JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 25, No. 1: 102~107, Jan. 2021

입력 포화가 존재하는 다중 에이전트 시스템을 위한 PI기반의 봉쇄 제어

임영훈[1] · 탁한호[2] · 강신출[3*]

PI-based Containment Control for Multi-agent Systems with Input Saturations

Young-Hun Lim[1] · Han-Ho Tack[2] · Shin-Chul Kang[3*]

[1]Assistant Professor, Department of Electronic Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Gyeongnam, 52725 Korea
[2]Professor, Department of Electronic Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Gyeongnam, 52725 Korea
[3*]Professor, Department of Electricity, University of Gyeongnam Namhae, 52422 Korea

요 약

본 논문에서는 입력 포화가 존재하는 다중 에이전트 시스템의 봉쇄제어 문제를 다룬다. 봉쇄제어의 목표는 추종 에이전트들을 리더 에이전트들에 의해 형성된 convex hull 안으로 몰아넣음으로써 군집 행동을 얻는 것이다. 본 논문에서는 일정한 속도로 움직이는 리더 에이전트들을 고려한다. 움직이는 리더들을 고려한 봉쇄 문제를 해결하기 위하여 PI기반의 분산제어 알고리즘을 제안한다. 다음으로 추종 에이전트들의 목표 위치로의 수렴성을 해석한다. 구체적으로 포화 비선형성을 고려하기 위하여 적분 형태의 리아프노프 함수를 적용한다. 그리고 Lasalle's Invariance Principle을 기반으로 임의의 상수 이득들에 대하여 오차 상태들의 점근적 수렴성을 보인다. 마지막으로 고정된 리더들과 일정한 속도로 움직이는 리더들을 고려한 시뮬레이션을 진행하여 이론적 결과를 검증하였다.

ABSTRACT

This paper discusses the containment control problem for multi-agent systems with input saturations. The goal of the containment control is to obtain swarming behavior by driving follower agents into the convex hull which is spanned by multiple leader agents. This paper considers multiple leader agents moving at the same constant speed. Then, to solve the containment problem for moving leaders, we propose a PI-based distributed control algorithm. We next analyze the convergence of follower agents to the desired positions. Specifically, we apply the integral-type Lyapunov function to take into account the saturation nonlinearity. Then, based on Lasalle's Invariance Principle, we show that the asymptotic convergence of error states to zero for any positive constant gains. Finally, numerical examples with the static and moving leaders are provided to validate the theoretical results.

키워드 : 봉쇄제어, 입력 포화, 다중 에이전트 시스템, 분산제어
Keywords : Containment control, Input saturation, Multi-agent system, Distributed control

Received 2 December 2020, **Revised** 6 December 2020, **Accepted** 14 December 2020

*** Corresponding Author** Shin-Chul Kang(E-mail:kangs@namhae.ac.kr, Tel:+82-55-254-2552)
Professor, Department of Electricity, University of Gyeongnam Namhae, 52422 Korea

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.1.102 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/li-censes/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. 서 론

다중 에이전트 시스템은 단일 에이전트와 비교하여 임무에 대한 유연성, 적응성, 강인성 등 다양한 장점이 있어 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 다중 에이전트 시스템의 일치(consensus)란 에이전트들이 이웃들과의 정보교환을 통하여 모든 에이전트의 상태변수나 출력변수가 같은 값으로 수렴하는 것을 의미하고, 일치기법은 군집 및 편대비행, 분산 컴퓨팅, 센서 네트워크 등 다양한 분야에 응용이 되고 있다[1-4].

본 논문에서는 다중 리더가 존재하는 다중 에이전트 시스템의 군집을 위한 봉쇄제어문제를 연구한다. 봉쇄제어의 목표는 추종 에이전트들이 리더 에이전트들의 상태변수나 출력변수에 의해 생성되는 convex hull 안으로 수렴하도록 제어함으로써 그룹의 군집 행동을 얻는 것이다. 이러한 봉쇄제어는 다양한 장점을 갖는다. 예를 들어, 에이전트의 일부(리더 에이전트)에만 장애물 감지를 위한 센서를 장착하여 전체 그룹이 장애물 회피를 할 수 있다. 또한, 리더 에이전트가 하나일 경우 추종 에이전트들이 일치된 값으로 도달하는 리더-추종 일치제어가 되기 때문에 봉쇄제어는 일치제어의 일반화된 제어기법으로 볼 수 있다. 따라서 일치제어 기법을 기반으로 1차[5], 2차[6], 그리고 일반적인 고차[7] 미분방정식으로 표현된 에이전트들을 고려한 연구가 진행되었다.

한편 실제 시스템에는 다양한 제약조건들이 발생한다. 그중 제어관점에서 중요한 문제 중 하나로 입력의 포화 현상이 있다. 입력의 포화 현상은 구동기 출력이 제한되기 때문에 발생하는 현상으로 시스템의 성능과 안정성에 영향을 미치기 때문에 최근 입력 포화를 고려한 봉쇄제어기법에 대한 연구가 진행되고 있다[8-10].

본 논문에서는 입력 포화를 고려한 다중 에이전트 시스템의 봉쇄제어문제를 연구한다. 비록 입력 포화를 고려한 연구가 진행되어왔지만, [8,9]의 연구는 low-gain 기반의 제어기를 제안하여 반전역적인(semi-global) 수렴성만 증명하여 전체 에이전트들의 초기 상태가 주어진 영역안에 존재해야 하는 한계가 존재한다. 또한 [9,10]에서는 전역적인 수렴성을 보장하는 제어기를 제안하였지만, 정적인 리더들에 대한 수렴성[9]과 비선형 제어기[10]를 설계하여 실제 시스템에 적용에는 어려움이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 전역적인 수렴성을 보장하고, 일정한 속도로 움직이는 동적인 리더들을 고려한 강인성을 보장하기 위하여 PI(Proportional and Integral)제어기법을 기반으로 분산제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘을 기반으로 다중 에이전트 시스템의 전역적 수렴성을 증명하기 위하여 적분 형태의 리아프노프(Lyapunov) 함수를 기반으로 해석을 진행하여 수렴성을 보장하기 위한 PI 제어이득들에 대한 조건을 분석하였다. 마지막으로 시뮬레이션을 통하여 제안된 제어기의 유효성을 평가하였다.

Ⅱ. 다중 에이전트 시스템의 봉쇄제어

2.1. 봉쇄제어 문제정의

본 논문에서는 총 q개의 에이전트들로 이루어진 다중 에이전트 시스템을 고려한다. 에이전트 그룹은 p개의 추종 에이전트들과 $q-p$개의 리더 에이전트들로 구성된다. 추종 에이전트들의 움직임은 아래와 같이 1차 미분방정식으로 표현된다.

$$\dot{x}_i = sat(u_i), \quad i \in \mathrm{N_F} := \{1,2,....,p\} \tag{1}$$

여기서 $x_i \in \mathrm{R}^n$는 에이전트 i의 상태변수, $u_i \in \mathrm{R}^n$는 에이전트 i의 입력변수를 나타낸다. $sat(\cdot)$은 포화함수로 $sat(\cdot) = sign(\cdot)\min\{|\cdot|, \bar{u}\}$로 정의되고, 여기서 $\bar{u} > 0$는 입력 포화 레벨을 나타낸다.

다음으로 리더 에이전트들의 움직임은 아래와 같이 주어진다.

$$\dot{x}_i = u_0, \quad i \in \mathrm{N_L} := \{p+1, p+2, ..., q\} \tag{2}$$

여기서 $u_0 \in \mathrm{R}^n$는 리더 에이전트들의 입력으로 본 연구에서는 상수 벡터라 가정한다. 다음으로 리더들로 구성된 convex hull을 $Co(x_i, i \in \mathrm{N_L})$라 정의하자. 본 논문의 목표는 식 (1)과 같이 주어진 p개의 추종 에이전트들의 봉쇄제어 알고리즘을 개발하는 것이다. 여기서 봉쇄제어의 목표는 p개의 추종 에이전트들이 아래와 같이 $q-p$개의 리더들에 의해 구성된 convex hull로 수렴하는 것을 의미한다.

$$x_i(t) \to Co(x_j, j \in \mathrm{V_L}), \; t \to \infty, \forall i \in \mathrm{N_F} \tag{3}$$

봉쇄제어의 목표 식 (3)으로부터 만약 하나의 리더 에이전트만 존재하는 경우, 봉쇄제어 문제는 일반적인 리

더 추종 일치(leader-following consensus) 문제가 됨을 알 수 있다. 따라서 봉쇄제어 문제는 일치 또는 동기제어 문제의 일반적인 결과로 볼 수 있다.

추종 에이전트들에 존재하는 입력 포화로 인하여 식 (3)을 만족하기 위하여 리더들의 입력 u_0는 다음을 만족한다고 가정한다.

$$|u_0| \le \bar{u} \tag{4}$$

또한, 해석상의 편의를 위하여 에이전트들이 1차원 상에 존재한다고 가정한다. 즉, $n=1$이라고 가정한다.

2.2. 그래프 이론

본 논문에서는 식 (3)을 달성하기 위하여 분산제어기법을 적용한다. 분산제어기법은 에이전트 간의 정보교환을 통하여 목표를 달성하기 위한 기법이다. 이 절에서는 분산제어기법의 수학적 해석을 위하여 그래프 이론을 소개한다. 그래프 $\mathrm{G}=(\mathrm{N},\mathrm{E},\mathrm{A})$는 노드(node)의 집합 $\mathrm{N}=\mathrm{N_F}\cup\mathrm{N_L}=\{1,2,...,q\}$, 엣지(edge)의 집합 $\mathrm{E}\subseteq\mathrm{N}\times\mathrm{N}$, 그리고 인접행렬(adjacency matrix) $\mathrm{A}=[a_{ij}]\in\mathrm{R}^{q\times q}$로 구성된다. 여기서 노드는 에이전트를 의미하고, 엣지는 두 에이전트 사이의 정보교환 여부를 의미한다. 만약 $(i,j)\in\mathrm{E}$인 경우, 에이전트 i는 j로부터 정보를 받을 수 있다. 또한 $(i,j)\in\mathrm{E}$인 경우 $a_{ij}>0$이고, 그 외에는 $a_{ij}=0$이다.

그래프에서 경로(path)는 서로 겹치지 않는 엣지들을 순차적으로 나열한 것이다. 만약 노드 i로부터 j로의 경로가 존재한다면 노드 i는 j로부터 도달 가능하다(reachable)고 한다. 그래프의 임의의 두 노드 $i,j\in\mathrm{N}$에 대하여 i,j 사이에 경로가 존재한다면 그래프는 연결되어 있다(connected)라고 한다.

그래프 G의 라플라시안 행렬(Laplacian matrix) $L=[l_{ij}]\in\mathrm{R}^{q\times q}$은 $l_{ii}=\sum_{j=1,j\neq i}^{q}a_{ij},\ l_{ij}=-a_{ij},\ i\neq j$로 정의된다. 본 논문에서는 리더 에이전트들은 추종 에이전트들에게 정보를 줄 수 있지만, 다른 에이전트들로부터 정보를 받을 수 없다고 가정한다. 따라서 모든 $i\in\mathrm{N_L}$, $j\in\mathrm{N}$에 대하여 $a_{ij}=0$을 성립하여 그래프 G의 라플라시안 행렬은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$L=\begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서 $L_1\in\mathrm{R}^{p\times p}$, $L_2\in\mathrm{R}^{\mathrm{p}\times(\mathrm{q}-\mathrm{p})}$이다.

본 논문에서는 추종 에이전트들 간의 정보교환은 양방향성이라 가정한다. 즉, 모든 $i,j\in\mathrm{N_F}$에 대하여 $a_{ij}=a_{ji}$를 만족한다. 또한, 추종 에이전트들 간의 정보교환은 연결되어 있고, 각 추종 에이전트들로부터 도달 가능한 리더 에이전트가 적어도 하나는 존재한다고 가정한다. 이러한 가정하에 L_1은 양의 정부호 실수대칭행렬(positive-definite real symmetric matrix)이 된다. 또한 행렬 $-L_1^{-1}L_2$의 각 원소들은 음이 아니고(nonnegative), 각 행의 합은 1이 된다[5].

다음으로 전역변수 $x_\mathrm{F}\in\mathrm{R}^p$, $x_\mathrm{L}\in\mathrm{R}^{(q-p)}$을 각 $x_\mathrm{F}=[x_1,...,x_p]^T$, $x_\mathrm{L}=[x_{p+1},x_{p+2},...,x_q]^T$이라고 정의하자. 라플라시안 행렬의 특성으로부터 만약 추종 에이전트들이 아래와 같이 수렴한다면 봉쇄제어의 목표 식 (3)을 달성한다고 할 수 있다[8].

$$x_\mathrm{F}(t)\to -L_1^{-1}L_2x_\mathrm{L}(t),\ t\to\infty \tag{6}$$

2.3. PI기반 봉쇄제어 알고리즘의 설계

본 논문에서는 이웃한 에이전트와의 정보교환을 기반으로 상태변수 차이를 이용하여 아래와 같은 PI기반의 봉쇄제어 알고리즘을 제안한다.

$$\begin{aligned} u_i &= k_\mathrm{P}\sum_{j=1,j\neq i}^{q}a_{ij}(x_j-x_i)+k_\mathrm{I}\,v_i \\ \dot{v}_i &= \sum_{j=1,j\neq i}^{q}a_{ij}(x_j-x_i),\ i\in\mathrm{N_F} \end{aligned} \tag{7}$$

위 식에서 $k_\mathrm{P},k_\mathrm{I}>0$는 각 P, I 제어이득을 나타낸다. 다음으로 $u=[u_1,...,u_p]^T$, $v=[v_1,...,v_p]^T$라 하면 라플라시안 행렬의 정의로부터 봉쇄제어 알고리즘 식 (7)은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= -k_\mathrm{P}L_1x_\mathrm{F}-k_\mathrm{P}L_2x_\mathrm{L}+k_\mathrm{I}v \\ \dot{v} &= -L_1x_\mathrm{F}-L_2x_\mathrm{L} \end{aligned} \tag{8}$$

다음으로 봉쇄제어의 목표 식 (3)을 달성하기 위한 제어이득 $k_\mathrm{P},k_\mathrm{I}$를 선정하기 위하여 상태 오차를 아래와 같이 정의한다.

$$e=x_\mathrm{F}+L_1^{-1}L_2x_\mathrm{L} \tag{9}$$

식 (6)으로부터 만약 상태 오차 e가 0으로 수렴한다면 봉쇄제어 목표 식 (3)을 달성한다고 할 수 있다. 상태

오차의 수렴성을 조사하기 위하여 오차 방정식을 고려한다. 식 (1), (2), (9)로부터 오차 방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{e} &= \dot{x}_{\mathrm{F}} + L_1^{-1}L_2\dot{x}_{\mathrm{L}} \\ &= sat(u) + L_1^{-1}L_2u_0 1_p \\ &= sat(u) - u_0 1_p\end{aligned} \tag{10}$$

위 식 (10)에서 $1_p \in \mathrm{R}^p$은 모든 원소가 1인 벡터를 의미하고, $-L_1^{-1}L_2$의 각 행의 합이 1이기 때문에 $-L_1^{-1}L_2 1_p = 1_p$이 된다. 또한, 봉쇄제어 알고리즘 (7)은 아래와 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}u &= -k_{\mathrm{P}}L_1x_{\mathrm{F}} - k_{\mathrm{P}}L_2x_{\mathrm{L}} + k_{\mathrm{I}}v \\ &= -k_{\mathrm{P}}L_1\left(x_{\mathrm{F}} + L_1^{-1}L_2x_{\mathrm{L}}\right) + k_{\mathrm{I}}v \\ &= -k_{\mathrm{P}}L_1e + k_{\mathrm{I}}v \\ \dot{v} &= -L_1e\end{aligned} \tag{11}$$

다음으로 오차 방정식 (10)의 수렴성을 조사를 위하여 리아프노프(Lyapunov) 안정성 이론을 적용한다. 아래와 같이 주어진 리아프노프 함수를 고려하자.

$$\begin{aligned}V &= V_1 + V_2 \\ V_1 &= \sum_{i\in \mathrm{N_F}} \int_{u_0}^{u_i} \left(sat(\tau) - u_0\right) d\tau \\ V_2 &= \frac{k_{\mathrm{I}}}{2} e^T L_1 e\end{aligned} \tag{12}$$

우선 수렴성 해석을 위하여 V_1을 고려한다. $\zeta_i = sat(u_i) - u_0$라 하고 $\zeta = [\zeta_1, ..., \zeta_p]^T$라 정의하면, V_1의 도함수는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= \sum_{i\in \mathrm{N_F}} \left(sat(u_i) - u_0\right)\dot{u}_i \\ &= \zeta^T\left(-k_{\mathrm{P}}L_1\dot{e} + k_{\mathrm{I}}\dot{v}\right) \\ &= \zeta^T\left(-k_{\mathrm{P}}L_1\left(sat(u) - u_0 1_p\right) - k_{\mathrm{I}}L_1e\right) \\ &= \zeta^T\left(-k_{\mathrm{P}}L_1\zeta - k_{\mathrm{I}}L_1e\right)\end{aligned} \tag{13}$$

다음으로 아래와 같이 V_2의 도함수를 고려하자.

$$\dot{V}_2 = k_{\mathrm{I}}e^TL_1\dot{e} = k_{\mathrm{I}}e^TL_1\zeta \tag{14}$$

식 (13), (14)로부터 리아프노프 함수 V의 도함수는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \zeta^T\left(-k_{\mathrm{P}}L_1\zeta - k_{\mathrm{I}}L_1e\right) + k_{\mathrm{I}}e^TL_1\zeta \\ &= -k_{\mathrm{P}}\zeta^TL_1\zeta\end{aligned} \tag{15}$$

따라서 식 (15)와 (12)로부터 $k_{\mathrm{P}} > 0$, $k_{\mathrm{I}} \geq 0$을 만족한다면 $\dot{V} \leq 0$이고, $\zeta = 0$인 경우에만 $\dot{V} = 0$이 됨을 알 수 있다. 즉, $\lim_{t\to\infty}\zeta = \lim_{t\to\infty} sat(u) - u_0 1_p = 0$이 되고, 식 (4)로부터 $\lim_{t\to\infty} u = u_0 1_p$이 됨을 알 수 있다. $\zeta = 0$인 경우 $\dot{e} = 0$이 되고, $k_{\mathrm{I}} > 0$인 경우 $\dot{v} = -L_1e = 0$이 된다. 여기서 L_1은 양의 정부호 실수대칭행렬이기 때문에 $e = 0$이 된다.

결론적으로 $k_{\mathrm{P}}, k_{\mathrm{I}} > 0$을 만족한다면 $\dot{V} \leq 0$이고 $\dot{V} = 0$은 $\zeta = 0$, $e = 0$인 경우에만 만족된다. 따라서 Lasalle's Invariance Principle에 따라 $\lim_{t\to\infty} e = 0$, 즉 봉쇄제어를 달성함을 알 수 있다.

비록 2장에서는 1차 다중 에이전트 시스템을 고려하였지만, 제안된 알고리즘은 각 차원에 대하여 독립적으로 적용이 가능하기 때문에 $n > 1$인 시스템에 대해서도 동일한 해석을 통하여 수렴성을 증명할 수 있다.

Ⅲ. 모의실험

본 논문에서는 2차 다중 에이전트 시스템을 고려하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에서는 개의 추종 ($\mathrm{N_F} = \{1,2,3,4 RIGHT\}$) 에이전트와 4개의 리더 ($\mathrm{N_L} = \{5,6,7,8 RIGHT\}$) 에이전트를 고려하였고, 에이전트 사이의 정보교환 그래프는 그림 1과 같이 주어진다고 고려하였다.

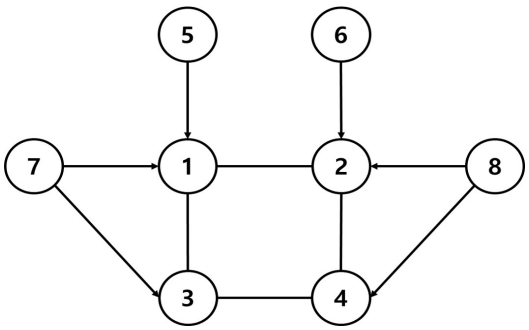

Fig. 1 Communication Graph between followers ($\mathrm{N_F} = \{1,2,3,4\mathrm{RIGHT}\}$) and leaders ($\mathrm{N_L} = \{5,6,7,8\}$)

또한, 모든 $(i,j) \in \mathrm{E}$에 대하여 $a_{ij} = 1$로 설정하였다. 따라서 라플라시안 행렬의 정의에 의하여 L_1과 L_2는 아래와 같이 주어진다.

$$L_1 = \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 3 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{17}$$

리더 에이전트들의 초기 위치는 각 $(-3,3)$, $(-3,0)$, $(3,3)$, $(3,0)$으로 설정하였고, 추종 에이전트들은 $(-6,-2)$, $(-8,3)$, $(8,7)$, $(5,-5)$로 설정하였다. 또한, 추종 에이전트들의 입력 포화 레벨은 $\overline{u}=[1,1]^T$로 설정하였고, 반복된 시뮬레이션을 통하여 제어기의 이득을, $k_{\mathrm{I}}=0.5$로 설정하였다.

제어기의 성능을 테스트하기 위하여 정적인 리더들($u_0=[0,0]^T$)과 동적인 리더들($u_0=[0.5,0.5]^T$)을 고려한 시뮬레이션을 진행하였다. 정적인 리더들에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 2와 3에서 볼 수 있다. 그림 2는 정적인 리더들에 대하여 모든 에이전트들의 경로를 나타내고, 그림 3은 추종 에이전트들의 에러 norm을 나타낸다. 또한, 동적인 리더들에 대한 에이전트들의 경로는 그림 4, 그리고 추종 에이전트들의 에러 norm은 그림 5에서 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 제안된 알고리즘은 정적인 리더들뿐 아니라 동적인 리더들에 대해서도 봉쇄제어 목표를 달성할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 입력 포화를 고려한 다중 에이전트 시스템의 봉쇄제어 문제를 연구하였다. 전역적인 해석과 동적인 리더들에 대한 강인성을 보장하기 위하여 PI기반의 봉쇄제어 알고리즘을 제안하였고, 적분 형태의 리아프노프 함수를 적용하여 입력 포화의 비선형성을 고려한 수렴성을 증명하였다. 마지막으로 시뮬레이션을

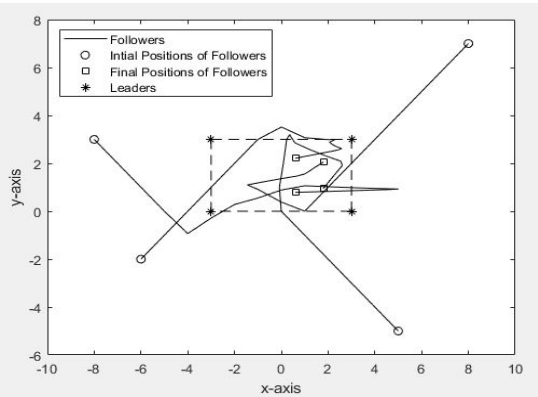

Fig. 2 Trajectories of all agents with static leaders

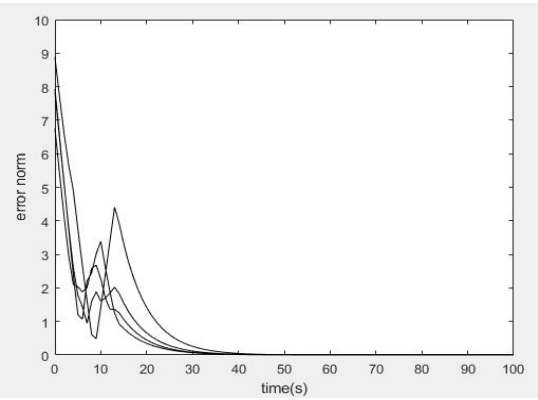

Fig. 3 Error norms of follower agents with static leaders

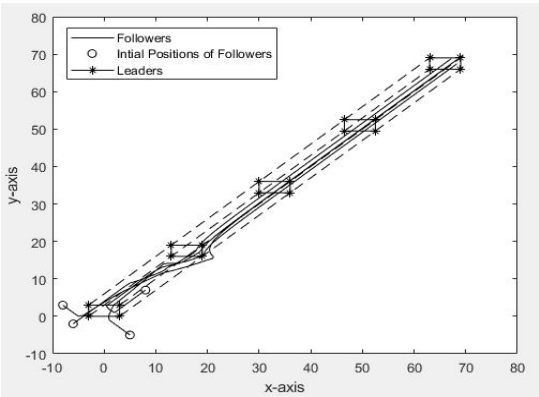

Fig. 4 Trajectories of all agents with moving leaders

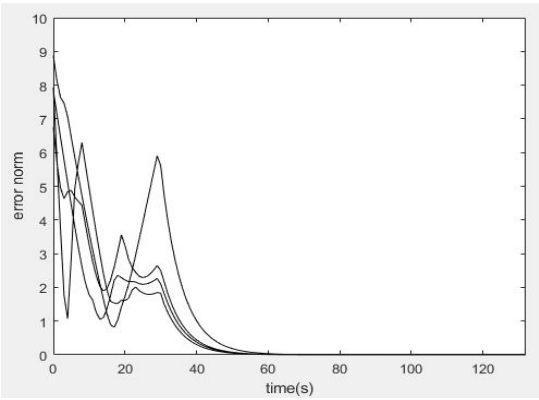

Fig. 5 Error norms of follower agents with static leaders

통하여 정적인 리더들뿐 아니라 동적인 리더들에 대한 수렴성을 확인하였다. 제안된 알고리즘은 기존 결과들과 비교하여 산업현장에서 일반적으로 사용되는 PI제어기를 기반으로 설계되어 실제 산업현장으로의 적용이 용이할 것으로 기대된다. 따라서 차후에는 본 논문에 제안한 제어기를 확장하여 실제 시스템의 모델을 고려한 해석 및 실험을 진행하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the research invigoration program of 2020 Gyeongnam National University of Science and Technology

REFERENCES

[1] J. Qin, Q. Ma, Y. Shi, and L. Wang, "Recent advances in consensus of multi-agent systems: A brief survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 4972-4983, Jun. 2017.

[2] Y. Li and C. Tan, "A survey of the consensus for multi-agent systems," *Systems & Control Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 468-482, Nov. 2019.

[3] J. P. Hong, "Distributed file placement and coverage expansion techniques for network throughput enhancement in small-cell network," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 183-189, Jan. 2018.

[4] J. C. Na, "Optimization in cooperative spectrum sensing," *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange*, vol. 3, no. 1, pp. 19-31, Mar. 2017.

[5] Y. Cao, W. Ren, and M. Egerstedt, "Distributed containment control with multiple stationary or dynamic leaders in fixed and switching directed networks," *Automatica*, vol. 48, no. 8, pp. 1586-1597, Aug. 2012.

[6] Y. Cao, D. Stuart, W. Ren, and Z. Meng, "Distributed containment control for multiple autonomous vehicles with double-integrator dynamics: Algorithms and experiments," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 19, no. 4, pp. 929-938, Jul. 2011.

[7] Z. Li, W. Ren, X. Liu, and M. Fu, "Distributed containment control of multi-agent systems with general linear dynamics in the presence of multiple leaders," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 23, no. 5, pp. 534-547, Mar. 2013.

[8] H. Su, G. Jia, and M. Z. Q. Chen, "Semi-global containment control of multi-agent systems with input saturation," *IET Control Theory & Applications*, vol. 8, no. 18, pp. 2229-2237, Dec. 2014.

[9] Q. Song, F. Liu, H. Su, and A. V. Vasilakos, "Semi-global and global containment control of multi-agent systems with second-order dynamics and input saturation," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 16, no. 10, pp. 3460-3480, Nov. 2016.

[10] J. Fu, Y. Wan, G. Wen, and T. Huang, "Distributed robust global containment control of second-order multiagent systems with input saturation," *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 1426-1437, Dec. 2019.

임영훈(Young-Hun Lim)

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

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
※관심분야 : 멀티미디어시스템, 지능시스템, 로보틱스, 공장자동화, 트랜스포테이션, 기계진동 및 동역학

강신출(Shin-Chul Kang)

부경대학교 전기공학과 공학사
동아대학교 전자공학과 공학석사
동아대학교 전자공학과 공학박사
한국통신(KT) 전력과장
창원기능대학 생산자동화기술학과 교수
1997년 3월 ~ 현재 경남도립남해대학 전기과 교수
※관심분야 : 컴퓨터제어, PLC제어, 퍼지 및 인공지능