

# 이산시간 퍼지 다개체 시스템의 상태일치 기반 대형 추종 제어기

## Consensus-Based Formation Tracking of Fuzzy Multi-Agent Systems

문지현\* · 지성철\* · 이호재†  
(Ji Hyun Moon · Sung Chul Jee · Ho Jae Lee)

**Abstract** - This paper addresses a design technique for formation tracking controllers of discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy multi-agent systems based on consensus. The interconnection topology among the agents is expressed as a digraph. The design condition is represented in terms of linear matrix inequalities. Numerical example demonstrates the effectiveness of the proposed method.

**Key Words** : Multi-agent system, State consensus, Takagi-Sugeno fuzzy system, Linear matrix inequality, Firing strength, Trajectory tracking controller

### 1. 서론

다개체(multi-agent) 시스템이란 단일 개체만으로는 완수하기 어렵거나 장시간이 소요되는 작업을 다개체가 효율적으로 처리하여 단일 개체 이상의 성능을 발휘하는 시스템이다. 다개체 시스템은 네트워크를 통하여 다개체의 정보를 수집하여 각 개체에 할당된 분할된 임무를 수행함으로써 전체 목표를 달성한다. 이러한 동작 행태는 자연계에서도 쉽게 발견할 수 있는데, 그 예로 물고기나 새들은 군집이동에 의해 먹이를 쉽게 확보하고 개별 개체의 에너지 소비를 줄임으로써 단일 개체보다 효과적으로 생존한다.

군집이동을 위한 대형제어(formation control) 방식은 크게 행동기반(behavior-based) 접근법, 가상구조(virtual structure) 접근법, 선도-추종(leader-following) 접근법, 상태일치(consensus) 접근법으로 분류할 수 있다. 행동기반 접근법은 장애물 회피 또는 목표지점에서의 이동 등의 행동의 목적에 따라 각 개체에 다른 가중치를 부여하여 제어하는 방식이다 [1]. 따라서 다양한 임무수행에 효과적이며, 분산제어 방식을 이용한다. 하지만 수식적 구현이 어려워 전체 대형의 안정도를 보장하기 어렵다. 가상구조 접근법은 먼저 원하는 형태의 가상구조를 하나의 강체(rigid body)로 가정하고 각 개체들이 이 구조의 움직임을 추종하는 제어방식이다 [2]. 대형을 유지하기 쉬운 장점이 있으나 분산제어가 어려우며 각 개체들간의 위치정보 전달을 위해 광대역 통신이 필요하다. 선도-추종 접근법은 미리 정해진 궤적을 갖는 선도 개체의 움직임을 추종 개체들이 따라가면서 대형을 유지하는 제어방식이다 [3]. 다른 제어기법들보다 개념을 이해하기 쉽고 확장이 용이하다. 하지만 선도 개체에 대한 추종 개체의 피드

백이 없어, 만약 추종 개체가 고장난다면 대형을 유지하기 어려우며 반대로 선도 개체가 고장나면 전체 대형이 마비된다. 상태일치 접근법에서는 네트워크를 유향그래프(digraph)로 나타낸다. 각 개체들은 모든 개체들의 정보를 수집하지 않으며 네트워크 내에서 직접 연결된 개체들의 정보만을 수집하기 때문에 넓은 통신대역이 필요하지 않다는 장점이 있다 [4, 5]. 그러나 관련 연구들은 대부분 개체가 선형 동역학으로 표현된 경우이다 [6-9]. 하지만 실제로 개체는 비선형 시스템인 경우가 많다 [10].

타카기-수게노(Takagi-Sugeno: T-S) 퍼지모델은 비선형 제어에 매우 효과적인 기법으로 알려져 있다 [11]. 그러나 T-S 퍼지모델 기반 비선형 다개체 시스템의 연구는 미진한 상황이다. 그 이유는 그래프 이론 기반 접근법에 의하여 구성된 대형의 동역학은 행렬 형태의 발화도를 갖게 됨에 있다.

본 논문에서는 그래프 이론을 접근법에 의한 상태일치에 기반한 대형 제어 기법을 논한다. 각 개체는 T-S 퍼지모델 형태의 비선형 시스템을 가정한다. 다개체 시스템의 안정도를 보장하는 퍼지제어기의 설계조건을 선형행렬부등식(linear matrix inequality: LMI)로 표현한다. 또한 다개체 시스템이 대형을 이루도록 하는 추종 제어를 설계한다. 수치적 예제를 통해 제안한 기법의 효용성을 입증한다.

### 2. 사전지식

그래프는  $G := \{\mathcal{V}, \mathcal{E}\}$ 로 표현한다. 여기서  $\mathcal{V} := \{1, 2, \dots, q\}$ 는 노드(node)의 유한한 집합이며  $\mathcal{E}$ 는  $(g, h) \in \mathcal{V}$ 로 구성된 엣지(edge)의 집합이다. 그래프에서 노드는 다개체 시스템의 개체를 의미하고 엣지는 두 개체 사이의 통신 여부 및 방향을 나타낸다. 경로(path)는 서로 겹치지 않는 엣지이거나 또는 그러한 엣지들을 순차적으로 나열한 것이다.

각 엣지를 구성하는 두 노드는 서로 인접(adjacent)하다고 하며, 이에 대한 인접행렬(adjacent matrix)  $\mathcal{A} = [a_{kl}] \in \mathbb{R}^{q \times q}$ 을 정의할 수 있는데, 여기서  $a_{kl}$ 는  $(l, k) \in \mathcal{E}$ 인 경우 1로,

† Corresponding Author : Dept. of Electronic Engineering,  
Inha University, Incheon, Korea  
E-mail : mylchi@inha.ac.kr

\* Dept. of Electronic Engineering, Inha University, Incheon,  
Korea.

Received : March 13, 2014; Accepted : May 23, 2014

$(l, k) \notin \mathcal{E}$ 인 경우 0으로 정의한다.  $\mathcal{G}$ 는 라플라시안 행렬(Laplacian matrix)  $[l_{kl}]_{q \times q} = \mathcal{L} := \mathcal{D} - \mathcal{A}$ 로 다개체 시스템의 네트워크를 나타낼 수 있다. 여기서 차수행렬(degree matrix)  $\mathcal{D} \in \mathbb{R}^{q \times q}$ 는 대각행렬이며  $k$ 번째 노드로 들어오는 엣지의 개수를 원소로 갖는다.

그래프에서 모든 노드로 정보를 전달할 수 있는 노드가 한 개 이상 존재한다면 그 그래프는 표면적으로 강하게 연결(quasi-strongly connected)되어 있다고 하며 그 경로들의 집합을 신장트리(spanning tree)라고 한다. 신장트리가 모든 노드를 포함하고 있다면 그 그래프는 강하게 연결(strongly connected)되어 있다고 한다.

$\mathcal{L}$ 은 도식화되어 있는 각 개체들의 연결상태를 수식적으로 표현하는데 용이하다.  $\mathcal{L}$ 의 각 행의 합은 언제나 0이므로 고유벡터가  $\mathbf{1}_Q := (1, 1, \dots, 1) \in \mathbb{R}^q$ 인 고유값 0을 최소한 한 개 이상 갖는다. 0을 제외한 나머지 고유값들의 위치는 거쉬고린의 정리(Gershgorin's theorem)에 의하여 복소수 평면의 우반면에 존재한다. 특히 그래프가 신장트리를 포함하고 있다면  $\mathcal{L}$ 은 고유값  $\lambda_1(\mathcal{L}) = 0$ 을 오직 한 개만 갖는다 [12].

$\otimes$ 는 크로넥커 곱(Kronecker product)이며 적절한 차원의 행렬  $A = [a_{ij}]$ ,  $B$ 에 대하여  $A \otimes B := [a_{ij}B]$ 로 계산한다. 또한 다음과 같은 특성을 갖는다: 적절한 행렬  $W, X, Y, Z$ , 스칼라  $\alpha \in \mathbb{R}$ 에 대하여  $(X \otimes Y)(Z \otimes W) = XZ \otimes YW$ 이고  $\alpha(X \otimes Y) = (\alpha X) \otimes Y = X \otimes (\alpha Y)$ .

$k \in \{1, 2, \dots, q\} =: \mathcal{I}_Q$ 번째 개체가 다음의  $R^i$ : IF  $z_1$  is about  $\Gamma_1^i$  and  $\dots$  and  $z_p$  is about  $\Gamma_p^i$

THEN  $x_k^+ = A_i x_k + B u_k$

T-S 퍼지모델로 표현가능하며  $q$ 개의 개체로 구성된 다개체 시스템을 고려하자. 여기서  $i \in \{1, 2, \dots, r\} =: \mathcal{I}_R$ ,  $x_k \in \mathbb{R}^n$ 는 상태변수,  $u_k \in \mathbb{R}^m$ 는 제어입력이다.  $z_j$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, p\} =: \mathcal{I}_P$ 는 전반부 변수이며  $\Gamma_j^i$ 는  $i$ 번째 규칙에서  $j$ 번째 전반부변수의 퍼지집합이다. 싱글톤 퍼지화, 곱셈 추론, 중심값 평균 비퍼지화에 의하여  $k$ 번째 개체의 전역 동특성은 아래와 같이 표현된다.

$$x_k^+ = \sum_{i=1}^r \theta_{k_i} (A_i x_k + B u_k) \quad (1)$$

여기서

$$\theta_{k_i} := \frac{\prod_{j=1}^p \Gamma_j^i(z_{k_j})}{\sum_{i=1}^r \left( \prod_{j=1}^p \Gamma_j^i(z_{k_j}) \right)}$$

이며  $\Gamma_j^i(z_{k_j})$ 는  $k$ 번째 개체 내에서  $j$ 번째 전반부 변수  $z_{k_j}$ 의 퍼지집합  $\Gamma_j^i$ 에 대한 소속도를 나타낸다.

(1)의 형태의  $q$ 개의 개체의 네트워크는 그래프  $\mathcal{G}$ 로 표현된다.

**가정 1:** (1)은 안정하다.

**가정 2:**  $(A_i, B)$ ,  $i \in \mathcal{I}_R$ 는 제어가 가능하며  $B$ 는 전행계수(full row rank)를 갖는다.

**가정 3:**  $\mathcal{G}$ 는 신장트리를 포함한다.

**참고 1:**  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 가 전행계수를 갖는다면, 다음을 만족하는 유사역행렬(pseudo inverse matrix)  $B^\dagger = B^T(BB^T)^{-1}$ 가 존재한다.

$$BB^\dagger = I_n$$

여기서  $I_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 항등행렬이다.

**참고 2:**  $\mathcal{G}$ 가 신장트리를 포함한다는 것은  $\mathcal{G}$ 내에서 모든 노드에 정보를 전달할 수 있는 적절한 노드가 한 개 이상 존재한다는 것을 의미한다.

### 3. 퍼지 다개체 시스템의 대형 추종제어

대형을 형성한  $k$ 번째 개체의 추종신호  $r_k^*$ 를 다음과 같이 설정하자.

$$r_k^* = r_0 + s_k, \quad k \in \mathcal{I}_Q$$

여기서  $r_0$ 은 공통 추종신호이고,  $s_k$ 는  $r_0$ 에서  $k$ 번째 개체까지의 상대 위치이다.

**정의 1:** 임의의 초기값  $x_k(0) \in \mathbb{R}^n$ 와  $r_k^*$ 에 대해서

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_k(t) - r_k^*(t)) = 0 \quad (2)$$

이면 다개체 시스템은 점근적으로 대형을 이루어 추종신호를 추종한다.

다음의 퍼지 제어를 도입하자.

$$u_k = \sum_{i=1}^r \theta_{k_i} \left( F_i \sum_{l=1}^q l_{kl} (x_k - r_k^* - (x_l - r_l^*)) - B^\dagger A_i r_k^* \right) + B^\dagger \dot{r}_k^* \quad (3)$$

여기서  $F_i$ ,  $i \in \mathcal{I}_R$ 는 제어이득 행렬이다.  $x := [x_1^T, x_2^T, \dots, x_q^T]^T$ ,  $u := [u_1^T, u_2^T, \dots, u_q^T]^T$ 와  $r^* := [r_1^{*T}, r_2^{*T}, \dots, r_q^{*T}]^T$ 를 정의하면 (3)은 다음과 같이 축약하여 표시할 수 있다.

$$u = - \sum_{i=1}^r (\Theta_i \otimes I_m) \left( (\mathcal{L} \otimes F_i)(x - r^*) - (I_q \otimes B^\dagger A_i) r^* \right) + (I_q \otimes B^\dagger) \dot{r}^*$$

여기서  $\Theta_i := \text{diag}\{\theta_{1_i}, \theta_{2_i}, \dots, \theta_{q_i}\}$ 다.

$k$ 번째 개체의 추종오차  $e_k := x_k - r_k^*$ 를 정의하면  $e := [e_1^T, e_2^T, \dots, e_q^T]^T$ 에 대한 동역학은 다음과 같다.

$$\dot{e}^+ = \sum_{i=1}^r (\Theta_i \otimes I_n) (I_q \otimes A_i - \mathcal{L} \otimes B F_i) e \quad (4)$$

가정 3에 의해  $\mathcal{L}$ 의 고유값  $\lambda_1(\mathcal{L}) = 0$ 에 대응하는 고유벡터는  $\mathbf{1}_Q$ 이므로 다음을 만족하는 비특이행렬  $V \in \mathbb{C}^{q \times q}$ 가 존재한다.

$$V^{-1} \mathcal{L} V = J_{\mathcal{L}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & \Delta & \\ 0 & & & \end{bmatrix}, \quad V = [1_Q \quad W]$$

여기서  $\Delta \in \mathbb{C}^{(q-1) \times (q-1)}$ 는 고유값  $\lambda_1(\mathcal{L}) = 0$ 을 제외한 나머지 고유값들을 원소로 갖는 대각행렬이고,  $W \in \mathbb{C}^{q \times (q-1)}$ 는 이에 대응되는 고유벡터로 이루어진 행렬이다[7].

다개체 시스템의 각 개체가 모두 추종신호에 도달했을 때의 발화도를  $\tilde{\Theta}_i = \tilde{\theta}_i I_q$ 로 가정하면 (4)는 다음식과 동가이다.

$$e^+ = \sum_{i=1}^r (\tilde{\Theta}_i \otimes I_n)(I_q \otimes A_i - \mathcal{L} \otimes BF_i)e + p(e) \quad (5)$$

여기서

$$p(e) = \sum_{i=1}^r ((\Theta_i - \tilde{\Theta}_i) \otimes I_n)(I_q \otimes A_i - \mathcal{L} \otimes BF_i)e$$

(5)는 좌표변환  $\tilde{e} := (V^{-1} \otimes I_n)e$ 에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{e}^+ = \sum_{i=1}^r (\tilde{\Theta}_i \otimes I_n)(I_q \otimes A_i - J_{\mathcal{L}} \otimes BF_i)\tilde{e} + p(\tilde{e}) \quad (6)$$

여기서

$$p(\tilde{e}) = \sum_{i=1}^r (V^{-1} \otimes I_n)((\Theta_i - \tilde{\Theta}_i) \otimes I_n) \times (I_q \otimes A_i - J_{\mathcal{L}} \otimes BF_i)(V \otimes I_n)\tilde{e} \quad (7)$$

**참고 3:** T-S 퍼지 시스템은 입력값의 논의 영역(universe of discourse)을 기반으로 한 일종의 범용 근사법(universal approximator)이다. 즉, 상태변수  $x_k$ 를 전반부 변수  $z_k$ 로 사상(map)하는 단사(one-to-one)함수가 존재하며,

$\|\tilde{e}\| \rightarrow 0$ 일 때  $\|[\theta_{k_i}]_{r \times 1} - [\tilde{\theta}_i]_{r \times 1}\| \rightarrow 0$ 이다. 따라서 섭동  $\|p(\tilde{e})\| \rightarrow 0$ 임을 관찰할 수 있다.

**보조정리 1:** 섭동이 존재하지 않는 경우, 다음의 시스템

$$\tilde{e}^+ = \sum_{i=1}^r (\tilde{\Theta}_i^{\Delta} \otimes I_n)(I_{q-1} \otimes A_i - \Delta \otimes BF_i)\tilde{e}$$

이 지수적으로 안정하다면 (1)은 점근적으로 대형을 이루며 궤적을 추종한다.

증명: 섭동이 존재하지 않는 경우, 좌표변환된 다개체 시스템 (6)은 다음의 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} \tilde{e}^+ &= \sum_{i=1}^r (\tilde{\Theta}_i \otimes I_n)((I_q \otimes A_i - J_{\mathcal{L}} \otimes BF_i))\tilde{e} \\ &= \sum_{i=1}^r \theta_i [I_q \otimes A_i - J_{\mathcal{L}} \otimes BF_i]\tilde{e} \\ &= \sum_{i=1}^r \theta_i \begin{bmatrix} A_i & 0_{n \times n(q-1)} \\ 0_{n(q-1) \times n} & I_{q-1} \otimes A_i - \Delta \otimes BF_i \end{bmatrix} \tilde{e} \end{aligned}$$

여기서  $0_{n \times n(q-1)} \in \mathbb{R}^{n \times n(q-1)}$ ,  $0_{n(q-1) \times n} \in \mathbb{R}^{n(q-1) \times n}$ 는 영행렬들이다. 모든  $i \in \mathcal{I}_R$ 에 대하여  $I_{q-1} \otimes A_i - \Delta \otimes BF_i = \text{blockdiag}\{A_i - \lambda_k(L)BY_iP\}$ ,  $i \in \mathcal{I}_R$ 가 안정하다면  $t \rightarrow \infty$ 일 때  $\tilde{e}_{n+1, nq} \rightarrow 0$ 이다. 여기서  $\tilde{e}_{n+1, nq}$ 는  $\tilde{e}$ 의  $n+1$ 번째부터  $nq$ 번째까지의 요소로 구성된 부벡터(subvector)이다. 가정 1에 따라  $\tilde{e}_{1, n} \rightarrow 0$ 이므로 다음의 조건이 만족한다.

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{x} - \tilde{r}^*) \rightarrow 0 &\Leftrightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} (V^{-1} \otimes I_n)(x - r^*) \rightarrow 0 \\ &\Leftrightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} (x_k - (r_0 + s_k)) \rightarrow 0 \\ &\Leftrightarrow (2) \end{aligned}$$

따라서 (1)의  $x_k$ 는  $r_k$ 에 수렴한다.

다음 정리는 (1)의  $x_k$ 가  $r^*$ 를 추종하기 위한 제어기 설계 조건을 제시한다.

**정리 1:**  $\mathcal{L}$ 의 영 고유값을 제외한 모든 고유값  $\lambda_k(\mathcal{L}) = \sigma_k + j\omega_k$ 에 대하여 다음의 조건을 만족하는 적절한 차원의  $X_i$ ,  $i \in \mathcal{I}_R$ 와  $P = P^T > 0$ 가 존재하면 다개체 시스템 (1)은 대형을 이루며 궤적을 추종한다.

$$\begin{bmatrix} -I_n & * & * \\ \begin{pmatrix} A_i P \\ -\sigma_k(\mathcal{L})BX_i \\ 0_n \end{pmatrix} & -P & * \\ -\omega_k(\mathcal{L})BX_i & \omega_k(\mathcal{L})(BX_i)^T & -I_n \\ & & \begin{pmatrix} A_i P \\ -\sigma_k(\mathcal{L})BX_i \end{pmatrix} \end{bmatrix} \prec 0, \quad (i, k) \in \mathcal{I}_R \times (\mathcal{I}_Q \setminus \{1\}) \quad (8)$$

여기서  $X_i := F_i P$ 이다.

증명:  $v$ 에 대하여 다음 리아푸노프 함수  $V := v^*(I_q \otimes P^{-1})v$ 를 사용한다. 모든  $v \in \mathbb{R}^{nq}$ 에 대하여  $\Delta V < 0$ 는

$$\sum_{i=1}^r \tilde{\theta}_{k_i} \begin{bmatrix} -I_n & * \\ (A_i - \lambda_k(\mathcal{L})BF_i)P & -P \end{bmatrix} \prec 0$$

과 동가이며 동형사상(homeomorphism)에 의해 다음식과 같이 유도할 수 있다.

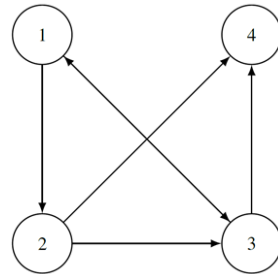
$$\sum_{i=1}^r \tilde{\theta}_{k_i} \mathcal{M}_{ik} \prec 0 \Leftrightarrow (8)$$

따라서 추종신호를 제외한 다개체 시스템은 보조정리 1을 만족한다.

**참고 4:**  $r^*$ 에서  $r_0$ 만 존재하는 경우 모든 개체는  $r_0$ 를 추종하며,  $s_k$ 만 존재하는 모든 개체는 정지된 대형을 형성한다.

#### 4. 예 제

동특성이 (1)로 표현되는 비선형 다개체 시스템을 고려하자. 각 개체들은 그림 1의 네트워크를 구성함을 가정한다.



**그림 1** 4개 개체의 네트워크를 나타내는 그래프  
**Fig. 1** Graph for the network of four-agent system

여기서

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.9512 & 0.0971 \\ 0 & 0.9900 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0.8780 & 0.0954 \\ -2.3852 & 0.8684 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0975 & 0.0049 \\ 0 & 0.0995 \end{bmatrix}$$

이고  $\Gamma_1^1(x_k^1) = \frac{x^2}{25}$ ,  $\Gamma_1^2(x_k^1) = 1 - \frac{x^2}{25}$ 이다. 각 개체들이 그림 1의 네트워크를 형성한다면 이 그래프는 다음과 같이 가정 3을 만족시키는 라플라시안 행렬을 구성한다.

$$\mathcal{L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

정리 1을 이용하여 설계된 제어이득은 다음과 같다.

$$F_1 = \begin{bmatrix} 4.8760 & 0.2475 \\ 0.0000 & 4.9750 \end{bmatrix}, \quad F_2 = \begin{bmatrix} 5.1029 & 0.2698 \\ -11.9856 & 4.3640 \end{bmatrix}$$

초기값을  $x_1(0) = [0, 1]^T, x_2(0) = [2, 0]^T, x_3(0) = [0, 3]^T, x_4(0) = [5, 0]^T$ 으로 설정하자. 추종신호는 다음과 같다.

$$r_0 = [\sin(0.05k) \quad \cos(0.05k)]^T,$$

$$s_1 = [1 \quad 2]^T, s_2 = [5 \quad 1]^T, s_3 = [2 \quad 6]^T, s_4 = [6 \quad 5]^T$$

그림 2에서 다개체 시스템의 상태가  $s_k, k \in \mathcal{I}_Q$ 로 표현된 대형을 이루어  $r_0$ 을 추종하는 모습을 확인할 수 있다. 참고 4에 언급했듯이,  $r_0$ 만 존재하는 경우 다개체 시스템이  $r_0$ 로 상태일치됨을 그림 3에서 확인할 수 있다. 그림 4는  $s_k$ 만 존재하는 경우 다개체 시스템이 대형을 이루는 모습을 보인다.

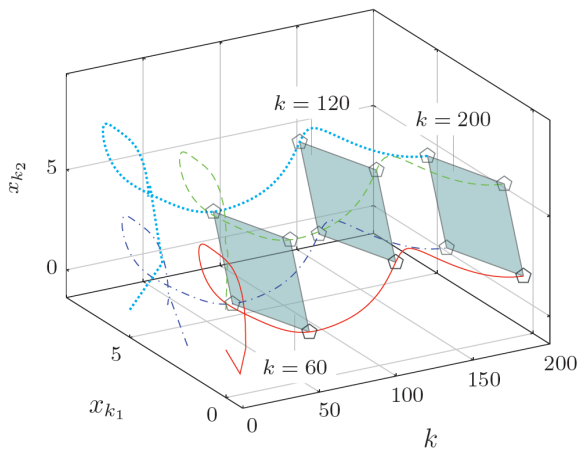


그림 2 대형 추종 (적색 실선: 1번째 개체, 청색 일점쇄선: 2번째 개체, 녹색 파선: 3번째 개체, 하늘색 점선: 4번째 개체)

Fig. 2 State tracking control

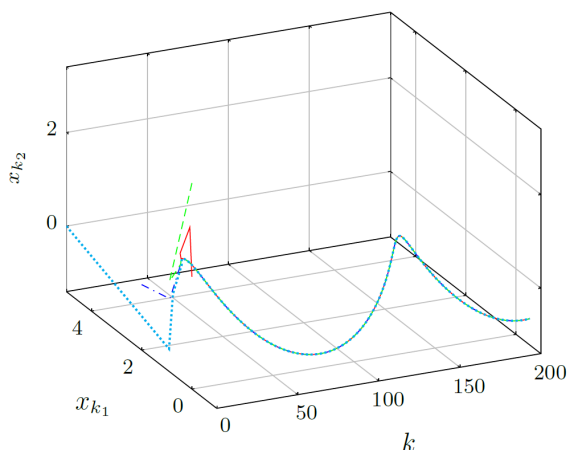


그림 3 상태일치 궤도 추종 (적색 실선: 1번째 개체, 청색 일점쇄선: 2번째 개체, 녹색 파선: 3번째 개체, 하늘색 점선: 4번째 개체)

Fig. 3 State tracking control without information of formation

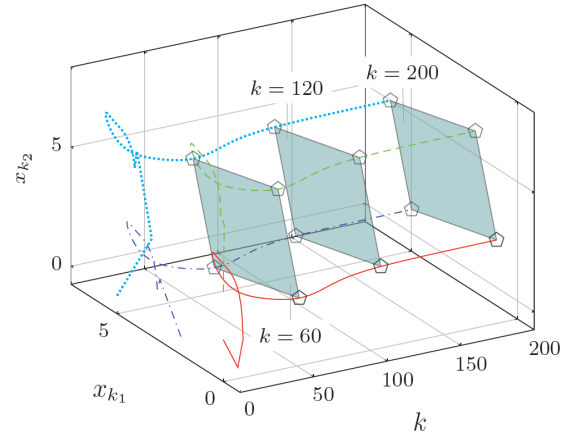


그림 4 대형 형성 (적색 실선: 1번째 개체, 청색 일점쇄선: 2번째 개체, 녹색 파선: 3번째 개체, 하늘색 점선: 4번째 개체)

Fig. 4 State tracking control without tracking reference

### 5. 결론

본 논문은 이산시간에서 상태일치에 기반한 퍼지 다개체 시스템의 추종 및 대형 제어기의 설계 기법을 논하였다. 퍼지 다개체 시스템에서 필수 불가결하게 생성되는 발화도 행렬로 인한 전역적 안정도 해석의 어려움을 논하였으며, 본문에서 이를 고려한 제어 알고리즘을 제시하였다. 설계조건은 선형행렬부등식으로 나타내었으며, 모의실험에서 상태일치 및 대형을 이루며 궤도를 추종하는 다개체 시스템의 모습을 검증하였다.

### 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2014R1A2A2A01005664).

### References

- [1] T. Balch and R. C. Arkin, "Behavior-based formation control for multirobot teams," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 14, no. 6, pp. 926-939, 1998.
- [2] P. O'gren, M. Egerstedt, and X. Hu, "A control lyapunov function approach to multiagent coordination," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 18, no. 5, pp. 847-851, 2002.
- [3] J. Shao, G. Xie, and L. Wang, "Leader-following formation control of multiple mobile vehicles," IET Control Theory and Applications, vol. 1, no. 2, pp. 545-552, 2007.
- [4] R. Olfati-Saber, A. Fax, and R. M. Murray, "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems," Proceedings of the IEEE, vol.

95, no. 1, pp. 215-233, 2007.

[5] P. Wieland, J.-S. Kim, and F. Allgower, "On topology and dynamics of consensus among linear high-order agents," *International Journal of Systems Science*, vol. 42, pp. 1831-1842, 2011.

[6] R. Olfati-Saber and R. M. Murray, "Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1520-1533, 2004.

[7] J. Lee, J.-S. Kim, and H. Shim, "Disc margins of the discrete-time lqr and its application to consensus problem," *International Journal of Systems Science*, vol. 43, no. 10, pp. 1891-1900, 2012.

[8] J. Wang, Z. Liu, and X. Hu, "Consensus of high order linear multi-agent systems using output error feedback," in *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on. IEEE, 2009*, pp. 3685-3690.

[9] P. Wieland, J. Kim, H. Scheu, and F. Allgower, "On consensus in multi-agent systems with linear high-order agents," in *Proc. 17th IFAC world congress, 2008*, pp. 1541-1546.

[10] H. J. Lee, J. B. Park, and G. Chen, "Robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 369-379, 2001.

[11] K. Tanaka, T. Ikeda, and H. Wang, "Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based designs," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 250-265, 1998.

[12] W. Ren, R. W. Beard, and E. M. Atkins, "Information consensus in multivehicle cooperative control," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 27, no. 2, pp. 71-82, 2007.



**지 성 철 (池 成 哲)**

2009년 인하대학교 전자공학부(공학사), 2011년 인하대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 2011년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 공장 진단 시스템, 퍼지 시스템, 디지털 제어 시스템.

E-mail : jeesch@inha.edu



**이 호 재 (李 皓 載)**

1998년 연세대학교 전기공학과(공학사), 2000년 연세대학교대학원 전기컴퓨터공학과(공학석사). 2004년 동 대학원 전기전자공학과(공학박사). 2005년 University of Houston, Houston, TX, USA 방문조교수. 현재 인하대학교 전자전기공학부 부교수. 관심분야는 비선형 샘플치 제어, 편대비행 제어, 디지털 재설계.

E-mail : mylchi@inha.ac.kr

**저 자 소 개**



**문 지 현 (文 智 鉉)**

2012년 인하대학교 전자공학부 (공학사), 2014년 인하대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 2014년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정. 관심분야는 퍼지제어, 디지털 재설계, 다개체 시스템

E-mail : moonjh87@gmail.com