

나노급 초정밀 위치결정 시스템에 대한 슬라이딩 모드 제어기 설계

Modified Sliding Mode Control for Ultra-precision Positioning System

최인성*, 김형석**, 이우람***, 유관호****

In-Sung Choi, Hyung-Suk Kim, Woo-Ram Lee, Kwan-Ho You

Abstract - In this paper, we design a new controller for an ultra-precision positioning system. In general, time optimal control enables to reach a target position faster than others. However it shows a weakness to chattering effect. In order to solve the problem, a new control algorithm based on sliding mode control is proposed. The suggested controller is composed of LQR control and sliding mode control. By performing some simulations, we prove that the proposed controller is more robust than time optimal control under the circumstance of parameter uncertainties and external disturbances.

Key Words : ultra-precision positioning, sliding mode control, disturbance, parameter uncertainty, stage

1. 서 론

최근 마이크로프로세서의 발달과 정보사회의 급속한 발달로 아주 정밀한 전자기기들의 필요성이 대두되면서 나노 기술이 산업 현장에서 핵심 기술로 급부상되고 있다. 이러한 나노 기술의 중요한 핵심 기술 중 하나가 초정밀 위치 결정 기술인데, 초정밀 위치 결정기술은 반도체 생산 시스템, 고속 하드 디스크 드라이브, 운송 장비 등에 사용되고 있다.

초정밀 위치 결정 시스템에서 가장 중요한 것은 구동 액츄에이터이다. 초정밀 위치 결정 시스템에서는 액츄에이터의 구동 분해능도 중요하지만, 구동장치 설치의 안정성, 진동, 온도, 공기 굴절률, 공기의 흐름 등 여러 환경조건에 의한 오차에 의한 문제점들이 발생하게 된다. 그리고 시스템 내에서 생기는 비선형성 오차가 정밀도를 제한하게 된다.

이 논문에서 나노 구동 시스템을 구현하기 위해 스테이지 구동을 위한 PZT 액츄에이터와 이동 변위를 검출하기 위한 정전 용량 센서를 사용하였다. 그리고 dSPACE를 사용하여 나노 스테이지와 제어기 사이에 데이터 수집을 한다. 그때, 시스템을 정확하게 모델링하기 위해서 시스템 식별법(system identification method)을 사용하는데 이 방법을 사용하여 4차 전달함수를 구하게 된다.

우리는 시간 최적 제어에 대해서 제안한다. 시간 최적 제어는 목표지점에 최대한 빨리 도달하는 장점을 가지고 있다. 하지만 목표 지점에서 채터링(chattering) 효과를 발생시키는

치명적인 단점을 가지고 있다. 특별히 파라미터 불확실성과 외부 노이즈에 취약하다. 이 문제를 해결하기 위해, 우리는 이 논문에서 LQ 최적 제어에 기초한 슬라이딩 모드 제어에 대해서 논하고자 한다.

2. 나노 스테이지에 대한 시스템 모델링

실험을 위해 Figure-1과 같이 나노 구동 시스템을 구성하였다. 나노 스테이지(P-621.1CL)의 내부 구성으로는 스테이지의 구동을 위한 PZT 액츄에이터와 이동 변위를 검출하기 위한 정전용량 센서로 구성되어 있으며 외부 장치로는 PZT에 인가되는 전압을 증폭하기 위한 전력 증폭기(LVPZT-Amplifier : E-505), PZT의 구동에 대한 비선형성인 히스테리시스를 보정하기 위한 나노 스테이지 제어기(PZT-Servo Controller), 그리고 입력전압과 변위를 측정하고 컴퓨터와 통신하기 위한 디스플레이/인터페이스(Display/Interface : E-516) 장치로 구성되어 있다[1].

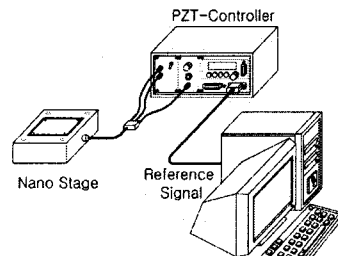


그림 1. 나노 스테이지의 구성

시스템을 정확하게 모델링하기 위해서 시스템 식별법을 사용하게 되는데 이 방법을 사용하여 4차 전달함수를 식(1)과 같이 모델링하게 된다.

저자 소개

* 準會員 : 成均館大學 電子電氣學科 碩士課程

** 準會員 : 成均館大學 電子電氣學科 碩士課程

*** 準會員 : 成均館大學 電子電氣學科 碩士課程

**** 正會員 : 成均館大學 電子電氣學科 副教授 · 工博

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2004-000-10338-0(2005))지원으로 연구되었음.

$$G(s) = \frac{0.008531s^4 - 5.957s^3 + 4050s^2 - 1.343e^6s^3 + 4.708e^8}{s^4 + 100.8s^3 + 2.192e^5s^2 + 2.075e^7s^3 + 7.589e^8} \quad (1)$$

다시 식 (1)에 나타난 4차 전달함수를 식 (2)와 같이 상태공간 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에 각 A, B, C, D 계수들은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -1.0080 \times 10^2 & -2.1920 \times 10^5 & -2.0748 \times 10^7 & -7.5886 \times 10^8 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [-6.8166 \quad 2.1800 \times 10^3 \quad -1.5195 \times 10^6 \quad 4.6435 \times 10^8], D = 8.531 \times 10^{-3}$$

3. 나노 스테이지에 대한 시간 최적 제어

어떤 시스템이 최소의 시간으로 주어진 초기상태에서 원하는 목표 상태까지 도달하도록 하는 제어 방법이 최적 시간 제어이다. 이러한 최적 시간 제어 문제에서 대부분의 시스템 모델은 연속적인 미분방정식 혹은 이산 모델로 표현된다. 이러한 시스템에는 기본적으로 초기조건과 만족되어야 하는 최종조건이 있다. 또한 부가적으로 제어제과 상태 변수에 대한 물리적 혹은 경제적인 제약조건들이 추가될 수 있다. 이 논문에서는 최적 제어 문제를 푸는 방법 중에 최소 원리에 의한 방법을 이용한다.

Pontryagin의 최소 원리[2]를 이용해서 정확한 연속 시간 최적 제어 u^* 를 구한다. u^* 를 최소화하는 비용함수(cost function)는

$$J = \int_0^T dt \quad (3)$$

가 된다.

위 식은 $J = T$ 가 되므로 결국 J 를 최소화하는 것은 최종시간을 최소화하는 것이다. 시간 최적제어의 제어 입력은 시스템의 초기 상태에서 최소 시간 내에 목표하는 상태로 시스템 상태 변수를 변화시킨다. 최대 제어입력을 $M+$ 라 하고 최소 제어입력을 $M-$ 라 하면 제어입력 $u(t)$ 의 범위는 다음과 같다.

$$M(-) \leq u(t) \leq M(+) \quad (4)$$

위에서 나타낸 식 (2)에 관한 Hamiltonian 함수는 식 (5)과 같이 정의된다.

$$H = 1 + \eta_1 x_1 + \eta_2 x_2 + \eta_3 x_3 + \eta_4 x_4 \quad (5)$$

이를 η 에 관한 식으로 나타내면

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_1 &= 1.0080 \times 10^2 \eta_1 - \eta_2 \\ \dot{\eta}_2 &= 2.1920 \times 10^5 \eta_1 - \eta_3 \\ \dot{\eta}_3 &= 2.0748 \times 10^7 \eta_1 - \eta_4 \\ \dot{\eta}_4 &= 7.5886 \times 10^8 \eta_1 \end{aligned} \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있다.

따라서 Pontryagin의 최소 원리를 이용해서 제어 입력을 $u = -M \operatorname{sgn}(\eta_1)$ (7)

으로 나타낼 수 있다.

위의 주어진 식을 가지고 matlab으로 구현하면 그림 2와 같이 나타난다.

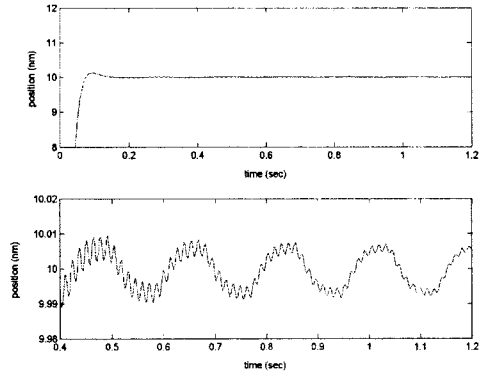


그림 2. 나노 스테이지에 대한 시간 최적 제어

시뮬레이션 결과 목표점인 10nm까지 가장 빠른 시간에 접근하는 상태를 나타내고 있다. 하지만 목표지점을 확대해 본 결과 안정되지 못하고 체터링(chattering) 효과가 큰 것을 볼 수 있다. 더욱이 외란(disturbance)이나 잡음(noise)이 많이 노출되어 있는 실환경에서 time-optimal control 방식의 제어기는 더욱 불안정한 상태를 나타낼 것이다.

이를 해결하기 위해 다음 장에서 소개되는 LQ 슬라이딩 모드 제어 방식이 외란과 잡음에 얼마큼 안정적인 결과를 주는 지 보일 것이다.

4. 최적 슬라이딩 모드 제어

슬라이딩 모드 제어기는 시스템의 상태를 미리 정의된 슬라이딩 평면 $\sigma(x) = 0$ 상에 구속시킴으로써 강인성을 얻을 수 있는 비선형 제어기법이다. 슬라이딩 모드 제어기는 시스템 모델의 불확실성과 외란이 존재할 경우에도 제어 시스템의 상태를 슬라이딩 평면에 있도록 함으로, 강인성을 보장할 수 있다. 스테이지 특성상 목표 지점에서의 진동 방지를 고려하여 제어기가 설계되어야 한다. 이것은 슬라이딩 모드 제어기 설계 시 생기는 체터링 현상을 줄이는 것과 같으며, 방법으로 는 슬라이딩 평면을 기준으로 양쪽 옆에 경계면(Δ), 즉 슬라이딩 모드 밴드 $-\Delta < \sigma(x) < \Delta$ 를 정의한다. 그리고 제어 입력의 불연속항을 근사적인 연속 항으로 바꿔 줌으로써 체터링 현상을 줄이고, 시스템의 상태가 슬라이딩 모드 밴드 내에서 움직이도록 한다.

또한 관측기(observer) 또는 추정기(estimator)를 사용하여 시스템의 상태를 예측함으로써 아래와 같은 슬라이딩 평면을 정의한다. 슬라이딩 평면이 정의되면, 다음으로 슬라이딩 모드의 도달 조건(reaching condition) 또는 Lyapunov함수를 이용하여 슬라이딩 모드에 관한 제어기를 설계할 수 있다.

식 (2)에서 나타낸 상태공간 방정식에 파라미터 노이즈를 준 것을 식 (8)과 같이 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u \\ y &= (C + \Delta C)x + (D + \Delta D)u \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)을 다시 나타내면

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \tilde{A}x + \tilde{B}u \\ y &= \tilde{C}x + \tilde{D}u \end{aligned} \quad (9)$$

와 같이 된다.

이 식의 일반해를 구하면

$$x(t) = e^{\tilde{A}t}x(0) + \int_0^t e^{\tilde{A}(t-\tau)}\tilde{B}u(\tau)d\tau \quad (10)$$

이 된다. 이 식 (10)을 이용하여 식 (11)와 같이 새로운 슬라이딩 표면을 나타낼 수 있다[3].

$$\sigma(t) = h[x(t) - e^{\tilde{A}t}x(0) + \int_0^t e^{\tilde{A}(t-\tau)}\tilde{B}K\tilde{x}(\tau)d\tau] = 0 \quad (11)$$

여기서, h 는 양의 상수의 값을 지닌 벡터이고, K 는 LQ 최적제어로 구해지는 선형피드백이득이다. LQ 이론을 이용한 피드백 제어기는 다음에 나오는 식 (10)의 비용 함수를 최소화함으로써 얻을 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)) \quad (12)$$

이 때 Q 와 R 은 비용 가중치와 임의로 선택된 양의 실수 행렬이다. 다시 말해, LQ 이론을 이용하여 $u(t) = -Kx(t)$ 라는 제어기를 설계할 수 있다[4].

다시 피드백 게인 K 는 식 (13)으로 구할 수 있다.

$$K = (R + B^T S B)^{-1} B^T S A \quad (13)$$

여기서 S 는 식 (14)의 algebraic Riccati equation(ARE)의 유일해이다.

$$A^T S A - S + Q - A^T S B (R + B^T S B)^{-1} B^T S A = 0 \quad (14)$$

슬라이딩 모드 제어 법칙은 $\sigma\dot{\sigma} < 0$ 을 만족하는 도달 상태조건을 토대로 유도된다[5].

슬라이딩 모드 제어기가 도달조건을 만족함에 따라 식 (15)와 변형된 슬라이딩 모드 제어기를 유도해 낼 수 있다.

$$u(t) = -kx(t) - Msat(\sigma) \quad (15)$$

5. 시뮬레이션 결과

제안된 알고리즘의 강인성을 보이기 위해서, 나노 스테이지에서 제안된 알고리즘을 적용하였다. 더욱이 우리는 외란과 파라미터 노이즈에 대한 안정성을 보이기 위해 시스템에 노이즈를 첨가하였다.

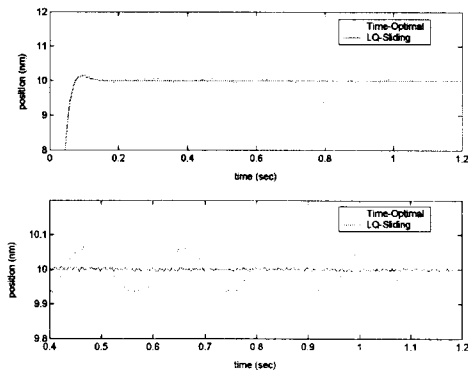


그림 4. LQ 슬라이딩 모드 제어와 시간 최적 제어의 비교

위의 그림은 식 (8)의 시스템(파라미터 노이즈를 첨가한 시스템)에서의 LQ 슬라이딩 모드 제어와 시간 최적 제어를

비교하였다.

시간 최적 시스템의 우수성은 목표지점에 빠르게 도달하는 것이다. 하지만 그림 4의 윗부분에서 볼 수 있듯이 두 제어 기법 간에 상승시간은 그렇게 차이가 나지 않는다. 이는 시간 최적 제어에 못지 않은 LQ 슬라이딩 모드 제어의 상승시간의 측면에서 우수성을 증명하는 것이다.

그리고 그림 4의 아랫부분을 보면, LQ 슬라이딩 모드 제어보다 시간 최적 제어가 10nm 부근에서 크게 흔들리는 것을 볼 수 있다. 이는 LQ 슬라이딩 모드 제어가 시간 최적 제어보다 강인성과 안정성을 가진다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

이 논문에서 우리는 나노급 위치 결정 시스템에서의 LQ 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 제안된 알고리즘은 파라미터 노이즈와 외란에 대해서 강인한 성능을 보이기 위해서 슬라이딩 모드 제어에 기초하였다.

실험 결과를 통해, 우리는 목표지점에 도달하는 상승시간을 최소화 하고 목표지점에서의 채터링 현상을 줄임으로써 시간 최적 제어와의 비교를 통해 그 우수성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Jaeho Lee, Seunghyun Kim, Joonhong Jung, Kiheon Park, "A Study on System Identification of Nano-scale Stage Using Capacitive Sensor", SungKyunKwan University, 2005.
- [2] L. I. Rozonoer, "Pontryagin Maximum principle in the Theory of Optimum Systems." Automation and Remote Control, vol. 20, pp. 1288 - 1302, 1405 - 1421, 1517 - 1532, 1959.
- [3] Kuo-Kai Shyu and Hsin-Jang Shieh, "A New Switching Surface Sliding-Mode Speed Control for Induction Motor Drive Systems"
- [4] J. J. E. Slotine and S. S. Sastry, "Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces with applications to robot manipulators" Int. J. Contr., vol. 39, No. 2, 1983.
- [5] Wilfrid Perruquetti and Jean Pierre Barbot, "Sliding Mode Control in Engineering", Marcel Dekker, Inc., 2002, pp. 14-17.