

# 로봇 매니플레이터의 분산 적응제어군

신규현<sup>†</sup>·이용연<sup>\*</sup>·이수한<sup>\*\*</sup>

## A Family of a Decentralized Adaptive Control for Robotic Manipulators

Shin Kyu Hyeon, Lee Yong Yeun and Lee Soo Han

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

### Abstract

In this paper, a family of 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 the 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.

### 1. 서 론

현재 산업로봇 대부분의 제어기는 선형 제어기에 기초한 분산 제어기를 사용하고 있다. 일반적으로 선형 제어기는 로봇 매니플레이터의 비선형 항과 마찰, 외란, 하중의 변화 등과 같은 불확실한 요소 등을 무시하고 설계되므로 만족스런 성능을 얻을 수 없다. 생산성 향상을 위해서는 로봇의 작업속도가 빠를 필요가 있고, 이런 경우 또한 선형 제어기로는 높은 정밀도를 실현하는데 한계가 있다.

비선형성과 동적 변수의 불확실성을 가진 로봇 매니플레이터를 제어하기 위하여 적응 제어기나

강인 제어기 같은 비선형 제어기에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다.<sup>(1-6)</sup> 분산 제어기에 관한 연구는 PID 제어기와 피드포워드항의 이득을 적응법칙으로 조정하는 방법이나,<sup>(7,8)</sup> 리아푸노프 이론에 근거하여 전체적으로 점근 안정한 적응 제어기의 설계도 연구되었다.<sup>(9,10)</sup> 또한 PD 제어기와 피드포워드의 강인/적응제어의 운동 보상항을 분산 제어기로 안정한 제어기를 설계하였는데, 우수한 궤적 추적 성능을 얻기 위해서는 제어 입력이 크다는 문제가 있다.<sup>(11)</sup> 그리고 PD제어항, 강인/적응 제어항, 동적 보상항을 사용한 분산 제어기의 연구도 있다.<sup>(12)</sup>

최근에는 로봇 매니플레이터의 제어에 퍼지나 유전자 알고리즘 및 신경회로망 이론이 응용되고 있는데<sup>(13)</sup> 그 중 유전자 알고리즘과 경사방법을 조합하여 로봇 매니플레이터를 분산적응 퍼지제어로 제어할 수 있는 방법이 제시되었으며,<sup>(14)</sup> 슬라이딩 모드제어와 퍼지 집합을 근거로 한 분산적응 퍼지제어 방법도 제안되었고,<sup>(15)</sup> Sugeno 형태의 퍼지 논리를 이용하여 분산적응 제어의 방법

---

† 울산대학교 대학원 기계자동차공학과  
E-mail : khshin111@mail.ulsan.ac.kr  
TEL : (052)259-2149 FAX : (052)259-1680

\* 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

\*\* 울산대학교 기계자동차공학부

---

도 제시되었다.<sup>(16)</sup>

본 연구에서는 계산량이 적고, 로봇 매니플레이터의 비선형성 및 연성, 시스템의 변화 등을 극복할 수 있는 새로운 분산적응 제어군을 제안한다. 제어기는 리아푸노프 이론을 이용하여 유도하고, 전산 모의실험을 통해 제안한 제어기의 성능과 안정성을 검증한다.

## 2. 운동방정식 및 제어기 설계

### 2.1 운동 방정식

관절이  $n$ 개인 로봇 매니플레이터의 운동 방정식은 다음과 같은 2차의 비선형 미분방정식으로 표현된다.

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

여기서,  $\theta$ 는 관절 변수로  $n \times 1$  벡터,  $T$ 는 관절에 입력되는 토크로  $n \times 1$  벡터,  $M(\theta)$ 는 관성행렬로 대칭이면 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  $n \times 1$  벡터이다.

위의 식(1)을 다음과 같은  $n$ 개의 2차 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 관성모멘트이다.  $g_i$ ,  $v_i$ ,  $h_i$ ,  $T_i$ 는  $i$  번째 관절에 유효한 중력 항, 코리올리력 및 원심력 항, 마찰력 항과 입력되는 토크를 각각 뜻한다.

### 2.2 분산 적응제어기 설계

각 관절에 대한 토크 입력을 다음과 같이 정의한다.

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

여기서,  $f_i$ 는 관절에 적용되는 적응법칙으로 뒤에서 정의되고,  $k_{P_i}, k_{D_i}$ 는 각각 비례, 미분 이득이다. 그리고 오차,  $e_i = \theta_{di}(t) - \theta_i(t)$ 을 뜻하고,  $\theta_{di}(t)$ 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)을 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 양의 한정인 리아푸노프 함수 후보를 정의한다. 첨자  $i$ 는 편의상 생략한다.

$$V = E^T P E + \frac{1}{ma} (u + \rho r^{2n_1-1} + \delta r^{2n_2-1} \int r^{2n_3} dt)^2, \quad n_1, n_2, n_3 = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

여기서,  $\delta, \rho, a$ 와  $m$ 은 임의의 양의 상수이다.

그리고  $Q$ 와  $P = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_2 & p_3 \end{bmatrix}$ 는 리아푸노프 방정식,  $PA + A^T P = -Q$ ,을 만족하는 양의 한정 대칭행렬(positive definite symmetric matrix)이며,  $r$ 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.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -E^T Q E + 2 \frac{u}{ma} \left[ \dot{u} + \frac{d}{dt} (\rho r^{2n_1-1}) \right. \\ & + \frac{d}{dt} (\delta r^{2n_2-1} \int r^{2n_3} dt) + ar \left. \right] + 2 \frac{\rho r^{2n_1-1}}{ma} \\ & \left[ \dot{u} + \frac{d}{dt} (\rho r^{2n_1-1}) + \frac{d}{dt} (\delta r^{2n_2-1} \int r^{2n_3} dt) \right] \quad (8) \\ & + 2 \frac{\delta r^{2n_2-1} \int r^{2n_3} dt}{ma} \left[ \dot{u} + \frac{d}{dt} (\rho r^{2n_1-1}) \right. \\ & \left. + \frac{d}{dt} (\delta r^{2n_2-1} \int r^{2n_3} dt) \right]. \end{aligned}$$

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

적용제어항,  $f$ ,의 시간에 대한 변화율을 다음과 같이 정의한 후,

$$\dot{f} = \frac{d}{dt} (\rho r^{2n_1-1}) + \frac{d}{dt} (\delta r^{2n_2-1} \int r^{2n_3} dt) + ar. \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -E^T Q E - 2 \frac{\rho r^{2n_1}}{m} \\ & - 2 \frac{\delta r^{2n_2}}{m} \int r^{2n_3} dt < 0. \end{aligned} \quad (10)$$

이 식은  $E$ 와  $r$ 에 대해 음의 한정(negative definite)이므로 이 제어계는 점근 안정하다. 따라서 식(3)에 정의된 적용제어항,  $f$ ,는 식(9)로부터 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} f(t) = & f(0) + \rho r^{2n_1-1} + \delta r^{2n_2-1} \int_0^t r^{2n_3} dt \\ & + a \int_0^t r dt. \end{aligned} \quad (11)$$

그러므로  $i$ 번째 관절에 입력되는 제어토크는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} T_i = & \rho_i r_i^{2n_1-1} + \delta_i r_i^{2n_2-1} \int_0^t r_i^{2n_3} dt \\ & + a_i \int_0^t r_i dt + k_{P_i} e_i + k_{D_i} \dot{e}_i. \end{aligned} \quad (12)$$

### 3. 전산 모의실험 및 결과

제안한 제어기의 안정성과 제어 성능을 알아보기 위하여 전산 모의실험을 실시한다. 적용한 로봇 모델은 Fig.1과 같은 2관절 로봇이고, 기준궤적은 사이클로이드 함수를 선택하였다.

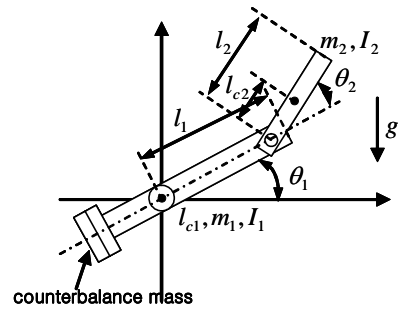


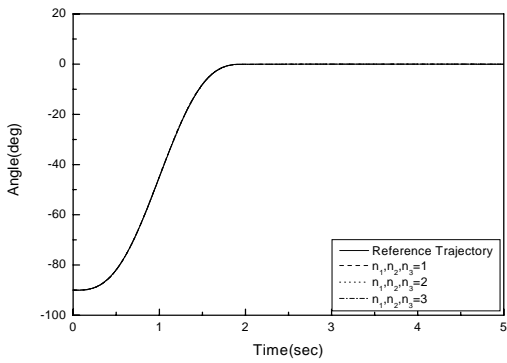
Fig. 1 Two-link robot manipulator

로봇 모델의 주요 변수는 Table 1에 나타내었다.

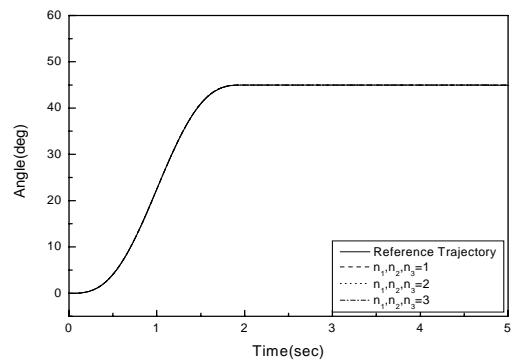
Table 1 Parameters of the manipulator

	Link 1	Link 2
질량 (m)	48 kg	3 kg
팔(Arm)의 길이 (l)	0.94 m	0.3 m
회전중심에서 질량중심까지 길이 (lc)	0 m	0.15 m
폭 (b)	0.125 m	0.05 m
질량중심에서의 관성질량모멘트 (I)	3.60 kg·m <sup>2</sup>	0.023 kg·m <sup>2</sup>

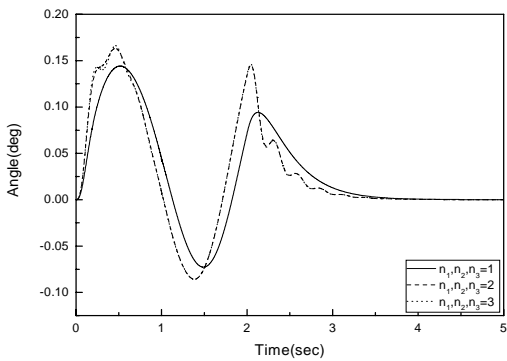
Fig. 2는 부하질량이 없는 경우의 결과이다. Fig. 2(c), (d)에서 확인할 수 있듯이 적용제어항의 차수( $n_1, n_2, n_3$ )에 따라서 제어 성능은 달라지고, 주어진 제어 이득 및 변수에서는  $n=1$ 일 때 가장 좋은 성능을 나타낸다. 또한 적용제어항의 차수가 높아지더라도 리아푸노프 이론에 따른 점근 안정의 특성은 그대로 유지함을 볼 수 있다.



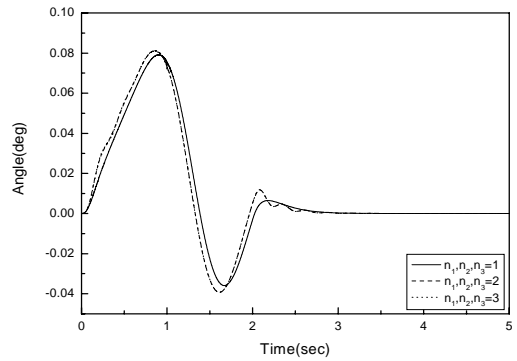
(a) Trajectory of joint 1



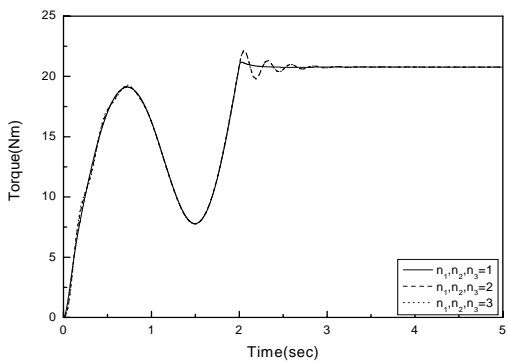
(b) Trajectory of joint 2



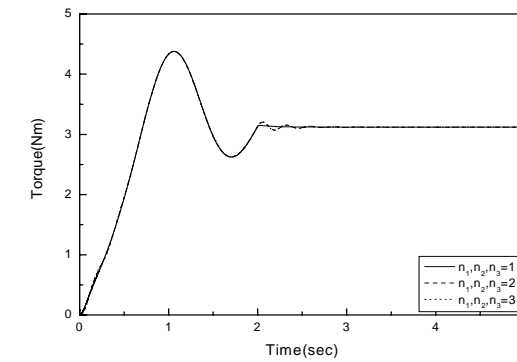
(c) Position error of joint 1



(d) Position error of joint 2

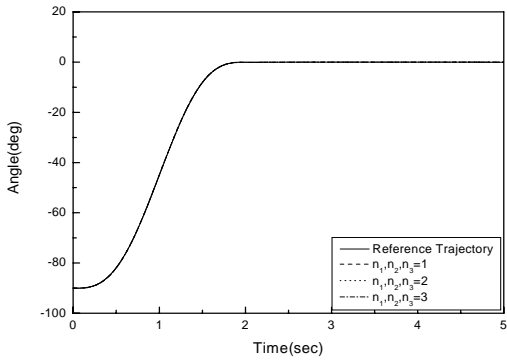


(e) Control input of joint 1

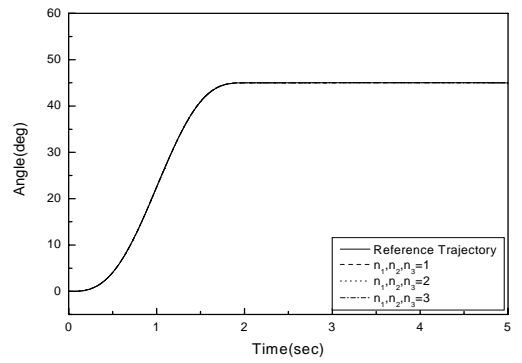


(f) Control input of joint 2

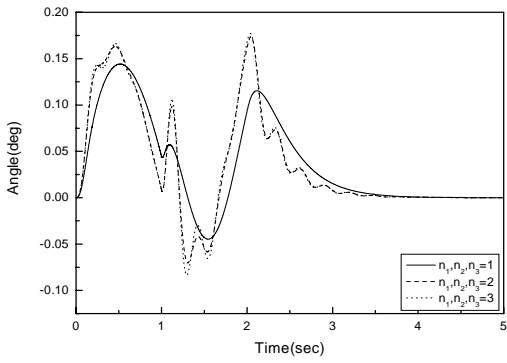
**Fig. 2** Trajectory tracking performance without payload



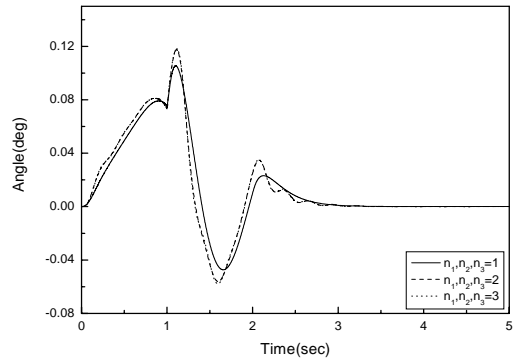
(a) Trajectory of joint 1



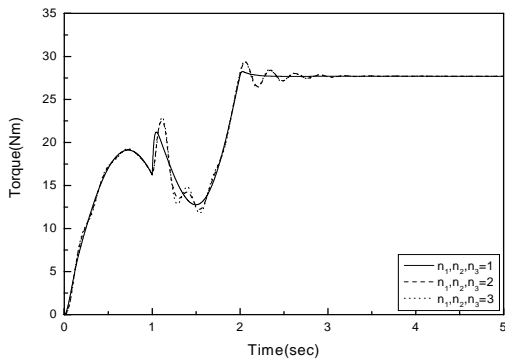
(b) Trajectory of joint 2



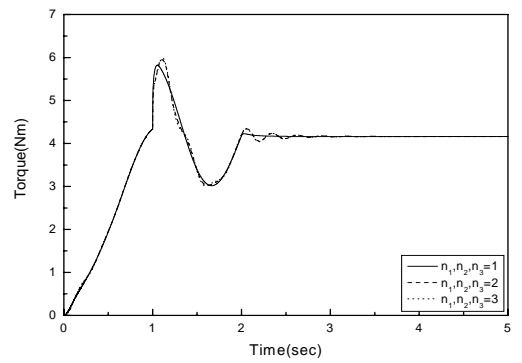
(c) Position error of joint 1



(d) Position error of joint 2



(e) Control input of joint 1



(f) Control input of joint 2

**Fig. 3** Trajectory tracking performance with payload (case 1000g)

Fig. 3은 제안한 제어기의 갑작스런 부하변화에 따른 적응성을 알아보기 위한 실험 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 정상상태 위치 오차는 부하 질량이 없는 경우와 마찬가지로 영으로 수렴함을 알 수 있다. 여기서, 제어기의 궤적 추종 성능은 제어기의 이득에 따라서 달라질 수 있다.

#### 4. 결론

로봇 매니퓰레이터는 마찰, 외란 같은 불확실한 요소들을 가지고 있고, 매우 복잡한 비선형 운동을 하므로 선형 제어기로 로봇을 정확히 제어하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 극복하기 위하여 계산량이 다소 많고 집적화된 기준 모델 적응제어와 달리 로봇의 수학적 모델이나 동적 매개변수가 필요치 않은 분산 적응제어군을 제안하였다. 제안된 적응제어기는 이론적으로 점근 안정함을 리아푸노프 이론을 이용하여 증명하였다. 제안된 적응제어기의 전산 모의실험에서는 높은 차수일 때 보다 낮은 차수일 경우에 보다 좋은 궤적 추적 성능을 나타내었다.

#### 참고문헌

- (1) Lewis, F. L., Abdallah, C. T. and Dawson, D. M., 1993, Control of Robot Manipulators, *Macmillan Publishing Company*, New York.
- (2) Ge, S. S., 1998, "Advanced Control Techniques of Robotic Manipulator," *Proc. Amer. Control Conf.*, pp. 2185-2199.
- (3) Ham, C. and Qu, Z., 1996, "A New Nonlinear Learning Control for Robotic Manipulators," *Advanced Robotics*, Vol. 10, No. 5, pp. 1-15.
- (4) John J. Craig, 1988, Adaptive Control of Mechanical Manipulators, *Addison-Wesley Publishing Company Inc.*
- (5) Utkin, V. I., Guldner, J. and Shi, J., 1999, Sliding Mode Control in Electromechanical Systems, *Taylor & Francis, Inc.*
- (6) Narendra, K. S. and Valavani, L. S., 1978, "Stable Adaptive Controller Design Direct Control," *IEEE Trans. Auto. Contr.*, Vol. AC-23, No. 4, pp. 570-583.
- (7) Oh, B.J. and Jamshidi, M., 1989, "Decentralized Adaptive Control of Robot Manipulators," *J. Robotic Systems*, Vol. 6, No. 4, pp. 461-483.
- (8) Colbaugh, R., Glass, K. and Seraji, H., 1993, "Decentralized Adaptive Control of Manipulators: Theory and Experiments," *Proc. IEEE Conference Decision & Control*, pp. 153-158.
- (9) Seraji, H., 1987, "A New Approach to Adaptive Control of Manipulators," *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, Vol. 109, No. 3, pp. 193-202.
- (10) Seraji, H., 1989, "Decentralized Adaptive Control of Manipulators: Theory, Simulation, and Experimentation," *IEEE Trans. on Robotics & Auto.*, Vol. 5, No. 2, pp. 183-201.
- (11) Fu, L. C., 1992, "Robust Adaptive Decentralized Control of Robot Manipulators," *IEEE Trans. Auto. Contr.*, Vol. 37, No. 1, pp. 106-110.
- (12) Lilong C. and Xiaoqi T., 1997, "A Model-Free Decentralized Control for Robot Manipulators," *IEEE Int. Conf. Robotics & Auto.*, pp. 3106-3111.
- (13) Er, M. J., 1993, "Recent Developments and Futuristic Trends in Robot Manipulator Control," *Motion Contr. Proc.*, pp. 106-111.
- (14) Jin, Yaochu., 1998, "Decentralized Adaptive Fuzzy Control of Robot Manipulators," *IEEE Trans. System, Man & Cyber. Part B Cybern.*, Vol. 28, No. 1, pp. 47-57.
- (15) Zhang, T. P. and Feng, C. B., 1997, "Decentralized Adaptive Fuzzy Control for Large-Scale Non Linear System," *Fuzzy Sets and Systems*, pp.61-70.
- (16) Kim, Y. T., 2003, "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.
- (17) Lee, S. H., Jo, H. S. and Jang, C. H., 2000, "Trajectory Tracking Control of a Pneumatic Cylinder with an Adaptive Controller," *J. of the KSPE*, Vol. 17, No. 10, pp. 110-118.