

리니어모터 스테이지 진직도 보상 제어

강민식* , 최정덕**

*경원대학교, **코미코

초록

An additive servo-system is developed to improve straightness of linear motor stages. For linear motor stages used in the field of high-precision linear motion process, high straightness accuracy is necessary as well as positioning accuracy in the longitudinal axis. In such cases, machining and assembling cost increases to improve the straightness accuracy. An electro-magnetic actuator which is relatively cost effective than any other conventional servo-systems is suggested to compensate the fixed straightness error. To overcome the compensation error due to modeling error and friction disturbance, a sliding mode control is addressed. The effectiveness of the suggested mechanism and the control are illustrated along with some experimental results.

1. 서론

리니어 모터 스테이지는 리니어 모터의 회전자 부분이 기계적 가이드를 따라 직선운동 할 수 있도록 만든 장치이다. 따라서 가이드의 정밀도에 따라 직선운동의 진직도가 결정된다. 정밀한 진직도를 보장하기 위해서는 가공과 조립 정밀도가 높아야 되나, 기계적 가공으로는 정밀도 실현에 한계가 있으며, 가능하더라도 가공 비용이 매우 높다. 조립 공정 또한 높은 기술과 많은 시간이 요구된다. 더구나 직선 이송거리가 길수록 정밀한 진직도 실현이 어려워진다.

본 연구에서는 리니어 모터 스테이지의 진직도 오차는 가이드의 기하학적 형상에 의해 결정되며, 따라서 각 이동방향 위치에서 직진도 오차는 재현성을 갖는 점에 착안하여 직선운동 방향과 수직 방향으로 움직이는 부가적 서보 장치를 이용하여 진직도 오차를 보상하여 진직도를 향상시키는 방법을 제안한다. 서보장치는 전자기 액츄에이터로 구동되며, 부하는 이 서보장치 위에 장착된다.

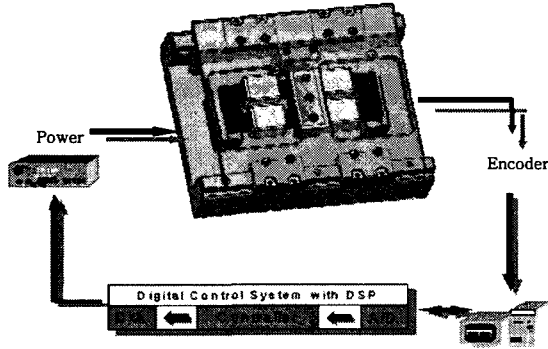
마찰은 기계적 접촉이 존재하는 경우 피할 수 없는 비선형 특성을 갖는 현상으로 서보 장치에서 위치 정밀도를 저해하는 요인으로 작용한다. 특히 상대속도가 작은 경우 스틱-슬립(stick-slip)현상을 유발하며, 정상상태 위치오차, 과도 응답을 나타내거나, 리밋 사이클(limit cycle)을 보인다. 본 연구에서는 서보 장치를 제작하고 마찰과 모델링 오차에 의한 위치오차를 줄이기 위해 슬라이딩모드 제어를 적용하며, 실험을 통해 제안된 방법의 적용성과 성능을 검증하였다. 실험 결과 슬라이딩모드 제어가 마찰에 의한 직진도 오차의 감소에 효과적임을 확인 하였으며, $\pm 11\mu\text{m}$ 수준의 직진도 오차를 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 수준으로 개선할 수 있었다.

2. 실험 방법

서보장치는 Fig. 1 과 같이 부하를 장착하며 좌우로 움직일 수 있는 상부의 슬라이더, 슬라이더 안내면, 슬라이더에 구동력을 제공하는 한 쌍의 전자석으로 구성된다. 슬라이더의 좌우 위치는 $0.1\mu\text{m}$ 분해능을 갖는 선형 엔코더로 측정하며, DSP 보드를 장착한 컴퓨터로 제어한다. 이 서보 시스템의 운동방정식은

$$m\ddot{y} = f_c + f_d \quad (1)$$

여기서 m 은 슬라이더 질량, y 는 슬라이드의 좌우 변위, f_c 는 전자기력, f_d 는 마찰력을 나타낸다. 전자기력은 (2)식과 같이 비선형 특성을 보인다.



$$f_c = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\left(\frac{I_0 + i_c}{y_0 - y} \right)^2 - \left(\frac{I_0 - i_c}{y_0 - y} \right)^2 \right] \quad (2)$$

여기서 μ_0 :공기의 투자율, A :자극의 단면적, N :코일의 감은 횟수, I_0 :바이어스 전류, i_c :제어 전류, y_0 :공칭공극, y : 공칭공극을 기준 공극의 변화이다. 전류는 전력증폭기에서 공급되며, 입력전압과 출력전류의 관계는 $i_c = K_a u$ 이다.

식(2)를 다시 쓰면 $f_c = (K_y + \Delta K_y)y + (K_i + \Delta K_i)i_c$

Fig. 1 Schematic of experimental set-up

$$K_y = \frac{\mu_0 N^2 A I_0^2}{y_0^3}, \quad K_i = \frac{\mu_0 N^2 A I_0}{y_0^2}, \quad \Delta K_i = \frac{3 \frac{y^2}{y_0^2} - \frac{y^4}{y_0^4} + \frac{y}{y_0} \frac{i_c}{I_0}}{\left(1 - \frac{y^2}{y_0^2}\right)^2} K_i, \quad \Delta K_y = \frac{\left(1 - \frac{y^2}{y_0^2}\right)^2 - 1}{\left(1 - \frac{y^2}{y_0^2}\right)^2} K_y$$

만일 운용구간을 $|y/y_0| \leq 0.1$, $|i_c/I_0| \leq 0.9$ 로 설계할 경우 $|\Delta K_y| \leq 0.02 K_y$, $|\Delta K_i| \leq 0.12 K_i$ 이다.

서보장치의 기준위치입력을 r , 위치오차를 $e(=r-y)$ 라 하고 상태변수를 $x = [\int e dt \quad e \quad \dot{e}]^T$ 로 정의하면 $\dot{x}_1 = x_2$, $\dot{x}_2 = x_3$, $\dot{x}_3 = ax_2 - bu - k_1 bu + \ddot{r} - ar - b\eta$,

$$a = K_y/m, \quad b = K_a K_i/m, \quad \eta = (\Delta K_y/K_a K_i)(r - x_2) + (1/K_a K_i)f_d$$

이 상을 정리하여 상태공간방정식을 쓰면

$$\dot{x} = Ax + Bu + k_1 Bu + k_2 B\ddot{r} + k_3 Br + B\eta, \quad |k_1 = \Delta K_i/K_i| \leq 0.12, \quad k_2 = 1/b, \quad k_3 = a/b \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & a & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -b \end{bmatrix}$$

따라서 식(3)으로 나타나는 시스템은 매칭조건(matching condition)을 만족한다. 이 시스템에 슬라이딩모드 제어를 적용한다. 슬라이딩 평면은 $\sigma = Sx$ 로 정의하며, 제어입력은 $u = u_l + u_n$ 으로 u_l 은 선형제어부, u_n 는 비선형제어부로 다음과 같이 정의한다.

$$u_l = -(SB)^{-1} \{ SAx + k_2 SB\ddot{r} + k_3 SB\dot{r} - \phi\sigma \}, \quad u_n = -(SB)^{-1} \rho \operatorname{sgn}[\sigma] \quad (4)$$

이 선형제어부는 비선형과 오차를 제외한 계의 모델에 적하면 슬라이딩평면 동력학은 $\dot{\sigma} + \phi\sigma = 0$ 으로 $\phi > 0$ 이면 안정하다. 도달조건을 검증하기 위해 Lyapunov 함수를 $V = 0.5\sigma^2$ 로 정의하면

$$\dot{V} = \sigma \dot{\sigma} = \sigma \{-\phi \sigma - \rho \operatorname{sgn}[\sigma] + k_1 SB(u_1 - \rho \operatorname{sgn}[\sigma]) + SB\eta\} \quad (5)$$

따라서 비선형 제어입력의 크기 ρ 를 $\rho > \frac{|k_1 \|SBu_1\| + \|SB\eta\|}{1 - |k_1|}$ 가 되도록 정하면 식(5)는 음이

되어 도달법칙을 만족한다.

슬라이딩 평면을 정의하는 행렬을 $S = [\omega_n^2 \quad 2\zeta\omega_n \quad 1]$ 로 정의할 경우 폐회로의 오차 동력학은

$$(s + \phi)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \frac{E(s)}{s} = 0 \quad (6)$$

이 되므로 ϕ, ζ, ω_n 을 정하면 폐회로 극점이 결정된다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2 는 크기 $\pm 50\mu\text{m}$, 주파수 0.8Hz 인 기준위치입력을 주었을 때 슬라이더 위치오차이다. 전반부는 슬라이딩모드제어의 선형부만을 적용한 경우, 후반부는 슬라이딩 모드의 비선형 제어부를 추가한 경우 응답이다. 선형부 제어는 PID-제어기 구조이다. 전반부 큰 오차는 슬라이더의 이동 방향이 바뀌는 지점에서 나타나며, 그 원인으로서는 마찰에 의해 발생된 스틱-슬립 현상으로 분석된다. 이 때 최대 위치오차는 p-p 4.75 [μm]로 나타났다. 후반부의 응답에서 보듯이 슬라이딩 모드 제어기의 비선형 항에 의해 이 마찰에 의한 응답의 오차가 현저하게 감소됨을 확인할 수 있으며, 이 때 위치오차는 p-p 0.8 [μm]로 나타났다. 이로써 슬라이딩모드 제어의 모델링 오차와 마찰에 의한 응답오차 개선 효과를 확인할 수 있다.

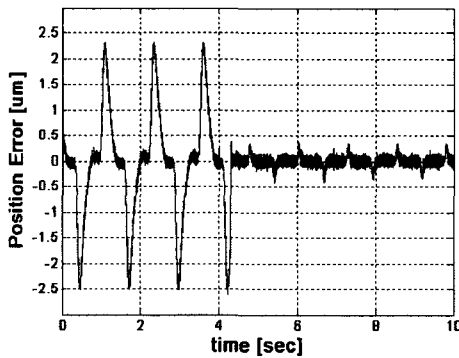


Fig. 2 Position errors by linear and sliding mode controls

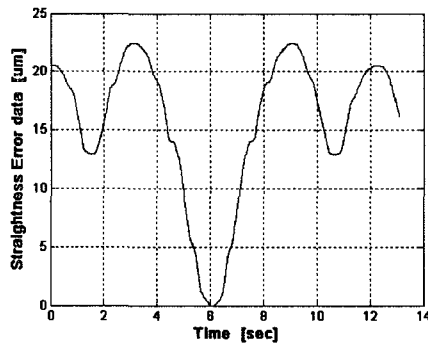


Fig. 3 Straightness error of a linear motor stage

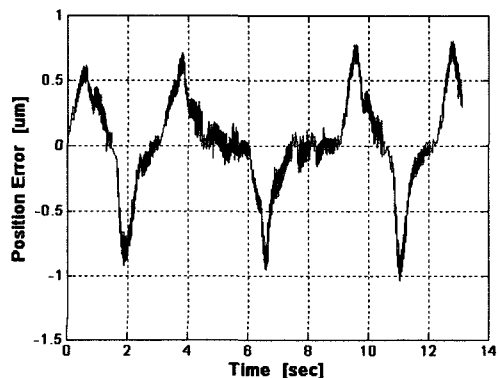


Fig. 4 Position error by linear part of SMC

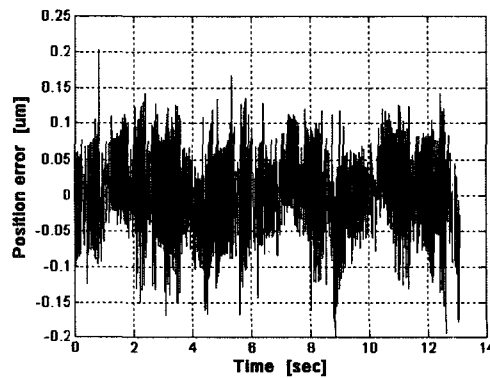


Fig. 5 Moving position error by sliding mode control

Fig. 3 은 적용 대상으로 선정된 리니어모터 스테이지에서 측정된 진직도 오차이다. 이송거리는 1760mm, 이송 속도 100mm/s 일 때 1 회 왕복하며 측정된 오차이다. 오차는 최대 $22.4 \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 전진과 후진 시의 이송방향 동일 위치에서 진직도 오차는 거의 차이가 없는 것으로 확인 되었다.

Fig. 4 는 Fig. 3 의 진직도 오차를 슬라이더 서보계의 기준입력으로 제공하면서 제어한 경우 위치의 오차로 슬라이딩 모드 제어기의 선형부 만을 적용한 경우이다. 기준입력의 기울기가 영인 지점 이후에 큰 오차가 발생함을 알 수 있는데, 이는 마찰에 의한 오차로 분석된다. 오차의 크기는 최대 $1.77 \mu\text{m}$ 이다. Fig. 5 는 비선형 부분을 포함한 슬라이딩모드 제어의 응답으로 비선형 부분 추가에 따라 오차가 최대 $0.4 \mu\text{m}$ 까지 감소되었다. 이 오차는 사용된 엔코더의 분해능이 $0.1 \mu\text{m}$ 임에 비추어 뛰어난 성능을 보인다고 할 수 있다.

이상의 결과로서 본 연구에서 제안한 서어보 시스템은 리니어모터 스테이지의 진직도 오차를 보상 시스템으로서의 적용성을 확인 할 수 있으며, 슬라이딩 모드 제어를 통해 최대 위치오차 요인인 마찰을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인 할 수 있다.

4. 결론(돋움체 11pt, 진하게)

본 연구에서는 리니어모터 스테이지에서 진직도 보상을 위해 전자석 액츄에이터로 구동되는 서보시스템을 개발하였다. 이 서보 시스템에서 마찰은 주요 외란 요소로 작용하며, 이 마찰에 의한 오차의 개선을 위해 슬라이딩모드 제어를 적용하였다. 실험 결과 제안된 서어보 시스템은 마찰에 의한 오차 요소를 잘 보상하여 진직도를 나노미터 수준으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] C. Edwards and S. K. Spurgeon, "Sliding Mode Control: Theory and Applications," TAYLOR & FRANCIS Inc, 2004.
- [2] T. J. Yeh and Y. J. Chung, "Sliding control of magnetic bearing systems," Proc of the American control Conference, pp 1622~1626, 2000.
- [3] J. E. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall, 1991.
- [4] 강민식, 정종수, "MFXLMS 알고리즘을 이용한 전자기베어링계의 외란보상 제어기-실험," 한국정밀공학 회, 제 21권, 제 2호. pp. 83~91, 2004.
- [5] 강민식, "능동자기베어링계의 슬라이딩모드 제어," 한국 소음진동공학회논문집, 제 14권, 제 5호, pp. 439~448, 2004.
- [6] 강민식, "자기베어링계에서 외란 관측기를 갖는 슬라이딩모드 제어," 대한기계학회지, 제 53D권, 제 6호, pp. 408~414, 2004.
- [7] Ogata, K., Modern Control Engineering, prentice-Hall Inc., 2004.
- [8] H. M. Gutierrez, and P. I. Ro, "Sliding-Mode Control of a Nonlinear-Input System: Application to a Magnetically Levitated Fast-Tool Servo," IEEE TRANSACTIONS INDUSTRIAL ELECTRONIC, vol. 45, No 6, pp. 921~927, 1998.