

이산시간 상호결합 퍼지 시스템을 위한 관측기 기반 분산 퍼지 제어기 설계

Design of an observer-based decentralized fuzzy controller for discrete-time interconnected fuzzy systems

구근범* · 주영훈** · 박진배*[†]
Geun Bum Koo, Young Hoon Joo, and Jin Bae Park[†]

*연세대학교 전기전자공학과, **군산대학교 제어로봇공학과
*School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University
**Department of Control and Robotics Engineering, Kunsan National University

요 약

본 논문은 이산시간 상호결합 퍼지 시스템을 위한 관측기 기반 분산 퍼지 제어기 설계 기법을 연구한다. 이를 위해 먼저 상호결합 퍼지 시스템의 퍼지 하위시스템을 고려하고, 이를 바탕으로 관측기 기반 분산 퍼지 제어기를 설계한다. 그리고 퍼지 하위시스템과 관측기 기반 분산 퍼지 제어기를 이용하여 페루프 시스템을 구한다. 구해진 페루프 시스템에 대해 최대 상호결합 범위를 포함한 안정도 조건을 도출하고, 이를 선형 행렬 부등식 형태로 나타낸다. 마지막으로 모의실험을 통해 제안된 제어기 설계 기법의 타당성을 분석한다.

키워드 : 이산시간 상호결합 퍼지 시스템, 관측기 기반 분산 퍼지 제어기, 최대 상호결합 범위, 안정도 조건, 선형 행렬 부등식.

Abstract

In this paper, an observer-based decentralized fuzzy controller is designed for discrete-time interconnected fuzzy systems. Based on the fuzzy subsystem of the interconnected fuzzy system, the observer-based decentralized fuzzy controller is considered. By using the fuzzy subsystem and the observer-based decentralized fuzzy controller, the closed-loop system is obtained. From the closed-loop system, the stability condition with the maximum interconnection bound is developed, and its sufficient condition is represented as the linear matrix inequality (LMI). Finally, the numerical example is provided to verify the effectiveness of the proposed technique.

Key Words : Discrete-time interconnected fuzzy system, Observer-based decentralized fuzzy controller, Maximum interconnection bound, Stability condition, Linear matrix inequality (LMI).

Received: Mar. 22, 2015
Revised : Apr. 5, 2015
Accepted: Jul. 9, 2015
[†]Corresponding author
jbpark@yonsei.ac.kr

본 논문은 2015년 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원(과제번호: NRF-2015R1A2A2A05001610)을 받아 수행된 연구임.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근, 산업 기술이 고도화됨에 따라 시스템의 크기가 커지고 시스템들이 서로 영향을 미치는 현상이 나타나고 있다. 이에, 이러한 시스템들을 표현하는 상호결합 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 상호결합 시스템은 기존의 시스템과는 다른 특성을 가지고 있기 때문에, 높은 차원수, 제어기의 구조적 제약, 미지의 상호결합과 같은 새로운 문제들이 나타나게 된다. 따라서 기존의 전통 제어 기법은 상호결합 시스템에 적용되기 어렵다는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해, 분산 제어 기법이 상호결합 시스템에 더욱 많이 사용된다 [1].

다양한 분산 제어 기법들 중에서 Takagi-Sugeno 퍼지 모델을 기반으로 한 분산 퍼지 제어 기법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [2-10, 13-16]. 분산 퍼지 제어 기법은 비선형 상호결합 시스템에 다양한 선형 분산 제어 기법을 용이하게 적용할 수 있다는 점에서 큰 효율성을 갖고 있다. 하지만 기존의 분산 퍼지 제어 기법들은 대부분 연속시간 상호결합 시스템에 국한된 기법들이었다 [2-7]. Zhang[8]은 이산시간 비선형 상호결합 시스템을 위한 분산 퍼지 필터링 기법을 제안하였지만, 분산 퍼지 제어 기법에 대해서는 다루지 않았다. 이산시간 상호결합 시스템을 위한 분산 퍼지 제어 기법이 연구된 바도 있지만[9,10], 관측기 기반

분산 퍼지 제어에 대한 연구는 지금까지 이뤄진 바가 없다. 뿐만 아니라, 기존의 분산 퍼지 제어 기법들은 대부분 상호결합을 정확하게 안다는 가정 하에 제안되었으며, 미지의 상호결합 문제나 최대 상호결합 범위에 대한 연구는 거의 이뤄진 바가 없다.

이에 본 논문에서는 이산시간 상호결합 퍼지 시스템을 위한 관측기 기반 분산 퍼지 제어 기법을 설계한다. 상호결합 시스템의 각 하위 시스템은 미지의 상호결합을 갖는다고 가정한다. 상호결합 시스템의 각 하위시스템을 기반으로 관측기 기반 분산 퍼지 제어를 설계하며, 이를 포함한 폐루프 시스템을 구한다. 폐루프 시스템을 기반으로 안정도를 분석하며, 폐루프 시스템의 안정도를 만족하는 미지의 최대 상호결합 범위를 충분조건의 형태로 나타낸다. 그리고 구해진 충분조건은 선형 행렬 부등식의 형태로 표현한다. 마지막으로 모의실험을 통해 제안된 분산 퍼지 제어 기법의 성능을 확인한다.

본 논문은 크게 다음과 같이 구성된다: 먼저 2장에서는 미지의 상호결합을 갖는 이산시간 상호결합 퍼지 시스템과 관측기 기반 분산 퍼지 제어를 설명한다. 3장에서는 폐루프 시스템을 기반으로 안정도를 만족하는 최대의 상호결합 범위 조건을 선형 행렬 부등식의 형태로 나타낸다. 4장에서는 모의실험을 통해 제안된 기법의 성능을 확인하며, 마지막으로 5장에서 결론을 도출한다.

2. 이산시간 상호결합 퍼지 시스템과 관측기 기반 분산 퍼지 제어기

먼저 n 개의 퍼지 하위시스템으로 구성된 이산시간 상호결합 퍼지 시스템을 고려한다. 각 하위시스템은 다음과 같은 퍼지 규칙을 따른다고 가정한다.

R_{ki} :
IF $z_{ki1}(t)$ is Γ_{ki1} and ... and $z_{kii}(t)$ is Γ_{kii} ,

$$THEN \begin{cases} x_k(t+1) = \sum_{i=1}^r \mu_{ki}(t)(A_{ki}x_k(t) + B_{ki}u_k(t) + h_k(x(t))) \\ y_k(t) = C_k x_k(t) \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $x_k \in R^{n_k}$, $u_k \in R^{m_k}$, $y_k \in R^{l_k}$ 는 각각 k 번째 하위시스템의 상태변수, 입력변수, 출력변수를 나타내고, A_{ki} , B_{ki} , C_k 는 시스템 행렬로 출력 모델은 선형이라 가정하며, $x(t) = col\{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$ 이고, $h_k(x(t))$ 는 다음의 가정을 만족하는 미지의 상호결합 함수이다.

가정 1 시스템의 상호결합을 나타내는 벡터 함수 $h_k(x(t))$ 는 다음의 이차부등식을 만족한다.

$$(h_k(x(t)))^T h_k(x(t)) \leq \alpha_k^2 x(t)^T H_k^T H_k x(t)$$

여기서, $\alpha_k > 0$ 은 상호결합 범위 상수, H_k 는 알고 있는 상수 행렬을 의미한다.

위의 퍼지 규칙 (1)을 통해 이산시간 상호결합 퍼지 시스템을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_k(t+1) &= \sum_{i=1}^r \mu_{ki}(t)(A_{ki}x_k(t) + B_{ki}u_k(t) + h_k(x(t))) \\ y_k(t) &= C_k x_k(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$$\mu_{ki}(t) = \omega_i(z_k(t)) / \sum_{i=1}^r \omega_i(z_k(t)),$$

$$\omega_i(z_k(t)) = \prod_{p=1}^q \Gamma_{kip}(z_{kp}(t))$$

이고, $\Gamma_{kip}(z_k(t))$ 는 소속 함수의 소속정도를 나타낸다.

제시된 상호결합 퍼지 시스템을 위한 관측기 기반 분산 퍼지 제어기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_k(t+1) &= \sum_{i=1}^r \mu_{ki}(t)(A_{ki}\hat{x}_k(t) + B_{ki}u_k(t) + L_{ki}\tilde{y}_k(t)) \\ \hat{y}_k(t) &= C_k \hat{x}_k(t) \\ u_k(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_{ki}(t)K_{ki}\hat{x}_k(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\tilde{y}_k(t) = y_k(t) - \hat{y}_k(t)$, $\hat{x}_k(t)$ 와 $\hat{y}_k(t)$ 는 추정된 상태 변수 및 출력변수, K_{ki} 와 L_{ki} 는 각각 제어 이득 행렬과 관측 이득 행렬이다. 추정오차를 $e_k(t) = x_k(t) - \hat{x}_k(t)$ 으로 정의하고, (2)과 (3)를 이용하면 다음의 폐루프 시스템을 얻을 수 있다.

$$\chi_k(t+1) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_{ki}(t)\mu_{kj}(t)(\Phi_{kij}\chi_k(t) + H_k(x(t))) \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} \chi_k(t) &= [x_k(t)^T \ e_k(t)^T]^T, \\ \Phi_{kij} &= \begin{bmatrix} A_{ki} + B_{ki}K_{kj} & -B_{ki}K_{kj} \\ 0 & A_{ki} - L_{ki}C_k \end{bmatrix}, \\ H_k(x(t)) &= \begin{bmatrix} h_k(x(t)) \\ h_k(x(t)) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

본 논문의 목적은 폐루프 시스템 (4)에 대한 안정도 조건을 도출하고, 안정도 조건으로부터 최대의 상호결합 범위를 구한다.

3. 페루프 시스템의 안정도 조건

본 장에서는 앞에서 구한 페루프 시스템 (4)에 대한 안정도 조건을 구한다. 이를 위해서는 다음과 같은 보조정리가 필요 하다.

보조정리 1 [11] 어떤 상수 $\epsilon > 0$ 와 적절한 차원을 갖는 어떤 행렬 X 와 Y 가 존재할 때, 다음 부등식이 항상 성립한다:

$$X^T Y + Y^T X \leq \epsilon X^T X + \frac{1}{\epsilon} Y^T Y$$

보조정리 2 [12] 적절한 크기를 갖는 임의의 실수 행렬 Y 와 $P = P^T > 0$ 에 대해, 다음 부등식이 항상 성립한다.

$$-Y^T P^{-1} Y \leq P - Y^T - Y$$

위의 보조정리를 이용하면 다음과 같은 정리를 얻을 수 있다.

정리 1 만약 다음의 제약조건을 갖는 선형 행렬 부등식들을 만족하는 상수 τ_k 와 행렬 $Q_k = Q_k^T > 0$, X_k , M_{ki} , N_{ki} , F_k 가 존재하면, 관측기 기반 분산 퍼지 제어기 갖는 이산시간 상호결합 퍼지 시스템 (4)은 점근적으로 안정하게 되고, 이때, 상호결합 최대 범위는 $\alpha_k = \tau_k^{-1/2}$ 이다.

min τ_l subject to

$$\Theta_{kii} < 0, \quad (k, l, i) \in I_n \times I_n \times I_r \quad (5)$$

$$\Theta_{kij} + \Theta_{kji} < 0, \quad (k, l, i, j) \in I_n \times I_n \times I_r \times I_s \quad (6)$$

$$C_k Q_k = F_k C_k \quad (7)$$

여기서,

$$\Theta_{kij} = \begin{bmatrix} nQ_k - \tilde{X}^T - \tilde{X} & * & * & * \\ \Psi_{kij} & -nQ_k & * & * \\ \Psi_{kij} & 0 & n^{-1}I - 2Q_k & * \\ H_{lk} & 0 & 0 & -\frac{1}{4}\tau_l I \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{kij} = \begin{bmatrix} A_{ki} X_k + B_{ki} M_{kj} & -B_{ki} M_{kj} \\ 0 & A_{ki} X_k - N_{ki} C_k \end{bmatrix},$$

$$\tilde{X}_k = \text{diag}\{X_k, X_k\}$$

이고, $I_r \times I_s$ 는 $1 \leq i < j \leq r$ 을 만족하는 $I_r \times I_r$ 를 의미한다. 또한, H_{lk} 는 H_l 의 $\delta_k = n_1 + n_2 + \dots + n_{k-1} + 1$ 번째 열 시작하는 n_k 열을 갖는 행렬이다. 또한, *는 행렬에서의 전치요소를 의미한다.

증명: 먼저 페루프 시스템 (4)을 기반으로, 다음과 같은 Lyapunov 함수를 고려한다.

$$V(\chi(t)) = \sum_{k=1}^n V_k(\chi_k(t)) = \sum_{k=1}^n \chi_k(t)^T P_k \chi_k(t)$$

여기서, P_k 는 양한정 행렬이고, 따라서 Lyapunov 함수는 항상 양의 값을 갖는다. 또한, Lyapunov 함수의 변화율을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V(\chi(t)) &= \sum_{k=1}^n (\chi_k(t+1)^T P_k \chi_k(t+1) - \chi_k(t)^T P_k \chi_k(t)) \\ &= \sum_{k=1}^n ((\Phi_k(t) \chi_k(t) + H_k(x(t)))^T P_k (\Phi_k(t) \chi_k(t) + H_k(x(t))) \\ &\quad - \chi_k(t)^T P_k \chi_k(t)) \\ &= \sum_{k=1}^n (\chi_k(t)^T (\Phi_k(t)^T P_k \Phi_k(t) - P_k) \chi_k(t)) \\ &\quad + \sum_{k=1}^n (\chi_k(t)^T \Phi_k(t)^T P_k H_k(x(t)) + H_k(x(t))^T P_k \Phi_k(t) \chi_k(t)) \\ &\quad + \sum_{k=1}^n H_k(x(t))^T H_k(x(t)) \end{aligned}$$

여기서,

$$\Phi_k(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_{ki}(t) \mu_{kj}(t) \Phi_{kij}.$$

보조 정리 1과 가정 1을 이용하면, 위의 Lyapunov 함수의 변화율은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta V(\chi(t)) &\leq \sum_{k=1}^n (\chi_k(t)^T (\Phi_k(t)^T P_k \Phi_k(t) + \Phi_k(t)^T P_k^2 \Phi_k(t) - P_k) \chi_k(t)) \\ &\quad + \sum_{k=1}^n 2H_k(x(t))^T H_k(x(t)) \\ &\leq \sum_{k=1}^n (\chi_k(t)^T (\Phi_k(t)^T P_k \Phi_k(t) + \Phi_k(t)^T P_k^2 \Phi_k(t) - P_k) \chi_k(t)) \\ &\quad + \sum_{k=1}^n 4\alpha_k^2 x(t)^T H_k^T H_k x(t). \end{aligned}$$

다음의 식

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 x(t)^T H_k^T H_k x(t) &= \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 \sum_{l=1}^n x_l(t)^T H_{kl}^T H_{kl} x_l(t) \\ &= \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \alpha_l^2 x_k(t)^T H_{lk}^T H_{lk} x_k(t) \end{aligned}$$

을 위의 Lyapunov 함수의 변화율에 대입하면 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \Delta V(\chi(t)) \\
 & \leq \sum_{k=1}^n (\chi_k(t)^T (\Phi_k(t)^T P_k \Phi_k(t) + \Phi_k(t)^T P_k^2 \Phi_k(t) - P_k) \chi_k(t)) \\
 & \quad + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n 4\alpha_l^2 x_k(t)^T H_{lk}^T H_{lk} x_k(t) \\
 & = \sum_{k=1}^n \chi_k(t)^T (\Phi_k(t)^T P_k \Phi_k(t) + \Phi_k(t)^T P_k^2 \Phi_k(t) - P_k \\
 & \quad + \sum_{l=1}^n 4\alpha_l^2 \tilde{H}_{lk}^T \tilde{H}_{lk}) \chi_k(t) \\
 & = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \chi_k(t)^T (\Phi_k(t)^T \frac{1}{n} P_k \Phi_k(t) + \Phi_k(t)^T \frac{1}{n} P_k^2 \Phi_k(t) \\
 & \quad - \frac{1}{n} P_k + 4\alpha_l^2 \tilde{H}_{lk}^T \tilde{H}_{lk}) \chi_k(t)
 \end{aligned}$$

여기서 $\tilde{H}_{lk} = [H_{lk} \ 0]$. 위의 식을 통해, 우리는 다음의 부등식이 성립하면 Lyapunov 함수의 변화율이 항상 음수를 갖는다는 것을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \Phi_k(t)^T \frac{1}{n} P_k \Phi_k(t) + \Phi_k(t)^T \frac{1}{n} P_k^2 \Phi_k(t) \\
 & - \frac{1}{n} P_k + 4\alpha_l^2 \tilde{H}_{lk}^T \tilde{H}_{lk} < 0. \tag{8}
 \end{aligned}$$

부등식 (8)에 슈어 여수(Schur complement)를 적용하고, $\text{diag}\{X_k, X_k, I, I, I, I\}$ 으로 합동변환(congruence transformation)을 치하며, 보조 정리 2를 적용하면 다음과 같은 부등식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} nQ_k - \tilde{X}_k^T - \tilde{X}_k & * & * & * \\ \Phi_k(t)\tilde{X}_k & -nQ_k & * & * \\ \Phi_k(t)\tilde{X}_k & 0 & n^{-1}I - 2Q_k & * \\ \tilde{H}_{lk}\tilde{X}_k & 0 & 0 & -\frac{1}{4\alpha_l^2}I \end{bmatrix} < 0. \tag{9}$$

마지막으로 방정식 (7)를 부등식 (9)에 대입해주면, 다음의 부등식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \mu_{ki}(t) \mu_{kj}(t) \theta_{klij} \\
 & = \sum_{i=1}^r \mu_{ki}(t)^2 \theta_{kiii} + \sum_{i < j}^r \mu_{ki}(t) \mu_{kj}(t) (\theta_{klij} + \theta_{klji}) < 0
 \end{aligned}$$

따라서 부등식 (5), (6)와 방정식 (7)가 성립하는 최소의 τ_k 값을 구하면, 페루프 시스템 (4)은 최대 상호결합 범위 $\alpha_k = \tau_k^{-1/2}$ 에 대해 항상 점근적으로 안정화하게 된다.

참조 1 제어 이득 행렬 K_{ki} 과 관측 이득 행렬 L_{ki} 는 다음의 통해 구할 수 있다.

$$K_{ki} = M_{ki} X_k^{-1}, \quad L_{ki} = N_{ki} F_k^{-1}$$

참조 2 제약조건 $C_k Q_k = F_k C_k$ 는 다음의 선형 행렬 부등식으로 치환할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -\epsilon_k I & * \\ C_k Q_k - F_k C_k & -\epsilon_k I \end{bmatrix} < 0$$

여기서, $\epsilon_k \cong 0 > 0$ 은 매우 작은 상수이다.

4. 모의실험

논문에 대한 내용을 검증하기 위해 두 개의 하위시스템을 갖는 이산시간 상호결합 퍼지 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned}
 x_k(t+1) &= \sum_{i=1}^2 \mu_{ki}(t) (A_{ki} x_k(t) + B_{ki} u_k(t) + h_k(x(t))) \\
 y_k(t) &= C_k x_k(t)
 \end{aligned}$$

여기서, $x_k(t) = [x_{k1}(t) \ x_{k2}(t)]^T$ 이고, 시스템 행렬은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= \begin{bmatrix} 1.2 & 0 \\ 0.1 & 0.4 \end{bmatrix}, \quad A_{12} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.1 & 0.6 \end{bmatrix}, \quad A_{21} = \begin{bmatrix} 1.1 & 0.1 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \\
 A_{22} &= \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 \end{bmatrix}, \quad B_{11} = B_{12} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_{21} = B_{22} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \\
 H_1 &= \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}, \quad H_2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}, \\
 C_1 &= C_2 = [1 \ 0],
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mu_{11}(t) &= \exp(-2x_{11}(t)^2), & \mu_{12}(t) &= 1 - \mu_{11}(t), \\
 \mu_{21}(t) &= 1/(1 + \exp(-x_{21}(t))), & \mu_{22}(t) &= 1 - \mu_{21}(t).
 \end{aligned}$$

정리 1의 선형 행렬 부등식을 통해 다음과 같은 이득 행렬을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= [-1.0103 \quad -0.0519], \quad K_{12} = [-0.8004 \quad -0.2687], \\
 K_{21} &= [-0.7209 \quad -0.0816], \quad K_{22} = [-0.5586 \quad -0.0908], \\
 L_{11} &= \begin{bmatrix} 0.6026 \\ 0.0948 \end{bmatrix}, \quad L_{12} = \begin{bmatrix} 0.4196 \\ 0.2086 \end{bmatrix}, \\
 L_{21} &= \begin{bmatrix} 0.5614 \\ 0.2180 \end{bmatrix}, \quad L_{22} = \begin{bmatrix} 0.4165 \\ 0.2078 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

또한, 최대 상호결합 범위는 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.4684$ 가 된다. 즉, 만약 α_k 이 0.4684보다 작은 값을 가진다면, 위의 관측기 분산

퍼지 제어를 포함한 폐루프 시스템은 언제나 점근적으로 안정하다는 뜻이 된다. 시스템의 상태변수 및 관측오차 초기값을 $x_1(0) = e_1(0) = [1 \ 1]^T$, $x_2(0) = e_2(0) = [1 \ -1]^T$ 로 가정하고 시뮬레이션을 하면 그림 1, 2와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 모든 상태변수 및 관측오차가 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있으며, 따라서 우리는 제안한 관측기 기반 분산 퍼지 제어기의 성능을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 이산시간 상호결합 퍼지 시스템을 위한 관측기 기반 분산 퍼지 제어를 개발하였다. 퍼지 하위시스템과 분산 퍼지 제어를 통해 폐루프 시스템을 구하고, 안정도 조건과 최대 상호결합 범위를 구하는 충분조건을 구하였다. 또한, 구해진 충분조건을 선형 행렬 부등식으로 나타내었다. 마지막으로 모의실험을 통해 개발된 제어기 설계 기법의 성능을 입증하였다.

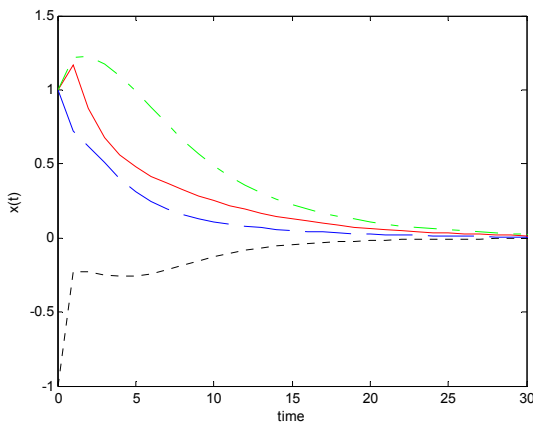


그림 1. 상호결합 퍼지 시스템의 상태변수 $x(t)$.

Fig. 1. State variable $x(t)$ of the interconnected fuzzy system.

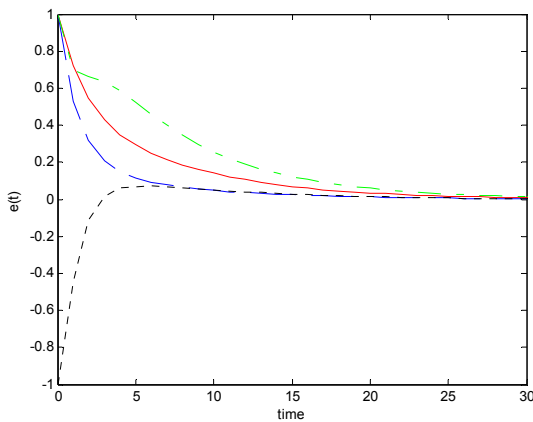


그림 2. 상호결합 퍼지 시스템의 추정오차 $e(t)$.

Fig. 2. Estimation error $e(t)$ of the interconnected fuzzy system.

References

- [1] L. Bakule, "Decentralized control: An overview," *Annual Reviews in Control*, vol. 32, pp. 87-98, 2008.
- [2] C. S. Tseng and B. S. Chen, " H_∞ decentralized fuzzy model reference tracking control design for nonlinear interconnected systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 9, no. 6, pp. 795-809, 2001.
- [3] F. H. Hsiao, C. W. Chen, Y. W. Liang, S.D. Xu, and W. L. Chiang, "T-S fuzzy controllers for nonlinear interconnected systems with multiple time delays," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, vol. 52, no. 9, pp. 1883-1893, 2005.
- [4] R. J. Wang, "Nonlinear decentralized state feedback controller for uncertain fuzzy time-delay interconnected systems," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 151, pp. 194-204, 2005.
- [5] C. S. Tseng, "A novel approach to H_∞ decentralized fuzzy-observer-based fuzzy control design for nonlinear interconnected systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 16, no. 5, pp. 1337-1350, 2008.
- [6] S. Tong, P. Shi, and H. Al-Madfai, "Robust fuzzy decentralized control for nonlinear large-scale systems with parametric uncertainties," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 19, pp. 85-101, 2008.
- [7] G. B. Koo, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Decentralized fuzzy observer-based output feedback control for nonlinear large-scale systems: An LMI approach," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 406-419, 2014.
- [8] H. Zhang, H. Zhong, and C. Dang, "Delay-dependent decentralized H_∞ filtering for discrete-time nonlinear interconnected systems with time-varying delay based on the T-S fuzzy model," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 431-443, 2012.
- [9] H. Mukaidani, M. Kimoto, and T. Yamamoto, "Decentralized guaranteed cost control for discrete-time uncertain large-scale systems using fuzzy control," *Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp. 3099-3105, 2006.
- [10] G. B. Koo, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Observer-based decentralized fuzzy controller for discrete-time large-scale fuzzy systems with packet losses," *Proceedings of 12th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 87-90, 2012.
- [11] I. R. Petersen, "A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems," *Systems and Control Letters*, vol. 8, pp. 351-357, 1987.
- [12] J. V. D. Oliveira, J. Bernussou, and J. C. Geromel,

"A new discrete-time robust stability condition," *Systems and Control Letters*, vol. 37, pp. 261-265, 1999.

[13] G. B. Koo, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Intelligent digital redesign for nonlinear systems using a guaranteed cost control method," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 11, no. 6, pp. 1075-1083, 2013.

[14] D. H. Lee, M. H. Tak, and Y. H. Joo, "A Lyapunov functional approach to robust stability analysis of continuous-time uncertain linear systems in polytopic domains," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 460-469, 2013.

[15] D. H. Lee and Y. H. Joo, "On the generalized local stability and local stabilization conditions for discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 22, no. 6, pp. 1654-1668, 2014.

[16] G. B. Koo, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Decentralized fuzzy observer-based output- feedback control for nonlinear large-scale systems: An LMI Approach," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 406-419, 2014

저 자 소 개



구근범(Geun Bum Koo)

2007년 : 연세대학교 전기전자공학과 졸업.
2007년~현재 : 동 대학원 전기전자공학과 석박사통합과정

관심분야 : Fuzzy, Decentralized control, Digital redesign
Phone : +82-2-2123-2773
E-mail : milbam@yonsei.ac.kr



박진배(Jin Bae Park)

1977년 : 연세대학교 전기공학과 졸업
1985~1990년 : Kansas State University
전기 및 컴퓨터 공학과 졸업 (공학박사)
1990~1991년 : Kansas State University
전기 및 컴퓨터 공학과 조교수

2006~2010년 : Int. Journal of Control, Robot. and Systems, Editor-in-Chief
2013년 : 제어로봇시스템학회 회장
2014~현재 : 연세대학교 부총장
1992~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수

관심분야 : Robust control and filtering, Nonlinear control, Intelligent mobile robot, Drone, Fuzzy logic control, Neural networks, Adaptive dynamic programming, Chaos theory, Genetic algorithms

Phone : +82-2-2123-2773

E-mail : jbpark@yonsei.ac.kr



주영훈(Young Hoon Joo)

1982년, 1984년, 1995년 : 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학사, 공학석사, 공학박사)
1986~1995년 : 삼성전자 (주) 생산기술센터 팀장

1995년~현재 : 군산대학교 제어로봇공학과 정교수
1998~1999년 : 미국 휴스턴대학 박사후과정
2009년 : 한국지능시스템학회 회장
2013~2014년 : 대한전기학회 부회장
2014~현재 : Int. Journal of Control, Robot. and Systems, Editor-in-Chief

관심분야 : Intelligent robot, Robot vision, Intelligent control, Human-robot interaction, Wind-farm control, Intelligent surveillance systems

Phone : +82-63-469-4706

E-mail : yhjoo@kunsan.ac.kr