

시간지연을 갖는 비선형 시스템의 퍼지 H_2/H_∞ 제어기 설계

Fuzzy H_2/H_∞ Controller Design for Delayed Nonlinear Systems

조희수, 이갑래, 박홍배
(Hee Soo Cho, Kap Rai Lee and Hong Bae Park)

Abstract : This paper presents a method for designing fuzzy H_2/H_∞ controllers of nonlinear systems with time varying delay. Takagi-Sugeno fuzzy model is employed to represent nonlinear systems with time varying delay. Using a single quadratic Lyapunov function, the globally exponential stability and H_2/H_∞ performance problem are discussed. A sufficient condition for the existence of fuzzy H_2/H_∞ controllers is then presented in terms of linear matrix inequalities(LMIs). The proposed fuzzy H_2/H_∞ controllers minimizes the upper bound on the linear quadratic performance measure.

Keywords : fuzzy controller, H_2/H_∞ controller, LMI, delayed nonlinear systems, fuzzy model

I. 서론

비선형 시스템에 대한 퍼지제어 연구는 많은 관심을 끌어들여 왔으며 성공적인 적용 사례도 많이 있다. 최근 퍼지제어에 있어 가장 중요한 연구중의 하나는 안정성과 성능을 만족하는 체계적인 제어기 설계에 대한 연구이다. Wang 등[1]은 Takagi-Sugeno(T-S) 퍼지모델로 표현된 비선형 시스템을 안정화하는 방법을 제시하고, 병렬분산보상(PDC: parallel distributed compensation) 개념을 이용하여 퍼지제어기를 설계하였다. 또한, Ma 등[2]은 T-S 퍼지모델에 대한 안정성을 보장하는 관측기 구조의 출력제한 제어기를 설계하였다.

외란감쇠에 대한 오차신호의 L_2 이득 제한조건과 안정성을 만족시키는 퍼지 H_∞ 제어연구도 많이 이루어지고 있다. Hong[3] 및 Lee[4] 등은 상태제한 퍼지 H_∞ 제어기를 설계하였으며, Chen 등[5]은 관측기 구조의 퍼지 H_∞ 제어기를 설계하였다. 시스템의 과도응답 성능을 고려하기 위해서는 LQ성능지수로 나타내는 H_2 제어가 더 효과적이다. Jadbabaie[6] 등은 안정성과 LQ성능을 만족하는 상태제한 퍼지제어기를 설계하였으며 Chen 등[7]은 H_2/H_∞ 성능을 만족시키는 출력제한 퍼지제어기를 설계하였다.

다양한 공학 시스템에 있어 시간지연은 안정성과 성능에 매우 심각한 영향을 나타낸다. Cao 등[8]은 안정성을 만족하는 관측기 구조의 퍼지제어기를 설계하였으며 Lee 등[9]은 안정성과 H_∞ 성능을 만족하는 출력제한 퍼지 H_∞ 제어기를 설계하였다.

본 논문에서는 상단에 시간지연을 갖는 비선형 시스템에 대한 퍼지 H_2/H_∞ 제어기를 설계한다. 시간지연을 갖는 비선형 시스템에 대한 안정성과 H_∞ 성능 및 H_2 성능 문제를 고려한 퍼지제어기를 설계하기 위하여, 시간지연을 갖는 비선형 시스템은 시간지연을 갖는 T-S 퍼지모델로 나타내며

병렬분산보상의 개념을 이용하여 제어기를 설계한다. 페루프 시스템이 지수함수적으로 안정하며 H_∞ 성능 조건과 H_2 성능의 상한값 최소화를 만족하는 충분조건을 유도한다. 이러한 충분조건 식으로부터 시간지연을 갖는 T-S 퍼지모델에 대한 퍼지제어기가 존재할 충분조건을 선형행렬부등식으로 나타내며, 퍼지제어기의 제어 이득값은 선형행렬부등식의 해로부터 직접 구한다.

II. 문제설정

T-S 퍼지모델은 비선형 시스템을 모델링하는데 효과적인 방법으로 알려져 있다. 시간지연을 갖는 T-S 퍼지모델

Plant Rule i :

IF $x_1(t)$ is M_{i1} and ... and $x_n(t)$ is M_{in}

THEN $\dot{x}(t) = A_i x(t) + A_d(t) x(t-d(t))$

$+ B_{1i} u(t) + B_{2i} u(t)$

$z(t) = C_i x(t) + D_i u(t)$ (1)

$x(t) = \phi(t), t \leq 0 \quad i=1,2,\dots,r$

를 고려한다. 여기서 M_{ij} 는 퍼지집합이고, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 는 상태, $\phi(t) \in \mathbb{R}^n$ 는 초기 상태함수, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 는 입력, $w(t) \in \mathbb{R}^p$ 는 제한된 에너지를 갖는 외부 외란, $z(t) \in \mathbb{R}^q$ 는 측정값, r 은 IF-THEN 규칙의 수, $A_i, A_d, B_{1i}, B_{2i}, C_i$ 와 D_i 는 공칭시스템을 나타내는 적절한 차원을 갖는 상수행렬이다. $d(t)$ 는

$$0 \leq d(t) < \infty, \quad \dot{d}(t) \leq \beta < 1 \quad (2)$$

을 만족하는 시변 시간지연이라고 가정한다. $\mu_i(x(t))$ 를 추론된 퍼지집합 $h_i(x(t))$ 의 정규화된 멤버함수로 정의한다.

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

$$h_i(x(t)) = \prod_{j=1}^r M_{ij}(x_j(t)) \quad (3)$$

$$x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)]^T$$

여기서 $M_{ij}(x_j(t))$ 는 멤버십 함수 M_{ij} 에서 $x_j(t)$ 의 멤버십 등급이다. 그리고 모든 t 에 대하여

$$h_i(x(t)) \geq 0, \quad i=1,2,\dots,r$$

$$\sum_{i=1}^r h_i(x(t)) > 0 \quad (4)$$

을 가정하면,

$$\mu_i(x(t)) \geq 0, \quad i=1,2,\dots,r$$

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(x(t)) = 1 \quad (5)$$

이다.

주어진 $(x(t), u(t))$ 에 대해서, T-S 퍼지모델의 최종출력은 추론된 $h_i(x(t))$ 를 이용하여 각 동작점에서 선형화된 r 개의 선형모델 조합인

$$\dot{x}(t) = A(\mu)x(t) + A_d(\mu)x(t-d(t)) + B_1(\mu)w(t) + B_2(\mu)u(t) \quad (6)$$

$$z(t) = C(\mu)x(t) + D(\mu)u(t)$$

$$x(t) = \psi(t), \quad t \leq 0$$

와 같이 추론된다. 여기서

$$A(\mu) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x(t))A_i, \quad A_d(\mu) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x(t))A_{d,i}$$

$$B_1(\mu) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x(t))B_{1,i}, \quad B_2(\mu) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x(t))B_{2,i} \quad (7)$$

$$C(\mu) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x(t))C_i, \quad D(\mu) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x(t))D_i$$

이다. 퍼지시스템 (1)을 안정화하는 견실 퍼지제어기로 아래와 같은 상태궤환 제어기 K_i 를 고려한다.

Control Rule i :

IF $x_1(t)$ is M_{1i} and \dots and $x_n(t)$ is M_{ni}
 THEN $u(t) = K_i x(t), \quad i=1,2,\dots,r \quad (8)$

이러한 퍼지제어기의 최종출력은

$$u(t) = K(\mu)x(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x(t))K_i x(t) \quad (9)$$

이다. 퍼지제어기 (9)를 퍼지시스템 (6)에 적용하였을 때, 페루프 시스템은

$$\dot{x}(t) = \widehat{A}(\mu)x(t) + A_d(\mu)x(t-d(t)) + B_1(\mu)w(t)$$

$$z(t) = \widehat{C}(\mu)x(t) \quad (10)$$

$$x(t) = \psi(t), \quad t \leq 0$$

이다.

여기서

$$\widehat{A}(\mu) = A(\mu) + B_2(\mu)K(\mu)$$

$$\widehat{C}(\mu) = C(\mu) + D(\mu)K(\mu) \quad (11)$$

이다.

주어진 γ 에 대해서 H_∞ 제어 성능

$$J_\infty =: \int_0^T \|z(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \left[\int_0^T \|w(t)\|^2 dt \right] \quad (12)$$

을 고려한다.

일반적으로 과도응답 등의 성능을 고려하는 제어기를 설계할 때에는 H_2 제어가 더욱 효과적이다. 즉, 외란 $w(t)$ 를 고려하지 않은 시스템에서 LQ 성능을 나타내는 비용함수

$$J_2 =: \int_0^T [x^T(t)Q_2x(t) + u^T(t)R_2u(t)]dt \quad (13)$$

을 고려할 경우 하중행렬 Q_2, R_2 을 적절히 조절함으로써 과도응답 등의 원하는 제어성능을 적절히 조절할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 시간지연을 갖는 퍼지시스템 (6)에서 페루프 시스템 (10)을 지수함수적으로 안정화할 뿐만 아니라 비용함수 (12)를 만족하면서 (13)을 최소화시키는 상태궤환 제어기 K_i 을 설계하고자 한다.

III. 퍼지 H_2/H_∞ 제어기 설계

정리 1 : 시간지연을 갖는 T-S 퍼지시스템 (10)에서

$$\begin{bmatrix} A(\mu) + \widehat{C}^T(\mu)\widehat{C}(\mu) & PA_d(\mu) & PB_1(\mu) \\ A_d^T(\mu)P & -(1-\beta)S_1 & 0 \\ B_1^T(\mu)P & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (14)$$

을 만족하는 양한정 행렬 P, S_1 및 양수 a 가 존재하면, 시간지연을 갖는 페루프 시스템 (10)은 지수함수적으로 안정할 뿐만 아니라 H_∞ 성능 (12)를 만족한다.

증명 : 시간지연을 갖는 T-S 퍼지시스템 (10)에서 $P > 0$ 이고 $S_1 > 0$ 를 만족하는 Lyapunov 함수

$$V(x(t)) = x^T(t)Px(t) + \int_{t-\alpha(t)}^t x^T(\tau)S_1x(\tau)d\tau \quad (15)$$

을 정의하면 $\delta_1 \|x\|^2 \leq V(x, t) \leq \delta_2 \|x\|^2$ 을 만족하는 양수 δ_1 및 δ_2 는 항상 존재한다.

따라서 $\dot{V}(x, t) \leq -\alpha \|x\|^2$ 을 만족하는 양수 α 가 존재한다면 시스템 (10)은 지수함수적으로 안정하다[10]. (2)의 가정으로부터

$$\begin{aligned} \dot{V}(x(t)) &\leq \dot{x}^T(t) P x(t) \\ &\quad + x^T(t) P \dot{x}(t) + x(t)^T S_1 x(t) \\ &\quad - x(t-d(t))^T (1-\beta) S_1 x(t-d(t)) \end{aligned} \tag{16}$$

$$:= \dot{V}_a(x, t)$$

이다. 또한 $\dot{V}_a(x(t)) \leq -\alpha \|x\|^2$ 로부터

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-d(t)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Lambda(\mu) & P A_d(\mu) \\ A_d^T(\mu) P & -(1-\beta) S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-d(t)) \end{bmatrix} \leq 0 \tag{17}$$

$$\Lambda(\mu) = \hat{A}^T(\mu) P + P \hat{A}(\mu) + S_1 + \alpha I \tag{18}$$

이다. 따라서 (14)가 만족되면 (17)이 만족됨을 알 수 있다.

H_∞ 성능을 증명하기 위하여 [9]에서 제시된 방법과 유사하게 조건식

$$\begin{aligned} J_a(t) &:= \dot{V}_a(x, t) + z^T(t) z(t) - \gamma^2 w^T(t) w(t) \\ &\leq 0 \end{aligned} \tag{19}$$

을 고려하면 (14)가 구해진다. $V(x(T)) > 0$ 이기 때문에 (19)가 만족되면 (12)가 만족됨을 알 수 있다. 즉, (14)가 만족되면 페루프 시스템은 지수함수적으로 안정하며 H_∞ 성능 (12)가 만족된다. ■

정리 2 : 시간지연을 갖는 T-S 퍼지시스템 (10)에서

$$\min\{\rho + \text{tr}(Q)\} \text{ Subject to} \tag{20}$$

$$\begin{bmatrix} H & P A_d(\mu) \\ A_d^T(\mu) P & -(1-\beta) S_1 \end{bmatrix} \leq 0 \tag{21}$$

여기서,

$$\begin{aligned} H &= \hat{A}(\mu)^T P + P \hat{A}(\mu) + S_1 + Q_2 + K^T(\mu) R_2 K(\mu) \\ &\quad - \rho + \psi^T(0) P \psi(0) < 0, \quad -Q + N_1^T S_1 N_1 < 0 \end{aligned} \tag{22}$$

을 만족하는 양한정 행렬 P, S_1, Q 및 ρ 가 존재하면, 제어기 (9)는 준최적(suboptimal) H_2 제어기이며 $\rho + \text{tr}(Q)$ 는 H_2 성능지수의 상한값이다. 여기서

$$\int_{-d(0)}^0 \psi(\tau) \psi(\tau)^T d\tau = N_1 N_1^T \tag{23}$$

이다.

증명 : Lyapunov 함수 (14)와 조건 (13)으로부터

$$\begin{aligned} J_2 &= \int_0^T \{x^T(t) Q_2 x(t) + u^T(t) R_2 u(t)\} dt \\ &= V(0) - V(T) + \int_0^T [x^T(t) Q_2 x(t) \\ &\quad + u^T(t) R_2 u(t) + \dot{V}(t)] dt \\ &\leq V(0) + \int_0^T [x^T(t) Q_2 x(t) + u^T(t) R_2 u(t) \\ &\quad + \dot{V}(t)] dt \end{aligned} \tag{24}$$

이다. 여기서

$$\dot{V}(t) + x^T(t) Q_2 x(t) + u^T(t) R_2 u(t) \leq 0 \tag{25}$$

이면 H_2 성능의 상한값은

$$J_2 \leq V(0) = x^T(0) P x(0) + \int_{-d(0)}^0 x^T(\tau) S_1 x(\tau) d\tau \tag{26}$$

임을 알 수 있다. (25)로부터 (21)이 얻어지며, (22)는 (26)의 상한값을 최소화하는 것이다. (26)의 우측 항의 첫 번째 부분의 최소화는

$$\psi^T(0) P \psi(0) < \rho \tag{27}$$

를 만족하면서 ρ 를 최소화하는 것이며, 두 번째 부분의 최소화는

$$\begin{aligned} \int_{-d(0)}^0 \psi^T(\tau) S_1 \psi(\tau) d\tau &= \int_{-d(0)}^0 \text{tr}\{\psi(\tau)^T S_1 \psi(\tau)\} d\tau \\ &= \text{tr}\{N_1 N_1^T S_1\} = \text{tr}\{N_1^T S_1 N_1\} < \text{tr}\{Q\} \end{aligned} \tag{28}$$

을 만족하면서 $\text{tr}(Q)$ 를 최소화하는 것이다. 따라서 (27) 및 (28)로부터 (22)가 구해지며 (26)의 성능 상한값은

$$J_2^* = \rho + \text{tr}(Q) \tag{29}$$

이고 (20)에 의해 구해진다. ■

따름정리 1은 정리 1 및 정리 2의 결과로부터 퍼지 H_2/H_∞ 제어기가 존재할 충분조건과 제어기 설계방법을 선형행렬부등식으로 나타낸다.

따름정리 1 : 시간지연을 갖는 퍼지시스템 (10)을 고려한다. 선형행렬부등식

$$\min\{\rho + \text{tr}(Q)\} \text{ subject to} \tag{30}$$

$$\begin{aligned} \Psi_{ii} &\leq 0, \quad \Omega_{ii} \leq 0, \quad i=1, 2, \dots, r \\ \Psi_{ij} + \Psi_{ji} &\leq 0, \quad \Omega_{ij} + \Omega_{ji} \leq 0, \quad i < j \leq r \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{bmatrix} -\rho & \phi^T(0) \\ \phi(0) & -X \end{bmatrix} < 0, \begin{bmatrix} -Q & N_1^T \\ N_1 & -S_1^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (32)$$

을 만족하는 행렬 $Q>0, X>0, Y_i>0, S_1>0$ 및 상수 $\rho>0, \alpha>0$ 가 존재하면 제어기 (9)는 H_∞ 성능 (12)를 만족하면서 H_2 성능 (13)의 상한값을 최소화하는 혼합 H_2/H_∞ 제어기이다. 여기서 N_1 은 (23)에 나타나 있으며

$$\Psi_{ij} = \begin{bmatrix} \Gamma_{ij} & B_{1i} & X & XC_i^T + Y_j D_i^T & X \\ B_{1i}^T & -\gamma^2 I & 0 & 0 & 0 \\ X & 0 & -S_1^{-1} & 0 & 0 \\ C_i X + D_i Y_j & 0 & 0 & -I & 0 \\ X & 0 & 0 & 0 & -\alpha^{-1} I \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\Omega_{ij} = \begin{bmatrix} \Gamma_{ij} & X & Y_i^T & X \\ X & -S_1^{-1} & 0 & 0 \\ Y_i & 0 & -R_2^{-1} & 0 \\ X & 0 & 0 & -Q_2^{-1} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\Gamma_{ij} = A_i X + X A_i^T + B_{2i} Y_j + Y_j^T B_{2i}^T + A_{di}(1-\beta)^{-1} S_1^{-1} A_{di}^T \quad (35)$$

이며, 상태케환 이득들은

$$K_i = Y_i X^{-1}, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (36)$$

이다.

증명: 정리 1과 정리 2로부터 $X = P^{-1}$ 로 두고 (18)의 앞과 뒤에 $\text{Diag}[X \ I \ I]$, (21)의 앞과 뒤에 $\text{Diag}[X \ I]$ 을 각각 곱하고

$$Y_i = K_i X \quad (37)$$

로 두면 (18) 및 (21)은 각각

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^r \mu_i(x(t)) \mu_i(x(t)) \Psi_{ii} \\ & + \sum_{i < j}^r \mu_i(x(t)) \mu_j(x(t)) (\Psi_{ij} + \Psi_{ji}) \leq 0 \\ & \sum_{i=1}^r \mu_i(x(t)) \mu_i(x(t)) \Omega_{ii} \\ & + \sum_{i < j}^r \mu_i(x(t)) \mu_j(x(t)) (\Omega_{ij} + \Omega_{ji}) \leq 0 \end{aligned} \quad (38)$$

와 등가이므로, (31)이 만족되면 (38)이 만족됨을 쉽게 알 수 있

다. 또한 (22)를 선형행렬부등식으로 나타내면 (32)이다. ■

따름정리 1의 모든 부등식은 모든 변수에 대해서 선형행렬부등식으로 나타나 있으므로 Matlab을 이용하면 (30)~(32)를 만족하는 해는 바로 구할 수 있다. 또한 제어기 K_i 및 LQ 성능의 상한값도 바로 구할 수 있다.

IV. 예제

다음의 비선형 시스템에 대해 퍼지 H_2/H_∞ 제어기 설계를 하고자 한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -5.125x_1(t) - 0.5x_1(t-d(t)) - 2x_2(t) \\ &\quad - 6.7x_2^3(t) - 0.2x_2(t-d(t)) + w(t) + u(t) \\ \dot{x}_2(t) &= x_1(t) \\ z(t) &= 2x_2(t) - 0.1u(t) \\ x(t) &= \phi(t), \quad t \leq 0 \end{aligned}$$

여기서 시변지연은 $d(t) = 1 + 0.44 \cos(0.1t)$ 이며 $x_1(t) \in [-1.5 \ 1.5]$, $x_2(t) \in [-1.5 \ 1.5]$ 라 가정한다. [1]과 같은 과정을 거쳐 비선형항은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$-6.7x_2^3(t) = M_{11} \cdot 0 \cdot x_2(t) - M_{12} \cdot 15.075 \cdot x_2(t)$$

여기서

$$\begin{aligned} M_{12}(x_2(t)) &= \frac{6.7}{15.075} x_2^2(t) \\ M_{11}(x_2(t)) &= 1 - M_{12}(x_2(t)) = 1 - \frac{1}{2.25} x_2^2(t) \end{aligned}$$

이며 이 퍼지집합을 이용하면 비선형시스템은 다음과 같은 T-S 퍼지모델로 표시할 수 있다.

Plant Rule 1 : IF $x_2(t)$ is M_{11}

$$\begin{aligned} \text{THEN } \dot{x}(t) &= A_1 x(t) + A_{d1}(t) x(t-d(t)) \\ &\quad + B_{11} w(t) + B_{21} u(t) \\ z(t) &= C_1 x(t) + D_1 u(t) \end{aligned}$$

Plant Rule 2 : IF $x_2(t)$ is M_{12}

$$\begin{aligned} \text{THEN } \dot{x}(t) &= A_2 x(t) + A_{d2}(t) x(t-d(t)) \\ &\quad + B_{12} w(t) + B_{22} u(t) \\ z(t) &= C_2 x(t) + D_2 u(t) \end{aligned}$$

여기서 $x(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -5.125 & -2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} -5.125 & -17.075 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{d_1} = A_{d_2} = \begin{bmatrix} -0.5 & -0.2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{1_1} = B_{1_2} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_{2_1} = B_{2_2} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = C_2 = [0 \ 2], \quad D_1 = D_2 = 0.1$$

이다.

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad R_2 = 0.1, \quad [X_1^T(0) \ X_2^T(0)] = [-1 \ -1],$$

$w(t) = 0.5 \cos(\pi t)$, $\gamma = 6$ 으로 두고 Matlab을 이용하여 H_2/H_∞ 제어를 구하면

$$K_1 = Y_1 X^{-1} = [-22.6512 \ 26.6927]$$

$$K_2 = Y_2 X^{-1} = [-32.7343 \ 40.3384]$$

이며 그림 1과 그림 2는 제어기 유무에 따른 상태응답을 나타낸 결과이다.

V. 결론

본 논문에서는 상태변수에 시간지연을 갖는 비선형 시스템에 대한 퍼지 H_2/H_∞ 제어기 설계 방법을 제시하였다. 페

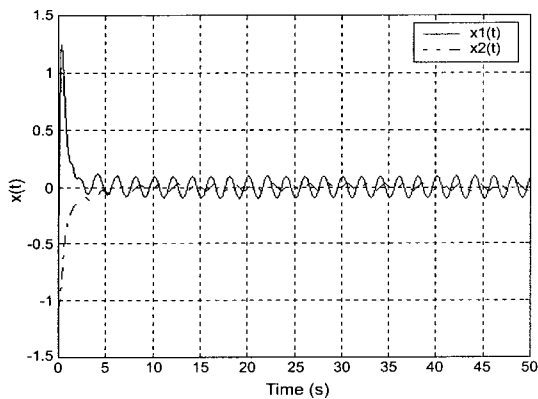


그림 1. 개회로 시스템에서의 상태응답.
Fig. 1. Response of the open-loop system.

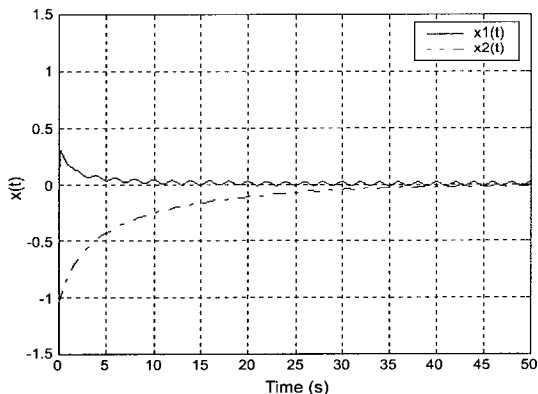
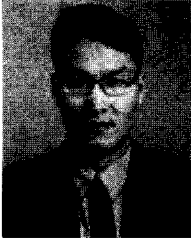


그림 2. 폐회로 시스템에서의 상태응답.
Fig. 2. Response of the closed-loop system.

루프 시스템의 안정화와 H_∞ 성능조건 및 H_2 성능의 상한값 최소화를 만족하는 퍼지제어기가 존재할 충분조건을 선형행렬부등식을 이용하여 나타내었으며, 그 선형행렬부등식의 해로부터 퍼지 H_2/H_∞ 제어기의 상태제환 이득과 성능 상한값을 직접 구할 수 있다. 즉, 제한한 퍼지제어기 설계기법을 이용하면 시간지연을 갖는 비선형 시스템의 안정성 뿐만 아니라 페루프 시스템의 H_∞ 성능조건과 LQ 성능의 상한값 최소화를 만족시키는 제어기를 직접 구할 수 있다. 또한 간단한 시뮬레이션 예를 통하여 본 논문의 결과를 확인하였다.

참고 문헌

- [1] K. Tanaka, T. Ikeda, and H. O. Wang, "Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control : Quadratic stabilizability, H_∞ control theory, and linear matrix inequalities," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 1-13, Feb. 1996.
- [2] X. J. Ma, Z. Q. Sun, and Y. Y. He, "Analysis and design of fuzzy controller and fuzzy observer," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 6, pp. 41-51, Feb. 1998.
- [3] Z. Han and G. Feng, "State feedback H_∞ controller design of fuzzy dynamic systems using LMI techniques," *Proc. FUZZ-IEEE, Anchorage, AK*, pp. 538-544, May 1988.
- [4] K. R. Lee, E. T. Jeung, and H. B. Park, "Robust fuzzy H_∞ control for uncertain nonlinear systems via state feedback : An LMI approach," *Fuzzy Sets and Syst.*, vol. 120, no. 1, pp. 123-134, 2001.
- [5] B. S. Chen, C. S. Tseng, and H. J. Uang, "Robustness design of nonlinear dynamic systems via fuzzy linear control," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 7, pp. 571-585, Oct. 1999.
- [6] A. Jadbabie, M. Jamshidi, and A. Titli, "Guaranteed cost design of continuous-time Takagi-Sugeno fuzzy controllers via linear matrix inequalities," *Proc. FUZZ-IEEE, Anchorage, AK*, pp. 268-273, May 1988.
- [7] B. S. Chen, C. S. Tseng, and H. J. Uang, "Mixed H_2/H_∞ fuzzy output feedback control design for nonlinear dynamic systems : An LMI approach," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 249-265, June 2000.
- [8] Y. Y. Cao and P. M. Frank, "Analysis and synthesis of nonlinear time-delay systems via fuzzy control approach," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 200-211, April 2000.
- [9] K. R. Lee, J. H. Kim, E. T. Jeung, and H. B. Park, "Output feedback robust H_∞ control of uncertain fuzzy dynamic systems with time-varying delay," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 8, no. 6, pp. 657-664, Dec. 2000.
- [10] K. Tanaka and M. Sugeno, "Stability analysis and design of fuzzy control systems," *Fuzzy Sets and Syst.*, vol. 45, no. 2, pp. 135-156, 1992.
- [11] C. L. Chen, P. C. Chen, and C.-K. Chen, "Analysis and design of fuzzy control systems," *Fuzzy Sets and Syst.*, vol. 57, pp. 125-140, 1993.



조 희 수

1969년 1월 2일생. 1993년 경북대학교 전자공학과 졸업. 포항공대 대학원 석사(1995). 1996년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 박사과정. 관심분야는 건설제어, 퍼지제어 및 응용, 모델링.



이 갑 래

1964년 11월 22일생. 1987년 경북대학교 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(1990), 동대학 박사(1999). 2001년~현재 평택대학교 정보과학부 교수. 관심분야는 지능제어, 산업네트워크제어, 임베디드 OS.



박 흥 배

1951년 3월 6일생. 1977년 경북대학교 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(1979), Univ. of New Mexico 박사(1988). 1988년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수. 관심분야는 건설제어, 최적제어 및 응용.