

# 무게 중심 보로노이 테셀레이션 을 이용한 군집 로봇의 협조탐색

|         |
|---------|
| 논 문     |
| 61-1-22 |

## The Cooperate Navigation for Swarm Robot Using Centroidal Voronoi Tessellation

방 문 섭\* · 주 영 훈†  
(Mun Seop Bang · Young Hoon Joo)

**Abstract** - In this paper, we propose a space partitioning technique for swarm robots by using the Centroidal Voronoi Tessellation. The proposed method consists of two parts such as space partition and collision avoidance. The space partition for searching a given space is carried out by a density function which is generated by some accidents. The collision avoidance is implemented by the potential field method. Finally, the numerical experiments show the effectiveness and feasibility of the proposed method.

**Key Words** : Swarm robots, Space search, Centroidal voronoi tessellation, Lloyd's algorithm, Potential field

### 1. 서 론

근래에 다양한 분야에서 로봇의 역할이 증대됨에 따라 점차 인간을 대신하거나 함께 작업을 하는 사례들이 증가하고 있다. 재해지역의 인명구조, 열악한 환경에 대한 탐사, 보안, 외부 행성 탐사 등 제한된 환경에서 인간을 대신하여 탐색하는 목적으로 현재에도 많은 관심을 받고 있다. 로봇의 필요성이 강조되는 작업 환경들은 대체로 사람이 접근하기 불가능하거나 잠재적으로 높은 위험성을 지닌 임무들이다. 인간의 개입이 물리적으로 제한되는 경우에 로봇 스스로 최소한의 환경 인식에 따른 의사결정 능력인, 최소한의 지능이 부여되어야 한다[1]. 로봇의 지능에 대한 관심은 자연에 존재하는 생태계의 메커니즘을 모사한 군집 지능에 주목하게 되었다[2][3]. 근래 들어 로봇 공학 분야에서 군집 지능 이론은 로봇 개체의 신뢰성과 단순성, 가격 경쟁력 등의 강점을 바탕으로 상대적으로 단순한 기능을 갖춘 로봇들의 협력적인 작업을 통해 복잡하고 어려운 임무를 완수할 수 있는 군집 로봇 시스템의 설계와 구현을 위한 구조적 접근 방법을 제공하여 많은 주목을 받고 있다[4-6].

군집로봇 시스템은 단일로봇 시스템에 비해 알려지지 않은 환경의 탐사에서 작업의 효율성, 시스템의 유연성을 확보할 수 있다. 구성원들의 집단적인 병렬 처리 능력으로 한 구성원의 실패나 시스템의 오류가 전체 시스템의 임무 성공 여부에 큰 영향을 주지 않아 상대적으로 신속하고 견실한 목표 달성을 기대할 수 있다.

군집 로봇 시스템의 기술은 크게 네 가지 부분으로 분류된다. 군집 행동 제어 기술, 군집 환경/상황 인지 기술, 군집

네트워킹 기술, 군집 시스템 통합 기술 등 이다[7]. 본 논문에서는 군집 환경/상황 인지 기술인 군집로봇의 협조탐색을 위한 공간분할 기법에 대해 다룬다.

일반적인 군집로봇 시스템을 이용한 공간을 탐색하는 방법은 'Random' 탐색 방식과 'Coordinated' 탐색 방식으로 나누어진다[4][8]. 'Random' 탐색 방식은 로봇들이 목표를 찾기 위해 탐색하는 동안 탐색 공간을 명시적으로 분할하거나, 동일한 영역을 반복하여 탐색하는 것에 제한이 없는 방식이다[8]. 제어 시스템을 비교적 쉽게 구축 할 수 있고 로봇의 대수가 증가해도 전체 시스템이 복잡해지지 않는 장점이 있다. 그러나 탐색 완료 소요 시간을 보장 받지 못하며, 각 개체간의 협조 체계를 구축하는 것이 쉽지 않다. 'Coordinated' 탐색 방식은 다수의 로봇으로 구성된 탐색 과정에서 탐색 공간을 로봇의 대수로 균등하게 영역을 나누어 한 로봇 당 한 분할영역을 할당하여 탐색을 수행하는 방식이다[9-11]. 로봇의 목표위치를 효율적으로 관리하여 자원 낭비를 줄일 수 있다. 하지만 로봇의 대수가 늘어나면 제어 시스템이 복잡해져 연산량이 급격하게 증가하는 문제점을 갖는다.

본 논문에서는 'Coordinated' 탐색 방식과 'Random' 탐색 방식을 혼합하여 군집로봇의 협조탐색을 위한 공간분할기법을 제안한다. 2장에서는 전체 시스템에 대한 개요를 설명한다. 3장에서는 군집로봇의 협조탐색을 위한 공간분할기법에 대해 제안한다. 4장에서는 군집로봇의 협조탐색 중 군집로봇들 간의 충돌방지를 위해 포텐셜 필드를 이용한 기법을 제안한다. 5장에서는 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 기법의 응용 가능성을 보인다.

### 2. 전체 시스템 개요

본 논문은 미지의 공간에서 군집로봇의 협조탐색을 위한 공간분할기법을 제안한다. 제안하는 기법은 공간분할방법과 군집로봇 구성원 간의 충돌회피방법으로 구성된다. 공간분

\* 준 회원 : 군산대학교 전자정보공학부 석사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 군산대학교 제어로봇공학과 정교수

E-mail : yhjoo@kunsan.ac.kr

접수일자 : 2011년 9월 23일

최종완료 : 2011년 11월 27일

할방법은 무게중심 보로노이 테셀레이션에 탐색공간의 임의로 정의한 밀도함수를 적용하여 공간을 분할하는 방법이다. 이벤트 발생에 따라 밀도함수를 조정하여 공간분할의 유연성을 부여한다. 군집로봇 구성원 간의 충돌회피방법은 군집로봇 구성원 간의 가상의 포텐셜 필드를 적용한 충돌회피기법이다. 군집로봇에 할당된 탐색공간의 무게중심점으로 인력이 작용하고, 일정 범위 내에 다른 군집로봇이 접근하면 서로 척력을 발생하여 충돌을 회피한다.

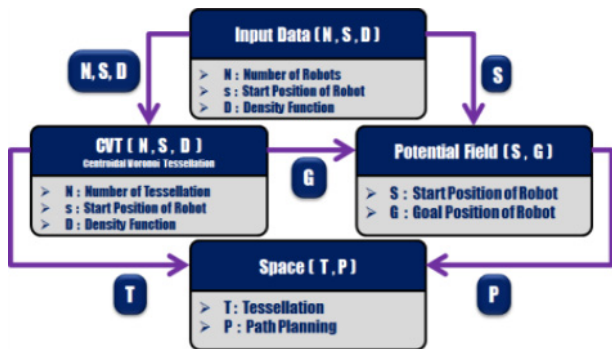


그림 1 전체 시스템 구성도  
Fig. 1 System block diagram

그림 1은 전체 시스템의 구성도이다. 탐색공간에 동일한 기능을 가진 군집로봇이 무작위로 생성된 후, 탐색공간을 군집로봇의 개체수대로 분할한다. 생성 초기의 밀도함수가 전체 탐색 공간에 균일하게 적용되어 균등하게 분할한다. 분할된 공간의 무게중심점이 각각의 군집로봇의 탐색목표위치이다. 군집 로봇이 각각의 목표 위치로 이동할 때는 가상의 포텐셜 필드가 적용되어 충돌을 회피한다. 탐색공간의 특정 지역에 가스누출이나 화재와 같은 이벤트가 발생될 경우, 발생된 지역의 좌표를 기준으로 밀도함수를 변경한다. 변경된 밀도함수에 따라 공간을 재분할 한다. 재분할된 공간의 중심점을 향해 군집 로봇은 재탐색을 실시한다. 이벤트가 사라지면, 밀도함수는 초기 상태로 되돌아간다.

### 3. 군집로봇의 협조탐색을 위한 공간분할기법

본 논문에서는 군집로봇의 협조탐색을 위한 공간분할기법에 보로노이 테셀레이션을 이용한다. 보로노이 테셀레이션은 임의의 시작점을 중심으로 각 정점이 다른 정점에 영향을 주지 않고 최대로 가질 수 있는 범위를 표현하기에 적합하기 때문이다.

#### 3.1 보로노이 테셀레이션(Voronoi Tessellation)

지역 분할 방식인 보로노이 테셀레이션은 이웃들과의 선분을 이등분한 선들로 이루어진 다각형의 집합을 의미한다. 테셀레이션은 집합  $S$ 가 있을 때, 한 부분집합  $S_i$ 에 속하는 원소는 다른 부분 집합  $S_j$ 에 속하지 않고, 집합  $S$ 의 모든 원소는 임의의 한 부분집합  $S_i$ 에 반드시 속하는 성질을 가지는 부분집합  $\{S_1, S_2, \dots, S_K\}$ 을 말한다.

보로노이 테셀레이션을 정의하면 다음과 같다. 집합  $S$ 의

원소를  $z_i (i=1,2, \dots, K)$ 라 하자. 집합  $S$ 의 원소  $z, w$ 에 대한 거리함수  $d(z, w)$ 일 때, 보로노이 부분집합  $V_j$ 는

$$V_j = \{w \in S | d(w, z_j) < d(w, z_i), i=1, 2, \dots, K, i \neq j\} \quad (1)$$

식(1)을 만족하는  $S$ 에 속하는 모든 원소의 집합이다. 보로노이 부분집합들의 집합  $\{V_1, V_2, \dots, V_k\}$ 을  $S$ 의 보로노이 테셀레이션이라 정의한다. 이때,  $z_i (i=1,2, \dots, K)$ 의 집합을 보로노이 테셀레이션의 생성자(Generators) 또는 보로노이 사이트(Voronoi Site)라 한다. 보로노이 부분집합  $V_j$ 는 보로노이 영역(Region) 또는 보로노이 폴리곤(Voronoi Polygon)이라 한다.

보로노이 테셀레이션 생성 결과는 그림 2와 같이 보로노이 사이트, 보로노이 폴리곤, 보로노이 에지(Voronoi Edge), 보로노이 버텍스(Voronoi Vertex)로 구성되어 있다.

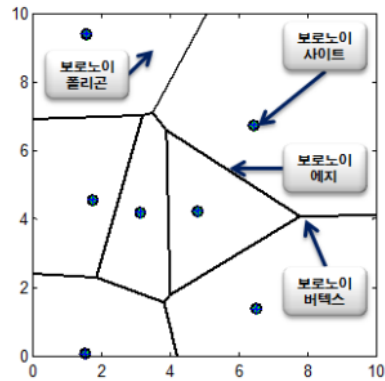


그림 2 보로노이 테셀레이션의 구성요소  
Fig. 2 Voronoi tessellation components

보로노이 버텍스는 임의의 정점을 포함한 영역에서 다른 두 개 이상의 정점이 가지는 영역들과 만나는 점을 말하며, 보로노이 에지는 한 개의 보로노이 폴리곤이 가지는 보로노이 버텍스 사이의 선분을 말한다.

#### 3.2 무게중심 보로노이 조각화(Centroidal Voronoi Tessellation)

보로노이 테셀레이션의 일종인 무게중심 보로노이 테셀레이션은 보로노이 폴리곤의 무게중심에 보로노이 사이트가 놓이게 되는 특징을 가진다. 무게중심 보로노이를 설명하기 위하여 무게중심을 일반적 집합에 대해 정의하면

$$z^* = \frac{\int_V w\rho(w)dw}{\int_V \rho(w)dw} \quad (2)$$

이다. 식 (2)에서  $v$ 는  $n^n$ 에 속하는 영역이며,  $\rho(w)$ 는 밀도 함수이다.  $w \in v$ 일 때,  $z^*$ 는  $v$ 의 무게중심이다[12].

무게중심 보로노이 테셀레이션은 위의 식(1)과 식(2)의 성질을 동시에 만족하는 테셀레이션을 말한다. 일반적으로 보로노이 집합의 생성자와 보로노이 집합의 무게중심 점은 일

치하지 않는다.

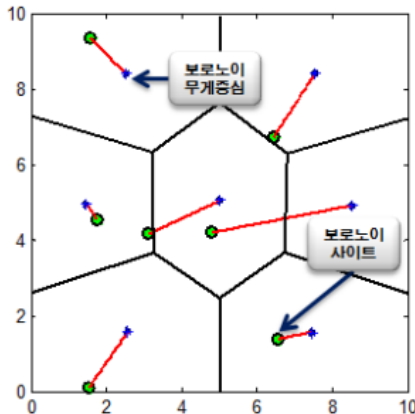


그림 3 무게중심 보로노이 테셀레이션  
Fig. 3 Centroidal Voronoi Tessellation

그림 3과 같은 무게중심 보로노이 테셀레이션을 생성하기 위하여 보로노이 테셀레이션을 반복적으로 수행해 주어야 한다. 반복 수행을 위한 알고리즘으로 Lloyd's Algorithm을 사용한다. Lloyd's Algorithm은 보로노이 사이트의 보로노이 테셀레이션을 계산하고, 식(2)를 이용하여 무게중심점을 계산 후, 각각의 보로노이 사이트를 각각의 무게중심점으로 이동시켜 보로노이 사이트가 무게중심점으로 수렴할 때까지 반복하는 알고리즘이다. 보로노이 사이트가 무게중심점으로 수렴이 되면 반복적인 수행이 멈추게 되며 결국 그림 3과 같은 결과를 얻게 된다.

본 논문에서는 보로노이 사이트는 군집로봇의 초기 생성 위치, 보로노이 폴리곤은 각각의 군집로봇이 가지는 탐색영역, 보로노이 에지는 탐색영역의 경계, 보로노이 폴리곤의 무게중심은 각각의 군집로봇의 탐색목표위치로 정의한다. 탐색공간의 특정지역에 가스누출이나 화재와 같은 이벤트가 발생되면, 군집로봇의 탐색 구역을 발생된 지역을 효과적으로 탐색하기 위해 이벤트 지역을 기준으로 가중치 분할한다. 가중치 분할은 탐색공간에 대한 밀도함수를 변경하여 구현한다. 밀도함수  $\rho(w)$ 는 생성 초기에는 전체공간에 대해 균일한 값을 가져 초기 공간분할 때는 균등하게 공간분할한다. 이벤트가 발생하면, 이벤트 좌표를 기준으로 밀도함수  $\rho(w)$ 를 변경하여 변경된 밀도함수  $\rho(w)$ 에 따라 공간을 재분할 한다. 재분할된 공간의 중심점을 향해 군집 로봇은 재탐색을 실시한다. 이벤트가 사라지면, 밀도함수  $\rho(w)$ 는 초기 상태로 되돌아간다.

#### 4. 로봇 구성원 간의 충돌회피제어

포텐셜 필드 방법(Potential Field Method)은 장애물과 로봇 사이에 척력을 만들어 서로간의 충돌을 회피하고, 로봇과 목표점 사이에는 인력을 만들어 목표점으로 수렴하도록 한다. 즉 포텐셜 필드 방법은 목표위치는 끌어들이는 인력을 생성하는 반면, 장애물은 로봇을 밀어내는 척력을 생성한다. 본 논문에서 사용한 포텐셜 필드는

$$U_{art}(x) = U_{x_s}(x) + U_o(x) \tag{4}$$

이다. 식(4)에서  $U_{x_s}(x)$ 는 로봇  $x$ 와 목표점 간의 인력이다.  $U_o(x)$ 는 로봇  $x$ 와 장애물 간의 척력이다.  $U_{art}(x)$ 는 두 가지 힘의 합을 나타낸다. 따라서 로봇의 움직임은  $U_{art}(x)$ 가 유기되는 힘의 방향으로 진행된다[13][14].

$$U_{x_s}(x) = \frac{1}{2}k_p(x - x_d)^2 \tag{5}$$

$$U_o(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & \text{if } \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

식(5)에서  $x_d$ 는 로봇의 목표점이다.  $k_p$ 는 인력에 대한 상수를 나타낸다. 식(6)에서  $\eta$ 는 척력에 대한 상수이다.  $\rho$ 는 로봇과 장애물간의 최단거리이다.  $\rho_0$ 는 장애물의 잠재적인 힘이 미치는 제한거리이다. 즉,  $\rho_0$  범위 안으로 로봇이 들어오면 척력이 발생한다.

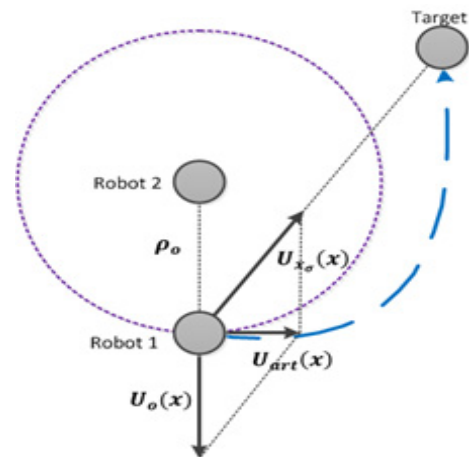


그림 4 포텐셜 필드에 의한 움직임 방향과 최종경로  
Fig. 4 Direction by potential field and final trajectory

본 논문에서 인력을 발생하는 위치는 군집로봇에게 할당된 보로노이 폴리곤의 무게중심 점이며, 군집로봇의 각각의 구성원은 서로에 대하여 동적 장애물로 인식된다. 각각의 로봇이 탐색목표위치로 이동하다 일정 범위에 들어오면 서로 밀어내어 충돌을 회피한다. 그림 4는 포텐셜 필드 방법에 의해 움직임 방향에 대한 연산과 이에 따른 경로를 나타낸다.

#### 5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

군집로봇의 협조탐색을 위한 공간분할기법의 효율성과 유용성을 평가하기 위해 시뮬레이션 환경을 MATLAB을 사용하여 구현하였다. 본 시뮬레이션에서 군집로봇들은 동일한 로봇시스템과 자율주행능력을 가지며 입력 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 입력 파라미터

Table 1 Simulation input parameter

| 입력 파라미터   | 명칭             | 값     |
|-----------|----------------|-------|
| S         | 탐색공간크기         | 10×10 |
| n         | 로봇의 개체수        | 20    |
| $\rho(w)$ | 초기밀도함수         | 1     |
| $k_p$     | 로봇-목표위치 간 인력상수 | 3     |
| $\eta$    | 로봇-로봇 간 척력상수   | 6     |
| $\rho_0$  | 로봇-로봇 간 척력발생거리 | 0.8   |

목표위치로 군집로봇이 이동 할 때, 가상의 포텐셜 필드를 적용하여 탐색 도중에 발생 가능한 군집로봇 구성원간의 충돌을 회피한다. 군집로봇의 배치가 완료 후, 특정한 위치에 이벤트가 발생되면 이벤트 위치에 따라 탐색 공간에 대한 밀도함수가 조정된다. 조정된 밀도함수에 따라 무게중심 보로노이 테셀레이션을 다시 구하면 그림 5(e)와 같이 군집로봇의 목표 위치를 할당 후, 군집로봇을 재배치한다. 이벤트가 종료되고 탐색 공간에 대한 밀도함수가 초기 값으로 변경되어 그림 5(f)과 같이 탐색공간을 균등하게 분할한 후 군집로봇을 재배치한다.

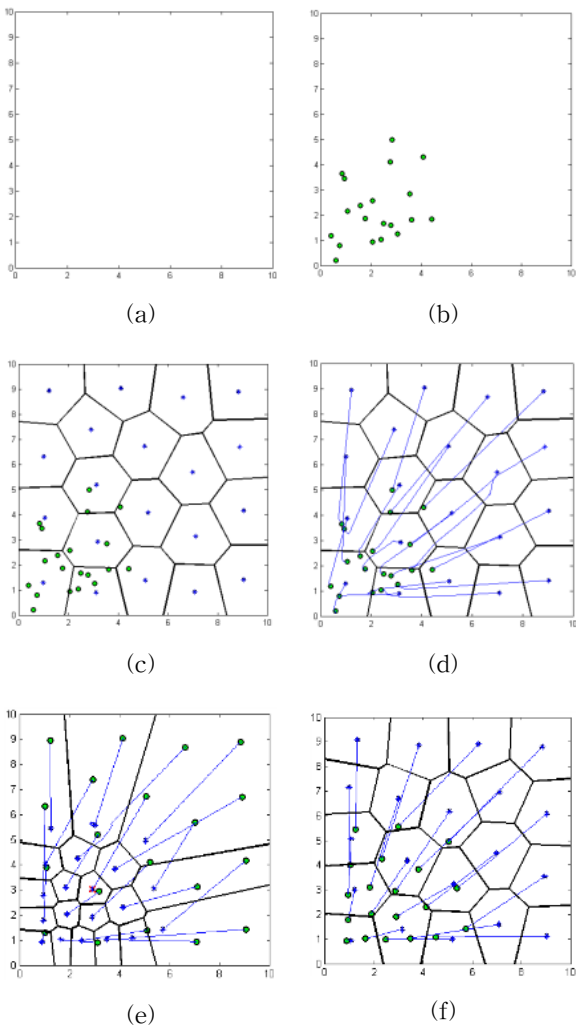


그림 5 공간분할 및 로봇이동  
Fig. 5 Tesselation and moving robots

시뮬레이션의 결과는 그림 5와 같다. 그림 5(a)에서 10 × 10의 탐색공간을 생성한다. 그림 5(b)에서 20개의 군집로봇들이 탐색공간에 무작위로 생성되면 무게중심 보로노이 테셀레이션을 적용하여 공간분할을 한다. 이때, 생성 초기의 밀도함수가 전체 탐색 공간에 대해 균일하므로 그림 5(c)와 같이 균등하게 분할한다. 분할된 공간의 중심점을 각각의 군집로봇의 목표위치로 그림 5(d)와 같이 할당한다. 할당된

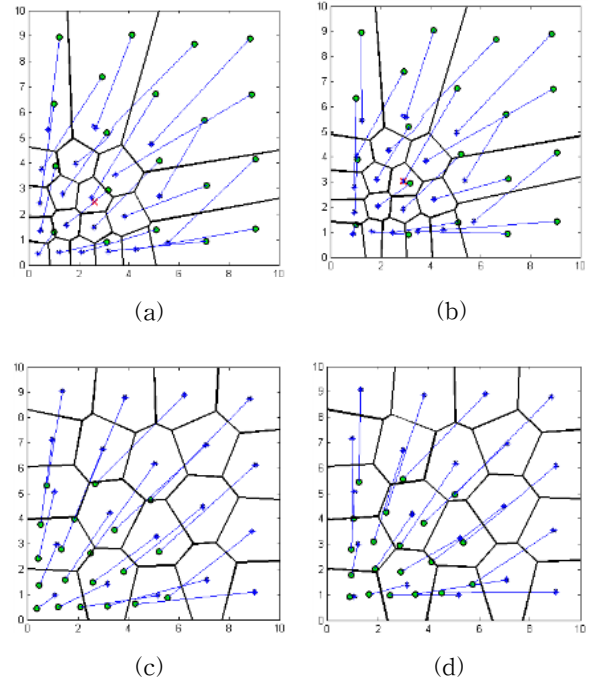


그림 6 이벤트 위치에 대한 공간분할 및 로봇이동  
Fig. 6 Events location for tessellation and moving robots

그림 6은 이벤트 좌표에 따른 탐색공간에 대한 공간분할 및 로봇이동을 보여준다. 빨간색 (x)는 이벤트 좌표를 나타낸다. 그림 6(a)는 이벤트 위치를 좌표 (2.5,2.5)에 부여한 결과 나타낸다. 이벤트 위치 좌표 (2.5,2.5)를 기준으로 군집로봇이 밀집된 것을 볼 수 있다. 그림 6(b)는 이벤트가 좌표 (3,3)에 결과이다. 그림 6(a)에 대해 이벤트가 종료되어 탐색 공간에 대한 밀도함수가 초기 값으로 변경되어 탐색공간을 균등하게 분할 후, 군집로봇을 재배치한 결과는 그림 6(c)이다. 그림 6(b)의 이벤트 종료 후 군집로봇을 재배치한 결과는 그림 6(d)이다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 미지의 공간을 군집로봇의 협조탐색을 위한 공간분할기법을 제안하였다. 무게중심 보로노이 테셀레이션을 탐색공간의 임의로 정의한 밀도함수를 이용하여 공간을 분할한다. 분할된 각각의 공간의 무게중심점을 군집로봇으로 할당한 후, 로봇 구성원 간의 가상의 포텐셜 필드를

적용하여 충돌회피 하였다. 탐색공간의 임의로 정의한 밀도 함수를 이벤트 좌표에 따라 조정하여 공간분할의 유동성을 부여하였다. 군집로봇의 협조탐색의 가능성을 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였다. 장애물, 비정형 공간 등 다양한 환경에서 신뢰성을 보다 높일 수 있는 추가적인 연구가 진행 중이다.

**참 고 문 헌**

[1] H. Szu, P. Chanyagorn, W. Hwang, M. Paulin and T. Yasukawa, "Collective and Distributive Swarm Intelligence: Evolutional Biological Survey," International Congress Series, Vol. 1269, pp. 46-49, 2004. 8.

[2] G. Beni, "From Swarm Intelligence to Swarm Robotics," Swarm Robotics, From Swarm Intelligence to Swarm Robotics, Vol. 3342, pp. 1-9, 2005.

[3] S. Garnier, J. Gautrais and G. Theraulaz, "The Biological Principals of Swarm Intelligence," Swarm Intelligence, Springer New york, Vol. 1, No. 1, pp. 3-31, 2007.

[4] S. Doctor, G. K. Venaygamoorthy and V. G. Gudise, "Optimal PSO for Collective Robotic Search Applications," Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Vol. 2, pp. 1390-1395, 2004. 6.

[5] J.M. Hereford, "A Distributed Particle Swarm Optimization Algorithm for Swarm Robotic Applications," Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp.1678-1685, 2006. 09.

[6] W. Jatmiko, K. Sekiyama and T. Fukuda, " A PSO-based mobile Sensor Network for Oder Source Localization in Dynamic Environment : theory, Simulation and Measurement," Proceedings of the 2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 1036-1043, 2006.

[7] 지상훈, "군집지능로봇기술의 국내외 연구 동향," 전기의세계, 제59권, 제11호, pp. 27-31. 2010. 11.

[8] A. T. Hayes, "How Many Robot? Group Size and Efficiency in Collective Search Tasks," Proceedings of the International Conference on Distributed Autonomous Robotic Systems, Springer verlag, pp. 289-298, 2002.

[9] W. Burgard, M. Moors, C. Stachniss and F. schneider, "Coordinated Multi-Robot Exploration," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21, No. 3, pp. 376-386, 2005.

[10] J. Cortes, S. Martinez, T. Karata, and F. Bullo, "Coverage control for mobile sensing networks," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol 20, no. 2, pp. 243-255, 2004.

[11] J. Cortes, S. Martinez, and F. Bullo, "Spatially-distributed coverage optimization and control with limited-range interactions," ESAIM: Control, Optimization and Calculus of Variations 11 (4) pp. 691-719, 2005.

[12] Q. Du, V. Faber, and M. Gunzburger, "Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms", Society for Industrial and Applied Mathematics Review, vol. 41, no. 4, pp. 637-676, 1999.

[13] R.B. Tilove, "Local obstacle avoidance for mobile robots based on the method of artificial potentials," IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 566-571, 1990.

[14] Y. Koren, and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.2, pp.1398-1404, 1991. 4.

**저 자 소 개**



**방 문 섭 (房文燮)**

1986년 8월 1일생. 2010년 군산대 전기전자제어학과 졸업(공학사). 2011년 동 대학원 전기전자제어학과 재학중(석사과정).  
Tel : 063-469-1958  
E-mail : bms0801@kunsan.ac.kr



**주 영 훈 (周永焄)**

1958년 6월생. 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, 2009년, 대한전기학회 정보제어부문회 편집위원장, 한국지능시스템학회 회장, Int. Journal of Control, Automation, and Systems (IJCAS) Editor.  
Tel : 063-469-4706  
E-mail : yhjoo@kunsan.ac.kr