

군집로봇의 협조탐색을 이용한 공간분할기법

방문섭*, 김중선*, 주영훈*, 박진배**
 군산대학교 제어로봇공학과*, 연세대학교 전기전자공학과**

The cooperate navigation for swarm robot using space partitioning technique

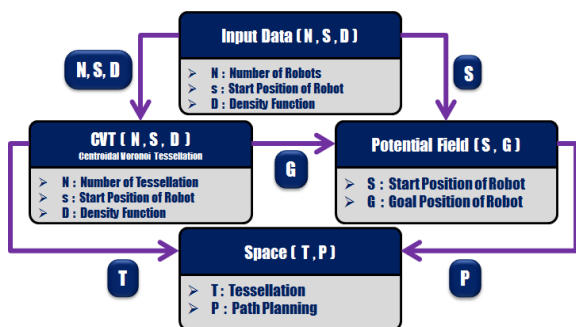
Mun Seop Bang*, Jong Sun Kim*, Young Hoon Joo*, Jin Bae Park**
 Kunsan National University*, Yonsei University**

Abstract - 본 논문에서는 Centroidal Voronoi Tessellation을 이용하여 군집로봇의 협조탐색을 위한 공간분할기법을 제안한다. 탐색공간은 Centroidal Voronoi Tessellation을 이용하여 분할한다. 전역 경로 계획 및 군집 로봇 간의 충돌 회피는 포텐셜 필드를 이용한다. 탐색공간에 밀도 함수를 사용하여 공간분할의 유용성을 부여한다. 마지막으로, 군집로봇의 협조탐색의 가능성을 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

1. 서 론

알려지지 않은 환경의 탐사나 탐색 작업등에서는 단일로봇보다 군집로봇이 효과적이다. 단일 로봇 시스템에 비해 군집로봇시스템은 한 구성원의 실패나 시스템의 오류가 전체 시스템의 임무 성공여부에 큰 영향을 주지 않는다. 구성원들의 집단적인 병렬 처리 능력으로 상대적으로 신속하고 견실한 목표 달성을 기대할 수 있다. 군집로봇의 탐색 작업에서 목표 탐색을 위한 접근 방법으로는 'Coordinated' 탐색 방식과 'Random' 탐색 방식으로 나뉜다. 'Coordinated' 탐색 방식은 N 개의 로봇으로 구성된 탐색 과정에서 탐색 공간의 N개의 균등 분할 영역으로 나누어 한 로봇당 한 분할 영역에 순차적으로 탐색을 수행하는 방식이다[1-3]. 'Random' 탐색 방식은 로봇들이 목표를 찾기 위해 탐색하는 동안 탐색 공간을 명시적으로 분할하거나, 동일한 영역을 반복하여 탐색하는 것을 위하는 것들에 대한 제한이 없는 방식이다[4]. 본 논문에서는, 'Coordinated' 기반의 탐색 작업을 효율적이고 성공적으로 수행하기 위하여 Centroidal Voronoi Tessellation을 이용한 공간분할 기법을 제안한다.

2. 본 론



〈그림 1〉 전체 시스템 구성도

제안하고자하는 시스템의 구성도는 그림1과 같다. 동일한 기능을 가지는 군집로봇은 탐색공간에 무작위로 생성된다. 생성 초기에는 Centroidal Voronoi Tessellation을 이용하여 탐색공간을 군집로봇 개체 수대로 균등분할한다. 분할된 공간의 무게중심점을 각각의 군집로봇의 목표점으로 할당한다. 할당된 군집로봇은 포텐셜필드를 이용한 경로계획을 통해 공간을 탐색한다. 탐색공간의 특정지역에 가스누출이나 화재와 같은 이벤트가 발생되면, 발생된 지역의 좌표를 기준으로 가중치를 부여한다. 가중치에 따라 밀도함수 $\rho(w)$ 를 조정한다. 밀도함수에 따라 공간을 재분할 하여, 재분할된 공간의 중심점을 향해 군집 로봇은 재탐색을 실시한다. 이벤트가 사라지면, 밀도함수 $\rho(w)$ 는 초기 상태로 되돌아간다.

2.1 Centroidal Voronoi Tessellation을 이용한 공간분할

Voronoi Tessellation은 기하학 등에 많이 사용되는 지역 분할 방식으로 이웃들과의 선분을 이등분한 선들로 이루어진 다각형의 집합을 의미한다. Tessellation이란 주어진 집합 S 가 있을 때, 한 부분집합 S_i 에 속

하는 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 $\{S_1, S_2, \dots, S_K\}$ 를 말한다.

Voronoi Tessellation을 정의하면 주어진 집합 S 가 있고 그 원소를 $z_i (i=1, 2, \dots, K)$ 이며, 집합 S 의 원소 z, w 에 대해 거리 함수가 $d(z, w)$ 일 때, 보로노이 부분 집합 V_j 는

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

식(1)을 만족하는 S 에 속하는 모든 원소의 집합이다. 보로노이 부분 집합들의 집합 $\{V_1, V_2, \dots, V_K\}$ 을 S 의 Voronoi Tessellation이라고 정의한다. 이때, $z_i (i=1, 2, \dots, K)$ 의 집합을 Voronoi Tessellation의 생성자들(Generators)라 정의한다.

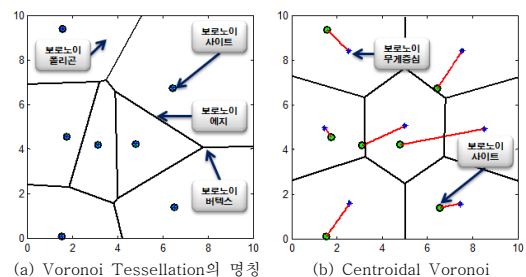
Voronoi Tessellation의 일종인 Centroidal Voronoi Tessellation은 조각화된 영역들의 밀도를 이용하여 중심점을 구하고, 이 중심점을 기준으로 다시 조각화를 반복 수행하는 기법이다. 무게중심 보로노이를 설명하기 위하여 무게중심을 일반적 집합에 대해 정의하면 다음과 같다[6].

$$z^* = \frac{\int_V w \rho(w) dw}{\int_V \rho(w) dw} \quad (1)$$

식 (1)에서 V 는 R^n 에 속하는 영역이며, $\rho(w)$ 는 밀도 함수이다. $w \in V$ 일 때, z^* 는 V 의 무게중심이 된다.

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^M w_j \rho(w_j)}{\sum_{j=1}^M \rho(w_j)} \quad (2)$$

식(2)에서 $W = w_j$ 는 R^n 에 속하는 점들의 이산적 집합이고, 밀도함수 $\rho(w_j), j=1, \dots, M$ 이 주어졌을 때 z^* 는 W 의 무게중심 된다. Centroidal Voronoi Tessellation은 위의 식(1)과 식(2)의 성질을 동시에 만족하는 Tessellation을 말한다. 일반적으로 보로노이 집합의 생성자와 보로노이 집합의 무게중심 점은 일치하지 않는다.



〈그림 2〉 Voronoi Tessellation과 Centroidal Voronoi Tessellation

그림 2-(b)와 같은 Centroidal Voronoi Tessellation을 생성하기 위하여 Voronoi Tessellation을 반복적으로 수행해 주어야 한다. 반복 수행을 위한 알고리즘으로 Lloyd's Algorithm을 사용한다.

본 논문에서는 보로노이 사이트는 군집로봇의 초기 생성 위치이고, 보로노이 폴리곤은 각각의 군집로봇이 가지는 탐색영역이며, 보로노이 무게중심은 각각의 군집로봇의 탐색 목표지점으로 정의한다. 탐색공간의 특정지역에 가스누출이나 화재와 같은 이벤트가 발생되면, 발생된 지역의 좌표를 기준으로 가중치를 부여한다. 가중치에 따라 밀도함수 $\rho(w)$ 를 조정한다. 밀도함수에 따라 공간을 재분할 하여, 재분할된 공간의 중심점을 향해 군집 로봇은 재탐색을 실시한다. 이벤트가 사라지면, 밀도함수 $\rho(w)$ 는 초기 상태로 되돌아간다.

2.2 포텐셜필드를 이용한 전역경로계획 및 장애물 회피

포텐셜 필드(Potential Field) 방법은 장애물과 로봇 사이에 척력을 만들어 서로간의 충돌을 회피하고, 로봇과 목표점 사이에는 인력을 만들어 목표점으로 수렴하도록 한다. 즉 포텐셜 필드 방법은 목표로 하는 위치는 끌어들이는 인력을 만들어내는 반면, 장애물은 척력을 생성한다. 본 논문에서는 포텐셜 필드는 2차원이라고 가정하였다. 식으로 표현하면 식 (4)과 같다.

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

식(4)의 $U_{x_s}(x)$ 는 로봇 x 와 목표점 간의 인력이고, $U_o(x)$ 는 로봇 x 와 장애물 간의 척력이다. $U_{art}(x)$ 는 두 가지 힘의 합이다. 따라서 로봇의 움직임은 $U_{art}(x)$ 가 유기되는 힘의 방향으로 진행된다[5].

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

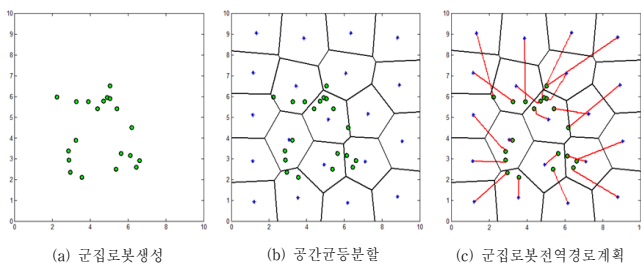
$$U_o(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & \text{if } \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

식(5)에서 x_d 는 로봇의 목표점이고, k_p 인력에 대한 상수이다. 식(6)에서 η 는 척력에 대한 상수이고, ρ 는 로봇과 장애물간의 최단거리이며, ρ_0 는 장애물의 잠재적인 힘이 미치는 제한거리이다. 즉, ρ_0 범위 안으로 로봇이 들어오면 척력이 발생한다. 포텐셜 필드 방법에 대한 구체적인 내용은 참고문헌[5]에서 자세히 확인할 수 있다.

본 논문에서는 로봇의 초기 위치는 탐색공간에서 무작위로 생성된다. 목표점은 Centroidal Voronoi Tessellation의 중심점으로 한다. 각각의 로봇은 서로 동적 장애물로 간주되어 제한범위 ρ_0 에 들어오면 식(6)과 같이 척력을 발생시켜, 충돌을 회피한다.

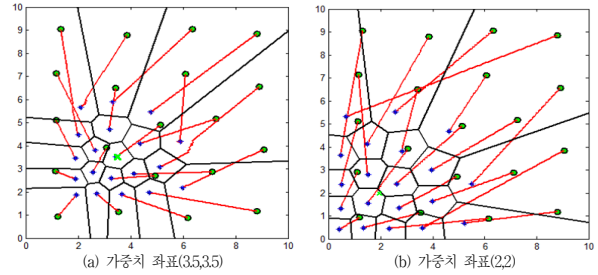
3. 시뮬레이션 및 고찰

군집로봇의 협조탐색을 위한 공간분할기법의 효율성과 유용성을 평가하기 위해 시뮬레이션 환경을 MATLAB을 사용하여 구현하였다. 여기서 모든 로봇은 동일한 로봇시스템과 자율주행능력을 가졌고, 군집로봇의 개체수, 군집로봇의 초기 생성 위치와 밀도함수는 입력변수로 사용한다.



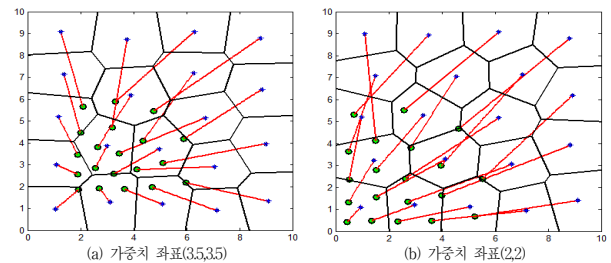
〈그림 3〉 군집로봇 생성 및 공간균등분할 후 경로계획

본 시뮬레이션에서는 초기 밀도함수는 균등하게 부여하고, 군집로봇의 개체수를 20개로 정하였다. 그림 3-(a)와 같이 탐색공간에 군집로봇은 무작위로 생성된다. 탐색공간을 Centroidal Voronoi Tessellation을 이용하여 그림 3-(b)와 같이 균등분할한다. 분할된 공간의 중심점을 각각의 군집로봇의 목표로 할당한다. 포텐셜필드를 이용하여 그림 3-(c)와 같이 군집로봇을 각각 분할된 공간으로 탐색을 실시한다.



〈그림 4〉 가중치에 따른 공간가중치분할 및 경로계획

탐색공간에 이벤트가 발생되면, 가중치가 발생되면, 그림 4와 같이 발생한 이벤트 좌표를 기준으로 가중치를 부여한다. 가중치에 따라 밀도함수를 변경한 후, 공간을 재분할한다. 군집로봇은 재분할된 공간의 중심점을 목표로 하여 공간을 재탐색한다. 그림 4-(a)는 가중치를 좌표 (3.5,3.5)에 부여하였고, 그림 4-(b)는 가중치를 좌표(2,2)에 부여하였다. 이벤트가 사라지면, 공간에 대한 가중치가 사라져 밀도함수 $\rho(w)$ 가 초기 상태로 되돌아간다. 그림 5와 같이 탐색공간을 다시 균등분할 후, 군집로봇은 재분할된 공간의 중심점을 목표로 하여 공간을 재탐색한다.



〈그림 5〉 이벤트 종료 후, 공간균등분할 및 경로계획

4. 결 론

본 논문에서는 Centroidal Voronoi Tessellation을 이용하여 군집로봇의 협조탐색을 위한 공간분할기법을 제안하였다. 탐색공간을 Centroidal Voronoi Tessellation을 이용하여 분할하였다. 이후, 포텐셜 필드를 이용하여 분할된 공간으로 각각의 로봇을 배치하였다. 탐색공간 분할시 가중치 함수를 사용하여 공간분할의 유연성을 부여하였다. 군집로봇의 협조탐색의 가능성을 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였다. 향후, 다양한 환경에서 신뢰성을 보다 높일 수 있는 연구가 추가적으로 필요하다.

감사의 글: 본 연구는 2011년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단 지역혁신인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

[참 고 문 헌]

[1] 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.
 [2] 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
 [3] 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
 [4] S. doctor, G. K. Venayagamoorthy and V. G. Gudise, "Optimal PSO for Collective Robotic Search Applications", Proceedings of the 2004 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Vol. 2, pp. 1390-1395, 2004.
 [5] B. Siciliano, O. Khatib, "Springer Handbook of Robotics, Springer", 2008.
 [6] Qiang Du, Vance Faber, and Max Gunzburger. "Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms.", 41(4):637-676, December 1999.