

조립구동용 VCM 정밀구동을 위한 상태궤환 방식의 위치제어기

(State Feedback-Based Position Controller of VCM(Voice Coil Motor) for Precise Automated Manufacturing Process)

김성국* · 라젠드라 · 석줄기**

(Sung-Kuk Kim · Shrestha Rajendra · Jul-Ki Seok)

Abstract

The state feedback-based position controller for the voice coil motor(VCM) used in precise automated manufacturing processes is proposed and analyzed in this paper. The proposed controller has advantage over the conventional cascade-type P-PI controller in terms of the gain selection and the controller interference. The feasibility of the presented idea is verified by experimental results on a designed VCM.

Key Words : State Feedback-Based Position Controller, Voice Coil Motor(VCM),
Precise Automated Manufacturing Process, Cascade-Type PI Controller

1. 서 론

Voice Coil Motor(VCM)는 그림 1과 같은 구조의 영구자석 선형 전동기로서 회전형 전동기가 직선 운동할 때 가지는 문제점인 기계적 마찰, 백래쉬(Backlash) 등이 거의 없으며 회전운동을 직선 운동으로 변환하기 위한 장치가 필요하지 않아 연성 PCB 본딩과 카메라 모듈 조립 등과 같은 소형 정밀 조립 생산라인에 널리 사용되고 있다[1]. VCM은 특히 구조가 간단하여 소형화 하기가 쉬우며 제작 단가가 저렴한 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 VCM은 최근 수

요가 증가하는 자동화 조립 공정의 패키징, 검사 공정의 핵심 장비로 적용되고 있으며, 수율 상승 및 생산성 향상을 위해 빠른 동특성 및 서브미크론 정도의 고정밀/고정밀 위치제어가 요구 된다[2].

현재 산업계 표준의 전동기 위치제어는 그림 2 (a)와 같이 PI 제어 방식의 속도 및 P 제어인 위치제어기가 직렬 연결(Cascade)된 구조이다. 여기에 위치제어 속응성을 개선하기 위하여 위치지령을 Feed-forward 하는 부분(Velocity Reference CFF)이 있다. 이러한 기존 제어 방식은 속도 정상상태 오차를 제거하기 위한 적분기에 의한 과도상태 동특성 저하 및 가감속 구간에서 와인드업(Wind-up)에 의한 진동 현상이 발생하게 된다[3-4]. 또한 이러한 구조에서는 속도제어를 위해 선정된 이득이 위치 제어 특성에 반영되는 등의 제어기간 간섭 현상이 발생하는 문제가 있다. 이는 제어기 특성의 물리적 해석을 어렵게 만들며 동 특성 개

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
Tel : 053-810-3997, Fax : 053-810-4767
E-mail : doljk@ynu.ac.kr
접수일자 : 2010년 6월 21일
1차심사 : 2010년 6월 23일
심사완료 : 2010년 7월 12일

선을 제한하는 요소로 동작하게 된다.

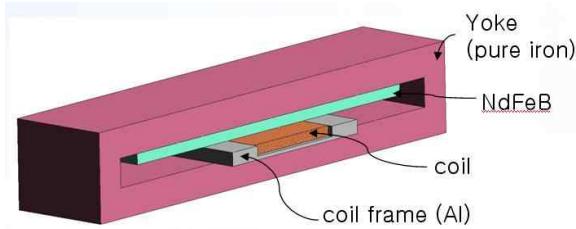


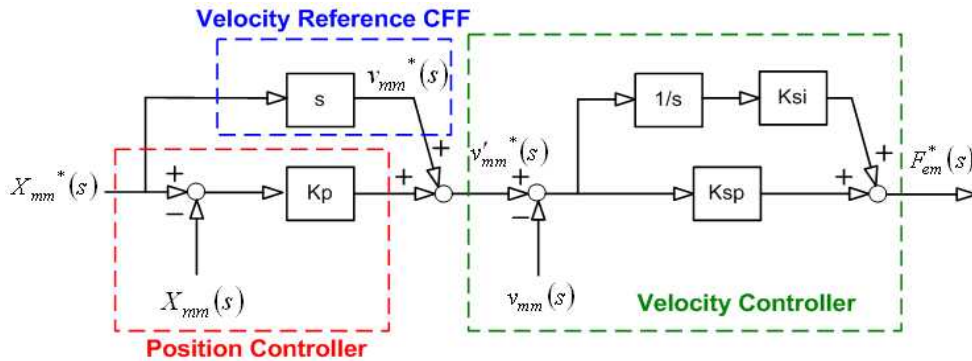
그림 1. VCM 3차원 구조도
Fig. 1. VCM 3-dimensional configuration

본 논문에서는 이를 개선하기 위하여 기존의 직렬구조의 제어기가 아닌 병렬형태의 상태궤환 방식의 제어 구조를 가진 상태궤환 위치-속도제어기를 제안한다. 제안된 제어기는 병렬구조이므로 제어기 동 특성의 물리적 해석을 용이하게 만들뿐만 아니라 동 특성

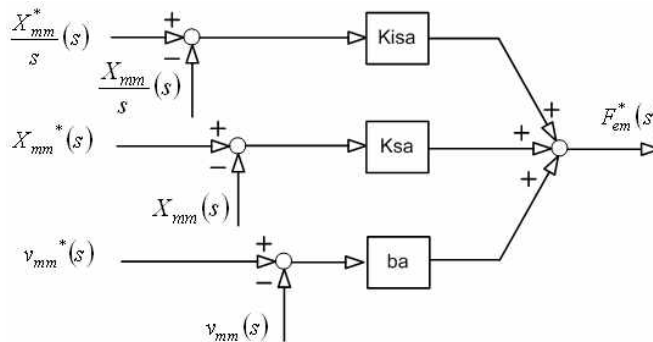
개선에도 이점이 있다. 또한, 일반적인 직렬형 P-PI 제어 방식보다 외란에 강인하고, 와인드업 현상에서 자유로운 것을 확인할 수 있었다. 제안된 제어 구조의 타당성을 증명하기 위해 조립공정용 z축 구동 VCM을 설계하고 제작된 전동기를 대상으로 실험을 수행하였다.

2. 상태궤환 제어기

본 논문에서는 직렬구조의 제어기가 아닌 그림 2 (b)와 같은 병렬형태의 제어구조를 가진 상태궤환 제어기를 제안한다. 제안된 제어기는 위치와 속도가 동시에 계산되는 구조이며 적분된 위치 지령에 대한 제어 경로가 추가되었는데, 모든 제어기는 P 제어기 형태로 설계된다.



(a) 직렬방식의 P-PI 구조 위치-속도제어기



(b) 병렬방식의 상태궤환 위치-속도제어기

그림 2. 위치 제어기의 블록선도
Fig. 2. Block diagram of position controller

제어 특성 해석을 위해 먼저 두 제어기의 추력 지령 F_{em}^* 을 살펴보면 식 (1), (2)와 같다.

$$F_{em}^*(t) = K_{sp} \cdot v_{err} + (K_{si} + K_p \cdot K_{sp}) \cdot X_{err} + K_p \cdot K_{si} \int X_{err} dt \quad (1)$$

$$F_{em}^*(t) = b_a \cdot v_{err} + K_{sa} \cdot X_{err} + K_{isa} \int X_{err} dt \quad (2)$$

식 (1)은 직렬방식의 P-PI 제어기의 추력지령을 나타내고 식 (2)는 상태궤환 제어기의 추력지령을 나타낸다.

식 (1)의 우변 2번째 항을 살펴보면 속도제어기 PI 이득이 위치제어에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이는 제어기의 이득 선정이 어렵게 만들며 제어기 간의 간섭이 일어날 수 있음을 의미한다.

반면 식 (2)를 보면 각각의 물리량이 각각의 이득에 의해서만 영향을 받음을 알 수 있다. 이는 제어기 물리적 해석을 용이하게 만들고 제어기 간의 간섭이 발생하지 않음을 의미한다.

상태궤환 제어기의 장점은 제어기의 구조가 병렬로 되어 있어 각각의 상태가 서로 독립적 이다는 것이다. 제어기의 구조가 직렬로 연결된 경우 예를 들어 위치 제어기에서 나오는 속도지령에 외란이 발생하면 이는 고스란히 속도제어기에 입력되고 속도제어기에서는 외란에 영향을 받은 속도지령을 추종하게 된다. 이는 제어기의 동특성이 저하되는 결과를 야기하며 결국 외란에 취약해지게 된다.

반면 상태궤환 제어기와 같은 병렬구조를 가지는 제어기는 각각의 상태와 지령이 서로 독립적이기 때문에 위와 같은 문제점에서 자유로울 수 있다. 위와 같은 이유로 상태궤환 제어기는 직선 왕복운동을 하며 왕복축과 지지대등이 쉽게 마모되어 불규칙한 마찰의 영향으로 속도 외란이 심한 VCM과 같은 적용에 유리하다[5].

다음 장에서는 이와 같은 특성을 가지는 상태궤환 제어기를 설계하고 이와 같은 대역폭을 가지는 P-PI 제어기를 설계하여 이를 분석하고 실험을 통해 이를 입증할 것이다.

3. 상태궤환 제어기 설계와 특성분석

두 제어기의 성능을 비교하려면 먼저 두 제어기의 위치제어 대역폭을 같게 설계하여야 한다. P-PI 제어기의 전달함수와 상태궤환 제어기의 전달함수를 살펴보면 각각 다음과 같다.

$$\frac{X_{mm}(s)}{X_{mm}^*(s)} = \frac{\omega_{sc}s + K_p\omega_{sc}}{s^2 + \omega_{sc}s + K_p\omega_{sc}} \quad (3)$$

$$\frac{X_{mm}(s)}{F_d(s)} = \frac{s}{M_p s^3 + K_{sp} s^2 + (K_{si} + K_p \cdot K_{sp})s + K_p \cdot K_{si}} \quad (4)$$

$$\frac{X_{mm}(s)}{X_{mm}^*(s)} = \frac{b_a s + K_{sa} + \frac{K_{isa}}{s}}{M_p s^2 + b_a s + K_{sa} + \frac{K_{isa}}{s}} \quad (5)$$

$$\frac{X_{mm}(s)}{F_d(s)} = \frac{s}{M_p s^3 + b_a s^2 + K_{sa} s + K_{isa}} \quad (6)$$

식 (3)은 P-PI제어기의 위치지령에 따른 위치의 전달함수를 나타내고 식 (4)는 외란 추력에 대한 위치의 전달함수를 나타낸다. 식 (5)는 상태궤환 제어기의 위치 지령에 따른 위치의 전달함수를 나타내고, 식 (6)은 외란 추력에 대한 위치의 전달함수를 나타낸다. 여기서 PI 제어기와 상태궤환 제어기의 형태가 같게 하기 위해서 그림 2 (a)와 같이 속도지령부에 위치지령으로부터 속도지령에 Feed-forward를 해주었다. 두 제어기의 특성을 보다 정확하게 비교하기 위해서 두 제어기 모두 동일한 추력제어(혹은 전류제어)기를 사용하였다. 추력제어기의 대역폭은 속도제어기의 대역폭보다 충분히 크게 설정하여 전체 시스템의 해석에서는 1로 두고 전체 전달함수를 구하였다.

식 (3)~(6)으로부터 위치정상상태 오차를 구하기 위하여 최종값 정리를 사용하면 각각 다음과 같다. 먼저 식 (3), (4)와 식 (5), (6)을 이용하면 실제위치는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X_{mm}(s) = \frac{\omega_{sc}s + K_p\omega_{sc}}{s^2 + \omega_{sc}s + K_p\omega_{sc}} X_{mm}^*(s) + \frac{s}{M_p s^3 + K_{sp}s^2 + (K_{si} + K_p \cdot K_{sp})s + K_p \cdot K_{si}} F_d(s) \quad (7)$$

$$X_{mm}(s) = \frac{b_a s + K_{sa} + \frac{K_{isa}}{s}}{M_p s^2 + b_a s + K_{sa} + \frac{K_{isa}}{s}} X_{mm}^*(s) + \frac{s}{M_p s^3 + b_a s^2 + K_{sa}s + K_{isa}} F_d(s) \quad (8)$$

식 (7)은 P-PI제어기의 실제 위치를 위치지령과 외란에 대한 함수로 나타낸 것이고, 식 (8)은 상태제환 제어기의 실제 위치를 위치지령과 외란에 대한 함수로 나타낸 것이다.

식 (7), (8)에서 정상상태에서 위치지령과 외란토크가 일정하다고 가정하면 식 (7), (8)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$X_{mm}(s) = \frac{\omega_{sc}s + K_p\omega_{sc}}{s^2 + \omega_{sc}s + K_p\omega_{sc}} \frac{X_{mm}^*}{s} + \frac{s}{M_p s^3 + K_{sp}s^2 + (K_{si} + K_p \cdot K_{sp})s + K_p \cdot K_{si}} \frac{F_d}{s} \quad (9)$$

$$X_{mm}(s) = \frac{b_a s + K_{sa} + \frac{K_{isa}}{s}}{M_p s^2 + b_a s + K_{sa} + \frac{K_{isa}}{s}} \frac{X_{mm}^*}{s} + \frac{s}{M_p s^3 + b_a s^2 + K_{sa}s + K_{isa}} \frac{F_d}{s} \quad (10)$$

식 (9), (10)을 최종값 정리로 나타내면 다음과 같다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} X_{mm}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s X_{mm}(s) = X_{mm}^* \quad (11)$$

식 (11)에서 알 수 있듯이 P-PI제어기와 상태제환 제어기 둘 다 정상상태에서는 정상상태 오차가 없이 실제 위치가 위치지령을 잘 추정하는 것을 확인할 수 있다.

두 제어기의 정확한 특성을 비교하기 위해서는 제어기의 대역폭이 같아야 한다. 앞에서 외부외란에 대한 정상상태 오차가 0인 것을 확인하였다. 이는 두 제어

기 모두 제어기로서의 성능을 발휘할 수 있다는 것을 의미한다. 여기에 두 제어기의 대역폭을 같게 설정하면 지령 추종 (Command Tracking) 입장에서 두 제어기는 동일한 제어기로 보일 것이다. 그림 3과 같이 두 제어기의 대역폭을 43[Hz]로 같게 선정한 후 제어기의 이득 값들을 구하였다[6-8]. 그림 3에서 파란색 선으로 나타낸 것이 상태제환 제어기의 보드선도이고 녹색 선으로 표현된 것이 P-PI제어기의 보드 선도이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 두 제어기의 대역폭이 동일하다는 것을 확인할 수 있다.

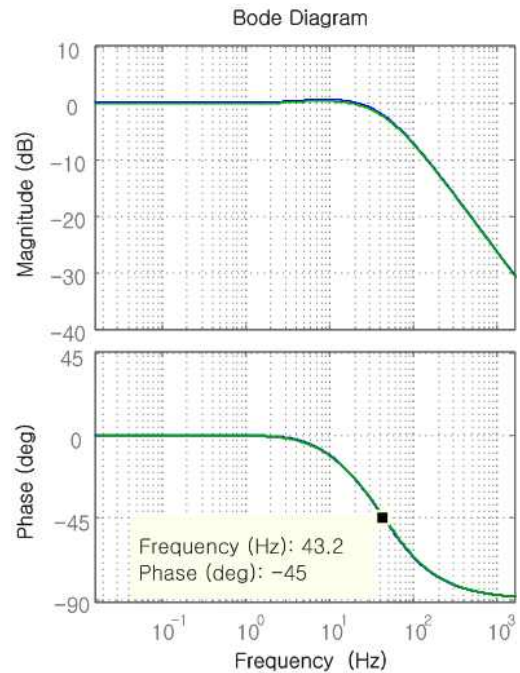


그림 3. 상태제환, P-PI 제어기의 보드선도
Fig. 3. Bode plot of SFB and P-PI controller

즉 두 제어기 모두 위치 추종에 대해서 동일한 성능을 발휘하지만, 앞에서 설명한 바와 같이 상태제환 제어기는 기존의 직렬형 P-PI 제어방식의 제어기 보다 시스템의 예기치 않은 외란이 발생했을 때 강력한 동특성을 가지고, 리미트에 의한 wind-up현상으로 인한 시스템의 진동 현상에서 자유롭다. 따라서 상태제환 제어기가 설계적 측면과 미지의 외란 제거 성능면에서 P-PI제어기보다 유리하다고 할 수 있으며, 이는 실제 VCM 구동에서 매우 우수한 성능을 보이게 된다.

4. 실험 결과

본 실험은 그림 4와 같이 정밀 조립 구동용으로 직접 제작한 z축 구동 방식의 VCM과 그림 5의 25[kHz]의 스위칭 주파수를 가지는 DC/DC컨버터를 이용하여 PWM을 수행하였다. 별도의 비선형 외란 인가를 위하여 그림 4에 나타난 바와 같이 스프링 부하를 설치하였고, 위치 및 속도를 케환하기 위한 선형 엔코드 분해능은 0.5[μm]이다. VCM의 전기자 등가 저항과 등가 인덕턴스는 각각 12.9[Ω], 0.3[mH]이다. wind-up 실험을 위해 VCM에 장착된 스프링 부하를 이용하였고, 위치 제어기와 속도 제어기 사이의 외부 외란을 위하여 VCM의 왕복면에 불규칙한 스크래치를 주어 마찰에 의한 효과를 증가시켰다.

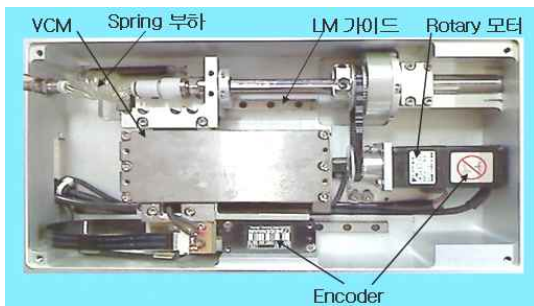


그림 4. 실제 제작된 VCM
Fig. 4. VCM picture



그림 5. 실제 제작된 VCM 디지털 구동 장치
Fig. 5. Digital controller picture

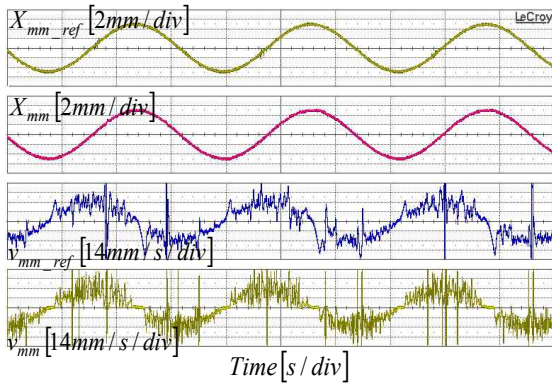
그림 6은 위치지령 크기가 5[mm], 주기가 1.25[Hz]의 정현파 위치지령 입력일 때 외부부하 없이 마찰 부하만 이용하여 P-PI 제어기와 상태케환 제어기의 위치 제어 성능을 나타낸 것이다. 위로부터 위치 지령, 엔코더로 측정된 위치, 속도 지령, 엔코더로 측정된 속도를 나타낸다. 그림 6 (a)에서 속도지령을 살펴보면 마찰로 인한 외부 외란으로 인하여 속도지령이 일그러져 있는 것을 확인할 수 있다. VCM의 실제 속도는 이 속도 지령을 추정하는데 속도지령이 일그러지면 그림 6 (a)의 4번째 파형과 같이 실제 속도도 많이 왜곡 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 VCM의 동특성을 저하시키는 것 뿐만 아니라 VCM의 수명 또한 많이 단축시키는 결과를 야기한다. 앞에서 설명 하였듯이 직렬구조로 된 기존의 P-PI형태의 제어기는 시스템이 직렬로 연결되어 있기 때문에 제어기 사이의 외부 외란이 발생하였을 때 그 영향이 시스템 전체에 미치는 것을 확인할 수 있다.

반면 상태케환 제어기는 각각의 지령이 서로 독립적이기 때문에 앞에서 문제가된 P-PI의 제어기의 문제점에서 자유로워 진다. 그림 6 (b)를 살펴보면 같은 조건에서의 위치제어 시에 속도지령(아래에서 3번째 파형)을 살펴보면 외부 외란의 영향을 거의 받지 않음을 확인할 수 있고 이로 인해 실제 속도(4번째 파형)도 P-PI제어기의 속도 보다 상당히 깨끗하다는 것을 확인할 수 있다.

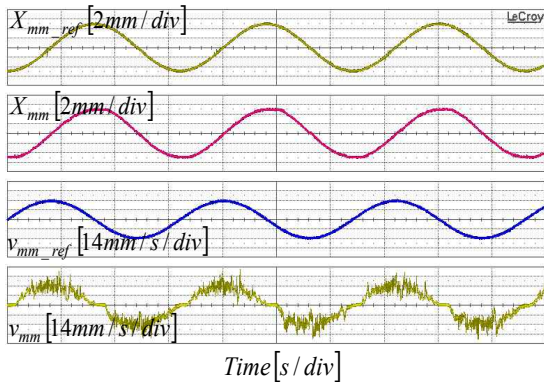
그림 7은 램프 입력에 대한 상태케환 제어기와 P-PI 제어기의 응답특성을 나타낸 것이다. 가속구간의 wind-up현상을 관찰하기 위하여 VCM에 부착된 스프링 부하를 사용하였다. 그림 7 (a)는 P-PI 제어기의 위치응답과 속도응답을 나타낸 것이고, (b)는 상태케환 제어기의 위치응답과 속도응답을 나타낸 것이다.

그림 7 (a)와 (b) 위치응답을 살펴보면 두 제어기 모두 위치지령을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 속도응답의 경우 P-PI제어기의 경우 초기 wind-up 현상으로 인해 속도가 심하게 진동하는 것을 확인할 수 있다. 반면 상태케환 제어기의 경우 적분기에 의한 wind-up현상이 없기 때문에 안정된 속도응답을 가짐을 확인할 수 있다. 그림 7 (b)의 속도 응답에서 약간의 진동이 발생함을 관찰할 수 있는데 이것은

VCM의 왕복 운동시 마찰에 의한 현상으로 wind-up의 진동과는 무관하다.



(a) P-PI 제어기



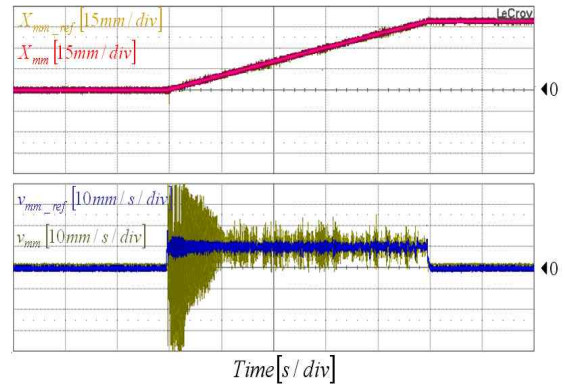
(b) 상태궤환 제어기

그림 6. 1.25[Hz], 5[mm], 정현파 위치지령에 대한 상태궤환, P-PI 제어기 응답특성
Fig. 6. Response of sinusoidal position command

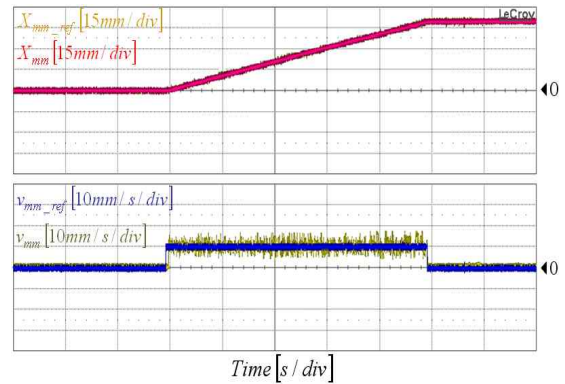
이처럼 P-PI제어기의 속도응답의 진동은 VCM의 동특성을 저하시키는 원인이기도 하지만 심한진동으로 인한 소음도 발생하게 되며 VCM의 수명에도 악영향을 미치게 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 직렬형 PI제어기의 형태가 아닌 병렬형 상태궤환 제어기를 제안하였다. 제안된 제어기는 각각의 물리적 지령이 서로 독립적이기 때문



(a) P-PI 제어기



(b) 상태궤환 제어기

그림 7. 램프 응답에 대한 상태궤환 제어기, P-PI제어기 위치, 속도 응답특성

Fig. 7. Response of ramp position command

에 기존의 직렬구조에서 문제점이었던 하나의 지령에 외란이 발생되면 시스템 전체에 영향을 주는 문제에 대해서 자유로운 것을 실험을 통해 증명하였다. 또한 리미트에 의한 wind-up 현상에 대해서도 제안된 제어기는 자유롭다는 것을 실험을 통해 증명하였다.

제안된 병렬형 상태궤환 제어기는 제어기의 이득이 고유의 물리적 특성을 가지고 있기 때문에 하나의 이득이 다른 이득에 영향을 주지 않는다. 따라서 제어기 이득 선정이 기존의 방법보다 쉬운 장점을 가진다. 이러한 장점들을 가진 본 논문에서 제안된 제어기를 VCM에 적용하면 VCM의 동특성과 수명을 크게 향상될 것으로 예상된다.

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(과제번호 2008T100100049)

Appendix

부호 정리

K_{isa}	: 상태케환 제어기의 위치 적분 이득
K_{sa}	: 상태케환 제어기의 위치 이득
b_a	: 상태케환 제어기의 속도 이득, 마찰 이득
K_p	: P 제어기의 위치 이득
K_{sp}	: P 제어기의 속도 비례이득
K_{si}	: P 제어기의 속도 적분이득
ω_{sc}	: P 제어기의 속도제어기 대역폭. 300(rad/s)
M_P	: VCM 의 질량(0.4[kg])
F_{em}^*	: 제어기의 추력 지령
F_d	: 외란 추력
X_{mm}^*, X_{mm-ref}	: 위치 지령
X_{mm}	: 엔코더로 측정된 위치
v_{mm}^*, v_{mm-ref}	: 속도 지령
v_{mm}	: 엔코더로 측정된 속도

References

- [1] Y. D. Chen, C. C. Fuh, and P. C. Tung, "Application of voice coil motors in active dynamic vibration absorbers", IEEE Trans. Mag., vol. 41, pp. 1149-1154, March 2005.
- [2] B. A. Awabdy, W. C. Shih, and D. M. Auslander, "Nanometer positioning of a linear motion stage under static loads", IEEE/ASME Trans. Mechatron., vol. 3, pp. 113-119, June 1998.
- [3] C. Bohn, D. P. Atherton, "An analysis package comparing PID anti-windup strategies," IEEE Control Systems Magazine, vol. 5, pp.34-40, 1995.
- [4] K. J. Astrom and T. Hagglund, PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. Indrument Society of America, pp. 88-92, 1995.

- [5] 설승기, "전기기기 제어론," Ch.4 홍릉과학출판사, 2007.
- [6] G.Ellis, "Control System Design Guide," 3rd Eddition, Ch.10, ElsevierAcademicPress, 2004.
- [7] H.Sugimoto and etc., "Practical Aspects of Theory and Design of AC Servo System," Ch7.1 in Japanese, Motor Electronics Publication, 1990.
- [8] J.K.Kim, and etc., "High Precision Position Control of Linear Permanent Magnet Synchronous Motor for Surface Mount Device Placement System," in Conf. Rec. PCC-Osaka, vol. 1, pp.37~42, 2002.

◇ 저자소개 ◇



김성국(金成國)

1982년 5월 1일생. 2009년 영남대 전기공학과 졸업. 2010년 영남대 대학원 전기공학과 석사과정.



라젠드라

1974년 9월 28일생. 1999년 트리보반대 전기공학과 졸업. 2010년 영남대 대학원 전기공학과 석사과정.



석줄기(石 줄기)

1969년 3월 29일생. 1992년 서울대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998~2001년 삼성전자 생산기술센터 자동화 연구소 책임 연구원. 현재 영남대 전기공학과 부교수.