

자기부상스테이지의 제어에 관한 연구.

남택근, 전정우, 김용주
한국전기연구원

Configuration control of a magnetic levitation stage.

Taek-Kun Nam, Jeong-Woo Jeon, Yong-Joo Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 연구에서는 자기부상 방식의 스테이지 시스템 설계 및 제작을 행하고 시스템의 제어성능평가를 하고자 한다. 본 논문에서는 제어성능의 효율성을 향상 시키기 위하여 부상체(Platen)의 기계적인 모델링을 행하고 Platen의 PTP(point to point) 및 궤도추종제어가 가능한 슬라이딩 모드제어기를 제안하였다. 제안한 슬라이딩 모드제어기는 모델링 오차 및 외란에 대해서도 강한 제어성능을 얻을 수 있으며 수치시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 확인하였다

1. 서 론

최첨단 산업기술의 발달과 더불어 초정밀 위치결정기구의 중요성이 증대되고 있다. 이러한 초정밀 위치결정기구는 초정밀 가공(ultra precision machining), 광기구의 정밀한 정렬작업 및 반도체 생산라인에 투입되는 스테퍼용 스테이지(stage) 등에서 찾아 볼 수 있다. 특히 Submicrometer 클래스의 정밀도를 가지는 위치결정기구는 NT (Nano-Technology)의 핵심요소기술로서 많은 분야에 걸쳐 다양한 파급효과를 기대할 수가 있다.

본 연구에서는 향후 스테퍼용 스테이지에 적용가능한 초정밀 위치결정기구를 개발하고자 한다. 초정밀 위치결정기구의 구동방식으로는 크게 피에조 액츄에이터를 이용한 방식과 리니어 모터(linear motor) 및 공기베어링(Air bearing)을 적용한 방식으로 나눌 수 있다. 수 μm 의 이동변위를 가지는 피에조 액츄에이터는 고출력, 고정도의 특성을 발휘할 수 있으나 이동변위의 제약을 가지는 단점이 있다. 한편 가장 일반적으로 이용되고 있는 리니어모터/공기베어링의 조합방식은 고속/고정도(μm)의 위치결정기구에 많이 적용되고 있지만 가이드 및 부수적인 장치가 필요하게 되어 다(多) 자유도를 구현하기 위해서는 장치의 크기 및 시스템이 복잡해지는 단점이 있다.

한편, 상기 구동방식들의 단점을 보완할 수 있는 방식으로서 자기부상방식에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 자기부상방식의 장점으로서 시스템의 구성에 따라 구동변위 조절이 가능하고 가이드 등이 필요없는 비접촉식 구조로 입자 및 열 발생을 최소화 할 수 있다. 이러한 자기부상 스테이지와 관련된 연구로서 Tusda 등은 5자유도를 가지는 자기부상 시스템을 구성하여 $1\mu\text{m}$ 급의 정밀도를 달성하고 있다 [1]. Busch 는 반도체 장비의 검사용 프루브(probe)에 적용하기 위한 2자유도의 위치결정기구를 개발하였다 [2]. Trumper는 정밀한 자기베어링을 이용한 스테이지를 개발하여 포토리소그래피(Photo-lithography)에 응용을 시도하였다 [3]. 이 시도는 기존의 기계적인 베어링을 이용한 웨이퍼 스테이지를 대체할 자기부상방식 스테이지 연구의 시발점이 되었다. Kim [4]은 6자유도를 가지는 자기부상 스테이지를 개발하였고 Holmes는 이동범위가 큰 스캐닝 스테이지를 개발하여 서브마이크로미터의 위

치정밀도를 구현하였다 [5].

본 연구에서는 Kim [4]이 제안한 방식의 자기부상 스테이지를 도입하여 실제 시스템의 설계 및 제작을 행하여 시스템의 제어성능평가를 하고 있다. Kim 에서는 선형화된 모델에 대하여 PID제어기(lead-lag compensator)를 설계하여 제어성능을 평가했지만, 본 논문에서는 제어성능의 효율성을 향상시키기 위하여 부상체(Platen)의 기계적인 모델링을 행하고 Platen의 PTP(point to point) 및 궤도추종제어가 가능한 슬라이딩 모드제어기를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 슬라이딩 모드제어기는 모델링 오차 및 외란에 대해서도 강한 제어성능을 얻을 수 있으며 수치시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 자기부상 스테이지

본 연구에서의 자기부상 스테이지 외관은 그림 1과 같고 시스템은 크게 구동부와 계측부 그리고 시스템 제어부로 나눌 수 있다.

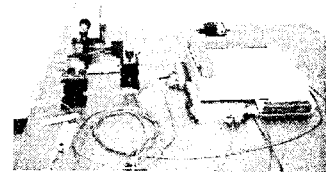


Fig. 1 Magnetic levitation stage system

구동부는 4개의 동기식 리니어모터(Stator), 1개의 Platen(mover), 그리고 Linear driver(amp)로 나눌 수 있다. 구동력은 스테이터의 3상전류에 의해 발생된 자계와 Platen의 영구자석어레이에 의해 형성된 자계간의 부상력과 추력으로 부터 얻어진다 [4]. 계측부는 Platen의 x,y 변위를 계측하기 위한 3개의 레이저 간섭계(Laser Interferometer), 스테이터 표면으로부터 Platen의 부상간극을 계측하기 위한 3개의 캐پ 센서(Capacitance Probe)로 구성되어 있다. 시스템을 제어하기 위한 인터페이스 모듈로는 PC보드, DSP보드, A/D보드, D/A보드를 이용한다.

2.2 기계적 시스템 모델링

본 절에서는 6자유도를 가지는 자기부상 스테이지(Platen)에 대해 라그랑제의 방정식을 적용하여 기계적인

운동방정식을 도출한다. Platen의 기계적인 모델링을 하기 위해서는 좌표계의 설정이 필요하며 설정된 좌표계는 그림 3과 같다.

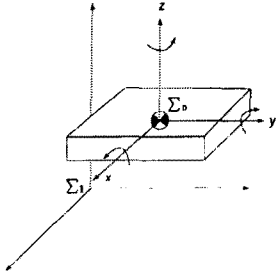


Fig. 3 Coordinates of platen

좌표계의 명칭을 Inertial frame: Σ_I (Stator의 CM를 기준으로 하는 좌표계), Body frame: Σ_O (platen의 CM를 기준으로 하는 좌표계)으로 부르고, $\eta_1 = [x, y, z]^T$, $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$ 는 Inertial frame을 기준으로 하는 위치와 회전각을 의미하며 $\nu_1 = [u, v, w]^T$, $\nu_2 = [p, q, r]^T$ 는 Body frame에서의 병진속도와 각속도를 나타낸다. 모든 회전각은 Euler각을 이용하고 Inertial frame에 대한 병진 속도는

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)\nu_1 \quad (1)$$

과 같다. 한편, Body frame에 대한 회전각속도는

$$\nu_2 = J_2^{-1}(\eta_2)\dot{\eta}_2 \quad (2)$$

가 얻어진다. 단, $J_1, J_2 \in R^{3 \times 3}$ 이다. 따라서 Body frame을 기준으로 하는 운동에너지는

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} m \nu_1^T \nu_1 + \frac{1}{2} \nu_2^T H \nu_2 \\ &= \frac{1}{2} m \dot{\eta}_1^T J_1^{-T} J_1^{-1} \dot{\eta}_1 + \frac{1}{2} \dot{\eta}_2^T J_2^{-T} J_2^{-1} H J_2^{-1} \dot{\eta}_2 \end{aligned} \quad (3)$$

와 같이 되고 위치에너지는

$$V = mgz \quad (4)$$

이다. 단, $H \in R^{3 \times 3}$ 는 관성텐서(Inertial tensor)를 나타낸다. (3), (4)로부터 시스템 전체의 Lagrangian은

$$L = T - V \quad (5)$$

가 얻어지므로 Lagrange의 운동방정식

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau$$

을 이용하여 시스템의 운동방정식은 (6)과 같이 구할 수가 있다.

$$M\ddot{q} + h_1 + h_2(q, \dot{q}) = u \quad (6)$$

단, $q = [x, y, z, \psi, \theta, \phi]^T$ 는 상태변수, $u = [f \ \tau]^T$ 는 각 축 방향의 힘과 토크를 의미하는 벡터입력이다. $M \in R^{6 \times 6}$ 는 관성행렬, h_1 은 중력항(mg)을 포함하는 벡터, h_2 는 Platen의 비선형 항을 나타낸다.

2.3 제어기의 설계

본 절에서는 라그랑제의 운동방정식을 이용하여 도출한 (6)에 대하여 $q_0 \rightarrow q$ 에 이동가능한 제어기를 설계하고자 한다. 본 논문에서는 선형, 비선형 및 파라미터 불확실성, 외란 등에도 강한 슬라이딩모드제어기를 도입하여 제어기를 설계한다.

먼저, (6)의 관성행렬을

$$M = M^0 + \Delta M \quad (7)$$

과 같이 M^0 (공칭치)와 ΔM (추정오차)의 합으로 나타낸다. 여기에서 공칭치는 Platen의 질량 및 관성에 대한 추정치를 의미하고 ΔM 은 실제값으로부터의 공칭치에 대한 추정오차를 의미한다. 그리고 ΔM 의 각 요소의 절대 상한치를

$$|\Delta M_{ij}(q)| \leq \hat{M}_{ij} \quad (8)$$

와 같이 정의한다.

먼저, 시스템이 가지는 중력의 영향을 보상하기 위해

$$u = v + h_1 \quad (9)$$

의 제어입력을 고려한다. (9)의 v 는 새로운 제어입력이고 h_1 은 Platen의 중력을 보상하기 위한 항이다. (7), (9)를 (6)에 대입하여

$$\ddot{q} = (M^0)^{-1}(v + d) \quad (10)$$

을 얻는다. 단, $d(q, \dot{q}, \ddot{q}) = -\Delta M \ddot{q} - h_2$ 는 공칭치로부터의 추정오차 및 운동방정식의 비선형 항을 나타내고 크기를 스칼라 함수 $\|d\| \leq \bar{d}$ 를 추정할 수 있는 것으로 한다. 추종제어를 행하기 위해 목표궤적으로부터 계산한 위치, 자세 및 속도의 상태변수를 q_r, \dot{q}_r 로 정의하고 추종오차를

$$e(t) = q - q_r, \dot{e}(t) = \dot{q} - \dot{q}_r \quad (11)$$

로 한다. 입력의 스위칭을 위한 스위칭평면을

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \dot{e} + \Lambda e \\ \Lambda &= \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n), \lambda_i > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

와 같이 도입한다. (12)에서는 스위칭 입력을 이용하여 $\sigma(t) \rightarrow 0$ 가 되면 $e(t)$ 는 안정한 미분방정식이 되어 $e(t) \rightarrow 0$ 이 보증되는 것을 알 수 있다.

따라서 제어문제는 상태변수 q, \dot{q} 를 (12)의 스위칭 평면에 구속시키면서 $\sigma \rightarrow 0$ 을 달성시키는 제어입력을 구하는 것이다. 이러한 제어입력을 도출하기 위해 $\sigma(t)$ 에 관한 리아프노프 함수 후보로서

$$V(\sigma) = \frac{1}{2} \sigma^T \sigma \quad (13)$$

를 생각한다. (11)의 미분치는

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma^T \dot{\sigma} \\ &= \sigma^T (\ddot{e} + \Lambda \dot{e}) \\ &= \sigma^T ((M^0)^{-1}v + (M^0)^{-1}d - \ddot{q}_r + \Lambda \dot{e}) \end{aligned} \quad (14)$$

가 되고 제어입력으로서

$$v = M^0 (\ddot{q}_r - \Lambda \dot{e} - K \frac{\sigma}{\|\sigma\|}), K > \|(M^0)^{-1}\| \hat{d} \quad (15)$$

를 고려하면

$$\dot{V} = -\|\sigma\| (K \pm (M^0)^{-1}d) \leq 0 \quad (16)$$

가 성립되고 $\sigma(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$ 가 얻어진다.

최종적인 제어입력으로서 (9), (15)로부터

$$u = M^0(\ddot{q}_r - \Lambda \dot{e} - K \frac{\sigma}{\|\sigma\|}) + h_1 \quad (17)$$

가 얻어진다.

2. 4 수치 시뮬레이션

제안한 제어알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 행하였다. Platen의 초기위치, 자세 및 목표치는 각각 $q_0 = (0, 0, 250 \mu m, 0, 1, 0, 2, 0, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$,

$q_r = (0.2, 0.2, 350 \mu m, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ 이고 Platen의 질량은 $5.47[\text{kg}]$, 중력은 $9.8[\text{m/s}^2]$,

$\Lambda = \text{diag}[3, 3, 3, 3, 3, 3]$ 으로 하였다. 공칭치 M^0 는 관성텐서(Inertia tensor)의 관성항을 실제값의 40%로 하여 시뮬레이션을 행하였고 그 결과는 그림 4와 같다.

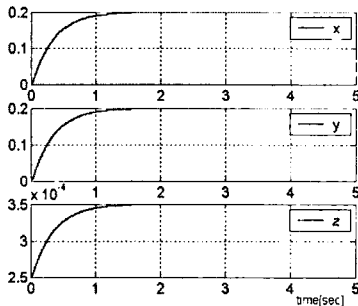


Fig. 4(a) Time evolution of states x, y, z .

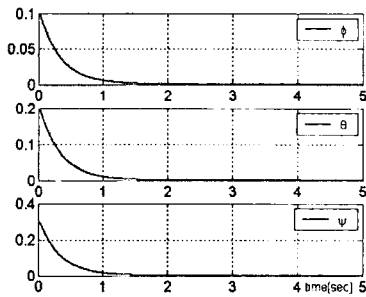


Fig. 4(b) Time evolution of states: ϕ, θ, ψ .

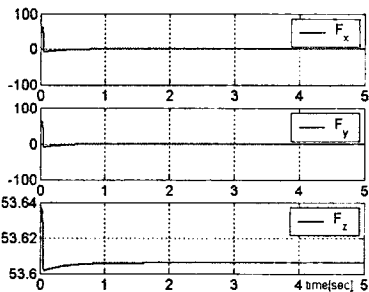


Fig. 4(c) Time evolution of inputs: f_x, f_y, f_z .

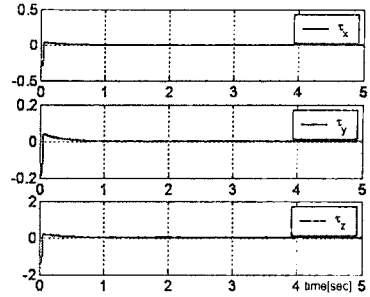


Fig. 4(d) Time evolution of inputs: τ_x, τ_y, τ_z .

그림 4(a), 그림 4(b)는 시간의 변화에 따른 상태변수의 추이를 나타내고 있고, 그림 4(c), 그림 4(d)는 각 축방향의 추진력과 토크를 나타내고 있다. 위의 결과로부터 제어목적이 달성되고 있음을 알 수 있다. (17)로부터 얻어진 힘과 토크는 대응하는 3상 전류의 입력신호로 변환되어 스테이터에 가해지게 된다^{[4],[7]}.

3. 결 론

본 논문에서는 자기부상 스테이지의 정밀한 위치제어를 위하여 Platen의 기계적인 모델링 및 초기위치에서 목적위치까지의 제어목적을 달성하기 위한 제어알고리즘을 제안하였다. 슬라이딩 모드제어기법을 적용하여 파라미터의 오차 및 외란에 대해서도 강인한 제어특성을 얻을 수 있었고 제어알고리즘의 유용성을 확인 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] M.Tsuda, T.Higuchi and S.Fujiwara, "Magnetic Levitation Servo for Flexible Assembly Automation", The International Journal of Robotics Research, vol.11, no.4, pp. 329 345, 1992.
- [2] I.J.Busch Vishniac, "Magnetically Levitated, Automated, Contact Analytical Probe Tool", Journal of IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, vol.8, no.1, pp. 72 78, 1995.
- [3] D.L.Trumper et al, "Precision Magnetic Suspension Linear Bearing", in NASA International Symposium on Magnetic Suspension Technology, pp. 89 103, 1991.
- [4] W.J.Kim, "High Precision Planar Magnetic Levitation," Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [5] M.L.Holmes, R.Hocken and D.L.Trumper, "The Long Lange Scanning Stage: a Novel Platform for Scanned Probe Microscopy", Precision Engineering, vol. 24, no. 3, pp. 191 209, 2000.
- [6] R.L.Hollis and S.E.Salcudean, "Lorentz Levitation Technology: a New Approach to Fine Motion Robotics, Teleoperation, Haptic Interface and Vibration Isolation", Proc. of 5th International Symposium on Robotics Research, 1993.
- [7] J.R.Melcher, "Continuum Electromechanics", MIT Press, 1981.