

모터 제어 정밀도 향상을 위한 정지 마찰력 보상

Static Friction Compensation for Enhancing Motor Control Precision

류 정 래, 도 태 용*
(Jung Rae Ryoo¹ and Tae-Yong Doh^{2*})

¹Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

²Department of Electronics and Control Engineering, Hanbat National University

Abstract: DC motor is a representative electric motor commonly utilized in various motion control fields. However, DC motor-based motion control systems suffer from degradation of position precision due to nonlinear static friction. In order to enhance control precision, friction model-based compensators have been introduced in previous researches, where friction models are identified and counter inputs are added to control inputs for cancelling out the identified friction forces. In this paper, a static friction compensator is proposed without use of a friction model. The proposed compensation algorithm utilizes internal state manipulation to generate compensation pulses, and related parameters are easily tuned experimentally. The proposed friction compensator is applied to a DC motor-based motion control system, and results are presented in comparison with those without a friction compensator.

Keywords: motion control, static friction, internal state manipulation, DC motor

I. 서론

모션 제어 시스템(motion control system)은 로봇 및 각종 기계 장치에 장착된 모터의 동작을 제어하여 시스템의 안정성과 제어 정밀도를 확보하여야 한다. 위치 정밀도는 모션 제어 시스템의 성능을 평가하는 대표적인 항목인데, 기계 시스템의 구동에서 발생하는 마찰력은 제어 성능을 저해하는 주요 외란으로 작용한다. 특히 정지 마찰력(static friction)은 DC 모터를 사용한 모션 제어 시스템에서 정상 상태 위치 정밀도를 악화시키는 가장 주된 마찰력 성분이다.

정지 마찰력은 물체가 정지한 상태에서 이동하기 직전에 나타난다. 쿨롱 마찰력(coulomb friction)이나 점성 마찰력(viscous friction)과 달리 정지 상태에서 큰 값을 가지고, 회전하기 시작하면 사라지는 특성을 가진다[1-3]. 특히, 위치 정밀도를 판단하는 정상 상태에서는 모터가 거의 회전하지 않기 때문에 정지 마찰력의 영향이 가장 심하게 나타난다. 이러한 비선형 특성으로 인하여 DC 모터 제어에 일반적으로 사용되는 PID 제어기 등의 선형 제어 방식으로는 위치 제어 정밀도의 확보에 한계가 있다.

마찰력으로 인한 제어 정밀도 저하를 개선하기 위하여 다양한 마찰력 보상 알고리즘이 연구되었는데, 마찰력의 수학적 모델을 기반으로 마찰력을 추정하고, 그 결과를 제어 입력에 보상하여 상쇄시키는 방식이 대표적이다[1,2]. 이를 위하여 마찰력의 다양한 수학적 모델에 대한 연구가 진행되었고[1-4], 마찰력 보상을 위해서는 해당 시스템에 존재하는 마찰력의 모델 동정(friction model identification)을 실행하여 보상

하거나[5-7] 적응적 방식의 마찰력 보상(adaptive friction compensation) 알고리즘을 적용하기도 한다[8,9]. 하지만 마찰력은 온도 및 습도, 기구의 상태 등 매우 다양한 환경 요인에 의하여 영향을 받기 때문에 모델 기반의 마찰력 보상 알고리즘의 적용에는 한계가 있다. 한편, 마찰력 모델을 사용하지 않는 보상 방식으로는 임펄스 제어(impulsive control), 진동 제어(dither control), 그리고 외란 관측기(disturbance observer) 등의 방식이 소개되었다[1,2,10].

본 논문에서는 DC 모터의 위치 정밀도 향상을 위한 정지 마찰력 보상 알고리즘을 제안한다. 제안하는 정지 마찰력 보상은 정지 마찰력의 영향이 가장 심한 위치 레귤레이션 제어(regulation control)의 세틀링(settling) 구간에서 적용되 정지 마찰력에 대한 수학적 모델은 사용하지 않는다. 본 논문에서는 정지 마찰력 보상 펄스를 생성하여 적용하는데, 이를 위하여 디지털 저역 통과 필터의 내부 상태 변수 조작(internal state manipulation)을 적용한다[11-13]. 이 방식은 기존 연구에서 뱅뱅 제어(bang-bang control)의 킥 펄스를 생성하거나 초기값 보상(initial value compensation)에 적용하는 방식으로 디지털 제어 시스템에서 손쉽게 구현할 수 있는 장점이 있다. 제안된 정지 마찰력 보상은 실제 모션 제어 시스템에 적용하여 그 타당성을 입증한다.

II. DC 모터 제어 시스템에서 정지 마찰력의 영향

1. 제어 시스템 소개 및 제어 목표 설정

그림 1에는 본 논문의 대상 기구부를 나타내었다. DC 모터의 회전은 감속기와 타이밍 벨트를 통하여 부하(load)의 수직 방향 직선 운동으로 변환되는데, 부하의 타이밍 벨트 반대편에는 부하와 질량이 같은 평형추(balancing mass)를 장착하여 중력의 영향을 기구적으로 보상한다. 감속기에 직결된 광학식 엔코더로 회전 각도를 측정하고, 이를 부하의 수직 위치로 환산한다. 엔코더 신호는 4체배로 처리하며, 최종적으로 부하의 수직위치 해상도는 약 0.039mm이다. 주요 구성 요소

* Corresponding Author

Manuscript received October 22, 2013 / revised December 6, 2013 / accepted December 10, 2013

류정래: 서울과학기술대학교 전기정보공학과(jryoo@seoultech.ac.kr)

도태용: 한밭대학교 전자제어공학과(dolerite@hanbat.ac.kr)

※ 이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부)지원으로 수행되었음.

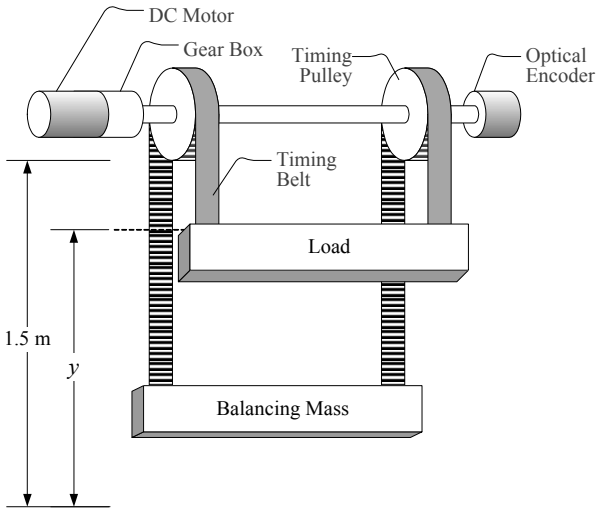


그림 1. DC 모터 구동 기구부.
Fig. 1. Mechanism driven by a DC motor.

표 1. 구성 요소 세부 사양.

Table 1. Component specifications.

DC Motor		Optical Encoder	
Rated Voltage	24V	Resolution	400 pulses/rev
Gear Ratio	19:1	Count Mode	X4
Max. Speed	271 RPM	Pos. Resolution	0.039 mm
Pulley Diameter	20 mm	Load	about 6 kg

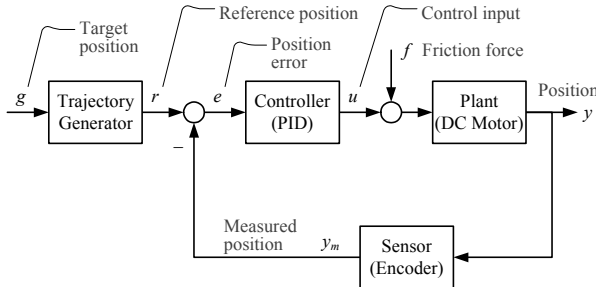


그림 2. DC 모터 제어 시스템.
Fig. 2. DC motor control system.

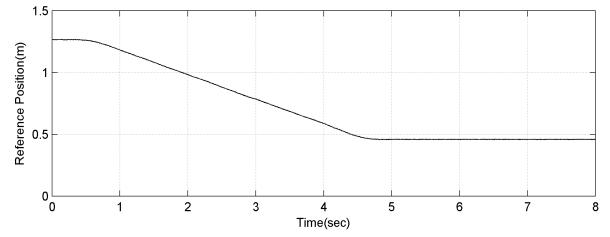
의 세부 사양은 표 1에 요약하였다.

그림 2에는 부하를 목표 위치(target position)로 이동하기 위한 제어 시스템의 구조를 나타내었다. 최대 이동 거리와 부하의 질량을 고려하여 목표 위치로의 위치 궤적을 기준 위치(reference position)에 적용한다. 본 논문에서는 목표 위치로 이동 중의 추종 오차는 중요하지 않으며, 정상상태에서 $\pm 0.1\text{mm}$ 이내의 위치 오차를 제어 목표로 한다. 제어기는 다음과 같은 디지털 PID 제어기를 사용하였다. 여기서 T_s 는 샘플링 주기를 의미한다.

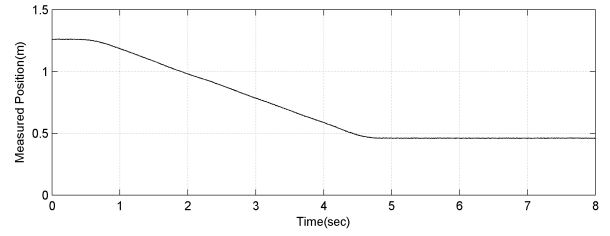
$$u[k] = K_p e[k] + K_D \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} + K_I \sum_{n=0}^k e[n] T_s \quad (1)$$

2. 정지 마찰력 및 제어 정밀도 한계

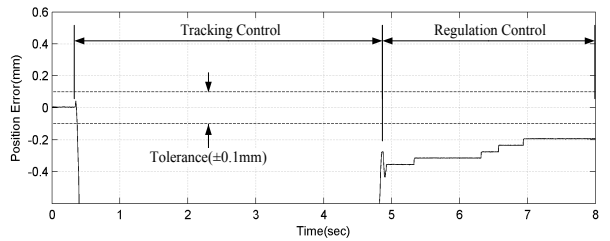
정지 마찰력은 모터의 회전 속도가 낮거나 정지 상태에서 나타나고 일단 회전하면 사라지는 마찰력 성분이다. 점성 마



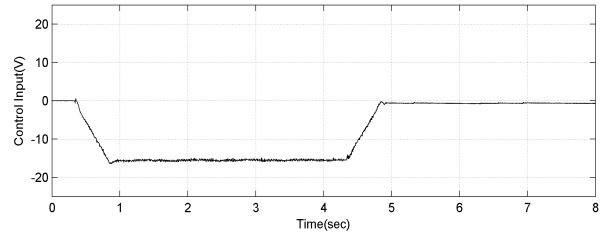
(a) Reference position(r).



(b) Measured position(y_m).



(c) Position error(e).



(d) Control input(u).

그림 3. 낮은 제어 이득에 의한 정상상태 허용오차 초과.

Fig. 3. Excess of steady-state error due to low control gain.

찰력은 회전 속도에 비례한 크기를 가지는 선형 특성을 가지는 반면 정지 마찰력은 비선형적인 특성을 가진다. 이러한 비선형 특성으로 인하여 PID 제어와 같은 선형 제어를 이용하여 그 영향을 최소화하는 것에는 한계가 있다. 그림 3과 4에는 그림 2의 제어 시스템에서 정지 마찰력으로 인한 성능 한계를 실험 결과로 예시하였으며, 두 실험에 적용된 PID 이득은 각각 (2)와 (3)에 제시하였다.

$$K_p = 4.0, K_D = 0.1, K_I = 2.0 \quad (2)$$

$$K_p = 6.0, K_D = 0.15, K_I = 3.0 \quad (3)$$

0.8m의 거리를 위치 궤적을 따라 이동하고 정상상태에서의 위치 오차를 확인해 보면 제어 이득이 낮은 경우에는 그림 3의 결과처럼 정상상태 위치오차가 허용 오차 범위를 벗어남을 확인할 수 있다. 반면, 정상상태 오차를 줄이기 위하여 제어 이득을 증가시키면 그림 4의 결과와 같이 발진하는 현상이 나타나는데, 이는 정지 마찰력의 비선형 특성에 의한 리미트 사이클(limit cycle) 현상이다.

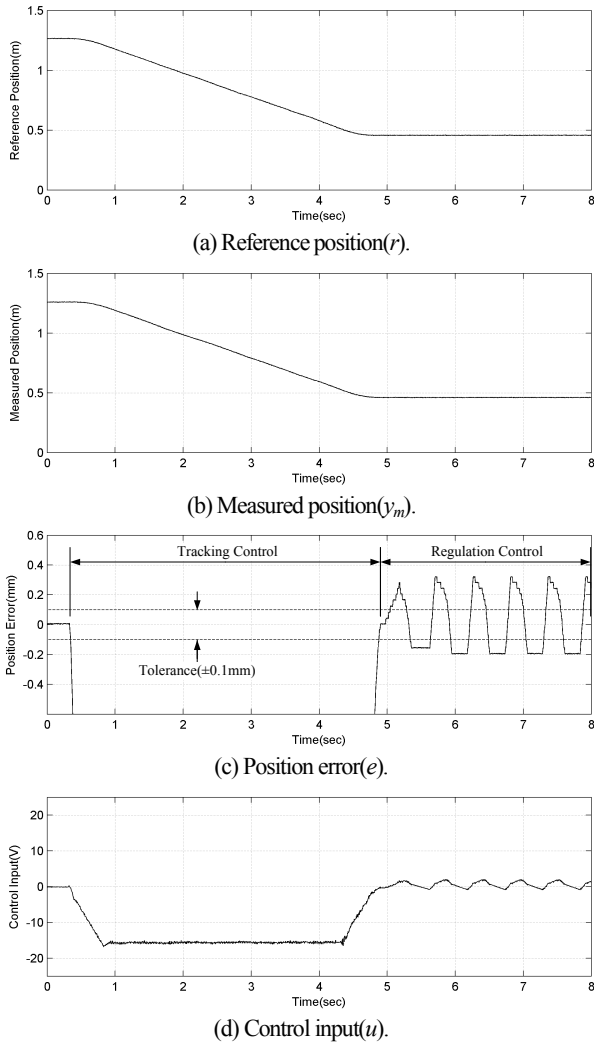


그림 4. 과도한 제어 이득에 의한 발진.
Fig. 4. Oscillation due to excessive control gain.

일반적으로 정상상태에서의 오차를 줄이기 위해서는 루프 이득을 증가시키기 위하여 제어기의 이득을 증가시킨다. 하지만, 비선형성의 정지 마찰력이 존재하는 상황에서의 높은 제어 이득은 리미트 사이클에 의한 발진을 유발할 수 있으므로 제어기 이득의 증가에는 한계가 있다. 본 논문에서는 PID 제어기 외에 add-on 형태의 정지 마찰력 보상기를 장착하여 정상상태에서의 오차를 줄이는 제어 구조를 제안한다.

III. 정지 마찰력 보상기

1. 내부 상태 변수 조작에 의한 정지 마찰력 보상기

본 논문에서는 정상상태 위치 정밀도를 향상시키기 위한 정지 마찰력 보상기를 제안한다. 정지 마찰력은 정지 상태 또는 매우 저속에서만 나타나는 비선형 마찰력이다. 일단 움직이기 시작하면 정지 마찰력은 무시할 수 있는 수준으로 줄어들기 때문에 본 논문에서는 펄스 형태의 보상 신호를 생성하여 적용한다.

그림 5에는 기존의 PID 제어기에 add-on 형식으로 장착된 정지 마찰력 보상기와 그 내부 구조를 나타내었다. 여기서 PID 제어기는 시스템의 안정성을 확보하도록 설정한 것을

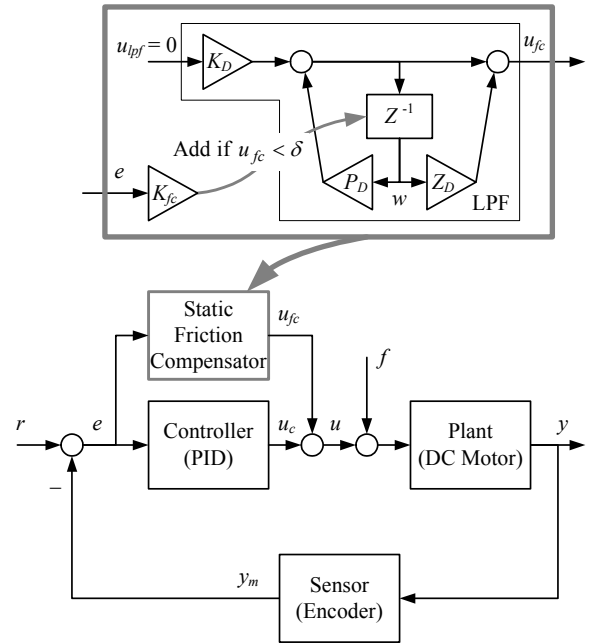


그림 5. 정지 마찰력 보상기를 포함한 DC 모터 제어 시스템.
Fig. 5. DC motor control system with a static friction compensator.

가정한다. 그림 5의 정지 마찰력 보상기는 목표 위치 근처에서 세틀링 구간 동안에 동작하여 정상상태 위치 정밀도를 향상시킨다.

그림 5에 나타낸 정지 마찰력 보상기의 내부 구조를 보면 디지털 저역 통과 필터(low-pass filter)를 사용하되 디지털 필터의 입력 $u_{lpf} = 0$ 으로 고정시키고 디지털 필터의 메모리 공간에 저장된 내부 상태 변수 w 를 직접 조작한다[11-13]. 사용된 저역 통과 필터의 입력이 0이므로 출력은 내부 상태 변수의 초기값에 의하여 발생하는데, 저역 통과 필터의 특성 상 지수적으로 감쇄(exponentially decaying)하는 값으로 나타난다. 그림 5의 정지 마찰력 보상기 내부에 사용된 디지털 저역 통과 필터의 입출력 관계는 다음과 같다[14].

$$U_{fc}(z^{-1}) = K_D \frac{1 - Z_D z^{-1}}{1 - P_D z^{-1}} U_{lpf}(z^{-1}) + \frac{P_D - Z_D}{1 - P_D z^{-1}} w[0] \quad (4)$$

여기서 $U_{fc}(z^{-1})$ 와 $U_{lpf}(z^{-1})$ 는 각각 $u_{fc}[k]$ 와 $u_{lpf}[k]$ 의 Z-변환이고, $w[0]$ 는 저역 통과 필터의 내부 상태 변수 $w[k]$ 의 초기값이다. 또한, P_D 와 Z_D 는 각각 디지털 필터의 극점(pole)과 영점(zero)인데, 안정한 디지털 저역 통과 필터에서는 $0 < P_D < 1$ 이고, $Z_D = -1$ 이다. 여기서 저역 통과 필터의 입력력을 $u_{lpf} = 0$ 로 설정하였으므로 저역 통과 필터의 출력은 다음과 같이 초기값에 의하여 결정된다.

$$U_{fc}(z^{-1}) = \frac{1 + P_D}{1 - P_D z^{-1}} w[0] \quad (5)$$

(5)를 이산시간영역으로 되돌리면 다음과 같이 지수적으로 감소하는 신호가 출력된다.

$$u_{fc}[k] = (1 + P_D) P_D^k w[0] \quad (6)$$

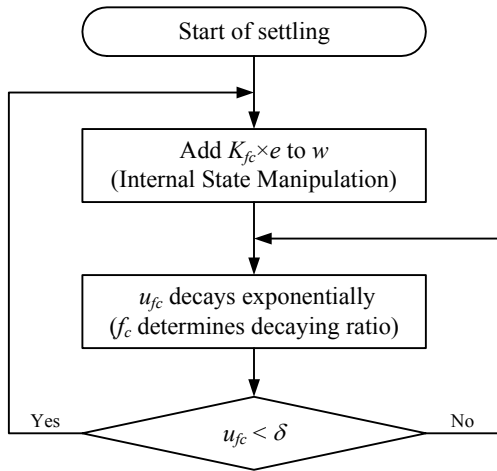


그림 6. 제안하는 정지 마찰력 보상 알고리즘의 흐름도.
Fig. 6. Flowchart of the proposed static friction compensator.

샘플링 주기가 T_s 인 디지털 필터에서 극점-영점 대응법 (matched pole-zero mapping method) 관점에서 봤을 때 (6)에서 $P_D = e^{-2\pi f_c T_s}$ 의 의미를 가지므로 그림 5의 디지털 저역 통과 필터에서는 메모리 공간에 저장된 내부 상태 변수의 초기 조건 $w[0]$ 에 의한 지수적으로 감쇄하는 출력이 발생하며, 감쇄율은 차단 주파수 f_c 에 의하여 결정된다. 감쇄율은 펄스의 폭과 직접 관련되므로 대상 플랜트의 정지 마찰력 특성에 따라 튜닝하여 적용할 수 있다.

2. 정지 마찰력 보상기 적용 및 파라미터 튜닝

본 논문에서 제안하는 그림 5의 정지 마찰력 보상기 구조는 저역 통과 필터와 같지만 디지털 필터의 내부 상태 변수의 초기값을 조작하는 차이가 있다. 그림 6에는 제안하는 정지 마찰력 보상기 알고리즘을 흐름도로 나타내었다.

- 목표 위치 근처의 세틀링 구간에서 동작한다. 여기서 세틀링 구간은 기준 위치 궤적이 목표 위치와 같게 되어 레귤레이션 제어로 변경된 직후를 의미한다.
- 목표 위치와 현재 위치의 위치 오차 e 에 보상 이득 K_{fc} 를 적용하여 내부 상태 변수 w 에 더한다.
- 보상 펄스는 디지털 저역 필터의 차단 주파수에 의하여 결정된 감쇄율에 따라 지수적으로 감소한다.
- 정지 마찰력 보상기의 출력이 $|u_{fc}| < \delta$ 을 만족하고, 잔존 위치 오차가 $e \neq 0$ 인 경우 위 과정을 반복한다.

제안한 정지 마찰력 보상기의 적용을 위해서는 앞에서 언급한 보상 이득 K_{fc} 와 δ , 그리고 차단 주파수 f_c 의 튜닝이 필요하다. 그림 7에는 정지 마찰력 보상 펄스에 나타나는 각 파라미터의 영향을 나타내었으며, 각 파라미터의 특성을 설명하면 다음과 같다.

- K_{fc} : 정지 마찰력 보상 펄스의 크기를 결정.
- δ : 정지 마찰력 보상 펄스 간격 및 DC 오프셋을 결정.
- f_c : 정지 마찰력 보상 펄스의 감쇄율을 결정하여 펄스 폭에 영향 반영.

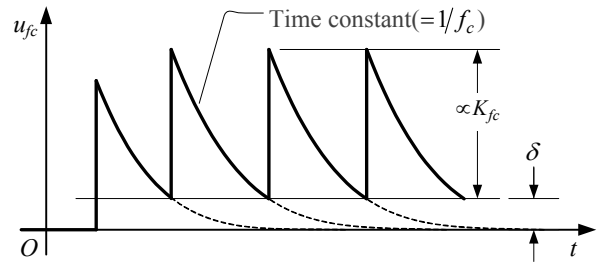


그림 7. 정지 마찰력 보상기 파라미터의 영향.
Fig. 7. Effects of the static friction compensator parameters.

위 3개의 파라미터를 다음의 기준에 맞추어 튜닝하면 보상 펄스의 크기, 폭, 펄스간 간격, 그리고 DC 오프셋 등을 조절할 수 있다.

- 보상 펄스 간격이 너무 큰 경우: δ 증가, f_c 감소.
- 보상 펄스에 대하여 오차가 감소하지 않는 경우: K_{fc} 증가, δ 증가, f_c 감소.
- 오차의 극성 반전이 빈번한 경우: K_{fc} 감소, f_c 증가.
- 허용 오차 이내에서도 보상 펄스의 크기가 과도한 경우: K_{fc} 감소, f_c 감소.

IV. 실험 및 결과

1. 실험 환경

그림 8에는 32 bit MCU 기반 디지털 제어 시스템의 구조를 나타내었다. 광학식 엔코더의 신호를 카운트하여 현재 위치를 측정하고, 이를 바탕으로 연산된 제어 입력은 PWM 파형으로 모터 드라이버에 인가되어 DC 모터를 구동한다. 전체 제어 루프의 샘플링 주파수는 대상 플랜트의 동특성과 MCU의 연산 능력을 고려하여 200Hz로 설정하였다. PID 제어기와 정지 마찰력 보상기 등은 모두 MCU의 펌웨어(firmware)로 구현되었다. 실험에 적용된 PID 이득은 그림 3의 결과에 해당하는 (2)를 사용하였으며, 제안한 정지마찰력 보상기의 파라미터는 다음과 같이 설정하였다.

$$K_{fc} = 6.0, \delta = 0.1, f_c = 5.0\text{Hz} \quad (7)$$

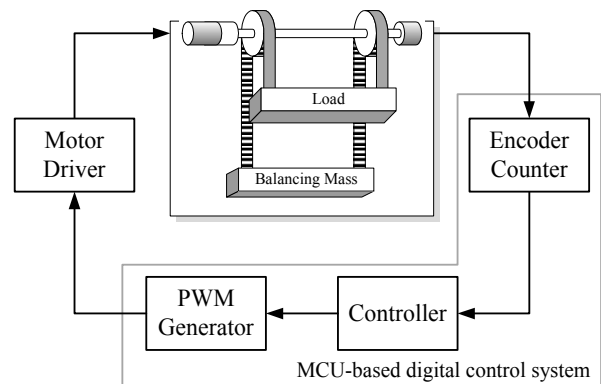


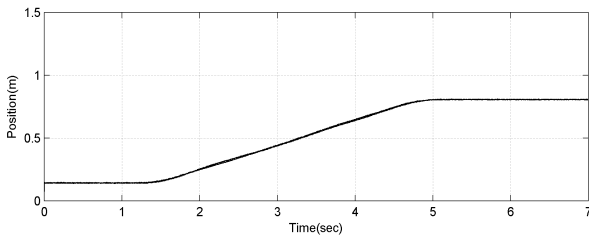
그림 8. MCU 기반 디지털 제어 시스템의 구성도.
Fig. 8. Schematic diagram of the MCU-based digital control system.

2. 실험 결과

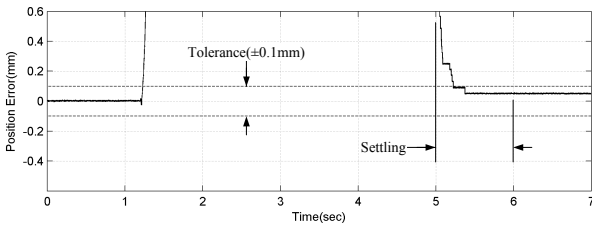
그림 9와 10에는 각각 상향과 하향 이동에 대하여 제안된 정지 마찰력 보상기를 적용한 실험 결과를 나타내었다. 주요 신호들은 모니터링용 DAC에서 아날로그 신호로 출력한 후 오실로스코프로 측정된 관계로 노이즈가 다소 포함되었다. 그림 9(a)와 10(a)에는 기준 위치와 측정 위치를 중첩하여 나타내었는데, 측정 위치가 기준 위치와 거의 일치하여 오차가 확인되지 않는다. 위치 오차를 확대하면 그림 9(b)와 10(b)에서 확인할 수 있는데, 초기 위치에서 목표 위치로 위치 궤적을 추종하는 구간에서는 다소 오차가 발생하지만 정상상태에서의 위치 오차는 허용 오차인 $\pm 0.1\text{mm}$ 보다 작아짐을 확인할 수 있다. 정지 마찰력 보상기를 적용하지 않은 그림 3의 경우보다 훨씬

빠르게 허용 오차 이내로 감소함을 확인할 수 있다.

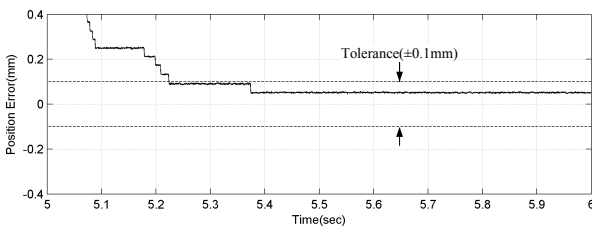
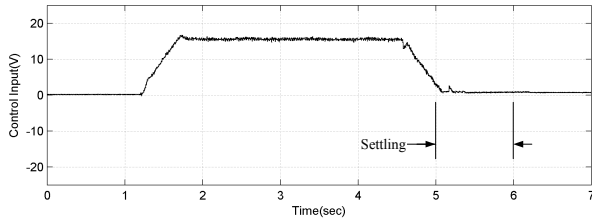
본 논문에서 제안한 정지 마찰력 보상기의 동작을 확인하기 위해서 세틀링 구간에서의 위치 오차와 제어 입력을 확대하여 그림 9(c)와 10(c)에 나타내었다. 그림 9(c)의 위치 오차 과정에서 보면 5.1초 시점에서의 오차는 허용오차보다 크지만 제어 입력 과정에서 화살표로 표시된 시점에 인가되는 정지 마찰력 보상 입력이 발생함에 따라 미세한 거리를 이동하여 5.2초 지점에는 허용오차 이내로 수렴함을 확인할 수 있다. 그림 10(c)에서는 그림 9(c)의 경우보다 오차가 천천히 줄어들지만 PID 제어기의 누적 제어 입력과 반복적인 정지 마찰력 보상 펄스에 의하여 허용오차 이내로 감소하는 결과를 확인할 수 있다.



(a) Reference position(r , solid) and measured position(y_m , dashed).

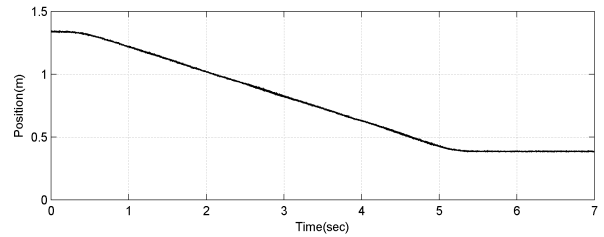


(b) Position error(e) and control input(u).

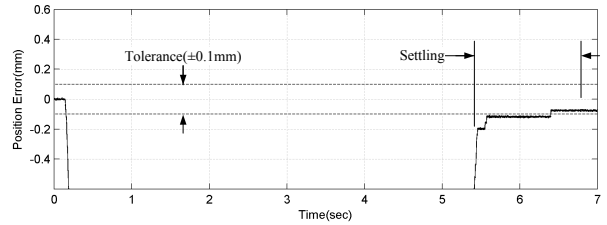


(c) Position error(e) and control input(u) in settling region.

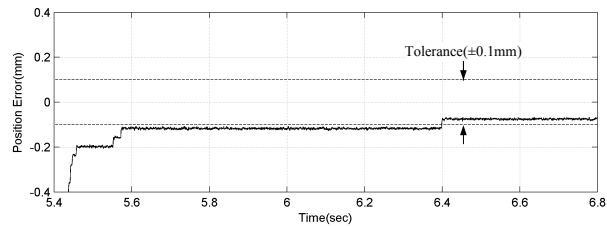
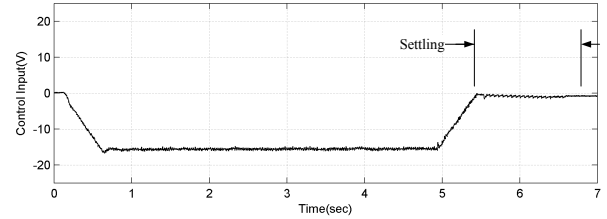
그림 9. 정지 마찰력 보상기를 적용한 0.6m 상향 이동 실험.
Fig. 9. Experimental result of 0.6m upward movement with the static friction compensator.



(a) Reference position(r , solid) and measured position(y_m , dashed).



(b) Position error(e) and control input(u).



(c) Position error(e) and control input(u) in settling region.

그림 10. 정지 마찰력 보상기를 적용한 1m 하향 이동 실험.
Fig. 10. Experimental result of 1m downward movement with the static friction compensator.

V. 결론

본 논문에서는 DC 모터를 사용한 제어 시스템에서 정지 마찰력을 보상하여 위치 제어 정밀도를 향상하기 위한 정지 마찰력 보상기를 제안하였다. 마찰력 모델 동정 후 이를 상쇄하는 입력을 추가하는 기존 방식과 달리 본 논문에서 제안한 방식에서는 마찰력 모델을 사용하지 않고, 정지 마찰력의 특성을 반영하여 펄스 형태의 보상 신호를 적용하였다.

정지 마찰력 보상 펄스의 생성 방법으로는 디지털 필터의 내부 상태 변수를 위치 오차에 비례하게 설정하는 방식을 적용하였으며, 디지털 필터의 차단 주파수를 튜닝함으로써 보상 펄스의 폭을 손쉽게 조절할 수 있다. 비교적 단순한 방식이지만 정상 상태의 위치 정밀도를 향상할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

REFERENCES

[1] H. Olsson, K. J. Åström, C. Canudas de Wit, M. Gäfvert, and P. Lischinsky, "Friction models and friction compensation," *European Journal of Control*, vol. 4, no. 3, pp. 176-195, Dec. 1998.

[2] B. Armstrong-Hélouvy, P. Dupont, and C. Canudas De Wit, "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction," *Automatica*, vol. 30, no. 7, pp. 1083-1138, Jul. 1994.

[3] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K. J. Åström, and P. Lischinsky, "A new model for control of systems with friction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, no. 3, pp. 419-425, Mar. 1995.

[4] V. Lampaert, J. Swevers, and F. Albender, "Experimental comparison of different friction models for accurate low-velocity tracking," *Proc. of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Lisbon, Portugal, Jul. 2005.

[5] S.-H. Lee and J.-B. Song, "Friction force compensation for actuators of a parallel manipulator using gravitational force," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 11, no. 7, pp. 609-614, Jul. 2005.

[6] Z. Jamaludin, H. V. Brussel, and J. Swevers, "Friction compensation of an XY feed table using friction-model-based feedforward and an inverse-model-based disturbance observer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 3848-3853, Oct. 2009.

[7] H. S. Lee and M. Tomizuka, "Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 1, pp. 48-55, Feb. 1996.

[8] S. Hwang, J.-h. Park, and S. K. Hong, "Control system design for a UAV-mounted camera gimbal subject to coulomb friction," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 7, pp. 680-687, Jul. 2012.

[9] C. Canudas de Wit and P. Lischinsky, "Adaptive friction compensation with partially known dynamic friction model," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 11, no. 1, pp. 65-80, Feb. 1997.

[10] M. Iwasaki, T. Shibata, and N. Matsui, "Disturbance-observer-based nonlinear friction compensation in table drive system," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 4, no. 1, pp. 3-8, Mar. 1999.

[11] J. R. Ryoo and T.-Y. Doh, "Enhanced track jump stability in

optical disc drives," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 7, pp. 683-687, Jul. 2009.

[12] S.-Y. Kim, K. Koo, J. R. Ryoo, and S. W. Kim, "Design for layer jump in optical disc drives using internal state manipulation," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1225-1231, Nov. 2012.

[13] T.-Y. Doh and J. R. Ryoo, "Improvement of the transient response by partially compensating initial values of digital controllers," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 4, pp. 285-289, Apr. 2013.

[14] K. Ogata, *Discrete-Time Control Systems*, Prentice-Hall, New Jersey, 1995.



류 정 래

1996년 한국과학기술대학 전기 및 전자공학과 졸업. 1998년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 및 2004년 박사. 2004년~2005년 9월 삼성전자 Sys. LSI 책임연구원. 2005년 10월~현재 국립서울과학기술대학교 전기정보공학과 부교수.

관심분야는 강인 동작 제어, 광디스크 드라이브 서보 제어, DSP 기반 디지털 제어 시스템 설계.



도 태 용

1992년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1999년 동 대학원 박사. 1997년~2001년 삼성전자 디지털 미디어 연구소 책임연구원. 2002년 3월~현재 국립한밭대학교 전자제어공학과 교수. 관심

분야는 강인제어, 학습제어, 반복제어, 디지털 제어 시스템.