

불확실한 비선형시스템을 위한 고장검출 시스템 설계

A Fault Detection system Design for Uncertain Nonlinear Systems

류석환·최병재

Seog-Hwan Yoo and Byung-Jae Choi

대구대학교 전자공학부

요약

본 연구에서는 T-S 퍼지시스템으로 모델된 불확실한 시변 파라미터를 갖는 비선형 시스템의 고장검출 시스템 설계법을 제안한다. 이를 위하여 퍼지시스템에 대한 소인수 분해를 정의하고 좌 소인수를 이용하여 오차발생기를 설계한다. 오차 발생기의 출력으로부터 고장검출을 판정하는 검출기준을 제시한다. 제시된 방법의 효용성을 입증하기 위하여 역도립 진자시스템에 적용하여 컴퓨터 모의실험을 수행한다.

Abstract

This paper deals with a fault detection system design for nonlinear systems with uncertain time varying parameters modelled as a T-S fuzzy system. A coprime factorization for T-S fuzzy systems is defined and a residual generator is designed using a left coprime factor. A fault detection criteria derived from the residual generator is also suggested. In order to demonstrate the efficacy of the suggested method, the fault detection method is applied to an inverted pendulum system and computer simulations are performed.

Key Words : T-S fuzzy system, fault detection, coprime factorization, nonlinear system

1. 서론

현대 제어기술은 급속도로 발전하여 다양한 환경 하에서 수요자의 성능 요구조건을 충족하는 아주 복잡한 동적 제어시스템의 설계 및 구현을 가능하게 하였다. 이러한 복잡한 제어시스템은 많은 불확실성하에서 오랜 시간의 운전기간 동안 높은 신뢰성과 안정성의 유지가 필수적이다. 이런 이유로 시스템 구성요소의 오동작이나 고장으로 인한 피해의 확산을 방지하기 위하여 고장을 조기에 검출하여 운전원에게 통보하는 고장검출 시스템의 설계에 대한 많은 연구가 최근 십 수년 동안 계속되어왔다.

대부분의 고장검출 시스템은 추정기를 기반으로 설계된다. 즉, 추정기에서 추정된 출력신호와 실제 측정된 출력신호를 비교하여 오차신호를 발생하고, 이 오차신호의 크기를 문턱 값과 비교하여 고장 발생의 유무를 판정한다. 모델 불확실성과 외란이 없는 경우에는 오차신호가 0이 되지만 피할 수 없는 모델 불확실성과 외란 때문에 고장이 발생하지 않더라도 오차신호의 크기는 0이 아니다. 그러므로 오차신호가 불확실성에 기인한 것인지 고장에 기인한 것인지를 판정하기가 모호하다. 따라서 모델 불확실성과 외란에 견실한 고장검출 시스템을 설계하기 위해서는 견실한 추정기의 설계가 필수적이다.

견실한 추정기를 설계하기 위하여 Patton[1]은 고유구조(eigenstructure)의 할당을 사용하였고, Gertler[2]는 견실한 parity 방정식을 이용하였으며, Chen[3]은 미지 입력을 갖는 관측기를 사용하였고, Frank[4]는 최적

추정기를 사용하였고, E. Collins 등[5]은 H_{∞} 제어를 사용하였다. 그러나 이 모든 접근법은 선형시스템을 대상으로 하였으며 비선형시스템에의 적용은 불가능하다.

본 연구에서는 T-S(Takagi-Sugeno) 퍼지접근법을 사용하여 불확실한 비선형시스템을 위한 고장검출 시스템을 설계하고자한다. 통상의 모델과는 달리 T-S 퍼지시스템은 여러 개의 선형시스템으로 구성되어 퍼지 IF-THEN 규칙에 의하여 비선형시스템의 전역적인 특성을 모델한다. 최근 비선형시스템의 효과적인 제어시스템 설계를 위하여 비선형 시스템을 T-S 퍼지시스템으로 모델하여 제어를 설계하는 기법이 많이 연구가 되고 있다[7-9]. 본 연구에서 제시하는 주요 개념은 T-S 퍼지시스템으로 모델된 비선형시스템을 좌 소인수 분해(Left Coprime Factorization)의 형태로 표현한 후 좌 소인수 분해된 모델로부터 추정기를 설계한다. 또한 고장검출 확률을 높이기 위하여 고장검출 추정기의 출력신호인 오차신호를 필터링하기 위한 고장검출 필터 설계법을 제안한다. 마지막으로 본 연구에서 제시한 고장검출 방법의 효용성을 보여주기 위하여 역도립 진자 시스템에 적용하여 컴퓨터 모의실험을 수행한다.

2. 불확실한 T-S 퍼지시스템

다음의 불확실한 T-S 퍼지시스템을 생각한다.

Plant Rule i ($i = 1, \dots, r$) :

IF $\rho_1(t)$ is M_{i1} and \dots and $\rho_q(t)$ is M_{iq} ,

THEN

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_i x(t) + B_i u(t) + F_i w(t) \\ y(t) &= C_i x(t) + G_i w(t) + D_i u(t) \\ z(t) &= H_i x(t) + J_i u(t) \\ w(t) &= \Theta(t) z(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 r 은 퍼지 규칙의 수이고 $\rho_j(t)$ 와 $M_{ik} (k=1, \dots, g)$ 는 전제변수와 퍼지집합이다.

$x(t) \in R^n$ 은 상태변수이고 $u(t) \in R^m$ 은 입력변수, $y(t) \in R^p$ 는 출력변수, $w(t) \in R^k$ 와 $z(t) \in R^k$ 는 불확실성에 관련된 변수이고 $\Theta(t)$ 는 크기가 $\Theta(t)^T \Theta(t) \leq I$ 를 만족하는 유계된 불확실한 시변 파라미터 행렬이다. A_i, B_i, \dots, J_i 는 적절한 차원을 갖는 상수행렬이다.

정규화된 소속함수 $\mu_i(\rho(t)) (i=1, \dots, r)$ 를 (2)와 같이 정의하면

$$\mu_i(\rho(t)) = \frac{\prod_{k=1}^g M_{ik}(\rho_k(t))}{\sum_{i=1}^r \prod_{k=1}^g M_{ik}(\rho_k(t))}, \quad (2)$$

정규화된 소속함수는 다음을 만족한다.

$$\mu_i(\rho(t)) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^r \mu_i(\rho(t)) = 1. \quad (3)$$

간략화를 위해 $\mu_i = \mu_i(\rho(t))$, $\mu^T = [\mu_1 \dots \mu_r]$ 이라 정의하면 불확실한 퍼지시스템 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i (A_i x(t) + B_i u(t) + F_i w(t)) \\ &= A_\mu x(t) + B_\mu u(t) + F_\mu w(t) \\ y(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i (C_i x(t) + D_i u(t) + G_i w(t)) \\ &= C_\mu x(t) + D_\mu u(t) + G_\mu w(t) \\ z(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i (H_i x(t) + J_i u(t)) \\ &= H_\mu x(t) + J_\mu u(t) \end{aligned} \quad (4)$$

퍼지 시스템(4)를 이후부터는 행렬을 이용하여 다음의 형태로 나타낸다.

$$G(\mu) = \left[\begin{array}{c|c|c} A_\mu & F_\mu & B_\mu \\ \hline H_\mu & 0 & J_\mu \\ \hline C_\mu & G_\mu & 0 \end{array} \right] \quad (5)$$

2. 고장검출시스템

이절에서는 퍼지시스템 (5)에서 소인수분해를 이용하여 오차발생기를 설계하고자한다. L_μ 를 $A_\mu + L_\mu C_\mu$ 가 2차 안정한(quadratically stable) 출력 주입행렬(output injection matrix)이라 정의한다. 그러면 $G(\mu) = \tilde{M}(\mu)^{-1} \tilde{N}(\mu)$ 로 나타낼 수 있다. 여기에서 $\tilde{M}(\mu)$, $\tilde{N}(\mu)$ 는 $G(\mu)$ 의 좌 소인수(left coprime factor)라 부르며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left[\tilde{M}(\mu) \quad \tilde{N}(\mu) \right] \\ &= \left[\begin{array}{c|c|c} A_\mu + L_\mu C_\mu & F_\mu + L_\mu G_\mu & L_\mu B_\mu + L_\mu D_\mu \\ \hline H_\mu & 0 & 0 \\ \hline C_\mu & G_\mu & I \end{array} \right] \quad (6) \end{aligned}$$

$\tilde{M}_0(\mu)$, $\tilde{N}_0(\mu)$ 를 $\tilde{M}(\mu)$, $\tilde{N}(\mu)$ 의 공칭시스템이라 정의한다. 즉,

$$\left[\tilde{M}_0(\mu) \quad \tilde{N}_0(\mu) \right] = \left[\begin{array}{c|c|c} A_\mu + L_\mu C_\mu & L_\mu B_\mu + L_\mu D_\mu \\ \hline C_\mu & I \end{array} \right] \quad (7)$$

공칭 좌 소인수 $\tilde{M}_0(\mu)$, $\tilde{N}_0(\mu)$ 를 이용하여 오차발생기를 구성한다. $u_f(t)$ 와 $y_f(t)$ 를 액츄에이터와 출력센서의 고장신호, μ_f 를 출력센서의 고장신호로 기인한 정규화 소속함수의 오차라 정의하면 오차신호 $e(t)$ 는 다음과 같이 발생시킬 수 있다.

$$e(t) = Q(\mu) (\tilde{M}_0(\mu + \mu_f)(y(t) + y_f(t)) - \tilde{N}_0(\mu + \mu_f)u(t)) \quad (8)$$

여기에서 $Q(\mu)$ 는 설계 파라미터로 사용될 안정한 퍼지필터이다. 좌 소인수분해의 정의로부터

$$0 = -\tilde{N}(\mu)(u(t) + u_f(t)) + \tilde{M}(\mu)y(t) \quad (9)$$

가 만족한다. (9)를 이용하여 (8)을 다시 쓰면

$$e(t) = Q(\mu)(e_u(t) + e_f(t)) \quad (10)$$

여기에서

$$\begin{aligned} e_u(t) &= (\tilde{N}(\mu + \mu_f) - \tilde{N}_0(\mu + \mu_f))u(t) \\ &\quad - (\tilde{M}(\mu + \mu_f) - \tilde{M}_0(\mu + \mu_f))(y(t) + y_f(t)) \\ e_f(t) &= \tilde{N}(\mu)u_f(t) + \tilde{M}(\mu)y_f(t) \\ &\quad + (\tilde{N}(\mu) - \tilde{N}(\mu + \mu_f))u(t) \\ &\quad - (\tilde{M}(\mu) - \tilde{M}(\mu + \mu_f))(y(t) + y_f(t)) \end{aligned}$$

이다. (10)에서 $e_u(t)$ 는 모델 불확실성에 의한 값이며

$e_f(t)$ 는 액추에이터 혹은 출력센서의 고장으로 인한 값이다. 고장이 없더라도 모델 불확실성 때문에 오차신호 $e(t)$ 는 0이 아니다.

$e(t)$ 를 관측하여 고장의 유무를 판정하기 위하여 문턱치를 선정한다. 고장이 발생하지 않았을 경우 (10)는

$$e(t) = Q(\mu)(\tilde{M}(\mu) - \tilde{N}_0(\mu))u(t) - (\tilde{M}(\mu) - \tilde{M}_0(\mu))y(t) \quad (11)$$

이 된다. 또한 소인수 모델오차는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}(\mu) - \tilde{M}_0(\mu) & \tilde{N}(\mu) - \tilde{N}_0(\mu) \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} A_\mu + L_\mu C_\mu & 0 & F_\mu + L_\mu G_\mu & L_\mu \ B_\mu \\ 0 & A_\mu + L_\mu C_\mu & 0 & L_\mu \ B_\mu \\ \hline H_\mu & 0 & 0 & 0 \ J_\mu \\ \hline C_\mu & -C_\mu & G_\mu & 0 \ 0 \end{array} \right] \quad (12)$$

다음의 (13)과 같이 정의하면

$$\begin{bmatrix} P_{11}(\mu) & P_{12}(\mu) \\ P_{21}(\mu) & P_{22}(\mu) \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} A_\mu + L_\mu C_\mu & 0 & F_\mu + L_\mu G_\mu & L_\mu \ B_\mu \\ 0 & A_\mu + L_\mu C_\mu & 0 & L_\mu \ B_\mu \\ \hline H_\mu & 0 & 0 & 0 \ J_\mu \\ \hline C_\mu & -C_\mu & G_\mu & 0 \ 0 \end{array} \right] \quad (13)$$

(12)의 소인수 모델오차는

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}(\mu) - \tilde{M}_0(\mu) & \tilde{N}(\mu) - \tilde{N}_0(\mu) \end{bmatrix} = P_{21}(\mu)\theta(t)(I - P_{11}(\mu)\theta(t))^{-1}P_{12}(\mu) \quad (14)$$

와 같이 쓸 수 있다. 따라서 고장이 없을 경우 오차신호 (11)은

$$e(t) = Q(\mu)P_{21}(\mu)\Delta w_e(t) \quad (15)$$

이 된다. 여기에서

$$w_e(t) = P_{12}(\mu) \begin{bmatrix} -y(t) \\ u(t) \end{bmatrix}, \quad \Delta = \theta(t)(I - P_{11}(\mu)\theta(t))^{-1}$$

이며 $w_e(t)$ 는 시스템의 입력과 출력을 이용하여 계산 가능한 량이다. 따라서 다음의 식 (21)을 만족할 경우 액추에이터 혹은 센서의 고장이 발생하였음을 알 수 있다.

$$\|e(t)\| > \gamma \|Q(\mu)P_{21}(\mu)\|_\infty \|w_e(t)\| \quad (16)$$

여기에서 γ 는 $\gamma \geq \|\Delta\|_\infty$ 을 만족하는 상수이며 불확실성 Δ 의 상태공간 표현 (17)을 이용하여 유실정리 (bounded real lemma)를 이용하여 쉽게 계산가능하다.

$$\Delta = \left[\begin{array}{cc|cc} A_\mu + L_\mu C_\mu & 0 & F_\mu + L_\mu G_\mu & 0 \\ 0 & A_\mu + L_\mu C_\mu & 0 & 0 \\ \hline H_\mu & 0 & 0 & I \\ \hline 0 & 0 & I & 0 \end{array} \right] \quad (17)$$

다음 설계 파라메터인 $Q(\mu)$ 의 선정시 고려사항을 기술한다.

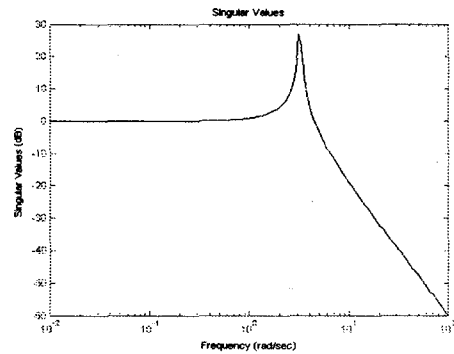


그림 1 특이치선도

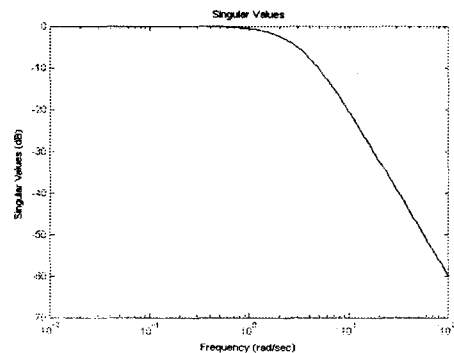


그림 2 특이치선도

어떤 고정된 μ 에 대해서 시스템 $Q(\mu)P_{21}(\mu)$ 의 최대 특이치가 그림 1 혹은 그림 2처럼 주어진 두 가지 경우를 생각한다. 또한 $w_e(t)$ 의 주파수성분이 (0, 1)에 주로 집중되어 있다고 가정한다. 그림 1의 경우에는 $\|Q(\mu)P_{21}(\mu)\|_\infty$ 이 $w_e(t)$ 의 주된 주파수 범위 바깥 영역에서 이루어지고 그림 2의 경우에는 $\|Q(\mu)P_{21}(\mu)\|_\infty$ 이 $w_e(t)$ 의 주된 주파수 범위 내에서 이루어진다. 따라서 (16)에 주어진 식으로부터 고장 검출을 하기 위해서는 그림 2의 경우가 그림 1의 경우보다 훨씬 비보수적(less conservative)으로 고장을 검출할 수 있다. 즉 고장이 발생하였지만 고장이 발생하지 않았다고 판정할 확률을 낮출 수가 있다. 따라서 안정한 필터 $Q(\mu)$ 는 그림 2에서와 같이 특이치의 최대값이 $w_e(t)$ 의 주된 주파수 범위 내에서 달성되도록 선

정한다. 그러나 실제 $w_e(t)$ 의 주된 주파수 범위를 모를 경우에는 가급적 넓은 주파수의 범위에서 특이치의 값이 균일하게 되도록 선정한다.

그림 2에서와 같은 특이치 선도를 갖도록 하는 $Q(\mu)$ 를 설계하는 방법 중 한 가지는 $\|W_R(s) - Q(\mu)P_{21}(\mu)\|_\infty \leq \gamma$ 이 되도록 하는 $Q(\mu)$ 를 선정한다. 여기에서 $W_R(s)$ 는 선형 시불변 시스템의 기준모델이고 γ 는 적절한 양수이다.

3. 역도립 전자에의 적용

다음의 역도립 전자 시스템을 생각한다.

Plant Rule $i (i = 1, 2)$:

IF $x_1(t)$ is M_{i1} ,

THEN

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_i x(t) + B_i u(t) + F_i w(t) & (18) \\ y(t) &= C_i x(t) \\ z(t) &= H_i x(t) + J_i u(t) \\ w(t) &= \Theta(t) z(t) \end{aligned}$$

여기에서 $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$, $x_1(t)$ 와 $x_2(t)$ 는 수직선과 진자가 이루는 각도와 각속도를 나타내고 퍼지 집합 $M_{11} = \cos(x_1(t))$, $M_{21} = 1 - \cos(x_1(t))$ 이고 상수행렬 A_1, A_2, \dots, J_2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 17.30 & 0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 4.68 & 0 \end{bmatrix}, F_1 = F_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \\ B_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ -176 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -10.5 \end{bmatrix}, \\ H_1 = H_2 &= \begin{bmatrix} 4.68 & 0 \\ 0 & 0.813 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, J_1 = J_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 8.97 \end{bmatrix}, \\ C_1 = C_2 &= [1 \ 0] \end{aligned}$$

불확실한 시변 파라메터 행렬은 $\Theta(t) = \text{diag}(\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t))$ 이고 $\Theta(t)^T \Theta(t) \leq I$ 이다.

좌 소인수를 구하기 위해서 $L_1 = L_2 = [-20 \ -100]^T$ 라 정의하였다. $Q(\mu)$ 를 구하기 위해서 $W_R(s) = [W_1(s) \ W_1(s) \ W_1(s)]$,

$$W_1(s) = \frac{900}{(s+30)^2} \text{이라 두고}$$

$\|W_R(s) - Q(\mu)P_{21}(\mu)\|_\infty \leq 0.001$ 이 되는 $Q(\mu)$ 를 얻은 후 2차계로 간략화 하였으며 간략화된 필터모델은 다음과 같다.

Filter Rule $i (i = 1, 2)$:

IF $y(t)$ is M_{i1} ,

THEN

$$\begin{aligned} \dot{x}_f(t) &= A_{f,i} x_f(t) + B_{f,i} w(t) & (19) \\ e(t) &= C_{f,i} x_f(t) + D_{f,i} w(t) \end{aligned}$$

여기에서 $y(t)$ 와 M_{i1} 은 (18)에서 정의된 것과 동일하고, $x_f(t)$, $w(t)$, $e(t)$ 는 필터의 상태변수, 필터입력, 필터출력이고 $A_{f,1}, A_{f,2}, \dots, D_{f,2}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_{f,1} = A_{f,2} &= \begin{bmatrix} -60 & -899 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B_{f,1} = B_{f,2} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ D_{f,1} = D_{f,2} &= 898, C_{f,1} = 10^5 \times [-0.359 \ -7.33], \\ C_{f,2} &= 10^5 \times [-0.359 \ -7.22] \end{aligned}$$

$\mu_1 = 1, \mu_2 = 0$ 일 때 $\bar{\sigma}(Q(\mu)P_{21}(\mu))$ 와 $\bar{\sigma}(W_R(s))$ 를 그림 3에 나타낸다.

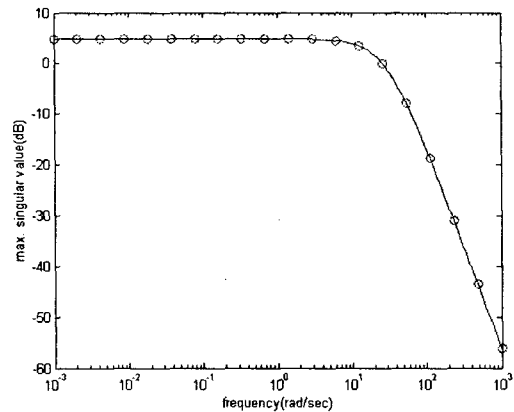


그림 3 특이치선도

그림 3에서 $\bar{\sigma}(Q(\mu)P_{21}(\mu))$ 는 실선으로 $\bar{\sigma}(W_R(s))$ 는 'o'로 나타내었으며 $\bar{\sigma}(Q(\mu)P_{21}(\mu))$ 가 $\bar{\sigma}(W_R(s))$ 와 거의 동일함을 알 수 있다.

실시간 고장검출을 위해 (16)에 주어진 판정법을 적용하기 위해서 (16)을 약간 변형한 다음의 판정기준 (20)를 사용한다.

$$J = \int_{t-T}^t (e(t)^2 - \alpha_{th}^2 |w_c(t)|^2) dt, \quad (20)$$

여기에서 $\alpha_{th} = \|Q(\mu)P_{21}(\mu)\|_\infty \|\Delta(t)\|_\infty$ 이고 $T=2$ 를 사용하였으며 $J > 0$ 이면 고장이 발생한 경우이다.

역도립 전자 제어시스템의 고장검출을 모의하기 위하여 다음의 두 가지 시나리오를 가상한다.

시나리오 1 : 시스템 작동 후 4초가 경과한 시점부터 측정기에서 -50%에 해당하는 고장신호가 발생(측정기 출력 값이 실제 값의 50%만 출력한 경우)

시나리오 2 : 시스템 작동 후 4초가 경과한 시점부터 액추에이터의 출력에 noise power가 0.005인 백색잡음이 인가된 경우

시나리오 1의 경우에 기준입력을 점선으로, 출력의 측정값을 실선으로, 출력의 실제 값을 dash-dot으로 그림 4에 나타내었다. 기준입력으로는 진폭이 0.2라디안, 주파수가 0.2Hz인 구형파를 사용하였다. 실제 4초가 경과한 시점부터 측정기에 고장이 발생하였지만 출력의

측정값은 기준입력을 잘 추종하고 있음을 보여준다. 그 이유는 출력의 측정값이 많은 오차를 갖고 있지만 출력 제한 제어기가 출력 측정값이 기준입력을 추종하도록 견실하게 설계가 되어있기 때문이다. 그러나 실제 출력값은 출력 측정치의 2배가 되어 기준입력을 추종하지 못하게 된다. 즉, 출력 측정값의 단순한 관찰만으로는 고장 발생의 여부를 판정하기가 어렵다. 매 순간마다 (20)의 J 를 계산한 결과를 그림 5에 나타낸다. 그림 5에서 고장발생 후 대략 0.5초가 경과한 후에 $J > 0$ 이 되어 고장발생을 검출할 수 있음을 보여준다.

시나리오 2의 경우에는 기준입력은 시나리오 1과 동일하게 사용하였으며 이때의 측정기 출력 값을 그림 6에 나타낸다. 또한 J 를 계산한 결과를 그림 7에 나타낸다. 이 경우 그림 7을 보면 고장발생 후 약 0.4초 만에 고장검출을 성공적으로 할 수 있음을 알 수 있다.

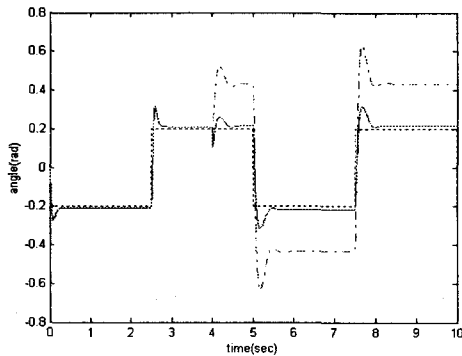


그림 4 측정기 출력(시나리오1)

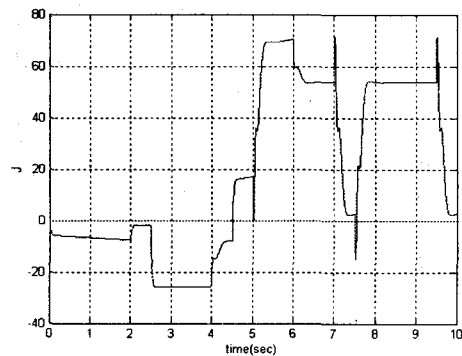


그림 5 J (시나리오1)

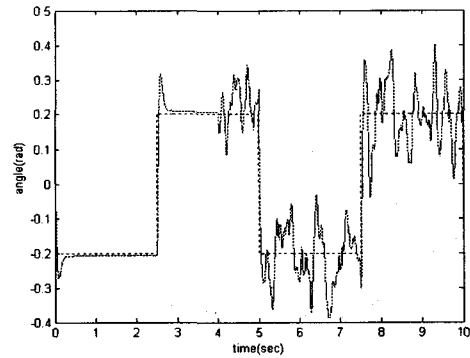


그림 6 측정기 출력(시나리오2)

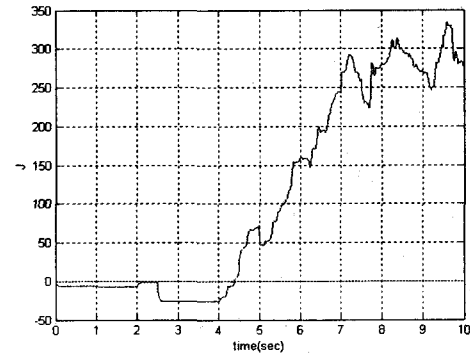


그림 7 J (시나리오2)

그러나 (20)의 판정기준은 고장발생에 대한 충분조건이기 때문에 고장이 발생하였다더라도 고장 검출을 실패할 경우가 종종 발생한다(시나리오1의 경우 고장발생 직후 0.5초간). 고장 검출 실패 확률을 줄이기 위해서는 (20)에서 $\alpha_{th} = \beta \| Q(\mu) P_{21}(\mu) \|_{\infty} \| \Delta(t) \|_{\infty}$ 이라 두고 β 를 0과 1사이의 적절한 값으로 설정한다. 이 경우 β 가 0에 가까우면 고장 검출 실패확률을 줄일 수 있지만, 고장이 발생하지 않은 경우에도 고장이 발생한 것으로 판정될 소지가 있다. 따라서 β 의 크기는 이러한 trade-off를 생각하여 운전자가 적절히 조정할 계수이다.

4. 결론

불확실한 비선형 제어시스템에서 측정기나 액츄에이터에 고장이 발생한 경우 실시간으로 고장발생을 경보해 줄 수 있는 고장검출 시스템의 설계법을 제안하였다. 고장검출 시스템을 설계하기 위하여 T-S 퍼지 접근법을 사용하였다. 퍼지시스템의 소인수 분해를 정의하였으며 좌 소인수를 사용하여 오차시스템을 구성하였다. 제어시스템이 동작 중 실시간으로 계산 가능한 충분조건 (16)을 오차시스템으로부터 제시하였다. 본 연구에서 제시된 검출방법의 타당성을 보여주기 위해서 역도립 진자의 제어시스템에 적용하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 모의실험 결과 액츄에이터와 측정기에 고장이 발생한 경우 적절한 시간내에 고장발생을 검출할 수 가있었다.

참고문헌

- [1] J. Gertler, "Analytical redundancy methods in fault detection and isolation", In *Proc. IFAC/IMACS Symp. SAFEPROCESS'91*, Baden-Baden 1991.
- [2] R. Patton and J. Chen, "Robust fault detection using eigenstructure assignment : A tutorial consideration and some new results", In *Proc. of the 30th CDC*, England, pp.2242-2247, 1991.
- [3] J. Chen, R. Patton and H. Zhang, "Design of unknown input observers and robust fault detection filters", *Int. J. Control*, vol.63, pp.85-105, 1996.
- [4] P. Frank and X. Ding, "Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model based fault diagnosis", *Automatica*, vol.30, no.5, pp.789-804, 1994.
- [5] E. Collins and T. Song, "Multiplier based robust H_{∞} estimation with application to robust fault detection", In *Proc. of the American Control Conference*, pp.4408-4412, San Diego, California, June 1999.
- [6] K. Tanaka, T. Ikeda and H. Wang, "Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control : Quadratic stabilizability, control theory, and linear matrix inequalities", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol.4, no.1, Feb., pp.1-13, 1996.
- [7] K. Tanaka, T. Ikeda, H.O.Wang : Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control : Quadratic stabilizability, control theory, and linear matrix inequalities. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol.4, no.1, Feb., pp.1-13, 1996
- [8] S.K.Nguang, P.Shi : Fuzzy output feedback control design for nonlinear systems : an LMI approach. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol.11, no.3, June pp.331-340, 2003
- [9] H.D. Tuan, P. Apkarian, T. Narikiyo and Y. Yamamoto : Parameterized linear matrix inequality techniques in fuzzy control system design. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol.9, no.2, April, pp.324-332, 2001.