

## 로봇 매니플레이터의 힘제어를 위한 퍼지 학습제어에 관한 연구

황 용 연\*

### A Study on the Fuzzy Learning Control for Force Control of Robot Manipulators

Y-Y Hwang\*

**Key words** : Robotics(로봇공학), Control system(제어 시스템), Force control(힘 제어),  
Fuzzy control(퍼지제어)

#### Abstract

A fuzzy learning control algorithm is proposed in this paper. In this method, two fuzzy controllers are used as a feedback and a feedforward type. The fuzzy feedback controller can be designed using simple knowledge for the controlled system. On the other hand, the fuzzy feedforward controller has a self-organizing mechanism and therefore, it does not need any knowledge in advance. The effectiveness of the proposed algorithm is demonstrated by experiment on the position and force control problem of a parallelogram type robot manipulator with two degrees of freedom. It is shown that the rapid learning and the robustness can be achieved by adopting the proposed method.

#### 1. 서 론

인공지능형 로봇의 실현을 위한 로봇의 제어 방식으로 퍼지제어 이론을 이용한 많은 연구가 이루어지고 있다. 퍼지제어는 작동자의 경험을 "if~then" 형식의 규칙에 의해 표현하기 때문에 언어적 제어(Linguistic control)라 불리며

제어대상의 정량적 모델을 필요로 하지 않는다. 그러나 규칙의 자동조정 기능을 필요로 하는 경우가 많다. 왜냐하면 퍼지제어는 제어기의 설계 초기에 있어서 언제나 최적의 규칙을 명확하게 확정할 수 있는 것이 아니며, 만약 확정되었다 하더라도 작동 중에 시스템의 파라미터가 변동하는 경우가 있기 때문이다. 이 때문에 Procyk

\* 부경대학교 전기·제어계측공학부

등<sup>[1-3]</sup>은 자동학습 기능이 부가된 퍼지제어를 제안하였다. 이 제어방식은 학습기능이 부가되지 않은 퍼지제어와 비교하면, 명확히 확정된 퍼지 규칙을 필요로 하지는 않지만, 제어대상에 대한 지식을 필요로 한다. 더욱이 언어적 제어에 있어서는 응답을 개선하기 위하여 많은 수의 규칙이 필요하다. 그러나 제어대상에 대한 여러 가지 지식을 퍼지규칙에서 표현하는 것은 쉽지 않은 않다.

한편 Ying 등<sup>[4]</sup>은 입력변수로서 오차값과 오차변화율을 사용한 입력공간 분할 퍼지법을 제안하였고, Misir 등<sup>[5-6]</sup>은 디지털 PID제어기 구조를 기초로하여 퍼지 PID제어기를 설계하였으며, Guely 등<sup>[7]</sup>은 신경회로망 대신에 학습기능을 부여한 퍼지제어 방식을 제안하였다. 이 학습법은 신경회로망을 이용한 것과 같이 피드백 제어기로부터의 출력을 이용하여 퍼지제어 알고리즘을 수정하며, 제어결과가 좋을 때만 학습기능을 행하는 것으로, 신경회로망을 이용했을 때와 비교하면 학습속도가 매우 빠르다. 그러나 이 방법은 제어대상에 대한 지식을 필요로 하고 있다. 그러므로 제어대상에 대한 지식을 어느 정도 정확하게 파악하느냐에 따라 학습제어의 성능이 좌우된다고 할 수 있다.

본 논문에서는 피드백 제어기(Feedback controller)와 피드포워드 제어기(Feedforward controller)에 퍼지기법을 적용한 퍼지 학습제어 방식을 제안한다. 이 학습방법은 제어대상에 대한 최소한의 기본 지식만을 피드백 제어기의 규

칙으로 표현하며, 그 출력을 기초로 하여 반복 실행시킴으로서 피드포워드 제어기에 필요한 규칙을 구축해 나간다. 이 방법은 제어응답의 개선을 위한 규칙의 세분화를 필요로 하지 않기 때문에, 실제로 실행시키는데 매우 편리하다고 할 수 있다. 본 논문의 퍼지 학습제어 방식을 평행링크 로봇의 힘제어에 적용하였다. 로봇의 힘제어는 제어대상에 힘센서와 대상물이 포함되어 있기 때문에 모델화가 쉽지 않다. 더욱이 한 종류의 작업 대상물만이 아닌 여러 종류의 작업 대상물에 대해서도 양호한 제어 결과가 요구된다. 이를 위해 힘제어에는 강한 적응력을 갖는 제어기가 필요하다. 본 논문에서 제안한 퍼지 학습제어 방식은 제어기를 설계할 때, 제어대상에 대한 최소한의 지식만을 필요로 하고 있으며, 반복 학습기능에 의해 제어대상에 대한 적응력을 높여 나간다.

## 2. 퍼지 학습제어

제안하는 퍼지 학습제어기의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 제어기의 기본 구성은 피드포워드 제어기(Feedforward controller, 이하 FFC), 피드백 제어기(Feedback controller, 이하 FBC), 그리고 조정메커니즘(Self-organizing mechanism, 이하 SOM)으로 구성되어 있다. FFC는 목표값  $r(k)$ 의 미래값  $r(k+p)$ 를 이용하여 출력  $u_f$ 를 추론하는 역할을 하며, FBC는 제어결과를 이용하여 출력  $u_b$ 를 추론하는 역할을 한다. 그리고 SOM은  $u_b$ 를 이용하여 FFC의 제어량을 수정하는 역할을 한다. 본 제어방식은 학습의 초기단계에서는 FBC가 주로 작동하지만, 학습이 진행됨에 따라 FBC의 출력인  $u_b$  값이 0으로 접근함으로써 인해, 제어의 중심이 FFC로 이행된다. 학습이 완료된 후, 주 제어기는 피드포워드 제어기가 되지만, 외란이 생길 때는 FBC가 역할을 한다. 즉, 반복 학습제어에 의해 FFC의 퍼지규칙을 이용하여 제어대상의 역 시스템을 구성한다.

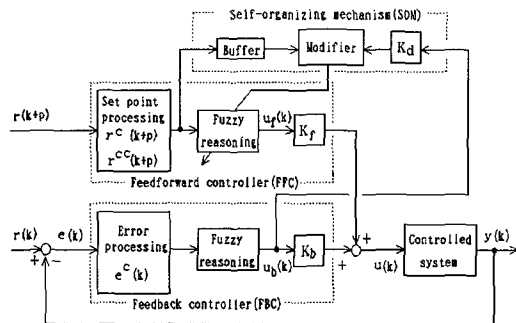


Fig. 1 Fuzzy learning control system

### 2.1 피드포워드 제어기(FFC)

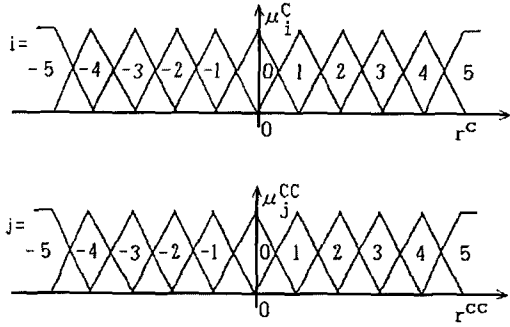


Fig. 2 Membership functions of FFC

주어진 목표값  $r(k)$  의 1계 차분  $r^c(k)$  및 2계 차분  $r^{cc}(k)$  를 다음과 같이 정의한다.

$$r^c(k) = \frac{r(k) - r(k-1)}{T} \quad (1)$$

$$r^{cc}(k) = \frac{r^c(k) - r^c(k-1)}{T} \quad (2)$$

여기서 T는 샘플링 주기이다. FFC의 전건부 변수는  $r^c$  와  $r^{cc}$ 로서 Fig. 2에 나타낸 삼각형 소속(Membership)함수를 갖는 11개의 퍼지집합  $A_i^c, A_j^{cc}$ 를 갖는다. 이 퍼지집합의 소속함수를 각각  $\mu_i^c, \mu_j^{cc}$  ( $i, j = -5, -4, \dots, 0, \dots, 4, 5$ )라 정의한다. FFC의 후건부 변수  $u_f$ 의 퍼지집합  $A_{ij}$ 는 일반적으로 이용되는 삼각형 소속함수가 아니라, 학습에 의해 형상이 자유롭게 변화한다. 이 소속함수를  $\mu_{ij}(U)$  라 정의한다.  $\mu_{ij}$ 는 이산형 소속함수로서 0에서 1까지의 값을 취한다. 단 U는 양자화된 수 ( $U = -5, -4, \dots, 0, \dots, 4, 5$ )이며,  $\mu_{ij}$ 의 첨자  $i, j$ 는 FFC의 전건부 퍼지집합  $A_i^c, A_j^{cc}$ 에 각각 대응한다.

이상과 같은 전건부와 후건부를 이용한 FFC의 퍼지 규칙을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \text{If } r^c \text{ is } A_i^c \text{ and } r^{cc} \text{ is } A_j^{cc} \\ \text{then } u_f \text{ is } A_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

$r^c, r^{cc}$ 의 값이 주어지면, 전건부의 적합도  $w_i^c, w_j^{cc}$ 는 각각의 소속함수  $\mu_i^c, \mu_j^{cc}$ 로부터 다음과 같이 계산된다.

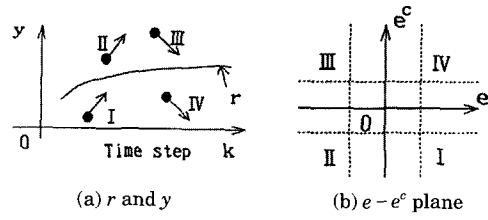


Fig. 3 Information of controlled system

$$w_i^c = \mu_i^c(r^c) \quad (4)$$

$$w_j^{cc} = \mu_j^{cc}(r^{cc}) \quad (5)$$

후건부 소속함수의 중심을 대표값이라 하고, 다음과 같이 정의한다.

$$u_{ij}^f = \frac{\sum \mu_{ij}(U)U}{\sum \mu_{ij}(U)} \quad (6)$$

또한, 규칙  $i, j$ 에 대해  $w_{ij}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$w_{ij} = \min(w_i^c, w_j^{cc}) \quad (7)$$

그러므로 FFC의 출력  $u_f$ 는  $w_{ij}$ 와 대표값  $u_{ij}^f$ 를 이용한 무게중심법으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$u_f = \frac{\sum_{i,j} w_{ij} u_{ij}^f}{\sum_{i,j} w_{ij}} \quad (8)$$

### 2.2 피드백 제어기(FBC)

피드백 제어의 목표값  $r(k)$ 와 출력값  $y(k)$ 의 편차를  $e(k)$ 라 놓고,  $e^c(k)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$e^c(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (9)$$

Fig. 3(a)의 점이 제어대상에 대한 응답을 나타내며, 화살표가 응답의 방향을 나타낸다고 가

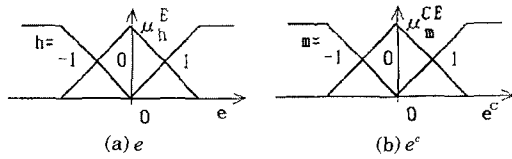


Fig. 4 Membership functions of FBC

Table 1 FBC information  $u_{hm}$

		e		
		h = -1	h = 0	h = 1
$e^c$	m = 1	-1	3	2
	m = 0	-5	0	5
	m = -1	-2	-3	1

정하면, II, IV가 이것에 대응한다. 그림에서 알 수 있듯이 제어대상에 대한 지식은 4가지의 상태 조작량을 결정하는 정도의 개략적인 것만 알면 된다. I에서 II로 옮기는 도중의 상태량을 알면, 자세한 제어가 가능하다. 이것을  $e - e^c$  평면상에 표현하면 Fig. 3(b)와 같이 되며, 점선으로 구분된 9개 부분을 퍼지규칙으로 표현하는 것이 된다. 즉 Fig. 4와 같이  $e$ 에 대해서 정, 0, 부를 퍼지집합으로 표현하며,  $e^c$ 에 대해서도 같은 방법으로 3개의 퍼지집합으로 표현한다.

이것을 전건부로서 퍼지추론을 이용하여 조작량을 계산하지만, 후건부는 소속함수를 사용하지 않고, 후건부의 대표값  $u_{hm}^b$ 를 Table 1에 나타낸 것처럼 직접 수치로 주어진다. 적합도는 소속함수로부터 다음과 같이 계산된다.

$$w_h^E = \mu_h^E(e) \quad (h = -1, 0, 1) \quad (10)$$

$$w_m^{CE} = \mu_m^{CE}(e^c) \quad (m = -1, 0, 1) \quad (11)$$

$$w_{hm} = \min(w_h^E, w_m^{CE}) \quad (12)$$

그러므로 FBC의 출력  $u_b$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$u_b = \frac{\sum_{h,m} w_{hm} u_{hm}^b}{\sum_{h,m} w_{hm}} \quad (13)$$

### 2.3 조정장치(SOM)

제안한 퍼지 학습제어기에 있어서, 현재시점

의 제어결과는 n 샘플링 전의 조작량에 원인이 있다고 판단하여, 현재시점 보다 n 샘플링 전에 사용한 규칙을 수정한다. 본 논문에서 제안하는 규칙의 수정법에서는 다음의 두 가지 점을 고려한다. 첫 번째는 n 샘플링 전에 사용한 FFC 전건부의 적합도에 따라 수정한다. 왜냐하면 식 (4)~(8)에 나타냈듯이  $r^c, r^{cc}$ 의 값이 각각의 규칙에 어느 정도 맞는가를 적합도를 이용하여 무게중심법으로 비퍼지화시킨 출력을  $u_f$ 라고 정의하였기 때문이다. 만약 사용한 규칙이 어느 정도 맞는가하는 적합도를 무시하고, 사용한 모든 규칙을 동등하게 수정한다면, 과도한 수정으로 인해 제어의 정밀도가 떨어지는 결과를 초래하게 된다. 두 번째는 FFC가 n 샘플링 전에  $u_f(k-n)$ 을 출력한 결과로 인하여, 현재시점의  $u_b(k)$ 가 발생한다.  $u_b(k)$  값이 0 부근에 있지 않을 경우에는 구축중의 FFC의 규칙이 최적으로 조정되지 않았음을 의미한다. 이러한 경우 FFC는  $u_b(k) > 0$  일 때는  $u_f(k-n)$ 보다 큰 값, 또한  $u_b(k) < 0$  일 때는  $u_f(k-n)$ 보다 작은 값을 출력할 수 있으면,  $u_b(k)$  값을 더욱 더 작게 할 수가 있다고 생각할 수 있다. 여기서 FFC 후건부의 소속함수  $\mu_{ij}(U)$ 의 형상을 바꾼다. 왜냐하면  $\mu_{ij}$ 의 형상변화에 의해 식 (6)에서 알 수 있듯이, 그 중심위치가 변화하여 규칙의 대표값  $u_{ij}^b$ 가 변화하기 때문이다. 단, 제어대상에 대한 자세한 정보를 모르기 때문에  $u_b(k)$ 의 값으로부터  $u_{ij}^b$ 의 값을 구할 수 없다. 그러므로 실행 중에 조금씩  $u_b(k)$ 가 0에 접근하도록 FFC의 규칙을 수정한다.

위에 기술한 두 가지 고려조건으로부터 사용한 규칙을 수정하기 위해, 적합도에 따른 가중치  $g_{ij}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$g_{ij} = \frac{w_i^c(k-n) w_j^{cc}(k-n)}{\max\{w_i^c(k-n)\} \max\{w_j^{cc}(k-n)\}} \quad (14)$$

식(14)에서 max는 FFC의 규칙  $ij$ 에 대하여 최대 값을 취하는 것을 의미하며, 가중치  $g_{ij}$ 를 이용하여 FFC 후건부의 소속함수  $\mu_{ij}$ 를 수정한다. n 샘플링 전에 FFC로부터 출력한  $u_f(k-n)$

을 이후에는 출력하지 않도록 다음과 같이  $\mu_{ij}$  값을 변경한다.

$$\mu_{ij}(q[K_u\{u_f(k-n)\} \leftarrow \mu_{ij}(q[K_u\{u_f(k-n)\}) - K_{dt}g_{ij}|u_b(k)| \quad (15)$$

즉  $u_f(k-n)$ 의 값을  $u_b(k)>0$  일 때는 증가시키고,  $u_b(k)<0$  일 때는 감소시키는 방향으로  $\mu_{ij}$ 의 값을 다음과 같이 변경한다.

$$\mu_{ij}(q[K_u\{u_f(k-n) + K_d g_{ij} u_b(k)\}) \leftarrow \mu_{ij}(q[K_u\{u_f(k-n) + K_d g_{ij} u_b(k)\}) + K_{dt}g_{ij}|u_b(k)| \quad (16)$$

식(15), (16)에서  $K_{dt}$ 는 수정량을 적합도로 변화시키기 위한 정수이며,  $K_d$ 는 학습의 진행속도를 조절하기 위한 값이다.  $K_d$ 의 값을 작게 하면, 학습은 안정되지만 진행속도는 느리게 되고,  $K_d$ 의 값을 크게 하면, 학습속도는 빠르게 되지만 FFC의 출력이 진동하는 경우가 생긴다. 본 제어방식은 FBC의 출력  $u_b(k)$ 를 FFC 후진부 소속함수  $\mu_{ij}$ 의 수정에 이용하기 때문에  $u_b(k)$ 가 0이 되지 않는 한, 조작량의 수정은 계속된다.

### 3. 위치와 힘 제어에의 적용

로봇을 이용한 작업이 다양화함에 따라 단순 위치제어뿐만 아니라 그라인딩, 디버링, 부품삽입 등과 같은 작업을 위해서는 위치제어와 더불어 힘을 제어해야만 한다<sup>[8-9]</sup>. 힘제어의 경우에는 로봇과 접촉되는 환경사이에 상호작용이 일어나므로 접촉환경에 대한 특성이 힘제어에 큰 영향을 미친다. 더욱이 힘 제어의 대상물이 작업에 따라 변하는 경우에는 대상물의 변화와 함께 제어대상의 모델이 바뀌게 된다. 또한 대상물 자체의 표면상태, 로봇의 토크변동 등은 힘제어에 있어서 큰 외란으로 작용한다. 그러므로 힘제어에는 외란에 강하고, 또한 대상물의 특성 변화에 강한 적응력을 갖고 있는 제어방식이 필요하다. 이러한 관점에서, 본 논문에서는 힘제어

를 위하여 대상물의 특성에 대한 자세한 지식을 필요로 하지 않고 외란의 영향에 강한 퍼지 학습제어를 적용하였고, 힘 제어보다 외란을 덜 받는 위치제어에는 PID제어를 적용하였다.

Fig. 5에 제안하는 제어기를 나타냈다. 그림에서  $r_p, r_f$ 는 각각 위치 및 힘의 목표 값이며,  $y_p, y_f$ 는 각각 위치 및 힘에 대한 응답이다.  $e_f$ 는 힘의 오차로서 다음과 같이 계산된다.

$$e_f = r_f - y_f \quad (17)$$

또한,  $S_p, S_f$ 는 위치 혹은 힘제어에 대한 방향을 선택하기 위한 대각행렬로서 다음과 같은 관계가 있다.

$$S_f = I - S_p \quad (18)$$

여기서  $I$ 는 단위행렬이다. Fig. 5에서  $J$ 는 Jacobian행렬,  $\Lambda(\theta)$ 는 각도  $\theta$ 를 기준좌표계에 대한 위치  $y_p$ 로 환산하기 위한 함수이다.

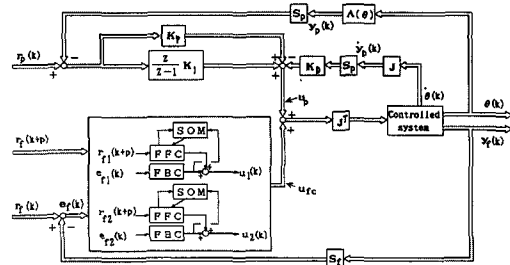


Fig. 5 Position and force control system

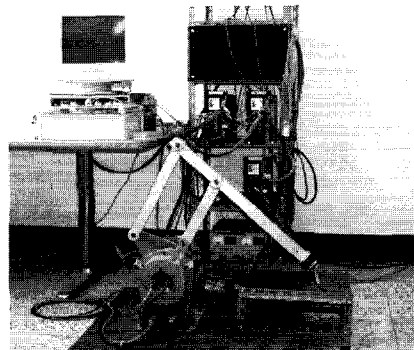


Fig. 6 Experimental apparatus

### 4. 실험

실험에 사용한 로봇은 직접구동형 모터 2대를 사용하여 제작한 2자유도 평행링크 로봇이다. Fig. 6에 실험장치를 나타냈으며, 로봇선단에는 Nitta(주)의 UFS-67M25A인 3축용 힘 센서가 부착되어 있고, 힘 센서로부터의 신호는 센서전용 DSP보드를 통하여 얻어진다. 로봇 선단을 이용한 힘제어의 대상물은 플라스틱 판재를 사용하였다. 샘플링 주기는 5 [ms], 제어기의 게인값은  $K_f = 0.8$ ,  $K_b = 0.05$ ,  $K_d = 0.5$ ,  $K_{dt} = 0.02$ ,  $K_u = 1.25$  이고, 파라미터는  $p=3$ ,  $n=3$ 이 이용되었다.

로봇을 이용한 실험은 로봇 선단을 대상물에 대하여 x축방향으로는 위치  $y_p$ , y축방향으로는 힘  $y_f$ 를 제어한다. 제어량  $y_p, y_f$ 에 대응하는 목표값은 각각  $r_p, r_f$ 이다. 힘제어의 목표값은 변화하는 목표값에 대한 추종성을 알아보기 위해 최대 10 [N]인 정

현파로 설정되었다.

또한 위치와 힘을 동시에 제어하는 실험에서는 y축방향으로 힘을 제어하면서 로봇의 몸체쪽으로 0.06 [m] 이동시킨다.

Fig. 7은 로봇 선단을 대상물의 한 점에 고정 한 상태에서 힘제어만을 실행(실험 1)한 결과로서 첫 번째 실행에서는 힘제어에 대한 응답이 진동하고 있으나, 7번째 실행한 결과 힘에 대한 응답이 목표값에 거의 일치하여 학습이 완료되었음을 알 수 있다.

Fig. 8은 위치 및 힘제어를 동시에 실행(실험 2)한 결과로서, Fig. 8(a)에 나타났듯이 첫 번째 실행결과에서는 힘제어에 대한 응답이 목표값에 대하여 크게 진동하고 있으나, Fig. 8(b)에 나타난 것처럼 7번째 실행한 결과, 위치 제어에 대해서는 PID제어를 이용하였으므로 실행회수와 관계없이 변화가 없으나, 퍼지 학습제어를 이용한 힘제어에 대한 응답은 진동이 없어지고 목표값

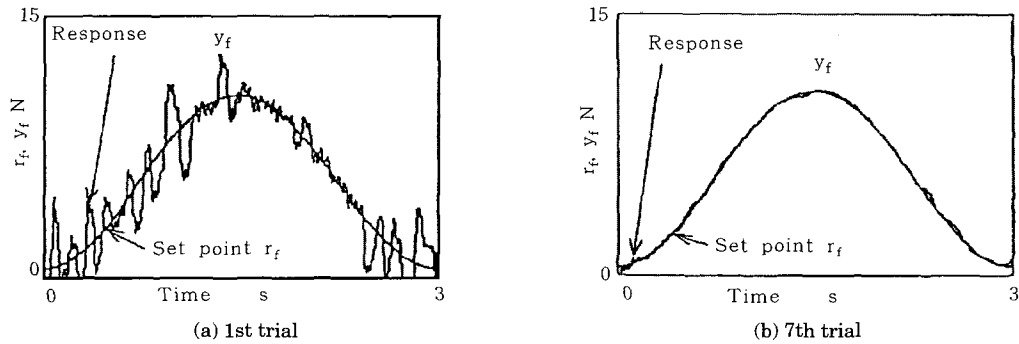
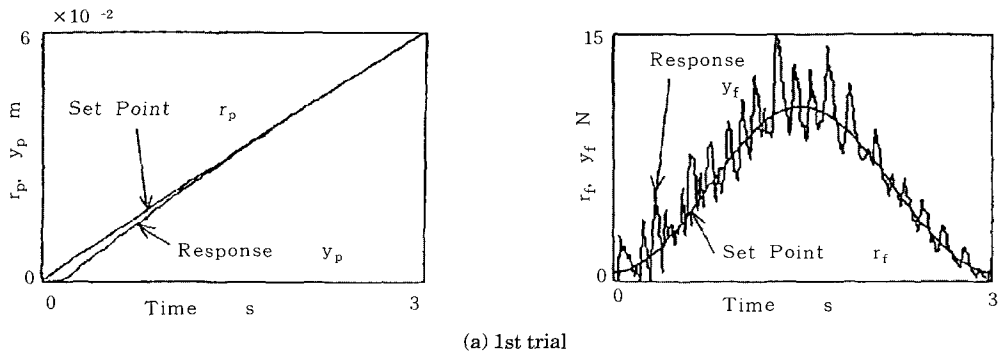


Fig. 7 Experimental results(1)



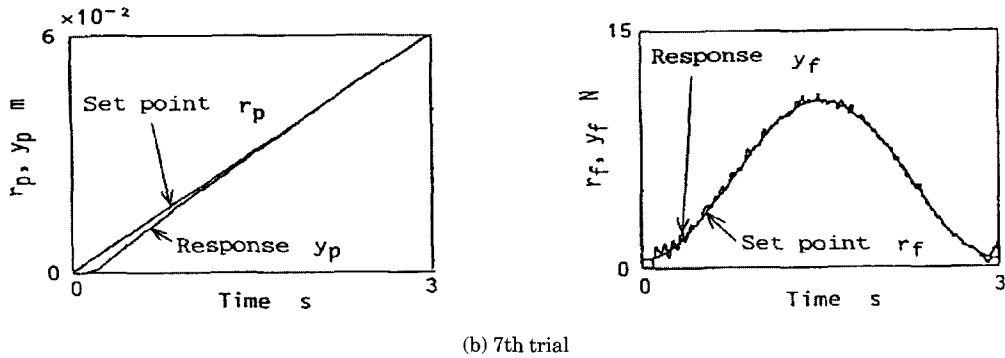


Fig. 8 Experimental results(2)

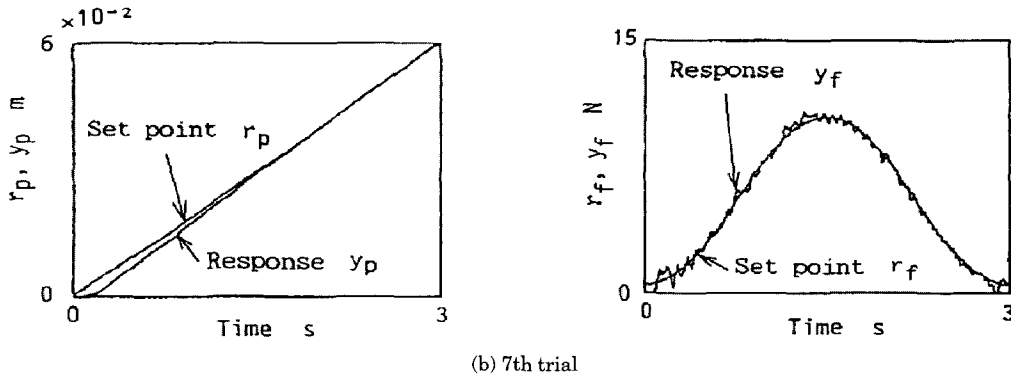
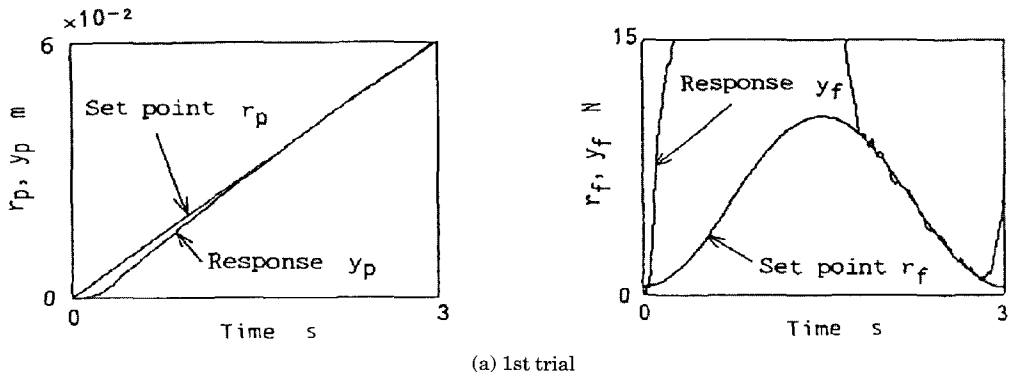


Fig. 9 Experimental results(3)

에 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 9는 FFC의  $\mu_{ij}$  초기 값으로 Fig. 7에 나타낸 힘제어만을 행한 결과에서 얻은  $\mu_{ij}$ 를 이용하여 힘과 위치를 동시에 제어한 실험(실험 3) 결과이다. 그 결과 Fig. 9(a)에 나타낸 것처럼 힘과 위치를 동시에 제어하였기 때문에 힘에 큰 외란이 발생하여, 초기단계부터 목표값에서 크게 벗어나고 있다. 그러나 반복실행에 의한 학습이 진행됨에 따라, 7번째 실행 결과인 Fig. 9(b)에서는 외란을 감쇠시키는 조작량이 생성되어 힘제어에 대한 응답이 목표값에 거의 접근하게 되어 실험 2의 실행 결과인 Fig. 8(b)와 같은 수준으로 제어됨을 알 수 있다.

습이 진행됨에 따라, 7번째 실행 결과인 Fig. 9(b)에서는 외란을 감쇠시키는 조작량이 생성되어 힘제어에 대한 응답이 목표값에 거의 접근하게 되어 실험 2의 실행 결과인 Fig. 8(b)와 같은 수준으로 제어됨을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 로봇의 힘제어를 위해 피드포워드 제어기(FFC)와 피드백 제어기(FBC)로 구성된 퍼지 학습제어 방식을 제안하였다. 제안한 제어방식은 제어기의 초기설계에서 규칙의 세분화가 필요 없으며, 미리 얻어진 몇 가지 규칙을 기초로 하여 구성된 FBC의 출력  $u_b(k)$ 를 이용하여 FFC의 후건부 소속함수를 변경한다. 따라서 FBC의 출력  $u_b(k)=0$ 에 접근할 때까지 반복 학습함에 따라 FFC의 제어량을 수정하게 하는 것이 특징이다. 제안한 제어방식을 평행링크형 로봇 매니퓰레이터에 의한 힘제어 실험에 적용하였다. 즉 힘제어에는 제안한 퍼지 학습제어 방식을 이용하였으며, 위치제어에는 PID제어방식을 이용한 결과, 힘제어에 있어서 제안한 퍼지 학습제어가 매우 유용하게 작용한다는 것을 실험을 통하여 확인하였다. 특히 외란에 대해서도 FFC에서 외란을 감쇠시키는 조작량이 생성되어 양호한 제어결과를 얻을 수 있었다.

### 참 고 문 헌

[1] T. J. Procyk and E. H. Mamdani, "A linguistic Self-Organizing Process Controller", *Automatica*, Vol. 15, No. 1, pp. 15-30, 1979.  
 [2] 山崎東, 菅野道夫, "自動學習ファジィコントローラ", *計測自動制御學會論文集*, Vol. 20, No. 8, pp. 720-726, 1983.  
 [3] K. Tanaka and M. Sugeno, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control System", *Fuzzy Sets and System*, Vol. 45, No. 2, pp. 135-156, 1992.

[4] H. Ying, W. Siler, and J. J. Buckley, "Fuzzy Control Theory: A Nonlinear Case", *Automatica*, Vol. 26, pp. 513-520, 1990.  
 [5] D. Misir, H. A. Malki, and G. Chen, "Design and Analysis of a Fuzzy Proportional-Integral-Derivative Controller", *Fuzzy Sets and System*, Vol. 79, pp. 297-314, 1996.  
 [6] B. G. Hu, G. K. I. Mann, and R. G. Gosine, "New Methodology for Analytical and Optimal Design of Fuzzy PID Controller", *IEEE Trans. Fuzzy System*, Vol. 7, No. 5, pp. 521-539, 1999.  
 [7] F. Guely and I. Todo, "A Fuzzy Self-Organizing Control Algorithm and Its Application to the Control of Robot Arm", *Proceeding of the 20th International Symposium on Industrial Robots*, pp. 137-144, 1989.  
 [8] M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 102, No. 2, pp. 126-133, 1981.  
 [9] M. T. Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-11, No. 6, pp. 418-432, 1981.

### 저 자 소 개



**황용연(黃龍淵)**

1959년 5월생. 1982년 인하대학교(기계공학 전공) 졸업. 1989년 일본요코하마국립대학 대학원 박사과정전기 졸업(석사). 1992년 동대학원 박사과정후기 졸업(박사). 1992년 ~현재 부경대학교 전기·제어계측공학부 부교수. 당학회 회원.