

로봇 매니퓰레이터를 위한 신경회로망을 이용한 슬라이딩 모드 제어

Sliding Mode Control using Neural Network for a Robot Manipulator

박양수*, 박윤명**, 최부귀***

Yang-Su Park, Yoon-Myung Park, Boo-Kwi Choi

요 약

본 논문에서는 로봇 매니퓰레이터의 고속 동작시 위치 제어의 정확성을 감소 시키는 다중 모드 오차 진동을 제거 할 수 있는 단순한 슬라이딩 모드 제어를 소개한다. 또한 시스템의 파라미터 변화와 외란으로 인해 슬라이딩 평면 조건의 깨짐을 방지하기 위해 신경망 학습 기능이 사용 되어 진다. 그러므로 본 논문에서는 신경망을 이용한 슬라이딩 모드 제어시스템이 설계되고, 제안된 제어 시스템의 성능은 시뮬레이션을 통해 증명된다.

Abstract

The position control accuracy of a robot manipulator is significantly deteriorated when a long arm robot is operated at a high speed. This paper presents a very simple sliding mode control which eliminates multiple mode residual vibration in a robot manipulator. The neural network is used to avoid that sliding mode condition is deviated due to the change of system parameter and disturbance. This paper is suggested control system which designed by sliding mode controller using neural network. The effectiveness of proposed scheme is demonstrated through computer simulation.

Keyword : robot manipulator, sliding mode, neural network, tip position.

I. 서론

현재 산업 현장의 자동화와 생산성 증대 및 해양, 항공, 우주 등 여러 분야에서 강체 로봇은 많이 응용되고 있다. 그러나 강체 로봇 자체의 무게와 크기로 인하여 넓은 공간 차지, 구동 장치가 커짐, 구동 에너지 증가, 동작 속도 증가의 어려움 등 많은 단점을 가지고 있다.^[1] 이를 개선하기 위해 로봇의 무게를 보다 가볍게 함으로써 유연성, 에너지의 효율성, 안정성 등을 증대시키는 유연한 로봇 매니퓰레이터(빔)의 관한 연구가 필요하게 되었다. 하지만 유연한 빔의 유연성으로 인해 동작시 진동을 일으키므로 정밀한 위치 제어나 궤적 제어를 위해서는 진동을 효율적으로 제어해야 한다는 문제점을 가지고 있다.^[2] 이를 보완하기 위해서는 탄성을 고려한 시스템의

모델을 개발하여 보다 정밀한 동역학 방정식과 효율적인 제어 알고리즘이 필요하게 된다.^[3-4]

유연한 빔의 진동 감소는 피드백 제어, 기준 궤적 신호 제어 등 여러 가지 방법으로 얻어 질 수 있다. 대다수 작업이 시스템 상태 즉 센서의 측정이나, 관찰자의 평가, 진동을 줄이기 위한 피드백 제어 법칙으로 사용되어지는 피드백 제어가 행해 졌다.^[5-6] 피드백 제어 기법에 대한 연구는 스트레인 게이지를 이용한 최적제어 및 슬라이딩 모드 제어, 가속도 신호를 이용한 PID 제어 등과 같이 다양하게 시도되고 있다.

본 논문에서는 기존의 슬라이딩 모드 제어의 수식적 부담을 줄이면서 보다 단순한 방법을 소개하고, 큰 외부 외란이나 시스템의 파라미터 변화에 기인한 슬라이딩 평면 조건이 깨짐을 방지하기 위해 신경회로망의 학습 기능을

추가하여 강인한 제어시스템을 설계하고자 한다. 그러므로 슬라이딩 모드 제어를 설계할 때 미리 정해 주어야 하는 외부 외란이나 시스템의 변수 변동의 불확실 정보의 양의 최대치에 대한 초기 가정이 실제 시스템 동작 상황에서 만족되지 않을 때, 신경회로망의 적응 학습 기능에 의해 슬라이딩 모드의 존재 조건을 만족하는 추가적인 제어입력을 적절히 만들어 기대이상의 외부 외란을 적절히 대처 할 수 있도록 함으로서 안정된 동작 수행과 견실한 제어기로서 로봇 매니플레이터 제어시스템을 그림 1과 같이 구성한다.

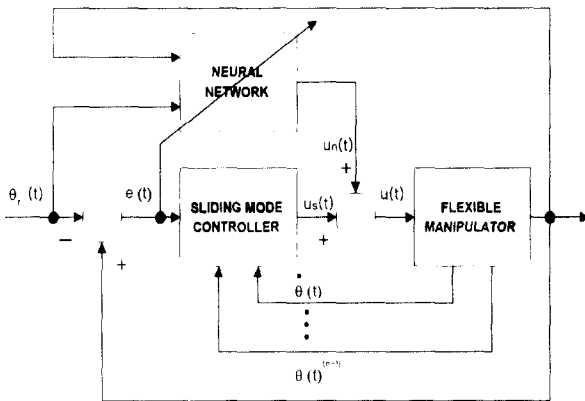


그림 1 제어시스템 구성
Fig. 1 The block diagram of control system

II. 유연한 매니플레이터 (beam : 빔)의 모델

가정모드방법(assumed mode approach)을 이용하여 고정 자유단(clamped free) 구조를 갖는 유연한 로봇 빔을 간단히 모델링하고 제안된 동역학 방정식에서 상태공간

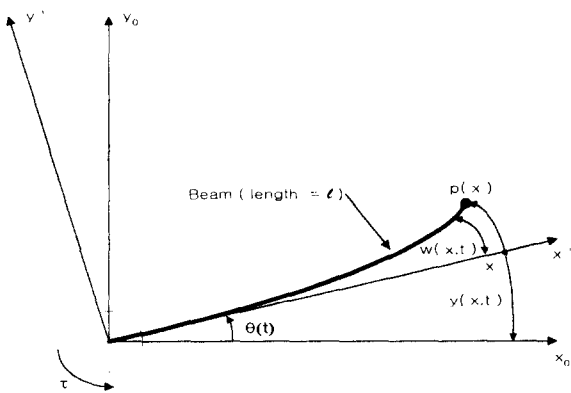


그림 2. 유연한 로봇 빔의 좌표
Fig. 2 The coordinate of a flexible robot beam

방정식을 구해본다. 수학적 모델을 구하기 위하여 유연한 빔의 좌표를 그림 2.에 나타내었다.

유연한 빔의 한쪽 끝은 모터에 고정되어 있고 다른 한쪽 끝은 자유로운 고정 자유단 구조의 상태공간 방정식을 유도한다.

빔은 관성모멘트 I, 길이 l을 가지며, 빔의 각 변형은 theta(t)로써 표시되고 모터가 theta(t)만큼 회전할 경우 유연한 빔은 w(x,t)의 빔의 휨 즉 탄성변형이 발생한다. 임의의 점 x에 대한 탄성변형 w(x,t)는 가정된 모드 방법을 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$w(x,t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) q_i(t) \quad (i = 1,2,\dots,n-1) \quad (1)$$

여기서 phi_i(x)는 빔의 i 번째 가정된 모드 형태로서 고정 자유단의 고유함수이며 다음 식으로 주어진다.

$$\phi_i(x) = (\sin \beta_i x - \sinh \beta_i x) - \frac{\sin \beta_i l + \sinh \beta_i l}{\cos \beta_i l + \cosh \beta_i l} (\cos \beta_i x - \cosh \beta_i x) \quad (2)$$

위 식에서 beta_i 는 다음식에 대한 해이다.

$$1 + \cos \beta_i l \cosh \beta_i l = 0 \quad (3)$$

유연한 빔의 고유 진동수는 다음과 같이 나타낸다.

$$\omega_i = \beta_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (4)$$

여기서 EI 는 유연한 빔의 굽힘 강성이고, rho 는 밀도이다.

상태 공간 방정식을 유도하기 위해 유연한 빔의 전체변위 y(x,t)는 길이가 l 일 경우 다음과 같이 나타낸다.

$$y(l,t) = \theta(t)l + u(l,t) \quad (5)$$

위식을 근거로 유연한 빔의 운동에너지 K와 위치에너지 V를 구하고, Lagrangian 함수 L=K-V와 식(6),(7) Euler-Lagrange 방정식 이용하면 식(8),(9)와 같은 유연한 빔의 최종 출력 미분 방정식이 유도된다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = u \quad (7)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{u + \sum_{i=1}^n q_i \omega_i^2 \int_0^l \phi_i x \, dm}{I_h} \quad (8)$$

$$\ddot{q}_i = -\frac{u}{I_h} \int_0^l \phi_i x \, dm - q_i \omega_i^2 \left[1 + \frac{(\int_0^l \phi_i x \, dm)^2}{I_h} \right] \quad (9)$$

$$a_i = \int_0^l \phi_i x \, dm \quad (10)$$

식(8),(9)에 식(10)을 대입하여 정리하면

$$\ddot{\theta} = \frac{\omega_i^2 a_i}{I_h} q_i + \frac{1}{I_h} u \quad (11)$$

$$\ddot{q}_i = -\omega_i^2 \left[1 + \frac{a_i^2}{I_h} \right] q_i - \frac{a_i}{I_h} u \quad (12)$$

식(11),(12)에서 다음 수식으로 치환하면 상태공간방정식이 구해진다.

$$K_1 = \frac{\omega_i^2 a_i}{I_h}, \quad K_2 = \frac{1}{I_h}, \quad K_3 = \omega_i^2 \left[1 + \frac{a_i^2}{I_h} \right], \quad K_4 = \frac{a_i}{I_h}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & K_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_2 \\ 0 \\ -K_4 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (13)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

III. 신경망을 이용한 슬라이딩 모드 제어기 구성

3.1 슬라이딩 모드 제어기 설계

슬라이딩 모드 제어기의 설계는 슬라이딩 면의 결정과 빠른 시간 내에 안정적으로 선정된 슬라이딩 면에 접근하도록 하는 동역학을 설계하는 두 부분으로 나눌 수 있다. 이 중 슬라이딩 면의 결정은 시스템의 최종 추종 성능을 표현하는 것으로 매우 중요하다. 본 논문에서는 시스템의 미분방정식을 이용하여 간편한 슬라이딩 모드 제어기를 제안한다. 식(11)을 치환하여 변형시키면 식(15)와 같이 된다.

$$\ddot{x} = K_1 q_i + K_2 u \quad (15)$$

그리고 슬라이딩 평면은 다음 식으로부터 구성한다.

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \hat{x} \quad (16)$$

여기서, $\hat{x} = x - x_r = e$ 이고, 추적오차라 한다. 따라서 2차 시스템에 대한 슬라이딩 평면은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$s = \dot{\hat{x}} + \lambda \hat{x} \quad (17)$$

여기서, λ 는 시스템의 슬라이딩 평면상에서의 동작이 안정되도록 $\lambda > 0$ 이 되고, \hat{x} 는 시간이 지남에 따라 원점에 지수함수적이며, 이때 슬라이딩 평면 $s=0$ 에서 시스템의 동특성은 점근적으로 안정화 될 수 있다. 따라서 $s=0$ 가 되도록 제어입력값을 결정하기 위하여 식(18)과 같이 리아프노프 에너지 함수를 고려한다.

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (18)$$

V의 시간 미분값을 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{V} = s\dot{s}$$

여기서 $\dot{s} = -K \text{sgn}(s)$ 라 하면($K > 0$) \dot{V} 는 음의 한정이 되므로 유한한 시간에 시스템의 동특성은 슬라이딩 평면으로 수렴하게 된다. 우변의 \dot{s} 는 제어 입력 u 값을 포함하게 되므로 주어진 플랜트 식(15)에 대해서 식(19)와 같이 제어 입력값 u 를 구할 수가 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= (\ddot{x} - \ddot{x}_r) + \lambda(\dot{x} - \dot{x}_r) = -K \text{sgn}(s) \\ &= K_1 q_i + K_2 u_s - \ddot{x}_r + \lambda(\dot{x} - \dot{x}_r) = -K \text{sgn}(s) \\ u_s &= [\ddot{x}_r - K_1 q_i - \lambda(\dot{x} - \dot{x}_r) - K \text{sgn}(s)] / K_2 \quad (19) \end{aligned}$$

페루프 계통의 특성 방정식을 식(15),(17),(19)에서 다음과 같이 나타낼수 있다

$$F(\lambda) = \lambda^n + a_1 \lambda^{(n-1)} + \dots + a_{(n-1)} \lambda + a_n = 0 \quad (20)$$

식(20)으로 나타낸 다항식 $F(\lambda) = 0$ 가 Routh-Hurwitz Criterion을 만족하게 K를 선정하면 전체 페루프 계통은 안정하다. 따라서 K를 적절한 값으로 선택하면 페루프 계통은 슬라이딩 존재 조건을 만족하면서 안정도를 보장 받을 수 있다.

3.2 신경망의 구조 및 설계

사용된 신경회로망의 내부 구조는 그림 3과 같으며 입력층 3개, 은닉층 7개, 출력층 1개의 뉴런으로 구성되어 있다. 가중치는 오류 역전파 학습 방법이고 은닉층은 전이함수로 tan 시그모이드 활성화 함수를 가지고, 출력층은 Purelin 시그모이드 함수를 사용한다.

신경회로망의 학습횟수는 10회 학습한 값을 사용하고, 가중치의 초기값은 작은 값으로 랜덤하게 소수점 이하 셋째자리부터 결정한다. 결과적으로 플랜트의 입력신호는 식(21)과 같이 슬라이딩 제어 출력값과 신경회로망 제어 출력값의 합이 된다.

$$u = u_s + u_n \tag{21}$$

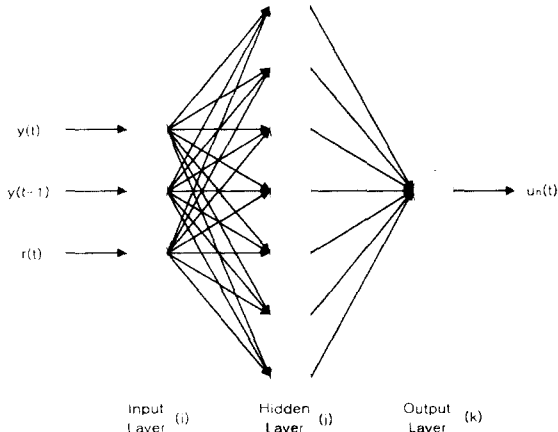


그림 3 신경회로망의 구조
Fig.3 Schematic of neural network

IV. 시뮬레이션 및 결과

제안된 방법의 우수한 제어성능을 입증하기 위하여 표 1로 주어지는 물리적 특성 및 모델변수를 갖는 단일 링크 탄성매니플레이터를 고려하였다.

표 1. 시스템의 매개변수
Table 1. Parameters of plant

구분	사양
매니플레이터의 길이	L=1.2[m]
매니플레이터의 폭	W=0.0254[m]
매니플레이터의 두께	D=0.0032[m]
매니플레이터의 무게	0.26Kg
선형질량 밀도	$\rho = 0.2332[\text{Kg/m}]$
탄성계수	EI=6.175[N.m ²]
허브관성	I _h =0.005[Kg/m ²]
매니플레이터의 재질	Al

또한 시뮬레이션에서 사용되어진 유연한 빔의 모드 수는 2차 모드로 하고, 구동 각도는 0에서 1까지의 라디안 값으로 한다. 그림 4에서 그림 8까지는 나타난 시뮬레이션 결과는 본 논문에서 제안한 신경회로망을 이용한 슬라이딩 모드 제어시스템(nn smc)과 신경회로망을 사용하지 않은 슬라이딩 모드 제어시스템(smc)으로 나누어 출력을 비교 분석하였다.

유연한 로봇 빔을 각도 성분과 진동 성분으로 나누어

설계하고, 그림 1에서 나타낸 제어 시스템을 구성한 것으로 그림 4는 스텝 입력 응답에 출력 특성 결과를 보여주고 있으며, nn smc 시스템이 smc 시스템에 비해 상승시간과 정상상태 오차등 응답 특성이 향상됨을 알 수 있다. 그림 5에서 그림 7까지는 부하변동, 외란 발생등에 대한 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 슬라이딩 모드제어만을 사용하였을 때 보다 신경회로망을 연결하여 시스템의 파라미터 변화 등의 환경 변화에 대해 제안한 제어 시스템의 출력응답 특성이 우수하고 기준신호에 잘 추종함을 알 수 있고, 그림 8에서는 구형파 신호를 입력하였을 경우 시스템의 출력응답 특성이 마찬가지로 안정되게 잘 추종함을 알 수 있다.

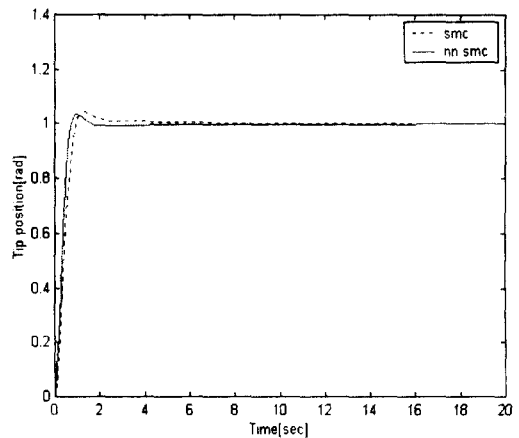


그림 4. 스텝신호 인가시 출력응답 특성
Fig. 4 Comparison of response in case of step

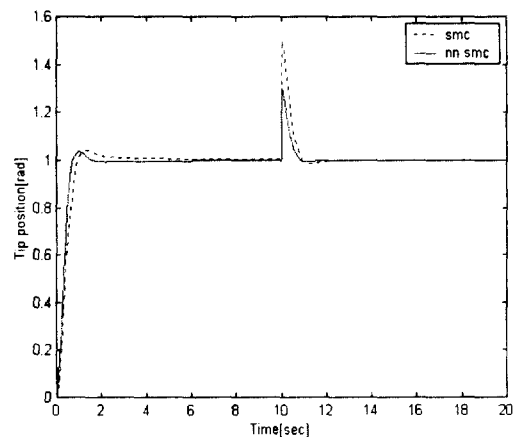


그림 5. 계단함수 부하를 인가시 출력응답 특성
Fig. 5 Comparison of response in case of supply load

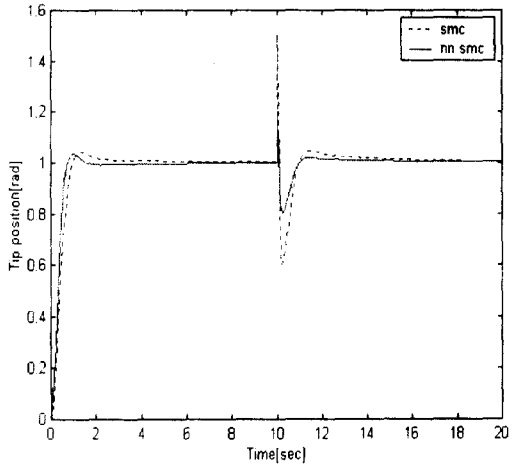


그림 6. 외란을 인가시 출력응답 특성
Fig. 6 Comparison of response in case of supply disturbance

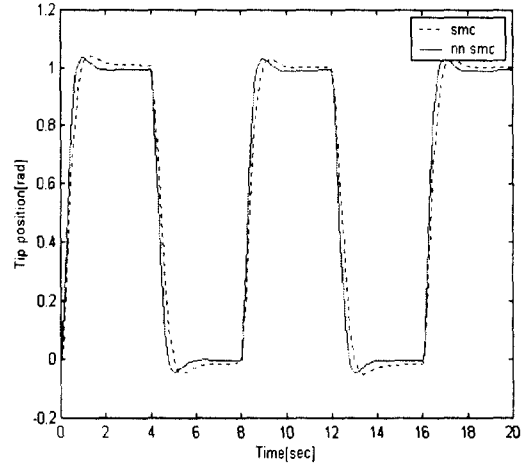


그림 8. 구형과 신호 입력시 출력응답 특성
Fig. 8 Comparison of response in case of pulse wave

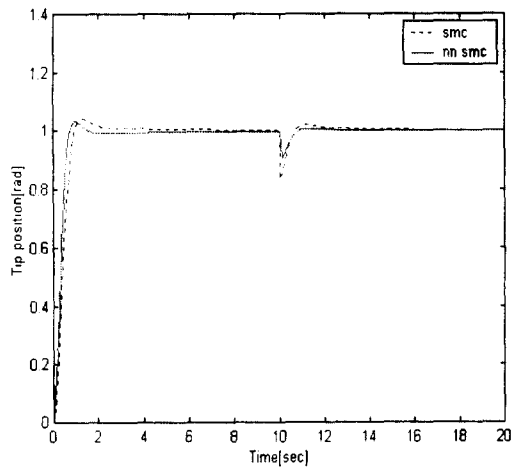


그림 7. 시스템 파라미터 변화시 출력응답 특성
Fig. 7 Comparison of response in case of varying plant parameter

V. 결론

본 논문에서 제안한 제어시스템이 유연한 로봇 빔의 끝단 위치를 우수하게 제어함을 알 수 있다. 제안된 슬라이딩 모드 제어는 시스템의 특성에 따라 설계가 단순하면서도 신경회로망을 통한 그 성능이 우수함을 시뮬레이션을 통해 증명하였다. 또한 제안된 제어 시스템이 부하 변동, 외란, 시스템의 파라미터 변화에 강건함을 보여 주고 있다.

향후에는 슬라이딩 모드의 계수 결정과 신경회로망의 입력층과 출력층 신호의 결정에 관한 연구가 필요하다고 생각된다.

접수일자 : 2000. 11. 28 수정완료 : 2001. 3. 30

참고문헌

- [1] Wang, D. and Vidyasagar, M. 1990 (Cincinnati, May). Passive control of a single flexible link. In proc, IEEE Conf. on Robotics and Automation, IEEE computer Society press, silver Spring, Md., pp. 1432-1437.
- [2] Wang, D. and Vidyasagar, M. 1992. Passive control of a Stiff Flexible Link. The International Journal of Robotic Vol.11.No 6, pp.572-578, December 1992.

- [3] K.S.Yeung and Y.P.Chen, "Sliding-mode controller design of a single-link flexible manipulator under gravity." J. of Control, vol. 52, no. pp. 101-117, 1990.
- [4] V.Feliu, K.S.Rattan and H.B.Brown,Jr 1992 Modeling and control of single link flexible arms with lumped masses. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, vol. 114/59, March 1992.
- [5] Krishnan,H. and Vidyasagar, M. 1988. Bounded input discrete-time control of a single-link flexible beam. Master's thesis, Department of Electrical Engineering, University of Waterloo, Canada.
- [6] 박양수 "슬라이딩모드제어에 의한 AC 서보모터의 위치제어에 관한 연구" 동아대학교 석사학위논문 1988.
- [7] Wang, D. and Vidyasagar, M. 1991. Transfer functions for a single flexible link. The International Journal of Robotics Research Vol.10.No 5, pp. 540-549, October 1991.
- [8] 박양수 "신경회로망을 이용한 유연한 관절의 선단위치 제어기에 관한 연구", 동아대학교, 박사학위논문, 1997
- [9] 신호필 외 2인 "슬라이딩 모드를 가진 2-자유도 제어기를 이용한 유연한 로봇 조작기의 끝점 위치 제어", 제어자동화시스템 공학회 논문지, 6권 6호, pp. 471-477, 2000.



박양수 (Yang-Su Park)

正會員

1987년 부경대학교 전자공학과 공학사

1989년 동아대학교 전자공학과
공학석사

1998년 동아대학교 전자공학과
공학박사

현재 : 경남정보대학 전자정보학부 부교수

관심분야: 신경회로망, 제어알고리즘, 공장자동화



박윤명 (Yoon-Myung Park)

正會員

1992년 동아대학교 전자공학과 공학사

1992년~1997년 LG전자(주) 조리기기
설계실(주임연구원)

1997년 동아대학교 전자공학과
공학석사

2001년 2월 동아대학교 대학원 전자공학과(박사수료)

현재 : 경남정보대학 전자정보학부 겸임교수

관심분야: 지능형제어, 로봇제어 및 마이컴 응용



최부귀 (Boo-Kwi Choi)

正會員

1960년 연세대학교 전기공학과 공학사

1980년 경희대학교 전자공학과
공학석사

현재 : 동아대학교 전기전자컴퓨터
공학부 교수

관심분야: 비선형제어, 적응제어