

I-PD 제어계에서 모델추종제어를 위한 전치보상기의 설계

(The Design of a Pre-Compensator for the Model-Following Control in the I-PD Control System)

하홍곤*

(Hong-Gon Ha)

요 약

제어계에서 제어성능을 개선시키기 위해서 많은 제어기법들이 제안되어왔다. 궤환제어계에서 일반적으로 제어기의 출력이 제어대상의 입력으로 사용된다. 그러나 불필요한 잡음이 제어기의 출력에 포함된다. 그러므로 이러한 잡음을 제거하고 계의 응답특성을 개선시키기 위해서 전치보상기를 사용할 필요가 있다.

본 논문에서는 모델추종제어를 위한 전치보상기의 설계법을 I-PD 제어계에서 제안하였다. 제안한 전치보상기를 신경망으로 구현하였고, 계의 응답특성이 어떤 조건하에서 변할 때 원하는 응답이 되도록 전치보상기의 이득이 자동적으로 조정되도록 하였다.

Abstract

Many control techniques have been proposed in order to improve the control performance in the control system. In the feedback control system, the output of controller is generally used as the input of a plant. But the undesired noise is included in the output of a controller. Therefore, there is a need to use a precompensator for rejecting the undesired noise and improving the response characteristic of a system.

In this paper, the design method of a precompensator is proposed for the model following control in the I-PD control system. The proposed precompensator is implemented with a neural network. The gains of a precompensator are adjusted automatically to obtain a desired response of a system when the response characteristic of a system is changed under a condition.

Key Words : I-PD controller, Model-following Control, Precompensator, Neural Network, Position Control system

1. 서 론

PID제어계나 I-PD제어계의 동작 특성은 제어기

의 이득에 따라 결정되므로 제어계에 알맞은 이득을 조정할 필요가 있다. 특히 외란이나 부하변동에 의해 계응답이 변하는 경우, 제어계의 이득을 재조정해야 하며, 여기에 대해서 여러 연구가 이루어지고 있으며, 신경망을 이용하여 학습제어를 하는 연구들도 많이 보고되고 있다.[1~3] 그 중에서도 목표신호와 실제 출력과의 자승오차를 평가함수로 하여, 이것을 최소로 하는 학습방법인 역전파 알고리즘이 제

* 주저자 : 동의대학교 전자·정보통신공학부 교수
Tel : 051-890-1676, Fax : 051-890-1674

E-mail : hgaha@dongeui.ac.kr

접수일자 : 2004년 6월 15일

1차심사 : 2004년 6월 22일, 2차심사 : 2004년 7월 15일

심사완료 : 2004년 8월 10일

안되어, 계층형 신경회로망에 의한 여러 가지 패턴 학습이 가능하게 되었다[4,5].

신경회로망은 학습을 통하여 임의의 함수를 근사화할 수 있고, 병렬분산 처리와 정보의 분류가 용이하다. 그리고 정확히 알지 못하는 시스템의 동력학 방정식을 신경회로망을 사용하여 근사화시킬 수 있다. 제어관점에서 가장 널리 사용되는 신경회로망의 구조는 역전파 알고리즘을 이용한 다층 신경회로망이다. 역전파 알고리즘은 연결 강도 및 바이어스의 초기값이 학습결과에 큰 영향을 미친다. 뿐만 아니라 학습계수, 은닉층 신경소자의 수 등이 제어기의 설계에 매우 중요한 문제가 된다[6,7].

본 논문에서는 I-PD제어기로 제어되는 제어계에서 모델추종제어를 위한 전치보상기를 설계하였다. 전치보상기를 신경망으로 구현하였다. 이 신경망의 연결가중치가 역전파 학습 알고리즘에 의해서 수정되어 전치보상기의 극점이 수정되도록 하였다. 제안한 제어기를 직류 서보 전동기를 구동으로 하는 위치 제어계에 적용하여 제어성능을 실험으로 입증하였다.

2. I-PD 제어계의 해석

I-PD 제어기에 의해서 제어대상 $G(z)$ 를 제어하는 제어계의 구성도가 그림 1이다.

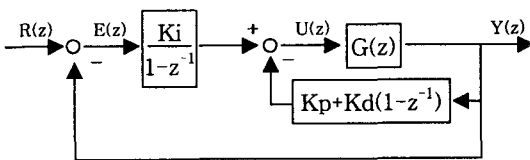


그림 1. I-PD 제어계의 구성도
Fig. 1. Block diagram of I-PD control system

그림 1에서 K_i , K_p 및 K_d 는 적분기, 비례기 및 미분기의 이득이고, $R(z)$ 및 $Y(z)$ 는 기준입력과 계응답이고, $E(z)$ 는 기준입력과 계응답간의 오차로

$$E(z) = R(z) - Y(z) \quad (1)$$

이다.

그리고 I-PD 제어기 출력 $U(z)$ 는 제어대상의 입력력으로 다음과 같다.

$$U(z) = \frac{K_i}{1-z^{-1}} E(z) - \{K_p + K_d(1-z^{-1})\} Y(z) \quad (2)$$

식 (2)를 정리하면 다음과 같다.

$$U(z) = \frac{M(z^{-1})}{L(z^{-1})} \left\{ \frac{K_i}{M(z^{-1})} R(z) - Y(z) \right\} \quad (3)$$

여기서 $L(z^{-1})$ 및 $M(z^{-1})$ 은 다음과 같다.

$$L(z^{-1}) = 1 - z^{-1} \quad (4-a)$$

$$M(z^{-1}) = K_i + K_p(1-z^{-1}) + K_d(1-z^{-1})^2 \quad (4-b)$$

제어대상의 전달함수 $G(z)$ 는

$$G(z) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (5)$$

로 가정한다. 이 식 (5)에서 d 는 제어대상의 부동시간 이고, $A(z^{-1})$ 가 $B(z^{-1})$ 은 다음과 같다.

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n} \quad (6-a)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m} \quad (6-b)$$

식 (3)과 (5)를 이용한 제어계가 그림 2이다.

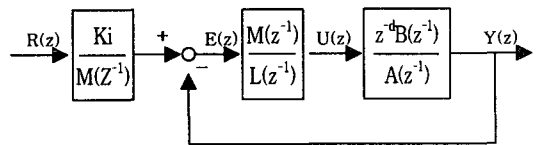


그림 2. 제어계의 구성도
Fig. 2. Block diagram of control system

3. 모델추종제어계를 위한 전치보상기의 설계

그림 2의 구성도에서 페루프 부분의 전달함수 $F(z)$ 는

I-PD 제어계에서 모델추종제어를 위한 전치보상기의 설계

$$F(z) = \frac{z^{-d}M(z^{-1})B(z^{-1})}{L(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-d}M(z^{-1})B(z^{-1})} \quad (7)$$

이다. 식 (7)에 다음의 전치보상기

$$G_c(z) = z^{-d} + \frac{L(z^{-1})}{M(z^{-1})} \frac{A(z^{-1})}{B(z^{-1})} \quad (8)$$

을 사용하면 $F(z) = z^{-d}$ 가 된다. 그러므로 $G_c(z)$ 는 $K_i/M(z^{-1})$ 을 규범 모델로 하는 추종제어가 되기 위한 전치보상기이다. 즉 제어대상의 지연시간이 d 만큼 지연된 후 계의 응답은 완전히 $R_1(z)$ 을 추종하게 된다.

4. 제어계의 구성

그림 1의 제어계가 직류서보전동기를 구동원으로 하는 위치제어계라 할 때 직류서보전동기의 전기자 전압에서 각위치까지 전달함수에서 $A(z^{-1})$ 및 $B(z^{-1})$ 은

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} \quad (9-a)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} \quad (9-b)$$

이다. 식 (5)에서 제어대상의 부동시간 $d=1$ 이고, a_1 , a_2 , b_0 및 b_1 은

$$a_1 = -(1 + a_2) \quad (10-a)$$

$$a_2 = \exp(-T_s/T_0) \quad (10-b)$$

$$b_0 = K(T_s - T_0(1 - a_2)) \quad (10-c)$$

$$b_1 = K(T_0(1 - a_2) - T_s a_2) \quad (10-d)$$

이다. 식 (10)에서 T_s 는 샘플링 시간이고, K 및 T_0 는 직류서보전동기의 등가이득 및 시정수에 다음과 같다

$$K = \frac{K_c}{FR_a + K_c K_t} \quad (11-a)$$

$$T_0 = \frac{FR_a T_m}{FR_a + K_c K_t} \quad (11-b)$$

식 (11)에서 R_a 는 전기자 저항, F 는 점성마찰 계수, K_t 는 토크상수 K_e 는 역기전력상수 그리고 T_m 은 기계적 시정수이다.

식 (4-b)에서 $M(z^{-1})$ 을

$$M(z^{-1}) = m_0 - m_1z^{-1} + m_2z^{-2} \quad (12)$$

라 하면

$$m_0 = K_i + K_p + K_d, \quad m_1 = K_p + 2K_d, \quad m_2 = K_d \quad (13)$$

이고, 식 (8)에서

$$L(z^{-1})A(z^{-1}) = 1 + l_1z^{-1} + l_2z^{-2} - l_3z^{-3} \quad (14)$$

$$M(z^{-1})B(z^{-1}) = n_0 + n_1z^{-1} + n_2z^{-2} + n_3z^{-3} \quad (15)$$

라 하면

$$l_1 = a_1 - 1, \quad l_2 = a_2 - a_1, \quad l_3 = a_2 \quad (16-a)$$

$$\begin{aligned} n_0 &= m_0 b_0, & n_1 &= m_0 b_1 - m_1 b_0 \\ n_2 &= b_0 m_2 - b_1 m_1, & n_3 &= b_1 m_2 \end{aligned} \quad (16-b)$$

이다. 식 (8)의 전치보상기를 갖는 제어계의 구성도가 그림 3이다.

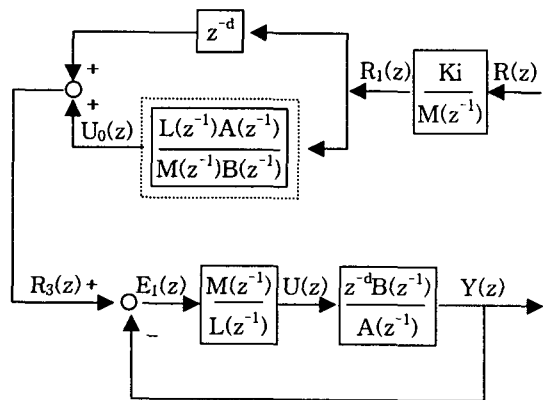


그림 3. 전치보상기를 갖는 제어계
Fig. 3. Control system with a precompensator

그림 3에서 $R_1(z)$ 는 모델의 출력, $U_0(z)$ 는 식 (8)의 전치보상기의 전달함수에서 유리함수의 출력, $R_3(z)$ 는 폐루프부의 입력이다. 그림 3에서 점선부분을 신경망으로 구현하기 위해서 $U_0(z)$ 를 차분방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$u_0(k) = k_0 r_2(k) - k_1 u_0(k-1) - k_2 u_0(k-2) - k_3 u_0(k-3) \quad (17)$$

여기서 $r_2(k)$ 는 그림 3의 점선부분에서 분자에 대한 차분방정식으로

$$r_2(k) = r_1(k) + l_1 r_1(k-1) + l_2 r_1(k-2) - l_3 r_1(k-3) \quad (18)$$

이고, k_0, k_1, k_2 그리고 k_3 는 다음과 같다.

$$k_0 = \frac{1}{n_0}, \quad k_1 = \frac{n_1}{n_0}, \quad k_2 = \frac{n_2}{n_0}, \quad k_3 = \frac{n_3}{n_0} \quad (19)$$

식 (17) 즉 전치보상기의 극점을 수정하기 위해서 활성화 함수 $f(\cdot) = x$ 인 신경망으로 구현하면 그림 4이다.

평가함수 J 를

$$J = \frac{1}{2} (r(k) - y(k))^2 \quad (20)$$

라 하고, $E_1(z)$ 와 $Y(z)$ 간의 전달함수가 선형이라고 가정하여 역전파알고리즘으로 계산하면 다음과 같다.

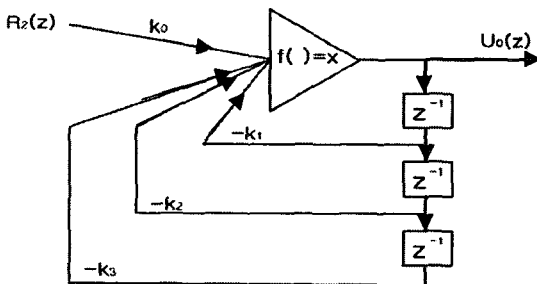


그림 4. 식 (18)의 신경망 구성
Fig. 4. Configuration of Neural Network on eq(18)

$$k_0(k) = k_0(k-1) + \lambda(r(k) - y(k))r_2(k) \quad (21-a)$$

$$k_1(k) = k_1(k-1) + \lambda(r(k) - y(k))u_0(k-1) \quad (21-b)$$

$$k_2(k) = k_2(k-1) + \lambda(r(k) - y(k))u_0(k-2) \quad (21-c)$$

$$k_3(k) = k_3(k-1) + \lambda(r(k) - y(k))u_0(k-3) \quad (21-d)$$

여기서 λ 는 임의의 상수이다.

위 식 (21)은 모델의 출력과 계응답과의 오차 $e(k) \neq 0$ 이면 수정되고 $e(k) = 0$ 이면 수정이 완료된다.

5. 실험 및 고찰

I-PD 제어기 및 제어계의 제어식을 고속으로 처리하기 위해 DSP(TMS320C32)를 이용하여 구성된 실험장치의 구성도가 그림 5이다.

그림 5의 DSP에서 연산 처리된 출력은 DAC에서 디지털 신호가 아날로그 신호로 변환되어 이 아날로그 신호가 직류 서보 전동기의 구동회로(DC : Drive circuit)에 인가된다. 이 직류 서보 전동기의 위치는 직류전압 $\pm 5[V]$ 로 인가된 전위차계(PM : Potential Meter)에서 전압으로 검출되어 이 전압이 ADC에서 디지털 신호로 변환되어 DSP에 인가하게 된다. 실험에 사용한 직류 서보 전동기의 제정수는 표 1과 같다.

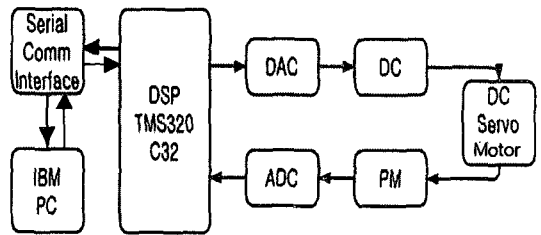


그림 5. 실험 장치의 구성도
Fig. 5. The Configuration of Experimental Setup

표 1에서 기어비 K_g 는 직류 서보전동기의 속도를 감속하기 위해서 사용하였으며 샘플링 시간 $T_s = 1[msec]$ 일 때, 식 (10)의 a_1, a_2, b_0 및 b_1 는 다음과 같다.

I-PD 제어계에서 모델추종제어를 위한 전치보상기의 설계

$$\begin{aligned} a_1 &= -1.042, \quad a_2 = 42.4 \times 10^{-3} \\ b_0 &= 1.682 \times 10^{-3}, \quad b_1 = 0.629 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (22)$$

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

| DC Servo Motor | | |
|----------------|--------|--|
| R_a | 전기저항 | 2.6[Ω] |
| K_e | 역기전력상수 | 7.67×10^{-3} [N·m/A] |
| K_t | 토크상수 | 7.67×10^{-3} [N·m/A] |
| F | 마찰계수 | 12×10^{-4} [Kg·m] |
| T_m | 기계적상수 | 0.3225×10^{-3} |
| K | 등가이득 | 2.413 |
| T_o | 등가시정수 | 0.3165×10^{-3} [sec ⁻¹] |
| K_g | 기어비 | 70:1 |

그리고 I-PD 제어기의 이득 K_i , K_p 및 K_d 는 다음과 같다.

$$K_i = 0.100695, \quad K_p = 0.98801, \quad K_d = 0.000695 \quad (23)$$

5.1 I-PD 제어계에서 응답

그림 1의 I-PD 제어계에서 I-PD 제어기의 이득은 식 (23)이며 식 (2)를 차분방정식으로 변환하여 그 결과가 DAC를 거쳐 직류서보전동기의 구동회로에 인가되도록 된다.

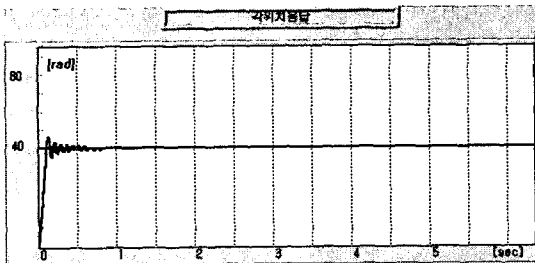


그림 6. 스텝입력에 대한 I-PD 제어계의 응답
Fig. 6. Response of I-PD system on the step input

그림 6은 스텝입력으로 계응답을 40[rad]이 되도록 지령하였을 때 그 스텝입력과 계응답을 보이고 있다. 계의 응답에서 상당한 과도응답이 발생하고

있음을 알 수 있다. 그리고 그림 7은 펄스입력으로 계응답을 ± 40 [rad]이 되도록 지령하였을 때 펄스입력과 계응답을 보이고 있다.

그림 7의 계응답에서 상당한 과도응답이 발생하여 정상상태에 도달하는 시간이 길어지는 것을 알 수 있다. 이러한 과도응답성분을 제거하기 위해서 제안한 모델추종제어를 위한 전치보상기를 이용하였다.

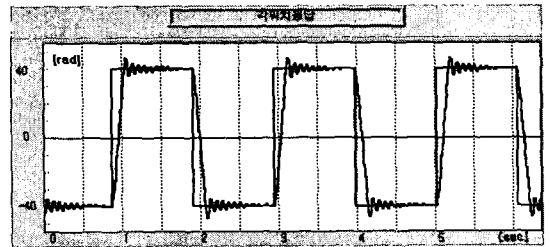


그림 7. 펄스입력에 대한 I-PD 제어계의 응답
Fig. 7. Response of I-PD control system on the pulse input

5.2 전치보상기를 이용한 제어계의 응답

제안한 전치보상기를 갖는 그림 3의 제어계에서 $R_1(z)$ 의 차분방정식은 식 (12)에서 $r_1(k)$ 는

$$\begin{aligned} r_1(k) &= \\ (1/m_0)(m_1 r_1(k-1) - m_2 r_1(k-2) + K_f u(k)) \end{aligned} \quad (24-a)$$

이고, $U_0(k)$ 는 식 (17) 과 식 (18)에 의해서 연산된다. 그러면, $r_3(k)$ 는 그림 3에서

$$r_3(k) = r_1(k-1) + u_0(k) \quad (24-b)$$

로 되고, $e(k)$ 는

$$e(k) = r_3(k) - y(k) \quad (24-c)$$

이므로 제어대상의 입력 $u(k)$ 는

$$\begin{aligned} u(k) &= \\ u(k-1) + m_0 e(k) - m_1 e(k-1) + m_2 e(k-2) \end{aligned} \quad (24-d)$$

이다. 이 $u(k)$ 가 DAC를 거쳐 구동회로에 인가된다. 이때 식 (3)에서 $M(z^{-1})$ 의 계수 m_0, m_1 및 m_2 는

$$m_0 = 1.0894, m_1 = 0.9894, m_2 = 0.000095 \quad (25)$$

이고 $L(z^{-1})A(z^{-1})$ 의 계수 l_1, l_2 및 l_3 는 식 (16-a) 에서 다음과 같다.

$$l_1 = -2.042, l_2 = 1.0824, l_3 = 0.0424 \quad (26)$$

그리고 신경망의 연결강도는 식 (21)에 의해서 수정된다. 연결강도의 초기치를 $k_0(0) = 0.02, k_1(0) = 0.0534, k_2(0) = 0.034, k_3(0) = -0.002$ 로 하였다.

그림 8은 스텝입력으로 계응답을 $40[rad]$ 이 되도록 하였을 때 계의 응답이다. 그림 6에 비해서 과도응답상태가 제거되어 그림 6에 비해서 정상상태에 도달하는 시간이 크게 개선된 것을 알 수 있다.

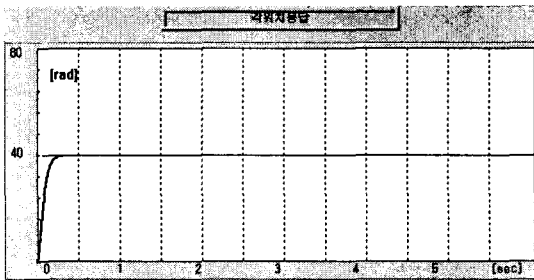


그림 8. 스텝입력에 대한 제어계의 응답
Fig. 8. Response of the control system on the step input

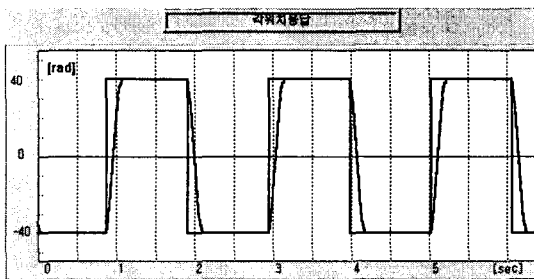


그림 9. 펄스입력에 대한 제어계의 응답
Fig. 9. Response of the control system on the pulse input

그림 9는 펄스입력으로 계응답을 $\pm 40[rad]$ 이 되도록 지령하였을 때 계응답으로 그림 7에 비해서 과도응답상태가 제거되어 입력에 추종하는 시간이 크게 단축된 것을 알 수 있다.

이상의 실험결과를 정리하면 표 2와 같다. 표 2에서 제안한 제어계에서 상승시간이 I-PD 제어계보다 길지만 제안한 제어계에서 최대 과도응답이 0 [%]이므로 정정시간이 크게 개선된 것을 알 수 있다.

표 2. 성능지수
Table 2. Performance Indexes

| 제어계 \ 성능지수 | 상승시간 [msec] | 정정시간 [msec] | 최대 과도응답[%] |
|------------|-------------|-------------|------------|
| I-PD 제어계 | 129 | 219 | 10.4 |
| 제안한 제어계 | 151 | 165 | 0 |

6. 결 론

본 논문에서 I-PD 제어기로 제어되는 제어계에서 불필요한 잡음과 계의 응답특성을 개선하기 위해서 모델추종제어형인 전치보상기의 설계법을 제안하였다. 제안한 전치보상기의 극점이 신경망의 연결강도에 의해서 수정되도록 하였다.

제안한 제어계는 직류 서보 전동기를 구동원으로 하는 위치제어계에 적용하여 실험으로 제어기의 성능을 확인한 결과 I-PD 제어계의 계응답에 비해서 제안한 제어계의 계응답이 개선된 것을 알 수 있으며 입력에 양호하게 추종하는 것을 알 수 있다.

이 논문은 2004년도 동의대학교 학술연구비 지원을 받아 연구된 것임.

References

- [1] G. Lightbody and G. W. Irwin "Direct neural model reference adaptive control" IEE. proc-control Theory. Appl., Vol. 142No.1, pp.31-43, 1995.
- [2] MoonYong LEE "Process control using a Neural Network Combinent with the Conventional PID Controller" icase,

I-PD 제어계에서 모델추종제어를 위한 전치보상기의 설계

- Korea, vol 2, No.3, pp196-200, 2000.
- [3] Chang-Goo Lee "Nonlinear FLD controller with Neural Network based compensator" Trans KIEE vol.49D, No.5 pp.225-233, 2000.
 - [4] Sung-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 pp 26-36, 2001.
 - [5] Hong-Gon Ha "The design of the expanded I-PD controller with the Neuro-precompensator" KJMICS, vol.4, NO.3, pp. 619-625, 2000.
 - [6] Tae-Eun Ko "Construction of the I-PD control system by Multilayer Neural Network" KISPS vol.3, No.1 pp.74-79, 2000.
 - [7] G. M. Scott, J. W. Shavlik & W. H. Ray "Refining PID Controllers using Neural Networks." Advances in Neural Information Processing Systems, pp. 555-562, 1992.

◇ 저자소개 ◇

하홍곤 (河泓坤)

1950년 11월 27일생. 1973년 동아대학교 전자공학과 졸업. 1977년 동 대학 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1983년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985년~현재 동의대학교 전자·정보통신공학부 교수.