

모델 추종 제어를 위한 PID 제어기법

PID Control Structure for Model Following Control

이창호*, 김종진**, 하홍곤***

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

요약

본 논문은 모델추종 제어를 위한 PID제어기법을 제안한다. 이산시간영역에서 제어성능을 개선하기 위해 제안하였고, PID 제어계에 새로운 전치 보상기를 삽입하여 모델추종제어계가 되도록 하였다. 외란이나 부하변동에 의해서 계의 응답이 변할 때 PID 제어기의 이득을 재조정할 필요가 있다. PID 제어계에서 각 PID 이득이 제어계의 성능을 크게 좌우하게 되므로 신경망을 PID제어기에 결합하여 제어계의 성능을 향상시켰고 제안한 제어계에서 PID제어기의 이득은 역전파 알고리즘에 의해 자동적으로 조정되어지도록 하였다.

모델추종 제어계의 제어성능을 확인하기 위하여 제어대상을 직류 서보 전동기의 각 위치로 하였다. 이것을 위치 제어계에 적용하여 실험을 통해 그 성능을 증명하였다.

Abstract

This paper proposes the design of the model following control system using the PID control structure. PID control system became model following control by inserting new pre-compensator in order to improve control performance in discrete-time region. Gain of the PID controller needs to be readjusted when response of system changes due to disturbance or load fluctuation. Performance of control system improves by joining neural network to PID control system because performance of control system depends largely on each PID gain in PID control system. And the gains of the PID controller in the proposed control system are automatically adjusted by back-propagation algorithm of the neural network.

Angular position of DC servo motor is selected as a plant in order to verify control performance in model following control. After it is applied to the position control system, its performance is verified through computer experiment.

Key words : model following control, PID control structure, gain, back-propagation algorithm, performance

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 결합하여 제어계의 성능을 향상시키려 하고 있다.^[4,5] 신경망을 이용한 제어기에서는 많은 뉴런 또는 처리소자들이 병렬 연결된 구조로 정확히 알지 못하는 계의 동역학 방정식을 근사화 할 수 있고, 학습이

나 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

그림 1은 PID 제어계의 구성도이다.

*경남공업고등학교, **부경대학교 전자·컴퓨터정보통신공학부

***동의대학교 전기·전자공학부

접수 일자 : 2003. 10. 28 수정 완료 : 2004. 4. 09

논문 번호 : 2003-4-21

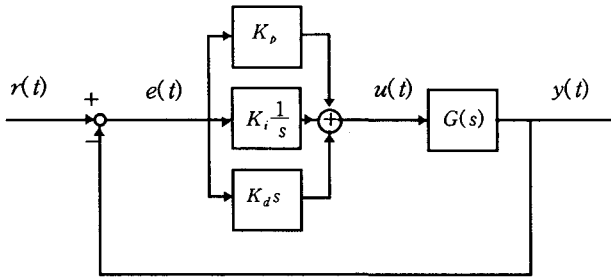


그림 1. PID 제어계
Fig. 1. PID Control System

그림 1에서 $r(t)$ 는 기준입력이고 $u(t)$ 는 PID제어기의 출력, 즉 제어대상의 입력이며 $y(t)$ 는 계의 응답이다. 그리고 PID 제어기의 입력 즉 기준입력 $r(t)$ 와 계응답 $y(t)$ 간의 오차 $e(t)$ 는

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

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

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{K_i}{T_i} \int e(t) dt + K_d \cdot T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (2)$$

식 (2)에서 K_p 는 비례이득, K_i 는 적분이득, K_d 는 미분이득, T_i 는 적분기의 적분시간, T_d 는 미분기의 미분시간이다.

식 (2)를 이산형으로 변환하면 다음과 같다.

$$u(k) = K_p [e(k) + \frac{K_i}{T_i} \sum_{n=0}^k e(n) T_s + K_d \cdot \frac{T_d}{T_s} (e(k) - e(k-1))] \quad (3)$$

식 (3)에서 T_s 는 샘플링 시간이다.

식 (3)을 속도형으로 변환하면 다음과 같다

$$u(k) = u(k-1) + K_p \{ e(k) - e(k-1) \} + K_I e(k) + K_D \{ e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \} \quad (4)$$

여기서 K_p 는 비례기의 이득이고 K_I 와 K_D 는 적분기 및 미분기의 이득으로 다음과 같다.

$$K_I = K_p \frac{T_s}{T_i} \quad K_D = K_p \frac{T_d}{T_s} \quad (5)$$

기준입력이 $r(k)$ 가 일정할 때, 식 (4)은 다음과 같이 된다.

$$u(k) = u(k-1) - K_p \{ y(k) - y(k-1) \} + K_I \{ r(k) - y(k) \} - K_D \{ y(k) - 2y(k-1) + y(k-2) \} \quad (6)$$

식 (6)를 Z변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$L(Z^{-1})Y(Z) + M(Z^{-1})U(Z) - N(Z^{-1})R(Z) = 0 \quad (7)$$

식 (7)에서 $L(Z^{-1})$, $M(Z^{-1})$ 그리고 $N(Z^{-1})$ 은

$$L(Z^{-1}) = (K_p + K_I + K_D) - (K_p + 2K_D)Z^{-1} + K_D Z^{-2} \quad (8-a)$$

$$M(Z^{-1}) = 1 - Z^{-1} \quad (8-b)$$

$$N(Z^{-1}) = K_I \quad (8-c)$$

이다. 제어대상을 다음과 같이 나타낸다.

$$A(Z^{-1})Y(Z) = Z^{-d}B(Z^{-1})U(Z) \quad (9)$$

식 (9)에서 d 는 제어대상의 부동시간이고 $A(Z^{-1})$ 과 $B(Z^{-1})$ 는

$$A(Z^{-1}) = 1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_n Z^{-n} \quad (10-a)$$

$$B(Z^{-1}) = b_0 + b_1 Z^{-1} + \dots + b_m Z^{-m} \quad (10-b)$$

이며 안정하다고 가정한다.

식 (8)과 식 (10)을 이용하여 구성한 구성도가 그림 2이다.

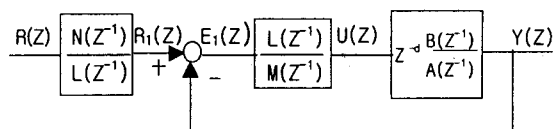


그림 2 Z- 변환된 PID 제어계의 구성도
Fig. 2. Block diagram of Z-transformed PID Control System

그림 2에서 이 PID 제어계는

$$H_1(Z) = \frac{N(Z^{-1})}{L(Z^{-1})} \quad (11)$$

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

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

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

2. 모델 추종 제어계의 설계

식 (12)에 다음의 전달함수

$$G_c(Z^{-1}) = Z^{-d} + \frac{M(Z^{-1})A(Z^{-1})}{L(Z^{-1})B(Z^{-1})} \quad (13)$$

를 곱하면 $H_1(Z^{-1})$ 이후의 전달함수는 Z^{-d} 이 된다. 이 식 (13)을 전치보상기로 이용한 제어계가 그림 3이다.

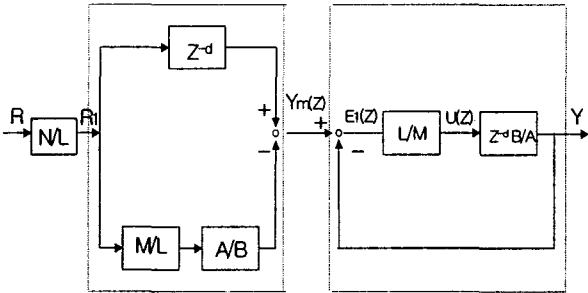


그림 3. PID 제어기법을 이용한 model 추종제어계의 구성도
Fig. 3. Block diagram of model following control system with PID control structure

3. 신경망에 의한 모델의 설계

그림 2에서 페루프 제어계의 제어기는 $L(Z^{-1})/M(Z^{-1})$ 이 된다. 이 $L(Z^{-1})$ 은 식 (8-a)에서

$$L(Z^{-1}) = d_0 + d_1 Z^{-1} + d_2 Z^{-2} \quad (14)$$

이고 여기서 d_0, d_1 및 d_2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d_0 &= K_P + K_I + K_D \\ d_1 &= -(K_P + 2K_D) \\ d_2 &= K_D \end{aligned} \quad (15)$$

그러므로 그림 4에서 $U(Z)$ 는

$$U(Z) = Z^{-1}U(Z) + (d_0 + d_1 Z^{-1} + d_2 Z^{-2})E_1(Z) \quad (16)$$

이다.

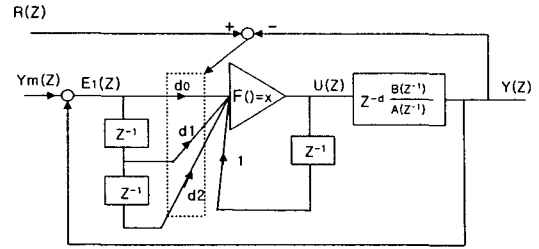


그림 4. 페루프계의 구성도

Fig. 4. Block diagram of closed-loop system

평가함수 J 는 다음과 같다.

$$J = \frac{1}{2} \{R(Z) - Y(Z)\}^2 \quad (17)$$

식 (17)에서 제어대상을 선형이라고 가정하고, 활성화함수 $F(\cdot) = x$ 로 하여 역전파 알고리즘에 의해서 신경망의 연결강도 d_0, d_1 그리고 d_2 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} d_0(k) &= d_0(k-1) + ae(k)e_1(k) \\ d_1(k) &= d_1(k-1) + ae(k)e_1(k-1) \\ d_2(k) &= d_2(k-1) + ae(k)e_1(k-2) \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)에서 a 는 임의의 상수이다.

III. 실험 및 고찰

모델추종 제어계의 제어성능을 확인하기 위하여 그림 4에서 제어대상은 직류 서보 전동기의 각 위치로 하였다. 이 직류 서보 전동기의 전기자 전압 $U(Z)$ 에서 각 위치 $Y(Z)$ 의 전달함수는 다음과 같다.^[8]

$$\frac{Y(Z)}{U(Z)} = \frac{b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2}}{1 + a_1 Z^{-1} + a_0 Z^{-2}} = \frac{Z^{-1}B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} \quad (19)$$

표 1. 직류 서보 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 | 4·10 ⁻⁶ [kg·m·sec ²] | F | 15·10 ⁻⁴ [Kg·m] |
| 정격전압 | 10[V] | 정격전류 | 1.8[A] |

식 (19)에서 제어대상의 부동시간 $d=1$ 이고, $a_1, a_0,$

b_1 그리고 b_2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_0 &= \exp(-T_s/T_0) \\ a_1 &= -(1+a_0) \\ b_1 &= K\{T_s - T_0(1-a_0)\} \\ b_2 &= K\{T_0(1-a_0) - a_0 T_s\} \end{aligned} \quad (20)$$

이다. 식 (20)에서 T_s 는 샘플링시간이고 K 와 T_0 는 직류 서보 전동기의 등가 이득 및 시정수로

$$K = \frac{K_e}{FR_a + (K_e)^2}, \quad T_0 = \frac{FR_a T_m}{FR_a + (K_e)^2} \quad (21)$$

이다. 식 (21)에서 K_e , F , R_a 및 T_m 은 직류 서보 전동기의 역기전력 상수, 점성 마찰 계수, 전기자 저항 및 기계적 시정수이다.

사용한 직류 서보 전동기의 정수는 표1과 같고 샘플링 시간 T_s 는 1[msec]로 하였다.

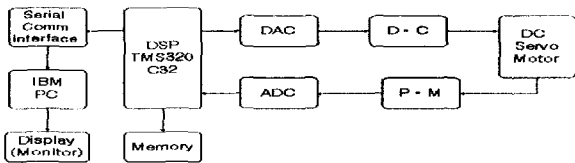


그림 5. DSP를 이용한 실험 장치의 구성
Fig. 5. The Configuration of Experimental setup using DSP

계의 기동특성은 그림 6과 같다.

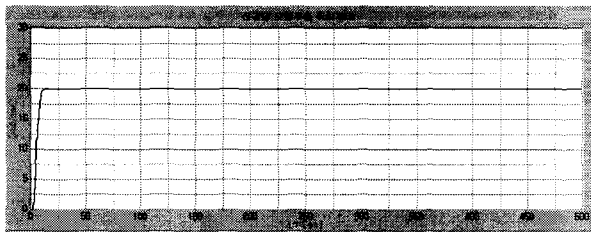


그림 6. 계의 기동특성
Fig. 6. Starting characteristics of control system

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

위의 기동특성에서는 overshoot가 거의 제거되어 계의 양호한 응답특성을 얻을 수 있다.

그림 7은 계응답의 추종성을 검토하기 위한 진폭 ± 40

[rad], 주기 2 [sec]인 펄스 입력신호를 나타내었다.

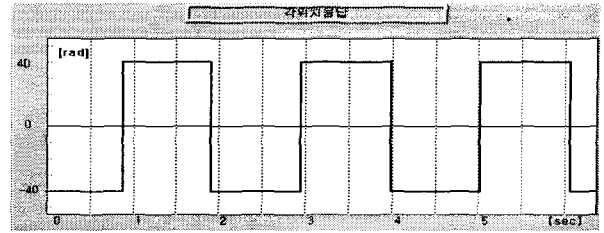


그림 65. 모델추종제어계의 펄스입력신호
Fig. 7. Pulse input signal of Model following control system

먼저 식 (18)의 초기치 $d_0(0)=0.987$, $d_1(0)=0.998$, $d_2(0)=0.0072$ 로 하였을 때 PID 제어를 이용한 계 위치응답은 그림 8과 같다.

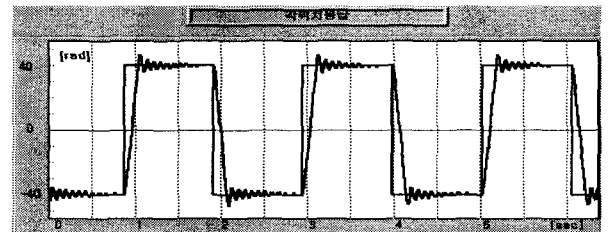


그림 8. 모델추종제어계의 응답(I)
Fig. 8. Response of Model following control system(I)

그림 8에서 상승 시간은 짧으나 overshoot가 크고 정상 상태에 추적하는 시간이 길어서 상당한 정정시간이 있음을 볼 수 있다.

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

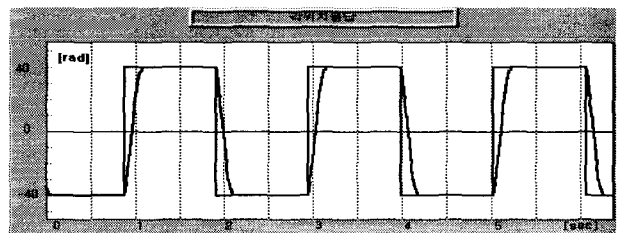


그림 9. 모델추종제어계의 응답(II)
Fig. 9. Response of model following control system(II)

IV. 결론

본 논문에서는 모델추종제어를 위한 PID제어기법을 이산시간영역에서 제안하였다. 제안한 제어계에서 PID제어기의 이득들을 신경망의 역전파 알고리즘에 의해서 계의

응답이 기준입력에 수렴하지 않을 때 자동적으로 조정 되도록 하였다. 그리고 이것을 직류 서보 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. ohnishi, 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] 고태연 "다층신경망에 의한 I-PD제어계의 구성." 한국신호처리·시스템학회, 제3권 1호. pp.74-79, 2002



하 홍 곤(Hong-Gon Ha)
 1972 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1977 동아대학교 대학원 졸업(공학석사)
 1984 중앙대학교 대학원 졸업(공학박사)
 현재 동의대학교 공과대학 전자공학과 교수

관심분야 : 제어이론, 지능형 및 비선형제어 등



이 창 호(Chang-Ho Lee)
 1985 충남대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1995 동의대학교 전자공학과 졸업(공학석)
 2001 부경대학교 대학원 전자공학과 수료
 1987-현재 경남공업고등학교 교사 전자과 교사

관심분야 : 자동제어, 병렬분산처리, 상호접속망, 컴퓨터구조



김 종 진(Jong-Jin Kim)
 1983 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1985 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 졸업(공학석사)
 1995 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1987-현재 부경대학교 전자컴퓨터정보 통신공학부 교수

관심분야 : 병렬분산처리, 상호접속망, 컴퓨터구조