

3차원 환경에서 포텐셜 필드를 이용한 이동 센서 로봇의 자율배치

강인석, 김용환, 김찬명, 한연희*
한국기술교육대학교 컴퓨터공학부
e-mail:{iseka, cherish, cmdr, yhhan}@kut.ac.kr

Autonomous Deployment of Mobile Sensor Robots using Potential Field in 3D Environment

In-Seok Kang, Young-hwan Kim, Chan-Myung Kim, Youn-Hee Han
Dept of Computer Science, Korea University of Technology and Education

고정형 센서노드들로 구성된 기존의 무선 센서 네트워크는 다양한 응용분야에서 사용되고 있다. 하지만, 센서노드에 이동기능이 추가되면 적절한 움직임을 통해 센싱 영역을 최대화 할 수 있다. 이러한 측면에서 최근 센서의 자율배치에 관련한 연구가 활발하게 진행 중이다. 기존 연구에서의 센서 이동은 대부분 2차원에서의 자율배치에 관하여 연구가 되어 왔다. 본 논문에서는 2차원에서의 자율배치가 아닌 3차원 공간에서의 센서노드의 자율배치에 대한 알고리즘과 이의 결과를 제시한다.

1. 서론

전통적인 고정형 무선 센서 네트워크는 많은 수의 작은 저전력 센서 노드들이 특정 상황을 감지하거나 정보를 수집하여 무선 Ad-Hoc통신으로 싱크노드까지 획득한 정보를 전송하는 네트워크이다. 이러한 무선 센서 네트워크는 점점 다양한 응용분야로 활용되고 있다.

최근 무선 센서 네트워크를 구성한 센서 노드들은 기본적인 센싱, 데이터 처리, 통신 기술 이외에 이동기능까지 겸비하고 있다.

이러한 이동 센서들을 이용하여 주변 상황을 인식하고 센서들은 본래의 기능을 수행하면서도 많은 정보를 얻기 위해 전체 관심 영역(Region of Interest, ROI)을 최대로 관측 할 수 있는 최적의 위치로 이동하는 자율배치 하는 알고리즘 개발이 활발하다[1][2]. 하지만 지금까지 대부분의 연구들은 센서의 이동이 지면에서의 이동으로 이동에 방해되는 지면의 굴곡이나, 지면의 상태로 인해 어려움을 겪을 수도 있고, 얻을 수 있는 데이터도 제한적이다.

본 논문에서는 센서의 이동이 공중을 비행하거나, 수중에서 이동할 수 있다는 가정 하에 연구를 수행하였다. 또한 센서는 자신의 위치와 통신 반경의 이웃 센서 위치를 정확히 알 수 있다고 가정하고 포텐셜 필드(Potential Field)기법을 이용하여 3차원 공간에서의 자율배치방법과

결과를 제시한다.

2. 관련연구

기존의 연구[1][2][3]에서 포텐셜 필드를 이용함으로써 센서들이 스스로 이동하여 자신들이 관측 할 수 있는 영역을 최대화하는 알고리즘을 제시하였다. 이동 센서는 수집 된 거리 데이터를 계산하여 이에 따라 밀어내는 힘인 척력(Repulsive Force)을 이용하여 다음 Target위치로 이동한다. 본 논문에서는 기본적으로 [1]에서 제시된 것을 활용하지만 2차원에서의 센서 이동이 아닌 3차원 공간에서의 자율배치 알고리즘과 이의 결과를 제시하고자 한다.

3. 3D환경에서의 자율배치 기법

본 장에서는 기존 연구[1]에서 제안한 포텐셜 필드 방식을 확장하여 센서의 자율배치 기법을 설명한다. 포텐셜 필드의 이론은 거리에 따라 발생하는 힘의 차이를 이용하여 이동센서가 이동할 타겟(Target) 위치를 알아 낼 수 있다. 본 논문에서 사용되는 힘은 총 3가지로 장애물이나 3차원 공간에서의 경계면에서 발생하는 척력 F_{obs} 과 통신 반경에 있는 이웃 센서에서 발생하는 척력 F_{nei} , 그리고 이웃 센서들과의 통신연결을 위해 필요한 인력(Attractive Force) F_{deg} [2]의 합력 F 를 이용하여 이동센서가 이동할 타겟위치를 구하고 센서노드들을 자율배치 한다.

$$F_{obs} = -K_{obs} \sum_i \frac{1}{r_i^2} \cdot \frac{\mathbf{r}_i}{r_i} \quad (1)$$

* 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행(2011-0005057)되었으며, 또한 이 논문은 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과입니다.

† 한연희 : 교신저자

$$F_{nei} = -K_{nei} \sum_i \frac{1}{r_i^2} \cdot \frac{\mathbf{r}_i}{r_i} \quad (2)$$

$$F_{deg} = \begin{cases} K_{deg} \sum_i \frac{1}{(r_i - R_c)^2} \cdot \frac{\mathbf{r}_i}{r_i} & \text{if critical connection} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

위 수식들에서 r_i 는 장애물 i 또는 이웃 센서 i 의 위치 (x_i)와 현재 센서의 위치(x)의 유클리디안 거리이며 ($r_i = |x_i - x|$), \mathbf{r}_i 는 장애물 i 또는 이웃 센서 i 의 위치와 현재 센서 위치의 벡터 차이이다($\mathbf{r}_i = x_i - x$). R_c 는 이동센서의 통신 범위(Communication Range)이고, 각 힘에서 사용되는 K_{obs} , K_{nei} , K_{deg} 는 F 를 실제 값으로 조율하기 위한 상수이다. 본 논문에서는 실험을 통해 경험적으로 K_{obs} , K_{nei} , K_{deg} 의 값을 정하였다.

수식 (1), (2)의 힘은 최대한의 센싱 영역을 확보하기 위해 이웃 센서들끼리 서로 밀어내는 힘이다. 수식 (3) F_{deg} 는 이웃 센서의 개수를 보장하기 위해 사용되는 인력이다. 수식 (3) 힘을 이용하여 각각의 센서들이 최소한으로 K 개의 이웃 센서를 가질 수 있으며, 이 K 의 값이 높을수록 연결이 끊어질 확률이 적은 것을 의미한다.

수식 (1), (2), (3)과 운동 방정식(Equation of Motion)을 적용하여 센서의 이동 위치를 계산할 수 있다. 각 센서는 위에서 구한 $F = F_{obs} + F_{nei} - F_{deg}$ 에 의하여 움직인다고 가정되 그 힘에 대항하는 다음과 같은 감쇠력(Damping Factor)이 있다고 가정한다.

$$F_D = \nu \cdot v_{current} \quad (4)$$

위 식에서 ν 는 감쇠 상수이며 $v_{current}$ 는 현재 센서 노드의 이동 속도이다.

센서 노드의 질량이 m 이라고 가정할 센서 노드의 이동 가속도 a_{next} 는 다음과 같이 구해진다.

$$a_{next} = \frac{F - F_D}{m} = \frac{F - \nu \cdot v_{current}}{m} \quad (5)$$

또한, 다음의 식을 통하여 단위 시간(t)이후의 센서 노드의 변위 x_{next} 를 구할 수 있다.

$$v_{next} = v_{current} + a_{next} \cdot t \quad (6)$$

$$x_{next} = x + v_{next} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_{next} \cdot t^2 \quad (7)$$

위 수식을 이용하면 이동 센서의 Target 위치를 3차원 좌표형태로 값을 얻을 수 있고, 획득한 값을 활용하여 이동 센서노드가 자율배치 된다. 센서들이 자율배치 되는 동안 각각의 센서는 현재 자신의 위치가 마지막 위치라고 판단 할 경우 이동을 종료하게 된다. 판단하는 조건은 센서가 이동 한 거리가 미리 지정해 놓은 이동거리 값 보다 작으면 S_{count} 를 증가시키며, 연속적으로 발생하여 $threshold_s$ 만큼 발생한다면 더 이상 이동할 거리가 미세하므로 평형 상태(Equilibrium Stage)라 판단하고 알고리즘을 종료한다.

표 1. 포텐셜 필드를 사용한 자율배치 알고리즘

Notation:

- N : 자신의 이웃 센서 위치정보 저장장소
- O : 센서에 의해 감지된 장애물과 경계면의 위치정보 저장장소
- $S(x, y, z)$: 자신의 위치 (x, y, z)에서의 센싱 영역
- $threshold_s$: 미리 정의된 임계 값, $S_{count} = 0$
- F_{obs}, F_{nei} : 장애물과 이웃센서에 의한 척력
- F_{deg} : 이웃센서에 대한 인력
- R : 한 점을 중점이라고 가정한 후 가장 먼 센서까지의 거리
- $Sphere Volume$: R 을 반지름으로 하는 구의 부피

Procedure(종료하기 전까지 반복):

- (1) 준비단계
 - (1.1) 자신의 위치정보(x, y, z)를 획득하고 연결된 이웃 센서들에게 알림
 - (1.2) 이웃 센서들의 정보를 받아 N 에 저장
 - (1.3) 센서에 의해 감지된 장애물과 경계면의 위치정보를 획득하여 O 에 저장
- (2) 힘 계산
 - (2.1) N 과 O 를 활용하여 F_{obs} 와 F_{nei} 계산
 - (2.2) 연결된 이웃센서의 수(Connectivity)에 따라 조건 검사 후 F_{deg} 계산
 - (2.3) 구한 모든 힘을 합산 하여 F 계산
 - (2.4) F 로부터 다음 Target 위치 (x', y', z')를 계산
- (3) 종료 판단
 - (3.1) 현재 위치와 새로운 Target 위치의 거리가 미리 정한 최소이동 값보다 작으면 S_{count} 를 1 증가시키고 S_{count} 가 연속적으로 증가하여 $threshold_s$ 와 같아지면 종료
 - (3.2) 위 종료조건에 만족하지 않으면 Target 위치로 이동 한다.
- (4) Coverage 계산
 - (4.1) Target 위치로 이동 후 모든 센서들 중에서 가장 거리가 긴 두 개의 센서를 선택한다.
 - (4.2) 두 개의 센서의 중점을 기준으로 가장 먼 센서를 포함하는 길이 R 을 계산한다.
 - (4.3) R 을 반지름으로 하는 $Sphere Volume$ (구의 부피)와 이동 된 센서들의 $S(x, y, z)$ 을 이용하여 Coverage를 계산한다.

위 논문에서 사용한 알고리즘의 전체적인 모습은 표. 1과 같다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서는 3차원 공간에서의 센서 자율배치 알고리

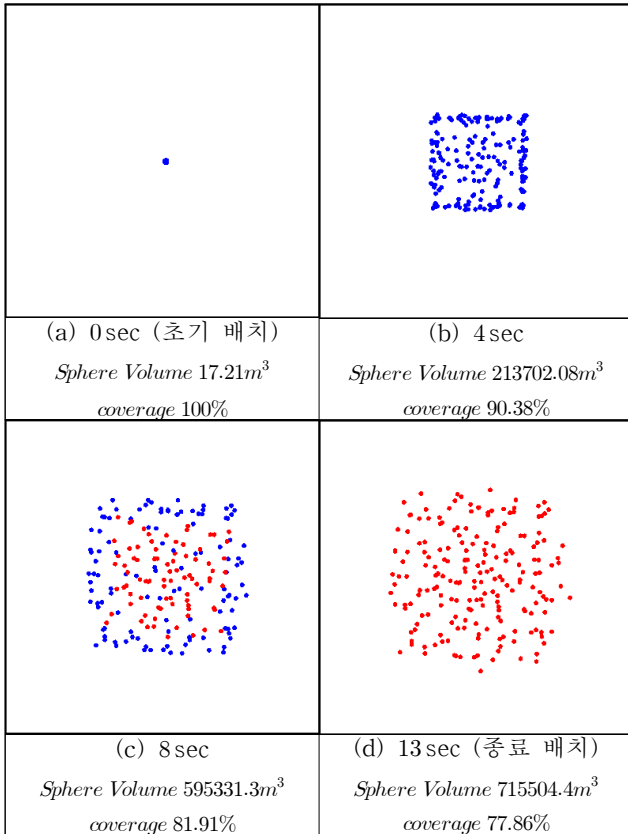


그림 1. 센서노드들의 자율 배치 변화 모습

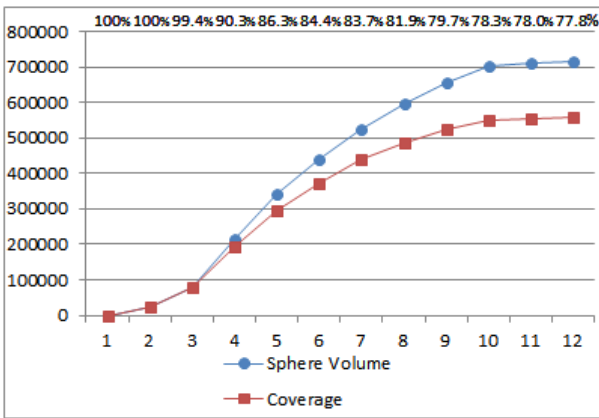


그림 2. 시간에 따른 ROI변화 모습과 Coverage

즘에 대해 시험하였다. 이를 위해 지면에 싱크노드를 배치하고 센서들의 초기 좌표를 그 위 60m 지점에서 랜덤하게 설정하였다. 센서노드들 중에서는 싱크노드와 통신 가능한 센서노드를 하나 추가하며, 센서노드의 수는 200개로 설정하였다.

모든 센서노드들은 $R_c = 20m$, $R_s = 10m$, $R_d = 10m$ 의 값을 가진다고 설정하였다. R_c 는 센서노드들의 통신 반경이고, R_s 는 센싱하여 얻을 수 있는 센싱 반경, 그리고 R_d 는 장애물이나, 경계면을 검출하여 거리 값을 얻을 수 있는 센서노드의 반경이라 할 때 본 논문에서는 지면을 3차원 공간에서의 경계면으로 설정하여 실험 하였다.

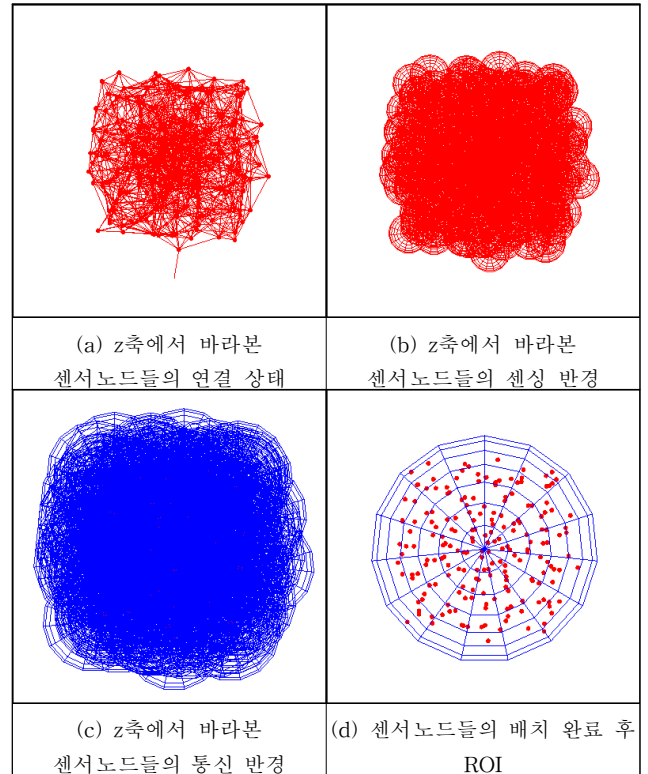


그림 3. 센서노드 배치 완료 후 모습

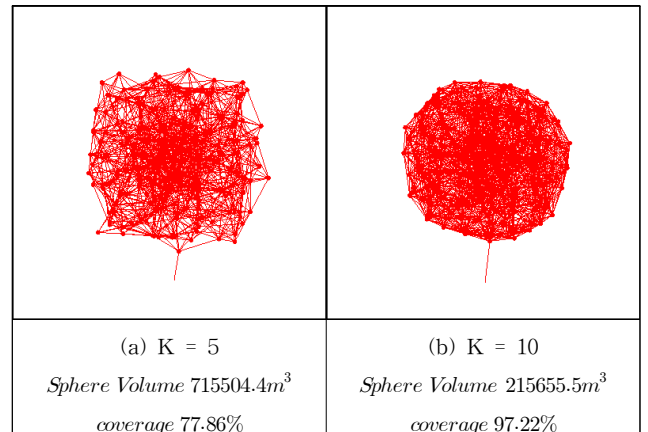


그림 4. Connectivity K 값에 의한 연결 모습

각 자율배치 되는 한 사이클의 시간은 1sec로 설정 하였으며, 한 사이클 동안 센서노드의 최대 이동거리는 0.5m로 설정하였다. 커버리지 성능지표는 다음 식 (8)과 같이 정의된다.

$$coverage(\%) = \frac{\bigcup_{i=1}^N A_i}{A} \quad (8)$$

이때, A_i 는 센서노드 i 에 의해 커버되는 지역(부피)이며 $\frac{4}{3}\pi R_s^3$ 으로 계산되고, N 은 전체 센서노드의 개수이고 A 는 (표 1)에서의 Sphere Volume 이다.

(그림 1)은 센서노드의 자율배치되는 과정이다. 녹색은 센서노드가 이동할 수 있는 상태이며, 붉은색은 센서노드가 평형 상태에 도달하여 이동을 종료한 상태이다. (a)의

그림은 초기 센서노드가 배치되어진 상태이며, (b)의 그림은 배치 과정 중, (c)의 그림은 배치 과정 중 센서노드의 이동 상태 유무를 보이고 있다. 마지막으로 (d)의 그림은 센서노드 모두가 배치를 완료하고 종료한 그림이다.

(그림 2)는 시간 변화에 따른 *Sphere Volume* 부피의 변화량을 보여주면서 *coverage*를 나타내고 있다.

실험에서의 최종 *Sphere Volume*는 $715504.4m^3$ 이며 *coverage*는 77.86%로 나타났다. 센서노드의 R_s 가 10m이므로 센싱 반경의 부피는 약 $4186.6m^3$ 가 된다. 그로인해서 *Sphere Volume*의 부피에 의한 가장 이상적인 센서노드의 개수는 약 170개이다.

(그림 3)은 센서노드들의 자율배치 완료 후 (a)센서노드들의 연결, (b)센서노드들의 센싱 반경, (c)센서노드들의 통신반경 그리고 (d)*Sphere Volume*의 모습을 보여 주고 있다.

(그림 4)은 센서노드들의 연결성을 보장하기 위해 사용한 K 값에 의한 센서노드들의 통신 연결 모습을 보여주고 있다. K 값은 수식 (3) F_{deg} 에 적용이 되어 이웃 센서노드와의 연결된 개수를 최소한 보장하도록 인력을 작용시킨다. (그림 4)에서 (a)는 K 의 값이 5인 경우이고, (b)의 그림은 10인 경우이다. (b)의 그림을 보면 이웃 노드의 개수를 맞추기 위해 인력이 많이 적용되어 *Sphere Volume*의 부피가 (a)보다 작은 것을 보이고 있지만 (a)보다는 확실한 통신 연결성을 보장함을 알 수가 있었다.

5. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 기존 연구와는 달리 3차원 공간에서의 센서노드들의 배치되는 알고리즘을 제시하고 실험을 통해 이의 결과를 제시하였다.

향후에는 본 논문에서 설정한 *Sphere Volume*의 부피에 맞는 가장 이상적인 센서노드의 개수만 필요하도록 새로운 개선방법을 개발하여 향상된 결과를 제시할 것이다.

참고문헌

- [1] A. Howard, M. J. Mataric, and G. S. Sukhatme, "Mobile Sensor Network Deployment Using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to The Area Coverage Problem," *The 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS02)*, June 2002.
- [2] S. Poduri and G. S. Sukhatme, "Constrained coverage for mobile sensor networks", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 165-172, May 2004.
- [3] Heon-Jong Lee, Yong-hwan Kim, Youn-Hee Han, Chan Yeol Park, "Centroid-based Movement Assisted Sensor Deployment Schemes in Wireless Sensor Networks," *70th Vehicular Technology Conference Fall*

(VTC 2009-Fall), pp.1-5, Sep., 2009.