

로봇 매니플레이터의 분산 적응제어

이수한*, 이용연**, 신규현#

Decentralized Adaptive Control of Robot Manipulators

Soo Han Lee*, Yong Yeun Lee** and Kyu Hyeon Shin#

ABSTRACT

In this paper, a decentralized adaptive controller is proposed to control robot manipulators which are governed by highly nonlinear dynamic equations. The controller is computationally efficient since it does not require mathematical model or parameter values of robot manipulators. The stability of the manipulators with the controller is proved by Lyapunov theory. The results of numerical simulations show that the system is stable, and has excellent trajectory tracking performance.

Key Words : Adaptive control(적응제어), Robot manipulators(로봇 매니플레이터), Decentralized control(분산제어), Lyapunov theory(리아푸노프 이론)

1. 서론

현재 산업로봇의 대부분은 선형 제어기에 기초한 분산제어기를 사용하고 있다. 이러한 선형 제어기는 로봇 매니플레이터의 비선형항과 마찰, 외란, 하중의 변화 등과 같은 불확실한 요소 등을 일반적으로 무시하고 설계된다. 그러므로 이런 제어기는 매니플레이터의 비선형성과 운동의 연성 때문에 로봇의 작동 속도가 빠를 경우에는 만족스런 성능을 얻을 수 없다. 생산성 향상을 위해서는 로봇의 작업속도가 빠를 필요가 있고, 이런 경우 선형 제어기로는 높은 정밀도를 실현하는 데는 한계가 있다.

비선형성과 동적 변수의 불확실성을 가진 로봇 매니플레이터를 제어하기 위하여 적응제어나 강인

제어 등의 비선형 제어기에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다. ¹⁻⁶ 분산제어기에 대한 연구는 PID 제어기와 피드포워드항의 이득을 적응법칙으로 조정하는 방법이나, ^{7,8} 리아푸노프 이론에 근거하여 전체적으로 접근 안정한 적응 제어기의 설계도 연구되었다. ^{9,10} 또한 PD 제어기와 피드포워드의 강인/적응제어의 운동 보상항을 분산 제어기로 전체적으로 안정한 제어계를 설계하였는데, 우수한 궤적 추적 성능을 얻기 위해서 제어 입력이 크다는 문제가 있다. ¹¹ 그리고 PD 제어항, 강인/적응제어항, 동적 보상항을 사용한 분산 제어기의 연구도 있었다. ¹²

최근에는 로봇 매니플레이터의 제어에 퍼지와 신경회로망이론이 응용되고 있는데, ¹³ 그 중 유전 알고리즘과 경사방법을 조합하여 로봇 매니플레

접수일 : 2003 년 8 월 29 일 ; 게재승인일: 2004 년 8 월 13 일

* 울산대학교 기계자동차공학부

** 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

교신저자, 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

Email: khshin11@mail.ulsan.ac.kr, Tel: (052) 259-2149

이터를 분산 적응 퍼지제어로 제어할 수 있는 방법이 제시되었으며,¹⁴ 슬라이딩모드 제어와 퍼지집합을 근거로 한 분산 적응 퍼지제어 방법도 제안되었고,¹⁵ Sugeno 형태의 퍼지 논리를 이용하여 분산 적응제어의 방법도 제시되었다.¹⁶

본 연구에서는 계산량이 적고, 로봇 매니플레이터의 비선형성 및 연성, 시스템의 변화 등을 극복할 수 있는 새로운 분산 적응제어기를 제안한다. 분산 적응제어기는 리아푸노프 이론을 이용하여 유도하고, 전산 모의 실험을 통해 제안한 제어기의 성능과 안정성을 검증한다.

2. 제어기 설계

관절이 n 개인 로봇 매니플레이터의 운동방정식은 다음과 같은 2 차의 비선형 미분방정식으로 표현된다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + H(\dot{\theta}) = T. \quad (1)$$

여기서, θ 는 관절 변수로 $n \times 1$ 벡터, T 는 관절에 입력되는 토크로 $n \times 1$ 벡터, $M(\theta)$ 는 관성 행렬로 대칭이며 양의 한정인 $n \times n$ 행렬이다. $V(\theta, \dot{\theta})$ 는 코리올리력과 원심력 항을 포함하는 $n \times 1$ 벡터, $G(\theta)$ 는 중력 항을 포함하는 $n \times 1$ 벡터, $H(\dot{\theta})$ 는 마찰력 항을 포함하는 $n \times 1$ 벡터다.

다관절 로봇시스템은 각각의 관절이 상호 연결된 시스템으로 생각할 수 있다. 이런 각 관절 시스템은 토크, 마찰력, 중력 항등이 내부적으로 연성 되어있다. 그러므로 위의 식(1)을 다음과 같은 n 개의 2 차 비선형 스칼라 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\left[\sum_{j=1}^n m_{ij}(\theta) \ddot{\theta}_j(t) \right] + v_i(\theta, \dot{\theta}) + g_i(\theta) + h_i(\dot{\theta}) = T_i(t), \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

여기서, 첨자 i 는 i 번째 관절을 의미하고, m_{ij} 는 i 번째 관절의 관성모우먼트 이다. g_i, v_i, h_i, T_i 는 각각 i 번째 관절에 유효한 중력 항, 코리올리력 및 원심력 항, 마찰력 항과 관절에 입력 되는 토크이다.

각 관절에 대한 토크 입력을 다음과 같이 정의

한다.

$$T_i = f_i + k_{p_i} e_i + k_{d_i} \dot{e}_i. \quad (3)$$

여기서, f_i 는 관절에 적용되는 적응 법칙으로 뒤에서 정의되고, k_{p_i} 와 k_{d_i} 는 비례, 미분 이득이다. 그리고, 오차, $e_i = \theta_{d_i}(t) - \theta_i(t)$ 을 뜻하고, $\theta_{d_i}(t)$ 는 관절의 기준궤적을 뜻한다.

식(3)을 식(2)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 오차 방정식으로 표현할 수 있다.

$$m_i \ddot{e}_i + k_{d_i} \dot{e}_i + k_{p_i} e_i = d_i - f_i. \quad (4)$$

여기서,

$$d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \left[\sum_{j=1}^n m_{ij}(\theta) \ddot{\theta}_j(t) \right] + m_i \ddot{e}_i + v_i(\theta, \dot{\theta}) + g_i(\theta) + h_i(\dot{\theta}) \quad (5)$$

이다.

식(4)를 상태방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\dot{E}_i = A_i E_i + B_i u_i. \quad (6)$$

여기서,

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_{p_i}}{m_i} & -\frac{k_{d_i}}{m_i} \end{bmatrix}, \quad E_i = \begin{bmatrix} e_i \\ \dot{e}_i \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad u_i = d_i - f_i$$

이다.

제어계의 안정성을 증명하기 위하여 아래와 같은 리아푸노프 함수 후보를 정의한다. 첨자 i 는 편의상 생략한다.

$$V = E^T P E + \frac{1}{ma} (u + \rho r + \delta r \int r^2 dt)^2. \quad (7)$$

여기서 δ, ρ, a, m 은 임의의 양의 상수이

다. 그리고, $P = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ P_2 & P_3 \end{bmatrix}$ 는 리아푸노프방정식

$PA + A^T P = -Q$ 을 만족하는 양의 한정 대칭행렬이며, r 은 위치오차와 속도오차에 가중치를 준 것으로 $r = p_2 e + p_3 \dot{e}$ 으로 표시된다.

식(7)을 식(6)의 경로에 따라 미분한 후 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -E^T Q E + 2 \frac{d-f}{ma} [\dot{u} + (\rho r) + (\delta r \int r^2 dt) + ar] \\ & + 2 \frac{\rho r}{ma} [\dot{u} + (\rho r) + (\delta r \int r^2 dt)] \\ & + 2 \frac{\delta r \int r^2}{ma} [\dot{u} + (\rho r) + (\delta r \int r^2 dt)]. \end{aligned} \quad (8)$$

적용제어항, f , 의 시간에 대한 변화율이 로봇 거동과 관련된 d 의 시간 변화율에 비하여 충분히 크다면, 즉 $\dot{u} \approx -\dot{f}$ 으로 표시할 수 있다.

적용제어항, f , 의 시간에 대한 변화율을 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{f} = \rho \frac{d}{dt} r + \delta \frac{d}{dt} (r \int r^2 dt) + ar. \quad (9)$$

식(9)를 식(8)에 대입 후 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -E^T Q E - 2 \frac{\rho r^2}{m} - 2 \frac{\delta}{m} r^2 \int r^2 dt \\ < & 0. \end{aligned} \quad (10)$$

이 식은 E 와 r 에 대해 음의 한정이므로 이 제어계는 점근 안정하다.

만약 함수 d 의 시간에 대한 변화율이 적용 제어항, f , 의 시간에 대한 변화율에 비하여 무시할 수 없을 경우 식(10)은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -E^T Q E - 2 \frac{\rho r^2}{m} - 2 \frac{\delta}{m} r^2 \int r^2 dt \\ & + 2 \frac{\dot{d}}{ma} [d - f(0) - a \int r dt] \\ \leq & -\lambda_{\min}(Q) \|E\|^2 + R. \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $\lambda_{\min}(\cdot)$ 는 행렬의 최소 고유치를 의미하고 $R \geq \frac{2}{ma} \|\dot{d} [d - f(0) - a \int r dt]\|$ 을 뜻한다.

d 와 \dot{d} 의 크기가 제한되어 있다고 가정하면 R 역시 제한되어 있다고 생각할 수 있으므로, 이 경우에도 제한된 안정성(Bounded stability)이 보장됨을 알 수 있다.

따라서, i 번째 관절에 입력되는 제어토크는 다음과 같이 정의된다.

$$T_i = \rho_i r_i + \delta_i r_i \int r_i^2 dt + a_i \int r_i dt + k_{p_i} e_i + k_{d_i} \dot{e}_i. \quad (12)$$

3. 전산 모의 실험

제안한 제어기의 안정성과 제어 성능을 알아보기 위하여 전산 모의 실험을 실시한다.

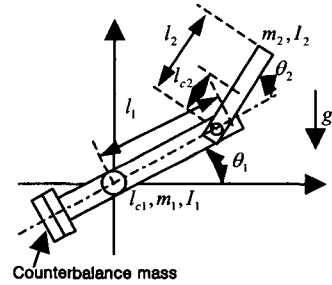


Fig. 1 Two-link robot manipulator

적용한 로봇 모델은 2 관절 로봇이고, 식(1)의 운동방정식에 사용되는 행렬들은 다음과 같다.

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_{11}(\theta) & M_{12}(\theta) \\ M_{21}(\theta) & M_{22}(\theta) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$V(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} h\dot{\theta}_2 & h(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ -h\dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} G_1(\theta) \\ G_2(\theta) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

여기서,

$$M_{11}(\theta) = m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos\theta_2) + I_1 + I_2,$$

$$M_{12}(\theta) = M_{21}(\theta) = m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos\theta_2) + I_2,$$

$$M_{22}(\theta) = m_2 l_{c2}^2 + I_2,$$

$$h = -m_2 l_1 l_{c2} \sin\theta_2,$$

$$G_1(\theta) = (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos\theta_1 + m_2 l_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2),$$

$$G_2(\theta) = m_2 l_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

이다.

식(1)의 마찰력 항은 아래와 같이 가정하였고, 외란은 포함시키지 않았다.

$$\text{관절 1; } F_d \dot{\theta} + F_s(\dot{\theta}) = 2.0 \dot{\theta}_1 + 5.5 \text{sgn}(\dot{\theta}_1),$$

$$\text{관절 2; } F_d \dot{\theta} + F_s(\dot{\theta}) = 0.2 \dot{\theta}_2 + 0.1 \text{sgn}(\dot{\theta}_2).$$

$$\text{여기서, } \text{sgn}(\bullet) = \begin{cases} 1 & (\bullet > 0) \\ 0 & (\bullet = 0) \\ -1 & (\bullet < 0) \end{cases}$$

이다.

기준궤적은 아래와 같이 사이클로이드 함수를 선택하였다.

$$\theta_{d1}(t) = \theta_1(0) + \frac{\theta_1(t_c) - \theta_1(0)}{2\pi} (\omega t - \sin \omega t), (0 \leq t \leq t_c)$$

$$\theta_{d1}(t) = \theta_1(t_c), \quad (t_c \leq t)$$

$$\theta_{d2}(t) = \theta_2(0) + \frac{\theta_2(t_c) - \theta_2(0)}{2\pi} (\omega t - \sin \omega t), (0 \leq t \leq t_c)$$

$$\theta_{d2}(t) = \theta_2(t_c). \quad (t_c \leq t)$$

여기서, $t_c = 1 \text{ sec}$, $\theta_{d1}(t_c) = 0$, $\theta_{d2}(t_c) = \pi/4$ 이고 $\omega = 2\pi/t_c$ 이다. 또, 초기위치 및 속도는 $\theta_1(0) = -\pi/2$, $\dot{\theta}_1(0) = 0$, $\theta_2(0) = \dot{\theta}_2(0) = 0$ 으로 두었다.

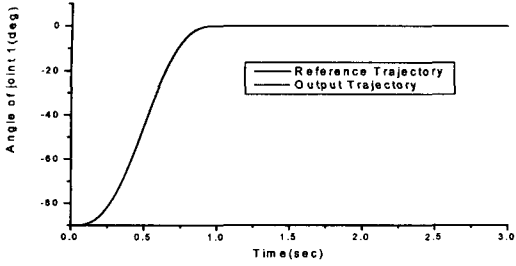
Table 1 Parameters of the manipulator

	Link 1	Link 2
질량 (m)	48 kg	5 kg
회전중심에서 끝 단까지의 길이 (L)	0.6 m	0.4 m
회전중심에서 질량 중심까지의 길이 (L _c)	0 m	0.2 m
너비 (b)	0.125 m	0.05 m
질량중심에서의 관성질량모멘트 (I)	3.60 kgm ²	0.068 kgm ²

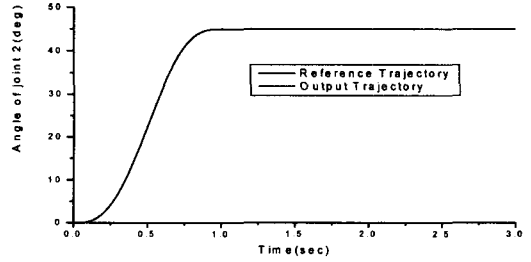
로봇 모델의 주요 변수를 Table 1 에 나타내었다. 여기서, Link 1 은 카운터밸런스 질량을 이용하여 질량중심과 회전중심을 일치시켰다고 가정한다.

Fig. 2 는 부하질량이 없는 경우의 결과이다. 기준궤적에 대한 로봇 매니플레이터의 추종궤적은 Fig. 2 (a), (b)와 같다. Fig. 2 (c), (d)에서 보듯이 제안한 제어기는 최대 위치오차가 관절 1 과 관절 2 에서 각각 0.228°, 0.038°로 아주 작았다. 또한 정상상태 위치오차는 각각 영으로 수렴하였다.

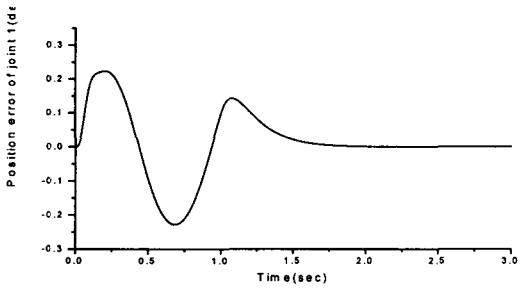
Fig. 3 은 제안한 제어기의 적응성을 확인하기 위하여 로봇 매니플레이터의 작동 0.5 초 경과 후 로봇의 끝에 부하질량 5 kg 을 갑자기 가했을 경우의 결과이다. 제안한 제어기의 최대 위치오차는 관절 1 에서 생기지만 0.237° 로 아주 작았다. 또한 정상상태 위치오차는 부하질량이 없는 경우와 마찬가지로 영으로 수렴하였다. 부하질량의 갑작스런 변화에도 제안한 제어기는 시간에 대한 응답을 보면 약간의 변화는 있으나 곧바로 기준 궤적으로 잘 추종함을 알 수 있다. 여기서, 제어기의 궤적 추종 성능은 제어기의 이득에 따라서 달라질 수 있다.



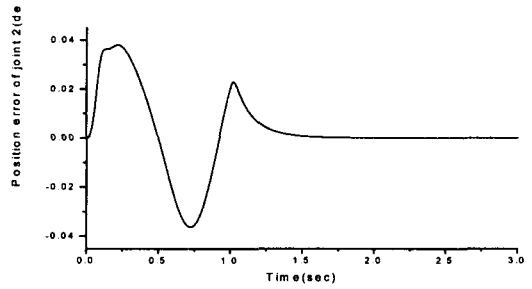
(a) Trajectory of joint 1



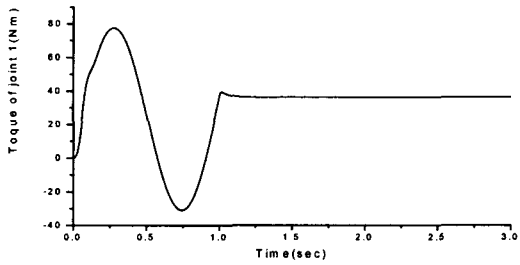
(b) Trajectory of joint 2



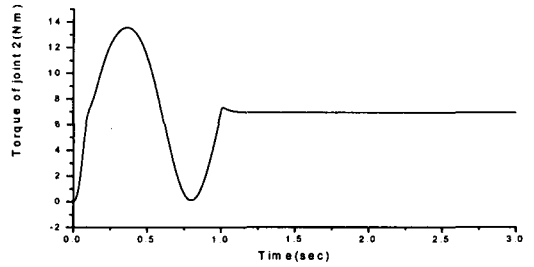
(c) Position error of joint 1



(d) Position error of joint 2

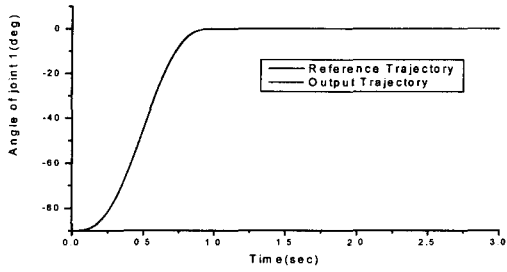


(e) Torque of joint 1

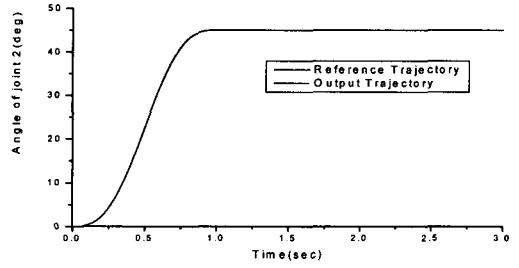


(f) Torque of joint 2

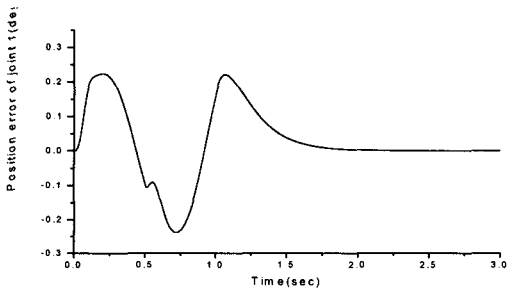
Fig. 2 Trajectory tracking performance without payload



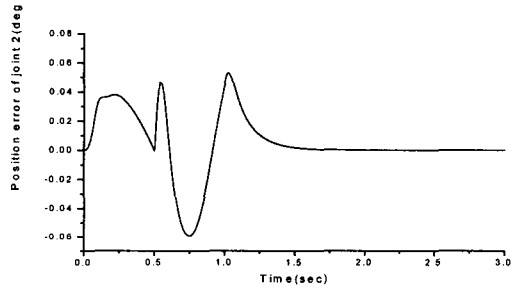
(a) Trajectory of joint 1



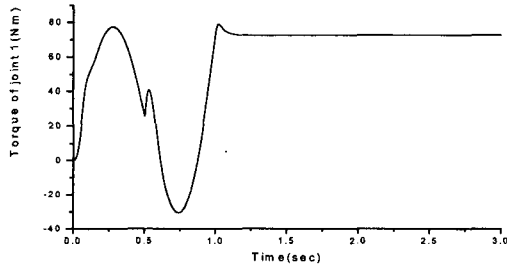
(b) Trajectory of joint 2



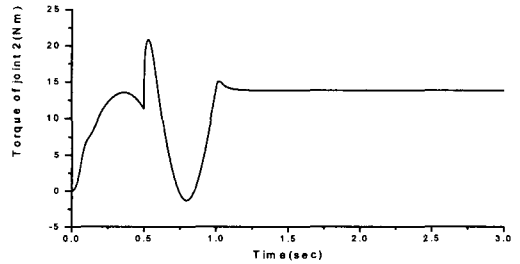
(c) Position error of joint 1



(d) Position error of joint 2



(e) Torque of joint 1



(f) Torque of joint 2

Fig.3 Trajectory tracking performance with 5kg payload

4. 결론

로봇 매니플레이터는 마찰, 외란 같은 불확실한 요소들을 가지고 있고, 매우 복잡한 비선형 운동을 하므로 선형 제어기로 로봇을 정확히 제어하기에는 한계가 있다. 이러한 점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 로봇의 수학적인 모델이나 동적 매개변수가 필요치 않은 분산 적응제어기를 제안하였다. 리아푸노프 이론을 이용하여 제안한 제어기가 이론적으로 점근 안정함을 증명하였고, 마지막으로 전산 모의 실험을 통하여 제안한 제어기가 안정하고, 궤적 추적 제어 성능이 우수함을 보였다.

후 기

이 논문은 2003 년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Lewis, F. L., Abdallah, C. T. and Dawson, D. M., Control of Robot Manipulators, Macmillan Publishing Company, 1993.
- Ge, S. S., "Advanced Control Techniques of Robotic Manipulator," Proc. Amer. Control Conf., pp. 2185-2199, June 1998.
- Ham, C. and Qu, Z., "A New Nonlinear Learning Control for Robotic Manipulators," Advanced Robotics, Vol. 10, No. 5, pp. 1-15, 1996.
- John, J. Craig, "Adaptive Control of Mechanical Manipulators," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1988.
- Utkin, V. I., Guldner, J. and Shi, J., "Sliding Mode Control in Electromechanical Systems," Taylor & Francis, Inc., 1999.
- Narendra, K.S. and Valavani, L.S., "Stable Adaptive Controller Design Direct Control," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-23, No. 4, pp. 570-583, 1978.
- Oh, B. J. and Jamshidi, M., "Decentralized Adaptive Control of Robot Manipulators," J. Robotic Systems, Vol. 6, No. 4, pp. 461-483, 1989.
- Colbaugh, R., Glass, K. and Seraji, H., "Decentralized Adaptive Control of Manipulators: Theory and Experiments," Proc. IEEE Conf. Decision & Control, pp. 153-158, 1993.
- Seraji, H., "A New Approach to Adaptive Control of Manipulators," ASME J. Dyn. Syst. Meas. Contr., Vol. 109, No. 3, pp. 193-202, 1987.
- Seraji, H., "Decentralized Adaptive Control of Manipulators: Theory, Simulation, and Experimentation," IEEE Trans. on Robotics & Auto., Vol. 5, No. 2, pp. 183-201, 1989.
- Fu, L. C., "Robust Adaptive Decentralized Control of Robot Manipulators," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 37, No. 1, pp. 106-110, 1992.
- Lilong, C. and Xiaohu, T., "A Model-Free Decentralized Control for Robot Manipulators," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Automat., pp. 3106-3111, 1997.
- Er, M. J., "Recent Developments and Futuristic Trends in Robot Manipulator Control," Motion Contr. Proc., pp. 106-111, 1993.
- Jin, Yaochu., "Decentralized Adaptive Fuzzy Control of Robot Manipulators," IEEE Trans. System, Man & Cyber. Part B Cybern., Vol. 28, No. 1, pp. 47-57, 1998.
- Zhang, T. P. and Feng, C. B., "Decentralized Adaptive Fuzzy Control for Large-Scale Non Linear System," Fuzzy Sets and Systems, pp.61-70, 1997.
- Kim, Y. T., "Independent Joint Adaptive Control of Robot Manipulator Using the Sugeno-type of Fuzzy Logic," J. of the KSPE, Vol. 20, No. 6, pp. 55-61, 2003.