

적분 보상을 포함하는 로봇 매니플레이터의 시각 궤환 강인 제어

A Robust Visual Feedback Control with Integral Compensation for Robot Manipulators

지민석*, 이강웅
(Min-Seok Jie and Kang-Woong Lee)

Abstract : This paper studies a visual feedback control scheme for robot manipulators with camera-in-hand configurations. We design a robust controller that compensates for bounded parametric uncertainties of robot mechanical dynamics. In order to reduce steady state tracking error of the robot arms due to uncertain dynamics, integral action is included in the control input. Using the Lyapunov stability criterion, the uniform ultimate boundedness of the tracking error is proved. Simulation and experimental results with a 2-link robot manipulator illustrate the robustness and effectiveness of the proposed control algorithm.

Keywords : robot manipulator, robust control, visual feedback, integral action

I. 서론

예기치 않은 주위 작업 환경의 변화와 불확실한 모델링 등으로 인한 로봇의 작업 효율 저하로 인해 시각 궤환을 이용한 로봇 제어에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 비전 시스템을 사용하지 않는 작업환경하에서는 모든 조건들이 완벽하게 정의되어야만 하였고, 이러한 변수들로 인해 경제적, 시간적인 손실이 크다는 면에서 비전 시스템을 이용한 로봇 제어 이론은 새로운 대안이 될 수 있을 것이다. 시각 궤환 정보는 가변의 작업 환경 정보를 제공함으로써 불확실한 작업 환경하에서 작업을 가능하게 해주며 작업 환경 구축을 위한 시간을 단축시키는 등의 효과를 제공한다.

본 연구에서는 원하는 궤적(desired trajectory)이 카메라의 영상 평면상에 주어지는 특징 기반(feature based)구조이며, 카메라의 시각 정보를 궤환하는 외부 루프와 로봇 구동을 위한 동역학 제어부에 별도의 궤환 루프를 가지는 이중 루프 구조의 강인제어기를 설계하고자 한다[1]. 로봇의 말단부에 장착된 카메라로부터 목표물의 영상 정보를 획득하며, 영상처리를 통해 영상 평면상의 특징점(feature point)을 원하는 특징점(desired feature point)으로 이동시키기 위한 관절각 속도를 생성한다. 이때 생성된 관절각 속도를 이용하여 로봇이 추종해야 할 궤적을 생성한다. 이 궤적은 로봇 동역학 제어부의 기준 입력이 되고 동역학 제어기는 이 궤적을 추종하도록 하는 입력 토크값을 생성한다.

이중 루프 구조는 시각 정보 궤환 루프와 동역학 제어 루프의 상호 작용으로 인해 시스템 성능을 저하시키는 단점을 가지고 있다. 또한 부하 변동이나 파라미터 불확실성, 마찰이나 외란은 로봇 동역학 제어부 성능 저하의 원인이 되고 느린 비전 샘플링, 고속 운동 등의 경우 전체적인 제어 시스템에 영향을 미쳐 로봇의 응답 특성이 떨어진다.

따라서 본 연구에서는 동역학 제어 루프의 성능을 개선하여 외부 시각 정보 궤환 루프의 성능을 향상시키고자 한다. 또한, 대부분의 이전 연구 결과들은 외란이나 파라미터 불확실성 등을 고려하지 않았으며 로봇 동역학 제어부는 이상적이다는 가정하에 설계 되었다[2,3].

본 연구에서 제안된 강인제어기는 기존의 시각 궤환을 이용한 로봇 매니플레이터의 강인제어기[4-6]에 로봇 관절각 오차의 적분항을 추가하여 정상 상태 오차를 개선 하였으며 제어기의 안정성은 Lyapunov 안정도 판별법을 적용하여 해석한다. 5-링크 2 자유도를 가지는 삼성 FARAMAN로봇을 대상으로 한 컴퓨터 모의 실험과 실험을 통해 강인제어기의 성능을 입증하고자 한다.

II. 로봇 매니플레이터 모델과 카메라 모델

마찰이 고려되지 않은 n -링크 강체 로봇의 동역학 방정식은 다음과 같이 표현된다[7].

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

여기서, q 는 관절의 $n \times 1$ 위치 벡터이며, τ 는 $n \times 1$ 토크 입력 벡터이고, 행렬 $M(q)$ 는 $n \times n$ 관성행렬로 대칭이고 양한(positive definite) 이다. 또한, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 는 구심력과 코리올리스 힘을 나타내는 $n \times 1$ 벡터이고, $G(q)$ 는 $n \times 1$ 의 중력 벡터이다. (1)의 동역학 방정식은 다음과 같은 성질을 가진다.

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

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

여기서 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 은 $n \times p$ 벡터로 기지의 함수이다.

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

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 9. 30., 채택확정 : 2006. 1. 25.

지민석, 이강웅 : 한국항공대학교 항공전자공학과
(tomsey@korea.com/kwlee@hau.ac.kr)

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = J_g(q)\dot{q} \quad (3)$$

여기서 $J_g(q)$ 는 로봇의 기하학적 자코비안(geometric jacobian)이다.

또한 이 자코비안은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_g(q) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} J_A(q) \quad (4)$$

여기서 $J_A(q)$ 는 해석적 자코비안(analytic jacobian)이라 하며, $T(q)$ 는 로봇 말단부의 회전을 나타내는 행렬이다.

로봇 매니퓰레이터의 말단부에 카메라가 장착된 비전 시스템에서 카메라 좌표계의 원점에서 목표물까지의 위치 벡터 ${}^c p_o = [X \ Y \ Z]^T$ 는 다음과 같다.

$${}^c p_o = {}^c R_w ({}^w p_o - {}^w p_c) \quad (5)$$

여기서, ${}^c R_w$ 는 카메라 좌표계에서 정의된 로봇 좌표계의 방향을 나타내는 회전 행렬이고, ${}^w p_o, {}^w p_c$ 는 각각 로봇 좌표계에서 정의된 목표물의 위치 벡터와, 카메라의 원점 벡터이다.

${}^c p_o$ 벡터를 영상평면에 원근 투영(perspective projection)시키게 되면 영상 평면상의 영상 특징점 좌표 ξ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\xi = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{bmatrix} X \\ \alpha \\ Y \\ \beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 f 는 카메라의 초점 거리이며, α, β 는 각각 영상 평면상의 X, Y축 단위 화소(pixel)당 미터 비례 계수이다. 또한 Z는 로봇 말단부에서 목표물까지의 거리이며 양(positive)의 값을 가진다.

(6)을 시간의 함수로 미분하게 되면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \frac{f}{\alpha Z} & 0 & -\frac{fX}{\alpha Z^2} \\ 0 & \frac{f}{\beta Z} & -\frac{fY}{\beta Z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \quad (7)$$

또한 (5)를 미분하여 (7)에 대입하게 되면 영상 특징점 좌표의 운동은 카메라 속도 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\xi} = J_{img}(\xi, Z) \begin{bmatrix} {}^c R_w & 0 \\ 0 & {}^c R_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 $J_{img}(\xi, Z)$ 는 영상 자코비안 행렬이고 다음과 같이 표현된다.

$$J_{img}(\xi, Z) = \begin{bmatrix} -\frac{f}{\alpha Z} & 0 & \frac{x}{Z} & \frac{\beta xy}{f} & -\frac{f^2 + \alpha^2 x^2}{\alpha f} & \frac{\beta y}{\alpha} \\ 0 & -\frac{f}{\beta Z} & \frac{y}{Z} & \frac{f^2 + \beta^2 y^2}{\beta f} & -\frac{\alpha xy}{f} & -\frac{\alpha x}{\beta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

(8)에 (3)을 대입하게 되면 영상 평면상의 특징점 속도는 로봇 관절의 속도로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서

$$J(q, \xi, Z) = J_{img}(q, \xi, Z) \begin{bmatrix} {}^c R_w & 0 \\ 0 & {}^c R_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} J_A(q) \quad (11)$$

시각 궤환을 이용한 로봇 제어에 있어서 제어 목적은 로봇의 위치와 목표물을 영상 평면상의 특징점으로 표현한 후 두 특징점을 설계자가 원하는 오차 범위 안에서 일치하도록 로봇의 말단부의 위치를 제어하는 것을 목표로 한다. 따라서 영상 특징점의 오차함수 $\tilde{\xi}$ 를 현재 영상 특징점 ξ 와 원하는 특징점 ξ_d 의 관계로 다음과 같이 정한다.

$$\tilde{\xi} = \xi - \xi_d \quad (12)$$

(10)을 이용하여 (12)를 미분하면 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\tilde{\xi}} = J(q, \xi, Z)\dot{q} \quad (13)$$

또한 로봇 매니퓰레이터의 관절 속도의 오차 함수를 다음과 같이 정한다.

$$\tilde{q} = \dot{q}_d - \dot{q} \quad (14)$$

여기서 \dot{q}_d 은 원하는 관절 속도로 설계해야 할 벡터이다. (14)를 (13)에 대입하게 되면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\tilde{\xi}} = J(q, \xi, Z)(\tilde{q} + \dot{q}_d) \quad (15)$$

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

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

여기서 K_c 는 설계 이득 이며 양한의 대칭행렬로 정하고, $J^+(q, \xi, Z)$ 는 의사 역행렬(pseudo inverse matrix)로 다음과 같다.

$$J^+(q, \xi, Z) = [J^T(q, \xi, Z)J(q, \xi, Z)]^{-1} J^T(q, \xi, Z) \quad (17)$$

(16)을 (15)에 대입하면 다음과 같은 관계를 만족하게 된다.

$$\dot{\tilde{\xi}} = J(q, \xi, Z)\tilde{q} - K_c \tilde{\xi} \quad (18)$$

III. 강인제어기 설계

로봇 매니퓰레이터의 실제 궤적과 원하는 궤적의 차이인 관절 추종오차 벡터

$$e = q - q_d \tag{19}$$

로 정의한다. 정의된 추종오차를 이용하여 (1)의 로봇 매니퓰레이터에 대한 동특성 방정식을 오차 상태 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\ddot{q}_d - M^{-1}(x_1, q_d)[C(x, q_d, \dot{q}_d)(x_2 + \dot{q}_d) \\ &\quad + G(x_1, q_d)] + M^{-1}(x_1, q_d)\tau \end{aligned} \tag{20}$$

여기서 $x_1 = e, x_2 = \dot{e}$ 이며 각각 $n \times 1$ 벡터이고 $x = [x_1, x_2]$ 이다.

각 관절의 위치 추종 오차의 적분항을 포함하는 확장 상태 방정식을 구현하기 위해 다음과 같은 새로운 상태변수를 정의한다.

$$\sigma = \kappa \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad 1, 2, \dots, n \tag{21}$$

여기서 $\kappa > 0$ 인 설계 이득이다.

(19)의 오차 방정식을 (21)에서 정의된 상태 변수를 포함하는 확장 상태 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{\zeta} = A\zeta + BM^{-1}(x_1, q_d)[-Y(x, Q_d)\theta + \tau] \tag{22}$$

여기서, $\zeta = [\sigma, x_1, x_2]^T, Q_d = [q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d]$ 이고

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \kappa I_{n \times n} & 0 \\ 0 & 0 & I_{n \times n} \\ 0 & 0 & 0_{n \times n} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0_{n \times n} \\ I_{n \times n} \end{bmatrix} \text{이며,}$$

함수 $Y(x, Q_d)\theta$ 는 성질1로부터 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y(x, Q_d)\theta &= M(x_1, q_d)\ddot{q}_d + C(x, q_d, \dot{q}_d) \\ &\quad \cdot (x_2 + \dot{q}_d) + G(x_1, q_d) \end{aligned} \tag{23}$$

적분항을 포함하는 강인제어 입력을 다음과 같이 정한다.

$$\begin{aligned} \tau &= Y(x, Q_d)\theta_o - M_o(x_1, q_d)K\zeta \\ &\quad + J^T(q, \xi, Z)K_i\tilde{\xi} + \tau_N \end{aligned} \tag{24}$$

여기서 K 는 설계이득 행렬로 양한이며 대칭이다. θ_o 는 상수값이고 θ 항의 공칭값(nominal value)이며 $Y(x, Q_d)\theta_o$ 또한 성질1로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} Y(x, Q_d)\theta_o &= M_o(x_1, q_d)\ddot{q}_d + C_o(x, q_d, \dot{q}_d) \\ &\quad \cdot (x_2 + \dot{q}_d) + G_o(x_1, q_d) \end{aligned} \tag{25}$$

여기서, $M_o(\cdot), C_o(\cdot)$ 와 $G_o(\cdot)$ 행렬은 각각 $M(\cdot), C(\cdot)$ 와 $G(\cdot)$ 행렬의 공칭 행렬이다.

τ_N 은 유한한 파라미터 불확실성을 보상하기 위한 비선형

항으로 구성된 제어 입력으로 추후에 정의하기로 한다.

(24)의 입력 토크 방정식을 확장 상태 방정식(22)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} &= (A - BK)\zeta + BM^{-1}(x_1, q_d)[-Y(x, Q_d)\tilde{\theta} \\ &\quad + \tilde{M}(x_1, q_d)K\zeta + J^T(q, \xi, Z)K_i\tilde{\xi} + \tau_N] \end{aligned} \tag{26}$$

여기서 $\tilde{\theta} = \theta_o - \theta, \tilde{M}(x_1, q_d) = M(x_1, q_d) - M_o(x_1, q_d)$

이며, 이득 행렬 K 는 행렬 $(A - BK)$ 가 Hurwitz이도록 정한다.

제어기의 안정도 해석에 필요한 가정을 다음과 같이하기로 한다[9].

가정 1: 관성행렬의 역행렬 $M^{-1}(q)$ 는 양한이며 다음의 부등식을 만족하는 λ_m, λ_M 이 존재한다.

$$\lambda_m \leq M^{-1}(q) \leq \lambda_M$$

가정 2: 다음 부등식을 만족시키는 상수 $\alpha \geq 0$ 와 스칼라 함수 $\beta(\zeta) \geq 0$ 가 존재한다.

$$\begin{aligned} \|\tilde{M}(q)\| &\leq \alpha \\ \|Y(\cdot)\tilde{\theta}\| &\leq \beta \end{aligned}$$

파라미터 변동 범위가 유한하다면 가정2의 부등식을 만족시키는 상수 α 와 $\beta(\zeta)$ 의 선정이 가능하다.

가정 3: 다음 부등식을 만족시키는 $\delta \geq 0$ 와 $v \geq 0$ 가 존재한다.

$$\begin{aligned} \|J^T(q, \xi, Z)K_i\tilde{\xi}\| &\leq \delta \\ \|\tilde{\xi}K_oJ(q, \xi, Z)\tilde{q}\| &\leq v \end{aligned}$$

여기서 K_o 는 설계이득이다.

비선형 제어 입력 τ_N 을 다음과 같이 정한다.

$$\tau_N = \begin{cases} \frac{\lambda_M(\bar{\beta}(\zeta) + \delta)s + v/2}{\lambda_m \|s\|} & \text{if } \lambda_M(\bar{\beta}(\zeta) + \delta)\|s\| + v/2 \geq \mu \\ \frac{\lambda_M(\bar{\beta}(\zeta) + \delta)^2 s + v/2}{\mu \lambda_m} & \text{if } \lambda_M(\bar{\beta}(\zeta) + \delta)\|s\| + v/2 < \mu \end{cases} \tag{27}$$

여기서 $s = B^T P \zeta, \bar{\beta} = \beta(\zeta) + \alpha \|K\| \|\zeta\|$ 이고 $\mu > 0$ 인 설계 파라미터이고, 행렬 $P = P^T > 0$ 는 Lyapunov 방정식 $(A - BK)^T P + P(A - BK) = -I$ 의 해이다.

정리 1: 가정1,2와 3이 성립될 때 확장된 오차방정식(23)은 제안된 강인제어기 (24), (27)에 의해 유한한 시간 내에 로봇 관절 위치 추종 오차는 한정된다.

증명: Lyapunov 후보 함수 V 를

$$V = \zeta^T P \zeta + \frac{1}{2} \tilde{\xi}^T K_o \tilde{\xi} \tag{28}$$

로 정하고 시간에 대해 미분을 하고 (26)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\zeta}^T P \zeta + \zeta^T P \dot{\zeta} + \tilde{\xi}^T K_o \tilde{\xi} \\ &= \zeta^T [(A - BK)^T P + P(A - BK)] \zeta - K_c \tilde{\xi}^T K_o \tilde{\xi} \\ &\quad + \tilde{\xi}^T K_o J(\cdot) \dot{q} + 2s^T M^{-1}(x_1, q_d) [Y(\cdot) \tilde{\theta} \\ &\quad + \tilde{M}(\cdot) K \zeta + J(\cdot) K_i \tilde{\xi} + \tau_N] \\ &\leq -\|\zeta\|^2 - \lambda_{\min}(K_o K_c) \|\xi\|^2 + 2\lambda_M \|s\| (\beta(\zeta) \\ &\quad + \delta) + v + 2s^T M^{-1}(x_1, q_d) \tau_N \end{aligned} \quad (29)$$

여기서 $\lambda_M(\bar{\beta}(\zeta) + \delta) \|s\| + v/2 \geq \mu$ 인 경우 (29) 부등식은

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\|\zeta\|^2 - \lambda_{\min}(K_o K_c) \|\xi\|^2 + 2\lambda_M \|s\| (\beta(\zeta) \\ &\quad + \delta) + v + 2s^T M^{-1}(\cdot) \left(-\frac{\lambda_M(\bar{\beta}(\zeta) + \delta)s + v/2}{\lambda_m \|s\|} \right) \\ &\leq -\|\zeta\|^2 - \lambda_{\min}(K_o K_c) \|\xi\|^2 \end{aligned} \quad (30)$$

위와 같은 관계를 만족하게 된다.

또한, $\lambda_M(\bar{\beta}(\zeta) + \delta) \|s\| + v/2 < \mu$ 인 경우 (29)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\|\zeta\|^2 - \lambda_{\min}(K_o K_c) \|\xi\|^2 + 2\lambda_M \|s\| (\beta(\zeta) \\ &\quad + \delta) + v + 2s^T M^{-1}(\cdot) \left(-\frac{\lambda_M(\bar{\beta}(\zeta) + \delta)s + v/2}{\mu \lambda_m} \right) \\ &\leq -\|\zeta\|^2 - \lambda_{\min}(K_o K_c) \|\xi\|^2 + \frac{\mu}{2} + \left(1 - \frac{\|s\|}{\mu}\right) v \end{aligned} \quad (31)$$

(31)을 다시 정리 하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = -\chi^T \Gamma \chi + \frac{\mu}{2} \quad (32)$$

여기서 $\chi = \begin{bmatrix} \zeta \\ \xi \end{bmatrix}$, $\Gamma = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \lambda_{\min}(K_o K_c) \end{bmatrix}$ 이다.

따라서 $\|\chi\| \geq \sqrt{\frac{\mu}{2\lambda_{\min}(\Gamma)}}$ 인 경우 설계된 강인제어기에 의해 시스템은 균일 최종 한계(uniform ultimately boundedness)를 만족하게 된다[10]. ■

IV. 모의 실험 및 실험

본 논문에서 제안된 강인 제어기법을 적용하여 모의 실험을 수행하기 위한 2-링크 로봇 매니퓰레이터의 동역학 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{12}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & C_{12}(q, \dot{q}) \\ C_{21}(q, \dot{q}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} G_1(q) \\ G_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (33)$$

여기서 관성행렬, 구심력과 코리올리스 힘, 중력 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_{11}(q) &= m_1 l_{c2}^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_1^2 + I_1 + I_3 \\ M_{12}(q) &= (m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) \cos(q_2 - q_1) \\ M_{21}(q) &= M_{12}(q) \\ M_{22}(q) &= l_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_{c4}^2 + I_2 + I_4 \\ C_{11}(q, \dot{q}) &= 0 \quad C_{22}(q, \dot{q}) = 0 \\ C_{12}(q, \dot{q}) &= -(m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) \sin(q_2 - q_1) \dot{q}_1 \\ C_{21}(q, \dot{q}) &= (m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) \sin(q_2 - q_1) \dot{q}_1 \\ G_1 &= g(l_1 l_{c1} + m_3 l_{c3} + m_4 l_1) \cos q_1 \\ G_2 &= g(l_2 l_{c2} + m_3 l_2 - m_4 l_{c4}) \cos q_2 \end{aligned}$$

강인제어기의 성능을 확인하기 위한 파라미터 변동은 질량 m_4 가 $0 \leq \Delta m_4 \leq 4.5$ 범위 내에서 변동한다고 가정하였다.

모의 실험 및 실험에 사용된 로봇 파라미터들과 설계 파라미터들은 그림 1, 표 1,2와 같다.

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

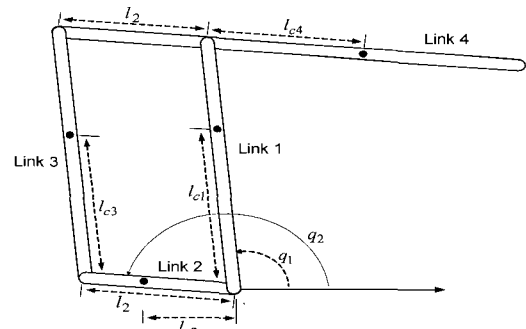


그림 1. 로봇 매니퓰레이터 구조

Fig. 1. The structure of a robot manipulator.

표 1. 로봇 매니퓰레이터의 파라미터들.

Table 1. Parameters of robot manipulator.

m_1	5.5Kg	l_2	0.140m	I_1	0.04 Kg m^2
m_2	0.3Kg	l_{c1}	0.175m	I_2	0.003 Kg m^2
m_3	0.2Kg	l_{c2}	0.070m	I_3	0.001 Kg m^2
m_4	4.5Kg	l_{c3}	0.175m	I_4	0.06 Kg m^2
l_1	0.350m	l_{c4}	0.250m		

표 2. 설계 파라미터들.

Table 2. Design parameters.

μ	5.5Kg	l_2	0.140m
κ	0.3Kg	l_{c1}	0.175m
K	0.2Kg	l_{c2}	0.070m

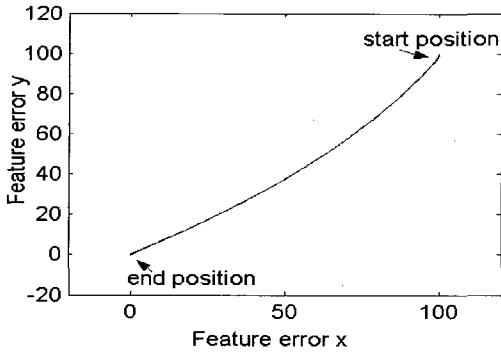


그림 2. 특징점의 궤적(모의 실험).
Fig. 2. Trajectories of image feature(simulation).

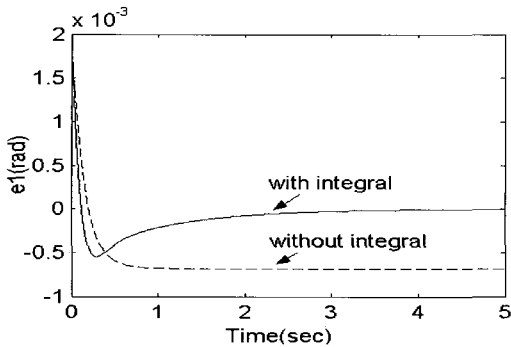


그림 3. 관절 1의 위치 오차(모의 실험).
Fig. 3. Position errors of link 1(simulation).

모의 실험의 결과는 그림 2, 3, 4와 같으며 각각 특징점 궤적, 관절 1의 위치오차, 관절 2의 위치오차이다.

그림 2의 특징점 궤적은 적분항을 포함한 경우(실선)와 적분항을 포함하지 않은 경우(점선), 정상상태에 도달했을 때 적분항이 포함되지 않은 제어기의 경우 특징점 오차는 x 축의 경우 0.7 pixel, y 축의 경우 0.5pixel 정도의 정상상태 오차가 발생한다.

특징점의 정상상태 오차가 발생하는 이유는 그림 3, 4에서 보는 바와 같이 링크 1의 $0.7 \times 10^{-3}(\text{rad})$, 링크 2의 $3.7 \times 10^{-3}(\text{rad})$ 정도의 관절 위치 정상상태 오차에 기인한 것임을 알 수 있다.

다음은 로봇 매니퓰레이터의 말단부에 카메라가 장착된 비전 시스템을 이용하여 강인제어기를 적용하는 실험을 통해 제어기의 성능을 확인하였다. 목표물은 백색 보드에 검은 점으로 구성되어 있고 CCD 카메라는 로봇 말단부에 장착되어 있다.

실험대상은 삼성에서 제작된 FARAMAN As1-I 산업용 로봇이며, 로봇 매니퓰레이터와 목표물은 그림 5와 같다. 실험에 사용된 설계 파라미터는 모의 실험에서 사용된 값과 동일하다.

실험 장치의 하드웨어 구조는 크게 제어 알고리즘을 담당하는 Pentium-IV 컴퓨터, 모터의 구동과 로봇 매니퓰레이터의 위치 계수를 담당하는 모터 제어부가 있다. 또한 카메라의 영상 정보를 처리하는 영상 처리부로 구성되어 있다. 컴퓨터에 장착된 MMC(Multi Motion Controller)보드는 TMS230C32

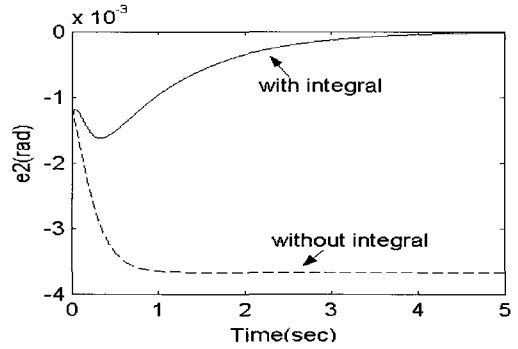


그림 4. 관절 2의 위치 오차(모의 실험).
Fig. 4. Position errors of link 2(simulation).

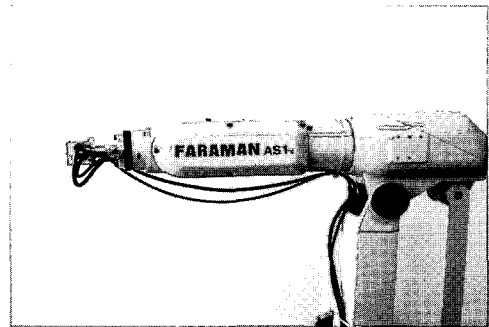


그림 5. 실험 장비.
Fig. 5. Experimental setup.

DSP Chip을 프로세서로 사용하며 제어 알고리즘 부분을 구현한다. CCD 카메라로부터 획득된 영상 정보는 컴퓨터에 장착된 Matrox Meteor II 영상 처리 보드를 통해 디지털화 되며 본 연구에 사용된 처리화 소스는 640×480 화소이다.

그림 6은 영상 평면상에서의 특징점 궤적을 나타내는 실험 결과이고, 그림 7은 관절1의 위치 오차, 그림 8은 관절2의 위치 오차를 나타낸다. 그림 6의 특징점오차는 적분항이 포함되지 않은 제어기의 경우 x 축은 1.2 pixel, y 축의 경우 2.5pixel 정도의 정상상태 오차가 발생한다. 그림 7, 8에서와 같이 링크1의 위치오차는 $0.013(\text{rad})$, 링크2의 위치 오차는 $0.017(\text{rad})$ 정도 개선됨을 알 수 있다. 실험에서 얻어낸 결과 또한 적분항을 포함하는 강인제어기의 정상상태 오차 특성이 더 우수함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 유한한 파라미터 불확실성을 갖는 2-링크 로봇 매니퓰레이터에 대한 시각 궤환을 이용한 강인제어기를 설계하였다. 제어 입력에 적분항을 포함시켜 정상상태 오차를 개선하였으며, 카메라를 통해 궤환되는 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 모의 실험과 실험을 통해 그 결과를 비교 분석함으로써 제안된 제어기의 성능을 확인하였다.

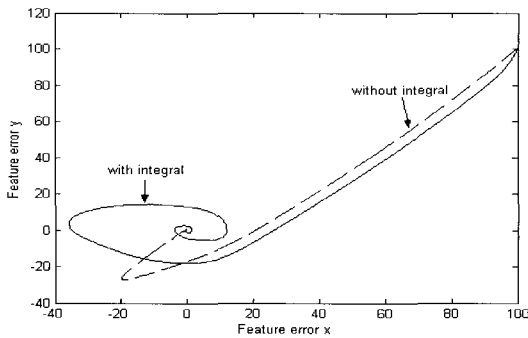


그림 6. 특징점의 궤적(실험).

Fig. 6. Trajectories of image feature(experiment).

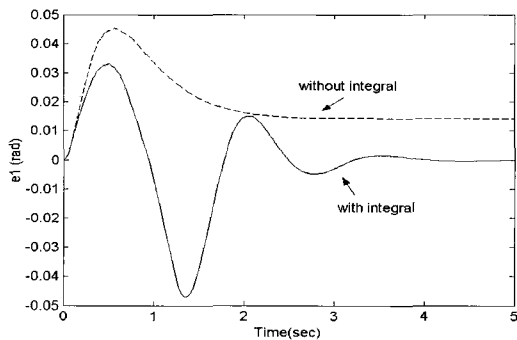


그림 7. 관절 1의 위치 오차(실험)

Fig. 7. Position errors of link 1(experiment).

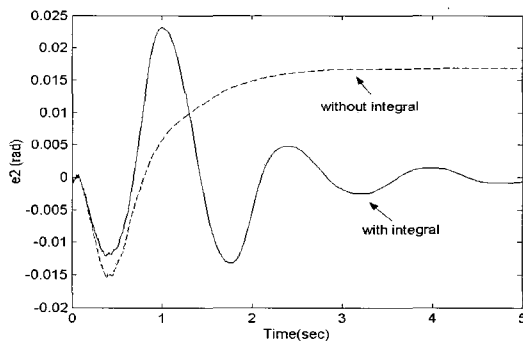


그림 8. 관절2의 위치 오차(실험)

Fig. 8. Position errors of link 2(experiment).

참고문헌

[1] K. Hashimoto, *VISUAL SERVOING*, World Scientific, 1993.
 [2] K. Hashimoto, T. Kimoto, T. Ebine, H. Kimura, "Manipulator control with image-based visual servo," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2267-2272, April, 1991.

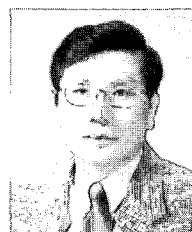
[3] B. Espiau, F. Chaumette, P. Rives, "A new approach to visual servoing in robotics," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 3, pp. 313-326, 1992.
 [4] R. Kelly, "Robust asymptotically stable visual servoing of planar robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5 pp. 759-766, October, 1996.
 [5] W. E. Dixon, E. Zergeroglu, Y. Fang, D. M. Dawson, "Object tracking by a robot manipulator: a robust cooperative visual servoing approach," *Proc. Of 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation Washington, DC*, pp. 211-216, May 2002.
 [6] E. Zergeroglu, D. M. Dawson, M. S. de Queiroz, P. Setlur, "Robust visual-servo control of robot manipulators in the presence of uncertainty," *Journal of Robotic Systems*, vol. 20, issue. 2, pp.93-106, February, 2003.
 [7] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and control*, John Wiley, New York, 1989.
 [8] L. Sciavicco, B. Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, McGraw Hill, New York, 1996.
 [9] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan, New York, 1989.
 [10] M. J. Coreless, G. Leitmann, "Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundedness for uncertain dynamic systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. AC-26, no. 5, pp. 1139-1144, October, 1981.

지민석



1995년 한국항공대학교 항공전자공학과 졸업(공학사). 1997년 동 대학원 졸업(공학석사). 1997년~2000년 한국 레이컴 기술연구소. 2000년~2002년 휴니드테크놀러지스 기술연구소. 2002년~현재 동대학원 박사과정 재학 중. 관심분야는 로봇 비전, 로봇 제어, 모터제어.

이강응



1980년 한국항공대학교 항공전자공학과 졸업(공학사). 1982년 서울대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 1989년 서울대학교 전자공학과 졸업(공학박사). 1994년~1995년 미시간주립대학교 전기공학과 연구교수. 1989년~현재 한국항공대학교 항공전자공학과 교수. 관심분야는 로봇제어, 강인제어, 비선형제어, 적응제어.