

자코비안 불확실성을 포함하는 로봇 매니플레이터의 영상기반 강인제어

Vision-Based Robust Control of Robot Manipulators with Jacobian Uncertainty

김진수*, 지민석*, 이강웅**

Chin-Su Kim*, Min-Seok Jie*, and Kang-Woong Lee**

요 약

본 논문에서는 로봇 매니플레이터가 기준 궤적을 추종할 수 있도록 영상기반 강인제어기를 제안하였다. 카메라로부터 획득된 목표물의 특징점을 원하는 특징점 좌표로 로봇이 이동할 수 있도록 기준 궤적을 생성하고, 제어 입력에 포함되는 로봇 동역학부의 파라미터 불확실성을 보상하기 위한 강인제어기를 설계하였다. 또한 자코비안에 불확실성이 존재하는 경우 이를 보상하기 위한 제어 입력을 갖는 영상기반 강인제어기를 제안하였다. 시스템의 안정도는 Lyapunov 안정도 판별법을 이용하여 검증하였다. 5-링크 2 자유도의 로봇 매니플레이터를 대상으로 제안된 제어기를 적용한 모의실험과 실험을 통하여 제어 성능을 입증하였다.

Abstract

In this paper, a vision-based robust controller for tracking the desired trajectory a robot manipulator is proposed. The trajectory is generated to move the feature point into the desired position which the robot follows to reach to the desired position. To compensate the parametric uncertainties of the robot manipulator which contain in the control input, the robust controller is proposed. In addition, if there are uncertainties in the Jacobian, to compensate it, a vision-based robust controller which has control input is proposed as well in this paper. The stability of the closed-loop system is shown by Lyapunov method. The performance of the proposed method is demonstrated by simulations and experiments on a two degree of freedom 5-link robot manipulators.

Key words : Robust Control, Vision-based Control, Jacobian Uncertainty

I. 서 론

로봇 매니플레이터는 주어진 작업을 빠르고 정확하게 수행할 수 있지만 작업 공간에 대한 정보획득 능력이 없기 때문에 능동적인 임무 수행이 불가능하

다. 따라서 로봇이 불확실한 작업공간에 대해서 보다 능동적인 임무수행을 위해 비전 센서 등을 이용한 연구가 진행되었다[1],[2].

로봇 매니플레이터에 비전 시스템을 적용하는 제어에는 원하는 로봇의 궤적이 작업 공간의 좌표로 주

* 한국항공대학교 항공전자공학과 자동제어연구소(Automatic Control Lab., Department of Electronics, Hankuk Aviation University)

** 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부(School of Electronics Telecomm. and Computer Engineering, Hankuk Aviation University)

· 제1저자 (First Author) : 김진수

· 접수일자 : 2006년 4월 25일

어지는 위치기반 구조와 카메라의 이미지 평면상에 주어지는 영상기반 구조로 분류된다[3],[4].

영상기반 구조는 카메라로부터 획득한 영상정보를 직접 이용하여 제어 입력을 생성하기 때문에 제어 입력에 로봇의 동역학 특성이 포함되어야 하지만 로봇 동역학 특성에 파라미터 불확실성이 존재하는 경우 제어 성능을 악화시킬 수 있다. 이런 단점을 보완하기 위해 강인제어 기법을 사용한다.

로봇 비전 시스템에서는 카메라를 통하여 획득한 목표물의 좌표를 영상평면상의 특징점으로 변환하여 원하는 특징점의 좌표로 이동시킨다. 이때 로봇 관절의 속도와 영상평면상의 특징점의 속도와의 관계를 나타내는 함수를 자코비안(Jacobian)이라 한다. 그러나 실제 목표물의 이동이 없다고 하더라도 자코비안 파라미터의 변동을 가져올 수 있다. 자코비안에 불확실성이 존재하는 경우 이를 보상하는 항이 포함된 제어 입력을 갖는 제어기를 필요로 한다.

Kelly[5]는 카메라를 로봇 매니퓰레이터의 말단부에 부착하고 카메라 이미지 평면상의 특징점 오차를 사용하는 이미지 기반 제어 알고리즘을 제시하였는데, 제어입력이 로봇의 동역학 특성이 포함되지 않아 특징점 오차의 크기에 민감하게 되어 외란이나 잡음이 있는 경우 제어 성능이 악화될 수 있다.

Zergeroglu[6]는 로봇의 파라미터 불확실성을 고려하여 제어 입력에 로봇 동역학 특성을 포함하는 제어기를 제안하였다. Cheah[7]는 자코비안 불확실성을 보상하는 제어 입력을 갖는 영상기반 제어기를 제안하였다. 그러나 제어 입력에 로봇 동역학 특성이 포함되지 않았으며 영상 자코비안을 제외한 기하학적 자코비안의 불확실성만을 고려하였다.

본 논문에서는 유한한 로봇 동역학 특성의 불확실성과 자코비안 불확실성을 갖는 로봇 비전 시스템을 대상으로 영상평면상의 특징점을 원하는 좌표로 이동시키기 위한 영상기반 구조의 강인제어기를 제안하고, 제안된 제어기의 성능을 입증하고자 한다.

II. 로봇 모델과 카메라 환경

마찰이 없다고 가정한 n-링크 로봇의 동역학 방정식은 다음과 같다.

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

여기서, q, \dot{q}, \ddot{q} 은 각각 로봇 매니퓰레이터의 위치, 속도, 가속도를 나타내며, 행렬 $M(q)$ 는 양행이고 대칭인 관성행렬이다. $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 은 구심력과 코리올리스 힘을 나타내며 $G(q)$ 는 $n \times 1$ 중력 벡터이며 $\tau \in R^n$ 는 토크벡터이다.

동역학 방정식은 다음과 같은 성질을 갖는다.

성질 1 : 식 (1)의 로봇 동역학 방정식은 미지의 파라미터 벡터 θ 에 대해 선형식으로 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 θ 는 로봇의 물리적인 파라미터로 구성된 $m \times 1$ 벡터이며 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 는 $n \times m$ 축차행렬이다.

성질 2 : 관성 행렬의 시간에 대한 미분과 구심력, 코리올리스 항은 다음을 만족한다.

$$\dot{q}^T \left[\frac{1}{2} M(q) - C(q, \dot{q}) \right] \dot{q} = 0, \quad \forall q, \dot{q} \in R^n \quad (3)$$

카메라의 좌표계와 로봇 말단부의 좌표계가 일치하면 카메라 좌표계에서 정의된 목표물의 위치벡터 ${}^c P_t$ 를 로봇의 기저 좌표계로 변환한다.

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

여기서 ${}^0 R_c$ 는 로봇 좌표계를 기준으로 할 때 카메라 좌표계의 회전행렬을 나타낸다.

원근 투영법을 이용하여 카메라 좌표계에서 정의된 목표물의 위치벡터 ${}^c P_t = [{}^c x_t \ {}^c y_t \ {}^c z_t]^T$ 를 영상평면상의 특징점 ζ 로 나타낼 수 있다.

$$\zeta = [x \ y]^T = \left[\frac{f^c x_t}{a^c z_t} \quad \frac{f^c y_t}{\beta^c z_t} \right]^T \quad (5)$$

여기서 f 는 카메라 좌표계의 원점에서 영상평면까지의 초점거리이고, a, β 는 각각 영상평면의 X, Y 축 단위 화소당 미터 비례 계수이다.

III. 영상기반 제어

영상기반 로봇 제어에서는 영상평면상의 특징점을 원하는 특징점으로 이동시키기 위해서 적절한 오차함수 ξ 를 정의하고, 이 오차함수가 영(zero)으로 수렴하는 것을 목표로 한다. 특징점을 원하는 위치로 이동시키기 위해 자코비안을 정의하는데 영상평면상의 특징점 ξ 를 미분하여 얻을 수 있다.

식 (5)를 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha} \frac{1}{c_{z_t}} & 0 & -\frac{c_{x_t}}{\alpha c_{z_t}} \\ 0 & \frac{1}{\beta} \frac{1}{c_{z_t}} & -\frac{c_{y_t}}{\beta c_{z_t}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{\dot{x}_t} \\ c_{\dot{y}_t} \\ c_{\dot{z}_t} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (4)로부터 카메라 좌표계에서 정의된 목표물의 위치는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$${}^c P_t = {}^c R_0 ({}^0 P_t - {}^0 P_c) \quad (7)$$

식 (7)를 미분하여 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} -\frac{F_1}{c_{z_t}} & 0 & \frac{x}{c_{z_t}} & \frac{xy}{F_2} & \frac{x^2+F_1}{F_1} & \frac{F_1 y}{F_2} \\ 0 & -\frac{F_2}{c_{z_t}} & \frac{y}{c_{z_t}} & \frac{y^2-F_2}{F_2} & \frac{xy}{F_1} & \frac{F_2 x}{F_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{v_c} \\ c_{\omega_c} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 $F_1 = f/\alpha$, $F_2 = f/\beta$ 이고, c_{v_c} , c_{ω_c} 는 카메라 좌표계에서 카메라의 선속도와 각속도이다.

그림 1에서와 같이 로봇 좌표계에서 카메라의 선속도와 각속도 $[v_c^T, \omega_c^T]^T$ 는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} c_{v_c} \\ c_{\omega_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0 R_c^T & 0 \\ 0 & {}^0 R_c^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)을 식 (8)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 영상 자코비안 $J_{img}(q, \xi, c_{z_t})$ 를 정의할 수 있다.

$$J_{img} = \begin{bmatrix} -\frac{F_1}{c_{z_t}} & 0 & \frac{x}{c_{z_t}} & \frac{xy}{F_2} & \frac{x^2+F_1}{F_1} & \frac{F_1 y}{F_2} \\ 0 & -\frac{F_2}{c_{z_t}} & \frac{y}{c_{z_t}} & \frac{y^2-F_2}{F_2} & \frac{xy}{F_1} & \frac{F_2 x}{F_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0 R_c^T & 0 \\ 0 & {}^0 R_c^T \end{bmatrix}$$

(10)

로봇의 관절속도 \dot{q} 과 로봇 말단부의 선속도 v_c 와 각속도 ω_c 는 다음의 관계를 만족한다.

$$[v_c^T, \omega_c^T]^T = J_g(q) \dot{q} \quad (11)$$

여기서 $J_g(q)$ 는 기하학적 자코비안으로 변환행렬 $T(q)$ 를 사용하여 나타낼 수 있다.

$$J_g(q) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} \frac{\partial {}^0 P_c}{\partial q} \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)를 이용하여 특징점의 미분을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\xi} = J_{img}(q, \xi, c_{z_t}) \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} \frac{\partial {}^0 P_c}{\partial q} \dot{q} \quad (13)$$

따라서 자코비안을 다음과 같이 정의한다.

$$\mathcal{J}(q, \xi, c_{z_t}) = J_{img}(q, \xi, c_{z_t}) \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} \frac{\partial {}^0 P_c}{\partial q} \quad (14)$$

자코비안을 사용하여 특징점의 속도를 로봇 관절의 속도로 표현할 수 있다.

$$\dot{\xi} = \mathcal{J}(q, \xi, c_{z_t}) \dot{q} \quad (15)$$

영상평면상의 특징점 오차함수 ξ 는 다음과 같다.

$$\xi = \xi_d - \xi \quad (16)$$

식 (16)을 시간에 대하여 미분하고 식 (15)을 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{\xi} = \dot{\xi}_d - \dot{\xi} = -\mathcal{J}(q, \xi, c_{z_t}) \dot{q} \quad (17)$$

로봇 관절의 속도 \dot{q} 를 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{q} = -J^+(q, \xi, c_{z_t}) K \xi \quad (18)$$

여기서, $J^+(a, \xi, {}^c z_i)$ 은 자코비안의 의사 역행렬이고, K 는 양한의 설계이득이다.

로봇의 희망 관절속도 \dot{q}_d 은 다음과 같다.

$$\dot{q}_d = -J^+(a, \xi, {}^c z_i)K\xi \quad (19)$$

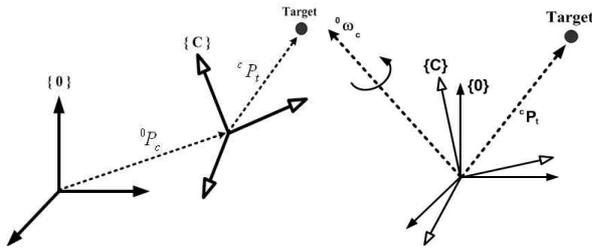


그림 1. 좌표계의 선속도와 각속도
Fig. 1. Linear and angular velocity of the coordinate frame.

IV. 제어기 설계

로봇의 원하는 관절 위치를 q_d 라 하면 로봇 관절 위치 q 와의 관계를 오차함수로 정의한다.

$$\tilde{q} = q_d - q \quad (20)$$

식 (17)에 식 (20)을 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{\xi} = -\mathcal{K}(a, \xi, {}^c z_i)(\dot{q}_d - \dot{\tilde{q}}) \quad (21)$$

식 (21)에 식 (19)을 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{\xi} = -K\xi + \mathcal{K}(a, \xi, {}^c z_i)\tilde{q} \quad (22)$$

로봇 동역학 방정식이 파라미터의 불확실성을 갖는 경우에도 원하는 제어성능을 발휘할 수 있도록 강인 제어를 설계한다. 파라미터의 불확실성이 유한하다고 가정하면 로봇 동역학 방정식 성질 1을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta = \tau \quad (23)$$

식 (23)에서 θ 는 불확실성을 포함하는 벡터로 θ_0 를 θ 의 공칭값이라 하면, 두 벡터는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\|\theta\| = \|\theta_0 - \theta\| \leq \rho \quad (24)$$

여기서, $\rho > 0$ 는 파라미터 변동 범위의 한계로 기지의 값이다.

자코비안에 불확실성이 존재하는 경우에는 이를 고려하여 제어 입력을 설계한다. 불확실성이 포함된 자코비안의 추정값을 \tilde{J} 이라 하면 자코비안 불확실성이 유한하다고 가정하면 다음의 관계를 만족한다.

$$\|\tilde{J}\| = \|J - \tilde{J}\| \leq \sigma \quad (25)$$

여기서, $\sigma > 0$ 는 자코비안 변동범위의 한계로 기지의 값이다.

따라서 로봇 동역학 특성의 불확실성과 자코비안 불확실성이 존재하더라도 원하는 관절 속도를 추종할 수 있도록 제어 입력을 다음과 같이 정의한다.

$$\tau = Y(q, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)(\theta_0 + u) + K_v\dot{\tilde{q}} + \tilde{J}^T(a, \xi, {}^c z_i)\xi + \mathcal{K}\xi\|\tilde{q}\|^2 \quad (26)$$

여기서, K_v 는 양한이고 대칭인 설계 이득이고, u 는 유한한 파라미터 불확실성을 보상하기 위한 비선형 항으로 다음과 같이 설계하였다.

$$u = \begin{cases} -\rho \frac{Y^T \dot{\tilde{q}}}{\|Y^T \dot{\tilde{q}}\|}, & \|Y^T \dot{\tilde{q}}\| > \varepsilon \\ -\rho \frac{Y^T \dot{\tilde{q}}}{\varepsilon}, & \|Y^T \dot{\tilde{q}}\| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (27)$$

또한 $Y(q, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)\theta_0$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$Y(q, \dot{q}_d, \ddot{q}_d)\theta_0 = M_0(q)\ddot{q}_d + C_0(q, \dot{q})\dot{q}_d + G_0(q) \quad (28)$$

$M_0(q), C_0(q, \dot{q}), G_0(q)$ 는 각각 $M(q), C(q, \dot{q}), G(q)$ 의 공칭항이다.

식 (26)의 제어 입력에서 자코비안 불확실성을

고려하여 자코비안의 추정값 \hat{J} 을 사용하므로 이를 보상하기 위해 k 를 다음과 같이 설계하였다.

$$k = \begin{cases} \frac{\sigma}{\|\hat{q} \hat{\xi}^T\|}, & \|\hat{q} \hat{\xi}^T\| > \eta \\ \frac{\sigma}{\eta}, & \|\hat{q} \hat{\xi}^T\| \leq \eta \end{cases} \quad (29)$$

제어 입력 u 와 자코비안 불확실성의 보상항 k 는 설계 파라미터 $\varepsilon > 0$ 와 $\eta > 0$ 에 의해 페루프 시스템의 추종오차를 유한한 범위 내에 있도록 할 수 있다. 식 (26)을 식 (1)에 대입하여 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{q} = & M^{-1}(q) [-C(q, \dot{q})\dot{q} + Y(q, \dot{q}, \ddot{q})(\Theta + u) \\ & - K_v \dot{q} - \hat{J}^T(q, \xi, c_z)\xi - k\|\xi\|^2 \hat{q}] \end{aligned} \quad (30)$$

페루프 시스템의 상태변수 벡터를 $[\xi^T \ \dot{q}^T]^T$ 로 정의하면 상태방정식은 $[\xi^T \ \dot{q}^T]^T = [0 \ 0]^T$ 인 유일 평형점을 갖는 비선형 시스템이 된다. 이 시스템이 안정함을 보이기 위해 Lyapunov 후보 함수를 다음과 같이 정한다.

$$V = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \xi^T \xi \quad (31)$$

식 (31)을 시간에 대해 미분하고 상태변수 방정식을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = -x^T Wx + \hat{q}^T Y(\Theta + u) + \hat{q}^T \hat{J}^T \xi - k\|\xi\|^2 \|\hat{q}\|^2 \quad (32)$$

여기서, $x = [\xi^T \ \dot{q}^T]^T$, $W = \begin{bmatrix} K^T & 0 \\ 0 & K_v \end{bmatrix}$ 이다.

식 (32)는 비선형 제어 입력 u 와 k 에 의해 다음의 네 가지 경우로 분류된다.

첫 번째로 $\|Y^T \hat{q}\| > \varepsilon$, $\|\hat{q} \hat{\xi}^T\| > \eta$ 인 경우,

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -x^T Wx + \|Y^T \hat{q}\|(\|\Theta\| - \rho) + \|\hat{q}\| \|\xi\| \|\hat{\xi}\| - \sigma \|\hat{q}\| \|\xi\| \\ \leq & -\lambda_{\min}(W)\|x\|^2 + \|\hat{q}\|(\|\Theta\| - \sigma)\|\xi\| \leq 0 \end{aligned} \quad (33)$$

두 번째로 $\|Y^T \hat{q}\| \leq \varepsilon$, $\|\hat{q} \hat{\xi}^T\| > \eta$ 인 경우,

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -x^T Wx + \frac{\varepsilon \rho}{4} + \|\hat{q}\|(\|\Theta\| - \sigma)\|\xi\| \\ \leq & -\lambda_{\min}(W)\|x\|^2 + \frac{\varepsilon \rho}{4} \end{aligned} \quad (34)$$

이때, $\|x\| \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon \rho}{\lambda_{\min}(W)}}$ 이면 $\dot{V} \leq 0$ 이 된다.

세 번째로 $\|Y^T \hat{q}\| > \varepsilon$, $\|\hat{q} \hat{\xi}^T\| \leq \eta$ 인 경우,

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -x^T Wx + \|Y^T \hat{q}\|(\|\Theta\| - \rho) + \sigma \|\hat{q}\| \|\xi\| \\ & - \frac{\sigma}{\eta} \|\xi\|^2 \|\hat{q}\|^2 \leq -\lambda_{\min}(W)\|x\|^2 + \frac{\eta \sigma}{4} \end{aligned} \quad (35)$$

이때, $\|x\| \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\eta \sigma}{\lambda_{\min}(W)}}$ 이면 $\dot{V} \leq 0$ 이 된다.

마지막으로 $\|Y^T \hat{q}\| \leq \varepsilon$, $\|\hat{q} \hat{\xi}^T\| \leq \eta$ 인 경우,

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -x^T Wx + \|Y^T \hat{q}\| \tau_\rho - \frac{\rho}{\varepsilon} \|Y^T \hat{q}\|^2 + \sigma \|\hat{q}\| \|\xi\| \\ & - \frac{\sigma}{\eta} \|\xi\|^2 \|\hat{q}\|^2 \leq -\lambda_{\min}(W)\|x\|^2 + \frac{\varepsilon \rho}{4} + \frac{\eta \sigma}{4} \end{aligned} \quad (36)$$

이때, $\|x\| \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\eta \sigma + \varepsilon \rho}{\lambda_{\min}(W)}}$ 이면 $\dot{V} \leq 0$ 이 된다.

따라서 제안된 시스템은 균일 최종 한계를 만족하게 된다. 여기서 ε , η 는 설계 파라미터로 충분히 작게 선정하면 영상평면상의 특징점 오차의 정상상태는 충분히 작은 값에 도달한다.

V. 모의실험과 실험

제안한 제어기의 성능을 검증하기 위하여 로봇 매니퓰레이터의 말단부에 카메라가 장착된 비전 시스템에 대한 모의실험을 수행하였다.

로봇 말단부의 카메라 위치와 목표물의 거리는 1 [m]로 가정하였고 로봇 말단부 좌표계와 카메라의 좌표계는 동일하게 설정하였다.

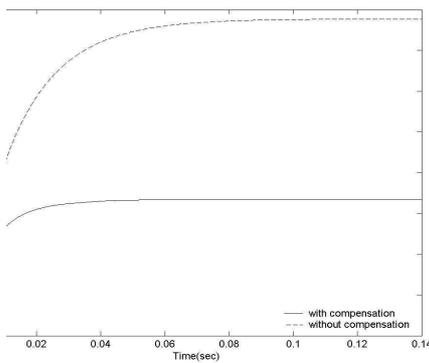
표 1. 카메라의 파라미터
Table 1. Parameters of the camera.

설명	기호	값	단위
초점거리	f	0.016	m
X축 미터 비례 계수	α	6.941×10^{-6}	$m/pixel$
Y축 미터 비례 계수	β	9.425×10^{-6}	$m/pixel$

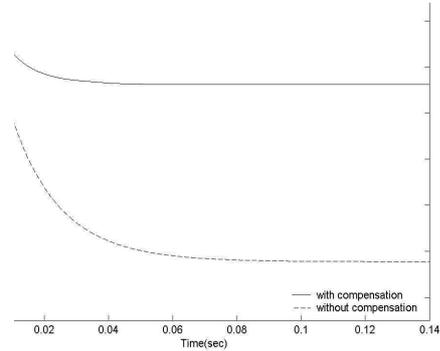
로봇 동역학 특성에 불확실성을 포함시키기 위해 링크 4의 무게에 미지의 부하 변동을 포함하도록 설정하였다. 또한 자코비안의 불확실성을 고려하여 영상 자코비안의 특징점 좌표와 카메라와 목표물 사이의 거리에 오차가 있다고 가정하였고, 로봇 매니플레이터 링크 1의 관성과 링크 2의 관성에 파라미터 불확실성이 존재한다고 설정하였다.

로봇 관절 1의 초기 위치는 $\pi/2$ [rad], 관절 2의 초기 위치는 π [rad]로 설정하였고, 영상 평면상의 초기 특징점 위치는 [100 100](pixel)로, 원하는 영상 평면상의 좌표는 [0 0](pixel)로 설정하였다.

그림 2는 자코비안 불확실성을 보상하는 제어기와 보상하지 않는 제어기의 비교 모의실험을 수행한 결과로 관절 1, 2의 위치 오차를 나타내었다. 제안된 제어기가 정상상태에 도달하는 속도가 빠르고, 정상상태에서의 오차도 약 0.09[rad] 개선시켰음을 확인할 수 있다.



(a) 관절 1의 위치 오차



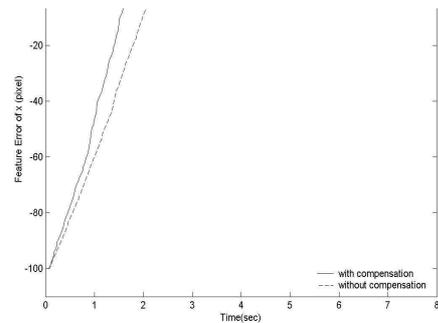
(b) 관절 2의 위치 오차

그림 2. 관절 1, 2의 위치 오차

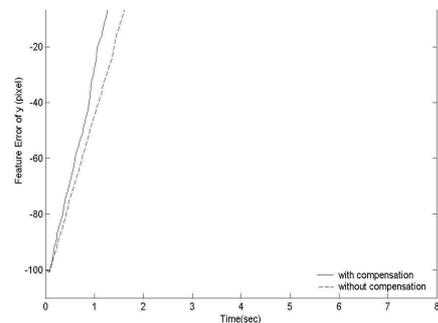
Fig. 2. Position errors of the link 1, 2.

제안된 제어 기법을 적용하는 실험은 5관절 2자유도를 가지는 로봇을 대상으로 수행하였다. 로봇 제어 시스템은 Pentium III 컴퓨터에 MMC(Multi motion controller)가 장착되고 로봇의 말단부에 장착된 CCD 카메라로부터 입력되는 영상정보를 처리하기 위하여 Matrox 보드를 사용하였다.

그림 3은 특징점 오차를 나타낸 것으로 제안된 제어기의 특징점이 원하는 특징점의 좌표로 이동하는 시간이 약 0.7초 감소되었음을 확인할 수 있다.



(a) x축의 특징점 오차



(b) y축의 특징점 오차

그림 3. 특징점 오차
Fig. 3. Feature errors.

VI. 결 론

본 논문에서는 유한한 동역학 특성의 파라미터 불확실성과 유한한 크기의 자코비안 불확실성이 존재하는 비전 로봇 시스템을 대상으로 영상기반 강인제어를 제안하였다. 제안된 제어 입력에 의해 영상평면상의 특징점이 원하는 특징점으로 이동할 수 있도록 생성된 기준 궤적을 추종하는 로봇 관절의 응답 속도를 개선시켰다. 제안한 제어기의 안정도는 Lyapunov 안정도 판별법에 의해 균일 최종 한계를 만족함을 보였고, 제어기의 성능은 로봇 말단부에 카메라가 장착된 5-링크 2 자유도의 로봇을 대상으로 한 모의실험과 실험을 통하여 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] P. Rivers, F. Chaumette, and B. Espiau, "Positioning of a robot with respect to an object, tracking and estimating its velocity by visual servoing," *In V. Hayward and O. Khatib, editors, Experimental Robotics*, vol. 139 of Lecture Notes in Control and Information Sciences, pp. 412-428, Springer-Verlag, 1989.

[2] F. Chaumette, P. Rives, and B. Espiau, "Positioning of a robot with respect to an object, tracking it and estimating its velocity by visual servoing," *In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2248-2253, 1991.

[3] Z. Qu and D. M. Dawson, *Robust Tracking Control of Robot Manipulators*, IEEE PRESS, New York, 1996.

[4] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan, New York, 1989.

[5] R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisi, B. Kuchen, and F. Reyes, "Stable visual servoing of camera-in-hand robotics systems," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 5, no. 1, pp. 39-48, Mar.

2000.

[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, pp. 93-106, 2003.

[7] C. C. Cheah, S. Kawamura and S. Arimoto, "Visual servoing of robot manipulator without camera calibration," *Advanced Motion Control. AMC '98-Coimbra.*, pp. 688-693, 1998.

김진수 (金珍秀)



2004년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과(공학사)
2006년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과(공학석사)
2006년 3월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 박사과정
관심분야 : 로봇 비전, 강인제어

지민석 (池旻錫)



1995년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과(공학사)
1997년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과(공학석사)
1997년~2000년 : (주)한국레이컴 기술연구소
2000년~2002년 : (주)휴니드 테크

놀리지스 기술연구소
2002년 : 한국항공대학교 항공전자공학과 박사과정
관심분야 : 로봇제어, 로봇 비전, 모터제어

이강웅 (李康熊)



1980년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과(공학사)
1982년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학석사)
1983년~1984년 : 삼성전자 컴퓨터개발부
1989년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학박사)

1994년~1995년 : 미시간주립대학교 방문교수

1989년~현재 : 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신
공학부 교수

관심분야 : 로봇제어, 비선형제어