

다단 신경회로망 예측제어기 개발에 관한 연구

배근신*, 김진수, 이영진, 이권순
 동아대학교 전기공학과

A Study on Development of Multi-step Neural Network Predictive Controller

Geun Shin Bae*, Jin Su Kim, Young Jin Lee, Kwon Soon Lee
 Dept. of Electrical Eng.
 Dong-A University, Pusan, Korea

Abstract - Neural network as a controller of a nonlinear system and a system identifier has been studied during the past few years. A well trained neural network identifier can be used as a system predictor. We proposed the method to design multi-step ahead predictor and multi-step predictive controller using neural network. We used the input and out put data of a system to train the NNP and used the forecasted approximat system output from NNP as a input of NNC. In this paper we used two-step ahead predictive controller to test a heating control system and compared with PI controller.

1. 서론

최근에 신경회로망을 이용한 비선형 시스템의 동정과 이를 이용한 제어기에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 신경회로망을 이용한 시스템 동정은 시스템의 입력과 출력사이의 비선형적 함수관계를 입.출력 데이터를 이용하여 오프라인(Off-line) 학습 후 신경회로망이 주어진 시스템의 입출력 관계를 잘 추종하도록 함으로서 이루어진다. 이렇게 임의의 시스템의 입.출력 관계를 잘 동정하도록 학습한 신경회로망은 예측기로서 사용될 수 있다[2]. 따라서 본 논문에서는 신경회로망 예측기와 예측된 값을 입력으로 하여 학습하는 신경회로망 제어기로 이루어진 다단 신경회로망 예측 제어기(Multi-step Neural Network Predictive Controller)의 구성법을 제안하고, 비교적 응답 지연시간이 전열기 온도제어의 실험을 통하여 PI제어와 비교하여 보았다..

2. 다단 신경회로망 예측기 설계

2.1 일단(One-step Ahead) 신경회로망 예측기

비선형 동적 시스템을 다음과 같이 나타낸다.

$$y(t+1) = F(y(t-n), u(t-m)) \quad (n \geq m) \quad (1)$$

여기서, $y(t)$, $u(t)$ 는 시스템의 출력과 입력을 나타내고, $F(\cdot)$ 는 미지의 비선형 함수이다.

(1)식과 같은 비선형 플랜트를 모델링 하기 위해 본 논문에서는 다층 신경회로망을 사용하며, BP(Back-Propagation)법으로 학습시킨다. 학습을 위한 입력 데이터 집합을 (2)식과 같이 둔다.

$$I(t) = [y(t-n), u(t-m)] \\ = [I_1(t), I_2(t), \dots, I_{m+n}(t)] \quad (2)$$

여기서, $y(t-n)$ 은 플랜트의 과거 출력을 나타내고, $u(t-m)$ 은 현재와 임의 시점까지의 제어입력값을 나타낸다. 일단 신경회로망 예측기 모델은 (3)식의 교차신호를 이용하여 오프라인 학습에 의해 얻어진다.

$$TS_i = (I(t) \rightarrow y(t+1)) \quad i=1, 2, \dots, M \quad (3)$$

신경회로망 예측기는 학습이 종료된 후 플랜트의 $t+1$ 의 출력을 예측하는 비선형 예측기로 사용된다. 따라서 다음과 같은 신경회로망 예측기 출력식이 얻어진다.

$$y(t+1) \approx \hat{y}_N(t+1) = NNPI(I(t)) \quad (4)$$

여기서, $y(t+1)$ 은 실제 플랜트 출력을 나타내고 $\hat{y}_N(t+1)$ 은 신경회로망 예측기 출력을 나타낸다.

2.2 다단(Multi-step Ahead)신경회로망 예측기

다단 예측은 현재의 입력만을 가지고 미래의 예측을 하는 것으로서 예측의 시점이 멀 수록 그 정도는 떨어진다. 다단 신경회로망 출력은 일단 예측기를 확장함으로서 얻어질 수 있다[3]. 일단예측기 자체는 시스템 동조기와 같은 역할을 함으로 같은 무게치를 가지는 일단 예측기를 여러개 적절로 연결함으로써 모델링된 시스템을 통한 미래의 예측과 유사한 출력을 내게 된다.

다단 신경회로망 예측기의 출력 $\hat{y}_N(t+k)$ 는 식 (4)

를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{y}_N(t+n) = NNP(NNP(\dots NNP(\hat{y}(t)) \dots)) \quad (5)$$

여기서 t 는 현재시점을 나타내며 n 는 미래의 임의의 시점을 나타낸다.

그림 1은 다단 신경회로망 예측기의 구성을 나타낸다.

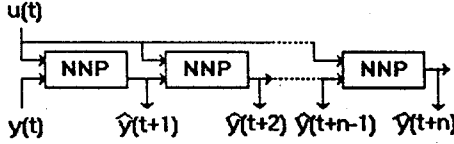


그림 1. 다단 신경회로망 예측기

본 논문에서는 2단(Two-step) 예측기를 구성하여 간단한 온도제어장치에 적용하여 보았으며, 예측기의 성능 시험을 위하여 그림 2와 같이 신경회로망 일단과 이단 예측기를 임의의 시험신호에 대하여 테스트하였다.

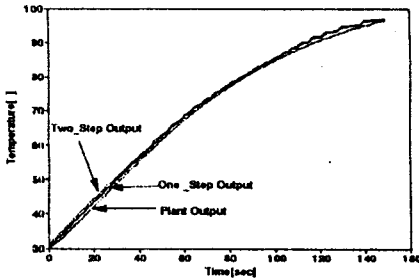


그림 2. 신경회로망 예측기 출력.

그림에서 보듯이 일단예측은 시스템의 출력과 거의 같지만, 이단 예측기에서는 얼마간의 오차가 생김을 알 수 있다. 이는 현재의 입력만을 사용하여 미래의 출력을 예측함으로써 생기는 누적오차에 의한 것으로서 예측의 정도는 그다지 좋지 않지만 현재 입력 상태에 대한 근사적인 미래 출력을 알 수가 있다.

3. 다단 신경회로망 예측 제어기 설계

3.1 신경회로망 제어기의 구조 및 학습

신경회로망 제어기는 학습하는 방법에 따라서 직접 역 제어기, 적응형 제어기 등으로 나누어진다[1][4]. 본 논문에서 사용하는 제어기 형태는 적응형 제어기의 특수학습구조의 형태로서 플랜트의 변동이나 여러 가지 동작 특성에 잘 적용하는 구조이다.

신경회로망 제어기의 출력 $u(k)$ 는 플랜트의 입력으로 쓰이고, 신경회로망은 다음 식을 최소화 하도록 학습한다.

$$E_d(t) = u_d(t) - u(t) \quad (6)$$

신경회로망 제어기는 3층의 다층 신경회로망으로 구성하고 그 출력은 다음 식으로 주어진다.

$$u(t) = NNC(y_d(t+1) - y(t+1), \Delta y_d(t+1) - y(t+1), y_d - \hat{y}(t+2)) \quad (7)$$

신경회로망 제어기 학습을 위해서는 $u_d(t)$ 를 알아야 하지만 우리는 신경회로망 출력에 의한 플랜트의 출력 결과만을 알 수가 있다. 따라서 우리가 알 수 있는 신호는 시스템 출력 오차인 $e(t+i) = y(t+i) - \hat{y}(t+i)$ 만을 알 수 있기 때문에 제어기 학습을 위한 식을 바로 구할 수가 없다. 본 논문에서는 신경회로망 제어기를 학습시키기 위해서 신경회로망 예측기를 이용한 시스템 자코비안에 의해서 신경회로망 제어기를 학습하는 구조를 택하였다.

다음과 같이 시스템의 목표 값과 출력 값을 이용하여 평가함수를 정의한다[1][3].

$$E_y(t+1) = \frac{1}{2} (e_y(t+1))^2 = \frac{1}{2} (y_d(t+1) - y(t+1))^2 \quad (8)$$

최급강화법을 이용하여 신경회로망 제어기의 은닉층에서 출력층으로 연결된 무게치를 다음과 같이 갱신(update)할 수 있다.

$$V_k(t+1) = V_k(t) + \Delta V_k \quad (9)$$

$$\Delta V_k \propto - \frac{\partial E_y(t)}{\partial V_k} \quad (10)$$

여기서, $u_k(t) = O_k(t)$ 이므로

$$\frac{\partial E_y(t+1)}{\partial V_k} = -(y_d(t+1) - y(t+1)) \cdot \frac{\partial y(t+1)}{\partial u_k(t)} \frac{\partial O_k(t)}{\partial S_k(t)} \frac{\partial S_k(t)}{\partial V_k} \quad (11)$$

가 된다. 여기서,

$$\frac{\partial O_k(t)}{\partial S_k(t)} = \mathcal{K}(S_k) \text{ 이고 } \frac{\partial S_k(t)}{\partial V_k} = H, \text{ 이므로 (11)식은}$$

$$\frac{\partial E_y(t+1)}{\partial V_k} = -(y_d(t+1) - y(t+1)) \cdot \frac{\partial y(t+1)}{\partial u_k(t)} \mathcal{K}(S_k) H; \quad (12)$$

가 된다. 따라서 (10)식은 다음과 같이 된다.

$$\Delta V_k = \eta \delta_k H; \quad (13)$$

이다. 여기서,

$$\delta_k = (y_d(t+1) - y(t+1)) \frac{\partial y(t+1)}{\partial u_k(t)} \mathcal{K}(S_k) \quad (14)$$

이다. 입력층에서 출력층으로 연결된 웨이트의 갱신은 다음과 같다.

$$W_k(t+1) = W_k(t) + \Delta W_k \quad (15)$$

$$\Delta W_k = \eta \delta_j \quad (16)$$

$$\delta_j = \sum_k \delta_k V_k(t) \quad (17)$$

이상의 신경회로망 제어기의 중간층과 출력층의 활성화함수 $\mathcal{K}(U_j), \mathcal{K}(S_k)$ 는 각각 시그모이드 함수와 선형 함수를 사용하였다.

식(12)의 $\partial y(t+1)/\partial u_k(t)$ 는 플랜트의 자코비안으로서 신경회로망 예측기로부터 다음과 같이 근사화 될 수 있다[3].

$$\frac{\partial y(t+1)}{\partial u(t)} \approx \frac{\partial \hat{y}(t+1)}{\partial u(t)} = \sum (f_{y'}(S_k) V_{jk} (f_{u'}(U_i) W_{ij})) \quad (18)$$

3.2. 2단 신경회로망 예측제어기

본 논문에서는 2단까지의 신경회로망 예측기를 이용하여 얻은 플랜트의 자코비안을 이용한 신경회로망 예측제어기를 제안하였다. 플랜트의 자코비안은 예측기 정도에 비례하여 1단에서의 자코비안과 2단에서의 자코비안의 합에 의하여 계산된다. 그 식은 (19)과 같다.

$$\frac{\partial \hat{y}(t+1)}{\partial u(t)} + \alpha \left(\frac{\partial \hat{y}(t+2)}{\partial u(t)} - \frac{\partial \hat{y}(t+1)}{\partial u(t)} \right) \quad (19)$$

여기서 α 는 비례상수이다.

제안한 예측 제어기의 구조는 그림 3과 같다.

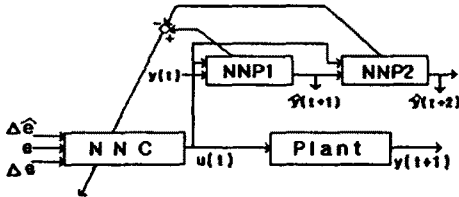


그림 3. 3단 신경회로망 예측제어기

4. 결과 및 고찰

제안된 신경회로망 예측제어기의 성능을 알아보기 위해서 전열기 온도제어[4]에 적용하여 보았다. 제어에 사용된 시스템의 블록 선도는 그림 4와 같다.

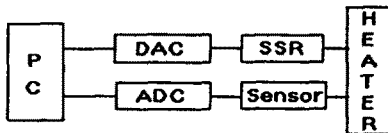


그림 4. 온도제어를 위한 시스템 블록 선도
온도 측정용 센서로는 선형 응답특성이 가지는 PT100 백금 온도센서를 사용하였으며, ADC로서는 TSC14433을 사용하였다. 샘플링 시간은 1sec로 하였고, 시스템 출력은 SSR로서 ON/OFF제어를 하였다.

그림 5는 PI제어기에 의한 플랜트의 계단 응답을 나타낸다. 기준 입력을 70°C에서 125sec 후에 90°C로 변 화시켰다.

그림 6은 2단 신경회로망 제어기의 계단 응답으로서 기준 입력은 PI제어와 같다.

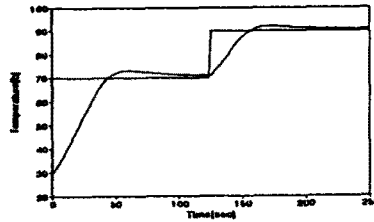


그림 5. PI 제어기에 의한 플랜트 출력.

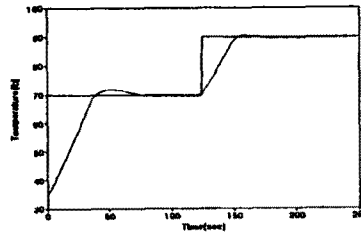


그림 6. 2단 신경회로망 예측제어기에 의한 플랜트 출력

5. 결론

플랜트 출력을 미리 예측하는 예측기를 통하여 미래의 플랜트 출력 정보를 얻고, 이를 이용하여 제어기의 학습을 하는 신경회로망 예측제어기를 구성하였고, 전열기 온도 제어를 통하여 그 유용성을 확인하였다. 향후, 신경회로망 예측기를 다른 제어기와 결합하여서 그 예측의 타당성을 입증 할 필요가 있으리라 생각되며, 신경회로망 제어기 학습시에 발생하는 초기 오차를 줄이는 병합제어기에 관한 연구가 진행 되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] Sigeru Omatu, Marzuki Khalid and Rubiyah Yusof, "Neuro-Control and its Applications," Springer, 1995.
- [2] Dianhui Wang, Tianyou Chai, "NEURAL-NET BASED MULTI-STEPS NONLINEAR ADAPTIVE MODEL PREDICTIVE CONTROLLER DESIGN," Proceedings of the American Control Conference, June 1995, pp. 4192-4193.
- [3] 업상희, 이권순, 배종일, "신경회로망 예측기를 이용한 보일러의 온도제어에 관한연구," 하계학술대회 논문집, pp. 798-800, 1995.
- [4] 조규상, 임제탁, "신경회로망의 자코비안을 이용한 Feedforward/Feedback 병합제어기 설계," 전자공학회의논문집 제 33권 B면 제 2호, pp. 340-348, 1996.