

## DC서보계에서 2층신경망을 이용한 확대 PID 제어기

### Expanded PID Controller Using Double-Layers Neural Network In DC Servo System

이정민, 하홍곤

Jung Min Lee and Hong Gon Ha

#### Abstract

In the position control system, the output of a 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.

In this paper, the expanded PID controller with a precompensator is constructed, The precompensator and PID controller are designed by a neural network with two-hidden layer and these coefficients are changed automatically to be a desired response of system when the response characteristic is changed under a condition.

**Keywords** : Expanded PID controller, a neural network with two-hidden layer

#### I. 서론

산업현장에서 고전제어 기법인 PID 제어기법 및 I-PD 제어기법이 여러 잇점 때문에 많이 이용되고 있다.[1-2] 이러한 제어기를 이용하는 제어계에서 제어기의 지연시간이나 외란 또는 부하변동에 의해 계응답이 변할 경우 운전자는 제어기의 이득을 재 조정하여야 한다. 즉 제어조건의 변화와 비선형 시변동특성을 갖는 시스템에서 최적의 기능을 수행하기 위해서는 수시로 제어기의 계수를 재조정하지 않으면 제어기는 제어능력을 충분히 발휘하지 못하게 된다.[3-4]

근간에는 전문가의 경험적 규칙이나 실험에 의한 지식을 자기동조 알고리즘화하여 제어기의 설계에 이용함으로써 어떠한 상황하에서도 파라메타의 변화를 자동적으로 계산하여 제어이득이 조정되는 지능제어기법이 연구되고 있으며 많은 분야에서 실용화 되고 있다. 이러한 지능제어기법의 하나가 신경망의 개념을 이용한 신경망제어기법이다.[5-8]

본 논문에서는 PID 제어기와 전치보상기를 가

지는 확대 PID 제어기를 구성하고, 이 확대 PID 제어기를 2개의 은닉층을 갖는 신경망으로 구현하였다. 신경망 내부의 연결가중치가 제어기의 각 이득에 대응되도록 구성하고, 이 연결 가중치가 역전파 학습알고리즘에 의하여 적절히 수정되도록 하였다.

제안된 제어기를 직류 서보 전동기를 구동원으로 하는 위치제어계에 응용하여, 계응답의 추종성으로 제어기의 제어성능을 실험으로 확인하였다.

#### II. 확대 PID 제어기의 구성 및 신경망의 학습

##### 1. 신경망의 학습

신경망 학습을 위한 구성도는 그림 1과 같다. 이 구성도는 입력층의 출력에서 2개의 은닉층과 하나의 출력층까지를 도기한 2개의 은닉층을 갖는 신경망 즉 2층 신경망의 구성도이다.

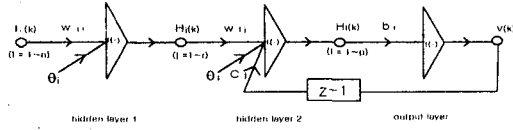


그림 1. 2층 신경망의 구성도

Fig.1. Block diagram of the neural network with two layers.

그림 1에서 i번째 입력층 unit의 출력을  $I_i(k) (i=1 \sim n)$ , j번째 은닉층 1 unit 출력을  $U_{lj}(k) (j=1 \sim r)$ , l번째 은닉층 2 unit의 출력을  $U_{2l}(k) (l=1 \sim p)$  그리고 출력층의 출력이  $V(k)$ 이다.

그림 1에서 은닉층 1의 입력  $net_{1j}$ 와 출력  $U_{lj}(k)$ 는

$$net_{1j} = \sum_{i=1}^n W_{ji} I_i + \theta_j \quad (1-1)$$

$$U_{lj}(k) = f(net_{1j}) \quad (1-2)$$

이다.

식(1)에서  $W_{ji}$ 는 입력층과 은닉층 1을 연결하는 연결강도이고  $\theta_j$ 는 은닉층 1의 문턱값이다. 그리고 은닉층 2의 입력  $net_{2l}$ 과 출력  $U_{2l}(k)$ 는

$$net_{2l} = \sum_{j=1}^r W_{lj} U_{lj}(k) + \theta_l \quad (2-1)$$

$$U_{2l}(k) = f(net_{2l}) \quad (2-2)$$

이다.

식(2)에서  $W_{lj}$ 는 은닉층 1과 2를 연결하는 접속 강도이고  $\theta_l$ 은 은닉층 2의 문턱값이다. 그리고 출력층의 입력  $net$ 와 출력  $V(k)$ 는

$$net = \sum_{j=1}^p b_j U_{2j}(k) \quad (3-1)$$

$$V(k) = f(net) \quad (3-2)$$

이고,  $b_j$ 는 은닉층 2와 출력층을 연결하는 연결 강도이며  $f(\cdot)$ 는 활성화 함수이다. 접속강도

$W_{ji}$ ,  $W_{lj}$  및  $b_j$ 를 수정하기 위해서 다음과 같은 역전과 학습알고리즘을 도입한다.

$$W_{ji}(k+1) = W_{ji}(k) - \eta_1 \frac{\partial E}{\partial W_{ji}(k)} \quad (4-1)$$

$$W_{lj}(k+1) = W_{lj}(k) - \eta_2 \frac{\partial E}{\partial W_{lj}(k)} \quad (4-2)$$

$$b_j(k+1) = b_j(k) - \eta_3 \frac{\partial E}{\partial b_j(k)} \quad (4-3)$$

식(4)에서  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  및  $\eta_3$ 는 상수이며  $E$ 는 기준치  $R(k)$ 와 계응답  $Y(k)$ 간의 오차  $e(k) = R(k) - Y(k)$ 의 함수로 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} \{e(k)\}^2 \quad (5)$$

식(4)에서 미분항을 계산하기 위하여 다음의 미분연쇄 법칙을 적용한다.

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ji}} = \frac{\partial E}{\partial Y(k)} \frac{\partial net_{1j}}{\partial W_{ji}} \frac{\partial U_{lj}(k)}{\partial net_{1j}} \frac{\partial net_{2l}}{\partial U_{lj}(k)} \times \frac{\partial U_{2l}(k)}{\partial net_{2l}} \frac{\partial net}{\partial U_{2l}(k)} \frac{\partial V(k)}{\partial net} \frac{\partial Y(k)}{\partial V(k)} \quad (6-1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_{lj}} = \frac{\partial E}{\partial Y(k)} \frac{\partial net_{2l}}{\partial W_{lj}} \frac{\partial U_{2l}(k)}{\partial net_{2l}} \times \frac{\partial net}{\partial U_{2l}(k)} \frac{\partial V(k)}{\partial net} \frac{\partial Y(k)}{\partial V(k)} \quad (6-2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_j(k)} = \frac{\partial E}{\partial Y(k)} \frac{\partial net}{\partial b_j(k)} \frac{\partial V(k)}{\partial net} \times \frac{\partial Y(k)}{\partial V(k)} \quad (6-3)$$

식 (1-1), (2-2) 및 (3-2)에서 활성화 함수  $f(\cdot) = x$ 라 하고 제어 대상을 선형이라고 가정하여 정리하면 다음과 같다.

$$W_{ji}(k+1) = W_{ji}(k) + \alpha_1 e(k) W_{ji}(k) I_i(k) b_j(k) \quad (7-1)$$

$$W_{lj}(k+1) = W_{lj}(k) + \alpha_2 e(k) b_j(k) U_{lj}(k) \quad (7-2)$$

$$b_j(k+1) = b_j(k) + \alpha_3 e(k) U_{2l}(k) \quad (7-3)$$

식(7)에서  $W_{ji}(k+1)$ 은  $W_j(k)$ 의 수정량  $W_{li}(k+1)$ 은  $W_{li}(k)$ 의 수정량, 그리고  $b_j(k+1)$ 은  $b_j(k)$ 의 수정량이고  $\alpha_1, \alpha_2$ , 및  $\alpha_3$ 는 상수이다. 위의 신경망을 이용하여 PID 제어기 및 전치보상기를 갖는 확대 PID제어기를 구현한다.

2. 전치보상기를 갖는 확대 PID제어기

PID 제어기 출력  $U_1(t)$ 는

$$U_1(t) = K_c \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (8)$$

위식에서  $e(t)$ 는 입력,  $T_i$ 는 적분기 적분시간,  $T_d$ 는 미분기 미분시간,  $U_1(t)$ 는 출력,  $K_c$ 는 이득이다.

식 (8)을 디지털로 변화시키면

$$U_1(k) = K_c \left\{ e(k) + \frac{1}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_i} \right\} \quad (9)$$

이고  $T_i$ 는 샘플링 시간이다.

식 (9)에서 속도형 PID 제어기는 다음과 같다.

$$U_1(k) = U_1(k-1) + K_p \{e(k) - e(k-1)\} + K_i e(k) + K_d \{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)\} \quad (10)$$

식 (10)에서  $K_p, K_i, K_d$ 는 비례, 적분, 미분계수로 다음과 같다.

$$K_p = K_c, \quad K_i = \frac{K_c T_i}{T_s}, \quad K_d = \frac{K_c T_d}{T_s} \quad (11)$$

PID 제어기의 출력을 제어 대상의 입력으로 이용할 때 이 PID 제어기의 제어작용에서 발생하는 잡음이나, 편차등을 억제하기 위하여 PID 제어기의 출력단 즉 제어대상 앞에 1차 지연형의 보상기인 전치보상기로 PID 제어기의 출력을 보

상하기위한 확대 PID 제어기의 구성도는 그림 2와 같다.[9]

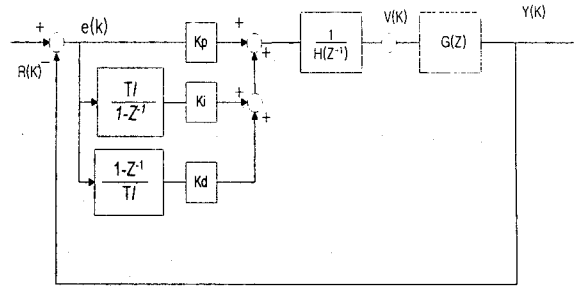


그림 2. 확대 PID 제어기

Fig. 2. Expanded PID control system

그림 2의 구성도에서  $R(k)$ 는 기준입력이고,  $e(k)$ 는 기준입력과 제어계의 응답간의 편차신호이고,  $H(k)$ 와  $V(k)$ 는 전치보상기의 입력과 출력,  $Y(k)$ 는 출력,  $K_i$ 는 적분기의 이득,  $K_d$ 는 미분기의 이득,  $K_p$ 는 비례기의 이득,  $T_i$ 는 샘플링 시간,  $V(k)$ 는 제어대상의 입력 그리고  $G(Z)$ 는 제어대상이다. 전치보상기는 1차 지연요소로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{V(k)}{H(k)} &= \frac{1}{h_0 + h_1 Z^{-1}} \\ &= \frac{\frac{1}{h_0}}{1 + \frac{1}{h_0} h_1 Z^{-1}} \end{aligned} \quad (12)$$

이다. 식(12)을 이용한 전치보상기의 구성도는 그림3과 같다.

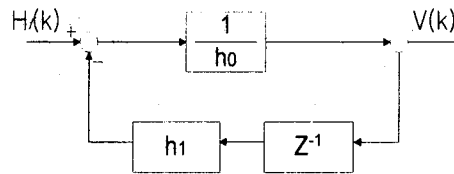


그림 3. 전치보상기의 구성도

Fig 3. Block diagram of precompensator

3. 위치제어계의 구성

그림 2의 구성도에서 그림 1의 신경망을 이용하

여 PID 출력단에 은닉층 1, 적분기의 출력단에 은닉층 2 그리고 전치보상기의 출력단에 출력층을 설정한 확대 PID 제어계의 구성도가 그림 4이다.

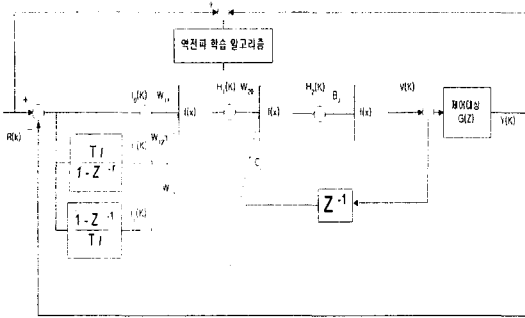


그림 4. 신경망에 의한 확대 PID 제어계의 구성도.  
Fig4. Block diagram of expanded PID control system by neural network.

그림 4에서 활성화 함수  $f(x) = x$  이므로  $V(k)$ 는

$$V(k) = b_j \{ W_{20}(I_0 W_{11} + I_1 W_{12} + I_3 W_{13}) + c_j V(k-1) \} \quad (13)$$

이다.

그림 2와 그림 4에서 계수  $K_p, K_i, K_d$  는  $W_{11}, W_{12}, W_{13}$ 이고 그림 3과 그림 4 전치보상기의 계수  $h_0, h_1$  는

$$h_0 = \frac{1}{b_j}, h_1 = c_j \quad (14)$$

이다.

그림 4의 PID 제어계에서 기준위치와 각 위치간의 오차신호  $e(k)$ , 적분기의 출력  $I_0(k)$  신경망의 은닉층 1의 출력  $H_1(k)$ 와 은닉층 2의 출력  $H_2(k)$ 의 출력  $V(k)$ 는 다음 순서로 계산된다.

$$e(k) = R(k) - Y(k) \quad (15-1)$$

$$I_0(k) = e(k) \quad (15-2)$$

$$I_1(k) = I_1(k-1) + T_i e(k) \quad (15-3)$$

$$I_2(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_i} \quad (15-4)$$

$$H_1(k) = I_0(k)W_{11} + I_1(k)W_{12} + I_2(k)W_{13} \quad (15-5)$$

$$H_2(k) = H_1(k)W_{20} + c_j V(k-1) \quad (15-6)$$

$$V(k) = H_2(k)b_j \quad (15-7)$$

연결강도  $W_{11}, W_{12}, W_{20}, W_{21}, c_j$  및  $b_j$  는 식 (7)에서 다음과 같이 수정된다.

$$W_{11}(k) = W_{11}(k-1) + \alpha_1 e(k)W_{20}(k)b_j(k)I_0(k) \quad (16-1)$$

$$W_{12}(k) = W_{12}(k-1) + \alpha_1 e(k)W_{20}(k)b_j(k)I_1(k) \quad (16-2)$$

$$W_{13}(k) = W_{13}(k-1) + \alpha_1 e(k)W_{20}(k)b_j(k)I_2(k) \quad (16-3)$$

$$W_{20}(k) = W_{20}(k-1) + \alpha_2 e(k)b_j(k)H_1(k) \quad (16-4)$$

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \alpha_3 e(k)H_2(k) \quad (16-5)$$

$$c_j(k) = c_j(k-1) + \alpha_2 e(k)b_j(k)V(k-1) \quad (16-6)$$

식 (16)은 은닉층 1과 2의 연결강도가 역전과 알고리즘에 의해  $e(k) \neq 0$  이면 수정되고  $e(k) = 0$  이면 수정이 완료된다.

### III. 실험결과 및 고찰

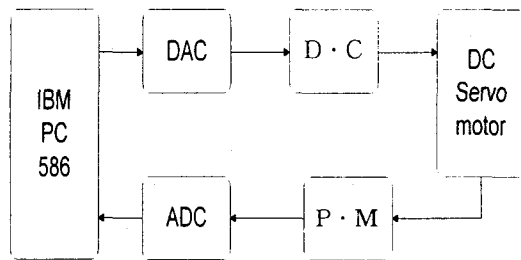


그림 5. 실험 장치의 구성  
Fig 5. Configuration of the Experimental setup

직류서보전동기를 구동원으로 하는 위치제어계에서 위치를 제어하기 위한 실험 구성도가 그림5와 같다. 직류서보전동기의 각위치를 전위차계(P·M: Potentiometer)에서 검출하여 ADC에서 디지털량으로 변환되어 PC에 인가되도록 하였다. 그리고 오차신호, PID제어기의 출력, 신경망 은닉층

1과 2, 그리고 출력층의 출력은 식(15)에서 계산 되도록 하였으며, 사용한 직류 서보 전동기의 제정수는 표1과 같다.

표 1. 직류 서보 전동기의 제정수

Table 1. Parameters of DC servo motor

기 호	설 명	값	단 위
$R_m$	전기자 저항	2.6	$\Omega$
$L_m$	전기자 인덕턴스	0.18	$mH$
$J_m$	전기자 회전관성	$3.87 \times 10^{-7}$	$kg \cdot m^2$
$K_m$	역기전력 상수	0.00767	$N \cdot m / A$
$K_t$	토크 상수	0.00767	$N \cdot m / A$
$K_g$	기어비	14 : 1	

샘플링 시간  $T_s$  는 0.01[msec]로 하였다. 여기서 기준 입력  $R(k)$ 는 진폭  $\pm 30$ [degree], 주기 2[sec]인 펄스를 인가하였으며, 오차  $e(k)$ 가 0이 아니면  $W_{11}(k)$ ,  $W_{12}(k)$ ,  $W_{13}(k)$ ,  $W_{20}(k)$ ,  $c_j(k)$  그리고  $b_j(k)$ 가 식(16)에서  $e(k) = 0$  이 될 때까지 수정되도록 하였다.

먼저 확대PID 제어기로 각위치를 제어하는 경우 그림 5의 실험에서 각 연결강도의 초기치,  $W_{11}(0)=0.65$ ,  $W_{12}(0)=0.014$ ,  $W_{13}(0)=0.0038$ ,  $W_{20}=0.28$ , 식(16)에서  $a_1=0.0001$ ,  $a_2=0.0001$ ,  $a_3=0.0001$ , 그리고 전치보상기 계수  $c_j(0)=0$ 와  $b_j(0)=1$  일 때 즉, 전치 보상기를 사용하지 않을 때 계응답 상태를 그림 6에 보였다.

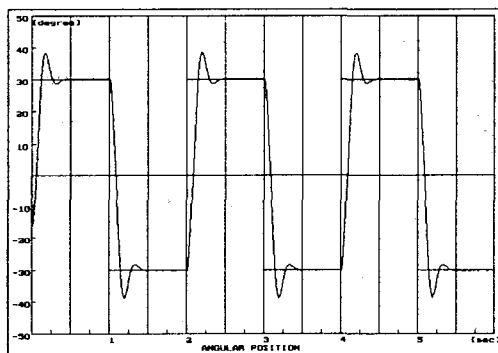


그림 6. PID제어계의 위치 응답. ( $b_j = 1, c_j = 0$ )

Fig 6. Responses of PID control system

그림 6에서 전치 보상기를 사용하지 않고 PID 제어기만을 사용하면 계의 응답이 입력을 추종하지만 과도응답특성 때문에 추종이 늦어지는 것을 알 수 있다. 그러므로 전치보상기를 사용하여 과도

응답상태를 제거하고 추종시간을 단축시켜야 한다.

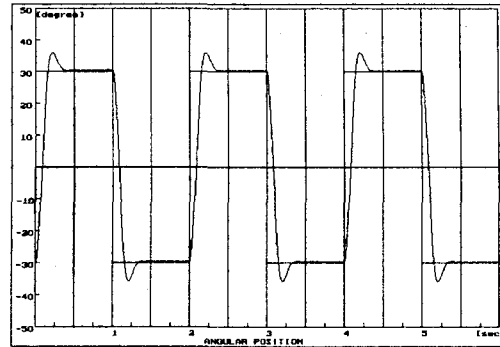


그림 7. 확대 PID제어계의 응답(I)

Fig 7. The response of the expanded PID control system (I)

그림 7은 전치보상기를 사용한 계응답 특성 곡선이다. 전치보상기 계수의 초기치  $b_j(0)=1$  과  $c_j(0)=0.13$ 로 하여 계응답 특성을 고찰하였다.

$c_j(0)$ 을 그림6에 비해서 크게 하였으므로 그림6에 비해서 과도응답상태가 감소하여 계응답이 입력을 추종하는 시간이 단축되었지만 계응답에 약간의 과도응답상태를 보이고 있다.

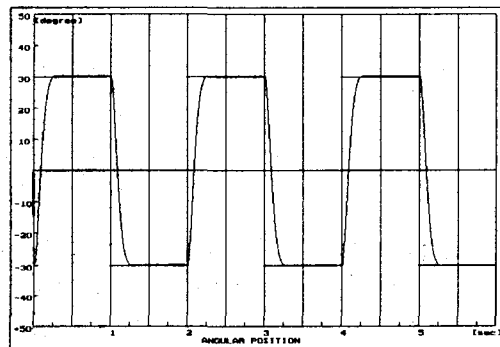


그림 8. 확대 PID제어계의 응답(II)

Fig 8. The response of the expanded PID control system (II)

그림 8은  $b_j=0.67$ 와  $c_j=0.13$ 로 하였을 경우로 하였을 경우의 계응답 특성 곡선이다.

$b_j(0)$ 의 값을 적게하므로써 그림7의 과도응답상태를 제거하며 계응답이 양호하게 입력을 추종하는 것을 알 수 있다.

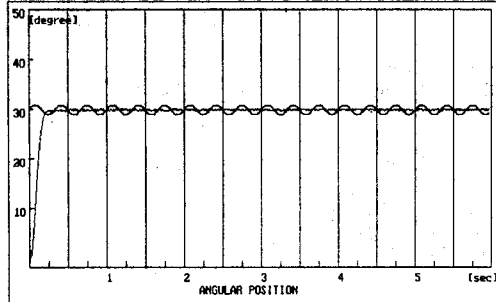


그림 9. 확대 PID제어계에 정현파의 외란이 있는 경우의 응답

Fig. 9. The response of the expanded PID control system with a sinusoidal disturbance

그림9는 30° 입력에  $\sin(6\pi t)$ °의 외란을 부가하여 응답을 살펴 보았다.

비교기준인 제어기의 이득은  $b_j = 0.67$ 와  $c_j = 0.13$ 로 그림8과 같도록 하였다.

제안된 제어기의 경우 외란에 의한 궤적의 일그러짐이 거의 없어 외란에 대한 강인한 특성을 보여주었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서 PID 제어기로 제어되는 제어계에서 제어기의 동작시 발생하는 불필요한 잡음이 발생한다. 이러한 잡음을 제거하기 위해서 전치보상기를 설계할 수 있는 방법을 제시하여 이 PID 제어기와 전치보상기를 2개의 은닉층을 갖는 2층 신경망으로 구성하였다. 이 신경망의 연결강도는 제어기의 각 이득에 대응되게 하였으며 연결강도의 수정식은 제어대상이 선형이라고 가정하여 역전파 알고리즘으로 유도하였다. 제안한 제어기법을 직류 서보 전동기를 구동원으로 하는 위치제어계에 적용하여 전치보상기의 계수들의 초기치를 적정히 선정하므로 계 응답이 입력을 양호하게 추종하는 것을 알 수 있었고 외란에 의한 궤적의 일그러짐이 거의 없어 외란에 대한 강인한 특성을 보여주었다.

이상의 결과에서 일반 제어계에서 전치보상기를 적절히 설계하여 사용하므로써 개선된 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

접수일자 : 2000. 9. 20 수정완료 : 2000. 12. 26

#### 참 고 문 헌

- [1] H. Butler, Ger Homderd, and Job von Amerongen, "Model Reference Adaptive of a Direct-Drive DC Motor", IEEE Control System Magazine Jan. 1989.
- [2] 高泰彦, "直流電動機의 速度應答改善을 위한 制御器의 設計", 東義大學校 産業技術研究所 研究誌, 第 4卷, 1990, 2, pp. 11-117.
- [3] P. B. Schmidt and R. D. Lorentz, "Design Principles and Implementation of DC Drives", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 28, No. 3, 1992, pp. 594-599.
- [4] K. H. Lee and Z. Bien, "Initial condition problem of learning control", IEEE PROCEEDINGS-D, Vol. 138, No. 6, November. 1991.
- [5] K. J. Hunt, D. Sbarbaro, R. Zbikowski, and P. J. Gawthrop, "Neural networks for control systems-a survey", Automatica, Vol. 28, pp. 1083-1112, 1982.
- [6] M. Saerens and A. Soquet, "A neural controller based on back propagation algorithm", Proc. of First IEE Int. Conf. on Artificial Neural Networks, London, pp. 211-215, 1989.
- [7] S. A. Billings, H. B. Jamaludin, and S. Chen, "Properties of neural networks with applications to modeling of nonlinear dynamical systems", Int. Journal of Control, Vol. 55, pp. 193-224, 1992.
- [8] J. Hertz, A. Krogh, and R. G. Palmer, "Introduction to the Theory of Neural Computation", Addison-Wesley, 1991, pp. 89-162.
- [9] 이정민, 허진영, 하홍곤, 고태연 "신경망에 의한 서보 모터의 위치제어", 2000년 한국조명, 전기설비학회 부산경남지회 춘계학술발표회 논문집, 2000년



이정민(Jung Min Lee)  
準會員  
2000년 동의대학교  
전자공학과(공학사)  
2000년-현재 동의대학교  
전자공학과 석사과정

관심분야 : 시스템 지능제어, 로보틱스



하홍곤(Hong Gon Ha)  
正會員  
1972년 동아대학교  
전자공학과졸  
1977년 동아대학교 대학원  
공학석사  
1984년 중앙대학교 대학원  
공학박사

현재 동의대학교 공과대학 전자공학과 교수  
관심분야 : 제어이론, 지능형 및 비선형제어등

---