

정밀제어를 위한 이중 스테이지 액추에이터 시스템의 설계 및 제어

Design and Control of Dual Stage Actuator Systems for Precise Control

*이승훈¹, #남경매¹, 김형종¹

*S. J. Lee¹(sjlee10@kitech.re.kr), #K. Y. Nam¹(robotnam@kitech.re.kr), Hyungjong Kim¹

¹한국생산기술연구원

Key words : Dual Stage, Disturbance Observer (DOB), Stepper Motor, Piezo Actuator

1. 서론

이중 스테이지의 초정밀 위치 제어 기술은 제조 장비에서 뿐만 아니라 초정밀 제품의 측정 및 시험 장치로서 제품의 개발 및 양산에 매우 중요한 요소이다[1].

이중 액추에이터 스테이지의 제어기술 중 LQG/LTR와 같은 MIMO 제어 방법은 병렬시스템 모델을 사용하여 액추에이터의 간섭현상을 제거하여 외란, 불확실성, 강인성을 고려하여 제어할 수 있다[2]. 하지만, 외란에 대해 완전히 자유로울 수 없으며, 외란에 대해 정량적인 접근이 어렵다.

본 연구에서는 위의 LQG/LTR기법을 기반으로 외란에 대한 제어 정밀성을 높이기 위하여 외란 관측기(Disturbance Observer)를 추가한다. 그래서 외란에 대한 강인성이 개선된 것을 실험을 통해 보일 것이다.

2. 이중 스테이지 시스템 모델링

이중 스테이지 모델은 다음과 같이 대변위(coarse actuator)와 미세변위(fine actuator) 두 부분으로 나누어 모델링 가능하다. 이때, 두 액추에이터간의 간섭부분이 발생하며, 이 간섭에서 일반적으로 미세변위운동은 대변위운동에 영향을 주지 않는다고 가정할 수 있다[2].

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -(k_1+k_2) & -(c_1+c_2) & k_2 & c_2 \\ m_1 & m_1 & m_1 & m_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -(k_2+k_3) & -(c_2+c_3) \\ & & m_2 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_1}F_1 \\ 0 \\ \frac{1}{m_2}(F_2+d) \end{bmatrix}, y = x_1 + x_3$$

여기서 m_1 은 미세변위 액추에이터의 질량, m_2 는 대변위 구동부의 질량, k_1 은 미세변위 액추에이터의 탄성 계수, k_2 는 대변위 구동부의 탄성계수, k_3 는 힌지의 탄성 계수, c_1 은 미세변위 액추에이터의 감쇠 계수, c_2 는 대변위 구동부의 감쇠 계수, c_3 는 힌지의 감쇠 계수, x_1 은 미세변위 액추에이터의 변위, x_3 는 대변위 구동부의 변위, F_1 은 미세변위 액추에이터에 가해지는 힘, F_2 는 대변위 구동부에 가해지는 힘, d 는 대변위 구동부의 입력외란을 의미한다.

3. 이중 스테이지 시스템을 위한 외란관측기

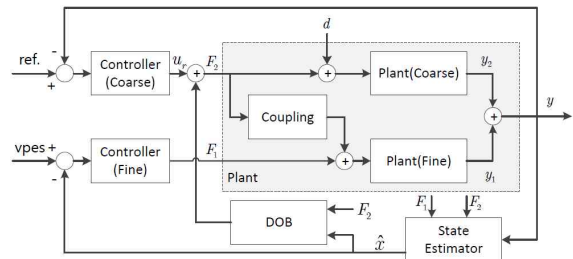


Fig. 1 전체 제어 블록도

Fig. 1은 전체 제어기의 구조를 보여주고 있다. 여기서 제어기(Controller)와 상태관측기(State Estimator)는 기존 논문의 내용을 참고 한다[2]. 관측기 이득과 되먹임 이득은 다음과 같이 설정하였다.

$$L = [0.1853 \ 1.6722 \ 0.8057 \ 17.7295]^T, \\ K = \begin{bmatrix} 2.1063 & 1.1986 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.231 & 0.0778 \end{bmatrix}^T$$

본 논문에서 제안한 외란관측기(DOB)는 대변위

엑추에이터의 외란을 제거하기 위한 부분외란 관측기(PDOB)를 제안한다[3]. 제안된 외란 관측기의 Q_A 필터와 Q_B 필터는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$Q_A \begin{cases} \dot{q}_1 = q_2 \\ \dot{q}_2 = -\frac{a_0}{\tau} q_1 - \frac{a_1}{\tau} q_2 + \frac{a_0}{\tau} \hat{x}_3 \end{cases}$$

$$Q_B \begin{cases} \dot{p}_1 = p_2 \\ \dot{p}_2 = -\frac{a_0}{\tau} p_1 - \frac{a_1}{\tau} p_2 + \frac{a_0}{\tau} (p_1 - \rho \dot{q}_2 + u_r) \end{cases}$$

여기서, $1/\rho$ 는 외란의 τ 입력 상수 값 $1/m_2$ 이다.

4. 실험 결과

Fig. 2는 실험 환경을 보여준다. Fig. 3은 스테이지의 분해능 결과를 보여주는데 30nm 단위로 초정밀 위치 제어의 구현을 보여주고 있다. Fig. 4는 이중 액추에이터 시스템의 500nm 단위의 제어 결과를 보여주고 있다. 두 개의 액추에이터의 유기적으로 동시에 제어가 되는데, 초기에는 피에조(미세 변위) 액추에이터의 응답 특성이 빠른 경향이 있으며 스텝모터(대변위) 구동부가 입력 신호를 따라 갈수록 변위가 작아지는데, 이것은 피에조 액추에이터가 스텝모터 구동부의 위치 오차를 잘 따라서 제어하고 있음을 알 수 있다.

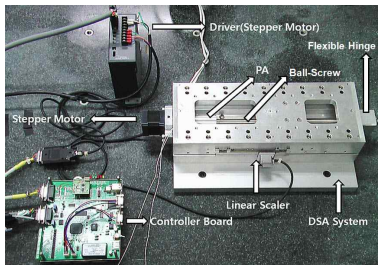


Fig. 2 실험 환경

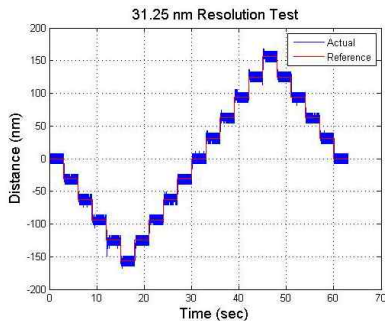


Fig. 3 분해능 실험 결과(30nm 단위)

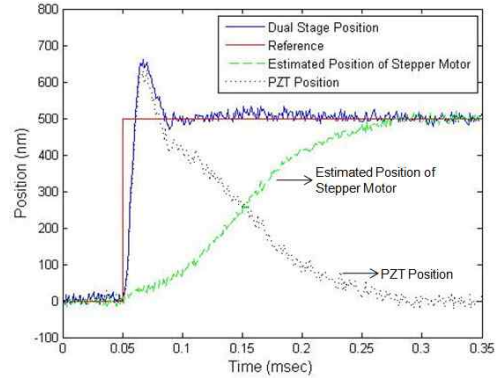


Fig. 4 이중 액추에이터 제어 실험 결과

5. 결론

본 논문에서는 기존에 제안된 LQG/LTR 제어 기법을 기반으로 외란에 더욱 강한 제어를 외란 관측기를 이용하여 구현하였다. 또한 적용된 알고리즘과 제어를 통하여서 이중 스테이지 시스템이 우수한 주파수 민감도를 가지게 되었고, 실험 결과 30nm 단위의 이중 액추에이터 시스템의 제어를 하였다.

참고 문헌

1. H.J. Pakh, D.S. Lee, J.H. Park, Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation, International Journal of Machine Tools and Manufacture Vol. 41, pp.51-63, 2001
2. Sang-Min Suh, Chung Choo Chung, and Seung-Hi Lee, "Discrete-Time LQG/LTR Dual-Stage Controller Design in Magnetic Disk Drivers", IEEE Trans on Magnetics, Vol. 37, No.4, 1891-1895, 2001.
3. J. S. Bang, H. Shim, S. K. Park, J. H. Seo, "Robust Tracking and Vibration Suppression for a Two-Inertia System by Combining Backstepping Approach With Disturbance Observer," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 9, pp. 3197-3206, Sep. 2010.