SVM을 이용한 H_∞ 제어의 강인성 향상에 관한 연구

김민찬* · 윤성식** · 박승규** · 안호균** · 곽군평** · 윤태성**

A Study on Robustness Improvement of H_∞ Control Using SVM

Min-Chan Kim* · Seong-Sik Yoon** · Seung-Kyu Park** · Ho-Gyun Ahn** · Gun-Pyong Kwak** · Tae-Sung Yoon**

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다

요 약

본 논문에서는 SVM(Support Vector Machine)을 이용하여 공칭 시스템의 동특성을 갖는 슬라이딩 평면 설계기법을 제안한다. 전형적인 슬라이딩 모드에서 슬라이딩 평면의 차수는 시스템의 차수보다 낮은 차수를 갖기 때문에 슬라이딩 평면은 H_∞ 제어기의 동특성을 가질 수 없다. 그러므로 이 문제를 해결하기 위해서는 추가적인 상태들이 정의되어야 한다. 본 논문에서는 추가적인 상태를 정의하지 않고 SVM을 이용하여 공칭 시스템의 동특성을 가질 수 있는 슬라이딩 평면의 설계기법을 제안한다. 이 설계기법은 먼저 H_∞ 제어기에 의해서 제어되는 공칭시스템의 상태들 간에 SVM을 이용하여 그 관계를 정립하며. 이를 바탕으로 새로운 슬라이딩 평면을 설계하며 이 평면은 H_∞ 제어 시스템 특성을 가진다. 그 결과 파라미터 불확실성이 존재하더라도 제안된 제어기는 H_∞ 제어기에 의해서 제어되는 공칭 시스템의 동특성을 가질 수 있다.

ABSTRACT

This paper proposes a new sliding surface which can have the same dynamics of nominal system based on SVM(Support Vector Machines). The conventional sliding mode control can not have the properties of H_∞ controller because its sliding surface has lower order dynamics than the original system. The additional states must be used to solve this problem. However, The sliding surface of this paper can have the dynamics of H_∞ control system by using support vector machines without defining any additional dynamic state. By using SVM, the property of H_∞ control system can be estimated as a relationship between the states. With this relationship, a new sliding surface can be designed and have H_∞ control system properties. As a result, in spite of the parameter uncertainty, the proposed controller can have the same dynamic of nominal system controlled by H_∞ controller.

키워드

Sliding Mode Control, Support Vector Machine, H_∞ Control, Robust Control

I. 서 론

슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control)는 파라미터 불확실성에 대하여 강인한 제어 기법으로 알려져 있다[1]-[3]. 슬라이딩 모드 제어에서는 시스템의 동특성이 슬라이딩 평면에 의해서 결정된다. 하지만 전형적인 슬

* 창원대학교 메카트로닉스 공학부
** 창원대학교 전기공학과

접수일자 : 2007. 9. 14

라이딩 평면의 차수가 시스템의 차수보다 입력차수 만큼 감소되기 때문에 공칭 시스템의 동특성을 가질 수 없다. 이를 해결하기 위해서 추가적인 상태를 정의한 연구가 진행되었다.[4][5] 하지만 이 결과들은 제어기의 차수를 증가시키기 때문에 개선이 필요하다.

SVM은 구조적 위험 최대화를 근간으로 하는 통계적 학습 이론에 기반 하여 뛰어난 함수 추정을 가능하게 하는 장점이 있다.[6][7]

본 논문에서는 SVM을 이용하여 슬라이딩 평면을 설계하는 기법을 제안한다. 이 제어기법은 먼저 상태들 간의 관계를 함수로 표현하며 SVM을 이용하여 이들 관계를 추정한다. 이 사실을 바탕으로 설계된 슬라이딩 평면은 추가적인 상태를 정의할 필요가 없고 제어기의 차수도 증가하지 않으며 그 동특성도 공칭 시스템의 동특성을 가질 수 있다. 본 논문에서 사용한 공칭 제어기는 H_∞ 제어기이다. 그 결과 파라미터 불확실성과 외란이 존재하더라도 H_∞ 제어기의 강인성을 향상시킬 수 있는 제어기 설계가 가능해진다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전형적인 슬라이딩 모드 제어에 대한 개념을 기술한다. 3장에서는 공칭시스템의 제어기인 LMI를 이용한 H_∞ 제어기의 설계방법을 설명한다. 4장에서는 SVM의 개략적인 개념과 본 논문에서 제안된 슬라이딩 설계기법을 기술한다. 5장에서는 제안된 제어기법의 효율성과 성능의 우수성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다. 마지막으로 5장에서는 결론에 대해서 기술한다.

Ⅱ. 슬라이딩 모드 제어

다음과 같이 파라미터 불확실성과 외란을 갖는 n차 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t)+Bu(t)+Ch(t) \\ y(t) &= C_y x(t)+D_{yw}w(t) \\ z(t) &= C_z x(t)+D_{zu}u(t)+D_{zw}w(t) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $x\in R^n$는 시스템의 상태, $u\in R^m$는 제어 입력, $h\in R^r$는 알려지지 않은 외란이며 $|h(t)|<h_{\max}$와 $rank[B\ \ C]=rank\ B$의 정합조건을 만족한다.

식(1)으로부터 공칭시스템의 가제어 표준형은 다음과 같다.

$$\dot{x}_0(t)=A_0x_0(t)+B_0u_0(t) \tag{2}$$

여기서 $A_0=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & \cdots & -a_n \end{bmatrix}$, $B_0=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$ 이고, $u_0(t)$는 공칭제어 입력이다.

전형적인 슬라이딩 평면은 다음과 같이 정의된다.

$$S=c_nx_n+c_{n-1}x_{n-1}+\cdots+c_2x_2+c_1x_1=0 \tag{3}$$

여기서 $c_1, c_2, c_{n-1}, \cdots, c_n$,은 슬라이딩 모드의 동특성이 안정하도록 주어진다.

상태가 슬라이딩 평면에 머무르게 하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$S(x)\,\dot{S}(x)<0 \tag{4}$$

위의 조건으로부터 다음과 같은 불연속 입력이 슬라이딩 평면상에서 그 구조를 바꾼다.

$$u(x,t)=\begin{cases} u^+(x,t) & \text{for } S(x)>0 \\ u^-(x,t) & \text{for } S(x)<0 \end{cases} \tag{5}$$

식(3)과 같은 슬라이딩 평면은 n-m 차의 동특성을 가지므로 공칭 시스템과는 다른 동특성을 가진다. 또한 상태들의 초기값이 슬라이딩 평면에 있지 않기 때문에 도달거리(reaching phase)가 존재한다. 이 도달 거리 구간에서는 시스템이 강인성을 보장받지 못하기 때문에 제거되어야 한다. 그러므로 본 논문에서는 SVM을 이용하여 공칭시스템의 동특성을 가질 수 있고 도달 거리도 제거할 수 있는 슬라이딩 평면 설계 기법을 제안한다.

Ⅲ. 공칭 시스템의 H_∞ 제어기 구성

이 절에서는 파라미터 불확실성이 존재하지 않을 때 제어 성능을 나타낼 수 있는 공칭 제어기를 설계한다. 본

논문에서는 다음과 같은 H_∞ 놈(norm)을 최소화 시키는 H_∞제어기를 도입한다.

$$\| T_{zw}\| = sup_{\|w\|_2 \neq 0} \frac{\|z\|_2}{\|w\|_2} = sup\sigma_{\max}[T_{zw}(jw)] \tag{6}$$

여기서, $T_{zw}(s) = C_{cl}(sI - A_{cl})^{-1}B_{cl} + D_{cl}$이다.

식(6)은 다음과 같은 식을 만족한다.

$$\begin{aligned} u &= K_{11}y + K_{12}v \\ \dot{v} &= K_{21}y + K_{22}v \end{aligned} \tag{7}$$

제어기가 포함된 시스템의 동특성은 다음식과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{cl} &= A_{cl}x_{cl} + B_{cl}w \\ z &= C_{cl}x_{cl} + D_{cl}w \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, $x_{cl} = [x^T, v^T]^T \in R^{n+k}$

$$C_{cl} = C_r + D_r K C_0,\ D_{cl} = D_{zw} + D_r K D_0,$$

$$D_0 = \begin{bmatrix} D_{yw} \\ 0 \end{bmatrix},\ B_r = \begin{bmatrix} B_w \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{cl} = A_0 + B_0 K C_0,\ B_{cl} = B_0 K D_0 + B_r,$$

$$C_r = [C_z\ 0], D_r = [D_{zu}\ 0]$$

설계된 제어기는 LMI 조건식으로부터 구할 수 있으며 이를 K, X에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_0X + * & * & * \\ S_r^T & -\gamma I & * \\ C_rX & D_{zw} & -\gamma I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_0 \\ 0 \\ D_r \end{bmatrix} K [C_0X,\ D_0,\ 0] + * < 0 \tag{9}$$

여기서 $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$를 보장할 필요충분조건은 LMI와 $rank(I - XY) = 0$ 를 만족하는 해가 존재하는 것이다. 또한 * 는 대칭에 의해 결정할 수 있는 다음과 같은 행렬 블록이다.

$$\begin{aligned} &\Phi_\infty^T \begin{bmatrix} A_0X + * & * & * \\ B_r^T & -\gamma I & * \\ C_rX & D_{zw} & -\gamma I \end{bmatrix} \Phi_\infty < 0, \\ &\Theta_\infty^T \begin{bmatrix} YA_0 + * & * & * \\ B_r^TY & -\gamma I & * \\ C_rX & D_{zw} & -\gamma I \end{bmatrix} \Theta_\infty < 0, \\ &\begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} \geq 0 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 Φ_∞, Θ_∞는 $[B_0^T\ 0\ D_r^T]^T$, $[C_0\ D_0\ 0]^T$의 orthogonal complement (주어진 $A \in R^{n \times m}$ 에 대하여 column을 A^T의 null space의 basis의 vector로 갖는 행렬)를 의미한다.

Ⅳ. SVM을 이용한 슬라이딩 평면 설계

SVM은 적은 샘플들을 가진 패턴인식 문제나 함수추정과 같은 학습문제들을 해결하는 통계적 학습 이론들 중의 하나이다. SVM의 특징은 명확한 이론적인 근거에 의하여 간단하고 명료한 알고리즘을 통하여 학습을 성공적으로 수행하는 데 영향을 미치는 요소들을 규명할 수 있다. 또한 실제적인 응용분야에서도 높은 인식 성능을 나타낸다.

SVM의 목적은 학습 자료로 주어진 n차원의 벡터공간에서 분류 공간 간에 모든 점들 사이의 거리를 최대화하도록 만들어 하나의 평면을 구해내는 것이다. 이 평면에 가장 가까운 점들을 Support Vector라고 부른다. SVM에서 분류 함수(classification function)는 다음과 같이 근사화 된다.

$$y(x) = w^T f(x) + b \tag{11}$$

여기서 $x \in R^n$는 입력들이며 w와 b는 계수들이다.

이 계수들은 각각 다른 그룹들에 속하는 점들(support vector) 사이에 가장 가까운 거리로 정의되는 마진폭을 최대화함으로써 추정된다.

마진폭은 다음과 같이 고려된다.

$$M = \frac{2}{|w|} \tag{12}$$

위의 식을 최대화하는 문제는 다음 식을 최소화 하는 문제와 같다.

$$\frac{1}{2} w^T w \tag{13}$$

이 문제는 다음과 같은 이중의 문제로 고려할 수 있으며 Lagrange multiplier α 는 모든 제약에 연관되어 있다. 문제는 다음 식에서 $\alpha_1, \cdots, \alpha_N$을 찾아내는 것이다.

$$\begin{cases} \max imize\ Q(\alpha) = \sum \alpha_i - \frac{1}{2} \sum\sum \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i^T x_j \\ \sum \alpha_i y_i = 0 \end{cases} \tag{14}$$

여기서 $\alpha_i \geq 0$이다. 해는 다음과 같은 형태를 가진다.

$$w=\sum \alpha_i y_i x_i^T, \quad b=y_k-wx_k \tag{15}$$

여기서 $x_k\alpha_k\neq 0$이다.

또한 α_i가 0이 아닐 때는 x_i가 support vector이다. 그러므로 분류함수는 다음과 같은 식을 만족한다.

$$f(x)=\alpha_i y_i x_i^T x+b=0 \tag{16}$$

만약 $\phi(x)=x_i^T x$라고 하면 $f(x)$는 다음식과 같이 표현된다.

$$f(x)=\alpha_i y_i \phi(t)+b=0 \tag{17}$$

위 식의 조건을 만족하는 경우는 선형 SVM을 의미한다. 그리고 $\phi(x)$는 다음과 같은 커널 함수(kernel function)로 대체할 수 있다. 커널 함수는 입력벡터를 고차원의 특징벡터로 변환한 후 내적을 구하는 과정을 대치한 함수로, Polynomial Machine, Radial Basis Function Machine, Two-layer Network Machine등과 같은 함수들이 주로 사용된다.

$$f(x)=\alpha_i y_i K(x)+b=0 \tag{18}$$

식(18)을 비선형 SVM이라고 한다. 여기서 $K(x)$ $(R^n \rightarrow R^k, k>n)$는 입력공간이 높은 차수의 feature 공간으로 매핑된다. 이런 종류들의 커널 함수의 장점은 고차원에서 많은 분류 문제가 쉽게 해결될 수 있다.

결과적으로 다음과 같은 식을 사용하여 학습을 시킨다.

$$f(x)=\sum \beta_i K(x_{sv}, x)+b=0 \tag{19}$$

여기서 β_i는 support vector에 대응되는 상수이며 x_{sv}는 support vector를, 그리고 K는 커널 함수를 나타낸다.

SVM을 통해 얻어진 입출력 관계를 가지고 제안된 슬라이딩 평면을 설계한다. 먼저 미리 설계된 공칭 제어기인 H_∞ 제어기를 가지고 시스템의 상태들 사이의 관계를 알아낸다. 이렇게 얻어진 데이터를 가지고 SVM을 통해 훈련을 시키면 support vector와 파라미터들, 바이어스 값이 얻어진다.

위의 사실들을 바탕으로 본 논문에서 제안된 슬라이딩 평면은 다음과 같다.

$$S(x)=x_1-\hat{x}_1=x_1-\sum \beta_i K(x_{sv}, x_v)-b=0 \tag{20}$$

여기서 $x_v=[x_2 \cdots x_{n-1}\ x_n]^T$ 이며 support vector와 β_i는 훈련과정에서 구해지며 Polynomial 커널 함수가 사용되었다.

$$K(x_v)=(x_{sv}^T x_v+1)^p \tag{21}$$

식 (4)의 조건을 만족하기 위하여 식(10)을 미분하면,

$$\begin{aligned} S&=\dot{x}_1-\sum \beta_i K(x_v) \\ &=Q(x_v)\dot{x}=Q(x_v)(Ax(t)+Bu(t)+Bh(t)) \end{aligned} \tag{22}$$

여기서 $Q(x_v)=[1\ 0\ \cdots\ 0]-\sum \beta_i p(x_{sv}^T x_v+1)^{p-1} x_{sv}\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$ 이다.

그러므로 슬라이딩 모드제어 입력은 다음과 같이 결정된다.

$$u(t)=-\frac{Q(x)Ax(t)}{Q(x)B}-h_{\max} sign(Q(x_v), S)) \tag{23}$$

V. 수치예제와 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제안된 제어기 성능의 우수성을 검증하기 위하여 다음과 같은 3차 계통을 고려한다[8].

$$A=\begin{bmatrix} -0.990 & 17.410 & 96.150 \\ 0.265 & -0.851 & -11.390 \\ 0 & 0 & -30.000 \end{bmatrix},$$

$$B_u=\begin{bmatrix} -97.780 \\ 0 \\ 30.000 \end{bmatrix}, \quad B_w=\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\Delta A=\begin{bmatrix} -1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 2 \end{bmatrix}, \quad C_y=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{yw}=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C_z=[1\ 1\ 0],$$

$$D_{zu}=0, D_{zw}=0 \tag{24}$$

$\gamma=0$일 때 출력 궤환 H_∞ 제어기는 다음과 같다.

$$u_H=[0.1249 \quad 0.3236] \tag{25}$$

H_∞ 제어기의 초기값 $x_1(0)=1$, $x_2(0)=2$, $x_3(0)=3$ 일때, SVM을 이용하여 x_1을 추정한다.

제안된 슬라이딩 평면은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S&=x_1-\hat{x}_1 \\ &=x_1+1.2242x_2^3+1.2057x_2^2+1.8189x_2-1.4756x_2^2x_3 \\ &\quad -2.8286x_2x_3+4.3273x_2x_3^2-6.7833x_3+2.1549x_3^2 \\ &\quad -2.2794x_3^3+0.0080 \end{aligned} \tag{26}$$

식(4)의 조건을 보장하는 슬라이딩 모드 제어 입력은 다음과 같다.

$$u(t) = 1/97.780\ (-0.990x_1 + 2.1971x_2^2 + 16.9928*x_2 + 5.7034x_2x_3 + 97.6312x_3 - 2.5109*x_3^2 - 4.9645 - h_{\max}\, sign(S)) \quad (27)$$

여기서 $h_{\max} = 1, h = 0.5$ 이다.

다음 그림들은 컴퓨터 시뮬레이션의 결과들이다. 그림 1은 H_∞ 제어기에 의해서 제어된 공칭시스템의 상태궤적을 보여준다. 파라미터 불확실성을 가진 H_∞ 제어기에 의해서 제어된 시스템의 상태궤적이 그림 2에 주어져 있다. 이 경우 그림 1의 상태궤적이 다름을 알 수 있고 H_∞ 제어기가 파라미터 불확실성 존재 시 그 성능이 저하됨을 알 수 있다. 그림 3은 파라미터 불확실성이 존재할 때 제안된 슬라이딩 모드 제어로 제어된 시스템의 상태궤적이다. 그림에서 보듯이 공칭 시스템의 동특성과 거의 같음을 알 수 있다. 그림 4와 그림 5는 제안된 슬라이딩 평면과 슬라이딩 모드 제어 입력을 나타낸다. 그림 5에서 보면 거의 도달거리가 제거됨을 알 수 있다.

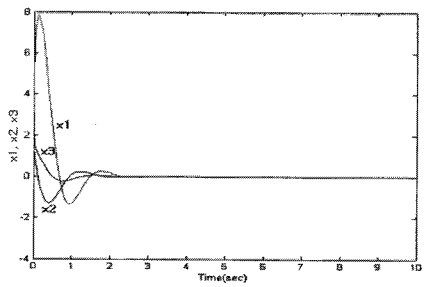

그림 1. 불확실성이 존재하지 않는 경우의 H_∞ 제어계통의 상태응답
Fig. 1. States of H∞ control system without parameter uncertainties

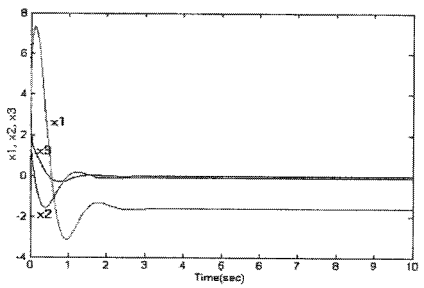

그림 2. 불확실성이 존재하는 경우의 H_∞ 제어계통의 상태응답
Fig. 2. States of H∞ control system with parameter uncertainties

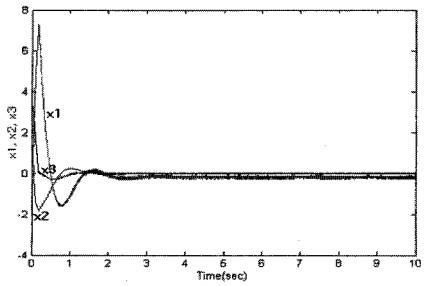

그림 3. 불확실성이 존재하는 경우의 제안된 SMC의 상태응답
Fig. 3. States of the proposed SMC with parameter uncertainties

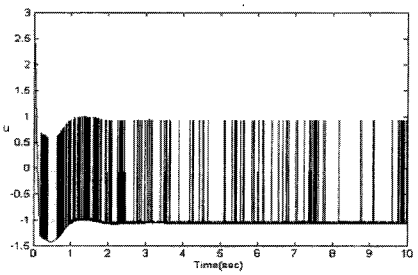

그림 4. 제안된 SMC의 제어 입력
Fig. 4. Control input of the proposed SMC

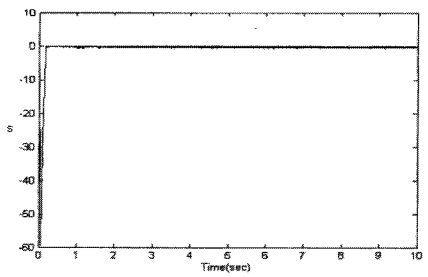

그림 5. 제안된 SMC의 슬라이딩 평면
Fig. 5. Sliding surface of the proposed SMC

VI. 결 론

본 논문에서는 추가적인 상태의 정의 없이 SVM을 이용하여 H_∞ 제어기에 의해 제어되는 공칭 시스템의 동특성을 가질 수 있는 슬라이딩 평면 설계기법을 제안하였다. 그 결과 파라미터 불확실성이 존재하더라도 제안된 제어기가 강인성을 가질 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 알 수 있었다.

참고문헌

[1] J. Y. Hung, W. Gao, and J. C. Hung, "Variable structure control : A survey", IEEE Trans on Industrial Electronics, Vol.40, No.1, pp. 2-22, 1993.

[2] V. I.Utkin, "sliding mode control design principles and applications to electric drives", IEEE transactions on industrial electronics : a publication of the IEEE Industrial Electronics Society, vol.40, No.1, pp.22-36, 1993

[3] U. Sawut, T. Hanamoto, and T. Tsuji, "Application of Eventual Sliding-Mode Technique in Flexible Arm", Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.36, No.8, pp.723-725, 2000.

[4] Utkin V., Shi J. "Integral sliding mode in systems operation under uncertainty conditions" Proceedings of the 35th CDC, pp.4591-4596, Dec 1996.

[5] S. K. Park and H. K. Ahn, "Robust controller design with novel sliding surface", IEE Proc.-Control Theory and Application. Vol.146. No.3, May 1999.

[6] Mingyue Tan, Support Vector Machine & Its Applications, The University of British Columbia, Nov 26, 2004.

[7] J. X. Dong, C.Y. Suen and A. Krzvzak, "A fast SVM training algorithm", International Journal of Pattern recognition and Artificial Intelligence, Vol. 17, No.3, pp.367-384, 2003.

[8] 김수진, 김민찬, 박승규, 안호균, 곽군평, 윤태성, "슬라이딩모드와 LMI를 이용한 H∞제어", 한국해양 정보통신학회 논문지, 제11권, 제2호, pp.316- 321, 2007.

저자소개

김 민 찬 (Min-Chan Kim)

1996년 창원대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1998년 창원대학교 전기전자제어공학과 졸업(공학석사)
2003년 창원대학교 전기공학과 졸업(공학박사)
2006년~현재 창원대학교 BK21 메카트로닉스・로봇 사업단 연구교수
※관심분야 : H∞ 제어, 슬라이딩모드제어, 적응제어

윤 성 식 (Seong-Sik Yoon)

2006년 창원대학교 전기공학과 졸업 (공학사)
2006년~현재 창원대학교 전기공학과 석사과정
※관심분야 : BLDC 센서리스 제어, 모터드라이버 설계, 전력변환장치 설계

박 승 규 (Seung-Kyu Park)

1984년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1986년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학석사)
1990년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학박사)
1995년~1996년 영국 Strathclyde대 visiting scholar
1990년~현재 창원대학교 전기공학과 교수
※관심분야 : 적응제어, 강인제어, 비선형제어

안 호 균 (Ho-Gyun Ahn)

1981년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1989년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학석사)
1992년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학박사)
1992년~현재 창원대학교 전기공학과 교수
※관심분야 : 전력전자, 전력변환, 대체에너지

곽 군 평 (Gun-Pyong Kwak)

1982년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1985년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학석사)
1990년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학박사)
1990년~1997년 LG산전 연구소 CNC팀 팀장
1998년~현재 창원대학교 전기공학과 부교수
※관심분야 : 제어 알고리즘, Motion Controller

윤 태 성 (Tae-Sung Yoon)

1978년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1980년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학석사)
1988년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사)
1994년~1995년 미 Vanderbilt대 방문교수
1989년~현재 창원대학교 전기공학과 교수
※관심분야 : 지능제어, 이동로봇제어