

An Instrument Fault Detection Scheme using Function Observers

李 起 常^{*} · 李 相 汶^{*}
(Kee-Sang Lee · Sang-Moon Lee)

Abstract - A major difficulty with the practical application of the multiple observer based IFDI schemes is the computational burden of the residual generation. In this paper, a new residual generator that employs function observers is proposed to reduce the computational burden, and the design methods of the IFDIS, equipped with the residual generator, are presented. The function observers employed in the residual generator can be considered as a dual of the unknown input (function) observer. And it can be designed to estimate the measurement errors that are due to sensor faults. The error estimates are further processed to generate the residuals by which reliable fault detection/isolation result can be obtained. The proposed scheme is more useful, in real-time application, than any other multiple state observer based IFDISs. It can be effectively applied to fault tolerant control because the failure effects can be compensated by the use of the estimates of measurement errors. The proposed IFDI scheme is applied to an inverted pendulum control system for the IFDI of failed sensor and fault compensation.

Key Words : Instrument Fault Detection, Function Observer, Residual Generation, Fault Tolerant Control

1. 서 론

최근에는 자동화 공정이 대형화되고 그 복잡성이 증대됨에 따라 요구되는 신뢰성의 확보가 매우 중요한 평가지표로 인식되고 있다. 특히 신속성과 정확성이 요구되는 모든 자동화 공정의 필수요소인 폐환제어계에 포함된 센서, 구동장치 등의 결함 및 오동작은 전체 자동화 공정의 성능감퇴를 가져오므로 이들 요소 고장의 조기검출과 고장요소의 식별에 관한 연구가 많은 관심을 받고 있다. 특히 측정 장치의 고장은 시스템의 상태감시 및 분석에 오류를 발생시킬 뿐 아니라 폐환제어시스템의 경우에는 부정확한 제어입력 발생 및 운전자의 오조작을 유발시키는 주요원인이므로 조기에 검출 식별하여 대응 조치를 취해야 한다.

센서고장 검출식별의 중요성은 우주개발을 주도해 온 NASA 등에 의해 70년대 후반부터 인식되었고 80년대에는 TMI, Chernoville 원전사고 등으로 인하여 시스템 신뢰도 개선의 중요수단으로 부각되었으며, 현재까지 제어시스템 분야의 중요 과제로서 미국, 유럽을 중심으로 매우 활발한 연구가 진행되고 있다[1,2]. 최근, 미국의 우주왕복선 디스커버리호의 발사 계획이 13일간이나 지연되었던 주원인이 연료센서의 이상이었던음은 이 분야 연구의 중요성을 다시 한번 인식시켜준 계기가 되었다[3]. 기본적으로 고전적인 센서고장검출기법은 한 개의 측정변수에

대하여 3개 이상의 다중센서를 설치하고 Voting 논리에 의해 고장여부를 결정하는 소위 하드웨어 중복(hardware redundancy) 방식이지만 이 기법은 실현 경비, 공간, 전력소모 등의 제한을 고려해야 한다. 따라서 80년대 중반 이후의 고장검출식별(Fault Detection & Isolation: FDI)기법 연구는 S/W 중복방식에 집중되어왔다. 이제까지 제안된 센서 고장 검출식별기법은 매우 다양하지만 대상 시스템의 수학적 모델의 사용여부에 따라 상태방정식 모델에 근거한 모델기반 기법과 데이터 분류 기법에 근거한 무모델 기법으로 구분된다[4]. 본 논문에서는 정밀급 제어 시스템의 고장검출식별과 고장허용제어에 직접 도입될 수 있는 모델기반기법을 다룬다. 모델기반기법은 고장검출식별을 위한 잔차(residual) 발생을 위해 주로 칼만 필터, 상태관측자 등을 도입한 것으로 다양한 구조의 다중관측자기법(Multiple Observer Scheme: MOS) 및 검출필터기법(Detection Filter: DF)으로 분류된다[2,4]. 최근의 연구동향은 FDI 시스템의 성능을 개선하기 위하여 외란, 파라미터 변화 및 모델화되지 않은 동특성에 대해 강인한 동시에 검출 대상 고장에 민감한 잔차 발생기구의 개발과 실시간적용이 가능한 정도의 단순한 FDI기법의 개발 및 고장허용제어기법의 적용 연구 등이다[5, 6]. 특히 MOS구조의 FDIS의 경우, 80년대부터 최근에 이르기까지 많은 연구 결과가 보고되었음에도 불구하고 실질적 적용이 쉽지 않은 주된 이유는 잔차 발생을 위한 관측자 뱅크(observer bank)의 크기로 인하여 실시간 적용이 곤란하기 때문인 것으로 파악된다. 따라서 MOS구조의 FDIS에서 잔차 발생기구의 단순화는 매우 중요한 의미를 가진다.

본 논문에서는 관측자 뱅크의 크기 축소를 위하여 기존의 거의 모든 연구에서 채택한 상태관측자 또는 KF (Kalman Filter) 대신 최대차수가 [(가관측지수-1)*추정함수의 수]로 알려진 함수관측자(Function Observer: FO)를 이용한 잔차 발생기구 및

* 교신저자, 正會員 : 檀國大學校 工科大學 電氣工學科 教授 · 工博

E-mail : keesang@dku.edu

* 學生會員 : 檀國大學校 大學院 電氣工學科 碩士課程
接受日字 : 2005年 11月 1日
最終完了 : 2006年 1月 24日

이를 이용한 IFDI (Instrument Fault Detection & Isolation) 및 보상기법을 제안하고 그 유용성을 검토한다[7]. 제안된 IFDI기법은 매우 낮은 차원의 함수관측자에 의해 잔차를 발생시킴으로 실시간 적용의 관점에서 기존의 상태관측자 기반 기법에 비해 매우 유리할 뿐 아니라, 고장검출식별 및 고장신호의 재생 기능을 가지므로 고장허용제어계의 실현에 직접 도입될 수 있다는 유용한 특징을 가진다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. 제 2절에는 함수관측자, 기존의 IFDIS 등 배경지식을 기술한다. 제 3장에는 함수관측자를 이용한 IFDIS기법에 대하여 기존의 연구결과를 검토한다. 제 4절에서는 DOS[2], GOS[2] 등과 같이 3개 이상의 측정출력을 가진 시스템에 적용 가능한 함수관측자 기반 IFDI기법을 제안하고, 제 5절에서는 제안된 IFDI기법을 전형적인 불안정 비선형 시스템인 역진자제어계의 센서고장검출 및 고장허용제어에 적용하여 그 실질적 적용가능성을 검토한다.

2. IFDIS 설계를 위한 배경지식

2.1 고장검출식별을 위한 구조적 잔차

IFDIS를 포함하여 모든 FDIS는 일반적으로 고장의 검출과 식별기능을 갖추어야 하므로 잔차 발생기구는 고장의 식별정보도 제공하도록 설계되어야한다. 구조적 잔차는 미리 정해진 논리에 의해 고장요소의 식별이 가능한 잔차의 집합을 의미하며, 본 연구에서 고찰하고자하는 다중관측자기법의 경우, 구조적 잔차 설계 개념은 다중 고장 검출식별의 필요성 여부에 따라 몇 가지로 구분된다. 앞으로의 전개를 위하여 검출식별 대상 고장으로 다음의 q 차원 고장 벡터를 고려한다.

$$f = [f_1 f_2 \dots f_q]^T \quad (1)$$

(경우 1) 동시고장을 고려하지 않는 경우 : 이 구조의 고장검출식별시스템은 검출 대상 고장수와 동일한 수의 관측자를 구동하며, 각 관측자는 특정한 한 개의 고장에 대해서 둔감하도록 설계한다[8]. 예를 들어 i 번째 관측자가 f_i 에 대하여 둔감하고 나머지 고장에 민감하도록 설계된다면 다음과 같은 q 개의 잔차를 얻을 수 있다[2].

$$\begin{aligned} r_1 &= \text{OBS}_1(f_2, f_3, \dots, f_q) \\ r_2 &= \text{OBS}_2(f_1, f_3, \dots, f_q) \\ &\vdots \\ r_q &= \text{OBS}_q(f_1, f_2, \dots, f_{q-1}) \end{aligned} \quad (2)$$

구동장치 고장과 같이 동적프로세스에 대한 수학적 모델(벡터미분방정식)의 우변에 대응되는 요소의 고장을 대상으로 한 고장검출식별시스템의 경우, 위의 관계를 달성하기 위해서는 일반적으로 미지입력관측자(Unknown Input Observer: UIO)의 도입이 요구된다. 하지만 IFDIS의 경우에는 다음과 같이 OBS_i 가 y_i 를 제외한 나머지 출력에 의해 구동되도록 설계함으로써 고장검출과 식별이 가능함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} r_1 &= \text{OBS}_1(y_2, y_3, \dots, y_q) \\ r_2 &= \text{OBS}_2(y_1, y_3, \dots, y_q) \\ &\vdots \\ r_q &= \text{OBS}_q(y_1, y_2, \dots, y_{q-1}) \end{aligned} \quad (3)$$

위의 잔차를 이용하면 단일 고장에 대한 고장식별논리는 매우 단순하며 다음과 같다.

$$\text{IF } r_i < \text{th}(i) \text{ and } r_j \geq \text{th}(j),$$

$$j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, q$$

Then, fault(i) occurs

IFDIS의 경우, 각 관측자(OBS_i)는 최대수의 가용(available) 측정 출력에 의해 구동되므로 최대 차수가 시스템의 가관측 지수에 의해 결정되는 함수관측자를 채택함으로써 최소차 잔차 발생기구의 설계가 가능하다는 장점을 가진다.

(경우 2) q 개 고장의 동시발생을 고려한 경우 : 동시에 발생하는 q 개의 센서고장을 식별하기 위해서는 다음과 같이 오직 한 개의 고장에 의해서만 영향을 받는 잔차를 발생시켜야 한다[2].

$$\begin{aligned} r_1 &= \text{OBS}_1(f_1) \\ r_2 &= \text{OBS}_2(f_2) \\ &\vdots \\ r_q &= \text{OBS}_q(f_q) \end{aligned} \quad (4)$$

위의 잔차 집합의 요소는 모두 독립적이므로 q 개의 동시고장 검출이 가능하다. IFDIS의 경우, 위의 조건은 각 측정출력 당 한개의 관측자가 구동되어야함을 의미하므로 결과적인 IFDIS는 아래와 같이 DOS에 귀결되어 잔차 발생에 측정출력과 동일한 수의 전체차수 관측자가 도입되어야 한다.

$$\begin{aligned} r_1 &= \text{OBS}_1(y_1) \\ r_2 &= \text{OBS}_2(y_2) \\ &\vdots \\ r_q &= \text{OBS}_q(y_q) \end{aligned} \quad (5)$$

이 경우 고장검출식별논리는 다음과 같다.

$$\text{If } r_i \geq \text{th}(i), \text{ then fault}(i) \text{ for } i=1,2,\dots,q$$

이 잔차 집합은 다중고장 식별의 관점에서 매우 유용하지만, 잔차 발생을 위해 q 개의 n 차원 관측자가 병렬적으로 구동되어야 하므로, 이를 도입한 고장검출식별시스템의 실시간 적용은 곤란하다. 또한 실제적으로 고성능 시스템에서 측정 장치의 다중고장 확률은 매우 낮으므로 본 논문에서는 경우(1)에 초점을 둔다.

2.2 미지 입력 함수관측자

모든 모델기반 IFDIS는 측정데이터로부터 고장정보를 추출하기 위한 잔차 발생기구와 잔차에 근거하여 고장을 검출식별하는 검출식별논리로 구성된다. 따라서 잔차 발생기구는 검출대상고장에 민감한 반면, 외란 및 비 검출대상에 대하여 둔감한 특성을 가져야 한다. 본 논문에서는 제안된 IFDIS의 외란에 대한 강인성 확보를 위해 외란 모델을 도입한 미지입력 함수관측자를 사용한다[7]. 다음 방정식으로 표현되는 시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [A + \delta A]x(t) + [B + \delta B]u(t) + Qd(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^r$, $y(t) \in R^p$, $d(t) \in R^q$ 는 각각 상태, 입력, 출력, 외란 벡터이다. 그리고 파라미터 변화 및 외란은 다음과 같이 취급될 수 있다.

$$Qu(t) = \delta Ax(t) + \delta Bu(t) + Qd(t) \quad (7)$$

이때 $u(t)$ 을 q -차원 벡터로 가정한다면 식(6)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Qu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)의 상태들을 추정하기 위해서는 미지 입력 관측자를 필요로 한다. 미지 입력 관측자 설계 기법은 대수적으로 미지의 외란을 제거하는 방법과 외란 모델링 방법이 있다. 대수적인 접근 방법은 관측자의 존재조건이 매우 까다롭기 때문에 본 논문에서는 외란 모델링 방법을 도입한다. 외란의 변화가 느리다고 가정하면, 각각의 외란은 다음과 같이 모델링 될 수 있다.

$$\begin{aligned} z_i(t) &= D_i \alpha_i(t) + E_i \delta(t) \\ w_i(t) &= h_i z_i(t) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 D_i, h_i, E_i 는 각각 $(m_i, m_i), (1, m_i), (m_i, 1)$ 차원 행렬이다. 또한 외란 벡터는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} z(t) &= D z(t) + E \delta(t) \\ u(t) &= H z(t) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $z(t)$ 는 $m(\sum m_i)$ 차원 벡터이다. UIFO의 설계 과정은 2 단계로 구성된다. 첫 단계에서는, 식(8)의 방정식과 외란 모델을 결합하여 확장시스템방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_d x(t) + B_d u(t) + E_d \delta(t) \\ y(t) &= C_d x(t) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $x^T = [x^T z^T \dots z_q^T]$ 는 $(n+m)$ 차원 확장상태벡터이며 각 행렬은 다음과 같다.

$$A_d = \begin{bmatrix} A & QH \\ 0 & D \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, E_d = \begin{bmatrix} 0 \\ E \end{bmatrix}, C_d = [C \quad 0] \quad (12)$$

두 번째 단계는, 함수관측자에 의해서 식(13)으로 표현되는 추정 대상 선형함수(linear functions)를 선정하고, UIFO를 설계하는 것이다.

$$u(x) = Kx \quad (13)$$

여기서는 전개의 편의 상 단일 함수를 가정하며, 이 경우 K 는 $(1, n+m)$ 차원 행렬이다. $[C_d \quad A_d]$ 쌍이 가관측하면 $u(x)$ 를 추정을 위한 식(14)의 UIFO 설계가 가능하다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= F_d \hat{x}(t) + J_d y(t) + G_d u(t) \\ \hat{u}(x) &= L_d \hat{x}(t) + P_d y(t) \end{aligned} \quad (14)$$

위에서 식(14)의 추정치가 식(13)에 수렴하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_d A_d - F_d T_d &= J_d C_d \\ L_d C_d + P_d T_d &= K \\ G_d &= T_d B_d \end{aligned} \quad (15)$$

이 경우 $\lim_{t \rightarrow \infty} s = T_d x$ 및 $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{u}(x) = u(x)$ 이 성립된다. 함수관측자의 이득행렬들을 구하는 방법은 잘 알려져 있으므로 본고에서는 이를 생략한다[9].

3. 함수관측자 기반 센서고장 검출식별

IFDI 문제를 고려하기 위해 다음의 시스템 방정식 및 출력방정식을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Qw(t) \end{aligned} \quad (16)$$

위식에서 센서 고장은 측정출력에 포함된 더하기 항 미지 외란으로 취급되었다. 시스템에 포함된 센서수를 출력벡터의 차원과 같은 p 개라하고 단일고장 (두개 이상 센서의 동시고장을 고려하지 않음) 만을 고려한다. 이 경우, 센서고장 검출과 고장 센서 식별을 위한 함수관측자 기반 IFDIS의 한가지 유형은 고장검출 대상 출력센서 중에서 선택된 서로 다른(독립인) 측정출력의 집합에 의해 구동되는 p 개의 함수관측자를 도입하고, 각 관측자가 동일한 선형함수 $u(x)$ 를 추정하게 한 다음, 그 추정 결과를 비교함으로써 고장을 검출식별하는 것이다. 예를 들어 4개의 측정출력을 가진 시스템의 경우, 아래의 4개 함수관측자가 IFDIS를 위한 잔차 발생에 사용될 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{v}_1 &= OES_1(v_2, v_3) \\ \hat{v}_2 &= OES_2(v_3, v_4) \\ \hat{v}_3 &= OES_2(v_4, v_1) \\ \hat{v}_4 &= OES_4(v_1, v_2) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 \hat{v}_i 는 i 번째 함수관측자(OES_i)에 의해 제공된 $u(x)$ 의 추정치이다. 위의 UIFO들이 동일한 선형함수의 추정치를 제공하므로 4개의 중복정보를 얻을 수 있다. 따라서 특정한 센서 이상의 검출, 식별은 이들 4개 관측자에 의해 제공되는 추정치를 이용하여 얻어지는 식(18)의 잔차에 근거하여 수행된다.

$$\begin{aligned} r_1 &= \hat{v}_1 - \hat{v}_2 = \mathcal{K}(v_2, v_3, v_4) \\ r_2 &= \hat{v}_2 - \hat{v}_3 = \mathcal{K}(v_1, v_3, v_4) \\ r_3 &= \hat{v}_3 - \hat{v}_4 = \mathcal{K}(v_1, v_2, v_4) \\ r_4 &= \hat{v}_4 - \hat{v}_1 = \mathcal{K}(v_1, v_2, v_3) \end{aligned} \quad (18)$$

이 잔차들은 식(3)과 동일한 특성을 가지는 반면, 식(17)로부터 정의되는 $|\hat{v}_2 - \hat{v}_3|, |\hat{v}_3 - \hat{v}_1|$ 는 모든 출력변수의 함수로서 고장 식별 정보를 가지지 못하므로 잔차에 포함되지 않는다. 여기서 주목할 사항은 특정 센서의 고장시, 고장센서의 식별과 정상 측정신호의 검증을 위해 서로 다른 두개 이상의 관측자가 동일 추정치를 제공하여야 하며, 이를 위해서는 각 UIFO가 두개 이상의 센서고장에 대하여 둔감한 특성을 가져야 한다는 사실이다. 따라서 IFDIS에 도입된 각 UIFO의 구동을 위해 투입 가능한 최대 측정출력의 수는 $p-2$ 로 제한된다. 제안된 함수관측자 기법은 추정하고자하는 함수 $u(x)$ 를 적절히 선정함으로써 다음과 같은 다양한 설계목적(Design Objective)의 달성이 가능하다[7].

DO(1) : 센서고장의 검출식별

UIFO가 추정할 선형함수 $u(x)$ 를 선정하면, 다음의 잔차를 정의할 수 있으며

$$\begin{aligned} r_i &= |\hat{v}_i - \hat{v}_{i+1}|, \quad i = 1, 2, \dots, p-1 \\ r_p &= |\hat{v}_p - \hat{v}_1| \end{aligned} \quad (19)$$

센서 고장의 검출식별은 다음과 같은 논리에 의해서 수행된다.

If $r_i < th$ for $i=1$ to p then no fault
If $r_i < th$ & $r_j > th$ for $j=1$ to $p, (j \neq i+1)$,
then i th sensor is faulty

DO(2) : 센서고장의 검출식별 및 고장신호의 재생

이 경우 UIFO가 추정할 선형함수는 단순히 센서 출력의 선형결합 형태로 선정할 수 있다.

$$v_i(y) = \sum_{i=1}^p y_i, \quad i=1 \dots p \quad (20)$$

검출 논리는 전과 동일하며, 고장 신호 y_i 는 다음 식에 의해서 재생된다.

$$y_{re}(i) = \widehat{v}_i(y) - (y_1 + y_2 + \dots + y_{i-1} + y_{i+1} + \dots + y_p) \quad (21)$$

DO(3) : 센서고장의 검출식별 및 제어입력발생

DO(1)의 특별한 경우이며 추정함수를 (상태회환)제어입력으로 선정함으로써 고장 검출식별과 함께 센서고장의 경우에도 정확한 제어입력을 제공하는 기능을 가진다.

4. 새로운 장치고장 검출식별기법

3절에 기술된 함수관측자 기반 IFDIS[7]는 매우 단순한 구조로 설계되지만 $p \geq 4$ 인 경우에만 적용이 가능하다. 이 적용조건은 기존 다중관측자기법의 적용조건($p \geq 3$)보다 까다로운 것이다. 따라서 본 절에서는 $p \geq 3$ 인 모든 경우에 적용 가능한 다중함수관측자 기반 IFDIS를 제안한다. 이 IFDIS 설계의 핵심은 센서고장의 검출, 식별정보를 추출하기 위한 관측자뱅크의 설계이다. 제안된 기법은 센서고장이 2절에 기술한 외란과 동일한 수학적 모델로 표현 가능하다는 점에 착안하여 센서고장으로 인한 측정오차를 직접 추정하도록 설계된 새로운 함수관측자를 도입한 것이며, 매우 단순한 논리에 의해 고장 검출식별이 가능할 뿐만 아니라 고장센서 신호의 재생 기능도 가진다. 제안된 IFDIS에 도입된 함수관측자는 2절의 미지입력관측자와 쌍대(dual) 관계를 가지며 아래와 같이 설계된다. 전개를 위해 더하기형의 센서고장을 포함한 식(16)의 시스템 표현을 고려한다. 센서 고장은 드리프트(drift), 편기(bias), 분산(variance)의 증가 등 여러 가지 형태로 나타날 수 있지만 많은 경우, 비교적 느린 변화의 파형으로 가정할 수 있으며, 따라서 2절에 기술한 외란과 동일한 식(22)의 모델로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} z_f(t) &= D_f z(t) + E_f x(t) \\ w_f(t) &= H_f z(t) \end{aligned} \quad (22)$$

식(16)의 시스템 방정식과 센서 고장 모델을 결합하면 식(23)의 확장시스템 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ex(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 $x^T = [x^T z^T]$ 는 확장 상태벡터이며 각 행렬은 식(24)와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} A & O \\ O & D_f \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B \\ O \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} O \\ E_f \end{bmatrix}, \quad C = [C \quad QH] \quad (24)$$

본 절에서 제안하는 IFDIS는 p개의 출력센서를 모두 고장검출식별 대상으로 하며, 검출식별정보의 추출을 위해 p개의 함수관측자를 도입한다. 이 IFDIS 설계의 핵심은 모든 센서고장의 검출과 고장센서의 식별이 가능하도록 각 함수관측자를 설계하는 것으로 다음의 세가지 과정으로 수행된다. 첫 단계에서는 함수관측자 구동을 위한 출력벡터(y)를 선정한다. 고장센서의 식

별은 고장에 민감한 잔차 집합과 둔감한 잔차 집합의 논리적 비교에 의해 수행되므로 각 함수관측자는 한개 이상의 센서고장에 대해 둔감해야 하며, 특정 출력센서 고장에 대한 함수관측자의 둔감성을 확보하는 가장 확실한 방법은 해당 출력을 함수관측자 구동에 투입하지 않는 것이다. 이후의 전개를 위해, i번째 함수관측자의 구동을 위해 선택된 출력벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$y^i = C^i x, \quad i=1 \dots p \quad (25)$$

여기서 $\dim(y^i) = \text{rank}(C^i) \leq p$ 이며, 이 출력벡터의 차원은 설계될 함수관측자의 차원을 결정하는 인자이다. 또한 추정될 선형함수와 함께 검출식별논리의 복잡(단순)성을 결정하는 중요 설계 요소이다. 두 번째 단계에서는 함수관측자가 추정할 선형함수(v_i)를 선정한다. 제안된 함수관측자 기반 IFDIS에서 각 함수관측자는 단일 선형함수를 추정하도록 설계되며, i번째 함수관측자에 의해 추정할 선형함수는 식(26)와 같이 확장 상태벡터에 속하는 변수들의 선형결합으로 표현된다.

$$v_i(x) = K_i x, \quad i=1 \dots p \quad (26)$$

확장 상태벡터는 센서 고장변수를 포함하고 있으므로 식(26)의 피추정함수는 모든 상태변수와 고장변수의 선형결합을 포함한다. 이 함수의 선정은 3절에 기술한 바와 같이 다양한 설계목적에 따라 선정될 수 있으며, 선택된 선형함수는 검출식별논리 설계의 중요 인자이다. 세 번째 단계에서는 식(25)의 출력벡터를 구동입력으로 식(26)의 $v_i(x)$ 를 추정하는 p개의 함수관측자를 설계한다. 이 함수관측자들은 식(27)과 같은 동태방정식으로 표현되며 $[C^i \quad A]$ 쌍이 가관측이면 설계가 가능하다. 함수관측자의 수렴조건 및 이득행렬 결정 방법은 2절에 언급된 바와 같다[9].

$$\begin{aligned} \dot{s}_i(t) &= F_i s_i(t) + J_i y^i(t) + G_i u(t) \\ \widehat{v}_i(x) &= L_i y^i(t) + P_i s_i(t), \quad i=1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (27)$$

설계된 p개의 함수관측자들은 잔차 발생을 위한 함수관측자뱅크를 구성한다. 식(28)은 ($p \geq 3$)인 경우 적용 가능한 본 절에서 제안한 IFDIS를 위한 함수관측자뱅크의 구성을 나타낸다. 이 식에서 OBS_i는 식(27)의 수학적 표현을 갖는 i번째 함수관측자를 나타내고, 좌변은 추정함수가 $v_i(x) = \omega_{f_i}$ 즉, 센서고장 변수 자체임을 의미한다. 또한 우변항의 인수들은 OBS_i가 한 개의 출력 y_{i-1} 을 제외한 모든 측정출력에 의해 구동됨을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \widehat{w}_1 &= \text{OBS}_1(y_1, y_2, \dots, y_{p-1}) \\ \widehat{w}_2 &= \text{OBS}_2(y_2, y_3, \dots, y_p) \\ \widehat{w}_3 &= \text{OBS}_3(y_3, y_4, \dots, y_p, y_1) \\ &\vdots \\ \widehat{w}_p &= \text{OBS}_p(y_p, y_1, \dots, y_{p-2}) \end{aligned} \quad (28)$$

and $r_i = \widehat{w}_{f_i}, \quad i=1, 2, \dots, p$

여기서 r_i 는 잔차이며, 식(28)의 마지막 식은 센서 고장 추정치가 고장검출 식별을 위한 잔차로 사용됨을 의미한다. 이 잔차를 채택할 경우, 센서고장의 검출과 고장센서의 식별은 다음과 같은 단순 논리에 의해 수행된다.

If all $|r_j| < th_j, \quad i=1, 2, \dots, p$ then no fault
 If $|r_{i+1}| < th_{i+1}$ & $|r_j| \geq th_j, \quad j=1, 2, \dots, i+2, \dots, p$

then i th sensor fault

제안된 기법의 중요한 특징의 하나는 고장변수 자체를 잔차로 선정하였기 때문에 별도의 기구없이 고장 센서 신호의 재생이 가능하다는 점이다. i 번째 센서의 고장이 선언된 경우, 재생 출력신호 \hat{y}_i 는 식(29)에 의해 얻어진다.

$$\hat{y}_i = y_i - \hat{w}_i \quad (29)$$

전술한 바와 같이 본 절에서 제안된 IFDIS는 출력센서 수가 3이상이면 적용이 가능하고, 고장 추정 및 보상을 가능케 해준다는 관점에서 최근의 결과[7]을 발전시킨 제안이라 할 수 있다.

(주1) 이 함수관측자는 여러 개의 함수(상태변수의 선형결합)를 추정하도록 설계될 수 있으며, 이 경우에는 단 한개의 함수관측자로서 p 개의 고장변수를 추정하는 검출필터로 활용될 수 있다.

(주2) 본 절의 센서고장검출 용 함수관측자는 외란에 대한 강인성 설계를 위해 2절의 UIFO 설계과정과 결합될 수 있다.

5. 적용 연구

본 절에서 4절에서 제안된 IFDIS의 실질적 적용 가능성을 검토하기 위하여 전형적인 비선형계통의 하나인 역진자 제어기에 대한 센서 고장검출식별 및 보상 시스템을 설계하고 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 검토한다.

5.1 역진자 제어계의 모델링

역진자 시스템은 다음의 비선형 식으로 표현된다 [10].

$$\begin{aligned} (m_p + m_c)\ddot{x}(t) + m_p a_l \cos(\alpha) - m_p a^2 l_p \sin(\alpha) &= F \\ m_p l_p \cos(\alpha)\dot{x} - m_p l_p \sin(\alpha)\dot{\alpha}x + m_p a^2 l_p - m_p g l_p \sin(\alpha) &= 0 \end{aligned} \quad (30)$$

식(30)을 선형화하고, 시스템의 입력인 힘 F 가 직류전동기에 의해 제공되는 경우를 고려하여 정상상태 전동기 모델을 도입하였다. 이 경우 역진자와 전동기가 결합된 시스템은 전동기 입력전압을 제어입력으로 가지는 다음의 상태방정식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \dot{x}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{m_p g}{m_c} & -\frac{K_m^2 K_g^2}{m_c R^2} & 0 \\ 0 & \frac{(m_p + m_c)g}{m_c l_p} & \frac{K_m^2 K_g^2}{m_c l_p R^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \alpha(t) \\ x(t) \\ \alpha(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_m K_g}{m_c R} \\ -\frac{K_m K_g}{m_c l_p R} \end{bmatrix} V_m \quad (31)$$

이 식에서 각 파라미터의 의미는 [5]에 기술되어 있다. 식(31)에 각 파라미터 값을 대입한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \dot{x}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -4.5 & -16.8 & 0 \\ 0 & 46.9 & 55.3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \alpha(t) \\ x(t) \\ \alpha(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.8 \\ -12.4 \end{bmatrix} V_m \quad (32)$$

5.2 시뮬레이션 및 결과 분석

추정 출력은 α 와 전동기의 속도 ω_m 을 가정하였다. 식

(32)의 방정식에서 변수 \dot{x} 는 전동기의 속도로부터

$$\dot{x} = \omega_m \quad (33)$$

와 같이 얻을 수 있다. 제어기로는 $u = Kx$ 인 상태배환 제어기를 적용하였으며, 이득은 페루프 제어계의 극점이 $(-20, -80, -2 \pm j2)$ 에 위치하도록 결정하였다. 또한 상태변수 중 x 는 \dot{x} 를 적분하여 얻었다.

$$K = [-105.4496 \quad -198.0692 \quad -63.7846 \quad -26.4876]$$

이 경우는 4장에서 설명한 3개의 함수관측자 설계가 가능한 경우에 속한다. 고장검출식별대상은 측정 센서 3개로 선정하였다.

제안된 IFDIS의 성능 검토를 위해 먼저 센서고장이 발생하지 않은 정상적인 경우에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과는 그림 1과 같다. IFDIS 내의 각 함수관측자가 추정할 선형함수는 각각 $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \hat{w}_3$ 이다. 식(28)에서 언급한 잔차는 $r_i = \hat{w}_i$ 이지만 이는 초기조건의 불일치 등으로 인한 과도특성을 수반하므로 검출식별 오류를 수반할 수 있다. 따라서 본 절의 시뮬레이션에서는 과도특성, 잡음 효과 등으로 인한 검출식별의 오류를 감소시키기 위하여 \hat{w}_i 를 저역통과 필터링한 결과를 잔차로 사용하였다. IFDIS의 성능을 좌우하는 또 하나의 요소인 임계치(threshold)는 다양한 고장 시뮬레이션 결과 및 검출식별 성능을 고려하여 각각의 잔차에 대하여 (0.01, 0.01, 0.05)로 선정하였다. 또한 고장 효과의 보상은 해당 함수관측자에 의해 제공되는 측정 편차의 예측치인 \hat{w}_i 를 측정출력에 가감함으로써 수행된다. 함수관측자의 파라미터는 부록에 수록하였다. 모든 상태관측자 기법과 마찬가지로 함수관측자도 초기조건의 불일치로 인한 초기편차를 수반하므로 IFDIS는 과도응답이 어느 정도 정정된 시점(1.5초)부터 스위치 온 되었다.

그림 2는 α 센서에 크기 0.1(rad) 바이어스 형태의 고장이 2초에 발생한 경우에 대한 시스템의 응답으로, 고장 시 카트 위치가 제어(regulation)되지 못함을 보여준다. 그림 3은 잔차의 궤적과 고장검출식별 결과를 보여준다. 그림 3에서 α 센서에 고장이 발생하면 α 센서로부터 얻어지는 출력에 의해서 구동되는 함수관측자 1과 3에 의해 발생하는 잔차(r_1, r_3)가 영에 수렴하지 못하는 반면, 이 출력에 의해 구동되지 않는 함수관측자 2의 잔차(r_2)는 영에 수렴한다. 그림 3에서 $fnum$ 은 고장센서의 번호이며 각도(α)센서 고장시 '1', 카트 속도(\dot{x}) 센서 고장시 '2'로 지정되었으며, 시뮬레이션 결과는 고장 발생 0.25초 후인 2.25초에 α 센서 고장이 검출식별 되었음을 나타낸다. 그림 4는 α 센서에 시스템이 제어를 상실할 정도의 크기인 0.1(rad)의 고장을 투입하고, 고장 검출식별과 동시에 보상을 수행한 결과이다. 이 결과는 2.25초에 고장이 검출 식별됨과 동시에 고장 효과보상을 수행함으로써 고장 발생 1.5초 이후인 3.5초에 고장발생 이전과 같은 상태로 복귀함을 보여준다. 그림 5는 \dot{x} 센서에 크기 0.3(m/sec)의 바이어스 고장이 발생한 경우의 제어계 응답이며, 그림 6은 잔차의 궤적과 고장검출식별 결과를 보여준다. 이 경우, 고장은 발생 직후인 2.1초 이내에 정확히 검출 식별되었음을 알 수 있다. 그림 7은 고장 보상을 수행한 결과로서 고장이 초기에 검출식별 및 보상됨으로서 고장으로 인한 제어능력이 신속히 복원되었음을 보여준다.

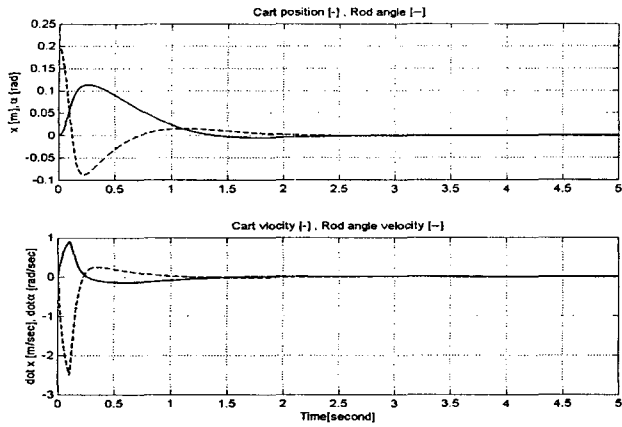


그림 1. 정상동작 시 역진자제어계의 응답
 Fig. 1 Responses of the inverted pendulum control system (normal operation)

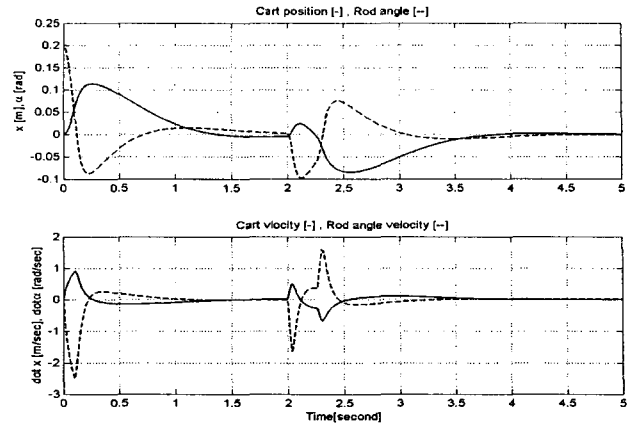


그림 4. α 센서 고장시 고장 보상 결과
 Fig. 4 Responses of the system with fault compensation for α sensor fault

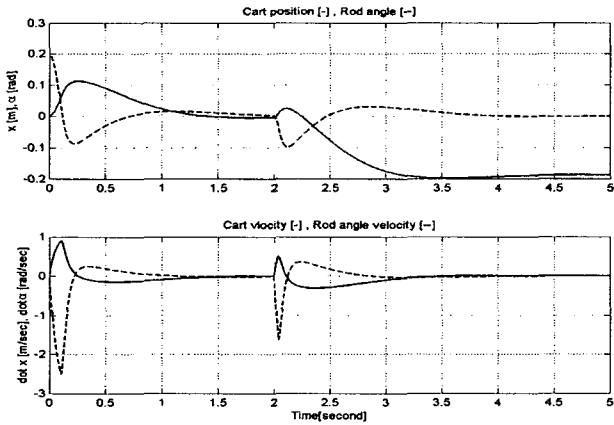


그림 2. α 센서 고장시 시스템 응답
 Fig. 2 System responses for α sensor fault

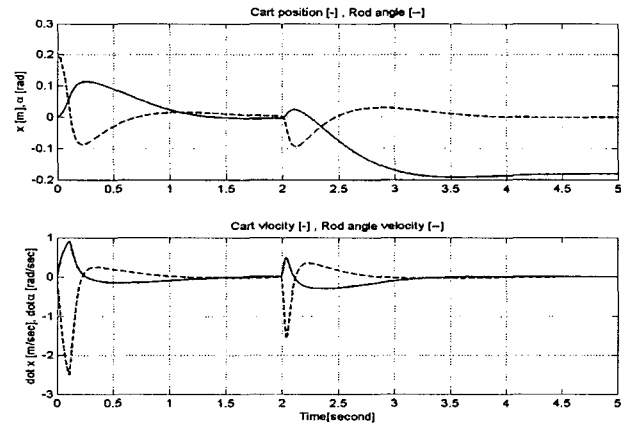


그림 5. \dot{x} 센서 고장시 시스템 응답
 Fig. 5 System responses for \dot{x} sensor fault

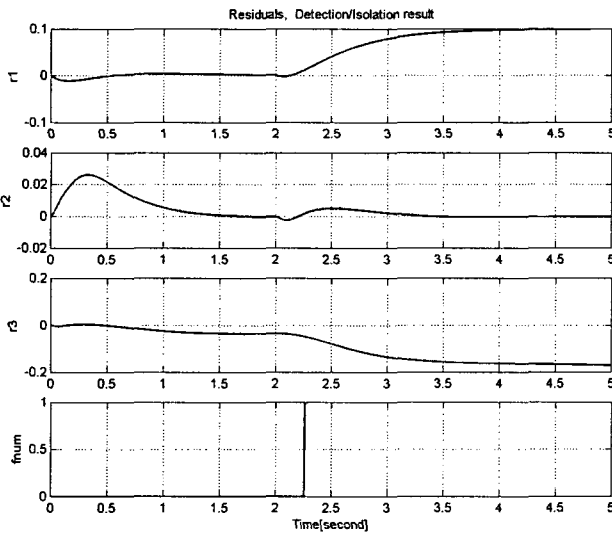


그림 3. α 센서 고장시 잔차 및 검출식별 결과
 Fig. 3 Residuals and FDI result for α sensor fault

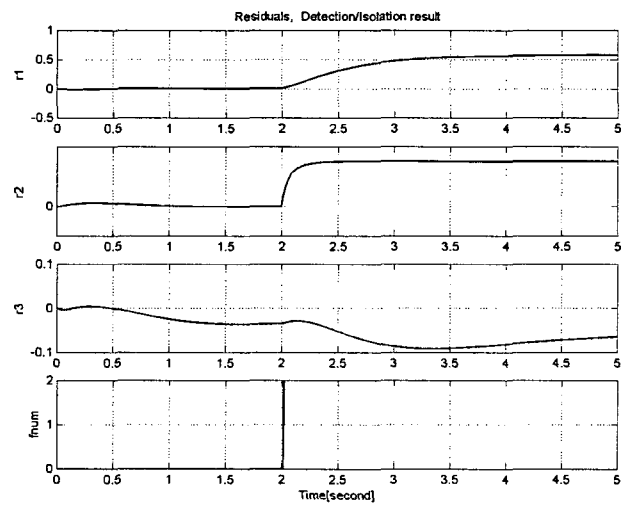


그림 6. \dot{x} 센서 고장시 잔차 및 검출식별 결과
 Fig. 6 Residuals and FDI result for \dot{x} sensor fault

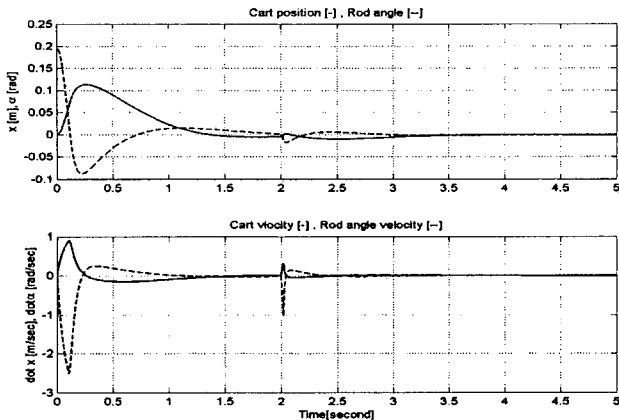


그림 7. \dot{x} 센서 고장시 보상결과
 Fig. 7 Responses of the system with fault compensation for \dot{x} sensor fault

6. 결 론

본 논문에서는 다중관측자를 이용한 고장검출식별기법의 실질적 적용과 관련하여 최대의 문제점인 잔차발생기구의 크기를 축소하기 위하여 기존의 거의 모든 연구에서 채택한 상태관측자 또는 칼만필터 대신 관측자 중 가장 저차의 설계가 가능한 함수관측자를 도입한 잔차 발생기구와 이를 이용한 장치고장 검출식별기구(IFDIS) 및 보상기법을 제안하고 그 유용성을 검토하였다. 제안된 IFDIS는 함수관측자를 이용한 기존의 잔차 발생기법의 적용상 제약조건을 완화시켜줄 뿐 아니라, 출력 센서의 측정오차를 직접 추정하고 이에 근거한 잔차를 고장검출식별에 사용한다. 이 기법은 잔차 발생기구의 단순성으로 인하여 실시간 적용의 관점에서 기존의 상태관측자 기반 기법에 비해 유리하며, 다른 IFDIS와는 달리 고장검출식별, 고장신호의 재생 등 다양한 설계목적에 부합되도록 설계될 수 있다는 유용한 특징을 가진다. 제안된 기법을 전형적인 비선형 시스템인 역진자제어계의 센서고장검출식별에 적용하여 시뮬레이션에 의해 그 검출식별 성능을 검토하였다. 제안된 기법의 중요한 특징의 하나는 고장모델을 도입하여 센서고장의 크기를 추정함으로써 별도의 기구 없이 시뮬레이션 결과에 보인 바와 같이 고성능의 고장허용제어를 가능케 하였다는 점이다.

감사의 글
 본 연구는 2004년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Abbas Enami-Naeini et. al., Robust detection, isolation, and accomodation for sensor failures, NASA report No. CR-174825, July, 1986.
 [2] R. Patton, P. M. Frank and R. N. Clark, Fault diagnosis in dynamic systems, theory and applications, Prentice-Hall, 1989.
 [3] Allard Beutel, Jessica Rye, and Kyle Heming, NASA launches space shuttle return to flight mission, NASA news, July 26, 2005.

[4] Pouliezios, A.D. and G.S. Stavrakakis, Real time fault monitoring of industrial processes, Kluwer Academic Publishers, 1994
 [5] S. Simani, C. Fantuzzi, and S. Beghelli, " Diagnosis techniques for sensor faults of industrial processes", IEEE transactions on Control System Technology, Vol.8, No.5, pp.848-855, 2000.
 [6] H. Hammouri, P. Kabore., S. Othman, and J. Biston, "Fault diagnosis and nonlinear observer, application to a hydraulic process," J. Franklin Institute, Vol. 339, No. 4-5, pp. 455-478, 2002.
 [7] 이기상, 류지수, "함수관측자를 이용한 고장검출식별에 관한 연구," 제어자동화시스템공학 논문지, Vol. 10, No. 11, pp. 883-890, 2003.
 [8] J. Gertler and R. Monajemy,"Generating directional residuals with dynamic parity equations", Proc. of 12th IFAC Congress, Vol.7, pp.505-510, 1993.
 [9] P. Murdoch, "Observer design for a linear functional of the state vector," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 16, No. 3, pp. 308-310, 1973.
 [10] J. Apkarian, A comprehensive and modular laboratory for control systems design and implementation, Quanser Consulting Inc., 1997.

부 록 : 함수관측자 파라미터

$$P_1=P_2=P_3=[1.0 \ 1.0], \quad F_1=\begin{bmatrix} -5.0 & 0.0 \\ 0.0 & -6.0 \end{bmatrix}, \quad F_2=\begin{bmatrix} -5.0 & 0.0 \\ 0.0 & -5.15 \end{bmatrix},$$

$$F_3=\begin{bmatrix} -10.0 & 0.0 \\ 0.0 & -4.0 \end{bmatrix}, \quad L_1=[-0.455 \ 0.74], \quad L_2=[0.8416 \ 0.1272],$$

$$L_3=[-3.780 \ 0.28], \quad J_1=\begin{bmatrix} 1.9989 & 4.2739 \\ 6.3316 & 1.9358 \end{bmatrix}, \quad J_2=\begin{bmatrix} 0.4101 & -0.4865 \\ 0.3935 & -0.5894 \end{bmatrix},$$

$$J_3=\begin{bmatrix} -0.4029 & 2.8017 \\ 6.3316 & 1.9358 \end{bmatrix}, \quad G_1=\begin{bmatrix} 1.0847 \\ -3.8925 \end{bmatrix}, \quad G_2=\begin{bmatrix} 15.0457 \\ -16.667 \end{bmatrix},$$

$$G_3=\begin{bmatrix} 5.8626 \\ -0.495 \end{bmatrix}$$

저 자 소 개



이 기 상(李起常)

1952년 10월 24일생. 1978년 고려대 전기공학과 졸업(학사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983년~현재 단국대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 1995년~1996년 Univ. of Washington 방문교수.
 Tel : (02) 709-2575, Fax : (02) 795-8771
 E-mail : keesang@dku.edu



이 상 문(李相汶)

1967년 11월 14일생. 1992년 단국대 전기공학과 졸업(학사). 2005년 동 대학원 전기공학과 석사과정 수료(석사).
 Tel : (02) 709-2581