

신경망 PID 제어기에 의한 위치 제어

이진순*, 하홍곤**, 고태언**

동의대학교 산업기술대학원 전기·전자공학부*, 동의대학교 전자·전자공학부**

The Position Control by Neuro - Network PID controller

Jin-soon Lee*, Hong-Gon Ha**, Tae-eun Go**

Dept. of Electric & Electronics, Industrial Graduate School, Dong-eui University

Abstract

In this paper an nonlinear neuro PID controller is constructed by the control system of general PID controller using a Self-Recurrent Neural Network. And the gains of the PID controller in the proposed control system are automatically adjusted by back-propagation algorithm of the neural network. Applying to the position control system, it's performance is verified through the results of computer simulation.

I. 서 론

신경회로망은 역전파 알고리즘을 이용한 다층 신경회로망을 사용하여 학습을 통한 함수의 근사화, 병렬분산 처리 및 정보의 분류가 용이하다. PID 제어기의 동조방법 중 신경회로망의 연결가중치(weight)를 학습하여 제어 평가함수를 최소화하는 학습법은 비선형 플랜트를 실시간으로 인식(identification)하고 인식된 신경회로망 모델의 출력과 기준입력의 차로 표현된 평가함수를 최소화하도록 PID 제어 이득을 학습하는 방법을 제시하였다. 이와 같이 설계된 신경회로망 PID 제어기는 제어 파라미터를 온라인으로 학습함으로써 자기동조 기능을 가지나 신경 회로망의 초기 연결가중치, 학습율(learning rate) 등에 매우 민감한 단점을 보였다.

본 논문에서는 일반 PID 제어기의 제어식을 자기 순환 신경망으로 구현하여 비선형 신경망 PID 제어기를 구성하였다. 그리고 각 연결강도를 역전파알고리즘으로 수정토록 하였으며 이 비선형 PID 제어기를 위치 제어기에 적용하여 시뮬레이션으로 그 유효성을 검토하였다.

II. 신경망 PID 제어기의 구성

2-1. 자기 순환 신경망의 구성

PID 제어기의 계수들을 적용 동조하기 위한 신경망은

입력층, 은닉층, 그리고 출력층으로 구성되며 은닉층의 출력을 내부적으로 회귀하는 자기 순환 신경망의 구성도가 그림 1이다.

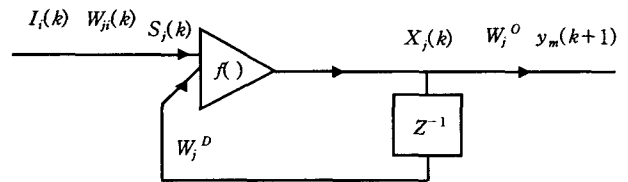


그림 1. 자기 순환 신경망 구성도

Fig 1. Configuration self-recurrent Neural Network

그림 1의 신경망에서 $I_i(k)$ ($i=1 \dots n+1$)는 입력층 입력이고, 입력층의 $I_{n+1}(k) = bias$, $X_j(k)$ ($j=1 \dots h+1$)는 은닉층의 출력이고 $X_{h+1}(k) = bias$ 이고 W_{ji} 는 은닉층 j 번째 뉴런과 i 번째 입력간의 연결강도, W_j^D 는 은닉층 j 번째 뉴런의 출력이 자신의 입력으로 회귀하는 연결강도, W_j^O 는 은닉층 j 번째 뉴런과 출력층간의 연결강도이다.

그림 1에서 은닉층의 입력 $S_j(k)$, 은닉층 출력 $X_j(k)$ 와 출력층 출력 $y_m(k+1)$ 는

$$S_j(k) = \sum_{i=1}^{n+1} W_{ji}(k)I_i(k) + W_j^D X_j(k-1) \quad (1a)$$

$$X_j(k) = f\{S_j(k)\} \quad (1b)$$

$$y_m(k+1) = \sum_{j=1}^{h+1} W_j^O X_j(k) \quad (1c)$$

이다. 식 (1)에서 $f(\cdot)$ 는 활성화 함수(activation function)이다. 계의 기준 입력을 $r(k)$ 그리고 계응답을 $y_m(k)$ 라 할 때, 오차신호 $e(k)$ 는

$$e(k) = r(k) - y_m(k) \quad (2)$$

이고, 평가함수 J 는 다음과 같다.

$$J(k) = \frac{1}{2} \{e(k)\}^2 \quad (3)$$

연결 강도를 수정하기 위해서 평가함수는 최소로 하는 최소 하강 법칙(Gradient descent)

$$W_{ji}(k+1) = W_{ji}(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial W_{ji}(k)} \quad (4a)$$

$$W_j^D(k+1) = W_j^D(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial W_j^D(k)} \quad (4b)$$

$$W_j^O(k+1) = W_j^O(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial W_j^O(k)} \quad (4c)$$

을 이용하여 계산한다.

위의 식에서 η 는 학습율이다. 위의 식에서 $W_{ji}(k+1)$, $W_j^D(k+1)$, $W_j^O(k+1)$ 는 $W_{ji}(k)$, $W_j^D(k)$ 및 $W_j^O(k)$ 의 수정식이며 $e(k)=0$ 이 될 때까지 수정된다.

2-2. 신경회로망 PID 제어기

그림 2는 PID 제어기의 구성도이다.

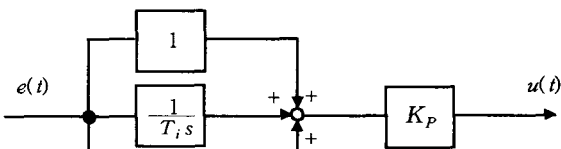


그림 2. PID 제어기
Fig. 2. PID Control System

제어기 입력을 $e(t)$ 라 할 때 PID 제어기 출력 $u(t)$ 는 다음과 같다.

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

식 (5)에서 K_P 는 비례이득, T_i 는 적분기의 적분시간, T_d 는 미분기의 미분시간이다.

식 (5)을 이산형으로 변환하면 다음과 같다.

$$u(k) = K_P \left\{ e(k) + \sum_{k=0}^n e(k) T_S + \frac{T_d}{T_S} e(k) - e(k-1) \right\} \quad (6)$$

식 (6)에서 T_S 는 샘플링 시간이다.

식 (6)를 속도형으로 변환하면 다음과 같다

$$u(k) = u(k-1) + K_P \{e(k) - e(k-1)\} + K_I e(k) + K_D e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (7)$$

식 (7)에서 K_I 와 K_D 는 적분기와 미분기의 이득으로 다음과 같다.

$$K_I = \frac{K_P T_S}{T_i} \quad (8-a)$$

$$K_D = \frac{K_P T_d}{T_S} \quad (8-b)$$

이고, 식 (7)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$u(k) = u(k-1) + K_1 e(k) - K_2 e(k-1) + K_3 e(k-2) \quad (9)$$

이고, K_1 , K_2 , K_3 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_1 &= K_I + K_P + K_D \\ K_2 &= K_P + 2K_D \\ K_3 &= K_D \end{aligned} \quad (10)$$

식 (9)을 활성화 함수의 독립변수로 사용한 비선형 신경회로망 PID 제어기는 그림 3과 같다.

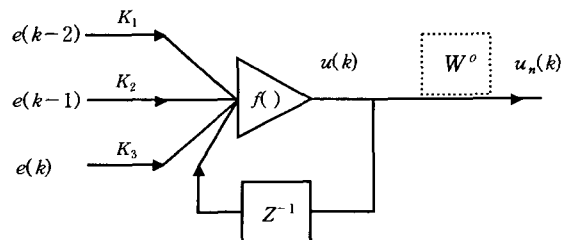


그림 3. 신경회로망 PID 제어기의 구조
Fig. 3. Structure of Neuro PID Controller

그림 3에서 K_1 , K_2 , 및 K_3 는 입력층과 은닉층간의 연결강도이고 은닉층의 출력이 1차 은닉층의 입력으로 회귀하는 연결강도 $W_j^D=1$ 이고 은닉층과 출력층간의 연결강도가 W^O 이다. 그리고 $u_n(k)$ 는 신경회로망 제어기의 출력으로 다음과 같다.

$$u_n(k) = f(u(k)) \quad (11)$$

2-3. 신경회로망 PID 제어기를 사용한 제어계의 구성

그림 3의 신경회로망 PID 제어기에 의해서 제어대상

$G(z)$ 를 제어할 때 제어계의 구성도가 그림 4이다.

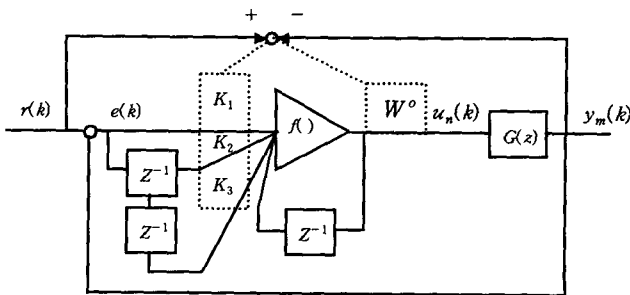


그림 4. 신경회로망 PID 제어기를 사용한 제어계
Fig. 4. Control system using on Neuro PID Controller

그림 4에서 활성화 함수 $f(x)$ 는

$$f(x) = \tanh x \tag{12}$$

식 (12)을 미분하면 $f'(x)$ 는

$$f'(x) = 1 - f(x)^2 \tag{13}$$

이 된다.

2-4. 신경망의 학습

그림 4의 제어계에서 계의 기동특성을 개선시키고, 계의 응답이 변할 때 이를 보상하기 위해서는 제어기의 계수 K_1, K_2, K_3 및 W^0 을 식 (4)에 의해서 수정하여야 한다.

제어대상을 선형이라고 가정하면,

$$\frac{\partial y_m}{\partial u_n} = \text{상수} \tag{14}$$

$$\frac{\partial I}{\partial K_i} = \frac{\partial I}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y_m} \frac{\partial y_m}{\partial u_n} \frac{\partial u_n}{\partial X_j} \frac{\partial X_j}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial K_i}$$

이다. 위의 관계식을 이용하여 정리하면 K_1, K_2, K_3 및 W^0 에 대한 수정식은 다음과 같다.

$$K_1(k) = K_1(k-1) + ke(k)f'\{u(k)\}e(k) \tag{15a}$$

$$K_2(k) = K_2(k-1) + ke(k)f'\{u(k)\}e(k-1) \tag{15b}$$

$$K_3(k) = K_3(k-1) + ke(k)f'\{u(k)\}e(k-2) \tag{15c}$$

$$W^0(k) = W^0(k-1) + ke(k)f'\{u(k)\}u(k-1) \tag{15d}$$

식 (15)에서 k 는 임의의 상수이다.

III. 시뮬레이션 및 고찰

제안한 신경회로망 PID 제어기의 제어성능을 검토하기 위하여 직류 서보 전동기를 구동원으로 하는 위치제어계에 적용하여 제어성능을 시뮬레이션으로 고찰하였다.

그림 4의 제어계에서 제어대상 $G(z^{-1})$ 는 직류서어보 전동기로 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{Y_m(z^{-1})}{U_n(z^{-1})} = \frac{z^{-1}(a_2 z^{-1} + a_3 z^{-2})}{1 - (1 + a_1)z^{-1} + a_1 z^{-2}} \tag{16}$$

식 (16)에서 a_1, a_2 및 a_3 는

$$\begin{aligned} a_1 &= \exp(-T_s/T) \\ a_2 &= K\{T_s - T(1 - a_1)\} \\ a_3 &= K\{T(1 - a_1) - a_1 T_s\} \end{aligned} \tag{17}$$

이고 T_s 는 샘플링 시간이다. 그리고 K 와 T 는 직류 서어보 전동기의 근사이득 및 시정수로 다음과 같다.

$$K = \frac{K_e}{FR_a + (K_e)^2}, \quad T_0 = \frac{FR_a T_m}{FR_a + (K_e)^2} \tag{18}$$

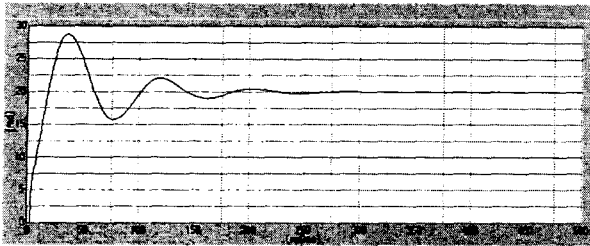
이다. 식 (17)에서 K_e, F, R_a 및 T_m 은 직류 서어보 전동기의 역기전력 상수, 점성 마찰 계수, 전기자 저항 및 기계적 시정수이다.

사용한 직류 서어보 전동기의 정수는 표 1과 같고 샘플링 시간 T_s 는 1[msec]로 하였다.

표 1. 직류 서어보 전동기의 제정수
Table 1. Parameter of DC servo motor

DC Servo Motor			
Ra	1.63[Ω]	Tm	12[msec]
La	1.7[mH]	Ke	6.8[V/krpm]
Jm	0.4[g · cm · sec ²]	F	0.15[Kg · cm]

여기서 기준입력 $r(k)$ 는 직류 전압 $\pm 5[V]$ 로 하였다. 먼저 그림 5는 수정계수 $W^0=0.004$ 로 고정시키고 $K_1=2.35, K_2=4.21, K_3=2.56$ 로 초기설정된 계응답이다



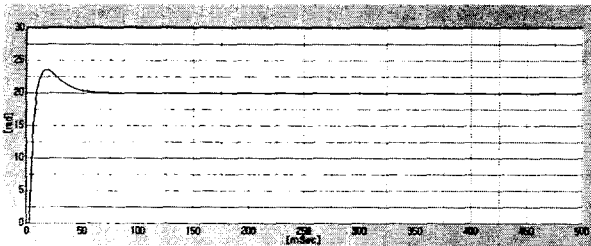
$$K_1 = 2.35, K_2 = 4.21, K_3 = 2.56$$

그림 5. 위치 제어계에서의 각위치 응답(I)

Fig. 5. Response of angular position in position control system(I)

그림 5에서 과도응답이 발생하여 상당한 지연시간이 발생하였다. 이를 감소시키기 위해 $K_2 = 4.21$, $K_3 = 2.56$ 로 고정시키고 $K_1 = 3.28$ 로 수정하였을 때의 계응답이 그림 6이다.

그림 6은 그림 5에 비해 과도응답이 현저히 감소하였다. 여기서 $K_1 = 2.35$, $K_3 = 2.56$ 로 고정시키고 $K_2 = 3.572$ 로 수정하였을 때의 계응답이 그림 7이다.

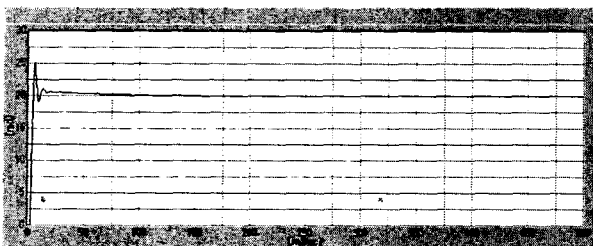


$$K_1 = 3.28, K_2 = 4.21, K_3 = 2.56$$

그림 6. 위치 제어계에서의 각위치 응답(II)

Fig. 6. Response of angular position in position control system(II)

그림 7의 응답특성에서 지연시간이 상당히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

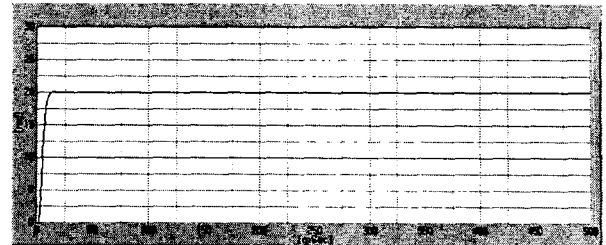


$$K_1 = 2.35, K_2 = 3.572, K_3 = 2.56$$

그림 7. 위치 제어계에서의 각위치 응답(III)

Fig. 7. Response of angular position in position control system(III)

다음의 그림 8은 $K_1 = 3.28$, $K_2 = 3.572$, $K_3 = 2.957$ 로 수정하였을 때의 계응답이다. 과도응답 및 지연시간이 제거된 양호한 성능을 나타내었다.



$$K_1 = 3.28, K_2 = 3.572, K_3 = 2.957$$

그림 8. 위치 제어계에서의 각위치 응답(IV)

Fig. 8. Response of angular position in position control system(IV)

IV. 결 론

신경망 PID 제어기로 구성된 신경망 제어시스템을 제안하였으며 활성화 함수를 재해석하여 출력 오차를 입력층과 은닉층, 은닉층과 출력층의 연결강도는 역전파 학습 알고리즘에 의하여 수정되도록 하였으며, 역전파 학습 알고리즘의 학습을 돕기 위하여 릴레이 케환기법과 I - N 동조 규칙을 위치제어계에 적용하여 자동적으로 적용하도록 하였다.

신경망 PID 제어기에서 각각의 계수의 초기치를 적절히 설정함으로써 제안된 제어 알고리즘이 유효하게 제어됨을 입증하였으며, 이 신경망 PID 제어기를 여러 제어분야에 응용 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] S. Tjokro and S. F. Shah, "Adaptive PID control", Proc American Control Conference, pp.1528-1534, 1985
- [2] 김도웅, 진강규 "RCGA를 이용한 PID 제어기의 모델 기반 동조규칙" 제어자동화 시스템공학 논문지 제 8권 제 12호 pp.1056-1060, 2002
- [3] 이정민, 하홍곤 "신경망에 의한 서보 모터의 위치제어" 동의대 동의논집 제 33집 자연과학편 pp.667-673, 2000
- [4] F. Cameron and D. E. Seborg, "A self tuning controller with a PID structure", INT. J Control, vol. 38, No. 2, pp.401-417, 1983
- [5] C. C. Hang, K. J. Åström and W. K. Ho. "Refinements of the Ziegler - Nichols tuning formula, ICE proceeding - D, vol. 138, No. 2, March, 1991
- [6] 고태연 "다층신경망에 의한 I-PD제어계의 구성" 한국신호처리·시스템 학회지 제3권 1호 pp.74-79, 2002. 1