

액추에이터 고장을 고려한 비선형 시간지연시스템의 H_∞ 고장허용제어

류석환

대구대학교 전자전기공학부

An H_∞ Fault Tolerant Control for Nonlinear Time delay Systems with Actuator Failures

Yoo, Seog Hwan

School of Electronic Eng'g, Daegu University

Abstract

This paper deals with a design of fault tolerant state feedback controllers for continuous time nonlinear time delay systems with actuator failures. The goal is to find an asymptotically stabilizing controller such that the closed loop system achieves the prescribed H_∞ performance objective in the actuator fault cases. Based on a sum of squares (SOS) approach, a design method for H_∞ fault tolerant controller is presented. In order to demonstrate our design method, a numerical example is provided.

Keywords : fault tolerant control, sum of squares, nonlinear time delay systems, actuator fault

1. 서론

현대 제어시스템은 액추에이터, 센서, 변환장치 등의 여러 가지 요소로 구성된 복잡한 시스템이다. 특히 항공기, 발전소, 제철공정과 같은 안전과 제어성능이 극도로 중요한 시스템의 경우 제어시스템을 구성하고 있는 구성기기들의 고장에도 불구하고 제어시스템이 적절한 제어성능을 발휘하도록 하는 고장허용제어에 관한 연구가 과거 십수년 동안 아주 활발하게 연구되어 왔다. 고장허용제어는 크게 수동적 고장허용제어와 능동적 고장허용제어의 두 가지로 분류할 수 있다. 수동적 고장허용제어에서는 제어기를 미리 가정한 예상고장에 강건하게 설계하여 고장이 발생할 경우 제어시스템에 어떠한 하드웨어나 소프트웨어의 변경 없이 제어시스템이 적절한 성능을 유지하도록 설계한다. 수동적 고장허용제어의 핵심은 고장발생이 가능한 액추에이터나 센서 등을 중복구성(redundancy)하고 모든 가정된 고장모드에 대해서 고장이 발생하더라도 적절한 제어성능을 발휘하도록 제어기를 견실하게 설계하는 것이다. 반면 능동적 고장허용제어는 고장발생을 검출하고 고장기기를 파악하여 제어시스템의 고장부위를 제거한 후 제어시스템을 재구성하는 방식이다. Oudghiri et al(2007)은 자동차에서 센서고장에 대한 수동적 고장허용제어시스템을 퍼지모델을 사용하여 설계하였다. Chen et al(2010)은 시변 파라미터를 갖는 선형시스템에 대해서 고장이 발생하더라도 페루프 극점이 미리 설정된 영역 내에 위치하도록 하는 수동적 고장허용제어기 설계법을 제안하였다. Sojoudi et al(2011)은 선형화된 모델에서 스마트그리드의 전력계통에 적용 가능한 수동적 고장허용제어기를 제안하였다. Ma 와 Yang(2007, 2008)은 연속형 비선형시스템과 이산형 비선형시스템에서 제곱합(Sum of Squares, SOS) 접근법을 사용하여 수동적 고장허용제어기를 설계하였다.

시간지연 시스템은 화학공정, 제철공정 등에서 많이 표현되는 동적시스템이며 최근에는 네트워크를 기반으로 하는 제어시스템을 시간지연 시스템으로 많이 모델링한다. 시간지연 시스템은 시간지연항이 불안정의 원인이 되기도 하고 제어시스템의 성능을 저하시키는 요인이 되기도 하여 실제적인 응용면에서나 이론적인 면에서 과거 오랜 기간 많은 연구자의 관심이 되었다. 특히 1990년대 이후에 선형행렬부등식(Linear Matrix Inequality, LMI)의 해를 이용하여 선형 시간지연시스템의 안정화에 관한 연구가 활발히 전개되었다. Mahmoud et al(1994)은 불확실한 선형 시간지연시스템을 LMI의 해를 이용하여 2차 안정화(quadratic stablization)하는 제어기를 제안하였고 Niculescu(1995)는 선형 시간지연시스템에서 LMI에 의한 H_∞ 제어기 설계법을 제시하였다. 그러나 비선형 시간지연시스템의 경우에는 안정화하는 제어기의 설계가 아주 어렵다. 통상 평형점 근처에서 비선형 시스템을 선형화하여 선형시스템에서 제어기를 설계할 수 있으나 이 제어기는 평형점 부근의 국부적인 영역에서만 안정성을 보장한다. 최근 SOS 접근법을 이용하여 비선형 다항식시스템을 전역적으로 안정화하는 제어기 설계법이 개발되었다. SOS 분해기법은 다항식 시스템에서 안정성이나 제어성능을 보장하는 제어기를 설계하는 과정에서 발생하는 여러 가지 부등식의 해를 효과적으로 구할 수 있는 장점을 갖고 있다. 일반적인 비선형시스템은 Taylor 급수전개를 통하여 다항식시스템으로 표현 가능하므로 SOS 접근법은 비선형시스템의 제어기설계에 아주 효과

적이다. 본 연구에서는 SOS 접근법을 이용하여 비선형 시간지연시스템의 수동적 고장허용 제어기를 설계하고자한다.

R^n 은 요소가 실수인 n 차원 벡터공간, $R^{n \times m}$ 은 $n \times m$ 실수행렬의 집합이다. $A \in R^{n \times n}$ 에서 A^T 는 A 의 전치행렬, A^{-1} 는 역행렬을 나타낸다. $R[x]$ 는 실계수 다항식의 집합, $R[x]^{p \times q}$ 는 $p \times q$ 차원의 실계수 다항식 행렬의 집합이고 $\Sigma[x]$ 는 SOS 다항식의 집합이다.

2. 고장허용제어기 문제설정

다음의 비선형 시간지연시스템을 생각한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(x(t))x(t) + A_d(x(t))x(t-d(t)) + B_1(x(t))w(t) + B_2(x(t))u(t) \\ z(t) &= C(x(t))x(t) + D(x(t))u(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 $x(t) \in R^n$ 는 상태변수, $u(t) \in R^{m_2}$ 는 제어입력, $w(t) \in R^{m_1}$ 는 외부 외란신호, $z(t) \in R^p$ 는 제어대상변수(controlled variable)이고 $A(x(t)), A_d(x(t)), \dots, D(x(t))$ 는 적절한 차원을 갖는 다항식행렬이다. $d(t)$ 는 시간지연이고 $|\dot{d}(t)| \leq \eta < 1$ 를 만족한다.

상기의 비선형 시간지연시스템 (1)은 일반적인 비선형시스템은 아니지만 외부 외란신호, 제어입력, 시간지연 상태변수에 선형인 비선형시스템의 경우에는 다항식이 아니라도 Taylor 급수전개에 의해 시스템 (1)과 같은 비선형 시간지연시스템으로 표현이 가능하다. 시간지연 시스템 (1)을 안정화시키기 위해 (2)에서와 같은 전상태 피드백 제어기(full state feedback controller)를 설계한다.

$$u(t) = -K(x(t))x(t) \quad (2)$$

여기에서 $K(x(t)) \in R[x]^{m_2 \times n}$ 는 제어이득 행렬이다.

액츄에이터 고장이 발생한 후의 제어입력을 $u^F(t)$ 라 정의하고 Wu 와 Zhang(2006)에서와 같이 다음의 액츄에이터 고장 모델을 생각한다.

$$u^F(t) = \alpha u(t) \quad (3)$$

여기에서

$$\alpha = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{m_2}), \quad 0 \leq \alpha_i^L \leq \alpha_i \leq \alpha_i^U \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m_2. \quad (4)$$

α_i^L 과 α_i^U 는 고장모델을 특징지어주는 파라미터이다. 즉, $\alpha_i^L = \alpha_i^U = 0$ 는 i 번째 액츄에이터가

완전 탈락한 경우이고 $0 < \alpha_i^L < \alpha_i^U < 1$ 의 경우는 성능저하, $\alpha_i^L = \alpha_i^U = 1$ 은 i 번째 액츄에이터는 고장이 발생하지 않는다고 가정하는 경우이다. 다음 (5)에서와 같은 집합을 생각한다.

$$F_b = \{\beta_L \mid \beta_L = \text{diag}(\beta_{L1}, \beta_{L2}, \dots, \beta_{Lm_2}), \beta_{Li} = \alpha_i^L \text{ or } \alpha_i^U, i = 1, 2, \dots, m_2\} \quad (5)$$

여기에서 $L = 1, 2, \dots, n_\beta$, $n_\beta = 2^{m_2-1}$ 이고 $l \leq m_2$ 은 고장이 발생하지 않는다고 가정한 액츄에이터의 수이다. α 는 꼭지점이 F_b 인 행렬다면체(matrix polytope) 내부의 점이다. 즉 $\alpha \in F_a$ 이다. 여기에서

$$F_a = \left\{ \alpha \mid \alpha = \sum_{L=1}^{n_\beta} \zeta_L \beta_L, \zeta_L \geq 0, \sum_{L=1}^{n_\beta} \zeta_L = 1 \right\} \quad (6)$$

고장 발생 후의 제어입력 (3)을 시간지연시스템 (1)에 적용하면 페루프 시스템은 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A(x(t)) - B_2(x(t))\alpha K(x(t)))x(t) + A_d(x(t))x(t-d(t)) + B_1(x(t))w(t) \\ z(t) &= (c(x(t)) - D(x(t))\alpha K(x(t)))x(t) \end{aligned} \quad (7)$$

비선형 시간지연시스템(1)에서 H_∞ 고장허용제어기 설계사양을 다음과 같이 정의한다.

설계사양: 모든 허용된 고장 α 에 대해서

- 1) $w(t) \equiv 0$ 일 때 페루프시스템 (7)은 점근적으로 안정하고
- 2) $x(\tau) = 0 (\tau \leq 0)$ 일 때 페루프시스템 (7)은 $\int_0^\infty z^T(t)z(t) < \gamma^2 \int_0^\infty w^T(t)w(t)dt$ 를 만족한다.

여기에서 $\gamma > 0$ 는 설계자가 정의하는 외란감소레벨(disturbance attenuation level)이다.

3. H_∞ 고장허용제어기 설계

이 절에서는 SOS 분해기법을 사용하여 앞 절에서 정의한 비선형 시간지연시스템 (1)을 위한 H_∞ 고장허용제어기를 설계하고자 한다. 이를 위하여 설계의 주요 수학적 도구인 SOS 분해기법에 대하여 간략히 기술한다.

정의 1 : $p(x) = \sum_{i=1}^M f_i^2(x)$ 를 만족하는 다항식 $f_i(x), i = 1, \dots, M$ 가 존재하면 다항식 $p(x)$ 는

SOS이다. 여기서 $x \in R^n$ 이다.

정의 1로부터 $p(x)$ 가 SOS이면 모든 x 에 대해서 $p(x) \geq 0$ 임을 알 수 있다. 그러나 $p(x) \geq 0$ 일지라도 SOS가 아닐 수도 있다.

정의 2[Tanaka et al(2007)] : $L(x) \in R[x]^{N \times N}$, $x \in R^n$ 라 정의할 때 $v \in R^N$ 에 대해서 $v^T L(x)v$ 가 SOS이면 모든 $x \in R^n$ 에 대해서 $L(x) \geq 0$ 을 만족한다.

앞 절에서 기술한 설계사양을 충족하는 설계문제의 해를 다음의 정리3에 기술한다.

정리 3 : (8)-(10)을 만족하는 대칭 양한정(positive definite) 행렬 $Q \in R^{n \times n}$, $R \in R^{n \times n}$ 과 다항식 행렬 $M(x) \in R[x]^{m_2 \times n}$ 가 존재하면 모든 고장 $\alpha \in F_a$ 에 대해서 설계사양을 충족시키는 H_∞ 고장허용제어기가 존재한다. 이때 제어기의 이득은 $K(x) = M(x)Q^{-1}$ 이다.

$$-v_1^T(S_L(x) + \epsilon_1(x)I)v_1, (L = 1, 2, \dots, n_\beta), v_1 \in R^{2n+p} \text{는 SOS이다.} \quad (8)$$

$$v_2^T(Q - \epsilon_2 I)v_2, v_2 \in R^n \text{는 SOS 이다.} \quad (9)$$

$$v_3^T(R - \epsilon_3 I)v_3, v_3 \in R^n \text{는 SOS 이다.} \quad (10)$$

여기에서

$$S_L(x) = \begin{bmatrix} S_{L11}(x) & Q & QC(x)^T - M(x)^T \beta_L D(x)^T \\ Q & -R & 0 \\ C(x)Q - D(x)\beta_L M(x) & 0 & -I \end{bmatrix}, \quad L = 1, 2, \dots, n_\beta$$

$$S_{L11}(x) = A(x)Q + QA(x)^T - B_2(x)\beta_L M(x) - M(x)^T \beta_L B_2(x)^T + \frac{1}{1-\eta} A_d(x)R A_d(x)^T + \gamma^{-2} B_1(x)B_1(x)^T$$

이고, $\epsilon_1(x) \in \Sigma[x]$ 그리고 $\epsilon_2, \epsilon_3 > 0$ 은 아주 작은 상수이다.

(증명) 먼저 설계사양 1)을 만족하는지를 보인다. (8)을 만족하므로 모든 L 에 대해서 $S_L(x) < 0$ 을 만족한다. $K(x) = M(x)Q^{-1}$ 를 이용하면 모든 $\alpha \in F_a$ 에 대해서 $\bar{S}(x) < 0$ 이다. 여기에서

$$\bar{S}(x) = (A(x) - B_2(x)\alpha K(x))Q + Q(A(x) - B_2(x)\alpha K(x))^T + \frac{1}{1-\eta} A_d(x)R A_d(x)^T + QR^{-1}Q. \quad (11)$$

리아푸노프 후보함수를 $V(x) = x(t)^T Q^{-1} x(t) + \int_{t-d(t)}^t x(\tau)^T R^{-1} x(\tau) d\tau$ 라 정의한다. (7)에서 $w(t) \equiv 0$ 이라 두고 $V(x)$ 의 시간변화율을 계산하면

$$\begin{aligned}
\dot{V}(x) &= x^T Q^{-1} \left((A(x) - B_2(x)\alpha K(x))Q + Q(A(x) - B_2(x)\alpha K(x))^T \right) Q^{-1} x(t) \\
&\quad + x(t-d(t))^T A_d(x)^T Q^{-1} x(t) + x(t)^T Q^{-1} A_d(x) x(t-d(t)) \\
&\quad + x(t)^T R^{-1} x(t) - (1-d(t))x(t-d(t))^T R^{-1} x(t-d(t)) \\
&\leq \begin{bmatrix} Q^{-1}x(t) \\ R^{-1}x(t-d(t)) \end{bmatrix}^T S_a(x) \begin{bmatrix} Q^{-1}x(t) \\ R^{-1}x(t-d(t)) \end{bmatrix} < 0
\end{aligned} \quad (12)$$

을 만족한다. 여기에서

$$S_a(x) = \begin{bmatrix} (A(x) - B_2(x)\alpha K(x))Q + Q(A(x) - B_2(x)\alpha K(x))^T + QR^{-1}Q & A_d(x)R \\ RA_d(x)^T & -(1-\eta)R \end{bmatrix} \quad (13)$$

이다. 따라서 $w(t) \equiv 0$ 일 때 폐루프시스템 (7)은 점근적으로 안정하다.

설계사양 2)를 만족하는지를 증명하기 위하여 (7)에서 $z(t)^T z(t) - \gamma^2 w(t)^T w(t) + \dot{V}(x)$ 를 앞의 방법으로 계산하면 Schur 보수정리(Schur complement theorem)를 이용하여

$$z(t)^T z(t) - \gamma^2 w(t)^T w(t) + \dot{V}(x) = \begin{bmatrix} Q^{-1}x(t) \\ R^{-1}x(t-d(t)) \\ w(t) \end{bmatrix}^T S_h(x) \begin{bmatrix} Q^{-1}x(t) \\ R^{-1}x(t-d(t)) \\ w(t) \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

를 얻는다. 여기에서

$$\begin{aligned}
S_h(x) &= \begin{bmatrix} S_{h11}(x) & A_d(x)R & B_1(x) \\ RA_d(x)^T & -(1-\eta)R & 0 \\ B_1(x)^T & 0 & -\gamma^2 \end{bmatrix} \\
S_{h11}(x) &= (A(x) - B_2(x)\alpha K(x))Q + Q(A(x) - B_2(x)\alpha K(x))^T \\
&\quad + QR^{-1}Q + Q(C(x) - D(x)\alpha K(x))^T (C(x) - D(x)\alpha K(x))Q
\end{aligned} \quad (15)$$

이다. 따라서 (14)를 적분하면

$$\begin{aligned}
\int_0^\infty z(t)^T z(t) dt &< \gamma^2 \int_0^\infty w(t)^T w(t) dt - V(x(\infty)) + V(x(0)) \\
&\leq \gamma^2 \int_0^\infty w(t)^T w(t) dt
\end{aligned} \quad (16)$$

를 얻는다. 이하 증명 끝.

정리 3에서 비선형 시간지연시스템 (1)에서 설계사양을 만족하는 H_∞ 고장허용제어기의 존재조건을 SOS 분해기법의 수단으로 표현하였다. (8)-(10)의 SOS 조건들은 matlab 환경에서 최근 개발된 SOSTOOLS를 사용하여 쉽게 구할 수 있다.

4. 수치 예

이 절에서는 수치 예를 통하여 정리3에 기술된 H_∞ 고장허용제어기를 설계하고 컴퓨터 모의실험을 통하여 성능을 분석한다. 이를 위하여 다음과 같은 비선형 시간지연시스템을 생각한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_1(t) + 5x_2(t) + (1 - x_2(t))x_1(t - d(t)) + 2w(t) + u_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -x_1(t) - x_2(t)^3 + x_2(t - d(t)) + u_1(t) + u_2(t) \\ z(t) &= x_1(t) \end{aligned} \quad (17)$$

(1)에서의 형태로 표현하면

$$\begin{aligned} A(x) &= \begin{bmatrix} 1 & 5 \\ -1 & -x_2(t)^2 \end{bmatrix}, \quad A_d(x) = \begin{bmatrix} 1 - x_2(t) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_1(x) = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_2(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \\ C(x) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D(x) = 0 \end{aligned}$$

이다. $|\dot{d}(t)| \leq 0.1$ 이라 가정하고 disturbance attenuation level $\gamma = 0.5$ 라 정의한다.

첫 번째 액츄에이터는 성능저하 뿐만 아니라 완전고장으로 인한 탈락 가능성도 가정하고 두 번째 액츄에이터는 최악의 경우 50%의 성능저하가 발생가능하다고 가정한다. 이 경우 고장 모델 파라미터는 다음과 같다.

$$\alpha_1^L = 0, \quad \alpha_1^U = 1, \quad \alpha_2^L = 0.5, \quad \alpha_2^U = 1 \quad (18)$$

따라서 (5)에 의하면

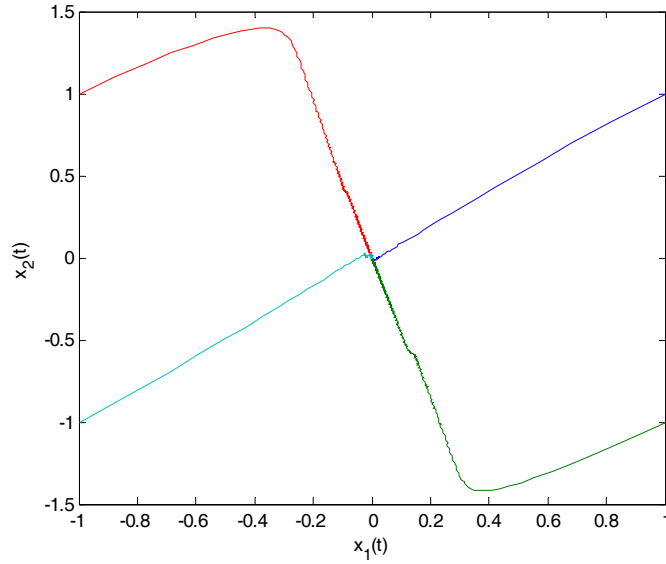
$$\beta_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \beta_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \beta_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad \beta_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (19)$$

이다. $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 10^{-6}$ 이라 정의한다. (8)-(10)을 SOSTOOLS를 이용하여 계산한 결과

$$\begin{aligned} Q &= \begin{bmatrix} 0.445 & -0.704 \\ -0.704 & 3.29 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 1.65 & -0.211 \\ -0.211 & 7.96 \end{bmatrix}, \\ K(x) &= \begin{bmatrix} -9.31x_2^2 - 0.721 & -1.92x_2^2 + 0.125 \\ 20.3x_2^2 + 56.6 & 3.81x_2^2 + 16.2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

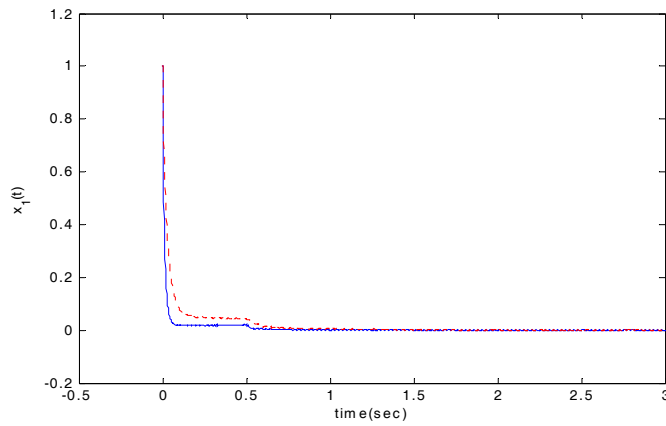
와 같이 얻었다. 초기 값이 $x(t) = [1 \ 1]^T, [1 \ -1]^T, [-1 \ 1]^T, [-1 \ -1]^T (t \leq 0)$ 의 4가

지 경우에 $w(t) \equiv 0$ 이고 2개의 액추에이터가 정상운전일 때 위상평면도는 <그림 1>과 같다. <그림 1>에서 보는 바와 같이 모든 초기조건에 대해서 원점으로 수렴하는 것을 알 수 있다.



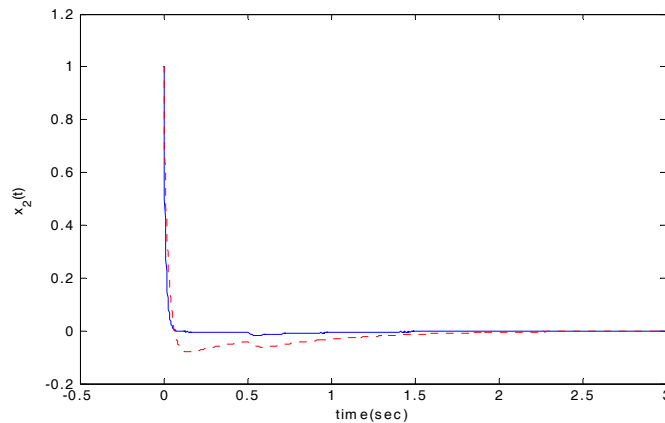
<그림 78> 위상평면도

$x(0) = [1 \ 1]^T$ 일 때의 상태변수의 시간궤적을 <그림 2>와 <그림 3>에 나타낸다. <그림 2>에서 실선은 두 개의 액추에이터가 정상작동할 때 $x_1(t)$ 의 궤적을 나타내고 점선은 첫 번째 액추에이터가 고장으로 완전탈락하고 두 번째 액추에이터가 50%의 성능저하가 일어났을 때 $x_1(t)$ 의 궤적을 나타낸다.



<그림 79> 정상과 고장시의 $x_1(t)$ 궤적

마찬가지로 <그림 3>에서 실선은 두 개의 액츄에이터가 정상작동할 때 $x_2(t)$ 의 궤적을 나타내고 점선은 첫 번째 액츄에이터가 고장으로 완전탈락하고 두 번째 액츄에이터가 50%의 성능저하가 일어났을 때 $x_2(t)$ 의 궤적을 나타낸다.



<그림 80> 정상과 고장시의 $x_2(t)$ 궤적

<그림 2>와 <그림 3>으로부터 액츄에이터에서 고장이 발생하였을 경우 정상 작동할 때 보다는 원점으로 수렴하는 속도가 느리지만 안정하게 원점으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

비선형 시간지연시스템에서 액츄에이터 고장을 가정한 H_∞ 고장허용 제어기를 SOS 접근법을 사용하여 설계하였다. 액츄에이터 고장모델은 정상운전, 부분적인 성능저하, 완전고장으로 인한 탈락을 가상하였다. 모델의 동적방정식에서 비선형성이 다항식의 형태로 존재할 경우에 통상적인 접근방식인 선형화기법, T-S 퍼지시스템 접근방법에서는 국부적인 해만 제공한다. 그러나 본 연구에서 제안하는 SOS 접근법에서는 전역적인 해를 얻었다. 또한 SOS 접근법은 matlab 환경하에서 SOS Toolbox를 이용하여 쉽게 계산할 수 있었으며 수치 예를 통한 컴퓨터 모의실험 결과 가정한 액츄에이터 고장에도 불구하고 설계사양을 만족하는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] M. Oudghiri, M. Chadli and A. Hajjaji(2007), "A fuzzy Approach for Sensor fault Tolerant Control of Vehicle Lateral Dynamics", Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control Applications, pp. 1221-1226, Singapore, Oct. 1-3
- [2] H. Ma and G. Yang(2007), "FTC Synthesis for Nonlinear Systems: Sum of Squares Optimization Approach", Proceedings of the 46th IEEE Conference on decision and Control, pp. 2645-2650, New Orleans, LA, Dec. 12-14
- [3] H. Ma and G. Yang(2008), "Fault Tolerant H_∞ Control for a Class of Nonlinear Discrete-time Systems: Using Sum of Squares Optimization", Proceedings of 2008 American Control Conference, pp. 1588-1593, Seattle, Washington, Jun. 11-13
- [4] L. Chen, R. Patton and S. Klinkhieo(2010), "An LPV Pole-placement Approach to Friction Compensation as an FTC Problem", Proceedings of 2010 Conference on Control and Fault Tolerant Syatems, pp. 100-105, Nice, france, Oct. 6-8
- [5] S. Sojoudi, J. Lavaei and R. Murray(2011), "Fault Tolerant Controller Design with Applications in Power Systems and Synthetic Biology", Proceedings of 2011 American Control Conference, pp. 4135-4142, San Francisco, Ca, Jun 29-Jul. 1
- [6] M. Mahmoud and N. F. Al-Muthairi(1994), "Qudratic stabilization of continuous time systems with state delay and norm bounded time varying uncertainties", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 39, pp.2135-2139
- [7] S. Niculescu(1995), " H_∞ memoryless control with an α -stability constraint for time delays systems: An LMI approach", Proceedings of the 34th CDC, pp.1507-1512, New Orleans, LA, Dec.
- [8] K. Tanaka, K. Yamauchi, H. Ohtake and H. O. Wang(2007), "Guaranteed Cost Control of Polynomial Fuzzy Systems via a Sum of Squares Approach", *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*, pp.5954-5959, New Orleans, LA, Dec. 12-14
- [9] H. Wu and H. Zhang(2006), "Reliable H_∞ Fuzzy Control for Continuous Time Nonlinear Systems with Actuator Failures", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol.14, No.5, pp. 609-618