

적응형 퍼지-칼만 필터 기반의 초정밀 위치 결정 시스템 제어

최인성, 최승옥, 유관호
성균관대학교, 정보통신공학부

An Approach of Ultra-Precision Positioning System using Adaptive Fuzzy-Kalman Filter Observer

In-sung Choi, Seung-ok Choi, Kwan-ho You
Sungkyunkwan University, School of Information and Communication Engineering

Abstract - 본 논문에서는 초정밀 위치 결정 시스템에서 보다 정확한 제어를 위한 새로운 제어기를 설계한다. 외란을 고려한 시스템의 경우, 환경이 달라질 때마다 측정 노이즈를 정확하게 알아내기란 쉽지 않다. 따라서 측정 장치의 정확성을 나타낼 수 있도록 칼만 필터 추정기와 퍼지 이론을 이용하여 정확한 측정 오차값을 구한다. 이때, 파라미터 불확실성과 외란에 강한 제어를 위해 슬라이딩 모드 제어기와 LQ 최적 제어기가 적용된다. 최종적으로, 제안된 제어기와 시간 최적 제어기의 성능비교를 통하여 보다 강인하고 안정된 성능개선을 증명한다.

1. 서 론

마이크로프로세서를 통한 정보사회의 발전과 더불어 나노기술에 대한 필요성이 급상하고 있으며, 여러 산업 분야에서 중요한 기술로 인식되어져 가고 있다. 초정밀 위치 결정 기술은 나노 기술의 중요한 부분을 차지하고 있으며, 고밀도 하드디스크 드라이브, 메모리, 반도체 웨이퍼, 통신 분야에서 적용되고 있다.

초정밀 위치 결정 시스템에서 구동기 분해능은 중요한 부분을 차지하지만 진동, 온도, 공기 굴절률, 구동장비의 안정성과 같은 외부 조건에 의해 영향을 받는다. 그리고 정밀도 또한 제어 시스템에서 발생하는 비선형성에 의해 제한받게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해서, 우리는 퍼지 이론과 칼만 필터를 기반한 슬라이딩 모드 제어와 LQ (Linear Quadratic) 최적 제어로 구성된 강인 최적 제어기를 설계한다. 외란을 고려한 시스템의 경우, 환경이 달라질 때마다 측정 노이즈를 정확하게 알아내기란 쉽지 않다. 따라서 측정 장치의 정확성을 나타낼 수 있도록 칼만 필터 추정기와 퍼지 이론을 이용하여 정확한 측정 오차값을 구한다. 그리고 슬라이딩 모드 제어는 시스템의 상태가 슬라이딩 면을 통과할 때 발생하는 제어 입력의 급격한 스위칭으로 인해 채터링 효과를 발생 시키게 되어 액츄에이터에 악영향을 끼치게 된다. 이때 LQ 최적 제어 목적함수는 제어 입력의 변화량과 상태의 흔들림을 최소화시키게 사용된다. 마지막으로 시간 최적 제어와의 비교를 통해 제안된 제어기의 강인한 성능을 보이고자 한다.

2. 시스템 모델링 및 DoM

2.1 시스템 모델링

우리는 실험에 필요한 초정밀 위치 결정 시스템을 그림 1과 같이 구성하였다. 나노 스테이지 (P-621.1CL)의 내부 구성으로는 이동 변위를 검출하기 위해서 정전용량 센서와 스테이지의 구동을 위한 PZT 액츄에이터 (piezoelectric actuator)로 구성되어 있으며, 외부 구성으로는 우선 마이크로 스테이지 위에 나노 스테이지를 설치하였고 PZT-controller에 연결하였다. PZT를 구동하는데 발생하는 비선형성인 히스테리시스를 보정하기 위해 나노 스테이지 서보 제어기 (PZT-Servo Controller), 변위와 입력 전압을 측정하고 컴퓨터와 인터페이스를 위한 Display/Interface (E-516), PZT에 인가되는 전압을 증폭하기 위해 LVPZT-Amplifier (E-505), 그리고 제어 시스템의 실시간 인터페이스를 위한 dSPACE controller 보드 (DS1104)를 이용하여 구성하였다.

이 시스템을 모델링하기 위해 시스템 식별법 (System Identification method)을 적용한다. 이 방법을 이용하여 4차로 된 전달함수를 구할 수 있다.

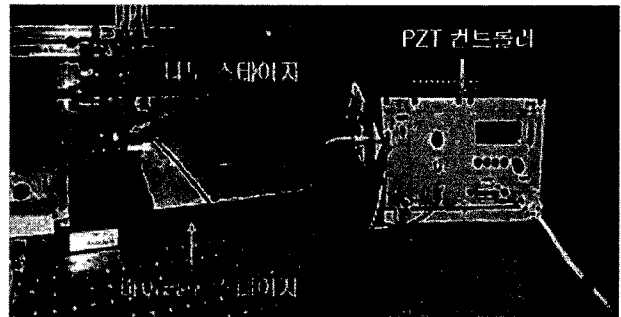


그림 1. 나노 스테이지 구성도

$$G(s) = \frac{0.001841s^3 + 0.003945s^2 + 0.001163s + 0.001184}{s^4 - 1.494s^3 - 0.2096s^2 + 1.121s - 0.408} \quad (1)$$

우리는 다시 식 (1)을 다음과 같이 이산시간 상태공간 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k \end{aligned} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 9.4217 \times 10^{-1} & -1.6188 \times 10^{-1} & 1.5499 \times 10^{-1} & 2.5039 \times 10^{-3} \\ -5.0158 \times 10^{-2} & 7.0433 \times 10^{-1} & 2.2706 \times 10^{-2} & 8.6337 \times 10^{-2} \\ -3.5786 \times 10^{-2} & 6.0251 \times 10^{-2} & 7.1964 \times 10^{-1} & 1.32 \times 10^{-1} \\ -1.1425 \times 10^{-2} & 1.1425 \times 10^{-2} & -7.2312 \times 10^{-2} & -8.7164 \times 10^{-1} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -3.1787 \times 10^{-2} \\ 1.2895 \times 10^{-1} \\ 1.8038 \times 10^{-1} \\ -3.0447 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$C = [5.1818 \times 10^0 \quad 1.0708 \times 10^0 \quad 1.5692 \times 10^{-1} \quad -5.5698 \times 10^{-2}]$
여기서 샘플링 시간은 0.002초이다.

2.2 Degree of Matching

측정 환경이 달라질 때마다 측정 노이즈를 정확하게 알아내기란 쉽지 않다. 따라서 측정 장치의 정확성을 나타낼 수 있도록 칼만 필터 추정기와 퍼지 이론을 이용하여 정확한 측정 오차값을 구하는데 이를 DoM 기법이라고 한다[1][2]. DoM을 적용하기 위해 식 (3)과 같이 외란을 포함하는 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + Gw \\ y_k &= Cx_k + Du_k + v \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, w 와 v 는 각각 프로세스 노이즈와 측정 노이즈를 나타내며, G 는 프로세스 노이즈 계수 값을 표현한다.

w 와 v 는 평균이 0이고, 공분산 행렬이 각각 Q , R 인 백색잡음이다. 공분산 행렬 R 은 측정 장치의 정확성을 나타낸다. 공분산 행렬 Q 는 정확하게 알고 있다는 것을 가정된 상태에서, 측정 노이즈의 공분산 행렬 R 을 추정하는 알고리즘을 유도한다. 이를 위해서 covariance-matching으로 알려진 기본 아이디어를 사용한다. 이 기법은 잔차(Residual)의 공분산에 대한 실제적인 값과 이론적인 값(theoretical value)을 일치시키기 위한 것이다.

칼만 필터 알고리즘으로부터 획득된 이론적인 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$S_k = C_k P_k^- C_k^T + R_k \quad (4)$$

여기서, $P_k = E(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T$ 이고 $P_{k-1}^- = A_k P_k A_k^T + Q_k$ 이다.

또한 실제적인 값의 공분산 행렬은 N 의 사이즈를 가진 움직이는 추정 윈도우 안에서 평균을 취하여 그것의 샘플 공분산에 의해 대략화된다. 그것은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{C}_{r,k} = \frac{1}{N} \sum_{i=i_0}^N r_i r_i^T \quad (5)$$

여기서, $i_0 = k - N + 1$ 은 추정 윈도우 안에서의 첫 번째 샘플이다. 윈도우 사이즈 N 은 통계적인 스무딩(smoothing) 처리를 해주기 위해 경험적으로 선택되어진다.

따라서, r_k 의 실제적인 공분산이 이론적인 값과의 차이를 보인다면 그때 이 차이를 보정하기 위해서 R 값을 조정해야 한다. 그러기 위해서 새로운 변수를 정의하게 되는데 이것을 바로 DoM 이라고 한다.

$$DoM_k = S_k - \hat{C}_{r,k} \quad (6)$$

우리는 다시 식 (6)번의 내용을 퍼지 제어 시스템으로 적용시킨다. 퍼지 제어 시스템을 적용시키는데 추론 규칙이 필요하다. 따라서 우리는 세 가지 If-then 규칙을 얻어낼 수 있다.

1. If $DoM \geq 0$, then R 을 유지
2. If $DoM > 0$, then R 을 줄임
3. If $DoM \leq 0$, then R 을 증가

그리고 R 은 다음과 같이 조정된다.

$$R_k = R_{k-1} + \Delta R_k \quad (7)$$

3. 슬라이딩 모드 제어를 기반 한 강인 최적 제어기 설계

초정밀 위치 결정 시스템에서 발생하는 지속적인 작은 흔들림은 액추에이터에 심각한 문제를 야기시킨다. 이때 발생하는 지속적인 작은 흔들림을 채터링 효과라고 하는데 이를 감소시키기 위해 LQ 최적 제어와 슬라이딩 모드 제어를 기반으로 한 강인 최적 제어기를 설계한다 [3][4].

제안한 제어기를 설계하기 위해 우선 식 (3)에서 노이즈를 고려하지 않은 시스템에 대한 일반 해를 구하면 다음과 같다.

$$x_k = A^k x_0 + \sum_{m=0}^{k-1} A^{k-1-m} B u_m \quad (8)$$

이제 우리는 식 (8)을 가지고 새로운 슬라이딩 면을 정의할 수 있다.

$$S_k = h[x_k - A^k x_0 + \sum_{m=0}^{k-1} A^{k-1-m} B u_m] \quad (9)$$

여기서 h 는 양의 상수 값에 대한 벡터가 되고, K 는 LQ 최적 제어로 획득한 선형 피드백 이득이다. LQ 이론을 이용한 피드백 제어기는 다음에 나오는 식 (10)의 목적 함수를 최소화함으로써 구할 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k) \quad (10)$$

여기서 Q 와 R 은 목적 가중치와 임의의 양의 실수 형태의 행렬이다. 즉, LQ 이론을 이용하여 $u(t) = -Kx(t)$ 라는 제어기를 설계할 수 있게 된다 [5]. 피드백 이득 K 는 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$K = (R + B^T S B)^{-1} B^T S A \quad (11)$$

식 (11)의 S 는 다음의 algebraic Riccati equation (ARE)의 유일한 해로 나타낼 수 있다.

$$A^T S A - S + Q - A^T S B (R + B^T S B)^{-1} B^T S A = 0 \quad (12)$$

슬라이딩 모드 제어 법칙은 다음과 같은 도달 상태 조건을 만족한다.

$$S_k \Delta S_k < 0, \Delta S_k = S_{k+1} - S_k, S_k \neq 0 \quad (13)$$

따라서 슬라이딩 모드 제어기는 식 (13)의 도달조건을 만족함으로써 다음과 같은 새로운 슬라이딩 모드 제어기를 유도하게 된다.

$$u_k = -kx_k - Msat(\sigma) \quad (14)$$

여기서 $sat(\cdot)$ 는 saturation 함수를 의미하며, M 은 상수 값을 나타낸다.

4. 시뮬레이션 결과

본 장에서 우리는 제안된 제어기의 강인한 성능을 시뮬레이션 결과를 통해 증명하고자 한다. 나노 스테이지의 시스템 모델에 제안된

알고리즘을 적용하여 그 효과를 확인한다. 또한, 파라미터 불확실성과 외란에 대한 강인성을 보이기 위해 각각의 상태들에 10% 미만 크기의 노이즈들을 고려했다. 우리는 앞에서 설명한 DoM 기반의 LQ-슬라이딩 모드 제어 (DLSC)와 최소의 시간으로 주어진 초기상태에서 원하는 목표 상태까지 도달하는 제어 방법인 최적 시간 제어 (TOC)에 대하여 시뮬레이션을 통해 성능을 비교한다.

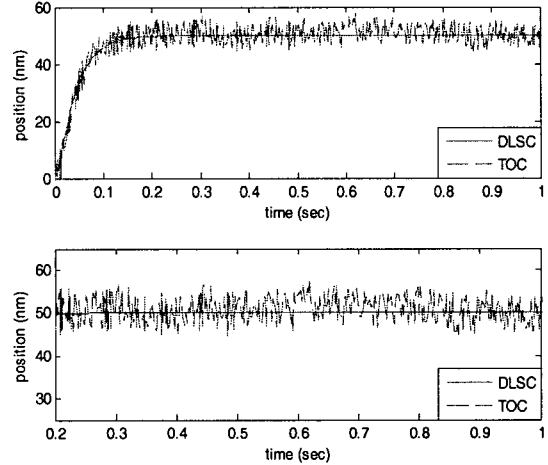


그림 2. DLSC와 TOC의 비교

시뮬레이션 결과, DLSC는 목표지점에 빠르게 도달하는 우수성을 가진 TOC에 비해 도달시간의 경우 큰 차이점을 보이지 못한다. 이는 DLSC가 상승시간의 측면에서의 우수함을 나타내는 것이다. 그리고 그림 2의 아래부분을 보게 되면 TOC의 경우, 목표지점인 50nm의 근처에서 상당한 흔들림을 보이고 있다. 반면 DLSC의 경우, 목표지점을 미세한 오차는 발생하지만 안정된 도달 상태를 보이고 있다. 최종적으로 DLSC가 TOC보다 상승시간의 최소화과 목표지점에서 정확하게 추종하는 두가지 측면에서 강인함과 안정성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서 우리는 나노미터급 위치 결정 시스템에서의 강인 제어기를 설계하였다. 환경이 달라질 때마다 측정 노이즈를 정확하게 알아내기 위해 DoM 기법을 기반으로 하였고, 파라미터 불확실성과 외란에 대해서 강인한 성능을 보이기 위해 LQ 최적 제어와 슬라이딩 모드 제어를 적용하였다.

시뮬레이션 결과를 통하여, 상승시간의 최소화와 목표지점에서의 보다 정확한 추종성을 보이기 위해 시간 최적 제어와 비교를 하였고, 개선된 강인성과 안정성을 증명하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2004-000-10338-0(2006))지원으로 연구되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] P.J. Escamilla-Ambrosio and N. Mort, "A hybrid kalman filter-fuzzy logic architecture for multisensor data fusion", IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2001.
- [2] R.G. Brown, and P.Y. Hwang, "Introduction to random signals and applied kalman filtering", Third edition, John Wiley & Sons, 1997.
- [3] K.K. Shyu, and H.J. Shieh, "A new switching surface sliding-mode speed control for induction motor drive systems", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 11, no. 4, pp. 660-667, 1996.
- [4] W. Gao, Y. Wang, and A. Homaifa, "Discrete-time variable structure control systems", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 42, no. 2, pp. 117-122, 1995.
- [5] J.J. Slotine, S.S. Sastry, "Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces with application to robot manipulators", International Journal of Control, vol. 38, no. 2, pp. 465-492, 1983.