

함수관측자 기반 고장검출진단시스템의 설계 및 응용

이상문, 이기상*, 박태건†
 삼성전자, 단국대학교 전기공학과, 충북과학대 전자정보과‡

Desing of Fault Detection and Diagnosis systems using function observers

Sang-Moon Lee, Kee-Sang Lee*, and Tae-Geon Park†

Samsung Electronics, Dept. of Elec. Eng., Dankook Univ, Dept. of Elec. Info, Chungbuk Provincial College of S&T‡

Abstract - 본 논문에서는 제어시스템의 신뢰성 향상을 위한 고장허용제어계를 실현하기 위하여, 함수관측자를 도입한 장치고장검출(IFD)기법 및 고장보상알고리즘을 제안하고, 이를 전형적인 불안정 비선형시스템인 역진자제어계에 적용하였다. 제안된 IFDS는 기존의 다중관측자기법과 동일한 구조를 가지지만 최저차 설계가 가능한 미지입력 함수관측자를 채택함으로써 알고리즘의 단순화를 가하였을 뿐 아니라 고장량의 추정 등 다양한 설계목적에 고려하여 설계될 수 있다는 특징을 가진다. 제안된 고장 검출식별 기법의 제안된 역진자제어계를 위한 제어기, 고장검출식별 및 보상알고리즘을 모두 포함한 상태에서 고장허용제어의 가능성을 검증하였다.

1. 서 론

폐환제어계는 신속성과 정확성이 요구되는 모든 자동화 공정의 필수요소이다. 최근에는 자동화 공정이 대형화되고 그 복잡성이 증대됨에 따라 요구되는 신뢰성의 확보가 매우 중요한 문제로 인식되고 있다. 특히 폐환제어계에 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 IFD 기법의 개발이다 [2, 3]. 이와 관련된 최근의 연구로는 최대차수가 [(가관측지수-1)*피추정함수의 수] 로 알려진 함수관측자를 이용한 잔차 발생기구의 제안과 이를 이용한 고장검출식별 및 보상기법 등이 있다 [3,4].

함수관측자를 이용한 FDI기법은 [3]에 언급된 바와 같이 기존의 상태관측자 기반 기법에 비해 매우 낮은 차원으로 설계될 수 있을 뿐 만 아니라, 다른 IFD 기법과는 달리 고장검출식별, 고장신호의 재생, 등 다양한 설계목적에 부합되도록 설계될 수 있다는 특징을 가진다. 그러나 이제까지의 모든 연구 결과는 기본적으로 4개 이상의 측정출력을 가진 시스템을 가정하였기 때문에 일반적인 제어시스템에의 적용이 제한되었다[3]. 본 논문의 목적은 기존의 다중관측자 기법과 같이 [1][2], 3개 이상의 측정출력을 가진 시스템에 적용 가능한 함수관측자 기반 IFD기법을 제안하고, 이를 전형적인 불안정 비선형시스템인 역진자제어계의 센서고장검출에 적용하여 그 적용가능성을 검토함에 있다. 본 연구의 또 다른 목적은 제안된 고장 검출식별 기법의 실험적 검증을 위하여 TI사의 DSP인 TMS320VC33을 사용하여 제어보드를 개발하고, 여기에 제안된 역진자제어계를

위한 제어기, 고장검출식별 및 보상 알고리즘까지를 탑재한 고장허용제어의 가능성을 검증하는 것이다.

2. 배경 및 문제의 설정

2.1 함수관측자

다음과 같은 방정식으로 표현되는 시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^l$, $y(t) \in R^p$ 는 각각 상태, 입력, 출력벡터이다. 함수관측자는 식(2)로 주어진 상태변수들의 선형 결합을 추정한다.

$$v(x) = Kx \quad (2)$$

여기서 K 는 (q, n) 차원 행렬이다. $[C : A]$ 쌍이 가관측하다면 $v(x)$ 를 추정할 수 있는 FO의 설계가 가능하다.

$$\begin{aligned} \dot{v}(t) &= Fv(t) + Jy(t) + Gu(t) \\ \hat{v}(x) &= Lv(t) + Ps(t) \end{aligned} \quad (3)$$

위에서 식(3)의 추정치가 식(2)에 수렴하기 위한 조건은 다음과 같다 [4].

$$\begin{aligned} TA - FT &= JC \\ LC + PT &= K \\ G &= TB \end{aligned} \quad (4)$$

이 경우 $\lim_{t \rightarrow \infty} s = Tx$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{v}(x) = v(x)$ 이 성립된다.

함수관측자의 이득행렬들을 구하는 방법은 잘 알려져 있으므로 본고에서는 생략한다 [5].

2.2 함수관측자 기반 센서고장 검출식별

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

$$y(t) = Cx(t) + Q\omega, \quad (5)$$

시스템에 포함된 센서수를 p 라하고 두개 이상의 센서가 동시에 고장나는 경우가 없다고 가정한다. 이 경우에는 센서고장의 검출과 고장센서의 식별을 위해 p 개의 함수관측자가 도입되어야 하며 각 관측자는 각각 한개의 함수 $v(x)$ 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 1에서 'o'로 표시된 센서의 출력(추정치)은 함수관측자의 입력으로 적용됨을 나타내며, 'x'로 표시된 센서 출력은 입력으로 적용하지 않는다는 의미이다. 이 경우, 각각의 FO가 동일 선형함수의 추정치를 제공함으로써 4개의 중복정보를 얻을 수 있다.

표 1. 함수관측자 입력

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
FO 1	x	o	o	x
FO 2	x	x	o	o
FO 3	o	x	x	o
FO 4	o	o	x	x

따라서 특정한 센서의 이상의 검출, 식별은 동일하게 선정된 함수에 대한 이들 4개 관측자의 추정치를 비교함으로써 수행된다. 함수관측자 기법의 중요한 특징의 하나는 추정하고자 하는 함수 $v(x)$ 를 적절히 선정함으로써 다음과 같은 다양한 설계목적(DO : design objective)에 부합되도록 설계될 수 있다는 점이다 [3].

DO(1) : 센서고장의 검출식별

DO(2) : 센서고장의 검출식별 및 고장신호의 재생

DO(3) : 센서고장의 검출식별 및 제어입력발생

그러나 [3,4]의 연구결과는 $p \geq 4$ 인 경우에만 적용이 가능하며 이 적용조건은 기존의 다중관측자기법[1]의 적용조건($p \geq 3$)보다 까다로운 것이므로 이를 완화하기 위한 대책이 필요하다.

3. 제안된 장치고장검출기법(IFDS)

본절에서는 기존함수관측자 기반 IFDS의 적용조건을 완화하기 위하여 고장모델을 도입한 미지입력 함수관측자를 도입한 IFDS를 제안한다. 이 기법은 고장모델링기법에 근거하여 미지입력 함수관측자를 설계하고 미리 결정된 논리에 의해 고장식별이 가능하도록 고장변수만을 추정함수로 선정하는 것이다. 센서 고장의 변화가 느리다고 가정하면, 각각의 센서 고장은 다음과 같이 모델링 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_i(t) &= D_i z_i(t) + E_i \delta(t) \\ w_i(t) &= h_i z_i(t) \end{aligned} \quad (6)$$

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.

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Dz(t) + E\delta(t) \\ w(t) &= Hz(t) \end{aligned} \quad (7)$$

식(1)의 시스템 방정식과 센서 고장 모델을 결합하여 다음과 같은 확장시스템 방정식을 얻을 수 있다.

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

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

$$A = \begin{bmatrix} A & O \\ O & D \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B \\ O \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} O \\ E \end{bmatrix}, C = [C \ QF] \quad (9)$$

이다. 다음과 같은 형태로 함수관측자에 의해서 추정할 q 개의 선형함수를 정의하고, UIFO를 설계한다.

$$v(x) = Kx \quad (10)$$

여기서 K 는 $(q, n+m)$ 차원 행렬이다. $[C \ A]$ 행이 가관측하다면 $v(x)$ 를 추정할 수 있는 UIFO의 설계가 가능하다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{v}}(t) &= F\hat{v}(t) + Jv(t) + Gu(t) \\ \hat{v}(x) &= L_1\hat{v}(t) + Fv(t) \end{aligned} \quad (11)$$

본 절에서 제안된 IFDS의 구성은 그림[1]과 같다. 그림[2]에서 출력(y_1, y_2)에 의해 구동되는 UIFO1은 $v_1 = w_1, (y_2, y_1)$ 에 의해 구동되는 UIFO2는 $v_2 = w_2$, 그리고 (y_3, y_1) 에 의해 구동되는 UIFO 3는 $v_3 = w_3$ 을 추정하도록 설계한다. 이 IFDS에서 잔차는 다음과 같이 정의될 수 있으며

$$r_i = |v_i|, i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

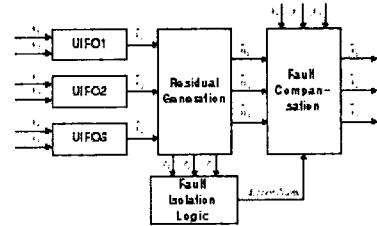
이 잔차를 이용한 고장검출식별논리는 다음과 같다.

표2. 고장검출식별 논리(입제치와의 비교)

failed sensor	r_1	r_2	r_3
sensor 1	>	<	>
sensor 2	>	>	<
sensor 3	<	>	>

고장신호는 다음과 같이 추정된 고장의 크기를 측정 출력에서 빼서 추정 할 수 있다.

$$\hat{y}(i) = y(i) - \hat{w}(i) \quad (13)$$



그림[1]. IFDS 구성도

4. 적용 연구

제안한 고장 검출식별 기법의 성능을 검증하기 위하여 역진자 제어계에 대한 센서 고장검출식별 및 보상 시스템을 설계하였다. 역진자계는 다음의 비선형 방정식으로 표현된다 [6].

$$\begin{aligned} (m_p + m_s)\ddot{x}(t) + m_s \ddot{\alpha} l_p \cos(\alpha) - m_p \ddot{\alpha}^2 l_p \sin(\alpha) &= F \\ m_p l_p \cos(\alpha) \ddot{x} - m_p l_p \sin(\alpha) \ddot{\alpha} \dot{x} + m_s \ddot{\alpha} l_p - m_g l_p \sin(\alpha) &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

윗식을 선형화하고, 시스템의 입력으로 힘 F 대신에 직류전동기에 인가되는 전압을 도입하면 다음의 상태방정식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \dot{x}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{m_p g}{m_c} & -\frac{K_m^2 K_x^2}{m_c R^2} & 0 \\ 0 & \frac{(m_p + m_s)g}{m_s l_p} & \frac{K_m^2 K_x^2}{m_s l_p R^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \alpha(t) \\ \dot{x}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_m K_x}{m_c R r} \\ -\frac{K_m K_x}{m_c l_p R r} \end{bmatrix} V_m \quad (15)$$

이 식에서 각 파라미터의 값과 의미는 [6]에 기술되어 있다.

측정 출력은 $\alpha, \dot{\alpha}$ 와 전동기의 속도 ω_m 을 가정하였다. 식

(15)의 방정식에서 변수 \dot{x} 는 전동기의 속도로부터

$$\dot{x} = r\omega_m \quad (16)$$

과 같이 얻을 수 있다. 제어기로는 $u = -KX$ 인 상태피드백제어를 적용하였으며, 페루프제어계의 극점을 $(-20, -80, -2+j2, -2-j2)$ 으로 선정하였으며, 이를 달성하도록 결정된 이득행렬은 $K = [-105.4496 \ -198.0692 \ -63.7846 \ -26.4876]$ 이다.

고장모델링기법에 근거하여 제안된 UIFO를 도입하여 미리 결정된 논리에 의해 고장식별이 가능하도록 고장변수만을 추정함수로 선정하였다. 또한 고장 보상은 각 UIFO에서 추정된 오차를 측정출력에서 뺀으로서 수행된다. 그림[2]는 α 센서에 바이어스 형태의 고장을 2초에 투입한 경우에 대한 시스템의 응답이며, 그림[3]은 잔차의 궤적이다. 그림[3]에서 α 센서에 고장이 발생하면 α 센서로부터 얻어지는 출력에 의해서 구동되는 UIFO 1과 3에 의해 발생하는 잔차(r_1, r_3)는 영에 수렴하

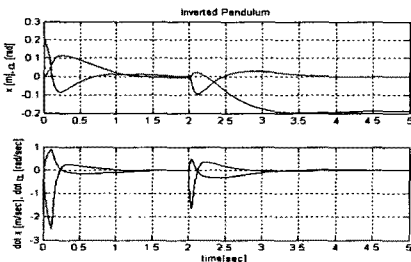
지 못하며, 이 출력에 의해 구동되지 않는 UIFO 2의 잔차(r_2)는 영에 수렴한다. 따라서 α 센서가 고장임을 지시해준다. 그림 [4]는 α 센서에서 시스템이 제어를 상실할 정도의 고장을 투입하고, 고장 보상을 수행한 결과이며, 이 결과에 의하면 고장발생 직후인 2.1초에 고장을 검출 식별하며, 보상을 수행함으로써 3.5초(고장 후 1.5초)에 거의 정상상와 같은 제어성능으로 복귀함을 보여준다. 그림[5]는 α 센서에서 고장을 투입한 경우의 시스템 응답이며, 그림[6]은 잔차의 궤적을 나타낸다. 그림[7]은 고장 보상을 수행한 결과이다.

5. 결 론

본 논문에서는 이제까지 제안된 관측자 중 가장 저차의 설계가 가능한 함수관측자를 도입한 IFD기법을 제안하고, 이를 전형적인 불안정 비선형시스템인 역진자제어계의 센서고장검출에 적용하여 그 실질적 적용가능성을 검토하였다. 제안된 고장검출식별 기법의 실험적 검증은 위하여 TI사의 DSP인 TMS320VC33을 사용하여 제어보드를 개발하고, 여기에 제안된 역진자제어계를 위한 제어기, 고장검출식별 및 보상 알고리즘까지를 탑재한 고장허용제어의 가능성을 검증하기 위한 실험을 실시하였으며 준정상상태에서 비교적 양호한 고장검출 및 보상이 이루어짐을 확인하였다. 이후 제안된 함수관측자 기반 IFD기법을 다중모델과 결합하여 과도상태에서의 고장검출 및 고장추정성능을 개선하기 위한 연구를 계속 진행할 것이다.

[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] 이상문, 류지수, 이기상, 박태건, "역진자제어계의 고장검출식별 기법" 2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 D권, pp.2227-2229, 2004.
- [5] P. Murdoch, "Observer design for a linear functional of the state vector," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 16, No. 3, pp. 308-310, 1973.
- [6] J. Apkarian, *A comprehensive and modular laboratory for control systems design and implementation*, Quanser Consulting Inc., 1997.



그림[2] α 센서 고장시 시스템 응답

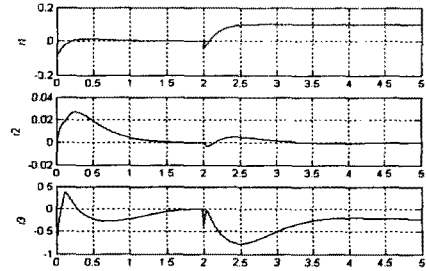


그림 [3] α 센서 고장시 잔차

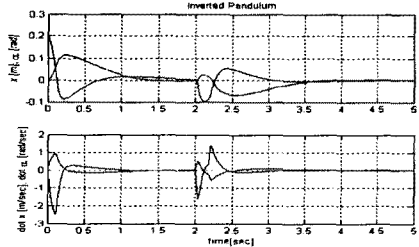


그림 [4] α 센서 고장시 고장 보상 결과

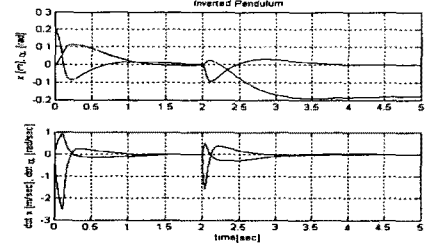


그림 [5] x 센서 고장시 시스템 응답

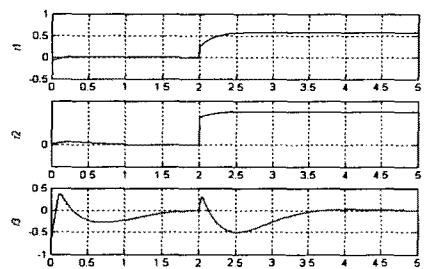


그림 [6] x 센서 고장시 잔차

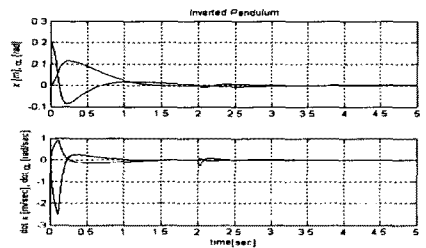


그림 [7] x 센서 고장시 보상결과