

군집 로봇 기반 공간 탐색을 위한 행동 제어 알고리즘

논 문
60-11-23

Behavior Control Algorithm for Space Search Based on Swarm Robots

탁 명 환* · 주 영 훈†
(Myung Hwan Tak · Young Hoon Joo)

Abstract - In this paper, we propose the novel behavior control algorithm by using the efficient searching method based on the characteristic of the swarm robots in unknown space. The proposed method consists of identifying the position and moving state of a robot by the dynamic modelling of a wheel drive vehicle, and planing behavior control rules of the swarm robots based on the sensor range zone. The cooperative search for unknown space is carried out by the proposed behavior control. Finally, some experiments show the effectiveness and the feasibility of the proposed method.

Key Words : Swarm robots, Space search, Behavior control, Cooperative behavior, Behavior rule, Exploration

1. 서 론

오늘날 현대 사회의 지능형 로봇산업의 급속도의 성장으로 인하여 로봇의 역할과 수행이 증가하여 산업 현장뿐만 아니라 일상생활에서도 많이 활용 되고 있다. 특히, 다수의 로봇이 스스로 주변 상황을 인식하고, 필요에 따라 하나의 목적을 위해 주위의 로봇과 협력 작업을 수행하는 군집 로봇 시스템에 대한 관심이 증대되고 있다 [1-3]. 특히, 건설 로봇, 국방로봇, 보안로봇 분야에서는 다수의 로봇을 활용하여 작업 효율성을 높일 수 있는 대표적인 분야이다. 최근 들어 사회 안전을 유지하기 위하여 광범위한 지역을 효과적으로 경비 및 탐색 할 수 있는 군집 로봇 시스템과 기존은 보안 시스템과 연동하여 사회의 안전을 목적으로 한 시스템이 각광받고 있다.

군집 로봇 시스템의 가장 큰 특징은 단일 로봇에 비해 작업의 효율성과 시스템의 유연성 및 강인성을 확보할 수 있다는 것이다. 예를 들어, 해저 탐사와 같이 광범위한 지역을 탐색하기 위해 단일 로봇만으로 임무 수행 시 시간의 효율성이 낮으며, 로봇에 결함이나 고장이 발생할 경우 임무 수행 자체가 불가능하다. 이러한 광범위한 지역에서 공간 탐색 작업을 수행 할 경우 단일 로봇의 문제점을 극복하기 위해 군집 로봇 시스템을 적용한다. 군집 로봇 시스템을 적용하여 공간 탐색 작업을 수행하기 위해서는 인접한 로봇들이 협조 행동을 통하여 공간을 탐색한다.

기존의 군집 로봇 시스템을 이용한 공간을 탐색 하는 방법은 침입자 검출을 위한 침입자 탐색 방법, 로봇의 개수에

맞게 공간을 다각형으로 분배하여 분배된 공간을 탐색하는 방법, 로봇의 임의의 이동에 의해 탐색하는 방법이 있다 [4-6]. 기존의 연구에서는 주어진 공간에 대한 환경 정보가 필요하다. 환경 정보가 없을 경우에는 로봇간의 충돌이 발생하고 미지의 공간에서 탐색하지 못하는 공간이 발생 한다. 또한, 각 로봇은 자율적으로 이동하면서 주위의 환경과 인접한 로봇들의 행동을 인식하여 자신의 행동을 결정해야 한다 [7]. 일부 로봇이 고장 나더라도 전체적인 시스템에 영향을 주지 않으며 주어진 다양한 작업에 대하여 로봇의 행동 규칙만 바꾸어 줌으로써 다양한 작업을 수행해야 한다 [8]. 군집 로봇 이 협조 탐색 행동을 결정하기 위해서 단일 로봇이 아닌 군집 로봇의 위치 및 이동 상태 정보가 필요하며 미지의 공간을 탐색하기 위해 인접한 로봇과 충돌을 회피하고 최적의 거리를 유지하여 주어진 환경을 탐색하는 제어 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 두 개의 구동륜을 사용하는 이동 로봇의 상태 방정식을 이용하여 각 로봇의 위치 및 이동 상태를 파악하고 각 로봇의 부착된 전 방향 거리 감지 센서를 이용한다. 인접한 로봇과 충돌 회피 및 탐색하지 못한 공간을 줄이기 위해 각 로봇의 탐색 반경 영역을 이용하여 행동 규칙 계획한다. 계획된 행동 규칙은 군집 로봇간의 충돌을 회피하고 미지의 공간을 협조 탐색하기 위해 인접한 로봇간의 최적의 거리를 유지한다. 군집과 떨어진 로봇이 있을 경우 군집 로봇과 협조하여 공간을 탐색하기 위해 군집 로봇 쪽으로 이동하여 최적의 거리를 유지한다. 따라서, 군집 로봇이 목표지점까지 이동 간에 인접한 로봇과 충돌을 회피하고 탐색하지 못하는 공간을 방지하여 공간을 탐색 할 수 있는 군집 로봇의 행동 제어 알고리즘을 제안한다.

2. 미지의 공간 탐색을 위한 군집 로봇 행동 제어

군집 로봇의 행동을 제어하기 각 로봇의 위치 및 이동 거

* 정 회 원 : 군산대학교 전자정보공학부 박사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 군산대학교 제어로봇시스템공학과 정교수

E-mail : yhjoo@kunsan.ac.kr

접수일자 : 2011년 9월 11일

최종완료 : 2011년 10월 24일

리를 파악해야 한다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 두 개의 구동륜을 두고 좌측바퀴와 우측바퀴가 독립적으로 제어 하는 방식인 이륜구동 방식의 이동 로봇을 이용한다 [9].

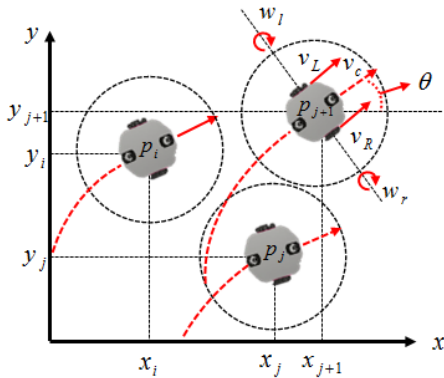


그림 1 군집 로봇의 좌표계
Fig. 1 Coordinate of swarm robots

각 로봇의 좌우측 바퀴의 속도를 각각 w_l, w_r 이라고 하면 각 바퀴의 선속도는 식 (1)과 같다.

$$v_l = rw_l, \quad v_r = rw_r \quad (1)$$

여기서 r 은 바퀴의 반지름을 나타내며 이동 로봇의 중심을 c 라고 하면 이동 로봇의 중심에서 로봇의 선속도 v_c 및 각속도 w_c 는 식 (2)와 같다. L 은 양 바퀴 사이의 거리이다.

$$v_c = \frac{v_l + v_r}{2}, \quad w_c = \frac{v_l - v_r}{L} \quad (2)$$

군집 로봇의 속도를 $v[m/s]$, 각속도 $w[rad/s]$ 로 하면, 로봇 i 의 상태 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서, $(x_i, y_i, \theta_i)^T$ 는 그림 1의 군집 로봇의 좌표계에서 로봇 i 의 위치에 해당하는 (x_i, y_i) 좌표이며, θ_i 는 x 축을 기준으로 로봇의 방향각을 나타낸다.

로봇의 상태 방정식을 이용하여 미지의 공간에서 각 로봇이 인접한 로봇과 협조하여 공간을 탐색하는 행동을 제어하기 위해 각 로봇은 전 방향 거리감지 센서를 사용한다. 군집 로봇이 공간을 탐색 시 인접한 로봇과 거리가 가까워져 발생할 수 있는 로봇간의 충돌을 회피하고 군집 로봇간의 거리가 멀어지면서 탐색하지 못하는 영역이 발생 하는 것을 예방하기 위해 각 로봇의 탐색 반경 거리를 유지하여 공간을 탐색한다. 또한 군집 로봇과 떨어진 로봇이 있을 경우 군집 로봇과 협조 탐색을 하기 위해 군집 로봇 쪽으로 이동하여 최적의 거리를 유지하여 초기 위치에서 목표지점 까지

이동하면서 공간을 탐색한다.

2.1 군집 로봇의 행동 제어

군집 로봇을 이용하여 미지의 공간을 탐색하는 행동을 제어 하기위해 각 로봇은 전 방향 거리감지 센서를 이용한다. 군집 로봇의 그림 2와 같이 각 로봇의 탐색 가능한 반경 거리를 d_r 로 나타낸다. 여기서, i 는 로봇의 개수이며 i 는 1부터 n 개 이다. j 는 주위의 로봇을 나타낸다.

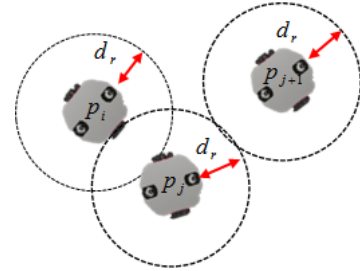


그림 2 군집 로봇의 센서반경 거리
Fig. 2 Sensor range distance of swarm robots

또한, 각 로봇의 중심으로부터 인접한 로봇 중심과의 거리 D 는 식(4)와 같이 나타낸다.

$$D = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

미지의 공간에서 탐색 반경을 기준으로 인접한 로봇과의 측정된 거리를 d 라고 한다.

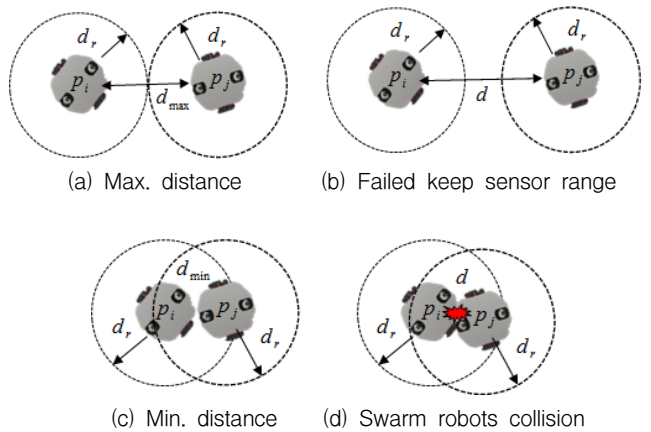


그림 3 거리에 의한 군집 로봇의 행동
Fig. 3 Behavior of swarm robot by distance

그림 3은 인접한 로봇의 측정된 거리 d 에 따라 나타나는 군집 로봇의 행동이다. 그림 3(a)와 같이 인접한 로봇과 협조 탐색 할 수 있는 최대 탐색 반경을 유지하는 거리를 d_{max} 라고 한다. 또한, 그림 3(b)인접한 로봇과의 충돌의 회피하는 최소 탐색 반경 거리를 d_{min} 으로 나타낸다.

표 1 측정된 d 에 의해 군집 로봇의 행동
Table 1 Behavior of swarm robot by measured d

군집 로봇의 행동	
$d = d_{max}$	(a) 탐색 가능한 최대거리 유지
$d > d_{max}$	(b) 인접한 로봇으로 이동
$d = d_{min}$	(c) 로봇간 최소거리 유지
$d < d_{min}$	(d) 인접한 로봇과의 충돌 회피

인접한 로봇의 측정된 거리 d 에 의해 군집 로봇의 행동은 표 1과 같다. 그림 3(a)의 경우 서로 인접한 로봇이 최대 탐색 반경 거리를 유지하고 (b)와 같이 인접한 로봇 사이에 탐색하지 못하는 영역이 발생하지 않도록 로봇의 행동을 제어 한다. (c)의 경우에는 서로 인접한 로봇이 충돌을 방지하기 위해 인접한 로봇간의 최소거리를 유지하고 (d)와 같이 인접한 로봇의 충돌을 방지하는 로봇의 행동을 제어 한다. 표 1과 같이 군집 로봇의 행동을 제어하기 위해 군집 로봇의 행동 규칙을 계획한다.

2.2 군집 로봇의 행동 규칙

미지의 공간에서 각 로봇이 인접한 로봇과 탐색 반경을 이용하여 공간을 탐색하기 위해 각 로봇이 탐색 가능한 반경 안에 그림 4와 같이 ZoR(Zone of Repulsion), ZoO(Zone of Orientation), ZoA(Zone of Attraction)로 영역을 구분하고 각 영역에 적합한 행동 규칙을 계획 한다 [10].

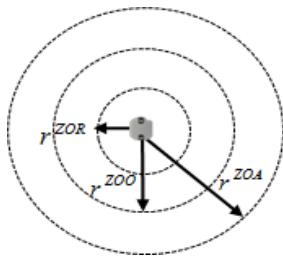


그림 4 센서 반경의 영역
Fig. 4 Zone of sensor range

그림 5는 각 영역에 대한 군집 로봇의 행동 규칙의 특성을 나타낸다.

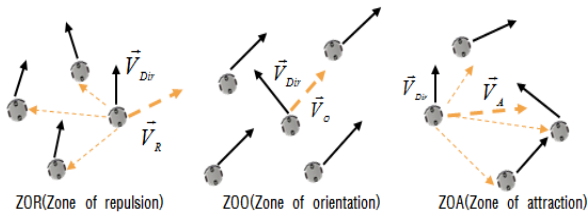


그림 5 군집 로봇의 행동 규칙 특성
Fig. 5 Property of behavior rule for swarm robot

각 영역에 대한 로봇들의 행동을 제어하기 위해 ZoR 영역에서는 군집 로봇은 인접한 로봇과 충돌을 회피하기 위해

최소 거리를 유지하며, ZoO영역에서는 인접한 로봇과 일정한 거리를 유지하기 위해 이동하는 군집 로봇의 평균 방향과 같은 방향으로 이동한다. 또한, ZoA영역에서는 군집 로봇이 분산 되어 있으므로 인접한 로봇이 존재하는 방향으로 이동한다. 이러한 각 영역에서 군집 로봇의 행동을 제어하기 위한 행동 규칙은 식 (5-7)과 같으며 각 영역에서 방향 벡터를 계산하여 구현할 수 있다. N_{ZoR} 영역에서는 로봇 i 의 방향벡터는 식 (5)와 같이 각 로봇의 위치를 이용하여 방향 벡터를 나타낸다.

$$\vec{v}_R = \begin{cases} \vec{v}_{Dr} & , N_{ZoR} = 0 \\ -\frac{1}{N_{ZoR}} \sum_{j=1}^{N_{ZoR}} \frac{(p_j - p_i)}{|p_j - p_i|} & , N_{ZoR} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

여기서, P_i 는 로봇 i 의 위치 (x_i, y_i)를 나타내며 P_j 는 주위 로봇의 위치 (x_j, y_j)를 나타낸다. \vec{v}_{Dr} 은 로봇 i 의 이동하는 방향을 나타낸다. $N_{ZoR}, N_{ZoO}, N_{ZoA}$ 은 각 영역에 대해 존재하는 로봇의 개수이다. N_{ZoO} 의 영역에서 로봇 i 의 방향을 결정하기 위해 주위의 로봇 j 의 방향벡터를 이용하여 나타내며 식 (6)과 같다.

$$\vec{v}_O = \begin{cases} \vec{v}_{Dr} & , N_{ZoO} = 0 \\ \frac{1}{N_{ZoO}} \sum_{j=1}^{N_{ZoO}} \frac{\vec{v}_j}{|\vec{v}_j|} & , N_{ZoO} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

N_{ZoA} 의 영역에서는 각 로봇의 위치를 이용하여 방향벡터를 나타내며 식 (7)과 같다.

$$\vec{v}_A = \begin{cases} \vec{v}_{Dr} & , N_{ZoA} = 0 \\ \frac{1}{N_{ZoA}} \sum_{j=1}^{N_{ZoA}} \frac{(p_j - p_i)}{|p_j - p_i|} & , N_{ZoA} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

또한, 각 로봇이 $N_{ZoR}, N_{ZoO}, N_{ZoA}$ 의 영역에 대해 중복된 행동을 방지하기 위해 각 영역에 로봇의 존재함에 따라 우선순위가 할당된다. 각 로봇의 행동의 우선순위를 결정하기 위해 식 (8)과 같이 N_{ZoR} 의 영역에 로봇이 존재하면 다른 행동을 제한하고 N_{ZoR} 의 영역에 적합한 행동을 한다. 만약 N_{ZoO} 과 N_{ZoA} 에 동시에 존재 한다면 최종 방향 벡터는 \vec{v}_O 와 \vec{v}_A 의 평균으로 구할 수 있다.

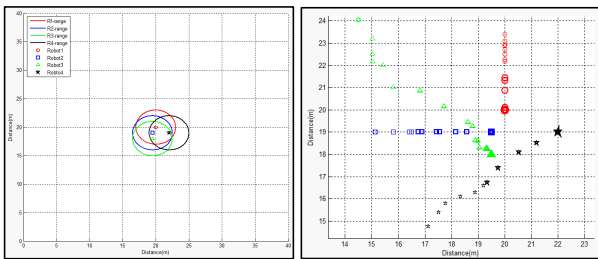
$$\vec{v}_C = \begin{cases} \vec{v}_R, & \text{if } N_{ZoR} > 0 \\ \vec{v}_O, & \text{if } N_{ZoR}, N_{ZoA} = 0 \wedge N_{ZoO} > 0 \\ \vec{v}_A, & \text{if } N_{ZoR}, N_{ZoO} = 0 \wedge N_{ZoA} > 0 \\ \frac{1}{2}(\vec{v}_O + \vec{v}_A), & \text{if } N_{ZoR} = 0 \wedge N_{ZoO}, N_{ZoA} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

ZoR, ZoO, ZoA의 각 영역에 대해 군집 로봇의 행동 규칙

을 계획하고 각 영역에 대한 중복된 행동을 방지하면 군집 로봇이 공간을 협조 탐색하기 위해 인접한 로봇 간에 충돌을 회피 하고 최적의 탐색 반경 거리를 유지하면서 탐색하지 못하는 공간을 줄일 수 있다. 또한, 군집과 떨어진 로봇이 있을 경우 공간을 협조 탐색하기 위해 군집 로봇으로 이동하여 공간을 협조하여 탐색이 가능하다. 따라서, 미지의 공간에서 목표 지점 까지 이동 할 경우 초기의 위치에서 인접한 로봇과 충돌을 회피하여 주변의 공간을 탐색한다. 또한 이동 중에 각 로봇의 탐색 반경을 이용하여 인접한 로봇과의 탐색 범위를 연결 및 유지하여 탐색하지 못하는 영역의 발생을 방지하는 행동을 제어 할 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

시뮬레이션은 군집 로봇을 이용하여 밀집된 초기위치에서 목표 지점까지 이동하면서 발생하는 로봇과의 충돌 회피 및 인접한 로봇의 탐색 반경 거리를 유지하여 탐색하지 못하는 영역 발생을 방지하는 군집 로봇의 행동을 제어한다. 또한, 군집과 떨어진 로봇이 있을 경우 공간을 협조 탐색하기 위하여 군집 로봇 쪽으로 이동하는 군집 로봇의 행동을 제어 한다. 그림 6(a)는 4개의 로봇이 밀집된 초기 위치를 나타낸다.



(a) Initial position (b) Path of swarm robots

그림 6 군집 로봇의 충돌 회피 및 행동 제어
Fig. 6 Collision avoid and behavior control of swarm robots

그림 6(b)는 밀집된 초기 위치에서 군집 로봇의 탐색 반경 거리를 최대 거리로 유지하기 위해 인접한 로봇과의 충돌을 회피하는 과정이며 그림 7과 같이 인접한 로봇간의 최대 탐색 반경 거리를 유지한다.

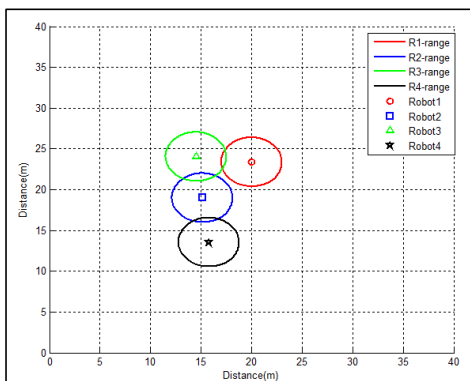
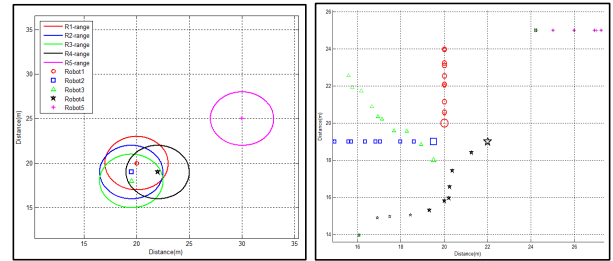


그림 7 행동 제어 결과
Fig. 7 Result of behavior control



(a) Initial position (b) Path of swarm robots

그림 8 군집 로봇의 충돌 회피 및 행동 제어
Fig. 8 Collision avoid and behavior control of swarm robots

그림 8(a)는 밀집된 군집 로봇의 초기 위치와 군집과 떨어진 로봇의 초기 위치를 나타낸다. 그림 8(b)는 군집과 떨어진 로봇이 있을 경우 초기 위치에서 공간을 협조 탐색하기 위하여 군집 로봇 쪽으로 이동하여 그림 9와 같이 탐색 반경거리를 유지한다.

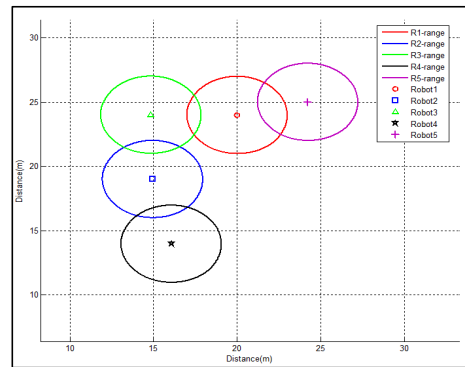


그림 9 행동 제어 결과
Fig. 9 Result of behavior control

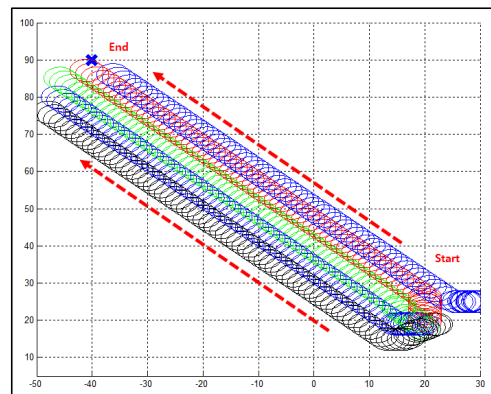


그림 10 군집 로봇의 경로
Fig. 10 Path of swarm robots

그림 10은 밀집된 초기 위치 및 군집 떨어진 로봇의 초기 위치와 목표 지점이 주어졌을 경우 군집 로봇이 목표 지점까지 이동하면서 공간을 탐색 하는 경로를 나타내며 초기위치에서는 인접한 로봇과 충돌을 회피 한다. 또한 이동 중에 발

생할 수 있는 탐색하지 못하는 공간을 예방하기 위해 인접한 로봇과 탐색 반경 거리를 유지하여 공간을 협조 탐색한다.

5. 결 론

본 논문에서는 미지의 공간을 협조 탐색하기 위한 군집 로봇의 행동을 제어 하는 방법을 제안 하였다. 군집 로봇을 이용하여 공간을 탐색 할 경우 발생하는 인접한 로봇간의 충돌 및 탐색하지 못하는 공간을 예방하기 위해 군집 로봇의 위치 및 이동 상태를 파악하고 군집 로봇의 탐색 반경에 대한 행동 규칙을 계획한다. 계획된 행동 규칙은 인접한 로봇과의 충돌을 회피한다. 또한, 밀집된 초기 위치와 군집과 떨어진 로봇의 경우 인접한 로봇이 공간을 협조 탐색 하기위해 인접한 로봇의 탐색 반경 거리를 유지하여 탐색하지 못하는 공간을 예방하는 군집 로봇의 행동을 제어 하였다. 마지막으로 시뮬레이션을 통하여 응용 가능성을 증명하였다.

참 고 문 헌

[1] Y. U. Cao, A. Fukunaga, and A. Kahng, "Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions," *Auton. Robots*, vol. 4, pp.1-23, 1997.

[2] D. M. Stipanovic, P. F. Hokayem, M. W. Spong and D. D. Siljak, "Cooperative avoidance control for multiagent systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 129, pp. 699-707, 2007.

[3] 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, 2008.

[4] I. Suzuki and M. Yamashita, "Searching for a mobile intruder in a polygonal region," *SIAM Journal on Computing*, vol. 21, no. 2, pp. 863 - 88, 1992.

[5] B. P. Gerkey, S. Thrun, and G. Gordon, "Visibility-based pursuit-evasion with limited field of view," *International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 4, pp. 299 - 15, 2006.

[6] S. Sachs, S. Rajko, and S. M. LaValle, "Visibility-based pursuit-evasion in an unknown planar environment," *International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 1, pp. 3 - 6, 2004.

[7] S. Mastellone, D. M. Stipanovic, C. R. Graunke, K. A. Intlekofer, and M. W. Spong, "Formation control and collision avoidance for multi-agent nonholonomic systems: Theory and experiments," *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 27, no. 1, pp. 107-126, 2008.

[8] O. Linda and M. Manic, "Fuzzy Manual Control of Multi-Robot System with Built-In Swarm Behavior," *IEEE Computer Science*, pp. 4-9, 2009.

[9] G. Dudek and M. Jenkin, *Computational Principles of Mobile Robotics*, Cambridge University Press, 2010.

[10] I. D. Couzin, J. Krause, R. James, G. D. Ruxton and

N. R. Franks, "Collective memory and spatial sorting in animal groups," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 218, pp. 1-11, 2002.

[11] J. W. Durham, A. Franchi, and F. Bullo, "Distributed pursuit-evasion with limited-visibility sensors via frontier-based exploration," in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (Anchorage, Alaska)*, May 2010.

저 자 소 개



탁 명 환 (卓 明 煥)

1984년 3월 29일생. 2009년 군산대 전기 전자제어학과 졸업(공학사). 2011년 동 대학원 전기전자제어학과 졸업(공학석사). 2011년~현재, 동 대학원 전기전자제어학과 박사과정.

Tel : 063-469-4706

E-mail : takgom@kunsan.ac.kr



주 영 훈 (周 永 焄)

1958년 6월 25일생. 1982년, 1984년, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학사, 공학석사, 공학박사). 1986-1995년 삼성전자(주) 생산기술센터 팀장, 1995년~현재 군산대학교 전자정보공학부 정교수. 1998~1999년 미국 휴스턴대학 박사후과정

Tel : 063-469-4706

E-mail : yhjoo@kunsan.ac.kr