

히스테리시스 보상을 이용한 압전구동기의 초정밀 위치제어.

홍성룡*(울산대 대학원 기계공학과), 이병룡(울산대 기계공학과)

Ultra-Precision Position Control of Piezoelectric Actuator System Using Hysteresis Compensation

S. R. Hong(Mecha. Eng. Dept. UOU), B. R. Lee(Mechanical Eng. Dept., UOU)

ABSTRACT

In this paper, the ultra precision positioning system for piezoelectric actuator using hysteresis compensation has been developed. Piezoelectric actuators exhibit limited accuracy in tracking control due to their hysteresis nonlinearity. The main purpose of the proposed controller is to compensate the hysteresis nonlinearity of the piezoelectric actuator. The controller is composed of a PD, hysteresis compensation and neural network part in parallel manner. at first, the excellent tracking performance of the neural network controller was verified by experiments and was compared with the classical PD controller.

Key Words : ultra-precision, piezoelectric actuator, hysteresis, neural network, PD control

1. 서론

최근 들어 각광받고 있는 반도체, 광통신 시스템, 우주 항공 분야는 초정밀 가공기술을 기초로 하고 있으며, 산업전반의 고도화로 초정밀가공 기술에 대한 수요는 날로 증가하고 있다. 이러한 요구를 만족하기 위해서는 서브마이크로 영역에서 고분해능을 가지며 높은 동적응답특성을 가지며 정밀한 미소변위로 제어할수 있어야 한다. 기존의 DC 모터나 유압구동기로는 나노급의 위치결정 분해능을 얻기 어렵고 충분한 응답속도를 가질수 없기 때문에 고응답성과 고강성특성을 갖는 적층형 압전구동기를 사용한다. 압전구동기는 구동력과 전압의 제어에 의한 높은 분해능을 얻을수 있으며 구동력이 크며 주파수 응답특성이 양호하다는 잇점을 가지고 있다. 하지만 압전구동기는 강유전체이므로 비선형 특성인 히스테리시스(hysteresis)가지고 있다. 이러한 성질로 인해 추종제어에서의 정밀도에 한계가 있다.

본 논문에서는 선형적으로 구동기를 제어하기 위해 신경망 제어를 이용하였고 히스테리시스 현상을 줄이기 위하여 여러 가지 패턴의 히스테리시스를 추출하여 이것을 신경망을 이용하여 미리 학습한 후 이것의 출력값을 앞먹임(feedforward) 제어 방법으로 제안된 제어기에 입력한다. 제안된 제어

기는 동적 모형이 필요하지 않고 간단한 수식으로 표현되며, 외란등의 시스템의 변수가 변해도 학습으로 인해 지속적으로 제어가 가능하다. 실험을 통하여 비례-미분 제어기의 이득을 설정하고, 비례-미분 제어기의 출력을 학습신호로 사용하고 무감독 학습방법으로 신경망을 학습시킨다. 또한 여러 가지 패턴의 히스테리시스는 미리 신경망 학습을 통하여 학습한 후 실제 시스템에 학습한 값을 입력한다. 학습이 이뤄지고 난 뒤에는 시스템의 갑작스런 거동이 발생하면 비례-미분 제어기가 동작하여 출력을 안정시키고, 대부분의 출력은 신경망 제어기와 히스테리시스 보상제어기가 담당하여 압전구동기를 제어하도록 하였다. 실험적으로 비례-미분 제어기와 비례-미분-학습제어기 그리고 비례-미분-학습-히스테리시스 보상 결과를 비교 검토하여 제어기 성능의 우수함을 검증한다.

2. 제어기 설계

2.1 신경회로망

신경회로망은 단순히 인간의 뇌에 대한 정보 처리 과정을 모방해 보자라는 것로부터 시작되었다. 하지만 최근에는 패턴 인식, 음성 분석, 로봇 공학등 여러 분야에서 사용되어지고 있다

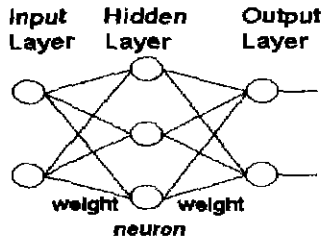


그림 1. 신경망 모델 (Neural network model)

그림 1.은 간단한 신경망의 구조를 나타낸 것이다. 기본적인 신경망 구조는 신경세포(neurons), 연결가중치(weights), 활성화함수(activation functions)의 세 가지로 이루어진다. 그림에서 보면 밑으로 늘어선 한 무리의 신경세포들의 모임을 층(layer)이라고 부른다. 같은 층 내의 신경세포들은 기능적으로 같은 작업을 수행하며, 신경망의 동시 동작과 병렬 동작의 기본 단위가 된다. 신경망이 가지는 여러 개의 층들 중에서 시스템의 외부로부터 입력을 받아들이는 층을 입력층(input layer), 시스템의 외부로 출력을 내 보내는 층을 출력층(output layer), 그 사이에 있는 층을 은닉층(hidden layer)이라고 한다.

신경세포들에서 전달된 출력값은 그것과 연결된 연결가중치가 각각 곱해져 신경세포들에 전달되고 이 때 연결가중치는 신경세포간의 정보 전달 정도를 결정하는 역할을 하는데 연결가중치가 큰 경우 전달되는 신호 값이 커지고 반대로 연결가중치가 작은 경우 작은 신호가 전달된다. 이렇게 더해진 값들은 산술적인 합산에 의해 가중합으로 나타난다. 최종적인 신경세포의 출력값은 이 가중합에 자신의 특성을 나타내는 활성화함수를 취한 값이 된다. 이를 신경세포는 활성화 되었다고 하며 그때의 출력값을 활성화값이라고 한다.

2.2 히스테리시스 보상

정밀한 피소변위 제어에 사용되는 압전구동기는 구동력과 전압의 제어에 의한 높은 분해능을 얻을 수 있고, 또한 구동력이 크며 주파수 응답특성이 양호하다는 이점이 있다. 하지만 고속에서의 고유진동수에 의한 작은 대역폭, Hysteresis의 비선형에 기인한 긴 행정거리에서의 낮은 정밀도등의 여러 가지 제한요소를 가지고 있다. 이 중에서도 Hysteresis의 비선형은 정밀한 위치 제어를 요구하는 곳에서는 아주 중요한 요소이다. 이러한 Hysteresis의 비선형에 의한 정밀도 저하를 방지

하는 기술로는 폐회로 기법, PZT를 전하로 제어하는 기법, Hysteresis를 모델링하고 이를 보상해주는 방법등이 있다.

본 논문에서는 여러 가지 패턴의 Hysteresis를 추출하여 이를 Neural Network를 이용하여 학습한 후 그 결과를 시스템에 입력으로 가함으로써 Hysteresis를 보상해 주고 제어기의 추종성능을 향상시킬 수 있다.

2.3 제어기 구성

본 논문에서는 압전구동기의 제어를 위해 PD제어기를 신경망의 학습 신호로 사용하고, 여러 가지 패턴의 Hysteresis를 미리 추출하여 Neural network로 학습시켜 앞먹임 하고 신경 제어기를 PD 제어기와 병렬로 사용하여 그림과 같은 제어기를 구성한다.

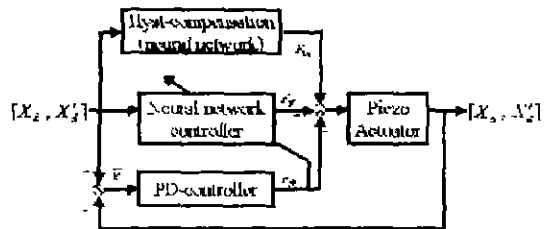


그림 2. 제어기 구조 (Controller structure)

위치와 속도의 오차에 의해 PD 제어기가 작동하여 피드백포스 F_{pd} 를 출력하고, 미리 추출한 Hysteresis를 neural network로 학습한 피드포워드 포스 F_{hc} 를 출력하고, 신경 제어기는 위치와 속도의 입력만으로 비감독 학습 방법으로 학습하여 피드포워드 포스 F_{nn} 를 출력한다. 압전소자는 이런 F_{pd} 와 F_{hc} 그리고 F_{nn} 의 합으로 제어된다. 그림 2.와 같이 PD 제어기와 신경 제어기를 병렬로 구성하면, 학습초기 신경망의 불안정한 출력으로부터는 비례-미분(PD Controller)제어기가 동작하여 압전소자를 안정하게 만들고, 학습 후에는 대부분의 출력을 신경 제어기가 담당하여 빠른 응답특성을 갖는다.

3. 시스템 구성 및 실험

3.1 시스템 구성

실험에 사용된 장치의 모델명과 사양은 아래의 표와 같다.

	Model	Note
Actuator	PI Co. P-245.20	Max.stroke 20 μm
Amp.	PI Co. E-471.00	0Volt ~ 1000Volt
Sensor	PI Co. D-050.00	25 μm ~ 75 μm
Sensor controller	PI Co. E-509.C1	1 channel
A/D,D/A board	PC-LabCard. PCL-818L	A/D convert: 16 channel, 12bit D/A convert: 2 channel, 12bit
Conter board	AXIOM. AX5216	5channel. 16bit

표 1. 실험장치의 구성

이를 이용하여 다음 그림과 같은 시스템을 구성하였다.

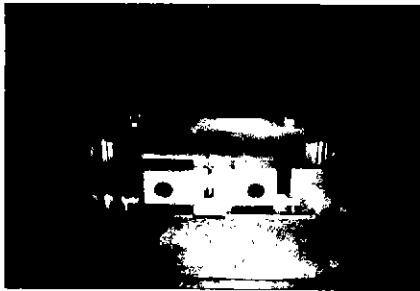


그림 3. 전체 시스템 (Total system)

3.2 실험결과

3.2.1 PD 제어기의 사인 곡선

그림 4.은 PD 제어기만을 사용하여 Sine 곡선 제어 실험 결과이다.

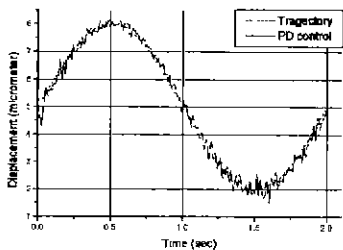


그림 4. PD 제어기를 이용한 사인곡선 (Sine curve tracking performance in PD control)

그림 5.은 PD 제어기를 이용하여 제어 시에 발생하는 오차를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, PD 제어 시에는 약 1.3 μm 의 Peak-to-peak Error 가 발생함을 알 수 있으며, 단순한 PD 제어로는 초정밀 위치제어의 성능을 얻을 수 없음을 알 수 있다.

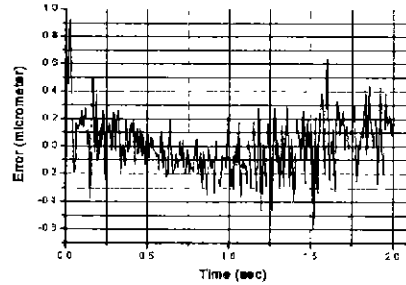


그림 5. PD 제어기의 위치 오차 (Displacement error in PD control)

3.2.2 학습제어기의 사인 곡선

그림 6.은 학습제어기를 사용하여 Sine 곡선 제어 실험 결과이다.

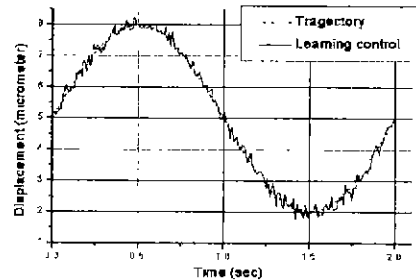


그림 6. 학습제어기를 이용한 사인곡선 (Sine curve tracking performance in neural network)

다음의 그림 7.는 이때의 위치오차를 나타낸 것이다.

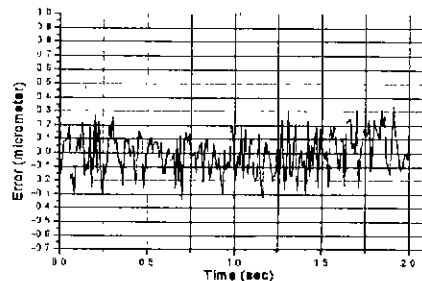


그림 7. 학습제어기의 위치 오차 (Displacement error in neural network)

위의 그림에서 확인할 수 있듯이 학습제어기를 사용하여 사인폭선 추종제어를 수행해 본 결과 위치오차가 PD 제어기를 사용했을 때 보다 50%정도 감소된 약 $0.62 \mu\text{m}$ 의 Peak-to-peak Error가 발생함을 알 수 있다.

3.2.3 PD 제어기의 Step 입력

그림 8.은 PD 제어기만을 사용하여 Step 입력을 주었을 때의 결과이고 그림 9.은 이때의 오차를 나타내고 있다.

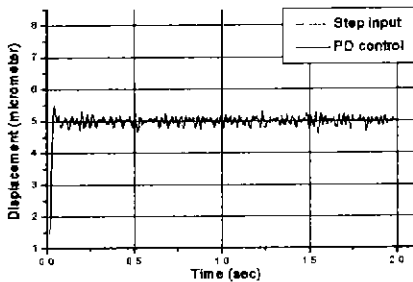


그림 8. PD 제어기를 이용한 Step 입력
(Step input tracking performance in PD control)

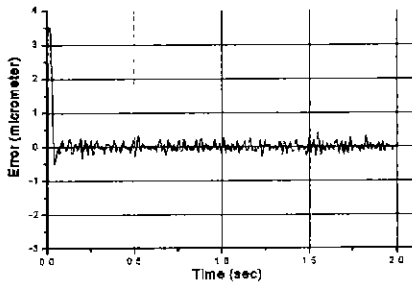


그림 9. PD 제어기의 Step 위치 오차
(Displacement error in PD control)

3.2.4 학습제어기의 Step 입력

그림 10.는 학습제어기를 사용하여 Step 입력을 주었을 때의 결과를 나타내고 있다.

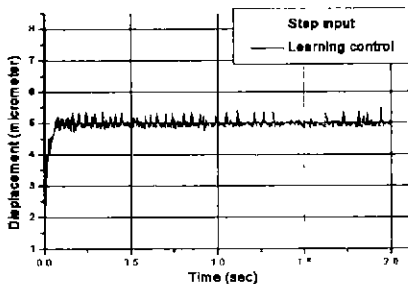


그림 10. 학습제어기를 이용한 Step 입력

(Step input tracking performance in neural network)

다음의 그림 11.은 Step 입력이 주었을 때의 위치 오차를 보여 준다.

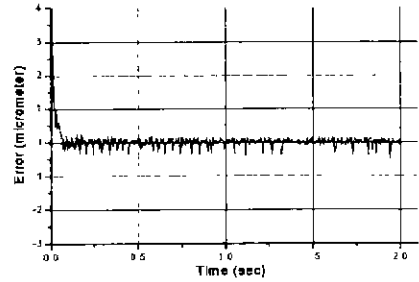


그림 11. 학습제어기의 Step 위치 오차
(Displacement error in neural network)

4. 결론

본 논문에서는 실험을 통하여 학습제어기를 사용했을 때와 비례-미분 제어기만을 사용했을 때의 추종 성능을 비교해본 결과 학습제어기를 사용하였을 때가 PD 제어기에서보다 사인폭선에서는 오차 값이 적었고, Step 입력에서는 Overshoot가 생기지 않으므로 성능이 우수하다.

참고문헌

1. S.Jung and S. Kim, "Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feedforward model-reference control", Precision Eng. P. Ge and M. Jouaneh, Vol. 16, NO.1, pp.49~55, 1994.
2. H.Kaizuka and B. Sui, "A simple way to reduce hysteresis and creep when using piezoelectric actuator". Japan J. Appl. Phys, Vol.27, No.5, pp.773~776, 1998.
3. S.Haykin, "Neural Networks", Macmillan, 1994.
4. 김승한, 송하성, 송재욱, 김의중, "압전 재료를 이용한 초정밀 가공기용 공구 위치 제어", 한국정밀공학회, 96년도추계학술대회논문, pp126~166.