

피에조 액츄에이터를 이용한 나노 구동 제어기 설계

유상훈, 이충우, 서상민, 정정주, 김대용*

한양대학교 전자통신전파공학과

*한국전자통신연구원 반도체원천기술연구소

Design of Controller Using the Piezo Actuator

Sanghoon Yu, Chungwoo Lee, Sang-Min Suh, Chung Choo Chung, Kim, Daeyong*

Division of Electrical and Computer Eng. Hanyang University

*Basic Research Field, Electronics and Telecommunications Research Institute

E-mail : yugatti@scl.hanyang.ac.kr

Abstract

본 논문에서는 Sub-nano 수준의 위치정밀도와 분해능을 갖는 Piezo actuator 의 제어기 설계를 목적으로 하였다. 이산 시간 상태 공간에서의 Piezo actuator 를 이용한 1 축 스테이지 드라이브 시스템 SISO 제어기를 설계하였다. Piezo actuator 의 소재 자체의 특성으로는 Hysteresis 가 있으며, 이는 정상상태에서 Piezo actuator 의 위치 오차를 발생하는 주요 원인이 된다. 제어기의 설계는 극점 배치 방법을 기본으로 하여 Hysteresis 에 대한 보상을 목적으로 적분제어방식과 외란 추정기를 각각 적용하였다. 모의실험을 통하여 제어기의 설계 및 시뮬레이션 하였으며, Hysteresis 에 대한 보상이 이루어짐을 보았고, 실험을 통하여 이를 증명하였다.

I. 서론

최근 나노과학기술에 대한 관심이 높아지면서 나노 조작을 위한 초 정밀 구동장치에 대한 중요성이 높아지고 있다. 압전구동기(Piezo actuator)는 Sub-nano 수준의 위치 정밀도와 분해능을 갖는 구동기로 반도체, 고집적 저장매체 및 초 정밀 주사현미경등의 많은 분야에서 사용되고 있다. Piezo actuator 의 정확한 제어를 위해서는 Piezo 소자의 특징인 히스테리시스(Hysteresis)의 해결이 관건이다. Hysteresis 는 정상상태에서 오차를 발생하여

정확한 위치제어를 어렵게 한다. Hysteresis 는 비선형적인 성질을 나타내며, 본 논문에서는 선형제어기를 이용하여 Hysteresis 에 대한 보상을 하고자 한다. Piezo actuator 의 모델링은 DSA 로 측정하여 얻는다. 제어기로는 기준 입력 추종의 극점배치방식을 기본으로 한 적분 제어(Integral control)와 외란관측기(Disturbance observer, DOB)를 적용한 각각의 제어시스템을 설계한다. 시뮬레이션과 실험은 적층(Stack)타입의 Piezo actuator 가 내장된 탄성 힌지 구조(Flexure hinge structure)의 1 축 Piezo stage[9]를 사용하여 실험결과를 보였다.

II. 구동기의 특성 분석

Piezo actuator 는 PI 사의 z 축 스테이지(P-753.11C)를 사용하였고, 그림 1 은 DSA(Dynamic Signal Analyzers)를 이용하여 얻은 Bode plot 이다. 이를 기준으로 2 차의 시스템과 2 차의 공진으로 모델링하면 전체 전달함수는 식 (1)과 같다.

$$G(s) = \frac{\omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2} \cdot \frac{\omega_2^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2} \quad (1)$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1, \quad \omega_2 = 2\pi f_2$$

$$\zeta_1 = 0.9, \quad f_1 = 400\text{Hz} \quad \zeta_2 = 0.15, \quad f_2 = 5\text{kHz}$$

Hysteresis 에 대한 모델링은 Banning 이 고려한 1 차 미분 방정식으로 모델링한다.

$$\dot{w}(t) = f(v(t), w(t))\dot{v}(t) + g(v(t), w(t))v(t) \quad (2)$$

식 (2)에서 $w(t)$ 는 Hysteresis 로 인한 변위이며, $v(t)$ 는 입력전압이다. $a > 0$ 이며, 또한 저주파수의 입력신호에서는 $f(v)$ 가 v 에 비례하고 $g(v)$ 가 v 에 일정하므로 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

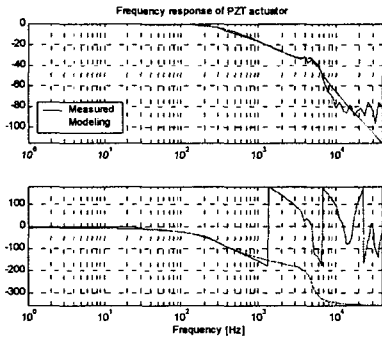


그림 1 Frequency response of the flexure hinge structure stage with piezo actuator

$$\begin{aligned} f(v(t)) &= av(t) \\ g(v(t)) &= b \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $0 < 0.5a \leq b < a$ 의 관계가 있으며 이를 이용하여 다음의 식을 구할 수 있다.

$$\dot{w}(t) = -\alpha w(t)\dot{v}(t) + \alpha a\dot{v}(t)v(t) + bv(t) \quad (4)$$

식(4)에서 $a = 165.02 \text{ nm/V}$, $b = 133.67 \text{ nm/V}$, $\alpha = 0.023 \text{ V}^{-1}$ 으로 파라미터를 결정할 수 있다.[5]

III. 제어알고리즘

본 논문에서의 제어기 설계는 상태공간에서 현재 추정기 기반으로 극점 배치(Pole placement)방법을 이용하였으며, Hysteresis 에 대한 제어를 위하여 적분제어(Integral control)방식과 외란관측기(Disturbance observer)를 각각 적용하였다.

(1)로부터 연속 시간 상태 공간 모델을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Fx + Gu \\ y &= Hx \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)을 ZOH 를 이용해서 이산 상태 공간 모델로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + \Gamma u(k) \\ y(k) &= Hx(k) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Phi = e^{FT}, \quad \Gamma = \int_0^T e^{F\eta} d\eta G$$

시스템 (Φ, Γ, H) 은 제어 가능하고 관측 가능하다.

3.1 현재 추정기 (Current estimator) 설계

식 (6)로부터 현재 추정기 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) &= \bar{x}(k) + L_c [y(k) - H\bar{x}(k)] \\ \bar{x}(k) &= \Phi \bar{x}(k-1) + \Gamma u(k-1) \\ u(k) &= -K\hat{x}(k) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 \hat{x} 은 현재 추정상태변수, \bar{x} 는 예측 상태변수, y 는 출력 측정 신호, L_c 는 현재 추정기 이득, $u(k)$ 는 제어 입력 신호, K 는 제어 이득이다.

식 (7)으로부터 현재 추정상태변수로 표현하면

$$\hat{x}(k) = (\Phi - L_c H \Phi) \hat{x}(k-1) + (\Gamma - L_c H \Gamma) u(k-1) + L_c y(k) \quad (8)$$

식 (8)와 식 (6)에서 현재추정오차 방정식은

$$\bar{x}(k+1) = [\Phi - L_c H \Phi] \bar{x}(k) \quad (9)$$

여기서 $\bar{x}(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ 는 추정 오차 상태이다.

3.2 제어기 설계(Controller Design)

폐환 제어 법칙(Feedback control law) $u(k)$ 는 식 (10)과 같이 정의할 수 있다.

$$u(k) = -K\hat{x}(k) \quad (10)$$

식 (6)과 식 (10)에서

$$x(k+1) = \Phi x(k) - \Gamma K \hat{x}(k) \quad (11)$$

식 (11)에서 $\hat{x}(k) = x(k) - \bar{x}(k)$ 이므로

$$x(k+1) = (\Phi - \Gamma K) x(k) + \Gamma K \bar{x}(k) \quad (12)$$

식 (9)에서 현재추정기 이득 L_c 를 설계하면 오차를 0에 수렴한다. 폐환이득 K 는 Ackermann's 공식을 이용해서 얻는다.

기존 입력을 고려할 때 정상상태에서 오차를 소거하는 피드포워드 이득을 구한다.

정상 상태에서는 식 (13)를 만족한다.

$$N_x r = x_s = x_{ss}, \quad H_x x_{ss} = y_m = r, \quad H_r N_x r = r \quad (13)$$

정상 상태에서 $x(k+1) = x(k)$ 이므로 식 (6)은 식 (13)에 의해서,

$$\begin{aligned} x_{ss} &= \Phi x_{ss} + \Gamma u_{ss} \\ (\Phi - I) x_{ss} + \Gamma u_{ss} &= 0 \\ (\Phi - I) N_x + \Gamma N_u r &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

식 (13)과 식 (14)을 행렬로 표현하면,

$$\begin{bmatrix} \Phi - I & \Gamma \\ H_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} N_x \\ N_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi - I & \Gamma \\ H_r & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\bar{N} = N_u + KN_u \quad (16)$$

기준입력을 고려한 제어 입력 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(k) &= -K(\hat{x}(k) - x_r) + N_u r \\ &= -K\hat{x}(k) + \bar{N}r \end{aligned} \quad (17)$$

Hysteresis 가 정상상태에서 오차로 나타나므로 이를 보상하기 위해서 적분제어 방식을 적용한다. 오차 ($e = y - r$)에 대한 적분 표현은 식 (18)과 같다.

$$x_i(k+1) = x_i(k) + e(k) = x_i(k) + Hx(k) - r(k) \quad (18)$$

식 (18)과 적분 제어 이득을 포함한 제어 입력 신호는 다음과 같다.[4]

$$u(k) = -[K_f \quad K] \begin{bmatrix} x_i(k) \\ \hat{x}(k) \end{bmatrix} + KN_x r(k) \quad (19)$$

여기서 적분 계인 K_f 는 Open loop transfer function 에서 결정할 수 있다. 적분 계인 K_f 을 크게 하면 Low frequency 의 Loop 이득을 크게 할 수 있다.

외란 추정기는 외란(Disturbance)이 존재하는 시스템 에서 성능을 강화한다. 내부루프에서 외란을 관측하고 제거하는 원리이며, 시스템의 안정도를 도모하는데 목적이 있다. 외란 추정기의 전달함수는 식 (20)과 같이 주어진다.

$$H(z) = \sum_{i=0}^l \alpha_i z^{-i} \quad (20)$$

여기서 α_i 는 외란추정기의 계인값들이다.

외란추정기는 Add-on 방식으로 구성되어 있으며, Separation principle 을 만족하여 설계자는 미리 결정된 제어기의 및 추정기의 계인을 가지고서도 제어기의 안정도에 영향을 끼치지 않으며, 제어기와 추정기의 극점에도 영향을 끼치지 않는다.

$$u(k) = -K\hat{x}(k) - \sum_{i=0}^l \alpha_i [y(k-i) - \hat{y}(k-i)] \quad (21)$$

외란추정기를 포함한 제어법칙은 식 (21)과 같다.[3]

IV. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션을 위해 Matlab Simulink 를 사용하였으며, 실험을 위해 TI 사의 TMS320C31 과 16bit AD/DA 를 사

용하였다.

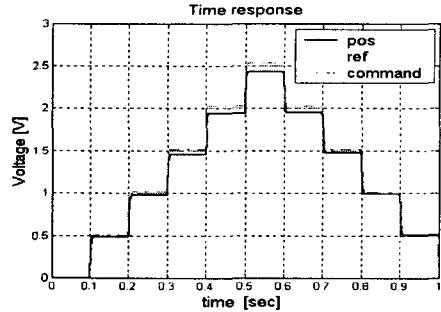


그림 2 Simulation result of pole placement

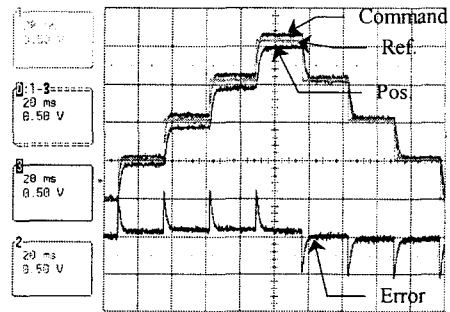


그림 3 Experiment result of pole placement

그림 2 과 그림 3 는 극배치방법에 의한 Piezo actuator 의 시간응답을 보여주고 있다. 기준 입력 신호에 대해서 상승시와 하강시의 Position 이 다르게 나타나는 Hysteresis 를 보상하지 못함을 알 수 있다.

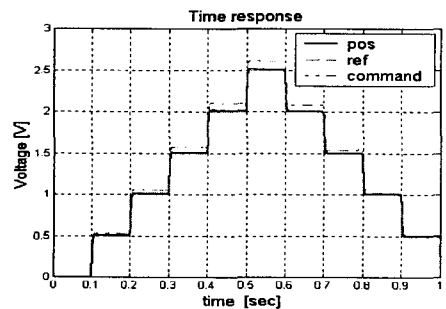


그림 4 Simulation result of integral control

그림 4 는 적분제어를 적용한 Piezo actuator 의 시간응답에 대하여 시뮬레이션을 통하여 보여주고 있다. 적분 제어는 정상상태 오차인 Hysteresis 에 대한 보상을 가능하게 하지만 시스템에 Zero 항을 추가하게 된다. 이로 인하여 적분계인값을 크게 하면 Hysteresis 에 대한 보상이 빠르게 되지만, Overshoot 이 증가하게 된다. 그림 6

은 실험 결과로 시뮬레이션에서 나타나는 경향을 그대로 보여주고 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 Flexure hinge type 의 구조물에 결합된 Piezo actuator 의 위치 정밀도의 향상을 위한 제어기에 대한 비교분석으로, 비선형성을 가지는 Hysteresis 를 선형 제어기를 이용하여 보상하였다. 정상상태 오차인 Hysteresis 를 이산 상태공간에서의 극배치 방법을 기본으로 하여 적분제어 방식과 외란추정기를 적용한 제어기에 대한 시뮬레이션과 실험을 하였으며, 각각의 제어 알고리즘으로 Hysteresis 에 대한 보상이 이루어짐을 보았다.

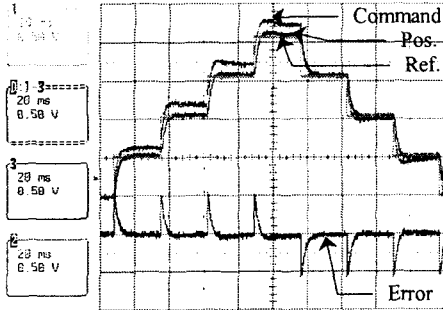


그림 5 Experiment result of integral control

본 논문은 정보통신부 선도기술개발사업의 연구비 지원에 의한 결과입니다

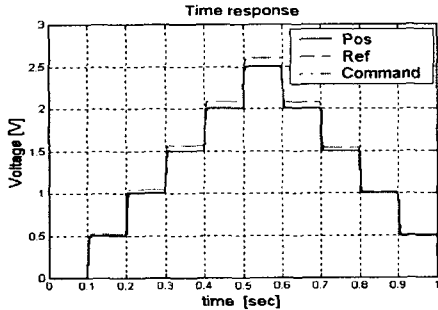


그림 6 Simulation result of DOB

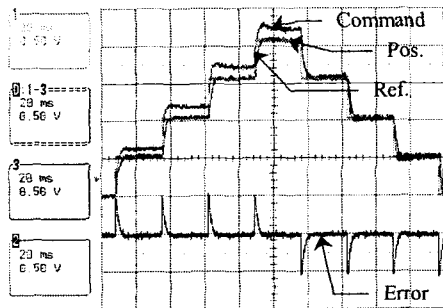


그림 7 Experiment result of DOB

그림 7 은 Add-on 방식의 외란추정기를 적용했을 때의 실험결과이다. 그림 6 의 시뮬레이션에서 보여준 바와 같이 Hysteresis 에 대한 보상이 이루어지고 있으며, Overshoot 도 발생하지 않음을 알 수 있다. Hysteresis 는 정상상태의 오차라는 것을 감안할 때, 이를 Low frequency 에서의 오차라고 간주하였으며, Low frequency 에서의 게인값의 Weighting 을 높게 하여 좋은 결과를 얻을 수 있다.

참고문헌

- [1] Franklin G. F., Powell J. D., and Emami-Naeini A., *Feedback Control of Dynamic Systems*, forth ed., Prentice Hall, 2002.
- [2] Goodwin G. C., Graebe S. F., and Salgado M. E., *Control System Design*, Prentice Hall, 2001.
- [3] Suh S.-M., Chung C. C. and Lee S.-H., "Discrete-Time Track Follow Controller Design Using State Space Disturbance Observer," *Microsystem Technologies*, Vol.9, pp.352-361, 2003
- [4] Franklin G. F., Powell J.D., and Michael Workman, *Digital Control of Dynamic systems*, third ed. Addison-Wesley, 1998.
- [5] 박재학, 정종철, 허건수, 정정주, "차세대 리소그라피 시스템을 위한 압전구동기의 동적해석" *대한기계학회논문집 A권*, 제27권 제3호, pp.472-477, 2003.
- [6] Ping Ge and Musa Jouqneh, "Modeling hysteresis in piezoceramic actuators," *Precision Engineering* Vol.17, No.3 pp.211-221, 1995.
- [7] Krejci, P. and Kuhnen, K., "Inverse Control of Systems with Hysteresis and Creep," *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol.148, No.3, pp.185-192, 2001.
- [8] Adrianens, H.J.M.T.A., de Koning, W.L. and Banning, R., "Modeling Piezoelectric Actuators," *IEEE Trans. on Mechatronics*, Vol.5, pp.331-341, 2000.
- [9] *Micropositioning, Nanopositioning, Nanoautomation*, Physik Instrumente.