

## 조립용 로봇의 가변구조 적응제어

### Variable Structure Adaptive Control of Assembling Robot

한성현<sup>1</sup>, 왕한홍<sup>2\*</sup>, 윤대식<sup>3</sup>, 이경식<sup>4</sup>

1. 경남대학교 기계설계학과
2. 경남대학교 기계설계학과 대학원
3. 대우중공업 로봇시스템부
4. 통일중공업 특수개발부

#### Abstract

This paper represent the variable structure adaptive mode control technique which is new approach to implement the robust control of industrial robot manipulator with external disturbances and parameter uncertainties.

Sliding mode control is a well-known technique for robust control of uncertain nonlinear systems. The robustness of sliding model controllers can be shown in continuous time, but digital implementation may not preserve robustness properties because the sampling process limits the existence of a true sliding mode. The sampling process often forces the trajectory to oscillate in the neighborhood of the sliding surface. Adaptive control technique is particularly well-suited to robot manipulators where dynamic model is highly complex and may contain unknown parameters.

Adaptive control algorithm is designed by using the principle of the model reference adaptive control method based upon the hyperstability theory.

The proposed control scheme has a simple structure is computationally fast and does not require knowledge of the complex dynamic model or the parameter values of the manipulator or the payload.

Simulation results show that the proposed

method not only improves the performance of the system but also reduces the chattering problem of sliding mode control. Consequently, it is expected that the new adaptive sliding mode control algorithm will be suited for various practical applications of industrial robot control system.

#### 1. 머릿말

산업용 로봇트 매니플레이터는 각 관절 사이에 코리올리스(Coriolis)력 및 원심력 등과 같은 강한 비선형 및 불확실성을 지니고 있기 때문에 정확한 동특성의 모델링이 어려우므로 모델과 제어기에 대한 선형성의 가정 및 프로세스의 진행 중 플랜트의 매개변수가 일정하게 유지된다는 것 등의 여러 가정 하에서 제어알고리즘을 설계해 왔으므로 고도의 동력학적 성능이 요구될 경우에 이러한 가정 하에서 설계된 제어 알고리즘은 그 수렴 특성을 상실하게 됨으로서 좋은 제어 성능을 내지 못하게 된다. 또한 모델식이 구해진다 해도 작업환경의 변화나 부하변동과 같은 외란의 영향에 대처하면서 위치제어를 고속으로 수행하기란 상당히 어려운 문제이다.

VSC(variable structure control)이론을 근간으로 하는 슬라이딩 모드 제어는 비선형성, 파라미터 변동, 잡음 등에 대하여 강인한 제어시스템을 실현할 수 있는 제어이론으로 제어대상의 모델링 시에 어느 정도의 불확실함이 포함되어있더라도

목표로 하는 제어를 수행 가능케 한다. 슬라이딩모드 제어의 원리는 오차상태공간내에 설정한 초평면의 양측에서 제어구조를 변환하여 슬라이딩모드를 발생시킴으로서 제어대상을 초평면(hypersurface)에 구속하는 것이다. 따라서 파라미터의 변동, 비선형성, 잡음 등에 둔감한 특성을 지닌 견실한 제어계를 실현할 수 있게 된다.

적응제어 방식은 플랜트의 동특성에 대한 제한된 정보만을 가지고 예측할 수 있는 불확실성에 대처할 수 있는 진보된 제어 방식이라 할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 산업용 로봇 제어시스템의 성능한계점을 보완하여 다양한 작업조건의 변화에 대해서도 유연하게 적응할 수 있는 고속 고정도의 로봇 제어시스템을 설계하기 위해 새로운 제어기법에 대한 연구를 수행하였다. 제안되는 제어기의 기본구조는 기존의 슬라이딩모드 제어구조<sup>(6)</sup>의 특성인 입력토크의 증가에 대한 채터링의 발생현상을 보완하고 외부외란에 대해 견실한 제어특성을 직접 적응제어방식의 기준모델 적응제어책에 결합시킴으로서 실제 생산공정에서 빈번히 수반되는 부하의 변동 및 외란의 증가현상에 대해서도 정확한 위치 및 속도의 궤적 추종이 가능한 견실한 가변구조 적응기법을 제안하고자 한다.

## 2. 가변구조 적응제어기 설계

로봇 매니퓰레이터의 관절 좌표의 동적 방정식은 직접 기구학을 이용하여 작업좌표의 동적 방정식으로 변환할 수 있다. 일반적으로 매니퓰레이터의 동적방정식을 비선형 결합 (nonlinear coupling) 행렬방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + G(q) = \tau(t) \quad (1)$$

여기서  $q, \dot{q}, \ddot{q}$ 는 각각 관절각의 위치, 속도 및 가속도를 나타내고,  $D(q) \in R^{n \times n}$ 은 대칭 정지 관성행렬( $n \times n$ )이고,  $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 은 원심력과 코리올리스 벡터행렬( $n \times 1$ ),  $G(q) \in R^{n \times 1}$ 은 중력벡터행렬( $n \times 1$ ),  $\tau(t)$ 은 각 관절에 가해지는 관절 토크이다.

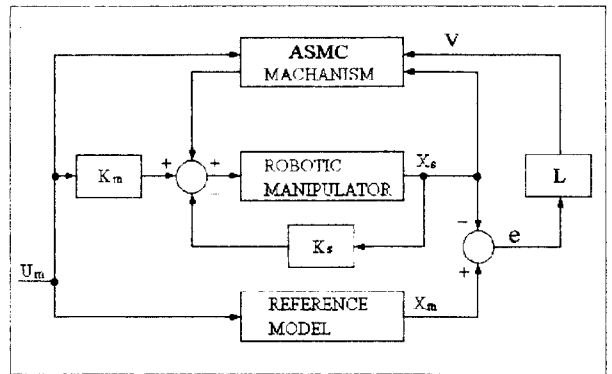


Fig. 1 Block diagram of adaptive-sliding mode control system.

본 연구에서 제안하고 있는 제어구조는 기준모델 적응제어구조를 기본구조로 하여 설계되었다. 기준모델 적응제어 시스템의 궁극적인 목적은 플랜트의 기준모델의 출력의 오차가 영이 되게 하는 즉,  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 가 되도록 하는 제어이득

을 선정하여 플랜트인 로봇 매니퓰레이터의 동특성이 기준모델을 추종하도록 하는 것이므로 기준모델의 선정이 매우 중요하다.

그런데 각 관절의 자유도 (degree of freedom)가 상호 결합이 되면 비선형(nonlinear)의 동특성을 지닌 로봇 매니퓰레이터의 각 관절에 대한 기준모델로서는 Dubowsky 에 의해 제안된 방법으로서 다음과 같이 기술되는 시불변 선형 2차 미분방정식으로 선정하였다.

$$\ddot{X}_m + A_i \dot{X}_m + B_i X_m = U_m \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

여기서  $X_m = [ X_m^T \quad \dot{X}_m^T ]$ 으로 정의하고 이 식을 상태공간 방정식(state space equation)으로 표기하면 다음 식과 같이 기술되어진다.

$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m U_m \quad (3)$$

여기서, 기준모델의 입력 및 출력의 상태변수는 다음과 같다.

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \Omega_0 & \Omega_1 \end{bmatrix}, \quad B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이고  $\Omega_0 = -B_i$ ,  $\Omega_1 = -A_i$ 이며  $A_i, B_i > 0$ 이다. 그리고  $X_m \in R^{n \times n}$  및  $U_m \in R^{n \times n}$ 는 각각 기준모델의 출력 및 입력의 상태변수를 나타내고 있다. 또한 기준모델과 플랜트의 출력오차 상태 방정식은 다음식과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} e(t) &= X_m(t) - X_s(t) \\ v(t) &= L e(t) \end{aligned} \quad (5)$$

위의 식(5)에서  $L$ 는 선형보상인자(linear compensator)이다. 그리고 제안된 매니플레이터의 적응슬라이딩모드 제어시스템(ASMC)의 제어입력은 Fig. 2에서와 같은 제어구조에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} U_s(t) &= \Phi_1(V, X_s, t)X_s(t) + \Phi_2(V, U_m, t)U_m(t) \\ &\quad - K_s X_s(t) + K_m U_m(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $K_s$  및  $K_m$ 은 각각 피이드백 게인 및 피이드 포워드 게인을 나타내고,  $\Phi_1$  및  $\Phi_2$ 는 슬라이딩 모드 제어구조를 내포한 적응제어칙으로써 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \Phi_1(V, X_s, t) &= P_1 \|V\|^{-1} \text{sgn}(X_s)^T \\ \Phi_2(V, U_m, t) &= P_2 \|V\|^{-1} \text{sgn}(U_m)^T \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $P_1, P_2$ 는 단위벡터 적응제어칙의 게인으로서 (8)식의 조건을 만족하는 수로서 positive definite 이어야 한다.

$$\begin{aligned} P_1 &> (\Lambda_R) \max (\Lambda_D) \min \\ P_2 &> (\Lambda_S) \max (\Lambda_D) \min \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $(\Lambda_R) \max$  및  $(\Lambda_S) \max$ 는 각각  $[RR^T]$  및  $[SS^T]$ 에 대한 최대고유치를 나타내고  $(\Lambda_D) \min$ 는  $[D^{-1}]$ 에 대한 최소고유치

를 나타낸다. 그리고  $[R]$ 과  $[S]$ 는 다음과 같이 정의되고 있다.

$$[R] = [K_s + B_s^+(A_m - A_s)] [B_s]^{-1} \quad (9)$$

$$[S] = [B_s^+ B_m - K_m] [B_s]^{-1} \quad (10)$$

여기서  $B_s^+ (= (B_s^T B_s)^{-1} B_s^{-1})$ 는 가관성행렬(pseudo inertial matrix)을 나타낸다.

### 3. 안정도 해석

일반적으로 모델추종 적응제어 시스템의 안정성 해석에 있어서는 우선 그 시스템의 플랜트 및 기준모델의 파라미터 구조적 특성에 의하여 결정되어지는 구조적 완전모델 추종조건(structural perfect model following condition)을 언급하여야 한다.

그러나 본 연구에서 제안하고 있는 직접 적응제어방식은 시간이 지남에 따라 상태오차 ( $e = X_m - X_s$ )가 "0"으로 수렴하는 구조를 갖도록 제어를 설계하므로 이 방식은 모델의 구조적인 특성에 의한 완전모델 추종조건을 언급하지 않아도 된다.

그리고 제안된 가변구조 적응제어시스템은 다음과 같이 상태오차에 대한 방정식으로 기술되어진다.

$$e = A_m e + [0 : 1] W \quad (11)$$

$$V = L e$$

$$W_1 = -W$$

$$\begin{aligned} &= [B_s] ([B_s^+] ([A_m] - [A_s]) \\ &\quad + K_s - \Phi_1) X_s + [B_s] ([B_s^+] [B_m] \\ &\quad - K_m + \Phi_2) U_m \end{aligned} \quad (12)$$

또한, 위의 식 (11), (12)는 선형 시불변 피이드포워드(linear time invariant feedforward)블록과 비선형시변(nonlinear time varying)의 피이드백

블록으로서 구성되는 Fig. 1 제어 시스템에 대한 등가표시(equivalent representation)를 Fig. 2와 같이 구성시킬 수 있다.

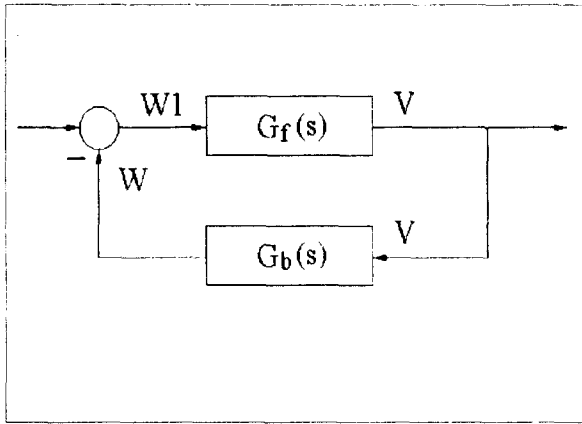


Fig. 2 Equivalent representation of adaptive sliding mode control system.

본 연구에서 제안되고 있는 가변구조 적응제어 시스템의 점근적인 초안정(A asymptotically hyper-stability)을 유지하기 위해서는 다음의 정리를 만족해야 한다.

정리1 : Fig. 2의 선형 시불변블록의 전달함수  $G_f(s)$ 이 SPR(strictly positive real)이어야 한다.

정리2 : Fig. 2에서 피드백의 비선형시변 블록은 다음과 같이 정의되는 부등식,

$$\int_0^t V^T W d\Gamma > -\gamma_0^2, \quad t > 0 \quad (13)$$

을 만족해야 한다. 여기서  $\gamma_0^2$ 는 임의의 상수이다.

첫 번째의 정리1은 앞절에서 언급된 선형보상인자(linear compensator)을 다음과 같이 설정함으로써 만족한다.

$$L = [0 : 1] M$$

여기서  $M$ 은 아래의 Lyapunov 방정식,

$$A_m^T M + M A_m = -H \quad (14)$$

의 해(solution)이다. 위식에서의  $H$ 는 양의 부호인 정치행렬(positive definite symmetric matrix)로서 기준모델이 디커플링(decoupling)이므로 다음과 같이 대각선 행렬로 구성하였다.

$$H = \begin{bmatrix} \text{diag}(h_1) & 0 \\ 0 & \text{diag}(h_{i+n}) \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} h_i, h_{i+n} > 0 \\ (i = 1, 2, \dots, n) \end{matrix} \quad (15)$$

그리고, 시스템의 초안정을 위한 두 번째 조건인 식 (13)의 만족은 식 (7)와 같이 정의되는 단위벡터 적응제어칙에 의해 달성되어진다.

따라서, 식 (12)을 식 (13)에 대입하면 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} & \int_0^t V^T [B_s \Phi_1 - B_s B_s^+ (A_m - A_s) + B_s K_s] d\Gamma \\ & + \int_0^t V^T [B_s \Phi_2 - B_s B_s^+ B_m - B_s K_m] d\Gamma > -\gamma_0^2, \quad t > 0 \end{aligned} \quad (16)$$

그러므로 식 (16)에서 적응칙  $\Phi_1$  및  $\Phi_2$ 의 계인  $P_1$  및  $P_2$ 의 값은 다음의 조건을 만족하는 값으로 정의되어야 한다.

$$\begin{aligned} P_1 & > \|B_s^{-1} [B_s^+ (A_m - A_s) + K_s]\| \cdot \|B_s\| \\ P_2 & > \|B_s^{-1} [B_s^+ B_m - K_m]\| \cdot \|B_s\| \end{aligned} \quad (17)$$

## 4 시뮬레이션

### 4.1 실물레이션 조건

제안된 가변구조 적응제어알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 스카라로봇의 1, 2관절의 속도 및 위치 추종성능을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 정현파 함수로 정의되는 위치 및 속도의 기준계적 성능시험을 위해 부하하중의 증가현상에 대한 제안된 제어기의 견실성평가를 위해 0.001sec의 샘플링시간으로 3초 동안 수행되었다. 프로그램언어는 볼랜드C를 사용하였으며 수치해석방법으로는 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하였다. Table. 1은 스카라형 로봇의 사양을 나타내고 Table. 2은 모터의 사양을 나타낸다.

Table. 1 The specification of a SCARA robot.

각 링크의 질량 (kg)		각 링크의 길이 (m)		각 관절의 기어비	
m1	15.067	l1	0.35	n1	1/100
m2	8.994	l2	0.3	n2	1/80
m3	3.0	d3	0.175	n3	1/200
m4	1.0	d4	0.007	n4	1/75
각 링크의 Viscous 마찰 계수 (N·m/(rad/s))		각 링크의 Colomb 마찰계수 (N·m/(rad/s))		각 링크의 관성 모우멘트 (kg·m <sup>2</sup> )	
f1	0.000759	k1	0.06867	I1	0.1538
f2	0.000328	k2	0.05150	I2	0.0674
f3	0.7	k3	0.04905	I3	0.0450
f4	0.0003	k4	0.04905	I4	0.0016

Table. 2 The specification of motor of a SCARA robot.

토크 계수 (K·m/A)		역기전력 계수 (V/(rad/s))		등가 저항 (Ohm)		각 관절의 로터 관성모우멘트 (Kg·m <sup>2</sup> )	
Ka1	$21.4839 \times 10^{-2}$	Kb1	$214.8592 \times 10^{-3}$	Ra1	1.5	Jm1	$5.0031 \times 10^{-5}$
Ka2	$20.0124 \times 10^{-2}$	Kb2	$200.5352 \times 10^{-3}$	Ra2	4.2	Jm2	$1.3734 \times 10^{-5}$
Ka3	$20.0124 \times 10^{-2}$	Kb3	$200.5352 \times 10^{-3}$	Ra3	9	Jm3	$0.8829 \times 10^{-5}$
Ka4	$17.6580 \times 10^{-2}$	Kb4	$176.6620 \times 10^{-3}$	Ra4	20	Jm4	$0.22563 \times 10^{-5}$

#### 4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구에서는 제안된 적응-슬라이딩모드 제어기의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 각 관절의 위치 및 속도의 기준궤적 추적에 대한 성능시험의 결과를 Fig. 3 ~ Fig. 5에 나타내고 있다.

Fig. 3은 무부하시 기존의 슬라이딩모드 제어의

링크 1 및 링크 2의 궤적추적성능시험에 대한 추적응답상태 및 추적오차에 대한 결과를 나타낸다. Fig. 3에서 나타낸 결과에서와 같이 무부하에서는 슬라이딩모드 제어는 비록 다소의 추적오차가 존재하지만 기준궤적을 비교적 잘 추적하는 제어성능을 보여주고 있지만, 관절1 및 관절2의 궤적추종성능을 비교해보면 커플링의 영향을 받고 있는 관절1의 궤적추종오차가 비교적 심하다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4는 2링크의 말단에 부하하중 1kg을 부가하였을 때의 기준궤적에 대한 위치추적성능을 보여주고 있다. 초기오차는 무부하상태와 거의 다름이 없지만 부하하중이 증가함에 따라 슬라이딩모드제어의 단점인 입력 신호에 비례한 채터링이 발생하고 있으며, 그 오차의 크기도 증가하고 있음을 볼 수가 있다. Fig. 5는 기존의 슬라이딩모드 제어기법을 사용하여 부하하중 3kg을 매니플레이터의 말단에 부가하였을 때의 위치추적성능을 보여주고 있다. 초기의 오차값이 상당히 증가하였으며, 기준궤적에 대한 위치추적성능면에서도 슬라이딩모드 제어의 문제점인 채터링현상이 고정도의 제어를 어렵게한다는 것을 알 수 있으며, 특히 1링크의 경우는 2링크에 비하여 그 오차의 크기가 크며 추적성능이 상당히 불량하다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 비단 부하하중의 증가 뿐만이 아니라, 로봇트 매니플레이터의 자유도가 증가할 수록 상당히 심각한 문제점으로 대두된다.

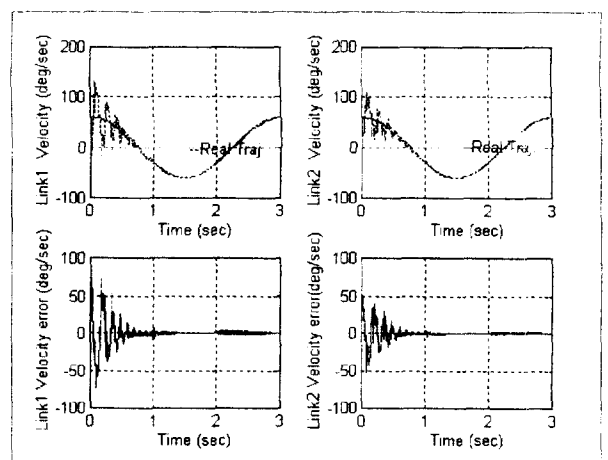


Fig. 3 Control performance of adaptive-sliding mode control for velocity trajectory tracking of link 1, 2 with payload(3kg).

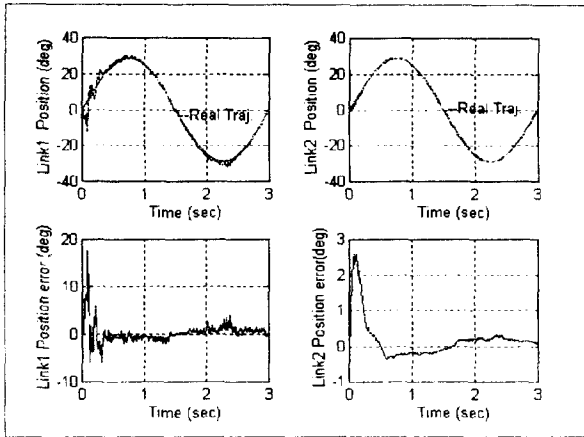


Fig. 4 Control performance of sliding mode control for position trajectory tracking of link 1, 2 with payload(1kg).

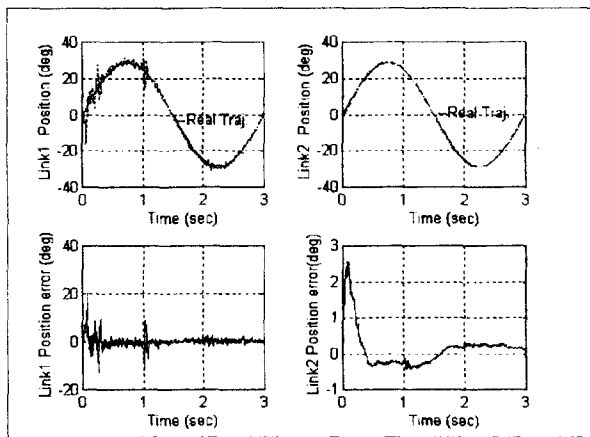


Fig. 5 Control performance of sliding mode control for position trajectory tracking of link 1, 2 with payload(3kg)

## 5. 결론

제안된 가변구조 적응제어에서 제어시스템의 안정도해석은 비선형시스템의 안정도 해석기법인 초안정도기법을 이용하여 제어시스템의 안정도를 해석함으로써 기존의 제어방법보다 미지외란 및 파라미터 불확실성에 더욱 더 안정되고 견실한 제어성능이 유지될 수 있었다.

또한, 제안된 가변구조 적응제어구조의 특성은 기존의 슬라이딩모드제어의 단점인 입력신호에 비례한 채터링의 증가현상을 경감시키므로써 외 부외란에 더욱 강인한 고속 고정도의 제어특성을

지닌다는 것이 시뮬레이션 실험을 통하여 입증됨 으로서 제어성능의 견실성을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) M. W. Spong and M. Vidyasagar, "Robot Dynamics And Control," John Wiley & Sons, Inc., pp.335-373, 1989.
- (2) R. Isermann, K.H. Lachmann, and D. Matko, "Adaptive Control," Prentice Hall Inc. pp. 387-512, 1992.
- (3) K.S. Narendra and A.M. Annaswamy, "Stable Adaptive Systems," Prentice Hall Inc. pp.21-97, 1989.
- (4) B.S. Chen and C.M. Lin, "Multipurpose adaptive control in deterministic multivariable systems," IEEE Proc. Vol.135, Pt.D, No. 4, 1988.
- (5) S. Dubowsky and D.T. DesForges, "The Application of Model Reference Adaptation Control to Robot Manipulators," ASME J. Dyn. Syst., Meas., Contr., Vol.101, pp. 193-200, 1979.
- (6) A.J. Koiv and T.H. Guo, "Adaptive linear controller for robotic manipulators," IEEE Trans., AC-29, pp. 162-171, 1983.
- (7) V. V. Chalam, "Adaptive Control System," Marcel Dekker, Inc., Newyork and Basel, 1987.
- (8) J. J. E. Slotine and Weiping Li, "Applied Nonlinear Control," Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1991.