \alpha_M \|\ddot{q}_d\| + \alpha_C \|\dot{q}_d\|^2, \beta_2 = 2\alpha_C \|\dot{q}_d\|, \beta_3 = \alpha_C$ 이다.

비선형 제어 입력 τ_N 을 다음과 같이 정한다.

$$\tau_N = \begin{cases} -\frac{\lambda_M \bar{\beta}_1(\xi, \xi) s}{\lambda_m \|s\|} - \frac{\beta_2(\xi, \xi) s}{2\lambda_m \|s\|^2} & \text{if } \lambda_M \bar{\beta}_1(\xi, \xi) \|s\| \geq \mu \\ -\frac{\lambda_M^2 \bar{\beta}_1^2(\xi, \xi) s}{\lambda_m \mu} - \frac{\beta_2(\xi, \xi) s}{2\lambda_m \|s\|^2} & \text{if } \lambda_M \bar{\beta}_1(\xi, \xi) \|s\| < \mu \end{cases} \quad (25)$$

여기서 $\mu > 0$ 는 설계 파라미터이고, $s = B^T P \xi$,

$$\bar{\beta}_1(\xi, \xi) = \beta_1 + \beta_2 \|\dot{q}\| + \beta_3 \|\dot{q}\|^2 + \alpha_M K_M + \lambda_J K_M \|\dot{q}\|,$$

$$\bar{\beta}_2(\xi, \xi) = \lambda_J K_{0M} \|\dot{q}\| \|\xi\| \text{ 이다.}$$

정리 1 : 가정 1, 2와 3이 성립될 때 오차방정식 (5), (19)는 제안된 제어기 식 (17), (25)에 의해 유한한 시간 내에 로봇 관절 위치 추종 오차는 한정된다.

증명 : Lyapunov 후보함수를 다음과 같이 정한다.

$$V = \xi^T P \xi + \frac{1}{2} \xi^T K_0 \xi \quad (26)$$

여기서 K_0 는 양한의 행렬이고, $P = P^T > 0$ 는 Lyapunov 방정식 $(A - BK)^T P + P(A - BK) = -I$ 의 해이다.

초기값을 포함하는 집합 Ω_c 를 다음과 같이 정의한다.

$$\Omega_c = \{(\zeta, \xi) \in \mathbb{R}^{3n+2} | V(\zeta, \xi) \leq c\}, \quad c > 0 \quad (27)$$

Lyapunov 후보함수 V 를 시간에 대해 미분하면 $\lambda_M \bar{\beta}_1(\zeta, \xi) \|\dot{\zeta}\| \geq \mu$ 인 경우는 다음과 같다.

$$V \leq -\|\dot{\zeta}\|^2 - \eta \|\dot{\xi}\|^2 \quad (28)$$

여기서 $\eta = K_{om} \lambda_{\lambda} / K_{cm}$ 이다.

또한 $\lambda_M \bar{\beta}_1(\zeta, \xi) \|\dot{\zeta}\| < \mu$ 인 경우에는 다음과 같다.

$$V \leq -\|\dot{\zeta}\|^2 - \eta \|\dot{\xi}\|^2 + \frac{\mu}{a} \quad (29)$$

여기서 $a > 1$ 인 $\mu \leq \frac{4\eta c}{a \lambda_{\min}(P) K_{om}}$ 의 조건하에서 다음을 만족한다.

$$V \leq 0 \quad (30)$$

여기서 집합 $\Omega_\mu = \{\lambda_M \bar{\beta}_1(\zeta, \xi) \|\dot{\zeta}\| < \mu\}$ 로 정의하면, 식 (30)의 궤적 (ζ, ξ) 는 충분한 시간이 지난 후에 집합 Ω_μ 로 수렴한다.

그러므로 설계된 제어법칙에 의해 시스템은 균일 최종 한계를 만족하게 된다.

4. 모의실험

카메라와 목표물까지의 거리 $Z=1[m]$ 로 정하였고 모의실험의 관절의 초기 위치값은 $q_1 = \pi/2 [rad]$, $q_2 = \pi [rad]$ 으로 정하여 모의실험을 수행하였으며, 목표물의 초기 영상 평면상의 특징점 $\xi = [100 \ 100]^T [pixel]$ 로, 원하는 특징점 좌표 $\xi_d = [0 \ 0]^T [pixel]$ 로 설정하였다.

모의실험의 결과는 그림 1, 2, 3과 같다. 그림 1의 특징점의 궤적은 영상 평면상의 특징점이 원하는 특징점으로 수렴하고 있다는 것을 보여준다. 그림 2, 3은 관절 1, 2의 위치오차를 나타낸 것으로, 제안된 적분 작용을 포함하는 강인제어기가 더 나은 성능을 보여주고 있음을 확인할 수 있다.

그림 1. 특징점의 궤적.

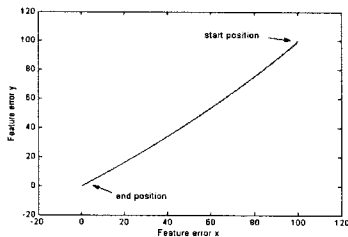


그림 2. 관절 1의 위치오차.

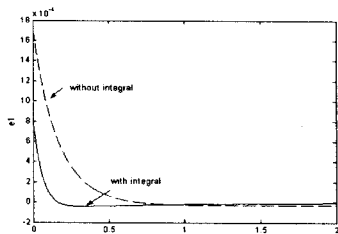
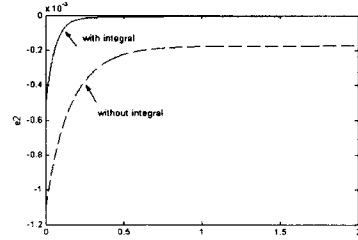


그림 3. 관절 2의 위치오차.



5. 결론

본 논문에서는 유한한 파라미터 불확실성을 갖는 2-링크 로봇 매니퓰레이터에 대한 시각 제어를 이용한 강인제어기를 설계하였다. 제어 입력에 적분항을 포함시켜 정상상태 오차를 개선하였으며, 카메라를 통해 계환되는 영상평면상의 특징점 오차를 토크 입력에 포함시켜 파라미터 불확실성이 보상되도록 하였다.

제안된 제어시스템의 안정도는 Lyapunov 안정도 판별법을 사용하여 해석되었으며 균일 최종한계를 만족함을 보였다. 제안된 제어기의 성능을 확인하기 위해 모의실험을 통해 제안된 제어기의 성능을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Hashimoto, K.: VISUAL SERVOING. World Scientific (1993)
- [2] Espiau, E., Chaumette, F., Rives, P.: A new approach to visual servoing in robotics. IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 8, No.3 (1992) 313-326
- [3] Hashimoto, K., Kimoto, T., Ebine, T., Kimura, H.: Manipulator control with image-based visual servo. IEEE International Conference on Robotics and Automation (1991) 2267-2272
- [4] Kelly, R., Carelli, R., Nasisi, O., Kuchen, B., Reyes, F.: Stable visual servoing of camera-in-hand robotic systems. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, Vol. 5, No.1, (2000) 39-43
- [5] Zergeroğlu, E., Dawson, D. M., Queiroz, M. S. de., Setlur, P.: Robust visual-servo control of robot manipulators in the presence of uncertainty. Journal of Robotic Systems, Vol. 20, issue, 2(2003) 93-106
- [6] Liu, G. J., Goldenberg, A. A., Robust control of robot manipulators based on dynamic decomposition. IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 13, no. 5, (1997) 783-789
- [7] Spong, M. W., Vidyasagar, M.: Robot Dynamics and Control. Wiley, New York (1989)
- [8] Sciacivco, L., Siciliano, B.: Modeling and Control of Robot Manipulators. McGrawHill, New York (1996)