2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

역진자 제어계의 고장검출식별 기법

*이상문, *류지수, *이기상, **박태건
*단국대학교 전기공학과, **충북과학대학 전자정보과

Fault Detection and Isolation Scheme for Inverted Pendulum Control System

*Sang-Moon Lee, *Ji-Su Ryu, *Kee-Sang Lee, **Tae-Geon Park
*Dept. of Electrical Eng., Dankook Univ., **Dept. of Electron. & Inform., Chungbuk Tech. College

Abstract - Fault Detection and Isolation(FDI) schemes using unknown input functional observers with very low order are presented. These schemes resolve the major practical difficulties with all FDI systems employing multiple observers for residual generation and can be implemented by the use of microprocessors that are normally used in commercial processes mainly due to the simplicity of the residual generation block. Various design objectives including detection, isolation, estimation and compensation of instrument fault/or process fault are achievable with these schemes. The proposed FDI scheme is applied to an inverted pendulum control system for instrument fault detection.

1. 서 론

궤환제어계는 신속성과 정확성이 요구되는 모든 자동화 공정의 필수요소이다. 최근에는 자동화 공정이 대형화되고 그 복잡성이 증대됨에 따라 요구되는 신뢰성의 확보가 매우 중요한 평가지표로 인식되고 있다. 특히 궤환제어계에 포함된 센서, 구동장치 등의 결함 및 오동작은 전체 자동화 공정의 성능감퇴를 가져오므로 이들 요소의 이상검출과 고장요소의 식별에 관한 연구가 많은 관심을 받고 있다.

센서고장검출(instrument fault detection)기법은 미국 NASA등의 주도로 이미 80년대 초부터 연구되어왔으며[1], 제안된 기법은 주로 칼만필터, 상태관측자 등의 잔차에 근거한 것으로 구조적으로 다중관측자기법 및 검출필터기법으로 분류된다[1]. 최근의 연구동향은 검출식별(fault detection isolation)시스템의 성능을 개선하기 위하여 외란, 파라미터변화 및 모델화되지 않은 동특성에 대해 강인한 동시에 검출 대상 고장에 민감한 잔차발생기구의 개발과 마이크로프로세서에 의한 실시간적용이 가능한 정도의 단순한 FDI기법의 개발이다[2, 3].

본 논문에서는 이제까지 제안된 관측자 중 가장 저차의 설계가 가능한 함수관측자(functional observer)를 도입한 IFD기법을 제안하고, 이를 전형적인 불안정 비선형시스템인 역진자제어계의 센서고장검출에 적용하여 그 실질적 적용가능성을 검토함에 있다. 본 연구의 또 다른 목적은 제안된 고장검출식별 기법의 실험적 검증을 위하여 TI사의 DSP인 TMS320VC33을 사용하여 인터넷을 통한 원격 제어 및 고장 monitoring을 위한 TCP/IP 서버로서 역할을 수행 할 수 있는 제어보드를 개발하고, 여기에 제안된 역진자제어계를 위한 제어기, 고장검출식별 및 보상 알고리즘까지를 탑재한 고장허용제어의 가능성을 검증하는 것이다.

2. 함수관측자 기반 고장검출식별

2.1 미지 입력 함수관측자

다음과 같은 방정식으로 표현되는 시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [A+\delta A]x(t)+[B+\delta B]u(t)+Qd(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \tag{1}$$

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

$$Qu(t)=\delta Ax(t)+\delta Bu(t)+Qd(t) \tag{2}$$

이때 $w(t)$을 q-차원 벡터로 가정한다면 식(1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t)+Bu(t)+Qw(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \tag{3}$$

식(3)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.

$$\begin{aligned} \dot{z}_i(t) &= D_i z_i(t)+E_i\delta(t) \\ w_i(t) &= h_i z_i(t) \end{aligned} \tag{4}$$

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

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Dz(t)+E\delta(t) \\ w(t) &= Hz(t) \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 $z(t)$는 $m(=\sum m_i)$차원 벡터이다. UIFO의 설계 과정은 2 단계로 구성된다. 첫 단계에서는, 식 (3)의 시스템 방정식과 외란 모델을 결합하여 확장시스템방정식(augmented system equation)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t)+Bx(t)+E\delta(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $x^T=[x^T\ z_1^T\cdots z_q^T]$는 $(n+m)$차원 확장상태벡터이고

$$A=\begin{bmatrix} A & QH \\ O & D \end{bmatrix},\quad B=\begin{bmatrix} B \\ O \end{bmatrix},\quad E=\begin{bmatrix} O \\ E \end{bmatrix},\quad \mathcal{C}=[C:O] \tag{7}$$

이다. 두 번째 단계는, 다음과 같은 형태로 함수관측자에 의해서 추정할 q개의 선형함수(independent linear functions)를 정의하고, UIFO를 설계하는 것이다.

$$v(x)=Kx \tag{8}$$

여기서 K는 $(q, n+m)$차원 행렬이다. $[\mathcal{C}: A]$쌍이 가관측하다면 $v(x)$를 추정할 수 있는 UIFO의 설계가 가능하다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= Fs(t)+Jy(t)+Gu(t) \\ \hat{v}(x) &= Ls(t)+Ps(t) \end{aligned} \tag{9}$$

함수관측자의 이득행렬들을 구하는 방법은 잘 알려져 있다[4].

2.2 UIFO 기반 센서고장 검출식별

센서 고장은 다음과 같이 출력에 외란이 포함된 것으로 취급될 수 있다.

$$y(t)=Cx(t)+Q_f w_f \quad \text{or} \quad y(t)=(C+\delta C)x(t) \tag{10}$$

Case(1) $p \geq 4$인 경우.

시스템에 포함된 센서수를 p라하고 두개 이상의 센서가 동시에 고장나는 경우가 없다고 가정한다. 이 경우에는 센서고장의 검출과 고장센서의 식별을 위해 p개의 함수관측자가 도입되어야 하며 각 관측자는 각각 한개의 함수 $f(x)$를 추정한다. 측정신호의 검증을 위해서는 서로 다른 관측자로부터 적어도 두개 이상의 동일 추정치가 확보되어야 한다. 예를 들어 4개의 측정출력을 가진 시스템의 경우, 표 1과 같이 4개의 관측자가 구동된다.

표 1. UIFO의 입력

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
UIFO 1	x	o	o	x
UIFO 2	x	x	o	o
UIFO 3	o	x	x	o
UIFO 4	o	o	x	x

표 1에서 'o'으로 표시된 출력은 함수관측자의 입력으로 적용됨을 나타내며, 'x'로 표시된 출력은 입력으로 적용하지 않는다는 의미이다. 이와 같이 UIFO를 구성하면, 각각의 UIFO가 동일한 선형함수의 추정치를 제공함으로 선형함수에 대한 4개의 중복정보를 얻을 수 있다. 따라서 특정한 센서의 이상의 검출, 식별은 동일하게 선정된 함수에 대한 이들 4개 관측자의 추정치를 비교함으로서 수행된다. 여기서 주목할 사항은 각 UIFO 입력의 최대 수가 p-2라는 사실이다. 함수관측자 기법의 중요한 특징의 하나는 추정하고자하는 함수 $f(x)$를 적절히 선정함으로서 다음과 같은 다양한 설계목적(DO : design objective)의 달성이 가능하다는 사실이다.

DO(1) : 센서고장의 검출식별

UIFO가 추정할 선형함수를 선정하였다면, 다음과 같은 잔차를 정의할 수 있다.

$$r(i,j) = |\hat{v}_i(x) - \hat{v}_j(x)| \tag{11}$$

여기서 전체 잔차의 수는 $p(p\text{-}1)/2$ 이다. 이때 센서 고장의 검출식별은 다음과 같은 논리에 의해서 수행된다.

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

DO(2) : 센서고장의 검출식별 및 고장신호의 재생

UIFO가 추정할 선형함수는 여러 가지 형태로 선정될 수 있지만, 단순히 센서 출력의 선형결합 형태로 다음과 같이 선정하는 것이 편리하다.

$$v_i(y) = \sum_{j=1}^{p} y_j, \quad i = 1 \cdots p \tag{12}$$

위의 경우와 같은 검출 논리가 이용되며, 고장 신호 y_i는 다음 식에 의해서 재생(regeneration)될 수 있다.

$$y_{re}(i) = \hat{v}_i(y) - (y_1 + y_2 + \cdots + y_{i-1} + y_{i+1} + \cdots + y_p) \tag{13}$$

DO(3) : 센서고장의 검출식별 및 제어입력발생

Case(2) p=3 인 경우

이 경우에는 함수관측자의 차수를 최소로 하기 위하여 출력 (y_1, y_2), (y_2, y_3), (y_3, y_1) 각각에 의해 구동되는 함수관측자를 사용한다. 이 경우 고장검출 및 고장센서의 식별은 가능하지만 고장보상을 위한 고장신호의 재생은 불가능하며, 이를 위해서는 IFD시스템을 두 단계로 설계하여야 한다. 첫 단계에서는 고장 검출식별을 수행하며, 두 번째 단계에서는 고장 식별 결과를 이용하여 관측자 구조를 변경함으로써 고장 보상을 수행한다.

[1 단계] DO(2)를 달성하기 위해서 각 UIFO가 추정할 선형함수를 각 UIFO에 입력되는 측정 출력의 합으로 선정하며, 다음과 같은 잔차를 정의한다.

$$r(i) = |v_i(x) - \hat{v}_i(x)| \tag{14}$$

이때 검출, 식별 논리는 다음과 같다.

If $r(i) < th$ for $i = 1$ to 3, then no fault
Otherwise
If $r(1) > th$ & $r(2) < th$ & $r(3) > th$, then Sensor 1 fault
If $r(1) > th$ & $r(2) > th$ & $r(3) < th$, then Sensor 2 fault
If $r(1) < th$ & $r(2) > th$ & $r(3) > th$, then Sensor 3 fault

[2 단계] 고장신호의 재생을 위해서는 별도의 UIFO가 구동되어야 한다. 설계시 2 단계에 사용될 함수관측자는 3개이며 각각 1단계와 동일한 출력에 의해 구동되도록 설계된다. 그러나 이 함수관측자들은 1 단계의 고장센서 식별 결과에 따라 선택적으로 구동되므로 계산량의 문제를 유발하지는 않는다. 구동되는 UIFO는 정상센서 출력을 입력으로 가진 관측자이며, 측정 출력의 합인 $y_1+y_2+y_3$을 추정하도록 설계된다. 이때 고장 신호 y_i의 재생 결과는 위 함수의 추정치에서 정상인 측정출력을 뺀 값으로 주어진다.

3. 적용 연구

제안한 고장 검출식별 기법의 성능을 검증하기 위하여 역진자 제어계에 대한 센서 고장검출식별 및 보상 시스템을 설계하였다.

3.1 역진자 제어계의 모델링

역진자 시스템은 다음의 비선형 방정식으로 표현된다[5].

$$\begin{aligned} &(m_p + m_c)\ddot{x}(t) + m_p \ddot{\alpha} l_p \cos(\alpha) - m_p \dot{\alpha}^2 l_p \sin(\alpha) = F \\ &m_p l_p \cos(\alpha)\ddot{x} - m_p l_p \sin(\alpha)\dot{\alpha}\dot{x} + m_p \ddot{\alpha} l_p^2 - m_p g l_p \sin(\alpha) = 0 \end{aligned} \tag{15}$$

식(15)을 선형화하고, 시스템의 입력으로 힘 F대신에 직류전동기에 인가되는 전압을 고려한 경우 다음과 같은 상태방정식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \ddot{x}(t) \\ \ddot{\alpha}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{m_p g}{m_c} & -\frac{K_m^2 K_g^2}{m_c R r^2} & 0 \\ 0 & \frac{(m_p + m_c)g}{m_c l_p} & \frac{K_m^2 K_g^2}{m_c l_p R r^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \alpha(t) \\ \dot{x}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_m K_g}{m_c R r} \\ -\frac{K_m K_g}{m_c l_p R r} \end{bmatrix} V_m \tag{16}$$

이 식에서 각 파라미터의 의미는 [5]에 기술되어 있다. 식(16)에 각 파라미터 값을 대입한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \ddot{x}(t) \\ \ddot{\alpha}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -4.5 & -16.8 & 0 \\ 0 & 46.9 & 55.3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \alpha(t) \\ \dot{x}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.8 \\ -12.4 \end{bmatrix} V_m \tag{17}$$

3.2 시뮬레이션 및 결과 분석

측정 출력은 α, $\dot{\alpha}$와 전동기의 속도 ω_m을 가정하였다. 식(16)의 방정식에서 변수 $\dot{x}$는 전동기의 속도로부터

$$\dot{x} = r\omega_m \tag{18}$$

와 같이 얻을 수 있다. 제어기로는 상태궤환제어기를 적용하였으며, 제어기를 위한 상태 x는 $\dot{x}$를 적분하여 얻었다. 이 경우는 2 절에서 설명한 3개의 UIFO 설계가 가능한 경우에 속한다. 이 시스템에 대한 UIFO의 최소 차원은 1차이나, UIFO의 수렴성을 고려해서 2차로 설계하였다. 고장검출식별대상은 측정 센서 3개로 선정하였다. 제1단계인 고장 검출식별을 위한

각 UIFO의 추정할 선형함수는 표 2와 같다. 또한 제2단계인 고장 보상을 위한 각 UIFO가 추정할 선형함수는 모두 $y_1+y_2+y_3$이다.

표 2. 고장 검출식별을 위한 UIFO

	v
UIFO 1	$y_1 + y_2$
UIFO 2	$y_2 + y_3$
UIFO 3	$y_1 + y_3$

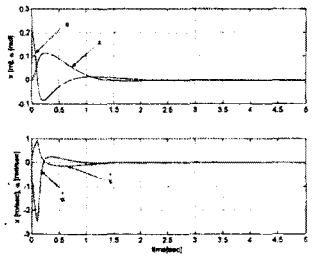

그림 1. 정상시 시스템의 응답

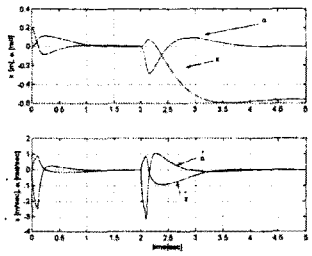

그림 2. α센서 고장시 시스템 응답

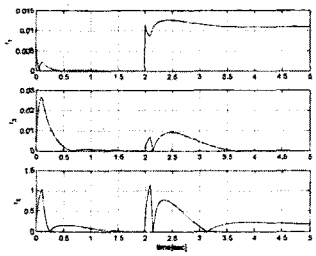

그림 3. α센서 고장시 잔차

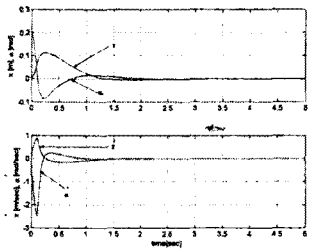

그림 4. α센서 고장시 고장 보상 결과

그림 1은 정상시 시스템의 응답이다. 그림 2는 α센서에 바이어스 형태의 고장을 2초에 투입한 경우에 대한 시스템의 응답이며, 그림 3은 잔차의 궤적이다. 그림 3에서 α센서에 고장이 발생하면 α센서로부터 얻어지는 출력에 의해서 구동되는 UIFO 1과 3는 추정편차를 보이는 것에 비해, 이 출력에 의해 구동되지 않는 UIFO 2는 추정편차가 발생하지 않는다. 따라서 α센서가 고장임을 지시해준다. 그림 4는 α센서에 시스템이 제어를 상실할 정도의 고장을 투입하고, 고장 보상을 수행한 결과이며, 이 결과에 의하면 고장을 보상함으로써 거의 정상시와 같은 제어성능을 유지할 수 있음을 보여준다.

4. 개발된 실험 장치

제안된 고장 검출식별 기법의 실험적 검증을 위하여 그림 5와 같은 제어보드를 개발하였다. 개발된 제어보드의 주 프로세서는 TI의 고성능 DSP인 TMS320VC33이다. 개발된 제어보드의 특징은 인터넷을 통한 원격 제어 및 고장 monitoring을 위한 TCP/IP 서버로서 역할을 수행 할 수 있다. 여기서 데이터 링크계층의 Ethernet interface부는 RTL8201L (Realteck)을 사용하였으며, 네트워크 계층과 전송계층을 구현하기 위해서는 TCP/IP 프로토콜을 하드웨어적으로 구현한 i2chip W3100(Wiznet)을 사용하였다. 본 TCP/IP 서버에 클라이언트는 최대 4개까지 연결될 수 있다. 그리고 전체 실험 장치의 구성도는 그림 6과 같다.

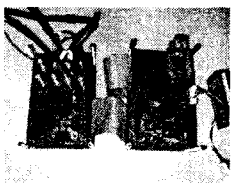

그림 5. 개발된 제어보드(TCP/IP Server)

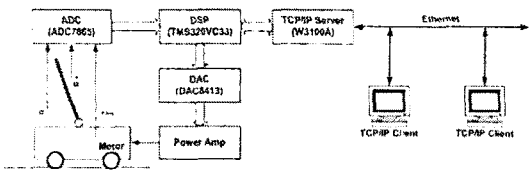

그림 6. 전체 시스템 구성도

5. 결 론

본 논문에서는 이제까지 제안된 관측자 중 가장 지차의 설계가 가능한 함수관측자를 도입한 IFD기법을 제안하고, 이를 전형적인 불안정 비선형시스템인 역진자제어계의 센서고장검출에 적용하여 그 실질적 적용가능성을 검토하였다. 제안된 고장 검출식별 기법의 실험적 검증을 위하여 TI사의 DSP인 TMS320VC33을 사용하여 인터넷을 통한 원격 제어 및 고장 monitoring을 위한 TCP/IP 서버로서 역할을 수행 할 수 있는 제어보드를 개발하였으며, 이를 이용하여 역진자제어계를 위한 제어기, 고장검출식별 및 보상 알고리즘까지를 탑재한 고장허용제어의 가능성을 실험적으로 입증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] R. Patton, P. M. Frank and R. N. Clark, Fault diagnosis in dynamic systems, theory and applications, Prentice Hall, 1989.

[2] 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.

[3] 이기상, 류지수, "함수관측자를 이용한 고장검출식별에 관한 연구," 제어자동화시스템공학 논문지, Vol. 10, No. 11, pp. 883 890, 2003.

[4] P. Murdoch, "Observer design for a linear functional of the state vector," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 16, No. 3, pp. 308 310, 1973.

[5] J. Apkarian, A comprehensive and modular laboratory for control systems design and implementation, Quanser Consulting Inc., 1997.