

곡률 반경을 이용한 군집 로봇의 대형 제어

Formation Control for Swarm Robot using Radius of Curvature

강동우¹, 송영훈¹, 이석^{1,✉}, 이경창²
Dong Woo Kang¹, Young Hun Song¹, Suk Lee^{1,✉}, Kyung Chang Lee²

¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

² 부경대학교 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong National University)

✉ Corresponding author: slee@pnu.edu, Tel: +82-51-510-2320

Manuscript received: 2014.5.20 / Revised: 2014.9.30 / Accepted: 2014.10.14

This paper presents a new method to control swarm robots so that they can keep the formation while following a curved path. The main idea is to utilize the information on the instant center of gyration. For a given path, location of the instant center of the formation center is calculated, and individual robots follow the circular path around the calculated instant center. Performance of curvature-radius based method is compared with leader-follower referenced method via MATLAB simulation.

Key Words: Swarm robot (군집 로봇), Formation control (대형 제어), Radius of gyration (회전 반경), MATLAB (매트랩), Simulation (시뮬레이션)

1. 서론

로봇 기술의 발달로 이미 산업, 서비스, 군사, 가정 등 폭넓은 분야의 응용을 위해 연구되고 있다.^{1,2} 기존의 로봇 기술은 하나의 로봇을 산업용이나 서비스용으로 활용하는 기술로 제한되었지만, 최근에는 각각의 로봇을 군집으로 묶어 활용하는 군집 로봇 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{3,4} 군집 로봇에게 임무가 주어졌을 때, 임무를 수행하기 위해 필요한 기술로는 다수의 로봇들의 행동을 제어하는 군집 행동 제어 기술, 외부 환경의 변화를 인지하는 군집 상황 인지 기술, 로봇 간의 원활한 정보를 공유하는 군집 네트워킹 기술, 로봇을 통합적으로 관리하는 군집 시스템 통합 기술 등 크게 4가지 부분으로 구성되어 있다.^{5,6}

군집 행동 제어 기술 중 하나인 군집 로봇의 대형 제어 방법에는 크게 Leader-follower referenced, Unit-center referenced, Neighbor referenced 방법으로 나눌 수 있다.⁷⁻¹⁰ 이러한 대형 제어 방법은 군집 로봇이 주행할 때 사용되는 참고 거점에 대한 연산이 간단하기 때문에, 대형 제어에 필요한 연산량이 적어 모바일 로봇과 같이 연산 능력이 비교적 떨어지는 로봇의 제어에 적합하다. 그러나, 이러한 대형 제어 방법은 군집 로봇이 주행할 때 정확한 대형을 꾸준히 유지하기 어렵다는 단점이 있다. 특히, Leader-follower referenced 방법의 경우, 선도 로봇의 작은 움직임에도 대형이 흐트러지는 현상이 발생한다. 즉, 군집 로봇이 협동 작업을 통하여 큰 물품을 운반할 때 목표점에 도달하지 못한 상황에 물품들을 떨어뜨리는 경우가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 리더가 되는 선도 로봇의 속도 및 회전 반경의 정보를 공유하여 추종 로봇을 제어하고 곡선 주행을 하는 경우에도 대형을 유지할 수 있는 곡률 반경 기반 대형 제어 방법을 제안한다. 또한, 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 기존 Leader-follower referenced 방법과 본 논문에서 제안하는 곡률 반경 기반 대형 제어 방법의 성능을 비교하여 평가한다.

본 논문은 서론을 포함하여 5개의 장으로 구성된다. 2장에서는 군집 로봇의 시뮬레이션을 위한 로봇 모델에 대해 소개한다. 3장에서는 기존 Leader-follower referenced 방법과, 본 논문에서 제안하는 곡률 반경 기반 대형 제어 방법에 대해 소개한다. 4장에서 MATLAB 시뮬레이션을 통해 이 두 방법의 성능을 비교하고, 5장에서는 결론 및 향후 계획으로 구성하였다.

2. 군집 로봇의 기구학적 모델링

본 논문에서는 Fig. 1과 같은 직각 좌표계 상에서 4개의 바퀴를 가진 이동 로봇을 대상으로 하고 있다. 그림에서, 4개의 바퀴가 각각 2개씩 같은 축상에 위치해 있으며, 각 바퀴는 모터에 의해서 독립적으로 제어된다. 실제 로봇의 주행에서는 바퀴와 바닥의 마찰력, 앞, 뒤 바퀴의 속도 차, 슬립 등과 같은 다양한 요소가 적용되지만, 본 논문에서는 바퀴와 지면 사이의 슬립은 고려하지 않았다. 또한 로봇의 회전은 단위 시간에서 좌, 우 바퀴의 이동거리 차에 의해서만 발생하는 것으로 가정하였다. 따라서, 군집 로봇의 움직임을 결정하는 V_l, V_r 과 군집 로봇의 선 속도 V , 회전 각속도 ω 는 다음 식(1),(2),(3)과 같이 나타내었다.

$$V_l = \frac{v_{lf} + v_{lb}}{2}, \quad V_r = \frac{v_{rf} + v_{rb}}{2} \quad (1)$$

$$V = \frac{V_l + V_r}{2} = \frac{r(\omega_l + \omega_r)}{2} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{V_l - V_r}{L} = \frac{r(\omega_l - \omega_r)}{L} \quad (3)$$

여기서, v_{lf}, v_{lb} 는 로봇의 왼쪽 앞, 뒤 바퀴의 속도, v_{rf}, v_{rb} 는 로봇의 오른쪽 앞, 뒤 바퀴의 속도를 나타낸 것이며, L 은 로봇에 장착되어 있는 양 바퀴 사이의 길이, r 은 로봇 바퀴의 반지름을 나타낸 것

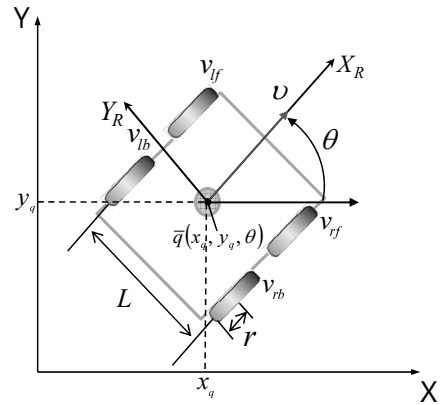


Fig. 1 Rectangular coordinate system of a 4-wheeled mobile robot

이다.

직각 좌표계 상에서 로봇의 위치는 x_q, y_q 로 표시하며, 로봇의 진행 방향은 θ 로 나타낸다. 군집 로봇의 위치와 자세를 \bar{q} 로 정의하면,

$$\bar{q} = [x_q \quad y_q \quad \theta]^T \quad (4)$$

로 표시된다. 그러면, 직각 좌표 상에서의 속도는

$$\dot{q} = [\dot{x}_q \quad \dot{y}_q \quad \dot{\theta}]^T \quad (5)$$

로 표현되며, 식(4)와 식(5)를 바탕으로 군집 로봇의 기구학적 모델 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_q \\ \dot{y}_q \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. 곡률 반경 기반 대형 유지 제어 시스템의 설계

3.1 Leader-follower referenced 방법

일반적으로 군집 로봇의 대형을 형성하기 위한 접근 방법은 Unit center referenced, Leader-follower referenced, Neighbor referenced와 같은 3가지 방법으로 분류할 수 있다.⁷⁻¹⁰ Unit center referenced 방법은 각 로봇들의 평균좌표에 있는 점을 중심으로 선정하고, 이 중심점을 기준으로 자신의 위치를 계산하는 방법이고, Leader-follower referenced 방법은 대형을 이루고 있는 하나의 로봇이 리더가 되어 다

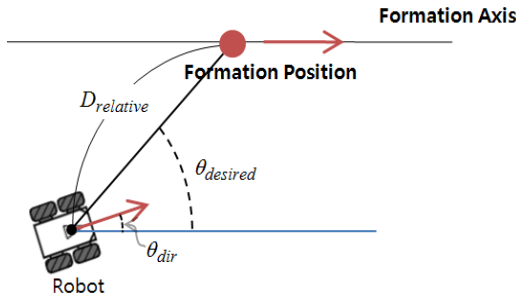


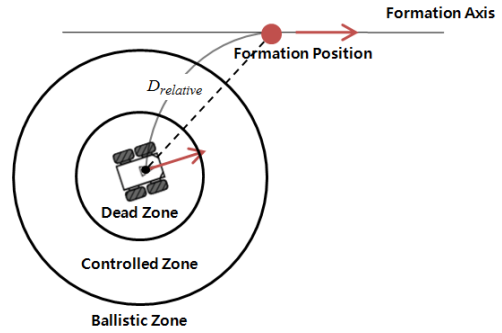
Fig. 2 Target and current positions of a swarm robot

른 로봇들이 리더를 기준으로 자신의 위치를 계산하는 방법이다. 그리고 neighbor referenced 방법은 각 로봇들이 자신과 이웃하고 있는 로봇을 기준으로 하여 자신의 위치를 계산하는 방법이다.

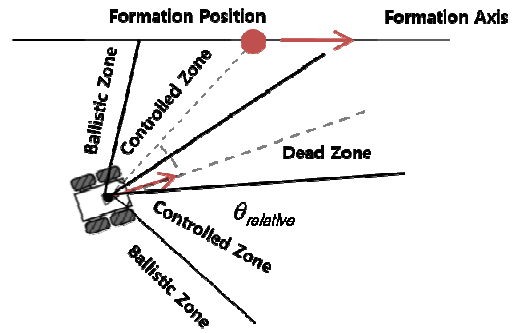
Leader-follower referenced 방법에는 다양한 방법이 연구되고 있지만, 대표적으로 Tucker Balch 등이 제안한 motor schema-based formation control 방법이 널리 사용되고 있다.⁷ motor schema-based 제어 방법은 avoid-static-obstacle, avoid-robot, move-to-goal, noise, maintain-formation의 5가지 기본적인 schema를 이용하여 로봇의 이동 벡터를 결정하는 방법이다. 특히, maintain-formation 파라미터로부터 계산된 벡터는 대형을 유지하기 위해서 목적지와와의 거리에 따라 ballistic zone, controlled zone, dead zone으로 나누어 벡터의 크기를 조절하여 목적지에 이르는 방법이다. 로봇이 ballistic zone에 위치할 경우에는 최대의 벡터의 크기 값으로 목적지로 주행하고, controlled zone에 위치할 경우에는 목적지와 로봇간의 거리에 따라 벡터의 크기를 가변하여 로봇이 주행하며, dead zone에 위치할 경우에는 벡터의 크기를 0으로 선정하여 로봇이 목적지에 도달한 것으로 인식하도록 한다. Fig. 2는 대형 유지를 위한 목적지와 로봇의 현재 위치를 나타낸 것이다.

Maintain-formation은 maintain-formation-speed 및 maintain-formation-steer를 이용하여 대형을 이룰 수 있는 적절한 위치에 도달하도록 로봇을 제어한다. Maintain-formation-speed는 로봇이 해당 위치 기준으로 뒤에 있는 경우에는 속도를 올려야 하고, 해당 위치 기준으로 앞에 있는 경우에는 속도를 줄인다. 군집 로봇의 속도는 속도 비율을 조절하는 설정 파라미터를 유저가 선정한 다음, 로봇의 속도 (V_{speed})를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{speed} = \alpha \times D_{relative} \quad (7)$$



(a) Zones for computing velocity corrections



(b) Zones for computing heading corrections

Fig. 3 Control zones of a swarm robot

여기서 α 는 속도 비율을 조절하는 설정 파라미터이고, $D_{relative}$ 는 로봇의 현재 위치에서 원하는 위치까지의 상대거리를 나타낸 것이다. 따라서, 군집 로봇은 Fig. 3(a)와 같이 원하는 위치와의 거리에 따라 종 방향의 영역으로 속도가 제어된다.

Maintain-formation-steer는 로봇의 현재 위치에서 대형이 형성되는 위치까지의 각도 오차를 통해 각도가 보정되는 방법으로, 보정된 각도의 부호는 대형이 형성되는 위치의 횡 방향에 따라 결정된다. 로봇은 보정된 각도를 이용하여 군집 로봇의 각속도 (ω_{steer})를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_{steer} = \beta \times (\theta_{desired} - \theta_{dir}) \quad (8)$$

여기서, β 는 각속도 비율을 조절하는 설정 파라미터이고, θ_{dir} 는 직각 좌표계 상에서 현재 로봇이 진행하는 각도이며, $\theta_{desired}$ 는 직각 좌표계 상에서 원하는 위치까지의 각도를 나타낸 것이다. 군집 로봇은 Fig. 3(b)와 같이 대형이 형성되는 위치까지의 각도에 따라 횡 방향의 영역으로 각도를 제어하여 대형을 유지하도록 한다.

따라서 로봇의 진행 방향인 종 방향으로의 속도 제어를, 로봇의 횡 방향으로의 각도 제어를 통해 대형을 유지한다. 본 논문에서는 장애물이 있는 경우에 대해 실험하지 않았으며, maintain-formation 파라미터만을 이용하였다.

3.2 곡률 반경기반 대형 유지 방법

곡률 반경이란, 곡선의 구간을 원의 호로 간주할 때 이 원호의 반지름을 의미한다. 군집 로봇은 곡선으로 궤적을 그리며 목표위치로 이동하기 위해 임의의 한 점을 기준으로 곡률 반경을 결정해야 한다. 특히, 선도 로봇이 곡선 주행 함에 있어 추종 로봇들이 선도 로봇의 상대거리 및 각도로만 로봇간의 대형을 유지할 수 없기 때문에 군집 로봇은 곡률 반경으로 주행하여 대형을 유지하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 군집 로봇이 동일한 임의의 한 점을 기준으로 곡률 반경을 이용하는 방법에 대해 제안한다.

이동 로봇은 양쪽 바퀴의 속도 차에 의해 주행 경로가 달라진다. 로봇의 양쪽 바퀴의 속도가 같을 경우 직선으로 주행하고, 로봇이 회전하는 경우에는 양 쪽 바퀴의 속도 비에 따라 회전 방향 및 곡률 반경이 결정된다. 로봇이 곡선 주행을 할 때 궤적의 중심점이 존재하는데, 이를 순간 중심(Instant Center)이라고 한다.^{11,12} 군집 로봇 중 기준이 되는 로봇으로 순간 중심 좌표를 구하는 식은 다음과 같다.

$$IC = [x_1 - R \cdot \sin \theta_1, Y_1 + R \cdot \cos \theta_1] \quad (9)$$

여기서, R 은 곡률 반경, θ_1 은 로봇의 진행 방향을 나타낸 것이다. 군집 로봇의 회전 방향은 순간 중심 좌표 기준으로 시계 반대방향으로 회전하고 군집 로봇이 시계 방향으로 회전할 경우에는 식(9)의 수식에서 부호를 변경하여 선정하며, 군집 로봇이 곡선 주행기간 동안에는 순간 중심 좌표가 변하지 않는 것으로 가정한다. 그리고 선도 로봇의 좌표를 이용하여 선정된 순간 중심으로부터 추종 로봇의 회전 방향을 결정한다.

Fig. 4와 같이 선도 로봇이 $[x_1, y_1, \theta_1]$ 위치에서 곡선 주행을 하여 $[x_2, y_2, \theta_2]$ 위치로 이동했을 때의 위치는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x_{IC} \\ y_1 - y_{IC} \\ \theta_1 + \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{IC} \\ y_{IC} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

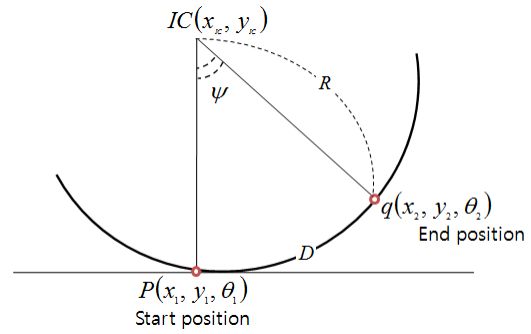


Fig. 4 Radius of curvature

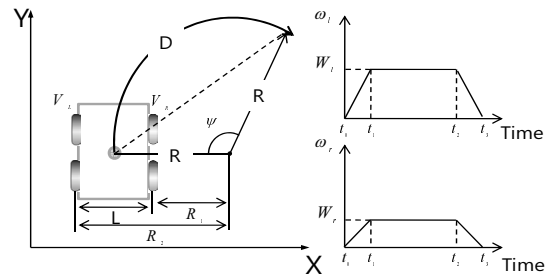


Fig. 5 Swarm robot on a curved path with its velocity profiles

여기서 x_{IC}, y_{IC} 는 순간 중심 좌표이고 ψ 는 순간 중심 좌표로부터 군집 로봇의 초기 좌표에서 이동한 좌표까지의 각도이며, θ_2 는 로봇의 진행 방향을 나타낸 것이다.

Fig. 5는 순간 중심 좌표로부터 군집 로봇이 이동해야 하는 이동 거리, 회전 각도 및 회전 반경을 나타낸 것이며, 군집 로봇이 Fig. 5와 같이 회전하는 방법은 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로는 스티어링을 통해 바퀴의 각도를 바꾸어 회전하는 방법이고, 두 번째로는 양 바퀴의 각도는 고정되어있는 상태에서 양 바퀴의 속도를 바꾸어 회전하는 방법이 있다. 본 논문에서 다루는 군집 로봇은 두 번째에 해당하는 시스템이다. 군집 로봇이 각속도가 일정할 때, 각각 바퀴의 선 속도는 회전 반경에 비례한다. 따라서 일정 곡률에서 좌우 바퀴의 속도를 곡률 반경에 대한 식으로 표현할 수 있으며, 다음과 같이 전개한다.

$$\frac{v_{lf} + v_{lb}}{2} : R + \frac{L}{2} = \frac{v_{rf} + v_{rb}}{2} : R - \frac{L}{2} \quad (11)$$

식(11)를 곡률 반경에 대한 식으로 정리하면

다음 식(12)를 유도할 수 있다.

$$R = \frac{L}{2} \cdot \frac{v_{lf} + v_{lb} + v_{rf} + v_{rb}}{v_{lf} + v_{lb} - v_{rf} - v_{rb}} \tag{12}$$

$$= \frac{L}{2} \cdot \frac{\omega_{lf} + \omega_{lb} + \omega_{rf} + \omega_{rb}}{\omega_{lf} + \omega_{lb} - \omega_{rf} - \omega_{rb}}$$

위의 식을 통해서 $v_{lf}, v_{lb} = v_{rf}, v_{rb}$ 이면 $R = \infty$ 이므로 군집 로봇은 직선으로 주행하게 되고, $v_{lf}, v_{lb} \neq v_{rf}, v_{rb}$ 이면 로봇은 곡선 주행한다는 것을 확인할 수 있다. 이 때, v_{lf}, v_{lb} 와 v_{rf}, v_{rb} 의 차이가 작을수록 R이 커지므로 동일한 목표 지점을 주행할 때 보다 큰 반경으로 곡선 주행을 한다. Fig. 5에서 보이는 것처럼 군집 로봇이 $t_0 \sim t_3$ 에 따라 양 바퀴가 일정한 속도로 주행할 때, 순간 중심 좌표에서부터 군집 로봇까지 떨어진 거리 R을 이용하여 곡률 계적을 따라 군집 로봇이 이동한 거리를 D로 표현하게 되면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \int_{t_0}^{t_3} \frac{v_{lf}(t) + v_{lb}(t) + v_{rf}(t) + v_{rb}(t)}{4} dt \tag{13}$$

$$= \int_{t_0}^{t_3} \frac{r}{4} \cdot (\omega_{lf}(t) + \omega_{lb}(t) + \omega_{rf}(t) + \omega_{rb}(t)) dt$$

식(12)과 식 (13)를 이용하여 군집 로봇의 현재 위치에서 목표지점까지의 회전각도 ψ 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\psi = \frac{D}{R} \tag{14}$$

$$= \frac{r \cdot (\omega_{lf} + \omega_{lb} - \omega_{rf} - \omega_{rb})}{4 \cdot L} \cdot (t_3 + t_2 - t_1 - t_0)$$

여기서, $t_0 \sim t_1$ 은 로봇이 곡선 주행을 시작하는 구간이고, $t_1 \sim t_2$ 은 로봇이 일정한 속도로 곡선을 주행하는 구간이며, $t_2 \sim t_3$ 은 로봇이 목적지에 도달하여 감속하는 구간을 나타낸 것이다. 그리고 W_l 은 로봇의 왼쪽 바퀴의 각속도 $(\omega_{lf} + \omega_{lb})/2$, W_r 은 로봇의 오른쪽 바퀴의 각속도 $(\omega_{rf} + \omega_{rb})/2$ 를 나타낸 것이다.

Fig. 5와 같이 양쪽 바퀴의 속도 비가 같다면, 로봇의 곡률 반경은 일정하다. 시뮬레이션에서는 바퀴의 슬립 현상을 고려하지 않은 상태에서 현재 로봇의 위치와 자세를 피드백 하여 위치 오차를 수정할 수 있도록 하였다. Fig. 6은 대형을 이루고 있는 군집 로봇과 같은 축 상에 있지 않은 순간

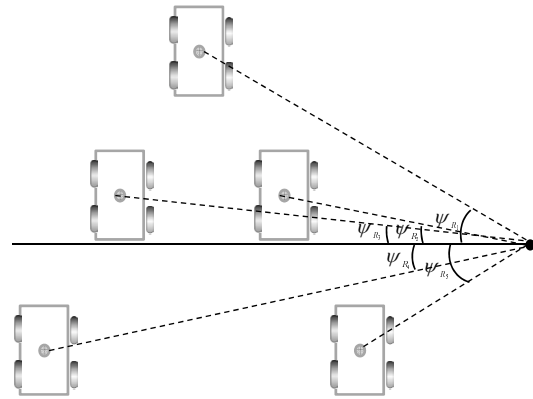


Fig. 6 Angular positions of swarm robots from instant center

중심 IC간의 각도를 도식적으로 나타낸 것이다. 선도 로봇의 곡률 반경 R을 이용하여 일정한 곡률로 곡선 주행한다면, 추종 로봇들도 각자 정해진 곡률 반경 R과 순간 중심 IC를 이용하여 선도 로봇이 회전을 끝낼 때까지 곡선 주행한다.

군집 로봇의 주행 속도는 식(7)와 식(8)을 이용하여 로봇의 위치에서 추종하는 위치까지의 거리와 각도로 제어하는데, 각 로봇들의 상대 거리를 세 부분, 즉 25cm 이상을 ballistic zone, 0cm~25cm 까지를 controlled zone, 0cm를 dead zone으로 구분하고, 각도 오차의 절대값이 29° 이상이면 ballistic zone, 0.06°~ 29°까지를 controlled zone, 0.06° 이하를 dead zone으로 구분하여 주행 속도와 방향을 제어한다.

4. 시뮬레이션을 통한 성능 평가

본 장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안된 곡률 반경기반 대형 제어 방법에 대해 성능을 검증하기 위해 MATLAB을 이용하였다. 시뮬레이션에서 기구학적으로 설계된 로봇의 수는 5대로 선정하였으며, 기존 Leader-follower referenced 대형 방법을 이용한 곡선 주행과 제안된 방법을 이용한 곡선 주行的 성능을 평가한다. 선도 로봇의 초기 좌표는 (-1000, -1000)으로 주어지며, 추종 로봇들의 각 초기 좌표는 (-750, 1480), (-1250, 1480), (-500, 1960), (-1500, 1960)으로 주어진다. 또한 선도 로봇의 초기 진행 방향은 90°이고, 추종 로봇들의 초기 진행 방향도 선도 로봇과 동일한 진행 방향으로 선정한다. 선도 로봇의 속도는 0.2m/s로 일정한 속

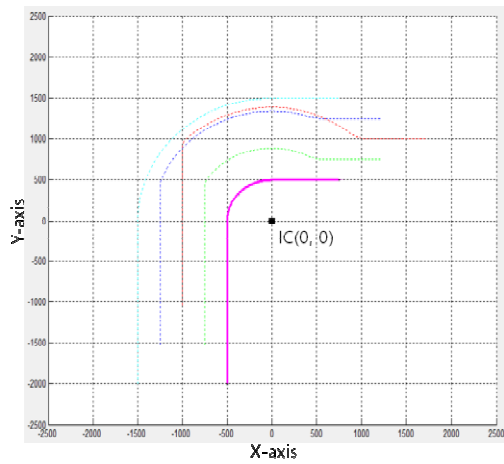
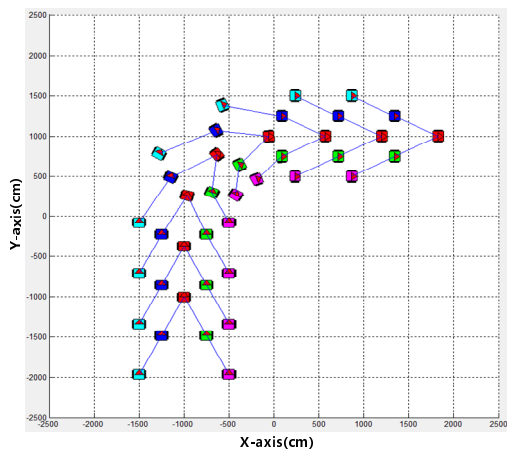
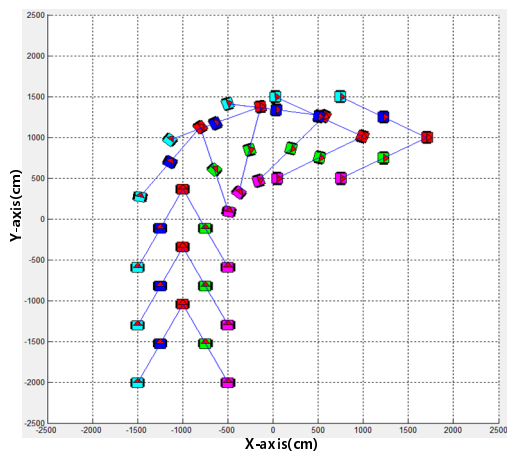


Fig. 7 Running path of curvature radius-based method

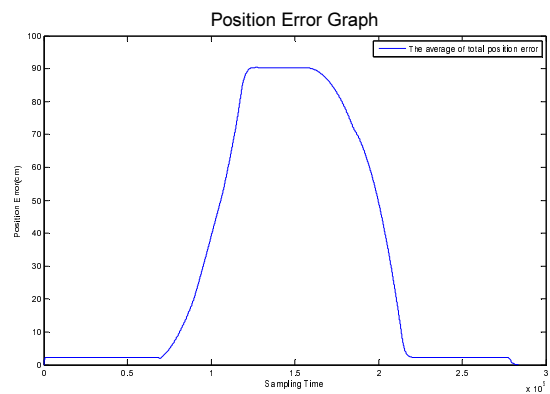


(a) Leader-follower referenced method

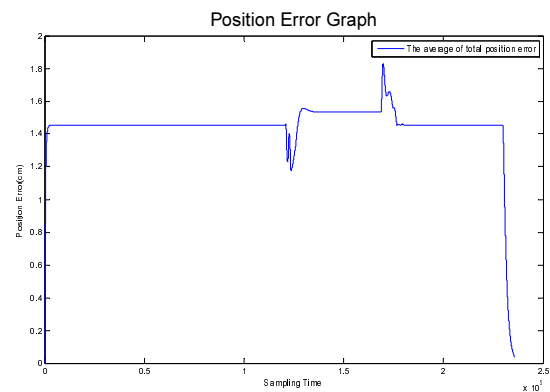


(b) Curvature radius-based method

Fig. 8 90° turn of swarm robot formation



(a) Leader-follower referenced method



(b) Curvature radius-based method

Fig. 9 Average of total position error of robot on a curve

도로 주행하고, 추종 로봇들은 선도 로봇과의 거리 차에 따라 속도가 주어지며, 최대 0.6m/s이다. Fig. 7은 본 논문에서 제안한 곡률 반경을 이용하여 주행하는 경로를 나타낸 것이다. 실선은 선도 로봇이 주행하는 경로이고, 점선은 추종 로봇들이 주행하는 경로이다. 그리고 군집 로봇의 대형 유지를 위한 공통 회전중심 IC(0,0)는 유저가 선정한다.

Fig. 8(a)는 군집 로봇이 Leader-follower referenced 방법으로 곡선 주행을 하는 모습이며, Fig. 8(b)는 본 논문에서 제안한 곡률 반경을 이용하여 곡선 주행을 한 모습이다. 또한, Fig. 9는 샘플링 주기마다 로봇들이 대형을 유지할 때 발생하는 로봇 간 거리 오차를 나타낸 것이다. 여기서 두 로봇의 거리 오차는 Fig. 10과 같이 정확한 대형을 유지했을 때의 로봇 간 거리와 실제 로봇 간 상대 거리의 차를 절댓값으로 나타내었고, 군집을 이루고 있는 로봇 5대에서 발생하는 10개의 거리 오차의 평균을 식(15)를 이용하여 계산하였다.

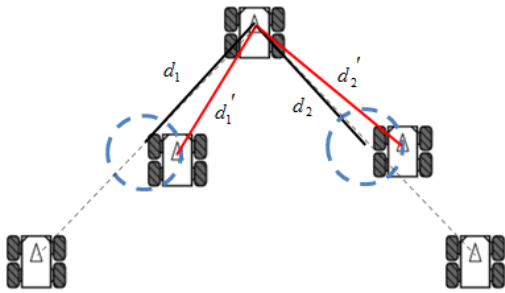


Fig. 10 Distance error between swarm robots

Table 1 Comparison of measured performance (cm)

	Average	Maximum
Leader-Follower reference method	33.56	90.34
Curvature trajectory-based method	1.46	1.82

$$D_{error} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} |d_i - d'_i| \quad (15)$$

이 때, 순간 중심 좌표로부터 멀리 떨어진 로봇은 회전 반경이 크고 로봇의 최고속도가 제한되어 있기 때문에 순간 중심에 가까이 위치하여 회전 반경이 작은 로봇보다 더 큰 오차를 발생시키는 경향이 있다.

Table 1에서 보는 바와 같이 Leader-follower referenced 방법은 최대 90.34cm, 평균 33.56cm의 위치 오차가 발생하는 것을 알 수 있었고, 제안된 곡률 반경기반 대형제어 방법은 최대 1.82cm, 평균 1.46cm의 위치 오차가 발생하는 것을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 9(b)를 살펴보면 Leader-follower referenced 방법으로 곡선을 주행할 때는 리더가 되는 하나의 로봇을 기준으로 다른 로봇들의 위치를 업데이트하여 리더 로봇을 추종하기 때문에 로봇간의 거리 오차가 크게 발생하고, 제안된 대형 제어 방법으로 곡선 주행을 할 경우에는 고정된 순간 중심 좌표 기준으로 모든 로봇의 위치를 업데이트하여 주행하기 때문에 로봇간의 거리 오차가 적게 발생하는 것을 확인하였다. 즉, 기존에 Leader-follower referenced 방법보다는 본 논문에서 제안한 방법이 대형 유지에 보다 효과적인 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 순간 중심 좌표로부터 곡률 반경을 계산하고, 계산된 곡률 반경으로 군집 로봇

이 곡선으로 주행하게 하여 대형을 유지하면서 이동하는 방법을 제안하였다. 이를 시뮬레이션으로 확인함으로써 기존 대형 제어 방법과 비교하여 성능을 검증하였다.

대형 제어 방법을 시뮬레이션으로 알아보기 위해 로봇을 기구학적으로 해석하였다. 제안된 곡률 반경기반 대형 제어 방법은 군집 로봇이 주행하다가 곡선 주행을 하게 되면 선도 로봇과 추종 로봇의 중심 좌표를 선정하고, 선정된 좌표 기준으로 순간 중심 좌표를 얻어 회전 반경을 구한 뒤, 군집 로봇이 곡선으로 주행하도록 하였다.

Leader-follower referenced 방법으로 곡선으로 주행할 경우에는 로봇간의 거리 오차가 크게 발생되어 대형이 무너지는 현상이 발생하였지만 제안된 대형 제어 방법을 사용할 경우에는 거리 오차가 적게 발생하는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 이렇게 기존의 방법보다 대형을 더 잘 유지하는 성능은 큰 물체를 여러 로봇이 같이 이송해야 하는 협업 상황에 더 적합할 수 있다.

하지만, 현재 곡률 반경기반 대형 제어 방법은 몇 가지 한계가 있다. 첫째, 군집 로봇의 주행 경로에 장애물이 없어야 한다. 둘째, 군집 전체의 순간 회전 중심은 군집이 이루는 대형 밖에 위치해야 한다. 그리고 본 논문에서 제안한 방법은 기존 알고리즘에 비해 연산 량이 많으며 자유 곡선을 따라 주행하기 위해서는 추가적인 알고리즘이 필요하다.

향후 군집 로봇이 주행 중에 장애물이 있을 경우 대형을 유지하면서 장애물을 회피하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 또한, 순간 회전 중심이 군집의 대형 내에 존재하는 경우에 대한 회전 방법에 대한 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Kowalczyk, W., "Multi-robot Coordination," Proc. IEEE, 2nd International Workshop on Robot Motion and Control, pp. 219-223, 2001.
2. Pack, D. J. and Mullins, B. E., "Toward Finding an Universal Search Algorithm for Swarm Robots," Proc.

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp. 1945-1950, 2003.
3. Das, A. K., Fierro, R., Kumar, V., Ostrowski, J. P., Spletzer, J., and Taylor, C. J., "A Vision-based Formation Control Framework," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 5, pp. 813-825, 2002.
 4. Takahashi, H., Nishi, H., and Ohnishi, K., "Autonomous Decentralized Control for Formation of Multiple Mobile Robots Considering Ability of Robot," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 6, pp. 1272-1279, 2004.
 5. Tak, M. H. and Joo, Y. H. "Localization for Cooperative Behavior of Swarm Robots based on Wireless Sensor Network," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 18, No. 8, pp. 725-730, 2012.
 6. La, B. H., Kim, S. H., and Joo, Y. H., "Formation Motion Control for Swarm Robots," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 60, No. 11, pp. 2147-2151, 2011.
 7. Balch, T., and Arkin, R. C., "Behavior-based Formation Control for Multi-Robot Teams," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 6, pp. 926-939, 1998.
 8. Fredslund, J., and Mataric, M. J., "A General Algorithm for Robot Formations using Local Sensing and Minimal Communication," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Robotics and Automation, *IEEE Transactions on*, Vol. 18, No. 5, pp. 837-846, 2002.
 9. Ogren, P., Egerstedt, M., and Hu, X. "A Control Lyapunov function approach to Multi-Agent Coordination," *Proc. of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 2, pp. 1150-1155, 2001.
 10. Shao, J., Xie, G., and Wang, L., "Leader-following Formation Control of Multiple Mobile Vehicles," *IET Control Theory and Applications*, Vol. 1, No. 2, pp. 545-552, 2007.
 11. Park, J. W., Park, J. H., Yun, K. S., and Lee, J. M., "Tracking and Capturing a Moving Object using Active Camera Mounted on a Mobile Robot," *Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 7, No. 9, pp. 741-748, 2001.
 12. Dudek, G. and Jenkin, M., "Computational Principles of Mobile Robotics," Cambridge University press, 2000.