

## 퍼지 제어를 이용한 DC 서보 모터의 속도 제어\*

강근택 · 김영택\*\*

부산수산대학교 \*\*경성대학교  
(1989년 12월 28일 접수)

### Control of DC-Servomotor Speed by Using Fuzzy Controller\*

Geun Taek KANG and Young Taek KIM\*\*

National Fisheries University of Pusan, \*\*Kyung Sung University  
(Received December 28, 1989)

DC-servomotor acts an important role in robots and manipulators. But the precise control of DC-motor is difficult by using usual linear controller because of the nonlinear characteristics of DC-motor. This study suggests the use of fuzzy controller in the control of DC-servomotor speed. The fuzzy controller is designed from a fuzzy model which can represent nonlinear systems very well. Hence the fuzzy controller is very useful in the control of nonlinear systems such as DC-motor.

We construct a fuzzy model of DC-servomotor, design a fuzzy controller from the fuzzy model, and compare that with a linear controller. When we use the fuzzy controller, the static ripples are reduced and the rise time is required 20% less than in using a linear controller.

### 서 론

최근 기계 전자, 마이크로 프로세스 기술의 발전과 함께 공장 자동화 특히 로봇, 매니플레이터 등의 개발이 급속히 이루어지고 있다. 그기에 중요한 역할을 하고 있는 것 중에 하나가 DC 서보 모터이며, 마이크로 프로세스의 발전으로 DC 서보 모터의 제어에 현대 제어 이론이 많이 응용되어지고 있다. 그러나 DC 서보 모터 자체가 비선형 특성을 가지고 있어 선형의 제어 시스템으로는 정밀한 고속 제어를 하기에는 한계가 있다. 따라서 비선형 특성을 고려한 제어 수법이 필요하다.

비선형 시스템을 대상으로 한 제어 수법으로 현재 많이 사용되는 것으로는 (1) 시간 최적 제어<sup>1)</sup>, (2) 기술 함수를 이용한 제어<sup>2)</sup>, (3) 가변 구조 제어<sup>3)</sup>의 3가지를 들 수 있다. 시간 최적 제어는 bang-bang 제어가 대표적인 것이며 제어 입력은 단순한 형태이나 robust성에 문제가 있다. 기술 함수를 이용할 경우에는 좋은 근사 함수를 구하는데 어려움이 있다. 가변구조 제어는 최근 마이크로 프로세스 기술의 발전으로 많이 이용되고 있으며 특히 슬라이딩 모드를 이용한 제어가 robust성이 좋은 제어로 많이 이용되고 있으나 슬라이딩 면의 계산이 복잡한 어려움이 있다. 가변 구조 제어의 하나로, 모터 속도가 가속 될 때와 감속 될 때를 나누어 설정치에 따라

\* 이 논문은 1989년도 과학재단 지원 기초연구비에 의해 연구된 것의 일부임.

파라미터를 변환시키는 제어 수법<sup>4)</sup>도 연구되어 있으나 구분 선형(piecewise linear)의 일종으로 모델의 수가 많은 단점이 있다.

본 연구에서는 가변 구조 제어의 한 형태인 퍼지 제어를 이용하여 DC 서보 모터의 속도를 제어하고자 한다. 여기서 사용하는 퍼지 제어기는 퍼지 모델로부터 설계되어지며, 그 퍼지 모델은 비선형 시스템의 표현 능력이 매우 뛰어나, 그로부터 설계되는 퍼지 제어기도 제어 능력이 뛰어나며 비교적 간단하고 알기 쉬운 형태를 한다. 본 연구에서 DC 서보 모터의 속도 제어를 위한 퍼지 제어를 설계하고 속도제어 실험을 하여 그 제어기의 유효성을 보인다.

### 퍼지 제어기

본 연구에서 사용하는 퍼지 제어기는 프로세스의 퍼지 모델로부터 설계된다. 1절에서 그 퍼지 모델을 설명하고 2절에서 그 퍼지 모델로부터 퍼지 제어를 설계하는 방법을 설명한다.

#### 1. 퍼지 모델

퍼지 모델의 형태로는 여러가지가 있으나, 본 연구에서 사용하는 것은 Takagi와 Sugeno<sup>5)</sup>에 의해 제안된 것으로 다음과 같은 형태의 퍼지 규칙들로 구성된다.

$$L^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_m \text{ is } A_m^i \\ \text{then } y^i = h^i(\cdot)$$

(1)

여기서,  $L^i$ 는 이 퍼지 규칙이  $i$ 번째 규칙임을 나타내고,  $x_j$ 는 변수  $A_j^i$ 는 퍼지 집합,  $y^i$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙의 출력,  $h^i(\cdot)$ 는 선형 함수이다. 어느 한 입력치( $x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0$ )에 대한 퍼지 모델로부터의 추론 결과  $\hat{y}$ 는 다음 식과 같이 구한다.

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^n W^i y^i}{\sum_{i=1}^n W^i} \quad (2)$$

여기서,  $n$ 은 퍼지 규칙의 수,  $W^i$ 는 입력치( $x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0$ )에 대한  $i$ 번째 규칙 전제부의

적합도를 나타내며, 퍼지 집합  $A_j^i$ 의  $x_j^0$ 에서 멤버십치(membership value)를  $A_j^i(x_j^0)$ 로 표현할 경우  $W^i$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$W^i = \prod_{j=1}^m A_j^i(x_j^0) \quad (3)$$

(1)식과 같은 퍼지 규칙들로 구성되는 퍼지 모델은, 입력 공간을 퍼지 분할하여 각 퍼지 부분 공간을 한 개의 선형식으로 표현한 형태이다. 각각 한 개의 퍼지 규칙은 전제부에서 정해지는 퍼지 부분 공간 위에서 성립하는 선형 입출력 관계를 결론부에서 나타내고 있다. 이러한 퍼지 모델은 표현 능력이 뛰어나고 시스템의 특성을 잘 나타내는 장점을 갖는다. 즉 각 퍼지 부분 공간에서, 두개 이상의 퍼지 규칙이 이용될 경우는 그 부분 공간에서 시스템이 비선형의 특성을 가지며, 한 개 만의 퍼지 규칙이 적용되면 그 부분 공간에서 시스템이 선형으로 근사될 수 있음을 알 수 있다. 시스템의 입출력 데이터만을 이용하여 위의 퍼지 모델을 인식(identification)하는 방법은 Segeno와 강<sup>6),7)</sup>에 의해 이미 발표되어 있다.

#### 2. 퍼지 제어기의 설계

프로세스 퍼지 모델의 규칙이 다음과 같다고 하자.

$$L^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_m \text{ is } A_m^i \\ \text{then } y^i = b^i u + g^i(\cdot)$$

(4)

여기서,  $u$ 는 제어 입력 변수이며,  $b^i$ 는  $u$ 의 계수이고,  $g^i(\cdot)$ 는 선형 함수이다.

퍼지 제어기도 퍼지 모델과 마찬가지로 다음과 같은 퍼지 규칙들로 구성되며 규칙 수는 퍼지 모델의 규칙 수와 동일 하다.

$$C^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_m \text{ is } A_m^i \\ \text{then } u^i = f^i(\cdot)$$

(5)

여기서,  $C^i$ 는 이 규칙이 퍼지 제어기의  $i$ 번째 규칙임을 나타내며,  $C^i$ 의 전제부는  $L^i$ 의 전제부와 똑 같다.  $C^i$ 의 결론부의  $u^i$ 는  $i$ 번째 규칙으로부터 구해지는 제어 입력을 나타내며,  $f^i(\cdot)$ 는

L'의 결론부의 선형 모델로부터 통상의 선형 제어 수법으로 설계되는 제어기이다.

어느 한 입력치( $x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0$ )에 대해, 프로세스의 출력이  $\hat{y}$ 가 되기 위한 제어 입력치  $u^0$ 를 퍼지 제어기로부터 구하는 방법은 다음과 같다. 우선 다음 식과 같이 프로세스 퍼지 모델의  $i$ 번째 규칙 출력이  $\hat{y}$ 가 되기 위한 제어입력치를  $\bar{u}^i$ 라 하자.

$$\bar{y} = b^i \bar{u}^i + g^i(\cdot) \quad (6)$$

이  $\bar{u}^i$ 는 퍼지 제어기의  $i$ 번째 규칙 결론부에서 구한다. 입력치 ( $x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0$ )에 대한  $i$ 번째 규칙 전제부의 적합도를  $W^i$ 라 하고  $W^i$ 를 (6)식에 곱하면

$$W^i \bar{y} = W^i (b^i \bar{u}^i + g^i(\cdot)) \quad (7)$$

가 되며,  $n$ 개의 각 규칙에 대해 (7)식과 같은 식을 구해 모두 더하면

$$\sum_{i=1}^n W^i \bar{y} = \sum_{i=1}^n W^i (b^i \bar{u}^i + g^i(\cdot)) \quad (8)$$

가 된다. 한편 프로세스 퍼지 모델로부터  $\bar{y}$ 는 다음 식과 같이 표현 된다.

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n W^i (b^i u^0 + g^i(\cdot))}{\sum_{i=1}^n W^i} \quad (9)$$

따라서 (8)식과 (9)식으로 부터  $u^0$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$u^0 = \frac{(\sum_{i=1}^n W^i b^i \bar{u}^i)}{(\sum_{i=1}^n W^i b^i)} \quad (10)$$

퍼지 규칙 전제부에 사용되는 퍼지 집합의 멤버십 함수의 형태는 여러가지가 있을 수 있으나 복잡하면 멤버십치를 구하는 계산 시간이 길어지므로 신속한 제어를 할 수 없다. 본 연구에서는 그림 1과 같은 3가지의 구분 선형 함수만을 멤버십 함수로 한다. 그러면 어느 한 입력  $x$ 에 대한 그림 1의 3퍼지 집합  $A_1, A_2, A_3$ 의 멤버십치  $A_1(x), A_2(x), A_3(x)$ 는 다음과 같이 간단한 식들로 표현된다.

$$A_1(x) = (|x - p_1| - |x - p_2|) / 2(p_2 - p_1) + (|x - p_3| - |x - p_4|) / 2(p_3 - p_4) \quad (11)$$

$$A_2(x) = 0.5 + (|x - p_5| - |x - p_6|) / 2(p_6 - p_5) \quad (12)$$

$$A_3(x) = 0.5 + (|x - p_7| - |x - p_8|) / 2(p_8 - p_7) \quad (13)$$

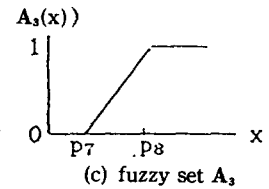
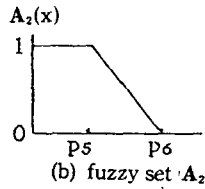
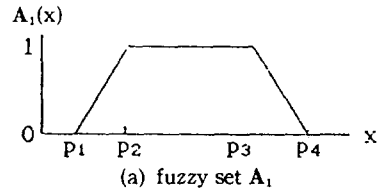


Fig.1. The fuzzy sets used in premises.

## DC 서보 모터의 속도 제어를 위한 퍼지 제어기 설계와 제어 실험

### 1. DC 서보 모터의 퍼지 제어기 설계

#### (1) DC 서보 모터의 퍼지 모델

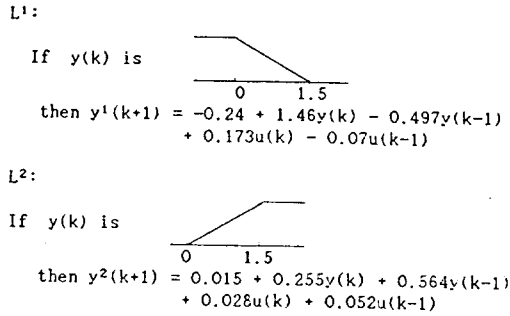
제어 대상의 모터는 15W의 DC 서보 모터이며 전기자 전압으로 모터 속도를 제어한다. 모터의 회전 속도는 모터에 연결된 다코 발전기의 출력 전압으로 측정한다. 모델 작성에 필요한 입력력 데이터를 얻기 위하여 의사 난수의 제어 입력을 사용하였으며 샘플 주기는 0.5초로 하였다. 입출력 데이터를 이용하여 인식(identification)된 퍼지 모델을 그림 2에 보이며 선형 모델은 (14)식에 보인다.

$$y(k+1) = 0.694 + 0.159y(k) + 0.058y(k-1) + 0.018u(k) - 0.022u(k-1) \quad (14)$$

여기서,  $y(k)$ 는 타코 발전기의 출력 전압이며  $u(k)$ 는 제어 입력이다.

#### (2) DC 서보 모터의 퍼지 제어기

그림 2의 모델로부터 퍼지 제어기를 설계한다. 퍼지 제어기 규칙의 전제부는 퍼지 모델의



**Fig.2.** The fuzzy model for DC motor;  $y(k)$ ; output of tachogenerator;  $u(k)$ : control input.

전제부와 동일하며, 결론부는 퍼지 모델의 결론부로부터 최적 제어 이론을 이용하여 설계한다. 최적 제어 이론을 이용하기 위해서 퍼지 모델 각 규칙의 결론부를 다음과 같은 상태 방정식 형태로 바꾼다.

$$X(k+1) = A X(k) + B u(k) \quad (15)$$

$$y(k) = D X(k) \quad (16)$$

위의 상태 방정식 형태로는 설정치 추종 제어기 설계가 곤란하므로 다음과 같이 상태변수  $W(k)$ 와 입력변수  $v(k)$ 를 정의한다.

$$W(k) = \begin{pmatrix} X(k+1) - X(k) \\ y(k) - r \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$v(k) = u(k+1) - u(k) \quad (18)$$

여기서  $r$ 은 설정치이다.  $W(k)$ 와  $v(k)$ 를 사용하여 상태 방정식을 구하면 다음과 같이 된다.

$$W(k+1) = \begin{pmatrix} A & 0 \\ D & 1 \end{pmatrix} W(k) + \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} v(k) \quad (19)$$

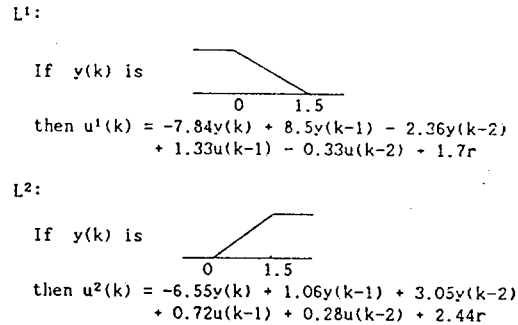
(19)식의 상태 방정식의 제약하에서 다음의 목적함수  $J$ 를 최소로 하는 제어를 설계하면 된다.

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [W'(k) Q_1 W(k) + Q_2 v^2(k)] \quad (20)$$

여기서,  $Q_1$ 은 상태 가중 행렬이며  $Q_2$ 는 제어 입력 가중치이다. 그림 2의 퍼지 모델로부터 위

의 방법으로 설계된 퍼지 제어를 그림 3에 보이며 (14)식의 선형 모델로부터 설계된 선형 제어기는 (21)식에 보인다. 그림 3과 (21)식의 제어기에서  $Q_1$ 으로는 단위 행렬을 사용하였으며  $Q_2$ 로는 0.1을 사용했다.

$$u(k) = -7.36 y(k) + 4.01 y(k-1) + 0.98 y(k-2) + 0.89 u(k-1) + 0.11 u(k-2) + 2.37r \quad (21)$$



**Fig.3.** The fuzzy controller for DC motor;  $y(k)$ : output of tachogenerator;  $u(k)$ : control input.

그림 3의 퍼지 제어기에서 사용되는 퍼지 집합의 멤버십 함수는 그림 1의 구분 선형 함수이므로 그림 3의 제어기는 (10)식과 (12), (13)식에 의해 (22)식과 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$u(k) = (u^1(k)(0.0865 + 0.0577(|y(k) - 1.5| - y(k))) + u^2(k)(.014 + 0.0093(y(k) - |y(k) - 1.5|)))/(0.1005) + 0.048(|y(k) - 1.5| - y(k)))$$

여기서,  $u^1(k)$ 와  $u^2(k)$ 는 그림 3과 동일하다.

## 2. 실험 결과

다음의 2 종류의 설정치 변동에 대해 (21)식의 선형 제어기와 그림 3의 퍼지 제어기로 모터 속도 제어 실험을 하였다.

(실험 1)  $r(k) = 0 \text{ rpm} ; k \leq 1 \text{ sec}$   
 $1010 \text{ rpm} ; 1 \leq k \leq 15 \text{ sec}$   
 $1850 \text{ rpm} ; 15 \leq k \text{ sec}$

(실험 2)  $r(k) = 0 \text{ rpm} ; k \leq 1 \text{ sec}$

1850 rpm :  $1 < k \leq 15$  sec

1010 rpm :  $15 < k$  sec

(실험 1)의 제어 결과를 그림 4에 보이며 (실험 2)의 제어 결과를 그림 5에 보인다. 두 실험의 결과, 퍼지 제어에 의한 제어 결과가 통상의 단일 선형 제어에 의한 결과에 비해 설정치 도달시간이 짧아졌으며 정상 리플(ripple)도 감소하였다. 설정치 변동의 90%에 도달하는 시간은 퍼지 제어가 단일 선형 제어의 약 80%로 짧아졌다. 이러한 결과는 DC 모터가 비선형의 특성을 갖고 있으며 퍼지 제어가 그 비선형의 특성을 잘 고려하기 때문이다.

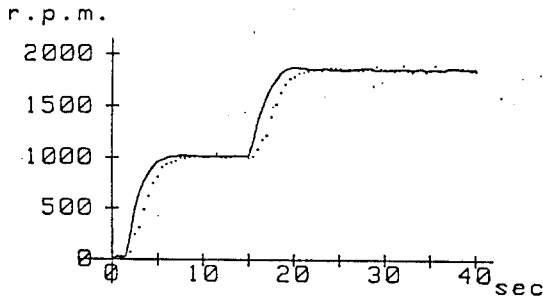


Fig.4. results of control in experiment 1; \_\_\_\_ : fuzzy control ; ..... : linear control.

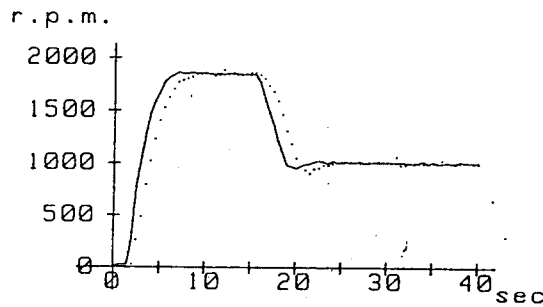


Fig.5. results of control in experiment 2; \_\_\_\_ : fuzzy control ; ..... : linear control.

## 결 론

비선형의 특성을 갖고 있는 DC 서보 모터의 속도 제어에 퍼지 제어기의 사용을 제안 하였다.

퍼지 제어기는 퍼지 모델로 부터 설계되며, 그 퍼지 모델은 시스템의 입력력 데이터로 인식되고 비선형 시스템의 표현에 뛰어난 능력을 갖고 있다. 따라서 퍼지 모델로 부터 설계되는 퍼지 제어기는 시스템의 비선형 특성이 잘 반영 되어서며 그러한 점은 서보 모터의 속도 제어에 응용한 결과 잘 알 수 있었다. 즉 퍼지 제어기에 비해 고속 제어가 가능해졌으며 정상 리플(ripple)이 감소하였다. 또한 이 퍼지 제어기에서 사용되는 퍼지 집합의 멤버십 함수는 간단한 선형 구분 함수이므로 퍼지 제어기도 간략한 형태로 표현되었다.

## 참고문헌

- 1) Halkin, H. (1965): A generalization of LaSalle's bang-bang principle. SIAM J. Control 5, 609-621.
- 2) Atherton, D.P. (1975): Nonlinear control engineering: describing function analysis and design. Van Nostrand Reinhold
- 3) Utkin, V.I. (1977): Variable structure systems with sliding modes. IEEE Trans. AC -22(2), 212-222.
- 4) 菊地 章 · 松本 守量 · 守末 利彌(1986): 加速 · 減速モデル切替によるDCサーボモータの速度制御. 日本電子通信學會論文誌 69-A 11, 1344-1350.
- 5) Takagi, T. and M. Sugeno (1985): Fuzzy identification of system and its application to modeling and control. IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics 15, 115-132.
- 6) Sugeno, M. and G.Y. Kang (1988): Structure identification of fuzzy model. Fuzzy Sets and Systems 28, 15-33.
- 7) 姜 根澤 · 菅野 道未(1987): ファジ. モデリング. 日本計測自動制御學會論文集 23-6, 650-652.