

피드백 오차 학습 신경회로망을 이용한 하드디스크 서보정보 기록 방식

Servo-Writing Method using Feedback Error Learning Neural Networks for HDD

김수환*, 정정주**, 심준석†

(Su Hwan Kim, Chung Choo Chung and Jun Seok Shim)

Abstract - This paper proposes the algorithm of servo-writing based on feedback error learning neural networks. The controller consists of feedback controller using PID and feedforward controller using gaussian radial basis function network. Because the RBFNs are trained by on-line rule, the controller has adaptation capability. The performance of the proposed controller is compared to that of conventional PID controller. Proposed algorithm shows better performance than PID controller.

Key Words : Track Servo Writing, Feedback Error Learning, Radial Basis Function, Intelligent Control

1. 서론

하드디스크의 트랙밀도가 매년 증가함에 따라 제조과정에서 일정 시간내의 생산량과 서보정보의 위치 정확도는 중요한 문제로 대두되고 있다. 현재까지 다양한 서보 정보 기록 방식이 사용되고 있으나, 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 현재 많이 사용되고 있는 방법으로써 외부 장치인 푸쉬 핀[1]을 이용한 기록방식이 있다. 위 방법은 서보 정보를 기록하는데 오랜 시간이 소요되며, 기록하는 동안에 주변의 외란에 의해 RRO(Repeatable Runout)가 생기는 문제를 갖고 있다. 또 다른 방법으로써 다수의 디스크를 적층하여 기록하는 미디어 레벨 방식[2]이 사용되고 있다. 이는 푸쉬 핀 방식보다 생산량을 높이는 장점이 있다. 하지만 기록하는 액추에이터와 하드디스크 액추에이터의 차이로 인해 생기는 트랙 오프셋, 타이밍 지터등 다양한 문제를 갖고 있다. 이를 해결하기 위해 추가적인 피드포워드 서보 제어를 이용한 캘리브레이션이 필요하다. 현재 사용되고 있지는 않지만, 활발히 연구 중에 있는 방법으로써 반도체 리소그래피 과정을 이용하여 서보 정보를 기록하는 패턴드 미디어 방식[3]과 자기 효과를 이용한 프린트드 미디어 방식[4]이 있다. 위 방법들 역시 생산량을 증가시킬 수 있으나, 현재의 기술로는 서보정보의 정확도를 보장할 수 없는 기술적인 한계를 가지고 있다. 따라서 하드디스크 제조과정에서 서보정보 기록시간의 단축과 기록 중에 생기는 다양한 문제를 해결하기 위해 새로운 서보정보 기록 기술이 필요하다. 이러한 정해진 프로파일에 대한 추종 제어 기법으로써 퍼지 슬라이딩 적용 제어[5], 멀티레이트 피드포워드 제어에 기반을 둔 완벽 추종 제어[6] 등이 제안되었다. 본 논문에서 제시된 방식은 실시간 학습과 제어이므로 주변 외란이나 플랜트 비선형 성분인 토크 바이어스 등이 있는 상황에도 향상된 성능을 갖는 장점이 있다.

저자 소개

* 正 會 員 : 한양대학 전자통신전공학 碩士課程

** 正 會 員 : 한양대학 전자전기컴퓨터공학과 副教授 · 工博

† 非 會 員 : 삼성종합기술원 工博

본 논문에서는 [7]에서 제시된 스파이럴 형태의 패턴을 이용하여 서보정보를 기록하는 방식을 구현하기 위해 피드백 오차 학습 신경회로망을 이용한 방식을 제안한다. 제시된 제어 방식은 모의실험을 통해 그 성능을 검증할 것이다. 마지막으로 이를 푸쉬 핀 방식에 적용, 실제 실험을 통하여 성능이 검증된다면 서보정보 기록시간을 기존에 비하여 약 8배 줄임으로써 생산량을 증대시킬 수 있다. 더 나아가 서보정보의 기록을 외부장치에 의존하지 않는 풀 셀프 서보 기록방식에 파급효과를 줄 수 있다.

2. 본론

1. 제어기의 설계

본 논문에서 제어의 목적은 헤드가 일정한 간격으로 스파이럴 형태의 패턴을 기록하는 것이다. 이를 위해서는 하드디스크 액추에이터가 최외각 트랙에서 최내각 트랙까지 가감속 구간을 줄이고, 정해진 시간 동안에 최대 속도를 유지한 상태로 등속도 운동을 하는 조건이 필요하다. 또한 원하는 트랙 수를 얻기 위해 정해진 프로파일에 대하여 언더슈트나 오버슈트 현상이 없어야 한다. 위의 조건을 만족할 경우 원하는 트랙 수를 얻을 수 있으며, 정확한 서보정보를 기록할 수 있다. 일반적으로 PID 제어기로는 외란이나 플랜트의 불확실성이 있을 때 PID 이득이 고정되어 있기 때문에 원하는 성능을 얻지 못할 뿐 만 아니라, 그 이상의 성능을 필요로 할 때에도 그 사양을 만족하기에는 그 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 같이 PID 선형 제어기와 RBFN(Radial Basis Function Network)을 이용한 피드포워드 제어를 제안한다. 여기서의 선형 제어기는 초기 제어를 담당하고 피드포워드 제어기가 빠른 학습을 할 수 역할을 수행한다. 선형 제어기는 반드시 안정성이 보장되어야 하며, 최적의 성능을 발휘할 수 있는 제어기로 구성해야 한다. 만약 선형 제어기가 안정하지 않은 경우에는 피드포워드 제어기가 학습을 할 수 없으며, 성능이 좋지 않은 경우에는 피드포워드 제어기의 학습 속도가 느려지는 문제가 생기게 된다. 아래의 그림 1은 본 논문에서 제시한 전체 제어기의 블록 다이어그램이다.

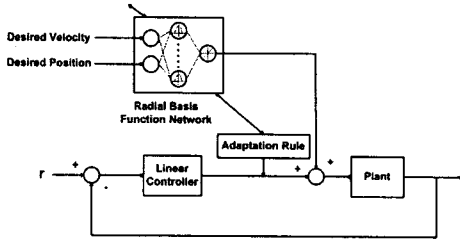


그림. 1 제어기의 블록 다이어그램

1-1 피드백 제어기 설계

본 논문에서 피드백 제어기는 PID 제어기로 구성하였다. 제어기의 이득은 다음 두 가지 경우를 고려하여 결정하였다. 플랜트 공진모드 성분의 영향이 나오지 않는 범위 내에서 이득을 결정하였다. 또한 신경회로망이 학습이 가능하게 하고, 보다 빠르게 학습을 할 수 있도록 시스템이 발산하지 않는 범위 내에서 PID 이득을 결정하였다

1-2 피드포워드 학습제어기 설계

Kawato 등은[8] 피드백 제어기의 출력을 신경회로망의 학습을 위한 오차로 사용하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 피드백 오차 학습(feedback error learning)이라 명명되었으며, 주로 로봇 제어에 주로 사용되고 있다. 피드포워드 루프상의 RBFN은 선형 제어기의 출력을 0으로 감소시키도록 학습되어지고, 속도와 위치의 변화에 따라 학습과정을 거쳐 가중치가 최적화 된다. RBFN은 두 개의 입력과 하나의 출력으로 구성되어 있다. 위의 그림 1과 같이 신경회로망의 입력은 원하는 위치 제척과 속도 제척을 사용하였다. 그리고 출력은 뉴런층의 응답의 선형 가중합의 형태를 사용하였다. 입력 변수는 뉴런간의 중심 간격을 이용하여 아래 그림 2와 같이 정규화한다.

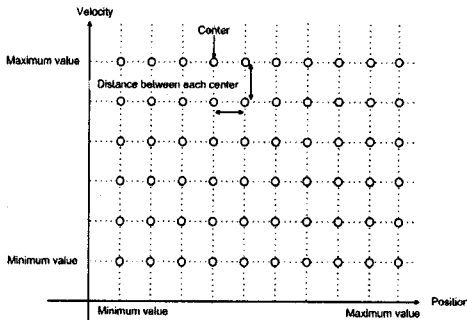


그림. 2 신경회로망의 정규화 입력 노드

j 번째 뉴런과 입력의 거리 D 는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 D_j(x_1, x_2) &= \left\| \frac{x - c_{1j}}{c_{sp1}} \right\|^2 \\
 &= \left(\frac{x_1 - c_{1j}}{c_{sp1}} \right)^2 + \left(\frac{x_2 - c_{2j}}{c_{sp2}} \right)^2 \\
 j &= 1, \dots, J
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 은닉층의 활성화수로 Gaussian 함수를 사용하였다. 이는 입력패턴의 특성에 따른 패턴분류를 할 때, 출력층의 신경소자는 분류된 각 집단에 대응한다. 본 논문에서 제시한 피드포워드 제어에 사용된 Gaussian RBFN의 구조는 식 (2)와 같다. 여기서 h 는 각 신경소자의 출력이며, σ 은 RBFN 폭이다.

$$h_j(x; c_j, \sigma_j) = \exp\left(-\frac{D_j(x_1, x_2)}{2\sigma_j^2}\right) \quad (2)$$

RBFN의 출력 y 는 은닉 뉴런층의 응답의 선형 가중합의 형태로 나타나며, 식 (3)과 같이 표현된다.

$$y(x) = \sum_{j=1}^J w_j h_j(x; c_j, \sigma_j) \quad (3)$$

오차 신호가 있는 네트워크의 피드포워드 오차 학습 방법에서 가중치 w 는 식 (4)을 이용하여 학습된다. 여기서 η 는 학습계수

$$\frac{dw_j}{dt} = \eta \left(\frac{y}{w_j} \right) u_{fb} = \eta h_j u_{fb} \quad (4)$$

2. 모의실험 결과

2-1. 플랜트 모델

실험에서 사용된 인코더는 Micro-E사의 PA2000 모델이다. 이 모델은 4.68 nanoradians의 분해능, 35 nanoradians rms의 정확도, 46°의 스트로크를 갖는 인코더이다. 플랜트 모델은 Micro-E사에서 제공하는 보드선도를 근거로 하여 전달함수를 구하였다. 플랜트 모델은 아래의 그림 3과 같이 0-dB 주파수가 약 800Hz이며 6.9KHz 근방에 있는 공진모드를 고려하여 4차로 아래의 식 (5)와 같이 모델링 하였다.

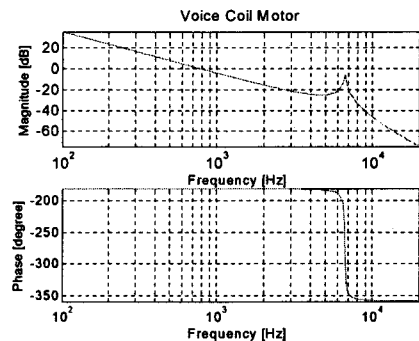
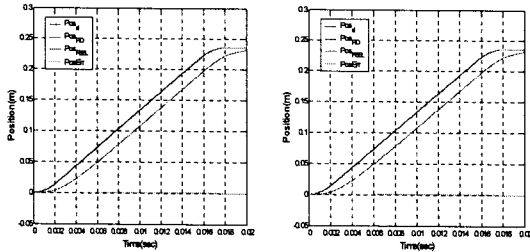


그림. 3 플랜트 보드선도

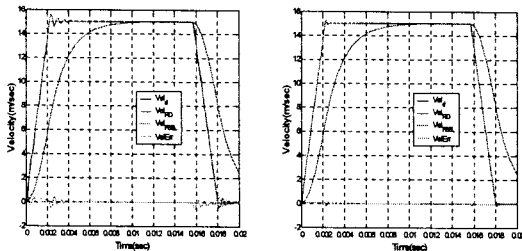
$$G(s) = \frac{3.816^2 \times 10^9}{s^4 + 1.178 \times 10^3 s^3 + 1.740 \times 10^9 s^2} \quad (5)$$

2-2. 모의실험 결과

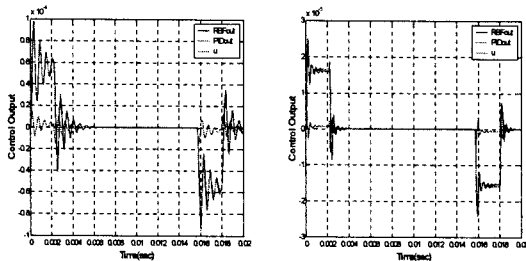
모의실험 조건은 샘플링 주기 20KHz, PI 이득 $K_p = 2.69e-005$, $K_i = 2.96e-006$, $K_d = 3.42e-008$, 학습속도 $\eta = 0.8$, RBFN 폭 $\sigma = 0.86$, 신경회로망 입력은 원하는 위치 10개와 속도 7개의 조합으로 총 70개, 학습 횟수 5회, 15회로 설정하여 그 결과를 PI 제어기와 비교하였다. 기준신호는 등속운동 구간을 전체 운동시간의 90%가 되도록 사다리꼴 형태의 속도 프로파일로 구성하였다.



(가). 학습 회수 5회 (나). 학습 회수 15회
그림. 4 원하는 위치 궤적과 실제 궤적



(가). 학습 회수 5회 (나). 학습 회수 15회
그림. 5 원하는 속도 궤적과 실제 궤적



(가). 학습 회수 5회 (나). 학습 회수 15회
그림. 6 피드포워드 학습제어기와 피드백 제어기 출력

그림 4에서 (나)의 경우 신경회로망 제어기는 일정한 오차를 갖기 시작하는 시간이 1.5msec로 PID 제어기의 3.3msec보다 두 배 이상 빠르며, 위치 프로파일과의 오차는 0.75mm로 PID 제어기의 14.5mm보다 20배 향상된 성능을 보여준다. 그림 5에서 (나)의 경우 신경회로망 제어기는 오버슈트 0.6%, 정착시간 1.5msec로 PID 제어기의 9.3msec보다 약 6배 빠르다. 1%에 대한 정상상태 오차 140um/sec로 PID의 3000um/sec보다 약 20배 향상된 성능을 보여준다. 아래의 표 1은 PID 제어기와 제안된 신경회로망 제어기의 성능을 비교한 표이다.

		학습 횟수 5회		학습 횟수 15회	
		PID 제어기	신경회로망 제어기	PID 제어기	신경회로망 제어기
위치	등속운동 시간(msec)	3.3	1.5	3.3	1.5
	정상상태 오차(mm)	14.5	0.86	14.5	0.75
속도	오버슈트 (%)	0	4	0	0.6
	정상상태 오차(um/sec)	3000	150	3000	140
	정착시간 (msec)	9.3	3.2	9.3	1.5

표. 1 PI 제어기와 신경회로망 제어기의 성능 비교

3. 결론

본 논문에서는 모의실험 결과를 통해 제안된 신경회로망 제어기가 PID 제어기보다 향상된 성능을 보여줌을 확인하였다. 이 결과는 기존 정보 기록방식의 한계를 넘어 새로운 알고리즘을 적용, 구현할 수 있는 가능성을 제시한다. 앞으로 제시한 알고리즘을 현재 푸시 핀 방식에 적용, 실험을 통하여 효용성을 확인할 것이다. 효용성이 확인된다면, 하드디스크 산업에서 서보정보 기록시간이 기존에 비하여 약 8배 단축됨으로써 생산량을 증대시킬 수 있다. 더 나아가 서보정보의 기록을 외부장치에 의존하지 않는 풀 셀프 서보 기록방식 기술에 파급효과를 줄 수 있다.

참고 문헌

- [1] Y. Uematsu, M. Fukushi, and K. Taniguchi, "Development of the Pushpin Free STW," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 37, no. 2, pp. 964-968, March 2001.
- [2] K. Takaishi, Y. Yamada, M. Kamimura, M. Fukushi and Y. Kuroba, "Hard Disk Drive Servo Technology for Media-Level Servo Tracking Writing," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 39, no. 2, pp. 851-856, March 2003.
- [3] E. C. Hughes and W. C. Messner, "Characterization of three servo pattern for position error signal generation in hard drives," American Control Conference 2003, vol. 5, pp. 4317-4322, June 2003.
- [4] T. Ishida, K. Miyata, T. Hamada and K. Tohma, "Printed Media Technology for an effective and Inexpensive servo track writing of HDDs," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 37, no. 4, pp. 1875-1877 July 2001.
- [5] B.-D. Yoon, Y.-H. Kim, H.-W. Rhew and C.-K. Kim, "An approach for the design of fuzzy sliding adaptive controller in induction motor drives," Industrial Electronics, Control and Instrumentation 1996, vol. 2, pp. 971-976, Aug. 1996.
- [6] H. Fujimoto, Y. Hori and A. Kawamura, "Perfect tracking control based on multirate feedforward control with generalized sampling periods," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 48, no. 3, June 2001.
- [7] P. A. Swearingen, "System for self-servowriting a disk drive," US patent 5,668,679, Quantum, 1997.
- [8] H. Miyamoto, M. Kawato, T. Setoyama and R. Suzuki, "Feedback-Error-Learning Neural Network for Trajectory Control of a Robotic Manipulator," Neural Networks, vol. 1, pp. 251-265, 1988.