모델 추종 제어를 위한 PID 제어기법

이창호*, 김종진*, 하홍곤**

부경대학교 전자 · 컴퓨터정보통신공학부*, 동의대학교 전기 · 전자공학부**

PID Control structure for Model following control

Chang-Ho Lee*, Jong-Jin Kim**, Hong-Gon Ha***

Gyoungnam Techinical High School, Division of Electronic and Telecommunication Engineering Pukyong National University, Department of Electricity & Electronic Dong-eui University

Abstract

In this paper the design of the model following control system is proposed using the PID control structure.

The gaines of the PID controller in the proposed control system are automatically adjusted by back-propagation algorithm of the neural network. And applying to the position control system, it's performance is verified through the results of computer experiment.

I. 서론

자동화가 확대되고 있는 산업현장에서 여러 가지 복잡한 시스템이 등장하여 각 공정의 고속화 및 고정밀화를 요구하고 있다. PID제어계에서 각 PID 이득이 제어계의 성능을 크게 좌우하게 되므로 이것을 결정하는 조정방법에 관해서 여러 가지 방법들이 보고되고 있다.[1,2,3]

최근에는 신경망을 PID 제어기에 융합하여 이 문제를 해결하려고 하고 있다.[4,5] 신경망을 이용한 제어기에서는 많은 뉴런 또는 처리소자들이 병렬 연결된 구조로, 즉 다층 신경망으로 정확히 알지 못하는 계의 동역학 방정식을 근사화 할 수 있고, 학습이나 훈련을 통해서 연결강도를 조정함으로써 유연성이나 적응능력이 양호하게 되었다.[6,7]

본 논문에서는 모델추종제어를 위한 PID제어기법을 제안하였다. 제안한 제어계에서 PID제어기의 계수들을 신경망의 역전파 알고리즘에 의해서 자동적으로 조정되도록 하였다. 그리고 이것을 위치제어계에 적용하여 실험을 통해서 그 성능을 확인하였다.

II. 모델추종제어를 위한 PID 제어기법

1. 이산시간속도형 PID제어계의 기본 설계

PID제어기로 제어대상을 제어하는 제어계의 구성도가 그림 1이다.

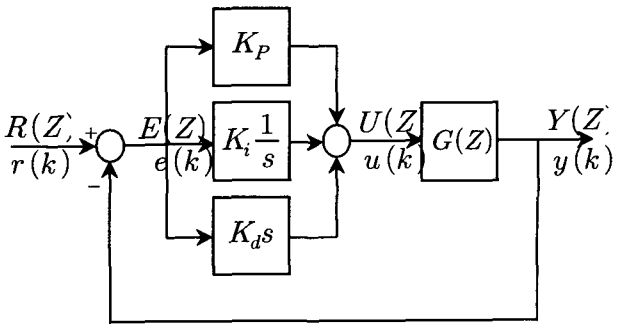

그림 1. PID 제어계

Fig. 1. PID Control System

그림 1에서 $R(Z)$는 기준입력이고 $U(Z)$는 PID제어기의 출력, 즉 제어대상의 입력이며 $Y(Z)$는 계의 응답이다. 그리고 PID 제어기의 입력 즉 기준입력 $r(k)$ ($R(Z)$)와 계응답 $y(k)$ ($Y(Z)$),간의 오차 $e(k)$ ($E(Z)$)는

$$e(k)=r(k)-y(k) \text{ 또는 } E(Z)=R(Z)-Y(Z) \quad (1)$$

이다. 그리고 이산시간영역에서 PID제어기의 출력 $u(k)$는

$$u(k)=K_p e(k)+K_i\sum_{i=0}^{k}e(k)T_s+\frac{K_d}{T_s}\{e(k)-e(k-1)\} \quad (2)$$

이고, T_s는 샘플링 시간이다.

식 (2)를 속도형으로 정리하면 다음과 같다.

$$u(k)=u(k-1)+K_P(e(k)-e(k-1))+K_I e(k)+K_D\{e(k)-2e(k-1)+e(k-2)\} \quad (3)$$

여기서 K_P는 비례기의 이득이고 K_I와 K_D는 적분기 및 미분기의 이득으로 다음과 같다.

$$K_I = K_i \cdot T_s \qquad K_D = \frac{K_d}{T_s} \tag{4}$$

기준입력이 $r(k)$가 일정할 때, 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$u(k) = u(k-1) - K_P\{y(k) - y(k-1)\} + K_I\{r(k) - y(k)\} + K_D\{y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)\} \tag{5}$$

식 (5)를 Z변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$L(Z^{-1})Y(Z) - M(Z^{-1})U(Z) + N(Z^{-1})R(Z) = 0 \tag{6}$$

식 (6)에서 $L(Z^{-1})$, $M(Z^{-1})$ 그리고 $N(Z^{-1})$은

$$L(Z^{-1}) = (K_P + K_I + K_D) - (K_P + 2K_D)Z^{-1} + K_D Z^{-2} \tag{7-a}$$

$$M(Z^{-1}) = 1 - Z^{-1} \tag{7-b}$$

$$N(Z^{-1}) = K_I \tag{7-c}$$

이다. 제어대상을 다음과 같이 나타낸다.

$$A(Z^{-1})Y(Z) = Z^{-d}B(Z^{-1})U(Z) \tag{8}$$

식 (8)에서 d는 제어대상의 부동시간이고 $A(Z^{-1})$과 $B(Z^{-1})$는

$$A(Z^{-1}) = 1 + a_1 Z^{-1} + \cdots + a_n Z^{-n} \tag{9-a}$$

$$B(Z^{-1}) = b_0 + b_1 Z^{-1} + \cdots + b_m Z^{-m} \tag{9-b}$$

이며 안정하다고 가정한다.
식 (7)과 식 (9)를 이용하여 구성한 구성도가 그림2이다.

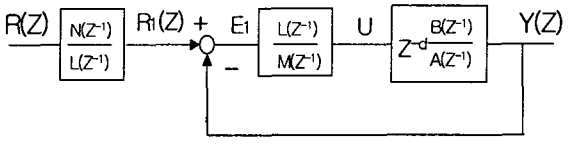

그림 4. PID 제어계의 구성도
Fig. 2. Block diagram of PID Control System

그림 2에서 이 PID제어계는

$$H_1(Z) = \frac{N(Z^{-1})}{L(Z^{-1})} \tag{10}$$

의 보상기를 갖는 것을 알 수 있다. 보상기 이후의 폐루프 전달함수가 Z^{-d}와 같을 경우 모델추종제어계가 되는 것을 알 수 있다. 이 보상기 이후의 폐루프의 전달함수는

$$F(Z^{-1}) = \frac{Z^{-d}L(Z^{-1})B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})M(Z^{-1}) + Z^{-d}L(Z^{-1})B(Z^{-1})} \tag{11}$$

이고 $F(Z^{-1}) \neq Z^{-d}$가 되므로, 이 PID제어계는 $H_1(Z^{-1})$을 규범모델로 하는 모델추종제어계라고 할 수 없다. 그러므로 이 PID 제어계에 새로운 전치보상기를 삽입하여 모델추종제어계가 되도록 한다.

2. 모델 추종 제어계의 설계

식 (11)에 다음의 전달함수

$$G_c(Z^{-1}) = Z^{-d} + \frac{M(Z^{-1})A(Z^{-1})}{L(Z^{-1})B(Z^{-1})} \tag{12}$$

를 곱하면 $H_1(Z^{-1})$이후의 전달함수는 Z^{-d}이 된다.
이 식 (12)을 전치보상기로 이용한 제어계가 그림 3이다.

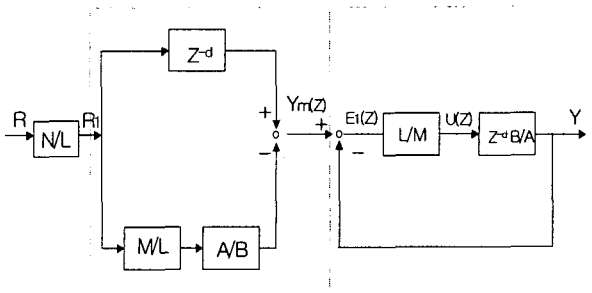

그림 5. PID 제어기를 이용한 model 추종제어계의 구성계도
Fig. 3. Block diagram of model following Control System with PID Control Structure

3. 신경망에 의한 모델의 설계

그림 2에서 폐루프 제어계의 제어기는 $L(Z^{-1})/M(Z^{-1})$이 된다. 이 $L(Z^{-1})$은 식 (7-a)에서

$$L(Z^{-1}) = d_0 + d_1 Z^{-1} + d_2 Z^{-2} \tag{13}$$

이고 여기서 d_0, d_1 및 d_2는 다음과 같다.

$$d_0 = K_P + K_I + K_D$$
$$d_1 = -(K_P + 2K_D)$$
$$d_2 = K_D \tag{14}$$

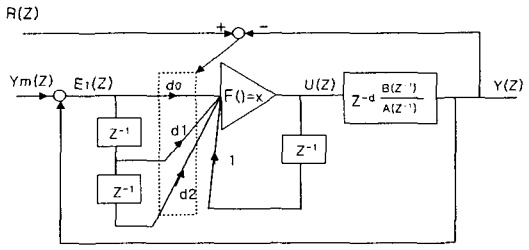

그림 6. 폐루프계의 구성도

Fig . 4. Block diagram of closed-loop system

그러므로 그림 4에서 $U(Z)$는

$$U(Z) = Z^{-1}U(Z) + (d_0 + d_1 Z^{-1} + d_2 Z^{-2})E_1(Z) \tag{15}$$

이다.

평가함수 J는 다음과 같다.

$$J = \frac{1}{2}\{R(Z) - Y(Z)\}^2 \tag{16}$$

식 (16)에서 제어대상을 선형이라고 가정하고, 역전파 알고리즘에 의해 최소화한다. 활성화 함수 $F(\cdot) = x$로 하여 역전파 알고리즘에 의해서 신경망의 연결강도 d_0, d_1 그리고 d_2는 다음과 같이 계산된다.

$$d_0(k) = d_0(k-1) + ae(k)e_1(k)$$
$$d_1(k) = d_1(k-1) + ae(k)e_1(k-1) \tag{17}$$
$$d_2(k) = d_2(k-1) + ae(k)e_1(k-2)$$

식 (17)에서 a는 임의의 상수이다. 그리고 식 (5)를 이용하면 K_I의 수정식은

$$K_I = K_I(k-1) + ae(k)\{r(k) - y(k)\}$$

이 된다.

III. 실험 및 고찰

모델추종 제어계의 제어성능을 확인하기 위하여 그림 4에서 제어대상은 직류 서어보 전동기의 각 위치로 하였다.

이 직류 서어보 전동기의 전기자 전압 $U(Z)$에서 각 위치 $Y(Z)$의 전달함수는 다음과 같다.[8]

$$\frac{Y(Z)}{U(Z)} = \frac{b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2}}{1 + a_1 Z^{-1} + a_0 Z^{-2}} = \frac{Z^{-1}B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} \tag{18}$$

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]

식 (17)에서 제어대상의 부동시간 $d=1$이고, a_1, a_0, b_1 그리고 b_2는 다음과 같다.

$$a_0 = \exp(-T_s/T_0)$$
$$a_1 = -(1 + a_0)$$
$$b_1 = K\{T_s - T_0(1 - a_0)\}$$
$$b_2 = K\{T_0(1 - a_0) - a_0 T_s\} \tag{19}$$

이다. 식 (19)에서 T_s는 샘플링시간이고 K와 T_0는 직류 서어보 전동기의 등가 이득 및 시정수로

$$K = \frac{K_e}{FR_a + (K_e)^2}, \quad T_0 = \frac{FR_a T_m}{FR_a + (K_e)^2} \tag{20}$$

이다. 식 (20)에서 K_e, F, R_a 및 T_m은 직류 서어보 전동기의 역기전력 상수, 점성 마찰 계수, 전기자 저항 및 기계적 시정수이다.

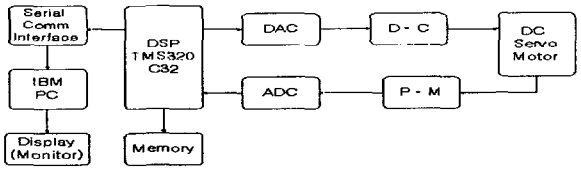

그림 5. DSP를 이용한 실험 장치의 구성

Fig. 5. The Configuration of Experimental

사용한 직류 서어보 전동기의 정수는 표1과 같고 샘플링 시간 T_s는 1[msec]로 하였다.

계의 기동특성은 그림 6과 같다.

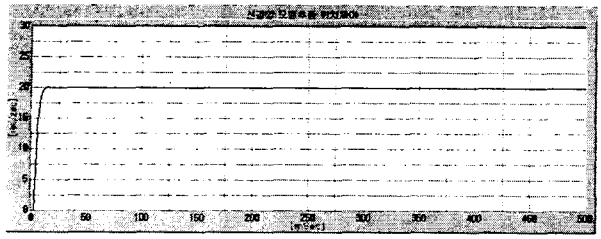

그림 6. 계의 기동특성
Fig. 6. Starting characteristics of control system

위 그림 6은 $d_0(0)=3.62$, $d_1(0)=0.0064$, $d_2(0)=0.0043$ 및 $K_I(0)=0.086$의 값으로 설정되었을 때의 계응답이다.

위의 기동특성에서는 과도응답이 완전히 제거되고, 상승시간 및 지연시간이 단축되어 계의 양호한 응답특성을 얻을 수 있다.

그림 7은 계응답의 추종성을 검토하기 위한 진폭 $\pm 40^\circ$, 주기 2 sec인 펄스 입력신호를 나타내었다.

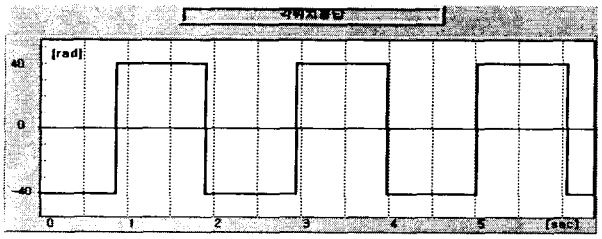

그림 9. 모델추종제어계의 펄스입력신호
Fig. 7. Pulse input signal of Model following control system

먼저 식 (17)의 초기치 $d_0(0)=0.987$, $d_1(0)=0.998$, $d_2(0)=0.0072$로 하였을 때 PID 제어기를 이용한 계 위치응답은 그림 8과 같다.

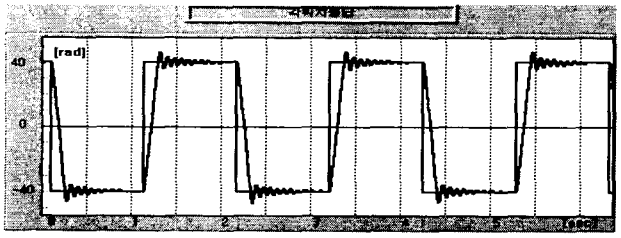

그림 8. 모델추종제어계의 응답(I)
Fig. 8. Response of Model following control system(I)

그림 8에서 상승 시간은 짧으나 과도 응답 상태가 크고 정상 상태에 추적하는 시간이 길어서 상당한 지연시간이 있음을 볼 수 있다.

다음의 그림 9는 $d_0(0)=5.572$, $d_1(0)=0.000695$로 고정시키고 $d_2(0)=0.00098$로 설정하였을 때의 계의 응답이다. 여기서 지연시간과 과도성분이 제거되어 양호한 계의 응답 특성을 확인할 수 있다.

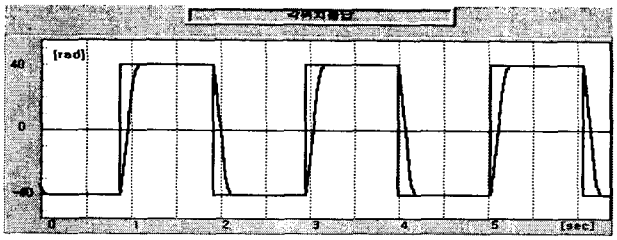

그림9. 모델추종제어계의 응답(II)
Fig. 9. Response of Model following control system(II)

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 모델추종제어를 위한 PID제어기법을 이산시간영역에서 제안하였다. 제안한 제어계에서 PID제어기의 이득들을 신경망의 역전파 알고리즘에 의해서 계의 응답이 기준입력에 수렴하지 않을 때 자동적으로 조정되도록 하였다. 그리고 이것을 직류 서어보 전동기의 각위치에 적용하여 실험한 결과 신경망의 연결강도의 초기치를 적정히 설정해 줌으로써 희망하는 계응답을 얻을 수 있었으며 타 제어분야에도 응용 가능하리라 생각된다.

참고문헌

[1] 中川三男, "高速精密서보계의 機械設計" : 計測制御, vol. 18., No. 1, pp.932-938, 1979

[2]K.ohishi,M. Nakao, K. ohnish, K.Miyachi, "Microprocessor controlled DC motor for load insensitive position servo system" IEEE/IECON 85, conf.Rec.pp.339-344, 1985

[3] G. Lightbody and G. W. irWin "Direct neural model reference adaptive control" IEE. proc-control Theory. Appl., Vol. 142.No.1, pp.31-43, 1995

[4] MoonYong LEE "Process control using a Neural Network Combinent with the Conventional PID Controller" icase, Korea, vol 2, No.3, pp196-200, 2000

[5] 이창구 "신경회로망 보상기를 갖는 비선형 PID 제어기" 전기학회 논문지, 권 5호, pp225-233, 2000

[6] 정성부, 이현관, 엄기환 "활성화 함수 이득가변화를 이용한 역전파 알고리즘의 성능개선 "전자공학회 논문지 제38권 C2편 제6호 pp26-36, 2001

[7] 하홍곤 "신경망 전치 보상기를 갖는 확대 I-PD 제어기의 설계" 한국해양정보통신학회 제4권 제3호 pp619-625, 2000

[8] 고태언 "다층신경망에 의한 I-PD제어계의 구성." 한국신호처리 · 시스템학회, 제3권 1호. pp.74-79, 2002