

비전 시스템을 이용한 로봇 머니플레이터의 동력학 추적 제어

Dynamic Tracking Control of Robot Manipulators Using Vision System

한 용 기, 국 태 용

성균관대학교 전자공학과(Tel:+82-331-290-7202; Fax:+82-331-290-7191; E-mail:tykuc@yurim.skku.ac.kr)

Abstracts Using the vision system, robotic tasks in unstructured environments can be accomplished, which reduces greatly the cost and setup time for the robotic system to fit to the well-defined and structured working environments. This paper proposes a dynamic control scheme for robot manipulator with eye-in-hand camera configuration. To perform the tasks defined in the image plane, the camera motion Jacobian (image Jacobian) matrix is used to transform the camera motion to the objection position change. In addition, the dynamic learning controller is designed to improve the tracking performance of robotic system. The proposed control scheme is implemented for tasks of tracking moving objects and shown to outperform the conventional visual servo system in convergence and robustness to parameter uncertainty, disturbances, low sampling rate, etc.

Keywords Vision Systems, Image Jacobian, Dynamic Controller, Robustness

1. 서론

로봇 머니플레이터를 이용한 작업을 수행하기 위해서는 작업 대상물과 로봇의 손(hand) 또는 말단장치(end-effector)사이의 상대적인 위치와 방향이 요구되는 오차 이내에 고정되어야 한다. 지금까지의 거의 모든 로봇 머니플레이터를 이용한 작업들은 이러한 상대적인 위치와 방향 관계를 맞추기 위하여 전체 작업 공간의 정확한 calibration을 필요로 한다. 비전 피드백은 넓은 작업 공간에 대한 정보를 얻을 수 있으므로 불확실한 작업 환경에서의 작업을 가능하게 해준다. 따라서 로봇 머니플레이터를 이용하는 시스템은 비전 시스템을 도입함으로써 설치 시간과 비용을 많이 줄일 수 있다.

비전 시스템을 이용한 제어 구조는 원하는 궤적이 주어지는 좌표계에 따라 영상 평면상에서 주어지는 "Image-based" 구조와 작업 공간 좌표계에서 주어지는 "Position-based" 구조로 나눌 수 있다. 또한 비전 시스템과 동력학 제어부의 연결 구조에 따라 로봇 머니플레이터의 동력학 제어부에 별도의 피드백 루프 없이 영상 피드백 정보만을 사용하는 구조와 동력학 제어부에 별도의 피드백 루프를 가지는 구조가 있다[5].

동력학 제어부의 관절 피드백 정보를 사용하지 않고 비전 피드백 정보만을 사용하는 구조의 경우 비전 시스템에서 얻어진 상태 정보가 바로 동력학 제어부에 피드백 되어 사용되므로 빠른 샘플링 시간을 요구하지만 현재의 비전 샘플링 시간이 최소한 33ms 보다는 크므로 물체의 운동이 빠른 경우 사용이 어려우며, 또한 로봇 머니플레이터의 비선형 동력학 특성을 고려하지 못하고 선형화 모델을 사용하고 있다[1,7]. 동력학 제어부에 관절 피드백 정보를 사용하는 경우 비전 시스템은 동력학 제어부의 기준 입력 또는 기준 궤적을 만들고 동력학 제어부는 시스템의 안정성을 보장하며 비전 시스템으로부터 들어온 입력을 추종한다. 시각 서보 시스템은 피드백 루프에서 시각 센서를 이용하며, 또한 로봇의 관절 서보 루프에도 시각 피드백 루프가 상호 작용을 하므로 외부 시각 서보 루프의 성능은 내부 관절 서보 루프의 나쁜 성능으로 인해 저하될 수 있다. 그러나 대부분의 이전의 연구 결과들은 이상적인 로봇 동력학 제어부의 성능을 가정하고 있다[2,3,4].

본 논문에서는 Eye-in-Hand 카메라 구성을 갖는 로봇 머니플레이터에 대하여 머니플레이터의 말단 장치의 운동과 영상 평면

상에서의 물체의 위치 변화 사이의 관계를 이용하여 영상 평면상에서 정의된 작업의 수행을 가능하게 하며 강인 학습 동력학 제어부를 구성하여 시스템의 성능을 향상시키고자 한다. 제안된 제어기의 성능을 검증하기 위하여 움직이는 물체에 대한 추적 작업을 수행하고 파라미터의 불확실성, 외란, 샘플링 주기에 대한 강인성 등을 기존의 제어 구조와 비교한다.

2. 카메라 모델

카메라의 모델은 렌즈를 하나의 작은 공동(Hole)으로 간주한 이상적인 핀홀(Pinhole) 카메라로 했으며 공간상의 한 점을 영상 평면으로 투영하는 방법은 원근 투영(Perspective Projection)법을 이용했다. 원근 투영법의 경우 카메라 좌표계의 프레임의 초점 길이가 f 인 렌즈의 초점 위치에 놓으면, 카메라 좌표계의 좌표 (X_C, Y_C, Z_C) 를 가지는 S_C 에 위치한 대상 물체 위의 특징점 (Feature point)의 카메라 영상 평면상의 한 점 (x_i, y_i) 으로의 투영은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{fX_C}{s_x Z_C} + x_p \\ y_i &= \frac{fY_C}{s_y Z_C} + y_p \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 (x_i, y_i) 는 특징점의 영상 평면상의 좌표, (s_x, s_y) 는 CCD 배열상의 픽셀들의 수직 수평 방향 차원들(Dimensions)이며, (x_p, y_p) 는 광축(Optical axis)이 CCD 상을 관통하는 점 (Piercing point)이다.

카메라 프레임 특징점 속도의 영상 평면 optic flow, 또는 센서 공간 속도로서의 전환(Mapping)은 간단하게 (1)식을 미분하여 다음과 같은 식으로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \frac{f\dot{X}_C}{s_x Z_C} - \frac{fX_C \dot{Z}_C}{s_x Z_C^2} = \frac{f\dot{X}_C}{s_x Z_C} - \frac{x_i \dot{Z}_C}{Z_C} \\ \dot{y}_i &= \frac{f\dot{Y}_C}{s_y Z_C} - \frac{fY_C \dot{Z}_C}{s_y Z_C^2} = \frac{f\dot{Y}_C}{s_y Z_C} - \frac{y_i \dot{Z}_C}{Z_C} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $x_s = x_i - x_p$ 이고 $y_s = y_i - y_p$ 이다.

한편 V_C 와 Ω_C 를 각각 카메라 좌표계에 대한 카메라의 선속도(Translational velocity)와 각속도(Angular velocity)라 하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} [\dot{X}_C \dot{Y}_C \dot{Z}_C]^T &= \frac{d}{dt} S_C \\ &= -V_C - \Omega_C \times S_C \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $V_C = [\dot{x}_C \dot{y}_C \dot{z}_C]^T$ 와 $\Omega_C = [\omega_{x_c} \omega_{y_c} \omega_{z_c}]^T$ 이다.

식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 카메라 프레임의 속도와 영상 평면상의 특징점 속도의 관계를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \end{bmatrix} = J_{image} \begin{bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{y}_C \\ \dot{z}_C \\ \omega_{x_c} \\ \omega_{y_c} \\ \omega_{z_c} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $x_s = \frac{fX_C}{s_x Z_C}$ 와 $y_s = \frac{fY_C}{s_y Z_C}$ 이다. 위 식의 2×6 인 전환 행렬

$$J_{image} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{s_x Z_C} & 0 & \frac{x_s}{Z_C} & \frac{s_y}{f} x_s y_s & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{f}{s_y Z_C} & \frac{y_s}{Z_C} & -\left[\frac{f}{s_x} + \frac{s_y}{f} y_s^2\right] & -\left[\frac{f}{s_x} + \frac{s_x}{f} x_s^2\right] & \frac{s_y}{s_x} y_s \\ & & & -\frac{s_y}{f} x_s y_s & -\frac{s_x}{s_y} x_s & 0 \end{bmatrix}$$

를 영상 자코비안(Image Jacobian)이라 한다.

일반적으로 하나의 물체에 대하여 여러 개의 특징점이 추종된다. N 개의 특징점에 대하여 영상 자코비안을 구하기 위해 식 (4)을 N 개에 대하여 적용하면 다음의 관계를 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{s1} \\ \dot{y}_{s1} \\ \vdots \\ \dot{x}_{sN} \\ \dot{y}_{sN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{y}_C \\ \dot{z}_C \\ \omega_{x_c} \\ \omega_{y_c} \\ \omega_{z_c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, J_i 는 각각의 특징점에 대한 영상 자코비안 행렬이다.

3. 동역학 제어기

실제 환경에서 로봇이 작업을 수행함에 따라 로봇의 파라미터(질량, 무게중심점, 관성항 등)에는 변동이 생기게 된다. 그러므로, 변동에 따른 제어입력의 보정이 필요하며, 마찰력에 대한 보상과 외란에 대한 강인한 제어기의 설계가 필요하다. 이 절에서는 이러한 조건하에서 성능이 보장되는 동역학 제어기를 설계한다.

일반적으로 일반화된 관절 좌표계에서의 n -DOF(Degrees of freedom)의 강제 로봇 매니퓰레이터의 동역학 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q}) + F(q, \dot{q}) + d = \tau \quad (6)$$

여기서 $q \in R^n$ 는 로봇 관절의 일반화 좌표 벡터이다. 그리고 $D(q) \in R^{n \times n}$ 는 양의 한정(positive-definite)인 관성 행렬이며, $B(q, \dot{q}) \in R^n$ 는 구심력 및 코리올리(coriolis)력을 나타내는 벡터이다. 또한 $F(q, \dot{q}) \in R^n$, $d(t) \in R^n$, $\tau \in R^n$ 는 각각 중력과 마

찰력, 크기가 유계된 미지의 확정 외란, 로봇에 주어지는 입력 토크 벡터를 표시한다. 제어기를 설계하고 안정도를 증명하기 위하여 식(6)의 로봇 동역학 방정식은 다음과 같은 성질을 만족한다고 가정한다.

성질 1) 관성행렬 $D(q)$ 는 양의 한정성과 대칭성을 가지며 모든 q 에 대해 유계되어 있다.

성질 2) 행렬 $\dot{D}(q) - 2B(q, \dot{q})$ 는 비대칭(skew-symmetric) 성질을 가진다.

성질 3) $D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + F(q, \dot{q}) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta$ 의 관계로 표현할 수 있다. 여기서 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in R^{n \times l}$, $\theta \in R^l$ 는 각각 회귀 행렬과 미지의 파라미터 벡터를 나타낸다. 즉, 동역학 식은 미지의 파라미터에 대하여 선형이다.

성질 4) 미지의 확정외란 $d(t)$ 는 유계되어 있으며 $d(t) = d_1 + d_2(t)$ 로 기술할 수 있고, 부동식 $\|d_2(t)\| \leq d_m$ 을 만족한다. 여기서 d_m 과 d_1 은 상수이다.

이러한 관계 하에서 본 논문에서 다루고자 하는 동역학 제어기 설계문제는 로봇 시스템의 개적이 원하는 제적 q_d 를 추적하는 제어 입력을 구하는 것이다.

먼저 동역학 제어기의 출력은 다음과 같이 구성한다.

$$\tau = \tau_{fb} + \tau_{ce} + \text{Pr}[h] + \text{Pr}[\gamma] \quad (7)$$

여기서 τ_{fb} , τ_{ce} , h , γ 는 각각 케환 오차 입력, 토크계산 오차입력(computed-torque error input), 학습입력, 강인 제어입력을 나타내며, 시스템을 안정화시키는 오차입력 τ_{fb} 와 τ_{ce} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{fb} &= \Gamma(\dot{e} + ae) \\ \tau_{ce} &= \widehat{D}_e \dot{q} + \widehat{B}_e \dot{q} + \widehat{F}_e + \alpha(\widehat{D}e + \widehat{B}e) \\ &= Y_e \hat{\theta} \end{aligned}$$

여기서 $e = q_d - q$, 케환 이득 Γ 는 양의 대칭행렬이고, α 는 양수이다. ($\hat{\cdot}$) 는 추정된 파라미터로 구성된 추정 시스템이며 다음과 같이 정의한다.

$$\widehat{D}_e(q) \equiv \widehat{D}(q) - \widehat{D}(q_d)$$

$$\widehat{B}_e(q) \equiv \widehat{B}(q) - \widehat{B}(q_d)$$

$$\widehat{F}_e(q) \equiv \widehat{F}(q) - \widehat{F}(q_d)$$

그리고 학습 신호의 과도한 변화를 방지하기 위하여 사용되는 Projection 연산자($\text{Pr}[\cdot]$)의 정의는 다음과 같다.

$$\text{Pr}[x(t)] = \begin{cases} \bar{X}, & \text{if } x(t) > \bar{X} \\ x(t), & \text{if } \underline{X} \leq x(t) \leq \bar{X} \\ \underline{X}, & \text{if } x(t) < \underline{X} \end{cases}$$

식 (7)을 식(6)에 대입하여 정리하면 다음의 오차 시스템을 구할 수 있다.

$$D(q)\dot{z} + B(q, \dot{q})z + \Gamma z = Y_e \hat{\theta} + \hat{h} + d_2 - \gamma \quad (8)$$

여기서 $z = \dot{e} + ae$, $\hat{\theta} = \theta - \hat{\theta}$, $\hat{h} = h_d - h$ 이고 강인 제어입력은 $\gamma = \text{Pr}[\widehat{d}_m(t)] \text{sgn}(z)$ 와 같이 정의한다. h_d 는 명령궤적에 대한 역동역학 제어입력과 유계된 외란으로 이루어져 있다. 즉, $h_d = Y_d \theta + d_1$. 그리고 $\text{sgn}(z)$ 의 정의는 다음과 같다.

$$\text{sgn}(z) = \begin{cases} \frac{z}{|z|}, & |z| \neq 0 \\ 0, & |z| = 0 \end{cases}$$

학습 입력과 추종 파라미터 그리고 외란의 경계치에 대한 적용 법칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h(t) &= \Pr[h(t-\delta)] + \sigma A_1^{-1} z(t-\delta) \\ \widehat{\theta}(t) &= \Pr[\widehat{\theta}(t-\delta)] + \sigma A_2^{-1} Y_e^T z(t-\delta) \\ \widehat{d}_m(t) &= \Pr[\widehat{d}_m(t-\delta)] + \sigma A_3^{-1} z(t-\delta) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 A_1, A_2 는 양의 대각 행렬인 학습이득이고, A_3, σ 는 양수인 학습 이득, δ 는 갱신 시간 간격이다.

위의 학습법칙에 있어서 갱신 시간 간격(δ)의 선택은 목표 제어 입력 값이 다음의 조건을 만족하도록 선택한다.

$$h_d(t) \approx h_d(t-\delta) \quad (10)$$

정리 1 : 오차시스템 (8)은 제어 입력 (7)과 학습입력, 파라미터, 시변 외란의 경계치를 위한 학습 규칙 (9)로 구성된 제어기에 의하여 점근적으로 수렴한다.

증명 : Lyapunov 함수를 다음과 같이 설정하자.

$$V(t) = \frac{1}{2\sigma} \int_{t-\delta}^t H dv + \frac{1}{2} z^T(t-\delta) D z(t-\delta)$$

여기서 $H = \widehat{h}^T A_1 \widehat{h} + \widehat{\theta}^T A_2 \widehat{\theta} + \widehat{d}_m^T A_3 \widehat{d}_m$ 이고 $\widehat{h} = h_d - h$, $\widehat{\theta} = \theta - \widehat{\theta}$, $\widehat{d}_m = d_m - \widehat{d}_m$ 이다.

오차시스템 (8)에 대한 Lyapunov 함수의 시간 미분은 다음과 같다.

$$\dot{V}(t) = \Delta H - |z(t-\delta)|_F^2 + z^T(Y_e \widehat{\theta} + \widehat{h} + d_2 - \gamma)$$

여기서 $|M|_A^2 = M^T A M$, $\Delta H = \frac{1}{2\sigma} (H(t) - H(t-\delta))$ 을 나타낸다.

이제 부등식 $|\Pr(M)|_A^2 \leq |M|_A^2$ 과 식 (10), 학습 규칙 (9)를 대입하고 케환이득을 $\Gamma = \sigma(A_1^{-1} + Y_e A_2^{-1} Y_e^T + A_3^{-1})$ 로 두고 정리하면 다음 식과 같다.

$$\dot{V}(t) \leq -\frac{\sigma}{2} z^T (A_1^{-1} + Y_e A_2^{-1} Y_e^T + A_3^{-1}) z + |z|^T (d_2 \text{sgn}(z) - d_m)$$

여기서 $|d_2| \leq d_m$ 이므로 $d_2 \text{sgn}(z) - d_m \leq 0$ 이다. 따라서

$$\dot{V}(t) \leq -\frac{\sigma}{2} z^T (A_1^{-1} + Y_e A_2^{-1} Y_e^T + A_3^{-1}) z \leq 0$$

따라서 z 는 유계되어 있고, Rayleigh-Ritz정리[6]를 이용하여 위의 식으로부터 다음 식을 유도할 수 있다.

$$V(0) - V(\infty) \geq \frac{\sigma}{2} \lambda_{\min}[A] \int_0^{\infty} |z|^2 dt$$

따라서 $z \in L_2$ 이다. 또한 오차 방정식의 우변은 학습규칙에 의해 유계되어 있다. 그러므로 $\dot{z} \in L_{\infty}$ 임을 알 수 있다. 따라서 Barbalat's Lemma[6]에 의해 점근적으로 수렴한다. 즉, $\lim_{t \rightarrow \infty} z = 0$

이다. 여기서 $z = \dot{e} + a e$ 는 z 를 입력으로 하는 안정한 1차 미분 방정식으로 볼 수 있으므로 입력 z 가 0으로 수렴함에 따라 오차 시스템도 수렴하게 된다.

4. 전체 제어기 구성

제어기의 전체적인 구성은 먼저 비전 시스템이 영상으로부터 얻은 정보를 일반적인 상태 피드백 구조의 피드백 루프에 사용하여 동력학 제어부에 기준 입력이 되는 속도 명령을 만들고, 동력학 제어부는 이 때의 입력에 대하여 자체의 피드백 루프를 이용하여 안정성을 보장하며 추종한다. 비전 시스템은 영상으로부터

얻은 특징점의 위치와 영상 자코비안을 이용하여 특징점이 영상 평면상의 원하는 위치에 오도록 상태 피드백을 이용한 속도 명령을 만들어 동력학 제어부의 속도 명령으로 사용한다.

비전 피드백 시스템의 상태와 제어 입력을 각각 $\xi = [x_{s1}, y_{s1}, x_{s2}, y_{s2}, \dots, x_{sn}, y_{sn}]^T$ 와 $u = [\dot{x}_c, \dot{y}_c, \dot{z}_c, \omega_{x_c}, \omega_{y_c}, \omega_{z_c}]^T$ 로 정의하면 식 (4)의 상태 공간 표현을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{\xi}(t) = J_{image}(t) u(t) \quad (11)$$

비전 샘플링 시간을 ΔT 라 놓으면 위 식은 다음과 같이 이산 시간 시스템(Discrete-time system)으로 근사화 될 수 있으며

$$\xi(t+1) = \xi(t) + J_{image}(t) \Delta T u(t) \quad (12)$$

이 시스템에 영상 평면상에서의 기준 입력 ξ_d 가 주어지면, 다음과 같은 오차 시스템을 얻을 수 있다.

$$e_i(t+1) = e_i(t) + B(t) u \quad (13)$$

여기서 $e_i(t) = \xi(t) - \xi_d$ 이고 $B(t) = J_{image}(t) \Delta T$ 이다. $B(t)$ 는 N 개의 특징점에 대하여 $2N \times 6$ 의 행렬이 되며, 3개 이상의 특징점이 존재할 때 일반화된 역행렬이 존재한다. 이러한 시스템은 상태 피드백을 이용하여 다음과 같은 최소 시간 정착 제어 입력 (Minimum time settling control input)을 구할 수 있다[4].

$$u = -K e_i(t) \quad (14)$$

여기서 $K = [B(t)^T B(t)]^{-1} B^T(t)$ 이다. 이렇게 만들어진 입력 u 가 동력학 제어부의 선속도와 각속도 기준 입력으로 들어간다.

선속도와 각속도 기준 입력은 궤적 생성기(Trajectory generator)에서 각 관절의 위치, 속도, 가속도 궤적으로 변환되어 3절에서 설명된 강인 학습 동력학 제어기에 기준 입력으로 들어간다. 제어기의 전체 구조를 그림 1에 보였다.

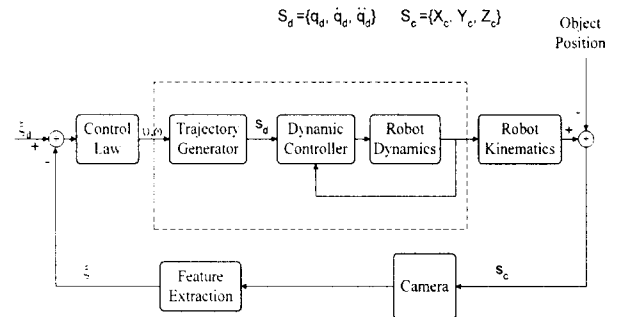


그림 1 제어기 구조
Fig. 1 Control structure

5. 모의 실험

본 논문에서 제안한 구조를 가지는 제어기의 성능을 검증하기 위하여 2개의 회전 관절을 가지고 있는 2-자유도의 로봇 머니폴레이더에 대하여 모의 실험을 수행하였다. 제어 목적은 말단 장치와 카메라의 위치가 동일하다는 가정 하에 대상 물체가 영상 평면의 중앙에 오도록 하는 것이며 제어기의 성능을 검증하기 위한 모의 실험이므로 이동 물체의 운동에 대한 Prediction 부분은 첨가하지 않았다. 그림 2는 샘플링 시간이 비전 시스템은 100ms이고 로봇 동력학 제어부는 1ms일 때 제안된 제어기가 움직이는 물체를 추종하고 있는 모습을 보여준다. 예상되어 지는 바와 같이 로봇의 위치는 물체의 위치에 뒤쳐져서 나타나고 있는데 그 거리는 물체의 이동 속도와 비전 샘플링 시간에 의존한다. 그림 3-5는 정현과 궤적에 대한 응답으로써 앞의 경우보다 느린 250ms의 비전 샘플링 시간을 가질 때 본 논문에서 제안된 제어기를 사용한

경우와 기존의 제어기를 사용한 경우의 성능을 비교하였다. 비교 대상으로는 Hashimoto[4]가 제안한 제어기를 사용했으며 그림 3은 시스템 파라미터를 정확히 알고있는 경우로서 비교적 느린 비진 샘플링 시간에도 제안된 제어기의 응답이 좋음을 보여준다. 그림 4와 그림 5는 각각 불확실한 파라미터가 있는 경우와 외란이 있는 경우로서 제안된 제어기가 파라미터의 변동이나 외란에 대해 강인한 성능을 보여주고 있다.

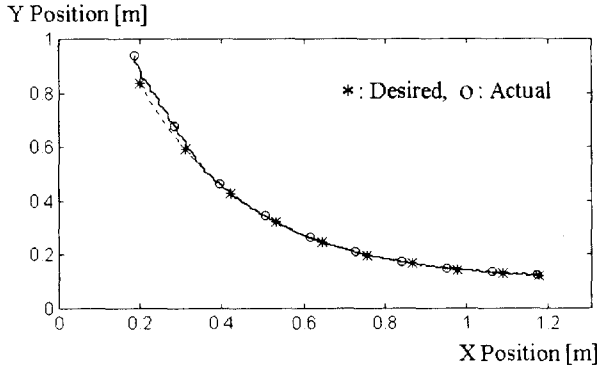
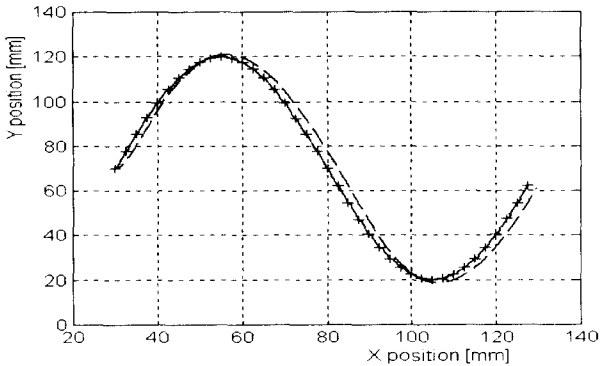
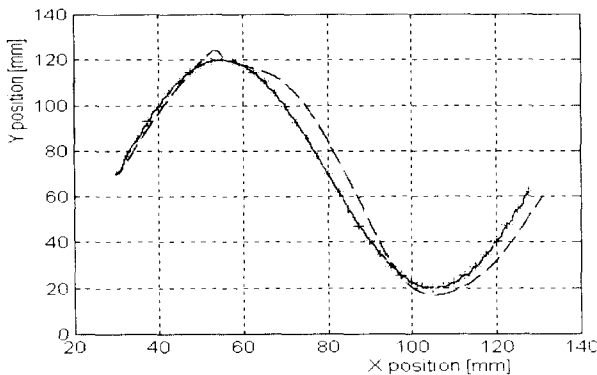


그림 2 시스템의 기준 궤적과 실제 궤적
Fig. 2 Desired and actual trajectories of system



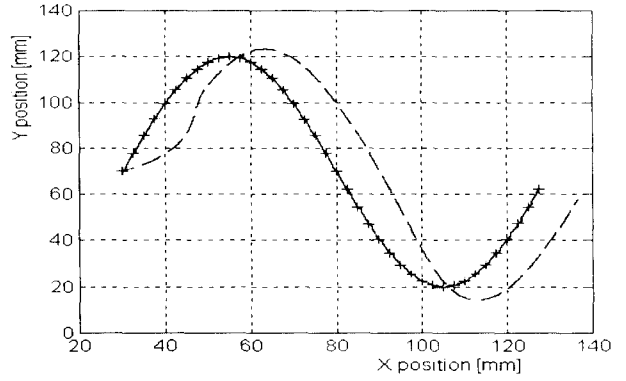
+ : desired, solid : proposed, dashed : Hashimoto's
그림 3 사인 궤적에 대한 응답

Fig. 3 Response to sinusoidal trajectory



+ : desired, solid : proposed, dashed : Hashimoto's
그림 4. 불확실한 파라미터가 있을 때의 응답

Fig. 4 Response to sinusoidal trajectory
with uncertain parameter



+ : desired, solid : proposed, dashed : Hashimoto's
그림 5. 외란이 있을 때의 응답

Fig. 5 Response to sinusoidal trajectory with disturbance

6. 결론

이 논문에서는 Eye-in-hand 구성을 갖는 로봇 머니퓰레이터에 대하여 카메라의 운동과 영상 평면상의 물체의 위치 변화 사이의 관계를 이용하여 영상 평면에서 정의된 작업의 수행을 가능하게 하였으며 동력학 제어부에 강인 학습 제어기를 이용하여 파라미터 불확실성, 외란, 샘플링 주기 등에 대하여 강인한 제어기를 제시하였다. 또한, 모의 실험을 통해 제안된 제어기가 기존의 제어기보다 우수한 성능을 나타냄을 보였다.

참고 문헌

- [1] Graham S. Bell and William J. Wilson, "Coordinated Controller Design for Position Based Robot Visual Servoing in Cartesian Coordinates," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1650-1655, 1996.
- [2] B. Espiau, F. Chaumette, and P. Rives, "A new approach to visual servoing in robotics," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.8, No.3, pp.313-326, 1992.
- [3] J. T. Feddema and O. R. Mitchell, "Vision-Guided Servoing with Feature-Based Trajectory Generation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 5, No. 5, pp. 691-700, 1989.
- [4] K. Hashimoto et. al, "Manipulator Control with Image-Based Visual Servo," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.2267-2272, 1991.
- [5] K. Hashimoto, editor, "VISUAL SERVOING," World Scientific, 1993.
- [6] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, "Control of Robot Manipulators," Micmillan, 1993
- [7] B. J. Nelson, N. P. Papanikolopoulos, and P. K. Khosla, "Robotic Visual Servoing and Robotic Assembly Tasks," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp.23-31, June, 1996.