

논문 2004-41SC-1-2

비전 시스템을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 강인 제어기 설계

(Design of a Robust Controller of Robot Manipulators Using Vision System)

이 영 찬*, 지 민 석*, 백 중 환**, 이 강 웅***

(Young Chan Lee, Min Seok Jie, Joong Hwan Baek, and Kang Woong Lee)

요 약

본 논문에서는 특징점 기반 시각 구동 제어 시스템을 이용하여 파라미터 불확실성을 가지는 로봇 매니퓰레이터에 대한 강인 제어를 제안한다. 시스템 내부 서브 루틴인 동역학 제어부에 적분 작용을 포함시켜 파라미터 변동에 의한 로봇 매니퓰레이터의 정상 상태 오차를 개선하기 위하여 시스템 내부 서브 루틴인 동역학 제어부에 적분 작용을 포함되도록 하였다. 이 적분 작용은 이미지 평면상의 특징점 추정 오차도 개선시킨다. 폐루프 시스템의 안정도는 Lyapunov 기법에 의하여 해석한다. 5링크 2 자유도의 로봇에 적용한 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 제어기법의 실용성을 보인다.

Abstract

In this paper, we propose a robust controller for robot manipulators with parametric uncertainties using feature-based visual servo control system. In order to improve trajectory error of the robot manipulators due to the parameter variation, integral action is included in the dynamic control part in inner subroutine of the control system. This integral action also reduces feature error in the steady state. The stability analysis of the closed-loop system is shown by the Lyapunov method. The effectiveness of the proposed method is shown by simulation and experimental results on the 5 link robot manipulator with two degree of freedom.

Keywords : Vision system, Robust control, Robot manipulator, Integral control

I. 서 론

가변적인 작업환경에서 로봇을 작동시키는 경우 비전 시스템을 이용하면 로봇 매니퓰레이터의 위치 및 속도제어에서 성능 향상을 기대할 수 있다. 비전 시스템을 포함하는 로봇 매니퓰레이터의 제어는 원하는 궤적이 공간 좌표계로 주어지는 위치기반(position-

based)구조와 카메라의 이미지 평면상에 주어지는 특징기반(feature-based)구조로 나눌 수 있다^[1]. 위치 기반 구조는 카메라에서 획득된 2차원의 위치정보를 이용하여 3차원의 좌표를 얻기 때문에 잡음에 약하다는 단점이 있다. 내부에 별도의 궤환 루프를 가지지 않는 특징기반 구조는 비전 시스템에서 얻어진 정보를 바로 이용하기 때문에 짧은 샘플링 시간을 요구하며 빠른 동작을 요구하는 경우에는 제어능력이 약화되는 문제점이 있다. 특징기반 구조이면서 동역학 제어부에 별도의 궤환 루프를 가지는 구조의 비전 시스템은 이미지 평면상의 특징점을 이용하는 입력에 의해 로봇 매니퓰레이터가 추종해야 하는 궤적을 생성시킨다. 이와 같이 생성된 궤적은 로봇 매니퓰레이터의 기준 입력이 되고 동역학 제어기는 기준 입력을 추종하도록 토크를 제어

* 학생회원, 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과
(Dept. of Avionics, Graduate School, Hankuk Aviation Univ.)

** 정회원, 한국항공대학교 정보통신공학과
(Dept. of Information and Telecommunication, Hankuk Aviation Univ.)

*** 정회원, 한국항공대학교 항공전자공학과
(Dept. of Avionics, Hankuk Aviation Univ.)

접수일자: 2002년12월3일, 수정완료일: 2003년10월20일

한다. 하지만 외부 서부 루틴의 성능은 내부 관절 서부 루틴의 나쁜 성능으로 인해 저하 될 수 있다.

한편, 로봇 매니퓰레이터 제어에 있어서 부하 변동, 마찰, 백래시, 외란 등과 같은 불확실성은 시스템의 내부 관절 서부 루틴의 성능을 악화시키게 된다^[2]. 시스템의 불확실성으로 인한 성능 악화를 개선하기 위한 여러 강인 제어 기법 중 포화 강인 제어기법^[3]은 파라미터 변동이나 외란에도 불구하고 위치 궤적 추종오차가 허용오차 범위 내로 수렴되도록 한다. Spong^[4]은 로봇의 동특성 모델의 파라미터의 선형적 성질을 이용하는 새로운 강인 제어기법을 제안하였다. 여기서 링크의 질량과 관성 모멘트와 같은 시스템 파라미터들의 불확실성의 범위만을 이용하여 제어시스템을 설계하였다. 그러나 파라미터 변동범위를 정확히 알기 어렵기 때문에 변동 범위 폭을 크게 선정하게 되는데 그 결과 제어입력이 커질 뿐만 아니라 정상상태에서 위치 궤적의 추종오차가 커지게 된다. 정상상태 오차를 줄이기 위한 방법으로는 제어입력에 적분작용이 포함되도록 하는 것이다^[5].

본 논문은 로봇의 말단부에 카메라가 장착되어 있고 로봇 말단부로부터 목표물까지의 거리가 알려진 값으로 가정된 비전 시스템에서 카메라를 통하여 획득한 이미지 평면상의 특징점을 원하는 곳으로 이동시키기 위하여 로봇의 말단부를 원하는 위치로 이동시키기 위한 제어 법칙을 설계한다. 또한 설계된 제어 입력을 추종하기 위하여 로봇의 동역학 제어부를 별도로 구성하고 로봇 매니퓰레이터 모델이 가지는 파라미터의 불확실성으로 인한 내부 관절 서부 루틴의 성능 악화를 개선하기 위한 강인 제어기법을 제안한다. 제안된 강인 제어기법은 Spong이 제안한 강인 제어기 구조를 기반으로 로봇의 원하는 궤적을 추종하는 과정에서 발생하는 정상상태 오차를 개선하기 위하여 오차 관련 함수의 적분항을 추가한 제어를 설계한다. II장에서는 카메라 모델로부터 이미지 평면상의 특징점과의 관계를 나타내는 이미지 자코비안에 대하여 논하고 III장에서는 특징점을 원하는 위치로 이동시키기 위한 제어 법칙을 제안하며 IV장에서는 III장에서 제안된 기준 입력을 추종하는 강인 제어기를 설계하고 제안된 제어 시스템의 안정도 및 수렴성은 Lyapunov 기법을 적용하여 해석한다. V장에서 제안된 제어기의 성능을 검증하기 위하여 5-링크 2 자유도를 가지는 로봇 매니퓰레이터를 대상으로 Spong이 제안한 제어기와 본 논문에서 제안한 강인 제어기를

비교하는 컴퓨터 모의 실험과 실험을 수행함으로써 제안된 강인 제어 기법이 파라미터 불확실성을 가지는 로봇 매니퓰레이터 제어에 적용될 수 있음을 입증하고자 한다.

II. 카메라 모델

로봇 매니퓰레이터의 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 회전행렬은 다음과 같다.

$$R_c = [x_c \ y_c \ z_c] \quad (1)$$

로봇 좌표계의 원점을 기준으로 목표물은 p_o 에 위치하고 카메라는 p_c 에 위치하는데 카메라 좌표계를 기준으로 할 때 목표물의 위치를 ${}^c p_o$ 라 하면 이들 사이의 관계는 다음과 같다.

$$p_o = p_c + R_c \cdot {}^c p_o \quad (2)$$

카메라 좌표계에서 ${}^c p_o = [X \ Y \ Z]^T$ 에 위치한 목표물 초점 거리가 f 인 이미지 평면에 투영시킬 때 이미지 평면상의 특징점(feature point) ξ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\xi = [x \ y]^T = \left[\frac{Xf}{\alpha Z} \ \frac{Yf}{\beta Z} \right]^T \quad (3)$$

여기서, α, β 는 각각 단위 미터당 X, Y 축의 화소(pixel) 비례 계수이다.

식 (3)을 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\xi = f \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha Z} & 0 & -\frac{X}{\alpha Z^2} \\ 0 & \frac{1}{\beta Z} & -\frac{Y}{\beta Z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (2)로부터 카메라 좌표계에 나타낸 목표물의 위치 ${}^c p_o = [X \ Y \ Z]^T$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, ${}^c R_w$ 는 카메라 좌표계에 대한 로봇 좌표계의 회전 행렬이다. 목표물이 움직이지 않는다고 가정하고 식 (5)를 미분한 후 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\xi = \begin{bmatrix} -\frac{F_1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & \frac{xy}{F_2} & -\frac{F_1^2+x^2}{F_1} & \frac{F_1}{F_2}y \\ 0 & -\frac{F_2}{Z} & \frac{y}{Z} & \frac{F_2+y^2}{F_2} & -\frac{xy}{F_1} & -\frac{F_2}{F_1}x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c v_c \\ {}^c \omega_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $F_1=f/a$, $F_2=f/\beta$ 이며 ${}^c v_c$, ${}^c \omega_c$ 는 카메라 좌표계에서의 카메라의 선속도, 각속도이다. 로봇 좌표계에서의 카메라의 선속도, 각속도 $u=[v_c^T \omega_c^T]^T$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} {}^c v_c \\ {}^c \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c^T & 0 \\ 0 & R_c^T \end{bmatrix} u \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\xi = J_{img}(q, \xi, Z)u \quad (8)$$

여기서, $J_{img}(q, \xi, Z)$ 은 다음과 같다.

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

III. 기준 궤적 생성

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

$$\xi = Q(\xi - \xi_d) \quad (9)$$

Q 는 시스템을 안정화시키는 행렬로 뒤에서 정하기로 한다. 식 (9)의 함수를 시간에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{\xi} = Q(\dot{\xi} - \dot{\xi}_d) + Q(\xi - \xi_d) \quad (10)$$

식 (10)에 식 (8)을 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{\xi} = QJ_{img}(q, \xi, Z)u - Q\dot{\xi}_d + Q(\xi - \xi_d) \quad (11)$$

식 (11)에서 제어 입력 u 를 다음과 같이 정한다.

$$u = -G\xi + Q\dot{\xi}_d - Q(\xi - \xi_d) \quad (12)$$

여기서 G 는 양한(positive definite)의 설계 이득이고 입력 변수 u 가 극단적으로 커지는 것을 방지하기 위하여 Q 를 다음과 같이 $J_{img}(q, \xi, Z)$ 의 의사역행렬(pseudo inverse matrix)로 정한다.

$$Q = J_{img}^+ = (J_{img}^T J_{img})^{-1} J_{img}^T \quad (13)$$

식 (11)에 식 (12)과 식 (13)을 대입하면 식 (10)의 동적 방정식은 다음과 같이 된다.

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

식 (14)는 $t \rightarrow \infty$ 가 되면 오차 관련 함수 ξ 는 영으로 수렴하게 되는데 수렴속도는 설계이득 G 값에 좌우된다. 이것으로부터 로봇 매니퓰레이터 말단부의 이동속도가 식 (12)의 속도로 정확하게 제어된다면 이미지 평면상의 특징점은 원하는 특징점으로 접근하게 된다. 로봇 매니퓰레이터의 관절의 이동속도와 말단부의 선속도와 가속도의 관계는 다음과 같다^[6].

$$u = \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = J(q) \dot{q} \quad (15)$$

여기서 $J(q)$ 는 카메라의 원점이 로봇 매니퓰레이터의 말단부에 놓여 있다고 가정할 때 로봇 좌표계에서 말단부의 위치를 관절각 q 에 대하여 미분한 것으로 다음과 같다.

$$J(q) = \frac{\partial p_c}{\partial q} \quad (16)$$

이 결과로부터 식 (12)의 입력 변수 u 는 궤적 생성기에서 각 관절의 위치, 속도, 가속도에 대한 궤적으로 변환되어 로봇 동역학 제어기의 기준 궤적 $S_d=(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 로 사용되는데 그림 1과 같은 블록도로 나타낼 수 있다.

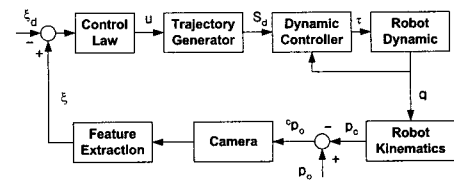


그림 1. 제어 시스템 구조
Fig. 1. Control system structure

IV. 강인 제어기 설계

n -링크 강체 로봇의 동역학 방정식은 다음과 같이 표현된다^[7].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (17)$$

여기서 q, \dot{q}, \ddot{q} 는 각각 관절의 위치, 속도, 가속도 벡터이고, $\tau \in R^n$ 는 입력토크 벡터이다. 관성행렬 $M(q) \in R^{n \times n}$ 은 대칭이고 양한이다. 또한 벡터 $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times 1}$ 은 구심

력과 코리올리스힘이고 $G(q) \in R^{n \times 1}$ 는 중력 벡터이다. 마찰은 무시되는 것으로 가정한다. 식 (17)의 동특성 방정식은 다음의 성질을 가진다.

성질 1 : 행렬 $M(q)-2C(q, \dot{q})$ 은 빗대칭(skew symmetric)이고 다음의 관계를 만족한다.

$$q^T(M(q)-2C(q, \dot{q}))\dot{q}=0, \forall q \in R^n=0 \quad (18)$$

성질 2 : 식 (17)의 동특성 방정식을 다음과 같이 미지의 $p \times 1$ 상수 파라미터 벡터 θ 에 대해 선형으로 나타낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta = \tau \quad (19)$$

여기서, $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 은 $n \times p$ 의 축차행렬(regression matrix)이다. 부하변동이나 외란에 의한 파라미터 불확실성이 유한하다고 가정할 때, 미지의 벡터 θ 를 이미 알고 있는 공칭(nominal) 벡터 θ_0 로 나타내면 다음과 같다.

$$\|\theta - \theta_0\| \leq \rho \quad (20)$$

이와 같이 변동범위가 제한되는 파라미터 변동을 보상하기 위한 강인 제어 입력은 공칭 파라미터로 표현되는 시스템에 적용되는 공칭항과 미지의 파라미터를 보상하는 항의 합으로 표현되며 공칭항은 다음과 같이 정하기로 한다.

$$\begin{aligned} \tau_0 &= M_0(q)\ddot{a} + C_0(q, \dot{a})\dot{v} + G_0(q) - Kr \\ &= Y(q, \dot{a}, \ddot{a})\theta_0 - Kr \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 $M_0(q)$, $C_0(q, \dot{a})$, $G_0(q)$ 는 각각 $M(q)$, $C(q, \dot{a})$, $G(q)$ 의 공칭행렬이고, K 는 양한의 대칭인 제어이득 행렬로 정해져야 한다. 변수 v 와 a 는 오차 벡터 $e(t) = q(t) - q_d(t)$ 와 설계 파라미터 $\lambda > 0$ 에 대하여 다음과 같이 정의된다.

$$v = \dot{a}_d - \lambda e - \lambda^2 \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad a = v \quad (22)$$

또한 함수 r 은 정상상태 오차를 개선하기 위하여 다음과 같이 오차의 적분항이 포함되도록 정의한다.

$$r = e + \lambda e + \lambda^2 \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (23)$$

파라미터 불확실성을 보상하기 위한 강인 제어 입력을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_0 + Y(q, \dot{a}, \ddot{a}, v, a)u \\ &= Y(q, \dot{a}, v, a)(\theta_0 + u) - Kr \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 u 는 파라미터 불확실성을 보상하기 위한 비선형 항이다. 식 (24)을 식 (19)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$M(q)\dot{r} + C(q, \dot{q})r + Kr = Y(q, \dot{q}, v, a)(\theta + u) \quad (25)$$

비선형 제어입력 u 는 다음 정리와 같이 정의함으로써 페루프 시스템의 추종오차가 유한한 범위 내에 있도록 보장할 수 있다.

정리 1: 임의의 상수 $\epsilon > 0$ 인 설계 파라미터에 대하여 비선형 입력 벡터 u 를 다음과 같이 정의하면 식 (24)의 제어입력에 의해 페루프 시스템의 추종오차는 유한한 범위 내에 있도록 할 수 있다.

$$u = \begin{cases} -\rho \frac{Y^T r}{\|Y^T r\|}, & \|Y^T r\| > \epsilon \\ -\frac{Y^T r}{\epsilon}, & \|Y^T r\| \leq \epsilon \end{cases} \quad (26)$$

증명 : 식 (23)으로 정의된 함수 r 은 e , \dot{e} , $\int e$ 의 선형 조합이므로 식 (25)의 평형점 $e=0$, $\dot{e}=0$ 의 안정성은 평형점 $e=0$, $r=0$ 의 안정성과 등가이다. 따라서 시스템의 안정도를 해석하기 위하여 Lyapunov 후보함수를 다음과 같이 정한다.

$$V = \frac{1}{2} r^T M(q) r \quad (27)$$

식 (27)의 양변을 미분하고 식 (25)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} \dot{r}^T M(q) r + \frac{1}{2} r^T \dot{M}(q) r + \frac{1}{2} r^T M(q) \dot{r} \\ &= r^T M(q) \dot{r} + \frac{1}{2} r^T \dot{M}(q) r \\ &= -r^T K r + r^T Y(q, \dot{q}, v, a)(\theta + u) \end{aligned} \quad (28)$$

여기서, $\|Y^T r\| > \epsilon$ 이면 식 (28)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -r^T K r + r^T Y(\theta - \rho \frac{Y^T r}{\|Y^T r\|}) \\ &\leq -r^T K r + \|Y^T r\|^T (\|\theta\| - \rho) \\ &\leq -r^T K r \end{aligned} \quad (29)$$

따라서 오차함수 r 은 초기상태에서 e 함수의 한정된 범위 내에 도달하게 됨을 알 수 있다. 다음으로 $\|Y^T r\| \leq \epsilon$ 인 경우에 식 (28)에 식 (26)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V &= -r^TKr + r^TY(q, \dot{q}, v, a)(\vartheta + u) \\
 &\leq -r^TKr + \|Y^T r\| \|\vartheta\| + r^TYu \\
 &\leq -r^TKr + \|Y^T r\| \rho + r^TYu \\
 &= -r^TKr + r^TY \left(\frac{\rho Y^T r}{\|Y^T r\|} + u \right) \\
 &= -r^TKr + r^TY \left(\frac{\rho Y^T r}{\|Y^T r\|} - \frac{\rho Y^T r}{\varepsilon} \right) \\
 &= -r^TKr + \rho \|Y^T r\| - \frac{\rho}{\varepsilon} \|Y^T r\|^2
 \end{aligned} \tag{30}$$

식 (30)의 우변 항에서 함수 $\rho \|Y^T r\| - \frac{\rho}{\varepsilon} \|Y^T r\|^2$ 는 $\|Y^T r\| = \varepsilon/2$ 에서 최대가 되며 최대값은 $\rho\varepsilon/4$ 이므로 다음 식이 성립된다.

$$\begin{aligned}
 V &\leq -r^TKr + \frac{\rho\varepsilon}{4} \\
 &\leq -\|K\| \|r\|^2 + \frac{\rho\varepsilon}{4}
 \end{aligned} \tag{31}$$

식 (31)에서 $\|r\| > \frac{\rho\varepsilon}{4\|K\|}$ 이면 $V < 0$ 이 된다. 따라서 오차함수 r 은 집합 $\{r: \|r\| \leq \frac{\rho\varepsilon}{4\|K\|}\}$ 으로 수렴하여 머무르게 된다. 여기서 ε 은 설계 파라미터로 임의로 선정할 수 있으므로 ε 을 충분히 작게 선정하면 제안된 제어입력은 파라미터 불확실성에 대한 정상상태 추종오차를 충분히 작게 할 수 있다.

V. 시뮬레이션과 실험

제안된 강인 제어기법을 적용하여 시뮬레이션하기 위한 2-링크 로봇 매니퓰레이터의 동역학 방정식은 다음과 같다. 시뮬레이션과 실험에서 말단부의 원점과 카메라의 원점은 일치한다고 가정하였고 로봇 매니퓰레이터의 마찰 없다고 가정하였다.

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

여기서 관성행렬, 구심력과 코리올리시스힘, 중력벡터는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 M_{11}(q) &= m_1 l_{c2}^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_1^2 + I_1 + I_3 = \theta_1 \\
 M_{12}(q) &= (m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) \cos(q_2 - q_1) = \theta_2 \cos(q_2 - q_1) \\
 M_{22}(q) &= m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_{c4}^2 + I_2 + I_4 = \theta_3 \\
 C_{21}(q, \dot{q}) &= \theta_2 \sin(q_2 - q_1) \dot{q}_2, \quad C_{12}(q, \dot{q}) = -C_{21}(q, \dot{q}) \\
 G_1 &= g(m_1 l_{c4} + m_3 l_{c3} + m_4 l_1) \cos q_1 = g\theta_4 \cos q_1 \\
 G_2 &= g(m_2 l_{c2} + m_3 l_2 - m_4 l_{c4}) \cos q_2 = g\theta_5 \cos q_2
 \end{aligned}$$

축차 행렬 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 의 Y_{ij} 요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= 0, \quad Y_{12} = \cos(q_2 - q_1) \dot{q}_2 - \sin(q_2 - q_1) \dot{q}_2^2, \quad Y_{13} = 0, \\
 Y_{14} &= g \cos q_1, \quad Y_{15} = 0, \quad Y_{21} = 0, \quad Y_{23} = \dot{q}_2, \quad Y_{24} = 0, \\
 Y_{25} &= g \cos q_2, \quad Y_{21} = \cos(q_2 - q_1) \dot{q}_1 + \sin(q_2 - q_1) \dot{q}_1^2.
 \end{aligned}$$

로봇의 파라미터 값들은 표 1과 같고 파라미터 변동은 질량 m_4 가 다음 범위 내에서 변하는 것으로 가정하였다.

$$0 \leq \Delta m_4 \leq 4.5$$

파라미터의 변동범위를 위와 같이 설정할 때 공칭벡터 θ_0 는 부하변동으로 인한 변화의 평균값을 취한 것으로 하며 다음과 같다.

$$\theta_0 = [1.0424 \quad -0.5857 \quad 0.4903 \quad 3.36 \quad -1.6525]^T$$

선정된 공칭 벡터를 이용하여 식 (20)에서 정의된 파라미터의 변동범위의 한계를 계산한 결과로부터 불확실성의 한계 ρ 는 1.0349이다.

표 1. 로봇 매니퓰레이터의 파라미터
Table 1. Parameters of the manipulator

설 명	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

$$\|\vartheta\| = \sum_{i=1}^5 (\theta_i - \theta)^2 \leq \sqrt{1.0349}$$

모의 실험에 사용된 설계 파라미터들과 관절의 초기 위치는 표 2와 같다.

표 2. 설계 파라미터들
Table 2. Design parameters

λ	5	α	$6.941 \times 10^{-6} (m/pixel)$
ϵ	1	β	$9.425 \times 10^{-6} (m/pixel)$
K	$30I$	q_1	$\pi/2 (rad)$
f	$0.016 (m)$	q_2	$\pi (rad)$

카메라에서 대상물까지의 거리 Z 은 1m로 설정하였으며 초기 특징점 좌표 $\xi=[100 \ 100]^T$ 로 정하고 원하는 특징점 좌표는 $\xi_d=[0 \ 0]^T$ 으로 설정하여 동역학 제어부의 오차 관련 함수에 적분항이 포함된 경우와 포함되지 않은 경우에 대한 비교 모의실험을 수행하였다.

그림 2는 제어 입력 u 에 의해 궤적 생성기에서 생성된 원하는 관절각 1과 2에 대한 추종 오차이며 점선이 Spong이 제안한 제어기를 적용한 결과이고 실선은 적분항을 추가한 제어기를 적용한 실험 결과이다. 그림 3은

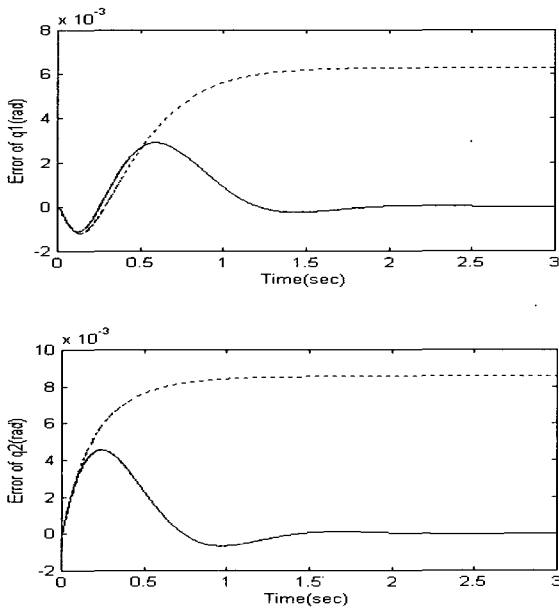


그림 2. 제안된 방식(실선)과 적분항을 포함하지 않은 강인 제어(점선)에 의한 각 관절 추종오차
Fig. 2. Tracking error of each joint by the proposed method(solid) and robust control without integral action(dotted)

이미지 평면상의 특징점 x 와 y 에 대한 추종 오차이며 점선이 Spong이 제안한 제어기를 적용한 결과이고 실선은 적분항을 추가한 제어기를 적용한 실험 결과이다. 그림 2에서 알 수 있듯이 관절 추종 오차의 경우 제안된 제어기를 적용한 결과가 적분항을 포함하지 않은 제어기를 적용

한 결과보다 정상상태에서 추종 오차가 개선되었음을 알 수 있고 이미지 평면상의 특징점 추종 오차 또한 개선되었음을 그림 3에서 확인 할 수 있다.

실험을 위한 비전 시스템은 CCD 카메라와 영상 정보의 이진화 처리를 담당하는 영상처리보드, 주컴퓨터의 제어 신호를 로봇의 모터에 전달하는 MMC(Multi motion controller) 부분과 제어 대상인 로봇매니플레이터로 분류된다. CCD 카메라에서 획득한 아날로그 영상 정보는 영상처리보드에서 2진 영상 정보로 변환되어 주컴퓨터로 전달되며 동시에 로봇의 엔코더 출력은 MMC를 통하여 현재의 로봇 관절의 위치값이 주컴퓨터로 전달한다. 비전 시스템에서 처리화 소스는 640×480 화소이고 CCD 카메라는 초점거리가 16mm인 Pulnix TM7 1/2"이다. 영상처리 보드는 Matrox/MC 보드를 사용하였다. 실험 대상인 로봇 매니플레이터는 삼성 Faraman-As1 모델이고 주 컴퓨터는 Pentium II MMX으로 OS는 Windows98 하에서

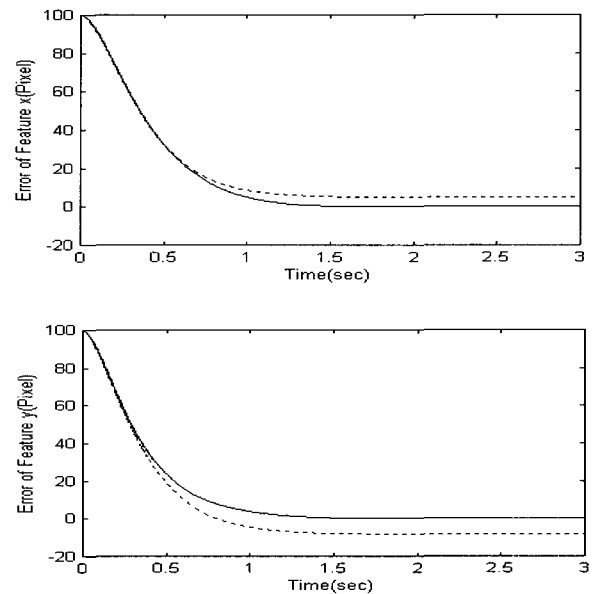


그림 3. 제안된 방식(실선)과 적분항을 포함하지 않은 강인 제어(점선)에 의한 특징점 추종 오차
Fig. 3. Tracking error of feature by the proposed method(solid) and robust control without integral action(dotted)

실험하였다. 영상 정보의 이진화 처리는 Matrox에서 제공하는 Active-Mil을 이용하여 프로그래밍 하였고 로봇 매니플레이터 구동을 위한 모션(Motion) 프로그램은 MMC에서 제공하는 라이브러리 함수를 이용하였다. CCD 카메라는 로봇의 말단부에 장착되어 있고 목표물은

카메라로부터 1m 떨어진 곳에 위치하며 영상처리의 단순화를 위하여 하얀 벽면에 검정 색의 목표물을 대상으로 실험을 수행하였다. 전체적인 비전 시스템의 블록도는 그림 4와 같다.

실험에 사용된 설계 파라미터는 $\lambda=5$, $\epsilon=1$ 로 설정하였으며 설계 이득 $K=50$ 으로 정하였다. 모의 실험과 마찬가지로 초기 특징점 좌표 $\xi=[100 \ 100]^T$ 로 정하고 원하는 특징점 좌표는 $\xi_d=[0 \ 0]^T$ 으로 설정하여 동역학

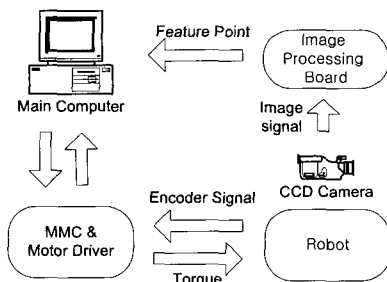


그림 4. 비전 시스템의 블록도
Fig 4. Block diagram of vision system

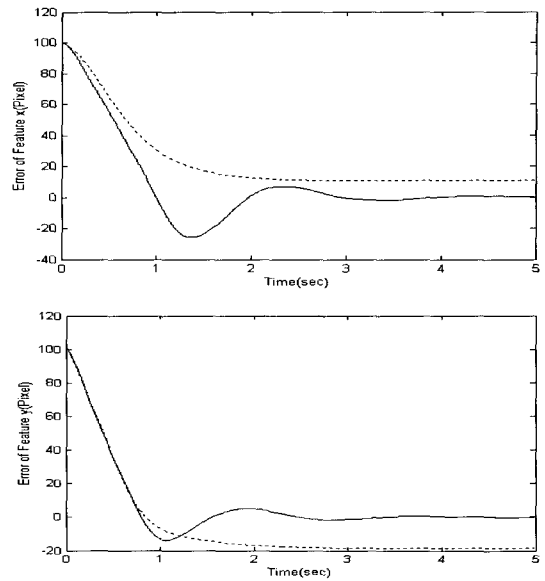


그림 6. 제안된 방식(실선)과 적분항을 포함하지 않은 강인 제어(점선)에 의한 특징점 추종 오차
Fig. 6. Tracking error of feature by the proposed method(solid) and robust control without integral action(dotted)

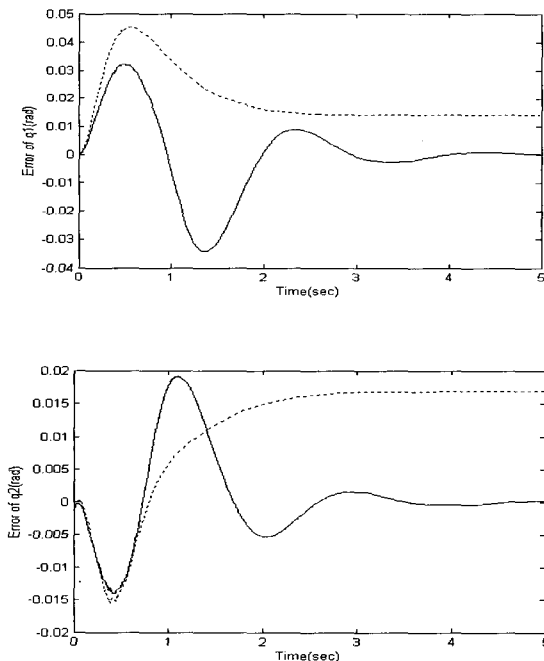


그림 5. 제안된 방식(실선)과 적분항을 포함하지 않은 강인 제어(점선)에 의한 관절추종 오차
Fig. 5. Tracking error of each joint by the proposed method(solid) and robust control without integral action(dotted)

제어부의 오차 관련 함수에 적분항이 포함된 경우와 포함되지 않은 경우에 대하여 영상 평면 특징점에 대한 추종 오차와 로봇의 관절 추종 오차에 대한 비교 실험을 수행하였다. 그림 5는 제어 입력 u 에 의해 궤적 생성기에서 생성된 원하는 관절각 1과 2에 대한 추종 오차이며 점선이 Spong이 제안한 제어기를 적용한 결과이고 실선은 적분항을 추가한 제어기를 적용한 실험 결과이다. 그림 6은 이미지 평면상의 특징점 x 와 y 에 대한 추종 오차이며 점선이 Spong이 제안한 제어기를 적용한 결과이고 실선은 적분항을 추가한 제어기를 적용한 실험 결과이다. 그림 5로부터 관절 1과 2의 추종오차는 초기에 오버슈트를 가지지만 정상상태 오차가 개선되었음을 알 수 있다. 따라서 내부 서보 루프의 성능 개선으로 인하여 그림 6에서와 이미지 평면상의 특징점 추종 오차의 정상 상태 오차가 기존의 방법에 비해 상당히 개선되었음을 알 수 있다. 그림 6에서 정상상태 오차가 특징점 x 는 15 픽셀, y 는 20 픽셀 개선되었음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 파라미터 불확실성을 가지는 로봇 매니퓰레이터에 특징점 기반 구조의 비전 시스템을 사용

하는 강인 제어를 설계하였다. 로봇 매니플레이터의 파라미터 불확실성에 기인한 이미지 평면상 특징점의 정상 상태 오차를 개선시키기 위하여 동역학 제어부의 오차 관련 함수에 추종오차의 적분항을 추가시킨 적분 제어기가 되도록 하였다. 적분항을 포함하는 동역학 제어부의 안정도는 Lyapunov 기법에 의하여 해석되었다. 제안된 기법을 5링크 2 자유도의 로봇에 적용한 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제어 성능을 확인하는데 제안된 기법은 파라미터 불확실성을 가지는 경우에도 정상상태 오차를 영 가까이 줄일 수 있음을 보였으며 실험에서도 같은 결과를 얻었기 때문에 제안된 기법이 부하변동이 있는 실용 로봇 제어에 적용될 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] K. Hashimoto, editor, "VISUAL SERVOING." World Scientific. 1993

[2] H. G. Sage, M. D. Mathelin, and E.O. stertag, "Robust control of robot manipulators: a servay," Int. J. Control, vol.72, no. 16, 1498-1522, 1999.

[3] M. Corless and G. Leitmann, "Continuous state feedback guaranteeing uniform ulimate boundness for uncertain dynamic systems," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-26, pp. 1139-1144, 1981.

[4] M. W. Spong, "On the robust control of robot manipulators," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 37, no.11, pp. 1782-1786, 1992.

[5] H. K. Khalil, "Universal Integral controllers for minimum-phase nonlinear systems," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 45. no. 3, pp. 490-494, 2000.

[6] C. Canuda, B. Siciliano and G. Bastin (eds), "Theory of Robot Control," Springer, London, 1996.

[7] M. W. Spong and M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control," New York:Jhon Wiley, 1989.

저 자 소 개



이 영 찬(학생회원)

1997년 2월 한국항공대학교 항공 전자공학과(공학사), 1999년 2월 한국항공대학교 항공전자공학과(공학석사), 현재 한국항공대학교 항공전자공학과 대학원 재학 중 (박사과정). <주관심분야 : 로봇비전, 로봇제어, 강인제어>



백 중 환(정회원)

1981년 2월 한국항공대학교 항공 통신정보공학과(공학사), 1987년 2월 Oklahoma State University (공학석사),1991년 2월 Oklahoma State University (공학박사), 현재 한국항공대학교 항공통신정보공학과 교수. <주관심분야 : 컴퓨터비전, 영상처리 및 압축, 패턴인식>



지 민 석(학생회원)

1995년 2월 한국항공대학교 항공 전자공학과(공학사), 1997년 2월 한국항공대학교 항공전자공학과(공학석사), 1997년 3월 ~ 2000년 3월 (주)한국레이컴, 2000년 3월 ~ 2002년 6월 (주)휴니드테크놀러지스, 현재 한국항공대학교 항공 전자공학과 대학원 재학 중(박사과정). <주관심분야 : 로봇비전, 로봇제어, 모터제어>



이 강 응(정회원)

1980년 2월 한국항공대학교 항공 전자공학과(공학사), 1982년 2월 서울대학교 전자공학과(공학석사), 1989년 8월 서울대학교 전자공학과(공학박사), 1994년 1월 ~ 1995년 1월 미시간주립대학교 전기공학과 연구교수, 현재 한국항공대학교 항공 전자공학과 교수. <주관심분야 : 로봇제어, 강인제어, 적응제어, 비선형제어>