

# PI형 퍼지이론을 이용한 압전소자 플렉시블암의 제어

류 재 춘\*      박 종 국\*\*  
안양전문대학 전자계산과      경희대학교 전자공학과

## Control of Piezoelectric Flexible Arm Using PI Type Fuzzy Algorithms

Jae-Chun Ryu\*,      Chong-Kug Park\*\*  
Dept. of Computer Science      Dept. of Electronic Engineering  
Anyang T. College      Kyung Hee University

### ABSTRACT

This paper describes the tip force control of a flexible miniature arm. The arm is driven by the torques generated by the cells, and the endpoint of the arm is controlled so that it moves in synchrony with the fluctuation of the target and maintains a constant distance to the surface of the target.

로 구동기로 사용하는 것은 불가능하다. 이 때문에 압전세라믹을 이용한 소형구동기의 개발이 적극적으로 추진되고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 보다 능동적으로 해결하기 위하여 퍼지이론을 적용하여 제어기를 설계하였다.

### 1. 서론

최근, 현저하게 발전하고 있는 우주 구조물이나 정보관련 기기는 경량화, 고속화와 더불어 높은 정밀도가 요구되고 있다. 그러나 이러한 구조물의 진동 제어는 종래의 방법은 불충분하고 새로운제어기법의 도입이 요구되어지고 있다.

따라서, 진동면이나 대상물의 변위에 추종하는 마이크로 로봇 암의 개발은 앞으로 정보기기 관련분야에 중요한 연구과제라 생각된다. Cannon-Schmitz, Skaar-Tucker, Yuh, 요시다 등이 1링크 강성암의 진동제어 문제를[1,2,3,4], Owet-Vegte, Hukuda, Umeno, Aoshima는 다링크 강성 암에 대해 연구를 하였다[5,6,7,8,9]. 이러한 연구에서 구동기는 서보모타로 소형 로봇 암을 필요로 하는 경우는 구동기의 규모가 크므

### 2. 이론 해석

그림 1은 압전소자를 상하면에 부착시킨 플렉시블 암을 표시한 것이다. 빔이 xy평면에서만 진동한다고 가정하면, 압전 구동기를 가진 플렉시블 암의 진동방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & [\rho(x) A(x) + m \delta(x-l)] \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \\ & + \frac{\partial^2}{\partial x^2} [E(x)I(x)(1 + \gamma \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}] \\ & = M_p \delta'(x-l_1) \end{aligned} \quad (1)$$

가 된다. 여기서

$$\delta(x) = d\delta(x)/dx$$

$$\begin{aligned} \rho(x)A(x) &= \begin{cases} \rho_b A_b & \text{for } l_1 \leq x \leq l \\ (\rho A)_b & \text{for } 0 \leq x \leq l_1, \end{cases} \\ E(x)I(x) &= \begin{cases} E_b I_b & \text{for } l_1 \leq x \leq l \\ (EI)_b & \text{for } 0 \leq x \leq l_1, \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

이고

$$(\rho A)_{bp} = \rho_b A_b + \rho_p A_p \quad (3)$$

$$(EI)_{bp} = bh_b^3 \frac{E_b}{12} + \frac{b[(h_b + 2h_p^3) - h_b^3]E_p}{12}$$

해석하기 위해 우선 계의 자유진동응답을 구한다.  $M_p = 0$  으로 한 해를

$$y(x, t) = W_n(x)f_n(t) \quad (4)$$

로 놓으면 식(1)은

$$\begin{aligned} & [\rho(x)A(x) + m\delta(x-l)] \frac{d^2 f}{dt^2} + \\ & \frac{d^2}{dx^2} [E(x)I(x)(1 + \gamma \frac{d}{dt}) \frac{d^2 y}{dx^2}] \\ & + K_s y(x, t) \delta(x-l) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

이식을 변형하면 다음과 같다.

$$\frac{d^4 w^i}{dx^4} - (\xi^i)^4 w^i - \bar{m}(\xi^i)^4 w^i \delta(x-l) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + k^2 \gamma \frac{df}{dt} + k^2 f = 0 \quad (7)$$

$$(\xi^i)^4 = k^2 \frac{(\rho A)^i}{(EI)^i} \quad (8)$$

$$\bar{m} = \frac{m}{\rho A}$$

식(6)의 일반해는

$$\begin{aligned} W(x) &= A^i S(\xi^i x) + B^i T(\xi^i x) + C^i U(\xi^i x) \\ &+ D^i V(\xi^i x) + \bar{m} \xi^i w^i(l) V[\xi^i(x-l)] H(x-l) \end{aligned} \quad (9)$$

$$i = I, II$$

로 놓을 수 있다. 이제 경계조건에 식(9)를 대입하여 얻은 식의 계수행렬식을 0으로 놓으면 진동방정식이 얻어진다. 따라서 진동방정식의 근  $\xi^i$ 를 구하고  $A^i - D^i$ 를 함수로 표시하면 암의 모드함수  $w$ 가 결정된다.

따라서 다음과 같은 일반진동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2 f_n}{dt^2} + k\gamma \frac{df_n}{dt} + k^2 f_n = Q_n(t) \quad (9)$$

여기서

$$Q_n(t) = \left[ \frac{dw_n(t)}{dx} - \frac{dw_n(t_1)}{dx} \right] M_p / \psi_n \quad (10)$$

이제 압전구동기에서 발생하는 왜곡 모멘트  $M_p$ 를 제어하고 암의 선단을 요동면의 변위  $u$ 에 추종할 수 있는 문제를 생각한다. 암의 변위 제어법으로서 요동면의 변위  $u$ 와 속도  $\dot{u}$  현재의 암선단의 위치  $y_L$ 과 속도  $\dot{y}_L$ 의 각각의 차를 제한 신호로서 이용, 그 값을 증폭해서 압전소자에 인가한다. 이 경우 위치제한이득을  $G_p$ , 속도제한이득을  $G_v$ 로 하면 구동기가 암에 가하는 왜곡모멘트는

$$M_p = G_p[u(t) - y_L(t)] + G_v[\dot{u}(t) - \dot{y}_L(t)] \quad (11)$$

으로 된다. 이상의 결과를 매트릭스 표현법으로 바꾸면

$$MF(t) + \Gamma F(t) + KF(t) = UM_p(t) \quad (12)$$

가 된다. 여기서

$$F(t) = [f_1(t), f_2(t) \cdots f_N(t)] \quad (13)$$

이고  $M, \Gamma, K$  및  $U$ 의 매트릭스 요소는 각각

$$\begin{aligned} m_{ij} &= \int_0^l [\rho(x)A(x) + m\delta(x-l)] W_i(x) W_j(x) dx \\ \gamma_{ij} &= \int_0^l \gamma E(x)I(x) \frac{\partial^4 W_i(x)}{\partial x^4} W_j(x) dx \\ k_{ij} &= \int_0^l [E(x)I(x) \frac{\partial^4 W_i(x)}{\partial x^4} + K_s W_i(x) \delta(x-l)] W_j(x) dx \end{aligned} \quad (14)$$

$$u_i = \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-l_1)] w_i(x) dx$$

$$i, j = 1, 2, 3, \dots, N$$

로 주어진다. 식 23을 연속시간계의 상태방정식으로 표시하면

$$\dot{x}(t) = A^c x(t) + B^c M_p(t) \quad (145)$$

$$F_s(t) = C^c x(t)$$

단,

$$x(t) = \begin{bmatrix} F(t) \\ F'(t) \end{bmatrix}, \quad A^c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}\Gamma \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$B^c = [OM^{-1}U]^T, \quad C^c = K[u_1 \cdots u_n, 0 \cdots 0]$$

이러나 상태량  $x(t)$ 를

$$x(t) = [f_1(t) \dot{f}_1(t) \dots f_n(t) \dot{f}_n(t)]^T \quad (17)$$

로 변형하여 식 25를 다시 표시하면

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c M_p(t) \quad (18)$$

$$F_s(t) = C_c x(t)$$

가 된다. 여기서  $A_c$ ,  $B_c$ ,  $C_c$

는  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  요소를 변형한 것이다.

식 11을 샘플링주기 T로 이산화하면 상태방정식 및 출력방정식은

$$x(i+1) = Ax(i) + BM_p(i) \quad (19)$$

$$F_s(i) = Cx(i)$$

가 된다.

### 3. 제어기의 설계

퍼지제어기에 대해 각종 제어기의 응용에도 많이 발표 되었다. 발표된 제어기는 주로 오차와 오차의 미분에 의해 새로운 제어 입력을 구하는 방식(PD형)이 주로 연구되어 있으나, 본 논문에서는 오차와 오차의 미분에 의해 제어 입력의 변동분을 구하는 PI형 퍼지제어기를 구성하였다. 제어기의 기본 구조는 그림 2에 나타내었다. PD형 퍼지 제어기의 경우 응답시간은 빠르게 할 수 있으나 정상상태 오차를 줄이는 방법이 결여되어 스텝입력 응답시 어느정도 진동을 포함하고 있으므로 저주파 충격등에 대한 진동제어에는 사용하기가 곤란하다.

PI형 제어기는 내부의 적분 동작에 의해 성능의 저하가 발생한다. 따라서 PI제어기의 과도응답 특성을 개선하기란 시스템의 차수가 증가하면 할수록 무척 어려운 일이다. 이것은 일반적으로 PI제어기를 사용하지 않는 이유이다. 실제적으로 퍼지제어기는 위상평면하에서 동작한다. 즉 제어기의 출력은 입력의 증가분보다 다음 식과 같이 입력 자체에 의하여 영향을 받는다.

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u(k) \quad (20)$$

따라서 증가분을 최대도 선택하면 스텝응답에서의 도달시간응답은 만족하게 얻을 수 있으나 오버슈트는 피할 수 없는 결과이다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 여기서는 가속오차( $\ddot{e}$ )를 적당한 값으로 선택하여야만 한다. 그러나 가속오차의 측정은 그리 쉬운일이 아니므로 가속오차를  $\dot{e}(k)$ ,  $\dot{e}(k-1)$ 에 의하여 구한다. 그러나 이는 샘플링 시간과 전의 값을 모두 기억해야 하므로 퍼지제어기에 이용할 경우 룰의 수를 증가시키므로 직접 퍼지제어기의 구성에 이용하는 것은 곤란하다. 또한 제어 입력이 너무 커 입력의 한계를 벗어날 수 있으므로 제어 입력에 리셋항을 추가하여 아래 식과 같이 새로운 제어입력을 구하였다.

$$u(k+1) = (1-r(k))u(k) + \Delta u(k) \quad (21)$$

여기서 k는 샘플링 순서이고 r(k)는 리셋으로 0과 1사이의 값이 되므로 퍼지를 이용하여 값을 설정한다. 따라서 시스템에 입력될 제어입력 Mp는 다음과 같이 퍼지 방법에 의하여 구한다.

먼저  $\Delta u$ 항을 구하기 위하여

$$R_i : \text{if } e \text{ is } A_i \text{ AND } \dot{e} \text{ is } B_i, \text{ then } \Delta u \text{ is } C_i \quad (22)$$

을 사용하여 구하고 r을 구하기 위하여

$$R_j : \text{if } e \text{ is } A_j \text{ AND } \dot{e} \text{ is } B_j, \text{ then } r \text{ is } R_j \quad (23)$$

의 식을 이용한다. 따라서 제어입력은

$$M_p(k+1) = (1-r(k))M_p(k) + \Delta u \quad (24)$$

### 4. 모의 실험

실제적인 적용을 위하여  $\Delta u$ 대한 퍼지테이블은 다음과 같다.

e \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

그림 3.  $\Delta u$ 를 구하기 위한 퍼지룰 테이블

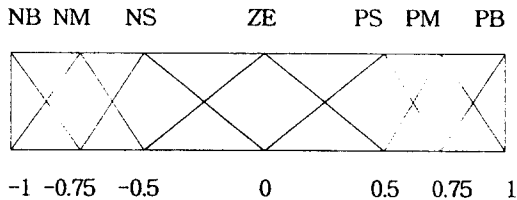


그림 3 오차에 대한 퍼지값

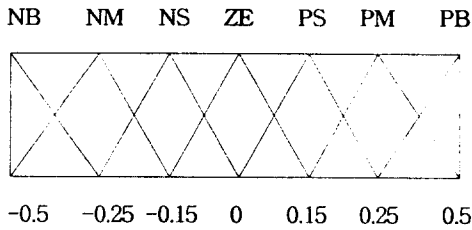


그림 4 오차율에 대한 퍼지값

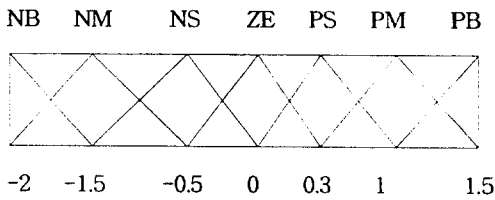


그림 5  $\Delta u$ 에 대한 퍼지값

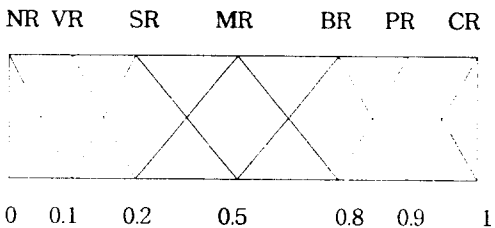


그림 6 r에 대한 퍼지값

e \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NR	SR	BR	CR	BR	SR	NR
NM	NR	NR	MR	PR	MR	NR	NR
NS	NR	NR	VR	BR	VR	NR	NR
ZE	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
PS	NR	NR	VR	BR	PR	NR	NR
PM	NR	NR	SR	PR	SR	NR	NR
PB	NR	VR	MR	CR	MR	VR	NR

그림 7. r에 대한 퍼지룰

그림 4은 모의실험결과로 그림에서 (a)는 스텝입력 후에 정지하는 경우의 예를 보인것이고 그림 (b)는 일정하게 요동하는 경우 결과이다.

모의 실험시에는 외부의 감쇄등의 영향을 고려하지 않았다.

### 5. 결론

압전 소자를 구동기로 사용한 선단 질량을 갖는 플렉시블암의 선단 변위 제어문제를 퍼지제어기를 이용하여 제어하였다. 기존의 퍼지제어기에 의한 오차와 오차율에 의하여 새로운 제어입력을 결정하는 방법이 아닌 PI제어기로 제어목적을 달성할 수 있음을 보였다

### 참고문헌

- 1) Cannon R. H., Jr. and Schmitz, Int. J. Robo Res. 3-3(1984) pp 62
- 2) Skaar, S. B. and Tucker, Trans. ASME. J Appl. Mech 53(1986)
- 3) Yuh J., J. Robot sys., 4(5) 1987 pp.621
- 4) 吉田, 機論 日本 機械學會 論文集 C編 54권 497호 1988 pp. 201
- 5) 田原, 長南 日本 機械學會 論文集 C編 54권 498호 1988 pp. 363
- 6) Over, J.C. and Van De Vegta J., IEEE J. Robot Auto., RA-3(5) 1987 pp.485
- 7) 福田, 下中, "人工指の 協の調制御に 關する 基礎的 研究" 日本 機械學會 論文集 C編 53권 485호

8) Z.W. Jiang, S.Chonan and J.Tani, Position Control of a Flexible Arm Using Pizeoelectric Bimorph Cells, Trans. ASME, Journal of DynamicSystem, Measurement, and Control, 113-2(1991), pp.327-329

9) S.Chonan, Z.W.Jiang and H.Sato, End-Point Control of a Minature Flexible Arm Driven by Piezoelectric Bimoehp Cells, The Proceedings of The First Japan-CIS Joint Seminar on Electromagnetomechanics in Structures, 1992, pp.38-41.

10) Jaechun Ryu, Chongkug Park "Force Control of a Flexible Robotic Finger With Piezoelectric Actuators using Fuzzy Algorithms" SICE '95 in SAPPORO 1995 pp. 1151 - 1156

11) 류재춘, 박중국 "퍼지이론을 이용한 마이크로 로봇 핑거의 힘제어" 한국퍼지 및 지능시스템학회 96년도 춘계학술대회논문집 제6권1호 1996.

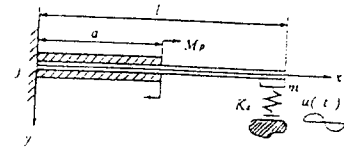
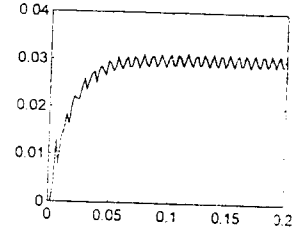


Fig. 1. Geometry of problem

정지 대상물을 일정 힘으로 유지



변동하는 힘을 가하는경우

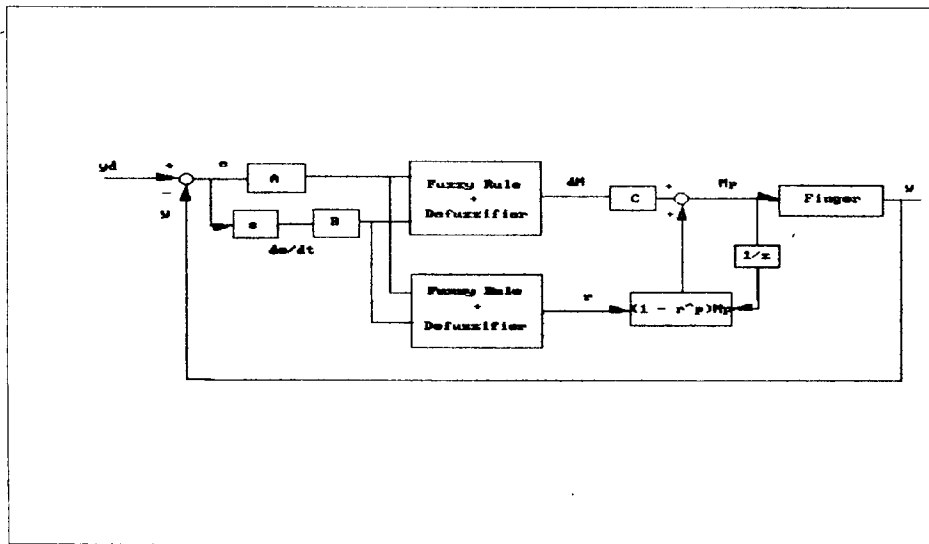
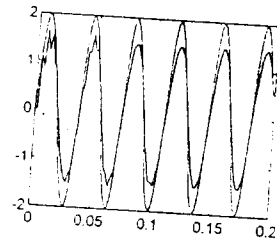


그림 2. 제안 시스템