

나노 스테이지에 대한 슬라이딩-모드 제어 기반의 강인 최적 제어기 설계

Design of Robust Optimal Controller for Nano Stage using Sliding-mode Control

최인성(*), 최승옥(**), 유관호(***)
In-Sung Choi, Seung-Ok Choi, Kwan-Ho You

Abstract - In this paper, we design a robust optimal controller for ultra-precision positioning system. Generally, it is hard to control the nanometric scale positioning system because of the parameter uncertainties and external disturbances. To solve this problem, we suggest a control algorithm based on the modified sliding-mode control and the LQ control in an augmented system. The augmented system is composed of additional state variables: state estimates and control input in the nominal system. Through comparison with LQ optimal control, it is verified that the proposed control algorithm is more robust to the unexpected parameter variations and external noises.

Key Words : ultra-precision positioning, sliding-mode control, disturbance, nano stage, Kalman filter

1. 서 론

최근 급격한 산업의 발전으로 인해 다양한 분야에서 나노 기술의 필요성이 대두되고 있다. 나노 기술에서 초정밀 위치 결정 기술은 중요한 핵심 기술 중 하나이다. 특히, 초정밀 위치 결정 기술은 우주 항공, 통신, 의료, 반도체 제조 등에서 눈부신 발전을 이루고 있다. 구동 분해능은 초정밀 위치 결정 시스템에서 아주 중요하다. 그러나 이것은 실 환경에서 진동, 공기 굴절률, 구동 장치의 안정성, 히스테리시스 등과 같은 다양한 외부 노이즈에 노출되어 있다. 그러한 시스템에서 발생된 비선형성은 구동 시스템의 정밀도를 제한하게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 LQ (linear quadratic) 제어와 슬라이딩 모드 제어로 구성된 강인 최적 제어기를 제안한다. 슬라이딩 모드 제어는 시스템 상태가 슬라이딩 표면을 가로지를 때 발생하는 제어 입력의 급격한 스위칭으로 인하여 채터링(chattering) 효과를 발생시킨다. 이는 액츄에이터에 악영향을 끼치게 된다. 이때 LQ 제어의 목적 함수는 상태의 흔들림과 입력의 변화량을 최소화시키기 위해 정의된다. 그리고 칼만 필터의 상태 관측기와 제어 입력을 시스템에 보조 상태 변수로 사용하여, 외란에 강인한 시스템을 설계한다. 최종적으로 이렇게 보강된 시스템은 슬라이딩 모드 제어에 대한 스위칭 면에 적용되어진다. LQ 제어기와의 비교를 통해 제안된 제어기의 강인한 성능을 보이고자 한다.

2. 초정밀 위치 결정 시스템에 대한 모델링

본 논문에서는 초정밀 위치 결정 시스템을 구성하기 위해 그림 1과 같이 나노 구동 시스템을 구성하였다. 나노 스테이지(P-621.1CL)의 외부 구성으로는 우선 나노 스테이지는 마이크로 스테이지 위에 설치하였고 PZT(piezoelectric actuator)-controller에 연결하였다. PZT의 구동에 대한 비선형성인 히스테리시스를 보정하기 위해 나노 스테이지 서보 제어기(PZT-Servo Controller)를 이용하였고, 변위와 입력 전압을 측정하고 컴퓨터와 인터페이스를 위해 Display/Interface(E-516)를 사용하였다. PZT에 인가되는 전압을 증폭하기 위해 LVPZT-Amplifier(E-505)를 사용하고 제어 시스템의 실시간 인터페이스를 위해 dSPACE 컨트롤러 보드(DS1104)에 적용하였다. 또한 내부 구성으로는 스테이지 내에서의 구동을 위해서 PZT 액츄에이터와 이동 변위를 검출하기 위해서 정전 용량 센서를 가지고 구성하였다.

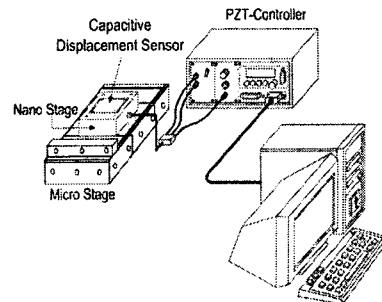


그림 1. 나노 스테이지 구성도

저자 소개

- * 최인성 : 成均館大學 電子電氣學科 碩士課程
 - ** 최승옥 : 成均館大學 電子電氣學科 碩士課程
 - *** 유관호 : 成均館大學 電子電氣學科 副教授 · 工博
- 본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(R01-2004-000-10338-0)지원으로 수행되었음.

우리는 시스템을 모델링하기 위해서 시스템 식별법 (System Identification method)을 사용한다. 이 방법을 통하여 3차로 된 전달함수를 구해낼 수 있다.

$$G(s) = \frac{1.491s^2 - 328.2s + 1.497e^6}{s^3 + 529.8s^2 + 4.367e^1s + 1.478e^6} \quad (1)$$

위 식(1)의 전달함수를 다시 상태 공간 방정식으로 나타내면 아래와 같다.

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

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1.478 \times 10^6 & -4.367 \times 10^1 & -5.298 \times 10^2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = [1.491 \quad -328.2 \quad 1.497 \times 10^6]$$

3. LQ 최적 제어

이 장에서는 LQ 최적 제어를 가지고 초정밀 위치 결정 시스템에 대하여 적용한다. LQ 제어를 설계하기 위해서, 우리는 식 (3)와 같이 외란을 고려한 시스템을 가정한다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= A\tilde{x}(t) + B\tilde{u}(t) + Gw \\ y(t) &= C\tilde{x}(t) + D\tilde{u}(t) + v \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, w 와 v 는 각각 프로세스 노이즈와 측정 노이즈를 나타내며, G 는 프로세스 노이즈 계수 값을 나타낸다. LQ 이론을 사용한 피드백 제어기는 식 (4)의 목적함수를 최소화함으로써 유도되어진다.

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (4)$$

이때 Q 와 R 은 목적 가중치이며 임의의 양의 실수 행렬이다. 그리고 피드백 게인은 식 (5)로부터 획득되어 진다.

$$K = (R + B^T S B)^{-1} B^T S A \quad (5)$$

여기서 S 는 식 (6)의 Algebraic Riccati equation(ARE)의 유일 해이다.

$$A^T S A - S + Q - A^T S B (R + B^T S B)^{-1} B^T S A = 0 \quad (6)$$

이제 LQ 최적 제어 문제의 해를 사용하여 다음의 상태 피드백 제어기를 설계할 수 있다 [1].

$$u(t) = -Kx(t) \quad (7)$$

위의 주어진 식을 가지고 matlab으로 구현하면 그림 2와 같이 나타난다

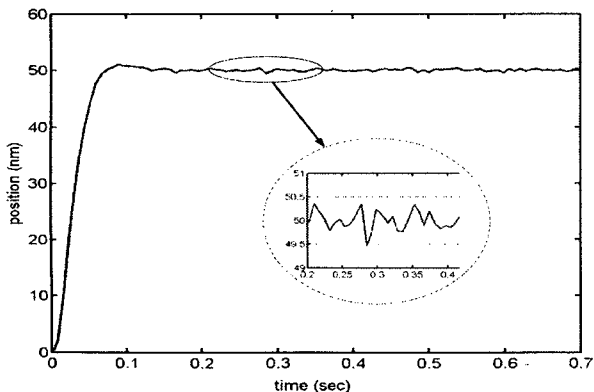


그림 2. 나노 스테이지에 대한 LQ 최적 제어

시뮬레이션 결과 목표점인 50nm까지 도달하는 시간이 0.1 초보다 적게 걸린다. 또한 등근 원 안에 확대한 그림을 보면 49.5 ~ 50.5nm의 범위 안에서 흔들리는 현상을 보게 된다.

4. 슬라이딩 모드 제어 기반의 강인 제어기 설계

이 장에서는 LQ 최적 제어를 기반으로 한 보강된 슬라이딩 모드 제어기를 제안한다.

4.1 칼만 필터 기법에 기반한 증가된 시스템

식 (3)으로부터 모든 상태 측정을 할 수 없기 때문에 우리는 측정되지 않은 상태값들을 얻어내기 위해 관측기(estimator)를 사용해야 한다. 따라서 칼만 필터는 상태 관측기로서 사용되어 진다 [2].

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - C\hat{x}(t) - Du(t)] \quad (8)$$

여기서 L 은 칼만 필터 게인이고 \hat{x} 는 x 의 상태 관측기이다. 적은 양의 외란과 파라미터 불확실성에도 불구하고 슬라이딩 모드 제어에서 채터링 효과가 발생되기 때문에 우리는 제어 입력을 새로운 상태 변수로 더해준다. 따라서 우리는 새로운 상태 벡터와 제어 입력을 정의한다.

$$\tilde{x}(t) = [x(t) \quad \hat{x}(t) \quad u(t)]^T, \quad w(t) = \dot{u}(t) \quad (9)$$

위의 식을 이용해서 상태 공간 방정식을 나타내면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= \Phi \tilde{x}(t) + \Gamma w(t) + n \\ \tilde{y}(t) &= H \tilde{x}(t) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} A & 0 & B \\ LC & A-LC & B \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$H = [0 \quad C \quad 0], \quad n = \begin{bmatrix} Gw \\ Lw \\ 0 \end{bmatrix}$$

4.2 LQ 최적 제어를 기반 한 슬라이딩 모드 제어

초정밀 위치 결정 시스템에서의 지속적인 작은 흔들림은 심각한 문제를 발생시킨다. 그렇기 때문에 제안된 제어기는 채터링 효과를 감소시키기 위해 설계된다. 이 문제를 해결하기 위해 위에 증가된 시스템에 LQ 최적 제어와 슬라이딩 모드 제어를 기반 한 변형된 제어기를 설계한다.

강인 최적 제어기를 설계하기 위해 우선 식 (10)에서 외란이 없는 시스템에 대한 일반해를 구한다.

$$\tilde{x}(t) = e^{\Phi t} \tilde{x}(0) + \int_0^t e^{\Phi(t-\tau)} \Gamma w(\tau) d\tau \quad (11)$$

식 (11)의 일반해를 가지고 식 (10)의 시스템 모델링에 대한 새로운 슬라이딩 면을 정의할 수 있다 [3].

$$\sigma(\tilde{x}) = h \left[\tilde{x}(t) - e^{\Phi t} \tilde{x}(0) + \int_0^t e^{\Phi(t-\tau)} \Gamma K \tilde{x}(\tau) d\tau \right] \quad (12)$$

여기서 h 는 양의 상수의 값을 가진 벡터이고, K 는 LQ 최

적 제어로 구해지는 선형 피드백 이득이다. LQ 이론을 이용한 피드백 제어기는 다음의 목적 함수를 최소화함으로써 유도된다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [\tilde{x}^T(t) Q \tilde{x}(t) + w^T(t) R w(t)] dt \quad (13)$$

피드백 게인은 다음으로부터 구해진다.

$$K = (R + \Gamma^T S \Gamma)^{-1} \Gamma^T S \Phi \quad (14)$$

여기서 S는 식 (15)의 Algebraic Riccati equation(ARE)의 유일해이다.

$$\Phi^T S \Phi - S + Q - \Phi^T S \Gamma (R + \Gamma^T S \Gamma)^{-1} \Gamma^T S \Phi = 0 \quad (15)$$

슬라이딩 모드 제어는 $\sigma\sigma < 0$ 을 만족하는 도달 상태조건을 토대로 유도된다 [4]. 슬라이딩 모드 제어기가 이 도달 조건을 만족함으로써 식 (16)과 같이 변형된 슬라이딩 모드 제어를 설계할 수 있다.

$$w(t) = -K\tilde{x}(t) - \mu \text{sat}[\sigma(\tilde{x})] \quad (16)$$

여기서 $\text{sat}[\cdot]$ 는 saturation 함수를 의미한다.

5. 시뮬레이션 결과

우리는 제안된 알고리즘의 강인한 성능을 시뮬레이션 결과를 통해 증명하고자 한다. 제안된 알고리즘의 효과를 확인하기 위해서 나노 스테이지의 시스템 모델에 강인 슬라이딩 모드 제어기를 적용하였다. 더욱이 파라미터 불확실성과 노이즈 혹은 외란에 대한 강인성을 보이기 위해 시스템 모델에서 각각의 상태들에 5% 미만의 크기를 갖는 노이즈들을 첨가했다. 우리는 앞에서 설명한 두개의 제어 알고리즘(LQ 제어 : LQC, 보강된 시스템에서의 LQ 슬라이딩 모드 제어 : ALQS)을 시뮬레이션을 통해 비교해 보았다

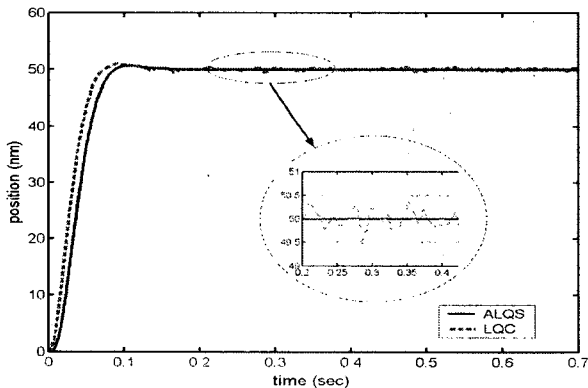


그림 3. 보강된 LQ 슬라이딩 모드 제어와 LQ 제어의 비교

그림 3에서 보듯이 LQC는 ALQS보다 상승시간(정상상태 응답의 10%~90%에 이르는 시간)이 0.01초 정도 빠르다. 안정화(2% 혹은 5%) 하는데 걸리는 정착 시간의 경우 역시 LQC가 0.03초 정도 빠른 결과를 볼 수 있게 된다. 하지만 이 시간적 차이는 그리 큰 차이가 아니라는 것을 알 수 있다.

초정밀 위치 결정 시스템의 목적 중 하나인 목표 지점에서 얼마나 정확한 위치 추종이 이루어지는가에 대한 관점에서 두 그림을 비교하였다. 그림 3의 원 안에 나타난 그림을 보게 되면 LQC의 경우 ALQS보다 목표지점인 50nm부근에서 상당히 큰 흔들림을 볼 수 있다. 이것은 초정밀 위치 결정 시스템에서 ALQS가 LQC보다 강인성과 안정성을 가진다는 것을 증명하는 것이다.

6. 결 론

이 논문에서 우리는 초정밀 위치 결정 시스템에서 강인 최적 LQ 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 제안된 제어 알고리즘은 파라미터 불확실성과 외란에 대한 강인성을 보장하기 위해서 슬라이딩 모드 제어를 기초로 하였다. 더욱이, 우리는 칼만 필터로부터 상태 관측과 제어 입력을 사용하여 채터링 효과를 줄이도록 했다.

시뮬레이션을 통해 우리는 상승 시간을 최소화 하고 목표 지점에서의 채터링 현상을 줄임으로써 LQ 최적 제어와의 비교를 통해 제안된 제어기의 우수성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Slotine, J. J., Sastry, S. S., "Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces with application to robot manipulators", International Journal of Control 38, (1983) 465-492
- [2] Brown, R. G., Hwang, P. Y., "Introduction to random signals and applied Kalman filtering", Third edition, John Wiley & Sons (1997)
- [3] Shyu, K. K., Shieh, H. J., "A New Switching Surface Sliding-Mode Speed Control for Induction Motor Drive Systems", IEEE Trans. Power Electronics 11, (1996) 660-667
- [4] Perruquetti, W., Barbot, J. P., "Sliding Mode Control in Engineering", Marcel Dekker, Inc. (2002)