

연속시간 T-S 퍼지 시스템에 대한 정적 출력궤환 제어

Static Output Feedback Control for Continuous T-S Fuzzy Systems

정은태*
(Eun Tae Jeung^{1,*})

¹Department of Control and Instrumentation Engineering, Changwon National University

Abstract: This paper presents a design method of a static output feedback controller for continuous T-S fuzzy systems via parallel distributed compensation (PDC). The existence condition of a set of static output feedback gains is represented in terms of linear matrix inequalities (LMIs). The sufficient condition presented here does not need any transformation matrices and equality constraints and is less conservative than the previous results seen in [20].

Keywords: T-S fuzzy system, static output feedback, LMI

I. 서론

T-S 퍼지 모델은 비선형 시스템을 묘사하는 방법 중의 하나로 Takagi와 Sugeno [1]에 의해서 제안되었다. T-S 퍼지 모델은 후건부를 선형시스템으로 표현한 특징과 병렬분산보상(parallel distributed compensation)의 제안[2,3]으로 인하여, 선형시스템에 대한 제어가 설계 방법을 T-S 퍼지 시스템으로 쉽게 확장할 수 있었으며, 수많은 결과가 발표되어 왔다. 대부분의 제어기법은 상태궤환[4-6]을 이용한 것이고, 상태가 측정 불가능일 때 관측기(observer)를 설계[7]한다든지, 출력궤환 제어기[8]를 설계하여 왔다.

출력궤환 제어기 중에서도 정적(static) 출력궤환 제어기는 가장 간단한 형태의 제어기로 실제 시스템에 적용하기가 쉽다는 장점이 있지만, 제어기가 존재할 조건을 선형행렬부등식으로 나타내는 것이 상태궤환 제어기에 비하여 어려운 편이다. 상태궤환 제어기 설계 기법은 선형행렬부등식(LMI: Linear Matrix Inequality)으로 표현할 수 있지만, 정적 출력궤환 제어 문제는 기본적으로 양선형행렬부등식(BMI: Bilinear Matrix Inequality)으로 나타나므로 해를 직접적으로 찾기가 어렵다. 양선형행렬부등식의 문제를 해결하기 위한 방법으로는 반복적인 선형행렬부등식을 이용한 방법[9,10]과 비반복적인 방법이 있다. 원뿔보선형화(cone complementary linearization) [10]는 반복적 방법에 중요한 역할을 하고, 이에 대한 다양한 적용이 발표[11,12]되었다. 비반복적 방법은 양선형행렬부등식의 충분조건을 이용하여 선형행렬부등식으로 변형하는 것이 주를 이루고 있다[13-20]. 이 중에서도 최근에 발표된 [20]의 결과는 [15]의 결과에서 등호조건($PB_i = B_iM$)을 없앤 것이고, 어떠한 행렬변환(matrix transformation)을 사용하지 않은 장점이 있다. 그러나 [20]에

서 제시된 결과도 충분조건으로 좀 더 완화된 충분조건이 존재할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 [20]의 결과를 좀 더 완화된 충분조건을 제시하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II 장에서 다루고자 하는 문제를 설정하고, III 장에서 T-S 퍼지 시스템에 대한 정적 출력궤환 제어기가 존재할 충분조건을 선형행렬부등식으로 제시하고, IV 장에서 예제를 통하여 제시한 결과의 타당성을 검증하고, 끝으로 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 문제설정 및 예비지식

비선형 시스템에 대한 T-S 퍼지 모델은 몇 개의 IF-THEN 규칙으로 구성되어 있으며, 선형시스템의 조합으로 구성되어 있다. 연속시간 T-S 퍼지 시스템의 상태와 출력은

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)] \\ y(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i x(t) \end{aligned} \quad (1)$$

으로 표현되고, 여기서 r 은 퍼지 규칙의 개수, $x(t) \in \mathbf{R}^n$ 는 상태벡터, $u(t) \in \mathbf{R}^m$ 는 입력벡터, $y(t) \in \mathbf{R}^q$ 는 출력벡터, $z(t)$ 는 전건부 변수 벡터이고, A_i, B_i, C_i 는 적절한 차원을 가지는 상수 행렬이다. 그리고 $h_i(z(t))$ 는

$$\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1, h_i(z(t)) \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, r \quad (2)$$

을 만족하는 함수이다.

T-S 퍼지 시스템 (1)에 대한 제어규칙으로 병렬분산보상(PDC: Parallel Distributed Compensation)을 많이 이용하고, 이를 적용한 정적 출력궤환 제어규칙은

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) K_i y(t) \quad (3)$$

* Corresponding Author

Manuscript received March 7, 2014 / revised March 11, 2014 / accepted March 13, 2014

정은태: 창원대학교 제어계측공학과(jet26@changwon.ac.kr)

* 이 논문은 2013-2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

이다. 제어기 (3)을 T-S 퍼지 시스템 (1)에 적용하면, 폐루프시스템은

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_i h_j h_k \tilde{A}_{ijk} x(t) \quad (4)$$

이고, 여기서 $\tilde{A}_{ijk} = A_i + B_i K_j C_k$, $h_i = h_i(z(t))$, $h_j = h_j(z(t))$, $h_k = h_k(z(t))$ 이다. 본 논문에서는, 연속시간 T-S 퍼지 시스템 (1)의 평형점을 안정화 시키는 정적 출력례환 제어기 (3)이 존재할 충분조건을 선형행렬부등식으로 제시한다. 다음 절에서 [20]의 결과보다 더 완화된 충분조건을 제시한다.

III. 주요결과

연속시간 T-S 퍼지 시스템 (1)의 평형점을 점근적으로 안정화시키는 정적 출력례환 제어 이득이 존재할 충분조건을 다음 정리에 나타낸다.

정리 1: 어떤 양의 실수 α 에 대하여, 선형행렬부등식

$$\begin{bmatrix} \Psi_{iii} & \Theta_{iii} \\ \Theta_{iii}^T & \Pi \end{bmatrix} < 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ijj} + \Psi_{jii} + \Psi_{jii} & \Theta_{ijj} & \Theta_{jii} & \Theta_{jii} \\ \Theta_{ijj}^T & \Pi & 0 & 0 \\ \Theta_{jii}^T & 0 & \Pi & 0 \\ \Theta_{jii}^T & 0 & 0 & \Pi \end{bmatrix} < 0, \quad 1 \leq i \neq j \leq r \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \left(\begin{array}{c} \Psi_{ijk} + \Psi_{ikj} \\ + \Psi_{jki} + \Psi_{jik} \\ \Psi_{kij} + \Psi_{kji} \end{array} \right) & \Theta_{ijk} & \Theta_{ikj} & \Theta_{jki} & \Theta_{jik} & \Theta_{kij} & \Theta_{kji} \\ \Theta_{ijk}^T & \Pi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Theta_{ikj}^T & 0 & \Pi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Theta_{jki}^T & 0 & 0 & \Pi & 0 & 0 & 0 \\ \Theta_{jik}^T & 0 & 0 & 0 & \Pi & 0 & 0 \\ \Theta_{kij}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & \Pi & 0 \\ \Theta_{kji}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Pi \end{array} \right) < 0, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{i11} & Z_{i12} & \dots & Z_{i1r} \\ Z_{i21} & Z_{i22} & \dots & Z_{i2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{ir1} & Z_{ir2} & \dots & Z_{irr} \end{bmatrix} < 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (8)$$

을 만족하는 양정의 대칭행렬 P 와 행렬 M , N_i ($i = 1, 2, \dots, r$), $Z_{ijk} = Z_{ikj}^T$ ($1 \leq i, j, k \leq r$)이 존재하면, 연속시간 T-S 퍼지 시스템 (1)의 평형점은 점근적으로 안정화 가능하다. 여기서

$$\Psi_{ijk} = PA_i + A_i^T P + B_i N_j C_k + C_k^T N_j^T B_i^T - Z_{ijk} \quad (9)$$

$$\Theta_{ijk} = PB_i - B_i M + \alpha C_k^T N_j^T \quad (10)$$

$$\Pi = -\alpha M - \alpha M^T \quad (11)$$

이다. 더욱이 제어이득은

$$K_i = M^{-1} N_i, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (12)$$

이다.

증명: 리아프노프 함수 후보로

$$V(x(t)) = x^T(t) P x(t), \quad P > 0 \quad (13)$$

을 선택하고, 이 함수의 시간에 대한 미분이 모든 $x(t) \neq 0$ 에 대하여 '0'보다 작으면, T-S 퍼지 시스템의 평형점은 점근적으로 안정하다. 즉,

$$\dot{V}(x(t)) = x^T(t) \left[\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_i h_j h_k (P \tilde{A}_{ijk} + \tilde{A}_{ijk}^T P) \right] x(t) < 0, \quad \forall x(t) \neq 0 \quad (14)$$

이고, (14)는

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_i h_j h_k (P \tilde{A}_{ijk} + \tilde{A}_{ijk}^T P) < 0 \quad (15)$$

와 등가이므로, (15)를 만족함을 보이면 증명은 완성된다. 먼저 $i = j = k$ 인 경우 (5)의 선형행렬부등식을 고려한다. (5)의 앞과 뒤에

$$\begin{bmatrix} I \\ K_i C_i \end{bmatrix}^T, \quad \begin{bmatrix} I \\ K_i C_i \end{bmatrix}$$

을 각각 곱하면

$$P \tilde{A}_{iii} + \tilde{A}_{iii}^T P - Z_{iii} < 0 \quad (16)$$

이다. (6)의 선형행렬부등식의 앞과 뒤에

$$\begin{bmatrix} I \\ K_j C_j \\ K_j C_i \\ K_i C_i \end{bmatrix}^T, \quad \begin{bmatrix} I \\ K_j C_j \\ K_j C_i \\ K_i C_i \end{bmatrix}$$

을 각각 곱하면

$$P \tilde{A}_{ijj} + \tilde{A}_{ijj}^T P + P \tilde{A}_{jii} + \tilde{A}_{jii}^T P + P \tilde{A}_{jii} + \tilde{A}_{jii}^T P - Z_{ijj} - Z_{jii} - Z_{jii} < 0 \quad (17)$$

이다. (7)의 선형행렬부등식도 마찬가지로 앞과 뒤에

$$\begin{bmatrix} I \\ K_j C_k \\ K_k C_j \\ K_k C_i \\ K_i C_k \\ K_i C_j \\ K_j C_i \end{bmatrix}^T, \quad \begin{bmatrix} I \\ K_j C_k \\ K_k C_j \\ K_k C_i \\ K_i C_k \\ K_i C_j \\ K_j C_i \end{bmatrix}$$

을 각각 곱하면

$$P \tilde{A}_{ijk} + \tilde{A}_{ijk}^T P + P \tilde{A}_{ikj} + \tilde{A}_{ikj}^T P + P \tilde{A}_{jki} + \tilde{A}_{jki}^T P + P \tilde{A}_{jik} + \tilde{A}_{jik}^T P + P \tilde{A}_{kij} + \tilde{A}_{kij}^T P + P \tilde{A}_{kji} + \tilde{A}_{kji}^T P - Z_{ijk} - Z_{ikj} - Z_{jki} - Z_{jik} - Z_{kij} - Z_{kji} < 0 \quad (18)$$

이다. (15)로부터

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_i h_j h_k (P\tilde{A}_{ijk} + \tilde{A}_{ijk}^T P) \\ &= \sum_{i=1}^r h_i^3 (P\tilde{A}_{iii} + \tilde{A}_{iii}^T P) \\ & \quad + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i^2 h_j (P\tilde{A}_{ijj} + \tilde{A}_{ijj}^T P + P\tilde{A}_{iji} \\ & \quad \quad + \tilde{A}_{iji}^T P + P\tilde{A}_{jii} + \tilde{A}_{jii}^T P) \\ & \quad + \sum_{i=1}^r \sum_{j=i+1}^r \sum_{k=j+1}^r h_i h_j h_k (P\tilde{A}_{ijk} + \tilde{A}_{ijk}^T P \\ & \quad \quad + P\tilde{A}_{ikj} + \tilde{A}_{ikj}^T P + P\tilde{A}_{jki} + \tilde{A}_{jki}^T P + P\tilde{A}_{jik} \\ & \quad \quad + \tilde{A}_{jik}^T P + P\tilde{A}_{kij} + \tilde{A}_{kij}^T P + P\tilde{A}_{kji} + \tilde{A}_{kji}^T P) \end{aligned}$$

이고, (16)에서 (18)로부터

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_i h_j h_k (P\tilde{A}_{ijk} + \tilde{A}_{ijk}^T P) \\ & < \sum_{i=1}^r h_i^3 Z_{iii} + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i^2 h_j (Z_{ijj} + Z_{iji} + Z_{jii}) \\ & \quad + \sum_{i=1}^r \sum_{j=i+1}^r \sum_{k=j+1}^r h_i h_j h_k \\ & \quad \quad \times (Z_{ijk} + Z_{ikj} + Z_{jki} + Z_{jik} + Z_{kij} + Z_{kji}) \\ &= \begin{bmatrix} h_1 I \\ h_2 I \\ \vdots \\ h_r I \end{bmatrix}^T \left(\sum_{i=1}^r h_i \begin{bmatrix} Z_{i11} & Z_{i12} & \cdots & Z_{i1r} \\ Z_{i21} & Z_{i22} & \cdots & Z_{i2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{ir1} & Z_{ir2} & \cdots & Z_{irr} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} h_1 I \\ h_2 I \\ \vdots \\ h_r I \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이므로, 선형행렬부등식 (8)로부터 $\dot{V}(x(t)) < 0$ 이다. ■

참고 1: [20]의 정리 3의 선형행렬부등식 (25)를 다시 쓰면

$$\begin{bmatrix} \Psi_{iii} & C_i^T N_i^T & PB_i - B_i M \\ N_i C_i & -R & 0 \\ B_i^T P - M^T B_i^T & 0 & \alpha^2 R - \alpha M - \alpha M^T \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

이고, 이 부등식의 앞과 뒤에

$$\begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & \alpha I & I \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & \alpha I & I \end{bmatrix}^T$$

을 각각 곱하면,

$$\begin{bmatrix} \Psi_{iii} & PB_i - B_i M + \alpha C_i^T N_i^T \\ B_i^T P - M^T B_i^T + \alpha N_i C_i & -\alpha M - \alpha M^T \end{bmatrix} < 0 \quad (20)$$

이다. 이는 (19)의 선형행렬부등식을 만족하면 (20)의 선형행렬부등식을 만족한다는 의미이므로, (19)는 (20)의 충분조건이다. 그리고 [20]의 정리 3의 선형행렬부등식 (26)과 (27)도 마찬가지로 본 논문의 정리 1의 (6)와 (7)의 충분조건이다. 따라서 정리 1은 [20]의 정리 3을 포함한다.

정적 출력제한 제어기 설계에 대한 정리 1은 충분조건으로, (15)를 이용한 것이다. 행렬부등식 (15)의 앞과 뒤에 $Q = P^{-1}$ 를 곱하면

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_i h_j h_k (\tilde{A}_{ijk} Q + Q \tilde{A}_{ijk}^T) < 0 \quad (21)$$

이고, (21)을 만족하는 선형행렬부등식 조건을 다음 정리에 나타낸다.

정리 2: 어떤 양의 실수 α 에 대하여, 선형행렬부등식

$$\begin{bmatrix} \Phi_{iii} & \Gamma_{iii} \\ \Gamma_{iii}^T & \Xi \end{bmatrix} < 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ijj} + \Phi_{jji} + \Phi_{jii} & \Gamma_{ijj} & \Gamma_{iji} & \Gamma_{jii} \\ \Gamma_{ijj}^T & \Xi & 0 & 0 \\ \Gamma_{iji}^T & 0 & \Xi & 0 \\ \Gamma_{jii}^T & 0 & 0 & \Xi \end{bmatrix} < 0, \quad 1 \leq i \neq j \leq r \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ijk} + \Phi_{ikj} \\ + \Phi_{jki} + \Phi_{jik} \\ \Phi_{kij} + \Phi_{kji} \end{bmatrix} \begin{matrix} \Gamma_{ijk} & \Gamma_{ikj} & \Gamma_{jki} & \Gamma_{jik} & \Gamma_{kij} & \Gamma_{kji} \\ \Gamma_{ijk}^T & \Xi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Gamma_{ikj}^T & 0 & \Xi & 0 & 0 & 0 \\ \Gamma_{jki}^T & 0 & 0 & \Xi & 0 & 0 \\ \Gamma_{jik}^T & 0 & 0 & 0 & \Xi & 0 \\ \Gamma_{kij}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & \Xi \\ \Gamma_{kji}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & \Xi \end{matrix} < 0, \quad (24)$$

$i = 1, 2, \dots, r-2, \quad j = i+1, \dots, r-1, \quad k = j+1, \dots, r$

$$\begin{bmatrix} Y_{i11} & Y_{i12} & \cdots & Y_{i1r} \\ Y_{i21} & Y_{i22} & \cdots & Y_{i2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{ir1} & Y_{ir2} & \cdots & Y_{irr} \end{bmatrix} < 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (25)$$

을 만족하는 양정의 대칭행렬 Q 와 행렬 \tilde{M}, \tilde{N}_i ($i = 1, 2, \dots, r$), $Y_{ijk} = Y_{ikj}^T$ ($1 \leq i, j, k \leq r$)이 존재하면, 연속 시간 T-S 퍼지 시스템 (1)의 평형점은 점근적으로 안정화 가능하다. 여기서

$$\Phi_{ijk} = A_i Q + Q A_i^T + B_i \tilde{N}_j C_k + C_k^T \tilde{N}_j^T B_i^T - Y_{ijk} \quad (26)$$

$$\Gamma_{ijk} = Q C_k^T - C_k^T \tilde{M}^T + \alpha B_i \tilde{N}_j \quad (27)$$

$$\Xi = -\alpha \tilde{M} - \alpha \tilde{M}^T \quad (28)$$

이다. 더욱이 제어이득은

$$K_i = \tilde{N}_i \tilde{M}^{-1}, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (29)$$

이다.

증명: 정리 1의 증명과 유사한 방법으로 쉽게 증명이 되므로 생략한다. ■

IV. 수치예제

본 논문의 결과의 타당성을 검증하기 위해, 퍼지 룰이 4개인 T-S 퍼지 시스템

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & b & -0.1 \\ 1 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & -0.3 & 0 \\ 0 & 0 & b & -1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.9b & -0.1 \\ 1 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & -0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9b & -1 \end{bmatrix}, \\ A_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & b & -0.1 \\ 1 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -0.3 & 0 \\ 0 & 0 & b & -1 \end{bmatrix}, \quad A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.9b & -0.1 \\ 1 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9b & -1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 1+a^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_3 = B_4 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1+a^2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, C_3 = C_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

에 대한 제어기를 설계한다. $a = 1.4$, $b = 1$ 일 때, $\alpha = 0.001$ 라 두고 정리 1을 이용한 정적 출력제한 제어기 특은

$$K_1 = [-0.2155 \quad -2.2168],$$

$$K_2 = [-0.2208 \quad -2.2607],$$

$$K_3 = [-0.5595 \quad -3.8670],$$

$$K_4 = [-0.5364 \quad -3.6888]$$

이다. 만약 [15]의 정리 9를 이용한다면, 등호조건 $PB_i = B_i M$ 을 만족해야 하므로 대칭행렬 $P > 0$ 는

$$P = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & p_{34} \\ 0 & 0 & p_{34} & p_{44} \end{bmatrix}$$

이다. 즉, 미지의 변수가 $m, p_{33}, p_{34}, p_{44}$ 로 4 개이지만, [20]과 본 논문에서는 $P > 0$ 는 대칭행렬이므로 변수가 10 개이다. 그림 1은 a 와 b 의 변화에 따라, [15]의 정리 9, [20]의 정리 3, 본 논문의 정리 1을 이용하여 안정화 제어기 설계가 가능한지를 파악한 것이다. 표시($\bullet, +, \circ$)는 각 정리에서 제시한 선형행렬부등식의 해가 존재하는 경우를 나타낸 것이고, [15]보다 [20]의 조건을 이용하는 것이, [20]보다 본 논문의 조건을 이용하는 것이 안정화 제어기를 설계할 가능성이 높다는 것을 보여준다. 이는 본 논문의 정리 1이 기존의 방법보다 완화된 충분조건이라는 것을 보이는 한 예이다.

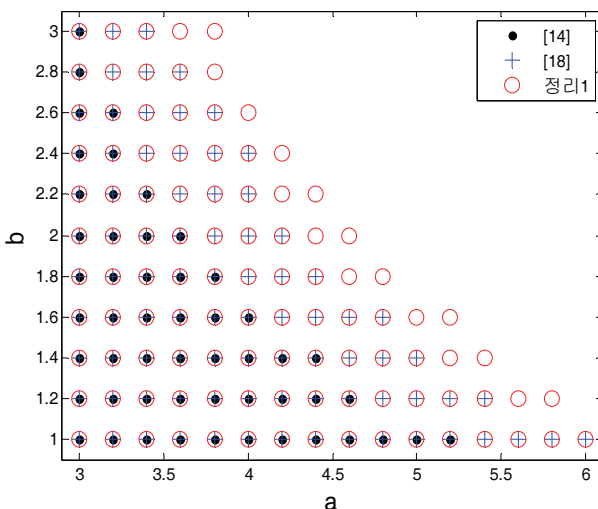


그림 1. 안정화 영역.
Fig. 1. Stabilization Region.

V. 결론

본 논문에서는 연속시간 T-S 퍼지 시스템에 대하여, 그 평형점을 점근적으로 안정화 시키는 정적 출력제한 제어가 존재할 충분조건을 선형행렬부등식으로 나타내었다. 제시한 충분조건이 기존의 조건[20] 보다 완화된 조건임을 보였고, 예제를 통하여 확인하였다.

REFERENCES

- [1] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics*, vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [2] H. Wang, K. Tanaka, and M. Griffin, "Parallel distributed compensation of nonlinear systems by Takagi and Sugeno's fuzzy model," in *Proc. FUZZ-IEEE*, Yokohama, Japan, pp. 531-538, 1995.
- [3] H. O. Wang, K. Tanaka, and M. F. Griffin, "An approach to fuzzy control of nonlinear systems: Stability and design issues," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 14-23, Feb. 1996.
- [4] E. Kim and H. Lee, "New approaches to relaxed quadratic stability condition of fuzzy control systems," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 8, no. 5, pp. 523-534, Oct. 2000.
- [5] X. Liu and Q. Zang, "Approaches to Quadratic Stability Conditions and H_∞ Control Designs for T-S Fuzzy Systems," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 11, no. 6, pp. 830-839, Dec. 2003.
- [6] D. Lee, H. C. Sung, and Y. H. Joo, "Fuzzy modeling and robust stability analysis of wind farm based on prediction model for wind speed," *J. Institute of Control, Robotics and Systems(in Korean)*, vol. 20, no. 1, pp. 22-28, 2014.
- [7] X.-J. Ma and Z.-Q. Sun, "Analysis and design of fuzzy reduced-dimensional observer and fuzzy functional observer," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 120, pp. 35-63, 2001.
- [8] 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 Systems*, vol. 8, no. 6, pp. 657-664, Dec. 2000.
- [9] V. L. Syrmos, C. T. Abdallah, P. Dorato, and K. Grigoriadis, "Static output feedback - a survey," *Automatica*, vol. 33, no. 2, pp. 125-137, 1997.
- [10] L. E. Ghaoui, F. Oustry, and M. AitRami, "A cone complementarity linearization algorithm for static output-feedback and related problems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 42, no. 8, Aug. 1997.
- [11] M. Nachidi, A. Benzaouia, F. Tadeo, and M. A. Rami, "LMI-based approach for output-feedback stabilization for discrete-time Takagi-Sugeno systems," *IEEE Trans. Fuzzy*

- Systems*, vol. 16, no. 5, pp. 1188-1196, Oct. 2008.
- [12] M. Nachidi, F. Tadeo, A. Benzaouia, and M. A. Rami, "Static output-feedback for Tagaki-Sugeno systems with delays," *Int. J. Adaptive Control & Signal Processing*, vol. 25, pp. 295-312, 2011.
- [13] J.-C. Lo and M.-L. Lin, "Robust H_∞ nonlinear control via fuzzy static output feedback," *IEEE Trans. Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 50, no. 11, pp. 1494-1502, 2003.
- [14] W. Chang, J. B. Park, Y. H. Joo, and G. Chen, "Static output-feedback fuzzy controller for Chen's chaotic system with uncertainties," *Information Sciences*, vol. 151, pp. 227-244, 2003.
- [15] C.-H. Fang, Y.-S. Liu, S.-W. Kau, L. Hong, and C.-H. Lee, "A new LMI-based approach to relaxed quadratic stabilization of T-S fuzzy control systems," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 386-397, Jun. 2006.
- [16] S. C. Jee, J. H. Moon, and H. J. Lee, "Static output-feedback-based robust fault tolerant controller design," *J. Institute of Control, Robotics and Systems(in Korean)*, vol. 19, no. 7, pp. 587-591, 2013.
- [17] S.-W. Kau, H. J. Lee, C.-M. Yang, C.-H. Lee, L. Hong, and C.-H. Fang, "Robust H_∞ fuzzy static output feedback control of T-S fuzzy systems with parametric uncertainties," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 158, pp. 135-146, 2007.
- [18] H. J. Lee and D. W. Kim, "Robust stabilization of T-S fuzzy systems: Fuzzy static output feedback under parametric uncertainty," *Int. J. Control, Automation, and Systems*, vol. 7, no. 5, pp. 731-736, 2009.
- [19] G. B. Koo, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Robust fuzzy controller for Large-scale nonlinear systems using decentralized static output feedback," *Int. J. Control, Automation, and Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 649-658, 2011.
- [20] E. T. Jeung and K. R. Lee, "Static output feedback control for continuous-time T-S fuzzy systems: An LMI approach," *Int. J. Control, Automation, and Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 703-708, 2014.

정 은 태

제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지, 제20권 제3호 참조.