



이산시간에서의 장주기모델에 관한 다개체시스템의 T-S 퍼지 군집제어

T-S Fuzzy Formation Controlling Phugoid Model-Based Multi-Agent Systems in Discrete Time

문지현* · 이재준* · 이호재*[†] · 김문환**

Ji Hyun Moon, Jaejun Lee, Ho Jae Lee[†], and Moon Hwan Kim

*인하대학교 전자공학과, **LIG 넥스원 해양연구소

[†]Department of Electronic Engineering, Inha University, ^{**}LIG Nex1 Maritime Research Center

요약

본 논문은 이산시간 장주기모델로 구성된 다개체시스템의 타카기-수게노(Takagi-Sugeno: T-S) 퍼지 군집제어 기법을 제안한다. 이산시간 모델은 오일러(Euler) 방법을 이용하여 유도한다. 이에 대한 T-S 퍼지 모델은 피드백 선형화 기법을 통해 구성하며, 이를 점근적으로 안정화하기 위한 퍼지제어기를 설계한다. 제어기 설계조건은 선형행렬부등식의 형태로 표현된다.

키워드: 다개체 시스템, 장주기모델, 이산시간, T-S 퍼지 시스템

Abstract

This paper addresses a formation control problem for a phugoid model-based multi-agent system in discrete time by using a Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model-based controller design technique. The concerned discrete-time model is obtained by Euler's method. A T-S fuzzy model is constructed through a feedback linearization. A fuzzy controller is then designed to stabilize the T-S fuzzy model. Design condition is presented in the linear matrix inequality format.

Key Words: Multi-agent System, Phugoid Model, Discrete Time, Takagi-Sugeno (T-S) Fuzzy Control

Received: May, 24, 2016

Revised: Aug, 9, 2016

Accepted: Aug, 10, 2016

[†]Corresponding authors

mylchi@inha.ac.kr

1. 서론

항공기가 수평 등속비행중인 상태를 평형상태라고 하며, 역학적으로는 트림(trim)상태라 한다. 이 때, 항공기는 일정한 고도와 속력을 유지하며 각운동은 발생하지 않는다. 항공기에는 롤링(rolling), 피칭(pitching), 요잉(yawing)의 세 가지 모멘트(moment)가 작용하는데, 각 모멘트들의 방향은 서로 직교하므로 한 모멘트의 발생이 다른 모멘트에 영향을 주지 않는다. 이 중에서 세로축(vertical axis) 운동에 영향을 미치는 모멘트는 피칭 모멘트이고, 세로축 운동의 안정성에 가장 중요한 요소는 받음각의 안정성이다. 비행시에 돌풍과 같은 외란에 의하여 받음각이 증가하고 세로축 운동이 비평형상태가 되었을 때, 안정성이 보장된 항공기는 트림상태로 복귀하기 위한 기수내림 피칭 모멘트가 발생한다. 이렇게 발생한 모멘트로부터 발생된 피칭의 진동은 2개의 감쇠진동 모드가 중첩되어있으며, 이에 대응되는 운동을 각각 단주기(short period mode)운동과 장주기(phugoid mode) 운동이라고 한다.

장주기운동은 수 분 동안 진동이 지속되며 [1], 항공기의 동역학 분석 및 제어기 설계에 활용된다. 최근 항공기의 동역학과 수중글라이더의 그것이 유사하다는 연구결과가 보고되어 [2,3] 항공공학에서 개발된 역학과 제어이론을 수중글라이더에 적용하는 연구가 진행중이다 [4]. 참고문헌 [5]에서는 장주기운동은 에너지가 보존된다는 특성과 해밀토니안(Hamiltonian) 기법을 이용하여 수중글라이더의 동역학을 해석하였다.

최근 다개체시스템(multi-agent systems)을 위한 제어 이론 연구가 활발하다 [6-8].

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

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.

다개체시스템이란 여러 개체들이 자신의 정보를 네트워크를 통하여 공유하는 시스템이다. 다개체시스템의 군집제어(formation control)란 다개체시스템에 속하는 개체들의 정보가 점근적으로 일치되도록 하는 제어이다. 이 개념은 자연에서 물고기나 새의 떼가 편대를 이루어 효율적으로 이동하는 현상에 착안한 개념이다. 군집제어는 리더(leader)가 존재하는 집중형(centralized)과 리더가 없는 분산형(decentralized)으로 구분 할 수 있다 [9]. 집중형의 경우 신뢰성이 높은리더가존재한다면 효율적인 임무수행이 가능하며, 제어기 설계단계에서의 수식적 접근 또한 명확하다. 하지만 리더에 고장이 발생하면 전체 다개체시스템의 군집 운영에 치명적 문제가 발생하며, 그 상황에 대처하기 위해 시간지연이 필수 불가결하다. 반면, 분산형은 각 개체의 고장이 전체 군집 운영에는 치명적인 영향을 끼치지 않는다는 장점을 보인다 [10,11].

본 논문은 이산시간 장주기모델로 구성된 다개체 시스템의 군집제어 방법을 개발한다. 장주기모델은 비선형 요소를 포함하며, 정현파의 궤적을 갖는다. 이를 제어하기 위해, 비선형 시스템을 효과적으로 표현할 수 있는 방법으로 잘 알려진 타카기수게노(Takagi-Sugeno: T-S) 퍼지모델을 도입한다. T-S 퍼지모델은 시스템의 국부적 선형입출력 관계로 표현되는 방정식들을 IF-THEN 규칙들의 비선형 결합으로 시스템의 전역 동특성을 나타내는 방법이다. 따라서 선형시스템 기반의 제어이론을 비선형시스템에 용이하게 적용시킬 수 있는 장점이 있다 [12].

다음 절에서는 란체스터의 장주기모델을 사용하여 개체의 위치를 표현하고 적절한 비선형제어기를 도입하여 추종신호의 오차에 대한 다개체시스템을 구성한다. 이후 T-S 퍼지모델을 유도하고 퍼지모델기반 군집제어기를 설계한다. 수치적 예제를 통해 논의의 효용성을 입증한다.

2. 장주기 모델기반 다개체시스템

먼저 식 (1)의 란체스터의 장주기모델[13]로 표현되는 개체를 생각하자.

$$\begin{cases} \dot{v} = -g \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{1}{mv} (Lv^2 - mg \cos \theta) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 V 는 개체의 속도(velocity), θ 는 경로각, L 은 양력계수(lift coefficient), g 는 중력가속도(acceleration of gravity)이며 m 은 개체의 질량이다. 그림 1은 장주기운동을 하는 개체를 도식적으로 나타낸 것이다. 직교좌표계(rectangular coordinate system)상에서 (1)에 대하여 개체의 동역학을 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

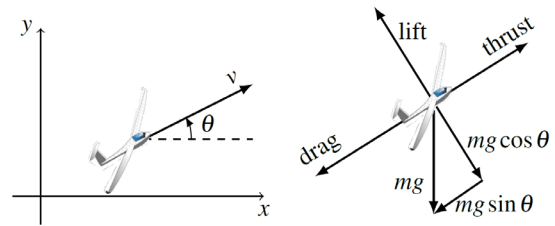


그림 1. 장주기모델
Fig. 1. Phugoid model

$$\begin{cases} \dot{X} = v \cos \theta \\ \dot{Y} = v \sin \theta \\ \dot{v} = -g \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{1}{mv} (Lv^2 - mg \cos \theta) \end{cases} \quad (2)$$

다음과 같이 새로운 상태변수 $x := (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \in \mathbb{R}^5$ 를 도입하자.

$$\begin{aligned} x_1 &:= X, & x_2 &:= Y, & x_3 &:= v \cos \theta \\ x_4 &:= v \sin \theta, & x_5 &:= v \end{aligned}$$

새로운 상태변수에 대한 상태방정식을 유도하고 비선형 제어입력 $(u_1, u_2, u_3) \in \mathbb{R}^3$ 을 추가적으로 고려하면 (2)를 따라 움직이는 $k(k \in \{1, 2, \dots, q\} =: \mathcal{I}_Q)$ 번째 개체의 동역학은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x}_{1,k} = x_{3,k} \\ \dot{x}_{2,k} = x_{4,k} \\ \dot{x}_{3,k} = -\frac{L}{m} x_{4,k} x_{5,k} + u_{1,k} \\ \dot{x}_{4,k} = \frac{L}{m} x_{3,k} x_{5,k} - g + u_{2,k} \\ \dot{x}_{5,k} = -g x_{4,k} \frac{1}{x_{5,k}} + u_{3,k} \end{cases} \quad (3)$$

동역학 (3)의 이산시간 모델을 구하기 위하여 오일러(Euler) 방법을 [14] 사용한다. 그 결과는 식 (4)와 같다.

$$\begin{cases} x_{1,k}^+ = x_{1,k} + T x_{3,k} \\ x_{2,k}^+ = x_{2,k} + T x_{4,k} \\ x_{3,k}^+ = x_{3,k} - T \frac{L}{m} x_{4,k} x_{5,k} + T u_{1,k} \\ x_{4,k}^+ = x_{4,k} + T \frac{L}{m} x_{3,k} x_{5,k} - T g + T u_{2,k} \\ x_{5,k}^+ = x_{5,k} - T g x_{4,k} \frac{1}{x_{5,k}} + T u_{3,k} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $T \in \mathbb{R}_{>0}$ 는 샘플링 시간이다.

참고 1: 다음의 몇 가지 논의를 제시한다.

위의 이산시간 동역학 (4)는 연속시간 동역학 (3)의 정확한 이산시간 모델이 아니며 $\mathcal{O}(T^2)$ 의 모델링오차를 갖는 근사 이산시간 모델이다. 이러한 성질을 갖는 이산시간 모델은 one-step consistency 성질을 갖는다 [15]. 근사 이산시간 모델이 점근적으로 안정하면 정확한 이산시간 모델은 T 에 대하여 균일 반전역적 실제점근안정성(uniform semiglobal practical asymptotic stability in T)이 보장됨이 알려져 있다 [16-18].

본 논문에서 개발하는 이산시간 장주기모델의 군집제어를 위한 기법은 샘플치 군집제어기의 구현에 효과적으로 적용될 수 있다.

k 번째 개체와 $k-1$ 번째 개체가 일정한 간격을 유지할 수 있도록 식 (5)와 같이 추종오차를 정의한다.

$$\begin{cases} e_{1,k} := x_{1,k-1} - x_{1,k} - x_{1,d} \\ e_{2,k} := x_{2,k-1} - x_{2,k} - x_{2,d} \\ e_{3,k} := x_{3,k} - x_{3,d} \\ e_{4,k} := x_{4,k} - x_{4,d} \\ e_{5,k} := x_{5,k} - x_{5,d} \end{cases} \quad (5)$$

여기서 $(x_{1,d}, x_{2,d})$ 와 $(x_{3,d}, x_{4,d})$ 는 각각 개체간 목표간격과 목표속도의 (X, Y) 축 성분이며, $x_{5,d}$ 는 개체의 목표속도이다. 식 (5)에서 정의한 오차가 점근적으로 안정하면 (2)의 개체들은 목표군집을 형성한다. 변수들 (5)에 대한 오차동역학은 식 (6)과 같다.

$$\begin{cases} e_{1,k}^+ = e_{1,k} + T(e_{3,k-1} - e_{3,k}) \\ e_{2,k}^+ = e_{2,k} + T(e_{4,k-1} - e_{4,k}) \\ e_{3,k}^+ = e_{3,k} - T \frac{L}{m}(e_{4,k}e_{5,k} + x_{5,d}e_{4,k} + x_{4,d}e_{5,k} \\ \quad + x_{4,d}x_{5,d}) + Tu_{1,k} \\ e_{4,k}^+ = e_{4,k} + T \frac{L}{m}(e_{3,k}e_{5,k} + x_{5,d}e_{3,k} + x_{3,d}e_{5,k} \\ \quad + x_{3,d}x_{5,d}) - Tg + Tu_{2,k} \\ e_{5,k}^+ = e_{5,k} - Tgx_{4,k} \frac{1}{x_{5,k}} + Tu_{3,k} \end{cases} \quad (6)$$

식 (7)과 같은 형태의 비선형 제어기를 도입하면

$$\begin{cases} u_{1,k} = \frac{L}{m}x_{4,d}x_{5,d} + \phi_{1,k} \\ u_{2,k} = g - \frac{L}{m}x_{3,d}x_{5,d} + \phi_{2,k} \\ u_{3,k} = gx_{4,k} \frac{1}{x_{5,k}} + \phi_{3,k} \end{cases} \quad (7)$$

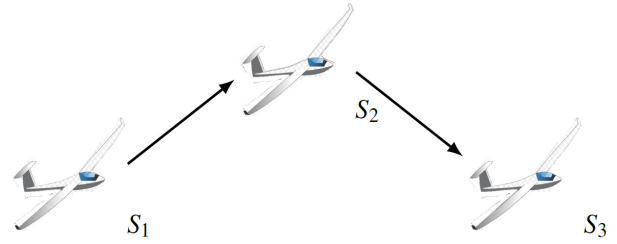


그림 2. 개체의 네트워크

Fig. 2. Network of the multi agent system

(6)의 상태가 $e_k := (e_{1,k}, e_{2,k}, e_{3,k}, e_{4,k}, e_{5,k})$ 만으로 구성된다. 여기서 $(\phi_{1,k}, \phi_{2,k}, \phi_{3,k})$ 는 추가적으로 설계할 제어입력이다. 비선형제어기 (7)에 의해 (6)의 폐루프시스템은 식 (8)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{cases} e_{1,k}^+ = e_{1,k} + T(e_{3,k-1} - e_{3,k}) \\ e_{2,k}^+ = e_{2,k} + T(e_{4,k-1} - e_{4,k}) \\ e_{3,k}^+ = e_{3,k} - T \frac{L}{m}(e_{5,k} + x_{5,d})e_{4,k} - T \frac{L}{m}x_{4,d}e_{5,k} \\ \quad + T\phi_{1,k} \\ e_{4,k}^+ = e_{4,k} + T \frac{L}{m}(e_{5,k} + x_{5,d})e_{3,k} + T \frac{L}{m}x_{3,d}e_{5,k} \\ \quad + T\phi_{2,k} \\ e_{5,k}^+ = e_{5,k} + T\phi_{3,k} \end{cases} \quad (8)$$

3. 주요결과

개체의 수를 2로 가정하면 (6)의 $e_{3,k}^+, e_{4,k}^+, e_{5,k}^+$ 에 (7)을 대입한 식과 (8)로 나타낸 전역동특성은 다음과 같다.

$$\begin{cases} e_{3,1}^+ = e_{3,1} - T \frac{L}{m}(e_{5,1} + x_{5,d})e_{4,1} - T \frac{L}{m}x_{4,d}e_{5,1} \\ \quad + T\phi_{1,1} \\ e_{4,1}^+ = e_{4,1} + T \frac{L}{m}(e_{5,1} + x_{5,d})e_{3,1} + T \frac{L}{m}x_{3,d}e_{5,1} \\ \quad + T\phi_{2,1} \\ e_{5,1}^+ = e_{5,1} + T\phi_{3,1} \\ e_{1,2}^+ = e_{1,2} + T(e_{3,1} - e_{3,2}) \\ e_{2,2}^+ = e_{2,2} + T(e_{4,1} - e_{4,2}) \\ e_{3,2}^+ = e_{3,2} - T \frac{L}{m}(e_{5,2} + x_{5,d})e_{4,2} - T \frac{L}{m}x_{4,d}e_{5,2} \\ \quad + T\phi_{1,2} \\ e_{4,2}^+ = e_{4,2} + T \frac{L}{m}(e_{5,2} + x_{5,d})e_{3,2} + T \frac{L}{m}x_{3,d}e_{5,2} \\ \quad + T\phi_{2,2} \\ e_{5,2}^+ = e_{5,2} + T\phi_{3,2} \end{cases} \quad (9)$$

전반부변수를 다음과 같이 설정하고

$$z_k = e_{5,k} + x_{5,d}$$

sector nonlinearity 기법 [19,20]을 적용하여 (9)에 대해 각 개체에 대하여 다음의 소속함수들을 구성한다.

$$\begin{cases} \Gamma_{k,1}(z_k) = \frac{e_{5,k} + x_{5,d} - c_{2,k}}{c_{1,k} - c_{2,k}} \\ \Gamma_{k,2}(z_k) = -\frac{e_{5,k} + x_{5,d} - c_{1,k}}{c_{1,k} - c_{2,k}} \end{cases}$$

여기서 $c_{1,k} = \min z_k$, $c_{2,k} = \max z_k$ 이다. 이를 이용한 (9)의 T-S 퍼지모델은 식 (10)과 같다.

$$e^+ = \sum_{h=1}^4 \mu_h A_h e + B \phi \quad (10)$$

여기서

$$\mu_i(z) := \frac{\prod_{j=1}^p \Gamma_j^i(z_j)}{\sum_{i=1}^r \left(\prod_{j=1}^p \Gamma_j^i(z_j) \right)} \in \mathbb{R}_{[0,1]}$$

는 $\sum_{i=1}^r \mu_i = 1$ 을 만족하며, $\Gamma_j^i(z_j)$ 는 z_j 의 Γ_j^i 에 대한 소속도를 나타낸다. 또한, 시스템 행렬은 다음과 같이 구성된다.

$$A_h = \begin{bmatrix} A_{11,i} & 0_{3 \times 5} \\ A_{21} & A_{22,j} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{5 \times 3} & B_{22} \end{bmatrix}$$

여기서

$$A_{11,i} = \begin{bmatrix} 1 & -T \frac{L}{m} c_{i,1} & -T \frac{L}{m} x_{4,d} \\ T \frac{L}{m} c_{i,1} & 1 & T \frac{L}{m} x_{3,d} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{22,j} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -T \frac{L}{m} c_{j,2} & -T \frac{L}{m} x_{4,d} \\ 0 & 0 & T \frac{L}{m} c_{j,2} & 1 & T \frac{L}{m} x_{3,d} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} T & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{11} = T I_3, \quad B_{22} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 3} \\ T I_3 \end{bmatrix}$$

$$e = [e_{3,1} \quad e_{4,1} \quad e_{5,1} \quad e_{1,2} \quad e_{2,2} \quad e_{3,2} \quad e_{4,2} \quad e_{5,2}]^T$$

$$\phi = [\phi_{1,1} \quad \phi_{2,1} \quad \phi_{3,1} \quad \phi_{1,2} \quad \phi_{2,2} \quad \phi_{3,2}]^T$$

이며, $h = j + 2(i - 1)$, $(i, j) \in \mathcal{I}_R \times \mathcal{I}_{R_0}$ 에 대하여

$$\mu_h = \Gamma_{1,i}(z_1) \Gamma_{2,j}(z_2)$$

이다. 여기서 $0_{3 \times 5} \in \mathbb{R}^{3 \times 5}$, $0_{3 \times 3} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $0_{3 \times 5} \in \mathbb{R}^{3 \times 5}$ 는 영행렬들이며, $I_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 은 항등행렬이다. 위 모델을 제어하기 위하여 식 (11)의 퍼지제어기를 도입하자.

$$\phi = \sum_{h=1}^4 \mu_h K_h e \quad (11)$$

여기서 K_h 는 제어이득 행렬이다. 식 (11)을 이용하면 (10)을 식 (12)와 같은 폐루프 시스템으로 구성할 수 있다.

$$e^+ = \sum_{h=1}^4 \mu_h (A_h + B K_h) e \quad (12)$$

정리 1: 식 (13)의 조건을 만족하는 양한정행렬 $Q = Q^T > 0$ 가 존재하면 (2)로 구성된 다개체시스템은 목표한 신호를 추종한다.

$$\begin{bmatrix} -Q & * \\ A_h Q + B M_h & -Q \end{bmatrix} < 0, \quad h \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (13)$$

증명 식 (9)에 대하여 리아푸노프(Lyapunov) 함수 $V = e^T P e$ 를 도입하자. 리아푸노프 안정도이론에 의하여 모든 $e \in \mathbb{R}^8$ 에 대하여 $\Delta V < 0$ 의 충분조건은 식 (14)와 같다.

$$(A_h + B K_h)^T P (A_h + B K_h) - P < 0 \quad (14)$$

식 (15)와 같이 슈어여수법(Schur's complement)을 적용하고

$$\begin{bmatrix} -P & * \\ A_h + B K_h & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

$\text{diag}\{P^{-1}, I\}$ 로 컨그루언스(congruence) 변환을 한 후 $Q = P^{-1}$, $M_h = K_h Q$ 로 변수치환을 하면 (13)을 유도할 수 있다. 따라서 (5)에서 정의한 추종오차들이 점근적으로 안정하므로 (2)로 구성된 k 개의 개체들은 $t \rightarrow \infty$ 에 따라

$$\begin{bmatrix} x_{1,k-1} - x_{1,k} \\ x_{2,k-1} - x_{2,k} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_{1,d} \\ x_{2,d} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_{3,k} \\ x_{4,k} \\ x_{5,k} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_{3,d} \\ x_{4,d} \\ x_{5,d} \end{bmatrix}$$

이다.

4. 모의실험

식 (4)의 동특성으로 구성된 총 3개의 개체를 가진 비선형 다개체시스템을 고려하자. 각 개체 $S_k, k \in \{1, 2, 3\}$ 의 네트워크는 그림 2와 같이 구성됨을 가정한다. 식 (9)과 비교하면, 개체가 하나 증가했기 때문에 3번째 개체의 오차동역학이 추가적으로 고려되어야 한다. 따라서 $e \in \mathbb{R}^{13}$ 와 $\phi \in \mathbb{R}^9$ 에 대한 전역동특성을 구성하여 앞 절의 논의를 이용해 식 (16)과 같은 퍼지모델을 유도할 수 있다.

$$e^+ = \sum_{h=1}^8 \mu_h A_h e + B \phi \tag{16}$$

이에 대한 시스템행렬은 다음과 같다.

$$A_h = \begin{bmatrix} A_{11,i} & 0_{3 \times 5} & 0_{3 \times 5} \\ A_{21} & A_{22,j} & 0_{5 \times 5} \\ 0_{5 \times 3} & A_{32} & A_{33,l} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{5 \times 3} & B_{22} & 0_{5 \times 3} \\ 0_{5 \times 3} & 0_{5 \times 3} & B_{33} \end{bmatrix}$$

여기서

$$A_{33,l} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -T \frac{L}{m} c_{l,3} & -T \frac{L}{m} x_{4,d} \\ 0 & 0 & T \frac{L}{m} c_{l,3} & 1 & T \frac{L}{m} x_{3,d} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{32} = [0_{5 \times 2} \quad A_{21}], \quad B_{33} = B_{22}$$

이며, $h = l + 2(j - 1) + 4(i - 1), (i, j, l) \in \mathcal{I}_R \times \mathcal{I}_R \times \mathcal{I}_R$ 이다. 이 때, 샘플링 시간 $T = 0.1$ s임을 가정하자. 위 모델에 대하여 $e_{5,k} \in [0, 100]$ 의 가정과 $L = 300, m = 24$ kg, $g = 9.8$ m/s²의 파라미터 값을 사용한다. 이에 대한 제어이득 행렬을 구하기 위해 정리 1을 이용한다. 제어이득행렬을 지면에 표현하기에 차원이 매우 커 부득이하게 생략한다.

각 개체의 초기값 $x_k(0)$ 와 추종 신호 x_d 를 다음과 같이 설정한다.

$$x_1(0) = [2 \quad 0 \quad 3 \cos(60^\circ) \quad 3 \sin(60^\circ) \quad 3]^T$$

$$x_2(0) = [0 \quad 3 \quad \cos(30^\circ) \quad \sin(30^\circ) \quad 1]^T$$

$$x_3(0) = [1 \quad 1 \quad 2 \cos(30^\circ) \quad 2 \sin(30^\circ) \quad 2]^T$$

$$x_d = [2 \quad 1 \quad 2 \cos(45^\circ) \quad 2 \sin(45^\circ) \quad 2]^T$$

다개체시스템 (4)의 상태변수들의 시간응답은 그림 3에서 확인할 수 있으며, 이에 대한 페루프 시스템 (8)의 추종오차들의 시간응답은

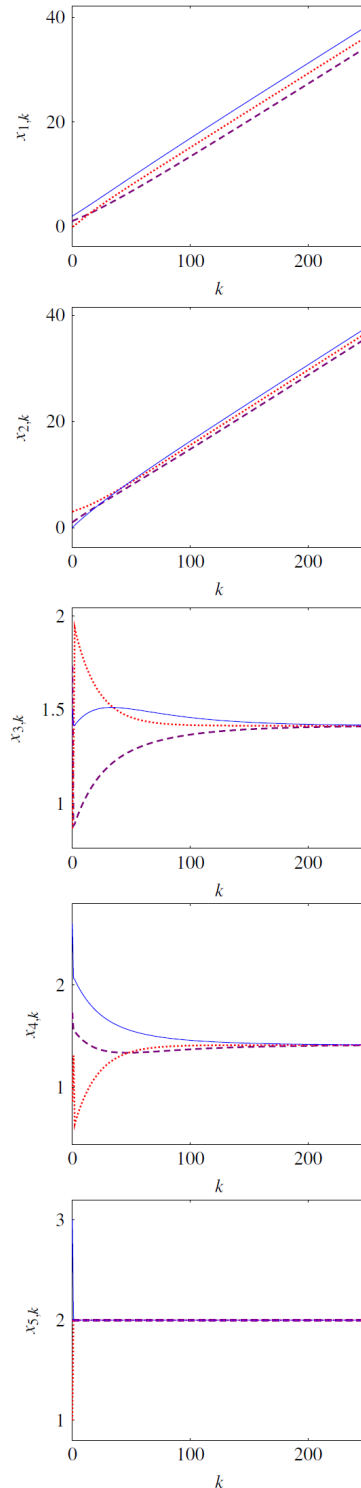


그림 3. 상태의 시간응답(청색-실선: 1번째 개체, 적색-점선: 2번째 개체, 자색-파선: 3번째 개체)
 Fig. 3. The state variables (blue-solid: agent 1, red-dotted: agent 2, violet-dashed: agent 3)

그림 4에 나타난다. 제안한 기법에 의해 x_3, x_4, x_5 가 추종신호에 점근적으로 수렴하고, 각 개체간의 거리가 목표거리와 일치하는

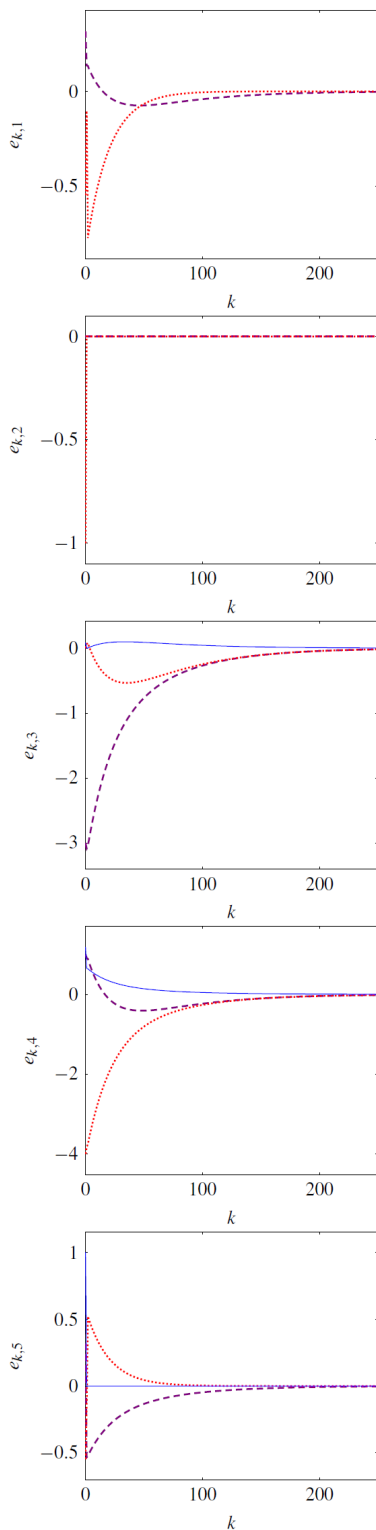


그림 4. 추종오차의 시간응답 (청색-실선: 1번째 개체, 적색-점선: 2번째 개체, 자색-파선: 3번째 개체)
 Fig. 4. The tracking errors (blue-solid: agent 1, red-dotted: agent 2, violet-dashed: agent 3)

것을 확인할 수 있다. 다개체시스템의 이동궤적을 그림 5에 보이며, 각 개체들이 목표한 군집을 형성하는 것을 확인할 수 있다.

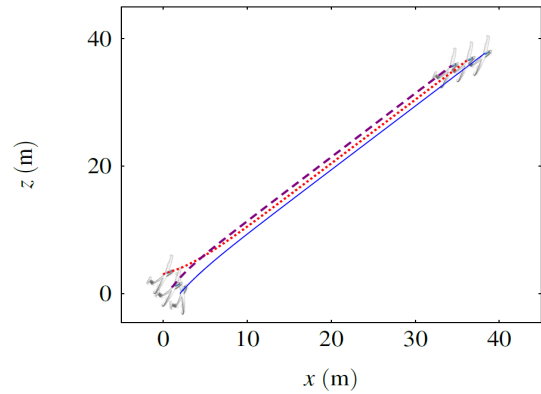


그림 5. 다개체시스템의 궤적 (청색-실선: 1번째 개체, 적색-점선: 2번째 개체, 자색-파선: 3번째 개체)
 Fig. 5. The trajectories for multi-agent systems (blue-solid: agent 1, red-dotted: agent 2, violet-dashed: agent 3)

5. 결론

본 논문에서는 장주기 모델의 근사 이산시간모델의 군집제어기 설계를 논하였다. 네트워크의 그래프를 기반으로 다개체시스템의 오차동역학을 구성하고 비선형제어기를 도입하여 T-S 퍼지모델을 유도하였다. 퍼지제어기의 설계조건은 리아푸노프 안정도이론에 기반한 선형행렬부등식의 형태로 제시하였다. 수치적 예제를 통해 제안한 기법의 효과를 입증하였다.

References

- [1] J. J. Bertin and M. L. Smith, *Aerodynamics for Engineers*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1979.
- [2] P. Bhatta and N. E. Leonard, "A Lyapunov function for vehicles with lift and drag: Stability of gliding," in *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, 2004, pp. 4101-4106.
- [3] J. G. Graver, "Underwater gliders: Dynamics, control and design," Ph.D. dissertation, Princeton University, 2005.
- [4] J. H. Moon, S. C. Jee, and H. J. Lee, "Output-feedback control of underwater gliders by buoyancy and pitching moment control: Feedback linearization approach," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 255-262, 2016.
- [5] P. Bhatta and N. E. Leonard, "Nonlinear gliding stability and control for vehicles with hydrodynamic forcing," *Automatica*, vol. 44, pp. 1240-1250, 2008.

[6] Z. Li, X. Liu, P. Lin, and W. Ren, "Consensus of linear multi-agent systems with reduced-order observer-based protocols," *Systems & Control Letters*, vol. 60, pp. 510-516, 2011.

[7] H. S. Kim, Y. H. Joo, and J. B. Park, "Formation control for swarm robots using artificial potential field," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, pp. 476-480, 2012.

[8] H. Jung and D. H. Kim, "Rank-based formation for multiple robots in a local coordinate system," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 25, pp. 42-47, 2015.

[9] F. Giulietti, L. Pollini, and M. Innocenti, "Autonomous formation flight," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 20, pp. 34-44, 2000.

[10] A. Zečević and D. Šiljak, "A new approach to control design with overlapping information structure constraints," *Automatica*, vol. 41, pp. 265-272, 2005.

[11] M. H. Kim, H. J. Lee, J. B. Park, D. B. Cha, and Y. H. Joo, "A decentralized control technique for experimental nonlinear helicopter systems," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 12, pp. 80-84, 2002.

[12] 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.

[13] F. W. Lanchester, *Aerodnetics*, London: A. Constable & Company Limited, 1908.

[14] J. Nakamura, *Applied Numerical Methods with Software*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1990.

[15] D. Nešić, A. R. Teel, and P. V. Kokotović, "Sufficient conditions for stabilization of sampled-data nonlinear systems via discrete-time approximations," *Systems & Control Letters*, vol. 38, pp. 259-270, 1999.

[16] H. J. Lee and D. W. Kim, "Intelligent digital redesign revisited: Approximate discretization and stability limitation," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 159, pp. 3221-3231, 2008.

[17] H. J. Lee and D. W. Kim, "Performance recoverable intelligent digital redesign for fuzzy tracking controllers," *Information Sciences*, vol. 326, pp. 350-367, 2016.

[18] J. H. Moon and H. J. Lee, "Performance recovery of intelligent digital redesign for observer-based output feedback under immeasurable premise variables," *IET Control Theory and Applications*, vol. 9, no. 12, pp. 1846-1856, 2015.

[19] K. Tanaka and H. Wang, *Fuzzy Control Systems Design*

and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach, Wiley-Interscience, 2001.

[20] S. C. Jee and H. J. Lee, "Sampled-data fault detection and isolation for nonlinear systems in T-S form: An approximate model approach," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 297, pp. 112-127, 2016.

저 자 소 개



문지현(Ji Hyun Moon)

2012년 : 인하대학교 전자공학부(공학사)

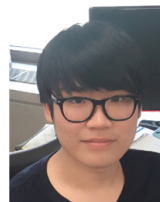
2014년 : 인하대학교 대학원 전자공학과
(공학석사)

2014년~현재 : 동 대학원 전자공학과 박사과정

관심분야 : 퍼지제어, 디지털 재설계, 다개체 시스템

Phone : +82-32-860-7425

E-mail : moonjh87@inha.edu



이재준(Jaejun Lee)

현재 : 인하대학교 전자공학과 학사과정

관심분야 : 퍼지제어, 비선형 제어

Phone : +82-32-860-7425

E-mail : wowns1821@hanmail.net



이호재(Ho Jae Lee)

1998년 : 연세대학교 전기공학과(공학사)

2000년 : 연세대학교 전기컴퓨터공학과
(공학석사)

2004년 : 동 대학원 전기전자 공학과(공학박사)

2005년 : University of Houston, Houston, Tx,

USA 방문조교수

현재 : 인하대학교 전자전기공학부 부교수

관심분야 : 비선형 샘플치 제어, 편대비행 제어, 디지털 재설계

Phone : +82-32-860-7425

E-mail : mylchi@inha.ac.kr



김문환(Moon Hwan Kim)

2004년 : 연세대학교 전기전자공학과(공학사)

2006년 : 연세대학교 전기전자공학과(공학석사)

2009년 : 해군사관학교 전기공학 전임강사

현재 : LIG 넥스원 선임연구원

관심분야 : 무인잠수정, 지능 시스템, 임베디드

시스템

Phone : +82-31-8026-4423

E-mail : moonanikim@lignex1.com