

나노 스테이지용 압전 구동기의 퍼지 PI 제어기 설계

Design of Fuzzy PI Controller for Piezo Actuator of Nano Stage

조 성 연*, 정 정 주**

(Seong-yeon Cho and Chung Choo Chung)

*한양대학교 전자통신전공학과(전화:(02)2282-5307, 팩스:(02)2281-9912, E-mail: eeboy@ihanyang.ac.kr)

**한양대학교 전자전기컴퓨터공학부(전화:(02)2290-1724, 팩스:(02)2281-9912, E-mail: cchung@hanyang.ac.kr)

Abstract : Piezo actuators are mainly used in precision position control system because of their high position resolution. Although there have been many approaches in open loop control of this, those method turn out to be not effective in precision control due to hysteresis and creep. To overcome the problems, closed loop PI control method is used in commercial products. However, it is very difficult to obtain fast response with conventional PI control although piezo actuator has fast response. In this paper, we propose a fuzzy PI control method with the proposed fuzzy PI controller, we obtains faster settling response over the conventional PI controller. We verify the effectiveness of the proposed method with experimental results.

Keywords : Fuzzy control, piezo actuator, hysteresis, tracking, nano stage

I. 서론

나노 구조에 대한 연구가 활발히 진행되면서 이를 연구하기 위한 기본적인 장비에 대한 필요성이 고조되고 있다. 현재 양산 시설에서 사용되고 있는 반도체 리소그래피 (Lithography) 공정에서의 스테퍼 (stepper), 스캐너 (scanner)에서도 수십 나노 미터 및 그 이하의 정밀도를 갖는 스테이지 (stage)가 사용되고 있으며 여러 분야의 연구에서 많이 이용되고 있는 SPM (Scanning probe microscope), AFM (Atomic force microscope) 등은 수십에서 수 나노 미터 이하의 분해능을 가지는 스테이지가 요구되고 있다. 이러한 나노 미터 이하 수준의 위치 정밀도와 분해능을 위해서 압전 구동기가 널리 이용되고 있다. 압전 구동기의 장점은 수 ~ 수십 kHz의 광대역 특성이 갖는 빠른 응답 시간과 입력 전압에 의해 나타나는 높은 분해능, 정밀도이다. 하지만 압전 구동기가 여러 장점을 가지는데 반해 비선형적인 성질을 나타내는 히스테리시스 (hysteresis)와 크립 (creep)이 이용하는데 가장 큰 문제가 된다. 이러한 비선형성들은 정상상태에서 오차를 발생하여 정확한 위치 제어를 어렵게 하기 때문이다. 최근 이러한 압전 구동기의 비선형성을 모델링하거나 보상하기 위해 여러 가지 연구가 이루어져 왔다.

압전 구동기를 전하(charge)로 구동하면 전압 구동보다 훨씬 히스테리시스의 영향이 적게 나타남이 확인되었고, 이 결과를 바탕으로 구동은 전압으로 인가하되, 변위가 아닌 압전 소자에 축적되는 전하량을 피드백 받는 제어 방식도 제안되었다[2]. 그러나 전하 구동 방식의 경우 별도의 전하 인가 장치가 필요하고, 전압 구동 방식보다 크립이 더 나타난다는 단점이 있다[4,6]. 이 외에 히스테리시스와 크립에 대한 근사 수식을 이용, 역 보상을 구동기 전단에 달아 전체적으로 선형 구동기가 되게끔 설계하는 방식도 제안되었고[1], 히스테리시스를 Preisach 모델식으로 모델링하여, 이를 이용한 피드포워드 제어 방법도 제안되었으며[8], Maxwell slip 모델식으로 피드백 선형 루프를 구성한

제어 방법도 연구되었다[7]. 이 외에도 구동기의 변위를 페루프로 피드백 받아 제어하는 방식도 있는데, 구동기의 추종은 PI 제어로, 기계적 공진 성분은 입력 성형화 기법으로 상쇄시키는 제어 방식을 취한 연구가 제안하였고[5], 선형 PI 제어를 적용한 AFM용 압전 구동기에 H_∞ 방식을 취하여 구동기의 대역폭을 넓혀 동작 속도를 더욱 개선하는 제어 방식도 제안되었다[3]. 이후 ramp파에 오차 없는 추종을 위해서 기존의 PI 제어기에 적분기를 하나 더 사용하는 PII 제어에 H_∞ 방식이 제안되었는데[4], PII 제어 시에는 ramp파에 대해 오차 없는 추종은 할 수 있지만 step 응답 시 오버슈트가 생기게 되어 오버슈트를 허용하지 않는 시스템에 적합한 구조라고 보기 어렵다. 현재 상용하고 있는 제품에서는 선형 PI 제어를 통하여 비선형성의 오차를 없애는 방법을 쓰고 있다. PI 제어방법이 압전 구동기에 오버슈트 없이 비선형성으로 인한 오차를 제거하는 제어 알고리즘이기 때문이다.

본 논문에서 제안하는 방식도 선형 PI 제어 방식을 기반으로 한다. 하지만 선형 PI 제어는 과도 응답 특성이 만족스럽지 않기 때문에 이를 더욱 개선하고자 퍼지 (fuzzy) PI 제어기를 제안한다. 퍼지 PI 제어기는 선형 제어기의 매개변수를 그대로 가져가며, 기존 선형 PI 제어기에 퍼지 제어기만 추가하면 되기 때문에 특별히 전체적인 제어기 구조를 변화시킬 필요가 없다. 그리고 오차에 대한 추종 특성은 선형 PI와 동일하며, 과도 응답을 안정적으로 개선할 수 있는 장점이 있다. 2 입력의 제어기 중 PD형 퍼지 제어기는 입력 변수인 오차 값과 오차의 변화율로부터 직접 제어 신호를 생성하는 위치형 제어기이고, PI형 퍼지 제어기는 PD형과 동일하지만 제어 신호의 증가분을 출력으로 갖는 속도형 제어기이다[7]. 압전 구동기를 위해 PI형 퍼지 제어기인 속도형 PD 제어기를 적용한다.

II. 압전 구동기의 모델링

압전 구동기의 전달함수를 구하기 위해 주파수 응답

을 보았다. 그림 1와 같은 전달함수가 나타나며, 5kHz 부근에서 스테이지의 기계적 공진 성분이 나타나는 것을 알 수 있다.

이 측정된 응답을 기준 삼아 수식적으로 공진 모드가 나타나기 이전과 공진 성분 둘 다 2차로 모델링 하였다. 전체 전달함수는

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

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

가 된다. 여기서 f_1, f_2 는 각각의 고유 주파수이고, ζ_1, ζ_2 는 각각의 감쇠율이다. $\zeta_1=0.9, f_1=400\text{Hz}, \zeta_2=0.15, f_2=5\text{kHz}$ 로 설정하여 근사 모델링한다.

다음으로 압전 구동기의 히스테리시스 특성을 확인하기 위해 저주파인 0.3Hz의 sine파 (0-70V)의 입력을 구동기에 가하였다. 그림 2에서 보듯이 히스테리시스 특성이 나타나는 것을 알 수 있다.

압전 구동기는 히스테리시스로 인하여 비선형 특성이 크게 나타나므로 이에 대한 고려가 필수적이다. Banning 등의 방식으로 식(2)의 1차 미분방정식으로 모델링하였고[9], 이를 모의실험에 적용, 제어기를 설계한다. 여기서 $w(t)$ 는 변위, $v(t)$ 는 입력이고, $a = 165.02 \text{ nm/V}, b = 133.67 \text{ nm/V}, a = 0.023 \text{ V}^{-1}$ 로 설정하였다.

$$\dot{w}(t) = -aw(t) + av(t) + bv(t) \quad (2)$$

III. 퍼지 PI 제어기의 설계

퍼지 PI 제어기 설계는 먼저 선형 PI 제어기를 설계한 후 이를 기반으로 한 퍼지 제어기를 구현하는 방법으로 한다. 선형 PI 제어기는 디지털 PI 제어기로 설계한다. 연속시간에서 PI 제어기를 속도형 PD 제어기로

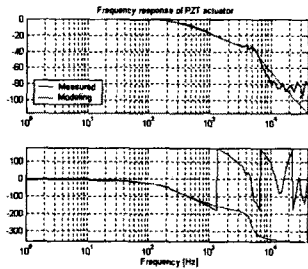


그림 1. 압전 구동기의 주파수 응답
Fig. 1. Frequency response of piezo actuator

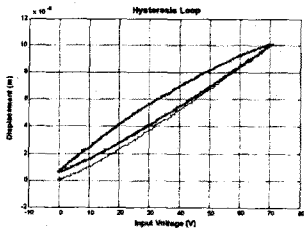


그림 2. 압전 구동기의 히스테리시스 특성
Fig. 2. Hysteresis characteristic of piezo actuator

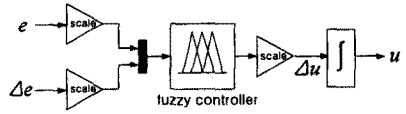


그림 3. 속도형 PD 제어기
Fig. 3. velocity type PD controller

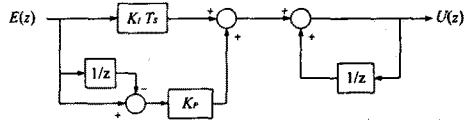


그림 4. 디지털 PI 제어기의 구조
Fig. 4. Structure of digital PI controller

변환 후, 이산시간에서의 미분과 적분으로 변환하여 제어기를 다시 표현하면,

$$G_c(s) = \left(\frac{K_i}{s} + K_p \right) = (K_i + K_p s) \cdot \frac{1}{s}$$

$$G_c(z) = \left(K_i + \frac{z-1}{T_s} K_p \right) \cdot \frac{T_s z}{z-1} = \left(K_i T_s + \frac{z-1}{z} K_p \right) \cdot \frac{z}{z-1}$$

$$= \left\{ K_i T_s + (1-z^{-1}) K_p \right\} \cdot \frac{1}{1-z^{-1}} \quad (3)$$

로 나타낼 수 있고 (T_s =샘플링 주기), 그림 4에 식(3)을 적용한 디지털 PI 제어기 구조를 나타내었다.

다음으로 퍼지 PI 제어기를 구성하기 위해 위의 선형 PI 제어기를 바탕으로 퍼지 제어기를 설계한다. 퍼지 제어기는 퍼지화, 비퍼지화를 위한 입력력 소속 함수, 퍼지 추론을 위한 퍼지 규칙으로 구성된다.

입력 소속 함수를 그림 5에 나타내었다. 비례 신호에 대해 'zero'와 'pos', 'neg'를 서로 분리해 줌으로써 오차가 클 때와 적을 때에 서로 다른 제어 규칙이 적용될 수 있도록 하였고, 미분 신호에 대해서는 'pos'와 'neg' 두 개의 소속 함수만을 설계하여 오차가 증가하는지, 감소하는지에 대해 구분하였다.

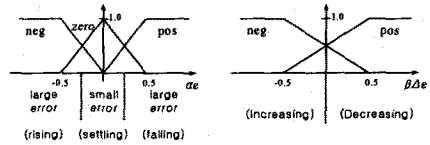


그림 5. 입력 소속 함수
Fig. 5. Input membership function

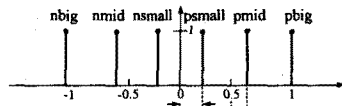


그림 6. 출력 소속 함수
Fig. 6. Output membership function

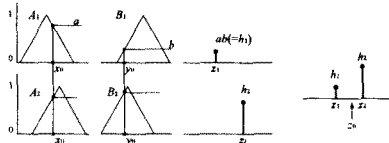


그림 7. Simplified reasoning 방식.
Fig. 7. Simplified reasoning method

입력 소속 함수들의 조합이 총 6가지가 나오기 때문에 그림 6과 같이 6개의 대칭적인 출력 소속 함수들로 구성하였다. 여기서 c_1, c_2 가 퍼지 제어기의 특징을 결정짓는 설계변수가 된다. 그리고 기준입력에 대한 추종을 원활히 하기 위한 제어 규칙 역시 아래의 6가지로 설정하였다.

- R1) If (e is neg) and (De is neg) then (out is nbig)
- R2) If (e is pos) and (De is pos) then (out is pbig)
- R3) If (e is neg) and (De is pos) then (out is nsmall)
- R4) If (e is pos) and (De is neg) then (out is psmall)
- R5) If (e is zero) and (De is pos) then (out is pmid)
- R6) If (e is zero) and (De is neg) then (out is nmid)

R1)과 R2)는 시스템 출력이 기준입력 위치로부터 멀어지고 있을 때 반대쪽으로 끌어당기는 큰 제어신호를 만들어 내고, R3)와 R4)는 기준입력 위치를 향해 가고 있을 때 가속시켜주는 역할을 하며, R5)와 R6)은 추종 오차가 감소한 후에 미분이득을 증가시켜준다.

퍼지 추론으로 가장 일반화 된 방식은 min-max gravity 방식이지만 본 논문에서는 원하는 추종 성능 개선을 위해 선형 추론 방식인 simplified reasoning 방식을 적용한다[7]. i번째 퍼지 규칙의 적합도는 식(4)와 같이 계산되고,

$$h_i = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_i}(y_0) \quad (4)$$

식(5)에 의해 z_i 의 평균을 구하는 방식으로 비퍼지화한다.

$$z_0 = \frac{h_1 \cdot z_1 + h_2 \cdot z_2 + \dots + h_n \cdot z_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} = \frac{\sum h_i z_i}{\sum z_i} \quad (5)$$

그림 8은 $c_1=c_2=0$ 으로 설정된 경우로 이 퍼지 PD 제어기는 선형 PD 제어기와 동일한 성능을 갖게 되며, 그림 9는 설계 변수 c_1, c_2 의 값을 각각 0.25와 0.1로 설정했을 때의 출력 표면이다. 우선 좌우 양끝 부분이 왼쪽이 내려가고 오른쪽이 올라간 형태로 기울어 있는데 이것은 변수 c_1 이 양의 값을 가지기 때문이

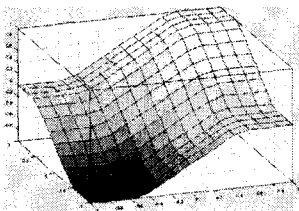


그림 8. 퍼지 PD 제어기의 출력 표면 ($c_1=c_2=0$)
Fig. 8. Output surface of fuzzy PD controller ($c_1=c_2=0$)

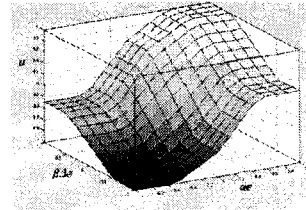


그림 9. 퍼지 PD 제어기의 출력 표면 ($c_1=0.25, c_2=0.1$)
Fig. 9. Output surface of fuzzy PD controller ($c_1=0.25, c_2=0.1$)

며, 추종 오차의 감소 속도를 가속시키는 효과를 나타내고 있다. 그리고 ae 값이 변화함에 따라서 bDe 축 방향의 기울기가 달라지고 있는데, 이것은 미분이득이 추종 오차에 따라 변화하는 것이다. 이러한 가속효과와 기준입력위치 근처에서의 감쇠효과는 각각 c_1, c_2 의 값을 크게 설정 할수록 커지게 된다. 즉, 가속 정도는 설계변수 c_1 값에 의해서 결정되고, 정착시간 이후에는 c_2 값에 의해서 감쇠 정도가 결정된다. [7]

IV. 모의실험

선형 및 퍼지 PI 제어에 대한 비교를 하기 위하여 그림 10과 같이 제어기를 구성하여 모의 실험을 한다. 그림 11에 선형 PI 제어와 퍼지 PI 제어시의 스텝 응답을 비교하였다. 각각의 비례, 적분 이득은 $K_P = 0.1, K_I = 400$ 으로 설정하였고, 같은 제어 이득 하에서 퍼지 PI 제어의 설계 변수인 c_1, c_2 는 각각 0.3, 0.2로 설정하였다. 두 방식 모두 오버 슈트는 없으며, 선형 PI 제어 시에 약 7ms인 정착시간이 퍼지 PI 제어에서는 약 5ms로 과도 응답 특성이 좋아짐을 확인할 수 있다.

V. 실험결과

압전 구동기의 실험을 위하여 그림 12와 같이 2-채널의 16bit A/D D/A 보드와 TMS320VC33 DSP로 시스템을 구성하였다.

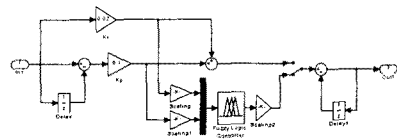


그림 10. 퍼지 PI 제어기의 구조
Fig. 10. Structure of Fuzzy PI controller

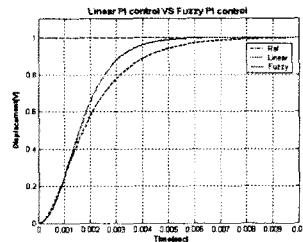


그림 11. 선형 및 퍼지 PI 제어 응답
Fig. 11. Responses of linear and fuzzy PI control

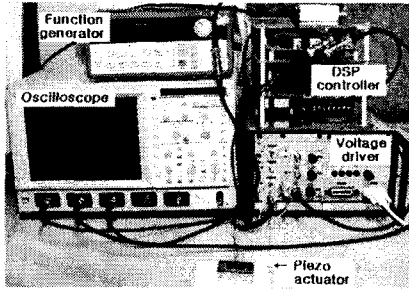
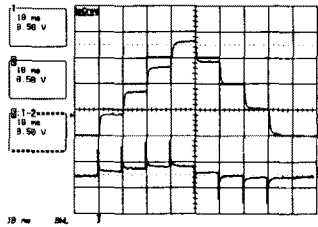


그림 12. 실험환경
Fig. 12. Experiment setup



(CH1: 기준 입력, CH2: 구동기 변위, CHB: 오차)

그림 13. 개루프 응답

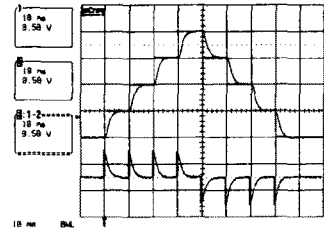
Fig. 13. Open loop Response

추종 특성을 보기 위해 계단파를 기준 신호로 주어 시스템의 특성을 확인한다. 0 - 2V 까지 10ms 마다 0.5V 씩 증가시키고, 다시 감소하는 입력을 주었다. 그림 13에 개루프 응답을 나타내었는데, 압전 구동기의 대표적인 비선형 특성인 히스테리시스와 크립이 나타남을 알 수 있다.

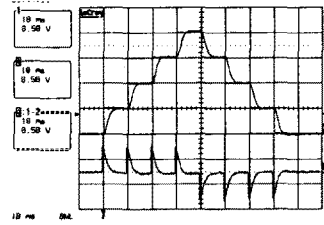
그림 14 (a)는 상용으로 쓰이고 있는 아날로그 PI 제어를 적용했을 때의 실험 결과이다. 구동기의 비선형성으로 인해 생기던 오차들이 사라진 것을 알 수 있고, 오버슈트 없이 정착 시간은 약 7ms 이다. 그림 14 (b)에는 우리가 제안한 퍼지 PI 제어 방식의 응답을 나타내었다. 우선 아날로그 PI 제어 때와 마찬가지로 구동기의 비선형성인 히스테리시스와 크립이 사라진 것을 알 수 있고, 특히 오버슈트를 없애면서도 정착 시간만 약 5ms로 줄여 더욱 개선된 응답을 얻을 수 있었다. 따라서 더욱 빠른 응답을 원하는 시스템에 본 퍼지 PI 제어 방식이 적합하다.

VI. 결론

본 연구에서는 기존의 선형 PI 제어기에서 비례 신호와 미분 신호 부분을 2 입력 1 출력의 퍼지 시스템을 사용한 퍼지 PI 제어기를 설계하고 구현하였다. 그리고 이를 나노 스테이지용 압전 구동기에 응용하였고, 선형 제어기와 비교하여 모의 실험과 실제 추종 실험을 통해 그 성능을 입증하였다. 추종오차가 비교적 큰 상황에서는 비례 이득이 주도하게 하고, 이후에는 미분이득이 강조되도록 함으로써 선형 제어기의 성능을 유지하면서도 압전 구동기와 같은 비선형 구동기에 대해서도 추종 성능을 향상시킬 수 있었다.



(a) 아날로그 PI 제어 응답



(b) 퍼지 PI 제어 응답

(CH1: 기준 입력, CH2: 구동기 변위, CHB: 오차)

그림 14. 계단 응답 비교

Fig. 14. Comparison between stair responses

참고문헌

- [1] P. Krejci, K. Kuhnen, "Inverse control of systems with hysteresis and creep", IEE proceedings: Control theory and applications, Vol.148, No.3, pp.185-192, 2001.
- [2] K. Furutani, M. Urushibata, N. Mohri, "Improvement of control method for piezoelectric actuator by combining induced charge feedback with inverse transfer function compensation", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.2, pp.1504-1509, 1998.
- [3] S. Salapaka, A. Sebastian, J. P. Cleveland, M. V. Salapaka, "Design, identification and control of a fast nanopositioning device", Proceedings of the American Control Conference, Vol.3, pp.1966-1971, 2002.
- [4] A. Sebastian, S. Salapaka, "H ∞ loop shaping design for nano positioning", Proceedings of the American Control Conference, Vol.3, pp.3708-3713, 2003.
- [5] T. Chang, X. Sun, "Analysis and control of monolithic piezoelectric nano actuator", IEEE transactions on control systems technology, Vol.9, No.1, pp.69-75, 2001.
- [6] G. S. Choi, Y. A. Lim, G. H. Choi, "Tracking position control of piezoelectric actuators for periodic reference inputs", Mechatronics : mechanics, electronics, control, Vol.12, No.5, pp.669-684, 2002.
- [7] 김봉주, 정경주, "퍼지 PID 제어기를 이용한 추종 제어기 설계", 제어자동화시스템공학 논문지, 제 7권, 제 7호, 2001년 7월.
- [8] P. Ge, M. Jouaneh, "Tracking control of a piezoceramic actuator", IEEE transactions on control systems technology, Vol.4, No.3, pp.209-216, 1996.
- [9] 박재학, 정종철, 허건수, 정경주, "차세대 리소그라피 시스템을 위한 압전구동기의 동적해석", 대한기계학회논문집 A권, 제 27권, 제 3호, pp.472-477, 2003.