

# 영상 자코비안 및 동특성 불확실성을 포함하는 로봇 매니플레이터의 영상기반 강인제어

## Image-based Robust Control of Robot Manipulators with Image Jacobian and Dynamics Uncertainties

김진수\*, 모은종, 이강웅  
(Chin-Su Kim, Eun-Jong Mo, and Kang-Woong Lee)

**Abstract :** In this paper, we design an image-based robust controller to compensate uncertainties with image Jacobian and robot dynamics due to uncertain depth measurement and load variations. The proposed controller with eye-in-hand structure has separate terms to compensate each of uncertainties. The ultimate boundedness of the closed-loop system is proved by the Lyapunov approach. The performance of the proposed control system is demonstrated by simulation and experimental results a 5-link robot manipulator with two degree of freedom.

**Keywords :** manipulator, visual servoing, robust control, image Jacobian

### I. 서론

미지의 작업환경이나 정해지지 않은 작업을 해야 하는 로봇 매니플레이터 제어에 카메라로부터 얻어지는 영상정보를 활용하는 제어기법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 작업 환경과 목표물에 대한 영상 정보로부터 로봇 말단부의 위치 제어입력이 실시간으로 생성되는 시각 서보(visual servoing) 제어시스템은 고정 카메라(fixed-camera) 구조와 말단부 부착(eye-in-hand) 구조로 분류된다[1]. 고정 카메라 구조에서는 로봇 매니플레이터 외부에 장착된 카메라 위치가 기준 좌표가 되고 카메라로부터 획득된 목표물과 작업환경의 영상정보가 로봇 매니플레이터에 제공되어 원하는 작업을 하도록 한다. 로봇 말단부에 카메라가 부착된 말단부 부착 구조에서는 목표물에 대한 영상 정보가 시각 서보 제어시스템에 제공되어 영상 평면상에 투영된 목표물의 위치로 로봇 매니플레이터가 이동하도록 한다.

영상기반 구조의 제어 시스템을 구현하는 경우 제어 성능이 향상되기 위해서는 제어 입력에 로봇 동역학 항과 카메라 파라미터 보정항이 포함되어야 한다. 그러나 로봇 동역학 항은 부하 변동과 마찰 등에 의한 파라미터 불확실성이 포함되게 되며 카메라 파라미터 항에도 거리 측정 오차 및 회전각도 오차 등에 의한 불확실성이 나타나게 된다. 특히 작업 특성이 변하는 미지의 환경에서 임무를 수행해야 되는 경우 이와 같은 불확실성은 증가하게 되며 제어 시스템이 불확실성을 적절히 보상하지 않는 경우 제어 성능이 약화된다. 각종 파라미터 불확실성을 보상하는 강인제어 시스템의 설계 중, Kelly[2]는 카메라 회전각도의 불확실성을 보상하는 위치 추종 제어를 설계하였는데 로봇 동역학 항의 중력성분은 정확히 아는 것으로 가정하였다. Zergeroglu[3,4]는 동역학 항의

파라미터 불확실성과 카메라 회전행렬의 파라미터 불확실성을 통합하여 나타내고 이를 보상하는 시각 서보 강인 제어를 제안하였다. Kelly[5]는 말단부 부착 구조의 로봇 매니플레이터에 대한 영상기반 시각 서보 제어를 제안하였는데 영상 자코비안(image Jacobian) 항은 정확히 알고 동역학 항의 중력성분이 불확실성을 포함하는 문제를 해결하고자 하였다.

본 논문에서는 말단부 부착 구조의 시각 서보 로봇 매니플레이터를 대상으로 부하 변동에 의한 동역학 항의 파라미터 불확실성과 카메라에 의한 목표물 인식이 발생할 수 있는 영상 자코비안 항의 불확실성을 보상하기 위해 영상기반 강인 제어를 제안하고자 한다. 영상 자코비안에는 회전각도의 불확실성뿐만 아니라 목표물까지의 거리 측정 오차에 따른 불확실성을 포함하게 되는데 동역학 항의 불확실성과 분리하여 제어 입력을 설계하는 것이 불확실성이 시스템에 미치는 영향을 줄일 수 있다[6]. 따라서 본 논문에서는 Kelly[5]의 제어구조를 기반으로 영상 자코비안에 불확실성을 보상하는 강인제어를 설계하기로 한다. 설계된 제어 시스템의 안정성은 Lyapunov 안정도 판별법을 적용하여 입증한다. 제안된 제어 시스템의 강인성은 5-링크 2자유도의 로봇 매니플레이터를 대상으로 모의실험을 수행하여 입증하기로 한다. 본 논문의 구성은 II절에서 제어 시스템을 설계하기 위한 로봇 및 카메라 모델링을 설명하고 III절에서 영상기반 강인제어를 설계하고, 설계된 제어시스템의 추종오차가 궁극적으로 한계 범위 내로 수렴함을 증명하고 IV절에서는 모의실험과 실험을 통하여 성능을 확인한 후 V절에서 결론을 맺는다.

### II. 로봇 및 카메라 모델

마찰이 없다고 가정된  $n$ -링크 강체 로봇 매니플레이터의 동역학 방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서  $q \in R^n$ ,  $\dot{q} \in R^n$ ,  $\ddot{q} \in R^n$  는 각각 로봇 관절의 위치벡터, 속도벡터, 가속도벡터이고,  $\tau \in R^n$  는 관절에 가해지는 토크 벡터이다.  $M(q) \in R^{n \times n}$  은 대칭인 양한(positive definite)의

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 3. 3., 채택확정 : 2008. 7. 23.

김진수, 모은종, 이강웅 : 한국항공대학교 항공전자공학과  
(kimcs78@paran.com/moe@pweh.com/kwlee@kau.ac.kr)

※ 본 논문은 2007년도 한국항공대학교 교비지원 연구비에 의하여 지원된 연구의 결과임.

관성행렬이고,  $C(q, \dot{q})\dot{q} \in R^n$  은 구심력과 코리올리스 힘을 나타내는 벡터이며  $G(q) \in R^n$  는 중력벡터이다.

(1)로 주어지는 동역학 방정식의 다음 성질은 안정도 해석에 이용된다.

성질 1: 미지의 파라미터 벡터  $\theta \in R^p$  에 대하여 (1)의 동역학 방정식은 선형화할 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  $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in R^{n \times p}$  은 아는 값으로 표시되는 축차행렬 (regression matrix)이다.

성질 2:  $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$  은 왜대칭행렬(skew-symmetry matrix)이다.

로봇 매니퓰레이터의 말단부에 부착되어 있는 CCD 카메라로부터 얻어지는 목표물의 영상 정보는 원근투영법으로 표시된다. 카메라 좌표계에서 정의되는 목표물의 좌표  ${}^cP_o = [X \ Y \ Z]^T$  는 다음과 같이 표현된다.

$${}^cP_o = {}^cR_o ({}^oP_o - {}^oO_c) \quad (3)$$

여기서  ${}^cR_o$  는 로봇 좌표계를 기준으로 카메라 좌표계를 회전한 회전행렬이고,  ${}^oP_o$  와  ${}^oO_c$  는 각각 로봇 좌표계에서 나타내는 목표물의 좌표와 카메라 좌표계의 원점이다.

원근투영법을 사용하여 목표물을 영상평면에서 특징점으로 나타내면 다음과 같다.

$$\xi = [x \ y]^T = \begin{bmatrix} fX / \alpha Z & fY / \beta Z \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

여기서 카메라 렌즈의  $f$  는 초점거리이고,  $\alpha$  와  $\beta$  는 카메라 샘플링에 따른 미터당 화소 수를 나타내는 비례 계수이다.

(4)를 시간에 대하여 미분하면 다음 식을 얻는다.

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \frac{f}{\alpha Z} & 0 & -\frac{fX}{\alpha Z^2} \\ 0 & \frac{f}{\beta Z} & -\frac{fY}{\beta Z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(3)을 시간에 대하여 미분하여 (5)에 대입하면 영상 평면에서 특징점의 속도는 다음과 같이 카메라가 부착된 로봇 말단부의 선속도와 각속도로 표현된다[7].

$$\dot{\xi} = J_{img}(q, \xi, Z) \begin{bmatrix} v_c^T & \omega_c^T \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

여기서  $v_c$  와  $\omega_c$  는 로봇 좌표계에서 표현되는 카메라의 선속도와 각속도이고, 행렬  $J_{img}(q, \xi, Z)$  는 이미지 자코비안으로 다음과 같이 정의된다.

$$J_{img}(q, \xi, Z) = \begin{bmatrix} -\frac{f}{\alpha Z} & 0 & \frac{x}{Z} & \frac{\beta xy}{f} & \frac{\alpha x^2 + f}{f} & \frac{\beta y}{\alpha} \\ 0 & -\frac{f}{\beta Z} & \frac{y}{Z} & \frac{\beta y^2 - f}{f} & \frac{\alpha xy}{f} & \frac{\alpha x}{\beta} \\ \begin{bmatrix} {}^oR_c^T & 0 \\ 0 & {}^oR_c^T \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (7)$$

한편, 카메라의 선속도와 각속도는 다음과 같이 관절의 속도벡터  $\dot{q}$  으로 표시된다[8].

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} J_A(q) \dot{q} \quad (8)$$

여기서  $T(q)$  는 변환 행렬이고  $J_A(q)$  는 해석적 자코비안 (analytic Jacobian)이다.

(8)을 (6)에 대입하면 영상 특징점의 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\xi} = J(q, \xi, Z) \dot{q} \quad (9)$$

여기서  $J(q, \xi, Z)$  는 자코비안으로 다음과 같다.

$$J(q, \xi, Z) = J_{img}(q, \xi, Z) \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} J_A(q) \quad (10)$$

### III. 영상기반 강인제어

영상기반 로봇 제어의 목표는 목표물을 영상 특징점이 영상평면상의 원하는 특징점에 도달하도록 로봇 말단부를 이동시키는 제어를 설계하는 것이다. 이번 장에서는 부하변동으로 인한 로봇 매니퓰레이터의 동역학 항의 파라미터 불확실성과 카메라를 이용한 목표물 인식시 부정확한 거리측정으로 인한 영상 자코비안의 불확실성을 가지는 경우 이를 보상하는 영상기반 강인제어를 설계하고 안정성을 입증하기로 한다. 영상기반 로봇 제어 시스템의 블록도는 아래 그림 1과 같다.

원하는 영상 특징점 벡터  $\xi_d$  를 상수라 가정하고 영상 특징점 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{\xi} = \xi_d - \xi \quad (11)$$

(11)을 시간에 대해 미분하고 (9)를 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

자코비안의 불확실성을 다음과 같이 알고 있는 공칭항 (nominal value)과 섭동항(perturbation term)으로 나타낼 수 있다고 한다.

$$J(q, \xi, Z) = J_0(q, \xi, Z) - \tilde{J}(q, \xi, Z) \quad (13)$$

여기서  $J_0(q, \xi, Z)$  는 자코비안의 공칭항이고  $\tilde{J}(q, \xi, Z)$  는

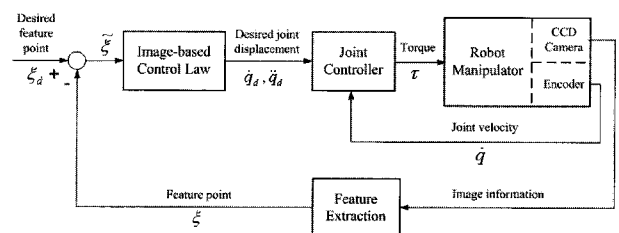


그림 1. 영상기반 로봇 제어 시스템의 블록도.  
Fig. 1. The block diagram of image-based robot control system.

거리 측정오차에 따른 섭동항이다.

관절의 원하는 속도 벡터를  $\dot{q}_d$  이라 하고 속도 오차 벡터를  $\dot{\tilde{q}} = \dot{q}_d - \dot{q}$  으로 정의하면 (12)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\tilde{\xi}} = -J\dot{\tilde{q}} = -J_0\dot{q}_d + \tilde{J}\dot{q}_d + J_0\dot{\tilde{q}} - \tilde{J}\dot{\tilde{q}} \quad (14)$$

제어입력 설계에 필요한 관절의 원하는 속도벡터  $\dot{q}_d$  을 다음과 같이 선정한다.

$$\dot{q}_d = J_0^+(q, \xi, Z)K_0\tilde{\xi} \quad (15)$$

여기서  $K_0$  는 양한의 설계 이득이고  $J_0^+(q, \xi, Z) = J_0^T(q, \xi, Z)[J_0(q, \xi, Z)J_0^T(q, \xi, Z)]^{-1}$  는 자코비안의 의사역행렬 (pseudo inverse matrix)이다.

(15)를 (14)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{\xi}} = -K_0\tilde{\xi} + \tilde{J}J_0^+K_0\tilde{\xi} + J_0\dot{\tilde{q}} - \tilde{J}\dot{\tilde{q}} \quad (16)$$

강인제어를 설계하기 위해서는 불확실성의 범위가 한정되어야 하므로 로봇 매니퓰레이터가 다루는 부하는 미지이지만 범위는 제한되어 있다고 가정하면 파라미터 벡터  $\theta$  의 불확실성도 다음과 같이 한정된 범위 내에 있게 된다.

$$\|\tilde{\theta}\| = \|\theta_0 - \theta\| \leq \rho, \quad \rho > 0 \quad (17)$$

여기서  $\theta_0$  는  $\theta$  의 공칭값이고  $\rho$  는 주어진 값이다.

또한 (13)과 같이 자코비안  $J(q, \xi, Z)$  의 섭동항도 측정방법에 따라 다르지만 다음과 같이 한정된 범위 내에 있다고 가정할 수 있다.

$$\|\tilde{J}(q, \xi, Z)\| \leq \eta \quad (18)$$

여기서  $\eta > 0$  는 주어지는 값이다.

영상 자코비안과 로봇 동역학 항의 불확실성을 보상하는 영상기반 강인제어를 다음과 같이 제안한다.

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)(\theta_0 + u) + K_v\dot{\tilde{q}} + J_0^T(q, \xi, Z)\tilde{\xi} + w \quad (19)$$

여기서  $K_v$  는 대칭의 양한인 설계이득이며,  $u$  와  $w$  는 로봇 동역학 항과 영상 자코비안 항의 불확실성을 보상하기 위한 보조 제어입력이고,  $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\theta_0$  는  $M(q)$ ,  $C(q, \dot{q})$ ,  $G(q)$  의 공칭항으로 다음과 같이 표현된다.

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\theta_0 = M_0(q)\ddot{q}_d + C_0(q, \dot{q})\dot{q}_d + G_0(q) \quad (20)$$

(19)를 (1)의 로봇 동역학 방정식에 대입하여 정리하고 (16)과 결합하면 다음과 같은 전체 시스템 방정식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{\xi}} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_0\tilde{\xi} + \tilde{J}J_0^+K_0\tilde{\xi} + J_0\dot{\tilde{q}} - \tilde{J}\dot{\tilde{q}} \\ M^{-1}(q)[-C(q, \dot{q})\dot{\tilde{q}} + Y(\tilde{\theta} - u) - K_v\dot{\tilde{q}} - J_0^T\tilde{\xi} - w] \end{bmatrix} \quad (21)$$

불확실성을 보상하기 위한 제어 입력  $u$  와  $w$  는 다음과 같이 정의한다.

$$u = \begin{cases} \rho \frac{Y^T \dot{\tilde{q}}}{\|Y^T \dot{\tilde{q}}\|}, & \|Y^T \dot{\tilde{q}}\| > \varepsilon \\ \rho \frac{Y^T \dot{\tilde{q}}}{\varepsilon}, & \|Y^T \dot{\tilde{q}}\| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (22)$$

$$w = \begin{cases} \sigma \frac{\|\tilde{\xi}\|^2}{\|\dot{\tilde{q}}\|^2} \dot{\tilde{q}} + \eta \frac{\|\tilde{\xi}\|}{\|\dot{\tilde{q}}\|} \dot{\tilde{q}}, & \|\dot{\tilde{q}}\| > \mu \\ \eta \frac{\|\tilde{\xi}\|^2}{\mu} \dot{\tilde{q}}, & \|\dot{\tilde{q}}\| \leq \mu \end{cases}$$

여기서  $\varepsilon > 0$  와  $\mu > 0$  는 설계 파라미터이고  $\sigma \geq \eta \|J_0^+\| \|K_0\|$  이다.

설계된 강인제어 시스템의 안정성을 입증하기 위하여 Lyapunov 후보함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} \dot{\tilde{q}}^T M(q) \dot{\tilde{q}} + \frac{1}{2} \tilde{\xi}^T \tilde{\xi} \quad (23)$$

(23)을 미분하고 (21)을 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\chi^T K \chi + \dot{\tilde{q}}^T Y(\tilde{\theta} - u) + \tilde{\xi}^T \tilde{J} J_0^+ K_0 \tilde{\xi} - \dot{\tilde{q}}^T \tilde{J}^T \tilde{\xi} - \dot{\tilde{q}}^T w \\ &\leq -\lambda_{\min}(K) \|\chi\|^2 + \rho \|Y^T \dot{\tilde{q}}\| - \dot{\tilde{q}}^T Y u + \sigma \|\tilde{\xi}\|^2 \\ &\quad + \eta \|\dot{\tilde{q}}\| \|\tilde{\xi}\| - \dot{\tilde{q}}^T w \end{aligned} \quad (24)$$

여기서  $\chi = [\tilde{\xi}^T \quad \dot{\tilde{q}}^T]^T$ ,  $K = \begin{bmatrix} K_0 & 0 \\ 0 & K_v \end{bmatrix}$  이고  $\lambda_{\min}(K)$  는  $K$  의 고유치의 최대값이다.

(24)에 (22)를 대입하면  $\|Y^T \dot{\tilde{q}}\| > \varepsilon$  이고  $\|\dot{\tilde{q}}\| > \mu$  인 경우에  $\dot{V}$  은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{\min}(K) \|\chi\|^2 + \rho \|Y^T \dot{\tilde{q}}\| - \rho (Y^T \dot{\tilde{q}})^T \frac{Y^T \dot{\tilde{q}}}{\|Y^T \dot{\tilde{q}}\|} + \sigma \|\tilde{\xi}\|^2 \\ &\quad + \eta \|\dot{\tilde{q}}\| \|\tilde{\xi}\| - \dot{\tilde{q}}^T \left( \sigma \frac{\|\tilde{\xi}\|^2}{\|\dot{\tilde{q}}\|^2} \dot{\tilde{q}} + \eta \frac{\|\tilde{\xi}\|}{\|\dot{\tilde{q}}\|} \dot{\tilde{q}} \right) \\ &\leq -\lambda_{\min}(K) \|\chi\|^2 \end{aligned} \quad (25)$$

다음으로  $\|Y^T \dot{\tilde{q}}\| \leq \varepsilon$  이고  $\|\dot{\tilde{q}}\| > \mu$  인 경우 (24)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{\min}(K) \|\chi\|^2 + \rho \|Y^T \dot{\tilde{q}}\| - \rho (Y^T \dot{\tilde{q}})^T \frac{Y^T \dot{\tilde{q}}}{\varepsilon} \\ &\leq -\lambda_{\min}(K) \|\chi\|^2 + \frac{\rho \varepsilon}{4} \end{aligned} \quad (26)$$

마찬가지로  $\|Y^T \dot{\tilde{q}}\| > \varepsilon$  이고  $\|\dot{\tilde{q}}\| \leq \mu$  인 경우에는 (24)는 다음 부등식을 만족한다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{\min}(K) \|\chi\|^2 + \sigma \|\tilde{\xi}\|^2 + \eta \|\dot{\tilde{q}}\| \|\tilde{\xi}\| - \frac{\eta}{\mu} \dot{\tilde{q}}^T \|\tilde{\xi}\|^2 \dot{\tilde{q}} \\ &\leq -\lambda_{\min}(K) \|\chi\|^2 + \sigma \mu^2 + \frac{\eta \mu}{4} \end{aligned} \quad (27)$$

마지막으로  $\|Y^T \dot{q}\| \leq \varepsilon$  이고  $\|\dot{q}\| \leq \mu$  인 경우 (24)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{\min}(K)\|\chi\|^2 + \rho\|Y^T \dot{q}\| - \rho(Y^T \dot{q})^T \frac{Y^T \dot{q}}{\varepsilon} + \sigma\|\xi\|^2 \\ &\quad + \eta\|\dot{q}\|\|\xi\| - \frac{\eta}{\mu}\dot{q}^T \|\xi\|^2 \dot{q} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\leq -\lambda_{\min}(K)\|\chi\|^2 + \frac{\rho\varepsilon}{4} + \sigma\mu^2 + \frac{\eta\mu}{4}$$

(28)에서  $\|\chi\| \geq \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\rho\varepsilon + 4\sigma\mu^2 + \eta\mu}{\lambda_{\min}(K)}}$  이면  $\dot{V} \leq 0$  을 만족한다.

(25)-(28)의 결과로부터 상태벡터  $\chi$  는 궁극적으로 한계 범위 내로 수렴됨이 입증되며 다음 정리로 요약할 수 있다.

정리: 영상 특징점의 속도방정식이 (9)로 표현되고 로봇동역학 방정식이 (1)과 같이 주어지면, (19)와 (22)의 강인제어기에 의해 (21)의 전체 시스템은 궁극적으로 한계 범위 내에서 안정(uniformly ultimately boundedness)된다.

**IV. 모의실험 및 실험**

제안된 제어기의 성능을 그림 2와 같은 5-링크 2자유도의 로봇 매니플레이터를 대상으로 한 모의실험과 실험을 통해 입증하였다.

모의실험과 실험에서 링크 4의 무게에 약 4.5 kg 의 부하를 부착하였고 다른 파라미터는 부하의 영향을 받지 않는다고 가정한다. 목표물은 카메라와  $Z=1[m]$  거리에 위치하고 매니플레이터는 목표물과 평행하게 움직이며 거리 측정에 대

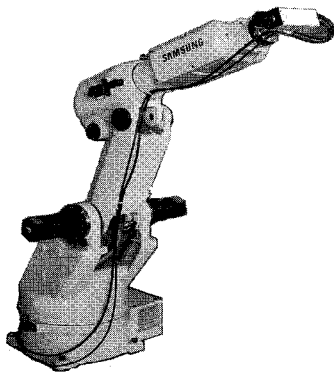


그림 2. 5-링크 2자유도 로봇 매니플레이터.  
Fig. 2. 5-link robot manipulator with two degree of freedom.

표 1. 설계 파라미터.  
Table 1. Design parameters.

모의실험	실험
$\alpha = 6.941 \times 10^{-6} [pixel/m]$ , $\beta = 9.425 \times 10^{-6} [pixel/m]$ , $f = 0.016 [m]$ , $q_1 = \pi/2 [rad]$ , $q_2 = \pi [rad]$ , $\xi = [100 \ 100]^T$ , $\xi_d = [0 \ 0]^T$ , $\rho = 1.0349$ , $\eta = 100$ , $\varepsilon = 0.1$ , $\mu = 0.1$	
$\sigma = 13.65$ , $K_0 = 100I$ , $K_v = 1500I$	$\sigma = 6.8$ , $K_0 = 3I$ , $K_v = 30I$

한 불확실성은 공칭값의 10%라 가정하였다.

실험을 위한 제어 시스템은 로봇 매니플레이터, MMC (Multi Motion Control) 보드, 카메라와 영상처리 보드, 주 컴퓨터로 구성된다. 로봇 제어에 사용되는 MMC 보드와 로봇 말단부에 장착된 카메라에서 획득한 영상정보를 처리하기 위한 영상처리 보드를 부착한 주 컴퓨터가 제어 알고리즘을 계산한다. 제어 시스템의 설계 파라미터와 이득은 표 1과 같이 정하였다.

그림 3~7은 모의실험 결과를 보여준다. 그림 3은 영상평면에서 x축의 특징점 오차를 나타내고, 그림 4는 y축의 특징점

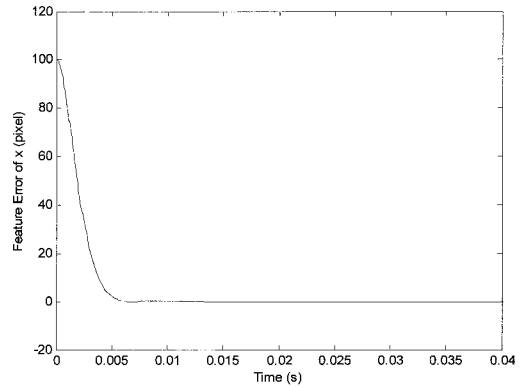


그림 3. 모의실험 결과: x축의 영상 특징점 오차.  
Fig. 3. Simulation result: Image feature errors of x-axis.

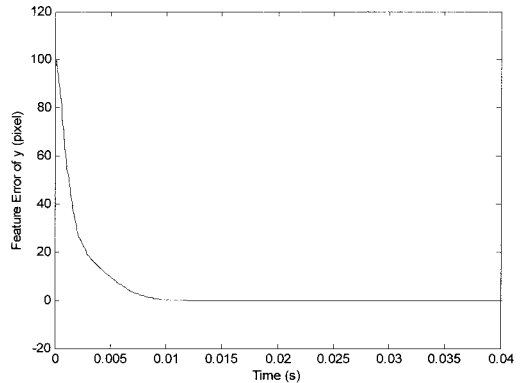


그림 4. 모의실험 결과: y축의 영상 특징점 오차.  
Fig. 4. Simulation result: Image feature errors of y-axis.

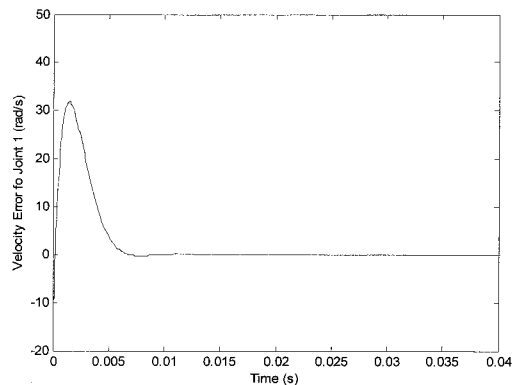


그림 5. 모의실험 결과: 관절 1의 속도 오차.  
Fig. 5. Simulation result: Velocity errors of joint 1.

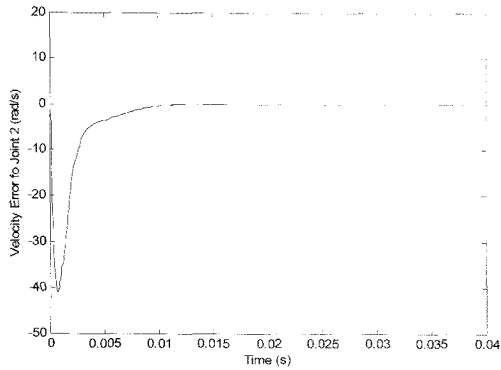


그림 6. 모의실험 결과: 관절 2의 속도 오차.

Fig. 6. Simulation result: Velocity errors of joint 2.

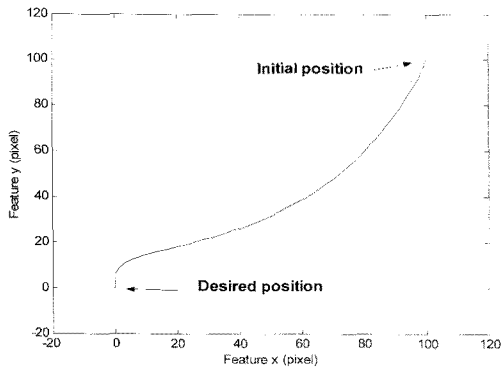


그림 7. 모의실험 결과: 시간에 따른 특징점 오차.

Fig. 7. Simulation result: Time evolution of the feature error.

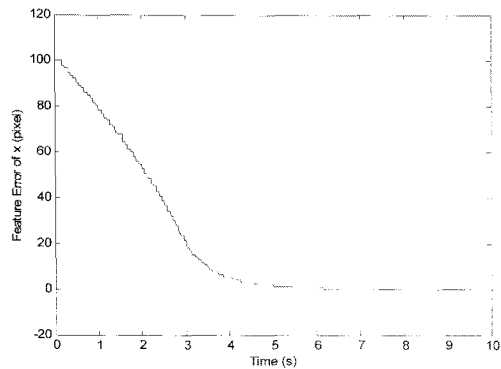


그림 8. 실험 결과: x축의 영상 특징점 오차.

Fig. 8. Experimental result: Image feature errors of x-axis.

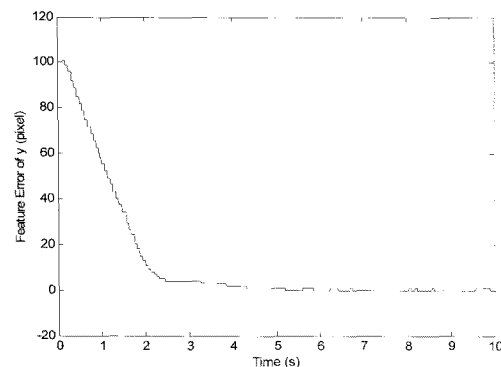


그림 9. 실험 결과: y축의 영상 특징점 오차.

Fig. 9. Experimental result: Image feature errors of y-axis.

오차를 나타낸 것으로 x, y축 모두 0.01초 내에 원하는 특징점 좌표인  $[0, 0]$  (pixel)으로 수렴하였다. 그림 5와 6은 각각 매니플레이터 관절 1과 관절 2의 속도오차를 보여준다. 관절 1과 관절 2 모두 원하는 속도벡터를 정상적으로 추종하여 속도 오차가 0.01초 내에 0(zero)으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 시간에 따른 영상 특징점 오차의 x-y 성분을 나타낸 것으로 제안된 제어가 효율적으로 목표물을 추종한 것을 확인할 수 있다.

그림 8-9는 영상평면에서 특징점 오차를 보여주는 실험 결과로 x, y축의 특징점 오차 모두 6초 내에 원하는 특징점 좌표로 수렴하였다. 그림 9에서 5초 이후에 보여지는 특징점 오차의 변동은 영상처리로 인해 발생하는 것으로 로봇의 실제 움직임과는 관련이 없다. 그림 3-8의 모의실험 결과는 제안된 제어가 효과적인 제어 성능을 갖추었음을 입증한다.

## V. 결론

본 논문에서는 로봇 매니플레이터의 영상 기반 강인제어기를 제안하였다. 제어기는 영상 자코비안 불확실성과 로봇 동역학 불확실성을 보상하도록 제안하였으며 제어 성능을 향상시키기 위해서 영상 자코비안 불확실성과 로봇 동역학 불확실성을 보상하는 비선형 제어 입력이 별도로 포함되도록 강인제어기를 설계하였다. 전체 시스템의 최종 균일 안정은 Lyapunov 안정도 판별법을 이용하여 증명하였다. 5-링크 2 자유도 로봇 매니플레이터를 대상으로 한 모의실험과 실험 결과는 제안된 제어기법이 로봇 동특성 불확실성과 영상 자코비안 불확실성을 갖는 로봇 매니플레이터 제어에 효과적임을 입증한다.

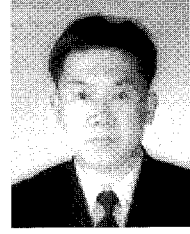
## 참고문헌

- [1] S. Hutchinson, 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] R. Kelly, "Robust asymptotically stable visual servoing of planar robots," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 759-766, 1996.
- [3] E. Zergeroglu, D. M. Dawson, M. S. de Queiroz, and A. Behal, "Vision-based nonlinear tracking controllers with uncertain robot-camera parameters," *IEEE/ASME Trans. On Mechatronics*, vol. 6, no. 3, pp. 322-337, 2001.
- [4] E. Zergeroglu, D. M. 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.
- [5] R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisi, B. Kuchen, and F. Reyes, "Stable visual servoing of camera-in-hand robotic systems," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 5, no. 1, pp. 39-43, 2000.
- [6] G. Liu and A. A. Goldenberg, "Robust control of robot manipulators based on dynamics decomposition," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 13, no. 5, pp. 783-789, 1997.
- [7] K. Hashimoto, T. Kimoto, T. Ebine and H. Kimura, "Manipulator control with image-based visual servo," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Sacramento, CA, pp. 2267-2272, 1991.
- [8] L. Sciavicco and B. Siciliano, *Modeling and Control of Robot Manipulator*, McGraw Hill New York, 1996.



### 김진수

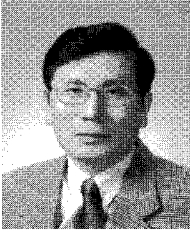
2004년 한국항공대학교 항공전자공학과(공학사). 2006년 한국항공대학교 항공전자공학과(공학석사). 2006년~현재 한국항공대학교 항공전자공학과 박사 과정 재학중. 관심분야는 로봇비전, 강인제어.



### 모은종

1998년 한국항공대학교 항공전자공학과(공학사). 2003년 한국항공대학교 항공전자공학과(공학석사). 2003년~현재 한국항공대학교 항공전자공학과 박사 과정 재학중. 1999년~현재 프랫&위트니 상용기 엔진 그룹(라지 커머셜 엔진).

관심분야는 항공기 엔진제어, fault 제어.



### 이강웅

1980년 한국항공대학교 항공전자공학과(공학사). 1982년 서울대학교 전자공학과(공학석사). 1983년~1984년 삼성전자 컴퓨터개발부. 1989년 서울대학교 전자공학과(공학박사). 1994년~1995년 미시간주립대학교 방문교수. 1989년~현재

한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수. 관심분야는 로봇제어, 비선형제어.