

고속 세틀링과 고정밀 위치 제어를 위한 모드 변경 제어 기법

김정재[†] · 최영만 · 김기현* · 권대갑** · 홍동표***

[†]한국과학기술원 기계공학과 NOM 연구실, *삼성전자 메카트로닉스 연구센터

**한국과학기술원 기계공학과 교수(주노스코프시스템즈 대표이사)

***전북대학교 정밀기계공학과 교수

A New Mode Switching Control for Fast Settling and High Precision Positioning

Jung Jae Kim[†], Young Man Choi, Ki Hyun Kim*,
Dae Gab Gweon** and Dong Pyo Hong***

[†]Nano Opto-Mechatronics Lab., Dept. of Mechanical Engineering, KAIST

*Mechatronics center, Samsung Electronics

**Professor of Dept. of Mechanical Engineering, KAIST (NanoScopeSystems)

***Professor of Dept. of Precision and Mechanical Engineering, Chonbuk University

ABSTRACT

Recently, with rapid development of digital media like semiconductor and large flat panel display, the manufacturing equipment is required to have high precision over large travel range. Moreover it should have high product throughput. To achieve high product throughput, a controller should perform fast point-to-point motion and high precision positioning after settling in spite of external disturbances or residual vibrations. We proposed a new mode switching control algorithm with an application to dual stage for long range and high precision positioning. The proposed algorithm uses a proximate time-optimal servomechanism for the fast settling and a time-delay controller for the high precision positioning. Experimental results show that the proposed method enables smooth mode switching and improves the settling time and the precision accuracy after settling by over than 33% and 45%, respectively.

Key Words : Fast Settling, Dual Stage, Mode Switching Control, PTOS, TDC

1. 서 론

최근 반도체가 고집적화 되고 평판 디스플레이의 크기가 대형화됨에 따라 고속의 검사 속도, 서브마이크론의 검사 정밀도, 그리고 대행정 구간에서도 높은 정밀도를 갖는 검사 장비에 대한 필요성이 증가하였다. 기존 검사 장비의 경우 하나의 구동축에 대해 하나의 구동기를 사용하는 단일 서보 시스템이 대부분이다. 하지만 행정 거리가 길어짐에 따라 문제가 되는 진직도 오차 및 yaw 오차를 보상할 수 없다. 본 논문에서는 이

러한 문제를 해결하기 위해 이중 서보 시스템을 제안하였다. 이중 서보 시스템은 대행정 모션을 위한 조동 구동기와 단행정 모션을 빠르고 높은 정밀도로 구동 가능하면서도 진직도 오차 및 yaw 오차를 보상 가능한 미세 구동기로 구성된다. 제안된 이중 서보 시스템의 조동 구동부는 선형 모터와 공기 베어링으로 구성되며 미세 구동부는 보이스코일 모터(VCM)와 공기 베어링 가이드로 구성된다. 조동 구동기와 미세 구동기 간의 기계적 결합성이 없기 때문에 검사 동작 수행 중 조동 구동기에서 발생할 수 있는 외란이 미세 구동기에 전달되지 않아 검사 정밀도를 향상시킬 수 있다. 게다가 미세 구동기의 질량이 작기 때문에 고속 모션이 가능하다는 장점이 있다[1].

[†]E-mail : kimjungjae@kaist.ac.kr

검사 효율을 높이기 위해서는 빠른 세틀링을 위한 제어기가 필요하다. 시간 최적 제어 기법이 널리 사용되는데 그 중 PTOS(proximate time optimal servomechanism) 제어기법은 채터링 없이 빠른 세틀링 성능을 얻을 수 있는 제어기로 HDD (Hard Disk Drive) 시스템의 트랙 검색 제어기로 널리 사용되고 있다[2-4]. 세틀링 이후의 위치 오차를 줄이고 트래킹 성능을 향상시키기 위해서는 외란에 강인하고 높은 대역폭의 제어기를 사용해야 하는데 시간 지연 제어(Time Delay Control: TDC) 기법은 구조가 간단하고 시스템에 대한 정확한 모델링이 없이도 뛰어난 트래킹 성능을 갖는 제어 기법이다[5-6]. 빠른 세틀링과 정상 상태 위치 제어 성능을 모두 향상시키기 위해서는 PTOS제어기를 이용해 빠른 세틀링을 얻고 세틀링 이후에는 TDC 제어기를 사용하여 높은 위치 제어 성능을 얻을 수 있도록 해야 한다. 이에 본 논문에서는 빠른 세틀링 성능과 정상 상태 위치 제어 성능 모두를 향상시킬 수 있는 모드 변경 제어(Mode Switching Control:MSC) 기법을 제안하고 이중 서보 시스템에 적용하여 성능을 검증하였다.

2. 이중 서보 시스템

제안한 이중 서보 시스템을 Fig. 1에 나타내었다. 대행정 모션을 위한 조동 구동부는 선형 모터로 구동되며 고속으로 정확한 모션을 수행하기 위한 미세 구동부는 4개의 VCM을 사용하여 X, Y, θ_z 모션을 구동 가능하며 진폭도 및 yaw 오차를 보상 가능하도록 제작되었다. 고속 및 정밀 모션을 위한 조동 및 미세 구동부의 가이드로는 마찰이 없는 공기 베어링을 사용하였다. 조동 구동부의 변위는 50 nm 분해능의 선형 엔코더로 측정되며 미세 구동부의 변위는 5 nm 분해능의 레이저

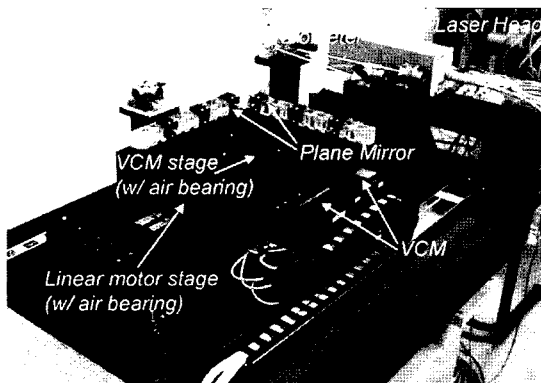


Fig. 1. Implemented Dual servo system

인터페로미터(HP10885)로 측정된다. 실시간 제어를 위해 샘플링 주파수가 10 KHz인 dSPACE DSP 제어 시스템(DS1005)을 사용하였다.

이중 서보 시스템의 성능은 미세 구동부에 의해 결정되는데 공기 베어링 가이드를 사용할 경우 미세 구동기는 식 (1)의 이차 시스템으로 모델링 할 수 있다.

$$G_{VCM}(s) = \frac{X}{I}(s) = \frac{a}{s^2} \quad (1)$$

X는 미세 구동기의 위치, I는 구동 전류, $a=K_f/M$ 는 가속 상수를 나타내며 K_f 는 모터의 힘상수, M은 미세 구동부의 질량을 의미한다.

3. 모드 변경 제어 기법

그림 2는 제안한 모드 변경 제어기의 시간 흐름도를 나타낸다. 위치 오차가 스위칭 경계 E_{sw} 보다 크다면 빠른 세틀링을 위해 PTOS 제어기로 동작한다. 반대로 E_{sw} 보다 작거나 같을 경우 모드 변경 제어기는 위치 제어 성능을 높이기 위해서 TDC 제어기로 동작한다.

위치 오차가 E_{sw} 와 같다면 PTOS 제어기에서 TDC 제어기로의 모드 변경이 일어난다. 모드 변경시 발생하는 과도 응답을 줄이기 위해서 TDC의 제어 입력을 계산하는데 한 스텝 이전의 PTOS 제어 입력을 사용한다. TDC 제어기의 이러한 특성이 부드러운 모드 변경을 가능케 하는 가장 중요한 사항이 된다. 모드 변경 제어기의 제어 법칙을 살펴보면 다음과 같다.

1) $|r-y| > E_{sw}$ 이면 모드 변경 제어기는 PTOS 제어기로 동작하며 제어 입력은 식(2)로 표현된다[2].

$$u_{MSC} = u_{PTOS} = u_{max} \text{sat} \left(\frac{k_2 [f(e) - v]}{u_{max}} \right) \quad (2)$$

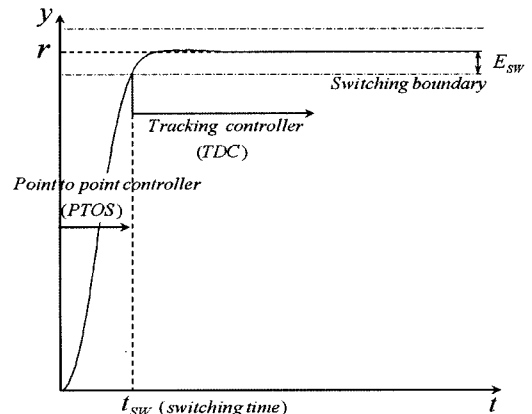


Fig. 2. Timing diagram of proposed MSC

여기서 e 는 위치 오차, v 는 현재 속도, u_{max} 는 최대 전류 그리고 k_2 는 속도 에러에 대한 제어 변수를 나타낸다. 시간 최적 제어를 위한 속도 궤적 $f(e)$ 는 식 (3)과 같이 표현된다[2].

$$f(e) = \begin{cases} \frac{k_1}{k_2} e & |e| \leq y_l \\ \text{sgn}(e) \left[\sqrt{2\alpha\alpha u_{max}} |e| - \frac{u_{max}}{k_2} \right] & |e| \geq y_l \end{cases} \quad (3)$$

여기서 α 는 부드러운 감속을 위한 변수(acceleration discount factor)로서 0~1의 값을 갖는다. k_1 는 위치 오차에 대한 제어 변수, y_l 은 PTOS 제어가 선형 제어기로 동작하는 영역을 나타낸다. k_2 와 y_l 는 (4)와 같이 표현된다[2].

$$k_2 = \left(\frac{2k_1}{\alpha a} \right)^{1/2}, \quad y_l = \frac{1}{k_1} \quad (4)$$

2) $|r-y|=E_{sw}$ 인 경우 PTOS에서 TDC로의 모드 변경이 일어나며 PTOS 제어 입력 $u_{PTOS}(t_{sw}-t_s)$ 의 값이 TDC의 과거 제어 입력 $u_{TDC}(t_{sw}-t_s)$ 의 값으로 치환되어 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} u_{MSC}(t_{sw}) &= u_{TDC}(t_{sw}) = u_{TDC}(t_{sw}-t_s) \\ &\quad - \bar{M}\ddot{x}(t_{sw}-t_s) + \bar{M}\{\ddot{x}_d(t_{sw}) \\ &\quad + K_D\dot{e}(t_{sw}) + K_P e(t_{sw})\} \\ &= u_{PTOS}(t_{sw}-t_s) - \bar{M}\ddot{x}(t_{sw}-t_s) \\ &\quad - \bar{M}\ddot{x}(t_{sw}-t_s) + \bar{M}\{\ddot{x}_d(t_{sw}) \\ &\quad + K_D\dot{e}(t_{sw}) + K_P e(t_{sw})\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 t_s 는 샘플링 주기, t_{sw} 는 모드 변경이 일어나는 순간의 시간을 말한다. \bar{M} 는 질량 M 의 추정값을 의미하며, K_D , K_P 는 제어 변수를 나타낸다.

3) $|r-y| < E_{sw}$ 인 경우 모드 변경 제어기는 TDC 제어기로 동작하며 제어 입력은 식(6)로 표현된다[5].

$$u_{MSC}(t) = u_{TDC}(t) = u_{TDC}(t-t_s) - \bar{M}\ddot{x}(t-t_s) + \bar{M}\{\ddot{x}_d(t) + K_D\dot{e}(t) + k_P e(t)\} \quad (6)$$

4. 실험 결과 및 고찰

제안한 모드 변경 제어기의 성능을 검증하기 위해 이중 서보 시스템에 적용하여 계단 응답 특성을 살펴 보았다. 400 μm , 10 mm 크기의 계단 입력을 가하였으며 PTOS 제어기만을 사용한 경우와 비교를 하였다. PTOS 제어기와 모드 변경 제어기 모두 가장 빠른 세

틀링이 되도록 설계하였고 이때의 제어 변수는 PTOS의 경우 $\alpha=0.9$, $k_1=10^5$, $k_2=409$, TDC의 경우 $\bar{M}=0.75$, $K_P=10^5$ 그리고 $K_D=520$ 으로 두었다. E_{sw} 는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 15 μm 으로 정하였다. 제어기의 성능 비교를 위해 다음의 두가지 성능 평가 항목을 비교하였다.

1) 검사 장비의 경우 절대적인 위치 오차의 크기가 중요해지므로 100 nm 이내로 세틀링 되는 시간을 계산하였다.

2) 정상상태 위치 오차의 크기를 비교하기 위해 세틀링 이후 200 ms 동안의 위치 오차의 표준 편차를 계산하였다.

그림 3과 4는 각각 400 μm , 10 mm 계단 입력에 대한 응답을 나타낸다. 그림 3(c)와 4(c)를 통해 모드 변

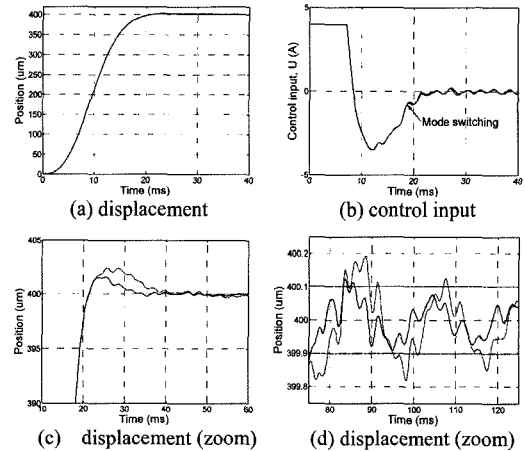


Fig. 3. 400 μm step response(dotted: PTOS, solid: MSC): implementation.

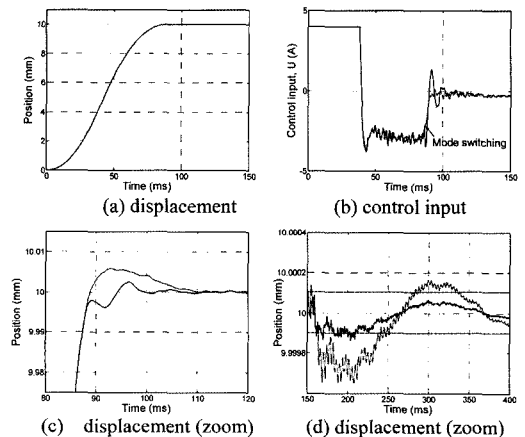


Fig. 4. 10 mm step response(dotted: PTOS, solid: MSC): implementation.

경 제어기가 PTOS 제어기에 비해 빠르게 세틀링 뒀을 볼 수 있다. 그림 3(d)와 4(d)를 보면 저주파 진동에 의해 세틀링이 늦어지고 정상 상태 위치 오차가 발생함을 확인할 수 있는데 이는 가감속시 발생하는 방진 테이블의 진동에 의한 것이다. 모드 변경 제어기가 PTOS 제어기에 비해 세틀링 이후의 정상 상태 위치 오차가 작음을 확인할 수 있는데 이는 TDC 제어기가 PTOS 제어기에 비해 높은 대역폭을 갖기 때문이다. 실험 결과를 정리하여 표 1에 나타내었다. 모드 변경 제어를 사용하였을 경우 PTOS에 비해 100 nm 세틀링 시간의 경우 30% 이상 감소하였고, 세틀링 이후의 위치 오차는 40% 이상 감소하였다.

Table 1. Implementation results: 100 nm settling time and position error.

	Performance	PTOS	MSC	Improvement with the MSC over the PTOS
400 μ m	100nm settling time (ms)	140.8	86.0	39 %
	Position error (nm, 1 σ)	12.0	6.6	45 %
10 mm	100nm settling time (ms)	323.5	218.0	33 %
	Position error (nm, 1 σ)	22.7	8.6	62 %

5. 결 론

본 논문에서는 고속, 고정밀, 장행정 모션을 위한 이중 서보 시스템을 제안하였다. 이중 서보 시스템은 대행정 구동을 위한 조동 구동기와 진직도 및 yaw 오차를 보상하고 고속 모션이 가능한 미세 구동기로 구성된다. 그리고 빠른 세틀링을 얻고 세틀링 이후의 위치 오차를 줄이기 위한 모드 변경 제어를 제안하였다. PTOS 제어기와 TDC 제어를 결합한 모드 변경 제어

기는 모드 변경 순간에 과도 응답이 없이도 부드러운 모드 변경이 가능하다. 이는 모드 변경 순간 TDC 제어 입력을 계산하기 위해 이전 스텝의 PTOS 제어 입력을 사용하기 때문이다. 이중 서보 시스템에 적용한 결과 제안한 모드 변경 제어기가 PTOS 제어기에 비해 세틀링 성능과 정상 상태 위치 제어 성능 모두 우수함을 확인하였다. 게다가 PTOS 제어기와 TDC 제어를 독립적으로 설계하여 결합하면 되므로 구조가 간단하고 HDD 시스템이나 반도체, LCD 검사 장비처럼 빠른 세틀링과 높은 위치 제어 성능이 모두 필요한 시스템에 쉽게 적용될 수 있다.

참고문헌

1. K. H. Kim, Y. M. Choi, D. M. Kim, B. U. Nam, D. G. Gweon, M. G. Lee and S. W. Lee, "Ultra precision dual stage system using air bearing and VCM for nanolevel scanning," *Korean Society of Precision Engineering*, vol. 22, pp. 80-86, 2005.
2. G. Franklin, D. Powell and M. Workman, "Digital Control of Dynamic Systems 3rd ed.," *Addison-Wesley Press*, 1990.
3. M. L. Workman, "Adaptive proximate time optimal servomechanisms," *Ph. D. Thesis, Stanford University*, 1987.
4. Y. M. Choi, J. Jeong and D. G. Gweon, "A Novel Damping Scheduling Proximate Time Optimal Servomechanism of Hard Disk Drives," *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 42, 3, March, 2006.
5. K. Yucef-Toumi and I. Osamu, "A time delay control for system with unknown dynamics," *Journal of Dynamic Measurements and Control Transactions of ASME*, vol. 112, pp. 133-142, 1990.
6. T. C. Hsia and L. S. Gao, "Robot manipulator control using decentralized linear time invariant time delayed joint controllers," *IEEE Proc.- Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2070-2075, 1990.