

구동기의 동특성을 고려한 로봇매니플레이터의 강인제어기설계  
A Robust Controller Design for Robot Manipulators with Actuator Dynamics

°박광석\*, 황동환\*

\* 충남대학교 전자공학과(Tel. 042-822-7956, Fax. : 042-823-5436)

**Abstracts** : In this paper, a robust controller is proposed to achieve an accurate tracking for an uncertain nonlinear plant with actuator dynamics. The extent of parameter uncertainty can be quantified by using linear parameterization technique. A switching controller is proposed to guarantee the global asymptotic stability of the plant. In order to eliminate the chattering caused by the switching controller, a smoothing controller is designed using the boundary layer technique around the sliding surface and guarantees the uniform ultimate boundedness of the tracking error.

**Key Words** : robust control, nonlinear control, sliding mode, uncertainty, actuator dynamics

1 서론

일반적으로 제어기 설계를 위하여 제어 대상 플랜트(Plant)를 모델링(Modeling)했을 경우, 제어기 설계의 기준이 되는 모델에는 실제 플랜트에는 존재하지만 모델에 포함되지 않는 불확실성(Uncertainty)이 존재한다. 플랜트의 불확실성을 고려하지 않고 설계한 제어기는 원하는 성능을 발휘하지 못하므로 불확실성을 포함하는 플랜트에 대한 제어기 설계 기법이 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 그리고, 보통 구동기의 동특성이 플랜트의 동특성에 비하여 매우 빠르다는 가정하에 구동기의 동특성을 무시하고 플랜트의 동특성만을 고려하여 제어기를 설계하는데, 구동기의 동특성이 플랜트의 동특성에 비하여 무시할 수 없는 경우나 강한 비선형 특성을 가진 구동기의 경우에는 구동기의 동특성이 전체 제어시스템의 성능에 현저한 영향을 미친다. 그러므로, 보다 빠른 응답과 보다 정밀한 제어가 요구되는 제어기 설계 시 구동기의 동특성에 대한 고려가 필요하다.

현재까지의 연구결과들[1-6]을 살펴보면 대부분 제어 대상 플랜트의 동특성만을 고려하는 방법이 주류를 이룬다. 그러나 최근들어 구동기의 동특성을 고려한 플랜트 모델을 대상으로 제어기를 설계하는 연구들이 있어 왔는데, Tarn등[7]은 직류전동기를 사용하는 로봇시스템을 대상으로 폐환선형화(Feedback Linearization)를 이용하여 구동기의 동특성을 고려한 제어기를 제안하여, 구동기의 성능을 고려하지 않은 제어기에 비하여 좋은 제어 성능을 얻을 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 구동기의 동특성을 고려한 비선형 플랜트에 대해 슬라이딩 모드(Sliding Mode) 기법[1, 3, 5, 6] 및 선형파라미터화(Linear Parameterization)[3-5]를 도입하여, 유계된 파라미터 불확실성이 존재하는 플랜트의 추종성을 보장하는 강인한 제어기를 제안하였다. 실제의 플랜트 및 구동기를 대상으로한 컴퓨터 모의 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 강인제어기의 성능을 평가하고, Tarn등[7]이 제안한 제어기법과의 비교평가를 수행하였다.

2 문제 제기

2.1 구동기의 동특성을 포함하는 로봇 매니플레이터 모델

n관절 로봇 매니플레이터에 대한 Lagrange-Euler 동력학 방정식은 다음과 같다[6, 18].

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

여기서,  $M(q) \in R^{n \times n}$ 은 관성행렬이고,  $C(q, \dot{q}) \in R^n$ 는 코리올리스 및 구심력 벡터이며,  $G(q) \in R^n$ 는 중력벡터이다. 그리고  $q \in R^n$ 은 로봇매니플레이터 관절의 각위치(Angular Position)을 나타내는 벡터이다. 또한 (2-1)식의  $M(q)$  행렬은 다음과 같이 유계되어 있는 것으로 알려져 있다[3, 8].

$$\nu_1 \leq \|M(q)^{-1}\| \leq \nu_2 \quad (\nu_1, \nu_2 > 0) \quad (2)$$

산업계 전반에 걸쳐서 광범위하게 사용되는 대표적인 구동기인 직류전동기는 다음과 같은 동특성을 가진다[8].

$$\begin{aligned} v_o = & \frac{L_a}{K_t} J_m \ddot{\theta}_m + \left( \frac{R_a}{K_t} J_m + \frac{L_a}{K_t} B_m \right) \dot{\theta}_m + \left( K_e + \frac{R_a}{K_t} B_m \right) \theta_m \\ & + (L_a/K_t) \ddot{r} + (R_a/K_t) \dot{r} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\tau$ ,  $v_o$ ,  $e$ 는 각각 부하토크, 입력 전압, 역기전력(Back emf)이다. 그리고,  $J_m$ ,  $\theta_m$ ,  $K_t$ ,  $B_m$ ,  $R_a$ ,  $L_a$ ,  $K_e$ 는 각각 회전자 이너서, 회전자 각변위(Angular Displacement), 토크상수, 비스코스 마찰계수(Viscous Friction Coefficient)이다.

직류전동기로 구동되는 다관절 로봇의 경우 전동기의 회전축이 회전하는 각도  $\theta_m$ 과 로봇관절의 회전 각도  $q$  사이에는  $\theta_m = Nq$ 가 성립하는데,  $N$ 은 관절에서의 기어비(Gear Ratio)이다.

플랜트입력을  $u$ 라 하면, (3)식으로 부터  $n$ 개의 직류전동기로 이루어진 로봇매니플레이터는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} u = & LK_t^{-1}(JN + M)\ddot{q} \\ & + \{RK_T^{-1}(JN + M) + LK_T^{-1}(B_mN + M' + C)\}\dot{q} \\ & + \{RK_T^{-1}(B_mN + C) + LK_T^{-1}C + K_eN\}q \\ & + \{RK_T^{-1}G + LK_T^{-1}G'\} \\ = & A(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + E(q, \dot{q}, q)q + F(q, q) \end{aligned} \quad (4)$$

(4)식에서  $LK_T^{-1}$ ,  $RK_T^{-1}$ ,  $K_e$ ,  $B_m$ ,  $N$ ,  $J \in R^{n \times n}$ 은 각각  $diag\{(L_a/K_t)_i\}$ ,  $diag\{(R_a/K_t)_i\}$ ,  $diag\{(K_e)_i\}$ ,  $diag\{(B_m)_i\}$ ,  $diag\{(J_m)_i\}$ ,  $diag\{(N)_i\}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )인 상수 행렬이고,  $A(q) = PM$ ,  $P = LK_T^{-1}$ ,  $M_e = JN + M$ 이다. 양한정 대칭행렬인  $JN$ 과  $M$ 의 합으로 표현되는  $M_e$ 행렬은 양한정이고 대칭인 행렬이다[9].

기존의 강인제어기에 관한 연구들[3-5]에서는 대부분 2차계 시스템인 (1)식에 대해 선형 파라미터화를 수행한 후 제어기 설계에 응용하였음을 볼 수 있다. 본 연구에서는 (4)식과 같은 3차계 시스템을 대상으로 하는데, 플랜트 모델 전체를 선형파라메터

화하지 않고 아래식과 같이 일부분만을 선형파라미터화하여 다음 절에서 기술할 제어기설계에 이용하였다.

$$u = A(q)q'' + B(q, q')q'' + E(q, q', q'')q' + F(q, q') \quad (5)$$

$$= A(q)q'' + Y(q, q', q'')\Phi$$

여기서,  $Y(q, q', q'') \in R^{n \times p}$  는 플랜트 변수  $q, q', q''$  만의 함수인 행렬이고,  $\Phi \in R^p$  는 플랜트 파라미터만으로 이루어진 파라미터 벡터이다. (5)식에서 불확실성이 없는 파라미터 즉, 공칭(Nominal) 파라미터를 가지는 공칭 플랜트 모델을 아래 (6)식처럼 둔다.

$$u = A_0 q'' + Y(q, q', q'')\Phi_0 \quad (6)$$

여기서 아래첨자 '0'는 공칭 파라미터를 표시한다.

만약 (1)식 및 (3)식에서의 플랜트 파라미터들이 특정값으로 상한과 하한이 유계되어 있다고 하면, 다음과 같은 가정이 가능하다.

[가정 1]  $m_1 \leq \|M(q)\| \leq m_2$  ( $m_1, m_2 > 0$ )

[가정 2]  $P^{-1} = (I + \Delta)P_0^{-1}$ ,  $\|\Delta\| \leq \delta$ , ( $\delta \in R \mid \delta \geq 0$ )

[가정 3]  $a_1 \leq \|A^{-1}\| \leq a_2$ , ( $a_1, a_2 \in R \mid a_2 \geq a_1 > 0$ )

[가정 4]  $\|\Phi_0 - \Phi\| = \|\Phi\| \leq \rho$ , ( $\rho \in R \mid \rho \geq 0$ )

여기서  $P_0$ 는  $P$ 의 공칭 행렬을 나타낸다.

## 2.2 문제 기술

구동기의 동특성이 포함된 불확실한 비선형 시스템인 (5)식을 제어 대상 플랜트로 한다. 이때 플랜트 파라미터의 불확실성을 극복하면서 기준 궤적에 대한 플랜트의 추종 오차가 유한시간 내에 유한 범위내로 유계(Uniform Ultimate Boundedness)됨이 보장되는 제어기를 설계하고자 한다.

## 3 강인제어기 설계

### 3.1 스윙 제어기

플랜트의 기준 궤적(Desired Trajectory)을  $q_d \in R^n$  이라 하고, 기준 궤적 추종 오차를  $\tilde{q} = q - q_d$  라 할 때, 추종 오차를 변수로 하는 슬라이딩 함수(Sliding Function)  $s \in R^n$  를 다음과 같이 정의한다.

$$s = \tilde{q} + 2\Lambda \dot{\tilde{q}} + \Lambda^2 \ddot{\tilde{q}} \quad (7)$$

여기서,  $\Lambda = \text{diag}[\lambda_i] \in R^{n \times n}$  는 상수 이득(Gain) 행렬로서 양한정인 행렬이다.

(7)식의 슬라이딩 함수  $s$ 에 대해  $s=0$  인 슬라이딩 평면에서 플랜트의 거동은  $\tilde{q} + 2\Lambda \dot{\tilde{q}} + \Lambda^2 \ddot{\tilde{q}} = 0$  를 만족하고, 따라서  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q} = 0$  가 보장된다[3]. 또한 플랜트의 거동이 최초 슬라이딩 평면 도달 시각 이후 평면을 벗어나지 않을 조건은  $s' = 0$ 이다

공칭 플랜트 (6)식에 대해  $s' = 0$ 을 만족시키는 입력  $u$ 를 공칭 제어 입력(Nominal Control Input)  $u_0$ 라 정의하자. (7)식의 시간에 대한 미분치를 구한 후 (6)식을 대입하고,

$$a = \ddot{q}_d - 2\Lambda \dot{\tilde{q}} - \Lambda^2 \ddot{\tilde{q}} \text{ 을 이용하여 정리하면}$$

$$s' = \ddot{q} + 2\Lambda \dot{\tilde{q}} + \Lambda^2 \ddot{\tilde{q}} = A_0^{-1}u - A_0^{-1}Y\Phi_0 - a \quad (8)$$

가 성립한다. 따라서  $u_0$ 는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$u_0 = Y\Phi_0 + A_0 a \quad (9)$$

공칭 제어 입력 (9)식은 공칭플랜트에 대한 플랜트의 불확실성이 존재할 경우는  $s' = 0$ 을 보장 할 수 없게 된다. 따라서 모델 파라미터의 불확실성이 존재하는 경우에도  $\lim_{t \rightarrow \infty} s = 0$ 와  $\lim_{t \rightarrow \infty} s = 0$ 을 보장하기 위해서 다음과 같은 스윙 제어기를 제안한다.

[정리 1] : 아래 (10)식과 같은 스윙 제어기는 (5)식으로 표

현되는 플랜트에서 (7)식으로 정의되는 슬라이딩 함수  $s$ 에 대해 전대역 점근적 안정성(Global Asymptotic Stability)을 보장한다.

$$u = \begin{cases} u_0 - K \frac{s}{\|s\|} & , (\|s\| \neq 0) \\ 0 & , (\|s\| = 0) \end{cases} \quad (10)$$

여기서,  $u_0 = Y\Phi_0 + A_0 a$ ,  $k = k_c \|Y\| + k_b \|a\| + k_c$ ,

$K = P_0 k$ ,  $k_c = a_2 \rho / l$ ,  $k_b = (a_2 \|A_0\| + 1) / l$ ,  $k_c > 0$ ,  $l = m_1 - m_2 \delta > 0$  이다.

증명 :

Lyapunov 함수를 다음과 같이 정하자.

$$V(s) = \frac{1}{2} s^T s \quad (11)$$

(11)식을 시간에 대해 미분하고, 가정 1, 2, 3 및 4를 이용하면

$$V'(s) = s^T s' \quad (12)$$

$$= s^T A^{-1} Y \Phi + s^T A^{-1} A_0 a - s^T A^{-1} K \frac{s}{\|s\|}$$

$$\leq -k_c (m_1 - m_2 \delta) \|s\| < 0$$

가 성립한다.

그러므로 (10)식과 같은 스윙 제어기는 슬라이딩 함수  $s$ 에 대해 전대역 점근적 안정성을 보장한다.■

(10)식과 같은 스윙 제어기는 슬라이딩 함수  $s$ 에 대해 불안속성이므로 채터링(Chattering)이 발생하게 된다. 이러한 채터링은 플랜트 모델링시 고려가 되지 않은 고주파 동특성(High Frequency Dynamics)을 여기(Excitation)시켜 플랜트를 불안정(Unstable)하게 만들 수도 있다. 다음 절에서는 채터링의 발생을 억제 시키는 평활화 제어기를 제안 한다.

### 3.2 평활화 제어기

[정리 2] :  $x$ 를 임의의 동적 시스템(Dynamic System)의 상태(State) 벡터라 할 때,  $D$ 를 영역  $\{x \in R^n \mid \|x\| \leq r\}$ 으로 정의하자. 그리고,  $V(\cdot) : D \rightarrow R$ 는  $\{x \in D \mid \|x\| \geq \mu > 0\}$ 인 모든  $x$ 에 대해

$$W_1(x) \leq V(x) \leq W_2(x), \quad \forall t \geq 0 \quad (13)$$

$$V'(x) \leq -W_3(x), \quad \forall t \geq 0$$

을 만족하는 연속이고 미분가능한 함수라고 하자. 여기서  $W_1, W_2, W_3$ 는  $D$ 영역내에서 정의되는 class  $K$  함수이다. 만약 양의 상수  $k_1, k_2, k_3, c$ 에 대해,  $W_1(x) \geq k_1 \|x\|^c$ ,  $W_2(x) \leq k_2 \|x\|^c$ ,  $W_3(x) \geq k_3 \|x\|^c$ 을 만족하는 함수  $W_1, W_2, W_3$ 가 존재하고,  $\mu < r(k_1/k_2)^{1/c}$ 가 성립한다면, 모든

$\|x(t_0)\| < r(k_1/k_2)^{1/c}$ 에 대해, 시스템의 상태가

$$\|x(t)\| \leq \beta(\|x(t_0)\|, t - t_0), \quad \forall t_0 \leq t < t_1 \quad (14)$$

$$\|x(t)\| \leq \mu (k_2/k_1)^{1/c}, \quad \forall t \geq t_1 \quad (15)$$

가 되는 유한시간  $t_1(x(t_0), \mu)$ 과 class  $KL$  함수  $\beta(\|x(t_0)\|, t - t_0)$ 가 존재한다.

여기서,  $\beta(\|x(t_0)\|, t - t_0) = k \|x(t_0)\| e^{-\gamma(t-t_0)}$ ,

$k = (k_2/k_1)^{1/c}$ ,  $\gamma = k_3/(k_2 c)$ 이다.

증명 : 자세한 증명은 참고문헌 [10]에서 볼 수 있다.■

[정리 3] : 아래 (16)식과 같은 평활화 제어기는 (5)식으로 표현되는 플랜트에서 (7)식으로 정의되는 슬라이딩 함수  $s$ 에 대해 Uniform Ultimate Boundedness를 보장한다.

$$u = \begin{cases} u_0 - K \frac{s}{\|s\|} & , (\|s\| > \epsilon) \\ u_0 - K \frac{s}{\epsilon} & , (\|s\| \leq \epsilon) \end{cases} \quad (3-16)$$

여기서,  $u_o = Y\phi_o + A_o a$ ,  $k = k_n \|Y\| + k_b \|a\| + k_c$ ,  
 $K = P_o k$ ,  $k_n = a_2 \rho / l$ ,  $k_b = (a_2 \|A_o\| + 1) / l$ ,  $k_c > 0$ ,  
 $l = m_1 - m_2 \delta > 0$  이다.

증명 : 정리 1과 정리 2를 이용하여 증명가능하므로 생략한다. ■

### 4 모의 실험

직류전동기를 구동기로 채용한 평면 로봇매니퓰레이터인 KIRO-III[11]에 3절에서 제안한 제어기를 적용하여 모의 실험을 수행하였다.

참고문헌 [11]에 나타나 있는 KIRO-III 로봇의 동특성 모델과 (3)식으로 표현되는 직류전동기의 동특성모델을 결합하면 다음과 같다.

$$u = PM_c q'''' + \{RK_T^{-1}(J+M) + LK_T^{-1}(B_M+M)\}q'' \quad (17)$$

$$+ \{RK_T^{-1}(B_M + C) + LK_T^{-1}C + K_E\}q'$$

$$= A(q)q'''' + B(q, q')q'' + E(q, q', q'')q'$$

(17)식에서  $B(q, q')q'' + E(q, q', q'')q'$  을  $Y(q, q', q'')\phi$  로 선형화 파라미터화하면

$$u = A(q)q'''' + Y(q, q', q'')\phi \quad (18)$$

가 된다. 여기서,  $Y(q, q', q'') \in R^{2 \times 5}$  은 각 요소들이 플랜트 변수  $q, q', q''$  만의 함수인 행렬이고,  $\phi \in R^5$  는 플랜트 파라미터만으로 이루어진 벡터이다.

KIRO-III 로봇매니퓰레이터와 구동기로 사용된 직류전동기의 공칭제원은 표 1과 같다. 표 1에 나타나 있는 KIRO-III 로봇매니퓰레이터와 직류전동기의 공칭 제원을 기준으로 플랜트 파라미터의 불확실성을  $\pm 30\%$ 로 설정하면 파라미터 벡터  $\phi$  의 각 요소들은 표 2와 같이 유계가 되며, 가정 1, 2, 3 및 4의 상수들은 표 3 과 같이 된다.

로봇관절에 대한 플랜트 기준 제적은 그림 1과 같다.

그림 2는 스위칭 제어기에 대한 모의 실험결과를 보여준다. 스위칭 제어기의 기준 제적에 대한 추종 오차는 그림 2 (a), (b)에서 보는 바와 같이 1번째 관절과 2번째 관절에서 모두 영에 수렴하고 있다. 그러나 그림 2 (c), (d)에서 보는 바와 같이 스위칭 제어기의 플랜트 제어입력에 심한 채터링이 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 3은  $\pm 30\%$  불확실성을 가진 플랜트에 대한 모의 실험 결과를 보여준다. 평활화 제어기의 기준 제적에 대한 추종 오차는 그림 3 (a)에서 보는 바와 같이 1번째 관절과 2번째 관절에서 최고 추종오차는 각각 약  $1 \times 10^{-3}$ ,  $8 \times 10^{-4}$  정도이며, 약 2초후 두 경우 모두 거의 영에 수렴한다. 또한 스위칭제어기의 제어입력인 그림 2(c), (d)에서와는 달리 평활화 제어기의 제어입력인 그림 3 (b)에서는 채터링이 발생하지 않으며, 1번째 관절과 2번째 관절에 대한 최고 제어입력은 각각 약 47[V], 37[V] 임을 알 수 있다.

그림 4는 Tarn등[7]이 제안한 제어기에 대한 모의 실험 결과이다. 그림 4 (a), (b)에서 보는 바와 같이 Tarn등[7]이 제안한 제어기의 기준 제적에 대한 추종 오차가 각 관절에서 최고  $1.5 \times 10^{-3}$ ,  $1.4 \times 10^{-3}$ 으로 나타났는데, 이는 (16)식의 평활화 제어기의 추종 오차  $1 \times 10^{-3}$ ,  $8 \times 10^{-4}$ 보다 큰 오차이다. 또한 오차의 수렴성도 평활화 제어기의 경우 약 2초후에 거의 영에 수렴하고 있음에 반해, Tarn등[7]이 제안한 제어기는 4초가 지난 후에도 추종 오차가 계속 존재하고 있음을 알 수 있다.

그림 4 (c), (d)로부터 Tarn등[7]이 제안한 제어기는 플랜트 제어 입력의 최고치는 각 관절에 대해 약 45[V], 41[V]임을 알 수 있다.

본 연구에서는 구동기의 동특성을 고려한 비선형 플랜트를 대상으로 정밀한 추종성이 보장되고 큰 불확실성에 대해서도 강한 제어기를 제안하였다.

동특성 모델을 선형 파라미터화하여 플랜트 파라미터 벡터를 구한 후, 벡터의 크기를 통해 불확실성 정도를 수치화 가능토록 하였다. 스위칭 제어기를 제안하고, 리아프노프안정도 해석법을 이용하여 플랜트 추종오차에 대한 전대역 점근적 안정성이 보장됨을 증명하였다. 또한, 스위칭 제어기에 의해서 발생하는 채터링을 제거하기 위해 슬라이딩 표면 부근에 경계층을 설정하는 기법을 이용하여 플랜트의 기준 제적 추종 오차가 특정 시간내에 특정 범위내로 유계(Uniform Ultimate Boundedness)됨이 보장되는 평활화 제어기를 제안하였다. 제안한 강인제어기법에 대한 성능평가를 위해 모의실험을 수행하였다. 모의 실험 결과, 스위칭 제어기에 의한 채터링은 발생하지만 추종오차는 매우 작은 값을 가지고 영에 수렴함을 볼 수 있었다. 평활화 제어기에 대한 모의 실험 결과로부터 짧은 시간내에 플랜트의 추종 오차가 특정 오차범위내로 유계됨을 알 수 있었고, 또한 스위칭 제어기에서 발생하는 채터링이 제거되었음을 확인 하였다. 구동기의 동특성을 고려한 플랜트를 대상으로 하는 대표적인 제어기법인 Tarn 등[7]의 제어기법과의 성능비교 결과, 제안한 제어기가 더 작은 추종 오차와 빠른 추종성을 가짐을 볼 수 있었다.

앞으로 평활화 제어기의 경계층 크기  $\epsilon$  과 슬라이딩 함수의 상수 이득 행렬  $\Lambda$  및 플랜트 추종 오차들에 대한 상호 연관성 분석 및 플랜트 추종 오차가 유계되는 시간과 오차의 상한치에 대한 이론적 수치를 검증하는 연구는 계속 수행되어야 한다.

### 참고 문헌

- [1] V. I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes", *IEEE Trans. Auto. Contr.*, Vol. AC-22, No. 2, pp. 212 - 222, April, 1977.
- [2] M. J. Corless and G. Leitmann, "Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems", *IEEE Trans. Auto. Contr.*, Vol. AC-26, No. 5, pp. 1139 - 1144, Oct. 1981.
- [3] J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1991.
- [4] J. J. E. Slotine and W. Li, "On the Adaptive Control of Robot Manipulators", *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 6, No. 3, pp. 49 - 59, Fall 1987.
- [5] M. W. Spong, "On the Robust Control of Robot Manipulators", *IEEE Tran. Auto. Contr.*, Vol. 37, No. 11, pp. 1782 - 1786, Nov. 1992.
- [6] C. Y. Su, T. P. Leung and Y. Stepanenko, "Real-Time Implementation of Regressor-Based Sliding Mode Control Algorithm for Robotic Manipulators", *IEEE Trans. Indust. Electr.*, Vol. 40, No. 1, pp. 71 - 79, Feb. 1993.
- [7] T. J. Tarn, A. K. Bejczy, X. Yun and Z. Li, "Effect of Motor Dynamics on Nonlinear Feedback Robot Arm Control", *IEEE Trans. Robot. and Automa.*, Vol. 7, No. 1, pp. 114 - 122, Feb. 1991.
- [8] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan, NY, USA, 1993.
- [9] F. A. Graybill, *Introduction to Matrices with Application in*

Statistics, Wadsworth, Belmont, CA, USA, 1969.

- [10] H. K. Khalil, Nonlinear Systems, 2nd ed., Prentice Hall, NJ, USA, 1996.
- [11] 홍윤식, 강봉수, 김수현, 박기환, 곽윤근, “ 직접구동방식의 평면 다관절 로봇의 동력학적 모델에 따른 피드 포워드 제어의 실험적 평가”, 대한기계학회논문집, 제20권, 제1호, pp. 146 - 153, 1996.

표 1 평면 로봇매니플레이터 및 직류전동기에 대한 플랜트 파라미터 및 공칭 제원.

Table 1 Plant Parameters of KIRO-III Robot and DC Motor

	1번째 링크(기호)	2번째 링크(기호)
길이(m)	0.32 ( $l_1$ )	0.32 ( $l_2$ )
질량(Kg)	4.25 ( $m_{r1}$ )	3.614 ( $m_{r2}$ )
이너서( $Kg \cdot m^2$ )	$6.81 \times 10^{-2}$ ( $I_1$ )	$7.15 \times 10^{-2}$ ( $I_2$ )
무게중심(m)	$6.23 \times 10^{-2}$ ( $l_{c1}$ )	$12.4 \times 10^{-2}$ ( $l_{c2}$ )
비스코스 마찰계수 ( $N \cdot m \cdot sec / Rad$ )	0.0026 ( $B_m$ )	0.0026 ( $B_m$ )
축 이너서( $Kg \cdot m^2$ )	0.3408 ( $J_m$ )	0.3408 ( $J_m$ )
아마추어 저항( $\Omega$ )	2.6 ( $R_a$ )	2.6 ( $R_a$ )
아마추어 인덕턴스(mH)	14 ( $L_a$ )	14 ( $L_a$ )
토크 상수( $N \cdot m / A$ )	2.51 ( $K_t$ )	2.51 ( $K_t$ )
역기전력 상수 ( $V \cdot sec / Rad$ )	3.01 ( $K_e$ )	3.01 ( $K_e$ )

2 평면 로봇매니플레이터 및 직류전동기에 대한  $\pm 30\%$  불확실성을 가진 플랜트의 파라미터 벡터  $\Phi$ 의 범위

Table 2 The Boundedness of Parameter Vector  $\Phi$  for

KIRO-III Robot with  $\pm 30\%$  Uncertainty

$\Phi_1$	$0.2353 \leq \Phi_1 \leq 3.6263$ , $\Phi_{10} = 1.9308$
$\Phi_2$	$2.0558 \leq \Phi_2 \leq 4.5772$ , $\Phi_{20} = 3.3165$
$\Phi_3$	$0.0001 \leq \Phi_3 \leq 0.0095$ , $\Phi_{30} = 0.0048$
$\Phi_4$	$0.0275 \leq \Phi_4 \leq 1.8282$ , $\Phi_{40} = 0.9278$
$\Phi_5$	$0.1732 \leq \Phi_5 \leq 2.4447$ , $\Phi_{50} = 1.309$
$\ \Phi\ $	$\ \Phi\  \leq \rho = 2.5622$

표 3 평면 로봇매니플레이터 및 직류전동기에 대한  $\pm 30\%$  불확실성을 가진 플랜트의 파라미터와 관련된 상수

Table 3 The Constant Values Related to KIRO-III Robot with  $\pm 30\%$  Uncertainty

$m_1$	$m_2$	$\delta$	$a_1$	$a_2$	$\rho$
0.6137	1.6254	0.3	35.29	790.7751	2.5622

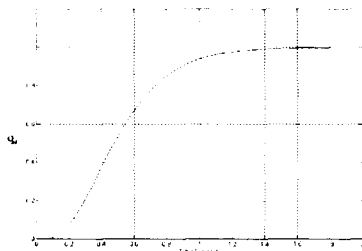
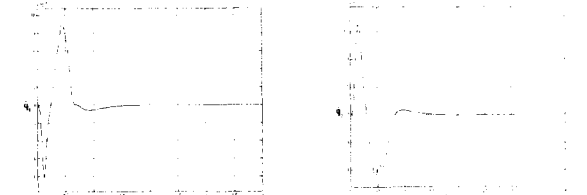


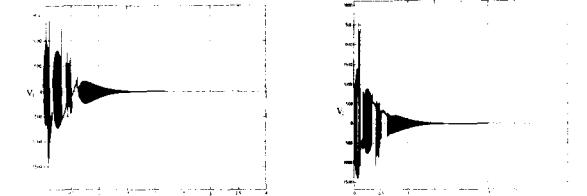
그림 1 기준 궤적

Fig. 1 Reference Trajectory



(a) 1번 관절의 추종 오차

(b) 2번 관절의 추종 오차

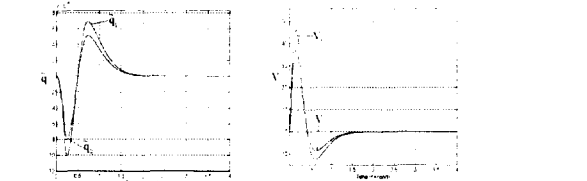


(c) 1번 관절의 제어입력 [V]

(d) 2번 관절의 제어입력 [V]

그림 2  $\pm 30\%$  불확실성 플랜트에 대한 스위칭 제어기의 실험 결과 - KIRO-III 로봇

Fig. 2 Simulation Results of Switching Controller for KIRO-III Robot with  $\pm 30\%$  Uncertainty

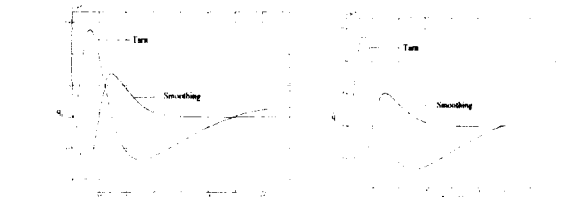


(a) 추종 오차

(b) 제어입력 [V]

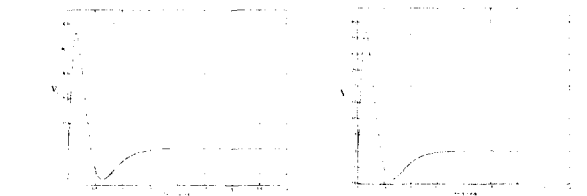
그림 3  $\pm 30\%$  불확실성 플랜트에 대한 평활화 제어기의 실험 결과 - KIRO-III 로봇

Fig. 3 Simulation Results of Smoothing Controller for KIRO-III Robot with  $\pm 30\%$  Uncertainty



(a) 1번 관절의 추종 오차

(b) 2번 관절의 추종 오차



(c) 1번 관절의 제어입력 [V]

(d) 2번 관절의 제어입력 [V]

그림 4  $\pm 30\%$  불확실성을 가지는 플랜트에 대한 Tarn등이 제안한 제어기와 평활화 제어기의 모의 실험결과 비교 - KIRO-III 로봇

Fig. 4 The Comparison with Tarn's Controller for KIRO-III Robot with  $\pm 30\%$  Uncertainty