외란관측기 기반한 2 자유도 제어계의 설계

Design of control system with two degrees of freedom based on the disturbance observer

하홍곤

Hong-Gon Ha

요 약

많은 제어기법들이 제어계의 제어성능을 개선하기위해 제안되고 있다 제어계에서 제어에 대한 자유도는 독립적으로 조정할 수 있는 폐루프 전달함수의 수로 결정된다, 목표치 추종 및 외란억제에 대해 2자유도 제어기법이 많이 이용되고 있다. 본 논문에서는 외란을 제거하기 위해 외란관측기를 갖는 제어계를 2자유도 제어계로 변환시켰으며, 기동 및 부하변동 시 과도응답의 제거를 용이하게 하였다, 그리고 외란관측기의 설계법이 주파수 영역으로 제안하였으며. 이 방법으로 설계된 외란관측기를 이용하여 2자유도 제어계를 구성하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 알고리즘의 유효성을 확인 하였다

Abstract

Many control techniques have been prposed in order to improve the control performancs of the control system.The freedom on control in the control system is decided by the number of the closed-loop transfer function which can adjust independently. The design method of the controller with two degrees of freedom(TDOF) is used extensively for following the desired value and rejecting the disturbance . In this paper, the control system with the disturbance observer(DOB) for rejecting the disturbance is transformed by the control system with TDOF and the rejection of a transient response is easy at the starting time and load variation. The design method of the DOB is proposed in the frequency -domain and the control system with TDOF is constructed by using the DOB which is designed with this method. Through the simulation results, the usefulness of the proposed algorithm is proved

Keywords : Disturbance observer, Two degrees of freedom, Control system, Frequency domain

I. 서론

현대 산업현장에서 운용자 및 사용자들의 여러 요구조건을 신속 정확하게 충족시킬 수 있는 자동화 설비의 개발에 대한 필요성이 자동화의 가속화, 고속화, 그리고 고정도 및 고정밀의 제어를 요구하게 된다.[1] 이러한 제어계는 반도체, 정보통신, 생산시스템에 관련 운동제어에서 핵심적인 요소이며, 설계과정에서 가장 중요한 목표는 제어계의 성능 및 정밀도의 향상이다. 제어계의 성능 및 정밀도는 제어계의 내 외적인 외란(Disturbance)에 크게 좌우되므로[2], 제어계의 고속화 및 고정밀화를 위해서 외란들을 효과적으로 보상할 수 있는 제어기가 요구되고 있다. 이러한 제어기법에는 외란관측기(DOB; Disturbance Observer) , 적응강인제어 (ARC; Adaptive Robust Control),와 2 자유도(TDOF; Two Degree-of -Freedom)제어 등이 구조가 간단하여 응용이 용이하고, 강인성이 검증되어 많이 이용되고 있다.[3,4,5] 이 제어기법들은 강인성을 위한 내부 루프 제어기와 원하는 제어성능들을 만족시키기 위해 외부 루프 제어기로 구성된다. 여기서 내부 루프는 외란을 상쇄시켜 주어진 공칭모델과 일치시키기 위한 제어입력을 그리고 외부 루프 제어기는 제어계의 성능 향상을 위한 것으로 주어진 공칭모델에 대해서 설계 되어 지는 특징을 가지고 있다. 일반적으로 외란관측기를 구현할 때 저주파 통과필터(Q-필터)가 실현성(Causality)을 보장하기 위해 이용되고 있으며 이것이 외란관측기의 특성을 결정짓는 중요한 요소가 된다.[6] 이러한 외란관측기는 기존의 설계된 주 제어기의 교

* 동의대학교

투고 일자 : 2009. 10. 20 수정완료일자 : 2010. 1. 22
게재확정일자 : 2010. 1. 29
* 이 논문은 2009년도 동의대학교 학술연구지원비를 받아 연구된 것임

체 없이 추가적으로 덧붙여 사용함으로써 외란과 계의 불확실성에 대처 할 수 있으며, 다른 제어기법에 비해 설계 과정이 간단하고, 탁월한 외란 제거 성능으로 로봇 및 정밀 제어 등을 비롯한 다양한 제어 분야에 이용되고 있다[7] 제어계에서 제어에 대한 자유도는 독립적으로 조정할 수 있는 폐루프 전달함수의 수로 결정된다, 목표치 추종 및 외란억제에 대해 2자유도 제어기법이 많이 이용되고 있다[1]

본 논문에서는 외란을 제거하기 위해 외란관측기를 갖는 제어계를 2자유도 제어계로 변환하여 기동 및 부하변동 시 과도응답의 제거를 용이하게 하였으며, 외란관측기를 주파수 영역으로 설계할 수 있는 방법을 제안하였다. 설계된 외란관측기를 이용하여 2자유도 제어계를 구성하여. 시뮬레이션으로 그 유효성을 확인 하였다

II.외란관측기를 이용한 2자유도 제어계 및 외란관측기의 설계

2.1,외란관측기를 이용한 2자유도 제어계의 설계

일반적으로 외란이 없을 때 만족한 성능의 제어계에 외란이 존재하여 제어계의 성능이 저하 될 경우 외란을 억제하여 계의 응답을 보상하기 위해 외란관측기를 사용한 제어계의 구성도가 그림 1이다.[8]

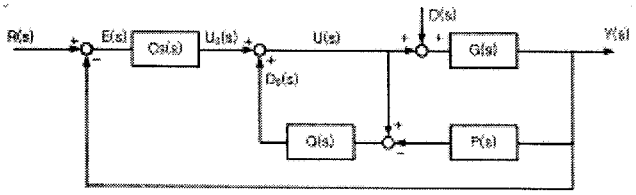


그림 1. 외란관측기를 갖는 제어계의 구성도
Fig.1.Block Diagram of Controll system with Disturbance Observer

그림 1의 제어계에서 $G(S)$는 제어대상의 전달함수, $P(S)$는 공칭모델의 전달함수 $R(S)$는 기준입력, $Y(S)$는 출력, $E(S)$는 기준입력과 출력과의 편차신호로 다음과 같다.

$$E(S) = R(S) - Y(S) \tag{1}$$

그리고 $Q(S)$는 외란관측기, $U_0(S)$는 제어기 $C_S(S)$의 출력, $U(S)$는 제어대상의 입력, $D(S)$와 $D_0(S)$는 외란 및 궤환루푸의 출력이다. 이 그림 1의 제어계의 E(S)에서 Y(S)까지 전달함수는

$$\frac{Y(S)}{E(S)} = \frac{C_S(S)G(S)}{1 - Q(S) + G(S)P(S)Q(S)} \tag{2}$$

이고, D(S)에서 Y(S)까지 전달함수는

$$\frac{Y(S)}{D(S)} = \frac{G(S)\{1 - Q(S)\}}{1 - Q(S) + G(S)P)S)Q(S)} \tag{3}$$

이다, 그리고 D(S)에서 $D_0(S)$가지 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{D_0(S)}{D(S)} = \frac{G(S)P(S)Q(S)}{1 - Q(S) + G(S)P(S)Q(S)} \tag{4}$$

식(5)에서

$$|Q(S)| = 1 \tag{5}$$

이면 식(7)에서

$$D(S) = D_0(S) \tag{6}$$

가 된다. 이 식(5)의 조건에 의해 식(3)의 Y(S))는

$$Y(S)=0 \tag{7}$$

이다. 즉 외란입력에 대해 출력이 없음을 의미 한다
그리고 제어대상의 입력 $U(S)$는

$$U(S) = C_S(S)E(S) + Q(S)\{U(S) - P(S)Y(S)\} \tag{8}$$

이므로 $U(S)$는 다음과 같다

$$U(S) = C_A(S)E(S) - C_B(S)Y(S) \tag{9}$$

이고 $C_A(S)$ 및 $C_B(S)$는 다음과 같다

$$C_A(S) = \frac{C_S(S)}{1 - Q(S)} \qquad C_B(S) = \frac{P(S)Q(S)}{1 - Q(S)} \tag{10}$$

이 식(9)을 이용하여 구성한 2자유도의 제어계가 그림 2이다

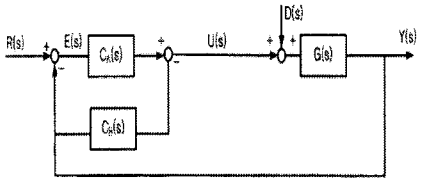


그림 2.외란관측기를 기반한 2자유도 제어계
Fig.2. Control system with Two Degrees of Freedom based on Disturbance Observer

2.2, 외란관측기의 설계

제어계에 외란이 존재할 때 그 외란을 제거하기 위해 사용한 그림1의 제어계의 구성도에서 외란관측기 $Q(S)$의 전달함수는 분모의 차수가 분자의 차수보다 커야 하므로

$$Q(S)=\frac{k(s+a_0)}{s^2+b_1s+b_0} \tag{11}$$

로 설정한다. 식(11)에서 k는 전달함수의 이득이다. 이 식(11)에 $s=j\omega$을 대입하여 크기$|Q(j\omega)|$ 및 위상각$\angle Q(j\omega)$을 구하면 다음과 같다

$$|Q(j\omega)|=\frac{k\sqrt{a_0^2+\omega^2}}{\sqrt{(b_0-\omega^2)^2+b_1^2\omega^2}} \tag{12}$$

$$\angle Q(j\omega)=\tan^{-1}\frac{\omega}{a_0}-\tan^{-1}\frac{b_1\omega}{b_0-\omega^2} \tag{13}$$

식(12)은 식(5)의 조건을 만족하여야 하므로 이득k는

$$k=\frac{\sqrt{(b_0-\omega^2)^2+b_1^2\omega^2}}{\sqrt{a_0^2+\omega^2}} \tag{14}$$

로 된다. 그리고 식(13)에서

$$\angle Q(j\omega)=0 \tag{15}$$

이면 $Q(S)$에 의한 위상차가 없다[8] 그러므로 식(13)에서 다음의 관계식이 성립한다

$$a_0b_1=b_0-\omega^2 \tag{16}$$

식(16)을 식 (13)에 대입하면 다음의 관계식이 얻어진다

$$k=b_1 \tag{17}$$

그리고 식(2)에서 $Q(S)$가 위의 조건을 만족 할 때 공칭모델전달함수P(S)가

$$P(S)=\frac{1}{G(S)} \tag{18}$$

이면, 식(2)는

$$\frac{Y(S)}{E(S)}=C_S(S)G(S) \tag{19}$$

로 된다, 식(20)에서 기준입력과 출력의 편차신호 $E(S)$에서 출력 y(S)까지 전달함수는 외란관측기$Q(S)$와 무관하게 된다.

식(16)과 식(17)을 이용하여 외란관측기Q(S)를 설계하기 위해 a_0와 b_1을 다음과 같이 설정한다[9]

$$a_0=\frac{1}{2}\omega \qquad b_1=2\omega \tag{20}$$

그러면 식(16)에서 b_0는

$$b_0=2\omega^2 \tag{21}$$

이다, 외란관측기 Q(S)는

$$Q(S)=\frac{2\omega s+\omega^2}{s^2+2\omega s+2\omega^2} \tag{22}$$

이므로

$$\frac{1}{1-Q(S)}=1+\frac{2\omega s+\omega^2}{s^2+\omega^2} \tag{23}$$

이다.

III. 시뮬레이션 및 고찰

그림 2의 2자유도 제어계를 시뮬레이션하기 위해 사용한 $C_S(S)$는 비례-적분 제어기로

$$C_S(S)=0.6+\frac{10}{s} \tag{24}$$

이고, 제어대상의 전달함수G(S)는

$$G(S)=\frac{526.6}{s(s+43.25)} \tag{25}$$

을 사용하였다[10]. 그러므로 P(S)는 식(18)에서

$$P(S)=0.019s^2+0.082s \tag{26}$$

이다. 식(10)과 식(23)에서 $C_A(S)$는

$$C_A(S)=\frac{(0.6s+10)(s^2+2\omega s+2\omega^2)}{s(s^2+\omega^2)} \tag{27}$$

이고, $C_B(S)$는

$$C_B(S)=C_{B1}(S)+C_{B2}(S) \tag{28}$$

이다. 이 식(28)에서$C_{B1}(S)$는

$$C_{B1}(S)=0.0038\omega(s+43.25+0.5\omega) \tag{29}$$

이고, $C_{B2}(S)$는

$$C_{B2}(S)=0.0038\omega^2\frac{(21.65-\omega)s-(43.15+0.5\omega)\omega^2}{s^2+\omega^2} \tag{30}$$

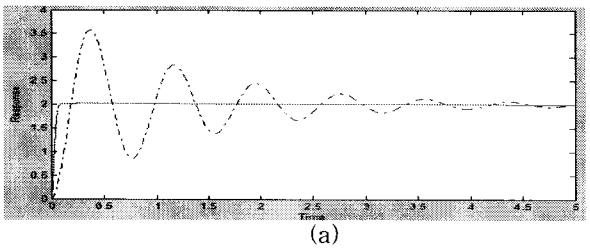
이다. 위의 관계식을 이용하여 각 주파수를 변화시켜 계응답의 변화를 고찰하여 설계한 외란관측기의 유효성을 시뮬레이션으로 확인 하였다. 일반적으로 전기기기를제어대상으로 할 때 기동 및 부하변동 시 나타나는 과도응답상태 및 잡음은 저주파이므로 아주 낮은 저주파를 이용하였다. 외란관측기Q(S)를 사용하지 않은 계의 응답특성과 비교하기위해 그림 2의 $C_A(S)$와 $C_B(S)$는

$$C_A(S)=C_S(S), \qquad C_B(S)=\frac{1}{G(S)} \tag{31}$$

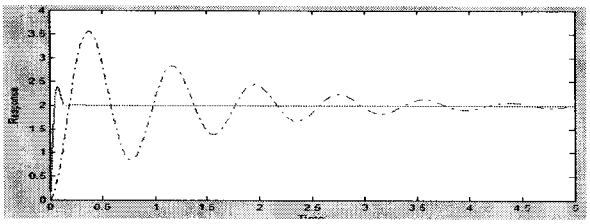
를 사용하여 계의 응답특성을 점선으로 그리고 외란관측기Q(S)를 사용한 계의 응답특성은 실선으로 계의 응답특성을 표시하였다.

3.1 기동시 계의 응답 특성

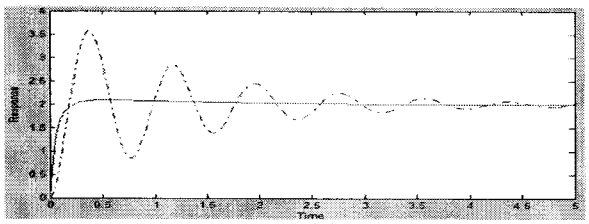
그림3은 크기가 2인 계단입력을 인가하였을 때 계의 응답특성이다.



(a)



(b)



(c)

그림3. 계단 입력에 대한 계의 응답 특성
(a) ω=0.125(rad/sec) (b) ω=0.25(rad/sec)
(c) ω=0.5(rad/sec

Fig.3. Response characteristics of control system on step input (a)ω=0.125(rad/sec) (b)ω=0.25(rad/sec) (c) ω=0.5(rad/sec))

외란관측기Q(S)에 사용한 각 주파수ω는 그림3의(a)에서 0.125(rad/sec), (b)에서 0.25(rad/sec) 그리고 (c)에서 0.5(rad/sec) 이다. 그림 3에서 외란관측기Q(S)를 사용하지 않은 계의 응답특성(그림 3의 점선)은 상당한 크기의 과도응답 상태를 보이고 있다. 이러한 과도응답상태를 제거하여 계의 응답특성을 개선하기 위해 외란관측기Q(S)를 사용한 계의 응답특성이 그림 3의 실선이다. 외란관측기Q(S)의 사용으로 그림3의 (a), (b) 및(c)에서 과도응답상태는 크게 개선된 것을 알 수 있다j 각 주파수가 아주 적은 그림3의 (a)에서 상승시간은 크게 개선 되었지만 약간의 과도응답상태를 보이고 있다. 각 주파수를 크게한 그림3의 (c)(에서는 (a)에 비해 상승시간이 길어 졌다 그리고 각 주파수를 적당히 설정한 그림3의 (b)에서는 과도응답상태가 완전히 제거되어 상승시간이 개선되었음을 알 수 있다.그러므로 각 주파수가 작을 수록 상승시간은 개선되지만 과도응답이 발생하는 것을 알 수 있었다

그림4는 그림3의 (b)조건 즉 각주파수가 0.25(rad/sec)일 때 계단입력의 크기를 2에서 시간 5(sec)에서 3으로 변화시킨 계의 응답특성으로 외란관측기Q(S)를 사용하지 않은 계의 응답특성(그림4의 점선)은 입력이 변하는 순간에 큰 과도응답을 보이고 있지만 외란관측기Q(S)를 사용한 계의 응답특성(그림4의 실선)에서는 완전히 과도응답이 개선되어 상승시간이 크게 향상된 것을 알 수 있다

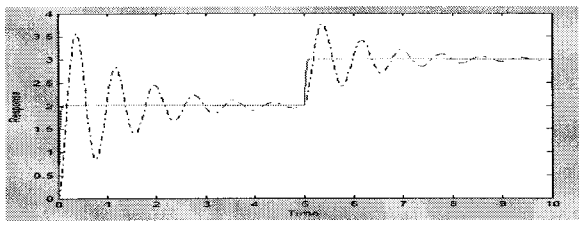
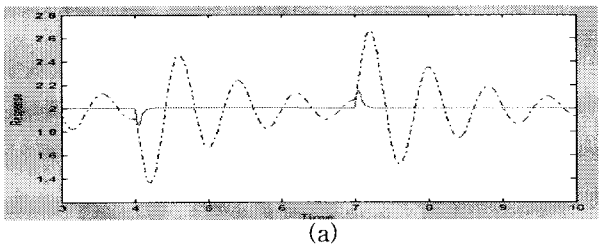


그림4. 계단 입력 변화시 계의 응답특성
Fig.4. Response characteristics of control system by varying step input

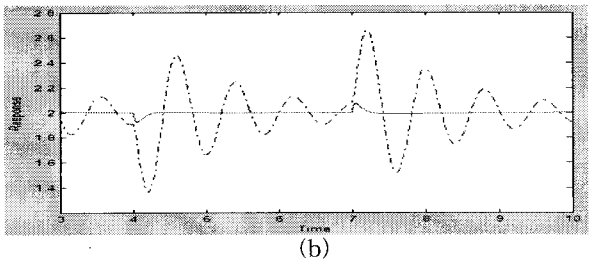
3.2 부하변동시 계의 응답 특성

그림5는 시간 4(sec)에서-로 그리고 7(sec)에서 +로 부하를 변화시킨 계의 응답 특성이다. 외란관측기를 사용하지 않은 계의 응답특성(그림 5의 점선)은 부하가 변동 할 때 과도응답상태가 크게 발생하였지만 외란관측기Q(S)의 사용으로 과도응답상태가 크게 개선 된 것을 알 수 있다 (그림 5의 실선). 그림5에서 외란관측기Q(S)에 사용한 각 주파수는 (a)에서 0.125(drad/sec) (b)에서 0.25(rad/sec) 그리고 (c)에서 0.5(rad/sec)이다.

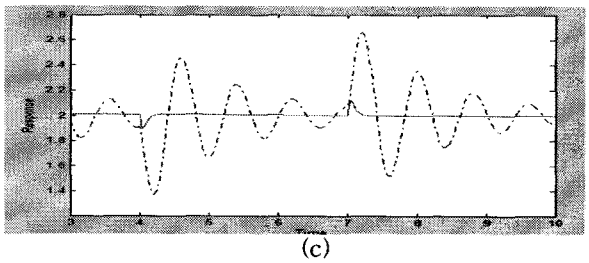
각 주파수가 작은 그림 5의 (a)에서 외란관측기Q(S)의 사용으로 응답의 변동이 크게 개선 되어 정상상태에 도달하는 시간도 향상 되었지만 부하가 변동하는 순간의 피크치는 크다. 이것에 비해 각 주파수가 큰 그림 4의 (c)의 경우 응답의 변동은 크게 개선 되었지만 부하가 변동하는 순간의 피크치는 (a)에 비해 다소 감소 하였고, 정상상태에 도달하는 시간도 (a)에 비해 늦다.



(a)



(b)



(c)

그림5. 부하변동에 의한 계의 응답
(a)ω=0.125(rad/sec) (b) ω=0.25(rad/sec) (c) ω=0.5(rad/sec)
Fig.5. Response charasteristics of control system by load variation (a)ω=0.125(rad/sec), (b) ω=0.25(rad/sec),(c) ω=0.5(rad/sec))

그러므로 부하변동 시 각 주파수가 적을수록 정상상태에 도달하는 시간은 단축되지만 부하가 변동하는 순간의 피크치는 증가함을 알 수 있었다. 그러므로 적당한 각 주파수에서 부하가 변동하는 순간의 피크치가 크지 않으면서 정상상태에 도달하는 시간을 단축 시킬 수 있다(그림 5의 (b))

그림 6은 주기가 0.2 진폭이 1.5인 정현파를 외란으로 인가하였을 때 계의 응답특성으로 외란관측기Q(S)를 사용하지 않을 경우 계의 응답특성은 거의 단진동 형태지만(그림6의 점선) 외란 관측기Q(S)에 의해 정현파성분이 많이 개선된 것을 알 수 있다 (그림6의 실선)

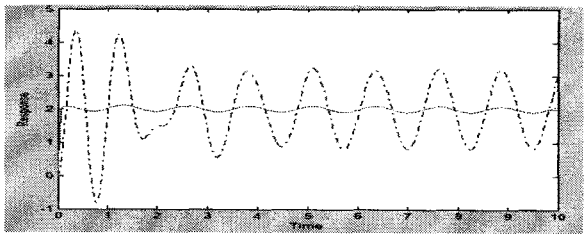


그림 6. 주기 0.2인 외란에 의한 계의 응답
Fig. 6. Response of control system by disturbance with period 0.2

그러므로 제안한 외란관측기는 주기적 외란도 제거할 수있음을 알 수 있었다

Ⅳ, 결론

외란관측기를 이용하여 기동시 과도응답을 제거하여 계의 응답특성을 개선하고, 부하변동 시 변동의 영향을 보상하여 계의 응답이 빠르게 정상상태에 도달 할 수 있도록 2자유도 제어계를 구성하였다. 그리고 외란관측기를 주파수 영역에서 설계할 수 있는 설계법을 제시하였다.제안한 방법으로 외란관측기를 구성하여 2자유도 제어계에 이용하였다. 전기기기를 제어대상으로 할 경우 계 응답의 과도상태와 외란의 주파수 성분은 저주파이므로 이 저주파영역에서 2자유도 제어계를 시뮬레이션하여 다음의 결론을 얻었다.

1, 기동 시

외란관측기의 사용으로 계의 응답에서 과도응답상태가 크게 개선되어

1) 각 주파수가 작을 경우 상승시간은 빨라지지만 계의 응답에 약간의 과도응답이 발생하고
2) 각 주파수가 클 경우 계의 응답에 과도응답은 완전히 개선되지만 각 주파수가 적을 경우에 비해 상승시간이 약간 길어졌다.

그러므로 적당한 각 주파수의 설정으로 양호한 계의 응답특성을 얻을 수 있었다.

2. 부하변동 시

1) 각 주파수가 적을 경우 빠르게 정상상태에 도달하지만 부하가 변하는 순간의 피크치가 크다.
2) 각 주파수가 클 경우 부하가 변하는 순간의 피크치는 작지만 각 주파수가 적을 경우에 비해 정상상태에 도달하는 시간이 늦다.
3) 주기적 외란도 크게 개선하였다.

그러므로 적당한 각 주파수의 설정으로 부하변동에의 계의 응답을 개선시킬 수 있었으며, 주기적 외란도 제거할 수 있었다

이상의 결론에서 제안한 2자유도 제어계는 정밀을 요하는 위치제어, 2자유도제어 등 많은 제어분야에 이용 가능하리라 사료된다.

참고문헌

[1] 하홍곤, 이창호 "이득 설계가 간단한 선형전동기 2자유도 PID 위치제어기 구현" 한국신호처리 • 시스템학회 논문지 8권 2호, PP.124-129, 2007

[2] 정성종, 김민석 "외란관측기를 이용한 서보계의 통합설계'" 대한기계학회 논문지 A권 제 29권 제 4호 pp.591 - 599, 2005.

[3] 김봉근 "구조적 분석에 기초한 외란관측기의 설계" 제어 • 자동화 • 시스템공학 논문지 제 10권 제 3호 pp.225 -231 ,2004

[4] Takaji Umeno, Tomoaki Kaneko, Yoichi Hori "Robust Servosystem Design with Two Degree of Freedom and iits Application to Novel Motion Control of Robot' IEEE Tans, Ind, Electron. vol. 40, no. 5, pp,473 - 485, 1993

[5] 최현택, 김봉근, 엄광식 "두개의 루프를 갖는 일반화된 모델기반의 외란관측기 설계" 제어 • 자동화 • 시스템 문지 제 10권 제 5호, pp.385-393, 2004.

[6] 최영진, 양광식, 정완균, 김홍록, 서일홍 "강인성과 제어성능을 고려한 외란관측기의 설계(1);2차시스템에 대한 이

론적 과찰" 제어 • 자동화 • 시스템공학 논문지 제 8권 제 8호 pp,655-664, 2002
[7] 정구종, 김인혁, 손영익 "부하변동을 고려한 DC/DC 승압형 컨버터의 외란관측기 기반 출력 궤환 제어기" 전기학회 논문지 58권 7호 PP,1405-1410 2009
[8] 손영익, 김성종, 정구종, 심형보 "PID제어기로 안정화 가능한 비최소위상시스템에 대한 외란관측기 설계'대한전기학회 논문지 57권 9호 pp. 1612-1616, 2008
[9] 손명공, 손천돈, 김구화, 이덕만, 권성하, 정은태 "가변 외란관측기를 이용한 연주시스템의 몰드 레벨 안정화" 제어 • 로봇 • 시스템학회 논문지, 제14권, 제2호 pp.105-110 2008,
[10] 김성대 "위치제어를 위한 I-PD제어계에서 PD제어기의 설계"한국신호처리 • 시스템학회 논문지 10권 4호 pp,262-266,2009

하 홍 곤(Hong-Gon Ha)

1973 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1977 동아대학교 대학원 졸업(공학석사)
1984 중앙대학교 대학원 졸업(공학박사)
현재 동의대학교 공대 전자공학과 교수
*관심분야; 제어이론, 지능형 및 비선형 제어 등