

유한시간 수렴 고장검출관측자를 이용한 고장검출식별 및 보상기법

논 문

58-9-24

A Fault Detection Isolation and Compensation Scheme using Finite-time Fault Detection Observers

이 기 상*
(Kee-Sang Lee)

Abstract - A fault detection observer with finite time convergence characteristics(FT_FDO) is proposed and applied to a fault detection isolation system for a dynamic control system. The FT_FDO is a kind of dual state-observer scheme that provides with the state estimates insensitive to a specified fault and the corresponding fault estimate. The state estimates are processed to get the residual that will be logically compared with other residuals to detect and isolate the fault of interest, and the fault estimate may be used for fault compensation. The FDIS employing the FT_FDOs can be considered to be a multiple observer schemes(MOS) in which FT_FDOs are parallelly driven to generate a set of residuals to be compared each other. Due to the finite time convergence characteristics of the FT_FDO, the predetermined detection delay can be considered in the design stage of FDIS so that any fault of interest can be detected and identified in that time. It evidently resolves a well known difficulty of threshold selection owing to the transient responses of the fault detection observers(FDO) employed in FDIS. An FDIS is constructed for instruments(2-sensor, 1-actuator) in an inverted pendulum control system, and simulations are performed to show the performance of the FDIS and fault tolerant control system.

Key Words : Fault detection observer, Multiple observer scheme, Fault tolerant control

1. 서 론

고장검출식별(fault detection isolation: FDI)기법은 산업용 공정의 대형화 및 복잡성의 증가로 인하여 시스템 신뢰도의 달성이 어려워지면서 신뢰도 확보의 핵심기술로 주목을 받게 되었으며 각종 항공시스템, 원자력 발전소 등과 같이 고도의 안전성과 신뢰성이 요구되는 첨단시스템을 대상으로 개발되어왔다[1,2]. 이제까지 제안 발전된 FDI기법은 수학적 모델에 근거한 해석적 중복기법(analytic redundancy method: ARM)기법[3,4], 운전데이터와 패턴 분류기법을 활용한 데이터기반 기법[5] 등으로 분류된다. 특히 ARM기법은 공정모델의 형태와 상태추정기법에 따라 다양한 형태의 FDIS설계에 도입될 수 있어 80년대 후반부터 매우 많은 연구가 진행되었으며, 고장검출필터, 고장진단관측자, 다중관측자구조(multiple observer scheme: MOS)의 FDIS 등의 기법이 제안 발전되었다[6-7]. 그 중, MOS형 FDIS는 다중의 상태추정기(상태관측자, Kalman Filter)가 제공하는 잔차를 단순 논리에 의해 비교함으로써 고장검출식별이 가능하며, 잔차발생 기구가 제공하는 정보의 다중성(redundancy)으로 인하여 고장정보의 획득이 가능하다는 특징을 가지고 있어

다수의 적용사례가 보고된 바 있다[1,8,9].

그러나 지금까지 제안된 모든 MOS형 FDIS는 잔차발생을 위해 도입되는 상태추정기가 $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{x}(t) = x(t)$ 인 수렴특성을 가지므로 과도특성으로 인하여 고장 검출논리의 핵심요소인 임계치 결정과 검출지연시간의 최소화가 어렵다는 본질적인 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 적응임계치(adaptive threshold)등의 방법이 제안되었지만[10], 이들은 FDIS의 주요 구성요소를 설계한 후, 검출식별성능의 개선을 위해 시행착오를 통하여 임계치를 포함한 파라미터 및 식별알리즘을 조정하는 방법이므로 본질적인 해결방안이라 할 수는 없다. MOS형 FDIS의 성능 개선을 위한 또 다른 고려 사항은 고장의 검출식별과 함께 고장보상에 직접 사용할 수 있는 구체적인 고장정보의 제공이 가능하도록 설계되어야한다는 점이다. 고장정보의 제공기능은 제어시스템의 능동적 고장허용제어를 가능하게 해준다는 관점에서 중요한 의미를 가진다.

본 논문에서는 위에 언급한 MOS구조 FDIS의 적용상 문제점을 본질적인 관점에서 해결하기 위해, 최근 제안된 유한시간 수렴특성을 가진 관측자 개념[11]을 활용하여, 설계자에 의해 지정된 수렴시간(T) 내에 수렴하는, 즉, $\lim_{t \rightarrow T} \hat{x}(t) = x(t)$ 및 $\hat{x}(t) = x(t) \forall t \geq T$ 인 특성을 가지는 동시에 지정된 특정고장의 추정치를 제공하는 유한시간 고장검출관측자(FT_FDO; finite-time fault detection observer)를 제안하고 이를 이용하여 규정된 검출지연시간 내에 고장검출식

* 펠로우회원 : 단국대학교 전자전기공학부 교수 · 공박

E-mail : keesang@dku.edu

접수일자 : 2009년 6월 2일

최종완료 : 2009년 6월 26일

별을 수행할 수 있는 FDIS를 제안한 다음, 적용연구를 통하여 그 실질적 적용가능성을 검토한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 유한시간 수렴특성을 갖는 FT_FDO를 제안하고, 제3절에서는 FT_FDO를 도입한 고장검출시스템의 구성과 검출식별론리 및 고장보상방법에 대하여 기술하며, 제4절에서는 제안된 기법을 역진자제어계의 센서 및 구동장치 고장검출식별과 능동적 고장허용제어계[12] 구성에 적용하고 그 성능을 분석 검토하여 제안 사항의 타당성을 입증하며, 마지막으로 결론을 기술한다.

2. 유한시간 수렴 고장검출관측자

2.1 고전적인 고장검출관측자

고장검출식별문제를 다루기 위해 더하기형 고장을 포함한 식(1)의 선형계를 고려한다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D_a f_a(t) \quad (1a)$$

$$y(t) = Cx(t) + D_s f_s(t) \quad (1b)$$

위에서 $x(t) \in R^n$ 은 상태벡터, $u(t) \in R^m$ 은 입력벡터, $y(t) \in R^q$ 는 출력벡터, $f_a(t) \in R^{l_a}$ 와 $f_s(t) \in R^{l_s}$ 는 프로세스고장 및 센서고장벡터이다. 또한 A, B, C 는 각각 $(n, n), (n, m)$ 및 (q, n) 차원의 행렬이며, D_a, D_s 는 각각 $(n, l_a), (q, l_s)$ 차원의 행렬이다. 본 절에 기술하는 고장검출관측자(fault detection observer: FDO)는 특정 고장의 검출식별이 가능하도록 지정된 고장이 발생한 경우에 상태변수와 해당 고장의 추정치를 제공하며, 고장(외란) 모델링에 근거하여 설계되는 관측자군에 속한다[13]. 전개의 편의상, 검출식별 대상 고장은 전과 특성이 연속적이며 비교적 느리게 진행되는 시간특성을 가진다고 가정한다. 이 가정은 대부분의 조기고장(incipient fault)과 바이어스형 고장 등에 적용되며, 이 가정에 부합되는 외란, 고장 등은 식(2)의 미분방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{w}_j(t) &= F_j w_j(t) + E_j \delta(t) \\ f_j(t) &= H_j w_j(t) \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서 $w_j \in R^b$ 이며 f_j 는 프로세스/센서 고장 중 j 번째 고장임을 의미하며, $\delta(t)$ 의 항은 초기치에만 영향을 주므로 일반적으로 생략된다. 이제 지정된 고장이 발생한 경우에 정확한 상태추정치와 해당 고장의 추정치를 제공하는 FDO 설계의 첫 단계는 지정된 고장을 포함한 상태방정식과 고장 모델을 결합하여 확장 시스템을 구성하는 것이다. 우선 j 번째 프로세스고장을 포함한 시스템방정식은 식(3a)와 같고, 여기서 d_a^j 는 D_a 의 j 번째 열이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + d_a^j f_j(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3a)$$

마찬가지로 j 번째 센서고장을 고려하면 식(3b)의 모델이 얻어지며, 여기서 d_s^j 는 D_s 의 j 번째 열이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + d_s^j f_j(t) \end{aligned} \quad (3b)$$

이제 식(2)의 고장모델과 식(3a)/(3b)의 시스템모델을 결합하면 식(4)의 확장시스템이 얻어진다.

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A}\underline{x}(t) + \underline{B}u(t) \quad (4)$$

$$y(t) = \underline{C}\underline{x}(t)$$

여기서 $\underline{x} = (x^T; w_j^T)^T$ 이며, 대상 고장을 고려한 시스템 파라미터는 다음과 같다.

- j 번째 프로세스 고장을 고려한 경우:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} A & d_a^j H_j \\ 0 & F_j \end{bmatrix}, \underline{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \underline{C} = [C; 0] \quad (5a)$$

- j 번째 센서 고장을 고려한 경우:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & F_j \end{bmatrix}, \underline{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \underline{C} = [C; d_s^j H_j] \quad (5b)$$

식(4)(5)의 확장시스템이 얻어진다면, 이후의 FDO 설계문제는 일반적인 관측자 설계 과정과 동일하다. 식(4)(5)에서 $(\underline{A}, \underline{C})$ 가 가관측이면, 식(6)의 FDO가 설계된다.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \underline{A}\hat{x}(t) + \underline{B}u(t) + \underline{L}^j(y(t) - \hat{y}^j(t)) \\ \hat{y}^j(t) = \underline{C}\hat{x}(t) \end{cases} \quad (6)$$

여기서, \hat{y}^j 는 j 번째 고장을 고려한 FDO에 의해 제공되는 추정 출력이다. 상태추정편차를 $\tilde{x} = x - \hat{x}$ 라 하면 식(7)의 편차방정식이 얻어진다.

$$\dot{\tilde{x}}(t) = (\underline{A} - \underline{L}^j \underline{C})\tilde{x}(t) \quad (7)$$

이 FDO는 정상동작시 및 j 번째 고장 발생시 정확한 추정 결과를 제공한다. 즉,

IF j th fault occurred,

$$\text{Then } \begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} r_j(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - \hat{y}^j(t)) = 0 \\ \hat{f}_j = H_j \hat{w}_j \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

또한, j 번째 고장 이외의 고장에 대하여 민감하며 $\lim_{t \rightarrow \infty} r_j(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - \hat{y}^j(t)) \neq 0$ 인 특성을 가진다.

2.2 제안된 고장검출관측자

본절에서 제안하는 유한시간 수렴 특성을 가진 고장검출관측자(FT_FDO)는 2.1절의 고전적인 FDO와 최근 제안된 유한시간 수렴특성을 갖는 관측자 개념[11]을 결합한 결과이다. 유한시간(τ_c) 수렴특성을 가진 관측자의 설계 개념은 서로 다른 고유치를 가지는 동일구조의 상태관측자 쌍(pair)을 설계하고, 이들로부터 제공되는 현재(t) 및 $(t - \tau_c)$ 에서의 상태추정벡터 쌍의 특별한 결합을 FT_FDO의 상태추정벡터로 설정한 방식이다. 식(1)의 선형계에 대한 FT_FDO를 기술하기 위하여, 우선 식(9)의 관측자 쌍을 설계한다. 모든 파라미터와 가정은 2.1절과 동일하다고 가정한다.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \underline{A}\hat{x}(t) + \underline{B}u(t) + \underline{L}_i^j(y(t) - \hat{y}^j(t)) \\ \hat{y}^j(t) = \underline{C}\hat{x}(t) \end{cases}, i=1,2 \quad (9)$$

전개의 편의 상, 식(9)의 표현을 다음과 같이 변경한다.

$$\dot{z}_i^j = F_i^j z_i^j + L_i^j y + G_i^j u$$

$$\text{여기서, } F_i^j = (A - L_i^j C), G_i^j = B, i = 1, 2 \quad (10)$$

이제 FT_FDO는 식(10)에 주어진 두 관측자의 결합인 식(11)-(13)으로 표현된다.

$$\dot{\bar{z}}^j = F^j \bar{z}^j + L^j y + G^j u \quad (11a)$$

$$q_j(t) = K_j [\bar{z}^j(t) - e^{F^j \tau_c} \bar{z}^j(t - \tau_c)] \quad (11b)$$

$$\hat{y}^j(t) = Q_j(t) \quad (11c)$$

여기서,

$$\bar{z}^j = \begin{bmatrix} z_1^j \\ z_2^j \end{bmatrix}, F^j = \begin{bmatrix} F_1^j & 0 \\ 0 & F_2^j \end{bmatrix}, L^j = \begin{bmatrix} L_1^j \\ L_2^j \end{bmatrix}, G^j = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$K_j = [I_{n+\beta}, 0_{n+\beta, n+\beta}] [P_j e^{F^j \tau_c} P_j]^{-1}, P_j = \begin{bmatrix} I_{n+\beta} \\ I_{n+\beta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

이며, τ_c 는 설계자에 의해 결정된 추정치의 수렴시간이다. 이 FT_FDO는 고전적인 FDO와 동일하게 설계시에 j 번째 고장을 고려하였으므로 정상동작시 및 j 번째 고장 발생시 실제 값에 수렴하는 추정치를 제공한다는 점에서 2.1절의 고전적인 FDO와 유사하지만 규정된 시간(τ_c)내에 수렴한다는 특징을 가진다. 즉,

In cases of no fault OR j th fault,

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \tau_c} r_j(t) = \lim_{t \rightarrow \tau_c} (y(t) - \hat{y}^j(t)) \rightarrow 0, t_o < t \leq t_o + \tau_c \\ r_j(t) = (y(t) - \hat{y}^j(t)) = 0, t \geq t_o + \tau_c \end{cases} \quad (14)$$

정상동작 및 j 번째 고장은 FT_FDO의 수렴 이후인 $t \geq t_o + \tau_c$ 에서 고장 추정 결과에 의해 식별할 수 있다.

$$\begin{cases} \hat{f}_j = H_j \hat{w}_j \neq 0, \text{ for } j\text{th fault} \\ \hat{f}_j = H_j \hat{w}_j = 0, \text{ for no fault} \end{cases} \quad (15)$$

이 FT_FDO는 j 번째 이외의 고장에 대하여 $r_j(t) = y(t) - \hat{y}^j(t) \neq 0$ 인 특성을 가진다. 이 FT_FDO의 수렴성은 다음 정리에 기술한 바와 같다.

[정리] 식(11)-(13)에서 L^j 와 τ_c 가 (i) F^j 의 모든 고유치가 안정영역에 존재하고 (ii) $\det[P_j e^{F^j \tau_c} P_j] \neq 0$ 인 두가지 조건을 만족하도록 선정되면, 식(11)-(13)은 식(4)(5)의 확장시스템에 대한 유한시간 수렴 관측자(FT_FDO)이며, 그 상태추정치 $q_j(t)$ 는 미리 정해진 시간(τ_c)내에 $x(t)$ 에 수렴한다.

[증명]: 증명 과정은 모든 FT_FDO에 대하여 동일하므로 전개과정에서 윗첨자 j 를 생략한다. 우선 식(9)(10)(11a)로부터 구한 편차방정식은 식(16)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\bar{z} - P\bar{x}) &= F\bar{z} + Ly + Gu - P(Ax + Bu) \\ &= F(\bar{z} - P\bar{x}) + (FP - PA + LC)\bar{x} + (G - PB)u \\ &= F(\bar{z} - P\bar{x}) \end{aligned} \quad (16)$$

(i) 시간구간 ($t_o < t \leq t_o + \tau_c$): 이 구간에서 식(16)의 해와 $\bar{z}(t - \tau_c)$ 는 각각 다음과 같다.

$$\bar{z}(t) = P\bar{x}(t) + e^{F(t-t_o)} [\bar{z}(t_o) - P\bar{x}(t_o)] \quad (17)$$

$$\bar{z}(t - \tau_c) = \bar{z}(t_o) = P\hat{x}(t_o) \quad (18)$$

이를 FT_FDO의 추정식인 (11b)에 대입하면,

$$\begin{aligned} q(t) &= K[\bar{z}(t) - e^{F\tau_c} \bar{z}(t - \tau_c)] = K[\bar{z}(t) - e^{F\tau_c} \bar{z}(t_o)] \\ &= K[P\bar{x}(t) + e^{F(t-t_o)} (\bar{z}(t_o) - P\bar{x}(t_o)) - e^{F\tau_c} \bar{z}(t_o)] \end{aligned} \quad (19)$$

이식에 $\bar{z}(t_o) = P\hat{x}(t_o)$ 와 식(13)에서 얻어지는 식(20)의 관계를 대입하면

$$KP = I_{n+\beta}, Ke^{F\tau_c} P = 0_{n+\beta, n+\beta} \quad (20)$$

$$q(t) = \bar{x}(t) + Ke^{F(t-t_o)} P(\hat{x}(t_o) - \bar{x}(t_o)) \quad (21)$$

(ii) 시간 구간 ($t \geq t_o + \tau_c$): 이 구간에서

$$\bar{z}(t - \tau_c) = P\bar{x}(t - \tau_c) + e^{F(t-\tau_c-t_o)} P(\hat{x}(t_o) - \bar{x}(t_o)) \quad (22)$$

이므로 이를 FT_FDO의 추정식인 (11b)에 대입하고 식(20)을 적용하면 식(23)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} q(t) &= K[\bar{z}(t) - e^{F\tau_c} \bar{z}(t - \tau_c)] \\ &= K[P\bar{x}(t) + e^{F(t-t_o)} P(\hat{x}(t_o) - \bar{x}(t_o))] \\ &\quad - Ke^{F\tau_c} [P\bar{x}(t - \tau_c) + e^{F(t-\tau_c-t_o)} P(\hat{x}(t_o) - \bar{x}(t_o))] \\ &= KP\bar{x}(t) + Ke^{F(t-t_o)} P(\hat{x}(t_o) - \bar{x}(t_o)) \\ &\quad - Ke^{F\tau_c} P\bar{x}(t - \tau_c) - Ke^{F(t-t_o)} P(\hat{x}(t_o) - \bar{x}(t_o)) = \bar{x}(t) \end{aligned} \quad (23)$$

□

또한 위 정리의 조건(ii)는 식(12)의 이득(L)을 식(24)를 만족하도록 선정함으로써 거의 모든 수렴시간(τ_c)에 대하여 성립된다[11].

$$Re \lambda_\alpha(F_2) < \sigma < Re \lambda_\alpha(F_1), \alpha = 1, 2, \dots, n + \beta \quad (24)$$

3. FT_FDO를 이용한 FDIS와 고장보상

3.1 FDIS의 구성과 고장검출식별 논리

전절에 기술한 FT_FDO는 단지 한개의 고장에 대하여 둔감한 특성을 가지므로, 이를 이용하여 DOS(dedicated observer scheme) 구조의 FDIS[9] 설계가 가능하다. 이 구조의 FDIS는 각 관측자와 고장이 일대일 대응되는 방식으로 검출대상과 같은 개수(l 개)의 검출관측자가 필요하다. 고장검출식별은 이들 검출관측자를 병렬적으로 구동하고 l 개의 (r_j, \hat{f}_j) 쌍에 대한 논리적 검사를 시행하여 식(14)(15)의 성질을 갖는 잔차쌍을 밝혀내는 과정이다. 고장검출식별을 위한 잔차와 고장추정치는 각각 식(25)(26)과 같다.

$$r_j(t) = \|y(t) - \hat{y}^j(t)\|, j = 1, \dots, l \quad (25)$$

$$\hat{f}_j = H_j \hat{w}_j, j = 1, \dots, l \quad (26)$$

우선 고장의 검출은 r_j 의 합 $rs = \sum_{j=1}^l r_j$ 에 대한 임계치 검사에 의해 수행된다. 일단, $rs > T_{rs}$ 이면 고장이 선언되며 고장식별을 수행한다. 본 절에서 제안된 고장검출식별 논리는 다음과 같다.

IF ($rs > T_{rs}$) then fault !
 $rmin = \min(r_1, r_2, \dots, r_l)$
 IF ($rmin = r_j$) & ($\hat{f}_j(t) \geq Th_{f_j}$) then jth fault

위의 고장식별논리는 FT_FDO(j)가 j 번째 고장에 둔감하도록 설계되어 다른 FT_FDO(i), ($i \neq j$) 보다 작은 간차를 가지는 동시에 그 고장의 추정기능을 갖는다는 사실에 근거한다.

3.2 고장보상

폐환제어계의 경우, FDIS의 도입은 발생 고장을 조기에 검출식별하고 가능한 한 원래의 제어계성능을 유지, 복원함에 중요한 목적이 있다. 본 논문에서 채택한 FDIS는 식(25)의 잔차와 각 FT_FDO가 제공하는 식(26)의 고장추정치에 근거하여 고장검출식별을 수행하기 때문에, 식별된 고장에 대응되는 FT_FDO가 제공하는 정보를 이용하여 고장효과를 보상함으로써 고장허용제어계를 구현할 수 있다[12]. 먼저, 센서고장의 보상은 고장 이전에 제어입력산출에 도입된 상태추정치 대신 식별된 고장에 대응되는 FT_FDO가 제공하는 상태추정치를 제어입력산출에 도입함으로써 완성된다. 또한 구동장치의 고장은 고장식별 이후 제어입력에 구동장치고장에 둔감한 FT_FDO가 제공하는 상태추정치를 도입하고, 동시에 산출된 제어입력에 고장추정치를 가감함으로써 보상된다.

4. 적용 연구

제안한 고장 검출식별 기법의 성능을 검증하기 위하여 역진자 제어계에 대한 센서 고장검출식별 및 보상 시스템을 설계하였다. 역진자 시스템은 식(27)의 비선형 방정식으로 표현된다[14]. 이 식에서 α 는 진자 각도, $\dot{\alpha}$ 는 각속도, x 는 카트 위치, \dot{x} 는 카트속도이다.

$$\begin{aligned} (m_p + m_c)\ddot{x}(t) + m_p \ddot{\alpha} l_p \cos(\alpha) - m_p \dot{\alpha}^2 l_p \sin(\alpha) &= F \\ m_p l_p \cos(\alpha) \ddot{x} - m_p l_p \sin(\alpha) \dot{\alpha} \dot{x} + m_p \ddot{\alpha} l_p^2 - m_p g l_p \sin(\alpha) &= 0 \end{aligned} \quad (27)$$

상태변수와 출력변수를 식(28)과 같이 정의하여 상태방정식을 구하여 평형점(up-right)에서 선형화하고,

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]' = [x \ \dot{x} \ \alpha \ \dot{\alpha}]' \quad (28a)$$

$$y = [y_1 \ y_2 \ y_3]' = [x_1 \ x_2 \ x_3]' \quad (28b)$$

입력 F 를 직류전동기의 입력전압으로 변경하면 식(29)의 상태방정식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{m_p g}{m_c} & -\frac{K_m^2 K_g^2}{m_c R r^2} & 0 \\ 0 & \frac{(m_p + m_c)g}{m_c l_p} & \frac{K_m^2 K_g^2}{m_c l_p R r^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_m K_g}{m_c R r} \\ -\frac{K_m K_g}{m_c l_p R r} \end{bmatrix} V_m \quad (29)$$

식(29)에 [14]에 주어진 파라미터 값을 대입하면 다음의 파라미터 행렬이 얻어진다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -4.5 & -16.8 & 0 \\ 0 & 46.9 & 55.3 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.8 \\ -12.4 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

제안된 FT_FDO를 이용한 FDIS의 설계 시, 검출대상 고장은 3개의 출력센서 중 2개의 고장($y_2 + f_{s1}$, $y_3 + f_{s2}$)과 구동장치고장($v_m + f_a$)으로 선정하였다. 각 고장에 대한 FT_FDO는 식(10)-(13)으로 기술된 바와 같이 두 고장검출관측자의 결합이다. 고장의 형태를 바이어스 형으로 가정하여 각각 5차의 확장계통을 구성하였으며, 각 관측자의 극점은 다음과 같이 선정하였다.

$$\begin{aligned} \lambda(F_1^j) &= [-1 - 1.5 - 2 - 2.5 - 3], \\ \lambda(F_2^j) &= [-4 - 4.5 - 5 - 5.5 - 6], \quad \forall j=1,2,3 \end{aligned} \quad (31)$$

FT_FDO의 수렴특성은 2절에 기술한 바와 같이 위의 관측자 극점보다는 설계자에 의해 선택된 수렴시간(τ_c)에 의해 결정되며, 본 절의 응용에서는 모든 FT_FDO에 대하여 $\tau_c = 0.2(\text{sec})$ 로 동일하게 설정하였다. 역진자계는 본질적으로 불안정계이므로 FDIS의 고장검출식별 및 보상 성능을 검토하기 위해서는 우선 계통안정화를 위한 제어입력을 도입해야한다. 본 절에서는 식(32)의 이득행렬에 의해 결정되는 전상태폐환 제어입력을 도입하였으며, 이 경우 안정화된 폐환 제어계의 극점은 $[-10 - 30 - 2 + j2 - 2 - j2]$ 이다. 정상동작시 제어입력의 계산에는 병렬 운전되는 3개의 FT_FDO가 모두 정확한 상태추정치를 제공하므로 임의 선정된 FT_FDO가 제공하는 상태추정치를 사용할 수 있으며, 본 절에서는 구동장치고장을 고려하여 설계된 FT_FDO가 제공하는 상태추정치를 적용하였다.

$$K = [-19.6046 \quad -48.6431 \quad -17.5429 \quad -7.5696] \quad (32)$$

성능 검토시 고려해야할 중요한 사실은 위의 제어기와 FT_FDO는 평형점(up-right)에서 얻어진 선형모델에 대하여 설계된 것이므로 비교적 작은 고장이 발생한 경우에도 제어계의 불안정이 초래될 수 있다는 점이다. 시뮬레이션 결과, 고장보상을 도입하지 않은 경우, 페루프제어계는 구동장치 고장보다 폐환정보를 제공하는 측정장치 고장에 더욱 민감하게 반응하며, 막대각(rod angle) 측정장치(센서2)의 경우, $f_{s1} \geq 0.13$, 카트 속도 측정장치(센서3)의 경우, $f_{s2} \geq 0.65$ 이면 제어계가 불안정해짐을 확인하였다. 따라서 고장효과의 분석을 위한 시뮬레이션은 안정도가 유지되는 범위내에서 수행되었다.

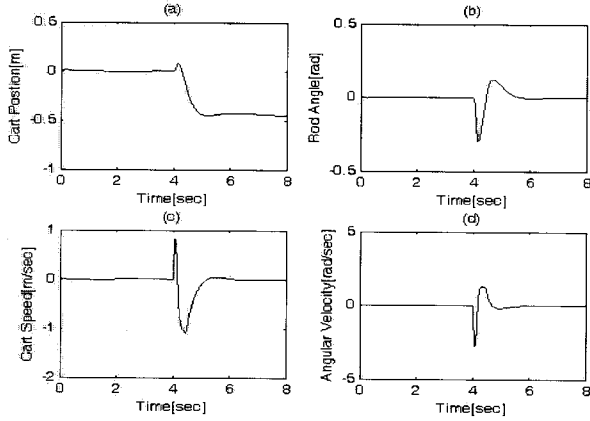


그림 1 센서2 고장(+0.12) 시 제어계 응답(비보상)
 Fig. 1 Control system responses when sensor2 failed (uncompensated)

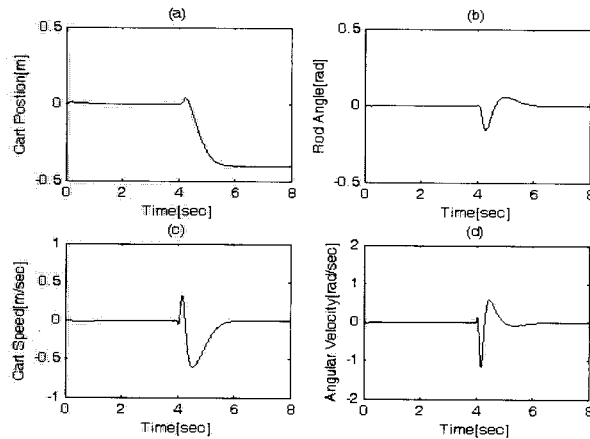


그림 2 센서3 고장(+0.4) 시 제어계 응답(비보상)
 Fig. 2 Control system responses when sensor3 failed (uncompensated)

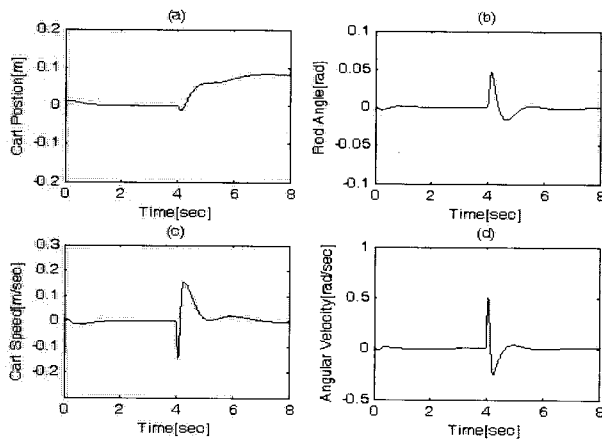


그림 3 구동장치 고장(-1.5)시 제어계 응답(비보상)
 Fig. 3 Control system responses when actuator failed (uncompensated)

그림 1은 $t=4\text{sec}$ 에서 크기 $f_{s1}=0.12$ 인 센서2 고장, 그림 2는 $f_{s2}=0.4$ 인 센서3 고장, 그림 3은 크기 $f_a=-1.5$ 인 구동장치 고장이 발생한 경우의 제어계 응답이다. 이들은 한계치 이하의 고장이 발생한 경우, 제어계의 불안정이 초래되지는 않지만 원하는 제어상태를 유지하지 못함을 보여준다.

그림 4-6은 제안된 FDIS와 고장보상기법을 도입한 고장 허용제어계 응답이다. 고장검출식별논리에 투입된 임계치 Th_{r_s} 는 0.1, Th_{f_j} ($J=1,2,3$)는 모두 10^{-3} 으로 설정하였으며. 고장보상은 3.2절에 기술한 바와 같이 고장검출식별 결과에 따라 각 고장에 대응하는 FT_FDO가 제공하는 상태추정치와 고장추정치를 이용하여 수행하였다. 그림 4는 크기 $f_{s1}=0.13$ 인 센서2 고장이 $t=4\text{sec}$ 에서 발생한 경우 제어계의 응답으로, 한계치보다 큰 고장이 발생한 경우에도 제어계의 안정도가 유지되고 고장효과의 보상이 이루어짐을 보여준다. 그림 5는 $f_{s2}=0.4$ 인 센서3 고장, 그림 6은 구동장치에 $f_a=-1.5$ 인 고장이 발생한 경우, FDIS와 보상알고리즘이 도입된 고장허용제어계 응답으로, 이들은 고장이 발생한 경우에도 제어계의 안정성이 유지되고 보상에 의해 고장 이전의 제어상태로 회복됨을 보여준다. 그림 4-6의 그림 (f)는 3개의 검출식별대상 고장에 대응하는 3개 FT_FDO의 잔차 r_1 (점선 dotted line), r_2 (대쉬선 dashed line)은 센서3 고장에 대응되는 FT_FDO의 잔차, r_3 (실선 solid line)은 구동장치 고장에 대응되는 FT_FDO의 잔차(r_3)이다. 그림 4-6(f)의 잔차를 관찰함으로써 FD_FDO의 허용 수렴시간($\tau_c=0.2\text{sec}$) 이내에 발생 고장이 검출식별되고, 동시에 고장보상이 개시됨을 알 수 있다.

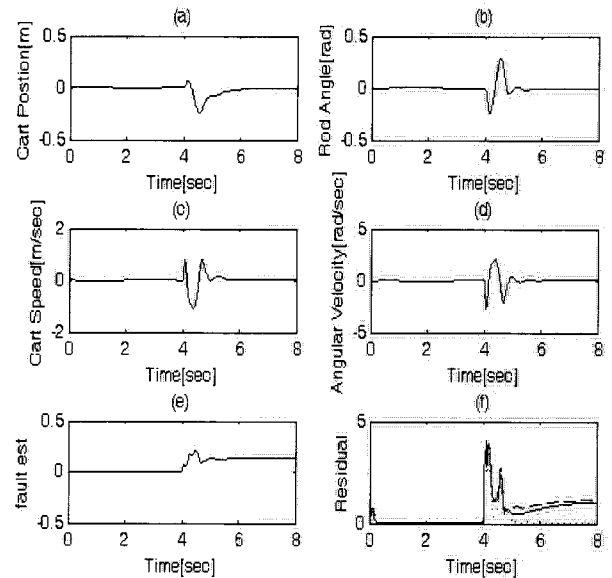


그림 4 센서2 고장(+0.13) 시 고장허용제어계 응답
 Fig. 4 FTCS responses when sensor2 failed
 (In Fig(f), dotted line: r_1 , dashed line: r_2 , solid line: r_3)

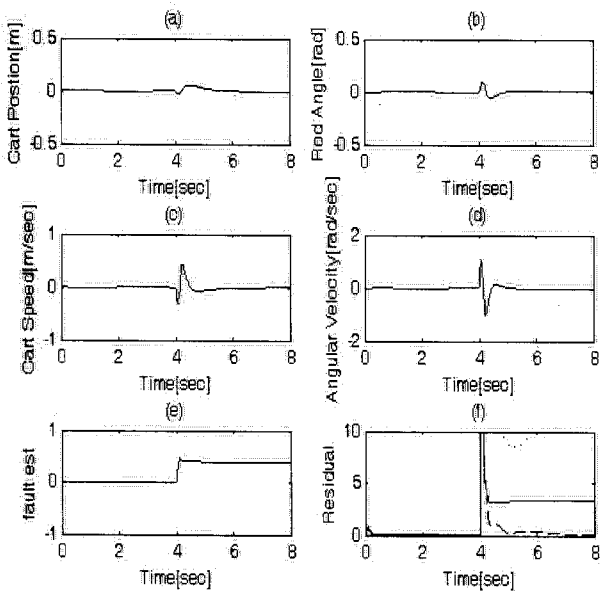


그림 5 센서3 고장(+0.4) 시 고장허용제어계 응답
 Fig. 5 FTCS responses when sensor 3 failed
 (In Fig(f), dotted line: r_1 , dashed line: r_2 , solid line: r_3)

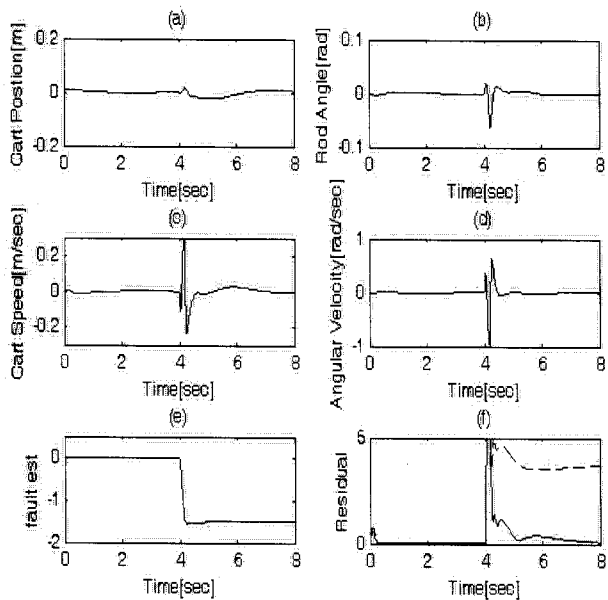


그림 6 구동장치 고장(-1.5)시 고장허용제어계 응답
 Fig. 6 FTCS responses when actuator failed
 (In Fig(f), dotted line: r_1 , dashed line: r_2 , solid line: r_3)

5. 결 론

본 논문에서는 MOS형 FDIS의 검출지연시간을 감소시키고 검출식별의 신뢰도를 개선하기 위하여, 유한시간 수렴특성을 갖는 FT_FDO를 제안하고 이를 이용한 FDIS의 적용가능성을 검토하였다. 제안된 FDO는 지정된 시간 내에 수렴이 보장되며, 고장이 발생하지 않은 경우 및 지정된 고장 발생시 정확한 상태추정치와 해당 고장에 대한 추정치를 제

공하는 특징을 가진다. 특히 FT_FDO의 유한시간 수렴특성은 이를 포함한 MOS형 FDIS 설계 시 미리 정해진 설계규격(예: 최대 검출지연시간)을 고려할 수 있게 해주며, 과도특성으로 인한 오검출의 최소화를 가능케 해준다. 제안된 FT_FDO를 도입하여 역진자시스템을 대상으로 측정장치와 구동장치고장을 검출식별할 수 있는 MOS형 FDIS를 설계하고, 고장검출식별 결과와 고장추정치를 이용한 고장허용제어계를 구성하여 검출식별성능과 제어계 성능을 검토함으로써 제안사항의 타당성을 입증하였다.

감사의 글

이 논문은 2008학년도 단국대학교 대학연구비 지원에 의해 이루어진 연구 결과임.

참 고 문 헌

- [1] R. Patton, P. M. Frank and R. N. Clark, Fault diagnosis in dynamic systems, Theory and Application, Prentice-Hall, 1989.
- [2] A.D. Pouliezos and G.S. Stavrakakis, Real time fault monitoring of industrial processes, Kluwer academic publishers, 1994.
- [3] P. M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge based redundancy: A survey and some new results," Automatica, Vol.26, pp.459-474, 1990.
- [4] V. Venkatasubramanian et. al., "A review of process fault detection and diagnosis, Part 1: Quantitative model based methods," Computers and chemical engineering, Vol.27, pp.293-311, 2003.
- [5] E. L. Russell, L. H. Chiang and R. D. Braatz, Data-driven techniques for fault detection and diagnosis in chemical processes, Springer, 2000.
- [6] Jinchao Guo, Xinhua Huang, Yu Cui, "Design and analysis of robust fault detection filter using LMI tools," Computers & Mathematics with Applications, Volume 57, Issues 11-12, Pages 1743-1747, 2009.
- [7] F. Tao and Q. Ahao, " Fault detection observer design with unknown inputs," Proc. of the 2005 IEEE conf. on control applications, Toronto, Canada, August 28-31, 2005, pp.1277-1280.
- [8] D. Theilliol, H. Noura, and J.-C. Ponsart, " Fault diagnosis and accommodation of a three-tank system based on analytical redundancy," ISA Transactions Vol.41, pp.365 - 382, 2002.
- [9] A. Garcia and P. M. Frank, " Analysis of a class of dedicated observer schemes to sensor fault isolation," Proc. of UKACC Int. conf. on Control, Vol.1, sept., 1996, pp.60-65.
- [10] G. Verdier, N. Hilgert and J-P Vila, "Adaptive threshold computation for CUSUM-type procedures

- in change detection and isolation problems," Computational statistics and data analysis, vol.52, pp.4146-4174, 2008.
- [11] Robert Engel and Gerhard Kreisselmeier, "A continuous-time observer which converges in finite time," IEEE Trans. Automat. contr., Vol.47, No.7, pp.1202-1204, 2002.
- [12] Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems," Annual reviews in control, Vol.32, pp.229-252, 2008.
- [13] 이기상, "퍼지모델을 이용한 비선형시스템의 센서고장 검출식별," 전기학회논문지, 제56권 2호, pp.407-414, 2007
- [14] J. Apkarian, A comprehensive and modular laboratory for control systems design and implementation, Quanser Consulting Inc., 1997.

저 자 소 개



이 기 상 (李 起 常)

1952년 10월 24일생.
1978년 고려대 전기공학과 졸업(학사).
1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
1995년~96년 Univ. of Washington 방문
교수
2005년~08년 단국대학교 정보통신대학
원장
1983년~현재 단국대 전자전기공학부 교수
Tel : 031) 8005-3605
Fax : 031) 8005-3622
E-mail : keesang@dku.edu