

논문 2007-441E-2-9

구동기의 미지고장추정을 위한 PI관측기 설계

(Design of PI Observers for Unknown Actuator Faults Estimation)

안 비 오*, 김 종 부**, 이 명 규***

(Pius Ahn, J. B. Kim, and M. K. Lee)

요 약

본 논문에서는 센서잡음이 있는 선형계의 구동기에 도입되는 미지고장을 추정하는 방법에 대해 연구하였다. 구동기의 미지 고장추정을 위하여 새로운 PI관측기를 도입함으로써 기존의 추정 방법에 비해 추정 성능을 개선시킬 수 있었으며, 시뮬레이션 결과로부터 본 연구방법의 유용성을 입증할 수 있었다.

Abstract

This paper deals with the estimation of unknown actuator faults for linear dynamic systems with sensor noise. The presented method based on the PI(proportional-integral) observer permits to achieve good convergence and exact estimation of unknown faults. The validity of proposed method is established with simulation results and comparisons to the existing methods.

Keywords : unknown actuator faults, linear dynamic systems, PI observer

I. 서 론

플랜트의 제어를 위한 제어기가 정확하게 설계되었더라도, 플랜트의 안전한 운전을 위해서는, 시스템의 예기치 않은 고장 등을 대비하여 시스템 구동기의 미지 고장에 대한 정확한 추정 및 조정이 필요하다. 구동기의 미지 고장에 대한 정확한 추정으로 제어 시스템의 신뢰성과 유연성을 크게 개선시킬 수 있다. 이러한 고장에 의해 시스템에 도입되는 미지입력추정을 위해 최근 여러 각도에서 활발히 연구되어 왔다^[1-8].

시스템의 고장에 의해 도입되는 미지입력은 PI (Proportional Integral)관측기에 의해 추정할 수 있다.

PI 관측기는 선형 시불변계의 미지 상태변수들을 추정하기 위하여 개발된 비례관측기 즉 Luenberger관측기로부터 유도된다. PI관측기는, 비례관측기에 출력 추정 오차의 적분에 비례하는 항을 추가한 관측기로, 시스템 제어 시 요구되는 강인성을 높이기 위해 개발되었다^[9-14]. PI 관측기 설계는, 일반적으로 비례이득은 추정오차방정식의 안정화시키는데 사용하고, 적분이득은 외란을 약화시키기 위해 사용한다. 그러나 이러한 접근은, 비례관측기의 경우와 같이 비례이득에 비례하여 측정잡음이 증폭되는 문제가 발생하기 때문에, 측정잡음이 있는 시스템의 고장추정을 다루는 데는 적합하지 않다. 구동기의 고장 등의 원인에 의해 시스템에 유입되는 미지입력을 추정하기 위해, 유도된 미지입력 추정방정식에는 추정된 상태벡터의 미분 항을 포함하게 된다. 이러한 미분 항은 작은 잡음이나 추정오차에도 민감하게 반응하여 유입되는 미지입력의 추정을 어렵게 한다.

시스템의 미지 입력을 추정하기 위해서는, 특히 잡음이 도입되는 경우에는, 시스템의 상태벡터의 정밀한 추정이 중요하다. 본 논문에서는 구동기의 고장에 의해

* 정회원, 네오피델리티(주), 기업부설연구소 CTO (CTO, Technical Research Center, NeoFidelity Inc.)

** 정회원, 인덕대학 메카트로닉스학과 (Department of Mechatronics, In-Duk College)

*** 정회원, 경성대학교 전기전자공학과 (Department of Electrical & Electronic Engineering, Kyungsung University)

접수일자: 2006년9월25일, 수정완료일: 2007년6월8일

시스템에 유입되는 미지입력을 추정하기 위하여, 기존의 비례관측기나 PI 관측기와는 다른, 새로운 적분관측기를 도입함으로써 측정 잡음이 있는 시스템의 미지 고장신호에 대한 정확한 추정이 이루어질 수 있음을 보인다. 본 논문의 PI 관측기는 모델링오차 및 측정 잡음이 존재하는 경우에도 상태추정의 정확성을 높이면서 측정 잡음의 영향을 최소화하여 기존의 방법보다 더욱 정확하게 구동기의 미지 고장을 추정할 수 있게 해준다.

II. 구동기의 미지고장 추정

시스템의 구동기에 미지고장이 발생한 경우 그림1과 같이 나타낼 수 있는데, $f(t)$ 는 구동기 측에 유입되는 미지입력이다. 이러한 미지 입력이 존재하면, 플랜트가 오동작하게 되고, 원하는 출력을 얻을 수 없게 된다. 구동기의 고장은 불감대에 의한 고장과 포화에 의한 고장으로 대별된다. 불감대에 의한 고장은 구동기의 비선형성으로 표현되기도 한다. 포화에 의한 고장은 구동기들의 동작범위가 한정되어있기 때문에 발생된다^[12].

시스템에 구동기의 고장이 발생한 경우 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = A_0x(t) + B_0w(t) \quad (2.1)$$

$$w(t) = u(t) + f(t) \quad (2.2)$$

$w(t)$ 는 플랜트에 인가되는 구동기의 출력이며, $f(t)$ 는 고장을 나타내는 신호이다. 고장이 발생하지 않을 때는 $w(t) = u(t)$ 이다. 불감대에 의한 고장은 구동기의 마찰 등의 원인에 의해 구동기의 출력이 제한 받게 될 때 발생하는 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$w(t) = \begin{cases} u(t) - u_d, & \text{if } u(t) \geq u_d \\ 0, & \text{if } -u_d \leq u(t) \leq u_d \\ u(t) + u_d, & \text{if } u(t) \leq -u_d \end{cases} \quad (2.3)$$

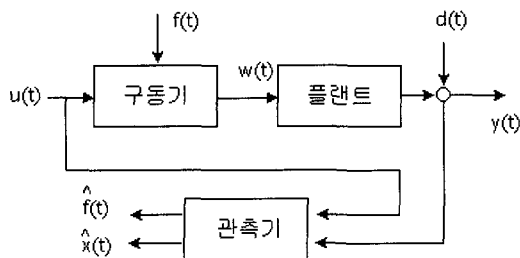


그림 1. 구동기의 미지 고장추정 시스템
Fig. 1. Schematic diagram for estimation of unknown actuator fault.

포화에 의한 고장은 제어입력의 일부분이 구동기의 동작범위를 벗어나는데서 기인하는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w(t) = \begin{cases} u_s, & \text{if } u(t) \geq u_s \\ u(t), & \text{if } -u_s \leq u(t) \leq u_s \\ -u_s, & \text{if } u(t) \leq -u_s \end{cases} \quad (2.4)$$

이와 같이 구동기의 고장이 포함된 시스템을 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) + Ff(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + d(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

위 식에서 F는 구동기의 고장 방향행렬이며, 구동기의 미지 고장신호는 다음과 같이 알 수 있다.

$$f(t) = [F^T F]^{-1} F^T [\dot{x}(t) - A_0x(t) - B_0u(t)] \quad (2.6)$$

그러나 시스템 내부의 상태변수는 직접 측정에 의해 알 수 없는 경우가 대부분이어서 정확한 상태의 관측을 필요로 한다. 실제로 직접 측정할 수 있다하더라도 측정 잡음에 의해 큰 영향을 받기 때문에 어떤 고장이 발생되었는지 알기 힘들다. 따라서 상태 추정에 의한 구동기의 고장추정을 위한 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{f}(t) = [F^T F]^{-1} F^T [\dot{\hat{x}}(t) - A_0\hat{x}(t) - B_0u(t)] \quad (2.7)$$

식(2.7)에서 보듯이 고장추정방정식에는 미분 항을 포함하고 있다. 이 미분 항은 추정된 상태 변수 값의 작은 오차에도 아주 민감하게 반응하기 때문에 구동기의 고장추정을 어렵게 한다. 따라서 고장추정의 정밀도를 높이기 위해서는 정확한 상태변수의 추정이 요구되며, 또한 추정된 상태변수는 출력 측에 포함되는 측정오차에 둔감해야한다.

III. 고장추정을 위한 외란에 강인한 상태관측기

1. 기존의 PI 관측기

시스템에 고장이 발생하지 않고, 출력 측에만 잡음이 존재하는 경우, 단일 출력 시스템의 상태변수를 추정하는 문제를 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + d(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] \in R^n$ 와 $u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)] \in R^m$ 는 각각 상태벡터와 제

어 입력벡터이고, $y(t) \in R$, $d(t) \in R$ 는 출력과 출력잡음을 나타낸다. 시스템행렬 A_0, B_0, C_0 는 각각 $(n \times n)$, $(n \times m)$, $(1 \times n)$ 행렬이다. (A_0, C_0) 가 가관측하다면, 기존의 PI 관측기는 다음과 같이 구성된다^[9-14].

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A_0\hat{x}(t) + B_0u(t) + K_p(y(t) - C_0\hat{x}(t)) + K_i x_{n+1}(t) \\ &= [A_0 - K_p C_0]\hat{x}(t) + K_i x_{n+1}(t) + B_0u(t) + K_p y(t) \\ \dot{x}_{n+1}(t) &= y(t) - C_0\hat{x}(t)\end{aligned}\quad (3.2)$$

여기서 $x_{n+1}(t)$ 는 플랜트 출력과 관측기 출력의 오차인 $y(t) - C\hat{x}(t)$ 를 적분한 값이다. 위 식은 행렬-벡터방정식으로 다음과 같으며

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{x}_{n+1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 - K_p C_0 & K_i \\ -C_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ x_{n+1}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} K_p \\ 1 \end{bmatrix} y(t)\quad (3.3)$$

이 PI 관측기의 상태추정 오차방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}(t) \\ \dot{x}_{n+1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 - K_p C_0 - K_i & \\ C_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(t) \\ x_{n+1}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_p \\ 1 \end{bmatrix} d(t)\quad (3.4)$$

K_p 와 K_i 는 각각 비례이득과 적분이득으로 식(3.4)의 오차방정식이 안정하도록 결정한다. 식(3.4)로부터 출력측에 측정 잡음이 있는 경우 추정오차는 비례이득 K_p 값에 따라 크게 달라짐을 알 수 있다. 상대 추정치에 측정 잡음이 증폭되어 인가되어 추정치에 신뢰성을 떨어뜨리게 됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 접근방법은 측정 잡음이 있다면 만족할만한 특성을 얻을 수 없음을 의미한다.

2. 외란에 강인한 PI 관측기

식(3.1)로 주어진 시스템에 모델링 오차가 있는 경우는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) + E_0d(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + d(t)\end{aligned}\quad (3.5)$$

여기서 E_0 는 $n \times 1$ 행렬이다.

식(3.5)으로 표현되는 시스템의 상태를 추정하기 위해 $x_0(t) = \int_0^t y(\tau)d(\tau)$ 라고 놓으면, $\dot{x}_0(t) = y(t) =$

$C_0x(t) + d(t)$ 이므로 다음과 같고,

$$\begin{aligned}\dot{x}_0(t) &= C_0x(t) + d(t) \\ \dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) + E_0d(t) \\ y_0(t) &= x_0(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + d(t)\end{aligned}\quad (3.6)$$

위 식을 다음과 같이 행렬-벡터 방정식으로 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_0(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C_0 \\ 0 & A_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(t) \\ x(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} d(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ E_0 \end{bmatrix} d(t)\quad (3.7)$$

$$y_0(t) = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_0(t) \\ x(t) \end{bmatrix}$$

$$y(t) = [0 \ C_0] \begin{bmatrix} x_0(t) \\ x(t) \end{bmatrix}$$

$$\text{여기서, } z(t) = \begin{bmatrix} x_0(t) \\ x(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & C_0 \\ 0_{n \times 1} & A_0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_0 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 1 \\ E_0 \end{bmatrix}, \quad C_1 = [1 \ 0], \quad C_2 = [0 \ C_0]$$

라고 하면, 위 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + C_1^T d(t) + Ed(t)\quad (3.8)$$

$$y_0(t) = C_1 z(t)$$

$$y(t) = C_2 z(t) + d(t)$$

식(3.8)로 나타난 시스템에 대한 PI 관측기는 다음과 같다

$$\begin{aligned}\dot{\hat{z}}(t) &= A\hat{z}(t) + Bu(t) + K_I\{y_0(t) - C_1\hat{z}(t)\} \\ &\quad + K_P\{y(t) - C_2\hat{z}(t)\} \\ &= [A - K_I C_1 - K_P C_2]\hat{z}(t) + Bu(t) \\ &\quad + K_I y_0(t) + K_P y(t)\end{aligned}\quad (3.9)$$

K_P 와 K_I 는 선택해야 할 관측기의 비례 및 적분 이득이다. 여기서 $e(t) = z(t) - \hat{z}(t)$ 라 하면 다음의 추정 오차방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{e}(t) = (A - K_I C_1)e(t) + C_1^T d(t) + Ed(t) - K_P C_2 e(t) - K_P d(t)\quad (3.10)$$

비례이득 $K_P = E$ 라고 하면, 식(3.10)에서 시스템 외란에 해당하는 $Ed(t)$ 을 상쇄할 수 있고 이때의 추정 오차방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= (A - K_I C_1)e(t) + C_1^T d(t) - EC_2 e(t) \\ &= (A - EC_2 - K_I C_1)e(t) + C_1^T d(t) \end{aligned} \quad (3.11)$$

여기서, (A, C_1) 이 가관측하다면, 오차방정식이 안정하도록 하는 K_I 를 선택할 수 있다. 즉 적분이득을 오차동특성을 안정화시키는데 사용되어지며, 비례이득은 외란 제거를 위해 선택한다.

IV. 시뮬레이션

S. P. Linder^[12]의 문헌에서 다루어진 시스템을 예로 든다. 여기에 측정 잡음을 추가하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} -5 & 1 \\ -100 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} w(t) \\ y(t) &= [1 \ 0]x(t) + d(t) \end{aligned}$$

위 시스템은 가관측 동반방정식으로 표현되어 있다. 이제 제어입력을 $u(t) = \sin(0.5t)$ 으로 하고, 출력 측에 도입되는 측정 잡음 $d(t)$ 는 그림2와 같다고 가정한다. 플랜트에는 제어입력 $u(t)$ 가 인가되어야 하는데, 포화에 의한 고장이 발생하여 다음과 같은 신호 $w(t)$ 가 플랜트에 인가되었다고 가정한다.

$$w(t) = \begin{cases} 0.3, & \text{if } u(t) \geq 0.3 \\ u(t), & \text{if } -0.3 \leq u(t) \leq 0.3 \\ -0.3, & \text{if } u(t) \leq -0.3 \end{cases}$$

그림 3은 기존의 PI 관측기를 이용하여 추정된 고장 신호 즉 구동기의 미지입력인 $f(t)$ 이고, 그림4는 본 논문의 PI 관측기를 이용할 때의 결과이다.

이러한 결과에서 보듯이 본 논문에 의한 고장추정 결과는 기존의 결과에 비해 매우 만족할만하다. 본 논문

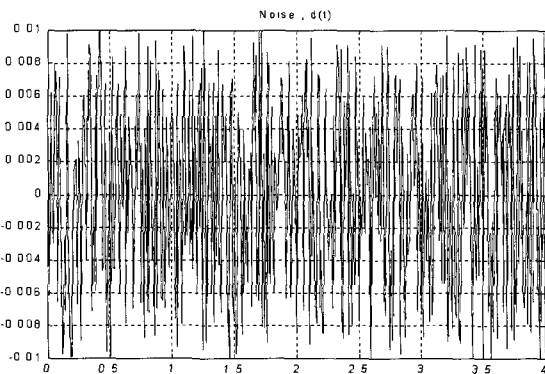


그림 2. 측정잡음
Fig. 2. Measurement noise.

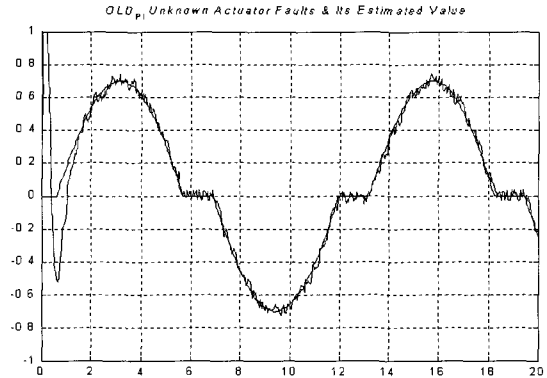


그림 3. 기존의 PI 관측기에 의한 (포화)고장추정
Fig. 3. Saturation fault estimation via classical PI observer.

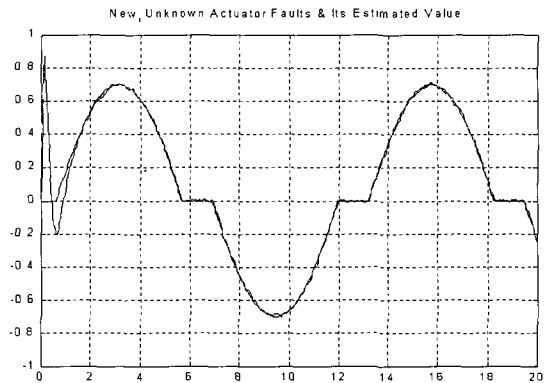


그림 4. 본 논문의 PI관측기에 의한 (포화)고장추정
Fig. 4. Saturation fault estimation via proposed PI observer.

의 상태관측기에 의한 결과는 잡음에 둔감한 반면, 기존의 방식은 잡음에 민감함을 알 수 있다. 이러한 원인은 상태 추정 오차로부터 이해될 수 있다. 고장추정 방정식은 상태추정치에 미분항을 포함하고 있다. 미분항은 작은 변화에도 민감하게 반응한다. 따라서 추정오차가 적고 평활한 본 논문에 의한 고장추정치가 기존의 방법에 의한 결과보다 더 우수함을 알 수 있다.

V. 결 론

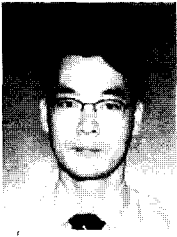
본 논문에서는 모델링오차 및 출력 측에 잡음이 있는 경우, 구동기 고장이나 오작동 등의 원인에 의해 예기치 않게, 시스템에 도입되는 미지입력을 새로운 PI관측기를 이용하여 추정하는 방법을 제시하였다. PI관측기를 이용함으로써, 모델링오차 및 출력 측에 잡음이 있는 경우에도 시스템의 상태변수를 정확히 추정할 수 있음을 보였고, 구동기의 고장에 의한 미지입력인 $f(t)$ 의

추정 성능도 기존의 방법에 비해 더욱 우수함을 알 수 있었다. 잡음이 없는 경우는, 본 논문의 방법이나 기존의 비례관측기나 PI관측기를 이용한 방법에 의한 결과와 같지만, 잡음이 있는 경우엔 본 논문의 방법이 뛰어난 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 미지고장 추정방정식에 포함된 미분 항에 기인하는 것으로, 본 논문에 의해 추정된 상태벡터 값이 기존의 방법에 한 결과보다 더 정확하고 평활하기 때문임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] S. H. Wang, E. J. Davison, P. Dorato, "Observing the state of systems with unmeasurable disturbance", IEEE Trans. Automatic Control, vol.20, pp.716-717, 1975.
- [2] Bhattacharyya, S. P., "Observer design for linear systems with unknown inputs," IEEE Trans. Automatic Control, vol. 23, pp. 483-484, 1978.
- [3] R. J. Miller, R. Mukundan, "On designing reduced order observers for the time invariant systems subject to unknown inputs", International Journal of Control, vol.35, pp.183-188, 1982.
- [4] F. W. Fairman, S. S. Mahil, and L. Luk, "Disturbance decoupled observer design via singular value decomposition," IEEE Trans. Automatic Control, vol. 29, pp. 84-86, 1984.
- [5] M. Hou and P. C. Muller, "Design of observers for linear systems with unknown inputs," IEEE Trans. Automatic Control, vol. 37, pp. 871-875, 1992.
- [6] Y. Guan and M. Saif, "A novel approach to the design of unknown input observer," IEEE Trans. Automatic Control, vol. 36, pp. 632- 635, 1991.
- [7] 이재혁, 변증남, "미지입력이 존재하는 선형시스템에 대한 축소 차수 관측기설계", 대한전기학회 논문지 제43권 제1호, pp. 71-75, 1994.
- [8] 안비오, 이명규, 안두수, "STWS를 이용한 선형 시불변시스템의 미지입력 관측기 설계에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 제 46권 제 1 호, pp 128-131, 1997.
- [9] S. Beale, B. Shafai, "Robust control design with a proportional integral observer", International Journal of Control, vol.50, pp.97-111, 1989.
- [10] H. H. Niemann, J. L. Stoustrup, B. Shafai, S. Beale, "LTR design of proportional integral observers", International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol.5, pp.671-693, 1995.
- [11] B. Shafai, S. Beale, H. H. Niemann, J. L. Stoustrup, "LTR design of discrete-time proportional integral observers", IEEE trans. Automatic Control, vol.41, no.7, pp.1056-1062, 1996.
- [12] S. P. Linder, B. Shafai, M. saif, "Estimating and accommodating unknown actuator faults with PI observers", Proceeding of the 1998 IEEE, pp.461-465, 1998.
- [13] K. K. Busawon, P. Kabore, "Disturbance attenuation using proportional integral observers", International Journal of Control, vol.76, no.6, pp.618-627, 2001.
- [14] B. Shafai, C. T. Pi, O. Bas, S. Nork, S. P. Linder, "A general purpose observer architecture with application to failure detection and isolation", Proceeding of American Control Conference, Arlington,VA, pp.1133-1138, June, 2001.

저 자 소 개



안 비 오(정회원)
 1992년 성균관대학교 전기공학과 학사졸업.
 1994년 성균관대학교 전기공학과 석사졸업.
 1998년 성균관대학교 전기공학과 박사졸업.
 1998년~1999년 한국원자력연구소 Post Doc.
 2000년~2001년 (주)마이다스코리아 CTO
 2002년~2006년 중소기업진흥공단 기술심사역
 2007년~현재 네오피텔리티(주) CTO
 <주관심분야:분산제어, IT응용, Embedded Sys.>



김 증 부(정회원)
 1984년 성균관대학교 전기공학과 학사졸업.
 1988년 성균관대학교 전기공학과 석사졸업.
 1993년 성균관대학교 전기공학과 박사졸업.
 1991년~현재 인덕대학 메카트로닉스학과 교수
 <주관심분야 : 통신, 신호처리, 메카트로닉스>



이 명 규(정회원)-교신저자
 1982년 성균관대학교 전기공학과 학사졸업.
 1984년 성균관대학교 전기공학과 석사졸업.
 1990년 성균관대학교 전기공학과 박사졸업.
 1991년~현재 경성대학교 전기전자공학과 교수
 <주관심분야 : 선형 및 비선형시스템 제어>