

인공 포텐셜 장을 이용한 군집 로봇의 대형 제어

Formation Control for Swarm Robots Using Artificial Potential Field

김한솔* · 주영훈** · 박진배**†

Han Sol Kim, Young Hoon Joo, and Jin Bae Park†

*연세대학교 전기전자공학과

**군산대학교 제어로봇공학과

요 약

본 논문에서는 선도 로봇을 추종하는 군집 로봇의 대형 제어를 인공 포텐셜 장을 사용하여 제안한다. 또한, 인공 포텐셜 장은 물리적으로 해석하기 쉬운 전기장을 모델링하여 구성하고, 장애물을 더욱 효과적으로 모델링하기 위해서, 장애물의 모양에 따라 전기장의 식을 달리한다. 제안하는 방법은 선도 로봇의 경로를 인공 포텐셜 장을 통해 계획한 뒤, 선도 로봇을 추종 로봇이 뒤따라가는 형태로 구성된다. 마지막으로 시뮬레이션 예제를 통해 제안하는 기법의 타당성을 검증한다.

키워드 : 군집 로봇, 대형 제어, 인공 포텐셜 장, 경로 계획.

Abstract

In this paper, artificial potential field(APF) is applied to formation control for the leader-following swarm robot. Furthermore, APF is constructed by applying the electrical field model. Moreover, to model the obstacle effectively, each obstacle has different form due to the electrical field equation. The proposed method is formed as two sub-objective: path planning for the leader-robot and following-robots following the leader-robot. Finally, simulation example is given to prove the validity of proposed method.

Key Words : Swarm robots, leader and following robot, formation control, artificial potential field, path planning.

1. 서 론

군집 로봇 시스템은 단일 로봇 시스템에 비해 보다 적은 비용으로 작업을 효과적으로 처리할 수 있기 때문에 최근에 많은 연구가 이뤄지고 있는 분야이다. 특히 인명 구조나 지형 탐색 등 다수의 로봇이 동시에 작업할 경우 효과가 극대화 되는 분야에서 군집 로봇 시스템의 활용이 필수적이다 [1].

이러한 군집 로봇 시스템의 연구 분야는 크게 군집 행동 기술, 군집 네트워킹 기술, 군집 상황 인지 기술, 그리고 군집 시스템 통합 기술의 네 가지로 분류할 수 있다. 이 중에서 군집 행동 기술은 군집을 이루고 있는 로봇들이 대형을 이루고 목표지점을 향해 이동하도록 제어하는 기술이다. 이런 군집 로봇의 대형 제어(formation control) 기술은 크게 행동 기반(behavior-based) 접근법[1], 선도 로봇-추종 로

봇(leader robot-follower robot) 접근법[2], 가상 구조(virtual structure) 접근법[3]으로 나눌 수 있다.

행동 기반 접근법은 다수의 임무가 주어졌을 때 제어 전략을 구상하는 것은 쉽지만, 전체 군집 시스템의 안정성을 수학적으로 증명하기 어렵다는 단점이 있다. 또한 가상 구조 접근법은 Lyapunov 안정도 이론으로 전체 군집 시스템의 안정도를 증명할 수 있다는 장점이 있지만, 실시간 제어를 위해서는 넓은 통신 대역폭이 필요하다는 단점이 있다. 마지막으로 선도 로봇-추종 로봇 접근법은 선도 로봇의 속도나 이동 방향에 대한 제약을 갖지만 비교적 쉽게 구현 가능하다는 장점이 있어 널리 연구되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 선도 로봇-추종 로봇에 기반하여 군집 이동 로봇의 대형 제어 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 선도 로봇의 경로를 계획한 후에 추종 로봇들은 선도 로봇이 만드는 추종 좌표를 따라가는 식으로 구성된다. 선도 로봇의 경로 계획과 추종 로봇의 선도 로봇 추종을 위해서 본 논문에서는 인공 포텐셜 장(artificial potential field) 기법을 사용한다[4-6]. 인공 포텐셜 장 기법은 실세계의 포텐셜 장에 대한 물리 법칙을 가상으로 모델링 하여 이동 로봇의 경로를 계획하는 기법이다. 기존의 인공 포텐셜 장 기법을 이용한 군집 시스템의 대형 제어 관련 연구는 실제 포텐셜 장을 모델링 하지 않고 임의로 인력과 척력을 설계하였다[7-11]]. 이와 같은 방법은 장애물의 물리적인 구조에 대한 영향을 정확히 반영할 수 없다는 단점이 있다.

접수일자: 2012년 5월 03일

심사(수정)일자: 2012년 5월 20일

게재확정일자 : 2012년 7월 31일

† 교신 저자

이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012014088).

본 논문은 2012년도 지능시스템학회 춘계학술대회 우수논문으로 선정되어 본 논문지에 게재됨.

따라서, 본 논문에서는 선도 로봇을 추종하는 군집 로봇의 대형 제어를 인공 포텐셜 장을 사용하여 제안한다. 또한, 인공 포텐셜 장은 물리적으로 해석하기 쉬운 전기장을 모델링하여 구성하고, 장애물을 더욱 효과적으로 모델링하기 위해서, 장애물의 모양에 따라 전기장의 식을 달리하는 방법을 제안한다. 그리고, 목표 지점은 점전하로 모델링한다. 마지막으로 추종 로봇이 선도 로봇을 따라가기 위해 선도 로봇은 진행 방향과 정반대 위치의 사용자가 사전에 설계한 거리만큼 떨어진 위치에 양의 점전하를 가상으로 만들어 추종 로봇은 그 지점을 추종해 선도 로봇과 충돌하지 않고 대형을 이뤄 목표 지점을 향하게 된다. 마지막으로 시뮬레이션 예제를 통해 제안하는 기법의 타당성을 검증한다.

2. 인공 포텐셜 장을 이용한 선도 로봇의 경로 계획

본 논문에서는 인공 포텐셜 장을 전기장을 이용하여 모델링한다. 목표점은 양으로 대전된 점전하로 모델링하며, 장애물과 선도 로봇은 음전하로 대전되어 있다고 가정하여 선도 로봇이 장애물과 충돌하지 않고 목표 지점을 향해 경로를 계획할 수 있도록 한다. 만약, 목표점의 전하량이 장애물의 전하량보다 크다면, 음으로 대전된 선도 로봇은 전기장 내에서 척력을 받아 목표점으로 끌려가게 되고, 장애물과 가까운 지점에서는 척력을 받아 충돌하지 않게 된다. 따라서, 목표점으로 끌려가는 경로는 자연스럽게 장애물과 충돌을 방지하는 경로대로 설정되며, 만약 장애물의 위치를 실시간으로 측정할 수 있는 센서가 있다면, 실시간으로 선도 로봇의 경로를 계획할 수 있다.

또한, 본 논문에서는 장애물에 의해 발생하는 척력을 장애물의 형상에 따라 달리하여, 장애물을 보다 효과적으로 회피할 수 있는 경로를 설정하도록 한다. 이를 위해 본 논문에서는 점전하와 선전하에 의해 형성되는 전기장의 식을 사용한다. 마지막으로 각 장애물의 크기나 위험도에 따라 전하의 양을 달리 하여 선도 로봇이 장애물을 피해 돌아가는 정도를 장애물마다 달리할 수 있다.

먼저 점전하에 의해 형성되는 전기장은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\vec{E}_D = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_{obs}}{\|r_{ol}\|^2} \vec{r}_{ol} \quad (1)$$

여기서, \vec{E}_D 는 점전하에 의해 형성되는 2차원의 전기장 벡터이며, $\epsilon = 8.85418... \times 10^{-12} F/m$ 은 진공에서의 유전율이지만, 선도 로봇의 경로 계획에서는 임의로 적절한 상수 파라미터로 활용하며, Q_{obs} 는 점전하의 전하량 (C), r_{ol} 은 임의의 2차원 한 지점에서 점전하까지의 벡터이며, $\| \cdot \|$ 은 유클리디안 거리이다.

마찬가지 방법으로 선전하에 대해서는 다음과 같은 방법으로 표현 가능하다.

$$\vec{E}_L = \frac{1}{2\pi\epsilon} \frac{\lambda_{obs}}{\|r_{ol}\|} \vec{r}_{ol} \quad (2)$$

여기서, \vec{E}_L 은 선전하에 의해 형성되는 2차원의 전기장

벡터이며, λ_{obs} 는 선전하의 전하량 (C)이다.

이 때, N개의 전하에 의해 형성되는 전기장은 다음과 같이 벡터의 합으로 구할 수 있다.

$$\vec{E}_{tot} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i \quad (3)$$

이상의 상황을 종합하여, 인공 포텐셜 장 내에서 선도 로봇이 받는 가상의 힘은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{F}_l = Q_l \vec{E}_{tot} \quad (4)$$

여기서, Q_l 은 선도 로봇에게 주어진 가상의 전하량으로 음의 값으로 설정한다.

하지만 이런 방법으로 군집 이동 로봇의 경로를 계획할 경우, 실제로는 장애물이 이동 로봇에게 아무런 영향을 미칠 수 없지만, 전기장을 형성하여 로봇의 경로 계획에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이런 문제점을 해결하기 위하여, 장애물의 영향이 미치지 않는 미리 설정된 거리 d 와 비교하여 다음과 같이 전기장 식을 수정한다.

$$\vec{E}' = \begin{cases} \vec{E}, & \|r_{ol}\| \leq d \\ 0, & \|r_{ol}\| > d \end{cases} \quad (5)$$

또한, 선도 로봇이 일정한 속력으로 움직이게 하기 위해서, 힘 벡터 \vec{F}_l 을 단위 벡터화 시켜, 인공 포텐셜 장 내에서 받는 힘은 선도 로봇의 방향의 변화에만 영향을 미치도록 한다.

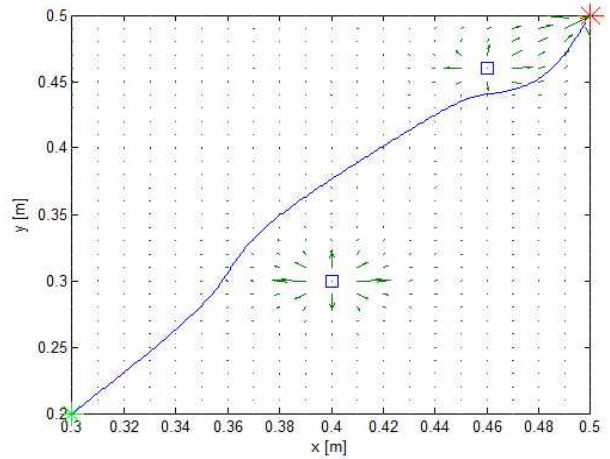


그림 1. 장애물과 목표지점의 전기장 모델링과 경로 계획

Fig. 1. Electrical modeling result of obstacles and target point and path planning

마지막으로 제안하는 기법을 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다. 그림에서 시작 지점은 (0.3m, 0.2m)이며, 목표지점은 (0.5m, 0.5m)이고, 청색선은 계획된 경로를, 녹색선은 전기장 벡터를 나타낸 것이다. 그림에서 경로 계획이 두 개의 점전하로 이루어진 장애물을 지나 목표지점으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

3. 대형 제어

본 논문에서 제안하는 기법을 명료하게 보이기 위하여, 직선 형태의 대형으로 추종 로봇이 선도 로봇을 따라 대형을 유지하도록 한다. 추종 로봇은 선도 로봇이 지나간 궤적을 따라 가기 때문에, 추종 로봇들 개개는 장애물과 충돌을 회피하기 위한 별도의 센서가 필요하지 않고, 단순히 선도 로봇이 만들어내는 점전하에 끌려가는 방식으로 포메이션 제어가 이루어진다.

선도 로봇은 자신의 진행 방향과 정 반대 방향으로 미리 설정된 거리만큼 떨어진 곳에 가상의 양전하를 만들어 추종 로봇1은 해당 양전하에 끌려가며, 추종 로봇1은 마찬가지로 방법으로 가상의 양전하를 만들어 추종 로봇 2가 끌려가게 된다. 다시 말해, 추종 로봇들은 선도 로봇이 지나간 궤적으로 지나가게 되므로, 별도의 장애물 회피 동작이 필요하지 않다.

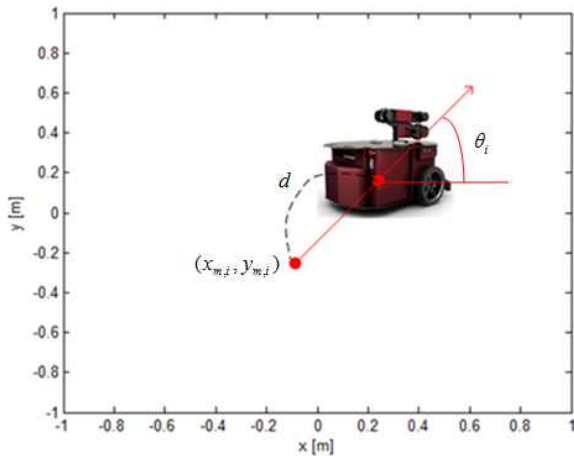


그림 2. 로봇 좌표계
Fig. 2. Robot coordinate

제안하는 기법을 그림으로 표현하면 그림 2와 같다. i 번 째 추종 로봇이 $i+1$ 번 째 추종 로봇을 위해 만드는 양전하의 좌표는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{m,i} &: x_i - d \times \cos(\theta_i) \\ y_{m,i} &: y_i - d \times \sin(\theta_i) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $x_{m,i}$, $y_{m,i}$ 는 각각 가상의 양전하의 x 와 y 좌표이며, d 는 미리 설정된 추종 로봇간의 거리, θ_i 는 i 번 째 로봇의 진행 방향이다.

$i+1$ 번 째 추종 로봇에서 바라본 전기장은 오직 자기 자신의 음전하와 i 번 째 추종 로봇이 만들어 낸 양전하만이 있다. 식 (6)의 위치에 새롭게 생성된 양전하에 이끌리기 위하여, 이 양전하에 의해 형성되는 전기장을 다음과 같은 식으로 만든다.

$$\vec{E}_{i+1} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_i}{\|\vec{r}_{i+1}\|^2} \vec{r}_{i+1} \quad (7)$$

여기서, \vec{r}_{i+1} 는 $i+1$ 번 째 추종 로봇에서 i 번 째 추종 로봇으로의 벡터이고, Q_i 는 i 번 째 추종 로봇의 가상 전하량으로 이 값을 조절하여 군집 로봇이 대형을 이룰 때 대형 성립 시간을 조절할 수 있다.

하지만 식 (7)과 같은 형태로 대형 제어를 수행할 경우, 군집 로봇의 대형 간격을 조절할 수 없게 된다. 다음과 같은 식을 활용하여 간단하게 대형의 간격을 유지할 수 있다.

$$\vec{F}_{i+1} = \begin{cases} Q_{i+1} \vec{E}_{i+1}, & \|\vec{r}_{i+1}\| > D \\ 0, & \|\vec{r}_{i+1}\| \leq D \end{cases} \quad (8)$$

여기서, D 는 미리 정의된 군집 로봇의 대형 간격이다. 즉, 후속 추종 로봇이 일정 거리 안에 진입할 경우, 받는 가상의 힘을 0으로 하여 더 이상 근접하지 않도록 하는 방식을 취한다.

또한, 추종 로봇은 별도의 장애물 회피 동작을 수행하지 않고, 선도 로봇의 경로를 뒤쫓아 가는 형태로 대형제어가 이루어지므로, 만약 추종 로봇이 선도 로봇을 추종하는 데 있어서 일정 크기 이상의 오차가 발생할 경우, 장애물과의 충돌을 방지할 수 없다는 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 다음과 같은 알고리즘을 활용하여 이러한 문제를 해결한다.

$$\vec{E}_{i+1} = \begin{cases} \vec{E}_{i+1}, & \|\vec{r}_i - \vec{r}_{i+1}\| \leq R \\ \vec{r}_i - \vec{r}_{i+1}, & \|\vec{r}_i - \vec{r}_{i+1}\| > R \end{cases} \quad (9)$$

여기서, R 는 미리 정의된 한계 거리이다. 식 (9)가 의미하는 바는, 주행 경로에 수직인 방향으로 추종 로봇 i 와 $i+1$ 이 떨어진 거리가 일정 값 이상일 경우, 주행 경로를 수직인 방향으로 틀어서 $i+1$ 번 째 추종 로봇이 정상 궤도상으로 돌아올 수 있도록 하는 것이다.

선도 로봇에서의 경로 계획과는 달리, 추종 로봇의 경우 선도 로봇과 떨어진 거리가 일정 범위 안에 들어야 하므로, 추종 로봇의 속도를 조절할 필요가 있다. 따라서 힘 벡터 \vec{F}_i 를 단위 벡터로 만들지 않고, \vec{F}_i 의 크기를 일정한 값의 범위 안으로 제한을 걸어 준다.

4.시뮬레이션 예제

이 장에서는 제안하는 결과의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 예제를 제공한다. 시뮬레이션 예제는 두 부분으로 이루어진다. 첫 번째는 선도 로봇의 경로 계획에 관한 것이고, 나머지 부분은 선도 로봇이 경로를 따라 갈 때, 추종 로봇들이 선도 로봇을 추종하여 편대를 이뤄 목표지점에 도착하는 것을 보인다.

그림 3은 선도 로봇의 경로 계획에 대한 결과를 나타낸다. 초기에 선도 로봇은 (0.2m, 0.3m)에 위치하고 있고, 목표 지점은 (0.5m, 0.5m)이다. 그림에서 사각형은 장애물이다. 여기서 장애물은 점전하로 모델링 되었으며, 장애물의 크기에 따라서 전하량의 크기를 결정했다. 그림에서 큰 장애물은 $-0.08C$, 작은 장애물은 $-0.005C$ 으로 가정한다.

장애물의 전하량을 크게 모델링 할수록, 선도 로봇이 보다 안전하게 장애물을 회피하며 목표 지점에 도달할 수 있

지만, 장애물 사이의 간격이 좁으면 실제로는 통과할 수 있는 넓이에도 돌아가는 문제점이 생기므로, 적절한 양으로 설정하는 것이 중요하다.

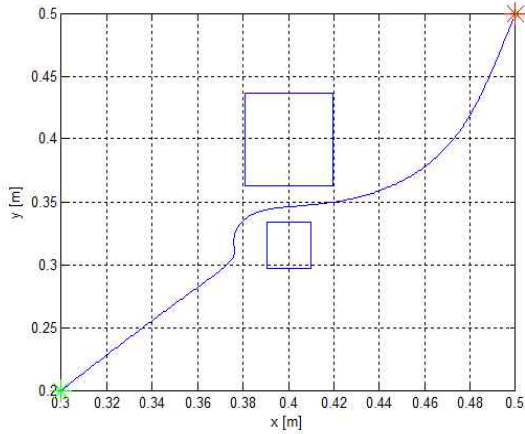


그림 3. 선도 로봇의 경로 계획 결과
(녹색 *은 출발점, 적색 *는 도착점)

Fig. 3. The result of leader robot's path planning
(Green *: start point, red *: finish point)

선도 로봇의 경로가 결정되면, 선도 로봇은 목표지점을 향해 출발하며, 선도 로봇은 추종 로봇을 위해 가상의 양전하를 생성하고, 이 정보를 추종 로봇에게 전송한다. 추종 로봇은 이 정보를 가지고 선도 로봇을 추종하게 된다. 시뮬레이션의 간결함을 위해 추종 로봇은 한 대로 가정했지만, 같은 이론을 적용해 N 대의 추종 로봇의 편대 주행도 가능하다.

추종 로봇의 초기 위치는 $(0.28m, 0.22m)$ 이다. 여기서 원형은 선도 로봇이고 삼각형은 추종 로봇이다. 초기 구동에서 추종 로봇이 선도 로봇을 따라 대형을 이루는 모습을 그림 4 (a)에 나타냈다. 그림 4 (b)는 추종 로봇과 선도 로봇이 장애물을 회피하며 목표지점을 향해 주행하는 것을 나타낸다.

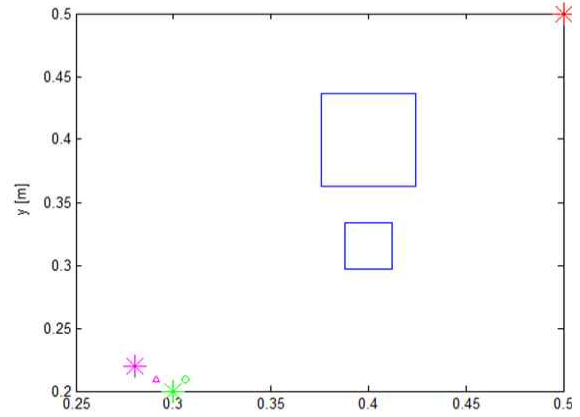
마지막으로 그림 5는 선도 로봇과 추종 로봇의 주행 궤적을 나타낸다. 그림 5를 통해 제안하는 기법이 성공적으로 선도 로봇의 경로를 계획하고, 추종 로봇이 편대를 이뤄 주행하는 것을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구

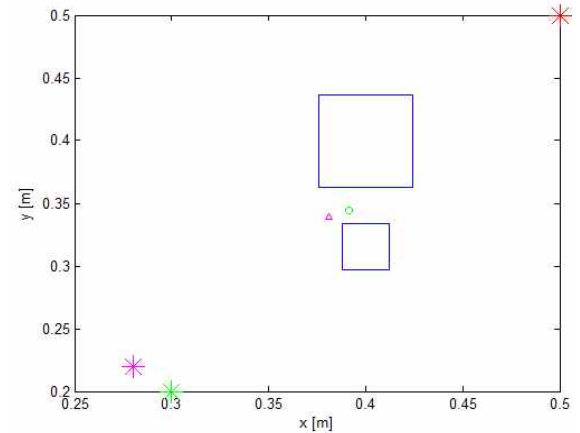
본 논문에서는 전기장 모델에 기반한 인공 포텐셜 장을 이용하여 군집 로봇의 대형 제어 방법을 제안했다. 제안하는 방법에서 군집 로봇의 대형 제어는 선도 로봇-추종 로봇 방법을 이용하였다. 또한 제안하는 이론에서 장애물의 모양에 따라 전기장의 식을 달리 하여 보다 효과적으로 경로를 계획할 수 있었다. 마지막으로 제안하는 기법의 타당성을 시뮬레이션 예제를 이용해 증명했다.

본 연구는 두 가지의 제약을 가지고 있다. 첫 째는 장애물의 모양을 점 모양과 선 모양의 두 가지 형태로 제한했다는 점이다. 이를 극복하기 위해서, 추후 연구에서는 실제 모양을 측정하여 전기장을 실시간으로 계산해 내어 보다 효과

적인 경로 계획이 가능하도록 한다. 두 번째 제약은 군집 로봇의 대형을 직선 형태로 가정한 것이다. 향후에는 다른 대형을 이루는 군집 시스템에 대한 연구를 하여, 제안하는 이론의 타당성을 더욱 확고히 할 예정이다.



(a) 대형을 만드는 모습



(b)대형을 이뤄 장애물을 피해 가는 모습

그림 4. 대형 제어 결과

Fig. 4. The result of formation control

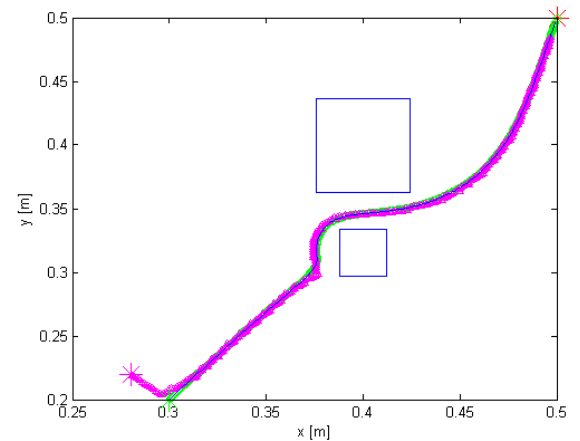


그림 5. 대형 제어 결과

Fig. 5. The result of formation control

참 고 문 헌

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

[2] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, B. Southall, J. Splezer, and C. J. Taylor, "Real-time vision-based control of a nonholonomic mobile robot," *ICRA 2011*, vol. 2, pp. 1714-1719, 2001.

[3] T. H. Kar and M. A. Lewis, "Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control," *IROS 96*, vol. 1, pp. 132-139, 1996.

[4] M. C. Lee and M. G. Park, "Artificial potential field based path planning for mobile robots using a virtual obstacle concept," *AIM 2003*, vol. 2, pp. 735-740, 2003.

[5] R. Daily and D. M. Bevly, "Harmonic potential field path planning for high speed vehicles," *American Control Conference*, pp. 4609-4614, 2008.

[6] J. Ren and K. A. McIsaac, "A hybrid-systems approach to potential field navigation for a multi-robot team," *Proc. of the IEEE Int. conf. Robot. Autom.*, pp. 3875-3880, 2003.

[7] M. H. Tark and Y. H. Joo, "Behavior control algorithm for space search based on swarm robots," *Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 60, no. 11, pp. 2152-2156, 2011, 11.

[8] 방문섭, 주영훈, "무계중심 보로노이 테셀레이션을 이용한 군집로봇의 협조탐색," *대한전기학회논문지*, vol. 61, no. 1, pp. 130-134, 2012, 1.

[9] 탁명환, 주영훈, "무선 센서 네트워크 기반 군집 로봇의 협조 행동을 위한 위치 측정," *제어로봇시스템학회논문지*, vol. 18, no. 8, pp. 725-730, 2012, 8.

[10] 탁명환, 주영훈, "군집 로봇 기반 공간 탐색을 위한 행동 제어 알고리즘," *대한전기학회논문지*, vol. 60, no. 11, pp. 2152-2156, 2011, 11.

[11] 라병호, 주영훈, "군집 로봇의 포메이션 이동 제어," *대한전기학회논문지*, vol. 60, no. 11, pp. 2147-2151, 2011, 11.

저 자 소 개



김한솔(Han Sol Kim)

2011년 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부 졸업 (공학사)
 2012년 : 연세대학교 전기전자공학과 졸업 (공학석사)
 2012년~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

관심분야 : 지능제어, 지능형 로봇, 군집 로봇 제어
 Phone : 02-2123-2773
 E-mail : solsol@yonsei.ac.kr



주영훈(Young Hoon Joo)

1982년 : 연세대학교 전기공학과 졸업
 1984년 : 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업
 1995년 : 동대학원 전기공학과 졸업 박사
 1986년~1995년 8월 : 삼성전자(주) 생산기술 센터 자동화연구소 책임연구원

2009년 1월~2009년 12월 : 한국지능시스템학회장
 2008년 1월~현재 : IJCAS(SCI급) 저널 Editor
 2010년 1월~현재 : 대한전기학회 정보제어부문 부회장
 현재 : 군산대 공대 제어로봇공학과 교수

관심분야 : 지능형 로봇, 지능제어, 지능형 감시 시스템, 로봇 비전, 지능형 전력 제어
 Phone : 063-469-4706
 E-mail : yhjoo@kunsan.ac.kr



박진배(Jin Bae Park)

1977년 : 연세대학교 전기공학과 공학사
 1985년~1990년 : Kansas State University 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업 공학박사
 1990년~1991년 : Kansas State University 전기 및 컴퓨터 공학과 조교수

2008년 1월~2010년 12월 : IJCAS(SCI급) 저널 편집장
 2012년 1월~현재 : 제어로봇시스템학회 차기회장
 현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수

관심분야 : 제어이론, 지능제어, 지능형 로봇, 신재생에너지
 Phone : 02-2123-2773
 E-mail : jbpark@yonsei.ac.kr