

군집로봇의 경로이탈 방지를 위한 하이브리드 경로계획 기법

Hybrid Path Planning of Multi-Robots for Path Deviation Prevention

위 성 길, 김 윤 구, 최 정 원, 이 석 규*
(Sung-Gil Wee¹, Yoon-Gu Kim², Jung-Won Choi³, and Suk-Gyu Lee¹)

¹Department of Electrical Engineering, Yeungnam University

²Robotics System Research Division, DGIST

³Department of Robotics, Yeungnam College of Science & Technology

Abstract: This paper suggests a hybrid path planning method of multi-robots, where a path deviation prevention for maintaining a specific formation is implemented by using repulsive function, A* algorithm and UKF (Unscented Kalman Filter). The repulsive function in potential field method is used to avoid collision among robots and obstacles. A* algorithm helps the robots to find optimal path. In addition, error estimation based on UKF guarantees small path deviation of each robot during navigation. The simulation results show that the swarm robots with designated formation successfully avoid obstacles and return to the assigned formation effectively.

Keywords: swarm robots, collision avoidance, repulsive function, A*, path planning, UKF

I. 서론

로봇 관련 기술이 발전함에 따라서 이중 센서를 가진 로봇들이 상호 협력하여 주어진 작업을 효율적으로 수행하는 경우가 증가하고 있다. 특히 국방·건설·탐사·보안 등의 분야에서 군집 로봇의 행동 제어기술, 상황인지 기술, 네트워킹 기술 등과 관련된 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다 [1-3].

군집로봇은 개별 로봇의 지능과 정보를 공유하고 이를 바탕으로 보다 정확하게 주변 상황을 인지하여 적절한 판단을 통해 작업의 효율성을 높일 뿐 아니라 분산연산처리를 통한 빠른 제어가 이루어진다. 또한 분산 제어, 센서 개발, 로봇간 충돌 회피, 경로계획 등 다양한 분야의 융합 기술이 군집로봇에 적용되고 있다[4-7].

포텐셜 필드는 대형유지를 위한 군집로봇의 경로탐색과 충돌회피에 폭넓게 사용되고 있다[9]. 또한 A* 알고리즘은 최단 경로탐색을 위해 보편적으로 많이 사용되고 있다[13,14]. 그러나 대부분의 국지 경로계획 알고리즘은 local minima 문제라는 고유한 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 Koditschek [8] 등은 Local minima free Potential Field 방법을 개발하였고, Chang [9] 등은 Potential Field 방법과 Voronoi Diagram 접근법에 기반한 경로계획 알고리즘을 제안하고 주행과 지도 작성 기능을 동시에 수행 가능한 Hybrid path planner를 제안하였다. 또한, Carpin [10] 등은 분산 군집로봇 시스템에서의 협업적 선두로봇 추종을 위한 대형유지 중

의 돌발적 장애물 회피법을 제안하였다. 또한 군집로봇의 경로계획을 위해 군집로봇을 팀 레벨에서의 행동들과 각 로봇 레벨에서의 행동들로 구분하여 정의하고 Situated automata에 기초한 접근법을 제안하였다.

본 논문에서는 다수의 로봇이 군집 형성을 통한 최단 경로 탐색 및 로봇과 장애물간, 로봇과 로봇간의 충돌회피기술을 접목하여 군집 이동시 효율적인 제어법을 제안한다. 이를 위하여 군집로봇내의 개개 로봇들이 스스로 상황을 판단하고 행동하여 최단경로로 목표점까지 도달하기 위해 A* 방법을 적용하고 로봇의 경로 이탈방지를 위한 UKF, 장애물 회피와 로봇간 충돌 방지를 위해 Potential Field의 repulsive 함수를 사용한 복합적 경로계획법을 제시한다.

II. 제안된 알고리즘

본 장에서는 최단경로와 충돌회피를 위해 포텐셜함수 중 repulsive 함수와 A*를 접목시켜 사용하고자 한다. A*를 이용한 최단경로 계획은 다수의 로봇이 군집 이동시 충돌을 피할 수 없게 되기 때문에 repulsive 함수를 적용해 이를 해결하고자 한다.

1. 충돌회피기술(potential repulsive function)

경로탐색 및 충돌회피 알고리즘에 사용되는 포텐셜함수는 이동로봇이 목표위치로 가기 위해 현재위치와 목표점 사이의 가상의 흡인력과 장애물이나 다른 로봇과의 가상의 반발력을 이용한다. 흡인력과 반발력은 식 (1)과 같으며 이를 포텐셜함수라 한다[11-14].

$$U(c) = U_{att}(c) + U_{rep}(c) \quad (1)$$

로봇간 충돌회피를 위해 repulsive함수 U_{rep} 를 본 시스템에 적용한다. 이 함수는 로봇이 이동중 서로 같은 경로로 동시에 진입 시 발생하는 충돌을 회피하는 방법이다. 서로의 로봇이 센서범위내의 일정값 안으로 들어오게 되면 U_{rep} 의 값

* 책임저자(Corresponding Author)

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

위성길, 이석규: 영남대학교 전기공학과

(sgwee@naver.com/sglee@ynu.ac.kr)

김윤구: DGIST(ryankim9@dgist.ac.kr)

최정원: 영남이공대학교 전기자동화과(consys@korea.com)

* 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1B3002240).

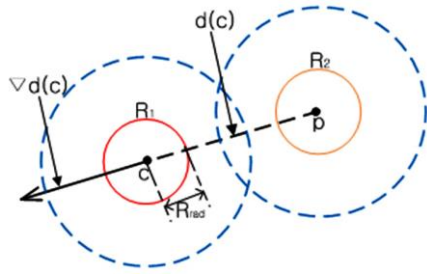


그림 1. 로봇간 회피.

Fig. 1. Repulsive force between two robots.

이 식 (4)에서처럼 증가하게 되어 반대방향으로 반발력이 생겨난다. 반대로 멀어지게 되면 U_{rep} 의 값은 0에 가까워져 반발력이 생기지 않게 된다.

그림 1은 두 로봇 사이에 작용하는 반발력을 도식화한 것이다. Repulsive 함수는 식 (2)-(4)와 같이 정의된다. $d(c)$ 는 로봇 R_1 과 R_2 의 좌표 c, p 사이의 거리를 나타내며 c 는 회피하는 로봇 R_1 의 현재 좌표이고 p 는 장애물처럼 인식되는 로봇 R_2 의 좌표이다. $\nabla d(c)$ 는 R_1 에 생기는 반발력에 의해 c 좌표로부터 발산되는 거리이다.

$$d(c) = \min_{p \in R} d(c, p) \quad (2)$$

$$\nabla d(c) = \frac{c - p}{d(c, p)} \quad (3)$$

$$U_{rep}(c) = \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{d(c) - R_{rad}} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \quad (4)$$

$$\text{if } (d(c) - R_{rad}) \leq \rho_0$$

$$U_{rep}(c) = 0 \quad \text{if } (d(c) - R_{rad}) > \rho_0$$

식 (4)에서 η 는 크기척도 값이고 R_{rad} 는 각 로봇의 반경을 나타내고 ρ_0 는 R_2 의 영향력이 끼치는 거리를 반영한 양의 상수이다. $(d(c) - R_{rad})$ 는 로봇중심좌표에서 로봇의 크기만큼의 값을 제해야지만 실제 로봇이 서로 충돌이 일어나지 않게 된다. $(d(c) - R_{rad})$ 과 ρ_0 의 상관관계에 의해 로봇간의 일정거리를 유지하게 되며 동일 경로상에서도 충돌을 방지할 수 있게 된다.

2. 경로계획 (A*)

포테셜함수를 이용한 경로계획은 앞서 언급한 것처럼 흡인력과 반발력이 작용해 목표점까지 장애물을 회피하여 도달하게 된다. 일반적으로 이 방법은 실시간 경로탐색과 알지 못하는 맵에서 많이 사용되어지지만 많은 계산량과 소요시간이 발생하고 local minimum에 빠지는 경우도 생겨난다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 A* 알고리즘을 이용하여 해결하고자 한다. A* 알고리즘의 일반적인 표현은 $f(x) = g(x) + h(x)$ 이다[15,16]. $g(x)$ 를 통해 시작점에서 목표점까지의 도달 비용을 예측하고 $h(x)$ 를 통해 목표점에서 시작점까지의 도달 비용을 예측하여 최단 경로를 생성한다. 이를 통해 $f(x)$ 즉, 시작점에서 도착지까지 경험적으로 예측된 거리 비용을 나타내게 된다. 그림 2는 장애물이 존재할 때 복수의 로봇이 경로를 탐색하는 과정을 나타내고 있다. 로봇은 원형과 사각으로 표시하였으며, 시작점이 다른 두 대의 로봇이

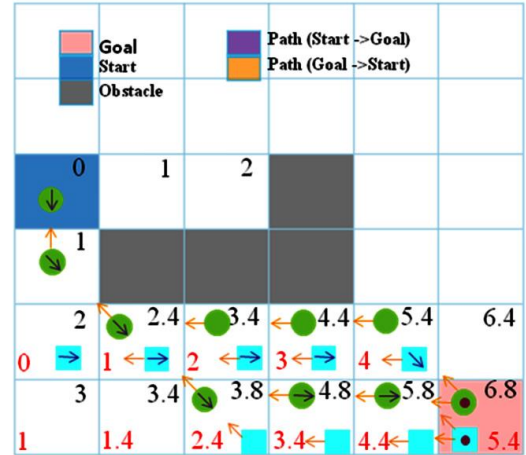


그림 2. A*경로계획.

Fig. 2. Path planning with A* algorithm.

그래프탐색알고리즘인 A*를 이용해 $g(x)$ 와 $h(x)$ 함수에 의해 최저 거리비용을 계산함으로 목표점에 도달한다. A*는 장애물회피는 물론이고 최단거리 경로를 확보하는 장점이 있지만 같은 목표로 이동 중 겹치는 경로가 발생하여 로봇간의 충돌이 일어날수도 있으며, 같은 목표점에 도달 시 충돌 회피를 막을 수가 없는 단점이 있다. 이러한 문제점을 방지하기 위해 앞서 언급한 repulsive 함수와 A*를 융합하여 최단거리를 유지하면서 로봇간의 충돌을 방지하고자 한다.

3. 경로이탈방지 (UKF)

EKF (Extended Kalman Filter)처럼 선형화시키지 않고 비선형 시스템 그대로를 해석해 평균과 공분산을 이용한 시그마 포인트를 사용하는 UKF (Unscented Kalman Filter)를 본 시스템에 적용하여 기존의 KF (Kalman Filter)에서 상태변수의 평균과 분산을 이용한 선형화 방법보다 정확한 경로 추정이 가능하다[17-19].

일반적인 비선형시스템은 식 (5)와 같이 상태벡터 x_k , 입력벡터 u_k , k 시간에서의 출력벡터 y_k , 외란 w_k , 센서 노이즈 벡터 v_k 로 표현된다.

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (5)$$

$$y_k = h(x_k) + v_k$$

UKF는 초기설정, 시그마 포인트 계산 및 time 업데이트, measurement 업데이트 순으로 식 (6)-(9) 과정을 예측과 관측을 반복 수행하면서 경로 좌표 오차를 줄이고자 한다.

• 초기화 단계

$$\begin{aligned} \bar{x}_0 &= E[x_0] \\ P_0 &= E[(x_0 - \bar{x}_0)(x_0 - \bar{x}_0)^T] \end{aligned} \quad (6)$$

• 시그마 포인트 계산 및 time 업데이트

$$\begin{aligned} X_{k-1} &= [\bar{x}_{k-1}, \bar{x}_{k-1} \pm \sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}}] \\ X_{k|k-1}^* &= f(X_{k-1}) \\ \bar{x}_{k|k-1} &= \sum_{i=0}^{2n} w_i^m X_{i,k|k-1}^* \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
P_{k|k-1} &= \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (X_{i,k|k-1}^* - \bar{x}_{k|k-1}) \cdot (X_{i,k|k-1}^* - \bar{x}_{k|k-1})^T + Q \\
X_{k|k-1} &= [\bar{x}_{k+k-1}, \bar{x}_{k|k-1} \pm \sqrt{(n+\lambda)P_{k|k-1}} \\
\gamma_{k|k-1} &= h(X_{k|k-1}) \\
\bar{y}_{k|k-1} &= \sum_{i=0}^{2m} w_i^m \gamma_{i,k|k-1}
\end{aligned}$$

여기서 time 업데이트에 따른 시그마 포인트들은 식 (8)과 같은 가중치를 가진다.

$$\begin{aligned}
w_0^m &= \frac{\lambda}{n+\lambda} \\
w_0^c &= \frac{\lambda}{n+\lambda} + (n-\alpha^2 + \beta) \\
w_i^m &= w_i^c = \frac{1}{2(n+\lambda)} \quad i=1, \dots, 2n \\
\lambda &= n(\alpha^2 - 1)
\end{aligned} \quad (8)$$

• Measurement 업데이트

$$\begin{aligned}
P_{\bar{y}_k, \bar{y}_k} &= \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\gamma_{i,k|k-1} - \bar{y}_{k|k-1}) \times (\gamma_{i,k|k-1} - \bar{y}_{k|k-1})^T + R \\
P_{\bar{x}_k, \bar{y}_k} &= \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (X_{i,k|k-1} - \bar{x}_{k|k-1}) \times (\gamma_{i,k|k-1} - \bar{y}_{k|k-1})^T \\
K_k &= P_{\bar{x}_k, \bar{y}_k} P_{\bar{y}_k, \bar{y}_k}^{-1} \\
P_k &= P_{k|k-1} - K_k P_{\bar{y}_k, \bar{y}_k} K_k^T \\
\bar{x}_k &= \bar{x}_{k|k-1} + K_k (\bar{y}_k - \bar{y}_{k|k-1})
\end{aligned} \quad (9)$$

식 (7)로부터 측정된 로봇의 위치좌표와 헤딩각에 대한 오차를 **unscented** 변환으로 근사화시켜 시그마 포인트를 계산한 후 식 (9)에 적용하여 평균과 오차 공분산을 구한다. 로봇의 현재 위치좌표와 헤딩각을 관측데이터로 사용하고 경로탐색에 의한 이상적인 로봇 경로의 위치좌표와 헤딩각을 예측경로로 이용하여 오차에 따라 다음 스텝에서의 로봇의 이동좌표를 예측하게 된다.

III. 전체시스템

1. 로봇모델링

본 시스템에 이용된 로봇은 식 (10)에 의해 설계되었으며 [20], 제어 가능한 2개의 바퀴와 하나의 보조바퀴로 구성된다. 또한 거리감지센서로 일정 반경 안에 물체나 로봇이 들어오게 되면 회피알고리즘에 의해 서로간의 충돌을 방지한다.

그림 3은 차동형 이동로봇을 바탕으로 모델링 되어진 시스템모델을 보여준다. 식 (10)에서 r_L 과 r_R 은 이동로봇의 좌우 바퀴의 반경, $\omega_{L,k+1}$ 과 $\omega_{R,k+1}$ 는 좌우 휠의 회전속도, D 는 휠 간 거리를 각각 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} (r_R \omega_{R,k+1} + r_L \omega_{L,k+1}) \cos \theta_k \\ \frac{\Delta t}{2} (r_R \omega_{R,k+1} - r_L \omega_{L,k+1}) \sin \theta_k \\ \frac{\Delta t}{D} (r_R \omega_{R,k+1} - r_L \omega_{L,k+1}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

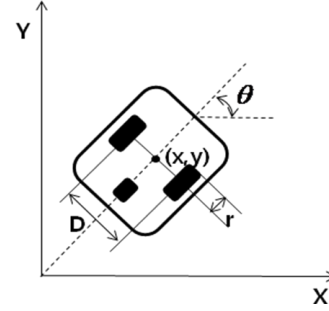


그림 3. 로봇 모델링.

Fig. 3. System model of a mobile robot.

2. 시스템 흐름도

본 시스템에서 제안된 충돌회피 경로탐색 방법과 군집대형제어 기술은 각 부분에서 어떻게 적용되고 어떤 역할을 하는지 그림 4의 전체 시스템 흐름도에서 보여주고 있다.

- 설정
 - 각 로봇의 초기위치, 목표위치
 - 맵 정보 인지
 - 기본 대형 설정
 - 로봇의 기본설정(휠 간 거리, 감지센서범위, 로봇크기, 정보범위 등)
- 랜덤 군집 대형
 - 초기 위치값에 따른 유동적 대형
 - 지형에 따른 로봇의 자율 군집 대형

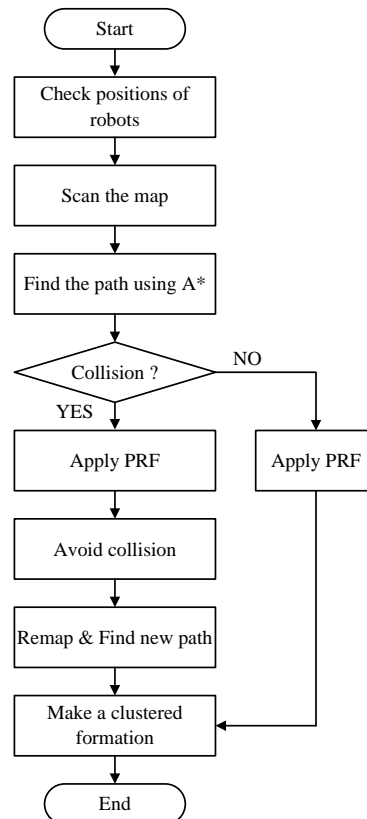


그림 4. 전체시스템 블록도.

Fig. 4. Flow chart of the whole system.

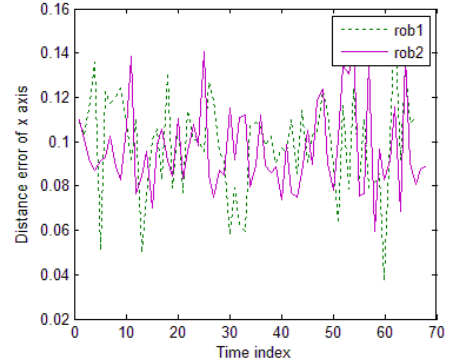
- 경로탐색
 - 각각의 로봇에 A* 적용
 - 효율적이고 지능적인 경로 탐색
- 충돌회피기술
 - 로봇간 충돌 회피를 위한 repulsive 함수
 - 고정 장애물회피를 위한 A*
- 경로 재탐색 설정
 - 충돌회피 후 맵핑과 경로 탐색을 다시 수행
- 목표점
 - 초기 대형 유지
 - 각 로봇별 자율이동을 통한 효과적인 움직임

IV. 시뮬레이션 결과

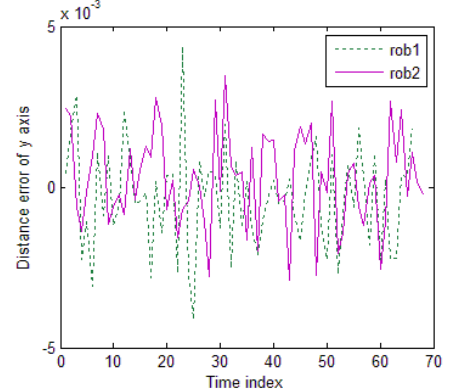
본 장에서는 제안된 알고리즘의 효율성을 MATLAB 시뮬레이션을 통해 검증한다. 시뮬레이션에서는 64×64 의 맵에서 장애물 유무에 따른 로봇의 대형제어와 경로탐색 및 충돌회피 방법을 보여준다. 앞장에서 설명한 것처럼 실제 로봇과 유사하게 모델링된 로봇과 환경을 바탕으로 테스트 하였으며, 로봇의 거리탐지기를 통해 장애물 및 로봇간의 거리를 감지함으로써 충돌을 방지하고 있다. 먼저 두 대의 로봇을 이용해 동일 목표점을 가질 때와 대형을 유지할 때를 그림 5와 그림 7에서 각각 보여주고 있다. 그림 6과 그림 8은 그림 5와 그림 7의 데이터 값으로 실제경로와 이상적인 경로의 좌표 x와 y의 값과 heading각의 오차를 나타내고 있다.

그림 5에서는 시작점이 다른 두 대의 로봇이 동일 목표로 이동할 때의 움직임을 나타내고 있다. 각각의 로봇에 제안된 알고리즘을 적용하였으며, 실선 경로는 이상적인 경로를 점선 경로는 실제 로봇의 움직임을 나타내고 있다. 표시된 일정구간에서 슬립과 heading각의 변화에 따라 경로를 이탈하지만 UKF에 의해 다시 이상적인 경로로 찾아가는 것을 확인할 수 있다.

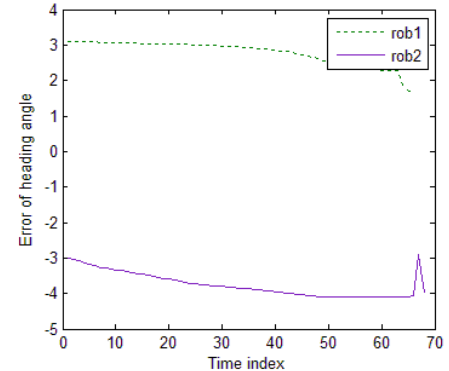
그림 6은 그림 5에 대한 결과 데이터를 나타내고 있다. (a), (b)는 시간스텝당 좌표 x값과 좌표 y값에 대한 이상적인 경로와 실제 경로간의 차이를 나타내고 있다. 또한 두 대의 로봇이 이동 중 (a), (b)에서 보여지는 것 같이 일정 값 이상으로 변동하는 구간들을 확인할 수 있다. 이는 그림 5의 우측 확대부분에서 보여지는 이탈 경로차에 의해 표시된 값이다. (c)는 heading각의 차이를 나타내는 것으로 두 대의 로봇 모두



(a)



(b)



(c)

그림 6. 하나의 목표점을 향한 운행 오차.
Fig. 6. Navigation errors of single target case.

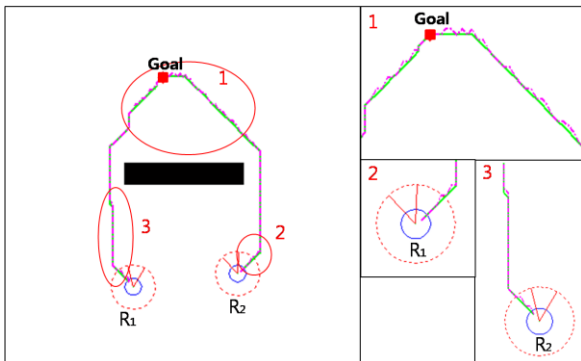


그림 5. 하나의 목표점에서의 로봇대형.
Fig. 5. Formation of robots (one target).

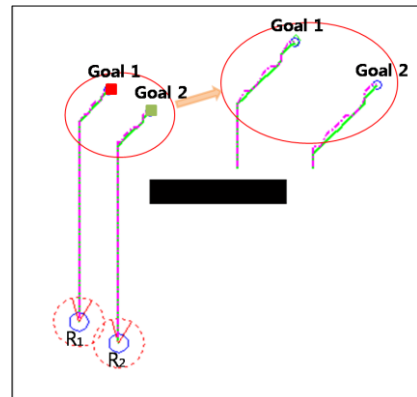


그림 7. 다중 목표에서의 로봇대형 유지.
Fig. 7. Formation of robots (multiple targets).

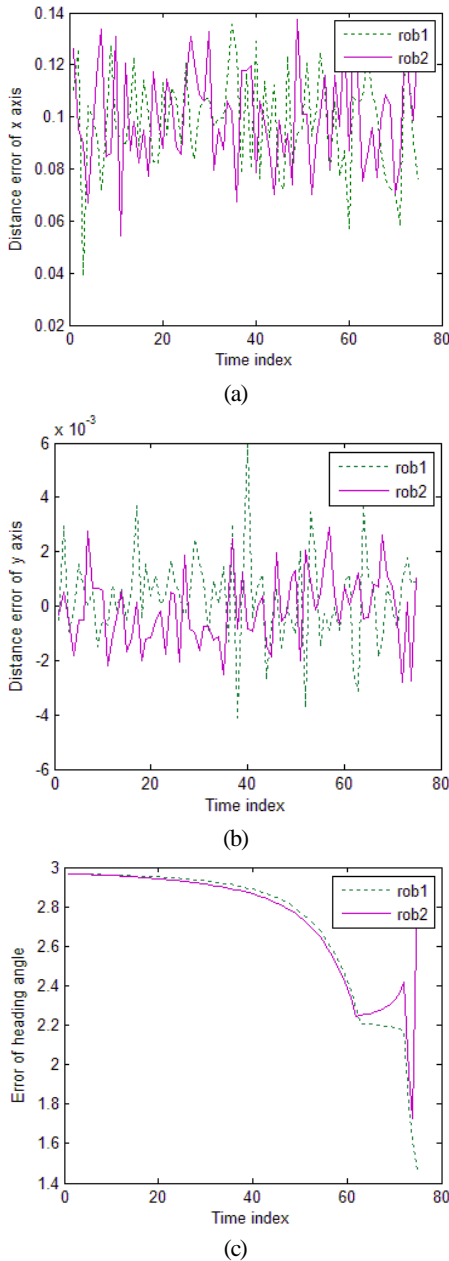


그림 8. 다중 목표점을 향한 운행 오차.
 Fig. 8. Navigation error of robots with different goals.

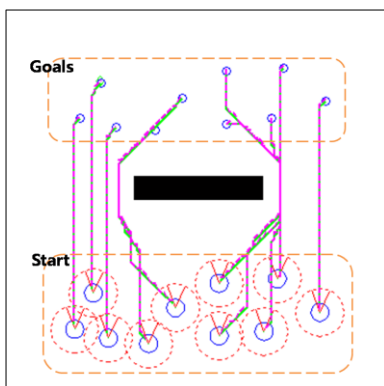


그림 9. 군집로봇 제어.
 Fig. 9. Swarm robots control.

일정한 각을 유지하고 있으며, 60~65 구간에서 목표점으로 가기 위한 움직임을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

그림 7은 시작점이 다른 두 대의 로봇이 목표점에서 초기의 대형을 유지하는 움직임을 보여주고 있다. 본 실험에서도 각 로봇에 제안된 알고리즘을 이용하여 장애물 회피와 더불어 군집제어를 보여주고 있다. 다만 그림 5의 실험에서와 같이 로봇간의 충돌 회피 기술은 적용되지 않았다. 실실험경로는 이상적인 경로를 점선 경로는 실제 로봇의 움직임을 나타내고 있으며 목표점에 도달해서도 초기의 대형을 유지함을 확인할 수 있다.

그림 8은 그림 7의 결과 데이터를 나타내고 있다. (a), (b)는 두 대의 로봇이 목표점으로 이동시 이상적인 경로와 실제 경로간의 좌표 x, y 오차를 각각 표현한 것이다. (c)는 이동에 따른 헤딩각의 변화가 로봇 별로 보여진다. R_1 과 R_2 모두 그림 8에서 보여지는 것처럼 오차의 값이 작아 이상 경로에서 크게 벗어나지 않고 안전적인 주행을 하고 있는 것을 확인할 수 있다. 다만 (c)에서 보여지는 것처럼 두 대의 로봇이 일정 경로를 유사하게 이동함에 따라 헤딩각의 변화가 비슷하게 나타나며 목표점 근처에서 급격한 헤딩 변화를 보여주고 있다.

다음은 10대의 로봇을 이용하여 그림 7의 실험방법과 동일하게 실험한 결과를 보여준다. 그림 9와 그림 10은 10대의 로봇을 이용한 대형유지 기술과 최단경로 기법을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 각 로봇에 최단 경로 탐색과 장애물 회피를 위한 A* 알고리즘을 적용한 것이다. 그림 9에서 확인할 수 있듯이 군집해 있던 로봇이 이동 경로상에 장애물을 탐지시 해당되는 로봇에 한해 경로를 우회하는 것을 확인할 수 있다.

그림 9의 실험에서 일부 로봇들이 특정지점에서 같은 타이밍에 같은 경로를 지나가면서 로봇간 충돌 현상이 발생하게 된다. 이러한 충돌 방지를 위해 포텐셜 Repulsive 함수 (PRF)를 이용해 충돌회피 경로를 생성하여 나가는 시뮬레이션 결과를 그림 11에서 보여주고 있다.

그림 10(a), (b), (c)는 10대의 개별로봇이 가지는 이상적인 경로와 실제 경로간의 거리오차와 헤딩각 오차를 나타내고 있다. x, y 좌표는 이전 실험에서 확인한 것과 같이 미세한 차이를 보이고 있으며, 헤딩각의 경우 장애물을 만났을시 로봇 4, 5, 6, 7 이 회피에 따른 변화 폭의 커짐을 확인할 수 있다.

두 대의 로봇을 이용해 경로를 찾는 과정에서 발생하는 로봇간의 충돌문제 해결을 위해 PRF를 적용한 결과는 그림 11과 같다.

그림 11(a)의 오른쪽 확대된 부분에서 확인할 수 있듯이 두 대의 로봇이 서로의 감지 범위 안에 들어 왔을시 하나의 로봇이 자동적으로 충돌부분에서 새로운 경로인 +표시 경로를 생성하여 목표점으로 진행하게 된다. 장애물 판단은 A*로 하고 로봇간 충돌은 PRF를 적용하기 때문에 충돌회피가 가능하다. 또한 그림 11(b)에서 보여주듯이 다수 로봇의 충돌회피와 경로탐색과정을 나타내고 있다. 경로가 겹쳐진 부분에서 회피는 했지만 충돌한 것처럼 보이는 것은 각 로봇은 일정한 속도로 움직이고 충돌을 감지한 로봇은 4스텝 후진 후 생성된 경로를 추종해 가기 때문에 충돌을 회피하여 경로진행하고 있다.

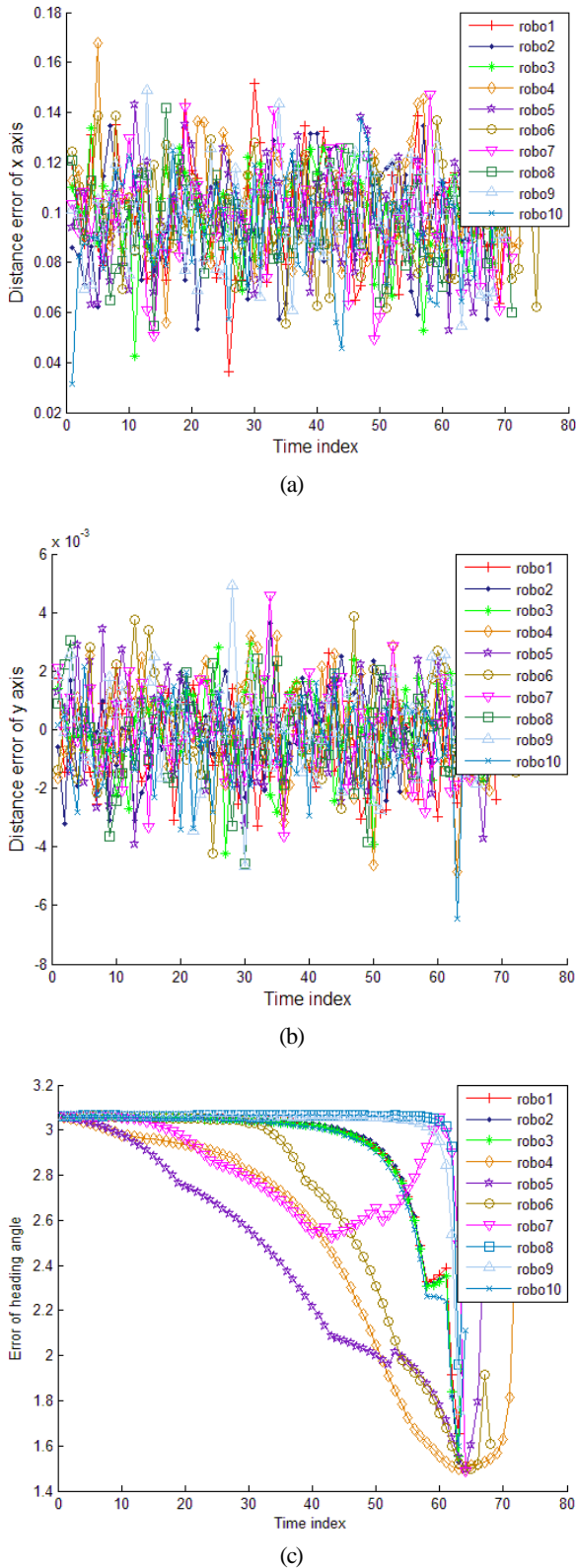


그림 10. (a) x축 거리오차 (b) y축 거리오차 (c) 헤딩각 오차.
 Fig. 10. (a) Distance error of x axis (b) Distance error of y axis (c) Heading error.

결론적으로 시뮬레이션을 통해 제안한 충돌회피와 경로계획 그리고 이탈방지 알고리즘의 융합기술을 군집로봇에 적용하여 본 시스템의 효율성을 보여주고 있다.

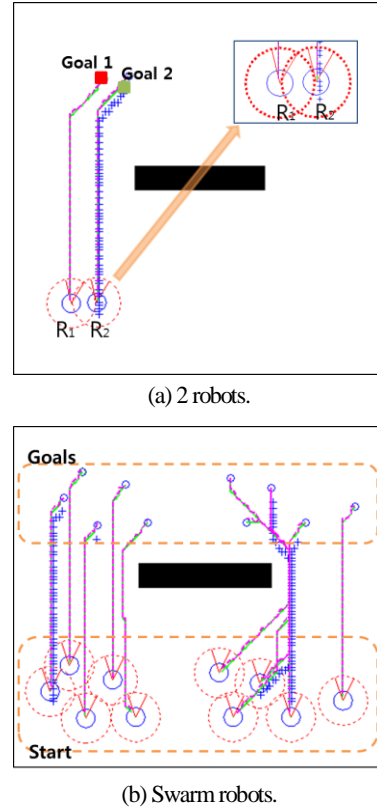


그림 11. PRF를 적용한 실험 결과.
 Fig. 11. Simulation result using PRF.

V. 결론

본 논문에서는 자율적 사고 판단이 가능한 개별 로봇들로 구성된 군집 로봇이 복합 알고리즘을 이용하여 경로탐색, 로봇간의 충돌회피, 이탈방지, 대형제어를 할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이를 위하여 포텐셜 필드법의 repulsive 함수, A* 알고리즘 및 UKF를 복합적으로 사용하였다. 제안된 시스템에서는 로봇 스스로가 리더가 되어 돌발상황에 대해 판단함과 동시에 군집대형 유지를 통한 공동 작업을 가능하게 한다. 제안된 방법은 다양한 경우의 시뮬레이션을 통해 효율성을 검증하였다. 로봇간 충돌 회피기술에서 회피 후 새로운 경로를 탐색으로 인한 느린 데이터 처리속도가 문제점으로 나타나고 있지만 경로 재탐색 부분을 적용하지 않는다면 실시간 처리가 가능하게 된다.

향후 본 연구 결과를 바탕으로 충돌회피 후 최단경로를 위한 경로 재탐색시의 처리속도 개선 알고리즘 및 실시간 제어 및 군집지능 알고리즘을 연구할 것이다.

참고문헌

[1] M. K. Kim, K. E. Ko, and K. B. Sim, "Behavior learning and evolution of swarm robot based on harmony search algorithm," *KIIS (in Korean), 2010 KIIS Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 441-446, 2010.
 [2] S. H. Ji, "Collective intelligence robot technology," *The Korean Institute of Electrical Engineers (in Korean)*, vol. 59, no. 11, pp. 27-31, Nov. 2010.
 [3] B. S. Jeon, D. Y. Lee, I. H. Choi, Y. H. Mo, J. M. Park, and M. T. Lim, "Obstacle avoidance method for multi-agent robots using

- IR sensor and image information,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 12, pp. 1122-1131, Dec. 2012.
- [4] K. M. Jung, S. W. Seo, and K. B. Sim, “Mutual localization of swarm robot using particle filter,” *KIIS (in Korean), KIIS Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 298-303, Apr. 2010.
- [5] S. P. Hou, C. C. Cheah, and J. J. E. Slotine, “Dynamic region following formation control for a swarm of robots,” *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe International Conference Center*, pp. 1929-1934, May 2009.
- [6] L. Barnes, W. Alvis, M. A. Fields, K. Valavanis, and W. Moreno, “Swarm formation control with potential fields formed by bivariate normal functions,” *Control and Automation, MED '06. 14th Mediterranean Conference on*, pp. 1-7, Jun. 2006.
- [7] D. J. Kim and J. S. Choi, “Multi-robot team outdoor localization using active marker and high frequency signal sources,” *Proc. of 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 26-29, Oct. 2011.
- [8] D. E. Koditschek and E. Rimon, “Robot navigation functions on manifolds with boundary,” *Advances in Applied Mathematics*, vol. 11, no. 4, pp. 412-442, Dec. 1990.
- [9] Y. Chang and Y. Yamamoto, “Path planning of wheeled mobile robot with simultaneous free space locating capability,” *Intelligent Service Robotics*, vol. 2, pp. 9-22, Jan. 2009.
- [10] S. Carpin and L. E. Parker, “Cooperative leader following in a distributed multi-robot system,” *Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2994-3001, May 2002.
- [11] S. H. Kim, G. T. Lee, I. P. Hong, and Y. J. Kim, “New potential functions for multi robot path planning: SWARM or SPREAD,” *Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 The 2nd International Conference on (in Korean)*, vol. 2, pp. 557-561, Feb. 2010.
- [12] Q. Tang, U. Shen, C. Hu, and J. Zeng, “Multi-swarm cooperation optimization for multi-modal functions in repulsive potential field,” *Advanced Computational Intelligence (IWACI), 2011 Fourth International Workshop on*, pp. 70-74, Oct. 2011.
- [13] L. Yin and Y. Yin, “An improved potential field method for mobile robot path planning in dynamic environments,” *Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 4847-4852, Jun. 2008.
- [14] B. R. Lee, “Development of potential-function based motion control algorithm for collision avoidance between multiple mobile robots,” *KSPE (in Korean)*, vol. 15, no. 6, pp. 107-115, Jun. 1998.
- [15] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, “A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths,” *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics*, vol. ssc-4, no. 2, Jul. 1968.
- [16] R. Inam, D. Cederman, and P. Tsigas, “A* algorithm for graphics processors,” *Third Swedish Workshop on Multi-core Computing-mcc'10*, Nov. 2010.
- [17] Q. Song and J. D. Han, “An adaptive UKF algorithm for the state and parameter estimations of a mobile robot,” *Acta Automatica Sinica*, vol. 34, no. 1, pp. 72-79, Jan. 2008.
- [18] W. Y. Kang, K. J. Kim, and C. G. Park, “Performance analysis of in-flight alignment Using UKF,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 12, no. 11, pp. 1124-

1129, Nov. 2006.

- [19] J. H. Lee, K. H. Jung, J. M. Kim, and S. S. Kim, “Sensor fusion of localization using unscented Kalman filter,” *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems (in Korean)*, vol. 21, no. 5, pp. 667-672, Oct. 2011.
- [20] C. Suliman, C. Cruceru, and F. Moldoveanu, “Mobile robot position estimation using the Kalman filter,” *Inter-eng 2009*, vol. 6, pp. 75-78, 2009.



위 성 길

2006년 영남대학교 전기공학과(공학사). 2008년 동 대학원(공학석사). 2008년~2011년 경북차량용 임베디드 기술연구원 연구원. 2011년~현재 동 대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 자율이동로봇, WSN, 군집로봇.



김 윤 구

2005년 영남대학교 컴퓨터공학과(공학석사). 2008년 동 대학원 (공학박사). 2008년~현재 대구경북과학기술원 선임연구원. 관심분야는 지능로봇, 자율이동로봇, 지능형 무인자동차, 자동제어.



최 정 원

1995년 영남대학교 전기공학과 졸업. 2002년 영남대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 2003년~2006년 (주)STX, 2009년~현재 영남이공대학교 전기자동차학과 교수. 관심분야는 이동로봇, 시스템제어.



이 석 규

1979년 서울대학교 전기공학과(공학사). 1981년 동 대학원 석사. 1990년 UCLA (공학박사). 1982년~현재 영남대학교 전기공학과 교수. 관심분야는 Control Theory, Robotics.