

# 직접구동 SCARA 로봇 머니플레이터에 대한 적응견실제어

이 지 형\*, 강 철 구\*\*

## Adaptive robust control for a direct drive SCARA robot manipulator

Ji-Hyung Lee\*, Chul-Goo Kang\*\*

### ABSTRACT

In case the uncertainty existing in a system is assumed to satisfy the matching condition and to be cone-bounded, Y. H. Chen proposed an adaptive robust control algorithm which introduced adaptive scheme for a design parameter into robust deterministic controls. In this paper, the adaptive robust control algorithm is applied to the position tracking control of direct drive robots, and simulation and experimental studies are conducted to evaluate control performance.

**Key Words** : Adaptive robust control(적응견실제어), Motion tracking(운동추종), Direct drive robot(직접구동로봇)

### 1. 서 론

실제 시스템은 불확실 요소를 항상 포함하며, 그 불확실 요소 중에는 알려지지 않았거나 불완전하게 알려진 파라미터(상수 또는 변수), 측정오차, 외란 등이 있을 수 있다. 최근에 이러한 불확실성을 확정적(deterministic)으로 취급하여 안정도를 보장하는 견실제어 알고리즘들이 많이 연구되어 왔다.<sup>(2, 4, 5, 6, 8, 9)</sup> 이러한 제어 방식을 일반적으로 궁극유계제어(ultimate boundedness control)라고 부른다. 일반적인 제어이론은 상태 변수를 평형점으로 몰고 오도록 제어를 설계하지만,

궁극유계제어에서는 불확실성이 존재하므로 평형점을 정의할 수가 없다. 따라서 평형점 대신 평형점을 포함하는 집합을 정의하고, 상태변수를 이 집합 내로 몰고 오도록 제어를 설계하자는 것이 궁극유계제어의 기본 개념이다. Y. H. Chen<sup>(3)</sup>은 불확실시스템에 대하여 이러한 궁극유계 제어를 설계하고, 설계 파라미터 중 한 개를 추정하고 적응시키는 적응견실 제어를 제안하였다.

일반적으로 산업용 로봇은 하모닉 드라이브를 사용하여 큰 토크를 발생시키고, 이 토크로 로봇 머니플레이터를 구동하고 있다. 그런데 이러한 감속기어를 사용함

\* 현대중공업 산업기술연구소 메카트로닉스연구실

\*\* 건국대학교 공과대학 기계공학과 (중신회원)

으로써 백래시로 인한 문제, 마찰에 의한 에너지 손실 등을 초래하게 된다.<sup>(1)</sup> 1980년대 초반에 미국 Carnegie-Mellon 대학과 MIT 대학을 중심으로 위의 문제점들을 해결하고 고속 고성능의 산업용 로봇을 위하여, 기어를 사용하지 않은 직접구동 로봇을 개발하였다.<sup>(2)</sup>

직접구동 로봇은 여러 가지 장점이 있는 반면, 로봇 머니플레이터의 동특성이 비선형이고 시변이며, 축간의 커플링 효과, 마찰력, 축정 잡음 등의 영향이 간접구동 로봇에 비하여 상대적으로 크기 때문에 정확한 위치 추종 제어가 어렵다. 이러한 직접구동 로봇을 제어하기 위하여 여러 가지 고등제어 이론들이 시도되어 왔다. 그 중 한가지 방법으로, 위의 여러 가지 영향들을 불확실성으로 취급한 뒤, Lyapunov의 제 2방법에 의하여 안정도를 만족하게 하는 궁극유계제어 방법이 있다.<sup>(3, 10, 11)</sup> 본 논문에서는 이러한 궁극유계제어에서 나아가, Y. H. Chen<sup>(9)</sup>의 적응건설제어 알고리즘을 직접구동 로봇 머니플레이터에 적용해보고자 한다. 이 적응건설제어의 장점은 부가적인 유계외란이 존재하되, 구체적인 유계값이 알려지지 않은 경우에 사용할 수 있다는 것이다. 본 논문의 목적은 두 가지라고 할 수 있다. 한가지는 Y. H. Chen의 적응건설제어 이론을 실제 시스템에 적용하여 그 타당성을 입증하는 것이고, 다른 한가지는 이 고등제어이론을 적용하여 로봇 머니플레이터의 운동추종제어를 시도해 보는 것이다.

2절에서는 Y. H. Chen의 적응건설제어 알고리즘을 요약한다. 3절에서는 실험 및 시뮬레이션에서 사용할 2축 직접구동 SCARA 로봇에 대하여 기술하고, 또 적응건설제어 알고리즘을 적용할 수 있도록 머니플레이터 동역학식을 변형한다. 4절에서는 시뮬레이션 및 실험결과를 기술하며, 5절에서 결론을 맺는다.

## 2. 불확실 시스템의 적응건설제어

이 절의 내용은 Y. H. Chen<sup>(9)</sup>의 적응건설제어 이론을 요약한 것이다. 다음과 같이 표현되는 불확실 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + e(x(t), \sigma(t), t) \quad (1)$$

$$y(t) = x(t) + \omega(t) \quad (2)$$

여기서  $x(t) \in R^n$ 는 상태벡터,  $u(t) \in R^m$ 는 제어입력

벡터,  $\sigma(t) \in R^p$ 는 불확실 파라미터 함수이다. 시스템 행렬  $A$ 와 입력 행렬  $B$ 는 모두 알려진 행렬이다. 불확실 함수  $e(\cdot): R \rightarrow \sum \subset R^p$ 는 Lebesgue 측정가능 (Lebesgue measurable)이다. 여기서  $\sum$ 는 알려지지 않은 긴밀집합(compact set)이다. 함수  $e(\cdot): R^n \times \sum \times R \rightarrow R^n$ 는 Carathéodory 함수이다. 그리고  $\omega(t) \in R^n$ 는 측정오차이다.  $\omega(\cdot): R \rightarrow \Omega \subset R^n$ 는 Lebesgue 측정가능이지만 알려지지 않은 함수이다. 여기서도  $\Omega$ 는 알려지지 않은 긴밀집합이다.

가정 1 :

$(A, B)$ 는 가안정(stabilizable)이다.

가정 2 :

$$(i) \exists \hat{e}(\cdot): R^n \times \sum \times R \rightarrow R^m \text{ such that} \quad (3)$$

$$e(x, \sigma, t) = B\hat{e}(x, \sigma, t),$$

$$\forall (x, \sigma, t) \in R^n \times \sum \times R$$

(ii) 알려지지 않은 다음과 같은 음이 아닌 실수  $k_1, k_2$ 가 존재한다.

$$\|\hat{e}(x, \sigma, t)\| \leq k_1 + k_2 \|x\|, \quad (4)$$

$$\forall (x, \sigma, t) \in R^n \times \sum \times R$$

가정 1과 2를 만족하는 시스템 (1), (2)에 대하여 다음과 같은 출력피드백 선형 건설제어를 정의할 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$u(y(t)) = Ky(t) - \gamma B^T Py(t) \quad (5)$$

여기서

$$\gamma \geq \gamma_o = \frac{1}{2} \left[ \frac{k_2^2}{C_1 \lambda_{\min}(\Omega)} + \frac{(\|K\| \hat{\omega} + k_1)^2}{C_2} \right] \quad (6)$$

$$\hat{\omega} \triangleq \max_{\omega \in \Omega} \|\omega\|$$

이고,  $C_1 \in (0, 1), C_2 \in (0, \infty)$ 는 설계 파라미터이며,  $P, Q$ 는 양의 한정행렬(positive definite matrix)로서 다음과 같은 Lyapunov 방정식의 해이다.

$$\bar{A}^T P + P \bar{A} + Q = 0,$$

$$\bar{A} \triangleq A + BK$$

여기서  $K$ 는  $\bar{A}$ 를 안정하게 하는 행렬로 선정한다.

식 (5)의 첫째 부분은 공칭(nominal) 시스템을 안정하게 하는 제어동작이고, 두 번째 부분은 불확실함수의 최대 한계를 사용하여 불확실성의 영향을 제거하기 위한 제어동작이다. 그러나  $k_1, k_2$ 가 알려지지 않았기

때문에  $\gamma_0$ 도 알려지지 않으므로, 식 (5)는 비현실적이다. 따라서 식 (5)를 적용하기 위하여  $\gamma$ 에 대한 다음과 같은 적용알고리즘을 고려한다.

$$\dot{\hat{\gamma}}(t) = l_1 \|B^T P y(t)\|^2 - l_2 \hat{\gamma}(t) - l_3 \hat{\gamma} \|B^T P y(t)\| \quad (7)$$

여기서  $l_1, l_2, l_3 > 0$ 인 상수이다.

**정리 1.**

가정 1, 2를 만족하는 불확실 시스템이 다음과 같은 제어입력을 가진다고 가정하자.

$$u(t) = Ky(t) - \hat{\gamma} B^T P y(t) \quad (8)$$

그러면 다음 미분방정식에 대하여, 아래의 성질들을 만족하는 상수  $\underline{d} > 0$ 가 존재한다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B[Ky(t) - \hat{\gamma}(t)B^T P y(t)] + e(x(t), \sigma(t), t) \quad (9.1)$$

$$\dot{\hat{\gamma}} = l_1 \|B^T P y\|^2 - l_2 \hat{\gamma} - l_3 \hat{\gamma} \|B^T P y\| \quad (9.2)$$

$$x(t_0) = x_0, \hat{\gamma}(t_0) = \hat{\gamma}_0$$

(i) 해의 존재성:

모든  $(x_0, \hat{\gamma}_0, t) \in R^n \times R \times R$ 에 대하여 식 (9)의 해  $(x(\cdot), \hat{\gamma}(\cdot)) : [t_0, t_1] \rightarrow R^n \times R$ 가 존재한다.

(ii) 평등 유계성 (uniform boundedness):

$$\eta = [x^T \hat{\gamma} - \gamma]^T, \eta_0 = [x_0^T \hat{\gamma}_0 - \gamma_0]^T \text{라고 두자.}$$

$\|\eta_0\| \leq r$ 인, 식 (9)의 임의의  $r > 0$ 과 임의의  $\eta(\cdot) : [t_0, t_1] \rightarrow R^n \times R, \eta_0(t_0) = \eta_0$ 에 대하여, 다음 식을 만족하는 상수  $d(r) > 0$ 이 존재한다.

$$\|\eta(t)\| \leq d(r), \forall t \in [t_0, t_1]$$

(iii) 해의 확장성:

식 (9)의 모든 해  $(x(\cdot), \hat{\gamma}(\cdot)) : [t_0, t_1] \rightarrow R^n \times R$ 는  $[t_0, \infty)$ 로 확장될 수 있다.

(iv) 평등 궁극 유계성 (uniform ultimate boundedness):

모든  $\bar{d} \geq \underline{d}$ 와  $r > 0$ 에 대하여,  $\|\eta_0\| \leq r$ 을 만족하는 임의의  $\eta(\cdot) : [t_0, \infty) \rightarrow R^n \times R, \eta_0(t_0) = \eta_0$ 가 주어지면, 다음 식을 만족하는 유한시간  $T(\bar{d}, r) \geq 0$ 가 존재한다.

$$\|\eta(t)\| \leq \bar{d}, \forall t \geq t_0 + T(\bar{d}, r)$$

(v) 평등 안정성 (uniform stability):

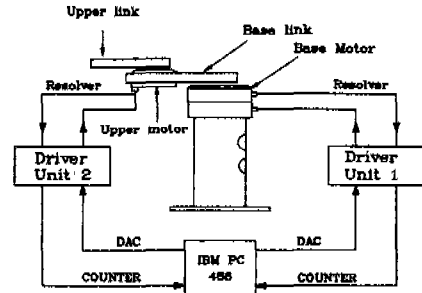


Fig. 1 Schematics of the 2 DOF direct-drive SCARA robot

모든  $\bar{d} \geq \underline{d}$ 에 대하여, 임의의  $\eta(\cdot) : [t_0, \infty) \rightarrow R^n \times R, \eta(t_0) = \eta_0$ 가 주어지면, 다음 식을 만족하는 상수  $\delta(\bar{d}) > 0$ 가 존재한다.

$$\|\eta_0\| \leq \delta(\bar{d}) \Rightarrow \|\eta\| \leq \bar{d}, \forall t \geq t_0$$

### 3. 2축 직접구동 SCARA 로봇

본 연구에서 사용된 2축 직접구동 SCARA 로봇 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다. Kon-Kuk DD Robot(건국 직접구동 로봇)이라 명명된 이 로봇 시스템은 2개의 NSK Megatorque 모터와 Driver Unit, 두 개의 두랄루민 링크와 지지대, 다기능 I/O 보드(National Instruments), 카운터 보드, IBM PC/486 호환기종을 사용하고 있다. 각 모터에는 리졸버가 부착되어 있고, 리졸버 신호는 RDC(Resolver to Digital Converter)를 거쳐 두 개의 사각파신호로 바뀐 다음 카운터에 의하여 위치 및 속도 신호로 만들어지고, 이것이 되먹임 신호로 사용된다.

강체링크를 가진  $n$ 자유도 로봇의 동역학은 Lagrange-Euler 방법을 사용하여 다음과 같이 유도될 수 있다.<sup>(10)</sup>

$$M(\theta(t))\dot{\omega}(t) + v(\theta(t), \omega(t)) + g(\theta(t)) + f(t, \theta(t), \omega(t), \tau(t)) = \tau(t) \quad (10)$$

여기서  $\theta(t)$ 는 각위치,  $\omega(t)$ 는 각속도,  $\tau(t)$ 는 모터에서 발생하는 토크를 나타낸다.  $M(\theta)$ 는 대칭이며 양의 한정(positive definite)인 관성행렬이고,  $v(\theta, \omega)$ 는 Coriolis 가속도와 원심가속도에 기인하는 벡터이고,  $f(t, \theta, \omega, \tau)$ 는 마찰토크 벡터이며  $g(\theta)$ 는 중력에 의한

토크벡터이다.

Kon-Kuk DD 로봇에서 중력에 의한 토크는 0이고, 지배적인 마찰토크는 Coulomb 마찰토크이기 때문에, 위의 각 항을 구체적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{bmatrix}, \begin{matrix} m_{11} = p_3 + 2p_1 \cos \theta_2 \\ m_{12} = p_2 + p_1 \cos \theta_2 \\ m_{22} = p_2 \end{matrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} -\omega_2(2\omega_1 + \omega_2)p_1 \sin \theta_2 \\ \omega_1^2 p_1 \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$f(\omega, \tau) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$$

$$f_i = \begin{cases} T_i \operatorname{sign}(\omega_i) & \text{if } |\omega_i| > 0 \\ T_i \operatorname{sign}(\tau_i) & \text{if } |\omega_i| = 0 \text{ and } |\tau_i| > T_i \\ \tau_i & \text{if } |\omega_i| = 0 \text{ and } |\tau_i| \leq T_i \end{cases} \quad i=1, 2$$

여기서,

$$\begin{aligned} p_1 &= 0.123 + 0.08M_p \\ p_2 &= 0.138 + 0.0625M_p + I_p \\ p_3 &= 1.676 + 0.165M_p + I_p \\ M_p &= 0 \text{ or } 3.76 \text{ Kg} \\ I_p &= 0 \text{ or } 0.012 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \\ T_1 &= 3.2 \text{ N} \cdot \text{m} \\ T_2 &= 0.17 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

이고,  $\theta_1, \omega_1, \tau_1$ 은 1축(기저축)에 대한 각위치, 각속도, 입력토크이며,  $\theta_2, \omega_2, \tau_2$ 는 2축(위축)에 대한 변수이다. 위에서 나타낸 머니플레이터의 운동방정식 (10)을 식 (1)의 형태로 나타내기 위하여 다음과 같은 형태로 바꾼다.

$$\dot{\omega}(t) = D(\theta(t))[\tau(t) - v(\theta(t), \omega(t)) - f(t, \theta(t), \omega(t), \tau(t)) - g(\theta(t))]$$

여기서

$$D(\theta) \triangleq M^{-1}(\theta) \Delta D_o [I + E(\theta)]$$

$$D_o \triangleq \frac{\max_{\theta} \{\lambda_{\max}(D(\theta))\} + \min_{\theta} \{\lambda_{\min}(D(\theta))\}}{2}$$

그러면 식 (1)과 (2)는 다음과 같은 형태가 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B\tau(t) + e(x(t), \sigma(t), t) \\ y(t) &= x(t) \end{aligned}$$

여기서

$$x(t) = \begin{bmatrix} \theta_d(t) - \theta(t) \\ \omega_d(t) - \omega(t) \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -D_o I \end{bmatrix}$$

이고,

$$\hat{e}(x, \sigma, t) = -D_o^{-1} \dot{\omega}_d - [I + E][v + f] + Eu$$

이다. 상태벡터의 정의에서  $\theta_d(t), \omega_d(t)$ 는 각각  $2 \times 1$  벡터로써, 목표궤적의 각위치 및 각속도를 나타낸다.  $A, B$  행렬에서  $I$ 는  $2 \times 2$  단위행렬이다. 위의 식에서 Coriolis 및 원심력의 항  $v(\theta, \omega)$ 는 관절속도 벡터  $\omega$ 의 2차 함수이므로 가정 2를 만족하기가 어렵다. 하지만,  $v(\theta, \omega)$  대신에 근사적으로  $v(\theta_d, \omega_d)$ 를 쓴다고 가정하자. 그러면 2절의 가정 1, 2가 만족되고, 식 (8)의 적응건설제어 알고리즘을 적용할 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 및 실험

건국 직접구동 로봇에 위의 적응건설제어 알고리즘을 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행한다. 대상 작업은 Fig. 2와 같이 7차 다항식으로 표현된 목표궤적을 각 축이 동시에 추종하는 것이다. 부하하중은 위 링크의 끝부분에 작용되고, 부하변동은 0kg에서 3kg으로, 또 3kg에서 0kg으로 변한다고 간주한다. 시뮬레이션에서 대상 플랜트는 연속시간으로 모델링하고, 제어기는 이산시간으로 모델링하였다. 그리고 IBM PC/

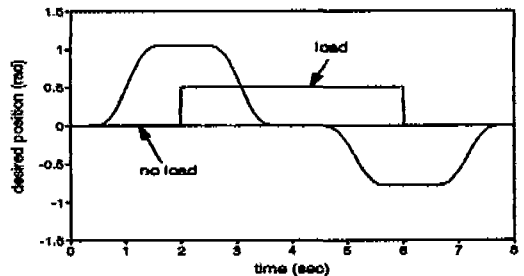


Fig. 2 Desired trajectory for each axis and payload change

486으로 이 로봇시스템을 제어하였다. 실험에서 실시간 제어를 위하여 IBM PC/486이 지원하는 하드웨어 인터럽트를 이용하였으며, 샘플링 시간은 8ms로 하였다.

설계 파라미터는 다음과 같은 값으로 선정한다.

$$K = \begin{bmatrix} 140 & 0 & 9.18 & 0 \\ 0 & 14 & 0 & 0.981 \end{bmatrix}$$

$$Q = \text{diag}(16000, 10, 200, 1),$$

$$(l_1, l_2, l_3) = (1, 10, 10),$$

여기서  $K$ 는  $\bar{A}$ 의 고유치가 충분히 작아지도록 (약 -18, -68,  $-4.3 \pm 10j$ ) 선정하였으며,  $Q$ 는 아래 축의 제어입력이 위 축의 제어입력보다 커지도록 선정하였다.  $l_i$  값은 적당한 적응속도를 갖도록 선정하였다.

그리고 3절에서 제안한 방법을 사용하여  $D_0$  값을 구하면 다음과 같다.

$$D_0 = 8.8$$

상태 벡터 및 적응 알고리즘의 초기치는 다음과 같이 둔다.

$$x_0 = 0, \hat{\gamma}_0 = 1$$

이와 같이 필요한 값들을 정한 다음, 부하가 있을 때와 없을 때에 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. Fig. 3-Fig. 5는 부하가 없는 경우 적응견실제어를 적용하였을 때 시뮬레이션한 결과이고, Fig. 6-Fig. 8은 실험한 결과이다. 이것으로부터 시뮬레이션과 실험결과가 근사적으로 일치함을 알 수 있다. 본 적응견실제어의 제어성능을 평가하기 위하여 PID 제어의 경우와 비교한다. PID 제어에서는 제어가 이득 튜닝을 하여 위치추종이 잘되는 파라미터를 선정하였다. Fig. 9는 부하가 없는 경우 PID 제어를 적용하였을 때 실험한 결

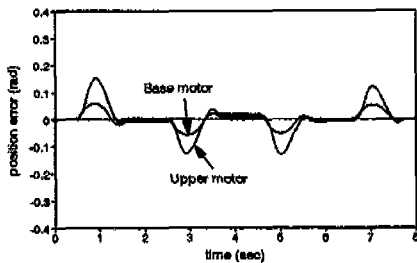


Fig. 3 Position tracking error when the adaptive robust control is used without payload; simulation

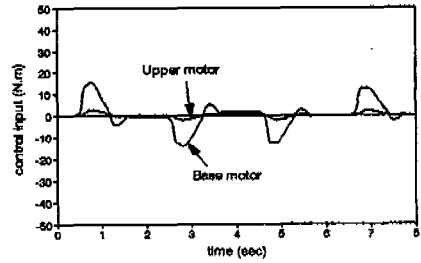


Fig. 4 Control input when the adaptive robust control is used without payload; simulation

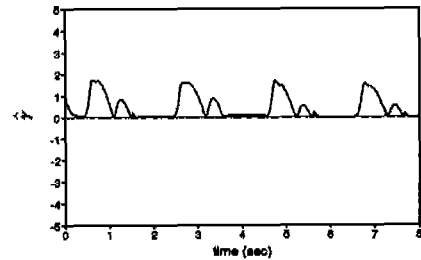


Fig. 5 Variation of  $\hat{\gamma}$  values when the adaptive robust control is used without payload; simulation

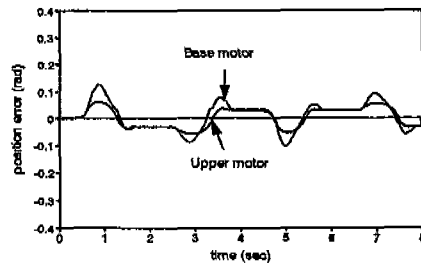


Fig. 6 Position tracking error when the adaptive robust control is used without payload; experiment

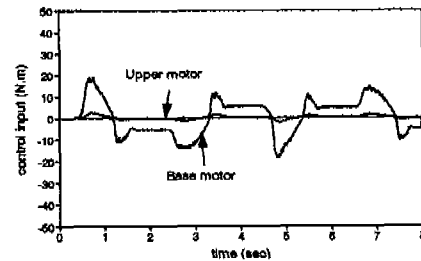


Fig. 7 Control input when the adaptive robust control is used without payload; experiment

과이다. 로봇실험 장치에 그리퍼가 설치되어 있지 않으므로 Fig. 2와 같은 부하변동을 줄 수가 없기 때문에, 이 경우에는 Fig. 10, Fig. 11과 같이 시뮬레이션 결과만 서로 비교한다. 이 결과로부터 적응건설제어와 PID 제어의 위치추종 성능이 근사함을 알 수 있다.

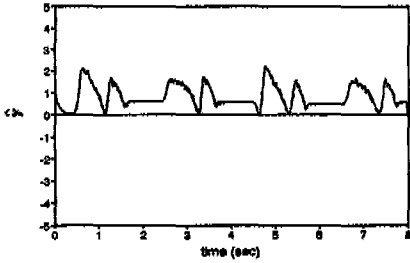


Fig. 8 Variation of  $\hat{\gamma}$  values when the adaptive robust control is used without payload; experiment

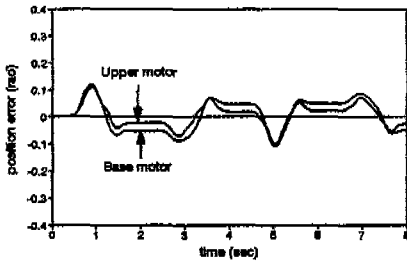


Fig. 9 Position tracking error when PID control is used without payload; experiment

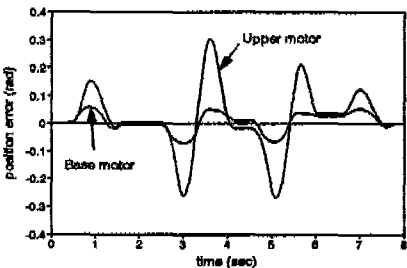


Fig. 10 Position tracking error when the adaptive robust control is used with payload; simulation

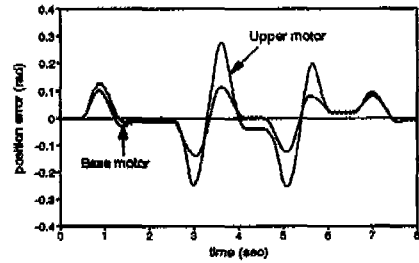


Fig. 11 Position tracking error when PID control is used with payload; simulation

## 5. 결론

본 논문에서는 Y. H. Chen이 제안한 적응건설제어 알고리즘을 직접구동 로봇의 위치추종제어에 적용하는 방법을 제시하였다. 2축 직접구동 SCARA 로봇에 대한 시뮬레이션과 실험을 통하여, 로봇 머니플레이터의 축간의 커플링 영향, 마찰력, 비선형이고 시변인 동특성 등을 모두 불확실함수로 취급하여 제어할 수 있음을 보였다. 적응건설제어의 장점은 부가적인 유계외란에 대해 건실성을 가지고, 시스템의 불확실성에 대해 사전지식이 필요 없다는 것이다. 본 연구에서 사용한 2축 직접구동 SCARA 로봇에 대해서는 Y. H. Chen의 적응건설제어와 PID 제어가 위치추종 면에서 서로 비슷한 제어 성능을 보여 주었다.

## 참고문헌

1. H. Asada and K. Youcef-Toumi, Direct-Drive Robots: Theory and Practice, The MIT Press, 1987.
2. B. R. Barmish and G. Leitmann, "On Ultimate Boundedness Control of Uncertain Systems in the absence of Matching Assumption", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-27, pp.153-158, February 1982.
3. Y. H. Chen, "Adaptive Robust Control of Uncertain Systems with Measurement Noise", Automatica, Vol.28, pp.715-728, 1992.
4. Y. H. Chen and G. Leitmann, "Robust-

- ness of uncertain systems in the absence of matching assumptions", *Int. J. Control*, Vol.45, pp.1527-1542, 1987.
5. M. J. Corless and G. Leitmann, "Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol.AC-26, pp.1139-1144, October 1981.
  6. S. Gutman, "Uncertain Dynamical Systems-A Lyapunov Min-Max Approach", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol.AC-24, pp.437-443, June 1979.
  7. C. G. Kang, "Robust Deterministic Control for Robotic Manipulators", Ph D. thesis, University of California at Berkeley, 1989.
  8. G. Leitmann, "On the Efficacy of Nonlinear Control in Uncertain Linear Systems", *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, Vol.102, pp.95-102, June 1981.
  9. Z. Qu and J. Dorsey, "Robust Control of Generalized Dynamic Systems without the matching Conditions", *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, Vol.113, pp.582-589, December 1991.
  10. M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, 1989.
  11. 강철구, "견실확정제어이론을 이용한 직접구동 로봇의 운동제어", *한국정밀공학회지*, 11권, 3호, pp.82-95, 1994.