

## 퍼지논리를 이용한 마찰력 보상에 관한 연구

조용대, 양상식  
아주대학교 제어계측공학과

## Friction Compensation Scheme using a Fuzzy Logic

Y.D. Cho and S. S. Yang  
Department of Control and Instrumentation Engineering  
AJOU University

**Abstract** ~ In this paper, a friction compensation scheme using a fuzzy logic is presented. For the precision positioning and tracking control, the proper friction compensation is essential. Friction compensation schemes based on velocity and controlling input or desired velocity, have limitations because the compensation values are fixed. In this paper, a fuzzy friction compensation scheme adjusts the compensation value depending on the velocity and the position error. The proposed fuzzy friction compensator is implemented in a linear positioning system. The performance is illustrated by simulations and experiments.

### 1. 서론

제품의 정밀기능을 위해서는 가공기기의 성능을 향상시킴과 동시에 제어기의 성능이 제고되어야 하며, 이를 위해서는 기기의 위치결정 정밀도와 더불어 추종성능도 함께 개선되어야 한다. 그러나 기계시스템의 운동부에서 발생하는 마찰력으로 인하여 이러한 정밀기기의 작동시 위치오차를 발생한다.

마찰력의 해석 및 모델링을 위하여 많은 연구들이 진행되어 왔다. Armstrong 등은 마찰력의 정역학 모델을 제안하였으며,[1][2] Canudas 등은 마찰력의 동역학모델을 제안하였다.[3] 마찰력은 운동의 방향, 속도, 위치, 부하의 변동에 의해 영향을 받으며 시변요소를 포함하고 있다.[1] 정밀위치제어 시스템에서 고정된 모델에 근거하여 마찰력 보상량을 결정하면 시변요소를 포함하는 마찰력을 충분히 보상하지 못하므로 위치오차가 발생한다. 마찰력을 추정하여 보상량을 결정하면 좋은 성능을 기대할 수는 있지만 추정과정의 계산량때문에 실시간제어에는 어려움이 따른다. 계산량을 줄이기 위하여 정지마찰력과 풀통 마찰력 모델에 근거하여 속도와 제어신호의 부호로 마찰력 보상량을 결정하는 연구가 진행되었다.[4] 그러나 이러한 방법에서는 속도의 크기와 시변요소가 고려되지 않기 때문에 오차가 발생할 수 있다.

이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 마찰력을 추정하지 않고 속

도와 위치오차로부터 적절한 마찰력 보상량을 결정하여 정상상태 오차뿐만 아니라 추종성능을 향상시키는 퍼지보상기를 제안한다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 퍼지마찰력 보상기의 성능을 확인한다.

### 2. 전체 위치제어시스템의 구성

일반적으로 위치제어 시스템에는 P 제어, 혹은 PD 제어를 사용한다. 선형요소만으로만 구성된 시스템에서 P, PD 제어만으로도 정상상태 오차를 제거할 수 있다. 그러나 실제의 기계 시스템에는 마찰력이 존재하므로 P, PD제어만 행하면 정상상태오차가 발생한다. 정상상태오차를 없애기 위하여 PID 제어를 행하면 reset windup 현상이 발생해서 위치제어시에는 만족스러운 성능을 기대하기 어렵다. 따라서 PD 제어가 출력값과 적절한 마찰력 보상량을 더하여 제어 한다. 그럼 1온 전체 위치제어 시스템의 블록도이다. 여기서,  $K_t$  는 토크상수,  $L$  은 전기자 인덕턴스,  $R$  은 전기자 저항,  $J$  는 모터 관성모멘트,  $B$  는 점성마찰계수,  $K_b$  는 역기전력,  $P$  는 스크류 피치이다.

### 3. 퍼지 마찰력 보상기

퍼지제어기는 복잡한 형태를 갖는 제어대상 시스템에 대해 수학

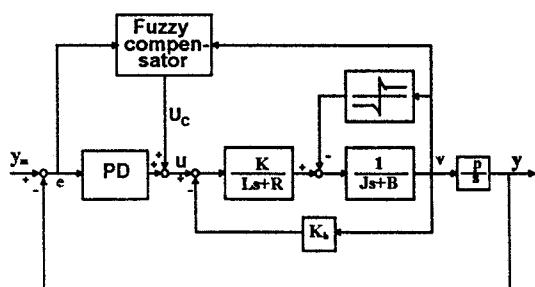


그림 1. 전체 위치제어 시스템의 블록도

적 모델링이 필요없고 비선형 시스템에 적용시 효과적이다.[5] 또한 전문가의 경험적 지식으로 제어규칙을 언어적 형식으로 적절히 표현함으로써 간단히 제어규칙을 설정할 수 있는 장점이 있다. 퍼지제어기는 제어대상의 파라미터 변경과 외란에도강인한 특성을 보여 시간과 위치, 속도등에 대하여 연속적으로 변화하는 마찰력을 보상하는데 적합하다. 일반적으로 퍼지제어기는 입력변수를 퍼지화하고 제어규칙에 의한 추론과정을 거쳐 비퍼지화를 통하여 제어신호를 계산한다. 그림 2는 퍼지 마찰력 보상기의 구조를 나타낸다. 입력 변수로는 속도와 위치오차를 사용한다. 속도에 대한 비선형성을 고려하기 위하여 속도를 입력변수로 선정한다. 위치오차는 위치 정밀도의 지표이므로 입력변수로 사용한다. 본 연구에서는 각 입력 변수에 대하여 5 가지 소속집합을 정한다. 따라서 25 가지의 추론 규칙을 갖는다.

일반적으로 마찰력은 속도의 함수로 모델링한다.[1] 그림 3은 위치제어시스템에서의 마찰력 모델을 나타낸 것이다. 속도가 0에서 정지마찰력,  $f_s$ 가 가장 크고 일정속도 이상에서는 쿠лон마찰력,  $f_c$ 만 나타난다. 그리고 저속부근에서는 속도가 증가함에 따라 마찰력의 크기가 작아지는 Stribeck 효과는 지수함수로 나타낸다. 그림 3에서  $f_s^+$ 와  $f_s^-$ 는 각각 속도가 (+)방향일때 정지마찰력과 쿠лон마찰력,  $f_c^+$ 와  $f_c^-$ 는 각각 속도가 (-)방향일때 정지마찰력과 쿠лон마찰력이다. 이러한 마찰력의 특성을 고려하여 속도소속함수를 설정한다.

그림 4는 속도, 위치오차, 마찰력 보상량의 소속함수를 나타낸 것이다. 소속함수를 나타내는 기호에서 P와 N은 각각 부호 (+), (-)를 나타내고, M과 L은 각각 "medium"과 "large"를 의미하며 ZE는 "zero"를 뜻한다. 그림 4 (a)에서 속도가 ZE인 부근을 작게 설정한 이유는 정지마찰력이 속도가 아주 작은 부근에서 나타나기 때문이다. 마찬가지로 Stribeck효과가 나타나는 저속 부근을 PM, NM으로 설정하고 일정속도 이상은 PL, NL로 설정한다. 위치 정밀도를 높이기 위하여 오차에 대한 소속함수는 ZE부근을 좀 더 설정할 필요

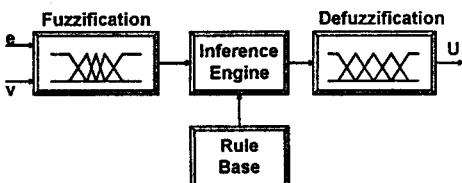


그림 2. 퍼지 마찰력 보상기의 구조

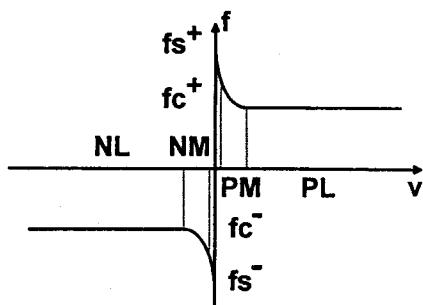


그림 3. 마찰력 모델

가 있다. 마찰력 보상량의 소속함수는 모터의 동특성 실험을 통하여 얻은 정지마찰력과 쿠лон마찰력을 바탕으로  $f_s^+$ ,  $f_s^-$ ,  $f_c^+$ ,  $f_c^-$ 를 각각 NL, NM, PM, PL의 중심값으로 한다.

추론규칙은 속도에 대한 마찰력 모델을 바탕으로 위치오차의 양을 참조하여 정한다. 표 1은 퍼지추론 규칙을 나타낸 것이다. 속도가 ZE의 경우에는 정지마찰력만이 존재하므로 보상량을 크게 한다. Stribeck효과가 나타나는 저속의 속도영역 NM과 PM에서는 위치오차가 크면 큰 양을, 오차가 작으면 작은 양을 보상한다. 일정속도 이상이 되면 쿠лон마찰력만 작용하므로 작은 양만 보상하도록 한다. 속도와 오차의 부호가 반대가 될 경우, 속도가 클 때에는 오차발생을 줄일 수 있도록 보상을 하지 않는다. 저속의 경우에는 속도의 부호를 참조하여 작은 양을 보상한다.

마찰력 보상 규칙은 다음과 같다.

$$R_{ij} : \text{IF } (v \text{ is } A_i) \text{ AND } (e \text{ is } B_j) \text{ THEN } U \text{ is } C_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, 5 \quad (1)$$

여기서  $v$ 는 속도값,  $A_i$ 는 속도의 언어변수,  $e$ 는 위치 오차값,  $B_j$ 는 위치오차의 언어변수,  $U$ 는 마찰력 보상량,  $C_{ij}$ 는 보상량의 언어변수를 나타낸다. 두개의 입력 변수, 속도,  $v$ 와 위치오차,  $e$ 에 대하여 소속함수가 겹치는 부분이 존재하므로 매번, 최대 4 개의 제어규칙이 적용된다. 속도,  $v$ 가  $A_i$ 이고, 위치오차,  $e$ 가  $B_j$ 일때 출력  $C_{ij}$ 에 대한 귀속도는

$$w_{ij} = \min(\mu_{A_i}(v), \mu_{B_j}(e)) \quad (2)$$

표 1. 마찰력 보상량 퍼지추론 규칙

$v \setminus e$	NL	NM	ZE	PM	PL
NL	NM	NM	NM	NM	ZE
NM	NL	NM	NM	NM	NM
ZE	NL	NL	ZE	PL	PL
PM	PM	PM	PM	PM	PL
PL	ZE	PM	PM	PM	PM

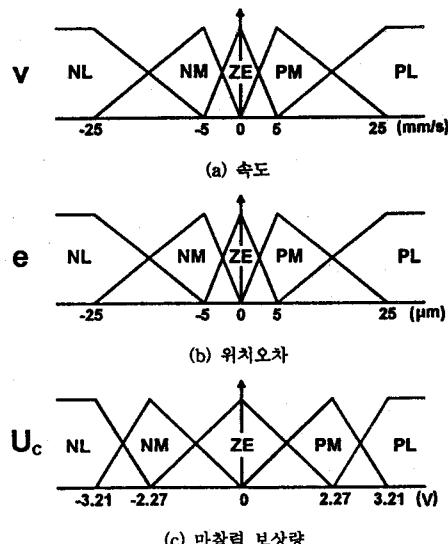


그림 4. 소속함수

이다. 퍼지추론을 거쳐도 출력,  $U$ 는 퍼지값이므로 비퍼지화를 통하여 물리적인 출력값을 결정한다. 본 연구에서는 무게중심법을 사용한다. 출력값,  $U_C$ 는

$$U_C = \frac{\sum_{I=1}^n w_I \cdot C_I}{\sum_{I=1}^n w_I} \quad (n \leq 4) \quad (3)$$

이다.[5] 여기서  $n$ 은 매 계산에서 적용되는 추론규칙의 수이다.

#### 4. 시뮬레이션

제어대상은 볼 스크류 타입 직류모터로 제원은 표 2와 같다. 시뮬레이션은 C 언어로 프로그래밍하였고 sampling time은 1ms이다. PD 제어기의 P 이득은 0.076 V/ $\mu$ m, D이득은 0.038 Vs/ $\mu$ m으로 설정한다. 마찰력의 모델은 그림 3의 모델로 블루마찰력을 정지마찰력의 60%로 한다. 그림 5는 위치, 속도, 가속도가 각각 25 mm, 25 mm/s, 250 mm/s<sup>2</sup>인 위치지령에 대한 위치오차의 시뮬레이션 결과이다. 마찰력 보상을 하지 않으면 초기의 정지마찰력 때문에 응답지연이 나타나고 정상상태 오차가 남아있는 것을 볼 수 있다. 속도의 부호와 제어신호의 부호를 이용한 비선형 마찰력 보상기[4]를 사용한 경우, 정상상태 오차는 줄일 수 있지만 등속구간에서 추종성능이 만족스럽지 못하다. 반면 퍼지 마찰력 보상기를 사용한 경우는 정상상태 오차뿐만 아니라 추종성능이 함께 개선되는 것을 볼 수 있다.

#### 5. 실험결과

그림 6은 위치오차에 대한 실험결과이다. 그림 6으로부터 실험결과가 시뮬레이션 결과와 근사하는 것을 알 수 있다. 위치오차의 진동현상은 속도재환을 하지 않고, 또한 제어기 이득을 동조시키지 않았기때문에 발생한다. 비선형 마찰력보상기와 퍼지마찰력보상기 모두 정상상태오차는 거의 없지만 등속구간에서의 추종성능은 퍼지마찰력보상기가 우수함을 볼 수 있다.

#### 6. 결론

본 논문에서는 마찰력에 의한 위치오차를 줄이고 추종성능을 개선하기 위하여 속도와 위치오차를 이용한 퍼지 마찰력 보상기를 제

표 2. 모터 변수

변수명	단위	값
전기자 저항 (R)	Ω	3.7
인덕턴스 (L)	H	$0.9 \times 10^{-3}$
토크 상수(K)	Nm/A	$52.9 \times 10^{-3}$
역기전력 상수(Kb)	V/rpm	$6.6 \times 10^{-3}$
관성모멘트(J)	$\text{kgm}^2$	$2.205 \times 10^{-6}$
점성마찰계수(B)	Nm/rpm	$3.528 \times 10^{-6}$
정지마찰 토크	Nm	$40.36 \times 10^{-3}$

안하였다. 시뮬레이션과 실험결과로부터, 제안된 마찰력 보상기가 위치오차의 감소 및 추종성능 개선에 효과적임을 확인하였다. 보상량의 소속집합의 수를 증가시키고 추론규칙을 개선하면 가감속구간의 진동현상을 감소시킬 수 있다고 생각된다.

#### 7. 참고 문헌

- [1] B. Armstrong, Control of Machines with Friction, Kluwer Academy Publishers, 1991, pp.7-42.
- [2] B. Armstrong and P. Dupont, "Friction Modelling for Control," Proc. of the American Control Conference, pp. 1905-1909, June. 1993.
- [3] C. Canudas, H. Olson, K. J. Åström, and P. Lischinsky, "Dynamic Friction Models and Control Design," Proc. of the American Control Conference, pp. 1920-1926, June. 1993
- [4] S. Yang, "A Stable Friction Compensation Scheme for Motion Control Systems," KSME, Vol. 6, pp. 95-100, 1992.
- [5] S. Jee, Y. Koren, "Friction Compensation in Feed Drive Systems Using An Adaptive Fuzzy Logic Control," ASME DSC. Vol. 55-2, pp. 885-893, 1994.

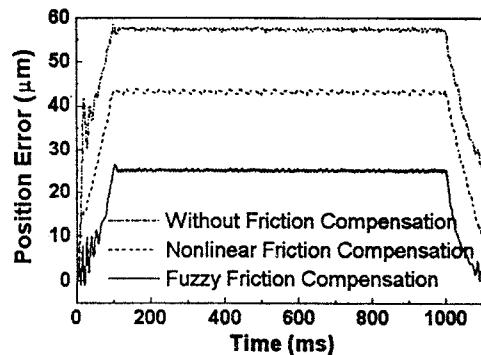


그림 5. 시뮬레이션 결과

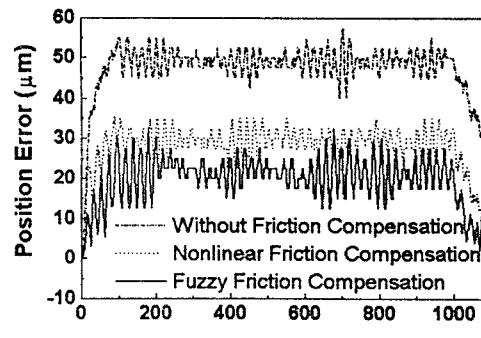


그림 6. 실험 결과