

# 고무인공근 매니퓰레이터의 퍼지제어에 관한 연구

° 陣相浩, 渡邊桂吾, 中村政俊, 李錫圭\*  
佑賀大學校, \* 嶺南大學校

## A Study on Fuzzy Control of A Manipulator with Artificial Rubber Muscles

° Sangho Jin, Keio Watanabw, Masatoshi Nakamura, Suckgyu Lee\*  
Saga University, \*Yeungnam University

### Abstract

A fuzzy controller of a manipulator with artificial rubber muscles is proposed. The fuzzy logic controller as a compensator is described to control the trajectory tracking of a two link manipulator, where computed torque control method has already assumed to be applied. We shows that the fuzzy compensator with a simple adaptive scaling technique is effective for the robust control when there exist model uncertainties and/or untuned feedback gains. The effectiveness of the proposed control method is illustrated by some experimental results for a circular path tracking.

### 1 서론

일반적으로 매니퓰레이터는 인간의 팔과 같은 형상으로 여러 자유도의 링크로 구성이 되어 있다. 강성체 링크를 가진 다자유도 매니퓰레이터는 링크의 관성 파라미터가 비선형이며, 각 관절 축간의 상호 운동 간섭등으로 모델 베이스의 비선형 제어를 하는 일은 간단한 일이 아니다. 특히 최근 매니퓰레이터 운동이 고속화가 요구되고 있으며, 이러한 문제 해결의 한 방법으로 가벼운 생체근육과 비슷한 특성을 가진 공기압 구동형 고무인공근을 이용한 매니퓰레이터가 개발되고 있다.<sup>(1)-(5)</sup> 본 논문에서는 고무 인공근을 이용한 2 자유도 매니퓰레이터의 궤도 추종 제어에 대해 비선형 모델에 근거한 토오크 산출제어에 퍼지 보상기를 추가한 시스템은 제안하였다. 일반적으로 토오크 산출 제어측은 매니퓰레이터의 관성행렬과 원심력 및 Coriolis력을 나타내는 비선형을 알고, 그 항은 완전히 없이는 것이 가능하다고 가정한다. 그러나 실제로는 이 모델 오차에 대하여 어떻게 강인한 제어 법을 얻는 것이 필요하다. 본 논문에서는 토오크 산출제어측에 퍼지보상기를 병렬로 배치하는 방법을 제안하여 강인한 제어 시스템을 구성하는 데 매우 유효하다는 것을 실제 실험으로 증명하였다.

### 2 실험장치

본 논문에서의 실험에 사용된 고무인공근을 가진 2링크 매니

퓰레이터는 수평방향으로만 움직이며, 중력의 영향은 없다고 가정한다. 또한 제어기에는 PC-9801 FA(cpu 486 SX, 16 MHz)을 사용하였다.

### 3 제어기 설계

#### 3.1 토오크 산출제어기

매니퓰레이터의 운동방정식은 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$M(\theta) \ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = r \quad (1)$$

여기서  $\theta \in R^n$ 은 관절각,  $\tau \in R^n$ 은 구동토오크이며,  $M(\cdot) \in R^{n \times n}$ 은 관성행렬,  $K(\cdot)$ 는 원심력 및 Coriolis력을 나타내는 비선형항이다. 목표관절각,  $\theta_d$ , 각속도,  $\dot{\theta}_d$ , 각 가속도,  $\ddot{\theta}_d$ 에 대해 출력 관절각  $\theta$  및 각속도들을 측정하여

$M(\theta)$  및  $h(\theta, \dot{\theta})$ 의 추정치에 대하여 토오크 연산 제어측은

$$\tau = \hat{M}(\theta)r^* + h(\theta, \dot{\theta}) \quad (2)$$

$$\tau^* = \ddot{\theta}_d + k_v \dot{e} + k_p e \quad (3)$$

가 된다. 여기서  $k_v \in R^{n \times n}$ ,  $k_p \in R^{n \times n}$ 은 각각 대각선 행렬의 미분 및 비례이득이다. 궤도추종오차  $e(t)$ 는

$$e(t) = \theta_d(t) - \theta(t) \quad (4)$$

라 가정한다. 파라미터 추정오차 및 구조적인 추정오차가 없다고 가정을 한 경우 (2)식의 비선형보상에 따라

$$\ddot{e}(t) + k_v \dot{e}(t) + k_p e(t) = 0 \quad (5)$$

인 오차방정식을 얻을 수 있다. 단  $k_v, k_p > 0$  이다.

#### 3.2 퍼지 보상기

토오크 산출측에서는 관성행렬 M 및 원심력, Coriolis력 h를 알고 있으므로 비선형을 완전히 소거할 수 있다고 가정할 것이다. 그러나 실제 시스템에는 dynamic모델의 파라미터의 추정은 쉽지 않다. 본 실험에서는 관성 모멘트 산출을 위해 중심 위치

의 변동 및 강성체부분의 형상이 복잡하기 때문에 모델과 오차가 크다고 예상되어진다. 이와 같은 파라미터 오차에 대해 강한 제어계를 구성하기 위해 그림1에서 처럼 퍼지보상기를 토오크 산출부와 병렬로 배치하는 방법을 제안한다.

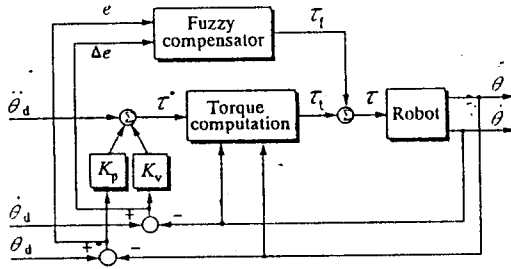


Fig.1 Computed torque control system with a fuzzy compensator

### 3. 2. 1 퍼지추론법

일반적으로 다관절 매니퓰레이터의 궤도제어문제는 복수의 입출력 제어 문제이다. 따라서 퍼지제어법을 이용하는 경우 입출력에 대한 퍼지추론의 입력수에서 직접 제어 법칙수를 결정하나 제어법칙수가 많게되어 좋은 퍼지제어기를 설계할 수 없다. 따라서 현재 많은 산업용 로봇에 쓰여지고 있는 독립관절제어법의 이용하는 것을 고려하였다. i 번째 관절의 목표 관절각도가 지령된 경우 그 궤도 추종 오차와 오차의 변화분을 추론 입력하여 추론 결과를 i 번째 링크의 입력 토오크 보정에 퍼지 제어법을 사용하였다. 따라서 n 링크의 경우에는 각 링크 마다 입출력을 변화시키며 n 회 같은 퍼지규칙을 사용하였다.

### 3.2.2 간략화된 퍼지 추론

퍼지 보상기의 설계에 있어서, Mamdani법을 간략화하고 후건부가 정수값을 가지는 "간략화된 퍼지추론"을 이용한다. 이방법에서는 2n 개의 입력변수 ( $e_1, \dots, e_n, \Delta e_1, \dots, \Delta e_n$ ), n개의 출력변수 ( $\tau_1, \dots, \tau_n$ )의 경우, 임의의 i 번째의 제어법칙은

$$\begin{aligned} R_i \text{ If } e_1 = A_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } e_n = A_{in} \\ \text{and } \Delta e_1 = A_{i(n+1)} \text{ and } \dots \text{ and } \Delta e_n = A_{i(2n)} \\ \text{then } \tau_i = B_{in} \text{ and } \dots \text{ and } \tau_n = B_{in} \end{aligned} \quad (6)$$

가 된다. 전건부 적합도  $h_i$ 는 membership equation의 2n 개의 적합도

$u_{A_{i1}}(e_1), \dots, u_{A_{in}}(e_n), u_{A_{i(n+1)}}(\Delta e_1), \dots, u_{A_{i(2n)}}(\Delta e_n)$ 을 이용하면

$$\begin{aligned} h_i = u_{A_{i1}}(e_1) \wedge u_{A_{i2}}(e_2) \dots u_{A_{in}}(e_n) \wedge u_{A_{i(n+1)}}(\Delta e_1) \\ \wedge u_{A_{i(n+2)}}(\Delta e_2) \dots \wedge u_{A_{i(2n)}}(\Delta e_n) \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다.

이 경우 j 번째 출력 추론 결과는

$$\tau_j = \frac{\sum_{i=1}^r h_i B_{ij}}{\sum_{i=1}^r h_i}, \quad j = 1, \dots, n \quad (8)$$

가 된다.

여기서 r은 제어법칙수이며, 전건부 퍼지수의 종류가 l 인 경

우, 일반적으로  $r = l^{2n}$ 개가 된다.

그림2에서는 퍼지보상기의 block 선도를 나타내며 여기서  $GIN(i), (i = 1, \dots, 2n)$ 은 입력 data  $e_1, \dots, e_n, \Delta e_1, \dots, \Delta e_n$ 의 입력이며,  $GOU(i), (i = 1, \dots, n)$ 은 추론 결과  $\tau_1^*, \dots, \tau_n^*$ 의 출력이다.

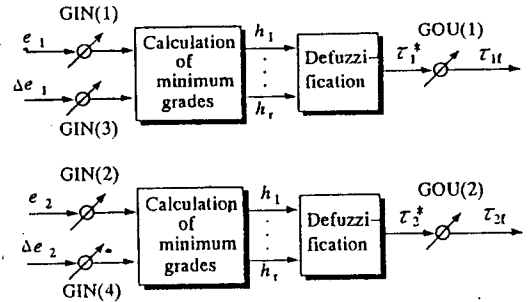


Fig.2 Fuzzy compensator based on the independent reasoning method

### 3.2.3 적용입력 Scaling

입력의 초기값은 토오크 산출제어를 이용한 제어실험에서 얻은 data의 최대치에서 쉽게 결정가능하다. 그러나 퍼지 보상기를 추가하기 위해, scaling된 data가 대 집합상에서 벗어나, 그 data에 대한 비영의 전건부 적합도를 구하는 것이 불가능하므로 다음의 적용 scaling 법

$$\begin{aligned} GIN(i)_{new} = \left\{ \begin{array}{l} -\frac{0.9L}{|e_i|} \text{ if } |GIN(i)_{old} \times e_i| > L \\ GIN(i)_{old} \text{ otherwise} \end{array} \right. \quad (9) \end{aligned}$$

를 제안 한다.

## 4. 매니퓰레이터의 모델링

식(1)에서  $M = [M_k], h = \text{col } h_i (i=1; k=1, 2)$ 로 하면

$$M_{11} = I_1 + I_2 + m_1 l_{g1}^2 + m_2 (l_{n1}^2 + l_{g2}^2 + 2l_{n1} l_{g2} \cos(\theta_2))$$

$$M_{12} = M_{21} = I_2 m_2 l_{g2}^2 + l_{n1} l_{g2} \cos(\theta_2)$$

$$M_{22} = I_2 + m_2 l_{g2}^2$$

$$h_1 = -m_2 l_{n1} l_{g2} \sin(\theta_2) (2\theta_1 + \theta_2)\theta_2$$

$$h_2 = m_2 l_{n1} l_{g2} \sin(\theta_2) \theta_2$$

$$\theta = (\theta_1, \theta_2)^T$$

$$\tau = (\tau_1, \tau_2)^T$$

가 된다. 단  $\theta_i$ 는 관절 i의 관절각,  $\tau_i$ 는 관절 i에서의 구동 토오크,  $I_i$ 는 링크 i의 중심에서의 관성 moment,  $M_i$ 는 링크 i의 질량,  $l_{ni}$ 는 링크 i의 길이,  $l_{gi}$ 는 관절 i에서 링크 i까지의 길이를 나타낸다.

## 5. 구동복원 특성과 검출복원 특성

### 5.1 구동복원 특성

구동복원 특성은, 구동장치의 특성의 역함수가 되도록 결정한다. 구동장치로서 서보AMPL을 이용하며, 그 입력전압을 0.1V 간격으로 입력한 경우의 관절 각속도출력의 특성을 그림 3에 나타내었다. 이결과에서 알 수 있듯이 입력전압  $v$ 에 대해 각각 비례한 각속도  $\dot{\theta}_i$ 를 생각할 수 있으며

$$\dot{\theta} = \left( \frac{1}{G_i^*} \right) v_i, \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

라 가정한다.

단, 정수값  $G_i^*$ 값은 그림 3의 결과에서 최소 자승법을 이용하여 구하고 링크 1, 2의 값은 각각 0.7505, 1.4165 [v sec/rad]로 된다. 구동 토크  $\tau_i$ 는

$$\tau_i = I_i \ddot{\theta}_i = \left( \frac{I_i}{G_i^*} \right) v_i \quad (11)$$

로 된다. 따라서 구동복원 특성은 (11)의 역함수로

$$v_i = \left( \frac{G_i^*}{I_i} \right) \int \tau_i dx \quad (12)$$

로 표시된다. (12)식은 이산함수로 표시하면

$$v_i = G_i \sum_{k=0}^N Z_i(k) \quad (13)$$

이 된다. 단  $\tau_i(k)$ 는 이산시간  $kT$ 에서  $(k+1)T$ 사이의 일정한 값을 가진 조작량으로, 정수  $G_i$ 는

$$G_i = \frac{G_i^* T}{I_i} \quad (14)$$

이다. 단  $T$ 는 sampling 폭이다. 표 1의 파라미터를 이용하여,  $T$ 가 25[ms]인 경우는,  $G_i$ 의 값은 각각 약 1.21, 15.12가 되었다.

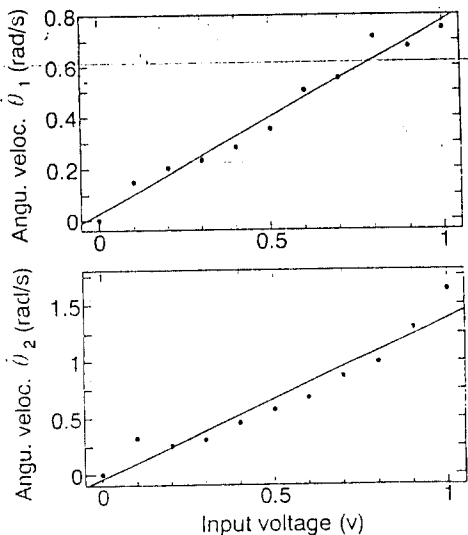


Fig.3 Input voltage - angular velocity relations of manipulator

Table 1 Model parameters of manipulator

	Mass $m_i$ (kg)	Inertia $I_i$ (kgm <sup>2</sup> )	Length $l_{ni}$ (m)	Length of c.g. $l_{gi}$ (m)
Link 1	1.39	0.02734	0.385	0.160
Link 2	0.65	0.00117	0.110	0.057

### 5.2 검출복원 특성

각 매니퓰레이터의 관절각 검출은 각각의 관절에 부착된 rotary encoder(2000p/R)에서 검출되며, counter를 통하여 computer에 전송된다. 매니퓰레이터와 rotary encoder와의 기어비  $k = 60/36$ 이며, rotary encoder에서 검출된 각도  $\theta^*$ 와 실제 매니퓰레이터의 관절 각도  $\theta$ 의 관계는

$$\theta = \frac{2\pi}{2000k} \theta^* \quad (15)$$

가 된다.

## 6. 실험결과

실제 고무 인공근을 이용한 2 링크 매니퓰레이터에 대해 반경 25mm의 원궤도 추종제어 실험을 하였다. 초기 조건에 있어서 각 링크각은 0 [rad]이 되게, 링크 1의 초기전압은 2.2[V], 링크 2의 초기전압은 2.4[V]이다. 제어기의 연산시간을 고려한 퍼지 보상기는 level 수 5개의 퍼지 집합과 25개의 제어규칙으로, membership함수는 삼각형을 이산적으로 정의하였다. 여기서 얻은 적합도는 [0, 1.6, 3.3, 5.0, 6.6, 8.3, 10]으로, X축은 [-12, 12]의 정수값이다. 이와 같은 조건하에서 5 level의 look-up table을 작성하였다. 토크 연산 제어법에서의 각각의 feedback 이득을 조성하지 않을 경우의 궤도추종제어 실험결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4는 그 경우의 적용입력 scaling을 이용한 퍼지 보상기를 적용한 결과이다. 이 경우의 고정입력 값  $G_{IN}(1) = 2000$ ,  $G_{IN}(2) = 20000$ ,  $G_{IN}(3) = 2000$ ,  $G_{IN}(4) = 20000$ 으로, 출력값  $G_{OU}(1) = 0.001$ ,  $G_{OU}(2) = 0.00025$ 이다. 그림 5을 PID형의 토크 산출제어의 feedback 이득 조정을 한 경우의 결과이다. 또 그림 3과 그림 5의 각각의 feedback gain을 표 2에 나타내었다. 그림 6에서는 그림 4에 대한 작업 좌표계에서의 궤도를 나타낸다. 그림 7에서는 제어성능의 평가를 하여  $e(t)$ 의 크기에 따라 비교하였다. 그림 8, 그림 9에서는 그림 4에 대한 토크 연산부와 퍼지 보상기의 각각의 입력토크를 나타내었다. 그림 7에서 알 수 있듯이 제안된 방법은 좋은 결과를 얻었다.

Table 2 Feedback gains of computed torque control

		$K_{ip}$ [1/s <sup>2</sup> ]	$K_{iv}$ [1/s]	$K_{ii}$ [1/s <sup>3</sup> ]
Fig.18	Link 1	30	4	*
	Link 2	250	4	*
Fig.20	Link 1	62	6	380
	Link 2	250	6	700

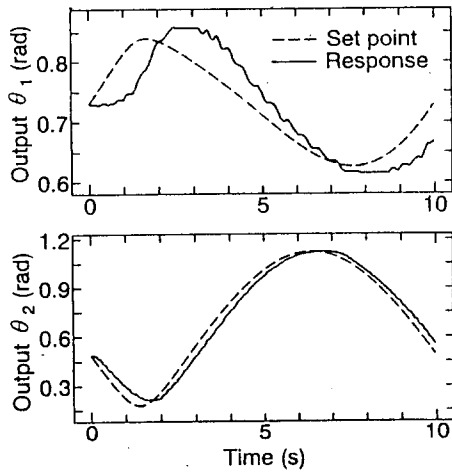


Fig.4 Experimental results of computed torque control with untuned feedback gains:

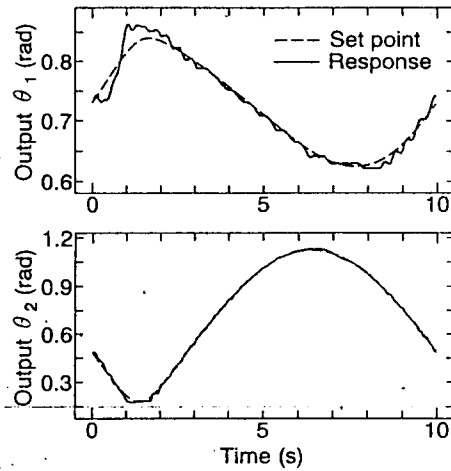


Fig.5 Experimental results of computed torque control with fuzzy compensator; adaptive input scaler

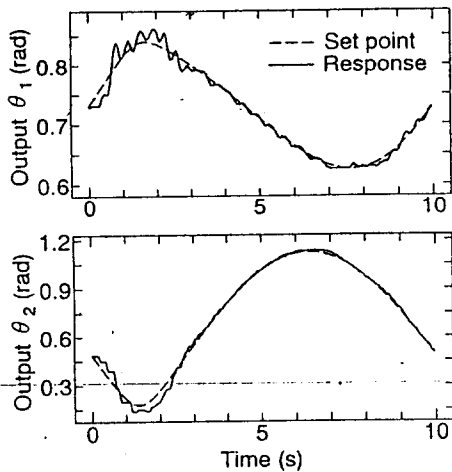


Fig.6: Experimental results of computed torque control with tuned feedback gains

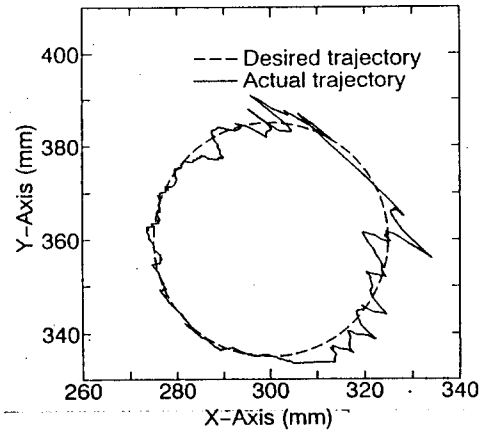


Fig.7 Experimental tracking error norms

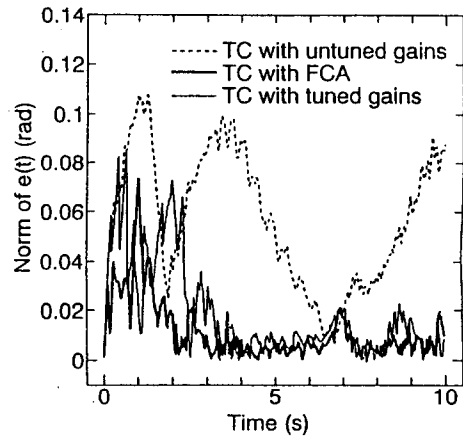


Fig.8 Experimental results of end-effector trajectory

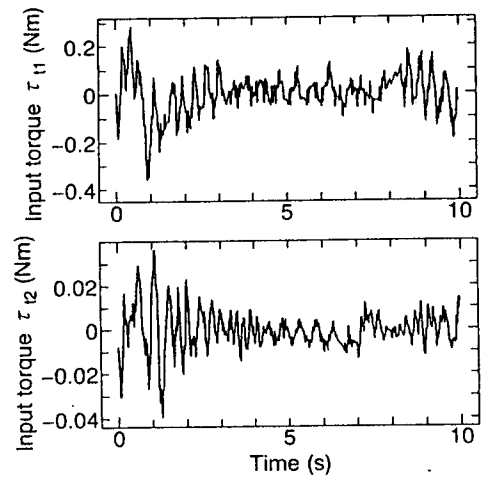


Fig.9 Experimental input torque due to computed torque control

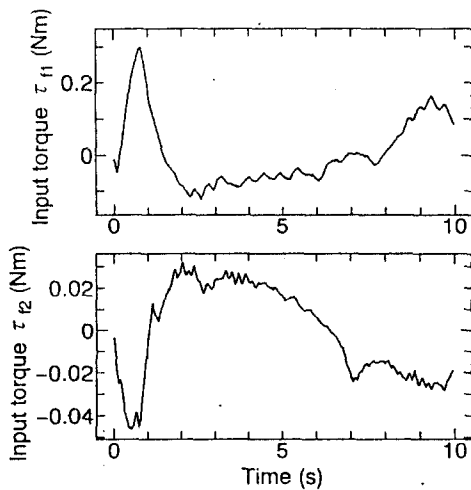


Fig.10 Experimental input torque due to fuzzy compensator

## 7. 결론

본 논문에서는 고무 인공근을 이용한 2자유도 매니퓰레이터의 궤도추종제어에 관한 것으로 비선형 모델에 근거한 토오크 산출제어에 퍼지 보상기를 병렬로 배치한 방법을 제안하였다. 또 실제 실험에서 퍼지 보상기에 따라 scaling된 입력 data가 대 집합상에서는 오차를 줄이기 위해 적용입력 scaling법을 제안하여 여러가지의 실험을 행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 모델화 오차에 대한 강인한 제어를 하는 것을 원래도 추종 실험으로 확인하였다. 이것으로 최적인 feedback 이득을 시행착오를 거쳐 조정하여 구한 것으로부터 발산이 없는 조정되지 않은 feedback gain을 가진 토오크 제어법에 퍼지 보상기를 추가하여 미조정 이득 및 모델화 오차의 영향을 없애기 위해 제안된 방법이 효율적이라는 것이 증명되었다.
- (2) 미조정된 feedback gain을 가진 토오크 산출제어에서 얻은 최대 오차 및 그의 증가분으로 결정된 고정입력을 그대로 사용한 경우 실제 실험에서는 실험후 곧 scaling 하여, 퍼지 보상기가 유효하게 동작하지 않았다. 이것을 제안된 적용입력 scaling법으로 개선되었다.

## 참고 문헌

- 1) 杉江俊治, 吉川恒夫, 小野敏郎, "2 자유도계를 이용한 로봇트마니퓰레이터의 로바스트 제어시스템 설계", 시스템과 제어, Vol. 31, NO. 8, pp. 613-620, 1987.
- 2) 井村順一, 杉江俊治, 吉川恒夫, "가속도정보를 이용한 마니퓰레이터의 로바스트 제어, 計測自動制御學會論文集, Vol. 27, NO. 5, pp. 577-584, 1991.
- 3) 杉江俊治: 리아프노프의 방법에 기초한 비선형계의 로바스트 제어, 計測과 제어, Vol. 30, NO. 8, pp. 663-668, 1991.
- 4) 大須賀公一, "비선형 메카니컬 시스템의適應 제어", 計測自動制御學會論文集, Vol. 22, NO. 7, pp. 756-752, 1986.
- 5) 大須賀公一, "비선형 메카니컬 시스템의 로바스트 모델 추적

從制御", 計測自動制御學會論文集, Vol. 24, NO. 2, pp. 126-133, 1988.

- 6) 渡邊柱吾, 陳 相浩, 黒石雅史, 鳥葉守弘, 驅田敏男, "ゴム人工筋2リソマニアビュラ-レタ의線形制御", 로보디क्स·메카트로닉스講演會 '92講演論文集, No. 920-33, pp. 761-766, 1992.
- 7) 陳 相浩, 渡邊柱吾, 中村政俊, 李 錫圭, "ゴム人工筋로봇트마니퓰레이터의軌道追從制御", KACC '92, pp. 642-646, 1992.
- 8) 則次俊郎, 和田 力, "ゴム人工筋의로봇트制御への應用", 日本로봇트學會誌, Vol. 9, NO. 4, pp. 502-506, 1992.
- 9) 大須賀公一, 木村哲愷, 小野敏朗, "라바치예타의 H<sup>∞</sup> 제어", 로보디क्स·메카트로닉스講演會 '90 講演論文集, No. 900-30, pp. 167-170, 1990.