

리니어모터 및 압전구동기를 이용한 이중서보의 구현

안 현 식

국민대학교 전자정보통신공학부
전화 : 02-910-4709

Implementation of Dual Servoing Using a Linear Motor and a Piezoelectric Actuator

Hyun-Sik Ahn

School of Electrical Engineering, Kookmin University
E-mail : ahs@kookmin.ac.kr

Abstract

For a precise position control with the resolution of a micrometer, a dual servo system is constructed using a linear motor and a piezoelectric actuator. The switching mode dual servo algorithm is implemented on a DSP board in which A/D and D/A converters are also mounted. It is shown by the experimental results that the precise position control is performed within a few micrometer of position error by using the dual servo system.

I. 서론

위치결정 기술은 산업 전반에 포괄적으로 응용되는 기술로 최근에는 위치 정밀도가 서브 μm 의 정밀도를 필요로 하는 첨단 응용분야가 증가하고 있다. 이러한 요구에 적합한 정밀위치 결정용 구동기로는 전기식 구동기중에서 정전 마이크로 구동기, 압전 구동기 및 전자장 마이크로 구동기 등을 고려할 수 있다. 특히 압전 구동기는 현재 단독으로 또는 기존의 구동기와 결합되어 다양한 분야의 위치제어에 적용되고 있다.

압전 구동기는 구동원인 압전 소자의 특성으로 인하여 서브 μm 이하의 정밀도를 쉽게 얻을 수 있으며 직선 변위를 발생시키므로 다른 기구를 이용하지 않고

직선 운동에 직접 사용할 수 있는 기구적 장점을 가지고 있다. 그러나 히스테리시스 현상으로 인하여 모델링이 어렵고 행정(Stroke)이 짧아 하나의 독립된 구동기로서의 사용이 제한된다는 문제점이 있다[1],[2]. 이와 같이 정밀제어는 가능하나 행정의 짧은 구동기의 효과를 충분히 활용하기 위해서는 제어 정밀도가 다소 부족해도 비교적 행정의 긴 구동기와 적절히 결합시킨 이중서보(Dual servo)의 사용이 필수적이며 따라서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3]-[5].

실제로 컴퓨터 HDD의 경우에 단일 구동기만을 이용하는 경우에는 운반 기구부 및 볼 베어링 등의 기계적 공진에 의한 영향 등으로 인하여 트랙간 피치를 줄이는데 한계가 있다. 따라서 15000tpi급 이상을 위한 위치 정밀도 및 서보 대역폭을 확보하기 위해서는 글로벌 서보(Global servo)와 마이크로 서보(Micro servo)를 결합시켜 사용하는 이중서보 시스템 구성이 효과적임이 알려져 있다.

HDD에서는 보이스 코일 모터와 압전 구동기를 결합하여 사용할 수 있으나 산업용 직선운동 기구부에서는 리니어 모터에 기초한 스테이지와 압전 구동기를 결합하는 방법을 고려할 수 있다.

본 논문에서는 이중서보 시스템의 구성 및 제어 방법에 대하여 살펴보고, 리니어 모터 및 압전 구동기를 각각 글로벌 서보 및 마이크로 서보로 구성하고 스위칭 모드 알고리즘을 사용한 실험 결과를 통하여 제어 시스템의 타당성 및 제어 성능을 검토한다.

II. 이중서보 제어 알고리즘

글로벌/마이크로 서보에 관한 연구는 1990년대 초에 시작되어 반도체 웨이퍼와 마스크 정렬이나 SPM (Scanning Probing Microscopy)용 스테이지에서는 요구되는 정밀도를 만족시킬 수 있도록 글로벌 서보로서 리니어 모터 스테이지를, 마이크로 서보로서 압전 구동기를 적용하고 있다. 이러한 이중서보 시스템의 제어방법은 크게 다음의 두 가지로 나눌 수 있다,

(1) 연속 제어 방식

연속 제어 방식은 두 개의 서보를 이송 시작부터 동시에 제어하는 방식이다. 연속 제어 방식의 경우 Coarse actuator 와 Fine actuator 사이에 상대 변위를 알고 있어야 제어가 가능하다. Y. Okazaki[6]에 의해서 제안된 1축 연속제어 방법은 정전 용량형 겹 센서와 레이저 인터페로미터를 사용하여 글로벌 서보와 마이크로 서보의 위치를 동시에 측정하여 궤환 제어를 수행하였다. 이와 같이 연속 제어 방식은 글로벌 서보와 마이크로 서보 사이에 상대 변위를 알기 위해서 두 개의 이상의 센서가 사용되어야 한다.

그러나, 최근에는 마이크로 서보는 고정된 센서에 의해 제어되고 글로벌 서보는 마이크로 서보의 상대 변위를 추정기(Estimator)를 통하여 제어를 수행하는 방법도 제안되고 있다.

(2) 스위칭 모드 제어 방식

스위칭 모드 제어 방식은 글로벌 서보에 의해서 마이크로 서보의 행정 이내까지 이송시킨 후 마이크로 서보만으로 최종위치를 결정하는 제어 알고리즘을 말한다. 일반적으로 위치 제어 시스템은 기준 궤적을 정확히 추종할 것을 원하는 트래킹 제어와 원하는 지점으로 이동하는 점대점(point-to-point) 방식의 제어가 있다. 스위칭 모드 제어 방식은 후자의 경우에 더욱 부합하는 알고리즘으로 고려될 수 있다.

실제로 HDD의 트랙 추종 제어에서는 기본적으로 세 가지 모드 즉, 탐색모드(Seek mode), 정착모드(Settle mode) 및 추종모드(Follow mode)를 정의하고 있는데 각 모드에 대한 구분은 대략적으로 다음과 같다[4]. 탐색모드에서는 주제어를 Coarse actuator를 이용하여 수행하고 있어서, 이 시간동안에 Fine actuator는 동작하지 않으며 긴 행정을 이동하게 된다. 원하는 위치까지 가능하게 빠른 이동을 요구하는 모드로 큰 가속도의 변화는 피하는 것이 일반적이다. 정착모드에서는 Coarse actuator로 원하는 목표지점에 근접한 이후 Fine actuator의 행정이내에 들게 될 경우 동작하는 모드로서 이때부터 주제어는 Fine actuator를 이용하게 된다. 또한 추종모드에서는 정착모드에서 원하는 목표

지점(트랙)에 도달한 이후에 그 트랙 위치를 지속적으로 유지하는 모드이다. 이 모드에 의해 위치 정밀도가 결정된다고 할 수 있으며, 이 모드에서의 가장 큰 문제는 구동기의 저속 운동으로 인한 마찰력 보상 문제와 구동기의 비선형성을 보상하는 것이다.

이상과 같이 스위칭 모드 제어 방식은 기본적으로 세 개의 모드로 나누어 행해지며 각 모드에서의 제어 성능을 향상시키기 위하여 각각 다른 제어 방법을 사용할 수 있다.

III. 리니어 모터 및 압전구동기의 제어

3.1 리니어 모터의 모델링 및 제어방법

본 논문에서 사용한 리니어 모터는 BLDC형으로서 회전형 3상 동기모터에서의 토크 발생 원리가 리니어 모터에서는 직선방향의 추력 발생 원리에 대응되며, 회전형 3상 동기모터에서와 유사하게 리니어 BLDC 모터의 전기적 모델링을 수립할 수 있다. 또한, 발생추력에 대한 표현식은 다음과 같이 결정된다.

$$F(t) = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot (\Phi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (1)$$

여기서, Φ 는 자속, P 는 극수(Pole pair)이며, q 와 d 는 각각 q -axis 및 d -axis로 변화된 성분을 나타낸다. 리니어 모터 시스템의 비선형 마찰력 항의 소거를 위하여 힘 계산법을 적용하여 리니어 BLDC 모터에 대한 궤환제어기를 설계한다. 힘 계산법을 적용하였을 때 모델링 오차의 크기가 유한한 경우에 오차방정식은 이득 선정에 따라서 안정한 시스템이 된다[7].

따라서 오차방정식이 안정하도록 비례 궤환 제어 이득과 미분 궤환 제어 이득을 설정하면 리니어 BLDC 모터 시스템은 원하는 경로를 점근적으로 추종하는 안정한 제어 시스템이 된다.

3.2 압전 구동기의 모델링 및 제어방법

압전 구동기에서 입력 전압과 외부 부하에 의해 생성되는 힘은 비선형 특성을 가지고 있지만 인가된 힘에 대한 변위 거동은 선형 특성을 가진다. 따라서 입력 전압에 대한 출력변위를 비선형 변수 $K_p(V_a)$ 로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다[8].

$$U_z = \frac{K_p(V_a)}{M_e s^2 + D_e s + K_e} V_E \quad (2)$$

여기서 M_e 는 등가 질량, D_e 는 등가 댐핑계수, K_e 는

등가 탄성계수이고, U_x 는 입력 전압 V_E 에 대한 정상 상태 출력 변위를 나타낸다. 또한 $K_p(V_d)$ 는 식 (2)로부터 다음과 같이 쓸 수 있으므로

$$K_p(V_d) = \frac{U_x}{V_E} (M_e s^2 + D_e s + K_e), \quad (3)$$

대상 압전 구동기에 대한 히스테리시스 커브로부터 입력전압에 대한 정상 상태 출력 변위의 특성을 구하여 사용할 수 있다. 제어기는 PID 제어기를 사용하되 우선 동적 시스템에 기초하여 적절한 이득상수를 설계한 후 히스테리시스 현상에 대한 수학적 모델링을 이용한 시뮬레이션을 통하여 이득상수들을 수정하여 사용하기로 한다.

IV. 이중서보의 구성 및 실험 결과

4.1 이중서보 시스템의 구성

본 절에서는 리니어 모터를 Coarse actuator로서, 압전 구동기를 Fine actuator로서 이용하여 그림 1과 같이 이중서보 시스템을 구성한다.

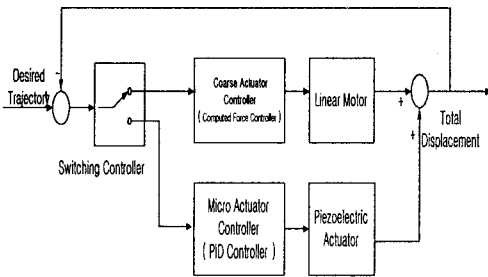


그림 1. 이중서보 시스템의 구성.

압전 구동기는 0~100V의 입력 전압에 대하여 0~100 μ m의 변위를 가지며 시스템 매개 변수를 이용하여[9],[11] 압전 구동기의 선형 모델에 대한 전달 함수는 식 (4)와 같이 결정된다.

$$G_p(s) = \frac{3}{s^2 + 1850.58s + 3000000} \quad (4)$$

적절한 PID 제어기 이득상수를 결정하기 위해서 우선, 압전 구동기의 수학적 모델링을 구한 후, 시뮬레이션을 통하여 적절한 상수를 찾는다. 기준입력은 반도체 제조공정의 Wire bonding 작업과 유사한 공정을

대상으로 설정하였다. 0.1초의 작업 주기를 기준으로 궤적을 생성하였으며 처음 20msec 동안에 Bonding 위치까지 이동한 후 다음 30msec 동안에 Bonding을 수행하도록 궤적을 4차 함수로 그림 2와 같이 설정하였다. 또 이 그림에 3부분으로 나누어진 스위칭 모드를 나타내었다.

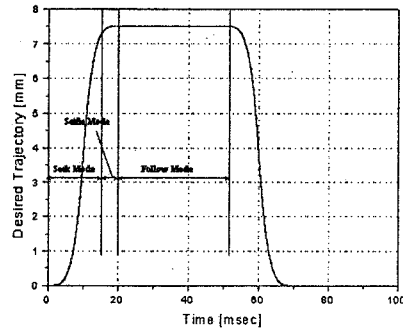


그림 2. 기준 궤적과 스위칭 모드의 정의.

리니어 모터의 제어방법은 식 (5)와 같이 힘 계산법에 의한 제어 알고리즘을 적용하였다[7],[10].

$$F = M \cdot u(t) + F(x, \dot{x}) + F_c$$

$$u(t) = \ddot{x}_d + K_p(x_d - x) + K_d(\dot{x}_d - \dot{x}) \quad (5)$$

스위칭 동작은 시작점에서 리니어 모터 스테이지만으로 위치제어를 수행하고 압전 구동기는 정지 상태를 유지한다. 탐색모드에서 위치 오차가 압전 구동기 범위 내에 들게 될 경우 정작모드로 스위칭된다. 또한, 추종모드에서는 압전 구동기만을 동작시키고 리니어 모터는 정지상태를 유지하게 된다. Bonding time이 지나면 서보시스템은 다시 추종모드에서 탐색모드로 스위칭되며 위치제어는 리니어 모터가 수행하게 된다.

4.2 실험 결과

실제 실험을 위한 제어 시스템의 구성도는 그림 3과 같다. 호스트 컴퓨터로서 IBM PC를 이용하고 제어 시스템은 dSPACE사의 DS1102 보드를 이용하여 임출력 데이터를 처리하며 Anorad사의 LW7 리니어 스테이지 [10] 및 Physik Instrument사의 P731.10 압전 구동기 [11]를 이용하여 이중서보 시스템을 구성했다.

실험 결과는 그림 4에 나타난 바와 같으며 스위칭 로직은 글로벌 서보가 10mm \pm 1 μ m 이내가 될 때 마이크로 서보가 동작하도록 로직을 설계하였다. 또한 그림 5에서는 마이크로 서보에 인가되는 제어 입력을

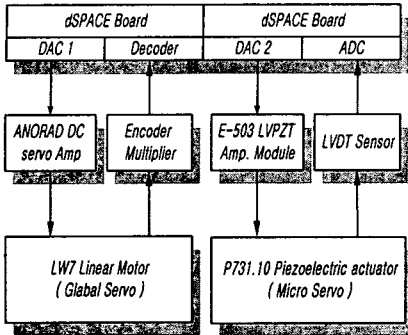


그림 3. 이중서보 시스템에 대한 제어 시스템 구성도

보이고 있는데 처음에는 제어 입력이 인가되지 않고, 글로벌 서보가 $10\text{mm} \pm 1\mu\text{m}$ 이내에 들게 될 경우에 입력이 인가됨을 볼 수 있다. 또한, 리니어 스테이지만을 사용하였을 때에 비하여 Bonding 위치에 도달하는 시간이 약 2 msec 정도 짧아지고, Bonding 동안의 위치 정밀도 역시 $2\mu\text{m}$ 정도 개선됨을 확인하였다.

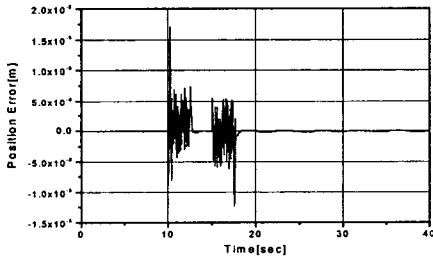


그림 4. 이중서보 시스템을 이용한 실험 결과.

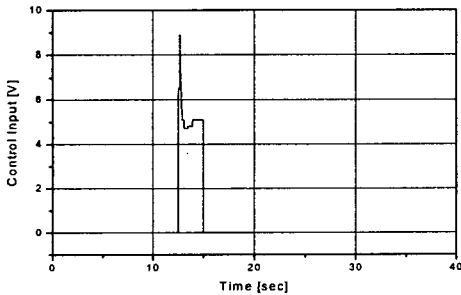


그림 5. 스위칭 로직에 의한 압전 구동기의 제어 입력.

V. 결론

본 논문에서는 고정밀 반도체 장비와 같이 마이크로

미터 수준의 정밀도를 요구하는 서보 시스템에 적합한 이중서보시스템의 구성하고 실제 실험을 통하여 제어 시스템의 성능을 검토하였다. 이중서보 알고리즘은 스위칭 모드 방법을 이용하였고, 글로벌 서보로서 리니어 모터를, 마이크로 서보로서 압전 구동기를 각각 사용하였다. 실제 실험 결과로부터 제어 방법의 타당성 및 정밀한 위치 제어를 수행할 수 있음을 확인하였다

참고문헌

- [1] P. Ge and M. Jouaneh, "Tracking control of a piezoelectric actuator," *IEEE Trans. on Contr. Syst. Tech.* Vol. 4, no. 3, 1996.
- [2] S. Jung and S. Kim, "Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feedforward model-reference control," *Precision Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 49-55, 1994.
- [3] L. Fan, H. Ottesen, T. Reiley, and R. Wood "Magnetic Recording Head Positioning at Very High Track Densities Using a Microactuator -Based Two-Stage Servo System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.42, No.3, pp. 222-233, 1995.
- [4] S. Koganezawa, Y. Uematsu, and T. Yamada, "Dual-Stage Actuator System for Magnetic Disk Drives Using a Shear Mode Piezoelectric Micro-actuators," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.35, No.2, pp. 988-992, March 1999.
- [5] W. Guo *et. al.*, "Dual Stage Actuators for High Density Rotating Memory Devices," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.34, No.2, pp.450-455, 1998.
- [6] Y. Okazaki, "A micro-positioning tool post using a piezoelectric actuator for diamond turning machines," *Precision Eng.*, vol. 12, no.3, pp. 151-156, 1990.
- [7] 최해성, 안현식, 김도현, 송중호, 최 익, "리니어 BLDC 모터에 대한 이산시간 반복제어기 설계 및 구현," 대한전자공학회 논문지, Vol.38-SC, No.3, pp.13-21, 2001.
- [8] 정승배, 전압 구동시 압전 구동기의 위치 결정 정도에 대한 비선형 모델링에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위 논문, 1993.
- [9] Hyun-Sik Ahn, "Controller design for a piezoelectric actuator based on the inverse hysteresis model," *Proc. of ICCAS*, pp. 840-845, 2002.
- [10] Anorad Corporation, *LW7 Linear Motor Stage*, 1998.
- [11] *Physik Instrumente Catalog*. 1998.