

웨이브렛 신경망을 이용한 PID제어기의 설계

(A Design of the PID controller Using Wavelet Neural network)

하곤곤*

(Hong - Gon Ha)

요 약

본 논문에서는 PID 제어기를 웨이브렛과 신경망으로 설계하여 웨이브렛 이론에 근거하여 신축과 이동의 변수값을 선택하여 웨이브렛 신경망 PID 제어기가 적용되도록 하였다. 그리고 연결강도는 역전과 알고리즘에 의해서 조정되도록 하였다. 이 제어기를 위치 제어계에 적용하여 실험을 통해 그 유효성을 검증하였다.

Abstract

In this paper, the PID controller is constructed with a neural network and wavelet function. And the wavelet neural PID controller is adapted by choosing the values of the dilation and translation parameter of the wavelet function. Weights are adjusted by the inverse propagation algorithm. Applying this method to the position control system, its usefulness is verified from the results of experiment.

Key Words : PID Controller, Wavelet Function, Neural Network, Position Control System.

1. 서 론

현대제어이론의 급격한 발전에도 불구하고 산업현장에 구조가 간단하고 특성이 강인한 PID 제어기가 많이 이용되고 있다. 그러나 이러한 제어기를 사용한 제어계에서 외란이나 부하변동 그리고 비선형 요소 등에 의한 계의 파라메타 변동으로 제어기는 자기의 기능을 충분히 발휘하지 못하게 된다[1][2]. 그러므로

제어계에서 양호한 성능을 유지하기 위해서 PID 제어기의 적절한 동조가 필요하게 되고, 이 동조방법에 대해서 많은 연구들이 있으며 최근에는 신경망을 PID 제어기에 융합하여 이 문제를 해결하려고 하고 있다[3][4].

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[5][6]. 그러나 신경망의 학습에 이용되고 있는 역전파 알고리즘은 여러 분야에서 응용되고 있지만 신경망의 입력층, 은닉층 그리고 출력층의 뉴런수가 증가하면 학습과정의 연산속도가 늦어지고, 부분

* 주저자 : 동의대학교 전기·전자·정보통신·메카트로닉스 공학부 교수, 공학박사
Tel : 051-890-1676, Fax : 051-890-1674
E-mail : haga@dongeui.ac.kr
접수일자 : 2002년10월16일
1차심사 : 2002년10월21일
심사완료 : 2002년11월13일

최소점에 빠질 수 있고, 연결강도의 초기치나 학습율에 민감하게 반응하며 그리고 주어진 입력과 출력 데이터를 기본으로 학습하기 때문에 새로운 입력데이터에 대해서 정밀성을 보장할 수 없는 문제점이 있다[1][5][7][8].

이러한 신경망의 문제점을 보완하기 위해서 신경망과 구조적 유사성을 갖는 웨이브렛(wavelet)을 신경망과 결합시킨 웨이브렛 신경망(Wavelet Neural Network)이 제안되어 함수의 근사화, 함수의 표현 및 분류 그리고 계의 동정등 여러 분야에서 응용되고 있다[9][10][11]. 특히 제어계에서 제어대상을 제어하는 제어기의 특성은 제어함수를 근사화하는데 사용한 함수 근사화의 성능에 따라 좌우된다[12].

본 논문에서는 PID 제어기를 웨이브렛 함수와 신경망으로 설계하여 이 웨이브렛 이론에 근거하여 신축(Dilation)과 이동(Translation) 변수값을 선택하여 초기 적용 웨이브렛 신경망 PID 제어기가 되도록 하였다. 그리고 연결강도(weight)는 역전파 알고리즘에 의해서 조종되도록 하였다. 이 제어기를 위치 제어계에 적용하여 실험으로 그 유효성을 검증하였다.

2. 웨이브렛 신경망 PID 제어기의 구현

2.1 신경망 PID 제어기

제어대상을 비례·적분·미분(PID ; Proportional Integral Derivative)제어기로 제어하는 PID 제어기의 출력 $U(t)$ 는 입력을 $e(t)$ 라 할 때 다음과 같다.

$$U(t) = K_c \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (1)$$

식 (1)에서 K_c 는 비례계수, T_i 는 적분시간 그리고 T_d 는 미분시간이다. 식 (1)을 이산시간영역에서 속도형 PID 제어식으로 변환하면 다음과 같다.

$$U(k) = U(k-1) + K_I e(k) + K_C E(k) + K_D \{E(k) - E(k-1)\} \quad (2)$$

식 (2)에서 K_I 및 K_D 는 적분 및 미분제어계수로

$$K_I = \frac{K_c T_s}{T_i}, \quad K_D = \frac{K_c T_d}{T_s} \quad (3)$$

이고, $E(k)$ 는

$$E(k) = e(k) - e(k-1) \quad (4)$$

이다. 여기서 T_s 는 샘플링 시간이다. 식 (4)를 구성도로 나타내면 그림 1과 같다.

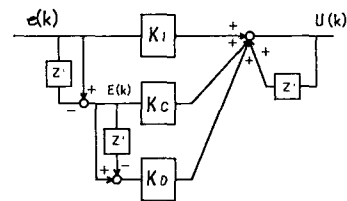


그림 1. PID 제어기의 구성도
Fig. 1. Block diagram of PID Controller

2.2 웨이브렛 신경망 PID 제어기의 구성

푸리에 변환은 주어진 함수나 신호를 사인(sine)과 코사인(cosine)을 기저함수로 하여 표현하고 있지만 웨이브렛 변환은 일정한 시간-주파수 정보를 가지는 기저함수를 이용하여 함수나 신호를 표현하고 있다. 그래서 푸리에 변환은 정제적신호(stationary signal) 해석에 유리한 반면에 웨이브렛 변환은 비정제적신호(non-stationary signal) 해석에 유리하다. 웨이브렛 변환에 사용되는 기저함수로 스케일링(scaling) 함수와 마더 웨이브렛(mother wavelet)이 있으면 마더 웨이브렛은 다음과 같다[13].

$$\psi_{a,\tau} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-\tau}{a} \right) \quad (5)$$

식 (5)에서 a 는 신축 파라미터(dilation or scaling parameter), τ 는 이동 파라미터(translation parameter) 그리고 $1/\sqrt{a}$ 는 정규화인자(normaliza

웨이브렛 신경망을 이용한 PID제어기의 설계

tion factor)이다. 식 (5)에서 $\Psi(t)$ 는 다음의 특성을 가지고 있다.

- (i) $w=0$ 에서 $\Psi(w)=0$ 즉 $\int \Psi(t)dt=0$, 직류성분이 없다.
- (ii) 밴드패스(bandpass) 신호이다.
- (iii) 시간영역에서 빠르게 0에 접근한다.

여기서 (i)은 웨이브렛 변환의 역변환이 존재하기 위한 조건이며 (ii)는 주파수 영역에서 웨이브렛 함수의 특징이며 (iii)은 웨이브렛 변환의 시간영역에서 분해능을 좋게 하기 위한 조건이다. 이러한 특징을 갖는 마더 웨이브렛을 신경망의 출력층의 활성화 함수 대신에 사용하고 이동 파라미터를 신경망의 은닉층의 바이어스로 한다. 그러면 식 (2)를 은닉층의 출력으로 하였을 때 식 (5)는 다음과 같다.

$$U(k) = \sum_{i=0}^4 W_i I_i(k) \quad (6)$$

식 (6)에서 W_0, W_1, W_2, W_3 및 W_4 는

$$\begin{aligned} W_0 &= \tau, W_1 = K_I, W_2 = K_C, \\ W_3 &= K_D, W_4 = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

이고 I_0, I_1, I_2, I_3 , 및 I_4 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_0 &= -1, I_1 = e(k), I_2 = E(k), \\ I_3 &= E(k) - E(k-1), I_4 = U(k-1) \end{aligned} \quad (8)$$

위의 관계를 이용하여 웨이브렛 신경망을 구성하면 그림 2와 같다.

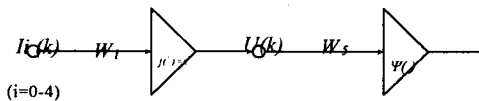


그림 2. 웨이브렛 신경망 PID 제어기의 구성도
Fig. 2. Block diagram of Wavelet Neural PID Controller

그림 2에서 W_5 는,

$$W_5 = \frac{1}{a} \quad (9)$$

이고, 마더 웨이브렛 $\Psi(\cdot)$ 는 가우시안 함수의 두 번 미분인 다음의 함수를 이용한다.

$$\begin{aligned} \Psi(x) &= (1-x^2) \exp(-x^2/2) \\ \Leftrightarrow \Psi(w) &= \sqrt{2\pi w^2} \exp(-w^2/2) \end{aligned} \quad (10)$$

그림 2에서 연결강도 $W_i(i=0\sim4)$ 는 기준입력을 $r(k)$ 그리고 계 응답을 $y(k)$ 라 할 때 오차 $e(k) = r(k) - y(k)$ 이고 평가함수 J 는 다음과 같다.

$$J = \frac{1}{2} \{e(k)\}^2 \quad (11)$$

이고 다음의 식에 의해서 수정되도록 한다.

$$W_i(k+1) = W_i(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial W_i(k)} \quad (12)$$

식(12)에서 η 는 학습율이다.

3. 제어계의 구성

그림 2의 웨이브렛 신경망 제어기로 제어대상(plant)을 제어하는 제어계의 구성도가 그림 3이다.

은닉층의 활성화 함수를 $f(u) = u$ 즉, 제어대상을 선형이라고 가정하여 식(12)를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W_0(k+1) &= W_0(k) + c e(k) W_5(k) \Psi'(x) \end{aligned} \quad (13-a)$$

$$\begin{aligned} W_1(k+1) &= W_1(k) + c e(k) W_5(k) \Psi'(x) \end{aligned} \quad (13-b)$$

$$W_2(k+1) = W_2(k) + c e(k) W_5(k) \Psi'(x) E(k) \quad (13-c)$$

$$W_3(k+1) = W_3(k) + c e(k) W_5(k) \Psi'(x) \{E(k) - E(k-1)\} \quad (13-d)$$

$$W_5(k+1) = W_5(k) + c e(k) \Psi'(x) U(k) \quad (13-e)$$

c는 상수이고 $W_4(k)=1$, 그리고 x 및 $\Psi'(x)$ 는 다음과 같다.

$$x = W_5(k) U(k),$$

$$\Psi'(x) = (x^3 - 3x) \exp(-x^2/2) \quad (14)$$

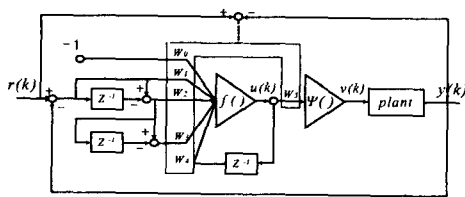


그림 3. 제어계의 구성도
Fig. 3. Block diagram of control system

4. 실험 및 고찰

그림 3에서 PID제어기의 계수연산 및 웨이브렛 신경망의 학습을 고속으로 처리하기 위해 DSP (TMS320C32)를 이용하여 구성한 실험 장치의 구성도가 그림 4이다.

그림 4의 DSP에서 연산처리된 출력은 DAC에서 디지털량이 아날로그량으로 변환되어 이 아날로그량이 직류 서보 전동기의 구동회로 (D·C: Drive-Circuit)에 인가되어 직류 서보 전동기를 구동하게 된다. 이 직류 서보 전동기의 위치는 직류전압 $\pm 5[V]$ 로

인가된 전위차계(P·M: Potential Meter)에서 전압으로 검출되어 이 전압이 ADC에서 디지털량으로 변환되어 DSP에 인가하게 된다. 실험에 사용한 직류 서보 전동기의 제정수는 표 1과 같다.

표 1. 직류 서보 전동기의 제정수
Table 1. Parameters of DC servo motor

| 기호 | 설명(Section) | 값(Value) | 단위(Unit) |
|-------|-------------|-----------------------|----------------|
| R_m | 전기자 저항 | 2.6 | Ω |
| L_m | 전기자 인덕턴스 | 0.18 | mH |
| J_m | 전기자 관성모멘트 | 3.87×10^{-4} | $kg \cdot m^2$ |
| K_e | 역기전력 상수 | 0.00767 | $N \cdot m/A$ |
| K_t | 토크 상수 | 0.00767 | $N \cdot m/A$ |
| F | 마찰 계수 | 12×10^{-4} | $kg \cdot m$ |
| K_g | 기어비 | 70:1 | |

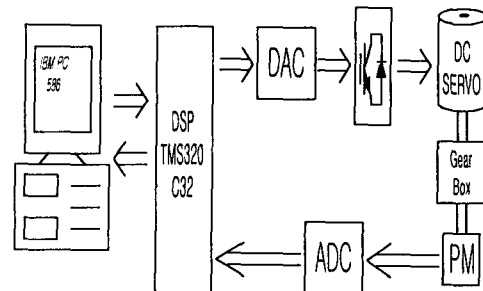


그림 4. 실험 장치의 구성도
Fig. 4. The Configuration of Experimental Set-Up

그림 3의 제어계의 구성에서 PID 제어기의 제어계수와 웨이브렛 신경망 제어기의 제어계수에 대한 수정식(13)에서 자동으로 조정되도록 하였고 샘플링 시간 $T_s = 1 [msec]$ 로 하였다. 그리고 입력은 $\pm 180[rad]$ 의 구형파를 인가하여 계 응답이 이 구형파를 추종하도록 하였다. 먼저 웨이브렛 함수를 사용하지 않은 PID 제어계 즉 바이어스 연결강도 $W_0(k) = 0$, 웨이브렛 함수 $\Psi(x) = 1$ 의 계 응답을 검출하기 위해서 적분계수의초기치 $W_1(0) = 0.00034$, 비례계수의초기치 $W_2(0) = 0.98$,

웨이브렛 신경망을 이용한 PID제어기의 설계

미분계수의 초기치 $W_3(0)=0.086$ 그리고 상수 $c=0.002$ 로 하였을때 계의 응답이 그림 5 그리고 오차 응답이 그림 6이다.

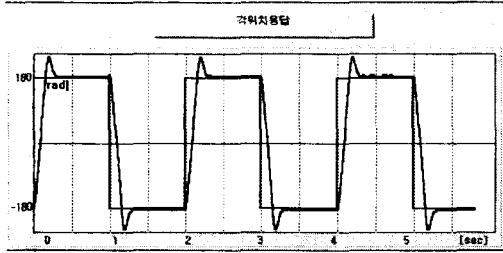


그림 5. PID 제어계의 각위치 응답
($K_p=0.98$, $K_i=0.00034$, $K_d=0.086$)
Fig. 5. Angular position response of PID control system

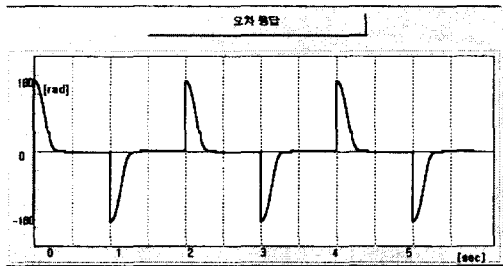


그림 6. PID 제어기의 오차특성
Fig. 6. Error response of PID control system

그림 5의 각위치 응답 특성 곡선에서 상승 시간은 단축되었으나 과도응답 성분이 크게 나타나고 정상상태에 도달하는 시간이 길어져 지연시간이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 그림 6의 오차응답에서 오차가 상당히 큰 것을 알 수 있다.

PID 제어계에서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 PID 제어기의 조건은 그림 5와 같으며 이동 파라미터 즉 바이어스의 연결강도의 초기치 $W_0(0)=0.64$ 그리고 신축 파라미터의 역의 초기치 $W_3(0)=0.019$ 로 하였을 때 계 응답이 그림 7 이고 오차응답이 그림 8이다.

그림 7의 특성곡선에서 과도응답이 완전히 제거되었고 정위치에 도달하기 위한 추종성능이 그림 5에 비해서 크게 개선된 것을 확인할 수 있다. 그래서 오차응답 그림 8은 그림 6에 비해서 크게 개선된 것을

알 수 있다. 그러므로 웨이브렛 신경망 PID 제어기의 신축 파라미터와 이동 파라미터의 값을 적절히 선정함으로써 양호한 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

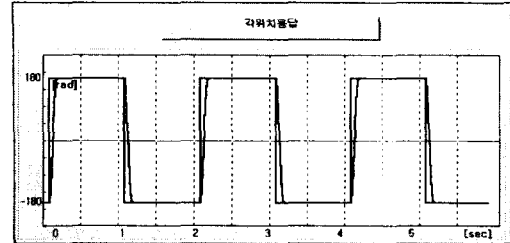


그림 7. 웨이브렛 신경망 PID 제어계의 각위치 응답
($K_0=-1$, $K_p=0.98$, $K_i=0.00034$,
 $K_d=0.086$, $b=0.64$, $c=0.019$)
Fig. 7. Angular position response of Wavelet neural network PID control system

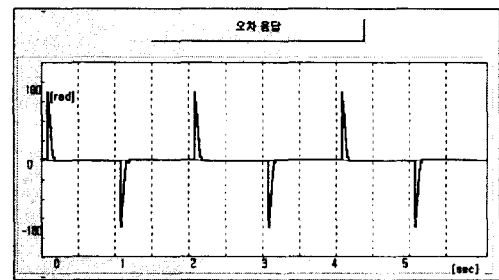


그림 8. 웨이브렛 신경망 PID 제어계의 오차특성
Fig. 8. Error response of Wavelet neural network PID control system

5. 결 론

본 논문에서는 PID 제어기를 웨이브렛 신경망으로 구성하였다. 구성된 제어기를 직류 서보 전동기를 구동원으로 하는 위치 제어계에 적용하여 실험한 결과 기존의 신경망 PID 제어기에 비해서 빠른 수렴 속도와 적은 수행 오차를 보이면서 추종한다는 것을 알 수 있었다. 이 웨이브렛 신경망 PID 제어기는 신경망 PID 제어기에 비해서 근사화 능력이 우수함으로 많은 산업분야에 응용 가능하리라 사료된다.

이 논문은 2002년도 동의대학교 학술연구비 지원을 받아 연구된 것임.

References

- [1] Katsuhisa Endo, Yoshihisa Ishida and Takashi Honda "Gain Adjustment of I-PD Control system" T.IEE, Japan, Vol.113-C, No.6, pp 409-416, 1993.
- [2] P.B.Schmidt and R.D.Lorentz "Design principles and Implementation of DC Drives, IEEE, Trans, Ind, Apply, vol.28, NO.3 pp594-599, 1992.
- [3] MoonYong Lee "Process control using a Neural Network Combinentwith the Conventional PID Controller" icase, Korea, Vol2, No.3, pp196-200, 2000.
- [4] Chang-Goo Lee "Nonlinear PID Controller with Neural Network based Compensator" Trans, KIEE Vol.49D, No.5, pp225-233, 2000.
- [5] Sugn-Boo Chung, Hyun-Kwan Lee, and Ki-Hwan Eom "The Performance Improvement of Backpropagation Algorithm Using the Gain Variable of Activation Function" IEEK, Vol.38 C1, No.6, pp350-369, 2001.
- [6] Hong-Gon Ha "The design of the expanded I-PD Controller with the Neuro-Precompensator" Kimics, Vol. 4, No.3, pp619-625, 2000.
- [7] Chang-Goo Lee "Identification and Control of Fast Time-Varying Nonlinear System Using Error Recurrent Neural Network" Trans, KIEE, Vol.46. No.12. pp1793-1799. 1997.
- [8] Chang-Goo Lee, Dong-Young Shin "Adaptive PID Controller Based on Error Self-Recurrent Neural Network" Journal of Control, Automation and System Engineering Vol.4. No.2. pp209-214, 1998.
- [9] J.Zhang, G.G.Walter, Y.Miao and W.N.WLee "Wavelet Neural Networks for Function Learning" IEEE Trans. onsignal processing. Vol.43, No 6, pp1485-1497, 1995.
- [10] Kyuon-Kwon Jung, Dong-Seol Son, Yong-Gu Lee, Hyun-Kwan Lee and Ki-Hwan Eom "Adaptive Control Method using Wavelet Neural Network" Pro. KIMICS, Vol.5, No.1. pp456-459, 2001.
- [11] Y.Tan.XDang, F.Liang and Chun-Yi Su "Dynamic Wavelet Neural Network for Nonlinear Dynamic System Identification" IEEE International Conference on control Applications, pp214-219, 2000.
- [12] Seung-Jin Seo, Jae-Yong Seo, Kyuon-Jae Won, Jung-Heun Yon, and Hong-Tae Jeon "Wavelet Network for Stable Direct Adaptive Control of Nonlinear Systems" IEBC, Vol.36-s, No.10, pp51-57 1999.
- [13] Hyun-Dong Lee, Kwang-Sik Lee and Dong-In Lee "The Analysis of Partial Discharges Pattern using Wavelet Transform" Journal of KIEE, Vol.15, No.1, PP.84~89. 2001.

◇ 저자소개 ◇

하 홍 곤 (河泓坤)

1973년 동아대학교 전자공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1982 중앙대학교 전기공학과 졸업(박사). 1985년~현재 동의대학교 전기·전자·정보통신·메카트로닉스 공학부 교수.