

상호작용 비선형성이 있는 다중 리더와 단일 추종자를 위한 일치 기반의 협력 제어

탁한호¹ · 임영훈^{2*}

Consensus-based Cooperative Control for multiple leaders and single follower with interaction nonlinearities

Han-Ho Tack¹ · Young-Hun Lim^{2*}

¹Professor, Department of Convergence Electronic Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725 Korea

^{2*}Associate Professor, Department of Convergence Electronic Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725 Korea

요 약

본 논문에서는 상호작용을 갖는 다중 리더들과 단일 추종자를 위한 협력 제어 문제를 고려한다. 리더들은 제어 가능하고, 추종자는 모든 리더들과 상호작용을 갖고 상호작용에 의하여 제어된다. 따라서 리더들을 제어함으로써 일치를 달성하는 협력 제어문제를 연구한다. 리더들과 추종자는 각 일차 적분기와 이차 적분기로 모델링되고 상호작용에 비선형성이 존재한다고 가정한다. 리더들은 추종자 사이의 상호작용만을 측정할 수 있고 이웃한 리더들과 측정된 정보를 교환할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 측정된 상호작용에 대한 정보와 속도 일치를 위한 가상의 속도 변수에 대한 정보교환을 이용하여 일치 기반의 협력 제어 알고리즘을 제안한다. 라살레 불변의 법칙을 기반으로 에이전트들의 공통 상태로의 수렴을 해석한다. 마지막으로 이론적 결과들을 검증하기 위하여 수치적 예제를 제공한다.

ABSTRACT

This paper considers the cooperative control problem for multiple leaders and a single follower with interactions. The leaders are controllable, and the follower has interactions with all leaders and is controlled by the interactions. Then, we study the cooperative control problem that achieves the consensus by controlling the leaders. The leaders and the follower are modeled by the single-integrator and the double-integrator, respectively, and it is assumed that the interactions have the nonlinearities. The leaders can estimate the interaction between the follower and exchange the estimated information with neighbors. Then, this paper proposes the consensus-based cooperative control algorithm using the information exchange of the estimated interactions and the virtual velocity variables to achieve the velocity consensus. We analyze the convergence of the agents to the common state based on the Lasalle's Invariance Principle. Finally, we provide the numerical example to validate the theoretical results.

키워드 : 일치 제어, 협력 제어, 상호작용 비선형성, 다중 에이전트 시스템, 다중 리더

Keywords : Consensus control, Cooperative control, Interaction nonlinearities, Multi-agent system, Multiple leaders

Received 16 September 2021, Revised 25 September 2021, Accepted 28 September 2021

* Corresponding Author Young-Hun Lim(E-mail:yhunlim@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-3331)

Associate Professor, Department of Convergence Electronic Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.11.1663>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© 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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

다중 에이전트 시스템(multi-agent system)은 협력기반의 임무 수행을 통하여 임무의 유연성, 강인성, 적응성 등 다양한 장점을 갖고 있다. 이에 다중 에이전트 시스템의 협력 제어를 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 특히, 다중 에이전트 시스템의 일치(consensus) 문제는 에이전트들이 정보교환을 통하여 그룹의 목표 상태로 수렴하도록 함으로써 협력을 통한 그룹의 편대[1,2] 및 협력 제어[3-5], 분산 센싱[6] 및 라우팅[7] 등 다양한 응용 분야로의 연구가 진행되고 있다.

초창기 일치 문제는 일차 적분기로 모델링된 에이전트들을 고려하였다. [8]에서 에이전트들이 일치를 달성하기 위한 필요 충분 조건은 정보교환 그래프가 연결되어 있는 경우임을 증명하였다. 이를 기반으로 이차 적분기[9], 고차 시스템[10], 비선형 시스템[11] 등의 일치 문제가 연구되었다. 또한, 리더가 있는 그룹의 일치를 위한 리더 추종의 일치 문제가 연구되었다[12-14].

본 논문에서는 다중 에이전트 시스템의 일치를 기반으로 협력 제어 문제를 연구한다. 일치 기반의 협력 제어는 다중 모터의 병렬 구동[3], 다중 로봇을 이용한 물건 운반[4,5] 등 다양한 응용분야로의 연구가 진행되고 있다. [3]에서는 단일 샤프트에 연결된 다중 모터의 병렬 구동을 위한 연구를 진행하였고, 일치 기반의 협력 제어 알고리즘을 기반으로 각 모터에 가해지는 토크를 일치시키는 토크 분배기술을 제안하였다. [4,5]에서는 다중 로봇을 이용한 물건 운반기술에 대한 연구를 진행하였고, 각 로봇에 가해지는 힘을 일치시킴으로써 안정적으로 물건을 운반할 수 있는 협력 제어 기술을 제안하였다. 비록 [3-5]에서 일치 기반의 협력 제어 연구를 진행하였지만, 일치를 달성하기 위하여 에이전트들의 상태변수들에 대한 정보를 필요로 하였다. 하지만 실제 시스템에서 상태변수에 대한 정보는 운영 환경에 따라 사용할 수 없는 경우가 존재한다. 예를 들어 다중 에이전트 시스템의 편대 비행을 위하여 위치 정보를 사용하는 경우 GPS와 같은 전역 위치 정보를 위한 센서가 필요하고, 이는 실내 환경에서는 사용이 불가능하다. 따라서 위치기반 제어가 아닌 에이전트간의 상대정보인 거리기반 제어가 사용될 수 있다[15]. 또한 다중 로봇의 물건 운반 기술을 위하여 로봇의 위치 정보가 아닌 물건과 상호작용에 의한 접촉력(contact force)을 이용할 수 있다

[16]. 따라서 본 논문에서는 다중 에이전트 시스템의 상태변수가 아닌 상호작용에 대한 정보만을 이용한 연구를 진행한다.

본 논문에서는 다중 에이전트들의 협력 제어 모델 [3-5, 16]을 기반으로 다중 리더와 단일 추종자를 고려한 일치 문제를 연구한다. 즉, 다중 리더들은 제어 가능하고, 단일 추종자는 리더들과의 상호작용에 의하여 제어된다. 리더와 추종자 사이의 상호작용은 단조 증가 함수로 정의된다. 리더들은 상호작용만을 측정할 수 있고 서로 정보를 교환할 수 있다고 가정한다. 따라서 리더들 사이의 정보교환을 통하여 비선형성이 존재하는 상호작용에 대한 제한된 정보만을 이용한 일치 기반의 협력 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘을 기반으로 그룹의 위치 및 속도의 수렴성을 증명하기 위하여 라살레 불변의 법칙을 적용하여 해석을 진행한다. 마지막으로 수치적 예제를 통하여 제안된 제어기의 유효성을 평가한다.

II. 일치 기반의 협력 제어

2.1. 문제정의

본 논문에서는 N 개의 리더들과 단일 추종자로 구성된 다중 에이전트 그룹을 고려한다. 리더들은 아래의 식 (1)과 같이 일차 적분기로 모델링 된다.

$$\dot{x}_i = u_i, \quad i \in V = \{1, 2, \dots, NRIGHT\} \quad (1)$$

위 식에서 $x_i, u_i \in \mathbb{R}$ 은 각 리더 i 의 위치와 입력변수를 나타낸다. 추종자의 경우 아래의 식 (2)와 같이 이차 적분기로 모델링 되고, 모든 리더들과의 상호작용에 의하여 제어된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{N+1} &= v_{N+1} \\ \dot{v}_{N+1} &= \sum_{i=1}^N f(z_i) \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서 $x_{N+1}, v_{N+1} \in \mathbb{R}$ 은 추종자의 위치와 속도, $f(z_i) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 는 리더 i 와 추종자 사이의 상호작용을 나타내고, $z_i = x_i - x_{N+1}$ 는 리더 i 와 추종자의 위치 차이를 나타낸다. 본 논문에서는 상호작용 함수 f 는 단조 증가(monotonically increasing)함수라 가정한다. 즉, 다음

과 같은 조건을 만족한다.

$$z_i f(z_i) \geq 0, \quad f(0) = 0 \quad (3)$$

본 논문에서 리더 에이전트 $i \in V$ 는 추종자와의 상호 작용 함수 f 만 측정 가능하다고 가정한다. 따라서 본 논문의 목표는 리더들이 협력을 통하여 전체 그룹의 일치를 달성하는 것이다. 그룹의 목표 속도를 v^* 라 정의하면, 본 논문의 목표는 다음과 같이 정리할 수 있으며, 목표 속도 v^* 는 상수라고 가정한다.

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} z_i &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_i &= \lim_{t \rightarrow \infty} v_{N+1} = v^*, \quad \forall i \in V \end{aligned} \quad (4)$$

2.2. 협력 제어 알고리즘

본 논문에서는 일치 기반의 협력 제어 알고리즘을 제안한다. 일치 알고리즘은 이웃한 에이전트들의 정보교환을 기반으로 구성된다. 에이전트 간의 정보교환은 무향 그래프(undirected graph)로 표현할 수 있다. 무향 그래프 $G = (V, E)$ 는 에이전트의 집합 $V = \{1, \dots, N, RIGHT$ 와 엣지의 집합 $E \subseteq \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j, RIGHT$ 로 구성된다. 만약 에이전트 i 와 j 가 정보교환이 가능한 경우 $(i, j) \in E$ 이 되고, 무향 그래프에서 $(i, j) \in E$ 인 경우 $(j, i) \in E$ 가 성립한다. 다음으로 에이전트 $i \in V$ 의 이웃들의 집합을 $N_i = \{j \in V : (i, j) \in E, RIGHT$ 라 정의한다.

다음으로 리더 $i \in V$ 의 가상의 속도 변수를 $w_i \in \mathbb{R}$ 이라 정의한다. 여기서 가상의 속도 변수는 리더와 추종자의 속도를 일치시키기 위하여 사용된다.

그림 1은 그래프 이론과 일치 이론을 기반으로 구현된 협력 제어 알고리즘을 나타낸다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 일치 기반의 제안된 알고리즘은 이웃들과의 정보교환을 기반으로 구성된다. 따라서 정보교환의 형태가 목표 달성에 중요한 요소가 된다. [6]에서 일치를 달성하기 위한 필요충분조건이 정보교환 그래프가 연결된 경우라는 것을 증명하였다. 만약 임의의 두 에이전트 $i, j \in V$ 사이에 경로가 존재한다면 그래프는 연결되어 있다고 한다. 따라서 본 논문에서는 정보교환 그래프가 연결되어 있다고 가정한다.

Algorithm : Controller Update Algorithm

```

Initialize:
set control gains
 $\alpha, \beta > 0$ 
for leader agent  $i \in V$  do
  if  $v^*$  is available then
     $k_i > 0$ 
  else
     $k_i = 0$ 
  endif
for  $t \in \mathbb{R}$  do
  for leader agent  $i \in V$  do
    send information  $f(z_i)$  and  $w_i$  to  $j \in N_i$ 
    receive information  $f(z_j)$  and  $w_j$  from  $j \in N_i$ 
    calculate the information difference
       $\sum_{j \in N_i} (f(z_j) - f(z_i))$  and  $\sum_{j \in N_i} (w_j - w_i)$ 
    update control input and virtual velocity dynamics
       $u_i = \alpha \sum_{j \in N_i} (f(z_j) - f(z_i)) + w_i$ 
       $\dot{w}_i = -k_i (w_i - v^*) + \beta \sum_{j \in N_i} (w_j - w_i) - f(z_i)$ 
  endfor
endfor
  
```

Fig. 1 Proposed controller update algorithm

2.3. 수렴성 해석

제안된 협력 제어 알고리즘을 기반으로 목표 식 (4)를 달성함을 보이기 위하여 오차 방정식의 수렴성을 해석한다. 오차 방정식의 수렴성 해석을 위하여 리더 i 의 위치 오차를 $z_i = x_i - x_{N+1}$ 이라 정의하면 리더와 추종자의 모델 식 (1)과 (2)로부터 아래와 같은 위치 오차 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_i &= \alpha \sum_{j \in N_i} (f(z_j) - f(z_i)) + w_i - v_{N+1} \\ &= \alpha \sum_{j \in N_i} (f(z_j) - f(z_i)) + e_i - e_{N+1} \end{aligned} \quad (5)$$

다음으로 속도 오차를 고려한다. 제안된 알고리즘을 고려하여 속도 일치를 달성한다면 다음의 식 (6)이 성립한다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_i = \lim_{t \rightarrow \infty} w_i = v^*, \quad \forall i \in V \quad (6)$$

따라서 리더 i 의 속도 오차를 $e_i = w_i - v^*$ 라 정의하면 아래의 식 (7)과 같은 속도 오차 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_i &= -k_i e_i + \beta \sum_{j \in N_i} (w_j - w_i) - f(z_i) \\ &= -k_i e_i + \beta \sum_{j \in N_i} (w_j - w_i - v^* + v^*) - f(z_i) \\ &= -k_i e_i + \beta \sum_{j \in N_i} (e_j - e_i) - f(z_i) \end{aligned} \quad (7)$$

마지막으로 추종자의 속도 오차 방정식을 구하기 위하여 추종자의 속도 오차를 $e_{N+1} = v_{N+1} - v^*$ 로 정의하면 다음과 같은 오차 방정식을 구할 수 있다.

$$\dot{e}_{N+1} = \sum_{i=1}^N f(z_i) \quad (8)$$

다음으로 $z = [z_1, \dots, z_N]^{RIGHT}T$, $e = [e_1, \dots, e_N]T$, 그리고 $f(z) = [f(z_1), \dots, f(z_N)RIGHT]T$ 라 정의하면 식 (5)와 (7)로부터 아래와 같이 리더 그룹의 오차 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -\alpha L f(z) + e - e_{N+1} 1_N \\ \dot{e} &= -ke - \beta L e - f(z) \end{aligned} \quad (9)$$

위 식에서 $1_N \in \mathbb{R}^N$ 은 모든 원소가 1인 벡터이고, $k = \text{diag}(k_1, \dots, k_N) \in \mathbb{R}^{N \times N}$, 그리고 $L = [l_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 은 라플라시안 행렬로 아래와 같이 정의된다[8].

$$l_{ij} = \begin{cases} |N_i \text{RIGHT}|, & i = j - 1, \\ (i, j) \in E & 0, \\ (i, j) \notin E & \end{cases} \quad (10)$$

여기서 $|N_i \text{RIGHT}|$ 는 N_i 의 기수(cardinality)를 나타낸다. 식 (10)으로부터 라플라시안 행렬 L 은 실수 대칭, 양의 준정부호(positive semidefinite) 행렬이 됨을 알 수 있다. 따라서 라플라시안 행렬의 고유값은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$0 = \lambda_1(L) \leq \lambda_2(L) \leq \dots \leq \lambda_N(L) \quad (11)$$

또한, 연결된 그래프에 대하여 0인 고유값은 한 개만 존재함을 알 수 있다[8]. 즉, 식 (11)에서 $\lambda_2(L) > 0$ 이 만족한다.

다음으로 오차 방정식 (8)와 (9)의 수렴성을 해석하기 위하여 아래와 같은 리아프노프 함수를 정의한다.

$$V = \sum_{i=1}^N \int_0^{z_i} f(\tau) d\tau + \frac{1}{2} e^T e + \frac{1}{2} e_{N+1}^2 \quad (12)$$

여기서 상호작용 함수의 정의 식 (3)으로부터 $V \geq 0$ 이고 $V=0$ 은 $z_i = 0, \forall i \in V, e = 0, e_{N+1} = 0$ 인 경우임을 알 수 있다. 다음으로 수렴성 해석을 위하여 V 의 도함수를 계산하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^N f(z_i) \dot{z}_i + e^T \dot{e} + e_{N+1} \dot{e}_{N+1} \\ &= f(z)^T (-\alpha L f(z) + e - e_{N+1} 1_N) \\ &\quad + e^T (-ke - \beta L e - f(z)) + e_{N+1} \sum_{i=1}^N f(z_i) \\ &= -\alpha f(z)^T L f(z) - e^T (k + \beta L) e \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 라플라시안 행렬은 양의 준정부호 행렬이고 목표 속도의 정보를 알고 있는 리더가 적어도 하나 존재한다면 $(k + \beta L)$ 은 양의 정부호(positive definite) 행렬이 된다[12]. 따라서 모든 $z \in \mathbb{R}^N$ 에 대하여 $-\alpha f(z)^T L f(z) \leq 0$ 이 되고, $e \neq 0$ 인 경우에 대하여 $-e^T (k + \beta L) e < 0$ 이 되어 $\dot{V} \leq 0$ 이 된다.

다음으로 집합 $S = \{\dot{V} = 0\}$ 를 고려하자. 식 (13)으로부터 S 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \{(z, e) \in \mathbb{R}^{2N} : f(z)^T L f(z) = 0, e = 0\} \quad (14)$$

연결된 그래프에 대하여 $f(z)^T L f(z) = 0$ 인 조건은 $f(z_i) - f(z_j) = 0, \forall i, j \in V$, 와 같다[6]. 따라서 $\dot{V} = 0$ 은 $f(z_i) - f(z_j) = 0, \forall i, j \in V$, 이고 $e = 0$ 인 경우임을 알 수 있다. 즉, $e_i = w_i - v^* = 0$ 이므로, 협력 제어 알고리즘으로부터 $u_i = v^*$ 가 되어 리더의 방정식 (1)은 $\dot{x}_i = v^*$ 가 된다. 또한, $e = 0$ 인 경우, 속도 오차 방정식 (7)로부터 $f(z) = 0$ 이 되고, 상호작용 함수의 정의 식 (3)으로부터 $z_i = x_i - x_{N+1} = 0, \forall i \in V$ 이 된다. 즉, 식 (14)는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$S = \{(z, e) \in \mathbb{R}^{2N} : z = 0, e = 0\} \quad (15)$$

따라서 라살레 불변의 법칙에 따라 (z, e) 는 집합 S 로 수렴하게 되고, $\dot{z} = 0$ 이 되어 식 (9)로부터 $e_{N+1} = v_{N+1} - v^* = 0$ 이 됨을 알 수 있다.

결론적으로 $\dot{V} \leq 0$ 이고, $\dot{V} = 0$ 인 경우는 $z = 0, e = 0, e_{N+1} = 0$ 이기 때문에 라살레 불변의 법칙에 따라 $\lim_{t \rightarrow \infty} z = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_{N+1} = 0$ 이 되어 목표 식 (4)를 달성할 수 있다.

III. 모의실험

본 논문에서는 10개의 리더들과 단일 추종자로 구성된 다중 에이전트 그룹을 고려하여 시뮬레이션을 진행한다. 본 시뮬레이션에서 상호작용 함수는 다음과 같이 식 (3)을 만족하는 포화함수로 고려하였다.

$$f(z_i) = \text{sat}(z_i) = \text{sign}(z_i) \min\{|z_i|, 1\} \text{RIGHT} \quad (16)$$

다음으로 리더들간의 정보교환 그래프는 그림 1과 같이 링 형태로 고려한다.

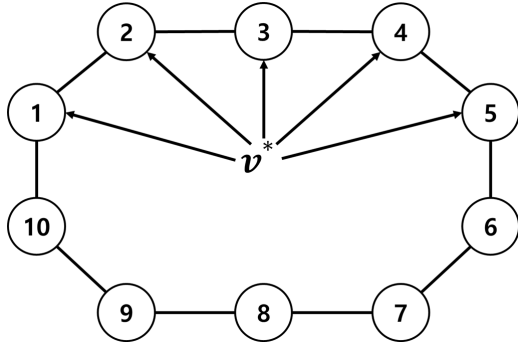


Fig. 2 Communication Graph between leaders

그림 2에 주어진 그래프에 대하여 라플라시안 행렬은 아래와 같이 주어진다.

$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

또한, 리더 1 ~ 5는 목표 속도에 대한 정보를 알고 있다고 가정하고, 목표 속도 $v^* = 1$ 로 설정하였다. 협력 제어 알고리즘의 제어이득 $\alpha = \beta = k_i = 5$, $\forall i = 1, 2, 3, 4, 5$, 로 선정하였다. 시뮬레이션은 matlab ode45를 이용하여 진행하였고, 리더들의 초기 상태는 matlab의 randperm() 함수를 사용하여 -50 ~ 50 사이의 랜덤 값으로, 추종자의 초기 상태 $x_{N+1}(0) = 100$, $v_{N+1}(0) = 10$ 으로 설정하였다. 제안된 협력 제어 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 그림 3-5에서 볼 수 있다.

그림 3과 4는 리더들(실선)과 추종자(점선)의 위치 및 속도 궤적을 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 리더들은 자신의 상태정보를 알지 못하지만, 비선형성을 갖는 상호작용에 대한 정보만을 이용하여 일치를 달성함을 볼 수 있다. 추종자의 경우 리더들과의 상호작용에 의해서만 제어되지만, 제안된 협력 제어 알고리즘에 의하여 리더들을 제어함으로써 리더들과 일치를 달성함을 볼 수 있다. 또한, 그림 5는 상호작용 함수의 궤적을 나타낸다. 일치를 달성함에 따라 상호작용 함수 또한 0으로 수렴함을 볼 수 있다.

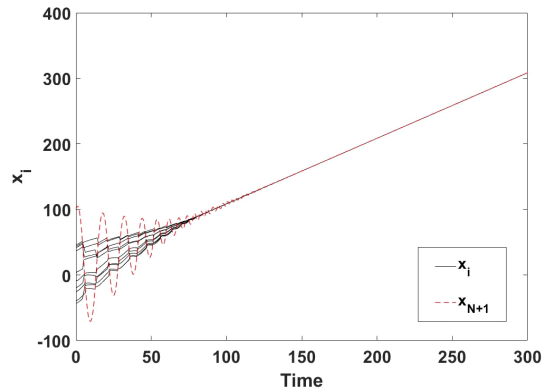


Fig. 3 Position trajectories of leaders (solid line) and follower (dashed line)

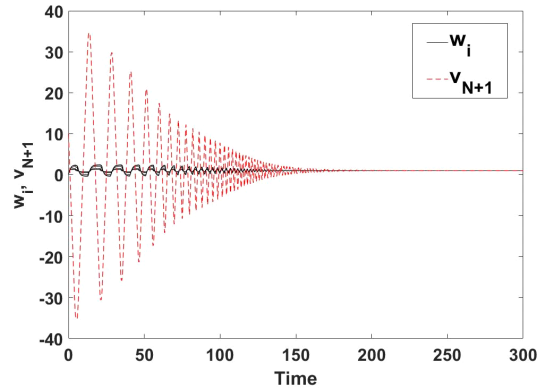


Fig. 4 Velocity trajectories of leaders and follower

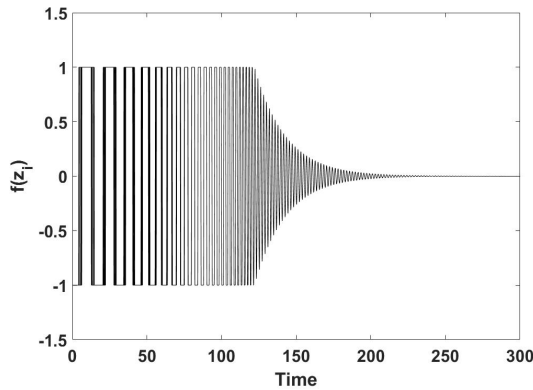


Fig. 5 State trajectories of interactions between leaders and follower

IV. 결 론

본 논문에서는 다중 리더들과 단일 추종자를 고려한 일치 기반의 협력 제어문제를 연구하였다. 추종자는 리더들과의 상호작용에 의하여 제어되고, 리더들은 추종자와의 상호작용만 가능한 경우를 고려하였다. 이러한 가정하에 리더들 간의 정보교환을 통한 일치 기반의 협력 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 비선형성이 존재하는 상호작용에 대한 제한된 정보만을 이용하여 일치를 달성할 수 있는 장점이 있다.

비록 본 논문에서는 다중 리더와 단일 추종자를 고려한 일치의 수렴성을 해석하였지만, 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 제한된 정보만을 이용하였기 때문에 수렴 속도에 대한 보장이 되지 않았다. 따라서 추후에는 실제 시스템에서 사용 가능한 추가적인 정보들을 이용하여 수렴 속도를 높이기 위한 연구를 진행할 계획이고, 이를 기반으로 다중 로봇의 협력 운반 시스템과 같은 실제 시스템에 적용하여 협력 시스템을 구축할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.NRF-2019R1C1C1009879)

REFERENCES

- [1] Y. Cao, W. Ren, N. Sorensen, L. Ballard, A. Reiter, and J. Kennedy, "Experiments in consensus-based distributed cooperative control of multiple mobile robots," in *Proceeding of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, China, pp. 2819-2824, Aug. 2007.
- [2] Y. Kuriki and T. Namerikawa, "Consensus-based cooperative formation control with collision avoidance for a multi-uav system," in *Proceeding of the 2014 American Control Conference*, pp. 2077-2082, 2014.
- [3] H. J. Lee, Y. H. Lim, and K. K. Oh, "Consensus based parallel operation of electric motors ensuring speed regulation and load torque sharing," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 19, pp. 3111-3121, Sept. 2021.
- [4] Z. Wang and M. Schwawger, "Force-amplifying n-robot transport system (force-ants) for cooperative planar manipulation without communication," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 35, no. 13, pp. 1564-1586, 2016.
- [5] S. Thapa, H. Bai, and J. A. Acosta, "Cooperative aerial manipulation with decentralized adaptive force-consensus control," *Journal of Intelligent & Robotic system*, vol. 97, no. 1, pp. 171-183, 2020.
- [6] J. C. Na, "Optimization in cooperative spectrum sensing," *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange*, vol. 3, no. 1, pp. 17-27, 2017.
- [7] Y. J. Choi, J. S. Seo, and J. P. Hong, "Deep reinforcement learning-based distributed routing algorithm for minimizing end-to-end delay in MANET," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 25, no. 9, pp. 1267-1270, 2021.
- [8] R. Olfati-Saber, J. 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, Jan. 2007.
- [9] X. He and Q. Wang "Distributed finite-time leaderless consensus control for double-integrator multi-agent systems with external disturbances," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 295, no. 15, pp. 65-76, 2017.
- [10] Z. Li, Z. Duan, G. Chen, and L. Huang, "Consensus of multiagent systems and sychronization of complex networks: A unified viewpoint," *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, vol. 57, no. 1, pp. 213-224, 2010.
- [11] H. Du, G. Wen, D. Wu, Y. Cheng, and J. Lu, "Distributed

- fixed-time consensus for nonlinear heterogeneous multi-agent systems,” *Automatica*, vol. 113, pp. 108-797, 2020.
- [12] W. Ni and D. Cheng, “Leader-following consensus of multi-agent systems under fixed and switching topologies,” *Systems & Control Letters*, vol. 59, no. 3-4, pp. 209-217, 2010.
- [13] J. Jing and Y. Jiang, “Leader-following consensus of linear time-varying multi-agent systems under fixed and switching topologies,” *Automatica*, vol. 113, pp. 108-804, 2020.
- [14] X. Tan, J. Cao, and X. Li, “Consensus of leader-following multiagent systems: a distributed event-triggered impulsive control strategy,” *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 49, no. 3, pp. 792-801, 2018.
- [15] S. M. Kang, M. C. Park, B. H. Lee, K. K. Oh, and H. S. Ahn, “Distance-based formation control: background, principal results and issues,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 19, no. 5, pp. 398-409, 2013.
- [16] H. Bai and J. T. Wen, “Cooperative load transport: a formation-control perspective,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 4, pp. 742-750, 2010.



탁한호(Han-Ho Tack)

부경대학교 전자공학과 공학사
 동아대학교 전자공학과 공학석사
 한국해양대학교 전자통신공학과 공학박사
 신일전기(주) 전기기기설계담당
 <주> 흥창 부설연구소(연구원)
 University of British Columbia(UBC), Vancouver, CANADA, 연구교수
 경남과학기술대학교 융합기술공과대학 전자공학과 교수
 현재 경상국립대학교 융합기술공과대학 융합전자공학부 교수
 ※관심분야: 멀티미디어시스템, 지능시스템, 로봇틱스, 공장자동화, 트랜스포테이션, 기계진동 및 동역학



임영훈(Young-Hun Lim)

2010년 2월 단국대학교 전기공학과 공학사
 2012년 2월 광주과학기술원 기전공학부 공학석사
 2016년 2월 광주과학기술원 기전공학부 공학박사
 2017년 9월 ~ 2021년 2월 경남과학기술대학교 전자공학과 조교수
 2021년 3월 ~ 현재 경상국립대학교 융합전자공학부 부교수
 ※관심분야: 분산제어, 군집제어, 비선형제어, 포화 비선형