

추종 로봇의 측정값들을 이용한 다중 이동 로봇의 선도-추종 접근법 기반 군집 제어

Leader-Follower Based Formation Control of Multiple Mobile Robots Using the Measurements of the Follower Robot

박 봉 석*
(Bong Seok Park¹)

¹Electronic Engineering, Chosun University

Abstract: This paper proposes the leader-follower based formation control method for multiple mobile robots. The controller is designed using the measurements of the follower robot such as the relative distance and angle between the leader and the follower. This means that the follower robot does not require the information of the leader robot while keeping the desired formation. Therefore, the proposed control method can reduce the communication loss and the cost for hardware. From Lyapunov stability theory, it is shown that all error signals in the closed-loop system are uniformly ultimately bounded. Finally, simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed control system.

Keywords: formation control, leader-follower approach, relative distance, relative angle

I. 서론

초창기 이동 로봇에 대한 연구는 단일 로봇의 자율 이동성에 중점을 두고 이루어졌다. 하지만 단일 로봇을 이용하여 다양한 임무를 수행하는 것은 그 효율성 면에서 한계가 있다. 예를 들어 광범위한 지역을 감시, 정찰하는데 있어 단일 로봇을 이용할 경우 많은 시간이 필요하며, 때로는 사각 지역이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 다수의 로봇을 운용하는 방법에 대한 연구들이 이루어지고 있다. 여러 대의 로봇을 운용하기 위해서는 다수 로봇의 대형 형성 및 이동과 같은 군집 제어(formation control) 문제를 반드시 해결하여야 한다. 이와 관련하여 행동 기반(behavior-based) 기법[1,2], 가상 구조(virtual structure) 접근법[3]과 선도-추종 로봇(leader-follower) 접근법 [4-8]등이 제안되었으며, 이 중 구현이 용이하고 확장성이 우수한 선도-추종 로봇 접근법이 군집 제어 부분에서 널리 사용되고 있다.

선도-추종 로봇 접근법은 선도 로봇과 추종 로봇의 상대거리 및 각도를 일정하게 유지하는 방법으로서, [4]에서 처음 제시된 이후로 많은 제어 기법들이 제시되었다. 지금까지 제시된 제어 기법들은 선도 로봇의 선속도(linear velocity)와 각속도(angular velocity) 및 선도 로봇의 진행 방향(heading direction)에 대한 각도 정보를 요구한다. 이를 위해서는 선도 로봇에 속도 정보 및 진행 방향을 측정할 수 있는 센서를 장착해야 하며, 통신 네트워크를 이용하여 추종 로봇에게 자신의 정보를 전송해 주어야 한다. 하지만 이는 센서를 이용한 측정이 부정확하고 정보 전송 과정에서 정보가 누락될 경우

원하는 대형을 유지할 수 없다는 단점을 내포하고 있다. 또한 센서 및 통신용 하드웨어 탑재는 로봇의 비용을 증대시키며, 이는 가격이 저렴한 다수의 로봇을 운용한다는 군집 제어의 목적에 위배되는 것이다.

따라서 본 논문에서는 추종 로봇이 선도 로봇의 정보 없이 원하는 대형을 형성하여 이동할 수 있는 군집 제어기를 제안한다. 선도 로봇은 주어진 경로 계획에 의해 자율적으로 움직이며, 추종 로봇은 목표 대형을 이루기 위해 선도 로봇과 일정한 거리 및 각도를 유지하며 움직인다. 추종 로봇이 움직이는데 있어서 선도 로봇의 정보는 필요치 않으며, 오직 선도 로봇과의 상대거리 및 각도와 자신의 진행 방향에 대한 정보만을 요구한다. Lyapunov 안정도 이론을 이용하여 제어기가 설계되며, 군집 제어 오차들이 상시 유계(uniformly ultimately bounded)됨을 증명한다. 마지막으로 모의 실험을 통해 제안된 군집 제어 시스템이 다수 이동 로봇들의 대형 형성 및 이동에 우수한 성능을 보임을 입증한다.

II. 군집 모델

1. 이동 로봇의 기구학 모델

본 논문에서는 구동축과 중심점이 같은 이동 로봇을 고려한다. 직교 좌표축에서 이동 로봇의 위치를 x, y 로 정의하고 이동 로봇의 진행 방향에 대한 각도를 ψ 로 정의하면 이동 로봇의 기구학(kinematic) 모델은 식 (1)과 같다[9].

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 \\ \sin\psi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 v 와 ω 는 각각 이동 로봇의 선속도와 각속도를 나타낸다.

2. 선도-추종 로봇 접근법 기반 군집 모델

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received February 20, 2013 / revised March 10, 2013 / accepted March 15, 2013

박봉석: 조선대학교 전자공학과(bspark@chosun.ac.kr)

※ 이 논문은 2012학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

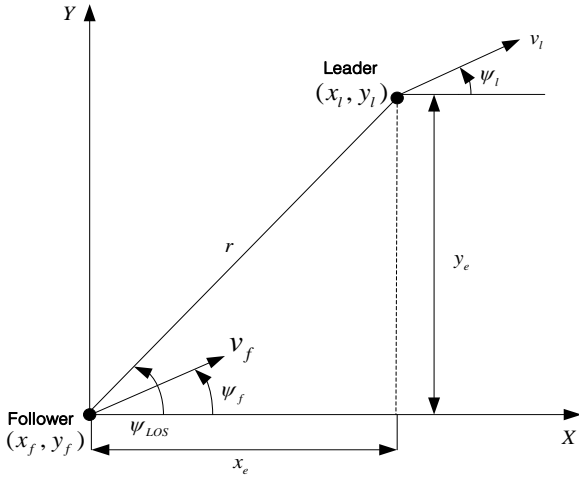


그림 1. 선도-추종 로봇 접근법 기반 군집 모델.

Fig. 1. Leader-follower based formation model.

본 논문에서는 이동 로봇의 군집 제어를 위해 그림 1과 같은 선도-추종 로봇 접근법을 이용한다. 그림 1에서 선도 로봇과 추종 로봇 사이의 상대거리 r 및 직교 좌표축에서 추종 로봇으로부터 선도 로봇을 연결하는 시선 벡터가 X 축과 이루는 각 ψ_{LOS} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x_e^2 + y_e^2} \\ \psi_{LOS} &= \arctan(y_e/x_e) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $x_e = x_l - x_f$, $y_e = y_l - y_f$, (x_l, y_l) 과 (x_f, y_f) 은 각각 직교 좌표축에서의 선도 로봇과 추종 로봇의 위치를 나타낸다. 식 (1)과 식 (2)를 이용하면 다음과 같은 선도-추종 로봇 접근법 기반 군집 모델을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{r} &= v_l \cos \alpha - v_f \cos \psi_g \\ \dot{\psi}_g &= -\frac{1}{r} v_l \sin \alpha + \frac{1}{r} v_f \sin \psi_g - \omega_f \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\alpha = \psi_{LOS} - \psi_l$, $\psi_g = \psi_{LOS} - \psi_f$, v_l 와 v_f 는 각각 선도 로봇과 추종 로봇의 선속도이며, ω_f 는 추종 로봇의 각속도이다.

가정 1: 선도 로봇의 선속도 v_l 은 $|v_l| \leq \lambda_1$ 과 같이 경계 값을 갖는다. 여기서 λ_1 은 양수이며, 추종 로봇이 낼 수 있는 선속도의 최대값보다 작은 값이다.

가정 2: 이동 로봇간의 충돌을 방지하기 위해 로봇간의 상대거리 r 은 최소 값 $r_A > 0$ 를 갖는다. 즉, $r \geq r_A > 0$ 이며, r_A 는 로봇이 충돌하지 않고 움직일 수 있는 최소한의 여유 거리를 나타낸다.

본 논문의 제어 목적은 이동 로봇들이 다음과 같이 원하는 군집 형태를 이루도록 제어기를 설계하는 것이다.

$$\begin{aligned} r &\rightarrow r_d \\ \psi_g &\rightarrow \psi_d \end{aligned}$$

여기서 r_d 와 ψ_d 는 각각 선도 로봇과 추종 로봇 사이의 목표 상대거리 및 각도를 나타낸다.

III. 제어기 설계

본 장에서는 선도-추종 로봇 접근법 기반 제어 기법의 설계 절차를 간략히 요약한다. 선도 로봇과 추종 로봇 사이의 상대거리 및 각도에 대한 추종 오차(error)를 식 (4)와 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} e_1 &= r - r_d \\ e_2 &= \psi_g - \psi_d \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 시간에 대해 미분하고 식 (3)을 대입하면 다음과 같은 오차 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= v_l \cos \alpha - v_f \cos \psi_g - \dot{r}_d \\ \dot{e}_2 &= -\frac{1}{r} v_l \sin \alpha + \frac{1}{r} v_f \sin \psi_g - \omega_f - \dot{\psi}_d \end{aligned} \quad (5)$$

본 논문에서는 식 (5)를 안정화하기 위한 제어기를 다음과 같이 제안한다.

$$\begin{aligned} v_f &= \frac{1}{\cos \psi_g} \left\{ k_1 e_1 - \dot{r}_d + \lambda_1 \tanh \left(\frac{\lambda_1 e_1}{\varepsilon_1} \right) \right\} \\ \omega_f &= \frac{1}{r} \tan \psi_g \left\{ k_1 e_1 - \dot{r}_d + \lambda_1 \tanh \left(\frac{\lambda_1 e_1}{\varepsilon_1} \right) \right. \\ &\quad \left. - \dot{\psi}_d + k_2 e_2 + \lambda_2 \tanh \left(\frac{\lambda_2 e_2}{\varepsilon_2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 k_1 , k_2 , ε_1 , ε_2 는 제어 이득을 나타내는 양의 상수이고 $\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{r_A}$ 이다. 식 (6)의 제어기는 정리 1의 Lyapunov 함수를 이용하여 유도된다.

참조 1: 식 (6)에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안된 제어기는 선도 로봇과 추종 로봇 사이의 상대 거리 및 각도 정보를 이용하여 구성된다. 따라서 선도 로봇에 대한 정보가 필요하지 않기 때문에 정보 전달로 인한 손실 및 하드웨어적인 비용을 줄일 수 있는 장점이 있다.

제안된 제어 시스템의 안정도를 분석하기 위해서는 다음과 같은 보조 정리가 필요하다.

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

$$0 \leq |\eta| - \eta \tanh \left(\frac{\eta}{\varepsilon} \right) \leq \kappa \varepsilon \quad (7)$$

여기서 κ 는 $\kappa = e^{-(\kappa+1)}$ 을 만족하는 상수이고 ε 는 임의의 양수이다.

증명: [10] 참조.

정리 1: 식 (3)의 선도-추종 로봇 접근법 기반 군집 모델을 고려하자. 만약 가정 1, 2가 만족된다면 제어 입력 (6)에 의해 제어 시스템 안의 모든 오차들은 상시 유계(uniformly ultimately bounded) 된다.

증명: 다음과 같은 Lyapunov 함수를 고려하자.

$$V = \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2) \quad (8)$$

식 (5)와 식 (6)을 식 (8)의 미분 값에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_1(v_i \cos \alpha - v_f \cos \psi_g - \dot{r}_d) \\ &\quad + e_2\left(-\frac{1}{r}v_i \sin \alpha + \frac{1}{r}v_f \sin \psi_g - \omega_f - \dot{\psi}_d\right) \\ &= -k_1 e_1^2 + e_1 v_i \cos \alpha - \lambda_1 e_1 \tanh\left(\frac{\lambda_1 e_1}{\varepsilon_1}\right) \\ &\quad - k_2 e_2^2 - \frac{1}{r}e_2 v_i \sin \alpha - \lambda_2 e_2 \tanh\left(\frac{\lambda_2 e_2}{\varepsilon_2}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

보조 정리 1을 이용하면 식 (9)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + |\lambda_1 e_1| - \lambda_1 e_1 \tanh\left(\frac{\lambda_1 e_1}{\varepsilon_1}\right) \\ &\quad + |\lambda_2 e_2| - \lambda_2 e_2 \tanh\left(\frac{\lambda_2 e_2}{\varepsilon_2}\right) \\ &\leq -c_1 V + c_2 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $c_1 = \min[k_1, k_2]$ 이고 $c_2 = \kappa(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ 이다. 식 (10)을 이용하여 모든 오차들이 상시 유계 됨을 보일 수 있으며, 이는 이동 로봇들이 원하는 대형을 유지할 수 있음을 내포한다.

참조 2: 식 (6)에서 ψ_g 가 $\pm \frac{\pi}{2}$ 이면 특이성 문제(singularity problem)가 발생하여 제어 입력을 구할 수 없게 된다. 따라서 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위해 만일 $\psi_g = \pm \frac{\pi}{2}$ 이면 $\psi_g = \pm \frac{89\pi}{180}$ 를 대신 사용하여 특이성 문제를 해결한다.

IV. 모의 실험

제안된 제어 시스템이 직선 및 곡선 구간에서 군집 대형을 효과적으로 유지할 수 있는지를 검증하기 위해 본 장에서는 두 가지 사례(case)에 대해 모의 실험을 수행한다. 추종 로봇들의 매개 변수는 다음과 같다.

$$k_1 = k_2 = 1, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1, \quad \lambda_1 = \lambda_2 = 2$$

한편 선도 로봇의 초기 위치는 $(x_1, y_1, \psi_1) = (0.1, 0.1, \pi/4)$ 이며, 추종 로봇 2대의 초기 위치는 각각 다음과 같다.

$$(x_{11}, y_{11}, \psi_{11}) = (-0.1, 0.1, 0), \quad (x_{12}, y_{12}, \psi_{12}) = (-0.3, 0.1, 0).$$

선도 로봇과 추종 로봇들간의 원하는 상대거리는 $r_d = 0.2$ m 이며, 원하는 각도는 추종 로봇 1의 경우 $\psi_d = \pi/6$ rad, 추종 로봇 2의 경우 $\psi_d = -\pi/6$ rad 이다.

사례 1: 이동 로봇들이 직선 구간에서 대형을 이루는 것을 모의 실험하며, 선도 로봇의 선속도 $v_i = 0.1$ m/s 이고 각속도 $\omega_i = 0$ rad/s 이다. 그림 2와 3은 각각 직선 구간에서의 이동 로봇들의 궤적과 군집 오차들을 나타낸다. 그림 3에 도시한 바와 같이 군집 오차들이 거의 0 근처에 수렴하고 있으므로 제안된 제어 시스템이 직선 구간에서 우수한 성능을 제공할 수 있다.

사례 2: 이동 로봇들이 곡선 구간에서 대형을 이루는 것을 모의 실험하며, 선도 로봇의 선속도 및 각속도는 다음과 같다.

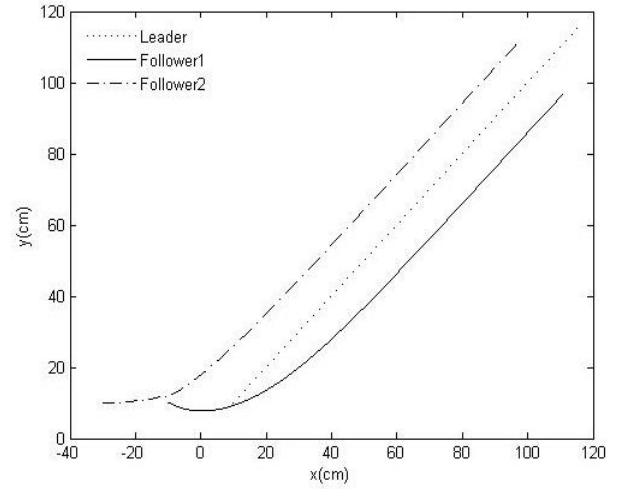
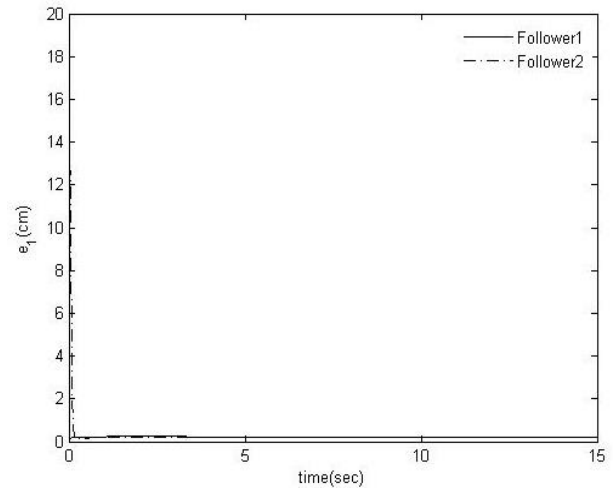
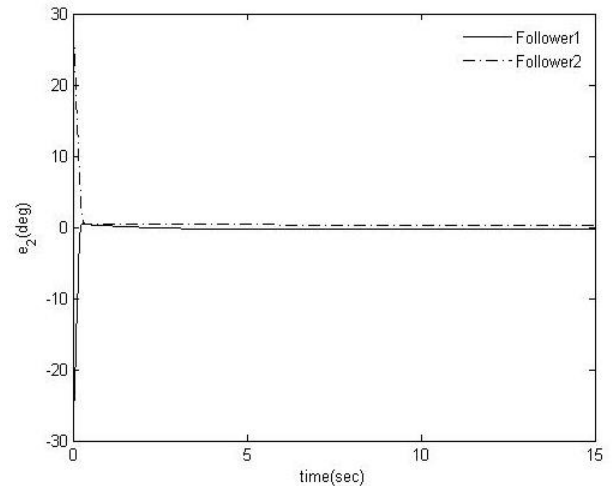


그림 2. 사례 1에 대한 선도, 추종 로봇들의 궤적.

Fig. 2. Trajectories of the leader and the followers for case 1.



(a) e_1 for case 1.



(b) e_2 for case 1.

그림 3. 사례 1에 대한 군집 오차.

Fig. 3. Formation errors for case 1.

$$\begin{aligned}
 0 \leq t < 2: v_l &= 0.2 \text{ m/s}, \quad \omega_l = 0 \text{ rad/s}, \\
 2 \leq t < 7: v_l &= 0.2 \text{ m/s}, \quad \omega_l = -0.3 \text{ rad/s}, \\
 7 \leq t < 12: v_l &= 0.2 \text{ m/s}, \quad \omega_l = 0.3 \text{ rad/s}, \\
 t \geq 12: v_l &= 0.2 \text{ m/s}, \quad \omega_l = 0 \text{ rad/s}
 \end{aligned}$$

곡선 구간에 대한 모의 실험 결과는 그림 6-7에 나타난다. 직선 구간과 달리 곡선 구간에서는 상대 각에 대한 오차가 최대 2°정도 발생하는데 이는 선도 로봇의 진행 방향이 시간에 따라 변하기 때문이다. 즉, 선도-추종 로봇간의 상대 각이 시간에 따라 변하므로 급격한 곡선 구간일수록 오차가 점점 커지게 된다. 이를 해결하기 위해 진행 방향에 대한 제어기를 설계하면 어느 정도 오차를 줄일 수 있으나 이동 로봇의 비홀로노믹(nonholonomic) 특성으로 인하여 제어기 설계의 어려움이 따른다. 그러나 그림 3에 도시한 바와 같이 급격한 경사 구간인 80초와 180초 구간에서도 오차는 작은 범위 내에 있으므로, 본 논문에서 제안된 제어기는 직선 및 곡선 구

간에서 원하는 대형을 유지하는데 있어서 우수한 성능을 제공한다고 할 수 있다.

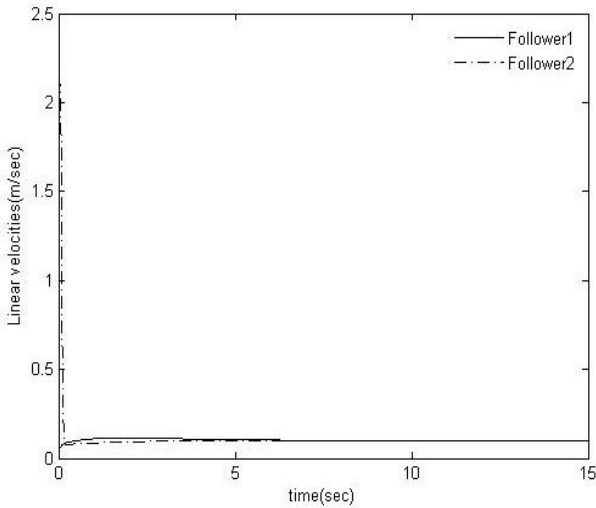


그림 4. 사례 1에 대한 선속도.
Fig. 4. Linear velocities for case 1.

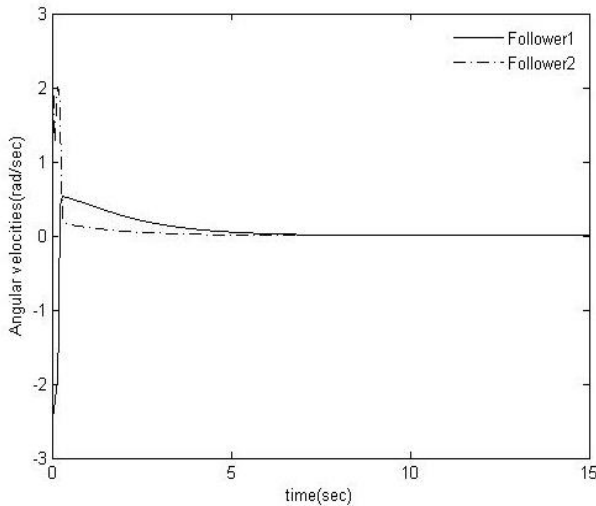


그림 5. 사례 1에 대한 각속도.
Fig. 5. Angular velocities for case 1.

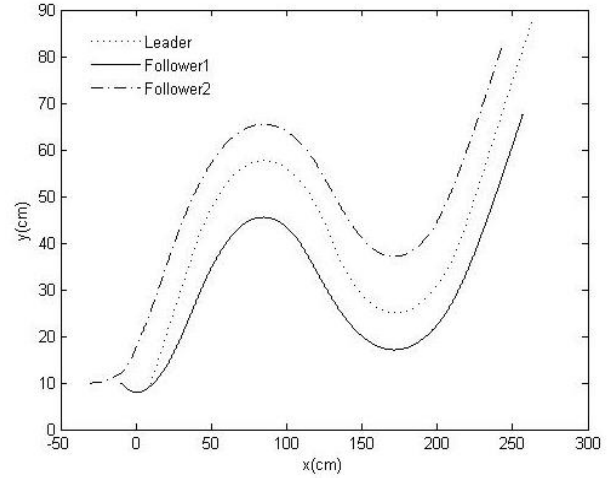
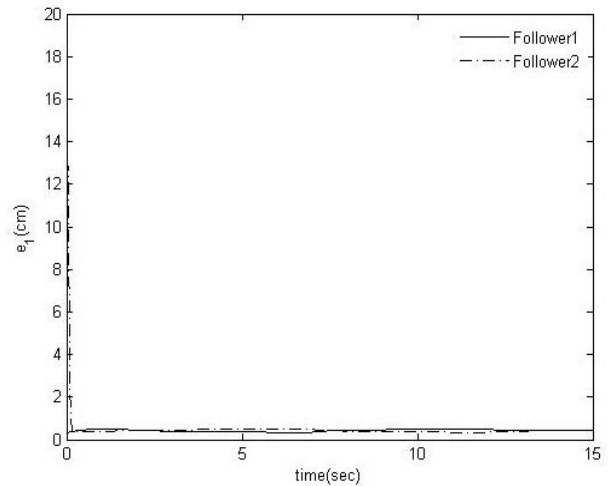
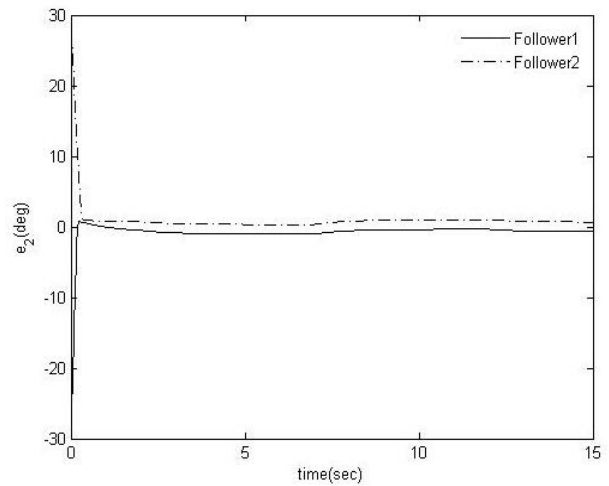


그림 6. 사례2에 대한 선도, 추종 로봇들의 궤적.
Fig. 6. Trajectories of the leader and the followers for case 2.



(a) e_1 for case 2.



(b) e_2 for case 2.

그림 7. 사례 2에 대한 균집 오차.
Fig. 7. Formation errors for case 2.

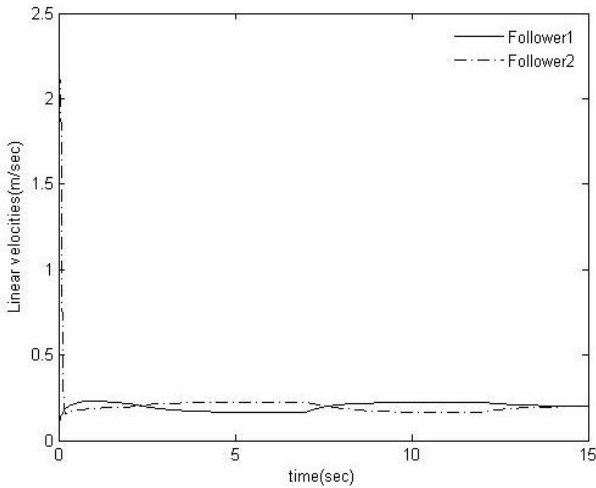


그림 8. 사례 2에 대한 선속도.

Fig. 8. Linear velocities for case 2.

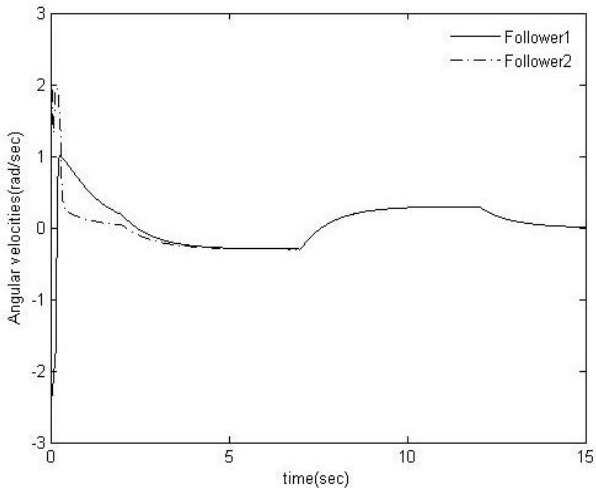


그림 9. 사례 2에 대한 각속도.

Fig. 9. Angular velocities for case 2.

V. 결론

본 논문에서는 선도-추종 로봇 접근법 기반 군집 제어를 제안하였다. 다수의 이동 로봇들을 운용하는 목적에 부합하기 위해 제어를 설계하는데 있어서 최소한의 정보만을 이용하였다. 즉, 제안된 제어기에서는 선도 로봇과 추종 로봇 사이의 상대거리 및 각도와 추종 로봇 자신의 진행 방향에 대한 정보만을 요구한다. 이를 위해 상대거리 및 각도를 이용하여 군집 모델을 유도하였으며, Lyapunov 안정도 이론을 이용하여 군집 제어 시스템을 설계하였다. 군집 오차들이 상시 유계 되며, 제어 이득 조정에 따라 0의 근처로 수렴하도록 만들 수 있기 때문에 이동 로봇들이 원하는 대형을 유지할 수 있다. 마지막으로 모의 실험 결과를 통해 제안된 제어기의 성능을 검증하였다.

참고문헌

[1] T. Balch and R. C. Arkin, "Behavior-based formation control for multirobot team," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 14, no. 6, pp. 926-939, Dec. 1998.

[2] J. S. Kim and Y. H. Joo, "Asynchronous behavior control algorithm of the swarm robot for surrounding intruders," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 9, pp. 812-818, Sep. 2012.

[3] K. D. Do and J. Pan, "Nonlinear formation control of unicycle-type mobile robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, pp. 191-204, Mar. 2007.

[4] J. P. Desai, J. Ostrowski, and V. Kumar, "Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 17, no. 6, pp. 905-908, Dec. 2001.

[5] J. Shao, G. Xiao, and Z. Cai, "Leader-following formation control of multiple mobile vehicles," *IET Control Theory and Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 545-552, Mar. 2007.

[6] L. Consolini, F. Morbidi, D. Prattichizzo, and M. Tosques, "Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints," *Automatica.*, vol. 44, pp. 1343-1349, May 2008.

[7] M. Defoort, T. Floquet, A. Kokosy, and W. Perruquetti, "Sliding-mode formation control for cooperative autonomous mobile robots," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 55, no. 11, pp. 3944-3953, Nov. 2008.

[8] T. Dierks and S. Jagannathan, "Neural network control of mobile robot formations using RISE feedback," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 39, no. 2, pp. 332-347, Apr. 2009.

[9] J. H. Shin, "Robust adaptive fuzzy backstepping control for trajectory tracking of an electrically driven nonholonomic mobile robot with uncertainties," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 18, pp. 902-911, Oct. 2012.

[10] M. M. Polycarpou, "Stable adaptive neural control scheme for nonlinear systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 41, no. 3, pp. 447-451, Mar. 1996.



박봉석

2005년 연세대학교 전기전자공학과(공학사). 2008년 동 대학원 공학석사. 2011년 동 대학원 공학박사. 2012년~현재 조선대학교 전자공학과 조교수 재직중. 관심분야는 비선형 적응 제어, 지능 제어, 이동 로봇, 무인 잠수정, 군집 제어.