

퍼지논리에 의한 XY 테이블의 위치제어기 설계

염형선, 신기상, 신두진, 허옥열
인하대학교 전기공학과

Design of Position Controller for XY table using Fuzzy Logic

Hyung Sun Yum, Ki Sang Shin, Doo Jin Shin, Uk Youl Huh
Department of Electrical Engineering, INHA University

Abstract - One significant error in XY table is due to friction and disturbance. However, the characteristics of this friction is not easy to predict and analyze because of its nonlinearity. Therefore, it is difficult for conventional controller to compensate it effectively. In order to solve this problem, this paper presents a position controller based on fuzzy logic controller(FLC) that is suitable for system with unknown and unmodelled dynamics. The performance of the proposed controller are demonstrated by simulation results.

1. 서 론

현대 산업분야에서 CNC 공작기계, 다관절 로봇, 와이어 컷트 방전 가공기, 플로터, XY 테이블 등과 같은 다축 위치 제어시스템은 정밀한 가공 및 고속 동작을 위해 고성능의 제어기가 요구된다. 그러나 이러한 기계적인 시스템은 외란, 마찰력, 백래쉬, 사구간, 가/감속, 운전, 비틀림 등을 포함하고 있어 이를 고려하지 않을 경우 정상상태 오차나 진동등과 같은 현상이 나타난다. 이를 해결하기 위해서는 위와 같은 비선형성을 적절히 고려하여 보상해 주어야 한다.

비선형적인 특성에 의한 오차발생 요인 가운데 하나는 서보 제어시스템이 저속으로 구동될 때 나타나는 정적마찰력인데, 이는 속도가 영에 근접시 각 축의 움직임을 방해하여 이로 인한 추적오차를 발생시킨다. 예를 들어 원 궤적을 추적할 때 모서리 부분마다 과도상태가 존재하는 것은 이에 기인한다.

기준궤적을 추적할 때 나타나는 마찰력의 여러 모델이 제안되었고 보상 방법들도 연구되었다. 현 상태의 입력과 오차를 기억해서 다음 상태에서의 마찰력의 영향을 예상 및 보상하는 반복제어(Repetitive Control) 기법 [1], 적절한 마찰력 모델을 선정한 후 이를 추정하여 이용하는 적응 제어기법 [2], 비선형 제어기 설계 [3] 등이 대표적이다.

기존의 보상 방법은 정확한 마찰력의 모델을 필요로 한다. 그러나 정확한 모델을 얻기 어려우므로 보상을 하는데 한계가 있다. 본 논문에서는 XY 테이블의 궤적 추적시 발생하는 저속에서의 마찰력 및 외란을 보상하기 위해 퍼지논리에 의한 위치제어기를 제안한다. 퍼지제어는 지식의 논리적, 구조적 표현을 명확히 할 수 있으며 퍼지추론등의 퍼지연산을 통하여 퍼지정보처리를 할 수 있고, 정확한 수학적 모델링을 필요로 하지 않는다. 제안한 서보제어기는 모의실험을 통하여 비선형적인 특성에 강인함을 가지며 외부 외란에 대해서도 견실함을 보

여준다.

2. 제어기 설계

2.1 다축 위치 제어시스템

그림 1은 XY 테이블의 위치 및 속도 제어기와 모터를 포함한 전체 시스템의 블록선도이다. 각 축의 위치 지령값이 입력으로 들어가고 모터의 엔코더 펄스에 의해 위치 및 속도가 계산되어 되먹임된다. 또한 마찰력 및 외란의 영향을 고려하였다.

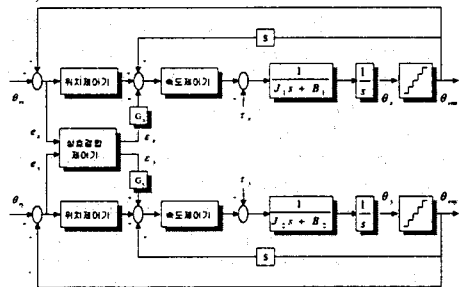


그림 1. 다축 위치 제어시스템

시스템의 제어기로는 비례제어에 의한 각 축의 위치제어기, 비례-적분제어에 의한 속도제어기, 그리고 두 축의 궤적을 정확히 이동시키기 위하여 윤곽오차를 계산하고 그에 상응하는 보상입력을 가하는 상호결합제어기(Cross-Coupled Controller)로 구성되어 있다 [4].

앞에서 설명한 여러 비선형적인 특성의 영향으로 각 축의 위치를 제어할 때 비례제어로는 효과적으로 이를 보상할 수 없기 때문에 기존의 비례제어 대신 퍼지논리에 의한 위치제어기를 설계한다. 그림 2는 제안하는 서보 제어시스템의 구조이다. 퍼지제어기는 각 축의 위치제어기이며, 플랜트는 속도제어기, 모터, XY 테이블 등을 포함한다.

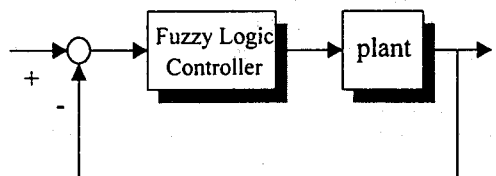


그림 2. 제안하는 퍼지 제어시스템

2.2 퍼지제어기의 설계

퍼지제어기는 입력을 퍼지공간으로 이동시키는 퍼지화부(Fuzzification), IF(전건부)-THEN(후건부) 형태의 언어적 제어 규칙으로 구성되어 퍼지집합에 대한 정보를 포함하는 룰 베이스부(Rule Bases), 룰 베이스에 따라 입력에 상응하는 출력을 계산하는 추론부(Inference Engine), 퍼지출력을 크리스프한 값으로 변환하는 비퍼지화부(Defuzzification)로 나눌 수 있다 [5]. 그림 3은 퍼지제어기의 구조이며 x 는 제어기 입력, y 는 제어기 출력을 나타낸다.

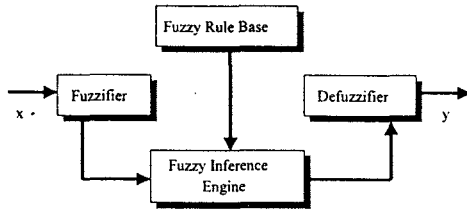


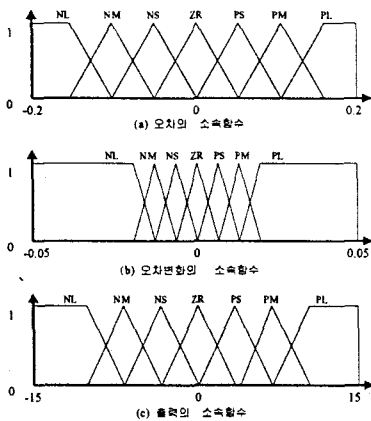
그림 3. 퍼지제어기의 구조

퍼지제어기의 전건부는 기준위치와 출력의 차이인 각 축의 오차 및 오차 변화이고 식 (1), (2)와 같다.

$$e(k) = r(k) - y(k-1) \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

퍼지제어에서 이러한 변수들은 소속함수로 표현되는데 각각 7개씩 설정하였고 삼각형 형태와 마름모 형태를 혼합해서 사용하였다. 그림 4는 각 변수들의 소속함수이다.



NL : Negative Large, NM : Negative Medium

NS : Negative Small, ZR : Zero, PS : Positive Small

PM : Positive Medium, PL : Positive Large

그림 4. 각 변수의 소속함수

오차는 기준위치와 실제위치의 차이이므로 오차가 양 (+)이면 기준입력이 큰 상태이고 음 (-)이면 실제출력이 큰 상태이다. 오차변화는 출력 기울기 부호의 역으로 양 (+)이면 출력이 하강하는 것이고 음 (-)이면 출력이 상승하는 것이다. 퍼지제어규칙은 오차가 크면 제어기 출력은 이를 보상하기 위해 그 크기가 커야하고 오차가 양

(+)일 때 오차변화가 양 (+)이면 출력의 방향을 바꾸기 위해서 그 크기가 커야하며 음 (-)일 때 역시 마찬가지로이다. 제어규칙은 (3)과 같이 표현되며 A_i , B_j 는 전건부의 소속함수, C_{ij} 는 후건부의 소속함수이다. 표 1은 전체 퍼지제어규칙을 도표화한 것이다.

$$\text{If } E = A_i \text{ and } \Delta E = B_j, \text{ then } U = C_{ij} \quad (3)$$

$$i, j = 1, \dots, 7$$

Control Action	ΔE						
	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL
NM	NL	NL	NM	NM	NS	NS	NS
NS	NL	NM	NM	NS	NS	NS	ZR
ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR
PS	ZR	PS	PS	PS	PM	PM	PL
PM	PS	PS	PS	PM	PM	PL	PL
PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL

표 1. 퍼지제어규칙

위 퍼지제어규칙에 의한 출력의 추론 방법은 Mamdani의 maximum-minimum 연산을 사용하였고 식 (4), (5)와 같이 표현된다.

$$\mu_C(u_k) = \max_{i,j} [\min(w_{ij}, \mu_{C_{ij}}(u_k))] \quad (4)$$

$$w_{ij} = \min(\mu_{A_i}(e_k), \mu_{B_j}(\Delta e_k)) \quad (5)$$

추론된 퍼지값을 비퍼지화 시켜서 제어 조작량으로 바꾸는 방법에는 여러 가지가 있다. 본 논문에서는 합성된 퍼지집합의 무게중심을 구하여 그에 상응하는 제어 조작량으로 사용하는 무게중심법을 사용하였다.

3. 모의실험 및 결과

XY 테이블과 같은 위치 결정시스템에서 존재하는 여러 비선형성중 마찰력은 축의 이동방향, 부하변화, 기계적인 결합등 많은 요소의 영향을 받기 때문에 적절한 모델을 설정해서 고려해야 한다. 그림 5는 모의실험에서 고려한 마찰력 모델이다.

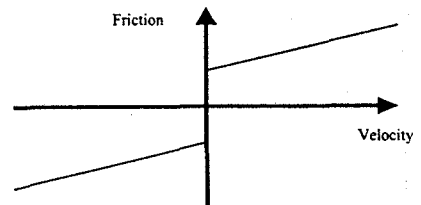


그림 5. 마찰력 모델

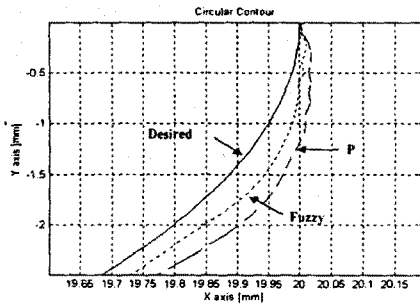
위 모델은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$F = F_v \dot{x} + F_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (6)$$

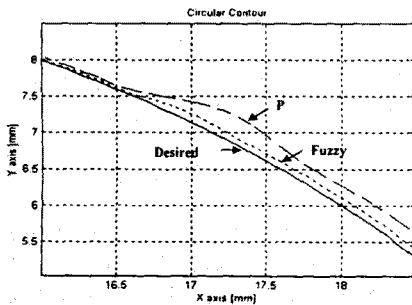
여기서, F_v 는 점성(viscous) 마찰력 상수, F_c 는 Coulomb 마찰력상수이고 sgn 함수는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

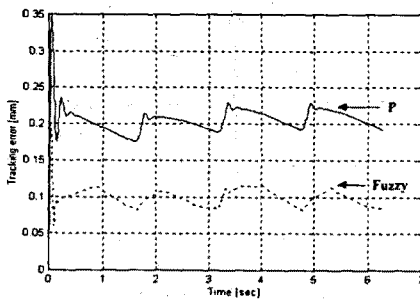
제안한 위치제어기의 성능을 평가하기 위해 모의실험을 통하여 비례제어기와 성능을 비교한다. 기준계적으로는 반경 10mm인 원 궤적을 사용하였고 그림 6은 모의실험 결과이다. 그림 6(a)는 각 축의 이동방향 변경 시점인 모서리 부분이며 퍼지제어를 사용할 때 좋은 추적성능을 보여주고 있다. 그림 6(b)는 직류 외란을 인가했을 때 두 제어기의 성능을 비교한 것으로 비례제어에 비해서 외란의 영향을 덜 받는다. 그림 6(c), (d)는 각각 추적오차와 윤곽오차를 나타낸 것으로 네 번의 과도상태가 나타나며 이는 원을 추적할 때 나타나는 오차의 주된 요소이다. 퍼지제어 사용시 오차가 감소됨을 알 수 있다. 표 2는 두 제어기의 추적오차와 윤곽오차의 평균값을 비교한 것이다.



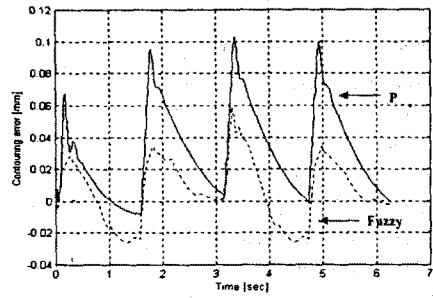
(a) 모서리 부분



(b) 외란인가시



(c) 추적오차



(d) 윤곽오차

그림 6. 모의실험결과

제어기 \ 오차	추적오차[mm]	윤곽오차[mm]
비례제어	0.206	0.032
퍼지제어	0.099	0.017
비교	48.05%	53.13%

표 2. 오차의 평균값 비교

4. 결 론

본 논문에서는 XY 테이블의 궤적 추적이 발생하는 마찰력 및 외란을 보상하기 위하여 비례제어 대신 퍼지제어에 의한 위치제어기를 설계하였다. 모의실험을 통하여 비례제어와 퍼지제어의 결과를 비교함으로써 궤적정밀도의 향상과 이로 인한 추적오차 및 윤곽오차의 감소를 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- (1) M. Tomizuka, "Low Velocity Friction Compensation and Feedforward Solution Based on Repetitive Control", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 115, pp. 279-284, June, 1993.
- (2) C. Canudas, P. Noel, A. Aubin, and B. Brogliato, "Adaptive Friction Compensation in robot manipulators : Low Velocities", *Int. J. Robotics Res.*, Vol. 10, pp. 189-199, June, 1991.
- (3) T. Kubo, G. Anwar, and M. Tomizuka, "Application of Nonlinear Friction Compensation to Robot Arm", *Proceedings of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 722-727, San Francisco, CA., 1986.
- (4) Y. Koren, "Cross-Coupled Biaxial Computer Controls for Manufacturing Systems", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, No. 4, pp. 265-272, 1980.
- (5) C. C. Lee, "Fuzzy logic in control system : fuzzy logic controller, part I and II", *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern.*, Vol. 20, No. 2, pp. 140-148, 1990.