입력 제한을 가진 추종 로봇을 고려한 선도 로봇 제어기

Leader Robot Controller Considering Follower with Input Constraint

이 승 주* · 홍 석 교†
(Seung-Joo Lee · Suk-Kyo Hong)

Abstract - This paper proposes controller of leader robot considering following robot with input constraints based on leader-following approach. In the previous formation control researches, it was assumed that leader and follower is same object. If leader robot drives as maximum speed that the initial position errors still remain even if following robot have same velocity as a leader. In the situation that velocity of following robot is lower than its leader robot, following robot cannot follow leader robot. Furthermore, the following robot will not be able to made formation with leader robot and keep proximity communication or sensing range. Therefore, multiple mobile robot system using leader-following method should be guaranteed range to get information each other. In this paper, Leader robot is driving to goal position using linear controller and following robot is following trajectory to be made from leader robot. We assume that following robot has input constraints to realize different performance between leader robot and following robot. We design controller of leader robot for desired goal position including the errors between formation and following robot. Thus, we propose leader robot controller considering input constraints of following robot. Finally, we were able to confirm the validity of the proposed method based on simulation results.

Key Words : Formation control, Leader-following approach, Input constraint, Leader robot

1. 서 론

군집제어를 이용한 다 개체 시스템은 단일 로봇에 비해 유적과 같은 알려지지 않은 지역의 탐색, 환경 조사, 대상 호위, 위험 지역 또는 문제 발생 지역의 감시와 단일 개체로는 수행하기 힘든 거대 물체의 이동, 재난 지역의 구조 활동 등, 활용 범위가 넓다. 다 개체 군집제어를 활용함으로써 수행능력 향상, 효율성 증가, 에너지 절감 효과와 같은 장점이 있어 연구자들로부터 많은 관심을 받고 있다[1-3]. 군집제어 방식은 행동 기반(behavior based) 접근 방식[4-6], 가상 구조(virtual structure) 방식[7-9], 마지막으로 선도-추종(leader-following) 접근 방식[10-13]으로 크게 3가지로 분류할 수 있다. 개체의 행동을 기반으로 하는 행동 기반 접근 방식은 다수의 임무가 부여되었을 때 제어 전략을 수립하기는 용이하다는 장점이 있는 반면, 수식적 표현과 전체의 안정도를 보장하기 어렵다는 단점이 있다. 가상구조 접근 방식은 전체 개체의 행동을 묘사하기는 쉬우나 군집 대형을 유지하기 위해 광 대역 통신이 필요하다는 단점이 있다. 마지막으로 선도-추종 접근 방식은 선도 로봇이 고장 날 경우 군집 대형을 유지하기 어렵다는 단점이 있으나 구현 및 이해가 용이하고 확장 성이 우수하여 많은 연구가 진행되고 있다. 선도-추종 접근 방식에서 선도 로봇은 주어진 목표 및 궤적을 향해 자율 주행하고 추종 로봇이 선도 로봇의 정

보를 이용하여 선도 로봇을 추종하는 문제에 대한 연구가 진행되어 왔다.

선도-추종 접근 방식에서 선도 로봇의 정보를 획득하는 방법으로 중앙 집중 방식(centralize method)이 연구되어 왔으나 인프라가 구축되어 있지 않은 환경에서 적용하기 어려운 점이 있어 이를 해결하기 위해 분산 방식(decentralize method)을 이용한 선도-추종 접근 방식이 연구되고 있다[2]. 분산 방식은 중앙 집중 방식에 비해 정보의 공유 시간이 짧고 통신 부하가 적은 장점이 있어 현재 많은 연구가 진행 중이다[6]. 분산 방식을 사용하는 선도-추종 접근 방식은 제어를 위해 근거리 통신, 비전 카메라, 센서 등을 이용하여 개체 간의 정보를 획득하여 군집 대형을 제어한다. 이러한 방법에서 가장 중요한 점은 센서의 측정 범위(measurable range) 및 근거리 통신 범위(communication range) 등의 정보를 계측하기 위한 범위가 보장되어야 한다. 그러나 기존의 선도-추종 접근 방식은 선도 로봇과 추종 로봇이 동일 성능을 가지는 같은 개체들로 구성된 환경으로 가정한 연구가 대부분이다[7-9].

최근 무인차량(UGV), 무인항공기(UAV), 무인잠수정(UUV), 무인선박(USV)등 서로 다른 성능을 가지는 개체(heterogeneous) 간에 군집대형을 구성하고 임무를 수행할 경우, 기존의 동일 개체들로 구성된 선도-추종 접근 방식으로는 이 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 다른 개체의 관련 정보를 획득하기 위한 통신 네트워크 범위를 보장하지 못하여 군집 제어에 문제가 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 EGG(embedded graph grammar)방법을 이용하여 개체의 위치 및 배치에 따라 추종 대상과 네트워크를 재구성하는 방법이 연구가 되고 있으며[14] 또한 실제 환경에 적용하게 되면 경사와 같은 환

* 정 회 원 : 아주대학교 전자공학과 석사

† 교신저자, 종신회원 : 아주대학교 전자공학과 교수

E-mail : skhong@ajou.ac.kr

접수일자 : 2011년 12월 9일

최종완료 : 2012년 6월 4일

경의 제약으로 인해 성능의 차이가 발생하게 되므로 3차원 공간에서 발생하는 군집 제어 문제가 연구되고 있으나[15] 광 대역 통신이 필요하다는 문제는 여전히 남아있다. 즉 성능이 다른 개체들로 구성된 군집 제어에서는 계층 범위를 유지할 수 없는 문제가 발생할 수 있으므로 서로 다른 개체로 구성된 다 개체 군집제어 시스템은 군집 대형을 유지하고 임무를 수행하기 위해서는 성능이 낮은 개체를 고려하여야 보다 안정된 성능을 낼 수 있다. 하지만 [14]와 같이 추종 대상과 네트워크를 재구성하는 방법은 재구성을 위한 소요 시간을 고려하지 않았으며 이로 인해 통신 지연(delay)과 같은 문제가 발생할 수 있다. 그리고 같은 성능을 가진 로봇으로 구성된 다 개체 시스템이라고 할지라도 로봇 간의 초기 오차가 클 때, 선도 로봇이 최대성능을 내는 경우에도 선도 로봇과 추종 로봇의 위치오차가 줄어들지 않는 문제가 발생하여 추종 로봇이 선도 로봇을 정상적으로 추종하지 못하는 문제와 임무 수행 중 추종 로봇의 성능이 저하되는 문제가 발생하게 되면 추종 로봇이 선도 로봇을 정상적으로 추종하지 못하는 문제가 발생하게 되고 결과적으로 임무를 수행하기 위한 대형을 유지하지 못하게 된다. 하지만 기존의 선도-추종 접근 방식의 군집 제어는 추종 로봇만이 자율 주행하는 선도 로봇으로부터 관련 정보를 계층하여 추종하고 선도 로봇은 추종 로봇의 상태를 전혀 고려하지 않고 있기 때문에 위와 같은 문제가 발생하게 되면 거대 물체의 이동과 같은 임무를 수행할 수 없게 된다. 따라서, 본 논문에서는 낮은 성능을 가진 추종 로봇이 선도 로봇을 안정적으로 추종할 수 있도록 선도 로봇과 추종 로봇 간의 오차를 포함하여 선도 로봇의 속도를 조절하는 선도 로봇의 제어기를 제안한다. 선도 로봇과 추종 로봇의 성능을 다르게 구현하기 위하여 추종 로봇의 제어 입력에 제한을 설정하고 선도 로봇과 추종 로봇의 초기 위치는 실제 발생 가능한 위치 오차로 지정하되 추종 로봇이 선도 로봇의 정보를 얻을 수 있는 최소 정보 계층 범위 내로 가정 한다. 선도 로봇은 자율 주행이 아닌 목표 위치까지의 수렴을 목표로 하며 선도 로봇은 추종 로봇의 위치 및 자세 각 등의 정보를 후방 센서 등을 이용하여 얻을 수 있다.

본 논문의 구성은 2장에서 이동 로봇의 기구 학 모델과 선도-추종 기법 기반의 군집제어 모델을 서술하고 다른 성능을 가진 로봇들로 구성된 다 개체 군집제어 시스템에서 발생 가능한 문제를 설정하기 위해 추종 로봇의 제어입력의 제한 방법에 대해 서술한다. 3장에서는 선도-추종 방식을 기반으로 선도 로봇과 추종 로봇간의 동역학과 입력 제한을 가진 추종 로봇을 고려하기 위해 선도 로봇과 추종 로봇 간의 오차를 포함하는 선도 로봇의 제어기를 제안한다. 4장에서는 모의실험을 통해 기존의 선도-추종 방식과 본 논문에서 제안한 방법을 비교하여 성능과 차이점을 분석하고 마지막으로 결론을 맺는다.

2. 기구 학 모델 및 선도-추종 기법

본 연구에서 사용된 이동로봇은 독립적으로 좌, 우 두 바퀴를 각각 구동시켜 이동하는 로봇이며 이동 로봇의 기구 학 모델을 직교좌표로 나타내면 그림 1과 같다. 두 바퀴 구동 형 이동로봇은 바퀴의 미끄러짐이 없음을 가정한 이동

로봇은 $\dot{x}_c \sin \theta_c - \dot{y}_c \cos \theta_c = 0$ 의 논홀로노믹(non-holonomic) 제약조건을 가진다. 그림 1에서 나타낸 이동 로봇의 논홀로노믹 동적 모델을 표현하면

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c(t) \\ \dot{y}_c(t) \\ \dot{\theta}_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_c(t)) & 0 \\ \sin(\theta_c(t)) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c(t) \\ \omega_c(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. $x_c(t), y_c(t) \in R$ 는 두 바퀴 구동 형 로봇의 위치를 나타내는 로봇의 x축, y축 좌표이고 $\theta_c(t) \in R$ 는 로봇의 방향각이다. 여기서 $v_c(t), \omega_c(t) \in R$ 는 각각 이동로봇의 선속도와 각속도를 의미한다. $v_c(t), \omega_c(t)$ 는 이동로봇의 제어 입력 u 이다.

본 논문에서는 다 개체 군집제어를 위하여 선도-추종 접근법을 이용하여, 단일 로봇의 추종 제어 문제를 군집 제어 문제로 확장하기 위해 선도 로봇으로부터 생성되는 지점을 이용한다. 다음은 선도 로봇과 추종 로봇 간의 기구 학 관계를 나타낸다[20].

그림 1 선도-추종 접근 기반 군집 모델

Fig. 1 Leader-following based for following model.

선도 로봇은 'L' 첨자, 추종 로봇을 'F' 첨자를 사용하여 표현하면 선도 로봇 R_L 의 현재 위치는 x_L, y_L 로 나타내고 선도 로봇의 자세 각은 θ_L 이다. 추종 로봇 R_F 의 위치는 x_F, y_F 이고 추종 로봇의 자세 각은 θ_F 로 표현된다. v_L, v_F 은 직진 속도이고 ω_L, ω_F 는 각 속도이다.

여기서 선도 로봇과 추종 로봇의 거리 d_x, d_y 를 직교 좌표를 이용하여 나타내면

$$\begin{aligned} d_x(t) &= x_L(t) - x_F(t) = -d(t) \cos(\Phi(t) + \theta_L(t)) \\ d_y(t) &= y_L(t) - y_F(t) = -d(t) \sin(\Phi(t) + \theta_L(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)로 표현된다. 추종 로봇의 현재 위치를 선도 로봇과의 관계식으로 표현하면

$$\begin{aligned} x_F(t) &= x_L(t) - d(t)\cos(\Phi(t) + \theta_L(t)) \\ y_F(t) &= y_L(t) - d(t)\sin(\Phi(t) + \theta_L(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 선도 로봇과 추종 로봇의 거리는 $d^2 = d_x^2 + d_y^2$ 이며 선도 로봇과 추종 로봇 사이의 방위각은 $\Phi(t) = \tan^{-1}(d_y/d_x) - \theta_L(t) + \pi$ 이며 거리와 방위각을 미분하면 식(4)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{d}(t) &= v_F(t)\cos(\Phi(t) + \theta_L(t) - \theta_F(t)) - v_L(t)\cos(\Phi(t)) \\ \dot{\Phi}(t) &= \frac{1}{d(t)} \left\{ v_L(t)\sin(\Phi(t)) \right. \\ &\quad \left. - v_F(t)\sin(\Phi(t) + \theta_L(t) - \theta_F(t)) - d(t)\omega_L(t) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

추종 로봇이 해야 하는 역할은 선도 로봇의 궤적으로부터 일정한 거리 및 각도를 유지하며 선도 로봇과 대형을 형성하는 것이다. 즉, 선도 로봇으로부터 일정한 거리 및 각도를 지정하여 원하는 위치를 생성한 뒤, 그 궤적을 추종 로봇이 따라가는 것이다. 선도 로봇으로부터 추종 로봇이 추종해야 하는 대형의 위치는

$$\begin{aligned} x_F^d(t) &= x_L(t) + d_{ref}(t)\cos(\Phi_{ref}(t) + \theta_L(t)) \\ y_F^d(t) &= y_L(t) + d_{ref}(t)\sin(\Phi_{ref}(t) + \theta_L(t)) \\ \theta_F^d(t) &= \theta_L(t) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)와 같이 표현할 수 있다. 추종 로봇이 추종해야 하는 위치는 $x_F^d(t)$, $y_F^d(t)$ 로 표현하고 $d_{ref}(t) > 0$ 은 선도 로봇과 추종 로봇이 추종해야 하는 궤적의 거리이다. $\Phi_{ref}(t) \in R$ 는 선도 로봇으로부터 유지해야 하는 일정 각도로 변수 값은 상수로 표현된다. 가상 선도 로봇의 좌표 변화량을 구하기 위해 식 (5)를 미분하면 식 (6)을 구할 수 있다[20].

$$\begin{aligned} \dot{x}_F^d(t) &= v_L(t)\cos(\theta_L(t)) - d_{ref}(t)\sin(\Phi_{ref}(t) + \theta_L(t))\omega_L(t) \\ \dot{y}_F^d(t) &= v_L(t)\sin(\theta_L(t)) + d_{ref}(t)\cos(\Phi_{ref}(t) + \theta_L(t))\omega_L(t) \end{aligned} \quad (6)$$

군집 제어를 위해 선도 로봇과 추종 로봇 간의 정보를 획득하기 위한 근접 계측 범위를 $\Delta \in R^+$ 라고 하면 로봇간의 정보는 $\|x_L(t) - x_F(t)\| \leq \Delta$ 만족해야만 제어를 위한 정보를 계측할 수 있다.

기존의 선도-추종 접근 방식에서는 선도 로봇과 추종 로봇이 동일한 성능을 가진 동일 개체라고 가정하고 있다. 이를 확장하여 다른 성능을 가진 개체들로 구성된 군집 제어를 고려하기 위해 추종 로봇의 제어 입력에 제한을 주어 선도 로봇과 추종 로봇의 성능을 다르게 구현하였다. 추종 로봇의 제한 입력은 다음과 같다.

$$|U_F(t)| \leq U_{\max} < |U_L(t)| \quad (7)$$

여기서 $U_F(t)$ 는 추종 로봇의 제어 입력 $v_F(t)$ 와 $\omega_F(t)$ 이고 $U_{\max}$ 는 상수이며 제한할 입력 값을 의미한다. 위와 같이 추종 로봇의 입력을 제한하면 생성되는 선도 로봇의 제어 입력 $U_L(t)$ 에 비해 추종 로봇의 제어 입력이 작아 선도 로봇보다 낮은 성능을 가지도록 할 수 있으며 이렇게 되면 선

도 로봇의 속도를 따라잡지 못하여 선도 로봇과의 거리는 점차 커지게 되므로 군집 대형을 안정적으로 추종하지 못하는 문제가 발생하게 되고 결과적으로 계측 범위를 벗어나는 문제가 발생할 것이다.

본 논문에서는 위와 같은 문제를 해결하기 위해 다음과 같은 가정을 도입한다.

(1) 선도 로봇은 후방 센서 및 카메라를 이용하여 추종 로봇의 정보, x_F , y_F , θ_F , v_F , ω_F 를 계측할 수 있다.

(2) 추종 로봇은 선도 로봇의 정보 x_L , y_L , θ_L , v_L , ω_L 를 센서 및 비전카메라 또는 근거리 통신을 이용하여 측정할 수 있다.

(3) 가정 (1)(2)의 정보는 계측, 통신 지연 등의 문제없이 획득 가능하고 계측된 정보는 정확하다.

3. 제어기 설계

이번 장에서는 군집 제어를 위한 선도 로봇과 추종 로봇의 제어기에 대해 서술한다. 3.1절에서는 본 논문에서 제안하는 제어기를 설계하기 위한 군집 제어 블록 다이어그램을 소개하고 3.2절에서는 기존의 선도-추종 접근 방식에서의 추종 로봇의 제어기에 대해 간략히 설명한다. 마지막으로 본 논문에서 제안하는 입력 제한을 가진 추종 로봇을 고려한 선도 로봇의 제어기에 대해 서술한다.

3.1 추종 로봇을 고려한 군집 제어 모델

본 절에서는 입력 제한이 있는 추종 로봇을 고려하는 선도 로봇의 제어기 설계를 위한 일련의 과정들을 그림 2의 블록 다이어그램을 통해 볼 수 있다.

그림 2 입력 제한을 가진 추종 로봇을 고려한 군집 제어 모델.
Fig. 2 Formation control model considering following robot which has input constraint

도 로봇은 추종 로봇의 현재 위치 정보, x_F , y_F , θ_F 를 얻으며 추종 로봇 또한 선도 로봇의 현재 위치, x_L , y_L 와 자세 각, θ_L 을 얻는다. 추종 로봇의 제어기는 기존의 연구된 제어기를 사용하였으며 추종 로봇의 제어 입력에 $\leq U_F^{\max}$ 블록을 통해 입력 제한을 주는 것으로 선도 로봇과 다른 성능을 구현하였다. 선도 로봇은 목표 위치 x_L^d , y_L^d 와 자신의 현재 위치, x_L , y_L 사이의 오차와 추종 로봇의 현재 위치 정보를 이용하여 제어 입력을 생성한다.

3.2 추종 로봇의 제어기

본 논문의 군집 제어에서 군집 대형을 유지하기 위해 선도 로봇으로부터 일정한 거리 및 각도를 유지해야 하는 위치에 가상 선도 로봇을 위치시키고 추종 로봇은 가상 선도 로봇의 궤적을 추종하여야 한다. 추종 로봇이 가상 선도 로봇의 궤적을 추종한다면 가상 선도 로봇은 선도 로봇으로부터 주어진 거리 및 각도를 유지할 수 있으므로 원하는 군집 대형을 구성할 수 있게 된다.

군집 제어기를 설계하기 위해 오차를 식 (8)과 같이 정의한다. 가상 선도 로봇의 궤적과 추종 로봇의 궤적의 오차를 다음과 같이 정의할 수 있다[21].

$$\begin{bmatrix} e_{x2}(t) \\ e_{y2}(t) \\ e_{\theta2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_F(t)) & \sin(\theta_F(t)) & 0 \\ -\sin(\theta_F(t)) & \cos(\theta_F(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x^d(t) - d_x(t) \\ d_y^d(t) - d_y(t) \\ \theta_F^d(t) - \theta_F(t) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} d_x^d(t)\cos(\Phi_{ref}(t) + e_{\theta2}(t)) - d_x(t)\cos(\Phi(t) + e_{\theta2}(t)) \\ d_y^d(t)\sin(\Phi_{ref}(t) + e_{\theta2}(t)) - d_y(t)\sin(\Phi(t) + e_{\theta2}(t)) \\ \theta_L(t) - \theta_F(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 추종 로봇의 위치는 $x_F(t)$, $y_F(t)$, $\theta_F(t)$ 로 표현하고 추종해야 하는 가상 선도 로봇의 기준 궤적의 위치는 $d_x^d(t)$, $d_y^d(t)$, 기준 궤적의 방위각은 $\theta_F^d(t)$ 로 나타낸다. $\theta_F^d(t)$ 는 선도 로봇의 방위각 $\theta_L(t)$ 과 동일하므로 바꿔 표현할 수 있으며 식 (8)을 식(2)와 식(3)을 이용하여 전개하면

$$\begin{aligned} e_{x2}(t) &= (x_L(t) - x_F(t))\cos(\theta_F(t)) + (y_L(t) - y_F(t))\sin(\theta_F(t)) \\ &\quad + d_{ref}(t)\cos(\Phi_{ref}(t) + (\theta_L(t) - \theta_F(t))(t)) \\ e_{y2}(t) &= -(x_L(t) - x_F(t))\sin(\theta_F(t)) \\ &\quad + (y_L(t) - y_F(t))\cos(\theta_F(t)) \\ &\quad + d_{ref}(t)\sin(\Phi_{ref}(t) + (\theta_L(t) - \theta_F(t))(t)) \\ e_{\theta2}(t) &= \theta_L(t) - \theta_F(t) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)를 얻을 수 있으며 $0 \leq \theta_L(t), \theta_F(t) < 2\pi$ 이다. 식(9)을 이용하여 주어진 가상 선도 로봇의 궤적과 추종 로봇간의 오차의 변화량을 구하기 위해 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{e}_{x2}(t) &= -v_F(t) + v_L(t)\cos(e_{\theta2}(t)) + e_{y2}(t)\omega_F(t) \\ &\quad - d_{ref}(t)\sin(\Phi_{ref}(t) + e_{\theta2}(t))\omega_L(t) \\ \dot{e}_{y2}(t) &= v_L(t)\sin(e_{\theta2}(t)) - e_{x2}(t)\omega_F(t) \\ &\quad + d_{ref}(t)\cos(\Phi_{ref}(t) + e_{\theta2}(t))\omega_L(t) \\ \dot{e}_{\theta2}(t) &= \omega_L(t) - \omega_F(t) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)로 표현 가능하다. 이를 이용하여 가상 선도 로봇의 위치를 추종하기 위한 추종 로봇의 제어 입력은

$$\begin{aligned} v_F(t) &= v_L(t)\cos(e_{\theta2}(t)) + k_{x2}e_{x2}(t) \\ &\quad - d_{ref}(t)\sin(\Phi_{ref}(t) + e_{\theta2}(t))\omega_L(t) \\ \omega_F(t) &= \omega_L(t) + k_{y2}e_{y2}(t)v_L(t) + k_{\theta2}\sin(e_{\theta2}(t)) \\ &\quad - d_{ref}(t)\cos(\Phi_{ref}(t) + e_{\theta2}(t))\omega_L(t) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)과 같이 구할 수 있다[22]. 여기서 이동 로봇의 속도는 $v_L(t) \geq 0$ 이며 $\theta_L(t) \geq 0$ 로 가정한다. 그리고 k_{x2} , k_{y2} ,

$k_{\theta2}$ 는 수렴 속도를 조절하기 위한 제어 상수이며 0이 아닌 양의 값을 가진다.

3.3 선도 로봇의 제어기 설계

선도 로봇은 주어진 목표 위치를 추종하는 것이 목적이므로 식 (1)로부터 선도 로봇과 주어진 목표 지점과의 오차는

$$\begin{bmatrix} e_{x1}(t) \\ e_{y1}(t) \\ e_{\theta1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_L^d(t) - x_L(t) \\ y_L^d(t) - y_L(t) \\ \theta_L^d(t) - \theta_L(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)와 같이 정의된다. 여기서 $x_L^d(t)$, $y_L^d(t)$ 는 추종할 목표 위치이고 목표 위치로 수렴하기 위해 선도 로봇이 추종해야 하는 자세 각은 $\theta_L^d(t) = \tan^{-1}(e_{y1}(t)/e_{x1}(t))$ 이며 $-\pi \leq \theta_L^d(t) \leq \pi$ 의 범위를 가진다. 식 (1)과 (12)을 이용하면 목표 위치와 선도 로봇간의 오차를 줄이기 위한 오차 동역학 식을

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{x1}(t) \\ \dot{e}_{y1}(t) \\ \dot{e}_{\theta1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_L^d(t) - v_L(t)\cos(\theta_L(t)) \\ y_L^d(t) - v_L(t)\sin(\theta_L(t)) \\ \theta_L^d(t) - \omega_L(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (13)과 같이 구할 수 있다. 그림 1과 동적 모델, 식 (1)이

$$\begin{aligned} \dot{e}_{x1}(t) &= -K_{x1}(x_L^d(t) - x_L(t)) \\ \dot{e}_{y1}(t) &= -K_{y1}(y_L^d(t) - y_L(t)) \\ \dot{e}_{\theta1}(t) &= -K_{\theta1}(\theta_L^d(t) - \theta_L(t)) \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)와 같이 표현되면 오차의 변화량은 음의 한정 함수를 가지게 되며 오차는 0으로 수렴하게 되어 안정한 제어기를 설계할 수 있다. 여기서 $K_{x1} > 0$, $K_{y1} > 0$, $K_{\theta1} > 0$ 는 수렴 속도를 조절하기 위한 제어 상수이다. 그리고 $x_L^d(t)$, $y_L^d(t)$, $\theta_L^d(t)$ 의 미분 값은 0이므로 식 (13)과 식 (14)를 이용하여 다시 표현하면

$$\begin{aligned} x_L^d(t) - v_L(t)\cos(\theta_L(t)) &= -K_{x1}(x_L^d(t) - x_L(t)) \\ y_L^d(t) - v_L(t)\sin(\theta_L(t)) &= -K_{y1}(y_L^d(t) - y_L(t)) \\ \theta_L^d(t) - \omega_L(t) &= -K_{\theta1}(\theta_L^d(t) - \theta_L(t)) \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)을 얻을 수 있다. 그리고 $x_L^d(t)$, $y_L^d(t)$, $\theta_L^d(t)$ 은 주어진 목표 위치로써 변하지 않는 값이므로 미분 값은 0이 된다. 선도 로봇의 동적 모델, 식 (1)을 식 (14)와 같이 재구성하기 위해 식 (16)을 제어 입력으로 사용한다.

$$\begin{aligned} v_L(t) &= k_{x1}e_{x1}(t)\cos(\theta_L(t)) + k_{y1}e_{y1}(t)\sin(\theta_L(t)) \\ \omega_L(t) &= k_{\theta1}\sin(e_{\theta1}(t)) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $K_{x1} > 0$, $K_{y1} > 0$, $K_{\theta1} > 0$ 는 제어 상수이다. 목표 위치를 추종하기 위하여 식 (16)을 선도 로봇의 제어 입력

으로 사용하면 안정적으로 수렴할 수 있다. 하지만 추종 로봇의 제어 입력에 식 (3)의 제한이 있으면 선도 로봇과 추종 로봇의 속도 성능 차이가 발생하여 군집 대형을 형성할 수 없고 계측 범위를 벗어나게 되어 제어가 어려운 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 선도 로봇은 속도를 줄이거나 후방으로 주행을 하고 추종 로봇의 자세 각 방향으로 틀어주어 추종 로봇이 추종할 수 있도록 한다. 이를 위해 추종 대형과 추종 로봇의 오차를 이용한다. 추종 로봇이 선도 로봇을 추종하지 못하여 추종 대형과 추종 로봇의 위치 오차가 커지게 되면 선도 로봇은 추종 로봇이 자신을 추종할 수 있도록 속도를 줄이고 오차가 다시 줄어들게 되면 목표 위치로 수렴하기 위해 속도를 높인다. 대형과 추종 로봇 간의 오차를 고려하기 위해 대형과 추종 로봇 사이의 오차 동역학 식을

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{x2}(t) \\ \dot{e}_{y2}(t) \\ \dot{e}_{\theta2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_F^d(t) - x_F(t) \\ y_F^d(t) - y_F(t) \\ \theta_F^d(t) - \theta_F(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (17)과 같이 정의한다. 여기서 $x_F^d(t)$, $y_F^d(t)$ 는 추종 로봇이 추종할 대형의 위치이다. 추종 로봇이 추종해야 하는 자세 각은 선도 로봇의 자세 각과 동일하므로 $\theta_F^d(t)$ 를 $\theta_L(t)$ 로 바꿔 표현할 수 있다. 식 (1)과 (17)을 이용하면 대형의 위치와 추종 로봇의 위치 오차를 줄이기 위한 오차 동역학 식을

$$\begin{aligned} \dot{e}_{x2}(t) &= v_L(t)\cos(\theta_L(t)) - v_F(t)\cos(\theta_F(t)) \\ &\quad - d_{ref}(t)\sin(\Phi_{ref}(t) + \theta_L(t))\omega_L(t) \\ \dot{e}_{y2}(t) &= v_L(t)\sin(\theta_L(t)) - v_F(t)\sin(\theta_F(t)) \\ &\quad + d_{ref}(t)\cos(\Phi_{ref}(t) + \theta_L(t))\omega_L(t) \\ \dot{e}_{\theta2}(t) &= \omega_L(t) - \omega_F(t) \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_{x2}(t) &= -K_{x2}(x_F^d(t) - x_F(t)) \\ \dot{e}_{y2}(t) &= -K_{y2}(y_F^d(t) - y_F(t)) \\ \dot{e}_{\theta2}(t) &= -K_{\theta2}\sin(\theta_F^d(t) - \theta_F(t)) \end{aligned} \quad (19)$$

$K_{x2} > 0$, $K_{y2} > 0$, $K_{\theta2} > 0$ 는 수렴 속도를 조절하기 위한 제어 상수이며 그림 1과 동적 모델, 식 (1)이 식 (19)와 같은 형태로 표현되면 오차의 변화량은 음의 한정 함수를 가지게 되며 오차는 0으로 수렴하게 되므로 제어를 안정하게 설계할 수 있다. 식 (18)을 식 (19)를 이용하여 전개하게 되면

$$\begin{aligned} v_L(t) &= -k_{x2}\dot{e}_{x2}(t)\cos(\theta_L(t)) - k_{y2}\dot{e}_{y2}(t)\sin(\theta_L(t)) \\ &\quad + d_{ref}\sin(\Phi_{ref}(t))\omega_L(t) + v_F\cos(e_2(t)) \\ \omega_L(t) &= -k_{\theta2}\sin(e_{\theta2}(t)) + \omega_F(t) \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)과 같이 제어 입력을 구할 수 있다. 앞에서 구한 선도 로봇과 목표 위치의 오차를 수렴하기 위한 제어 입력, 식 (16)과 대형 위치와 추종 로봇 사이의 오차를 고려한 제

어 입력, 식 (20)을 이용하면

$$\begin{aligned} v_L(t) &= k_{x1}e_{x1}(t)\cos(\theta_L(t)) + K_{y1}e_{y1}(t)\sin(\theta_L(t)) \\ &\quad + d_{ref}\sin(\Phi_{ref}(t))\omega_L(t) - k_{x2}\dot{e}_{x2}(t)\cos(\theta_L(t)) \\ &\quad - k_{y2}\dot{e}_{y2}(t)\sin(\theta_L(t)) \\ \omega_L(t) &= k_{\theta1}\sin(e_{\theta1}(t)) - k_{\theta2}\sin(e_{\theta2}(t)) + \omega_F(t) \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)과 같이 제어 입력, $v_L(t)$ 과 $\omega_L(t)$ 를 구할 수 있으며 입력 제한이 있는 추종 로봇을 고려한 선도 로봇의 제어 입력으로 제안한다. 식 (12)부터 식 (15)까지의 과정을 거쳐 구한 식 (16)을 제어 입력으로 사용하면 목표 위치와 선도 로봇 간의 오차는 0으로 수렴하며 안정하다. 또한 식 (17)부터 식 (20)까지 일련의 과정을 거쳐 추종 로봇과 대형의 위치 사이의 오차의 변화량을 음의 한정 함수로 재구성하였으므로 오차는 0으로 수렴할 것이며 이를 위한 제어 입력으로 식 (21)을 사용하면 안정할 것이다. 식 (14)와 식 (19)과 같이 선형 시스템의 형태로 재구성하여 생성한 제어 입력 (16)과 (20)은 중첩의 원리(principle of superposition)를 통해 제어 입력 (21)과 같이 생성하여도 전체 시스템은 $t \rightarrow \infty$ 일 때 0으로 수렴하며 안정하다고 말할 수 있다. 다음 장에서는 본 논문에서 제안하는 선도 로봇의 제어를 모의실험을 통해 확인하도록 하겠다.

4. 모의실험

본 논문에서 제안한 추종 로봇의 입력제한을 고려한 알고리즘의 타당성을 보이기 위해 모의실험을 통해 확인하였다. 모의실험에는 기존 방법과의 차이점을 비교하기 위해 기존의 추종 로봇 제어기[22]와 선도 로봇의 제어기[23]를 사용하였다. 추종 로봇에는 기존과 동일한 제어기를 사용하였고 선도 로봇의 제어기는 본 논문에서 제안하는 방법을 사용하였다. 선도 로봇과 추종 로봇의 초기 위치 및 자세 각은 표 1과 같다.

표 1 선도, 추종 로봇의 초기 위치와 자세 각
Table 1 Initial position and angle of robots

	x	y	θ
1 st robot	2	0	0
2 nd robot	0	4	0.2

모의실험을 위해 선도 로봇이 추종해야 하는 목표 위치를 $x_L^d(t) = 20$, $y_L^d(t) = 30$ 로 설정하였다. 그리고 추종 로봇의 입력 제한은 $v_F^{\max}(t) = 1.0$, $\omega_F^{\max}(t) = 0.5$ 로 설정하였다. 선도 로봇의 제어 상수 $k_{x1} = 0.1$, $k_{y1} = 0.1$, $k_{\theta1} = 0.1$, $k_{x2} = 1.0$, $k_{y2} = 1.0$, $k_{\theta2} = 0.1$ 이다.

군집제어를 위한 상호 정보를 측정할 수 있는 계측 범위를 5m로 정하고 이 범위를 벗어나는 문제가 발생하게 되면 좌표에 표시하였다. 추종 로봇이 선도 로봇보다 낮은 성능을 가진 군집 제어에서 기존 방식의 제어기의 결과와 입력 제한을 가진 추종 로봇을 고려한 본 논문에서 제안하는 선도 로봇 제어기의 결과를 비교하였다. 선도 로봇과 목표 지

점과의 오차와 가상 선도 로봇과 추종 로봇의 오차를 서로 비교하여 제안된 선도 로봇의 제어기의 성능과 안정성을 확인하였다.

(a) 기존 제어기 ($x_L^d(t) = 20$, $y_L^d(t) = 30$)

(b) 제안된 제어기 ($x_L^d(t) = 20$, $y_L^d(t) = 30$)

그림 3 군집 제어 결과 비교

Fig. 3 Comparison of the formation results.

그림 3에서 파란 원은 목표 위치를 나타내고 검은 선은 선도 로봇의 위치 궤적이다. 녹색 점선은 대형을 유지하기 위해 추종 로봇이 추종해야 하는 선도 로봇으로부터 생성된 위치 궤적이며 자주색의 선은 추종 로봇의 주행 궤적이다. 마지막으로 적색 선은 추종 로봇이 군집 대형을 추종하면서 계측 범위를 벗어난 위치를 표시한 것이다.

그림 3의 (a)는 입력 제한을 가진 추종 로봇과 기존의 선도 로봇 제어기를 사용한 군집 제어 결과를 나타낸다. 선도 로봇은 목표 위치까지 수렴하는 것을 확인할 수 있었지만 추종 로봇은 추종해야 하는 대형을 제대로 형성하지 못하여 계측 범위를 빈번하게 벗어나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 그림 3의 (b), 본 논문에서 제안한 선도 로봇의 제어기는 목표 위치까지 수렴하고 추종 로봇 또한 추종해야 하는 대형을 빠르게 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 그림 3의 (a)에서 발생한 계측 범위를 벗어나는 문제도 발생하지 않았다.

(a) 기존 제어기

(b) 제안된 제어기

그림 4 오차 비교

Fig. 4 Comparison of the errors.

그림 4의 (a)에서 선도 로봇과 목표 위치와의 오차 $e_{x1}(t)$, $e_{y1}(t)$, $e_{\theta1}(t)$ 는 0으로 수렴하였으나 추종 로봇과 대형 위치와의 오차 $e_{y2}(t)$ 는 수렴하지 못하는 결과를 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 선도 로봇의 제어기는 그림 4의 (b)를 통해 모든 오차가 0으로 수렴함을 확인할 수 있었다.

그림 5의 (b)는 본 논문에서 제안하는 선도 로봇의 제어 입력으로 7초 부근에서 추종 로봇과 대형의 오차가 수렴하여 선도 로봇은 제어 입력 $v_L(t)$ 을 높였으며 9~10초 부근에서 군집 대형과 추종 로봇과의 오차가 커지자 입력 제한을 가진 추종 로봇이 대형을 잘 추종할 수 있도록 제어 입력 $v_L(t)$ 을 줄인 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 추종 로봇이 선도 로봇과 대형을 형성하기 위해 선도 로봇으로부터 유지해야 하는 거리와 관계 방향 각, ϕ 를 비교한 결과이다. 기존의 방법을 사용한 결과는 유지해야 하는 거리와 방향 각을 추종하지 못하고 있다. 하지만 본 논문에서 제안하는 선도 로봇의 제어기를 사용한 결과, (b)는 선도 로봇과 떨어져 유지해야 하는 거리와 방향 각도, 모두 안정하게 추종하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7에서부터 그림 8까지는 초기 조건을 다르게 하여 확인하였다. 그림 7은 이동 로봇의 초기 위치를 표 2와 같

(a) 기존 제어기

(b) 제안된 제어기

그림 5 제어 입력 비교

Fig. 5 Comparison of the inputs.

(a) 기존 제어기 ($x_L^d(t) = 20$, $y_L^d(t) = 30$)

(b) 제안된 제어기 ($x_L^d(t) = 20$, $y_L^d(t) = 30$)

그림 6 거리와 관계 방향 비교

Fig. 6 Comparison of the distance and relative orientation.

(a) 기존 제어기 ($x_L^d(t) = 20$, $y_L^d(t) = 30$)

(b) 제안된 제어기 ($x_L^d(t) = 20$, $y_L^d(t) = 30$)

그림 7 군집 제어 결과 비교 2

Fig. 7 Comparison of the formation results 2.

이 설정하였을 때의 결과이고 그림 8은 선도 로봇의 목표 위치를 $x_L^d(t)=30$, $y_L^d(t)=10$ 로 하였을 때 군집 제어 결과이다. 이를 통해 추종 로봇의 입력 제한이 있는 경우에도 성능이 개선되었음을 확인하였다.

표 2 선도, 추종 로봇의 초기 위치와 자세 각

Table 2 Initial position and angle of robots

	x	y	θ
1 st robot	4	2	0
2 nd robot	7	0	0.2

(a) 기존 제어기 ($x_L^d(t)=30$, $y_L^d(t)=10$)

(b) 제안된 제어기 ($x_L^d(t)=30$, $y_L^d(t)=10$)

그림 8 군집 제어 결과 비교 3

Fig. 8 Comparison of the formation results 3.

5. 결 론

본 논문은 군집 제어에서 추종 로봇의 입력 제한으로 인하여 선도 로봇보다 성능이 낮은 추종 로봇을 고려한 선도 로봇의 제어기를 제안하였으며 기존 방식의 추종 로봇의 입력 제한을 고려하지 않은 제어기와 본 논문에서 제안하는 제어기를 모의실험을 통해 비교, 분석하였다. 선도 로봇이 추종 로봇을 고려하기 때문에 전체 군집의 수렴 속도는 다

그림 9 제한한 선도 로봇 제어기를 사용한 상세 군집 제어 상세 결과.

Fig. 9 Formation control detailed result using proposed leader controller.

소 줄어들었으나 추종 로봇이 대형을 빠르게 형성하고 결과적으로 군집 개체의 계측 범위 또한 유지하는 것을 확인하였다. 기존의 동일 성능을 가진 개체들로 이루어진 군집 제어 문제에 추종 개체의 입력 제한이란 제약을 추가함으로써 실제 환경에 적용하였을 때 개선된 성능을 낼 수 있고 나아가 다른 개체들로 이루어진 군집 제어 등, 활용 범위가 넓을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] D. Cruz, J. McClintock, B. Perteet, A. A. O. Orqueda, Y. Cao and R. Fierro, "Decentralized cooperative control," IEEE Control Systems Magazine, pp. 58-78, June. 2007.
- [2] J. T. Feddema, C. Lewis, and D. A. Schoenwald, "Decentralized control of cooperative robotic vehicles: theory and application," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 18, no. 5, pp. 852-864, Oct. 2002.
- [3] Y. Gu, B. Seanor, G. Campa, M. R. Napolitano, L.

- Rowe, S. Gururajan, and S. Wan, "Design and flight testing evaluation of formation control laws," IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 14, no. 6, pp. 1105-1112, Nov. 2006.
- [4] 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.
- [5] J. Fredslund and M. J. Mataric, "A general algorithm for robot formation using local sensing and minimal communication," IEEE Trans. Robot and Automation, vol. 18, no. 5, pp. 837-846, 2002.
- [6] J. R. T. Lawton, R. W. Beard, and B. J. Young, "A decentralized approach to formation maneuvers," IEEE Trans. Robot and Automation, vol. 19, no. 6, pp. 933-941, 2003.
- [7] K. D. Do and J. Pan, "Nonlinear formation control of unicycle-type mobile robots," Robot Autonomous System, Vol. 55, pp. 191-204, 2007.
- [8] 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.
- [9] M. A. Lewis and K. H. Tan, "High precision formation control of mobile robots using virtual structures," Autonomous Robots, vol. 4, no. 4, pp. 387-403, 1997.
- [10] J. P. Desai, J. Ostrowski, and V. Kumar, "Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots," IEEE Trans. Robot Automation, vol. 17, no. 6, pp. 905-908, 2001.
- [11] 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.
- [12] 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 Automation, vol. 18, no. 5, pp. 813-825, 2002.
- [13] 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.
- [14] U. T. Jonsson, "Consensus of Heterogeneous Linear Agents Applied to a Formation Control Problem," IEEE International Conference on Decision and control, Atlanta, December 15-17, 2010.
- [15] B. S. Smith, J. Wang, M. Egerstedt and A. Howard, "Automatic Formation Deployment of Decentralized Heterogeneous Multi-Robots networks with Limited Sensing Capabilities," IEEE International Conference Robotics and Automation, Japan, May 12-17, 2009
- [16] B. Jung and G. S. Sukhatme, "Tracking multiple moving targets using a camera and laser rangender," Institute for robotics and Intelligent Systems Technical Report IRIS-01-397, University of Southern California, 2001.
- [17] M. Kim, H. W. Kim, and N. Y. Chong, "Automated robot docking using direction sensing rfid," 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007). Proceedings., pp. 4588 - 593, April 2007.
- [18] 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.
- [19] M. M. Polycarpou, "Stable adaptive neural control scheme for nonlinear systems," IEEE Trans. Automatic Control, vol. 41, no. 3, pp. 447-451, 1996.
- [20] DIERKS T., JAGANNATHAN S., "Control of nonholonomic mobile robot formation : Backstepping kinematics into dynamics," Proc. IEEE Multi-Conf. Systems Control, Singapore, October. 2007, pp. 94-99
- [21] J. Y. Tigli and M. C. Thoma, "Use of multi agent systems for mobile robotics control," in Proc. IEEE International Conference Systems, Man, Cybernetics, San Antonio, TX, Oct. 1994, vol.1, pp.588-592
- [22] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," in Proc. IEEE International Conference Robotics and Automation, 1990, pp. 384-389.
- [23] R. Wiegwart and L. Nourbakhsh, "Introduction of Autonomous Mobile Robots," A Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2004.

저 자 소 개

이 승 주 (李昇柱)

2004년 위덕대학교 정보통신공학과 졸업, 2012년 아주대학교 전자공학과 대학원 석사.
관심분야는 로봇제어, 컴퓨터응용, 비선형 적응제어.

홍 석 교 (洪錫敎)

1971년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1973년 동 대학원 석사, 1981년 동 대학원 박사, 1976년~아주대학교 전자공학부 교수.
관심 분야는 로봇제어, 컴퓨터 응용, 지능제어.