

고이득 관측기를 이용한 영상기반 로봇 매니플레이터의 출력궤환 강인제어

Image-Based Robust Output Feedback Control of Robot Manipulators using High-Gain Observer

전 영 범, 장 기 동, 이 강 웅*

(Yeong-Beom Jeon¹, Ki-Dong Jang², and Kang-woong Lee¹)

¹Dept. of Avionics Engineering, Korea Aerospace University

²Dept. of Information Electronics Engineering, Dong Yang Mirae University

Abstract: In this paper, we propose an image-based output feedback robust controller of robot manipulators which have bounded parametric uncertainty. The proposed controller contains an integral action and high-gain observer in order to improve steady state error of joint position and performance deterioration due to measurement errors of joint velocity. The stability of the closed-loop system is proved by Lyapunov approach. The performance of the proposed method is demonstrated by simulations on a 5-link robot manipulators with two degrees of freedom.

Keywords: image-based robot control, robust control, high-gain observer, output feedback control

I. 서론

산업용 로봇은 빠르고 정확한 작업 수행으로 제조 산업의 중심에 있으며 용접, 도색, 운반, 조립 등의 다양한 분야에 사용되고 있다. 단순 작업을 반복하는 로봇과 달리 자율적이고 능동적인 임무를 수행하는 로봇이 목표 위치로 이동하기 위해서는 작업 환경이 제어 알고리즘에 반영하여야 한다. 카메라로 작업환경을 영상처리하고 이를 활용하는 영상 기반의 로봇 매니플레이터 제어에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1].

영상기반 로봇 매니플레이터 제어의 경우 제어 성능을 향상시키기 위하여 제어시스템은 매니플레이터의 비선형 동역학 항과 카메라 파라미터에 관한 항들을 포함하여야 한다[2]. 그러나 이 경우 로봇 동역학 항과 카메라 파라미터에는 불확실성이 포함될 수 있으며 이 불확실성에 의한 제어 성능 저하는 해결해야 될 과제이다. 카메라 파라미터와 로봇의 동역학 항이 불확실성을 포함하는 경우 이를 보상하기 위하여 영상기반 적응제어 기법이 제시되었다[3,4].

Kelly [5]는 카메라 회전시 발생하는 불확실성을 고려한 강인제어기를 제안하였는데 로봇 동역학 항 중에서 중력 성분은 정확히 아는 것으로 가정하였다. Zergeroglu [6]은 로봇 카메라 시스템이 가지는 불확실성을 보상하기 위한 영상기반 강인제어기를 제안하였다. 또한 로봇 동역학 항과 카메라 시스템의 불확실성을 분리하여 보상하는 영상기반

강인제어기법도 제시되었다[7,13]. 강인제어기법을 적용하는 경우 추종오차의 유한 범위내로의 수렴성만을 보장하기 때문에 적분기를 포함하여 추종오차를 줄이도록 한다[8,12].

제어 입력에 로봇 동역학 항을 포함하는 적응제어나 강인제어의 경우에는 관절이 위치와 각속도 등의 상태 값들이 피드백 되어야 한다. 관절의 각속도는 타코미터와 같은 센서를 통해 측정하거나 관절의 위치를 미분하여 얻을 수 있지만, 이 경우 고속이나 저속으로 운전 시 잡음에 의해 제어 이득이 커지며, 제어성능이 저하될 수 있다. 또한, 속도 측정을 위한 센서의 추가로 인해 시스템의 부피와 비용의 증가를 초래할 수 있다. 이와 같은 성능 저하와 시스템 비용을 개선하기 위하여 관측기에 의해 추정된 각속도를 사용하는 출력궤환 기법이 매니플레이터에 적용되었다[9].

본 논문에서는 관절속도를 추정하는 관측기를 포함하는 로봇 매니플레이터의 강인제어기를 영상기반으로 설계하고자 한다. 제안된 기법은 적분작용을 포함하는 영상기반 로봇 매니플레이터 강인제어에 관측기를 포함시킨 확장된 시스템으로 파라미터 불확실성을 보상하는 제어입력에 영상 정보가 포함되며 전체 폐루프 시스템의 안정성 입증에 필요하다. 제안된 폐루프 시스템의 안정성은 [9]의 결과를 적용하여 입증하였다. 관측기를 이용하는 영상기반 강인제어 기법의 성능은 상태 궤환 시스템의 성능 추종 여부로 확인하며 2 자유도를 가지는 5 링크 로봇 매니플레이터에 적용하여 입증하고자 한다.

II. 로봇과 카메라 모델

n-링크 로봇 매니플레이터에 대한 오일러-라그랑지 방정식을 일반적인 행렬의 형태로 표현한 로봇 매니플레이터의 동역학 방정식은 다음과 같다[10].

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received March 4, 2013 / revised April 26, 2013 / accepted June 13, 2013

전영범, 이강웅: 한국항공대학교 항공전자공학과

(ybjeon@kau.ac.kr/kwlee@kau.ac.kr)

장기동: 동양미래대학교 정보전자과(gdjang@dongyang.ac.kr)

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

여기서, $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 은 각 관절의 위치, 속도, 가속도 벡터이고, $\tau \in R^n$ 은 토크 벡터를 나타낸다. $M(q)$ 는 관성행렬로 양한의 $n \times n$ 대칭행렬, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 는 코리올리힘으로 $n \times 1$ 벡터이고, $G(q)$ 는 $n \times 1$ 의 중력벡터이다.

식 (1)의 로봇 동역학 방정식은 다음 성질을 가지는데 이 성질은 제어기 안정도 해석에 사용된다.

성질 1: 식 (1)의 로봇 동역학 방정식은 파라미터 벡터 θ 에 대해 선형성을 가진다.

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

여기서 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 는 $n \times m$ 축차행렬이다.

성질 2: 행렬 $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ 은 다음이 성립되는 외대칭행렬(Skew-Symmetric Matrix)이다.

$$\dot{q}^T [\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})] \dot{q} = 0, \forall q, \dot{q} \in R^n \quad (3)$$

카메라가 로봇 말단부에 부착된 구조에서 카메라 좌표계에서 나타낸 목표물의 위치 ${}^c P_t$ 는 다음과 같이 표현된다.

$${}^0 P_t = {}^0 P_c + {}^0 R_c {}^c P_t \quad (4)$$

여기서 ${}^0 P_t$ 와 ${}^0 P_c$ 는 각각 로봇 좌표계에서의 목표물의 위치와 카메라 좌표계의 원점을 나타내며, ${}^0 R_c$ 는 로봇 좌표계를 기준으로 한 카메라 좌표계의 회전행렬이다.

원근 투영법에 의하면 목표물의 위치 ${}^c P_t$ 를 다음과 같이 영상평면상의 특징점 ξ 로 나타낼 수 있다.

$$\xi = [x \ y]^T = \begin{bmatrix} fX & fY \\ \alpha Z & \beta Z \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

여기서 f 는 카메라의 초점거리, α, β 는 영상평면의 X, Y 축 비례계수로 화소수/m이다.

식 (5)를 시간에 대해 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} f & 0 & -fX \\ \alpha Z & 0 & -\alpha Z \\ 0 & f & -fY \\ & \beta Z & -\beta Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

한편, 카메라 좌표계에서 목표물의 이동속도는 식 (4)를 미분하여 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \frac{d{}^c P_t}{dt} = {}^c R_0 (-{}^0 \omega_c \times ({}^0 P_t - {}^0 P_c)) + {}^c R_0 ({}^0 \dot{P}_t - {}^0 \nu_c) \quad (7)$$

여기서 ${}^0 \nu_c$ 와 ${}^0 \omega_c$ 는 로봇 좌표계를 기준으로 한 카메라의 선속도와 각속도이다.

식 (7)을 식 (6)에 대입하여 정리하면 영상 특징점의 속도와 로봇 관절 속도 사이의 관계가 다음 식으로 표현된다.

$$\dot{\xi} = J(q, \xi, Z) \dot{q} \quad (8)$$

식 (8)에서 $J(q, \xi, Z)$ 는 영상 자코비안으로 다음과 같다.

$$J(q, \xi, Z) = \begin{bmatrix} \frac{-F_1 C_2 l_1 S_1 + F_1 S_2 l_1 C_1}{Z} & \frac{F_1 C_2 l_4 S_2 - F_1 S_2 l_4 C_2}{Z} + \frac{F_1}{F_2} Y \\ \frac{F_2 S_2 l_1 S_1 + F_2 C_2 l_1 C_1}{Z} & \frac{-F_2 S_2 l_4 S_2 - F_2 C_2 l_4 C_2}{Z} - \frac{F_2}{F_1} X \end{bmatrix}$$

여기서 l_1 과 l_4 는 로봇 링크 1과 링크 4의 길이, $S_1 = \sin q_1$,

$C_1 = \cos q_1$, $S_2 = \sin q_2$, $C_2 = \cos q_2$ 이고, $F_1 = \frac{\alpha}{f}$, $F_2 = \frac{\beta}{f}$ 이다.

영상 평면상의 특징점 ξ 와 원하는 특징점 ξ_d 의 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{\xi} = \xi_d - \xi \quad (9)$$

원하는 특징점은 고정된다고 가정하고, 식(9)를 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{\tilde{\xi}} = \dot{\xi}_d - \dot{\xi} = -J(q, \xi, Z) \dot{q} \quad (10)$$

제어기에 적용될 기준 로봇 관절 속도 \dot{q}_d 를 다음과 같이 정한다.

$$\dot{q}_d = J^+(q, \xi, Z) K_o \tilde{\xi} \quad (11)$$

여기서 K_o 는 양한의 설계이득이고, $J^+(q, \xi, Z)$ 는 자코비안의 의사 역행렬(Pseudo Inverse Matrix)로 다음과 같다.

$$J^+(q, \xi, Z) = J^T(q, \xi, Z) [J(q, \xi, Z) J^T(q, \xi, Z)]^{-1}$$

식 (11)을 식 (10)에 대입하면 영상 오차 동특성 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\dot{\tilde{\xi}} = -K_o \tilde{\xi} - J(q, \xi, Z) \dot{q} \quad (12)$$

여기서 $\dot{q} = \dot{q} - \dot{q}_d$ 이다.

III. 상태궤환 강인제어기와 출력궤환 강인제어기

로봇 매니퓰레이터 관절의 위치 추종오차 벡터를 $\tilde{q} = q - q_d$ 로 정의하면 식 (1)의 동역학 방정식으로부터 다음과 같은 오차 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\tilde{q}} = M^{-1}(q) [-M(q)\ddot{q}_d - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) + \tau] \quad (13)$$

부하변동이나 모델링시 무시된 파라미터 불확실성을 보상하기 위해 강인제어를 적용하는 경우 발생하는 정상상태 오차를 개선하기 위해, 관절위치 추종오차의 적분으로 정의되는 새로운 상태 변수를 제어입력에 포함하도록 한다.

$$\sigma_i = \kappa \int_0^t \tilde{q}_i(\tau) d\tau, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

여기서 $\kappa \geq 0$ 는 적분제어에서 발생될 수 있는 와인드 업(wind-up) 현상을 개선하기 위한 조건 파라미터로 0과 1을 가진다.

확장된 상태벡터를 $\zeta = [\sigma^T, \tilde{q}^T, \dot{\tilde{q}}^T]^T$ 로 정의하면 다음과

같은 오차 상태방정식이 얻어진다.

$$\dot{\zeta} = A\zeta + BM^{-1}(\tilde{q}, \dot{q}_d)[-Y(\tilde{q}, \dot{q}, \ddot{q}_d)\theta + \tau] \quad (15)$$

$$\text{여기서 } A = \begin{bmatrix} 0 & \kappa I & 0_{n \times n} \\ 0 & 0 & I_{n \times n} \\ 0 & 0 & 0_{n \times n} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0_{n \times n} \\ I_{n \times n} \end{bmatrix}, Q_d = [q_d^T, \dot{q}_d^T, \ddot{q}_d^T]^T \text{ 이다}$$

고 $Y(\tilde{q}, \dot{q}, \ddot{q}_d)\theta = M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$ 이다.

시스템 파라미터 $\theta \in R^p$ 는 부하변동이나 외란 등으로 불확실하지만 변동범위는 제한되어 다음과 같이 표현된다고 가정한다.

$$\|\theta\| = \|\theta_0 - \theta\| \leq \rho, \quad \rho > 0 \quad (16)$$

여기서 θ_0 와 ρ 는 아는 값이다.

식 (15)의 시스템에 대해 파라미터 불확실성을 보상하는 영상기반 상태제환 강인제어기를 다음과 같이 정한다.

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

여기서 K 는 피드백 제어 이득 행렬이고 τ_N 은 파라미터 불확실성을 보상하기 위한 비선형항이다. 또한 $M_0(q)$ 는 행렬 $M(q)$ 에 대한 공칭행렬(nominal matrix)이다.

다음 가정들은 시스템 안정도 해석에 사용된다.

가정 1: 다음과 같은 행렬의 노름(norm)이 성립된다.

$$\begin{aligned} \lambda_m &\leq \|M^{-1}(q)\| \leq \lambda_M \\ \|J(q, \xi, c_{z_t})\| &\leq \lambda_J, \quad \|J^+(q, \xi, c_{z_t})\| \leq \lambda_{J^+} \end{aligned} \quad (15)$$

가정 2: 다음 부등식을 만족시키는 상수 $\alpha_M, \alpha_C, \alpha_G \geq 0$ 가 존재한다.

$$\begin{aligned} \|M(q) - M_0(q)\| &\leq \alpha_M \\ \|C(q, \dot{q}) - C_0(q, \dot{q})\| &\leq \alpha_C \|\dot{q}\| \\ \|G(q) - G_0(q)\| &\leq \alpha_G \end{aligned} \quad (16)$$

가정 3: 다음 부등식을 만족하는 상수 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 가 존재한다.

$$\|Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\tilde{\theta}\| \leq \beta_1 + \beta_2 \|\zeta\| + \beta_3 \|\zeta\|^2 \quad (17)$$

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

비선형항 τ_N 을 다음과 같이 정한다.

$$\tau_N = \begin{cases} -\frac{\lambda_M \beta(\zeta) s}{\lambda_m \|s\|} - \frac{\beta_1(\tilde{\xi}) s}{\lambda_m \|s\|} & \text{if } \lambda_M \beta(\zeta) \|s\| > \mu_1 \text{ and } \lambda_M \|\tilde{\xi}\| \|s\| > \mu_2 \\ -\frac{\lambda_M^2 \beta^2(\zeta) s}{2\lambda_m \mu_1} - \frac{\beta_1^2(\tilde{\xi}) s}{\lambda_m \|s\|} & \text{if } \lambda_M \beta(\zeta) \|s\| \leq \mu_1 \text{ and } \lambda_M \|\tilde{\xi}\| \|s\| > \mu_2 \\ -\frac{\lambda_M \beta(\zeta) s}{\lambda_m \|s\|} - \frac{\beta_1^2(\tilde{\xi}) s}{2\lambda_m \mu_2} & \text{if } \lambda_M \beta(\zeta) \|s\| > \mu_1 \text{ and } \lambda_M \|\tilde{\xi}\| \|s\| \leq \mu_2 \\ -\frac{\lambda_M^2 \beta^2(\zeta) s}{2\lambda_m \mu_1} - \frac{\beta_1^2(\tilde{\xi}) s}{2\lambda_m \mu_2} & \text{if } \lambda_M \beta(\zeta) \|s\| \leq \mu_1 \text{ and } \lambda_M \|\tilde{\xi}\| \|s\| \leq \mu_2 \end{cases} \quad (18)$$

여기서 $s = B^T P \zeta$, $\beta(\zeta) = \beta_1 + (\beta_2 + \alpha_M \lambda_M) \|\zeta\| + \beta_3 \|\zeta\|^2$, $\beta_1(\tilde{\xi}) = \lambda_M \lambda_{J^+} \|K_i\| \|\tilde{\xi}\|$ 이고 $\mu_1 > 0$ 과 $\mu_2 > 0$ 는 설계

파라미터이다. 또한 행렬 $P = P^T$ 는 Lyapunov 방정식 $(A - BK)^T P + P(A - BK) = -I$ 의 해이다[11].

시스템의 안정도를 해석하기 위하여 Lyapunov 후보함수 V 를 다음과 같이 정한다.

$$V = \zeta^T P \zeta + \frac{1}{2\eta} \tilde{\xi}^T \tilde{\xi} \quad (19)$$

여기서 $\eta > 0$ 이다.

시스템 (12)와 (15)의 궤적을 따라 식 (19)를 미분하고 식 (18)의 조건에 대해 정리하면 다음과 같이 된다.

우선, $\lambda_M \beta(\zeta) \|s\| > \mu_1$ and $\lambda_M \|\tilde{\xi}\| \|s\| > \mu_2$ 이면

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(A)(\|\zeta\|^2 + \|\tilde{\xi}\|^2) \quad (20)$$

$$\text{여기서 } A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2}\lambda_J \\ \frac{1}{2}\lambda_J & \lambda_{\min}(K_o) \end{bmatrix}.$$

다음으로 $\lambda_M \beta(\zeta) \|s\| \leq \mu_1$ and $\lambda_M \|\tilde{\xi}\| \|s\| > \mu_2$ 이면

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(A)(\|\zeta\|^2 + \|\tilde{\xi}\|^2) + \mu_1 \quad (21)$$

마찬가지로 $\lambda_M \beta(\zeta) \|s\| > \mu_1$ and $\lambda_M \|\tilde{\xi}\| \|s\| \leq \mu_2$ 이면

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(A)(\|\zeta\|^2 + \|\tilde{\xi}\|^2) + \mu_2 \quad (22)$$

마지막으로 $\lambda_M \beta(\zeta) \|s\| \leq \mu_1$ and $\lambda_M \|\tilde{\xi}\| \|s\| \leq \mu_2$ 이면

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(A)(\|\zeta\|^2 + \|\tilde{\xi}\|^2) + \mu_1 + \mu_2 \quad (23)$$

이 결과는 상태벡터 ζ 와 $\tilde{\xi}$ 가 궁극적으로 유한함을 보인다. 한편, 식 (23)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V} \leq -\frac{\lambda_{\min}(A)}{\lambda_{\max}(P)} V + \mu_1 + \mu_2 \quad (24)$$

집합 $\Omega_c = \{(\zeta, \tilde{\xi}) \mid V \leq c\}$, $c > 0$ 로 정의할 때 μ_1, μ_2 는 다음 조건을 만족하는 임의의 작은 값으로 정할 수 있다.

$$\mu_1 + \mu_2 \leq \frac{\lambda_{\min}(A)}{\lambda_{\max}(P)} c \quad (25)$$

또한 $0 < b < c$ 인 집합 $\Omega_b = \{(\zeta, \tilde{\xi}) \mid V \leq b\} \in \Omega_c$ 를 정의

하고, $\alpha > 1$ 에 대해 μ_1, μ_2 를 $\mu_1 + \mu_2 = \frac{2b\lambda_{\min}(A)}{\alpha\lambda_{\max}(P)}$ 로 정하면, $V \geq b$ 에서 식 (24)는 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} \leq -(\mu_1 + \mu_2)(\alpha - 1) < 0 \quad (26)$$

따라서 상태벡터는 초기상태로부터 유한 시간내에 Ω_b 에 도달하여 머물게 된다.

출력제환 제어기를 설계하기 위하여 다음과 같은 포화제어 입력(saturation control input)을 정의한다.

$$\tau_i^s = s_i \text{sat}\left(\frac{\tau_i(\zeta, \tilde{\xi})}{s_i}\right), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

여기서 $s_i = \max_{\zeta, \tilde{\xi} \in \Omega_c} |\tau_i(\zeta, \tilde{\xi})|$ 이고

$$\text{sat}(y) = \begin{cases} -1 & y < -1 \\ y & |y| \leq 1 \\ 1 & y > 1 \end{cases} \quad (28)$$

상태벡터가 $\zeta, \tilde{\xi} \in \Omega_c$ 에 속하면 포화제어 입력은 $r^s(\zeta, \tilde{\xi}) = \tau(\zeta, \tilde{\xi})$ 가 된다.

관결 위치 측정치로부터 속도벡터를 추정하기 위하여 다음과 같은 고이득 관측기(high-gain observer)를 다음과 같이 구성한다.

$$\dot{\hat{e}}_1 = \hat{e}_2 + \frac{1}{\epsilon} L_1 (e_1 - \hat{e}_1) \quad (29)$$

$$\dot{\hat{e}}_2 = \frac{1}{\epsilon^2} L_2 (e_1 - \hat{e}_1) - M_0^{-1}(\hat{e}_1, q_d) \{ Y(\hat{e}, Q_d) \theta_0 + r^s(\sigma, \hat{e}, \tilde{\xi}) \}$$

여기서 $e_1 = \tilde{q}, e_2 = \dot{\tilde{q}}, e = [e_1^T e_2^T]^T$ 이고 $L_1 = \text{diag}\{\alpha_{1i}\}, L_2 = \text{diag}\{\alpha_{2i}\}, i = 1, 2, \dots, n$ 이며, 양수 α_{1i}, α_{2i} 는 행렬 $L = \begin{bmatrix} -L_1 & I \\ -L_2 & 0 \end{bmatrix}$ 가 Hurwitz가 되도록 정한다. 또한 이득을 결정하는 $\epsilon > 0$ 은 매우 작은 값으로 정하여 고이득이 되도록 한다.

상태 변수의 추종 오차를 스케일한 상태변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\chi_i = \frac{1}{\epsilon^{2-i}} (e_i - \hat{e}_i), \quad i = 1, 2 \quad (30)$$

식 (30)의 상태변수를 이용하면 식 (15)의 시스템 방정식과 식 (29)의 관측기 방정식은 다음과 같이 표준 싱글라 섭동 방정식(standard singular perturbation equation)으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\zeta} = A\zeta + BM^{-1}(e_1, q_d) [-Y(e, Q_d)\theta + r^s(\sigma, e - D(\epsilon)\chi, \tilde{\xi})] \quad (31)$$

$$\epsilon \dot{\chi} = L\chi + \epsilon \bar{B} \{ [M_0^{-1}(e_1 - \epsilon\chi_1, q_d) Y(e - D(\epsilon)\chi, Q_d) \theta_0 - M^{-1}(e_1, q_d) Y(e, Q_d) \theta] + [M_0^{-1}(e_1 - \epsilon\chi_1, q_d) - M^{-1}(e_1, q_d)] r^s(\sigma, e - D(\epsilon)\chi, \tilde{\xi}) \}$$

여기서 $\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, D(\epsilon) = \begin{bmatrix} \epsilon I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$.

출력 궤환 강인제어기의 설계 파라미터 ϵ 이 충분히 작은 경우 상태궤환 강인제어기의 성능을 복원함을 확인하기 위하여 함수 $\nu = \chi^T \bar{P} \chi$ 를 고려하자. 여기서 행렬 \bar{P} 는 Lyapunov 방정식 $\bar{P}L + L^T \bar{P} = -I$ 의 해이다.

상태벡터가 집합 Ω_c 내에 있으면 제어입력이 포화되므로 다음 부등식이 성립된다고 가정할 수 있다.

$$\| M_0^{-1}(\cdot) Y(\cdot) \theta_0 - M^{-1}(\cdot) Y(\cdot) \theta + [M_0^{-1}(\cdot) - M^{-1}(\cdot)] r^s(\cdot) \| < k, \quad k > 0 \quad (33)$$

함수 ν 를 시간에 대해 미분하고 식 (32)를 대입하면

$$\dot{\nu} \leq -\frac{\nu}{\epsilon \lambda_{\max}(\bar{P})} + \frac{2k \|\bar{P}\bar{B}\| \sqrt{\nu}}{\sqrt{\lambda_{\min}(\bar{P})}} \quad (34)$$

여기서 $\rho = \frac{16k^2 \|\bar{P}\bar{B}\| (\lambda_{\max}(\bar{P}))^2}{\sqrt{\lambda_{\min}(\bar{P})}}$ 로 정의하면, $\nu > \rho\epsilon^2$

에서 식 (34)는 다음과 같이 된다.

$$\dot{\nu} \leq -\frac{\nu}{2\epsilon \lambda_{\max}(\bar{P})} \quad (35)$$

따라서 상태변수 χ 는 유한시간내에 집합 $\{\chi \mid \nu \leq \rho\epsilon\}$ 에 도달하여 머물게 되며 다음과 같이 ϵ 의 함수로 제한된다.

$$\|\chi\| \leq \gamma\epsilon, \quad \gamma = \frac{4k \|\bar{P}\bar{B}\| \lambda_{\max}(\bar{P})}{\lambda_{\min}(\bar{P})} \quad (36)$$

식 (36)의 조건에서 상태벡터 추종오차도 다음과 같이 ϵ 의 함수로 제한된다.

$$\|e - \hat{e}\| \leq \|D(\epsilon)\chi\| \leq \gamma\epsilon \quad (37)$$

상태변수 χ 가 집합 $\{\chi \mid \nu \leq \rho\epsilon\}$ 에 속해 있으면 식 (31)은 다음과 같이 섭동항(perturbation term)을 가지는 형태로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\zeta} = A\zeta + BM^{-1}(e_1, q_d) [-Y(e, Q_d)\theta + r^s(\sigma, e, \tilde{\xi})] + BM^{-1}(e_1, q_d) [r^s(\sigma, \hat{e}, \tilde{\xi}) - r^s(\sigma, e, \tilde{\xi})] \quad (38)$$

식 (37)로부터 식 (38)의 섭동항은 ϵ 의 함수로 제한된다. 따라서 $V \geq b$ 에서 식 (26)의 함수 V 의 미분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(A) (\|\zeta\|^2 + \|\tilde{\xi}\|^2) + \mu_1 + \mu_2 + \bar{k}\epsilon \leq -(\mu_1 + \mu_2)(\alpha - 1) + \bar{k}\epsilon \quad (39)$$

여기서 $\epsilon \leq \frac{\mu_1 + \mu_2(\alpha - 1)}{2\bar{k}}$ 로 정하면 식 (39)는 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} \leq -\frac{(\mu_1 + \mu_2)(\alpha - 1)}{2} < 0 \quad (40)$$

이것은 ϵ 를 충분히 작게 정하면 고이득 관측기를 사용하는 출력궤환 강인제어기가 상태궤환 강인제어기의 성능을 복원할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 모의실험

제안한 제어기의 성능 검증을 위해 그림 1과 같은 5-링크, 2 자유도의 삼성 FARAMAN-AS1 로봇에 대해 Matlab을

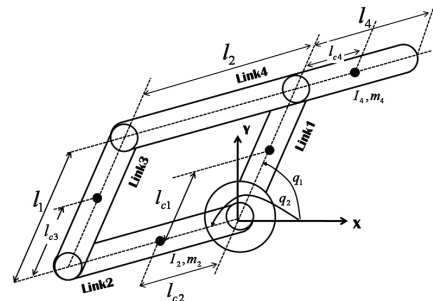


그림 1. 5 링크 로봇 매니퓰레이터.

Fig. 1. 5-link robot manipulator.

이용한 모의실험을 수행하였다.

관측기의 설계 파라미터인 ϵ 을 0.01과 0.001로 설정하여 제안된 출력궤환 제어기와 상태궤환 제어기와 성능추종을 비교하는 모의실험을 하였다. 고이득 관측기의 설계 파라미터를 제외한 나머지 제어기 관련 파라미터와 이득들은 표

표 1. 제어기의 모의실험 파라미터.

Table 1. Parameters of controller for simulation.

파라미터	값
m_4 의 변동범위	< 4.5kg
$q_1(0)$	$\pi/2-0.05[\text{rad}]$
$q_2(0)$	$\pi-0.05[\text{rad}]$
ξ_0	[100 100]
K	$[2I_{2 \times 2} \ 10I_{2 \times 2} \ 30I_{2 \times 2}]$
K_i	$I_{2 \times 2}$
κ	1
ϵ	0.01 과 0.001
L_1, L_2	100

1과 같고 관절각 초기 오차는 0.05로 설정하였다. 4.5kg의 부하가 링크 l_4 의 질량 m_4 에 부가된다.

그림 2와 3은 로봇 관절의 위치 오차를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 설계 파라미터 ϵ 을 0.001로 정한 출력궤환 제어의 경우 약 0.2초 이내에 상태궤환 제어 성능을 복원하면서 위치 오차가 0으로 수렴함을 확인할 수 있다.

그림 4와 5는 로봇 관절의 속도 오차를 나타내는 그래프이다. 설계 파라미터 ϵ 이 작을수록 초기에 피킹이 발생하지만 상태궤환 제어 성능을 짧은시간내에 복원함을 확인할 수 있다.

그림 6과 7은 영상 특징점 오차를 나타낸 그래프로 설계 파라미터 ϵ 이 작을수록 상태궤환 제어 성능에 가까운 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

시뮬레이션 결과에서 확인한 바와 같이 ϵ 이 작은 고이득 관측기에 의해 추정된 관절 속도를 제어에 사용하여도 실제 속도정보를 사용하는 상태궤환 제어 성능을 유지함을 알 수 있으며 ϵ 을 작게 설정할수록 상태궤환 제어 성능에 가까워짐을 알 수 있다.

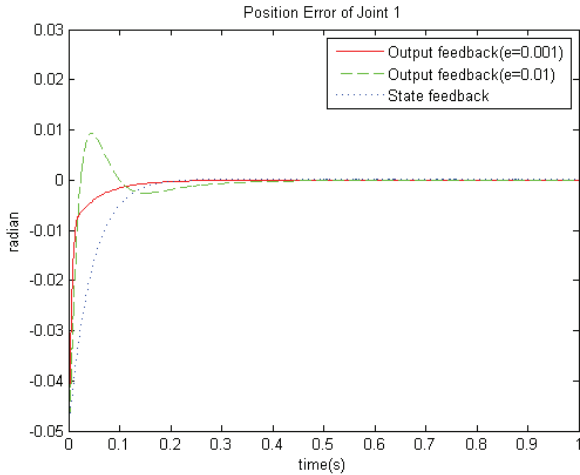


그림 2. 로봇 관절 1의 위치 오차.

Fig. 2. Position error of joint 1.

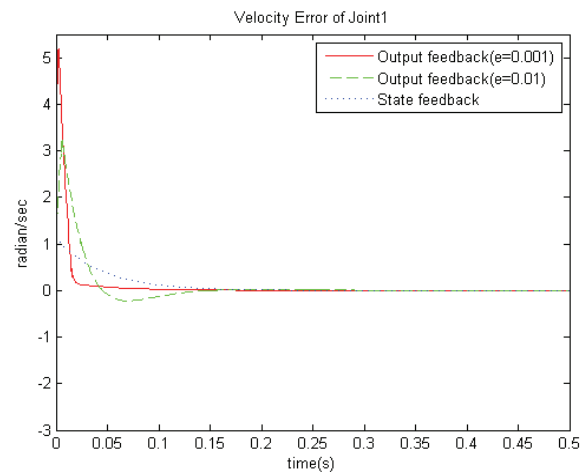


그림 4. 로봇 관절 1의 속도 오차.

Fig. 4. Velocity error of joint 1.

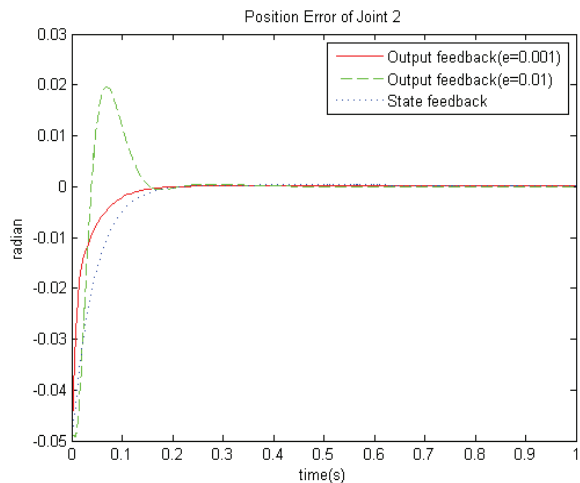


그림 3. 로봇 관절 2의 위치 오차.

Fig. 3. Position error of joint 2.

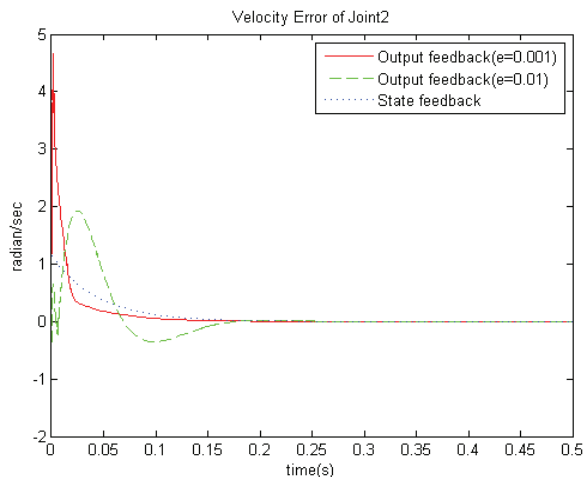


그림 5. 로봇 관절 2의 속도 오차.

Fig. 5. Velocity error of joint 2.

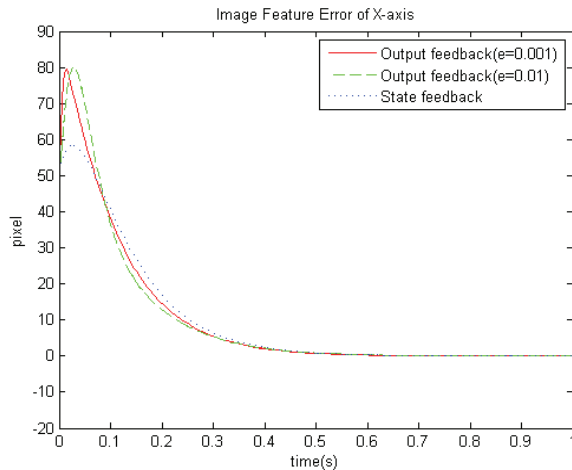


그림 6. X축의 영상 특징점 오차.

Fig. 6. Image feature error in the X-axis.

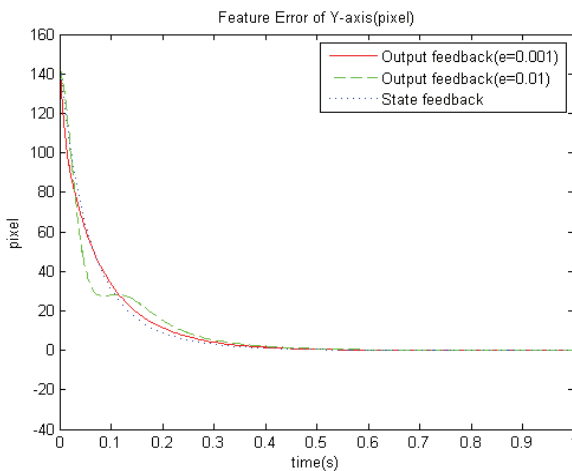


그림 7. Y축의 영상 특징점 오차.

Fig. 7. Image feature error in the Y-axis.

V. 결론

본 논문에서는 유한한 변동 범위의 파라미터 불확실성이 존재하는 로봇 매니퓰레이터에 대한 영상기반 출력례환 강인제어기를 제안하였다. 고이득 관측기를 통하여 추정된 관절 속도 추정치를 사용하는 출력례환 강인제어 성능이 상태례환 제어 성능을 복원시킬 수 있음을 확인하였다. 부하 변동에 의한 파라미터 불확실성으로 발생하는 정상상태 오차는 적분제어에 의해 개선되도록 하였으며 제안된 제어 시스템의 수렴성은 Lyapunov 기법으로 입증하였다. 제안된 제어기의 제어성능은 로봇 말단부에 카메라가 장착된 5-링크 2 자유도의 로봇을 대상으로 한 모의실험을 통하여 입증하였으며, 실험을 통하여 실용성이 있음을 입증하는 것은 향후 과제이다.

REFERENCES

[1] S. Husthinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, "A Tutorial on visual servo control," *IEEE trans. Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 651-670, 1996.

- [2] K. Hashimoto and H. Kimura, "Dynamic visual servoing with nonlinear model-based control," *Proc. of the 12th IFAC World Congress*, Sydney, vol. 9, pp. 405-408, 1993.
- [3] L. Hsu and P. L. S. Aquino, "Adaptive visual tracking with uncertain manipulator dynamics and uncalibrated camera," *Proc. Conf. Decision and Control*, Arizona, pp. 1248-1253, 1999.
- [4] O. Nasisi and R. Carelli, "Adaptive servo visual robot control," *Robotics and Autonomous System*, vol. 43, pp. 51-78, 2003.
- [5] R. Kelly, "Robust asymptotically stable visual servoing of planar robots," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 759-766, 1996.
- [6] E. Zergeroglu, D. W. Dawson, M. S. de Queiroz, and P. Setlur, "Robust visual-servo control of robot manipulators in the presence of uncertainty," *Journal of Robotic Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 93-106, 2003.
- [7] C. S. Kim, E. J. Mo, S. M. Han, M. S. Jie, and K. W. Lee, "Robust visual servo control of robot manipulators with uncertain dynamics and camera parameters," *International Journal Control Automat. Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 308-313, 2010.
- [8] R. Kelly, "Global positioning of robot manipulators via PD control plus a class of nonlinear integral actions," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 43, no. 7, pp. 934-938, 1998.
- [9] K. W. Lee and H. K. Khalil, "Adaptive output feedback control of robot manipulators using high-gain observer," *Int. J. Control*, vol. 67, no. 6, pp. 869-886, 1997.
- [10] M. W. Spong and M. Vidysagar, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley, New York, 1989.
- [11] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*. Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
- [12] M. S. Jie and K. W. Lee, "A robust visual feedback control with integral compensation for robot manipulators," *Journal of Control, Automation, and Systems (in Korean)*, vol. 12, no. 3, pp. 294-299, May 2006.
- [13] C. S. Kim, E. J. Mo, and K. W. Lee, "Image-based Robust Control of Robot Manipulators with Image Jacobian and Dynamics Uncertainties," *Journal of Control, Automation, and Systems (in Korean)*, vol. 14, no. 10, pp. 1047-1052, Oct. 2008.



전 영 범

2010년 한서대학교 항공전자공학과 학사. 2009년~2011년 서보산전 기술연구소 근무. 2011년~현재 한국항공대학교 항공 전자공학과 석사과정. 관심분야는 로봇제어 및 모터제어.



장기동

2005년 한국방송통신대학교 컴퓨터과학과 학사. 2008년 성균관대학교 정보통신대학원 컴퓨터공학과 석사. 2010년~현재 한국항공대학교 항공자공학과 박사과정. 2008년~현재 동양미래대학교 정보전자과 조교수. 관심분야는 이동로봇 제어 및 영상처리.



이강웅

1980년 한국항공대학교 항공전자공학과 학사. 1982년 서울대학교 전자공학과 석사. 1989년 서울대학교 전자공학과 박사. 1983년~1984년 삼성전자 컴퓨터개발부. 1994년~1995년 미시간주립대학교 방문교수. 1989년~현재 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수. 관심분야는 영상기반 로봇제어, 무인기제어.