

Dynamic Visual Servoing of Robot Manipulators

白承珉* · 林慶洙** · 韓雄基*** · 鞠兌龍[§]

(Seung-Min Baek · Kyung-Soo Lim · Woong-Gie Han · Tae-Yong Kuc)

Abstract - A better tracking performance can be achieved, if visual sensors such as CCD cameras are used in controlling a robot manipulator, than when only relative sensors such as encoders are used. However, for precise visual servoing of a robot manipulator, an expensive vision system which has fast sampling rate must be used. Moreover, even if a fast vision system is implemented for visual servoing, one cannot get a reliable performance without use of robust and stable inner joint servo-loop. In this paper, we propose a dynamic control scheme for robot manipulators with eye-in-hand camera configuration, where a 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 be robust to parameter uncertainty, disturbances, low sampling rate, etc.

Key Words : robot dynamics, learning control, image Jacobian, visual servoing

1. 서 론

단일 센서로서 가장 많은 정보를 줄 수 있는 센서인 시각 센서는 알려지지 않은 동적 환경(unknown dynamic environment)에서의 로봇 제어에 큰 역할을 해왔고, 특히 그에 대한 연구는 robot kinematics, dynamics control, real-time processing, active vision, real-time computing, high-performance system architecture 와 같이 많은 분야에서 진행되고 있다. 최근 20년간 비전 피드백을 로봇 제어에 이용하는 Visual Servoing 연구가 많이 진행되어 왔다[5,6]. 비전 시스템에서 얻어진 시각 정보를 직접 피드백시켜서 로봇 매니퓰레이터의 안정적이고 강인한 제어 출력을 내는 시각서보제어는 일반적으로 작업 궤적이 주어지는 좌표계에 따라서 추출된 image feature로부터 각 관절을 직접 제어하는 Image-Based Method와 간접적으로 좌표계의 관계를 이용하여 target의 위치와 방향을 결정하여 로봇을 제어하는 Position-Based Method로 나눌 수 있다[6, 11-14].

또한 Visual Servoing연구의 대부분의 접근방법은 모델링에 대한 불확실성을 줄이기 위해 3차원에서의 작업보다는 2차원에서의 영상을 피드백시키는 페루프 구조를 하고 있다 [3]. 이 피드백 구조는 비전 데이터와 동력학 제어기의 유무에 따라 로봇의 서보 제어기에 내부 피드백 루프 없이 영상

피드백 정보만을 이용하는 단일 루프 구조와 내부 피드백 루프를 갖는 이중 루프 구조로 분류할 수 있다[6]. 단일 루프 구조는 서보 제어기에 각 관절의 인코더로부터의 피드백을 하지 않고 비전 시스템에서 얻어진 데이터만을 피드백하기 때문에 비전 시스템의 빠른 샘플링 시간을 요구하지만 현재의 비전 샘플링 시간이 최소한 33ms 보다는 크므로 물체의 운동이 빠른 경우에는 사용이 어려우며, 로봇 매니퓰레이터의 선형 동력학 모델을 적용하고 있다[1,9]. 이에 반해 이중 루프 구조는 상위 제어기로서의 비전 시스템이 서보 제어기의 기준 입력과 기준 궤적을 만들고, 하위 제어기로서의 서보 제어기는 비전 시스템으로부터 들어온 입력을 추종하여 시스템의 안정성을 보장한다. 이와 같은 이중 루프 구조는 상위 제어기와 하위 제어기가 서로 다른 샘플링 시간을 가지므로 비교적 느린 샘플링 시간을 갖는 비전 시스템으로도 구현할 수 있는 구조이다. 기존의 이중 루프 구조의 연구는 대부분 로봇의 내부 관절 서보 루프에 단순한 PID 제어기를 사용하고 있다[3-5]. 이러한 시각 서보 제어기는 내부 관절 서보 루프에 동력학을 고려하지 않으므로 느린 비전 샘플링, 고속운동 등의 경우 성능 저하로 로봇의 응답 특성이 떨어지는 단점이 있다.

한편 [18]에서는 Eye-in-hand 구성의 카메라를 설치한 로봇 매니퓰레이터에 대하여 비교적 느린 샘플링 시간을 가지는 저가의 그래픽카드도 구현 가능한 이중 루프 구성의 제어기로 강인 학습 동력학 제어기를 제안하고 이론적 검증을 하였다. 또한 모의 실험을 통하여 기존의 제어기와 비교함으로써 그 효용성을 보였다. 본 논문에서는 [18]의 제어구조를 바탕으로 다양한 실험을 함으로써 실제 적용하고 물체에 대한 추적 작업, 파라미터의 불확실성, 외란, 샘플링 주기에 대한 강인성을 평가하고자 한다.

* 正 會 員 : 成均館大 電氣電子 및 컴퓨터工學科 博士課程

** 準 會 員 : 成均館大 電氣電子 및 컴퓨터工學科 碩士課程

*** 準 會 員 : 國防科學研究所 研究員

[§] 正 會 員 : 成均館大 電氣電子 및 컴퓨터工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 9月 20日

最終完了 : 1999年 12月 8日

2. 제어기 구성

이 장에서는 Eye-in-hand 핀홀 카메라 모델을 갖는 로봇 매니퓰레이터에 대한 이중 루프의 강인한 동역학 제어기를 소개한다.

2.1 영상 자코비안

시각센서로서 카메라를 이용한 시스템의 경우 작업공간에서 센서공간으로의 사상은 작업 물체의 CCD 영상평면상로의 투영을 나타내기 위하여 카메라 렌즈 모델을 필요로 한다. 본 논문에서 카메라 모델은 왜곡이 없는 렌즈를 하나의 작은 동공으로 간주한 이상적인 핀홀 카메라(pin hole camera)로 했다. 그리고 공간상의 한 점을 영상평면으로 투영하는 방법은 원근투영법을 이용했다.

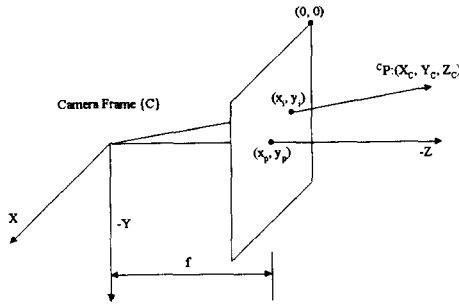


그림 1 핀홀 카메라 모델
Fig. 1 Pin hole camera model

그림 1처럼 카메라 좌표계를 렌즈의 초점에 맞추면 카메라 좌표계에서의 점 ${}^cP: (X_C, Y_C, Z_C)$ 이 카메라의 영상 평면의 점 (x_i, y_i) 에 투영되는 관계식은 다음과 같다.

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

여기서 f 는 렌즈의 초점거리이고, s_x 와 s_y 는 CCD 어레이에서 화소의 수평과 수직 차원을 나타내며, (x_p, y_p) 는 광축의 CCD 투과점이다. 이 모델은 $|Z_d| \gg |f|$ 임을 가정할 것이다.

위의 식(1)을 미분하면 카메라 좌표계에서의 물체의 속도를 영상평면에서의 optical flow나 센서공간에서의 속도도 나타낼 수 있다.

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

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

일반적인 Eye-in-hand 카메라 구성의 경우에는 작업좌표

계와 카메라좌표계가 일치한다. 그러므로 카메라의 직선운동과 회전운동에 따라 관측되는 카메라좌표계에서의 점 cP 의 이동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^c\dot{p} = -{}^cV - {}^c\Omega \times {}^cP \quad (3)$$

여기서 ${}^cV = [\dot{x}_c \ \dot{y}_c \ \dot{z}_c]^T$ 이고 ${}^c\Omega = [\omega_{x_c} \ \omega_{y_c} \ \omega_{z_c}]^T$ 로서 카메라의 선속도와 각속도를 나타낸다. 이제 영상평면 상의 속도관계식(2)와 위 식(3)을 결합하면 다음의 전환식을 얻을 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 $x_s = \frac{fX_C}{s_x Z_C}$, $y_s = \frac{fY_C}{s_y Z_C}$ 이며, 위 식의 2×6 전환 행렬은 다음과 같다.

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

이 행렬을 영상 자코비안이라 한다.

일반적으로 하나의 물체에 대하여 여러 개의 특징점을 추출할 수 있고 N개의 특징점에 대한 영상 자코비안을 구하기 위해 식 (4)를 변형해보면 다음의 관계를 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{s1} \\ \dot{y}_{s1} \\ \dot{x}_{s2} \\ \dot{y}_{s2} \\ \vdots \\ \dot{x}_{sN} \\ \dot{y}_{sN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \\ \omega_{x_c} \\ \omega_{y_c} \\ \omega_{z_c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 J_i 는 각각의 특징점에 대한 영상 자코비안 행렬이다.

2.2 내부 동역학 제어기

일반화된 관절 좌표계에서의 n-DOF(Degrees of freedom)의 강체 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 마찰력, 크기가 유계된 미지의 확정 외란, 로봇에 주어지는 입력 토크 벡터를 표시한다. 제어를 설계하고 안정도를 증명하기 위하여 식(6)의 로봇 동력학 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 비대칭성질을 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 회귀행렬과 미지의 파라미터 벡터를 나타낸다. 즉, 동력학 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 동력학 제어기 설계문제는 로봇 시스템의 궤적이 원하는 궤적 q_d 를 추적하는 제어 입력을 구하는 것이다.

먼저 동력학 제어기의 출력을 다음과 같이 정의한다.

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

여기서 $\tau_b, \tau_{ce}, h, \gamma$ 는 각각 궤환 오차 입력, 토크계산 오차 입력(computed-torque-error input), 학습입력, 강인 제어입력을 나타내며, 시스템을 안정화시키는 오차입력 τ_b 와 τ_{ce} 는 다음과 같다.

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

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

$$\begin{aligned} \hat{D}_e(q) &\equiv \hat{D}(q) - \hat{D}(q_d) \\ \hat{B}_e(q) &\equiv \hat{B}(q) - \hat{B}(q_d) \\ \hat{F}_e(q) &\equiv \hat{F}(q) - \hat{F}(q_d) \end{aligned}$$

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

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

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

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

여기서 $z = \dot{e} + ae$, $\hat{\theta} = \theta - \hat{\theta}$, $\tilde{h} = h_d - h$ 이고 강인 제어 입력은 $\gamma = \Pr[\hat{d}_m(t)]sgn(z)$ 와 같이 정의한다. h_d 는 명령 궤적에 대한 역동력학 제어입력과 유계된 외란으로 이루어

져 있다. 즉, $h_d = Y_d \theta + d_1$. 그리고 $sgn(z)$ 의 정의는 다음과 같다.

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

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

$$\begin{aligned} \dot{h}(t) &= \Pr[\dot{h}(t-\delta)] + \sigma \Lambda_1^{-1} z(t-\delta) \\ \dot{\hat{\theta}}(t) &= \Pr[\dot{\hat{\theta}}(t-\delta)] + \sigma \Lambda_2^{-1} Y_e^T z(t-\delta) \\ \dot{\hat{d}_m}(t) &= \Pr[\dot{\hat{d}_m}(t-\delta)] + \sigma \Lambda_3^{-1} z(t-\delta) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 Λ_1, Λ_2 는 양의 대각 행렬인 학습이득이고, Λ_3, σ 는 양수인 학습 이득, δ 는 갱신 시간 간격이다.

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

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

그러면 오차시스템 (8)은 제어 입력 (7)과 학습입력, 파라미터, 시변 외란의 경계치를 위한 학습 규칙 (9)로 구성된 제어기에 의하여 점근적으로 수렴함을 알 수 있다[18].

2.3 동력학 시각제어 구조

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 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 $\xi = [x_s, y_s, x_{s2}, y_{s2}, \dots, x_{sn}, y_{sn}]^T$ 와 $u = [x_c, y_c, z_c, \omega_{xc}, \omega_{yc}, \omega_{zc}]^T$ 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 시

간 정착 제어 입력(Minimum time settling control input)을 구할 수 있다[5].

$$u = -Ke_f(t) \quad (14)$$

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 앞절에서 설명된 강인 학습 동력학 제어기에 기준 입력으로 들어간다. 제어기의 전체 구조를 그림 2에 보였다.

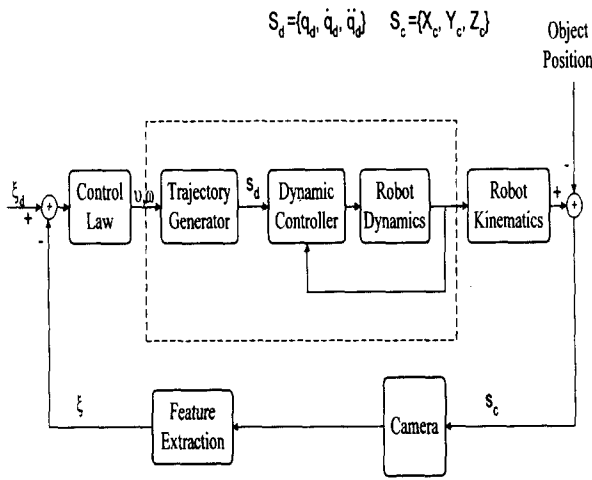


그림 2 제어기 구조
Fig. 2 Control structure

3. 구현 및 성능평가

실험 장치는 크게 주컴퓨터, 비전 시스템, 인터페이스 보드, 로봇 매니퓰레이터의 네 부분으로 나누어진다. 먼저 주컴퓨터는 비전시스템으로부터 특징점의 위치를 입력받아 외부 시각 서보 루프를 구성함과 동시에 인터페이스 보드를 통하여 로봇 관절의 회전 상태를 입력받아 동력학 제어를 수행한다. 비전 시스템으로는 저가의 오버레이 보드를 장착한 컴퓨터를 사용하였으며, 비전 시스템의 역할은 CCD 카메라로부터의 영상신호를 오버레이 보드를 통하여 입력받아 특징점을 추출하고, 병렬통신으로 특징점의 위치를 주컴퓨터에 전달하는 것이다. 비전 시스템에서의 처리화소수는 320×240 이고, 특징점 추출은 칼라패치의 중심점(centroid)을 구하는 방법을 사용하였다. 인터페이스 보드는 주컴퓨터와 로봇 구동부를 연결해주는 장치로서 로봇의 상태를 주컴퓨터에 알려주고, 주컴퓨터로부터의 구동입력을 로봇 매니퓰레이터에 전달한다. 인터페이스 보드는 인코더 펄스값을 계수하기 위한 16bit UP/DOWN 카운트회로와 PWM 드라이버로 아날로그 제어 입력을 출력하기 위한 12bit DA 컨버터, 그리고 로봇의 각 스위치 상태를 읽을 수 있는 병렬 I/O로 구성되어 있다. 제어 대상 로봇은 산업용 SCARA 로봇 매니퓰레이터이고, 로봇의 자세한 규격은 표 1에 나타나 있다. 전체적인 실험장치의 블록선도를 그림 3에 나타내었다.

표 2 스카라 로봇 매니퓰레이터의 규격

Table 2 Specifications of SCARA

		관절 1	관절 2
모터	최대전압	65 V	65 V
	최대전류	6.5 A	3.5 A
	최대전력	400 W	200 W
	최대속도	3000 rpm	3000 rpm
	최대토크	400 Nm	200 Nm
동력전달 방식		하모닉드라이브	하모닉드라이브
감속비		50 : 1	50 : 1
인코더		1000 pulse/rev.	1000 pulse/rev.
링크 길이		350 mm	250 mm
작업각도		$\pm 110^\circ$	$\pm 145^\circ$

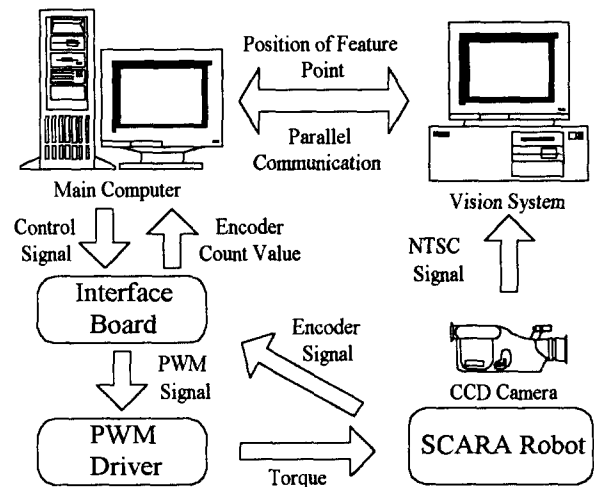


그림 3 전체 시스템의 블록선도
Fig. 3 Block diagram of overall system

CCD 카메라는 SCARA 로봇의 2축 링크의 끝에 장치하여 실험을 수행하였다. 추적하는 물체의 움직임은 반지름이 10cm인 원을 따라서 1.35rad/sec의 속도로 회전하도록 DC 모터로 구동하여 구현하였다. 카메라의 높이는 움직이는 물체로부터 73cm의 높이에 설치하였으며, 이 때 카메라는 26cm \times 19.5cm의 작업공간을 볼 수 있다.

본 실험에서는 비전시스템의 샘플링 간격이 40ms와 80ms 일 때, 각각의 경우에 대하여 내부 관절 서보 루프로 일반적인 PD 제어기를 사용하였을 경우와 동력학 제어기를 사용하였을 경우로 나누어 추적 성능을 비교하여 보았다. PD 제어기와 동력학 제어기는 모두 1ms의 주기로 동작시켰고, 동력학제어기의 파라미터는 Γ 는 30, αA_1^{-1} 는 0.5, αA_2^{-1} 는 0.5, αA_3^{-1} 는 0.5, α 는 3으로 설정하였으며, 비교 대상인 PD 제어기의 PD 이득은 동력학 제어기의 PD 제어기 부분과 같이 P 이득은 90, D 이득은 30으로 설정하였다.

그림 4~7은 비전의 샘플링 시간이 40ms일 경우에 대한 응답이고, 그림 8~11은 비전의 샘플링 시간이 80ms일 경우

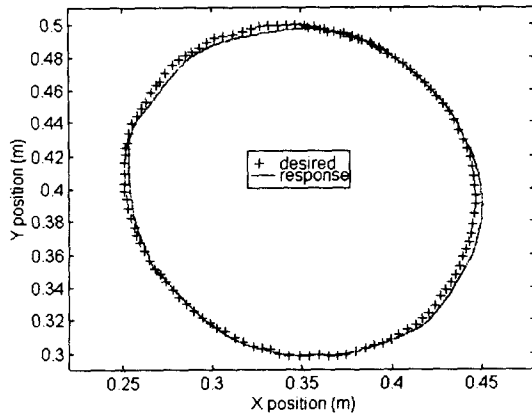


그림 4 PD 제어를 사용하였을 때의 응답(비전 샘플링 시간 : 40ms)
 Fig. 4 Response of robot manipulator with PD controller (vision sampling time : 40ms)

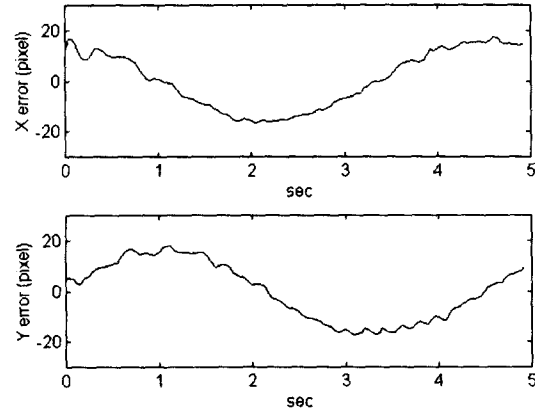


그림 7 동력학 제어를 사용하였을 때 위치오차(비전 샘플링 시간 : 40ms)
 Fig. 7 Position errors with dynamic controller(vision sampling time : 40ms)

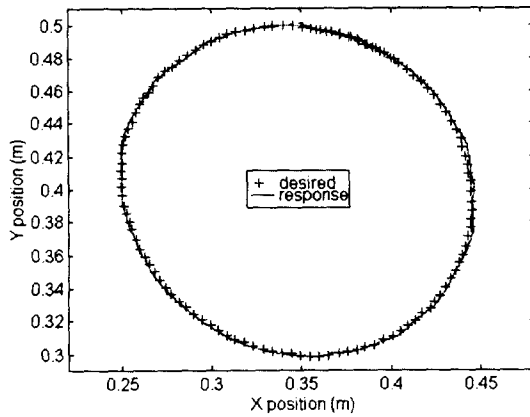


그림 5 동력학 제어를 사용하였을 때의 응답(비전 샘플링 시간 : 40ms)
 Fig. 5 Response of robot manipulator with dynamiccontroller (vision sampling time : 40ms)

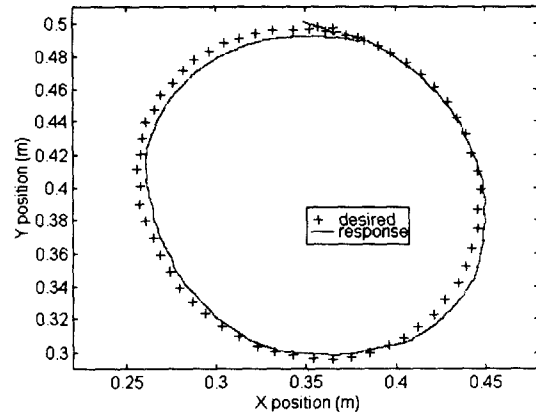


그림 8 PD 제어를 사용하였을 때의 응답(비전 샘플링 시간 : 80ms)
 Fig. 8 Response of robot manipulator with PD controller(vision sampling time : 80ms)

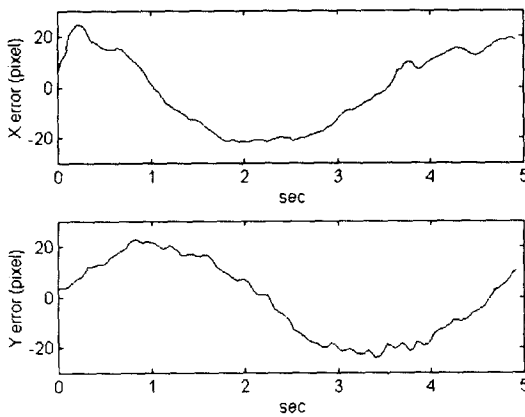


그림 6 PD 제어를 사용하였을 때 위치오차(비전 샘플링 시간 : 40ms)-
 Fig. 6 Position errors with PD controller(vision sampling time : 40ms)-

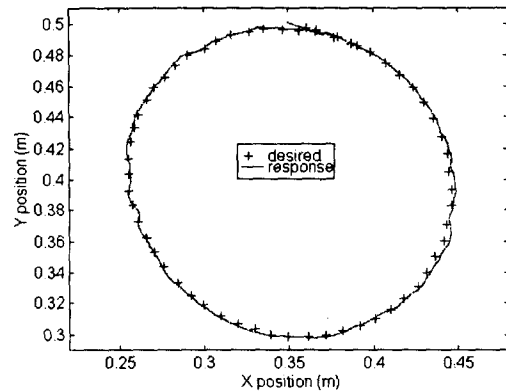


그림 9 동력학 제어를 사용하였을 때의 응답(비전 샘플링 시간 : 80ms)
 Fig. 9 Response of robot manipulator with dynamiccontroller (vision sampling time : 80ms)

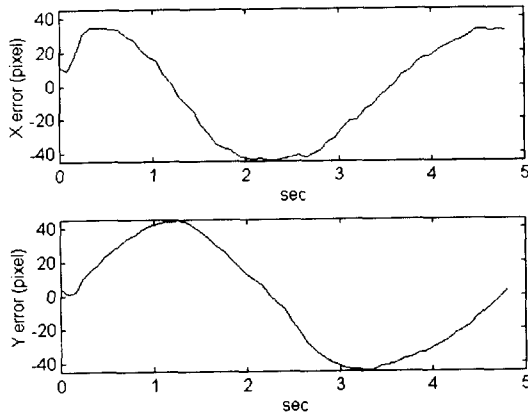


그림 10 PD 제어를 사용하였을 때 위치오차(비전 샘플링 시간 : 80ms)

Fig. 10 Position errors with PD controller(vision sampling time : 80ms)

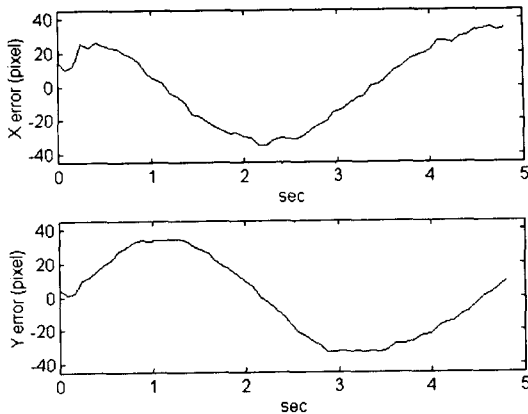


그림 11 동력학 제어를 사용하였을 때 위치오차(비전 샘플링 시간 : 80ms)

Fig. 11 Position errors with dynamic controller(vision sampling time : 80ms)

에 대한 응답이다. 그림들을 살펴보면 모든 경우에 대하여 동력학 제어가 PD 제어기에 비해 정확한 추적성능을 보이는 것을 알 수 있고, 비전의 샘플링 시간이 길어질수록 성능이 저하되는 PD 제어기에 반해 동력학 제어기는 비전 샘플링 시간의 변화에 강인한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 Eye-in-hand 구성의 비전 시스템을 이용한 로봇 매니플레이터의 제어에 대하여 살펴보았다. 제안한 동력학 시각 제어기는 비교적 느린 샘플링 시간을 갖는 저가의 비전 시스템으로도 구현 가능한 이중 루프 구성이며, 내부 관측 서보 루프로 동력학 제어를 적용하여 로봇 매니플레이터의 추적 성능과 강인성을 향상시켰다. 비전 시스템에서는 카메라의 운동과 영상 평면상의 물체의 위치 변화

사이의 관계인 영상 자코비안을 구하여 영상 평면상의 작업을 수행 가능하도록 하였으며 계산한 영상 자코비안을 이용한 상태 피드백을 통하여 카메라의 속도 명령을 만들었다. 동력학 제어부에는 강인 학습 제어를 적용하여 미지의 파라미터, 외란, 샘플링 주기 등에 대하여 강인한 특성을 갖도록 하였다. 실험에서는 제안한 제어기의 성능을 검증하기 위하여 움직이는 물체에 대한 추적 작업을 수행하였고, 제안된 제어기가 기존의 제어기보다 파라미터의 불확실성, 외란, 샘플링 주기 등에 대하여 강인하고, 뛰어난 추적성능을 나타냄을 보였다.

참 고 문 헌

- [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] Brad Bishop, Seth Hutchinson and Mark Spang, "Camera Modeling for Visual Servo Applications," Mathematical and Computer Modeling Journal, special issue on Modeling Issues in Visual Sensing, Vol. 24, No. 5/6, pp. 79-102, 1996.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Koichi Hashimoto et. al, "Manipulator Control with Image-Based Visual Servo," IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2267-2272, 1991.
- [6] Koichi Hashimoto, editor, "VISUAL SERVOING," World Scientific, 1993.
- [7] Oussama Khatib, "A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 3, no. 1, Feb., 1987
- [8] Oussama Khatib, "A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 3, no. 1, Feb., 1987
- [9] 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.
- [10] Mark W. Spang and M. Vidyasagar, "ROBOT DYNAMICS AND CONTROL," John Wiley & Sons, 1989.
- [11] L. E. Weiss, Dynamic visual servo control of robots : an adaptive image-based approach, Ph. D. Thesis,

- Pittsburgh, The Robotics Institute Carnegie Mellon University, 1984.[12] Bradley J. Nelson and Pradeep K. Khosla, "Visual Guided Manipulation Using Active Camera-Lens Systems," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp437-442, 1997.
- [12] Bradley J. Nelson and Pradeep K. Khosla, "Visual Guided Manipulation Using Active Camera-Lens Systems," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp437-442, 1997.
- [13] Dong-Ming Chuang, Shiaw-Chain Wu, and Maw-kae Hor, "Adaptive Fuzzy Visual Servoing in Robot Control" IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.811-816, 1997.
- [14] Koichi Hashimoto and Toshiro Noritsugu, "Performance and Sensitivity in Visual Servoing," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2321-2326, 1998.
- [15] J. R. Parker, "Algorithm for Image Processing and Computer Vision", WILEY Computing Publishing, 1997.
- [16] Ramesh Jain, Rangachar Kasturi, Brian G. Schunck, "Machine Vision", McGraw-Hill, 1995.
- [17] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, "Digital Image Processing", Addison-Wesley Publishing. 1992.
- [18] Woong-Gie Han and Tae-Yong Kuc "Robust Object Tracking of Robot Manipulator Using Low-Cost Vision System," IEEE Int. Conf. on SMC, pp.3501-3506, San Diego, California, USA, 1998.10
- [19] Hanqi Zhuang, "Hand/Eye Calibration for Electronic Assembly Robots", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.14, No.4, pp.612-616, August 1998.
- [20] Guo-Qing Wei, Klaus Arbter, and Gerd Hirzinger, "Active Self-Calibration of Robotic Eyes and Hand-Eye Relationships with Model Identification", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol14, No.1, pp.158-166, February 1998.
- [20] Carlo Colombo and Benedetto Allotta, "Image-Based Robot Task Planning and Control Using a Compact Visual Representation", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part A:Systems and Humans, vol.29, No.1, pp.92-100, January 1999.
- [20] Ishay Kamon, Tamar Flash, and Shimon Edelman, "Learning Visually Guided Grasping : A Test Case in Sensorimotor Learning", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part A:Systems and Humans, vol.28, No.3, pp.266-276, May 1998.
- [20] Janabisharifi F, Wilson WJ, "Automatic Grasp Planning for Visual-Servo Controlled Robotic Manipulators", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Vol.28, No.5 , pp.693-711, October 1998

저 자 소 개



백 승 민(白承珉)
 1974년 8월 1일생. 1996년 성균관대 전자공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전자공학과(석사). 1998년~현재 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터 공학과 박사과정.



한 응 기(韓雄基)
 1973년 3월 8일생. 1996년 성균관대 전자공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전자공학과(석사). 1998년~현재 국방과학연구소 연구원



임 경 수(林慶洙)
 1975년 4월 11일생. 1998년 경북산업대 제어계측공학과 졸업. 1998년~현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터 공학과 석사과정
 Tel : 0331-290-7202



국 태 용(鞠兌龍)
 1961년 11월 20일생. 1988년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원(공박). 1993년 4월~8월 삼성항공(주)정밀기 기연구소 주임연구원. 1993년 9월~1995년 2월 목포대 전기공학과 전임강사. 1995년~1999년 4월 성균관대 전기전자 및 컴퓨터 공학부 조교수. 1999년 4월~현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터 공학부 부교수.