

# 신경망을 이용한 하이브리드 학습 제어 알고리즘의 연구

고영철 • 왕지남

아주대학교 산업공학과

## Abstract

본 연구에서는 반복 학습 제어 이론을 기초로 하는 하이브리드 신경망 제어를 제안한다. 신경망으로는 백프로퍼게이션(backpropagation) 신경망을 사용하고, 기존의 반복 학습 제어 이론의 단점을 보완한 제어 알고리즘을 제안한다. 백프로퍼게이션 신경망의 맵핑(mapping)의 특징으로 원하는 목표 패턴에 추종할 수 있는 출력 패턴을 생성하고 반복 학습에 소요되는 학습시간을 줄일 수 있다. 실험결과에서 보듯이 제안된 제어 알고리즘은 목표패턴에 수렴함을 알 수 있다. 제시한 알고리즘은 CD-ROM 드라이브와 같은 광디스크 드라이브류의 초점 제어 등에 응용할 수 있다.

## I 서론

제어 대상의 동특성(dynamics)이 복잡하고 비선형이며 부하에 따라 파라미터 등이 변동되는 등 많은 불확실성을 내포하고 있는 경우는 미지의 동특성을 효과적으로 제어하는 방법에 대한 연구가 이루어져야 하며, 이에 대한 연구로 반복 학습 제어를 들 수 있다. 동일한 일을 반복적으로 수행할 때 학습이라는 개념을 자동 제어에 적용한 반복 학습 제어는 시스템에 대한 정확한 모델이 없어도 제어를 반복함에 따라 이전 수행시의 오차에 대한 정보를 기준으로 제어 입력을 수정하여 점차 성능이 개선된다는 장점이 있으며, 제어 방식이 단

순하여 쉽게 구현되므로 이에 대한 이론적인 연구가 활발히 진행되어 왔다.

최근에는 디스크 드라이브의 트래킹 제어와 같은 회전체를 가진 시스템의 주기적인 잡음 제어에도 응용이 시도되고 있으나, 반복 학습 제어에 있어 각 단계의 초기 조건의 미묘한 차이에도 시스템이 발산할 수 있으므로 각 단계의 초기 조건이 같아야 한다는 제약이 있다. 본 연구에서는 반복 학습 제어의 개념과 신경망을 이용하여 제어 알고리즘을 제시하여, 반복 학습 제어의 이러한 제약점을 제거하려 한다.

개발된 알고리즘을 광 디스크 드라이브의 제어에 적용하여 이 시스템의 제어 시간을 단축시키고 구동 메가니즘을 개선시키며 전체 광 디스크 드라이브의 성능을 향상시키고자 한다.

## II. 기존의 연구

Uchiyama에 의해 최초로 제안된 반복 학습 제어 방법은 Arimoto와 그의 동료들에 의해 이론이 확립되었으며, 완벽한 추종이 이루어질 때까지 알고리즘을 계속 반복적으로 미지의 시스템에 적용한다. 제어기의 기본 형태는 다음과 같다.

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + L \frac{d}{dt} e_k(t) \quad 0 \leq t \leq T$$

단,  $u_k(t)$ : k번째 반복에서의 제어 입력

$e_k(t)$ : 시스템의 출력( $y_d(t)$ )과 시스템의 목표 출력 ( $y_k(t)$ )사이의 차  
 즉,  $e_k(t) = y_d(t) - y_k(t)$   
 L: gain factor

반복 학습 제어는 시스템의 정확한 모델을 필요로 하지 않는 장점이 있으며, 시스템이 조건을 만족하면 제어를 반복함에 따라 일괄 추종(uniform tracking)성능을 보장한다는 장점이 있다.

Kolmogrov는 신경망을 사용해서  $R^n$ 에서  $R^m$ 로의 비선형 맵핑이 가능함을 보였다. 이 연구를 계기로 제어가 설계에 신경망을 이용한 연구들의 계기를 마련하였다.

Psaltis, Sideris와 Yamamura 등은 신경망을 사용하여 feedforward 제어를 설계하여, 세가지 제어 방법을 제시하였다. 첫번째 방법은 제어 입력과 신경망의 출력과의 차를 최소화하도록 제어를 설계하는 것과, 두번째로는 제어 입력과 시스템의 출력과의 차의 제곱을 최소화하도록 제어를 설계하였다. 마지막 방법은 제어 입력으로 출력을 학습시켜 목표 출력에 수렴하도록 제어를 설계하였다. 동적으로 작동하는 시스템의 동특성 제어를 위해 Narendra와 Parthasarthy는 신경망을 이용하여 제어를 설계하였다.

### III 제안 알고리즘

신경망의 가장 큰 장점은 학습에 있다. 입력 패턴과 그에 대한 목표패턴이 주어지면 신경망은 내부적인 연결강도를 조정하며, 학습이 성공적으로 진행되었을 때는 입력패턴에 대해 정확한 답을 줄 수 있도록 내부적인 변수(parameter)들이 조정된다. 일반적으로 훈련 예제들의 집합은 내부적인 변수들이 점차로 조정될 수 있도록 여러번 반복하여 제공된다.

이러한 특성을 지닌 신경망을 제어기의 설계에 이용하는 것은, 신경망이 비선형 시스템이고 내부 표현(internal representation)을 학습하며 연상 기억 능력을 가지므로 비선형 제어의 좋은 대상이 된다.

신경망의 학습은 목표패턴과 입력패턴과의 차이를 줄여나가는 방향으로 가중치들이 수정된다. 신경망의 목표패턴에 따라 입력패턴의 학습이 결정되므로, 신경망의 목표패턴이 시스템 목표 제어 입력에 근사할수록 좋은 결과가 나온다. 따라서, 신경망의 목표패턴은 반복 학습 제어를 통해서 얻는다.

반복 학습 제어에 의해 생성된 제어 입력에 의해 시스템이 발산하기전 혹은 이전보다 제어 입력의 개선이 있을 때까지는 반복 학습 제어를 사용하며, 시스템이 발산할 경우에는 그때까지의 목표 출력과 시스템의 실제 출력과의 차이를 최소로 하는 제어 입력을 신경망의 목표패턴으로 하여 학습을 한다.

제안된 알고리즘은 다음과 같다.

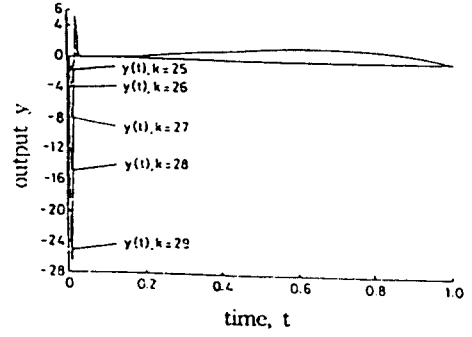
#### Algorithm

- Step 1: 반복 학습 제어를 적용하여 제어 입력 생성
- Step 2:  $e(t)$ 를 계산
- Step 3: 전단계의  $e(t)$ 보다 개선된 경우는 step1으로, 전단계의  $e(t)$ 보다 개선되지 않고 그 차이가 일정 범위안에 들어올때, step 4로
- Step 4: 목표 패턴에 대해 신경망 학습
- Step 5: 신경망으로 학습된 입력에 대해 시스템 제어

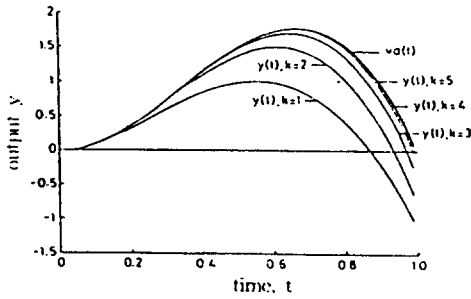
### IV 실험결과

<그림3>에서 12단계에서  $[0, T]$ 사이의 트래킹 에러는  $10^{-5}$ 보다 작다. 만약 반복을 계속할수록, 시간 't=0' 근처에서 출력  $y(t)$ 가 증가하는 것을 볼 수 있다. 반복 수 k가 증가함에 따라  $y_k(t)$ 가 커짐을 알 수 있다. 따라서, 't=0'시점에서 출력이 증가하는 점을 막기 위해 백프로 퍼게이션 신경망을 사용하였다. 신경망의 목표패턴을 시스템이 발산하기 전인 'k=12'일 때로 목표패턴으로 학습시킨 후 각 제어 입력에 대한 출력값을 살펴보면 에러가 상당히 감소된 것을 알 수 있다. 먼저 <그림4>는 목표 패턴과 입력 패턴에 의해 계산된 신경망상의 출력

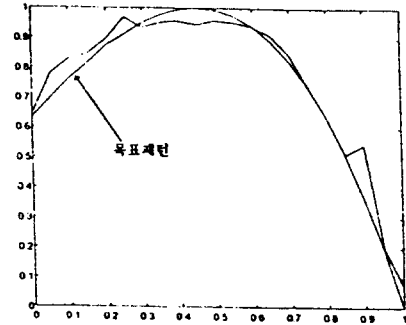
과의 차의 제곱합이 '0.2'일 때까지 학습을 시켰을 때의 결과이고, <그림5>은 '0.109'일 때까지 학습한 경우이다. 그림에서와 같이 학습이 진행될수록 더욱 만족스러운 결과값이 나오는 것을 볼 수 있다.



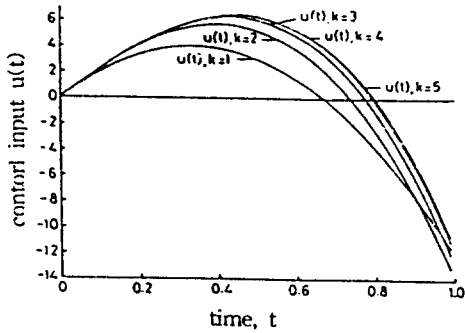
<그림 3> Plot of  $y(t)$  after the 25th iteration



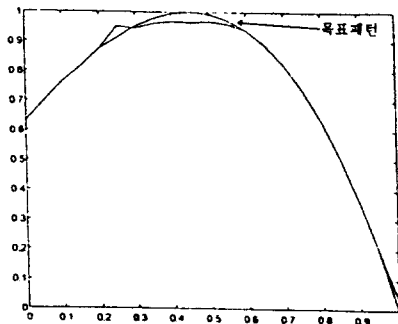
<그림 1> Plot of  $y(t)$  up to the 5th iteration



<그림 4> 에러제곱합이 0.2일 때 가중치를 사용한 입력패턴과 목표패턴



<그림 2> Plot of  $u(t)$  up to the 5th iteration



<그림 5> 에러제곱합이 0.109일 때 가중치를 사용한 입력패턴과 목표패턴

## V 결론

신경망은 제시된 목표패턴에 대해 학습이 이루어지는 특성을 이용하여 반복 학습 제어로 제어를 이용하여 제어 입력을 생성하였다. 일단 학습된 신경망은 다른 입력에 대해서도 매 단계 같은 신호를 출력하므로, 학습이 잘된 신경망은 좋은 제어 입력을 계속적으로 생성시킬 수 있다.

반복에 의해 최적을 찾아가는 반복 학습 제어와 달리, 신경망을 이용하면 목표패턴이 정확히 주어진 경우에는 반복에 의하지 않고도 곧 바로 좋은 제어 입력을 생성시킬 수 있다.

본 연구에서는 반복 학습에 의해 신경망의 목표패턴을 얻었으나, 다른 제어 기술에 의해서도 신경망의 목표패턴을 얻어 실험을 해보려 하며, 학습으로 유연성이 적어진 패턴을 다중 신경망을 이용하여 학습시켜 패턴의 유연성을 향상시키고, 이렇게 설계된 제어 알고리즘을 신경망 전용 칩을 통해 구현하여 학습에 소요되는 시간을 최소로 하여 효율을 높이려 한다.

## Reference

- [1] 이경호, "반복 학습 제어기의 설계 및 MODD 초집 제어에의 응용에 관한 연구", 박사 학위 논문, 한국 과학 기술원, 전기 및 전자 공학과, 1994.
- [2] A. Guez, J. L. Eilbert, and M. Kam, "Neural Network Architecture for Control," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 22-25, April 1988
- [3] D. H. Hwang, Z. Bien, and S. R. Oh, "Iterative learning control method for discrete-time dynamic systems", *IEE Proceedings-D*, vol. 138, No. 2, March 1991.
- [4] D. Psaltis, A. Sideris, and A. Yamamura, "A multilayered neural network controller," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 8, pp. 7-21, April 1988.
- [5] F. L. Lewis, K. Liu and A. Yesildirek, "Neural Net Robot Controller with Guranteed Tracking Performance," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 6, No.3 May 1995
- [6] K. H. Lee and Z. Bien, "Initial conditions problem of learning control," *IEE Proceedings-D*, Vol. 138, No. 6, November 1991
- [7] Kevin L. Moore, *Iterative Learning Control for Deterministic Systems*, Springer-Verlag, 1993
- [8] K. Narendra and K. Parthasarathy, "Identification and control of dynamical systems using neural networks," *IEEE Transactions on Neurl Networks*, vol. 1, pp. 4-27, March 1990
- [9] Z. Bien and K. M. Huh, "Higher-order iterative learning control algorithm," *IEE Proceedings*, vol. 136, Pt. D, No. 3, May 1989.