

이미지 기반 시각 구동을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 관절 속도 제어

이 영 찬 , 지 민 석 , 이 강 웅
한국항공대학교 항공전자공학과
전화 : 02-3158-0166/ 핸드폰 : 017-348-0502

Robot Manipulator Joint Velocity Control Using Image-based Visual Servoing

Young Chan Lee, Min Seok Jie, Kang Woong Lee
Dept. of Avionics, HanKuk Aviation University
E-mail : tianai@korea.com

Abstract

This paper presents a robot manipulator kinematic motion control scheme based on velocity feedback loop. The desired joint velocity is obtained by the feature-based visual servoing and is used in the joint velocity control loop system for trajectory control of the robot manipulator. The asymptotic stability of the closed loop system is shown by the Lyapunov method. Effectiveness of the proposed method is shown by simulation and experimental results on a robot manipulator with two degree of freedom.

I. 서론

말단부에 카메라가 장착된 로봇 매니퓰레이터의 작업은 보통 작업 공간상에서 로봇 말단부의 자세 제어에 필요한 원하는 궤적(desired trajectory)으로 명시된다. 특히 비전 시스템을 적용한 로봇 매니퓰레이터의 시각 구동 제어 구조는 카메라와 물체 사이의 상대적인 위치와 자세에 의해 표현되는 위치를 이용하는 구조(position-based)와 이미지 평면상에 주어지는 특징점을 이용하는 구조(feature-based)로 분류된다. 또한 로봇의 서보 제어기에 내부 궤환 루프 없이 영상 궤환

정보만을 이용하는 단일 루프 구조와 내부에 별도의 궤환 루프를 가지는 이중 루프 구조가 있다. 단일 루프 구조는 빠른 비전 샘플링을 요구하는 반면 이중 루프 구조는 상위 제어기에 포함되는 비전 시스템에서 서보 제어기의 기준 입력과 기준 궤적을 만들고 하위 제어기에서는 이것을 추종하도록 함으로써 시스템의 안정성을 보장하기 때문에 비교적 느린 비전 샘플링 시간으로도 구현이 가능하다[1]. 한편 Kelly[2]는 물체의 위치와 자세가 주어질 경우 동역학 제어기에서 원하는 관절 속도를 생성한 후 관절 속도 제어부에서 이를 추종하는 이중 루프 구조를 제안하였다. 하지만 카메라를 통하여 들어온 2차원의 위치 정보를 이용하여 3차원의 좌표로 예측할 경우, 이 과정에서 포함될 수 있는 잡음에 취약하다는 단점이 있다. 본 논문은 [2]의 동역학 제어부 구조를 바탕으로 영상 평면상의 특징점을 원하는 특징점으로 이동시키기 위하여 원하는 관절 속도를 생성시키고 이를 추종하기 위한 동역학 제어부를 가지는 이중 루프 구조를 설계한다. 제안된 제어기의 안정성과 수렴성은 Lyapunov 기법을 적용하여 해석한다. 5-링크 2 자유도를 가지는 로봇 매니퓰레이터를 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 제어 성능을 확인하고 실용될 수 있음을 입증하고 한다.

II. 로봇 모델과 카메라 모델

마찰이 무시된 n -링크 강체 로봇의 동역학 방정식은 다음과 같다[3].

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

여기서, $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 은 각각 관절의 위치, 속도, 가속도 벡터이고, $\tau \in R^n$ 은 토크 벡터이다. $M(q) \in R^{n \times n}$ 은 관성행렬로 대칭이고 양한(positive definite)이다. 또한 벡터 $C(q, \dot{q})\dot{q} \in R^n$ 은 구심력과 코리올리시힘이고 $G(q) \in R^n$ 은 중력 벡터이다. 마찰은 무시된다. 로봇 동역학 방정식의 성질에서 시스템의 안정성 증명에 사용되는 중요한 관계는 다음과 같다.

$$M(q) - 2C(q, \dot{q}) = 0 \quad (2)$$

로봇 매니플레이터의 관절 속도 \dot{q} 와 로봇의 말단부의 선속도 v_c 와 각속도 ω_c 는 같은 관계를 만족한다[4].

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

여기서, $J_g(q)$ 는 말단부의 방향을 로봇 좌표계에 일치시키는 변환행렬 $T(q)$ 와 말단부의 위치를 로봇의 관절에 대하여 미분함으로써 얻을 수 있는 $J_A(q)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J_g(q) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} \frac{\partial p_c}{\partial q} = J_A(q) \frac{\partial p_c}{\partial q} \quad (4)$$

로봇 매니플레이터의 말단부에 카메라가 장착된 비전 시스템에서 로봇 좌표계에 고정된 카메라 좌표계의 X, Y, Z 축의 단위 벡터를 각각 x_c, y_c, z_c 라 하면 로봇 좌표계를 기준으로 할 때 카메라 좌표계의 회전 행렬은 다음과 같다.

$$R_c = [x_c \ y_c \ z_c] \quad (5)$$

로봇 좌표계의 원점을 기준으로 p_o 에 목표물이 놓여 있고 카메라는 p_c 에 위치하며 카메라 좌표계에서 목표물의 위치를 ${}^c p_o$ 라 할 때 이들 사이의 관계는 다음과 같다.

$$p_o = p_c + R_c {}^c p_o \quad (6)$$

카메라 좌표계에서 ${}^c p_o = [X \ Y \ Z]^T$ 에 위치한 목표물을 초점 거리가 f 인 이미지 평면에 투영시킬 때 이미지 평면상의 특징점은 다음과 같이 표시된다.

$$\xi = [x \ y]^T = \left[\frac{Xf}{aZ} \ \frac{Yf}{\beta Z} \right]^T \quad (7)$$

여기서, a, β 는 각각 단위 미터당 X, Y 축의 화소(pixel) 비례 계수이다. 식 (7)을 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{\xi} = f \begin{bmatrix} \frac{1}{aZ} & 0 & -\frac{X}{aZ^2} \\ 0 & \frac{1}{\beta Z} & -\frac{Y}{\beta Z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (6)으로부터 카메라 좌표계에서 나타낸 목표물의

위치 ${}^c p_o = [X \ Y \ Z]^T$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^c p_o = {}^c R_w ({}^w p_o - {}^w p_c) \quad (9)$$

여기서, ${}^c R_w$ 는 카메라 좌표계에 대한 로봇 좌표계의 회전 행렬이다. 식 (9)를 미분하고 식 (8)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{\xi} = J_{img}(q, \xi, Z) \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, $J_{img}(q, \xi, Z)$ 는 다음과 같다.

$$J_{img}(q, \xi, Z) = J_{img}(\xi, Z) \begin{bmatrix} R_c^T & 0 \\ 0 & R_c^T \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$J_{img}(\xi, Z) = \begin{bmatrix} -\frac{F_1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & \frac{xy}{F_2} & -\frac{F_1^2 + x^2}{F_1} & \frac{F_1}{F_2} y \\ 0 & -\frac{F_2}{Z} & \frac{y}{Z} & \frac{F_2 + y^2}{F_2} & -\frac{xy}{F_1} & -\frac{F_2}{F_1} x \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, $F_1 = f / a$, $F_2 = f / \beta$ 이다.

식 (10)에 식 (3)과 식 (4)를 대입하면 특징점의 미분은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= J_{img}(q, \xi, Z) \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T(q) \end{bmatrix} \frac{\partial p_c}{\partial q} \dot{q} \\ &= \mathcal{J}(q, \xi, Z) \dot{q} \end{aligned} \quad (13)$$

III. 관절 속도 제어기

카메라를 사용하는 로봇 제어에서는 목표물과 로봇의 위치를 영상 평면상에서 영상 특징점으로 나타내고 이들 특징점이 일치하도록 로봇 매니플레이터를 제어한다. 영상 평면상에서 현재 특징점 ξ 와 원하는 특징점 ξ_d 사이의 오차와 관련된 함수를 다음과 같이 정한다.

$$\tilde{\xi} = Q(\xi_d - \xi) \quad (14)$$

Q 는 시스템을 안정화시키는 행렬이고 다음에 정한다. 식 (14)의 함수를 시간에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{\xi}} = Q(\dot{\xi}_d - \dot{\xi}) + Q(\xi_d - \xi) \quad (15)$$

식 (15)에 식 (13)을 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{\tilde{\xi}} = Q(\dot{\xi}_d - \mathcal{J}(q, \xi, Z)\dot{q}) + Q(\xi_d - \xi) \quad (16)$$

여기서, Q 를 다음과 같이 $J_{imgR}(q, \xi, Z)$ 의 의사역행렬(pseudo inverse matrix)로 정한다.

$$Q = (J_{imgR}(q, \xi, Z) \mathcal{J}(q, \xi, Z))^T \mathcal{J}(q, \xi, Z)^T \quad (17)$$

원하는 관절 속도 ω_d 와 로봇 관절 속도와의 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{\omega} = \omega_d - \dot{q} \quad (18)$$

식 (17)과 식 (18)을 식 (16)에 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{\xi}} = Q\xi_d - \omega_d + \tilde{\omega} + Q(\xi_d - \xi) \quad (19)$$

식 (19)에서 원하는 관절 속도 ω_d 를 다음과 같이 정한다

다.

$$\omega_d = K\xi + Q\xi_d + Q(\xi_d - \xi) \quad (20)$$

식 (20)을 식 (19)에 대입하면 다음과 같다.

$$\ddot{\xi} = -K\ddot{\xi} + \ddot{\omega} \quad (21)$$

여기서, K 는 설계 이득이며 양한으로 정한다. 원하는 관절 속도 ω_d 를 추종하기 위한 동역학 제어 시스템은 그림 1과 같이 구성하며 토크 입력을 다음과 같이 정한다.

$$\tau = M(q)\dot{\omega}_d + C(q, \dot{q})\omega_d + g(q) + K_v\ddot{\omega} + K_i\sigma \quad (22)$$

$$\sigma = \ddot{\omega}$$

여기서, K_v 와 K_i 는 양한의 설계 이득 행렬이다. 식 (22)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \sigma \\ \ddot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(q)^{-1}[-C(q, \dot{q})\ddot{\omega} - K_v\ddot{\omega} - K_i\sigma] \\ \sigma \end{bmatrix} \quad (23)$$

식 (23)의 상태방정식은 유일 평형점이 원점에 있는 비선형 시스템이 된다. 안정성을 증명하기 위하여 Lyapunov 후보 함수를 다음과 같이 정한다.

$$V = \frac{1}{2} \ddot{\omega}^T M(q) \ddot{\omega} + \frac{1}{2} \sigma^T K_i \sigma \quad (24)$$

식 (24)을 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \ddot{\omega}^T M(q) \dot{\ddot{\omega}} + \frac{1}{2} \dot{\ddot{\omega}}^T M(q) \ddot{\omega} + \sigma^T K_i \dot{\sigma} \\ &= \ddot{\omega}^T (-C(q, \dot{q})\ddot{\omega} - K_v\ddot{\omega} - K_i\sigma) \\ &\quad + \frac{1}{2} \dot{\ddot{\omega}}^T M(q) \ddot{\omega} + \sigma^T K_i \dot{\sigma} \\ &= -K_v \|\ddot{\omega}\|^2 \end{aligned}$$

여기서, 설계 이득 행렬 K_v 는 양한이므로 $\dot{V} < 0$ 이 된다.

따라서 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $\ddot{\omega} \rightarrow 0$ 이 된다.

식 (18)에서 $\ddot{\omega} \rightarrow 0$ 이면 $\dot{\xi} \rightarrow 0$ 이 되어 특징점 ξ 는 원하는 특징점 ξ_d 를 추종한다.

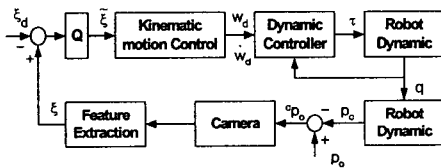


그림 1 제어기의 구조

IV. 모의실험 및 실험

제안한 구조를 가지는 제어기의 성능을 검증하기 위하여 2개의 회전 관절을 가지는 로봇 매니퓰레이터에 대한 모의실험을 수행하였다. 말단부와 카메라의 위치가 동일하다고 가정하였으며 로봇 매니퓰레이터의 동

역학 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & C_{12} \\ C_{12} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1(q) \\ G_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

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

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

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

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

$$C_{12}(q, \dot{q}) = -C_{21}(q, \dot{q})$$

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

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

표 2. 로봇 매니퓰레이터의 파라미터

m_1	5.5Kg	l_2	0.140m	I_1	0.04Kgm ²
m_2	0.3Kg	l_{c1}	0.175m	I_2	0.003Kgm ²
m_3	0.2Kg	l_{c2}	0.070m	I_3	0.001Kgm ²
m_4	4.5Kg	l_{c3}	0.175m	I_4	0.06Kgm ²
l_1	0.350m	l_{c4}	0.250m		

모의 실험에 사용된 로봇 매니퓰레이터의 파라미터는 표 1과 같고 설계 이득은 $K=5I$, $K_v=10I$, $K_i=10I$ 로 설정하였다. 초점 거리는 $f=0.016m$ 이고, 단위 화소 비례 계수 α 는 6.941×10^{-6} , β 는 9.425×10^{-6} 이다.

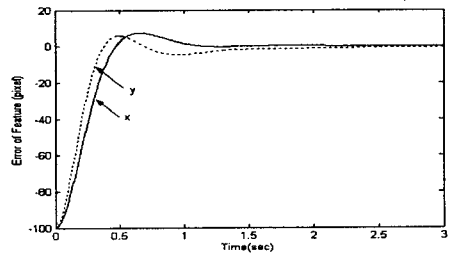


그림 2. 특징점의 추종 오차

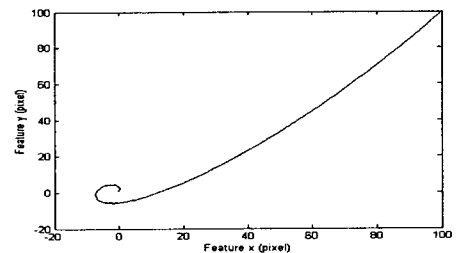


그림 3. 특징점의 궤적

관절 1과 관절 2의 초기 위치값은 각각 $\pi/2$ (rad),

π (rad)으로 정하였으며 대상물의 초기 이미지 평면상의 좌표 $\xi^T = [100 \ 100]^T$, 원하는 특징점 좌표 $\xi_d^T = [0 \ 0]^T$ 로 설정하였다. 그림 2와 그림 3은 각각 이미지 평면상에서의 특징점 x 와 y 의 추종오차와 이미지 평면상에서의 특징점 궤적을 나타내는 모의실험 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 특징점의 추종 오차는 초기에 약간의 오버슈트가 있었지만 정상상태 오차는 거의 영에 근접하게 감소하였음을 알 수 있다.

실험을 위한 비전 시스템은 크게 CCD 카메라와 영상 정보의 이진화 처리를 담당하는 이미지 프로세싱 보드, 주컴퓨터의 제어 신호를 로봇의 모터에 전달하는 MMC(Multi motion controller) 부분과 로봇 매니플레이터로 분류된다. CCD 카메라는 로봇의 말단부에 장착되어 실험을 수행하였다. 전체적인 비전 시스템의 블록도는 그림 4에 나타내었다.

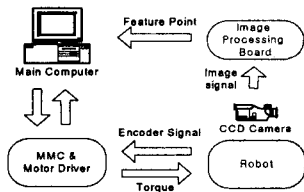


그림 4. 비전 시스템의 블록도

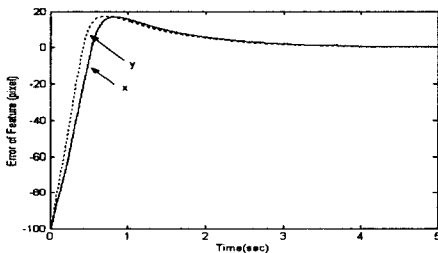


그림 5. 특징점의 추종오차

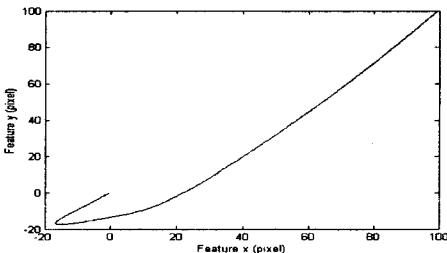


그림 6. 특징점의 궤적

실험에 사용된 설계 이득은 각각 $K=20I$, $K_v=50I$,

$K_r=50I$ 이다. 대상물의 초기 이미지 평면상의 좌표 $\xi^T = [100 \ 100]^T$, 원하는 특징점 좌표 $\xi_d^T = [0 \ 0]^T$ 로 설정하였다. 그림 5는 이미지 평면상에서의 특징점 x, y 오차이며, 그림 6은 이미지 평면상에서의 특징점 궤적을 나타내는 실험 결과이다. 모의 실험의 결과와 마찬가지로 초기에 약간의 오버 슈트가 있었지만 정상상태 오차가 거의 영으로 근접하게 감소함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 말단부에 카메라가 장착된 로봇 매니플레이터에 대하여 대상 물체의 영상 정보로부터 획득한 영상 평면상의 특징점을 이용하였다. 대상 물체의 특징점을 원하는 특징점 좌표로 이동시키기 위하여 카메라의 위치에 대한 자코비안을 이용해서 로봇의 원하는 관절 속도를 생성하였다. 동역학 제어부에서는 생성된 관절 속도를 추종하도록 하는 제어 입력을 설계하였으며 제안된 제어기의 안정성 및 수렴성은 Lyapunov 기법을 적용하여 증명하였다. 비전 시스템을 이용한 로봇 매니플레이터에 대한 모의실험결과에서 정상상태 오차를 영 가까이 줄일 수 있음을 보였으며 실험에서도 같은 결과를 얻었기 때문에 제안된 기법이 실용 로봇 제어에 적용될 수 있음을 보였다.

참고문헌

- [1] Koich. Hashimoto et. al, "Manipulator Control with Image-Based Visual Servo," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.2267-2272, 1991.
- [2] Rafael Kelly, Javier Moreno and Fermin Perez, "Manipulator Motion Control in Operational Space Using Joint Velocity Inner Loops," *IEEE Proc. on Decision and Control*, pp 2416-2417, 2001.
- [3] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, New York:John Wiley, 1989.
- [4] L. Sciavicco and B. Siciliano, *Modeling and Control of Robot Manipulators*. New York : Mc GrawHill, 1996.
- [5] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control, 2nd ed.* Reading, MA : Addison-Wesley, 1989.