볼 스크류 구동 스테이지의 나노포지셔닝 제어
Nanopositioning Control for Bal-Screw Driven Stage

*김규하 [1], 조상구 [1], 김완수 [1], #이선규 [1]
*G.. H. Kim[1], S. G.. Cho[1], W. S. Kim[1], #S. K. Lee(skyee@gist.ac.kr)[1]
[1] 광주 과학기술원 기전공학과

Key words : friction, NCTF control, pre-sliding region, switching control

1. 서론

위치 제어 시스템은 반도체 공정장비, 공작 기계, 계측기기, 광산업, 가전기기 분야에 널리 쓰고 있다. 특히 볼 스크류 스테이지의 경우, 높은 강성과 상대적으로 낮은 가격으로 인해 위치 제어 시스템에 많이 쓰여지고 있다. 그러나 볼 스크류의 비선형적이고 위치에 따라 변하는 마찰 특성으로 인해 위치 정밀도를 높이는데 한계가 있다.[1,2]

이러한 마찰 문제를 해결하기 위하여 여러 종류의 제어 기법들이 발표 되었다. 그러나 이러한 문제를 해결하기 위해서는 발표된 제어 이론들은 마찰에 대한 정확한 모델과 그 대응하는 시스템 규명법(System Identification)이 필요하며 제어이론이 수학적인 복잡성으로 인해 일반적인 PID 제어에 익숙한 산업계에서는 제안된 제어이론들을 응용하기에 어려움이 많다.[3]

볼 스크류 스테이지의 정밀도를 높이는 다른 방법으로 볼 스크류로 조동 위치 제어를 하고 보이스 코일이나 PZT 를 사용하여 미동 위치 제어 하는 Dual Stage [4], 볼 스크류의 예압을 PZT 를 이용하여 조절하여 미세 제어하는 방법[5,6]등이 있다. 하드웨어를 이용한 이러한 방법은 미세제어에 대한 성능 요구 조건을 충족시키지만 스테이지에 추가되는 장치의 비용과 늘어난 구동 장치의 증가에 따른 제어 시스템의 복잡성이 증가한다.

Nominal Characteristic Trajectory Following(NCTF) Control 방법은 제어 이론의 수학적인 복잡성, 정확한 마찰 모델과 모델에 필요한 계수의 실험적 규명 등이 위에서 언급한 제어 방법에 비해 수학적으로 덜 복잡하며, 제어 이론에 마찰 모델이 필요치 않으며 제어한 필요한 시스템 파라메터의 수가 적어서 간단한 실험에 의해 시스템 계수를 구할 수 있다.[3,7] 하드웨어적으로도 볼 스크류 외에 다른 위치 제어 장치는 필요치 않다. 그러나 미세 영역에서의 구동은 응답 속도가 느리고 정밀도가 떨어지는 성능의 한계를 가지고 있다. 본 논문은 이러한 단점을 보완한 switching control 방법에 대해 소개한다.

2. Nominal Characteristic Trajectory Following (NCTF) Control

NCTF Control 시스템의 구성도는 Fig. 1 과 같다. NCTF Control 시스템은 open loop 응답의 감속 패턴을 묘사하는 규범 특성 곡선(Nominal Characteristic Trajectory Curve, NCT Curve)과 PI 보상기로 구성되어 있다. NCTF Control 방법은 PI 보상기를 이용하여 open loop 응답의 감속 특성을 가진 정지 패턴을 따라가게 하여 고정도의 성능을 얻게 하는 제어 기법이다. NCT Curve 는 error 와 error rate 로 phase plane 에 구성하며 NCT Curve 의 출력인 u_p 는 NCT Curve 와 실제 시스템이 phase plane 상에 나타난 위치와 차이이다. 아래의 식은 위에서 설명 내용을 수식화한 것이다.

$$e = x_r - x \qquad (1)$$

$$\dot{e} = \dot{x}_r - \dot{x} = 0 - \dot{x} = -\dot{x} \qquad (2)$$

$$d\dot{e} / de = -\alpha \qquad (3)$$

$$u_n = \dot{e} + \alpha e = -\dot{x} + \alpha e \qquad (4)$$

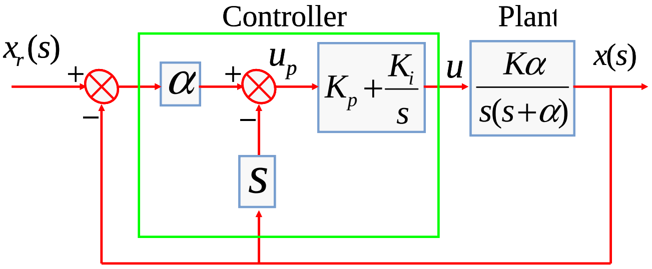


Fig. 1 Structure of NCTF Control system

3. Dynamic Characteristics of Ball screw Stage

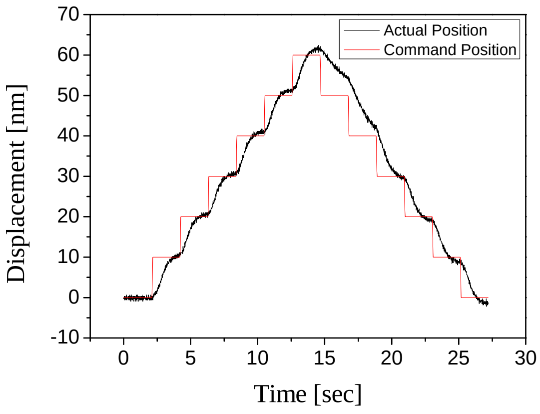
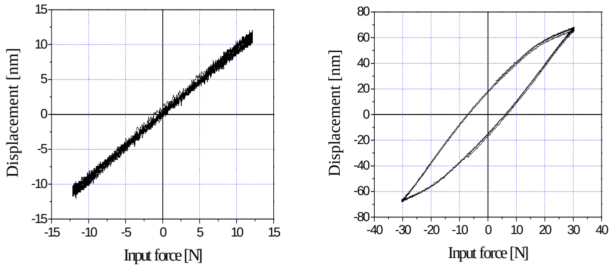


Fig. 2 10 nm step response with NCTF Control

NCTF control 은 Fig. 2 와 같이 미세 구동에서 응답이 느리고 정도가 떨어진다. 볼 스크류 스테이지의 변위는 마찰 특성으로 인해 구동력이 최대 정지 마찰력보다 작은 micro dynamic (또는 pre-sliding) 영역과 구동력이 최대 정지 마찰력보다 큰 macro dynamic (또는 sliding) 영역으로 나눌 수 있다. 마찰면 사이의 접촉은 표면 거칠기로 인해 면접촉이 아닌 점접촉이 된다. 이러한 이유로 macro dynamic 영역에서 게인을 조정한 NCTF control 시스템은 micro dynamic 영역에서의 제어에는 맞지 않다.



(a) 20nm displacement (b) 100μm displacement

Fig. 3 Elastic characteristics in micro dynamic region

micro dynamic 영역에서는 접촉점에서 미끄러짐(sliding)은 일어나지 않고 붙어 있으며 Fig. 3 과 같이 구동력에 의

한 탄성 변형으로 인해 스테이지의 미세한 변위가 가능해진다.

4. Switching Control

NCTF Control 시스템의 문제점을 해결하기 위해서 macro dynamic 영역은 NCTF Control 로, micro dynamic 영역에서는 PID 제어를 하는 switching control 를 구성하였다. 기존의 switching control 방법이 있는데 크게 두가지로 첫번째는 macro dynamic 영역에서 잠시 동작을 멈춘 후, micro dynamic 영역으로 switching 하는 방법으로 지연시간을 이용하여 안정적으로 작동하게 하는 방법이다. 그러나 지연시간으로 인해 응답 속도가 느린 단점이 있다. 두번째는 한계 속도와 구동 범위를 정하는 방법이 있는데 시스템이 불안정해지는 단점이 있다.[8]

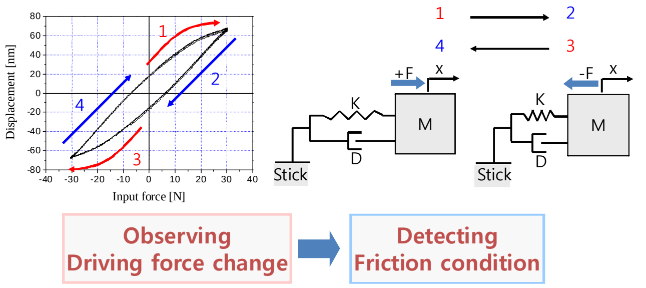


Fig. 4 New switching control concept

구동 중 안정적으로 동작할 수 있도록 하는 방법으로 먼저 오차(e)를 이용하여 micro dynamic 영역으로 변환할 수 있는 변환 범위를 지정한다. NCTF Control 시스템은 스테이지를 NCT Curve 를 따라 변환 범위 안으로 이동으로 시킨다. 그 다음, Fig. 4 와 같이 구동력의 방향 변화를 탐지한 후, micro dynamic 영역용 제어기로 전환을 해서 미세 제어를 수행해서 스테이지를 위하는 위치에 이동시킨다.

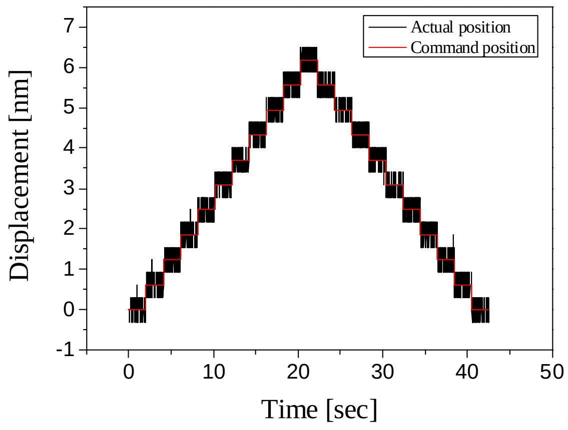


Fig. 5 0.6 nm step response with switching control method

새로운 switching control 방법을 사용하여 nm 단위의 step 응답과 수십 mm 단위의 step 응답에 대해서 스테이지를 이동시켜보았다. Fig. 5 는 변위측정용으로 0.3nm 정밀도를 가진 Agilent 10706B Laser Interferometer 를 사용해서 0.6nm 씩 구동시킨 결과이다. Fig. 6 은 100mm step 시행한 후 결과이다. 2 초에서 step 명령이 시작되고 10 초 지점에서 오차가 0.6nm 가 되어 명령을 완료하는데 8 초가 걸림을 알 수가 있다. 그러나 NCTF control 의 경우 10 초 이후에도 잔여 진동이 있음을 알 수 있다. 이것으로 제안한 switching control 방법이 micro dynamic 영역에서의 응답과 macro dynamic 영역과 micro dynamic 영역에서 모두 구동함을 알 수 있다.

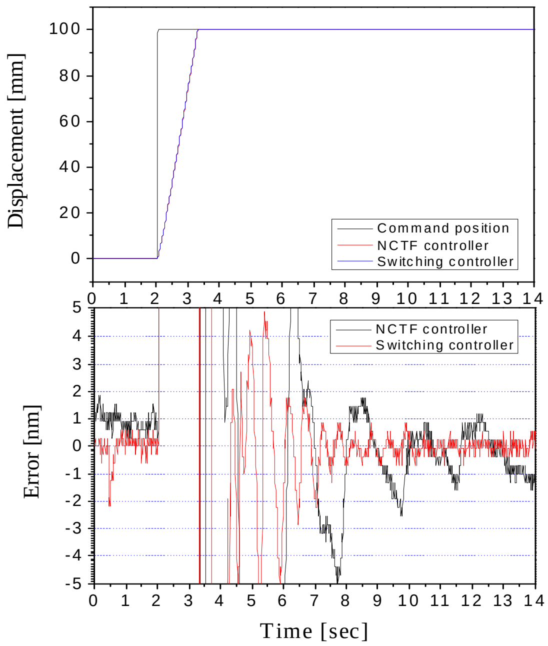


Fig. 6 100 mm step response with switching control method

6. 결론

본 논문에서는 볼 스크류 스테이지와 laser Interferometer 를 이용하여 NCTF control 을 수행하고 이의 문제점에 대하여 논하였다. 또한 이러한 문제점을 보완할 switching control 방법에 대하여 제안을 하였으며 이를 검증하기 위하여 다양한 변위에 대한 실험을 수행하여 0.6nm 정밀도와 100mm step 응답에서 0.6nm 이하의 오차 범위 내에 들어오는데 8 초가 걸림을 알 수 있었다.

참고문헌

1. J.S. Chen, K.C. Chen, Z.C. Lai, and Y.K, Huang, “Friction characterization and compensation of a linear motor rolling guide stage,” International journal of machine tools and manufacture, **43**, 905-915, 2003.
2. C. Hsieh, Y.C. Pan, “Dynamic Behavior and Modeling of The Pre-sliding Static Friction,” Wear, **242**, 1-17, 2000.
3. K. Sato, Wahyudi, and A. Shimokohbe, “Design and characteristics of practical control system for PTP positioning (in Japanese),” Trans Jpn Soc Mech Eng (series C), **67**, 222-228, 2001.
4. Y. Okazaki, S. Ichikawa and J. Otsuka, "A simple and compact hybrid positioning stage with 1nm resolution," Proceedings of the 1st ICPT, 354-355, 2004.
5. J.S. Chen and I.C. Dwang, "A ballscrew drive mechanism with piezo-electric nut for preload and motion control," International Journal of Machine Tools & Manufacture, **40**, 513–526, 2000
6. Katuhiro Nakahima, Kazuki Takafuji, Yuuma Tamura, “Ultra fine positioning by preload change in ball screw drive,” Proceedings of the 1st ICPT, 31-36, 2004.
7. Wahyudi, K. Sato, and A. Shimokohbe, "Characteristics of practical control for point-to-point(PTP) positioning systems Effect of design parameters and actuator saturation on positioning performance," Precision Engineering **27**, 157–169, 2003.
8. S. Futami, A. Furutani, and S. Yoshida, “ Nanometer positioning and its micro-dynamics,” Nanotechnology, **1**, 31-37, 1990.