

논문 2006-43SC-1-3

비전을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 자세제어

(Motion Control of Robot Manipulators using Visual Feedback)

지 민 석*, 이 영 찬**, 김 진 수***, 이 강 웅*

(Min Seok Jie, Young Chan Lee, Chin Su Kim, and Kang Woong Lee)

요 약

본 논문에서는 로봇 말단부에 장착된 카메라 환경에서 시각 궤환을 이용하는 로봇 매니퓰레이터의 자세제어 기법을 제안한다. 자세제어를 위한 기준 관절 속도와 관절 가속도는 외부루프의 특징점을 이용한 영상정보에서 생성된다. 영상평면상에서 특징점을 추종하기 위한 제어 입력은 로봇 동역학을 사용하였다. 영상평면상의 특징점과 관절 각속도 오차를 로봇 구동을 위한 제어입력에 포함시켜 파라미터 불확실성에 강인하도록 하였다. 시스템의 안정도는 Lyapunov 안정도 판별법을 이용하여 입증하였다. 제안된 제어기의 성능은 5-링크 2 자유도를 가지는 로봇에 대한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

Abstract

In this paper, we propose a motion control scheme of robot manipulators based on visual feedback under camera-in-hand configuration. The desired joint velocity and acceleration for motion control is made by the feature-based visual data in the outer loop. The control input for tracking feature points on the image plane uses robot kinematics dynamic. The proposed control input consists of the image feature and the joint velocity error to achieve robustness to the parametric uncertainty. The stability of the closed-loop system is proved by Lyapunov approach. Computer simulations and experiments on a two degree of freedom manipulator with 5 links are presented to illustrate the performance of proposed control system.

Keywords: motion control, robot manipulator, visual servoing.

I. 서 론

비전 시스템은 로봇 제어에서 성능개선을 위해 도입되었는데 특히 고정되지 않은 작업을 수행하는 로봇의 위치 및 구동제어에 적용되고 있으며 지금까지 많은 연구가 이루어지고 있다. 로봇 매니퓰레이터의 구동은 말단부가 원하는 궤적을 따라 이동하도록 위치 및 속도 제어가 요구된다. CCD 카메라 등의 비전 센서를 이용

하면 가변적인 목표물의 추종을 보다 정밀하게 할 수 있는데 카메라와 목표물 사이의 상대적인 위치와 자세에 의해 표현되는 위치를 이용하는 제어(position-based control)와 이미지 평면상에 주어지는 목표물의 특징점을 이용하는 제어(feature-based control)로 나눌 수 있다^[1].

Kelly^[2]는 카메라가 고정된 위치기반 제어시스템 구조에서 카메라에서 측정되는 위치 오차를 사용하는 제어 알고리즘을 제시하였는데, 카메라 파라미터를 조정하지 않고 역 동역학(inverse kinematics)을 이용하지 않는 특성이 있다. 또한 Kelly^[3]는 카메라를 로봇 매니퓰레이터의 말단부에 부착하고 카메라 이미지 평면상의 특징점 오차를 사용하는 이미지 기반 제어 알고리즘도 제시하였는데, 제어입력이 로봇의 동역학 특성이 포함되지 않는 단순한 구조를 갖는 특성이 있다. 그러나 이

* 정회원, 한국항공대학교

(Hankuk Aviation University)

** 정회원, (주) 제일 반도체 사업부

*** 학생회원, 한국항공대학교

(Hankuk Aviation University)

※ 본 연구는 2003년도 한국항공대학교 학술연구비로 수행되어진 결과임.

접수일자: 2005년7월18일 수정완료일: 2005년1월5일

구조는 동력학 특성이 제어 입력에 반영되지 않으므로 특징점 오차의 크기에 민감하게 되어 외란이나 잡음이 있는 경우 제어 성능이 악화될 수 있다^[4].

Goncalves와 Pinto^[5]는 Kelly^[2]의 제어 알고리즘을 카메라가 로봇 매니플레이터의 말단부에 장착된 환경으로 확장시켜 로봇의 움직임에 따라 변화하는 카메라의 위치에 상관없이 제어가능한 제어기를 제안하였다. 그러나 제어입력에 로봇 동력학 특성이 포함되지 않기 때문에 제어 성능이 악화될 수 있다.

Akella^[6]는 로봇 매니플레이터의 모든 불확실성을 고려하여 제어 알고리즘을 제안하여 외란이나 잡음에 의한 제어기의 성능 저하를 예방하였으나, 정상상태에서 로봇 관절의 추종 오차를 제거하지 못하는 단점이 있다. Cervantes^[7]는 정상상태에서의 오차를 제거하기 위해 고전적 제어방식인 PID(proportional integral derivative) 제어기법을 적용한 이미지 기반 제어 알고리즘도 제안하였지만, 중력 벡터의 불확실성만을 고려하여 제어입력을 설계하여 부분적인 제어 성능 향상만을 가져왔다.

한편 로봇 제어시스템은 한 개의 피드백 루프만을 가지는 단일 루프 구조와 내부에 별도의 피드백 루프를 가지는 이중 루프 구조로 구현할 수 있다. 이중 루프의 경우 내부 루프에서는 관절의 위치 및 속도를 피드백 시키고 외부 루프에서는 말단부의 위치와 회전에 관한 정보를 피드백 시키는데 비전을 이용하는 경우 이와 같은 이중 루프 구조가 적합하다. Kelly^[8]는 로봇 매니플레이터의 구동제어를 이중 루프 구조로 하고 제어입력이 로봇의 동력학 특성을 반영하며 원하는 관절속도, 원하는 관절 가속도 및 속도 오차로 결정되도록 하였으며 Lyapunov 안정도 판별법을 이용하여 제어시스템의 안정도를 판별하였다.

본 논문에서는 로봇 매니플레이터의 말단부에 카메라를 부착시켜 카메라로부터 얻는 이미지 평면상의 특징점 오차를 이용하는 제어시스템에 의하여 로봇 매니플레이터의 구동제어를 하고자 한다. 카메라로부터 획득한 영상 정보로부터 목표물의 특징점을 찾아내고, 이 특징점이 기준 특징점으로 수렴하도록 하는 원하는 관절속도를 생성시키고 이를 추종하도록 하는 제어입력은 동력학 특성이 반영되도록 Kelly^[4]의 제어 입력 구조를 가지도록 설계한다. 제안된 제어기의 안정성과 수렴성은 Lyapunov 기법을 적용하여 해석하며, 말단부에 카메라를 장착시킨 5-링크 2 자유도를 가지는 로봇 매니플레이터를 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 제어 성능 및 실용성을 검증한다.

II. 로봇 모델과 카메라 모델

본 논문에서 고려하는 로봇 비전 시스템은 로봇의 말단부에 카메라가 장착된 구조이며 로봇은 마찰이 없다고 가정한 n -링크 강체 로봇으로 동력학 방정식은 다음과 같다^[9].

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

여기서, $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 은 각각 관절의 위치, 속도, 가속도 벡터이고, $\tau \in R^n$ 은 토크 벡터이다. 또한 $M(q) \in R^{n \times n}$ 은 관성 행렬로 대칭이고 양한(positive definite)이며, $C(q, \dot{q})\dot{q} \in R^{n \times 1}$ 은 구심력과 코리올리시 힘을 나타내는 벡터이고 $G(q) \in R^{n \times 1}$ 는 중력 벡터이다.

식 (1)의 동력학 방정식은 다음과 같은 성질을 가지는데 이 성질은 안정성 입증에 이용된다.

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

카메라가 장착된 로봇 말단부의 속도는 선속도 v_c 와 각속도 ω_c 로 표현되며 매니플레이터의 관절 속도 \dot{q} 와 는 다음과 같은 관계를 가진다^[10].

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

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

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 말단부의 회전을 나타내는 변환행렬이다.

다음으로 로봇의 말단부에 장착된 카메라 좌표계에서 목표물을 나타내고 이를 이용하여 목표물의 운동방정식을 유도하기로 한다.

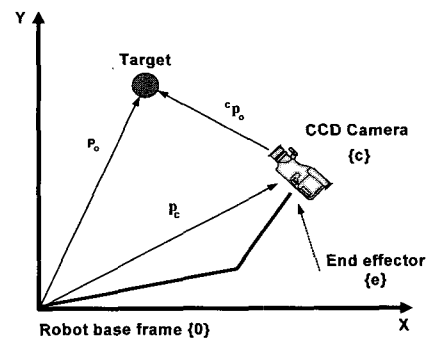


그림 1. 로봇 좌표 시스템

Fig. 1. Robot coordinate system.

그림 1과 같이 로봇 좌표계에서 목표물은 p_o 에 위치하며 카메라는 p_c 에 위치한다. 카메라 좌표계에서 나타낸 목표물의 위치를 ${}^c p_o$ 라 할 때 이들 사이의 관계는 다음과 같다.

$${}^c p_o = R_c^T(p_o - p_c) \quad (5)$$

여기서, $R_c^T = R_c^{-1}$ 이며 R_c 는 좌표계의 회전행렬이다. 식 (5)와 같이 카메라 좌표계에서 나타낸 목표물을 ${}^c p_o = [X \ Y \ Z]^T$ 로 나타낼 때 그림 2와 같이 목표물을 카메라의 이미지 평면에 투영시킨 이미지 평면상의 좌표로 나타내면 다음과 같다.

$$\xi = [x \ y]^T = \left[\frac{Xf}{aZ} \quad \frac{Yf}{\beta Z} \right]^T \quad (6)$$

여기서, f 는 카메라의 초점거리이고, α, β 는 각각 X, Y 축의 단위 미터당 화소(pixel)수를 나타내는 비례계수이다.

로봇 말단부의 속도와 이미지 평면에 있는 특징점(feature point)의 속도사이의 관계를 얻기 위하여 식 (6)을 시간에 대해 미분하는데 그 결과는 다음과 같다.

$$\dot{\xi} = f \begin{bmatrix} \frac{1}{aZ} & 0 & -\frac{X}{aZ^2} \\ 0 & \frac{1}{\beta Z} & -\frac{Y}{\beta Z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \quad (7)$$

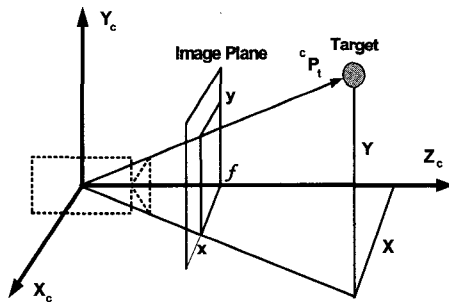


그림 2. 카메라 모델
Fig. 2. Camera model.

식 (5)를 미분하면 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & -Z & Y \\ 0 & -1 & 0 & Z & 0 & -X \\ 0 & 0 & -1 & -Y & X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_c^T(q) & 0 \\ 0 & R_c^T(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c(q) \\ \omega_c(q) \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 말단부에 장착된 카메라의 속도와 이미지 평면상의 특징점의 속도와의 관계가 얻어진다.

$$\dot{\xi} = J_{img}(\xi, Z) \begin{bmatrix} R_c^T(q) & 0 \\ 0 & R_c^T(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c(q) \\ \omega_c(q) \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)에서 $J_{img}(\xi, Z)$ 는 영상 자코비안으로 다음과 같이 표현된다^[10].

$$J_{img}(\xi, Z) = \begin{bmatrix} -\frac{F_1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & \frac{xy}{F_2} & -\frac{F_1^2 + x^2}{F_1} & \frac{F_1}{F_2} y \\ 0 & -\frac{F_2}{Z} & \frac{y}{Z} & \frac{F_2^2 + y^2}{F_2} & -\frac{xy}{F_1} & -\frac{F_2}{F_1} x \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 $F_1 = f / \alpha$ 와 $F_2 = f / \beta$ 이다.

식 (9)에 식 (3)을 대입하면 다음과 같이 이미지 평면상의 특징점의 속도는 로봇 관절의 속도로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\xi} = J(q, \xi, Z) \dot{q} \quad (11)$$

여기서, $J(q, \xi, Z)$ 는 관절의 속도와 이미지 평면상의 특징점 속도와의 관계를 나타내는 자코비안으로 다음과 같다.

$$J(q, \xi, Z) = J_{img}(\xi, Z) \begin{bmatrix} R_c^T(q) & 0 \\ 0 & R_c^T(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} J_A(q) \quad (12)$$

III. 제어기 설계

카메라를 이용하는 로봇 제어에서의 제어목표는 목표물과 로봇의 위치를 이미지 평면상에서 이미지 특징점으로 나타내고 이들 특징점이 일치하도록 로봇 매니퓰레이터를 제어하는 것이다.

이미지 평면상에서 현재 특징점 ξ 와 원하는 특징점 ξ_d 사이의 오차관련 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{\xi} = \xi_d - \xi \quad (13)$$

식 (13)을 시간에 대하여 미분하면 다음과 같다.

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

식 (14)에 식 (11)을 대입하면 다음과 같이 된다.

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

다음으로 관절의 희망 회전 각속도 ω_d 와 실제 관절의 회전 각속도와의 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{\omega} = \omega_d - \dot{q} \quad (16)$$

식 (16)을 식 (15)에 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{\xi}} = \dot{\xi}_d - J(q, \xi, Z)(\omega_d - \tilde{\omega}) \quad (17)$$

식 (17)로부터 관절의 희망 회전 각속도 ω_d 를 다음

과 같이 정하기로 한다.

$$\omega_d = J^+(K\dot{\xi} + \dot{\xi}_d) \quad (18)$$

여기서, $J^+ = J(q, \xi, Z)^T [J(q, \xi, Z)J(q, \xi, Z)]^{-1}$ 인 의사 역행렬(pseudo inverse matrix)이고, K 는 설계 이득으로 양한의 대칭행렬로 정한다.

식 (18)을 식 (17)에 대입하면 다음식이 얻어진다.

$$\dot{\xi} = -K\dot{\xi} + J(q, \xi, Z)\bar{\omega} \quad (19)$$

로봇의 관절 각속도가 식 (18)로 주어지는 희망 각속도를 추종하도록 하는 토크 제어입력을 다음과 같이 정한다.

$$\tau = M(q)\dot{\omega}_d + C(q, \dot{q})\omega_d + g(q) + K_v\bar{\omega} + K_i\sigma + J(q, \xi, Z)^T \dot{\xi} \quad (20)$$

여기서 K_v 와 K_i 는 양한의 설계 이득 행렬이고, σ 는 다음 관계식으로 정의된다.

$$\dot{\sigma} = \bar{\omega} \quad (21)$$

식 (20)의 토크 제어입력을 식 (1)에 대입하여 정리하고 식 (19)와 식 (21)을 조합하면 다음과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \sigma \\ \bar{\omega} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(q)^{-1}[-C(q, \dot{q})\bar{\omega} - K_v\bar{\omega} - K_i\sigma - J(q, \xi, Z)^T \dot{\xi}] \\ -K\dot{\xi} + J(q, \xi, Z)\bar{\omega} \end{bmatrix} \quad (22)$$

식 (22)의 상태방정식은 $[\sigma, \bar{\omega}, \dot{\xi}]^T = [0 \ 0 \ 0]^T$ 인 유일 평형점을 가지는 비선형 시스템이 된다.

이 시스템이 점근적으로 안정함을 보이기 위하여 Lyapunov 후보 함수를 다음과 같이 정한다.

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

식 (23)을 시간에 대해 미분하고 식 (22)를 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \bar{\omega}^T M(q) \dot{\bar{\omega}} + \frac{1}{2} \bar{\omega}^T M(q) \dot{\bar{\omega}} + \sigma^T K_i \dot{\sigma} + \dot{\xi}^T \dot{\xi} \\ &= \frac{1}{2} \bar{\omega}^T [M(q) - 2C(q, \dot{q})] \bar{\omega} - \bar{\omega}^T K_v \bar{\omega} - \dot{\xi}^T K \dot{\xi} \end{aligned} \quad (24)$$

식 (2)의 성질을 이용하면 식 (24)는 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} = -\bar{\omega}^T K_v \bar{\omega} - \dot{\xi}^T K \dot{\xi} \quad (25)$$

여기서, 설계 이득 행렬 K_v 와 K 는 양한이므로 $\dot{V} < 0$ 이 된다. 따라서 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $\bar{\omega} \rightarrow 0$, $\dot{\xi} \rightarrow 0$ 가 되므

로 제안된 토크 제어입력에 의해 관절의 회전 각속도와 특징점 ξ 는 각각 희망 관절의 각속도와 원하는 특징점 ξ_d 를 추종한다.

IV. 시뮬레이션과 실험

제안된 방식의 제어 성능을 검증하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 그림 3과 같이 2개의 회전 관절을 가지는 로봇 매니퓰레이터에 대해 실시하였다.

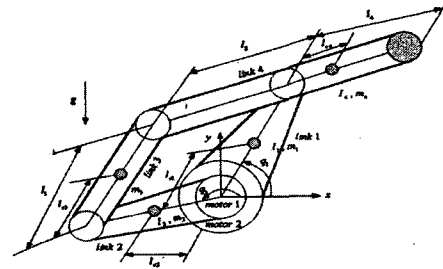


그림 3. 로봇 매니퓰레이터 구조

Fig. 3. The structure of a robot manipulator.

1. 컴퓨터 시뮬레이션

모의실험에서는 로봇 말단부에 장착된 카메라의 좌표계가 로봇 말단부의 좌표계와 일치한다고 가정하였다. 식 (1)의 로봇 매니퓰레이터의 동역학 방정식은 다음과 같다.

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

여기서, 관성행렬 $M(q)$ 의 요소 $M_{ij}(q)$ ($i, j = 1, 2$)는 다음과 같다.

$$M_{11}(q) = m_1 l_{c2}^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_1^2 + I_1 + I_3$$

$$M_{12}(q) = (m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) \cos(q_2 - q_1)$$

$$M_{21}(q) = (m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) \cos(q_2 - q_1)$$

$$M_{22}(q) = m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_{c4}^2 + I_2 + I_4$$

구심력과 코리올리스 행렬 $C(q, \dot{q})$ 의 요소 $C_{ij}(q)$ ($i, j = 1, 2$)는 다음과 같다.

$$C_{11}(q, \dot{q}) = 0$$

$$C_{12}(q, \dot{q}) = -(m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) \sin(q_2 - q_1) \dot{q}_2$$

$$C_{21}(q, \dot{q}) = (m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) \sin(q_2 - q_1) \dot{q}_2$$

$$C_{22}(q, \dot{q}) = 0$$

중력벡터 $G(q)$ 의 요소 $G_i(q)$ ($i=1,2$)는 다음과 같다.

$$G_1 = g(m_1 l_{c1} + m_3 l_{c3} + m_4 l_1) \cos q_1$$

$$G_2 = g(m_2 l_{c2} + m_3 l_2 - m_4 l_{c4}) \cos q_2$$

로봇 좌표계를 기준으로 ZYZ 오일러 각, α, β, γ 를 이용한 카메라의 자세는 다음과 같다.

$${}^c p_o = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos q_1 - l_4 \cos q_2 \\ l_1 \sin q_1 - l_4 \sin q_2 \\ 0 \\ q_2 - \pi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

여기서, 로봇 말단부는 로봇 좌표계의 XY 평면에서만 움직이므로 $\alpha = q_2 - \pi, \beta = \gamma = 0$ 이다.

식 (26)을 각 관절에 대하여 편미분하면 다음과 같은 해석적 자코비안이 얻어진다.

$$J_A(q) = \frac{\partial {}^c p_o}{\partial q} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 & l_4 \sin q_2 \\ l_1 \cos q_1 - l_4 \cos q_2 & \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

한편 ZYZ 오일러 각에 대하여 카메라의 각속도와 오일러 각에 대한 관계를 나타내는 변환 행렬 $T(q)$ 는 다음과 같다.

$$T(q) = \begin{bmatrix} 0 & -\sin(-\pi + q_2) & 0 \\ 0 & \cos(-\pi + q_2) & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

로봇 좌표계를 기준으로 하는 카메라 좌표계의 회전 행렬 R_c^T 는 다음과 같이 주어진다.

$$R_c^T = \begin{bmatrix} -\cos q_2 & -\sin q_2 & 0 \\ \sin q_2 & -\cos q_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

식 (26), 식 (27), 식 (28)과 식 (29)를 이용하여 식 (12)에서 정의된 자코비안 $J(q, \xi, Z)$ 을 계산하면 다음과 같이 된다.

$$J(q, \xi, Z) = \begin{bmatrix} -\frac{F_1 c_2 l_1 s_1}{Z} + \frac{F_1 s_2 l_1 c_1}{Z} & \frac{F_1 c_2 l_4 s_2}{Z} - \frac{F_1 s_2 l_4 c_2}{Z} + \frac{F_1}{F_2} y \\ \frac{F_2 s_2 l_1 s_1}{Z} + \frac{F_2 c_2 l_1 c_1}{Z} & -\frac{F_2 s_2 l_4 s_2}{Z} - \frac{F_2 c_2 l_4 c_2}{Z} + \frac{F_2}{F_1} x \end{bmatrix} \quad (30)$$

여기서 $c_1 = \cos q_1, c_2 = \cos q_2, s_1 = \sin q_1, s_2 = \sin q_2$ 이다.

시뮬레이션에 사용된 로봇 매니퓰레이터의 파라미터는 표 1과 같고 카메라 모델의 파라미터는 표 2와 같다.

각 관절의 초기 위치값은 각각 $q_1 = \pi/2$ (rad), $q_2 = \pi$ (rad)으로 정하였으며 설계 이득은 $K=5I, K_v=800I, K_i=100I$ 로 정하였다. 목표물의 초기 이미지 평면상의 특징점 좌표는 $\xi^T = [100 \ 100]^T$ 으로 하고 원하는 특징점의 좌표는 $\xi_d^T = [0 \ 0]^T$ 로 설정하였다.

표 1. 로봇 매니퓰레이터 파라미터
Table 1. Parameters of the robot manipulator.

설명	기호	값	단위
링크1의 무게	m_1	5.5	Kg
링크2의 무게	m_2	0.3	Kg
링크3의 무게	m_3	0.2	Kg
링크4의 무게	m_4	4.5	Kg
링크1의 길이	l_1	0.350	m
링크2의 길이	l_2	0.140	m
링크1의 중심점	l_{c1}	0.175	m
링크2의 중심점	l_{c2}	0.707	m
링크3의 중심점	l_{c3}	0.175	m
링크4의 중심점	l_{c4}	0.250	m
링크1의 관성	I_1	0.04	Kgm^2
링크2의 관성	I_2	0.003	Kgm^2
링크3의 관성	I_3	0.001	Kgm^2
링크4의 관성	I_4	0.06	Kgm^2
중력가속도	g	0.8	m/sec^2

표 2. 카메라 파라미터
Table 2. Parameters of the camera.

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

그림 4의 시뮬레이션 결과는 관절 1과 관절 2의 속도의 추종 오차로서 약 0.015초 내에 0으로 수렴함을 보여주고 있다. 그림 5는 이미지 평면상에 있는 특징점 x 와 y 가 초기위치로부터 원하는 좌표로 추종하도록 할 때의 추종오차 결과로서 관절의 속도 추종 오차와 마찬가지로 약 0.015초 이내에 원하는 좌표로 수렴함을 보여주고 있다. 이와 같은 이미지 평면상의 특징점의 궤적을 그림 6에 나타내었다. 그림 7에는 시뮬레이션 동안 각 관절에 입력되는 토크 제어입력을 나타내었다.

2. 실험

제한된 제어 기법을 적용하는 실험은 그림 8과 같이 4관절 2자유도를 가지는 삼성 Faraman-As1 용접용 로

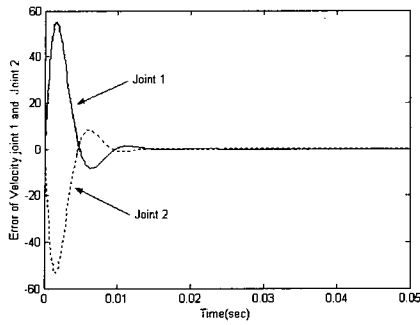


그림 4. 관절 1과 2의 속도 오차
Fig. 4. Velocity errors of joint 1 and 2.

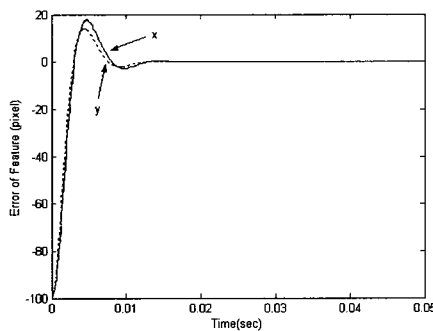


그림 5. 특징점의 추종오차
Fig. 5. Tracking errors of feature point.

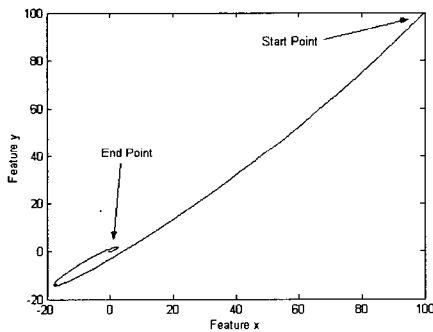


그림 6. 특징점의 궤적
Fig. 6. Feature point trajectory in image plane.

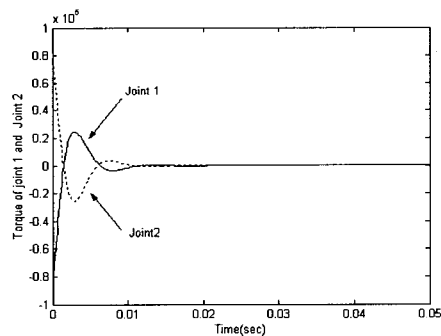


그림 7. 관절 1과 2의 토크 입력
Fig. 7. Torque inputs applied to joint 1 and 2.

봇을 대상으로 하였다. 로봇 제어 시스템 구성은 그림 9와 같이 Pentium II MMX의 주 컴퓨터에 MMC(Multi motion controller)가 장착되고 로봇의 말단부에 장착된 CCD 카메라로부터 입력되는 영상정보를 처리하기 위한 이미지 보드는 Matrox 보드를 사용하였다. CCD 카메라는 초점거리가 16mm인 Pulnix TM7 1/2"를 사용하였으며 엔코더에 의해 측정되는 관절의 위치 및 속도정보는 MMC 보드를 통하여 피드백 되도록 하였다.

실험에 사용된 설계 이득은 각각 $K=5I$, $K_v=1000I$, $K_i=100I$ 로 설정하였으며 각 관절의 초기 위치값은 각각 $q_1=\pi/2(rad)$, $q_2=\pi(rad)$ 으로 정하였다. 초기 이미지 평면상의 좌표는 $\xi^T=[104 \ 104]^T(pixel)$ 로 정하고 원하는 특징점의 좌표는 $\xi_d^T=[0 \ 0]^T(pixel)$ 로 설정하였다.

그림 10은 관절 1과 2에서 원하는 속도에 대한 관절의 추종 오차로 엔코더를 통해 측정되는 위치각으로부터 속도값을 얻기 때문에 이 과정에서 나타나는 채터0링이 있지만 약 0.25초 후에 오차가 0으로 수렴함을 알 수 있다.

그림 11은 이미지 평면상에서 특징점이 원하는 특징점으로 추종하는 추종오차를 나타낸 것으로 역시 약 0.25초 후에 0으로 수렴함을 보여주고 있으며 그림 12는 특징점의 궤적이다. 그림 13은 관절 1과 2에 가해지는 토크 입력을 나타내었다. 비주얼 피드백을 가지는 제한된

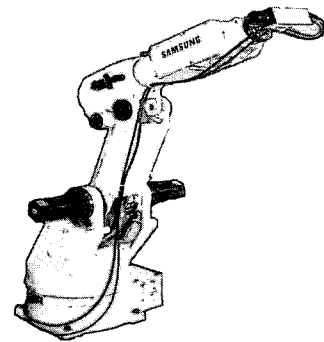


그림 8. 실험 로봇
Fig. 8. Experimental robot.

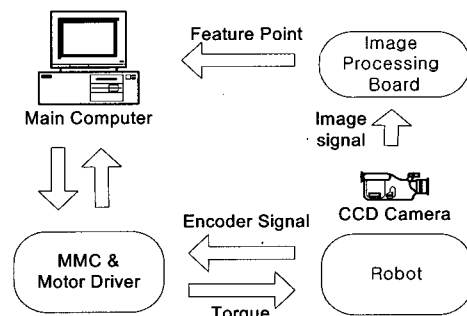


그림 9. 로봇 제어시스템 블록도
Fig. 9. Block diagram of robot control system.

제어기법을 적용한 실험결과는 컴퓨터 시뮬레이션과 유사한 결과를 얻으며 실제 적용 가능성을 보여주고 있다.

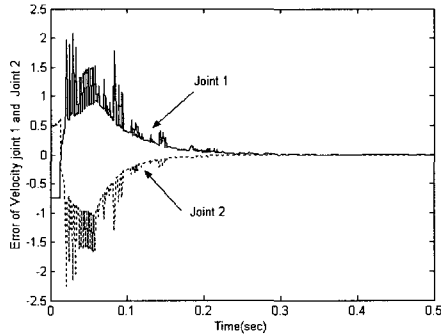


그림 10. 관절 1과 2의 속도 오차
Fig. 10. Velocity errors of joint 1 and 2.

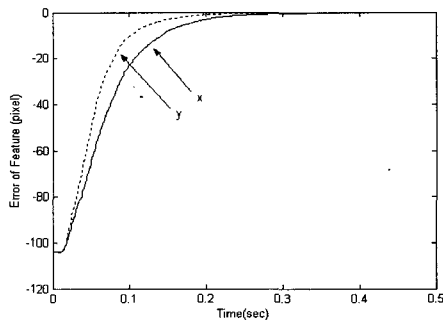


그림 11. 특징점의 추종 오차
Fig. 11. Tracking errors of feature point.

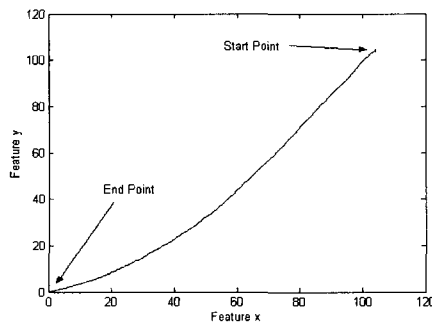


그림 12. 특징점의 궤적
Fig. 12. The trajectory of feature point.

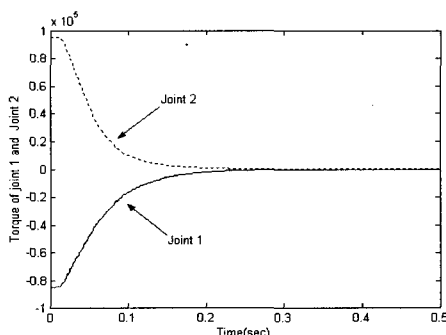


그림 13. 관절 1과 2의 토크 입력
Fig. 13. Torque inputs applied to joint 1 and 2.

V. 결 론

본 논문에서는 로봇 매니플레이터의 말단부에 장착된 카메라로부터 얻어지는 특징점을 이용하는 특징점 기반 로봇 구동 제어시스템을 설계하였다. 대상 목표물에 대한 이미지 평면상의 특징점을 원하는 특징점 좌표로 이동시키기 위한 원하는 관절 속도를 생성하고, 이 속도정보를 사용하는 제어입력은 제어 성능을 개선시키도록 로봇의 동역학 특성이 반영되도록 하였다.

제안된 폐루프 제어 시스템의 안정도는 Lyapunov 기법을 적용하여 증명하였다. 2-링크 로봇 매니플레이터에 대한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 기법이 로봇 매니플레이터의 구동제어에 적용될 수 있는 제어성능을 가짐을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, "A Tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 12, no. 5, Oct. 1996.
- [2] R. Kelly, "Robust asymptotically stable visual servoing of planar robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 12, no. 5, pp. 759-766, Oct. 1996.
- [3] 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.
- [4] Y. Shen, Y. H. Liu, and K. Li, "Asymptotic motion control of robot manipulators using uncalibrated visual feedback," *Proc of the 2001 IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 241-246, Seoul, Korea, May 2001.
- [5] P. J. Sequeira Goncalves and J. R. Caldas Pinto, "Dynamic Visual Servoing of Robotic Manipulators," *IEEE Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation*, Vol. 2, pp. 560-565, Sept. 2003.
- [6] M. R. Akella, "Vision-Based Adaptive Tracking Control of Uncertain Robot Manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 21, pp. 747-753, Aug. 2005.
- [7] I. Cervantes, R. Garrido, J. Alvarez-Ramirez, and A. Martinez, "Vision-based PID control of planar robots," *IEEE Trans. on Mechatronics*, Vol. 9, pp. 132-136, March 2004.

- [8] R. Kelly, J. Moreno, and F. Perez, "Manipulator motion control in operational space using joint velocity inner loops," *Proc. of the 40th IEEE CDC*, pp. 2416-2417, Orlando, Florida, USA, Dec. 2001.
- [9] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, New York: John Wiley, 1989.
- [10] L. Sciacivco and B. Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, Springer, 2001.

 저 자 소 개



지 민 석 (정회원)
 1995년 한국항공대학교 항공전자
 공학과 학사
 1997년 한국항공대학교 항공전자
 공학과 석사
 1997년~2000년 (주)한국레이컴
 기술연구소 근무

2000년~2002년 (주)휴니드테크놀러지스
 기술연구소 근무

2002년~현재 한국항공대학교 항공전자공학과
 대학원 박사 과정

<주관심분야 : 로봇비전, 로봇제어, 모터제어>



김 진 수 (학생회원)
 2004년 한국항공대학교 항공전자
 공학과 학사
 2004년~현재 한국항공대학교
 항공전자공학과 석사 과정

<주관심분야 : 로봇비전, 강인제어>



이 영 찬 (정회원)
 1997년 한국항공대학교 항공전자
 공학과 학사
 1999년 한국항공대학교 항공전자
 공학과 석사
 2004년 한국항공대학교 항공전자
 공학과 박사

2004년~현재 (주)제일 반도체 사업부 근무.

<주관심분야 : 로봇비전, 로봇제어, 강인제어>



이 강 응 (정회원)
 1980년 한국항공대학교 항공전자
 공학과 학사
 1982년 서울대학교 전자공학과
 석사
 1983년~1984년 삼성전자 컴퓨터
 개발부 근무

1989년 서울대학교 전자공학과 박사

1994년~1995년 미시간주립대학교 방문교수

1989년~현재 한국항공대학교 항공전자 및
 정보통신공학부 교수

<주관심분야 : 로봇제어, 비선형제어>