



이산시간 비선형 상호결합 시스템을 위한 지능형 분산 관측기 설계

Intelligent Decentralized Observer Design for Discrete-Time Nonlinear Interconnected Systems

구근범[†]
Geun Bum Koo[†]

공주대학교 전기전자제어공학부
Division of Electrical, Electronic and Control Engineering, Kongju National University

요약

본 논문은 이산시간 비선형 상호결합 시스템에 대한 지능형 분산 관측기 설계 기법을 제안한다. 여기서, 비선형 상호결합 시스템은 미지의 상호결합을 갖는다고 가정한다. 설계하는 지능형 분산 관측기 설계를 위한 문제를 설정하고, 문제를 해결할 수 있도록, 성능함수를 정의한다. 정의된 성능함수를 기반으로, 지능형 분산 관측기 설계 문제를 해결할 수 있는 충분조건을 구하고, 이를 선형 행렬 부등식의 형태로 나타낸다. 마지막으로 모의실험을 통해 제안된 지능형 분산 관측기 기법의 성능을 확인한다.

키워드 : 이산시간 비선형 상호결합 시스템, 지능형 분산 관측기, 미지의 상호결합, 선형 행렬 부등식.

Abstract

In this paper, the decentralized fuzzy observer design technique is presented for discrete-time nonlinear interconnected systems, which are assumed to be with unknown interconnections. To design the decentralized fuzzy observer, the design problem is considered and the performance function is defined to solve the design problem. Based on the performance function, the sufficient condition is derived for the observer design, and its condition is formulated into linear matrix inequalities. Finally, by the simulation result, the validity of the proposed observer design technique is shown.

Key Words : Discrete-Time Nonlinear Interconnected Systems, Decentralized Fuzzy Observer, Unknown Interconnections, Linear Matrix Inequality

Received: Nov. 24, 2016
Revised: Dec. 23, 2016
Accepted: Dec. 23, 2016
[†]Corresponding authors
gbkoo@kongju.ac.kr

1. 서론

관측기 설계는 제어 분야에서 가장 중요한 이슈 중에 하나이다[1-3]. 이러한 관측기 설계에 대한 연구는 관측기 설계에 대한 순수 연구뿐만 아니라, 관측기 기반 제어[4,5], 관측기 기반 필터 설계 [6,7], 고장 진단[8,9] 등으로 확장되어 꾸준히 연구되고 있다. 이러한 기존의 관측기 설계 연구들은 모두 관측 오차를 영으로 수렴시키거나, 노이즈에 대해 최소가 되도록 하는 연구들이 대부분이었다. 그리고 앞의 두 개의 목적을 위해서는 관측기 설계를 위해 기본적으로 시스템을 정확하게 알고 있거나, 혹은 시스템이 점근적 안정도를 만족해야 하는 경우에 대한 것이 대부분이었다.

하지만 최근 각광받고 있는 상호결합 시스템의 경우에는 이러한 조건을 만족하는 것이 어렵다. 상호결합 시스템이란 몇 개의 하위 시스템이 서로 영향을 주고받는 시스템을 말하며, 따라서, 상호결합 시스템은 그 특성에 의해, 기존의 전통적인 시스템과 다른 높은 차원 수, 제어기의 구조적 제약, 미지의 상호결합과 같은 새로운 문제들이 발생한다[10-14]. 또한, 앞서서 언급한 관측기 설계에서도 여러 개의 하위 시스템이 묶여 있으므로, 시스템의 정보를 완벽하게 파악하는 것이 거의 불가능하며, 전체 시스템에 대한 안정도를 보장하는 것 역시 어렵다. 따라서 상호결합 시스템을 위한 관측기 설계는 기존의 연구방법과는 다른 방식에서의 접근이 필요하다.

이에 본 논문에서는 이산시간 비선형 상호결합 시스템에 대한 지능형 분산 관측기 설계 기법을

이 논문은 2016년 공주대학교 학술연구지원 사업의 연구지원에 의하여 연구되었음.
This work was supported by the research grant of the Kongju National University in 2016.
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.

제안한다. 여기서, 비선형 상호결합 시스템은 미지의 상호결합을 갖는 퍼지 시스템 [15]으로 표현될 수 있다고 가정한다. 지능형 관측기 설계 문제를 해결할 수 있도록, 성능함수를 정의한다. 정의된 성능함수를 기반으로, 분산 관측기 설계 문제를 해결할 수 있는 충분조건을 구한다. 그리고 구해진 충분조건은 최적화 문제를 포함하는 선형 행렬 부등식의 형태로 나타낸다. 마지막으로 모의실험을 통해 제안된 분산 관측기법의 성능을 확인한다.

본 논문은 크게 다음과 같이 구성된다: 먼저 2장에서는 미지의 상호결합을 갖는 이산시간 상호결합 퍼지 시스템을 설명하고, 분산 퍼지 관측기를 제시하고, 관측기 설계 문제를 고려한다. 3장에서는 관측기 설계 문제를 해결하는 충분조건을 구하고 이를 선형 행렬 부등식의 형태로 나타낸다. 4장에서는 모의실험을 통해 제안된 기법의 성능을 확인하며, 마지막으로 5장에서 결론을 도출한다.

2. 관측기 설계 문제 설정

다음과 같은 n 개의 하위 시스템을 갖는 이산시간 퍼지 상호결합 시스템을 고려한다. 각 하위시스템은 다음과 같은 퍼지 규칙을 따른다고 가정한다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Rule } R_{ki} : \\
 & \text{IF } z_{k1}(t) \text{ is } \Gamma_{ki1} \text{ and } \dots \text{ and } z_{kn}(t) \text{ is } \Gamma_{kin}, \\
 & \text{THEN } \begin{cases} x_k(t+1) = A_{ki}x_k(t) + h_k(x(t)) \\ y_k(t) = C_kx_k(t) \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서, $x_k \in R^{n_k}$ 와 $y_k \in R^{l_k}$ 는 각각 k 번째 하위 시스템의 상태변수와 출력변수를 나타내며, 행렬 A_k 와 C_k 는 적절한 크기를 가지는 선형 행렬이고, 출력 시스템은 선형이라 가정한다. 그리고 $x(t) = \text{col}\{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$ 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)은 다음과 같은 상호결합 퍼지 시스템을 나타낼 수 있다.

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

여기서, r 은 퍼지 규칙수를 나타내며, $\mu_{ki}(z_k(t))$ 는 다음과 같다.

$$\mu_{ki}(t) = \left(\prod_{m=1}^p \Gamma_{im}^k(z_{km}(t)) \right) / \left(\sum_{i=1}^r \left(\prod_{m=1}^p \Gamma_{im}^k(z_{km}(t)) \right) \right)$$

이고, $\Gamma_{im}^k(z_{km}(t))$ 는 소속 함수의 소속 정도를 나타낸다.

제시된 상호결합 시스템을 위한 분산 관측기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, $\hat{x}_k(t)$ 와 $\hat{y}_k(t)$ 는 추정된 상태 변수 및 출력변수이고, L_{ki} 는 관측 이득 행렬이다.

관측기 설계를 위해 추정오차를 $e_k(t) = x_k(t) - \hat{x}_k(t)$ 으로 정의하고, (2)과 (3)를 추정오차에 대입하면 다음의 오차식을 얻을 수 있다.

$$e_k(t+1) = \Phi_k(t) e_k(t) + h_k(x(t)) \quad (4)$$

여기서,

$$\Phi_k(t) = \sum_{i=1}^r \mu_{ki}(z_k(t)) (A_{ki} - L_{ki} C_k)$$

이다. 본 논문의 목적은 다음과 같다.

문제 1 오차식 (4)을 통해 다음의 조건을 만족하는 관측 이득 행렬 L_k 을 구하하라:

- 1) $h_k(x(t)) = 0$ 일 때, 오차식 (3)은 점근적으로 안정해야 한다.
- 2) $\|e_k(t)\| \leq \gamma \|x(t)\|$ 를 만족하는 감쇠도상수 $\gamma \geq 0$ 이 존재해야 한다.
- 3) γ/α_k 가 최소가 되어야 한다.

참조 1 문제 1에서 감쇠도상수 γ 는 노이즈와 오차에 관한 상수가 아니라 노이즈와 상태변수에 관련된 상수이다. 즉, 시스템이 안정하지 않더라도 감쇠도상수를 통해 관측성능을 어느정도 보장할 수 있게 된다.

3. 지능형 분산 관측기 설계

앞에서 제시한 분산 퍼지 관측기 설계 문제를 해결하는 충분조건을 구하기 위해서는 먼저 다음과 같은 정의와 보조정리가 필요하다.

정의 1 [16] 만약 다음의 성능 함수

$$J = \sum_{t=0}^{\infty} \left(e(t)^T e(t) - \frac{\gamma^2}{n} x(t)^T x(t) \right) \quad (5)$$

에 대해 $J \leq 0$ 을 만족하는 관측기 이득 행렬 L_{ki} 이 존재하면, 우리는 감쇠도상수 γ 이 존재하고, 분산 관측기는 $\|e_k(t)\| \leq \gamma \|x(t)\|$ 을 만족하며, 이때, 성능 함수 J 를 관측성능 보장함수라고 한다.

보조정리 1 [17] 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 [18] 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 정의와 보조정리를 이용하면 다음과 같은 분산 관측기 설계 기법에 대한 정리를 얻을 수 있다.

정리 1 만약 다음의 선형 행렬 부등식들을 만족하는 상수 δ_k, β_k 와 행렬 $P_k = P_k^T > 0, N_{ki}$ 가 존재하면, 오차식 (4)은 $h_k(x(t)) = 0$ 일 때, 점근적으로 안정하게 되고, 관측성능 보장함수는 $J \leq 0$ 를 만족하며, 이때, 최소가 되는 γ/α_k 은 $\sqrt{\delta_k}$ 이다.

$$\begin{aligned} & \min \delta_k \quad \text{subject to} \\ & \begin{bmatrix} -P_k + I & * & * \\ P_k A_{ki} - N_{ki} C_k & -P_k & * \\ P_k A_{ki} - N_{ki} C_k & 0 & -\left(\frac{1}{n\lambda_{H_k}} \delta_k - \beta_k\right) I \end{bmatrix} < 0, \quad (6) \\ & P_k - \beta_k I < 0 \quad (7) \end{aligned}$$

여기서, λ_{H_k} 는 행렬 H_k 의 최대 고유치이며, * 는 행렬에서의 전치요소를 의미한다.

증명 : 먼저 오차식 (4)와 그를 기반으로 한 Lyapunov 함수 $V(e(t)) = \sum_{k=1}^n e_k(t)^T P_k e_k(t)$ 를 이용하여 다음의 부등식을 고려한다.

$$\begin{aligned} & V(e(t+1)) - V(e(t)) + \sum_{k=1}^n \left(e_k(t)^T e_k(t) - \frac{\gamma^2}{n} x(t)^T x(t) \right) \\ & = \sum_{k=1}^n \left(\Phi_k(t) e_k(t) + h_k(x(t)) \right)^T P_k \left(\Phi_k(t) e_k(t) + h_k(x(t)) \right) \\ & \quad - \sum_{k=1}^n e_k(t)^T P_k e_k(t) + \sum_{k=1}^n \left(e_k(t)^T e_k(t) - \frac{\gamma^2}{n} x(t)^T x(t) \right) \\ & < 0 \quad (8) \end{aligned}$$

여기서, P_k 는 양한정 행렬이다.

이때, 임의의 상수값 $\sigma_k > 0$ 에 대해서, 다음의 식이 성립하므로

$$\begin{aligned} & \Phi_k(t)^T P_k h_k(x(t)) + h_k(x(t))^T P_k \Phi_k(t) \\ & \leq \sigma_k \Phi_k(t)^T P_k^2 \Phi_k(t) + \sigma_k^{-1} h_k(x(t))^T h_k(x(t)) \quad (9) \end{aligned}$$

식 (9)를 위의 식 (8)에 적용하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & V(e(t+1)) - V(e(t)) + \sum_{k=1}^n \left(e_k(t)^T e_k(t) - \frac{\gamma^2}{n} x(t)^T x(t) \right) \\ & \leq \sum_{k=1}^n e_k(t)^T \left(\Phi_k(t)^T \tilde{P}_k \Phi_k(t) - P_k + I \right) e_k(t) \\ & \quad - \sum_{k=1}^n \left(h_k(t)^T (\sigma_k^{-1} I + P_k) h_k(t) - \frac{\gamma^2}{n} x(t)^T x(t) \right) \end{aligned}$$

여기서, $\tilde{P}_k = P_k + \sigma_k P_k^2$ 이다. 또한, 만약 $P_k < \beta_k I$ 를 만족하는 상수 β_k 가 존재한다면, 가정 1에 의해서, 다음의 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} & V(e(t+1)) - V(e(t)) + \sum_{k=1}^n \left(e_k(t)^T e_k(t) - \frac{\gamma^2}{n} x(t)^T x(t) \right) \\ & \leq \sum_{k=1}^n e_k(t)^T \left(\Phi_k(t)^T \tilde{P}_k \Phi_k(t) - P_k + I \right) e_k(t) \\ & \quad - \sum_{k=1}^n \left((\sigma_k^{-1} + \beta_k) \alpha_k^2 x(t)^T H_k^T H_k x(t) - \frac{\gamma^2}{n} x(t)^T x(t) \right) \end{aligned}$$

즉, 만약 다음의 조건들이 충족되면 부등식 (8)은 언제나 만족하게 된다.

$$\Phi_k(t)^T \tilde{P}_k \Phi_k(t) - P_k + I < 0 \quad (10)$$

$$(\sigma_k^{-1} + \beta_k) \alpha_k^2 \lambda_{H_k} - \frac{\gamma^2}{n} = 0 \quad (11)$$

부등식 (10)에 슈어 여수(Schur complement)를 적용하면, 다음의 부등식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -P_k + I & * & * \\ P_k \Phi_k & -P_k & * \\ P_k \Phi_k & 0 & -\sigma_k^{-1} I \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

또한, 부등식 (12)에 (11)을 대입하고, $P_k L_{ki} = N_{ki} \gamma^2 / \alpha_k^2 = \delta_k$ 를 치환하면, 선형 행렬 부등식 (6)을 얻을 수 있다. 즉, 만약 선형 행렬 부등식 (6)가 만족한다면, 부등식 (8)이 만족됨을 알 수 있다.

$$V(e(t+1)) - V(e(t)) + \sum_{k=1}^n \left(e_k(t)^T e_k(t) - \frac{\gamma^2}{n} x(t)^T x(t) \right) < 0 \quad (13)$$

그리고 위의 식을 $t=0$ 부터 ∞ 까지 더해지면 성능 함수 (5)에 대해 $J < 0$ 를 만족하게 된다. 또한, 선형 행렬 부등식 (6)가 만족하면 $h_k(x(t)) = 0$ 일 때, 오차식 (4)는 점근적으로 안정하게 된다.

참조 2 관측 이득 행렬 L_{ki} 는 $L_{ki} = P_k^{-1} N_{ki}$ 을 통해 구할 수 있다.

참조 3 본 논문에서 제안한 지능형 분산 관측기는 시스템의 상태변수가 수렴하지 않더라도 적용이 가능하다. 또한 본 논문에서 제안한 관측기 설계 기법은 관측기 기반 제어기나 필터 기법에 적용하여 새로운 기법들을 개발할 수 있다.

4. 모의실험

4.1. 첫 번째 모의실험

다음과 같은 두 개의 하위시스템을 갖는 이산시간 퍼지 상호결합 시스템을 고려한다.

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

여기서, $x_k(t) = [x_{k1}(t) \ x_{k2}(t)]^T$ 이고, 여기서, $h_k(z(t))$ 는 미지의 상호결합 함수이며, $h_k(z(t))$ 는 미지의 상수값 $\alpha_k \geq 0$ 를 이용하여 $\alpha_k H_k x(t)$ 로 표현할 수 있다고 가정한다. 그리고 시스템 행렬은 각각 다음과 같다.

● 첫 번째 하위 시스템

$$\begin{aligned} A_{11} &= \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ -0.1 & 0.9 \end{bmatrix}, A_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ -0.1 & 0.8 \end{bmatrix}, \\ H_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, C_1 = [0 \ 1], \\ \mu_{11}(x_1(t)) &= \exp(-2x_{11}(t)^2), \\ \mu_{12}(x_1(t)) &= 1 - \mu_{11}(x_1(t)) \end{aligned}$$

● 두 번째 하위 시스템

$$\begin{aligned} A_{21} &= \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ -0.1 & 0.85 \end{bmatrix}, A_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ -0.1 & 0.75 \end{bmatrix}, \\ H_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, C_2 = [0 \ 1], \\ \mu_{21}(x_2(t)) &= \exp(-x_{21}(t)^2), \\ \mu_{22}(x_2(t)) &= 1 - \mu_{21}(x_2(t)). \end{aligned}$$

정리 1을 통해 관측 이득 행렬을 얻을 수 있다.

● 첫 번째 하위 시스템

$$L_{11} = \begin{bmatrix} -2.6408 \\ 1.1742 \end{bmatrix}, L_{12} = \begin{bmatrix} -2.6408 \\ 1.0742 \end{bmatrix},$$

● 두 번째 하위 시스템

$$L_{21} = \begin{bmatrix} -2.6407 \\ 1.1241 \end{bmatrix}, L_{22} = \begin{bmatrix} -2.6407 \\ 1.0241 \end{bmatrix}.$$

위의 관측 이득 행렬을 이용해 지능형 분산 관측기를 설계하면, 최대 상호결합 범위 $\alpha_k = 1$ 에 대해, 그림 1, 2와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림을 통해 볼 수 있듯이, 설계한 분산 관측기가 적절하게 각 하위 시스템의 상태변수를 추정한다는 것을 알 수 있다. 이는 그림 3, 4에 제시된 각 하위 시스템들의 추정 오차를 통해 확인할 수 있으며, 정리 1을 통해 구한 최대 추정 오차 4.968보다 작다는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 제안된 분산 관측기 설계 기법의 성능을 확인할 수 있다.

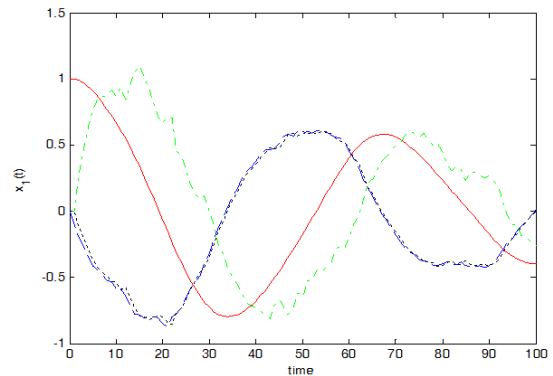


그림 1. 첫 번째 하위 시스템의 상태변수와 추정 상태변수: $x_{11}(t)$ (실선),

$x_{12}(t)$ (파선), $\hat{x}_{11}(t)$ (쇄선), $\hat{x}_{12}(t)$ (점선)

Fig. 1. State-variables and estimated state-variables of the first subsystem: $x_{11}(t)$ (solid), $x_{12}(t)$ (dashed), $\hat{x}_{11}(t)$ (dash-dotted), $\hat{x}_{12}(t)$ (dotted)

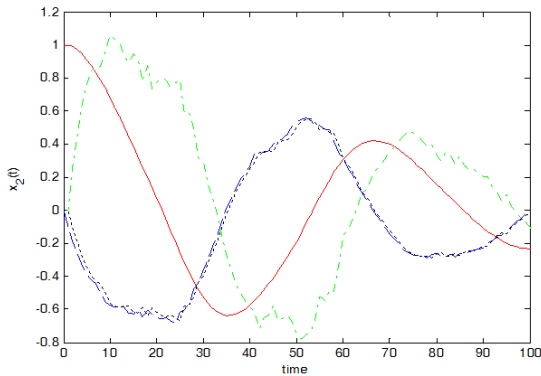


그림 2. 두 번째 하위 시스템의 상태변수와 추정 상태변수: $x_{21}(t)$ (실선), $x_{22}(t)$ (파선), $\hat{x}_{21}(t)$ (쇄선), $\hat{x}_{22}(t)$ (점선)
 Fig. 2. State-variables and estimated state-variables of the second subsystem: $x_{21}(t)$ (solid), $x_{22}(t)$ (dashed), $\hat{x}_{21}(t)$ (dash-dotted), $\hat{x}_{22}(t)$ (dotted)

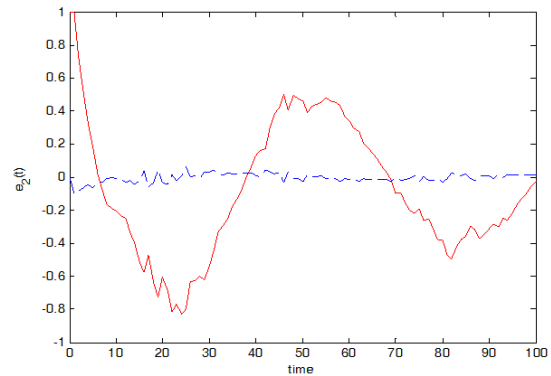


그림 4. 두 번째 하위 시스템의 추정 오차: $e_{21}(t)$ (실선), $e_{22}(t)$ (파선)
 Fig. 4. estimated errors of the second subsystem: $e_{21}(t)$ (solid), $e_{22}(t)$ (dashed)

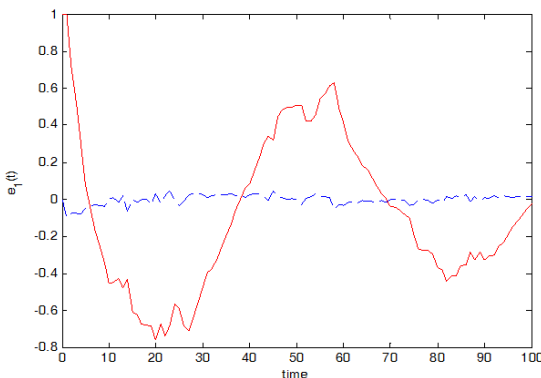


그림 3. 첫 번째 하위 시스템의 추정 오차: $e_{11}(t)$ (실선), $e_{12}(t)$ (파선)
 Fig. 3. estimated errors of the first subsystem: $e_{11}(t)$ (solid), $e_{12}(t)$ (dashed)

위의 시스템에서 상태변수를 $x_k(t) = [x_{k1}(t) \ x_{k2}(t)]^T = [z_k(t) \ \dot{z}_k(t)]^T$ 라 하면, 이산화 과정을 거쳐 다음과 같은 퍼지 시스템으로 표현할 수 있다.

$$x_k(t+1) = \sum_{i=1}^2 \mu_{ki}(x_k(t)) A_{ki} x_k(t) + h_k(x_k(t))$$

$$y_k(t) = C_k x_k(t)$$

여기서,

$$A_{k1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & \psi_k(1 - M_k^2) \end{bmatrix} I,$$

$$A_{k2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & \psi_k \end{bmatrix} I,$$

$$C_k = [0 \ 1]$$

$$\mu_{k1}(z_k(t)) = \frac{z_k(t)^2}{M_k^2}, \quad \mu_{k2}(z_k(t)) = 1 - \mu_{k1}(z_k(t))$$

4.1. 두 번째 모의실험

다음과 같은 두 개의 Van der Pol 발진기가 결합된 상호결합 시스템을 고려한다 [16].

$$\ddot{z}_k(t) - \psi_k(1 - z_k(t)^2)\dot{z}_k(t) + z_k(t) - h_k(z_k(t)) = 0$$

$$y_k(t) = z_k(t)$$

여기서, $\psi_1 = 1$, $\psi_2 = 0.5$ 이라 하며, $h_k(z_k(t))$ 는 미지의 상호결합 함수이며, 앞의 예제와 마찬가지로 $h_k(z_k(t)) = \alpha_k H_k z_k(t)$ 라고 가정한다. 이때, $H_k = [0 \ 0.01 \ 0 \ 0.01]$ 이고, $\alpha_k \geq 0$ 이다.

이고, $M_1 = M_2 = 2.5$ 이며, 샘플링값 $T = 0.01$ 이라 한다. 그러면 정리 1을 통해 관측 이득 행렬을 얻을 수 있다.

● 첫 번째 하위 시스템

$$L_{11} = \begin{bmatrix} -1.9695 \\ 0.9673 \end{bmatrix}, \quad L_{12} = \begin{bmatrix} -1.9695 \\ 1.0298 \end{bmatrix},$$

● 두 번째 하위 시스템

$$L_{21} = \begin{bmatrix} -1.9596 \\ 0.9936 \end{bmatrix}, \quad L_{22} = \begin{bmatrix} -1.9696 \\ 1.0248 \end{bmatrix}.$$

이를 통해 지능형 분산 관측기를 설계하면, 최대 상호결합 범위

$\alpha_k = 0.1$ 에 대해, 그림 5, 6와 같은 결과를 얻을 수 있으며, 최소 $\gamma/\alpha_k = 5.416$ 값이 나온다.

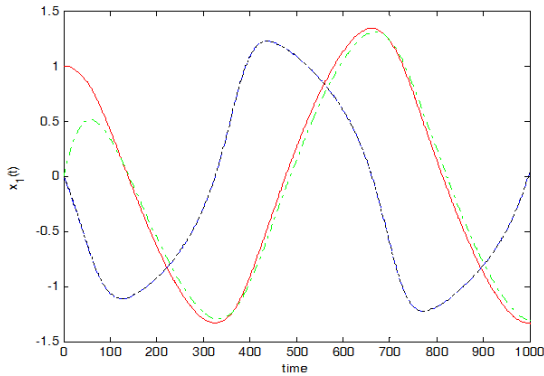


그림 5. 첫 번째 하위 시스템의 상태변수와 추정 상태변수: $x_{11}(t)$ (실선), $x_{12}(t)$ (파선), $\hat{x}_{11}(t)$ (쇄선), $\hat{x}_{12}(t)$ (점선)
 Fig. 5. State-variables and estimated state-variables of the first subsystem: $x_{11}(t)$ (solid), $x_{12}(t)$ (dashed), $\hat{x}_{11}(t)$ (dash-dotted), $\hat{x}_{12}(t)$ (dotted)

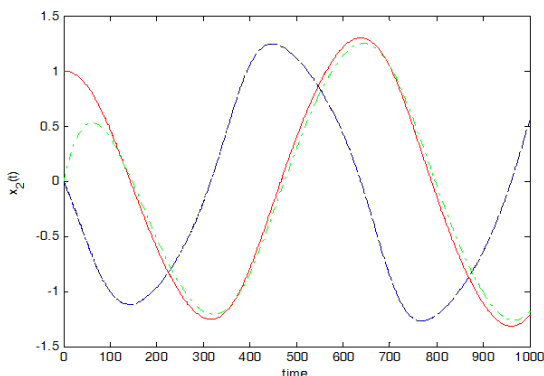


그림 6. 두 번째 하위 시스템의 상태변수와 추정 상태변수: $x_{21}(t)$ (실선), $x_{22}(t)$ (파선), $\hat{x}_{21}(t)$ (쇄선), $\hat{x}_{22}(t)$ (점선)
 Fig. 6. State-variables and estimated state-variables of the second subsystem: $x_{21}(t)$ (solid), $x_{22}(t)$ (dashed), $\hat{x}_{21}(t)$ (dash-dotted), $\hat{x}_{22}(t)$ (dotted)

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 이산시간 비선형 상호결합 시스템을 위한 지능형 분산관측기를 개발하였다. 비선형 상호결합 시스템은 퍼지 시스템과 미지의 상호결합으로 구성하며, 각 하위시스템을 위한 지능형 분산 관측기를 설계하였다. 또한, 하위시스템과 분산 관측기를 통해 오차식을 구하고, 분산 관측기의 설계 문제를 해결하는 충분조건을 구하였고, 이를 선형 행렬 부등식으로 나타내었다. 마지막으로 모의실험을 통해 개발된 관측기 설계 기법의 성능을 입증하였다.

향후 연구에서는 본 연구에서 제안된 관측기 설계 기법을 바탕으로 보다 성능이 뛰어난 관측기 기반 분산 제어기 설계에 대한 연구를 진행할 예정이다. 또한, 제안된 관측기 설계 기법이 필터 설계 기법에 적용하여 새로운 분산 필터 설계 기법을 연구할 예정이다.

References

- [1] A. M. Pertew, H. J. Marquez, and Q. Zhao, " H_∞ observer design for Lipschitz nonlinear systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 51, no. 7, pp. 1211-1216, 2006.
- [2] F. Cacace, A. Germani, and C. Manes, "An observer for a class of nonlinear systems with time varying observation delay," *Systems and Control Letters*, vol. 51, pp. 305-312, 2010.
- [3] Z. Wang, Y. Shen, X. Zhang, and Q. Wang, "Observer design for discrete-time descriptor systems," *Systems and Control Letters*, vol. 61, pp. 683-687, 2012.
- [4] S. Ibri, "Observer-based control of a class of time delay nonlinear systems having triangular structure," *Automatica*, vol. 47, pp. 388-394, 2011.
- [5] H. Kheloufi, A. Zemouche, F. Bedouhene, and M. Boutayeb, "On LMI conditions to design observer-based controllers for linear systems with parameter uncertainties," *Automatica*, vol. 49, pp. 3700-3704, 2013.
- [6] J. Zhang, Y. Xia, and R. Tao, "New results on H_∞ filtering for fuzzy time-delay systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 128-137, 2009.
- [7] M. Zerrougui, M. Darouach, L. Boutat-Baddas, and H. S. Ali, " H_∞ filtering for singular bilinear systems with application to a single-link flexible joint robot," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 590-598, 2014.
- [8] M. Chadli, A. Abdo, and S. X. Ding, " H_2/H_∞ fault detection filter design for discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy system," *Automatica*, vol. 49, pp. 1996-2005, 2013.
- [9] S.-P. He, "Fault estimation for T-S fuzzy Markovian jumping systems based on the adaptive observer," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 12, no. 5, pp. 977-985, 2014.
- [10] M. Jamshidi, *Large-Scale System: Modeling and Control*, Elsevier, New York, USA, 1983.

- [11] J. H. Moon, J. Lee, H. J. Lee, and M. H. Kim, "T-S fuzzy formation controlling phugoid model-based multi-agent system in discrete-time," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 26, No. 4, pp. 308-315, 2016.
- [12] G. B. Koo, Y. H. Joo, and J. B. Park, "Design of an observer-based decentralized fuzzy controller for discrete-time interconnected fuzzy systems," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 25, No. 5, pp. 451-465, 2015.
- [13] G. B. Koo, Y. H. Joo, and J. B. Park, "Observer-based decentralized fuzzy controller design of nonlinear interconnected system for PEMFC," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 21, No. 4, pp. 423-429, 2011.
- [14] G. B. Koo, J. K. Kim, Y. H. Joo, and J. B. Park, "Decentralized dynamic output feedback controller for discrete-time nonlinear interconnected systems via T-S fuzzy models," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 17, No. 6, pp. 780-785, 2017.
- [15] G. Kang and K. Oh, "Design of fuzzy PID controllers using TSK fuzzy systems," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 24, No. 1, pp. 102-109, 2014.
- [16] G. B. Koo, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Decentralized sampled-data fuzzy observer design for nonlinear interconnected systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 661-674, 2016.
- [17] I. R. Petersen, "A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems," *Systems and Control Letters*, vol. 8, pp. 351-357, 1987.
- [18] J. V. D. Oliveira, J. Bemussou, and J. C. Geromel, "A new discrete-time robust stability condition," *Systems and Control Letters*, Vol. 37, pp. 261-265, 1999.

저자소개



구근범 (Geun Bum Koo)

2007년 : 연세대학교 전기전자공학과 졸업.

2015년 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정

2016년 : 연세대학교 산업기술연구소 박사후과정

2016년~현재 : 공주대학교 전기전자제어공학부 조교수

관심분야 : Fuzzy, Decentralized control, Digital redesign

Phone : +82-41-521-9150

E-mail : gbkoo@kongju.ac.kr