

# 다개체 이동 로봇을 위한 선도-추종 접근법 기반 적응 군집 제어

## Leader-Following Based Adaptive Formation Control for Multiple Mobile Robots

박 봉 석, 박 진 배\*  
(Bong Seok Park and Jin Bae Park)

**Abstract:** In this paper, an adaptive formation control based on the leader-following approach is proposed for multiple mobile robots with time varying parameters. The proposed controller does not require the velocity information of the leader robot, which is commonly assumed that it is either measured or telecommunicated. In order to estimate time varying velocities of the leader robot, the smooth projection algorithm is employed. From the Lyapunov stability theory, it is proved that the proposed control scheme can guarantee the uniform ultimate boundedness of error signals of the closed-loop system. Finally, the computer simulations are performed to demonstrate the performance of the proposed control system.

**Keywords:** formation control, leader-following approach, mobile robot, projection algorithm, leader velocity

### I. 서론

군집 제어(formation control)는 탐색, 구조, 협업과 같은 작업들의 경우 단일 로봇에 비해 많은 장점들을 가지고 있기 때문에 많은 연구자들로부터 관심을 받아왔다. 이러한 군집 제어 방식은 크게 행동 기반(behavior based) 접근 방식[1-3], 가상 구조(virtual structure) 접근 방식[4-6], 선도-추종(leader-following) 접근법[7-10]으로 분류할 수 있다. 행동 기반 접근 방식은 다수의 임무가 부여되었을 때 제어 전략을 수립하기 용이하나 수식적 구현과 전체 로봇의 안정도 보장이 어렵다. 가상 구조 접근 방식은 전체 로봇의 행동을 묘사하기는 쉬우나 군집 대형을 유지하기 위해 광대역 통신이 필요하다. 선도-추종 접근법은 선도 로봇이 고정할 경우 군집 대형을 유지하기 어렵다는 단점이 있지만 구현이 용이하고 확장성이 우수하기 때문에 많이 사용되고 있다.

선도 로봇-추종 로봇 접근법은 [7]에서 처음 제안되었으며, [8]에서는 가상 로봇 개념을 이용하였고 [9]에서는 시각(vision)을 이용하여 장애물도 회피할 수 있는 제어를 설계하였다. 그러나 이동 로봇의 비홀로노믹 제약 조건(nonholonomic constraints) 때문에 상기의 논문들에서 제안된 제어 기법들은 리아프노프 직접법(Lyapunov direct method)을 이용하여 모든 오차(error)의 점근 안정성(asymptotic stability)을 증명하지 못하였다. 이를 해결하기 위해 최근 [10]에서는 기준 방위각(reference orientation)을 이용하여 오차들의 점근 안정성을 증명하였다. 하지만 상기의 논문에서 제안된 제어 기법은 선도 로봇의 속도 정보를 정확히 알아야만 하는 제한성을 가진다. 즉, 선도 로봇이 자신의 속도 정보를 센서를 통해 측정하고 추종 로봇들에게 통신을 이용하여 전달해야만 한다. 센서를 이용하여 속도 정보를 정확히 추정하는 것은 많은 어려움이

따르고 또한 통신을 통해 정보를 전달할 경우 정보의 지연, 전달 오류 등과 같은 문제점도 야기할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 시간에 따라 변하는 선도 로봇의 속도 정보를 모르는 경우에도 군집 제어가 가능한 적응 군집 제어를 제안한다. 모든 오차의 수렴성을 보이기 위해 [10]에서 제안한 기법을 수정보완하며, 투영 알고리즘(projection algorithm)을 이용하여 시간에 따라 변하는 선도 로봇의 속도 정보를 추정한다. 또한 제안된 제어기의 안정도를 분석함에 있어서 리아프노프 이론을 이용하여 제어 시스템 안의 모든 오차들이 상시 유계(uniformly ultimately bounded) 됨을 증명한다. 마지막으로 시뮬레이션 결과를 통해 본 논문에서 제안하는 제어기의 성능을 검증하고자 한다.

표기법: 본 논문에서는  $j$ 번째 추종 로봇에 대한 정보를 " $j$ " 첨자로 표시하며, 선도 로봇을 " $1$ " 첨자로 표시한다.

### II. 군집 모델

본 논문에서는 다개체 로봇의 군집 제어를 위해 그림 1과 같은 선도-추종 접근법을 이용하며, 단일 로봇의 추종 제어 문제를 군집 제어 문제로 확장하기 위해 가상 선도 로봇 개념을 이용한다. 즉, 군집을 유지하기 위해 선도 로봇으로부터 떨어져야 할 거리 및 각도를 유지해야 하는 위치에 가상 선

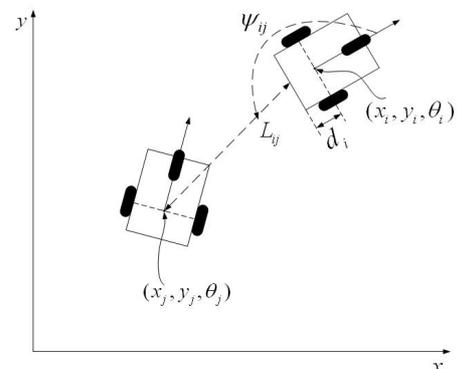


그림 1. 선도-추종 접근법 기반 군집 모델.

Fig. 1. Leader-following based formation model.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 10. 20., 수정: 2009. 12. 28., 채택확정: 2010. 2. 12.

박봉석, 박진배: 연세대학교 전기전자공학과

(bongseok@yonsei.ac.kr/jbpark@yonsei.ac.kr)

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2009-0073583).

※ 상기 논문은 KACC2009 학술대회에서 초안이 발표되었습니다.

도 로봇을 위치시키고 추종 로봇은 가상 선도 로봇의 궤적을 정확히 추종하게 하는 것이다. 이 때 각각의 추종 로봇이 각각의 가상 선도 로봇의 궤적을 정확히 추종한다면 각각의 가상 선도 로봇은 선도 로봇으로부터 일정 거리 및 각도를 유지하기 때문에 원하는 군집을 이룰 수 있게 된다.

선도 로봇의 위치를  $(x_i, y_i, \theta_i)$  로 표현한다면  $j$ 번째 추종 로봇이 추종해야 할 가상 선도 로봇의 위치  $(x_{jr}, y_{jr}, \theta_{jr})$  는 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_{jr} &= x_i - d_i \cos \theta_i + L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_i) \\ y_{jr} &= y_i - d_i \sin \theta_i + L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_i) \\ \theta_{jr} &= \theta_i \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $L_{ij}^d$  와  $\psi_{ij}^d$  는 각각 선도 로봇과 추종 로봇 사이의 원하는 거리와 각도이며,  $d_i > 0$  는 선도 로봇의 중심점과 뒷부분 사이의 거리이다.  $\theta_{jr}$  은 가상 선도 로봇의 방위각으로서 III 장에서 정의될 것이다. 다음으로  $j$ 번째 추종 로봇의 위치  $(x_j, y_j, \theta_j)$  를 선도 로봇의 위치로 표현하면 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} x_j &= x_i - d_i \cos \theta_i + L_{ij} \cos(\psi_{ij} + \theta_i) \\ y_j &= y_i - d_i \sin \theta_i + L_{ij} \sin(\psi_{ij} + \theta_i) \\ \theta_j &= \theta_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $L_{ij}$  와  $\psi_{ij}$  는  $j$ 번째 추종 로봇과 선도 로봇 사이의 실제 거리 및 각도이다.

가정 1:  $L_{ij}$ ,  $\psi_{ij}$ ,  $\theta_i$ ,  $\theta_j$  는 센서를 이용하여 측정할 수 있으며, 추종 로봇은 통신을 통하여 선도 로봇의 방위각인  $\theta_i$  에 대한 정보를 얻을 수 있다고 가정한다.

### III. 적응 군집 제어

#### 1. 적응 제어기 설계

적응 군집 제어기를 설계하기 위해 오차를 (3)과 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} e_{j1} \\ e_{j2} \\ e_{j3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) - L_{ij} \cos(\psi_{ij} + \theta_j) \\ L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) - L_{ij} \sin(\psi_{ij} + \theta_j) \\ \theta_{jr} - \theta_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$  이며,  $\theta_{jr}$  은 (4)에 의해 정의된다.

$$\dot{\theta}_{jr} = \frac{1}{d_i} (\hat{\omega}_i L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + \hat{v}_i \sin \theta_{ij} + k_{j2} e_{j2} + \beta_j) \quad (4)$$

여기서  $\beta_j = \lambda_{j1} \theta_{jr} + \delta_j \tanh(\frac{\delta_j \theta_{jr}}{\varepsilon_j})$ ,  $\theta_{jr} = \theta_i - \theta_{jr}$ ,  $\delta_j = |\hat{v}_i| + L_{ij}^d |\hat{\omega}_i| + d_i \omega_i$  이다.  $k_{j2}$ ,  $\lambda_{j1}$ ,  $\varepsilon_j$  는 양수로서 제어기의 이득 (gain)이다.  $\hat{v}_i$  와  $\hat{\omega}_i$  은 각각 선도 로봇의 선속도  $v_i$  와 각속도  $\omega_i$  를 투영 알고리즘[11]을 이용하여 추정한다.

가정 2: 선도 로봇의 속도인  $v_i$  와  $\omega_i$  는 미분 가능하고 시변(time varying)이며, 미지의 값이고  $v_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\dot{v}_i$ ,  $\dot{\omega}_i$  의 경계치 (bound)가 있다고 가정한다. 즉,  $|v_i| \leq \Omega_v$ ,  $|\omega_i| \leq \Omega_\omega$ ,  $|\dot{v}_i| \leq \mu_v$ ,

$|\dot{\omega}_i| \leq \mu_\omega$  이다.

가정 3:  $-\pi < \theta_{jr}, \theta_i, \theta_j \leq \pi$  이다.

정의 1:  $\phi(t) \in r_\Omega$  는 시변인 미지의 파라미터 벡터이고  $\hat{\phi}$  을 추정치라고 한다면 투영 알고리즘  $\text{Proj}(y, \hat{\phi})$  는 (5)와 같이 정의된다[11].

$$\text{Proj}(y, \hat{\phi}) = \begin{cases} y, & \text{if } p(\hat{\phi}) \leq 0 \\ y, & \text{if } p(\hat{\phi}) \geq 0 \text{ and } \frac{\partial p}{\partial \hat{\phi}} y \leq 0 \\ y - \frac{p(\hat{\phi}) \frac{\partial p}{\partial \hat{\phi}} y}{\left\| \frac{\partial p}{\partial \hat{\phi}} \right\|^2}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $p(\hat{\phi}) = (\hat{\phi}^T \hat{\phi} - r_\Omega^2) / (\kappa^2 + 2\kappa r_\Omega)$   $\| \cdot \|$  는 유클리디안 벡터 놈(Euclidean vector norm),  $\kappa$  는 임의의 양수로서 추정 오차를 나타낸다.

특성 1 [11]:  $\| \hat{\phi}(t) \| \leq r_\Omega + \kappa, \forall t \geq 0$ .

특성 2 [11]:  $\hat{\phi}^T \text{Proj}(y, \hat{\phi}) \geq \hat{\phi}^T y$ ,  $\dot{\hat{\phi}} = \hat{\phi} - \hat{\phi}$ .

참조 1:  $\theta_{jr}$  은 리아프노프 직접법을 이용하여 (3)으로 주어진 오차들의 수렴성을 보이기 위해 사용된 기준 방위각이다. 우선  $e_{j3}$  의 수렴성을 보인 후  $\theta_{jr}$  이  $\theta_i$  로 수렴함을 보임으로써 최종적으로  $\theta_j$  가  $\theta_i$  로 수렴하게 된다.

(3)의 오차 방정식(error dynamics)을 구하기 위해 필요한  $\dot{L}_{ij}$  와  $\dot{\psi}_{ij}$  은 (6)과 같이 정의할 수 있다[9].

$$\begin{aligned} \dot{L}_{ij} &= v_j \cos(\psi_{ij} + \theta_{ij}) + d_i \omega_j \sin(\psi_{ij} + \theta_{ij}) - v_i \cos \psi_{ij} \\ \dot{\psi}_{ij} &= -\frac{v_j}{L_{ij}} \sin(\psi_{ij} + \theta_{ij}) + \frac{d_i \omega_j}{L_{ij}} \cos(\psi_{ij} + \theta_{ij}) + \frac{v_i}{L_{ij}} \sin \psi_{ij} - \omega_i \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $v_j$  와  $\omega_j$  는 각각  $j$ 번째 추종 로봇의 선속도 및 각속도를 나타낸다. (6)을 (3)의 미분값에 대입하면 (7)과 같은 오차 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{j1} \\ \dot{e}_{j2} \\ \dot{e}_{j3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_j + v_i \cos \theta_{ij} + \omega_j e_{j2} - \omega_i L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ v_i \sin \theta_{ij} - \omega_j e_{j1} - d_j \omega_j + \omega_i L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \dot{\theta}_{jr} - \omega_j \end{bmatrix} \quad (7)$$

이 때 본 논문에서는 제어 입력  $v_j$  와  $\omega_j$  를 (8)과 같이 제안한다.

$$\begin{aligned} v_j &= \hat{v}_i \cos \theta_{ij} + k_{j1} e_{j1} - \hat{\omega}_i L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) \\ \omega_j &= \frac{1}{d_i} (\hat{\omega}_i L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + \hat{v}_i \sin \theta_{ij} + k_{j2} e_{j2} + k_{j3} e_{j3} - \frac{1}{4} \lambda_{j2} e_{j3}) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $k_{j1}$ ,  $k_{j3}$ ,  $\lambda_{j2}$  는 양수이다.  $\hat{v}_i$  와  $\hat{\omega}_i$  의 학습 법칙을 구하기 위해 정의 1의 투영 알고리즘을 이용하며, 학습 법칙은 (9)와 같이 표현된다.

$$\dot{\hat{v}}_i = \gamma_{1j} \text{Proj}(y_{vj}, \hat{v}_i), \quad \dot{\hat{\omega}}_i = \gamma_{2j} \text{Proj}(y_{\omega j}, \hat{\omega}_i) \quad (9)$$

여기서  $\gamma_{1j}$  과  $\gamma_{2j}$  는 양수이며,  $y_{vj} = e_{j1} \cos \theta_{ij} + e_{j2} \sin \theta_{ij}$ ,

$y_{\omega j} = -e_{j1}L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + e_{j2}L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij})$  이다.

## 2. 안정도 해석

본 논문에서는 설계된 제어기의 안정도를 분석하기 위해 리아프노프 안정도 해석 기법을 이용한다.

정리 1: (10)과 같이 주어진 시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{L}_{ij} &= v_j \cos \theta_{ij} + d_i \omega_j \sin \theta_{ij} - \cos \psi_{ij} \\ \dot{\psi}_{ij} &= \frac{1}{L_{ij}}(-v_j \sin \theta_{ij} + d_i \omega_j \cos \theta_{ij} + v_i \sin \psi_{ij}) - \omega_i \end{aligned} \quad (10)$$

만약 가정 1-3이 만족되고 (9)에 의해  $\hat{v}_i$ 와  $\hat{\omega}_i$ 가 학습된다면 (8)과 같이 주어진 제어 입력에 의해 제어 시스템 안의 모든 오차들은 상시 유계 된다.

증명: 리아프노프 함수를 (11)과 같이 정의하자.

$$V = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2}(e_{j1}^2 + e_{j2}^2 + d_i e_{j3}^2 + \frac{1}{\gamma_{1j}} \tilde{v}_i^2 + \frac{1}{\gamma_{2j}} \tilde{\omega}_i^2) \quad (11)$$

(7)을 (11)의 미분값에 대입하면 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{j=1}^n [e_{j1}(-v_j + v_i \cos \theta_{ij} + \omega_j e_{j2} - \omega_i L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij})) \\ &\quad + e_{j2}(v_j \sin \theta_{ij} - \omega_j e_{j1} - d_i \omega_j + \omega_i L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij})) \\ &\quad + d_i e_{j3}(\hat{\theta}_{jr} - \omega_j) + \frac{1}{\gamma_{1j}} \tilde{v}_i(\dot{v}_i - \hat{v}_i) + \frac{1}{\gamma_{2j}} \tilde{\omega}_i(\dot{\omega}_i - \hat{\omega}_i)] \end{aligned} \quad (12)$$

(12)에 (8)을 대입하면 (13)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{j=1}^n [e_{j1}(\tilde{v}_i \cos \theta_{ij} - \tilde{\omega}_i L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij})) - k_{j1} e_{j1}] \\ &\quad + e_{j2}(\tilde{v}_i \sin \theta_{ij} + \tilde{\omega}_i L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij})) - k_{j2} e_{j2} - \frac{1}{4} \lambda_{j2} e_{j3} \\ &\quad + e_{j3}(\beta_j - k_{j3} e_{j3} - \frac{1}{4} \lambda_{j2} e_{j3}) + \frac{1}{\gamma_{1j}} \tilde{v}_i(\dot{v}_i - \hat{v}_i) + \frac{1}{\gamma_{2j}} \tilde{\omega}_i(\dot{\omega}_i - \hat{\omega}_i)] \\ &= \sum_{j=1}^n [-k_{j1} e_{j1}^2 - k_{j2} e_{j2}^2 - k_{j3} e_{j3}^2 - k_{j3} e_{j2} e_{j3} \\ &\quad + \tilde{v}_i(e_{j1} \cos \theta_{ij} + e_{j2} \sin \theta_{ij} - \frac{1}{\gamma_{1j}} \hat{v}_i) \\ &\quad + \tilde{\omega}_i(-e_{j1} L_{ij}^d \sin(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) + e_{j2} L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij})) - \frac{1}{\gamma_{2j}} \hat{\omega}_i \\ &\quad - \frac{1}{4} \lambda_{j2} e_{j2} e_{j3} + e_{j3}(\beta_j - \frac{1}{4} \lambda_{j2} e_{j3}) + \frac{1}{\gamma_{1j}} \tilde{v}_i \dot{v}_i + \frac{1}{\gamma_{2j}} \tilde{\omega}_i \dot{\omega}_i] \end{aligned} \quad (13)$$

(13)에 (9)를 대입하면 투영 알고리즘의 특성 2에 의해 (14)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{j=1}^n [-k_{j1} e_{j1}^2 - k_{j2} e_{j2}^2 - k_{j3} e_{j3}^2 - k_{j3} e_{j2} e_{j3} + \tilde{v}_i(y_{vj} - \text{Proj}(y_{vj}, \hat{v}_i)) \\ &\quad + \tilde{\omega}_i(y_{\omega j} - \text{Proj}(y_{\omega j}, \hat{\omega}_i)) - \frac{1}{4} \lambda_{j2} e_{j2} e_{j3} + e_{j3}(\beta_j - \frac{1}{4} \lambda_{j2} e_{j3}) \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_{1j}} \tilde{v}_i \dot{v}_i + \frac{1}{\gamma_{2j}} \tilde{\omega}_i \dot{\omega}_i] \\ &\leq \sum_{j=1}^n [-k_{j1} e_{j1}^2 - k_{j2} e_{j2}^2 - k_{j3} e_{j3}^2 - k_{j3} e_{j2} e_{j3} - \frac{1}{4} \lambda_{j2} e_{j2} e_{j3} \\ &\quad + e_{j3}(\beta_j - \frac{1}{4} \lambda_{j2} e_{j3}) + \frac{1}{\gamma_{1j}} \tilde{v}_i \dot{v}_i + \frac{1}{\gamma_{2j}} \tilde{\omega}_i \dot{\omega}_i] \end{aligned} \quad (14)$$

이 때 Young의 부등식(즉,  $\frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 \geq z_1 z_2$ ) 을 이용하면 (15)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \sum_{j=1}^n [-k_{j1} e_{j1}^2 - (k_{j2} - \frac{k_{j3}}{2} - \frac{\lambda_{j2}}{8}) e_{j2}^2 - (\frac{k_{j3}}{2} - \frac{\lambda_{j2}}{8}) e_{j3}^2 \\ &\quad - \frac{\tilde{v}_i^2}{\gamma_{j1}} - \frac{\tilde{\omega}_i^2}{\gamma_{j2}} + \frac{\beta_j^2}{\lambda_{j2}} + \frac{2\tilde{v}_i^2}{\gamma_{j1}} + \frac{2\tilde{\omega}_i^2}{\gamma_{j2}} + \frac{\dot{v}_i^2}{4\gamma_{j1}} + \frac{\dot{\omega}_i^2}{4\gamma_{j2}}] \end{aligned} \quad (15)$$

이 때,  $k_{j2} = \frac{k_{j3}}{2} + \frac{\lambda_{j2}}{8} + k_{j2}^*$ ,  $k_{j3} = \frac{\lambda_{j2}}{4} + k_{j3}^*$  로 선택하면 (15)는 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \sum_{j=1}^n [-k_{j1} e_{j1}^2 - k_{j2}^* e_{j2}^2 - k_{j3}^* e_{j3}^2 - \frac{\tilde{v}_i^2}{\gamma_{1j}} - \frac{\tilde{\omega}_i^2}{\gamma_{2j}} \\ &\quad + \frac{\beta_j^2}{\lambda_{j2}} + \frac{2\tilde{v}_i^2}{\gamma_{1j}} + \frac{2\tilde{\omega}_i^2}{\gamma_{2j}} + \frac{\dot{v}_i^2}{4\gamma_{1j}} + \frac{\dot{\omega}_i^2}{4\gamma_{2j}}] \\ &\leq -c_0 V + c_1 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서

$$\begin{aligned} 0 &< c_0 < \min[k_{j1}, k_{j2}^*, \frac{k_{j3}^*}{d_i}, \frac{1}{\gamma_{1j}}, \frac{1}{\gamma_{2j}}], \\ c_1 &= \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\beta_j^2}{\lambda_{j2}} + \frac{2\tilde{v}_i^2}{\gamma_{1j}} + \frac{2\tilde{\omega}_i^2}{\gamma_{2j}} + \frac{\dot{v}_i^2}{4\gamma_{1j}} + \frac{\dot{\omega}_i^2}{4\gamma_{2j}} \right] \end{aligned}$$

이다.

(16)의 양변에  $e^{c_0 t}$  를 곱하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}(V(t)e^{c_0 t}) \leq c_1 e^{c_0 t}$$

위 식을 시간에 따라 적분하면 (17)과 같이 된다.

$$0 \leq V(t) \leq \left[ V(0) - \frac{c_1}{c_0} \right] e^{-c_0 t} + \frac{c_1}{c_0} \quad (17)$$

가정 2와 특성 1에 의해  $|v_i| \leq \Omega_v$ ,  $|\omega_i| \leq \Omega_\omega$ ,  $|\hat{v}_i| \leq \Omega_v + \kappa_v$ ,  $|\hat{\omega}_i| \leq \Omega_\omega + \kappa_\omega$  이므로  $|\tilde{v}_i| \leq 2\Omega_v + \kappa_v$ ,  $|\tilde{\omega}_i| \leq 2\Omega_\omega + \kappa_\omega$  이며, 또한 가정 2와 가정 3에 의해  $\dot{v}_i$ ,  $\dot{\omega}_i$ ,  $\beta_j$ 의 경계치가 존재하므로  $c_1$ 의 경계치가 존재한다. 따라서 (17)로부터  $e_{j1}$ ,  $e_{j2}$ ,  $e_{j3}$ 가 상시 유계 함을 알 수 있다.

$\theta_{ij}$ 의 수렴성을 보이기 위해 (18)과 같은 리아프노프 함수를 고려하자.

$$V_1 = \frac{1}{2} d_i \theta_{ij}^2 \quad (18)$$

(18)을 미분하면 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}_1 = \theta_{ij} (d_i \omega_i - \hat{v}_i \sin \theta_{ij} - \hat{\omega}_i L_{ij}^d \cos(\psi_{ij}^d + \theta_{ij}) - \beta_j) \quad (19)$$

위 식에서  $\theta_{ij}$ 의 수렴성을 보이기 위해서는 다음과 같은 보조 정리가 필요하다.

보조 정리 1: 다음과 같은 부등식이 모든  $\sigma > 0$ ,  $\eta \in \mathfrak{R}$ 에 대해 성립한다.

$$0 \leq |\eta| - \eta \tanh\left(\frac{\eta}{\sigma}\right) \leq \mu\sigma$$

여기서  $\mu$  는  $\mu = e^{-(\mu+1)}$  을 만족하는 상수이다.

증명: [12] 참조.

보조 정리 1을 이용하면 (19)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &\leq -\lambda_{j_i} \theta_{j_i}^2 + |\delta_{j_i} \theta_{j_i}| - \delta_{j_i} \theta_{j_i} \tanh\left(\frac{\delta_{j_i} \theta_{j_i}}{\varepsilon_j}\right) \\ &\leq -\frac{\lambda_{j_i}}{d_i} V_i + \frac{\varepsilon_j}{2} \end{aligned} \quad (20)$$

따라서  $\theta_{j_i}$  이 상시 유계함을 알 수 있다. ■

#### IV. 시뮬레이션

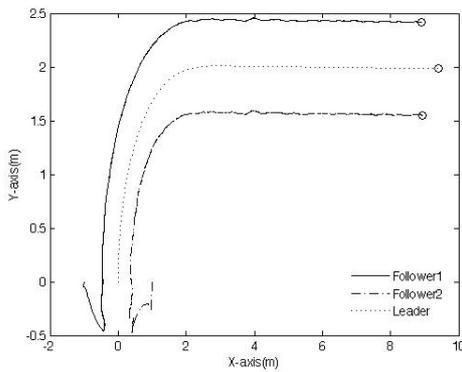
본 논문에서 제안된 제어기의 우수성을 검증하기 위해 기

존의 기법[10]과 본 논문에서 제안된 기법을 이용하여 3대의 로봇에 대한 군집 제어 실험을 수행하였으며 모의 실험에 사용된 매개변수 설정은 다음과 같이 하였다.  $k_{j_1} = 5, k_{j_2} = 5, k_{j_3} = 3, \lambda_{j_1} = 1, \lambda_{j_2} = 1, d_i = 0.2, \gamma_{1_j} = \gamma_{2_j} = 0.5$ .

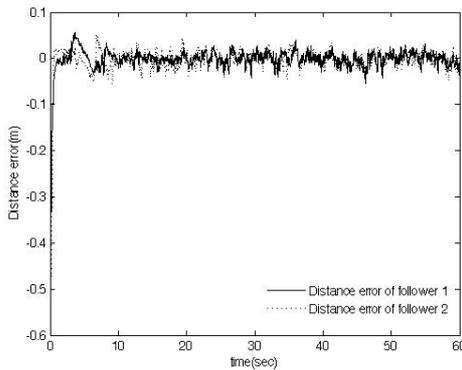
선도 로봇의 초기 위치는  $(x_i, y_i, \theta_i) = (0, 0, \pi/2)$  이며, 선속도  $v_i$  와 각속도  $\omega_i$  는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 0 \leq t < 15 : v_i &= 0.1(1 - \cos(\frac{\pi t}{15})), \omega_i = -0.0525(1 - \cos(\frac{\pi t}{15})) \\ 15 \leq t < 30 : v_i &= 0.2, \omega_i = -0.0525(1 - \cos(\frac{\pi t}{15})) \\ 30 \leq t < 50 : v_i &= 0.2, \omega_i = 0 \end{aligned}$$

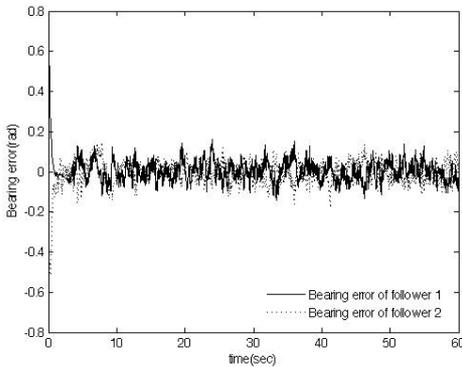
추종 로봇 2대의 초기 위치는 각각  $(x_1, y_1, \theta_1) = (-1, 0, \pi/2), (x_2, y_2, \theta_2) = (1, 0, \pi/2)$  이며, 선도 로봇과 추종 로봇간



(a) Formation tracking result



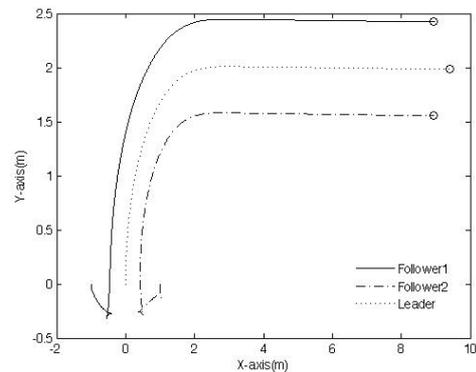
(b) Distance errors between the leader and the followers.



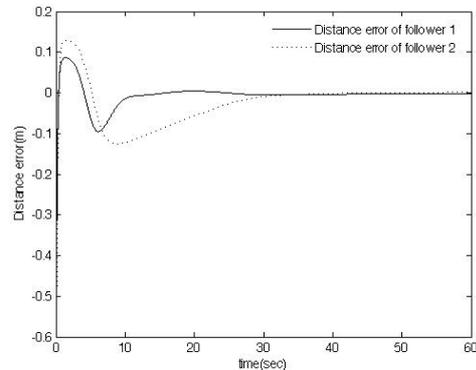
(c) Bearing errors between the leader and the followers

그림 2. 기존 기법[10]의 군집 제어 결과.

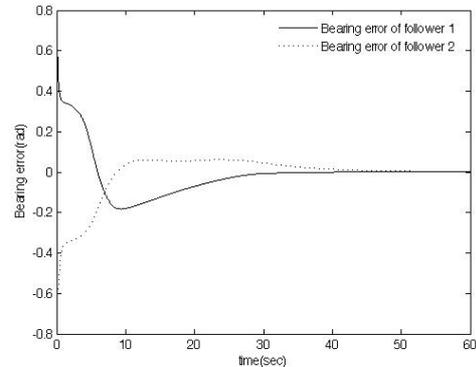
Fig. 2. Simulation results.



(a) Formation tracking result



(b) Distance errors between the leader and the followers.



(c) Bearing errors between the leader and the followers

그림 3. 제안된 기법의 군집 제어 결과.

Fig. 3. Simulation results of the proposed controller.

의 원하는 거리 및 각도는 각각  $L_{i1}^d = L_{i2}^d = 0.5(m)$ ,  $\psi_{i1}^d = 2.0944(rad)$ ,  $\psi_{i2}^d = -2.0944(rad)$  이다. [10]에서 제안된 기법은 선도 로봇의 속도 정보를 알고 있어야 하므로 선도 로봇의 속도 정보를 모르는 본 논문의 결과와 비교하기 위해 [10]의 기법을 이용하여 군집 제어 실험을 할 때 선도 로봇의 속도 정보에 평균값 0, 분산이 0.5인 가우시안 랜덤 잡음 (Gaussian random noise)을 넣어 주었다.

그림 2는 기존 기법[10]의 선도 로봇 속도 정보에 랜덤 잡음을 넣었을 때 군집 제어 결과를 보여주며, 그림 3은 제안된 제어기를 이용한 군집 제어 결과를 보여준다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 추종 로봇이 선도 로봇의 속도 정보를 정확히 알 수 없다면 추종 오차들이 0으로 수렴하지 못함을 알 수 있다. 반면 본 논문에서 제안된 제어기는 선도 로봇의 속도 정보를 몰라도 제어가 가능하므로 그림 3의 결과에서 보듯이 추종 오차들이 0 근처로 수렴함을 알 수 있다. 따라서 선도 로봇의 속도 정보를 모르는 상태에서 추종 로봇들이 대형을 형성할 때 본 논문에서 제안된 제어기가 우수한 성능을 보임을 시뮬레이션 결과들로부터 알 수 있다.

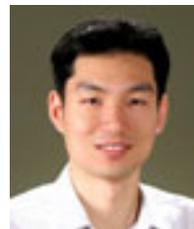
### V. 결론

본 논문에서는 시변 파라미터를 갖는 이동 로봇들을 위한 적응 군집 제어기를 제안하였다. 본 논문에서 제안된 제어 시스템은 투영 알고리즘을 사용함으로써 시간에 따라 변하는 선도 로봇의 속도 정보를 추정하였다. 또한 리아프노프 직접법 이론을 사용하여 제안된 제어기의 안정도를 분석함으로써 모든 오차들이 0 근처로 수렴함을 증명하였다. 마지막으로 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 제어기의 성능을 검증하였다. 향후 연구 과제는 로봇 간의 통신 상에서 발생할 수 있는 문제점, 즉 통신 지연, 노이즈(noise), 패킷 손실(packet loss) 등을 고려한 군집 제어기를 설계하는 것이다.

### 참고문헌

- [1] T. Balch and R. C. Arkin, "Behavior-based formation control for multirobot team," *IEEE Trans. Robot and Automation*, vol. 14, no. 6, pp. 926-939, 1998.
- [2] J. Fredslund and M. J. Mataric, "A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 18, no. 5, pp. 837-846, 2002.
- [3] J. R. T. Lawton, R. W. Beard, and B. J. Young, "A decentralized approach to formation maneuvers," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 19, no. 6, pp. 933-941, 2003.
- [4] K. D. Do and J. Pan, "Nonlinear formation control of unicycle-type mobile robots," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 55, pp. 191-204, 2007.

- [5] P. Ogren, M. Egerstedt, and X. Hu, "A control Lyapunov function approach to multi-agent coordination," *Proc. of IEEE Conf. Decision and Control*, Orlando, FL, pp. 1150-1155, Dec. 2001.
- [6] M. A. Lewis and K. H. Tan, "High precision formation control of mobile robots using virtual structures," *Auton. Robots*, vol. 4, no. 4, pp. 387-403, 1997.
- [7] J. P. Desai, J. Ostrowski, and V. Kumar, "Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots," *IEEE Trans. Robot. Automa.*, vol. 17, no. 6, pp. 905-908, 2001.
- [8] J. Shao, G. Xiao, and Z. Cai, "Leader-following formation control of multiple mobile vehicles," *IET Control Theory Appl.*, vol. 1, no. 2, pp. 545-552, 2007.
- [9] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer, and C. J. Taylor, "A vision-based formation control framework," *IEEE Trans. Robotics and Automat.*, vol. 18, no. 5, pp. 813-825, 2002.
- [10] T. Dierks and S. Jagannathan, "Neural network control of mobile robot formations using RISE feedback," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybern.*, vol. 39, no. 2, pp. 332-347, 2009.
- [11] J. B. Pomet and L. Praly, "Adaptive nonlinear regulation: estimation from the Lyapunov equation," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 37, no. 6, pp. 729-740, 1992.
- [12] M. M. Polycarpou, "Stable adaptive neural control scheme for nonlinear systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 41, no. 3, pp. 447-451, 1996.
- [13] 박봉석, 최윤호, 박진배, "시변 매개변수를 갖는 다개체 이동 로봇을 위한 적응 군집 제어," 한국자동제어학술회의 논문집(KACC2009), 부산, 한국, pp. 136-138, 2009.



**박 봉 석**

2005년 연세대학교 전기전자공학과(공학사). 2008년 동 대학원 공학석사. 2008년~현재 동 대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 비선형 적응 제어, 지능 제어, 이동 로봇, 군집 제어.



**박 진 배**

1977년 연세대학교 전기공학과(공학사). 1985년 Kansas 주립대학교 전기공학과(공학석사). 1990년 Kansas 주립대학교 전기공학과(공학박사). 1992년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수. 관심분야는 강인 제어, 필터, 비선형 제어, 로보틱스, 퍼지 이론, 신경망 회로 이론.