

## On the Design of a Finite Time Reduced Order Observer

이 기 상\*  
(Kee-Sang Lee)

**Abstract** - A reduced order observer with finite time convergence characteristics is proposed for linear time invariant systems. The proposed finite time reduced order observer(FTROO) is a dual observer scheme in which two reduced order Luenberger observers with asymptotic convergence characteristics and a finite time delay element are employed. The FTROO can be constructed so as to converge in the designer specified finite time independent of the eigenvalues of the reduced order observers. A numerical example is given to show the finite-time convergence characteristics of the proposed FTROO.

**Key Words** : Reduced order observer, Finite time observer

### 1. 서 론

선형연속치계의 상태추정을 위한 관측자 설계 문제는 1960년대부터 현재에 이르기까지 제어 및 신호처리분야의 중요과제로서 수많은 연구가 진행되었으며, 그 결과 매우 다양한 설계 및 응용방법이 제안되었다[1]. 이제까지 제안된 거의 모든 관측자기법의 공통적 특징의 하나는 추정치의 점근적 수렴특성이다. 이는 추정 편차( $\epsilon$ )가 궁극적으로 수렴함, 즉  $\lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon(t) \rightarrow 0$  임을 의미할 뿐 이므로, 관측자의 고유치를 적절히 선정함으로써 수렴성의 개선이 가능하다 하더라도 정확한 수렴시간의 예측 및 설계규격으로의 도입은 불가능하다. 이러한 수렴특성의 문제는 엄격한 설계규격이 주어 진 실시간제어, 검출시간이 설계조건으로 주어지는 고장검출 시스템 등과 같은 중요한 응용분야에 적용 시 설계 및 실현상의 어려움을 야기시킨다.

최근 Engel 과 Kreisselmeier는 설계자에 의해 지정된 수렴시간( $D$ ) 내에 수렴하는 특성, 즉  $\lim_{t \rightarrow t_0+D} \hat{x}(t) \rightarrow x(t)$  및  $\hat{x}(t) = x(t) \forall t \geq t_0 + D$  인 특성을 가지는 상태관측자 알고리즘을 추정알고리즘을 제안하였다[2]. 이 유한시간관측자(FTO: finite time observer)는 서로 다른 고유치를 가지는 두 개의 전차수관측자(full-order observer)를 도입한 구조이며, 최종적인 상태추정치는 두 관측자가 제공하는 현재의 추정치  $\hat{x}(t)$ 와 지연된 추정치  $\hat{x}(t-D)$ 의 특별한 결합으로 주어진다. 이 FTO는 실시간제어계와 고장검출시스템 등에서 추정기의 수렴성과 관련된 제반 문제를 해결할 수 있는 중

요한 특징을 가지므로 여러 연구자들에 의해 확장 연구가 수행되어, 기존의 함수관측자[3], 미지입력관측자[4] 등에 근거한 FTO가 제안된 바 있다[5][6][7].

최근에는 유한시간 고장검출관측자와 이를 이용한 고장검출 및 보상에 관한 기초 연구가 이루어진 바 있다[8]. 본 논문에서는 감소차수관측자(reduced-order observer)에 근거한 FTO를 제안함에 목적을 둔다. 감소차수관측자[9]는 차수(dimension)가 전차수관측자보다 작고, 존재조건이 함수관측자보다 부드러운 적용의 관점에서 매우 유용하여 지속적인 연구가 진행되고 있으며, 최근에는 비선형계로의 확장[10,11,12], 적응형 감소차수관측자[13]의 제안, 로봇제어계에의 적용[14] 등, 이론적 확장과 응용연구가 다수 보고되었다. 그럼에도 불구하고 기본적인 감소차수관측자에 유한시간 수렴특성을 부여하기 위한 확장연구 연구결과는 아직 보고된 바 없는 것으로 파악된다. 따라서 적용되는 시스템의 요구에 따라 미리 결정된 수렴시간을 설계규격으로 도입하여 정확한 시간에 수렴이 보장되도록 설계 가능한 유한시간 감소차수관측자(FTROO: finite time reduced order observer)의 제안은 고성능 상태추정기법이 요구되는 실시간제어 및 고장검출시스템의 설계 및 실현상의 어려움을 해결해 준다는 관점에서 중요한 의미를 가진다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 FTROO의 기본 구성요소로 채택된 고전적인 감소차수관측자에 대하여 간단히 기술하고, 제3절에서는 감소차수관측자를 기반으로 유한시간 수렴특성을 갖는 FTROO를 제안하고, 제4절에서는 간단한 수치예를 들어 제안된 FTROO의 수렴특성을 기존의 감소차수관측자와 비교하여 유용성을 보이고, 마지막으로 결론을 기술한다.

\* 펠로우회원 : 단국대 공대 전자전기공학부 교수

E-mail : keesang@dankook.ac.kr

접수일자 : 2010년 1월 14일

최종완료 : 2010년 4월 12일

### 2. 감소차수 관측자

식(1)의 선형시불변계를 고려한다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{1a}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{1b}$$

위에서  $x(t) \in R^n$  은 상태벡터,  $u(t) \in R^m$  은 입력벡터,  $y(t) \in R^q$  는 출력벡터이다. 또한  $A, B, C$  는 각각  $(n, n), (n, m)$  및  $(q, n)$  차원의 행렬이며  $\text{rank}(C) = q$  라 가정한다. 감소차수 관측자의 기본 개념은 식(1)의 상태방정식을 출력방정식과 출력 외의 상태에 대한 방정식으로 분리하고 후자에 대한 관측자를 설계하는 것이다. 먼저 상태방정식의 분리를 위해 다음의 변환을 정의한다.

$$\bar{x} = Tx, \quad T = \begin{pmatrix} C \\ R \end{pmatrix} \tag{2}$$

여기서  $R$  은  $T^{-1}$  가 존재하도록 선정된  $(n-q, n)$  차원 행렬이다. 식(1)에 식(2)의 변환을 도입하면 식(3)이 얻어진다.

$$\dot{\bar{y}} = \overline{A_{11}}\bar{y} + \overline{A_{12}}\bar{x}_2 + \overline{B_1}u \tag{3a}$$

$$\dot{\bar{x}}_2 = \overline{A_{21}}\bar{y} + \overline{A_{22}}\bar{x}_2 + \overline{B_2}u \tag{3b}$$

식(3)에서  $\bar{y} = \bar{x}_1$  이며 입력과 출력정보의 가용성을 고려하여  $\bar{y} = \dot{\bar{y}} - \overline{A_{11}}\bar{y} - \overline{B_1}u$  와  $\bar{u} = \overline{A_{21}}\bar{y} + \overline{B_2}u$  를 정의하면 다음의 감소차수방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_2 &= \overline{A_{22}}\bar{x}_2 + \bar{u} \\ \bar{y} &= \overline{A_{12}}\bar{x}_2 \end{aligned} \tag{4}$$

식(4)에 대한 관측자 존재조건은 다음 정리에 기술된 바와 같다.

[정리 1] 식(1)의  $(A, C)$  가 가관측이면  $(\overline{A_{22}}, \overline{A_{12}})$  도 가관측이다[9].

이제 식(4)에 근거하여 얻어진  $(n-q)$  차원의 감소차수관측자는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 &= (\overline{A_{22}} - \overline{L} \overline{A_{12}}) \hat{x}_2 + \overline{L} \bar{y} + \bar{u} \\ &= (\overline{A_{22}} - \overline{L} \overline{A_{12}}) \hat{x}_2 + \overline{L} (\dot{\bar{y}} - \overline{A_{11}} \bar{y} - \overline{B_1} u) + (\overline{A_{21}} \bar{y} + \overline{B_2} u) \end{aligned} \tag{5}$$

식(5)에 포함된 출력의 도함수를 제거하기 위해  $\omega = \hat{x}_2 - \overline{L} \bar{y}$  를 도입하면 식(6)의 감소차수관측자가 얻어지며,

$$\dot{\omega} = (\overline{A_{22}} - \overline{L} \overline{A_{12}}) \omega + [(\overline{A_{22}} - \overline{L} \overline{A_{12}}) \overline{L} + (\overline{A_{21}} - \overline{L} \overline{A_{11}})] \bar{y} + (\overline{B_2} - \overline{L} \overline{B_1}) u \tag{6a}$$

$$\hat{x}_2 = \omega + \overline{L} \bar{y} \tag{6b}$$

원래 상태변수의 추정치는 역변환  $\hat{x} = T^{-1}(y', \hat{x}_2)'$  에 의해 구해진다. 추정오차를  $e = \bar{x}_2 - \hat{x}_2 = \bar{x}_2 - (\omega + \overline{L} \bar{y})$  로 정의하면

다음의 오차방정식이 얻어진다.

$$\dot{e} = (\overline{A_{22}} - \overline{L} \overline{A_{12}}) e \tag{7}$$

관측자 이득 ( $\overline{L}$ ) 은 행렬  $(\overline{A_{22}} - \overline{L} \overline{A_{12}})$  의 모든 고유치가 부의 실수부를 갖도록 결정되며, 이때  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$  인 점근적 수렴이 보장된다.

### 3. 유한시간 감소차수 관측자

제한된 FTROO는 식(1)의 계통에 대하여 서로 다른 고유치 집합을 갖도록 설계된 두개의 감소차수관측자 방정식과 이들이 제공하는 추정치들의 특별한 결합으로 구성된다. 우선 점근적 수렴특성을 가지는 두 개의 감소차수관측자는 다음과 같다.

$$\dot{\omega}_i = F_i \omega_i + J_i y + G_i u \tag{8a}$$

$$\hat{z}_i = \omega_i + \overline{L}_i y, \quad i = 1, 2 \tag{8b}$$

윗 식에서

$$\begin{aligned} F_i &= (\overline{A_{22}} - \overline{L}_i \overline{A_{12}}), J_i = (\overline{A_{22}} - \overline{L}_i \overline{A_{12}}) \overline{L}_i + (\overline{A_{21}} - \overline{L}_i \overline{A_{11}}), \\ G_i &= (\overline{B_2} - \overline{L}_i \overline{B_1}), \quad i = 1, 2 \end{aligned} \tag{9}$$

이고  $\hat{z}_i$  는  $i$  번째 관측자에 의해 제공되는  $\bar{x}_2$  의 추정치이다. 전개의 편의상 식(8)의 두식을 결합하면 식(10)과 같고

$$\dot{\bar{\omega}} = F \bar{\omega} + J y + G u \tag{10a}$$

$$\hat{z} = \bar{\omega} + \overline{L} y \tag{10b}$$

여기서  $\bar{\omega} = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{pmatrix}$  이고,  $F = \begin{pmatrix} F_1 & 0 \\ 0 & F_2 \end{pmatrix}$ ,  $J = \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \end{pmatrix}$ ,  $G = \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \end{pmatrix}$ ,  $\overline{L} = \begin{pmatrix} \overline{L}_1 \\ \overline{L}_2 \end{pmatrix}$

이다. 또한  $z = P \bar{x}_2$  로서  $P = \begin{pmatrix} I_{n-q} \\ 0 \end{pmatrix}$  이다.

이제 유한시간 감소차수관측자의 추정치  $\bar{q}(t)$  는 식(11)로 주어지며,

$$\bar{q}(t) = K[\hat{z}(t) - e^{FD} \hat{z}(t-D)] \tag{11}$$

$$K = (I_{n-q} : 0_{n-q, n-q}) (P^{-1} e^{FD} P)^{-1} \tag{12}$$

원래 전체 상태변수의 추정치는 식(2)에 대한 역변환  $\hat{x} = T^{-1}(y', \bar{q})'$  에 의해 구해진다. 식(10)(11) 및 (12)로 주어진 유한시간 감소차수 관측자의 특성은 다음 정리에 기술된 바와 같다.

[정리 2] (i) 식(10)의 행렬  $F$  내  $F_i$ ,  $i = 1, 2$  의 모든 고유치가 안정영역에 존재하고 (ii)  $\det[P^{-1} e^{FD} P] \neq 0$  가 만족되도록 이득행렬  $\overline{L}_i$ ,  $i = 1, 2$  이 선정되면 식(11)의  $\bar{q}(t)$  는 미리 정해진 수렴시간( $D$ ) 내에  $\bar{x}_2$  에 수렴한다.

[증명]: 우선 추정오차를 식(13)로 정의하면

$$e = (\hat{z} - z) = (\bar{\omega} + \overline{L} y) - P \bar{x}_2 \tag{13}$$

식(3)과 식(10)로부터 다음의 오차방정식이 구해진다.

$$\begin{aligned} (\dot{\hat{z}} - \dot{z}) &= (\dot{\bar{\omega}} + \bar{L}\dot{y}) - \dot{P}\bar{x}_2 \\ &= \bar{F}\bar{\omega} + \bar{J}y + \bar{G}u + \bar{L}(A_{11}y + A_{12}x_2 + B_1u) \\ &\quad - P(A_{21}y + A_{22}x_2 + B_2u) \end{aligned} \quad (14)$$

위식에 식(9)(10)의 파라미터 행렬을 대입하고 정리한 결과는 다음과 같다.

$$(\dot{\hat{z}} - \dot{z}) = F(\hat{z} - z) \quad (15)$$

유한시간 감소차수관측자의 오차해석은 궁극적으로 식(11)로 주어진  $\bar{q}(t)$ 의 수렴특성에 관한 것이므로 이를 위해 다음의 시간 구간을 고려한다.

(i) 시간구간 ( $t_0 < t \leq t_0 + D$ ) : 이 구간에서 식(15)의 해와  $\hat{z}(t-D)$ 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{z}(t) &= z(t) + e^{F(t-t_0)}(\hat{z}(t_0) - z(t_0)) \\ &= Px_2(t) + e^{F(t-t_0)}(\hat{z}(t_0) - Px_2(t_0)) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\hat{z}(t-D) = \hat{z}(t_0) = \widehat{Px}_2(t_0) \quad (17)$$

이를 FTROO의 추정식인 식(11)에 대입하면

$$\begin{aligned} \bar{q}(t) &= K[\hat{z}(t) - e^{FD}\hat{z}(t-D)] = K[\hat{z}(t) - e^{FD}\hat{z}(t_0)] \\ &= KP\bar{x}_2(t) + Ke^{F(t-t_0)}(\hat{z}(t_0) - Px_2(t_0)) - Ke^{FD}\hat{z}(t_0) \end{aligned} \quad (18)$$

이식에  $\hat{z}(t_0) = \widehat{Px}_2(t_0)$ 와 식(12)에서 얻어지는 식(19)의 관계를 대입하면

$$KP = I_{n-q}, \quad Ke^{FD}P = 0_{n-q, n-q} \quad (19)$$

$$\bar{q}(t) = \bar{x}_2(t) + Ke^{F(t-t_0)}P(\widehat{x}_2(t_0) - \bar{x}_2(t_0)) \quad (20)$$

(ii) 시간 구간 ( $t \geq t_0 + D$ ) : 식(16)로부터 이 구간에서의  $\hat{z}(t-D)$ 를 구하면 식(21)과 같다

$$\hat{z}(t-D) = \bar{Px}_2(t-D) + e^{F(t-D-t_0)}P(\widehat{x}_2(t_0) - \bar{x}_2(t_0)) \quad (21)$$

이를 FTROO의 추정식인 (11)에 대입하고 식(19)을 적용한 결과는 식(22)와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{q}(t) &= K[\hat{z}(t) - e^{FD}\hat{z}(t-D)] \\ &= K[P\bar{x}_2(t) + e^{F(t-t_0)}P(\widehat{x}_2(t_0) - \bar{x}_2(t_0))] \\ &\quad - Ke^{FD}[P\bar{x}_2(t-D) + e^{F(t-D-t_0)}P(\widehat{x}_2(t_0) - \bar{x}_2(t_0))] \\ &= KP\bar{x}_2(t) + Ke^{F(t-t_0)}P(\widehat{x}_2(t_0) - \bar{x}_2(t_0)) \\ &\quad - Ke^{FD}P\bar{x}_2(t-D) - Ke^{F(t-t_0)}P(\widehat{x}_2(t_0) - \bar{x}_2(t_0)) \\ &= \bar{x}_2(t) \quad \square \end{aligned} \quad (22)$$

위의 증명은  $\lim_{t \rightarrow t_0+D} \bar{q}(t) \rightarrow \bar{x}_2(t)$  및  $\bar{q}(t) = \bar{x}_2(t) \forall t \geq t_0 + D$  임을 확인시켜준다. 그리고 위 정리의 조건(ii)는 식(10)의 이득( $\bar{L}_1, \bar{L}_2$ )를 식(23)가 만족하도록 선정함으로써 성립된다 [2].

$$Re \lambda_\alpha(F_2) < \sigma < Re \lambda_\alpha(F_1), \quad \alpha = 1, 2, \dots, n-q \quad (23)$$

#### 4. 수치예

제안된 FTROO의 성능을 검토하기 위하여 아래와 같은 파라미터 행렬을 가진 식(1)의 상태방정식을 고려한다.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -4.5 & -16.8 & 0 \\ 0 & 46.9 & 55.3 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.8 \\ -12.4 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

이 방정식은 잘 알려진 역진자제어계의 비선형방정식을 평형점(up-right)에서 선형화한 결과이다[8]. 이 시스템은  $C = [I_2 : O]$ 의 형태이므로 변환이 불필요하다. 두 개의 감소차수관측자의 고유치는 각각  $\{-1, -2\}$ 와  $\{-3, -4\}$ 로 임의 선정하였으며 이때 두 관측자 이득( $\bar{L}_i, i=1,2$ )은 다음과 같고, 설계파라미터인 수렴시간( $D$ )은 0.4 초로 설정하였다.

$$\bar{L}_1 = \begin{pmatrix} -15.8 & 0 \\ 55.3 & 2.0 \end{pmatrix}, \quad \bar{L}_2 = \begin{pmatrix} -13.8 & 0 \\ 55.3 & 4.0 \end{pmatrix}$$

또한 제어계의 안정화를 위해 다음 이득에 의해 결정되는 상태배환 제어입력을 투입하였다.

$$K = (-65.3488 \ -130.3172 \ -43.5897 \ -17.971)$$

그림 1은 제안된 FTROO와 고전적인 감소차수관측자의 추정성능을 비교, 분석하기 위한 시뮬레이션 결과이다. 비교를 위한 감소차수관측자로는 FTROO 구성에 도입된 관측자 중  $\{-3, -4\}$ 인 고유치를 가진 것을 사용하였다. 시뮬레이션 시 관측자는 실질적 적용을 고려하여 Euler 방법에 의해 구한 이산치 방정식으로 구현하였다. 그림 1의 (a)(b)는 각각 상태변수  $x_3$ (각속도)와  $x_4$ (카트속도)에 대한 추정 결과로서 실선은 실제값, 점선은 FTROO의 추정치, 절선은 감소차수관측자에 의한 추정치를 나타낸다. 그림 1의 (c)(d)는  $x_3$ 와  $x_4$ 에 대한 추정 오차로서 실선은 FTROO의 추정오차, 절선은 감소차수관측자의 추정오차를 나타내며 유한시간 수렴 특성을 상세히 보이기 위해 [0-2]sec 구간 만을 도시하였다. 시뮬레이션 결과는 요소관측자로 도입된 감소차수관측자의 수렴속도가 매우 느림에도 불구하고, 제안된 FTROO가 설계규격으로 주어진 수렴시간(0.4 sec)에 정확하게 수렴함을 보여준다. 그림 1(c)에서 수렴시간인  $t=0.4$ 초에 나타난 급격한 오차변화는 구간( $0 \leq t < D$ )에서 식(17)과 같이 초기 추정치(일반적으로 영으로 세팅)로 고정되었던  $\hat{z}(t-D)$ 이 이 시점에서부터 갱신(update)되기 때문에 나타나는 현상이다.

[주1] 기존의 감소차수관측자의 경우, 고유치를 매우 큰 부의 실수로 할당함으로써 수렴속도를 개선할 수는 있으나 이 경우에는 매우 큰 관측자 이득으로 인하여 출력잡음 등에 대한 특성이 악화된다. 반면 제안된 유한시간 감소차수관측자는 요소관측자의 안정도가 보장되는 한 극점 위치에 무관하게 수렴시간을 할당할 수 있다.

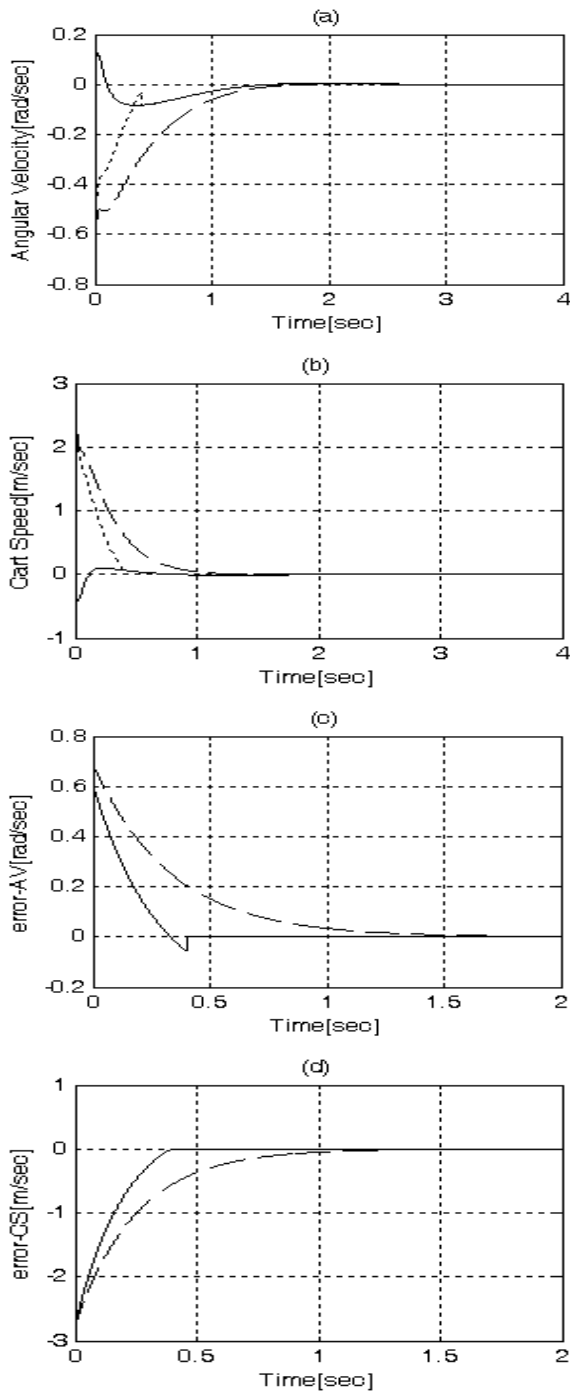


그림 1 제안된 FTROO와 고전적인 ROO의 추정특성 비교  
 Fig. 1 Comparison of estimation results of FTROO and conventional ROO

5. 결 론

본 논문에서는 Luenberger에 의해 제안된 세가지 유형의 관측자인 전차수관측자, 감소차수관측자 및 상태함수관측자 [9] 중, 유한시간 수렴 관측자로의 확장연구가 이루어지지 않은 감소차수관측자에 근거한 유한시간 감소차수관측자를 제안하고 수치예를 들어 그 수렴특성 확인하였다. 제안된 결

과는 다양한 구조의 감소차수관측자의 유한시간 수렴특성 확보를 위해 도입될 수 있으며, 설계자에 의해 결정된 수렴 시간특성을 가지는 관측자가 요구되는 실시간 고장검출식별 시스템 및 이를 포함한 고장허용제어계 등의 응용 연구에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 유한시간 관측자의 실질적 적용을 위해서는 외란 및 파라미터 변화 등에 대한 강인성 해석과 확보가 매우 중요하며 이를 위한 후속 연구를 진행할 예정이다.

**감사의 글**

이 논문은 2009학년도 단국대학교 대학연구비(연구년) 지원에 의해 이루어진 연구 결과임.

**참 고 문 헌**

- [1] J. O'Reilly, Observers for linear systems, Academic Press, 1983.
- [2] R. Engel and G. Kreisselmeier, "A continuous-time observer which converges in finite time," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.47, 2002, pp.1202-1204.
- [3] M. Darouach, "Existence and design of functional observers for linear systems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.45, 2000, pp.940-943.
- [4] M. Hou and P.C. Muller, "Design of observers for linear systems with unknown inputs," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.37, No.6, 1992, pp.871-875.
- [5] T. Raff et.al., "A finite time functional observer for linear systems," Proceedings of the 44th IEEE conference on Decision and Control, Seville, Spain, Dec.12-15, 2005, pp.7198-7203.
- [6] J. Feng et. al., "Finite-time functional observer for descriptor systems," International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol.7, No.3, 2009, pp.341-347.
- [7] T. Raff, F. Lachner, F. Allgower, "A finite time unknown input observer for linear systems," 2006 14th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2006, pp.1-5,
- [8] 이기상, "유한시간 수렴 고장검출관측자를 이용한 고장 검출식별 및 보상기법," 전기학회논문지, 제58권, 9호, 2009, pp.1802-1808.
- [9] D. G. Luenberger, "Introduction to observers," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.16, No.6, 1971, pp.596-602
- [10] V. Sundarapandian, "Reduced order observer design for nonlinear systems," Applied Mathematics Letters 19, 2006, pp.936-941.
- [11] G. Bartolini and E. Punta, "Reduced order observer and chattering reduction for sliding mode control of

- nonlinear systems," Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, P.R.China, December 2009, pp.8411-8416.
- [12] Z. Ding, "Reduced order observer design for nonlinear systems with control applications," Proceedings of the 2009 American Control Conference, St. Louis, MO, USA, June 10-12, pp.5303-5308.
- [13] J. D. Boskovic and N. Knoebel, "Adaptive control using reduced order observers," Proceedings of the 2008 American Control Conference, Seattle, Washington USA, June 11-13, pp.5156-5161.
- [14] M. Mallon et.al., "Friction compensation in a controlled one-link robot using a reduced order observer," IEEE Transactions on Control System Technology, Vol.14, No.2, 2006, pp.374-383.

---

## 저 자 소 개



### 이 기 상 (李 起 常)

1952년 10월 24일생.

1978년 고려대 전기공학과 졸업(학사).

1984년 고려대 대학원 전기공학과 졸업  
(박사).

1995년~96년 Univ. of Washington 방문  
교수

2005년~08년 단국대학교 정보통신대학원장

1983년~현재 단국대 전자전기공학부 교수

Tel : 031) 8005-3605

Fax : 031) 8005-3622

E-mail : keesang@dku.edu