

신경망을 이용한 PID 제어기의 자동동조 및 기준모델 적응제어

김순태, 김중석, 서양오, 박세진, 홍연찬
 인천대학교 전자공학과 제어계측 연구실(Tel : 032-770-8449; Fax : 032-764-2371)

Auto-tuning of PID controller using Neural Networks and Model Reference Adaptive control

S.T. Kim, J.S. Kim, Y.O. Seo, S.J. Park, Y.C. Hong.
 Dept. of Electronics engineering, Univ. of Incheon

Abstract - In this paper, the design of PID controller using Neural networks for the control of non-linear system is presented. First, non-linear system is identified using BPN(Backpropagation Network) algorithm. This identified model is connected to the PID controller and the parameters of PID controller are updated to the direction of reducing the difference between the identified model output and model reference output in arbitrary input signal. Therefore, identified model output tracks the model reference output in an acceptable error range and the parameters of controller are updated adaptively.

The output of the system has a good performance in case of both noisy and noiseless model reference and we can control the system stable in off-line when the dynamics of the system is changed.

1. 서 론

지난 수 십 년 동안 제어분야에서 괄목할 만한 이론의 발전에도 불구하고 비례, 적분, 미분제어기는 현재까지도 산업계에서 널리 사용되고 있다. 그러한 이유중의 하나는 구조가 단순하고 강인한 특성을 가지고 있으며 비 선형적인 현상 운영자라 할지라도 시행 착오적인 방법에 의해 비교적 손쉽게 제어기를 동조할 수 있기 때문이다. 또한 PID(Proportional, Integral, Derivative) 계수가 시스템의 특성에 맞게 결정되었다면 시스템의 구조가 바뀌지 않는 한 매우 견실한 제어 특성을 가지고 있다.

그러나 비선형적인 시스템이나 미지의 시스템일 경우에는 단순한 경험에 의한 방법만으로는 최적의 제어를 이룰 수 없으며 적절한 PID 계수를 결정하기가 어렵다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에는 학습기능을 가지고 있어서 시스템의 동특성에 관한 지식이 없어도 제어환경의 변화에 스스로 적응할 수 있는 신경망을 제어분야에 응용하고 있다[1]. 본 논문에서는 비선형 시스템 또는 미지의 시스템을 off-line상에서 신경망을 이용하여 인식한 후 이를 바탕으로 시스템이 기준모델(model reference)을 추적하도록 신경망을 이용하여 PID 계수를 결정한다[2]. 즉, 임의의 입력에 대한 시스템의 인식을 한 후 기준모델을 추적하도록 함으로써 초기 응답의 부정확성을 개선시키며, 원하는 출력이 변화하였을 경우에 시스템의 인식을 다시 하지 않고 기준모델을 바꾸어 줌으로써 시스템 제어의 편리성을 도모하였다.

미지의 시스템을 인식하기 위하여 임의의 입력신호에 대한 시스템의 출력신호와 신경망 출력신호의 오차를 측

정하여 이 오차를 줄이는 방향으로 가중치(weights)를 변경시켰다. 가장 널리 사용되고 있는 오차 역전파(error backpropagation) 알고리즘을 이용하여 만족할 만한 오차범위에 이르기까지 신경망을 학습한 후에 이를 인식모델(identified model)에 다운로드한다. 여기에 PID 제어기를 연결한 다음 임의의 입력에 대한 기준모델의 출력과 인식모델의 출력 오차를 줄이는 방향으로 신경망을 이용하여 PID 제어기의 계수를 변경하였다.

본 논문에서는 잡음 성분이 있는 경우와 잡음 성분이 없는 경우의 비선형 시스템을 모의 실험을 통하여 강인한 제어특성을 보였으며 기존의 제어특성에 비해 좋은 응답을 보였다.

2. 신경망을 이용한 PID 제어기의 자동동조 및 기준모델 적응제어

다음 그림은 본 논문에서 제시한 전반적인 시스템의 구성도이다. 먼저 시스템의 인식을 위하여 신경망을 이용하였다. 인식된 모델을 이용하여 시스템이 기준모델을 추적하도록 제어기의 계수를 역시 신경망을 이용하여 선정하였다. 다음 그림은 전체 구성도이다.

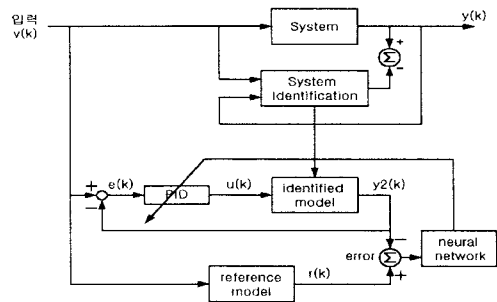


그림 1. 전체 시스템 구성도

2.1 신경망을 이용한 시스템 인식

실제 산업 현장에서는 시스템의 전달함수를 수학적으로 표시할 수 없는 경우가 많다. 그렇기 때문에 임의의 신호를 시스템에 인가하여 시스템의 전달함수를 표시할 수 있는 방법이 필요하다. 즉 입력되는 데이터에 근거하여 하나의 동적 시스템에 관한 수학적인 모형을 구축하는 것이 필요하다. 신경망 기반의 시스템 인식 모형에서 신경망의 가중치와 바이어스들은 모형 출력이 측정된 출

력과 유사하도록 조정된다. 하나의 동적인 모형은 출력이 시스템의 과거 상태에 종속되는 것이라 할 수 있다. 다음 그림은 본 논문에서 사용한 시스템 인식 구성도이다.

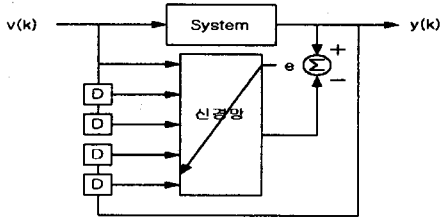


그림 2. 시스템 인식을 위한 블록선도

시스템의 입력으로 입력신호 $v(k)$ 가 들어오며 이 신호는 시스템에 의해 출력신호 $y(k)$ 를 만들어 낸다. 이 시스템을 인식하기 위한 신경망 모델의 입력으로 입력신호 $v(k)$ 와 지연된 신호들인 $v(k-1)$, $v(k-2)$ 와 출력의 지연 신호인 $y(k-1)$, $y(k-2)$ 를 사용하였다. 실험에 의하면 신경망의 입력으로 $v(k)$ 만을 사용할 경우에는 오차가 심할 경우 ± 0.5 정도로 매우 크며 지연신호 $v(k-1)$, $y(k-1)$ 를 추가하였을 경우에는 오차가 10^{-5} 정도이다. 위의 그림과 같이 $v(k-2)$, $y(k-2)$ 를 더 추가하였을 경우와 $v(k-3)$, $y(k-3)$ 를 추가하였을 경우에는 오차가 10^{-12} , 10^{-13} 정도로 이 두가지 경우가 가장 안정적이다. 그러나 지연신호를 더 증가시키면 오히려 오차가 증가되었다. 입력이 5개인 신경망 구조는 다음 그림3과 같다.

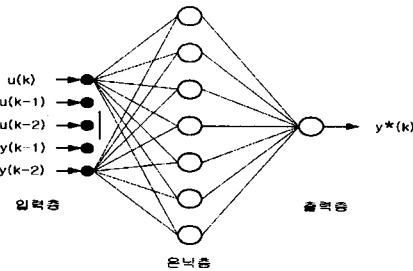


그림 3. 시스템 인식을 위한 신경망 구조

시스템 인식을 위하여 사용된 비선형 시스템은 다음과 같다.

$$y(k) = \frac{0.85y(k-1)y(k-2) + 0.16u(k-1) + 0.25u(k-2)}{1 + y(k-1)^2} \quad (1)$$

여기서 시스템의 동특성을 파악하기 위하여 신경망의 오차 역전파 알고리즘을 이용하였다. 은닉층의 전달함수는 시그모이드 함수를, 출력층의 전달함수는 선형함수를 사용하였다. 은닉층의 뉴런 갯수는 7개를 사용하였으며 출력층은 1개의 뉴런을 사용하여 신경망의 출력과 시스템의 출력의 오차를 비교하였다. 신경망의 학습은 시스템 입력에 의한 시스템 출력과 인식모델의 출력이 같아

지도록 가중치를 갱신시키는 형태로 이루어진다. 가중치를 갱신시키기 위한 오차함수 $E(k)$ 를 다음 식(2)과 같이 정의하고 그 때 가중치의 학습 식은 식(3)과 같다.

$$E(k) = \frac{1}{2} (y(k) - y^*(k))^2 \quad (2)$$

$$W(k+1) = W(k) - \eta \frac{\partial E(k)}{\partial W(k)} \quad (3)$$

여기서 η 는 학습율을 나타내며, 신경망을 반복적으로 학습시키는 경우에 학습을 자체적으로 변화시키는, 즉 적응성을 갖도록 하는 것이 효과적이다. 시스템의 입력 $u(k)$ 는 주기 20인 구형파 신호를 사용하였으며 시스템의 출력과 신경망에 의한 인식신호는 다음 그림4와 같다.

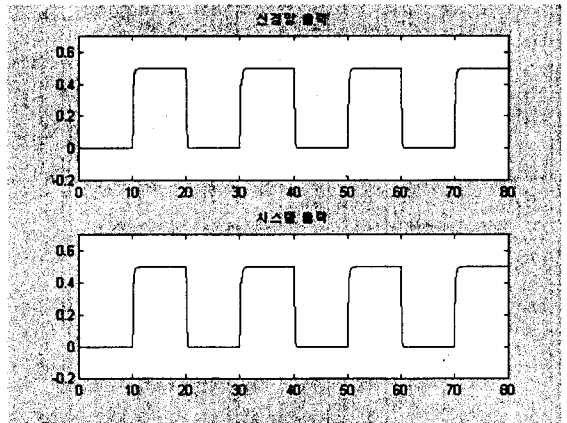


그림 4. 신경망 출력과 시스템 출력

2.2 기준모델 및 기준모델 적응제어

본 논문에서 사용한 기준모델은 주기 20인 구형파 입력신호($v(k)$)에 의해 출력된 신호로 출력과형은 다음 식과 같다.

$$r(k) = -0.35r(k-1) + 0.11r(k-2) + 0.1r(k-3) + 0.1r(k-4) + 0.3r(k-5) + 0.21v(k-1) + 0.11v(k-2) + 0.12v(k-3) + 0.2v(k-4) + 0.1v(k-5) \quad (2)$$

시스템의 인식모델은 기준모델의 신호를 추적하도록 하였다. 이에 대한 블록선도는 다음 그림5와 같다.

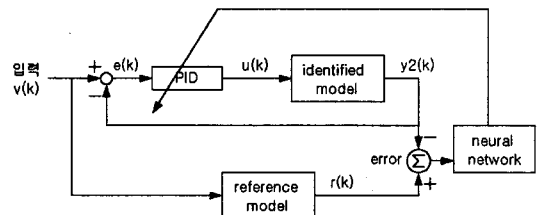


그림 5. 기준모델 적응제어를 위한 PID제어기 구조

여기서 $error = r(k) - y_2(k)$ 로서 기준신호와 인식신호간의 오차이며 이산시간 PID 제어기의 일반형은 다음 식과 같다.

$$\frac{u(z)}{e(z)} = K_p \left(1 + \frac{z}{T_i(z-1)} + T_d \frac{(z-1)}{z} \right) \quad (3)$$

$$u(k) = u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4)$$

여기서 PID 제어기의 계수를 구하기 위해 시스템 인식부분에서 사용하였던 신경망 구조와 유사한 구조를 사용하였다. 입력은 $e(k)$, $e(k-1)$, $e(k-2)$, $r(k-1)$, $r(k-2)$ 를 사용하였고 은닉층의 뉴런은 7개를 사용하였으며 출력층은 3개의 뉴런으로 구성하였다. 출력층의 3개의 뉴런은 각각 PID 제어기의 계수로 사용되었다. 다음 그림은 이러한 신경망 구조를 나타낸 것이다.

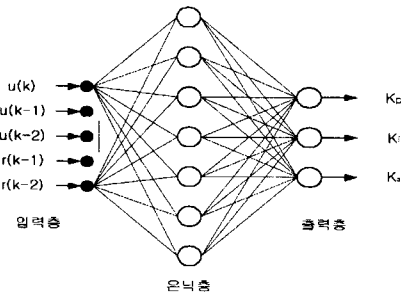


그림 6. PID 계수를 구하기 위한 신경망 구조

위의 그림에서 얻은 PID계수를 제어기에 다운로드하여 $u(k)$ 를 구한다. 출력신호 $y_2(k)$ 는 기준모델 신호 $r(k)$ 와 비교되어 오차신호 $error(k)$ 를 만들어 낸다. 신경망은 이 오차신호를 줄여나가는 방향으로 오차 역전파 알고리즘을 이용하여 은닉층과 출력층의 가중치를 변경시킨다. 따라서 신경망은 허용할 수 있는 오차범위 내에서 기준모델의 출력 신호를 추적할 수 있도록 PID 제어기의 계수를 결정할 수 있다. 다음 그림은 기준모델을 추적하는 최종 출력이다.

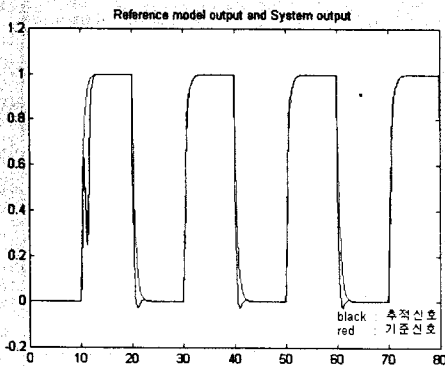


그림 7. 기준모델과 추적신호

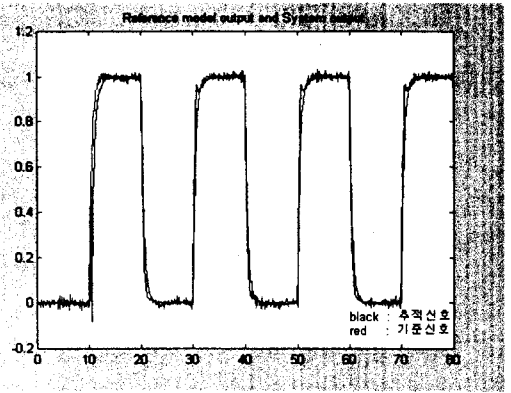


그림 8. 잡음이 있는 기준모델과 추적신호

위의 그림에서 보듯이 시스템의 출력은 기준모델을 일정 오차 범위 내에서 안정적으로 추적함을 볼 수 있다. 또한 기준모델에 잡음성분이 섞일 경우에 시스템의 출력에서도 기준모델을 거의 안정적으로 추적함을 볼 수 있다. 즉 신경망에 의한 시스템의 제어는 잡음성분에 강한 특성이 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서 제시된 방법에서 비선형 시스템의 추적에 적절한 PID계수가 선정되었음을 보였다. 즉 비선형 시스템 제어에 있어서 신경망을 이용한 PID 제어기는 구조가 간단하고 비선형 시스템을 선형화 시키지 않고 인식을 하며 시스템의 변화나 잡음에 학습능력이 있는 제어를 설계할 수 있다는 장점이 있다.

시스템의 제어에 있어서 기존의 방법은 출력값이 입력을 추적하도록 함으로서 원하는 출력이 변화할 경우에 이에 맞는 시스템 인식을 다시 하여야 했으나 본 논문에서 제시한 방법은 기준모델을 도입함으로써 시스템의 인식을 다시 하지 않고 원하는 출력값을 내도록 기준모델만 변화시키면 된다.

또한 시스템의 동특성이 변화할 경우 Off-Line상에서 시스템의 인식을 다시 하여 안정적으로 제어기의 계수를 결정할 후에 시스템의 제어에 이용함으로써 산업 현장에서 좀더 실질적으로 사용될 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 정중대, "인공신경망에 의한 PID 제어기 자동동조에 관한 연구", 한국퍼지 및 지능 시스템학회 논문지, Vol.6, No.2., 1996
- [2] ASRIEL U. LEVIN, KUMPATI S. NARENDRA, "Recursive identification using feedforward neural networks", INT. J. CONTROL, Vol.61, No.3, pp. 533-547, 1995
- [3] S. Daley, G. P. Liu, "Optimal PID tuning using direct search algorithms", Computing and Control Engineering Journal, 1999
- [4] Toshiharu Matsukuma, Atsushi Fujiwara, Munehiro Namba and Yoshihisa Ishida, "Non-Linear PID Controller Using Neural Networks", IEEE, pp. 811-814, 1997