

A Fuzzy Model Based Sensor Fault Detection Scheme for Nonlinear Dynamic Systems

李 起 常[†]
(Kee-Sang Lee)

Abstract - A sensor fault detection scheme(SFDS) for a class of nonlinear systems that can be represented by Takagi-Sugeno fuzzy model is proposed. Basically, the SFDS may be considered as a multiple observer scheme(MOS) in which the bank of state observers and the detection & isolation logic are included. However, the proposed scheme has two great differences from the conventional MOSs. First, the proposed scheme includes fuzzy fault detection observers(FFDO) that are constructed based on the T-S fuzzy model that provides very good approximation to nonlinear dynamic systems. Secondly, unlike the conventional MOS, the FFDOs are driven not parallelly but sequentially according to the predetermined sequence to avoid the massive computational burden, which is known to be the biggest obstacle to the practical application of the multiple observer based FDI schemes. During the operating time, each FFDO generates the residuals carrying the information of a specified fault, and the corresponding fault detection logic unit performs the logical operations to detect and isolate the fault of interest. The proposed scheme is applied to an inverted pendulum control system for sensor fault detection/isolation. Simulation study shows the practical feasibility of the proposed scheme.

Key Words : Sensor fault detection, Multiple observer FDI scheme, T-S fuzzy model, Inverted pendulum

1. 서 론

제어시스템이 대형화되고 복잡해짐에 따라 요구되는 시스템 신뢰도 확보를 위한 고장검출식별기법(Fault Detection Isolation: FDI)에 관한 연구가 큰 주목을 받고 있다[1-3]. 이제까지 제안된 다양한 기법 중 고성능제어계를 위한 대표적인 FDI기법은 여러 개의 관측자를 병렬 구동하고 그 추정 결과를 상호 비교하는 다중 관측자기법(Multiple Observer Scheme: MOS)이다[1,2,4]. 90년대 이후로는 선형시스템을 대상으로 잘 발전된 FDI기법을 비선형계로 확장하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 다양한 형태의 비선형관측자 기반 기법들이 개발된 바 있다[5-8]. 그러나 비선형계의 경우에는 특정 고장에 둔감하고 또 다른 고장에 매우 민감한 특성을 가진 잔차(residual)를 얻기 위한 다중의 관측자를 설계하는 일이 쉽지 않아 이들 대부분의 기법은 특별한 조건이 만족되는 경우에만 그 적용이 가능하다. 따라서 기존 비선형제어 및 관측자의 적용 상 문제점을 해결하고 적용 조건을 완화하기 위하여 기존의 해석적 기법과 인공지능기법의 결합을 통한 다양한 접근 방법이 연구되고 있다[9]. 그중 비선형 시스템을 위한 퍼지모델링 기법은 데이터의 속성만을 나타내는 신경망모델로는 달성할 수 없는 해석적 접근을 가능케 한다는 관점에서 비선형시스템의 해석과 제어에 유용하게 사용될

수 있다. 특히 T-S퍼지모델은 전건부 변수에 따라 형성된 입력공간을 적절한 형태로 분할하고, 각 분할영역에 대응되는 선형모델을 후건부로 설정한 비선형 동적시스템 표현 방식으로 넓은 범위의 비선형계 표현에 적합하다. T-S퍼지 모델의 도입은 완성 단계의 매우 다양한 선형계 해석 및 설계 기법을 비선형계에 확장 적용할 수 있는 주요 방법 중 하나로 인식되어 비선형계의 제어기 및 상태관측자 설계에 적극적으로 도입되고 있으며[10-13], 최근에는 이 모델에 근거한 고장검출기법과 고장허용제어에 관한 연구도 보고되고 있다[14-18].

Ichtov[16] 등은 각각의 검출대상 고장이 발생한 경우의 시스템 특성을 온라인 식별기법에 의해 T-S모델로 표현한 다음, 시스템의 입출력에 근거하며 각 고장모델의 확률검사를 시행하는 고장검출식별기법을 제안하였으며, Lee[17] 등은 T-S 퍼지모델의 온라인 식별 결과로 얻어지는 파라미터의 변화를 잔차로 활용하는 고장검출식별기법을 제안하였다. 또한 Mendonca[18] 등은 온라인 모델-파라미터 식별기법을 도입하여 각 검출대상고장 고장시의 시스템 입출력특성을 정적인 T-S퍼지모델로 표현하고, 각 고장에 대한 퍼지모델 출력과 시스템 출력을 논리적으로 비교 검토함으로써 고장을 검출식별하는 기법을 제안한 바 있다.

본 논문의 기본적인 목적은 선형계통에 대한 고장검출식별 기법 중 가장 많은 연구가 진행된 다중관측자 기반 FDI 기법을 비선형제어계의 센서고장 검출식별에 확장 적용하기 위하여 T-S퍼지모델에 근거한 (다중)퍼지관측자 기반 기법을 제안하고, 이를 전형적인 비선형계인 역진자제어계에 적

[†] 교신저자, 正會員 : 壇國大學校 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : keesang@dku.edu
接受日字 : 2006年 11月 20日
最終完了 : 2006年 12月 4日

융합으로서 그 실질적 적용가능성을 검토함에 있다. 제안된 SFDS (Sensor Fault Detection System)는 고장검출 대상 센서 수와 같은 수의 퍼지고장검출관측자(Fuzzy Fault Detection Observer: FFDO)와 FFDO에 의해 제공되는 정보에 근거하여 발생한 고장을 검출하고 식별하는 고장검출식별논리부로 구성된다. 이 SFDS의 초기 발상은 T-S 모델에 근거하여 설계되는 다중 퍼지관측자를 도입하여, 비선형시스템의 센서고장검출식별을 위한 DOS[1], GOS[4] 구조의 SFDS를 구성하는 것이었다. 그러나 T-S모델에 근거하여 설계된 퍼지관측자는 실질적으로 T-S모델 내의 규칙수와 동일한 수의 관측자 군을 의미하고, 따라서 MOS구조의 SFDS를 운영하기 위해서는 (T-S모델의 규칙수×검출대상 고장 수)와 같은 수의 관측자와 검출식별논리를 구동해야한다. 이러한 퍼지관측자의 병렬운전으로 인하여 발생하는 매우 큰 계산량은 이 기법의 실시간 적용을 불가능하게 한다. 따라서 본 논문의 중요 연구 내용의 하나는 T-S 모델에 근거한 퍼지관측자 기반 SFDS의 실질적 적용의 가장 큰 걸림돌인 다중관측자의 병렬 구동에 기인한 계산량의 문제를 해결할 수 있는 운용방법을 제안하는 것이다. 제안된 SFDS는 근본적으로 이제까지 모든 MOS기법에서 채택해온 (다중관측자의) 병렬구동방식을 순차구동방식으로 변경한 것이며, 검출대상 고장과 동일한 수의 FFDO와 FFDO의 구동순서 결정알고리즘 및 고장검출식별논리부로 구성된다. 또한 제안된 SFDS에 도입되는 FFDO는 각 고장에 대한 순차적 검사가 가능하도록 각각 지정된 고장에 대한 검출식별정보를 제공하도록 설계된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 비선형계에 대한 T-S 퍼지모델에 대하여 기술하며, 제3절에는 제안된 SFDS에서 센서고장의 검출식별 정보를 제공할 퍼지고장검출관측자 설계과정을 기술하였다. 제4절에서는 FFDO를 도입한 고장검출시스템의 운영 방법과 고장검출식별논리에 대하여 기술하였고, 제5절에서는 제안된 기법을 역진자제어계의 센서고장검출식별에 적용하고 그 성능을 분석함으로써 실질적 적용가능성을 입증하였다.

2. 비선형계를 위한 T-S 퍼지 모델

T-S퍼지모델은 비선형시스템의 특정 동작점 근방에서의 선형적 입출력 관계를 나타내는 퍼지 IF-THEN 규칙군으로 표현된다. T-S모델의 각 규칙은 다음과 같다.

Plant Rule i :

$$\begin{aligned} &\text{If } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots z_p(t) \text{ is } M_{ip} \\ &\text{THEN } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 전진부 변수 $z_i(t), i=1, 2, \dots, p$ 는 동작점(영역)의 표현에 필수적인 상태변수이고, M_{ij} 는 i 번째 규칙에서 $z_j(t)$ 의 범위를 나타내는 퍼지집합이며, r 은 IF-THEN 규칙의 수이다. $x(t) \in R^n$ 은 상태벡터, $u(t) \in R^m$ 은 입력벡터, $y(t) \in R^q$ 는

출력벡터이며, A_i, B_i, C_i 는 각각 $(n,n), (n,m)$ 및 (q,n) 차원의 행렬이다. 이 퍼지시스템의 출력은 다음으로 얻어진다.

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)]}{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))} \quad (2a)$$

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))} \quad (2b)$$

위에서 $\mu_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t))$ 이다. 여기에 식(3)을 도입하면,

$$h_i(t) = \frac{\mu_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))} \quad (3)$$

퍼지모델의 출력은 식(4)와 같이 단순화된다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)] \quad (4a)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i x(t) \quad (4b)$$

여기서 $h_i(z(t))$ 는 다음 성질을 가진다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) &= 1 \\ h_i(z(t)) &\geq 0, i=1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (5)$$

고장검출식별문제를 다루기 위해 더하기형 센서고장이 발생한 경우를 고려한다. 이 경우 T-S모델은 다음과 같다.

Plant Rule I :

$$\begin{aligned} &\text{If } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots z_p(t) \text{ is } M_{ip} \\ &\text{THEN } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) + D_i f(t) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (6)$$

또는

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)] \quad (7a)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [C_i x(t) + D_i f(t)] \quad (7b)$$

위에서 f 는 q 차원의 고장벡터이고, D_i 는 (q,q) 차원의 고장분포(fault distribution)행렬로서 $D_1 = D_2 = \dots = D_r = D$ 인 단위행렬로 가정한다.

3. 퍼지 고장 검출 관측자

본 논문에서 제안된 SFDS는 근본적으로 이제까지 MOS 기법에서 채택해온 (다중관측자의) 병렬구동방식 대신 한번에 한개의 FFDO만을 구동하고 이로부터 제공되는 정보에 근거하여 지정된 고장을 검출식별하는 순차검사방식을 택한 것이다. 따라서 각각의 FFDO는 지정된 고장의 검출식별에 충분한 정보를 제공하도록 설계되어야 한다. 본 절에서 제안

된 FFDO는 미지입력관측자의 단순한 변형이지만 미리 선정된 센서고장에 대한 둔감성을 가지며, 동시에 그 고장이 발생한 경우 고장량의 추정 기능을 갖도록 설계될 수 있어 순차 검사를 가능케 해주는 중요한 특성을 가진다. FFDO의 설계를 위해 식(6)에 주어진 r 개의 $[C_i : A_i]$ 가 모두 가관측이라 가정한다. 이제 j 번째 센서의 고장만을 고려하면 식(8)의 T-S모델이 얻어지며, 여기서 d^j 는 D 의 j 번째 열을 나타낸다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)] \quad (8a)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [C_i x(t) + d^j f_j(t)] \quad (8b)$$

제안하는 FFDO를 지정된 고장에 대한 잔차의 둔감성과 고장추정 기능을 동시에 가지도록 설계하는 한가지 방법은 식(9)와 같은 고장모델을 도입하여 고장변수를 확장 시스템의 상태변수로 취급하는 것이다[19].

$$\begin{cases} \dot{w}_j(t) = F_j w_j(t) + E_j \delta(t) \\ f_j(t) = H_j w_j(t) \end{cases} \quad (9)$$

이제 식(8)의 T-S모델과 식(9)의 고장 모델을 결합하면 식(10)의 확장시스템 방정식을 얻을 수 있다. 위식에서 $\delta(t)$ 의 항은 초기치에만 영향을 주므로 관측자 설계 과정에서는 고려할 필요가 없으며, 따라서 확장 상태방정식에서는 이항을 생략한다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [\underline{A}_i \hat{x}(t) + \underline{B}_i u(t)] \quad (10a)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \underline{C}_i \hat{x}(t) \quad (10b)$$

위식에서 $\hat{x} = \begin{pmatrix} x \\ w_j \end{pmatrix}$ 이며 각 행렬은 식(11)과 같다.

$$\underline{A}_i = \begin{bmatrix} A_i & O \\ O & F_j \end{bmatrix}, \underline{B}_i = \begin{bmatrix} B_i \\ O \end{bmatrix}, \underline{C}_i = [C_i : d^j H_j] \quad (11)$$

이제 j 번째 고장변수 f_j 의 발생을 검출하고 고장의 크기를 추정할 수 있는 검출관측자는 식(10)(11)의 T-S퍼지모델에 대한 일반적인 관측자 설계 과정에 의해 설계된다. 퍼지검출관측자는 식(12)의 IF-THEN 규칙으로 표현된다.

Fuzzy Fault Detection Observer Rule I :

IF $z_1(t)$ is M_{i1} and $\dots z_p(t)$ is M_{ip} , THEN

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \underline{A}_i \hat{x}(t) + \underline{B}_i u(t) + \underline{K}_i (y(t) - \hat{y}^j(t)) \\ \hat{y}^j(t) = \underline{C}_i \hat{x}(t) \end{cases}, i = 1, 2, \dots, r \quad (12)$$

또한 퍼지검출관측자의 추론 결과는 식(13)과 같이 간단하게 기술할 수 있다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [\underline{A}_i \hat{x}(t) + \underline{B}_i u(t) + \underline{K}_i (y(t) - \hat{y}^j(t))] \quad (13a)$$

$$\hat{y}^j(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \underline{C}_i \hat{x}(t) \quad (13b)$$

식(12)(13)에서 \hat{y}^j 는 j 번째 고장을 고려한 FFDO의 출력력을 의미한다. 이식에서 상태추정편차를 $\tilde{x} = x - \hat{x}$ 라 하면 식(14)의 편차방정식이 얻어진다.

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) (\underline{A}_i - \underline{K}_i \underline{C}_i) \tilde{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \underline{A}_{oi} \tilde{x}(t) \quad (14)$$

따라서 식(12)(13)의 FFDO는 다음 조건을 만족하는 양한정(positive definite) 행렬 P 가 존재하면 그 수렴이 보장된다 [10].

$$A_{oi}^T P + P A_{oi} < 0, \text{ for } i = 1, 2, \dots, r \quad (15)$$

이 FFDO는 정상동작시 및 j 번째 고장 발생시 정확한 추정결과를 제공한다. 즉,

IF j th fault occurred,

Then $\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} r_j(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - \hat{y}^j(t)) = 0 \\ \hat{f}_j = H_j \hat{w}_j \neq 0 \end{cases} \quad (16)$

고장검출논리의 단순성을 위해 $[row_k(C_i) : A_i], k = 1, 2, \dots, q$ 가 모두 가관측이라 가정하면, 위의 FFDO는 설계과정에서 모델화되지 않은 고장에 대하여 민감하며 $\lim_{t \rightarrow \infty} r_j(t) \neq 0$ 인 특성을 가진다. 이러한 검출관측자의 특성은 순차적 검사에 의한 고장 식별을 가능하게 해준다.

4. 퍼지고장검출관측자를 이용한 센서고장검출

전절에서 설계한 FFDO는 단지 한개의 고장에 대하여 둔감한 특성을 가지므로 상정한 모든 고장의 식별을 위해서는 최소한 검출대상 고장수와 동일한 수의 검출관측자가 필요하다. 검출대상 고장 수를 l 개라 가정하면 기본적인 고장검출식별과정은 l 개의 관측자를 병렬적으로 구동하고 l 개의 (r, f_j) 쌍에 대한 논리적 검사를 시행하여 식(16)의 성질을 갖는 잔차쌍을 밝혀내는 것이다. 중요한 사실은 병렬 구동방식을 취할 경우, 확장 상태벡터의 차원과 동일 차원을 가진 $(r \times l)$ 개의 관측자방정식을 동시에 실시간 구동해야한다는 점이다. 예를 들어, T-S모델의 규칙수 5, 검출대상 고장 수 5인 경우, 25개의 관측자 방정식을 동시 구동하는 것은 아무리 고성능 DSP를 도입한다고해도 실현이 불가능하다.

본 절에서는 이러한 실현상의 문제점을 해결하기 위한 대책으로서 순차적 검사기법을 제안한다. 제안된 순차적 검사기법은 고장수와 동일한 개수의 퍼지고장검출관측자를 미리 정해진 순서에 따라서 구동하고, 구동 결과 생성되는 잔차(residual)에 대한 논리적 검사를 수행하여 퍼지고장검출관측자 설계시 고려한 과장의 발생여부를 판별하는 방식이다. 따라서 제안된 SFDS에서는 검사 순서의 결정이 매우 중요하다. 검사 순서, 즉, 퍼지고장검출관측자 투입 순서가 잘 결정된 경우에는 l 회의 순차적 검사 중 최초 1,2번째 검사에서 발생 고장이 검출식별될 수 있으므로 순차적 검사로

인한 검출지연시간을 감소시킬 수 있다. 제안된 기법 적용시의 부차적인 문제로는 각 고장의 검출을 위한 검출관측자 교체시 교체 직후, 과도특성으로 인한 오검출이 최소화되도록 운영되어야 한다는 점이다.

4.1 퍼지추론에 근거한 검사순서 결정

검사 순서는 고장검출식별의 신속성과 신뢰도에 매우 큰 영향을 끼치므로 다양한 요소를 고려하여 결정되어야 한다. 본 절에서는 다음의 두가지 요소를 고려한 순위 결정방법을 채택한다.

- (1) 고장의 발생빈도(failure frequency: FF): MTTF, MTBF, Failure rate 등에 근거
- (2) 고장의 치명도(criticality: CR)

검사 순위 결정에는 불확실성을 내포한 다양한 요소들이 개입될 수 있으므로 다음과 같은 언어적 규칙(Linguistic rules)에 근거한 퍼지추론기법이 적합하다. 언어적 규칙을 예시하기 위해 위의 3개의 퍼지변수에 대하여 언어치(Linguistic value)를 부여한다.

FF = { High, Medium, Low }
 CR = { High, Medium, Low }
 Rank = { Very High, High, Medium, Low, Very Low }

이 경우 검사 순위 결정을 위한 언어적 규칙군(9개 규칙)의 일례는 아래의 표 1과 같다. 이 규칙표 내의 각 규칙은 다음에 같은 형태를 가진다.

예: IF FF is (High) & CR is (High), THEN Rank is (Very High)

표 1 검사순위 결정을 위한 규칙군
 Table 1 A rule base for determining the fault test sequence

	CR	High	Medium	Low
FF	High	Very High	High	Medium
	Medium	Very High	Medium	Low
	Low	High	Medium	Very Low

위의 규칙군에 근거한 퍼지추론을 위해서는 각 변수에 대한 언어치별 소속함수, 추론을 위한 합성연산방법, 비퍼지화 방법 등이 결정되어야 한다. 하지만 퍼지추론 기법 등은 이미 잘 알려진 내용이므로 본고에서 생략하였다[20].

4.2 순차적 검출식별 기법

시스템의 동작 중에는 제어 및 상태감시 정보를 획득하기 위한 상태변수 추정 및 잔차 발생 수단으로서 항상 하나의 FFDO가 구동된다. 이 역할은 4.1절의 퍼지알고리즘에 의해 1순위검사 대상으로 결정된 고장을 고려한 FFDO가 담당한다. 이 FFDO는 정상 운전시 투입된 것이므로 고장이 발생한 경우 FFDO 자체의 과도응답으로 인하여 발생할 수 있는 오검출과 검출지연(Detection Delay)을 최소화시켜 준다. 1순위 고장이 j번째 고장이라 하면 이 고장의 검출식별은

FFDO(j)로부터 제공되는 다음 두가지 정보에 대한 논리적(임계치) 검사에 의해 수행된다.

$$r_j(t) = \|y(t) - \hat{y}^j(t)\| \tag{17a}$$

$$\hat{f}_j = H_j \hat{w}_j \tag{17b}$$

[고장검출식별논리 1]

IF $r_j(t) \leq Th_{r_j}$ & $|\hat{f}_j(t)| \leq Th_{f_j}$,
 THEN no fault occurred
 Otherwise, IF $r_j(t) \leq Th_{r_j}$ & $|\hat{f}_j(t)| \geq Th_{f_j}$,
 THEN jth fault occurred
 Otherwise, Test next fault(ex, kth fault)

위의 논리는 FFDO(j)가 j번째 고장에 대한 둔감성과 함께 그 고장의 추정기능을 갖도록 설계되었다는 사실에 근거한 것이다. 일단 $r_j(t) \geq Th_{r_j}$ 이면, j번째 고장을 제외한 다른 고장의 발생을 의미하므로 다음 고장(ex, kth fault)의 식별 과정을 수행한다. 이 과정의 첫 단계는 FFDO(k)를 구동하는 것이다. FFDO(j)와 마찬가지로 FFDO(k)는 k번째 고장에 둔감하며 그 고장의 크기를 추정한다. FFDO(k)는 2순위 이후의 고장식별에 투입되는 것이므로 추정치가 준정상 상태에 이르기까지의 과도기간을 피할 수 없다. 이 과도기간은 FFDO가 빠른 수렴특성을 갖도록 고유치를 선정함으로써 조절할 수 있지만, 이 경우에는 과도기간 중 큰 진동이 유발되어 오경보의 원인이 될 수 있다. 이러한 문제점을 감소시킬 수 있는 bumpless transfer의 한가지 방법은 선행관측자의 상태추정치를 후발관측자의 초기치로 도입하는 것이다. 이 경우, 초기잔차는 선행관측자 잔차의 최종치와 동일하여 일반적으로 $r_k(t) \geq Th_{r_k}$ 이므로 잔차에 대한 임계치검사 만으로는 신속한 고장식별이 불가능하다. 이에 대한 해결 방안은 경향검사(trend check)를 병행하는 것이다. 경향검사를 위해 다음과 같은 잔차의 변화율(change in $r_k(t)$: σ_k)을 구한다.

$$\sigma_k(t) = r_k(t) - r_k(t - \tau) \tag{18}$$

위에서 τ 는 잔차의 샘플링 간격으로 출력데이터 샘플링 간격의 배수로 설정한다. 이제 k번째 고장의 식별은 해당 고장정보를 제공할 FFDO(k)의 구동을 개시하고 제공되는 정보에 대하여 아래의 고장검출식별 논리를 적용함으로써 수행된다.

[고장검출식별논리 2]

step 1: IF $\sigma_k(t) < 0$ & $r_k(t) < Th_{r_k}$ & $|\hat{f}_k(t)| \geq Th_{f_k}$,
 THEN kth fault occurred
 step 2: Otherwise IF $\sigma_k(t) < 0$ & $r_k(t) \geq Th_{r_k}$,
 THEN go to step1 to check kth fault again
 step 3: Otherwise IF $\sigma_k(t) \geq 0$ & $r_k(t) \geq Th_{r_k}$, THEN
 repeat this step for predefined waiting time(T_w).
 And if same result is obtained, Then test next fault. Otherwise go to step1.

위 검사논리는 FFDO(k)는 k 번째 고장 발생 시 정확한 상태추정을 하도록 설계되었으므로 $r_k(t)$ 가 급속히 감소함에 근거한다. 위 검사논리의 특징은 과도특성으로 인한 오경보율을 감소시키기 위하여 검사시간의 조정 규칙에 근거한 적응적 반복검사 기법을 도입하였다는 점이다. 단계 3에 요구되는 검출대기시간(T_w)는 새로운 관측자의 구동 초기에 초기조건의 불일치 등에 의한 잔차 증가가 발생함을 고려하여 도입된 것이며, 각 FFDO의 과도특성과 허용되는 검출지연 시간을 고려하여 결정되어야 한다. 위의 고장검출식별 논리는 1순위 검출고장을 포함한 모든 검출식별 대상 고장에 동일하게 적용될 수 있다.

5. 적용 사례

5.1 프로세스 모델과 운전 조건

제안된 FFDO 기반 순차적 고장검출식별기법의 실질적 적용가능성을 검토하기 위하여 전형적인 불안정 비선형계인 도입진자제어시스템을 고려한다. 도입진자의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{g \sin(x_1) - m l a x_2^2 \sin(2x_1)/2}{l \cdot \text{den}(x_1)} \\ x_4 \\ \frac{-m a g \sin(2x_1)/2 + 4 m l a x_2^2 \sin(x_1)/3}{\text{den}(x_1)} \\ \frac{4a/3}{\text{den}(x_1)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -a \cos(x_1) \\ 0 \\ \frac{4a/3}{\text{den}(x_1)} \end{pmatrix} (u - f_c) \quad (19)$$

식(19)에서 $\text{den}(x_1) = 4/3 - m a \cos^2(x_1)$ 이며, x_1 은 진자의 각도, x_2 는 각속도, x_3 는 카트의 위치, x_4 는 카트의 속도이다. 위의 비선형 모델로부터 얻어지는 T-S 퍼지 모델은 다음 두개의 언어적 규칙으로 표현된다.

Rule 1: If $x_1(t)$ is about 0

$$\text{Then } \dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 (u(t) + h) \quad (20a)$$

Rule 2: If $x_1(t)$ is about $\pm\pi/4$

$$\text{Then } \dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 (u(t) + h) \quad (20b)$$

각 규칙내의 선형 모델을 구하는 과정은 고전적인 Taylor 급수 전개기법의 문제점을 극복할 수 있도록 제안된 Teixeira등의 선형화 알고리즘을 사용하였으며[11], 각 파라미터는 다음과 같다.

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 17.294 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.7295 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.1765 \\ 0 \\ 0.1177 \end{pmatrix}, \quad (21)$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 14.3081 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.0117 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.1147 \\ 0 \\ 0.1081 \end{pmatrix}$$

퍼지추론을 위한 소속함수는 [11]에서와 동일하게 선정하였다.

$$h_1(x_1) = \frac{1 - 1/(1 + \exp(-14(x_1 - \pi/8)))}{1 + \exp(-14(x_1 + \pi/8))} \quad (22a)$$

$$h_2(x_1) = 1 - h_1(x_1) \quad (22b)$$

도입진자시스템은 본질적으로 불안정하므로 다음과 같은 안정화입력을 도입한 페루프제어계를 고려하였다.

$$u = -(h_1 F_1 + h_2 F_2)x + \eta_q \text{sign}(z) \quad (23a)$$

$$z = (h_1 B_1^T + h_2 B_2^T) P x \quad (23b)$$

5.2 센서고장 검출식별 시스템의 설계

제안된 퍼지관측자 기반 고장검출기법의 타당성을 보이기 위하여 5.1절에 주어진 페루프 도입진자 제어계의 센서고장 검출식별 문제를 고려한다. 우선 식(23)의 궤환제어 입력은 모든 상태변수 $x(t)$ 의 가용성을 전제한 것이므로 본 절에서는 모든 상태변수를 측정한다고 가정한다. 이 경우 출력행렬은 다음과 같다.

$$C_1 = C_2 = I_4$$

FFDO는 고장을 검출식별하여야 할 각 센서에 대하여 설계되어야 한다. 본 절에서는 고장 발생시 궤환제어계의 성능 감퇴 정도를 고려하여 막대 각(rod angle), $y_1 = x_1$, 각속도(rod angle velocity), $y_2 = x_2$, 측정 센서를 1,2 순위의 검출 대상 고장으로 선정하였다. 각 FFDO 설계 시, 각 센서의 고장은 bias형으로 가정하였다. 이 경우 확장계의 상태방정식 파라미터 행렬은 다음과 같다.

$$A_i = \begin{pmatrix} A_i & 0_{4 \times 1} \\ 0_{1 \times 4} & 0_{1 \times 1} \end{pmatrix}, B_i = \begin{pmatrix} B_i \\ 0_{1 \times 1} \end{pmatrix}, i = 1, 2$$

$$C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ I_4 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ I_4 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

위에서 C_1, C_2 는 각각 센서1 및 센서2의 고장을 고려한 출력행렬이다. 식(20)(21)의 퍼지 모델에 대응되는 퍼지관측자의 설계 결과인 관측자 이득행렬은 다음과 같다. 설계 시 각 FFDO의 고유치는 (-5 -10 -15 -20 -25)로 동일하게 선정하였으며, 설계된 각각의 관측자에 대하여 식(15)의 조건을 만족하는 행렬 P 가 존재함을 확인하였다.

[센서1 고장을 위한 FFDO]

$$L_{11} = \begin{pmatrix} 10.6733 & 15.7795 & 0 & 0.5644 \\ 9.4109 & 35.1431 & 0 & 0.7797 \\ 0 & 0 & 5 & 1 \\ -1.4532 & -1.5245 & 0 & 14.954 \\ 9.2295 & -14.5812 & 0 & -1.6314 \end{pmatrix},$$

$$L_{12} = \begin{pmatrix} 10.6446 & 18.7115 & 0 & 0.6664 \\ 7.7776 & 35.0527 & 0 & 0.5241 \\ 0 & 0 & 5 & 1 \\ -0.7002 & -1.0330 & 0 & 14.9405 \\ 9.3622 & -17.4597 & 0 & -1.0038 \end{pmatrix}$$

[센서2 고장을 위한 FFDO]

$$L_{21} = \begin{pmatrix} 39.9997 & 0.3045 & 0 & 0 \\ 392.2771 & 6.2763 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 1 \\ -1.7295 & 0 & 0 & 10 \\ -375.0203 & 13.724 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$L_{22} = \begin{pmatrix} 39.9997 & 0.3045 & 0 & 0 \\ 389.2912 & 6.2763 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 1 \\ -1.0117 & 0 & 0 & 10 \\ -375.0203 & 13.724 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

5.3 적용 결과

전술한 바와 같이 제안된 FFDO기반 SFDS의 큰 특징은 병렬운전 결과의 상호 비교를 전제한 기존의 다중관측자 기반 기법과 달리, 각 고장에 대응하는 FFDO를 순차적으로 구동하는 과정에서 고장의 검출과 식별이 가능하다는 점이다. 이러한 방식에 의한 검출식별의 가능성은 특정고장 발생 시 상태추정의 강인성과 고장추정 기능을 동시에 가진 FFDO를 도입함으로써 얻어진 것이다. 측정장치 고장으로 인한 제어계의 성능 감퇴와 제안된 SFDS의 성능을 고찰하기 위하여 식(24)의 입력에 의해 구동되는 페루프계를 고려하였다. 이 식은 모든 상태변수를 측정한다는 가정 하에 식(23)의 상태변수를 출력변수로 단순 대응시킨 결과이다.

$$u = -(h_1 F_1 + h_2 F_2)y + \eta_q \text{sign}(z) \tag{24a}$$

$$z = (h_1 B_1^T + h_2 B_2^T)Py \tag{24b}$$

각 FFDO의 투입순서 결정을 위해 두 센서의 동일 고장율을 가정하였으며, 치명도는 동일 크기 고장에 대한 시뮬레이션 결과를 사용하였다. 시뮬레이션 결과, 막대각 센서에 크기 0.6이상의 바이어스고장이 발생하면 페루프제어계는 진동 발산하는 반면, 각속도 센서의 경우 크기 3.0 이하의 바이어스고장에 대해 페루프계의 안정도가 유지됨을 확인하였다. 이 결과를 4.1절의 언어적 규칙에 적용하여, 막대각 센서에 대한 FFDO가 1순위로 선정되었다. 고장의 검출식별은 [고장검출식별논리 2]에 의해 수행되었으며, 사용된 임계치 (Th_{r_k} , Th_{j_k})와 검출대기시간(T_w)는 검출대상 고장의 최소 크기, 검출속도, 검출식별 결과의 신뢰성 등을 고려하여 선정하였다. 본 절의 적용예의 경우, 검출대상 고장의 최소 크기는 고장의 영향분석 결과에 근거하여 각각 0.05, 0.1로 설정하였다. 또한 식(18)의 σ_k 계산을 위한 시간 간격(τ)는 시뮬레이션에 적용한 샘플링 간격(0.005s)과 동일하게 설정하였다. 고장검출식별의 신뢰성을 확보하기 위해 검출대기시간은 $T_{w1} = 0.15\text{sec}$, $T_{w2} = 0.2\text{sec}$ 로 설정하였으며, 사용된 임계치는 각각 $Th_{r_1} = Th_{r_2} = 0.3$, $Th_{j_1} = 0.05$, $Th_{j_2} = 0.1$ 으로 선정하였다.

그림 1은 $t=4\text{sec}$ 에 막대각 센서에 크기 0.3인 바이어스 고장이 발생한 경우의 제어계 응답이다. 그림 (a)(b)(c)및 (d)는 상태변수와 FFDO에 의해 발생된 상태 추정치이며 그

림 (e)는 잔차와 고장추정치, (f)는 고장검출식별 결과를 나타낸다. 추정 시뮬레이션 결과로부터 이 고장이 모든 변수에 비교적 큰 과도응답을 유발하며, 특히 카트위치의 매우 큰 편차를 유발시킴을 알 수 있다. 그림 (e)에 보인 잔차 특성은 $t=4.1\text{sec}$ 에서 급격한 이상이 발생했음을 보여준다. 또한 그림 (e)로부터 FFDO에 의해 제공된 센서1 고장의 추정치가 실제의 고장치인 0.3에 수렴함을 알 수 있다. 그림 (f)에 보인 바와 같이 고장검출시점은 4.4sec정도였다. 검출식별과정에 0.4sec 정도의 지연이 발생한 것은 4절에 기술된 바와 같이 검출식별논리가 3개의 식별조건이 동시에 만족되어야만 고장을 선언하는 검출결과와 신뢰성에 비중을 둔 구조로 설계되었기 때문이다.

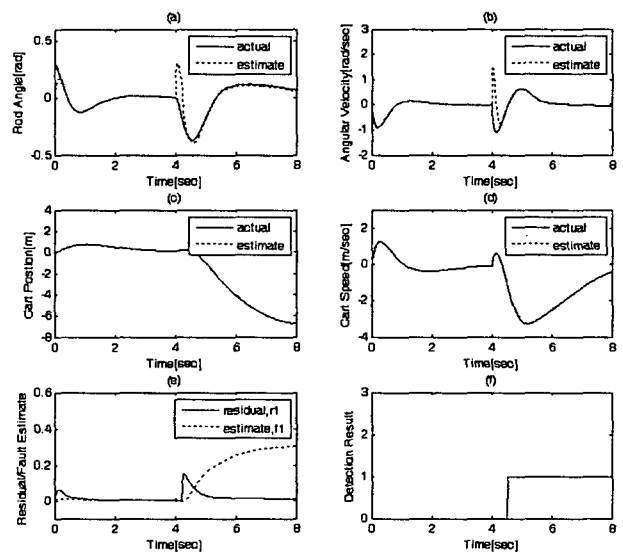


그림 1 막대각 센서 고장 시 제어계 응답, 잔차 및 고장 추정 결과

Fig. 1 Control system responses, residuals, and fault estimate when the rod angle sensor failed

그림 2는 $t=4\text{sec}$ 에 각속도 센서에 크기 1.0인 바이어스 고장이 발생한 경우 제어계 응답이다. 고장 발생 시의 제어계 응답 패턴은 그림 1에 보인 각 센서 고장의 경우와 매우 유사하지만, 고장 크기가 '1'인 점을 고려하면 동일한 크기의 각센서 고장에 비해 영향이 적음을 알 수 있다. 그림 (f)는 도입된 FFDO에 의해 제공된 잔차와 센서2 고장의 추정치를 보여준다. 그림으로부터 잔차가 고장 1의 경우에 비해 매우 적음에도 고장의 추정 결과가 매우 정확함을 알 수 있다. 그림 (f)는 이 고장이 2순위 FFDO에 의한 검출 결과임에도 4.3 sec정도로서 막대각센서의 고장에 비해 빠른 검출특성을 보임을 알 수 있으며, 그 이유는 그림에서 알 수 있듯이 해당 FFDO의 과도기간 중의 편차 특성 차이에 기인하는 것으로 파악된다.

참고 문헌

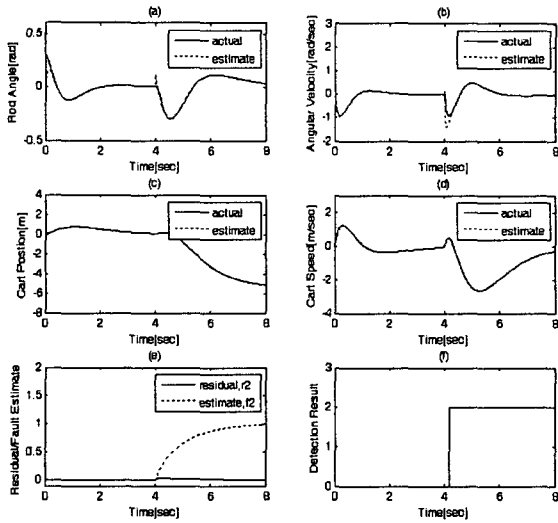


그림 2 각속도 센서 고장 시 제어계 응답, 잔차 및 고장 추정 결과

Fig. 2 Control system responses, residuals, and fault estimate when the angular velocity sensor failed

6. 결 론

본 논문에서는 T-S퍼지모델과 퍼지관측자 기법을 도입하여, 비선형시스템을 위한 센서고장 검출식별 기법을 제안하고 구체적인 실현 방법을 제시한 다음, 그 실질적 적용 가능성을 검토하였다. 제안된 SFDS는 검출식별하고자하는 고장수와 같은 수의 FFDO와 고장검출식별논리부로 구성된다. 각 FFDO는 특정고장의 발생여부를 검출식별할 수 있는 잔차 정보를 제공하도록 설계된다. 고장검출식별을 위한 논리부는 FFDO의 구동순서와 각 고장의 검출식별논리를 포함하고 있다. 이 순차구동방식은 제안된 고장 추정 기능을 가진 FFDO를 사용함으로써 가능한 것이며, 다중관측자의 병렬운전을 전제한 기존 관측자기반 고장검출시스템의 실질적 적용시 가장 큰 문제점인 계산량의 문제를 해결해 준다. 제안된 센서고장 검출기법을 전형적인 비선형계통인 역진자 제어계의 센서고장 검출문제에 적용한 결과 검출식별성능과 계산시간 면에서 모두 만족스러운 결과를 얻었다. 또한 퍼지 관측자에 의해 제공되는 고장추정치는 센서고장허용제어를 가능케 해준다.

감사의 글

이 논문은 2005학년도 단국대학교 대학연구비 지원에 의해 이루어진 연구 결과임.

- [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] S. Simani, C. Fantuzzi and R.J. Patton, Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques, Springer, 2003.
- [4] P. M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge based redundancy: A survey and some new results", Automatica, Vol.26, 1990, pp.459-474.
- [5] P. M. Frank, "On-line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: A survey", International Journal of System Science, 1994, Vol.25, No.12, pp.2129-2154.
- [6] R. Seliger and P. M. Frank, "Robust residual evaluation by threshold selection and a performance index for nonlinear observer based fault diagnosis", Proc. International Conf. on Fault Diagnosis, Toulouse, April, 1993.
- [7] D. Koenig and S. Mammar, "Design of a class of reduced order unknown input nonlinear observer for fault diagnosis", Proc. of ACC, Arlington, VA, June25-27,2001
- [8] Wen Chen and Mehrdad Saif, "Robust fault detection in uncertain nonlinear systems via a second order sliding mode observer", Proc. of the 40th IEEE conf. on Decision and Control, Sydney, Australia, Dec. 2000.
- [9] D. Schroder, Intelligent observer and control design for nonlinear systems, springer, 2000.
- [10] K. Tanaka, T. Ikeda and H.O. Wang, "Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based designs", IEEE Transaction on Fuzzy Systems, Vol.6, No.2, May, 1998, pp.250-265
- [11] M.C.M. Teixeira & S.H. Zak, "Stabilizing controller design for uncertain nonlinear systems using fuzzy models", IEEE Trans. Fuzzy Systems, Vol.7, No. 2, April 1999, pp.133-142
- [12] P. Bergstein, R. Palm and D. Driankov, "Fuzzy Observers", Proc. of 2001 IEEE International Fuzzy System Conference, pp.700-703
- [13] E. Kim, "A fuzzy disturbance observer and its application to control", IEEE Transaction on Fuzzy Systems, Vol.10, No.1, February, 2002, pp.77-84
- [14] C.J. Lopez-Toribio, R.J. Patton, "Takagi-Sugeno fuzzy fault tolerant control for a non-linear system", proc. of the 38th Conference on Decision and

- Control, Phoenix, Arizona USA, December 1999, pp. 4368-4373
- [15] Y. Zheng, H. Fang, and H.O. Wang, "Takagi-Sugeno fuzzy-model-based fault detection for networked control systems with markov delays", IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol.36, NO.4, August, 2006, pp.924-929.
- [16] A. Ichtev, J. Hellendoorn, and R. Babuska," Fault detection and isolation using multiple Takagi-Sugeno fuzzy models", Proceedings of the 2001 IEEE international fuzzy system conference, pp.1498-1502
- [17] J.R. Lee et. al., "Fault Diagnosis of nonlinear system based on fuzzy dynamic model", Proceedings of the 1999 IEEE international fuzzy system conference, Seoul, Korea, August 1999, pp.245-250
- [18] L.F.Mendonca, J.M.C.Sousa and J.M.G. Sa da Costa," Fault detection and isolation of industrial process using optimized fuzzy models", Proceedings of the 2005 IEEE international conference on fuzzy system, May 2005, pp.851-856.
- [19] 이기상, 이상문, "함수관측자를 이용한 장치고장검출 기법", 전기학회논문지, 제55D권, 제3호, 2006, pp.91-97
- [20] L.H. Tsoukalas, R.E. Uhrig, Fuzzy and neural approaches in engineering, John Wiley & sons, 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).
1983년~현재 단국대 전기공학 전공 교수. 1995년~96년 Univ. of Washington 방문교수.
2005년~현재 단국대학교 정보통신대학 원장
Tel : 02) 709-2575
Fax : 02) 795-8771
E-mail : keesang@dku.edu