

2축 직접 구동 SCARA 로봇에 대한 적응 견실제어

이지형, 강철구
전국대학교 공과대학 기계공학과

Adaptive Robust Control for 2 Axis Direct Drive SCARA Robots

Ji Hyoung Lee, Chul Goo Kang
Department of Mechanical Engineering
Kon Kuk University

Abstract

In general, systems contain uncertain elements in the real world; these may be parameters, constant or varying, that are unknown or imperfectly known. When the uncertainty is assumed to satisfy the matching condition and to be cone-bounded, Y.H. Chen[8] proposed an adaptive robust control algorithm which introduced adaptive scheme for a design parameter into robust deterministic controls.

In this paper, the above control algorithm is applied to the position tracking control of 2 DOF direct drive SCARA robots, and simulation and experimental studies are conducted to verify the control algorithm and to evaluate control performance.

1. 서론

일반적으로 시스템은 불확실 요소(uncertain element)를 포함하며, 그 불확실 요소들은 알려지지 않았거나 불완전하게 알려진 파라미터, 상수 또는 변수일 수 있고, 측정오차(measurement error) 또는 입력일 수도 있다. 최근에 불확실성을 확정적(deterministic)으로 취급하여 안정도를 보장하는 견실제어 알고리즘이 많이 연구되어 왔다[1, 2, 3, 5]. 이러한 제어 알고리즘은 파라미터 추정에 의하지 않고 제어를 수행하기 때문에 일반적인 적응제어 알고리즘과는 달리 견실성(robustness)을 가지게 된다.

로봇 머니플레이터의 제어 목적은 많은 경우에 미리 정의된 목표궤적을 추종(tracking)하게 하는 것이다. 일반적으로 산업용 로봇에서는 하모닉 드라이브를 사용하여 저속, 고토크를 발생시키고 있다. 최근에 와서 기어에 의하여 발생할 수 있는 문제점들을 해결하고 고속·고성능의 산업용 로봇을 위하여, 기어를 사용하지 않은 직접구동 로봇을 개발하였다. 직접구동 로봇 머니플레이터의 동특성은 비선형적이고 시변이며, 축간의 커플링 효과, 마찰력의 영향, 측정 잡음 등으로 인하여 정확한 위치 추종 제어가 어렵다. 이러한 직접구동 로봇을 제어하기 위하여 여러 가지 고등제어 이론들이 개발되어 왔다. 그 중 한 가지 방법으로써, 위의 여러가지 영향들을 불확실성으로 취급한 뒤, Lyapunov의 제 2방법에 의하여 안정도를 만족하게 하는 궁극유계제어(ultimate boundedness control) 방법이 있

다[3, 4, 12, 13]. 본 연구에서는 궁극유계제어 알고리즘에서 제어 파라미터를 적용하게 하는 Y.H. Chen[8]의 적응 견실제어 알고리즘에 기초하여, 2축 직접구동 SCARA 머니플레이터의 위치추종제어를 실현하고자 한다.

2. 불확실 시스템의 적응 견실제어

다음과 같이 표현되는 불확실 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + e(x(t), \sigma(t), t) \quad (2.1)$$

$$x(t_0) = x_0$$

$$y(t) = x(t) + \omega(t) \quad (2.2)$$

여기서 $x(t) \in R^n$ 는 상태벡터, $u(t) \in R^m$ 는 제어입력벡터, $\sigma(t) \in R^p$ 는 불확실 파라미터 함수이다. 시스템 행렬 A 와 입력 행렬 B 는 모두 알려진 행렬이다. 불확실 함수 $e(\cdot): R \times R \rightarrow \Sigma \subset R^p$ 는 Lebesgue 측정가능이다. 여기서 Σ 는 알려지지 않은 긴밀집합(compact set)이다. $e(\cdot): R^n \times \Sigma \times R \rightarrow R^n$ 는 Carathéodory 함수이다. 그리고 $\omega(t) \in R^n$ 는 측정오차이다. $\omega(\cdot): R \rightarrow R^n$ 는 Lebesgue 측정가능이지만 알려지지 않은 함수이다. 여기서도 Ω 는 알려지지 않은 긴밀집합이다.

가정 1:

(A, B)는 가안정(stabilizable)이다.

가정 2:

i) $\exists \hat{e}(\cdot): R^n \times \Sigma \times R \rightarrow R^m$ s.t.

$$e(x, \sigma, t) = B\hat{e}(x, \sigma, t), \quad (2.3)$$

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

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

$$\|\dot{e}(x, \sigma, t)\| \leq k_1 + k_2 \|x\|, \quad (2.4)$$

$$\forall (x, \sigma, t) \in \mathbb{R}^n \times \Sigma \times \mathbb{R}$$

가정 1과 2를 만족하는 시스템 (2.1), (2.2)에 대하여 다음과 같은 선형 전실패어를 정의한다.

$$u(y) = Ky(t) - \gamma B^T Py(t) \quad (2.5)$$

여기서

$$\gamma \geq \gamma_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{k_2^2}{C_1 \lambda_{\min}(Q)} + \frac{(\|K\|\bar{\omega} + k_1)^2}{C_2} \right] \quad (2.6)$$

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

$C_1 \in (0, 1)$, $C_2 \in (0, \infty)$ 는 설계 파라미터이다.

그리고 행렬 $(P, Q) > 0$ 는 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 것으로 선정한다.

식 (2.5)의 첫째 부분은 공칭(nominal) 시스템을 안정하게 하는 것이고, 두번째 부분은 불확실함수의 최대 한계(maximum bound)를 사용하여 불확실성을 제거하기 위한 것이다. 그러나 k_1, k_2 가 알려지지 않았기 때문에 γ_0 도 알려지지 않으므로, 식 (2.5)는 비현실적이다. 그래서 식 (2.5)를 적용하기 위하여 γ 에 대한 다음과 같은 적응계획(adaptive scheme)을 고려한다.

$$\dot{\gamma}(t) = l_1 \|B^T Py(t)\|^2 - l_2 \dot{\gamma}(t) - l_3 \dot{\gamma} \|B^T Py(t)\| \quad (2.7)$$

여기서 $l_1, l_2, l_3 > 0$ 인 상수이다.

Theorem 1.

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

$$u(t) = Ky(t) - \dot{\gamma} B^T Py(t) \quad (2.8)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B[Ky(t) - \dot{\gamma}(t)B^T Py(t)] \\ &\quad + e(x(t), \sigma(t), t) \end{aligned} \quad (2.9.1)$$

$$\dot{\gamma} = l_{11} \|B^T Py\|^2 - l_2 \dot{\gamma} - l_3 \dot{\gamma} \|B^T Py\| \quad (2.9.2)$$

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

(P1) 해의 존재성(existence of solution) :

각각의 $(x_0, \gamma_0, t) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ 에 대해 식 (2.9)의 해

$(x(\cdot), \dot{\gamma}(\cdot)) : [t_0, t_1] \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ 가 존재한다.

(P2) 일양 유계성(uniform boundedness) :

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

$\|\eta_0\| \leq r$ 인, 식 (2.9)의 임의의 $r > 0$ 과 임의의 $\eta(\cdot) : [t_0, t_1] \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$, $\eta(t_0) = \eta_0$ 에 대하여, 다음식을 만족하는 상수 $d(r) > 0$ 이 존재한다.

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

(P3) 해의 확장성(extension of solutions) :

식 (2.9)의 모든 해 $(x(\cdot), \dot{\gamma}(\cdot)) : [t_0, t_1] \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ 는 $[t_0, \infty)$ 로 확장될 수 있다.

(P4) 일양 궁극 유계성(uniform ultimate boundedness) :

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

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

(P5) 일양 안정성(uniform stability) :

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

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

3. 2축 직접구동 SCARA 로봇시스템

실험실에 설치된 2축 직접구동 SCARA 로봇시스템의 개략도는 Fig.3.1과 같다. 이 로봇시스템은 2개의 NSK Megatorque 모터를 사용하고 있으며, 중요 제원은 표 3.1과 같다. 이 시스템을 블록선도로 나타내면 Fig. 3.2와 같다.

로봇의 동적 운동방정식은 Lagrange-Euler 방법을 사용하여 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} M(\theta(t))\ddot{\omega}(t) + V(\theta(t), \omega(t)) + g(\theta(t)) &= \\ \tau(t) - f(t, \theta(t), \omega(t), \tau(t)) \end{aligned} \quad (3.1)$$

여기서 $\theta(t)$ 는 각위치, $\omega(t)$ 는 각속도, $\tau(t)$ 는 모터에서 발생되는 토크를 나타낸다. $M(\theta)$ 는 대칭이며 양의 한정(positive definite)인 관성행렬이고, $V(\theta, \omega)$ 는 Coriolis 가속도와 원심 가속도에 기인하는 벡터이며 $f(t, \theta, \omega, \tau)$ 는 마찰토크 벡터를 나타낸다. 그리고 $g(\theta)$ 는 중력에 의한 토크벡터로서 여기서는 0이다.

머니플레이터의 Coulomb 마찰 토크는 다음과 같이 나타내어진다.

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

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

위에서 나타난 매니퓰레이터의 동적 운동방정식 (3.1)을 식 (2.1)의 형태로 나타내면 다음과 같다.

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

$$\dot{e}(t, \theta, x) = -D_o \dot{\omega}_d - [I+E][V + f] + Eu$$

여기서 $D_o = [\lambda_{\max}(D(\theta)) + \lambda_{\min}(D(\theta))] / 2$ 이고

$D(\theta) = M(\theta)^{-1}$ 이다. 여기서 Coriolis와 원심력의 항 $V(\theta, \omega)$ 는 관절 속도 벡터 ω 의 2차 함수이므로 가정 2를 만족하기가 어렵다. 하지만, 근사적으로 $V(\theta_d, \omega_d)$ 를 $V(\theta, \omega)$ 대신에 쓴다고 가정하자. 이렇게 함으로써 가정 1, 2가 만족되고 Y.H. Chen이 제안한 식 (2.8)의 적용건실제어 알고리즘을 적용할 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 실험

제안된 제어 알고리즘을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인하고 직접 실험을 통하여 시뮬레이션의 결과와 비교해본다. 대상 작업은 집어나르기 작업으로서 목표궤적은 7차 다항식으로 Fig. 4.1과 같다. IBM AT 386으로 이 로봇 시스템을 제어하였으며, 대상 플랜트는 연속시간으로 하고 제어기는 이산시간으로 하여 시뮬레이션하였고, 실험에서는 하드웨어 인터럽트를 이용한 실시간 제어를 하였다. 그리고 제어기와 Megatorque 모터 사이의 정보교환은 당분간 RS-232C를 사용하였다. 되먹임 신호는 리졸버로부터 오는 위상차가 90°인 A, B상의 두 사각파이다. 이것을 입력으로 하는 16 비트 카운트를 제작하여 PC와 인터페이스하여 위치와 속도 신호를 받아 들였다. 샘플 주기는 20ms로 하였으며 영차출드를 사용하는 것으로 하였다. 설계 파라미터를 $Q = \text{diag}(16000, 10, 200, 1), (l_1, l_2, l_3) = (1, 10, 10), D_o = 8.8, x_o = 0, \dot{\gamma}_o = 1$ 로 선정하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 본 제어 알고리즘의 제어성능을 평가하기 위하여 PID제어의 경우와 비교하였다. 부하가 있을 때와 없을 때의 위치 추종, 위치오차, 제어입력에 대한 시뮬레이션과 실험 결과를 Fig. 4.2에서 Fig. 4.16까지 나타내었다. 시뮬레이션과 실험의 결과가 대체로 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 [8]에서 제안된 적응 건설 제어 알고리즘을 2축 직접구동 산업용 SCARA 로봇에 적용하여 시뮬레이션과 실험을 하였다. 이것으로부터 로봇 매니퓰레이터의 축간의 커플링 효과, 마찰력과 추정 잡음의 영향, 비선형이고 시변인 동특성 등을 모두 불확실함수로 취급하여 제어할 수 있음을 보였다. 또한 [8]에서 제안한 적응 건설 제어 알고리즘을 직접구동 매니퓰레이터에 적용할 수 있음을 보였다. 본 제어 알고리즘의 제어 성능은 가변하중이 일정할 경우 PID 제어와 비슷하였다.

참고문헌

- [1] S. Gutman, "Un certain Dynamical Systems - A Lyapunov Min - Max Approach", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-24, pp. 437-443, June 1979.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Y.H. Chen, "On the deterministic performance of uncertain dynamical systems", *Int. J. Control*, vol. 43, pp. 1557-1579, 1986.
- [6] Y.H. Chen and G. Leitmann, "Robustness of uncertain systems in the absence of matching assumptions", *Int. J. Control*, vol. 45, pp. 1527-1542, 1987.
- [7] Y.H. Chen, "Design of Robust Controllers for Uncertain Dynamical Systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 33, pp. 487-491, May 1988.
- [8] Y.H. Chen, "Adaptive Robust Control of Uncertain Systems with Measurement Noise", *Automatica*, vol. 28, pp. 715-728, 1992.
- [9] Y.H. Chen, "On the Robustness of Mismatched Uncertain Dynamical Systems", *ASME J. Dynam. Syst. Contr.*, vol. 109, pp. 29-35, March 1987.
- [10] Y.H. Chen, "Modified adaptive robust control system design", *Int. J. Control*, vol. 49, pp. 1869-1882, 1989.
- [11] 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.
- [12] C.G. Kang, "Robust Deterministic Control for Robotic Manipulators", *Ph D. thesis*, University of California at Berkeley, 1989.
- [13] 강철구, 이지형, "센서와 액추에이터의 동특성을 고려한 1 자유도 로봇의 건설제어", *대한기계학회 추계학술대회논문집*, pp. 648-651, 1992.
- [14] M.W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, 1989.

표 3.1 SCARA 로봇의 물리적 파라미터

| Symbol | Value | Definition |
|----------|----------------------------|--|
| I_1 | 0.3059 Kg · m ² | Lower link inertia(about c.g.) |
| I_2 | 0.0890 Kg · m ² | Upper link inertia(about c.g.) |
| I_3 | 0.0750 Kg · m ² | Rotor inertia of the lower motor |
| I_4 | 0.0022 Kg · m ² | Rotor inertia of the upper motor |
| I_{4s} | 0.0312 Kg · m ² | Stator and housing inertia of the upper motor |
| I_p | 0.0002 Kg · m ² | Payload inertia(about c.g.) |
| M_1 | 7.5800 Kg | Lower link mass |
| M_2 | 3.1500 Kg | Upper link mass |
| M_3 | 40.000 Kg | Lower motor mass |
| M_4 | 6.5000 Kg | Upper motor mass |
| M_p | 3.0 Kg | Payload mass |
| L_1 | 0.3200 m | Lower link length |
| L_2 | 0.2500 m | Upper link length |
| L_3 | 0.1350 m | Distance from c.g. of the lower link to the lower motor axis |
| L_4 | 0.1220 m | Distance from c.g. of the upper link to the upper motor axis |
| T_1 | 5.3900 N · m | Lower axis Coulomb friction torque |
| T_2 | 0.9810 N · m | Upper axis Coulomb friction torque |

Note : c.g. implies the center of gravity.

NSK Megatorque motor specifications

| Specifications | Model RS 1010 | Model AS 0408 |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Maximum torque | 147.15 N · m | 9.81 N · m |
| Rotor inertia | 0.075 Kg · m ² | 0.00225 Kg · m ² |
| Maximum speed | 3.0 rps | 4.5 rps |
| Mass | 40 Kg | 6.5 Kg |
| Resolver resolution | 38400 count/rev | 25600 count/rev |

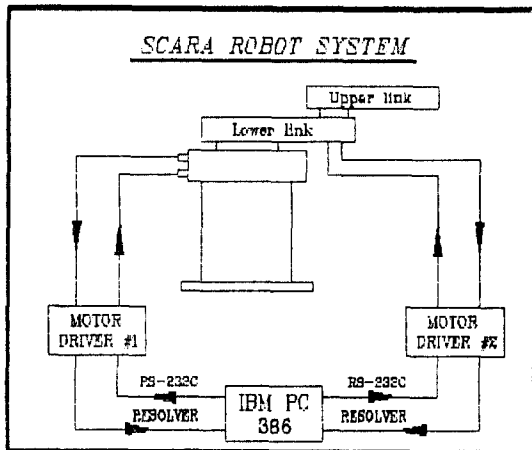


Fig. 3.1 2 DOF direct-drive manipulator

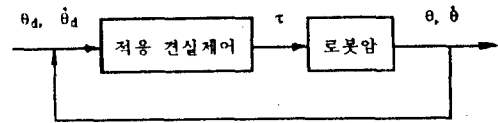


Fig. 3.2 Block diagram of the overall control system

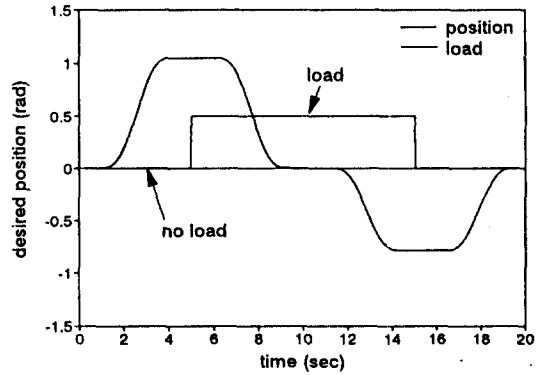


Fig. 4.1 Desired trajectory and payload changes

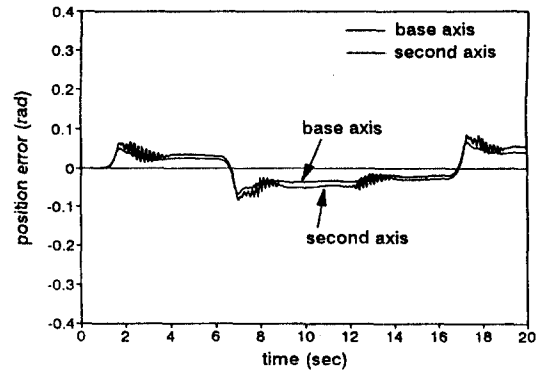


Fig. 4.2 Position tracking error when PID control is used without payload; simulation

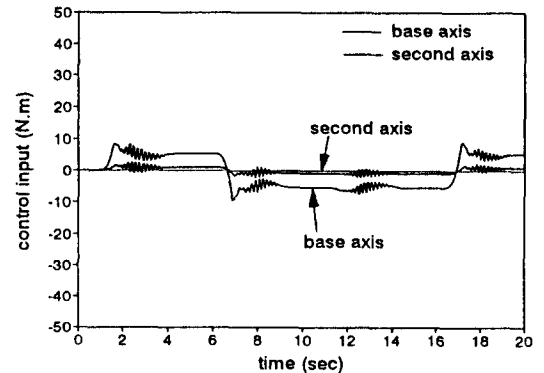


Fig. 4.3 Control input when PID control is used without payload; simulation

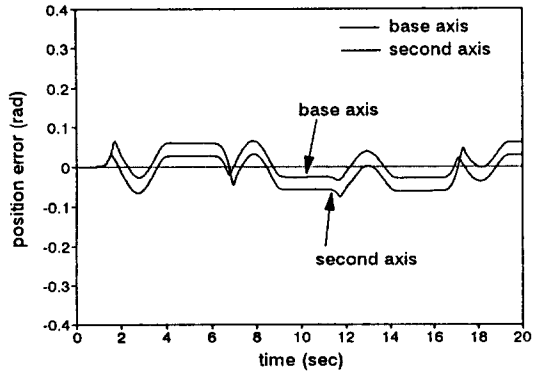


Fig. 4.4 Position tracking error when AR control is used without payload; simulation

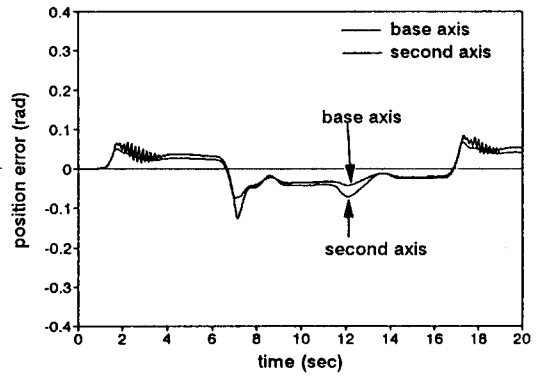


Fig. 4.7 Position tracking error when PID control is used with payload; simulation

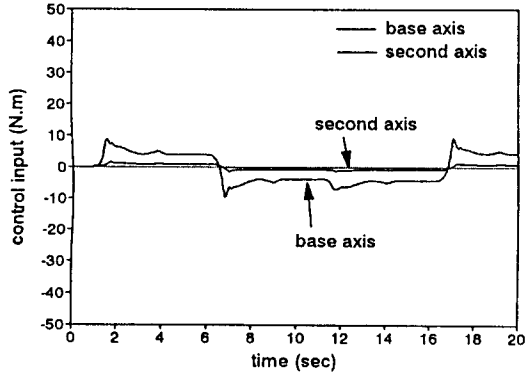


Fig. 4.5 Control input when AR control is used without payload; simulation

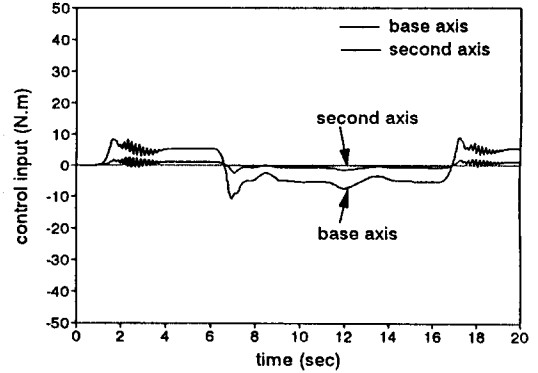


Fig. 4.8 Control input when PID control is used with payload; simulation

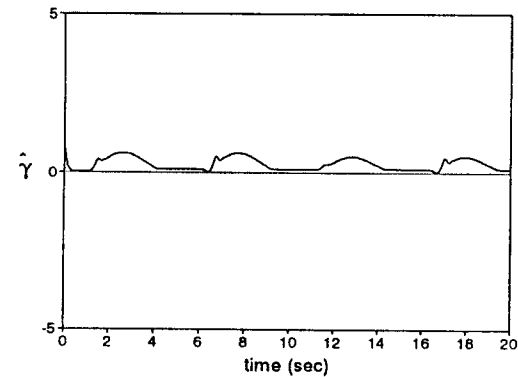


Fig. 4.6 Adaptation of $\hat{\gamma}$ values when AR control is used without payload; simulation

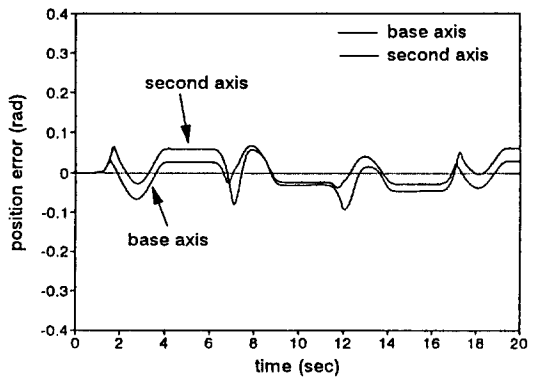


Fig. 4.9 Position tracking error when AR control is used with payload; simulation

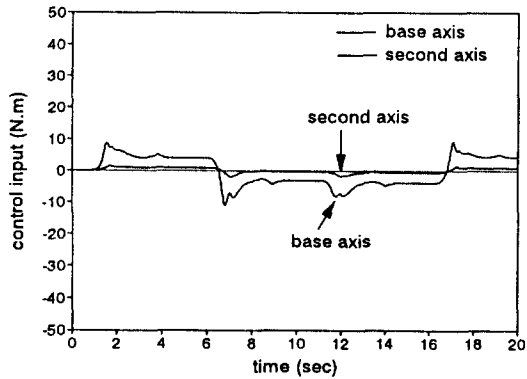


Fig. 4.10 Control input when AR control is used with payload; simulation

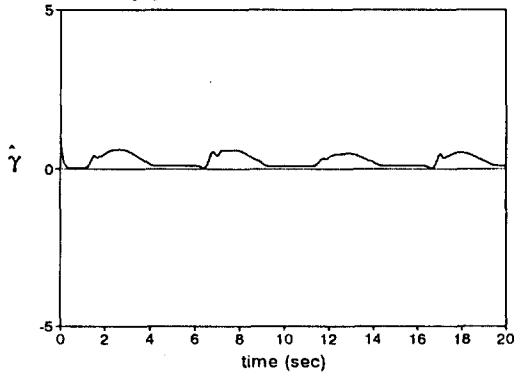


Fig. 4.11 Adaptation of $\hat{\gamma}$ values when AR control is used with payload; simulation

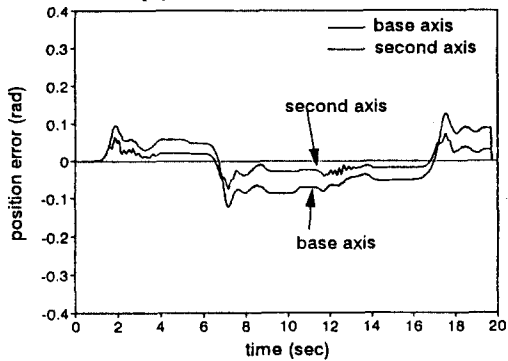


Fig. 4.12 Position tracking error when PID control is used without payload; experiment

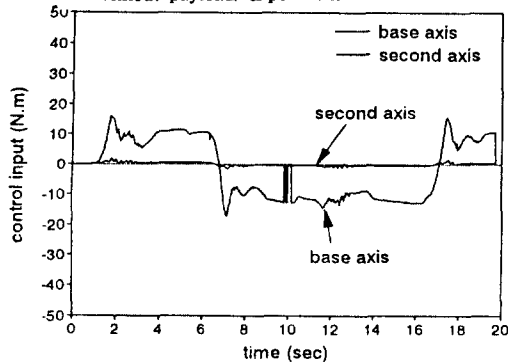


Fig. 4.13 Control input when PID control is used without payload; experiment

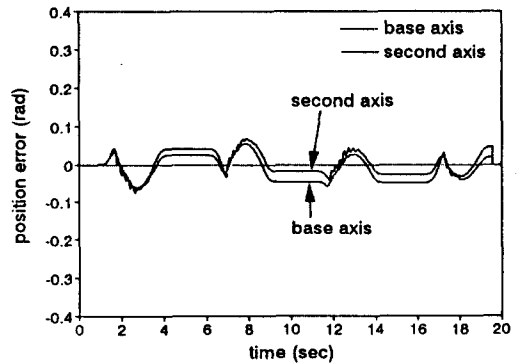


Fig. 4.14 Position tracking error when AR control is used without payload; experiment

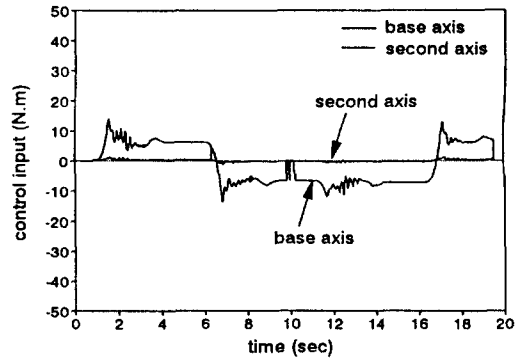


Fig. 4.15 Control input when AR control is used without payload; experiment

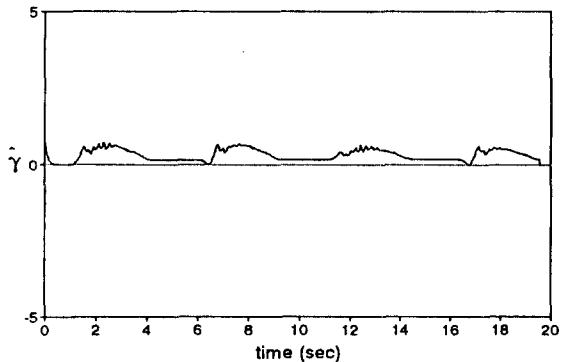


Fig. 4.16 Adaptation of $\hat{\gamma}$ values when AR control is used without payload; experiment