

피에조일렉트릭 액츄에이터의 히스테리시스 보상 제어

Hysteresis Compensation Control of Piezoelectric Actuators

임 요 안(서울시립대 대학원), 최 기 흥(한성대), 최 기 상(서울시립대)
Yo An Lim(Graduate School, Seoul City Univ), Gi Heung Choi(Han Sung Univ),
Gi Sang Choi(Seoul City Univ)

ABSTRACT

Piezoelectric actuators exhibit limited accuracy in tracking control due to their hysteresis nonlinearity. In this study a digital tracking control approach for a piezoelectric actuator based on incorporating a feedback linearization loop with a PID feedback controller is presented. The hysteresis nonlinearity of the piezoelectric actuator is modeled in the feedback compensation loop using the Maxwell slip model. Experiments were performed on a piezoelectric 2-axis linear positioner for tracking linearly decaying sinusoidal waveforms and circles. The experimental results show that the tracking control performance is noticeably improved by augmenting the feedback loop with a model of hysteresis in the feedback compensation loop.

Key Words : piezoelectric actuator(압전 구동기), hysteresis(히스테리시스), Maxwell slip model, feedback compensation control(피드백 보상 제어), ferroelectric(강유전성)

1. 서 론

압전(piezoelectric)소자는 기계적 에너지와 전기적 에너지 사이에서 양방향으로 변환을 일으킬 수 있으며, 이러한 성질을 이용하면 센서와 구동기 모두로 사용될 수 있다[1]. 본 연구에서는 구동기로 사용되는 경우의 압전 소자에 대하여 논한다. 압전 구동기는 높은 변위 해상도와 빠른 주파수 응답을 가지고 있어 전자 현미경이나 로봇의 그리퍼(gripper), 의학과 생물학 분야에서의 미세 외과수술 등과 같은 정밀한 위치제어를 필요로 하는 여러 분야에서 이용될 수 있다.

그러나 압전세라믹 구동기는 기본적으로 강유전체(ferroelectric)이므로 가해진 전압에 대한 변위 응답이 히스테리시스(hysteresis) 성질을 가지게 되고 이러한 성질로 인해 추종제어에서의 정밀도에 한계가 있다. Fig. 1은 실험에 사용된 압전 구동기의 가해진 전압과 변위의 히스테리시스 곡선을 나타내고 있다. 이러한 히스테리시스 현상은 매우 복잡한 과정을 통해서 일어나기 때문에 확실한 미시적인 설명이 어렵다.

그러나 압전 구동기의 응용 측면에서 히스테리시스 비선형성을 줄이기 위해 이제까지 많은 노력이 있어왔는데, Newcomb과 Flinn[2]은 변위를 일으키는 제어입력으로 전압대신에 전하(charge)를 이용한다면 압전 구동기의 비선형 특성을 없애고 선형적으로 제어할 수 있다고 제안하였다. 그러나 전압대신 전하를 제어입력으로 이용하기 위해서는 특별히 고안된 전하구동증폭기(charge drive amplifier)와 같이 하드웨어적인 요구사항이 많아지게 되고 변위의 감도가 떨어지게 되는 단점이 있다. 이 방법을 이용할 경우에 선형 제어이론을 이용할 수 있어 제어기는 단순해지는 반면에 하드웨어가 복잡해지게 된다. 압전 구동기의 히스테리시스 현상을 줄이는 간단한 방법을 Kaizuka와 Sui[3]도 제안하였는데 이는 구동기와 직렬로 캐패시터(capacitor)를 연결함으로써 전압을 이용하여 선형적으로 구동기를 제어할 수 있다는 것이다. 하지만 이 방법을 이용할 경우에는 같은 변위 출력을 얻기 위해서 상대적으로 매우 높은 전압을 가해야 한다는 단점이 있다. 또 다른 방법은 페루프 제어기를 이용하는 것[4]인데 이 경우에는 제어기에 압전 구동기의 히스테리시스 현상이 포함되

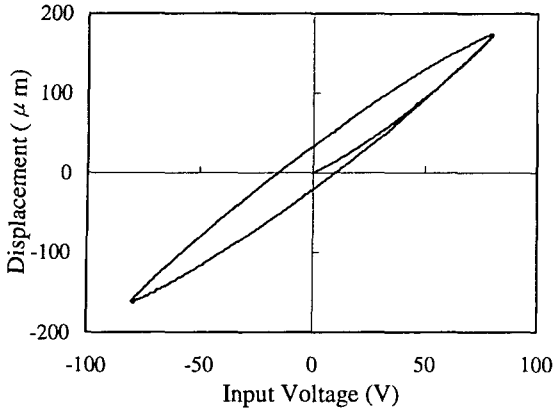


Fig. 1 Hysteresis response of a piezoelectric actuator

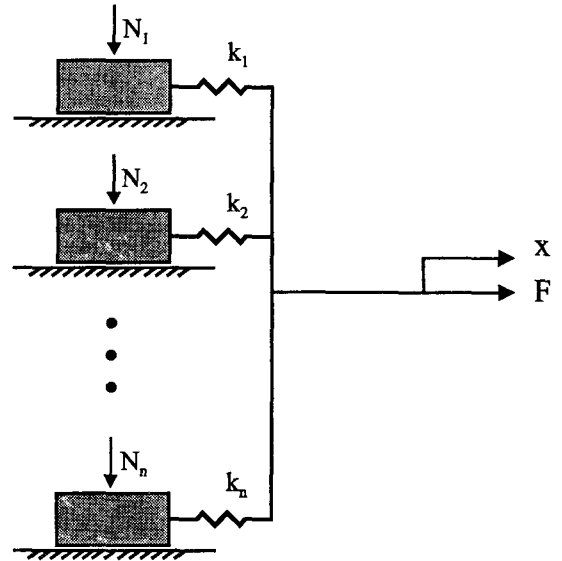


Fig. 2 Maxwell slip model

어 있지 않으면 시스템의 불안정성을 야기시킬 수 있고 정밀도에도 한계가 있다. 그리고 앞먹임 제어 방법(feedforward control)이 제안되었는데 이 방법은 히스테리시스 현상에 대한 모델을 만들고 기준 입력과 모델을 이용하여 입력을 미리 예상하여 시스템에 가해주는 것이다. 예를 들면 Ge와 Jouaneh[5]는 classical Preisach model을 이용하여 구동기의 히스테리시스 현상을 모델링하고 이를 시스템에 적용하여 성능의 큰 향상을 보았다. 하지만 제안된 모델은 크기가 일정한 주기 신호만을 추종할 수 있다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 Maxwell slip model[6]을 이용하여 구동기의 히스테리시스 현상을 모델링하고 압전 세라믹 구동기의 선형화를 위해서 되먹임에 의해 보상한다. 그리고 크기가 변하는 주기 신호를 추종하는 실험과 2차원 평면의 원을 추종하는 실험을 통해 시스템의 성능을 평가한다.

2. 압전 구동기의 히스테리시스 현상 모델링

압전 구동기의 추종제어 정밀도를 향상시키기 위해서는 히스테리시스 비선형성에 대한 모델을 만들고 이것을 제어에 이용하는 것이 효과적이다. 본 연구에서는 압전 구동기의 히스테리시스 비선형성을 Maxwell slip을 이용하여 모델링하였다.

히스테리시스 현상은 기계적으로는 쿨롱 마찰력(Coulomb friction)에 의해 나타난다[7]. Fig. 2에서와 같이 질량이 없는 물체에 N_1, N_2, \dots, N_n 의 수직력(normal force)이 작용하고 물체와 바닥 사이에 쿨롱 마찰력만이 작용할 때, 질량이 없고 스프링 상수가 k_1, k_2, \dots, k_n 인 스프링에 가하는 힘 F 와 위치 x 사

이의 관계는 전형적인 히스테리시스 비선형성을 나타내게 된다. 이와 같이 변위와 힘 사이의 관계가 히스테리시스 현상을 나타내는 원인은 힘이 스프링에 작용하여 스프링이 늘어나면 스프링에 에너지가 축적되고 스프링의 힘이 마찰력보다 크게 되면 물체는 밀리게 된다. 이때 힘에 의한 에너지는 스프링에 다 저장되지 못하고 일부가 마찰에 의해 소모된다. 그래서 힘의 방향이 바뀌게 되면 이전 방향으로 움직일 때와는 다른 변위 경로를 나타내게 된다. 이때 변위와 힘 관계의 경로는 변위 구간별로 각 물체의 스프링 상수와 breakforce 사이의 관계에 의해 결정되게 된다.

본 연구에서는 7개의 물체를 이용하여 모델링을 수행하였다. Table 1에 모델링에 이용된 스프링 상수와 breakforce들이 나타나 있고 Fig. 3은 이러한 파라미터를 이용했을 때의 히스테리시스 모델을 보여준다. 모델에서 변위는 압전세라믹 구동기의 변위를, 모델의 힘은 구동기의 전압을 나타낸다.

Element	Stiffness(k_n)	Breakforce
1	0.21	0.56
2	0.03	1.68
3	0.06	2.52
4	0.10	1.12
5	0.01	1.40
6	0.10	1.68
7	0.40	150.

Table 1. Model parameters

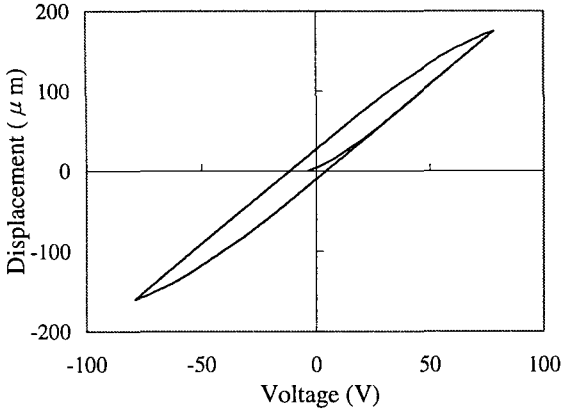


Fig. 3 Hysteresis model of a piezoceramic actuator

3. 제어기 설계

Fig. 5에 본 연구에서 제안한 되먹임 보상 (feedback compensation)[8] 제어기의 구조가 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시스템의 비선형적 특성을 가지는 출력을 다시 시스템의 입력으로 가하여 시스템의 비선형성을 상쇄하는 것을 기본 개념으로 하고 있다. 구체적으로 본 연구에서는 압전 구동기의 히스테리시스 비선형성을 Maxwell slip을 이용하여 모델링하고 되먹임 선형화 제어기와 히스테리시스 모델을 이용하여 구동기의 비선형성을 보상하여 압전 구동기 제어 성능을 향상시키고자 한다.

PID 제어기는 연속시간 영역에서 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

그리고 이를 디지털 컴퓨터에 의한 이산시간 제어 시스템에 적용하기 위해서는 식(1)을 식(2)의 형태로 바꾸어야 한다. 적분항은 이제까지의 오차들의 합이 되고 미분항은 backward difference 근사화 방법을 이용하여 T는 샘플링 주기이다.

$$u(k) = K_P e(k) + K_I T \sum e(k) + \frac{K_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (2)$$

4. 실험 및 결과

실험장치가 Fig. 4에 도시되어 있다. 압전 구동기는 Piezo Systems사의 2-axis linear positioner (ILN2-001-M)인데 최대 ± 90 volt의 입력에 $\pm 200 \mu\text{m}$

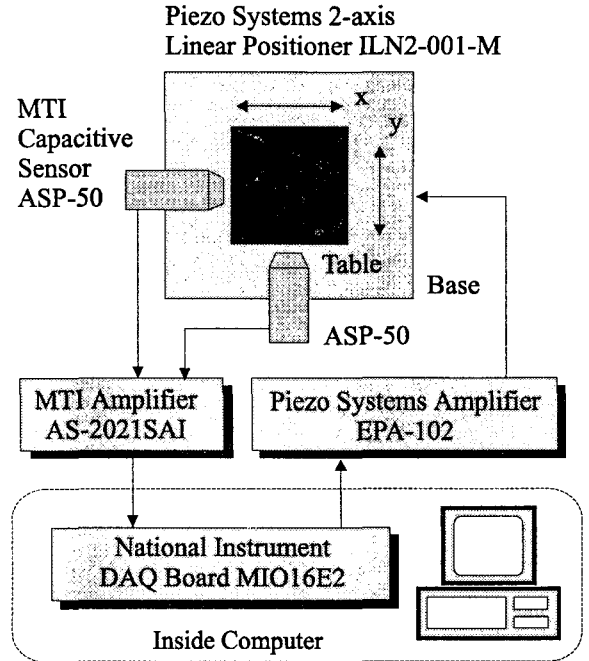


Fig. 4 Experimental setup

의 최대 변위와 밴드폭(bandwidth) 10Hz의 성능을 가지고 있다. 이 압전 세라믹 구동기를 구동하기 위해서 20배의 증폭율을 가지는 Piezo Systems사의 전압 증폭기(EPA-102)가 이용되었다. 위치측정을 위해서는 MTI사의 $1.25 \mu\text{m}$ 의 해상도를 가지는 비접촉 정전용량형(capacitive) 센서(ASP-50)가 이용되었으며 센서 신호는 MTI AS-2021SAI 증폭기를 통과해 12bit A/D 변환기에 의해서 컴퓨터로 입력되었다. 구동기를 제어하기 위한 소프트웨어는 PC (Pentium-100MHz)에서 실행되고 제어입력은 12bit D/A 변환기에 의해 전압증폭기로 입력되었다. 한편 제어 시스템의 샘플링 주기는 300Hz로 고정하였다.

실험을 통하여 개루프로 구동기를 움직이는 경우와 PID 제어기를 사용한 경우 그리고 Maxwell slip model을 이용한 되먹임 보상 제어기를 사용할 경우 등의 성능을 비교한다. 기준 신호로는 0.1Hz-10Hz의 주파수를 가지고 크기가 $80 \mu\text{m}$ 에서 1초당 $20 \mu\text{m}$ 씩 선형적으로 감소하는 정현파와 반지름 $80 \mu\text{m}$ 의 원을 소프트웨어적으로 발생시키고 추종실험을 실시하였다.

Fig. 6에 개루프로 구동할 때와 PID 페루프 제어기를 사용했을 때의 결과가 비교되어 있다. PID 제어기의 파라미터들은 시스템의 해석적인 모델을 없으므로 trial-and-error에 의해 선택되었다 ($K_P=0.0025$, $K_I=0.2$, $K_D=0.000015$). 그림은 PID 제어기만

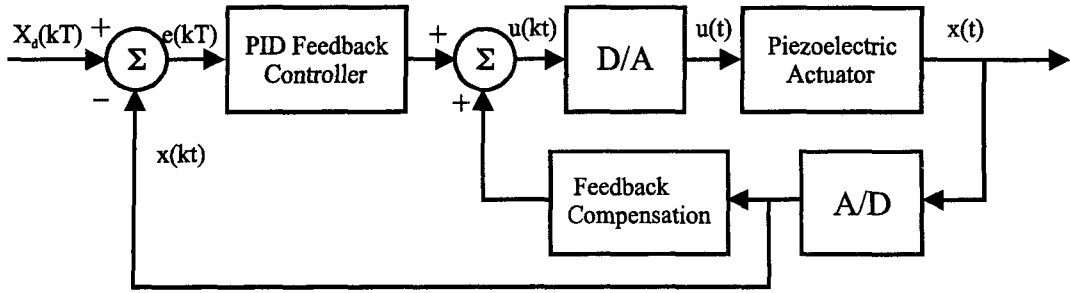


Fig. 5 A block diagram of a PID feedback controller with hysteresis modeling in the feedback linearization loop

을 사용하였을 경우에 개루프와 비교하여 거의 성능의 향상이 없음을 보여주고 있다. 반면에 되먹임 보상 제어의 결과는 Fig. 7에 나타난 것처럼 PID 제어기만을 사용하였을 경우와 비교하여 큰 성능의 향상이 있었다. Table 2에는 각각의 제어방법에 대해서 추종실험에서의 오차 평균이 나타나 있다. 개루프와 비교하여, PID 제어기만을 사용하였을 경우와 되먹임 보상을 한 경우 정현파 입력에 대하여는 오차가 각각 15% 와 72% 감소하였고, 원 입력에 대하여는 각각 11% 와 60%의 오차감소가 있었다. Table 3에는 일정한 크기(80 μ m)를 가지는 정현파의 주파수를 변화시킴에 따른 추종실험 결과의 오차 평균이 있고 Table 4에는 주파수를 고정하고 (1Hz) 정현파의 크기를 변화시켰을 때 기록된 오차평균이 나타나 있다. 구동기의 밴드폭이 10Hz이므로 주파수가 10Hz에 가까워 짐에 따라 추종오차가 증가하지만 제안된 제어방법의 성능이 특히 급속히 악화하는 것을 알 수 있다. 또한 오차는 입력의 크기가 증가함에 비례하여 커지는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 압전 구동기의 추종제어에 있어서 히스테리시스 모델을 이용한 되먹임 보상을 하므로써 PID 제어기만을 사용하였을 때 보다 성능이 향상됨을 보였다. 특히 본 연구에서는 이용하는 모델은 크기의 변화에 따라 형태가 변하는 히스테리시스의 모델링이 가능하므로 제안된 방법은 크기가 일정한 주기신호 뿐만이 아니라 크기가 변화하는 주기신호에도 적용될 수 있다. 한편 액츄에이터의 히스테리시스 뿐 아니라 마찰, 콤플라이언스 등 시스템의 다른 동적 비선형성을 모델링하여 보상하고 보다 체계적이고 합리적으로 Maxwell slip 히스테리시스의 구조와 파라미터를 결정한다면 제어의 성능을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

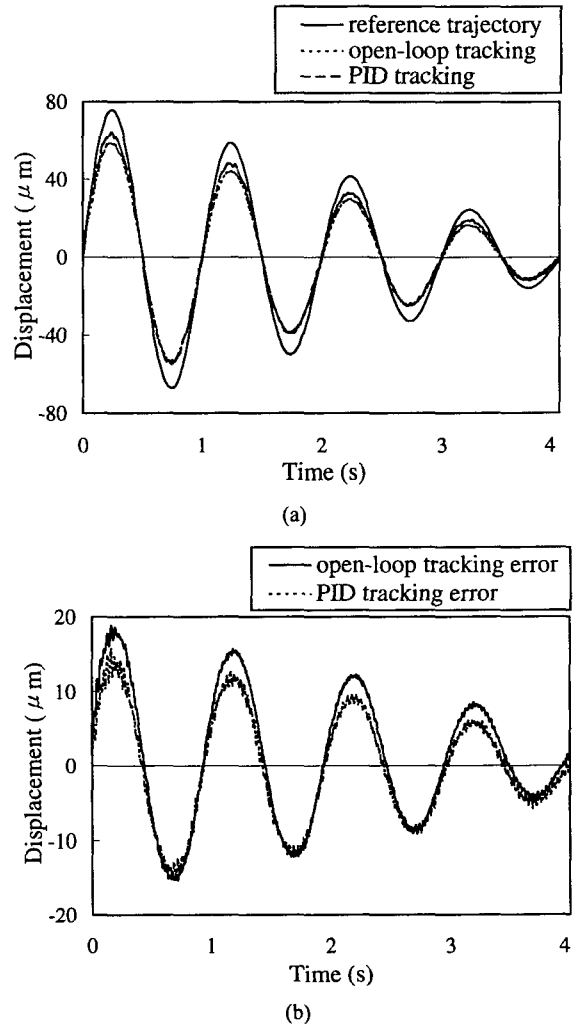


Fig. 6 Comparison of open-loop and PID tracking of a linearly decaying sine waveform

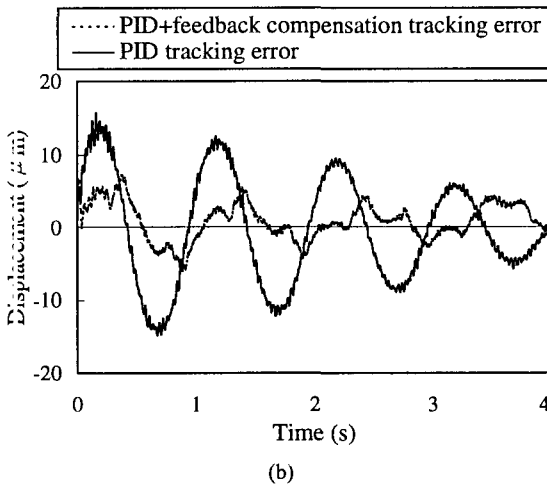
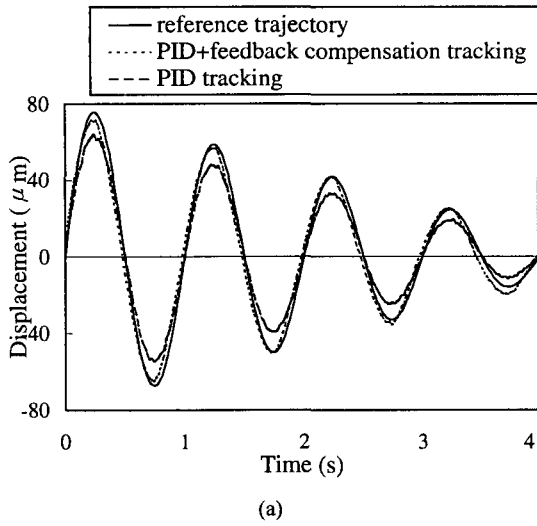


Fig. 7 Comparison of PID and PID+feedback compensation tracking of a linearly decaying sine waveform

	sine waveform	circle
open-loop	7.58	19.11
PID	6.47	16.92
feedback-linearization	2.16	7.73

Table 2. Average of tracking errors for a linearly decaying sine waveform and a circle

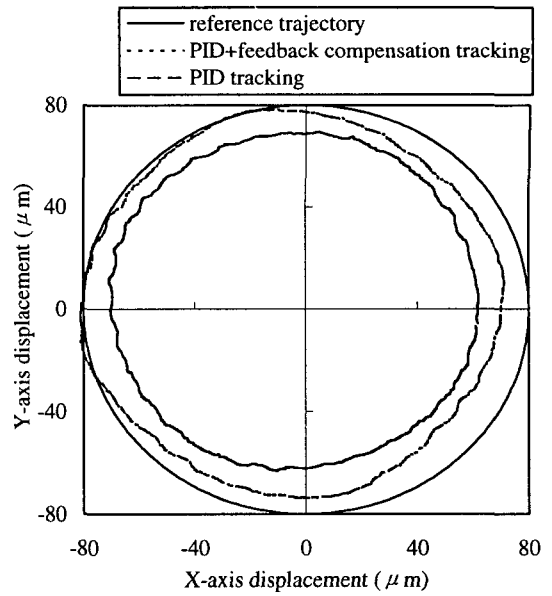


Fig. 8 Comparison of PID and PID+feedback compensation tracking of a circle

freq.(Hz)	open-loop	PID	PID+feedback compensation
0.1	11.64	9.76	1.95
0.5	12.48	10.94	4.33
1	13.00	11.69	4.76
2	13.94	12.71	5.06
4	16.25	14.70	7.85
6	19.17	16.98	12.20
8	20.36	18.52	14.96
10	26.10	24.65	17.59

Table 3. Average of tracking errors for varying frequencies

amplitude (μm)	open-loop	PID	PID+feedback compensation
20	5.30	3.83	1.42
40	7.84	6.91	2.20
60	10.39	9.49	2.92
80	12.64	11.70	4.86
100	14.69	13.58	6.46

Table 4. Average of tracking errors for varying amplitudes

1. 박창엽, "전기전자용 압전세라믹스", pp. 147-161, 1995.
2. C. V. Newcomb and I. Flinn, "Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators", *Electronics Letters*, Vol. 18, No. 11, May, pp. 442-444, 1982.
3. H. Kaizuka and B. Sui, "A simple way to reduce hysteresis and creep when using piezoelectric actuators", *Japan J. Appl. Phys*, Vol. 27, No. 5, pp. 773-776, 1988.
4. M. Tanaka, Z. W. Jiang and S. Chonan, "Force Control of a Flexible Finger with Distributed Force Sensors and Piezoelectric Actuators", *Proceedings of the 1st International Workshop on Advanced Mechatronics*, pp. 237-241, 1995.
5. P. Ge and M. Jouaneh, "Tracking Control of a Piezoceramic Actuator", *IEEE transactions on control systems technology*, Vol. 4, No. 3, 1996.
6. M. Goldfarb and N. Celanovic, "Behavioral Implications of Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation", *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 226-231, 1996.
7. Z. X. Wang, K. Jouaneh and D. Dornfield, "Design and characterization of a linear motion piezoelectric microactuator", *IEEE Conf. Robotics and Automation*, pp. 1710-1715, 1989.
8. J. E. Slotine and W. Li, "Applied Nonlinear Control", *Prentice-Hall International Editions*, pp. 207-274, 1991.