

# 새로운 파라미터 조정법에 의한 2자유도 PID제어기

이창호\*, 김종진\*, 하홍곤\*\*

부경대학교 전자 · 컴퓨터정보통신공학부\*, 부경대학교 전자 · 컴퓨터정보통신공학부\*,  
동의대학교 전자 · 정보통신공학부\*\*

## 2DOF PID Controller by the new method of adjusting parameters

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

Dept. of Electronic Eng. Pukyong National University,\*

Dept. of Electronics, Information and Communications Eng. Dong-eui University\*\*

### Abstract

Many control techniques have been proposed in order to improve the control performance of the discrete-time domain control system. In the position control system, the output of a controller is generally used as the input of a plant but the undesired noise is include in the output of a controller.

In this paper, the neuro-network 2-DOF PID Controller is designed by a neural network and the gains of this controller are adjusted automatically by the back-propagation algorithm of the neural network when the response characteristic of system is changed under a condition.

### I. 서 론

현대 산업현장에서는 운용자 및 사용자들의 여러 가지 요구조건을 신속 · 정확하게 충족시킬 수 있는 자동화 설비의 개발에 대한 필요성이 자동화의 가속화 및 고속화 · 고정밀 · 고정도의 제어기에 대한 연구가 필요하다. 이러한 제어를 요구하는 위치제어계에서는 제어가 용이하고 성능이 양호한 PID제어기가 많이 사용되고 있으나 출력이 목표치를 추종하도록 PID 제어기의 계수들을 조정하면 외란 제어가 난조가 발생하게 되고, 외란에 강인하도록 계수들을 설정하면 목표치 추종시 문제점이 발생하게 된다. 제어계의 자유도는 독립적으로 조정할 수 있는 페루프 전달함수의 수로 결정된다. 그래서 목표치 추종시 문제점과 외란 제거에 대한 2자유도 제어기법이 이용되고 있다.

본 논문에서는 신경망을 이용한 2자유도 제어기를 PID 제어기법으로 설계하였으며 2자유도 파라미터를 조정할 수 있는 새로운 방법을 제시하여 이것을 신경회로망의 역전파 알고리즘을 이용하여 평가함수를 최소화하는 학습법으로 조정되도록 하였다. 그리고 직류 서보전동기를 구동원으로 하는 위치제어계에 적용하여 시뮬레이션으로 제어기의 성능을 검토하였다.

### II. 2자유도 PID제어계의 기본 설계

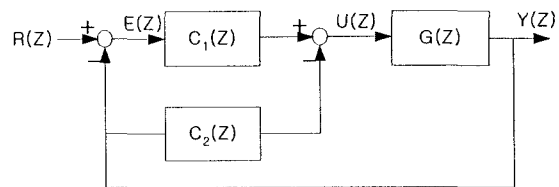


그림 1. 2자유도 제어계

Fig. 1. 2DOF Control system

제어계  $C_1(Z)$ 에 의해서 제어대상  $G(Z)$ 를 제어하는 제어계에 기동시 기동특성을 그리고 외란 및 잡음에 의한 계의 응답특성을 페환루프의 제어기  $C_2(Z)$ 를 이용하여 개선시키는 2자유도 제어계의 구성이 그림 1이다.

그림에서  $R(Z)$ 는 기준입력,  $U(Z)$ 는 제어기의 출력 즉 제어대상의 입력, 그리고  $Y(Z)$ 는 계의 응답이다. 여기서  $U(Z)$ 는

$$U(Z) = C_1(Z) (R(Z) - Y(Z)) - C_2(Z) Y(Z) \quad (1)$$

이고, 계 전체의 전달함수  $M(Z)$ 는 다음과 같다.

$$M(Z) = \frac{G(Z)C_1(Z)}{1 + G(Z)(C_1(Z) + C_2(Z))} \quad (2)$$

식(2)에서 계의 감도  $S_G$ 는

$$S_G = \frac{1}{1 + G(Z)(C_1(Z) + C_2(Z))} \quad (3)$$

식(3)에서  $C_1(Z)$ 와  $C_2(Z)$ 가  $S_G$ 에 관계하므로  $C_1(Z)$ 와  $C_2(Z)$ 가 PID제어기  $C(Z)$

$$C(Z) = K_p + \frac{K_i}{1 - Z^{-1}} + K_d(1 - Z^{-1}) \quad (4)$$

가 되도록 PID 및 PD 제어기로 다음과 같이 구성한다.

$$C_1(Z) = \frac{1}{1 + \alpha} K_p + \frac{K_i}{1 - Z^{-1}} + \frac{1}{1 + \beta} K_d(1 - Z^{-1}) \quad (5-a)$$

$$C_2(Z) = \frac{\alpha}{1 + \alpha} K_p + \frac{\beta}{1 + \beta} K_d(1 - Z^{-1}) \quad (5-b)$$

식(5)에서  $C_1(Z) + C_2(Z)$ 는  $\alpha, \beta$ 에 무관하므로 계의 감도 식(3)에는 영향이 없다. 폐환형 2자유도 PID 제어계에서 외란억제 비례 및 미분계수  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 0에서 1까지 조정 가능하지만<sup>1)</sup> 식(5)과 같이  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 설정하므로  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 0에서  $\infty$ 까지 설정하여도  $\frac{1}{1 + \alpha}$ 와  $\frac{1}{1 + \beta}$ 는 0에서 1사이의 값이 된다.

그러므로 그림 1에서 제어대상의 입력  $U(Z)$ 는

$$U(Z) = C_1(Z)E(Z) - C_2(Z)Y(Z) \quad (6)$$

이고 식(6)에서  $E(Z)$ 는 기준입력  $R(Z)$ 와 계 응답  $Y(Z)$ 간의 오차로

$$E(Z) = R(Z) - Y(Z) \quad (7)$$

이다. 식(6)을 차분방정식으로 고치면 다음과 같다.

$$u(k) = u(k-1) + v(k) - w(k) \quad (8)$$

이고 식(8)에서  $v(k)$ 와  $w(k)$ 는 다음과 같다.

$$v(k) = \frac{1}{1 + \alpha} K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + \frac{1}{1 + \beta} K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (9-a)$$

$$w(k) = \frac{\alpha}{1 + \alpha} K_p(y(k) - y(k-1)) + \frac{\beta}{1 + \beta} K_d(y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)) \quad (9-b)$$

식(9)에서  $K_p$ 와  $K_d$ 는  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 관계하므로  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 변화에 따라 사실상 비례 및 미분 계수가 변화하는 결과를 얻을 수 있다.

1) 박광현, 허진영, 하홍곤, "DC서보모터 구동을 위한 신경망 2자유도 PID제어기 구성"

그러므로 식(9)에서  $\alpha, \beta$  그리고  $K_i$ 가 역전과 알고리즘에 의해서 수정되도록 식(9-a)를 신경망으로 구현하면 다음과 같다.

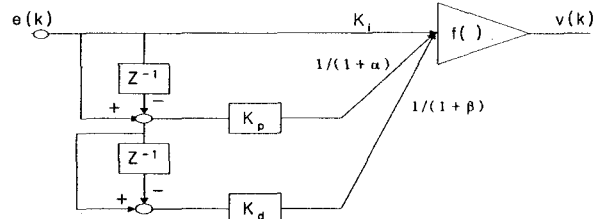


그림 2. 신경망 PID 제어기  
Fig. 2. Neuro PID Controller

그림(2)의 신경망에서  $K_i, \alpha$  및  $\beta$ 를 수정하기 위하여 다음의 평가함수를 이용한다.

$$J = \frac{1}{2} \{e(k)\}^2 \quad (10)$$

신경망의 활성화 함수  $f()$ 에 제어대상을 선형이라고 가정하여 역전과 알고리즘에 의해서  $K_i, \alpha$  및  $\beta$ 의 수정식은 다음과 같다.

$$K_i(k) = K_i(k-1) + ke(k) \quad (11-a)$$

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) + ke(k) * K_p \{e(k) - e(k-1)\} \quad (11-b)$$

$$\beta(k) = \beta(k-1) + ke(k) * K_d \{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)\} \quad (11-c)$$

제어계에서 계의 응답을 모델의 출력과 비교하기 위해서 다음 직류 서보 전동기의 전달함수

$$\frac{Y(z^{-1})}{U(z^{-1})} = \frac{(a_{m2} + a_{m3}z^{-1})z^{-1}}{(1 - a_{m1}z^{-1})(1 - z^{-1})} \quad (12)$$

을 이용하였으며 식(12)에서  $U(z^{-1})$ 는 모델의 입력 즉 직류 서보 전동기의 전기자전압, 그리고  $Y(z^{-1})$ 는 모델의 출력, 즉 직류 서보 전동기의 각 위치이다. 이 식(12)을

$$\frac{Y(z^{-1})}{U(z^{-1})} = \frac{W_m(z^{-1})}{u(z^{-1})} \frac{Y(z^{-1})}{W_m(z^{-1})} \quad (13)$$

로 분해되면 식(13)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{W(z^{-1})}{U(z^{-1})} = \frac{a_{m2} + a_{m3}z^{-1}}{1 - a_{m1}z^{-1}} \quad (14-a)$$

$$\frac{Y(z^{-1})}{W_m(z^{-1})} = \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (14-b)$$

식(14)에서  $W_m(z^{-1})$ 은 직류 서보 전동기의 각속도이다. 식(14)를 차분방정식으로 변화하면 다음과 같다.

$$W_m(k) = a_{m1}W_m(k-1) + a_{m2}u(k) + a_{m3}u(k-1) \quad (15-a)$$

$$y(k) = y(k-1) + W_m(k-1) \quad (15-b)$$

식(15)에서 좌변을 종속변수, 우변의 각 변수들을 독립 변수로 간주하면 다음의 신경망으로 구현된다.

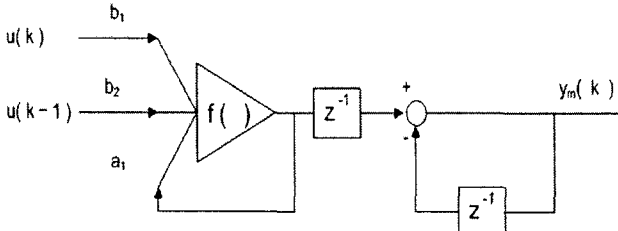


그림 3. 신경망에 의한 서보전동기

Fig. 3. Servo motor by Neural Network

### III. 시뮬레이션 및 고찰

제안한 제어기의 성능을 검출하기 위해서 직류 서보전동기의 각 위치를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 직류 서보전동기의 전기자전압  $U(z)$ 에서 각 위치  $Y(z)$ 의 제어대상의 전달함수  $G(z)$ 는

$$G(z) = \frac{b_0z^{-1} + b_1z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} = \frac{z^{-1}B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (16)$$

이고,  $A(z^{-1})$  및  $B(z^{-1})$ 은

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} \quad (17-a)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} \quad (17-b)$$

이다. 식 (17)에서 제어대상의 부동시간  $d=1$ 이고,

$a_1, a_2, b_0$  및  $b_1$  은

$$a_1 = -(1 + a_2) \quad (18-a)$$

$$a_2 = \exp(-T_s/T_0) \quad (18-b)$$

$$b_0 = K T_s - T_0(1 - a_2) \quad (18-c)$$

$$b_1 = K T_0(1 - a_2) - T_s a_2 \quad (18-d)$$

이다. 식(18)에서  $T_s$ 는 샘플링 시간이고,  $K$  및  $T_0$ 는 직류 서보전동기의 등가이득 및 시정수로 다음과 같다.

$$K = \frac{K_e}{FR_a + (K_e K_i)} \quad (19-a)$$

$$T_0 = \frac{FR_a T_m}{FR_a + (K_e K_i)} \quad (19-b)$$

식 (19)에서  $R_a$ 는 전기자 저항,  $F$ 는 점성마찰계수,  $K_t$ 는 토크상수,  $K_e$ 는 역기전력 상수 그리고  $T_m$ 은 기계적 시정수이다. 시뮬레이션에 사용한 직류서보전동

기의 제정수는 표 1과 같다.

표 1. 직류 서보 전동기의 제정수

Table 1. The parameters of DC servo motor

DC Servo Motor		
$R_a$	전기자 저항	2.6[Ω]
$K_e$	역기전력상수	$7.67 \times 10^{-3} [N \cdot m/A]$
$K_t$	토크상수	$7.67 \times 10^{-3} [N \cdot m/A]$
$F$	마찰 계수	$12 \times 10^{-4} [Kg \cdot m]$
$T_m$	기계적 상수	$0.3225 \times 10^{-3}$
$K$	등가 이득	2.413
$T_0$	등가시정수	$0.3165 \times 10^{-3} [sec^{-1}]$
$K_g$	기어비	70:1

표 1에서 기어비  $K_g$ 는 직류 서보전동기의 속도를 감소하기 위해서 사용하였으며 샘플링 시간  $T_s = 1[msec]$ 일 때, 식 (18)의  $a_1, a_2$  및  $b_0, b_1$  은 다음과 같다.

$$a_1 = -1.042, \quad a_2 = 42.4 \times 10^{-3} \quad (20)$$

$$b_0 = 1.682 \times 10^{-3}, \quad b_1 = 0.629 \times 10^{-3}$$

그리고 신경망 2자유도 PID 제어기의 출력도는 식(8)과 (10)에 의해서 계산되고 신경망의 연결강도는 식(11)에 의해서 수정된다.

PID 제어기에서 비례이득  $K_p=45.02$ , 적분이득  $K_i=0.048$  그리고 미분이득  $K_d=0.0005$ , 그리고 2자유도 계수  $\alpha=2, \beta=10$ 으로 하였을 때 계의 응답이 그림 4이다.

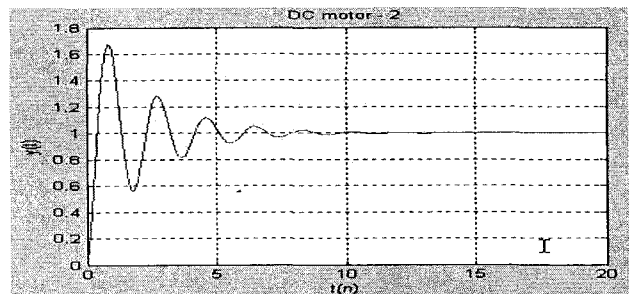


그림 4. 신경망 2DOF PID 제어계의 응답

$$(K_i=0.048, \alpha=2, \beta=10)$$

Fig. 4. Response of the Neuro Network 2DOF PID system( $K_i=0.048, \alpha=2, \beta=10$ )

그림 4는 1[rad]의 스텝입력을 인가하였을 때 그 응답을 나타내고 있는 것으로 응답에서 과도응답 상태가 크고, 정착시간이 길어서 이 과도응답 상태를 줄이고 정착시간을 개선시키기 위하여 2자유도 제어기의 계수  $\alpha$ 와  $\beta$ , 그리고 적분이득  $K_i$ 를 식(11)에서 계산되도록 하였다. 계의 응답에서 상당한 오버슈트 및 지연시간이 발생하고 있음을 알 수 있다.

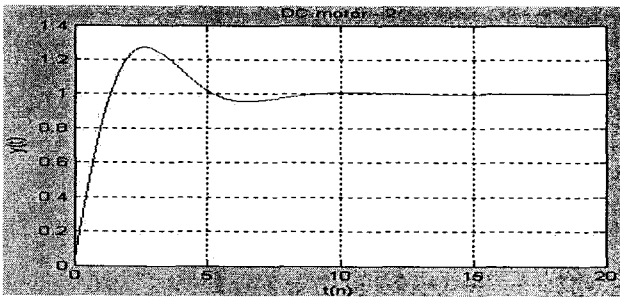


그림 5. 신경망 2DOF PID 제어계의 응답  
( $K_i=0.028, \alpha=2, \beta=10$ )

Fig. 5. Response of the Neuro Network 2DOF PID system( $K_i=0.028, \alpha=2, \beta=10$ )

그림5는  $K_i=0.028, \alpha=2, \beta=10$ 로 설정한 것으로 과도응답 상태가 크게 줄어든 것을 볼 수 있다.

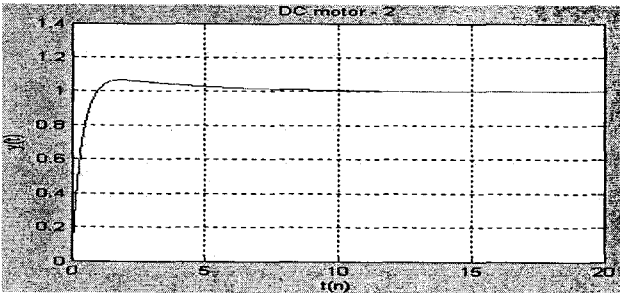


그림 6. 신경망 2DOF PID 제어계의 응답  
( $K_i=0.028, \alpha=0, \beta=10$ )

Fig. 6. Response of the Neuro Network 2DOF PID system( $K_i=0.028, \alpha=0, \beta=10$ )

그림 6은  $K_i=0.028, \alpha=0, \beta=10$ 로 설정한 것으로 크게 함으로써 정상상태에 도달하는 지연시간을 줄일 수가 있었다.

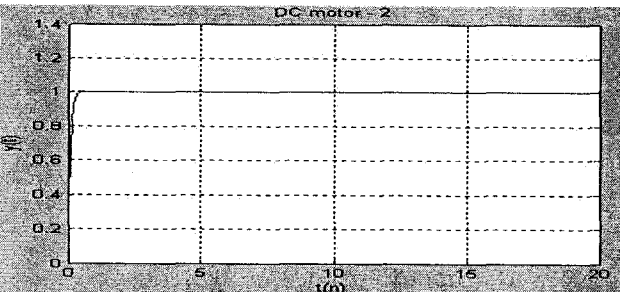


그림 7. 신경망 2DOF PID 제어계의 응답( $K_i=0.028, \alpha=0, \beta=0$ )

Fig. 7. Response of the Neuro Network 2DOF PID system( $K_i=0.028, \alpha=0, \beta=0$ )

그림 7은  $K_i=0.028, \alpha=0, \beta=0$ 으로 설정한 것으로 제안한 제어계를 그림 3의 신경망을 사용하여 신경망의 연결강도를 식 (11)에 의해서 수정되도록 하였으며 그림 4에 비하여 과도응답상태가 제거되고 정상상태에 도달하는 시간이 크게 개선된 것을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 2자유도 PID 제어기를 신경망으로 구성하였으며 2자유도 파라미터를 조정할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 이 제어기법을 직류 서보 전동기를 구동원으로 하는 위치제어계에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션 결과 다음의 결론을 얻었다. 적분이득계수가 클수록 과도응답상태가 증가하고 작을수록 과도 응답상태가 감소되지만 지연시간이 길어진다.

파라미터  $\alpha$ 와  $\beta$ 가 작을수록 과도응답은 적어지고 지연시간도 작아지는 것을 알 수 있다. 그러므로 적분이득계수 및  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 적절히 선정하므로 양호한 제어 성능을 얻을 수 있다.

#### 참고 문헌

- [1] H. Butler, Ger Homderd, and Job von Amerongen, "Model Reference Adaptive of a Direct-Drive DC Motor", IEEE Control system Maganize Jan. 1989. Vol. 27, No. 8, pp. 899~906, 1991.
- [2] 허진영, 하홍곤 "도립전자시스템구동을 위한 신경망 2자유도 PID 제어기의 설계", 한국해양정보통신학회 2000년도 춘계종합학술대회, Vol. 4, No. 1, pp. 378~385, 2000.
- [3] Shu Yamamoto Ara, Masaki Sugiura Jun Sawaki, Kouki Matsuse "A Design Method of 2DOF PID position controller for Linear Servo Motor Drives."
- [4] 이권순, 잉여진, 손주한, 이민형 "2자유도 PID제어기를 이용한 AGV의 조향제어에 관한 연구:전기학회논문지. 490권. 5호, pp. 241~248, 2000.
- [5] 이창구 "신경회로망 보상기를 갖는 비선형 PID 제어기" 전기학회논문지. 490권 5호, pp225~234, 2000.
- [6] C. C. Hang, K. J. Astrom W. K. Ho "Refinements of the Zieger-Nichols tuning formula" IEE pro, vol. 138, No. 2 March, 1991.
- [7] Mituhiko Araki, and Hidefumi Taguch: "TWO-Degree-of Freedom PID Controllers" ICAS. vol. 1, No. 4 pp. 401~411. 2003.