Journal of Korean Institute of Intelligent Systems
Vol. 27, No. 1, February 2017, pp. 059-064
http://dx.doi.org/10.5391/JKIIS.2017.27.1.059

ISSN(Print) 1976-9172
ISSN(Online) 2288-2324

JKIIS

불완전한 전반부 정합 하에서의 이산 T-S 퍼지 모델에 대한 완화된 안정화 조건

A Relaxed Stabilization Condition for Discrete T-S Fuzzy Model under Imperfect Premise Matching

임현준* · 주영훈** · 박진배*†
Hyeon Jun Lim, Young Hoon Joo and Jin Bae Park†

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

요 약

본 논문은 이산 Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 모델의 제어기 설계 시 시스템과 제어기가 상이한 소속 함수를 가지는 불완전한 전반부 정합 하에서의 제어기 설계에 대해 다룬다. 이산 T-S 퍼지 모델의 안정화 조건을 구할 때, 단일 Lyapunov 함수를 이용하여 구한 기존의 보수적인 안정화 조건보다 완화된 안정화 조건을 구하기 위해 퍼지 Lyapunov 함수를 고려한다. 퍼지 Lyapunov 함수를 이용하여 선형 행렬 부등식 기반의 완화된 안정화 조건을 구하고 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 타당성을 검증한다.

키워드 : 비선형 시스템, T-S 퍼지 모델, 제어기 설계, 퍼지 Lyapunov 함수, 불완전한 전반부 정합

Abstract

In this paper, a controller for discrete Takagi-Sugeno(T-S) fuzzy model under imperfect premise matching is proposed. Most of previous papers have obtained the stabilization condition using common quadratic Lyapunov function. However, the stabilization condition may be conservative due to the typical disadvantage of the common quadratic Lyapunov function. Hence, in order to solve this problem, we propose the stabilization condition of discrete T-S fuzzy model using fuzzy Lyapunov function. Finally, the proposed approach is verified by the simulation experiments.

Key Words : Nonlinear System, T-S Fuzzy, Controller Design, Fuzzy Lyapunov Function, Imperfect Premise Matching

Received: Nov. 25, 2016
Revised: Jan. 4, 2017
Accepted: Jan. 16, 2017
†Corresponding authors
jbpark@yonsei.ac.kr

1. 서 론

최근 시스템의 규모가 커지고 복잡성이 증가함에 따라 시스템은 다양한 형태의 비선형성을 포함하게 되었다 [1-3]. 이에 따라 비선형 시스템 제어의 필요성은 나날이 증대되어 왔으며 다양한 비선형 시스템 제어 이론에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중, Takagi-Sugeno (T-S) 퍼지 모델은 비선형 시스템을 선형 시불변 부분시스템과 비선형 소속 함수의 결합으로 표현하여 분석하는 기법으로 선형 제어 이론을 도입할 수 있어 많은 주목을 받고 있다 [1], [5-15].

일반적으로, T-S 퍼지 모델의 제어기 설계는 시스템과 제어기가 동일한 소속 함수를 공유하는 parallel distributed compensation (PDC)을 기반으로 한다 [1], [7-25].

그러나 PDC 기반 설계는 시스템이 복잡해짐에 따라 제어기의 하드웨어 구현 비용을 점차 증가시키는 결과를 초래한다. 이에 [4]에서는 이러한 한계점을 극복하기 위해 시스템과 제어기가 동일한 소속 함수를 공유하지 않는 불완전한 전반부 정합 하에서의 제어기 설계를 제안하였다. 그러나 [4]에서 제안한 단일 Lyapunov 함수를 이용한 안정화 조건은 모든 퍼지 규칙에 대해 부등식 조건을 만족하는 하나의 행렬을 찾아야 하기 때문에 해를 구해내기 어려운 한계점이 있다. 이에 [5]에서는 기존의 안정화 조건보다 완화된 안정화 조건을 유도하기 위해 퍼지 Lyapunov 함수를 제안하였지만 불완전한 전반부 정합 하에서의 이산 T-S 퍼지 모델에 대해서는 아직 연구가 이루어지지 않았다 [5-9].

본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 중견연구자과제(과제번호:NRF-2015R1A2A2A05001610)와 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: NRF-2016R1A6A1A 03013567).

이에 본 논문에서는 불완전한 전반부 정합 하에서의 이산 T-S 퍼지 모델에 대한 완화된 안정화 조건을 제안한다. 기존 단일 Lyapunov 함수보다 개선된 퍼지 Lyapunov 함수를 이용하여 완화된 안정화 조건을 선형 행렬 부등식형태로 표현한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 타당성을 검증한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다: 먼저 2장에서 불완전한 전반부 정합 하에서의 이산 T-S 퍼지 모델 및 제어기 설계에 대해 설명한다. 3장에서는 퍼지 Lyapunov 함수를 활용하여 완화된 안정화 조건을 선형 행렬 부등식 형태로 나타낸다. 4장에서 시뮬레이션 예제를 통해 제안한 방법의 타당성을 검증하며 마지막으로 5장에서 결론을 도출한다.

2. 이산 T-S 퍼지 모델

일반적인 이산 비선형 시스템은 다음과 같은 동적 방정식으로 표현된다 [1-3]:

$$x(k+1)=f(x(k),u(k)), \tag{1}$$

여기서 $f(x(k),\, u(k))\in R^n$은 비선형 벡터 함수, $x(k)\in R^n$은 상태 벡터, $u(k)\in R^m$은 입력 벡터를 나타낸다. 식 (1)의 이산 비선형 시스템은 다음과 같은 이산 T-S 퍼지 모델로 나타낼 수 있다 [1]:

$$\begin{aligned}&Rule\ i:\ IF\ z_1(k)\ is\ M_1^i,\ \cdots\ ,\text{and}\ z_p(k)\ is\ M_p^i,\\&\quad THEN\quad x(k+1)=A_ix(k)+B_iu(k)\end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $Rule\ i$는 퍼지 규칙을 나타내며 M_j^i는 퍼지 집합을 나타낸다. $A_i\in R^{n\times n}$은 시스템 행렬, $B_i\in R^{n\times m}$은 입력 행렬 $x(k)\in R^n$는 시스템 상태 벡터, $u(k)\in R^m$는 입력 벡터, $z_i(k)\ (i=1,2,\ldots,p)$는 전제 변수를 나타낸다.

식 (2)에 중심값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글톤 퍼지화를 적용하면 다음의 식을 얻을 수 있다 [1]:

$$x(k+1)=\sum_{i=1}^{r}w_i(z(k))(A_ix(k)+B_iu(k)), \tag{3}$$

여기서 $w_i(z(k))$은 시스템 소속 함수로 다음과 같은 성질을 만족한다:

$$\begin{aligned}&w_i(z(k))\in[0,1],\\&\sum_{i=1}^{n}w_i(z(k))=1.\end{aligned} \tag{4}$$

시스템과 같은 방법으로 불완전한 전반부 정합 하에서의 이산 T-S 퍼지 모델의 제어기는 다음과 같이 표현 할 수 있다 [4-6], [16]:

$$u(k)=\left(\sum_{j=1}^{r}m_j(g(k))K_j\right)\left(\sum_{l=1}^{r}m_l(g(k))P_l\right)^{-1}x(k), \tag{5}$$

여기서 $K_j\in R^{m\times n}$, $P_l\in R^{n\times n}$이며 제어기의 이득 값은 $K_j\left(\sum_{l=1}^{r}m_l(g(k))P_l\right)^{-1}$이다. $g(k)$는 전제 변수 $m_j(g(k))$은 제어기 소속 함수로 다음과 같은 성질을 만족한다:

$$\begin{aligned}&m_j(g(k))\in[0,1],\\&\sum_{j=1}^{r}m_j(g(k))=1.\end{aligned} \tag{6}$$

식 (3)과 식 (5)를 이용하여 다음과 같은 불완전 전반부 정합 하에서의 폐루프 이산 T-S 퍼지 모델을 얻을 수 있다:

$$\begin{aligned}x(k+1)=&\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}w_i(z(k))m_j(g(k))(A_i\\&+B_iK_j(\sum_{l=1}^{r}m_l(g(k))P_l)^{-1})x(k).\end{aligned} \tag{7}$$

표현의 간결함을 위해 $w_i(z(k))=w_i$, $m_j(g(k))=m_j$, $m_j(g(k+1))=g_i^+$, $Y_w=\sum_{i=1}^{r}w_iY_i$, $Y_m=\sum_{j=1}^{r}m_jY_j$, $Y_m^+=\sum_{j=1}^{r}m_j^+Y_j$로 축약한다. ($Y\in\{A,B,K,P\}$)

참고 1: T-S 퍼지 모델 식 (3)과 제어기 식 (5)에 의해 시스템과 제어기가 상이한 소속 함수를 가진다는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존의 PDC 기반 제어기 설계와 차이점으로, 시스템의 소속 함수가 복잡할 때, 하드웨어 구현에 어려움을 갖는 PDC 기반 제어기 설계의 한계점을 해결할 수 있다.

3. 안정화 조건

본 장에서는 앞에서 구한 폐루프 이산 T-S 퍼지 모델 (8)에 대한 안정화 조건을 구한다. 기존의 안정화 조건보다 완화된 조건을 구하기 위해 다음과 같은 퍼지 Lyapunov 함수를 고려한다:

$$V(x(k))=x^T(k)(P_m)^{-1}x(k), \tag{8}$$

여기서 P_m는 양한정 행렬이며 따라서 Lyapunov 함수는 항상

양한정이다.

정리 불완전한 전반부 정합 하에서의 폐루프 이산 T-S 퍼지 모델 (7)의 평형점은 $m_i - \rho_i w_i > 0$를 만족시키는 상수 $\rho_i > 0$에 대하여 다음 의 제약 조건을 갖는 선형 행렬 부등식들을 만족시키는 양한정 행렬 $P_i \in R^{n \times n}$, $\Lambda_i \in R^{2n \times 2n}$, 대칭행렬 $V_{ij} \in R^{2n \times 2n}$과 임의의 행렬 $K_j \in R^{m \times n}$이 존재하면 점근적으로 안정하다. 이때, 제어기의 이득 값은 $K_j P_m^{-1}$으로 결정된다.

$i, l = 1, 2, \ldots, r$일 때,

$$\rho_i (H_{ii}^l - \Lambda_i - V_{ii}) < 0, \tag{9}$$

$$\Lambda_i - \rho_i V_{ii} < 0, \tag{10}$$

$i < j = 1, 2, \ldots, r,\ l = 1, 2, \ldots, r$일 때,

$$\rho_j (H_{ij}^l - \Lambda_i - V_{ij}) + \rho_i (H_{ji}^l - \Lambda_j - V_{ji}) < 0 \tag{11}$$

$$\Lambda_i + \rho_j V_{ij} + \Lambda_j + \rho_i V_{ji} < 0, \tag{12}$$

$i, j, l = 1, 2, \ldots, r$일 때,

$$H_{ij}^l - \Lambda_i < 0, \tag{13}$$

여기서

$$H_{ij}^l = \begin{bmatrix} -P_j & * \\ A_i P_j + B_i K_j & -P_l \end{bmatrix},$$

이다.

증명 : 식 (6)의 안정화 조건을 구하기 위해 Lyapunov 함수 (8)를 고려한다. 식 (8)의 변화율을 구하면 다음과 같다:

$$\begin{aligned} &\Delta V(x(k)) \\ &= V(x(k+1)) - V(x(k)) \\ &= x^T(k+1)(P_m^+)^{-1} x(k+1) - x^T(k)(P_m)^{-1} x(k) \\ &= x^T(k)\{(A_w + B_w K_m)^T (P_m^+)^{-1} (A_w + B_w K_m) \\ &\quad -(P_m)^{-1}\} x(k) \end{aligned} \tag{14}$$

식 (14)에 의해 Lyapunov 함수의 변화율이 항상 음수가 되기 위한 다음과 같은 부등식 조건을 얻을 수 있다:

$$(A_w + B_w K_m)^T (P_m^+)^{-1} (A_w + B_w K_m) - (P_m)^{-1} < 0. \tag{15}$$

식 (15)의 양변에 P_m으로 합동 변환을 취하고 Schur complement를 적용하면 다음의 부등식 조건을 얻을 수 있다:

여기서,

$$\sum_{l=1}^{r}\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} m_l^+ w_i m_j H_{ij}^l < 0,\ H_{ij}^l = \begin{bmatrix} -P_j & * \\ A_i P_j + B_i K_j & -P_l \end{bmatrix} \tag{16}$$

이다.

$$\sum_{l=1}^{r}\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} m_l^+ w_i m_j H_{ij}^l < 0, \tag{17}$$

식 (17)을 식 (16)에 대입하면 다음과 같이 부등식 조건을 정리할 수 있다:

$$\begin{aligned} &\sum_{l=1}^{r} (m_l^+)^{-1} \Big\{ \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} w_i m_j H_{ij}^l \\ &\quad + \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} w_i (w_j - g_j + \rho_j w_j - \rho_j w_j) \Lambda_i \Big\} \\ &= \sum_{l=1}^{r} (m_l^+)^{-1} \Big\{ \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} w_i m_j H_{ij}^l + \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} w_i (w_j - \rho_j w_j) \Lambda_i \\ &\quad - \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} w_i (m_j - \rho_j w_j) \Lambda_i + \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} w_i w_j \rho_j (V_{ij} - V_{ij}) \Big\} \\ &= \sum_{l=1}^{r} (m_l^+)^{-1} \Big\{ \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} w_i w_j \rho_j (H_{ij}^l - \Lambda_i - V_{ij}) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} w_i (m_j - \rho_j w_j)(H_{ij}^l - \Lambda_j) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} w_i w_j (\Lambda_i + \rho_j V_{ij}) \Big\} \\ &= \sum_{l=1}^{r} (m_l^+)^{-1} \Big\{ \sum_{i=1}^{r} w_i^2 \rho_i (H_{ii}^l - \Lambda_i - V_{ii}) \\ &\quad + \sum_{j=1}^{r}\sum_{i<j} w_i w_j (\rho_j (H_{ij}^l - \Lambda_i - V_{ij}) + \rho_i (H_{ji}^l - \Lambda_j - V_{ji})) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{r} w_i^2 \rho_i (\Lambda_i + \rho_i V_{ii}) \\ &\quad\quad + \sum_{j=1}^{r}\sum_{i<j} w_i w_j (\Lambda_i + \rho_j V_{ij} + \Lambda_j + \rho_i V_{ji}) \Big\} \end{aligned} \tag{18}$$

따라서 식 (18)을 통해 불완전한 전반부 정합 하에서의 폐루프 이산 T-S 퍼지 모델 (8)이 안정화되기 위한 충분조건의 선형 행렬 부등식 (9)-(13)을 유도할 수 있다.

참고 2: 선형 행렬 부등식 (9)-(13)으로 표현된 폐루프 이산 T-S 퍼지 모델 (8)의 안정화 조건은 [5]의 안정화 조건과 비교하였을 때, 보다 완화된 조건을 제공한다. 이는 모든 퍼지 규칙에 대해 부등식 조건을 만족하는 하나의 행렬을 구해야 하는 단일 Lyapunov 함수의

한계점을 극복한 것이다.

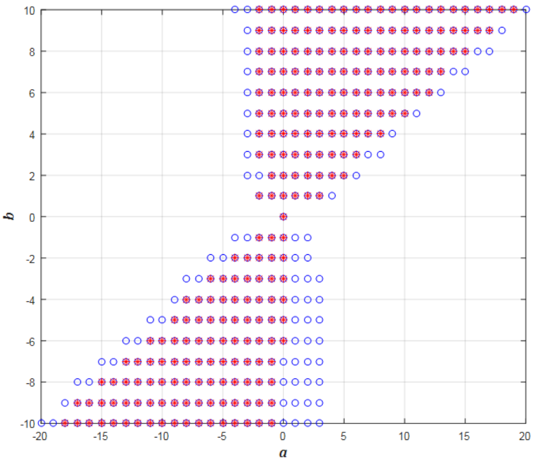

그림 1. 안정화 가능 영역 ($a\in[-20, 20]$, $b\in[-10, 10]$)

Fig. 1. Stabilization regions ($a\in[-20, 20]$, $b\in[-10, 10]$)

참고 3: 식 (4)와 (7)에 의하면 임의의 양한정 행렬 Λ_i에 대해 식 (17)이 항상 성립한다는 것을 알 수 있다. 또한, 식 (9)-(13)의 양한정 행렬 Λ_i와 대칭 행렬 V_{ij}는 불완전한 전반부 정합 하에서의 이산 T-S 퍼지모델의 제어기 설계 시 안정화 가능 영역을 넓히기 위해 추가된 slack 행렬이다 [4-6].

4. 시뮬레이션 예제

본 논문에서 제안한 안정화 조건을 검증하기 위해 두 개의 규칙을 갖는 이산 T-S 퍼지 모델을 고려한다:

$$\begin{aligned} &Rule\ i\ :\ IF\ x_1(k)\ is\ M_1^i, \\ &\qquad THEN\quad x(k+1)=A_i x(k)+B_i u(k)\,. \end{aligned}$$

여기서, $x(k)=[x_1(k)\ x_2(k)]^T$이며 시스템 행렬 및 입력 행렬은 다음과 같다:

$$A_1=\begin{bmatrix} a & 0 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}, A_2=\begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.2 & 0.9 \end{bmatrix},$$
$$B_1=\begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix}, B_2=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

시스템의 소속 함수는 다음과 같다:

$$w_1(z(k))=\begin{cases} 0.982 & \text{for } x_1(k)\leqq -4 \\ \dfrac{1}{1+e^{x_1(k)}} & \text{for } -4< x_1(k)\leqq\ 4 \\ 0.018 & \text{for } 4\ < x_1(k), \end{cases}$$
$$w_2(z(k))=1-w_1(z(k)).$$

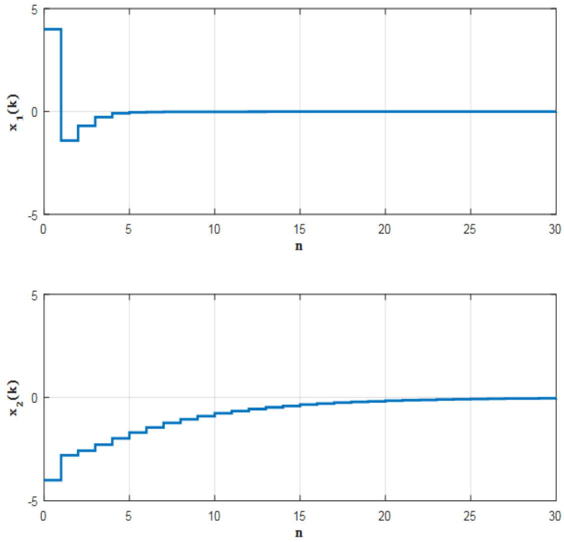

그림 2. $a=6,\ b=2$일 때의 상태응답, $x(0)=[4, -4]^T$

Fig. 2. State responses at $a=6,\ b=2$, $x(0)=[4, -4]^T$

시스템의 소속 함수에 분수 계산 및 지수 계산이 혼재되어있기 때문에 PDC 기반의 기존 제어기 설계는 하드웨어 구현에 어려움을 갖는다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같이 시스템의 소속 함수보다 간단한 제어기 소속 함수를 고려한다.

$$m_1(g(k))=\begin{cases} 0.9 & \text{for } x_1(k)\leqq -4 \\ \dfrac{-x_1(k)+5}{10} & \text{for } -4< x_1(k)\leqq\ 4 \\ 0.1 & \text{for } 4< x_1(k), \end{cases}$$
$$m_2(g(k))=1-m_1(g(k)).$$

조건 $m_i-\rho_i w_i>0$을 만족시키기 위해 $\rho_1=\rho_2=0.75$으로 설정한다. 그림 1은 a와 b의 변화에 따른 안정화 가능 영역을 표시한 것이다. * 로 표시된 영역은 [5]에서 제안된 방법으로 구한 안정화 가능 영역이며 ○로 표시된 영역은 본 논문에서 제안한 퍼지 Lyapunov 함수를 이용하여 구한 안정화 가능 영역이다. 그림 1을 통해 제안한 방법의 안정화 가능 영역이 기존의 안정화 가능 영역보다 늘어났음을 확인할 수 있다. 이는 제안한 방법이 퍼지 규칙에 따라 변화하는 부등식 조건에 대해 이를 만족시키는 행렬을 구하기 용이하다는 것을 의미한다.

그림 2는 $a=6$, $b=2$일 때, 초기 조건 $x(0)=[4,-4]^T$에서의 상태응답을 나타낸다. 그림 1에서 확인할 수 있듯이, [5]에서 제안한 안정화 조건으로는 이득 값을 결정할 수 없는 범위였으나, 본 논문에서 제안한 안정화 조건을 활용하여 다음과 같은 양한정 행렬 및 퍼지 제어기의 이득 값을 결정할 수 있다:

$$P_1=\begin{bmatrix} 0.5605 & 0.0249 \\ 0.0249 & 1.2497 \end{bmatrix}, P_2=\begin{bmatrix} 0.4865 & 0.0183 \\ 0.0183 & 1.1965 \end{bmatrix},$$

$K_1 = [-1.8062 \;\; -0.0412]$, $K_2 = [-0.4397 \;\; -0.1950]$.

그림 2에서 점근적으로 상태 벡터 $x(k)$가 평형점인 $[0, 0]^T$으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 시스템과 제어기가 상이한 소속 함수를 가지는 불완전한 전반부 정합 하에서의 이산 T-S 퍼지 모델의 완화된 안정화 조건에 대해 다루었다. 기존의 단일 Lyapunov 함수를 이용하여 유도한 보수적인 안정화 조건을 완화하기 위해, 퍼지 Lyapunov 함수를 활용하였다. 퍼지 Lyapunov 함수를 이용하여 완화된 안정화 조건을 선형 행렬 부등식 형태로 유도하였으며, 시뮬레이션을 통해 기존의 안정화 조건과 비교하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

References

[1] K. Tanaka and H. O. Wang, "Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach," *New York: Wiley*, 2001.

[2] H. K. Khalil, "Nonlinear Systems," *third ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ*, 2002.

[3] S. Boyd, L.E. Ghaoui, E. Feron, V. Blalkrishnan "Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory," *SIAM, Philadelphia, PA*, 1994.

[4] H. K. Lam, "Stability Analysis and Performance Design for Fuzzy-model-based Control System under Imperfect Premise Matching," *IEEE Trans, Fuzzy Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 949-961, Aug. 2009.

[5] H. J. Kim, J. B. Park and Y. H. Joo, "Stabilization Conditions of Takagi-Sugeno Fuzzy Systems based on the Fuzzy Lyapunov Functions under the Imperfect Premise Matching," *American Control Conference, Washington, DC, USA*, June 17-19, 2013.

[6] H. K. Lam, "Design of Stable Fuzzy Controller for Nonlinear Systems Subject to Imperfect premise Matching based on Grid-point Approach," *Control Theory & Application, IET*, vol. 4, no. 12. pp. 2770-2780, 2010.

[7] K. Tanaka, T. Hori and H. O. Wang, "A Multiple Lyapunov Function Approach to Stabilization of Fuzzy Control Systems," *IEEE Trans, Fuzzy Syst.*, vol. 11, no. 4, 2003.

[8] B-J. Rhee and S. Won "A New Fuzzy Lyapunov Function Approach For a Takagi-Sugeno Fuzzy Control System Design," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 9, pp. 1211-1228, 2006.

[9] K. Tanaka, T. Hori and H. O. Wang, "A Fuzzy Lyapunov Approach to Fuzzy Control System Design," *American Control Conference, Arlington, VA*, 2001, 00. 4790-4795.

[10] K. Tanaka, T. Hori and H. O. Wang "New Parallel Distributed Compensation using Time Derivative of Membership Functions: A Fuzzy Lyapunov Approach," *IEEE Conf. on Decision Control, Orland, FL*, 2001, pp. 3942-3947.

[11] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE Trans., Sys., Man., Cybern., vol. SMC-15*, no. 1, pp. 116-132, Jan, 1985.

[12] H. O. Wang, K. Tanaka, and M. F. Griffin "An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear Systems: Stability and the Design Issues," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 250-265, May 1998.

[13] K. Tanaka, T. Ikeda and H. O. Wang, "Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers: Relaxed Stability Conditions and LMI-based Designs," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 250-265, May 1998.

[14] H. K. Lam and L. D. Seneviratne, "Stability analysis of polynomial fuzzy-model-based control systems under perfect/imperfect premise matching," *IET Control Theory Appl.*, vol. 5, no. 15, pp. 1689-1697, 2011.

[15] G. B. Koo, Y. H. Joo and Jin Bae Park, "Design of an Observer-based Decentralized Fuzzy Controller for Discrete-time Interconnected Fuzzy Systems," *JKIIS*, vol. 25, no. 5, PP. 451-456, Oct 2015

[16] T.M Guerra and L. Vermeiren, "LMI-based Relaxed Nonquadratic Stabilization Conditions for Nonlinear Systems in the Takagi–Sugeno's Form," *Automatica*, vol. 40, pp. 823-829, 2004

[17] G. B. Koo, J. B. Park, Y. H. Joo, "Decentralized Fuzzy Observer-based Output-feedback Control for Nonlinear Large-scale Systems: an LMI Approach," *IEEE Trans., Fuzzy Syst.*, vol. 22, 406-419, 2014

[18] H. J. Lee, J. B. Park and Y. H. Joo, "Further Refinement on LMI-based Digital Redesign: Delta-operator Approach," *IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs* 53 (6), 473-477, 2006.

[19] D. H. Lee, J. B. Park, Y. H. Joo, K. C. Lin and C. H. Ham, "Robust H∞ Control for Uncertain Nonlinear Active Magnetic Bearing Systems via Takagi-Sugeno Fuzzy Models," *International Journal of Control, Automation and Systems* 8 (3), 636-646, 2010

[20] D. W. Kim, J. B. Park and Y. H. Joo, "Theoretical Justification of Approximate Norm Minimization Method for Intelligent Digital Redesign," *Automatica* 44 (3), 851-856, 2008

[21] M. K. Song, J. B. Park, J. K. Kim and Y. H. Joo. "Delay-range-dependent Stability Analysis and Stabilization for Nonlinear Systems : T-S Fuzzy Model Approach," *JKIIS*, 19.3 (2009.6): 337-342.

[22] M. H. Kim, Y. H. Joo and J. B. Park "TS Fuzzy Classifier using a Linear Matrix Inequality," *JKIIS*, vol. 14, no. 1, pp. 46-51, 2004

[23] H. J. Lee, Y. H. Joo, S. Y. Lee, J. B. Park, "Stochastic Stabilization of TS Fuzzy System with Markovian Input Delay," *JKIIS*, 11.6 (2001.12): 459-464.

[24] Y. H. Joo, H. J. Lee and J. B. Park, "Design of Fuzzy Controller for Input-delayed TS Fuzzy Systems." *JKIIS*, 11.3 (2001.6): 208-214.

[25] H. J. Lee, Y. H. Joo and J. B. Park "Output Tracking Controller Design of Discrete-Time TS Fuzzy Systems," *JKIIS*, 11.1 (2001.2): 45-51.

저 자 소 개

임현준(Hyeon Jun Lim)

2016년 : 연세대학교 전기전자공학부 졸업.

2016~현재 : 연세대학교 대학원 전기 전자공학과 석사과정

관심분야 : T-S fuzzy system, Intelligent control, Non- linear control

Phone : +82-2-2123-2773

E-mail : tocreating@gmail.com

박진배(Jin Bae Park)

1977년 : 연세대학교 전기공학과 졸업

1985~1990년 : Kansas State Univer- sity 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업 (공학박사)

1990~1991년 : Kansas State Univer- sity 전기 및 컴퓨터 공학과 조교수

2006~2010년 : Int. Journal of Control, Robot, and Systems Editor-in-Chief

2013년 : 제어로봇시스템학회 회장

2014~2016년 : 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㈜ 생산기술센터 팀장

1995~현재 : 군산대학교 제어로봇공학과 교수

2009년 : 한국지능시스템학회 회장

2013~2014년 : 대한전기학회 부회장

2014~현재 : Int. Journal of Control, Automation, and Systems, Editor-in-Chief

2016~현재 : 대한전기학회 부회장

2016~현재 : 제어로봇시스템학회 부회장

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

Phone : +82-63-469-4706

E-mail : yhjoo@kunsan.ac.kr