

퍼지이론을 이용한 압전소자 플렉시블암의 위치제어

류 재 춘* 박 중 국**
안양전문대학 전자계산과 경희대학교 전자공학과

Position Control of Piezoelectric Flexible Arm Using Fuzzy Algorithms

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

A B S T R A C T

This paper describes the tip displacement of a flexible miniature arm controlled by the piezoelectric bimorph cells cemented on the surface of the 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. The voltage applied to the cells is controlled by a feedback signal composed of the tip displacement and the velocity. A theoretical solution is obtained by considering the cell-arm system as a stepped beam and applying the time-discrete method to the governing equations of the system. The results are in good agreement for a wide range of physical parameters involved.

1. 서론

최근, 현저하게 발전하고 있는 우주구조물이나 정보 관련기기는 경량화, 고속화와 더불어 높은 정밀도가 요구되고 있다. 그러나 이러한 구조물의 진동 제어는 종래의 방법은 불충분하고 새로운 제어기법의 도입이 요구되어지고 있다.

예를 들어, 주행체에 적재된 컴퓨터는 주행체의 진동에 의해 더욱 진동되며 내부의 기억매체인 자기디스크의 헤드에 영향을 주어 데이터의 기록 및 재생시 신뢰성을 저하시킨다.

따라서, 진동면이나 대상물의 변위에 추종하는 마이크로 로봇 암의 개발은 앞으로 정보기기 관련분야에 중요한 연구과제라 생각된다.

최근 플렉시블 암의 진동억제 제어가 주목적으로 많은 연구가 되어오고 있으나 주로 사용되는 구동기는 서보모터로 소형 로봇 암을 필요로 하는 경우 모터의 규모가 크므로 구동기로 사용하는 것은 불가능하다. 이 때문에 압전세라믹을 이용한 소형구동기의 개발이 적극적으로 추진되고 있다. 압전 소자를 구동기로 사용한 플렉시블암의 진동제어문제에 대해서는 Baz-Poh Takahas Umeda가 암의 진동억제법을 이론적으로 해석하였고 암의 위치제어 문제에 압전소자를 도입한 연구는 Chonan, Jiang, Tani 등이 종래의 PD제어 방법으로 제어기를 구성하여 제어하였으나 이는 위

치제어시 각 이득이 정확하게 조정되어야 하는 문제가 있다(1,2). 본 연구에서는 이러한 문제를 보다 능동적으로 해결하기 위하여 퍼지이론을 적용하여 설계한 제어기가 서로 다른 작업을 하거나, 미지의 환경에 대응할 수 있도록 하였다.

2. 이론 해석

그림 1은 압전소자를 상하면에 부착시킨 플렉시블 암을 표시한 것이다. 압전소자를 구동기로 사용하여 암전단의 변위를 제어한다. 아래의 해석에서는 암의 밀도를 ρ_b 단면적을 A_b , 종탄성계수를 E_b , 단면 2차 모멘트를 I_b , 압전소자의 밀도를 ρ_p , 단면적은 A_p , 종탄성계수를 E_p , 판의 내부 감쇄계수를 γ , 소자가 암에 가하는 모멘트를 M_p 로 한다. 판이 xy평면에서만 진동한다고 가정하면, 압전 구동기를 가진 플렉시블 암의 진동방정식은 아래와 같다.

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

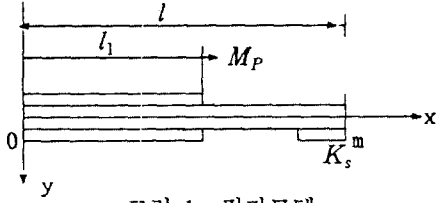


그림 1. 빙거모델

식(1)을 해석하기 위해 우선 계의 자유진동응답을 구한다. $M_p = 0$ 으로 한 해를

$$y(x, t) = W_n(x)f_n(t) \quad (2)$$

로 놓으면 식(1)은

$$\begin{aligned} & [\rho(x) A(x) + m \delta(x-l)] \frac{d^2 f}{dt^2} \\ & + \frac{d^2}{dx^2} [E(x)I(x) (1 + \gamma \frac{d}{dt}) \frac{d^2 y}{dx^2}] \\ & + K_s y(x, t) \delta(x-l) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

가 된다.

이를 각 모드별로 전개하면 다음과 같다.

$$[(\rho A)^i + m \delta(x-l)] w^i \frac{d^2 f}{dt^2} + \quad (4)$$

$$(EI)^i \frac{d^4 w^i}{dx^4} (f + \gamma \frac{df}{dt}) = 0$$

$i=1,2$

또 식 4는 다음과 같이 변형된다.

$$\frac{d^4 w^i}{dx^4} - (\xi^i)^4 w^i - \bar{m} (\xi^i)^4 w^i \delta(x-l) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + k^2 \gamma \frac{df}{dt} + k^2 f = 0 \quad (6)$$

$$(\xi^i)^4 = k^2 \frac{(\rho A)^i}{(EI)^i} \quad (7)$$

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

식(5)의 일반해는

$$\begin{aligned} W(x) &= A^i S(\xi^i x) + B^i T(\xi^i x) + C^i U(\xi^i x) \\ &+ D^i V(\xi^i x) \\ &+ \bar{m} l \xi^i w^i(l) V[\xi^i(x-l)] H(x-l) \end{aligned} \quad (8)$$

$i=I, II$

각 절점에서의 경계조건을 식(8)를 대입하여 얻은 식의 계수행렬식을 0으로 놓으면 진동방정식이 얻어진다. 따라서 진동방정식의 근 ε^i 를 구하고 $A^i - D^i$ 를 함수로 표시하면 암의 모드함수 w 가 결정된다. 식(14)

의 경계조건에 의해 구한 압전소자를 부착한 빙의 모드함수식 (8)을 이용해서 식(1)의 해를

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^N W_n(x) f_n(t) \quad (9)$$

정규함수의 직교성에 따라 다음과 같은 일반진동방정식으로 된다.

$$\frac{d^2 f_n}{dt^2} + k\gamma \frac{df_n}{dt} + k^2 f_n = Q_n(t) \quad (10)$$

여기서

$$Q_n(t) = \left[\frac{dw_n(l)}{dx} - \frac{dw_n(l_1)}{dx} \right] M_p / \psi_n \quad (11)$$

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

$$M_p = G_p [u(t) - y_L(t)] + G_v [\dot{u}(t) - \dot{y}_L(t)] \quad (12)$$

로 된다. 이상의 결과를 매트릭스 표현법으로 바꾸면

$$M\dot{F}(t) + \Gamma F(t) + KF(t) = UM_p(t) \quad (13)$$

가 된다. 여기서

$$F(t) = [f_1(t), f_2(t) \cdots f_N(t)] \quad (14)$$

이다

위식을 연속시간계의 상태방정식으로 표시하면

$$\dot{x}(t) = A'_c x(t) + B'_c M_p(t)$$

$$F_s(t) = C'_c x(t) \quad (15)$$

단,

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

$$B'_c = [OM^{-1}U]^T, \quad C'_c = K_s [w_1 \cdots w_n, 0 \cdots 0]$$

(16)

이다. 상태량 $x(t)$ 를

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

로 변형하여 식 15를 다시 표시하면

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

(18)

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

가 된다. 여기서 A_c , B_c , C_c 는

A_c , B_c , C_c 요소를 변형한 것이다.

식 18을 샘플링주기 T 로 이산화하면 상태방정식 및 출력 방정식은

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

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

가 된다. 여기서

$$A = \exp(A_c T).$$

$$B = \int_0^T \exp[A_c r] dr B_c, \quad C = C_c \quad (20)$$

이다. 압 선단의 힘이 일정치로 되면 압전소자의 발생하는 왜곡 모멘트를 제어한다.

이제, 압전구동기로 구동하는 플렉시블암의 변위 추종을 위한 제어를 설계한다.

3 퍼지 제어기설계

이제 오차와 오차의 미분값에 의한 퍼지제어를 설계한다. 제어기의 구조는 그림 2에 나타내었다. 제어기 구성의 기본적인 원리는 다음과 같다. 제어기는 기본적으로 PD형의 제어기를 이용하여 제어한다. 이때 제어기에 입력되는 각 이득(P, D 이득)은 정의되어있지 않으므로 임의의 값을 사용한다. 제어기의 이득값이 입력되고 주어진 목적 궤적이 주어지면 제어기가 동작하여 식 12에 의하여 모멘트가 계산되고 플랜트에는 이모멘트값이 입력되어 y_L 이 출력된다. 이를 목적궤적과 비교하여 e [$u(t) - y_L(t)$] 와 \dot{e} [$\dot{u}(t) - \dot{y}_L(t)$]를 구하고 이를 이용하여 ΔK_p (증가치)를 룰베이스를 이용하여 계산한다.

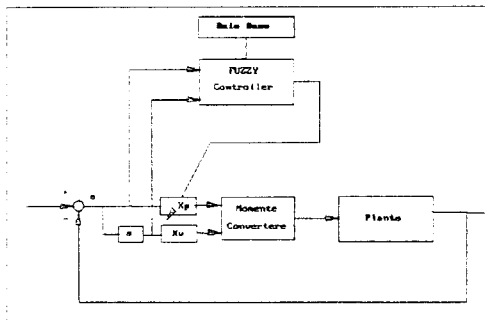


그림 2. 제안된 제어기

ΔK_p 에 대한 퍼지 테이블은 다음과 같다.

표 1. Δu 를 구하기 위한 퍼지룰 테이블

e \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	NP
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

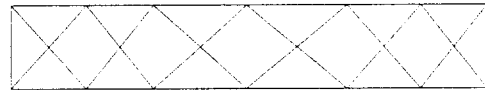
그러면 K_p 는 다음과 같이 구한다.

$$K_p(i+1) = K_p (1 + \Delta K_p(i)) \quad (21)$$

표 2. 빔의 파라메타

	Beam	Piezo Cell
Length(mm)	51.9	33.3
Width(mm)	12.2	12.2
Thickness(mm)	0.3	0.65
Density(Kg/m ³)	8670	8300
Young's module(GPa)	102.5	58.03
Damping (s)	4.05 X 10 ⁻⁵	
Mass of sensor(g)	5.05	
Stiffness(N/m)	2110	

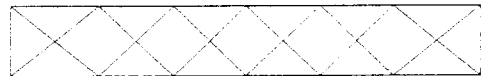
NB NM NS ZE PS PM PB



-1 -0.75 -0.5 0 0.5 0.75 1

그림 3 오차에 대한 퍼지값

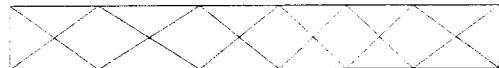
NB NM NS ZE PS PM PB



-0.5 -0.25 -0.15 0 0.15 0.25 0.5

그림 4 오차율에 대한 퍼지값

NB NM NS ZE PS PM PB



-2 -1.5 -0.5 0 0.3 1 1.5

그림 5 ΔK_p 에 대한 퍼지값

4. 모의 실험

그림 6(a)(b)(c)는 모의실험결과로 그림에서 (a)는 스텝입력후에 정지하는 경우의 예를 보인것이고 그림 (b)는 일정하게 요동하는 위치제어를 그리고 (c)는 요동과 저주파 충격을 합한 경우의 결과이다. 요동면의 진동수는 $f_u=1.7\text{Hz}$, 진폭 $A_u=0.215\text{mm}$ 의 정현파를 진동할 때의 압전구동기로 구동제어된 압전단의 변위 추종 특성을 표시하였다. 모의실험에서 측정된 그림의 압의 1차 고유진동수는 2.97Hz 이다. 그림 6(a)은 위치 제한만을 한 경우의 압전단의 변위 의 변화이다.

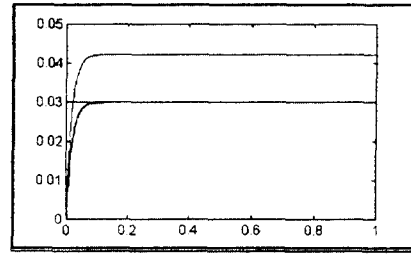
위치 제한이들을 $f_{gp}=1(G_p=179.85)$, 샘플링주기는 $T=5\text{ms}$ 이다. 모의 실험시에는 외부의 감쇄등의 영향을 고려하지 않았다. 그림에서 위치 제한제어 (P 제어)만으로는 압전소자로 압의 변위추종제어는 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

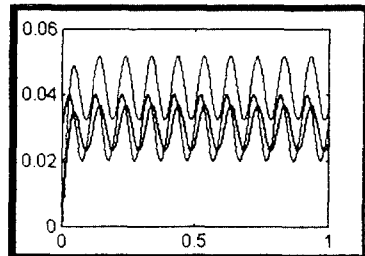
압전 소자를 구동기로 사용한 선단 질량을 갖는 플렉시블암의 선단 변위 제어문제를 퍼지제어기를 이용하여 제어하였다. 기존의 퍼지제어기에 의한 오차와 오차율에 의하여 새로운 제어입력을 결정하는 방법이 아닌 PD제어기의 각 이득을 퍼지제어기로 동정하여 정확한 제어이득을 찾을 필요없이 제어목적을 달성할 수 있음을 보였다.

참고문헌

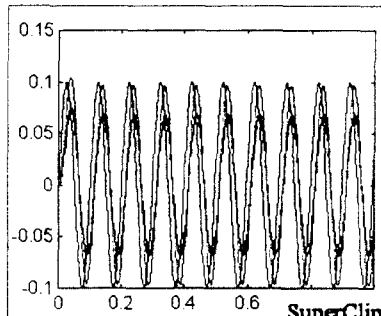
1. Z.W. Jiang, S.Chonan and J.Tani, Position Control of a Flexible Arm Using Piezoelectric Bimorph Cells, Trans. ASME, Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, 113-2(1991), pp.327-329
2. S.Chonan, Z.W.Jiang and H.Sato, End-Point Control of a Miniature Flexible Arm Driven by Piezoelectric Bimorph Cells, The Proceedings of The First Japan-CIS Joint Seminar on Electromagnetomechanics in Structures, 1992, pp.38-41.
3. 菅野道夫, "あいまい集合と 論理の 制御への 應用" 計測と 制御 Vol.18, No.2, pp.150-160, 1979
4. Jianxin Xu, H.Hashimoto, F.Harashima "Fuzzy Control of Rule Based Dynamic System " 26th SICE Annual Conference ,pp.1237-1240, 1987.9
5. F.Hashimoto, Jianxin Xu, "Stability and Controllability of Fuzzy Control System with Energetic Function", 9th SICE Symposium on Dynamical System Theory, 1986.12, pp.261-264
6. Jaechun Ryu, Chongkug Park "Force Control of a Flexible Robotic Finger With Piezoelectric



(a)



(b)



(c)

그림 6. 모의실험 결과