

이동 센서 네트워크에서 개선된 포텐셜 필드를 사용한 자율 배치 방법

준회원 이 헌 중*, 김 용 환*, 종신회원 한 연 희*, 정회원 정 영 식**

A Self-Deployment Scheme Using Improved Potential Field in Mobile Sensor Networks

Heon-Jong Lee*, Yong-hwan Kim* *Associate Members*, Youn-Hee Han*^o *Lifelong Member*
Young-Sik Jeong** *Regular Member*

요 약

센서들은 최대 관찰영역 확보, 신뢰성 있는 데이터 획득, 센서의 효율적 자원관리 등을 위하여 최적의 위치에 배치되어야 한다. 전통적인 고정형 무선 센서 네트워크에서는 미개발 지역, 군사 지역, 재난 지역 등의 경우에는 사람이 직접 센서를 배치하는 것이 불가능하다. 따라서 이러한 경우 각 센서가 이동 능력을 겸비하고 있다면 스스로 주변 센서들의 위치를 인식하고 그 정보를 활용하여 전체 영역을 관찰할 수 있다. 우리는 이전 연구를 통해 각 센서가 이웃의 위치 좌표를 통해 계산된 보로노이 다각형의 중심으로 이동하는 것이 높은 커버리지 확보에 효율적임을 보인 바 있다. 본 논문에서는 보로노이 다각형의 중심을 활용하는 방안과 전통적인 포텐셜 필드 방식에 의한 센서 움직임 방법을 접목하여 보다 향상된 자율 배치 방법을 제안한다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 제안한 센서 자율 배치 방법이 단순하게 포텐셜 필드만을 활용하였을 때 보다 적은 이동으로 빠른 시간 안에 높은 커버리지를 확보함을 보인다.

Key Words : Mobile Sensor Networks, Self-Deployment, Potential Field, Voronoi Diagram, Centroid

ABSTRACT

Sensor deployment makes an effect on not only covering of the interesting area but also reliable data acquisition and efficient resource management of sensor, so that sensors must be deployed at their better place. In traditional static wireless sensor networks, however, it is impossible to deploy the sensors manually when they are distributed in unexploited, hostile, or disaster areas. Therefore, if each sensor has locomotion capability, it can re-deploy itself using the location information of neighbor sensors. In our previous study, we showed that moving sensors to the centroids of their Voronoi polygon is efficient for extending the coverage area. In this paper, we present an improved potential-field-based sensor self-deployment scheme by combining the centroid of Voronoi polygon with the traditional potential-field scheme. Simulation results show that our scheme can achieve higher coverage in shorter time and less movement than the traditional potential-field scheme.

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부) 재원의 한국연구재단(2009-0076098) 및 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과입니다.

* 한국기술교육대학교 첨단기술연구소(iwantwine@kut.ac.kr, cherish@kut.ac.kr, yhhan@kut.ac.kr)(^o:교신저자)

** 원광대학교 컴퓨터공학과(hong@paper.korean.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-10-509, 접수일자 : 2009년 11월 2일, 최종논문접수일자 : 2010년 1월 19일

I. 서론

전통적인 고정형 무선 센서 네트워크(WSNs)는 많은 수의 작은 저전력 센서 노드들이 특정 상황을 감지하거나 정보를 수집하여 무선 애드 혹 통신으로 싱크 노드까지 그 정보를 전송하는 네트워크이다. 이런 무선 센서 네트워크는 감시와 위치 파악 및 추적 같은 군사용 목적 이외에도 의료 복지, 생태 파악, 재난 감시, 기후 연구 등 점차 그 사용분야가 확대되고 있다^{[1][2]}. 이러한 많은 응용 분야에서 활용되는 센서 네트워크는 우선적으로 네트워크가 설치된 관심 영역(Region of Interest, ROI)을 최대한 관측(cover)할 수 있도록 잘 배치될 필요가 있다^[3]. 센서의 배치는 센서 네트워크의 관심 영역 최대 확보뿐만 아니라 신뢰성 있는 데이터 획득, 자원이 제한적인 센서의 효율적 관리에 많은 영향을 주기 때문에 각 센서들은 주어진 목적에 맞게끔 최적의 위치에 배치되어야 한다.

그러나 미 개발지역이나 군사 지역 또는 재난 지역에서의 센서 배치는 사람이 직접 센서들을 배치하기 어렵다. 따라서 이러한 경우 항공기 등을 이용하여 센서를 공중에서 뿌리는 방법을 활용할 수 있는데, 이러한 방법을 사용하면 센서가 배치되는 장소들이 무작위로 분포되어서 관심 영역의 커버리지(coverage) 확보가 효율적으로 되기 어렵다^[4]. 따라서 센서가 센싱, 계산, 통신하는 능력 이외에도 스스로 이동할 수 있는 능력을 겸비하고 있다면 스스로 주변 센서와 환경을 인식하고 그 정보들을 활용하여 빠른 시간 안에 적은 움직임으로 전체 영역을 관찰할 수 있도록 하는 자가 배치를 활용하여 관심 영역의 커버리지를 최대한 확보할 수 있다. 특히, 최근에는 센서 네트워크를 로봇 집단에 활용하려는 연구^[5]가 시작되었으며 그러한 로봇 집단들은 이동능력을 자체적으로 겸비하고 있기 때문에 이동 센서 네트워크가 구성되는 시나리오는 앞으로도 많이 출현할 것으로 기대된다.

센서 자율 배치문제는 관심 영역이 주어졌을 때, 어떻게 빠른 시간에 적은 움직임으로 센서 커버리지를 최대화 할 것인가에 관한 문제이다. 가장 널리 알려진 센서(또는 로봇 집단)의 배치 방식으로는 이웃 센서와의 상대적 거리를 힘으로 표현하는 포텐셜 필드(Potential Field)^[6]를 활용하는 방식이 있다. 또한 공간 분할 기법으로 널리 쓰이는 보로노이 다이어그램(Voronoi Diagram)^[7]을 활용하여 관심 영역을 얼마나 잘 관찰하는가는 확인하고, 이를 개선

하기 위해 이동하는 방법도 널리 사용된다.

본 논문에서 센서의 자율 배치 문제를 해결하기 위해 제시하는 알고리즘은 포텐셜 필드와 보로노이 다이어그램을 동시에 활용한다. 우리는 이전 연구를 통해 각 센서가 이웃의 위치 좌표를 통해 계산된 보로노이 다각형(Voronoi Polygon, VP)의 도심(centroid, 또는 질량중심)으로 이동하는 것이 높은 커버리지 확보에 효율적임을 보인 바 있다^[8]. 본 논문에서는 보로노이 다각형의 도심을 포텐셜 필드 기반의 자율 배치방식에 접목시켜 보다 향상된 자율 배치 방식을 제안한다. 기존의 포텐셜 필드 방식에서는 각 센서가 마치 자석입자처럼 서로를 밀어내는 힘만 작용하여 퍼짐으로써 센서를 재배치하였지만, 제안하는 방식에서는 기존의 척력과 보로노이 다각형의 도심으로 향하는 힘을 동시에 적용하여 보다 빠른 시간 안에 적은 움직임으로 전체 네트워크의 커버리지를 확장한다. 그리고 시뮬레이션을 통해 커버리지, 배치 시간, 평균 이동거리 등을 기존의 포텐셜 필드 방식과 비교 하여 제안된 알고리즘이 보다 우수한 성능을 가지고 있음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 이동 센서 네트워크에서의 자율 배치 문제와 관련된 연구를 살펴보고, 3장에서는 본 논문에서 다루고자 하는 자율 배치 문제를 정의하고 문제를 풀기 위한 가정을 기술한다. 4장에서는 포텐셜필드와 보로노이 다이어그램을 사용한 자율 배치 방식을 제안하고, 5장에서는 시뮬레이션을 통해 제안된 방법과 기존의 포텐셜 필드 방식을 비교 평가한다. 그리고 6장에서는 본 논문의 결론을 기술한다.

II. 관련 연구

기존 연구 [6]에서는 로봇 공학 분야에서 널리 알려진 포텐셜 필드를 적용하여 모여 있던 센서들이 스스로 퍼져 센서 네트워크의 관측가능한 지역이 최대화 되는 알고리즘을 제시하였다. 센서끼리 또는 센서와 장애물끼리는 척력(Repulsive Force)이 발생한다고 가정하고 그 힘을 이용해 센서들을 네트워크에 골고루 퍼지도록 분산시키되, 척력과 반대되는 마찰력이 작용하여 센서들을 움직이지 않는 정적 평형상태(Static Equilibrium)에 도달하도록 하였다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 [6]에서 제시된 것을 기본적으로 활용하지만 단순히 퍼져나가는 것이 아니라 지역적인 커버리지를 최대화하는 방향으로 각 센서들을 유도한다는 점이 다르다.

기존 연구 [7]에서는 보로노이 다이어그램을 활용한 자율 배치 알고리즘을 제시하였다. 먼저, 임의의 관심 지역에 대하여 이동 시간, 센서의 이동 거리, 메시지의 복잡성을 최소화 하면서 센서들이 관심 지역을 최대한으로 관측할 수 있는가에 관한 문제를 제기하였다. 이를 해결하기 위해서는 센서에 의하여 관측되지 않는 커버리지 결함(Coverage Hole)을 찾고 이를 관측할 수 있도록 센서를 적절하게 이동시켜야 한다고 언급하였다. 이와 관련하여 3가지 방법, VEC(VECTor-based Algorithm), VOR(VORoni-based Algorithm), Minimax 방식을 제시하였다. 각각의 방법은 각 단계마다 이웃 센서들의 위치정보를 획득하여 보로노이 다각형을 그린 이후 그 다각형에서 커버리지가 확보되지 않은 지역을 최소화하는 방향으로 이동하는 방식을 반복한다. 그 중 VOR은 보로노이 다각형의 가장 먼 꼭짓점으로 향하며, Minimax는 보로노이 다각형의 외심(Circumcenter)을 향해 이동하는 방식으로 동작한다.

기존 연구 [8]에서도 [7]에서와 같이 보로노이 다이어그램을 기반으로 하여 센서 자율 배치 문제를 해결하였다. [8]에서는 센서들이 각 단계마다 이웃 센서의 위치 정보를 활용하여 보로노이 다각형을 구성하고 그 다각형의 도심(Centroid)로 향하여 이동하는 방식을 제안하였다. 보로노이 다각형의 도심은 보로노이 다각형 내부의 모든 점들의 평균위치라고 할 수 있다. 다시 말하면 도심은 임의의 한 센서의 보로노이 다각형의 각 꼭짓점까지의 거리 분산의 합이 최소가 되는 지점이며, 이 점으로 이동한다면 보로노이 다각형을 가장 잘 커버하는 위치가 되기 때문이다.

마지막으로 기존 연구 [9]는 센서의 자율 배치는 그 자체로 많은 에너지를 소비하기 때문에 이동거리를 최소화 하는 것뿐만 아니라 남아있는 에너지를 고려하여 이동하여야 한다고 언급하였다. 이 연구에서는 세 가지 알고리즘을 제시하였는데, 각 센서의 지역적 밀도(이웃 센서의 수)와 남아있는 에너지 잔량을 고려하여 이동의 정도를 달리함으로써 전체 네트워크가 균형 있게 배치 되도록 하였다.

III. 문제 정의

본 논문에서 제시하는 센서 자율 배치 문제는 다음과 같이 정의된다.

주어진 관심 영역에 센싱 반경이 R_s , 통신 반

경이 R_c 인 N 개의 이동 센서가 무작위로 배치되었을 때, 어떻게 빠른 시간 안에 적은 움직임(적은 에너지 소모)으로 전체 영역을 관측할 수 있도록 자율 배치할 것인가?

본 논문에서 위 문제를 풀기 위하여 몇 가지 가정을 하였다. 우선 모든 센서는 센싱, 통신, 계산, 이동할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 동일한 센싱 반경과 통신 반경을 가진다고 가정한다. 또한 센싱 반경의 모델링은 이진 센서 모델(Binary Sensing Model)^[10]을 사용한다. 이진 센서 모델은 센서의 센싱 반경 안에서 발생하는 이벤트를 올바르게 센싱할 확률은 1이고, 그 외의 지역은 0으로 이진화하는 방식이다.

또한 각 센서는 주변의 장애물을 파악할 수 있는 장치(예, 초음파 센서)를 장착하고 있어 임의의 θ 각도마다 전방의 장애물 위치를 파악한다. 장애물을 파악할 수 있는 거리의 한계는 모든 센서에 동일한 값으로 R_w 라고 가정한다. 즉, 예를 들어 R_w 는 초음파를 활용할 때 유효 거리(Effective Range)가 될 수 있다.

센서의 초기 배치는 무작위이며 관심 영역을 충분히 관측할 만큼의 센서가 배치된다고 가정한다. 또한 각 센서는 임의의 방법을 통하여 자신의 위치 정보를 알 수 있으며, 주기적인 비콘 메시지를 사용하여 이웃 센서(Neighbor Sensors)의 위치 정보를 획득하여 활용한다. 이때 이웃 센서란 임의의 센서 자신의 통신 반경 R_c 내부에 위치하는 주변 센서들을 의미한다.

본 논문에서는 다음 세 가지 성능 지표(Performance Metrics)로 자율 배치 알고리즘의 성능을 평가한다.

3.1 커버리지(coverage)

커버리지는 네트워크 전체의 성능을 평가하는 가장 중요한 지표이다. 이는 전체 관심 영역의 임의의 한 지점이 적어도 한 센서에 의해 관찰되는 정도를 의미한다. 이를 식으로 표현하면,

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

이때, A_i 는 센서 i 에 의해 커버되는 지역으로 πR_s^2 으로 계산되며, N 은 전체 센서의 개수, A 는 관심 영역의 넓이다.

3.2 이동 거리(Moving Distance)

이동 거리는 최초에 각 센서들이 무작위로 배치된 이후에 최종 위치까지 이동하는 센서 당 평균 누적 거리를 의미한다. 센서의 이동은 많은 에너지를 직접적으로 소비하게 하기 때문에 최대한 짧은 거리로 움직여 센서의 수명을 연장하여야 한다.

3.3 배치 시간(Deployment Time)

배치 시간은 최초에 센서들이 무작위로 배치된 이후에 모든 센서들이 최종 위치에 도달하는데 까지 걸린 시간을 의미한다. 배치 시간도 센서 네트워크의 배치 문제의 성능을 평가하는 중요한 지표이다. 특히 긴급 인명 구조나 재난 상황에서는 더욱 그러하다⁹⁾. 본 논문에서 지표로 하는 배치 시간에 관한 보다 자세한 내용은 4장에서 설명한다.

IV. 제안하는 센서 자율 배치 방법

본 장에서는 포텐셜필드와 보로노이 다각형의 도심을 사용한 센서 자율 배치 방법을 설명한다. 우선 [8]에서 제안하였던 보로노이 다각형의 도심을 활용한 배치 방법을 소개하고 보로노이 다각형의 도심을 포텐셜 필드 기반 배치 방식에 적용하여 보다 우수한 성능의 개선된 포텐셜 필드 기반 자율 배치 방법을 제시한다.

4.1 도심(Centroid) 기반 배치 방법

앞에서도 언급했듯이, 보로노이 다이어그램(Voronoi diagram)은 기하학 등에 많이 사용되는 지역 분할 방식으로 이웃들과의 선분을 이등분한 선들로 이루어진 다각형의 집합을 의미한다. 보로노이 다각형의 특성상 한 보로노이 다각형 내부의 임의의 지점은 이웃한 센서보다 그 다각형 내부의 센서와 거리가

가장 가까우므로, 다각형 내부의 센서는 그 다각형을 최대한 센싱 해야 하는 의무가 있다. 따라서 보로노이 다각형의 도심으로 이동하는 것이 지역적으로 커버리지를 가장 많이 확보할 수 있는 방법이다. 그림 1은 단계별로 각 센서가 계산한 도심으로 이동하여 네트워크의 커버리지가 점차 증가하는 모습을 보여준다.

n 개의 꼭짓점 (x_i, y_i) 을 가진 다각형에서 도심 (C_x, C_y) 은 다음과 같은 식으로 구한다.

$$C_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i),$$

$$C_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$$
(2)

여기서 A 는 다각형의 면적으로써 다음과 같이 구한다.

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$$
(3)

그림 2와 그림 3은 도심을 활용한 방식과 [7]에서 제시한 VOR, Minimax 방식을 본 연구에서 직접 작성한 시뮬레이터를 이용하여 그 성능을 비교한 결과를 보여준다. 최초에 30개의 센서를 50m × 50m 관심 지역에 임의로 배치시킨 후 알고리즘의 진행 라운드별로 네트워크 커버리지와 평균 누적 이동거리를 산출하여 비교하였다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이, [8]에서 제시한 Centroid 방식이 [7]에서 제시한 방식보다 넓은 커버리지를 빨리 확보한다. 또한 [7]에 제시한 방식 중 가장 높은 커버리지를 보이는 Minimax와 Centroid 방식을 비교하면 커버

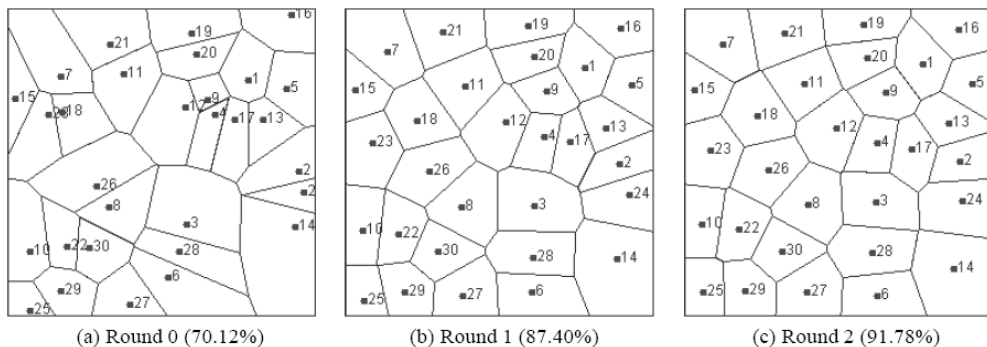


그림 1. Centroid 알고리즘에 의한 각 센서의 자율 이동 및 커버리지 증가 모습

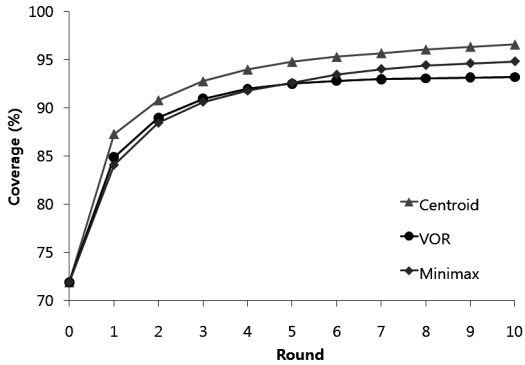


그림 2. 30개의 센서를 50m×50m에 배치했을 때의 단계별 커버리지

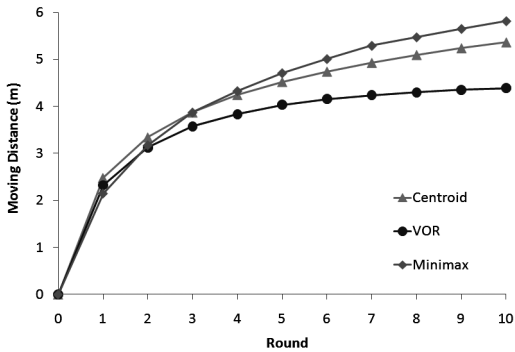


그림 3. 30개의 센서를 50m×50m에 배치했을 때의 단계별 누적 평균 이동거리

리지를 더욱 확보하면서도 평균 이동 거리도 크지 않다는 것을 볼 수 있다. 따라서 각 센서들이 자신들의 보로노이 다각형의 도심으로 이동하는 것은 네트워크 커버리지를 확보하는 데에 많은 도움을 준다는 것을 확인할 수 있다. 이 실험 결과에 대한 보다 자세한 사항은 [8]에서 볼 수 있다.

본 논문에서는 이러한 보로노이 다각형의 도심을 활용한 방식의 장점을 취하여 포텐셜 필드 방식에 접목하였다.

4.2 개선된 포텐셜 필드 기반 배치 방법

4.2.1 가상의 힘(Virtual Force)

포텐셜 필드는 장애물이나 이웃 센서까지의 상대적인 거리에 따라 가상의 반발력이 작용하여 서로 밀쳐내면서 센서 네트워크의 커버리지를 넓히는 방식이다. [6]은 센서들이 초기에 한 곳에 모여 있다는 가정을 하고 서로 밀어내면 전체 영역으로 퍼져 나갈 것이라 생각하였다. 하지만 초기 배치가 무작

위인 경우, 센서들은 단순히 서로 밀어내어 퍼지는 것 외에도 좀 더 지능적으로 커버리지가 닿지 않는 커버리지 결함(Coverage Hole)영역으로 다가가는 이동 요인이 동시에 필요할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 개선된 포텐셜 필드 기반 배치 방법에서는 커버리지 확보에 우수한 성능을 보였던 도심으로 향하는 이동과 기존의 포텐셜 필드 방식을 동시에 사용하여 센서들이 퍼져나가되 커버리지를 잘 확보하는 방향으로 이동하도록 하였다.

제안하는 방법은 총 3가지의 가상의 힘(Virtual Force)을 활용한다. 주변의 외곽 장애물로부터의 반발력 F_{obs} , 이웃 센서로부터의 반발력 F_{nei} , 보로노이 다각형의 도심으로 끌어당기는 인력 F_{att} 가 그것이다. 각각은 장애물, 이웃 센서 또는 도심까지의 상대적인 거리에 따라 그 크기가 결정되며, 세 힘의 합력 F 에 의해 센서가 이동하게 된다.

$$F = F_{obs} + F_{nei} + F_{att} \quad (4)$$

그림 4는 세 개의 가상의 힘과 합력 F 를 보여주고 있다. 여기서 점 C 는 센서 o 의 보로노이 다각형(Voronoi Polygon, VP)의 도심이다. 각 이웃 n 으로부터의 반발력과 장애물로부터의 반발력, 도심 cen 에서의 끌어당기는 힘을 합력하여 F 가 계산되며 이 힘에 의해 다음 위치 o' 가 유도된다. 이때 만약 현재 자신의 보로노이 다각형 전 영역이 센서 o 의 센싱 영역내부에 속하게 되어 그 영역 모두가 관측 가능하다면 그 영역의 도심은 현재 자신의 위치와 비슷할 가능성이 많으므로 도심을 계산하지 않고 F_{obs} 와 F_{nei} 의 합력으로 계산한다. 그렇지 않을 경우에는 식 (2)와 (3)을 활용하여 도심을 구한 뒤,

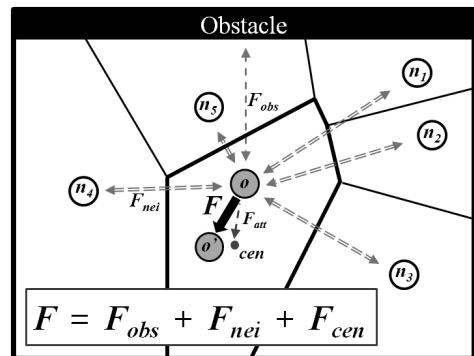


그림 4. 개선된 포텐셜 필드 기반 배치 방법의 가상의 힘

그 곳으로 센서를 끌어당기는 힘인 F_{att} 을 발생시키고 F_{obs} 와 F_{nei} 과 합하여 전체 힘 F 를 구한다.

각 가상의 힘을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$F_{obs} = -K_{obs} \sum_i \frac{1}{r_i^2} \cdot \frac{\mathbf{r}_i}{r_i} \quad (5)$$

$$F_{nei} = -K_{nei} \sum_i \frac{1}{r_i^2} \cdot \frac{\mathbf{r}_i}{r_i} \quad (6)$$

$$F_{att} = \begin{cases} K_{att} \cdot r^2 \cdot \frac{\mathbf{r}}{r} & \text{if Voronoi polygon} \\ & \text{is not fully covered;} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

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 ($\mathbf{r}_i = x_i - x$). 식 (7)의 r 은 도심의 위치(x_c)와 현재 센서의 위치(x)와의 유클리디안 거리이며, \mathbf{r} 은 도심의 위치와 현재 센서 위치와의 벡터 차이이다($\mathbf{r} = x_c - x$). 또한 각 힘에서 사용되는 K_{obs} , K_{nei} , K_{att} 는 F 를 실제 값으로 조율하기 위한 상수이다.

임의의 센서가 전체 힘 F 를 식 (4)-(7)을 사용하여 구한 이후 이 센서의 가속도는 다음 식 (8)을 활용하여 구한다.

$$a(t) = \left(\frac{F - \nu V}{m} \right) \quad (8)$$

이 때, ν 는 제동력(damping factor)으로써 센서를 정적 평형 상태로 유도하는 값이며, m 은 센서의 질량으로 시뮬레이션 상에서는 1로 가정한다. V 는 속도로 물리적인 한계를 고려하여 시뮬레이션 상에서는 최대값과 최소값을 사전에 정의한다.

4.2.2 상수 K_{obs} , K_{nei} , K_{att} 의 값 산출

본 절에서는 앞에서 살펴본 가상의 힘에 사용된 각 상수를 유도하는 방법을 기술한다. 우선 K_{nei} 를 구하기 위하여 두 센서 x_i, x_j 가 서로 가까이 붙어 있다가 반발력에 의해 멀어지는 상황이라고 가정하자. 만약 두 센서 사이의 거리가 $2R_s$ 이상이 된다면 이동을 계속 하더라도 더 이상 전체 커버리지에 이득은 없다. 따라서 두 센서 사이의 거리가 $2R_s$ 이 되는 지점에서는 힘이 0이다. 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$d = 2R_s, \|F_{nei} - \nu V\| = 0 \quad (9)$$

$$\left\| \left(\frac{-K_{nei}}{(2R_s)^2} \right) \cdot \left(\frac{x_i - x_j}{2R_s} \right) - \nu V \right\| = 0 \quad (10)$$

위 식을 풀면 K_{nei} 를 구할 수 있다.

한편, K_{obs} 를 구하기 위하여 센서 x_i 와 장애물 x_j 가 서로 가까이 붙어 있다가 반발력에 의해 센서가 멀어지는 상황이라고 가정하자. 이번에는 센서 x_i 와 장애물 x_j 사이 거리가 R_s 가 될 때 같은 이유로 힘이 0이 될 수 있다. 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$d = R_s, \|F_{obs} - \nu V\| = 0 \quad (11)$$

$$\left\| \left(\frac{-K_{obs}}{R_s^2} \right) \cdot \left(\frac{x_i - x_j}{R_s} \right) - \nu V \right\| = 0 \quad (12)$$

위 식을 풀면 K_{obs} 를 구할 수 있다.

K_{att} 는 보로노이 다각형의 도심까지의 상대적인 거리에 직접 곱해지므로 K_{obs} 나 K_{nei} 보다는 상대적으로 작다. 도심에서 끌어당기는 힘이 너무 크다면 센서가 관심 영역을 순간적으로 이탈하게 되는 값이 산출될 수 있으므로 적절한 값이 필요하다. 본 논문에서는 실험에 의해 그 값을 경험적으로 결정한다.

4.2.3 이동 조정

본 논문에서 제안하는 방식에서는 F 로부터 유도된 다음 위치로 바로 이동하지 않고 현재 위치와 계산된 다음 위치 중 어느 곳이 커버리지에 더 이득이 있는지 판단한 뒤 이동한다. 현재 위치가 계산된 다음 위치보다 커버리지 확보 측면에서 더 좋다면 불필요한 이동을 할 필요가 없기 때문이다. 이는 이동 거리를 최소로 줄여 에너지 효율을 높일 뿐만 아니라 센서가 같은자리를 반복해서 이동하는 불필요한 진동(oscillation)을 억제할 수 있다. 커버리지 이득의 여부는 보로노이 다각형을 사용하여 판단한다. 현재 이웃 센서들의 위치정보로 그려진 보로노이 다각형과 현재 위치에서의 센싱 영역 및 계산된 다음 위치에서의 센싱 영역을 비교하여 더욱 많은 영역이 현재의 보로노이 다각형과 겹쳐지는 위치가 커버리지 측면에서 이득인 위치이다. 만약 현재 위치가 새롭게 구한 위치보다 커버리지 이득 측면에서 더 좋다면 그 새로운 위치로 이동하지 않고 현 위치를 유지한다. 센서들의 위치가 자율적으로 계속

하여 변하기 때문에 다음 주기에서는 현 위치를 유지하던 센서가 다시 새로운 위치로 이동할 수 있다.

4.2.4 배치의 종료

센서가 자신의 이동을 멈추는 때를 설정하는 것은 중요한 문제이다. 본 논문에서는 모든 센서가 다음의 두 가지의 경우 중 한 가지에 도달하였을 때를 배치 종료로 보고 모든 센서가 스스로 배치 종료할 때까지의 시간을 배치 시간으로 정하였다. 모든 센서가 배치 종료된다는 것은 각 센서가 스스로 평형 상태(Equilibrium State)에 진입한 것으로 볼 수 있으며 이러한 평형 상태를 다음 두 가지의 경우로 나누어 판단한다.

- 평형 진동 상태 : 센서가 이동한 위치가 이전에 다녀갔던 위치인 경우라면 한 번의 ‘진동’이 되었다고 판단한다. 이후 연속해서 ‘진동’이 미리 설정된 $threshold_o$ 만큼 발생한다면 평형 상태에 진입한 상태에서의 진동이라고 판단하고 자율 배치 이동을 종료한다.
- 평형 중지 상태 : 센서가 일정 시간동안 이동한 거리가 기준 거리보다 작다면 한 번의 ‘이동 중지중’이라고 판단한다. 이러한 ‘이동 중지중’이 미리 설정된 $threshold_e$ 만큼 계속된다면 평형 상태에서 이동이 중지되는 것이라고 판단하고 자율 배치 이동을 종료한다.

위에서 각각의 임계값 ($threshold_o$, $threshold_e$)은 실험에 의해 결정하였다.

본 논문에서 제안하는 개선된 포텐셜 필드 기반 센서 자율 배치 알고리즘을 기술하면 표 1과 같다. 이 알고리즘은 각 센서가 수행하는 분산 알고리즘으로서 위에서 제시한 두 가지 중 하나의 평형 상

표 1. 개선된 포텐셜 필드 기반 센서 자율 배치 알고리즘

Notation:	
N :	자신의 이웃 센서 위치 저장 장소
O :	감지된 장애물 위치 저장 장소
D :	자신의 누적 이동 거리 저장 장소
L :	자신의 각 이동 위치 저장 장소(초기 위치 저장됨)
$G_p(x,y)$:	자신의 위치 (x, y) 에서의 보로노이 다각형
$S(x,y)$:	자신의 위치 (x, y) 에서의 센싱 영역
$threshold_o$, $threshold_e$:	미리 정의된 임계값
$O_{count} = 0$, $E_{count} = 0$	
Procedure(종료하기 전까지 반복):	
(1) 준비 단계	
(1.1)	자신의 위치 정보 (x, y) 를 획득하고 L 에 저장하며 이웃 센서들에게 알림(비콘사용)
(1.2)	이웃 센서들의 정보를 받아 N 에 저장
(1.3)	장애물의 위치를 획득하여 O 에 저장
(2) 힘 계산	
(2.1)	N 과 O 를 활용하여 F_{obs} 와 F_{nei} 계산
(2.2)	보로노이 다각형 $G_p(x,y)$ 를 그림
(2.3)	만약 $G_p(x,y) \subset S(x,y)$ 가 아니면 도심을 구하고 F_{att} 계산. 그렇지 않으면 $F_{att} = 0$
(2.4)	구한 모든 힘을 합산 하여 F 계산
(2.5)	F 로부터 다음 이동 위치 (x', y') 를 계산
(3) 이동 조정	
(3.1)	만약 $G_p(x,y) \cap S(x,y) > G_p(x,y) \cap S(x',y')$ 이동하지 않음. 단계 (1)부터 다시 수행
(4) 종료 판단 및 이동	
(4.1)	연속해서 L 에 저장된 최근 위치로 이동한다면 평형상태 진동으로 판단하고 $O_{count}++$. 만약 $O_{count} \geq threshold_o$ 이면 알고리즘 수행 종료
(4.2)	연속해서 D 에 저장된 누적 이동 거리가 미리 정한 기준보다 작다면 평형 상태에서의 이동 중지중으로 판단하고 $E_{count}++$. 만약 $E_{count} \geq threshold_e$ 이면 알고리즘 수행 종료
(4.3)	위 종료 조건을 통과하면 (x', y') 로 이동 후 이동거리를 D 에 저장. 단계 (1)부터 다시 수행

태가 될 때까지 주기적으로 반복하여 수행된다. 그림 5는 제안 알고리즘을 적용한 센서의 이동 모습 스냅 그림이다. 25개의 센서를 60m×60m의 지역에

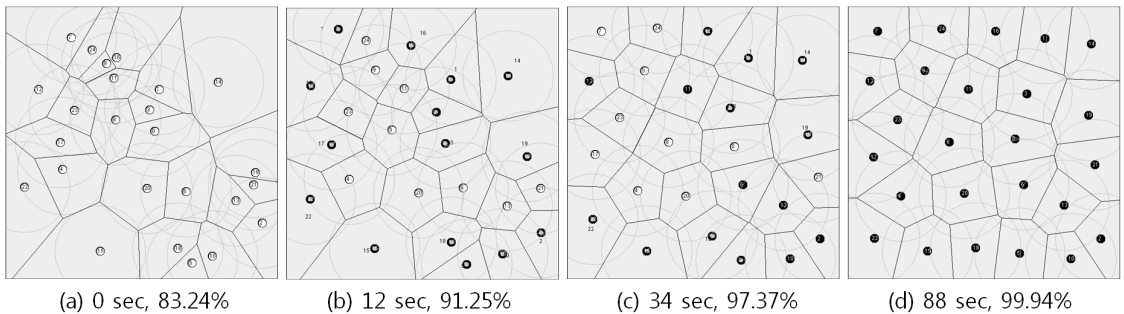


그림 5. 제안 알고리즘에 의한 센서 이동 모습. ○: $F = F_{obs} + F_{nei}$ 인 센서, ●: $F = F_{obs} + F_{nei} + F_{att}$ 인 센서, ●: 배치 종료된 센서

무작위로 투여하였으며 R_s 는 10m, R_c 는 20m이다. (a)에서 (d)로 배치 시간이 경과함에 따라 센서들이 처음 보다 점점 균일하게 배치되어 전체 네트워크의 커버리지가 증가하는 것을 볼 수 있다.

V. 실험 및 분석

본 논문에서는 [6]의 포텐셜 필드 기반의 배치 방법과 제안하는 방법의 성능을 비교하여 그 성능을 분석한다. 실험을 위해 그림 6과 같은 시뮬레이터를 직접 제작하여 활용하였다.

5.1 시뮬레이터 구조

시뮬레이터는 그림 7과 같이 크게 사용자 인터페이스(User Interface), 장애물 처리기(Obstacle Manager), 노드 핸들러(Node Handler), 센서 노드(Sensor Node), 뷰어(Viewer)의 다섯 부분으로 구성된다.

사용자 인터페이스는 사용자에게 관심 영역의 지형 제어와 센서 네트워크 시뮬레이션을 위한 제어

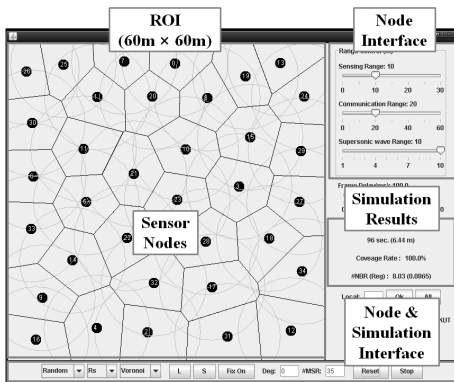


그림 6. 본 논문에서 사용하는 시뮬레이터의 모습

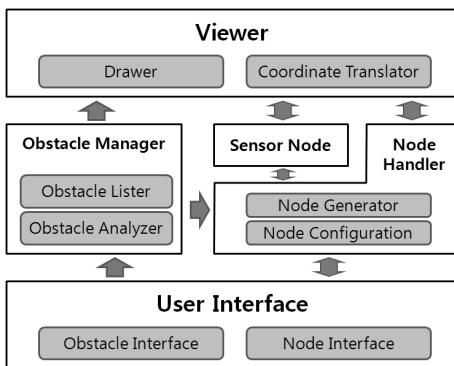


그림 7. 시뮬레이터 구조

를 제공한다. 특히 노드 인터페이스는 실제 노드 핸들러와 연결되어 센서들의 초기 설정 값들을 제어할 수 있는 부분으로 사용하고자 하는 배치 알고리즘의 선택, 센서의 초기 위치, 센서의 개수, 센싱 반경과 통신 반경 등을 설정할 수 있다. 노드 핸들러는 설정 값에 따라 센서 노드들을 생성하며, 실제 힘을 조율하기 위한 상수 값(K_{nci} , K_{obs} , K_{att})을 계산하고 센서들에게 전달한다. 실제 센서 노드는 정해진 매 시간마다 현재 자신의 위치 정보, 주변의 이웃 센서와 장애물의 위치 정보를 가지고 자신의 다음 위치를 계산하는 일을 수행한다. 뷰어는 센서의 위치 정보, 장애물의 위치 정보를 받아 사용자에게 계산된 결과를 그래픽하게 보여주는 역할을 수행한다. 또한 실제 네트워크의 커버리지를 계산하여 제공한다.

5.2 설정 값

각 센서의 R_w 는 10m, R_s 는 10m, R_c 는 20m로 설정한다. 이후에 통신 반경 따른 성능 변화를 분석하기 위해 R_c 를 14m~26m에서 그 값을 변경한다. 센서는 15~40개를 투여하며, 60m×60m 크기의 관심영역에 무작위 위치로 배치된다. 힘을 구할 때 사용하는 상수 값으로 ν 는 0.25, K_{att} 는 0.003으로 설정하였고 식 (9)~(12)에 의하여 K_{nei} 는 60, K_{obs} 는 15로 산출된 값을 활용하였다.

5.3 시뮬레이션 결과

5.3.1 커버리지, 배치시간, 이동거리

그림 8은 무작위로 센서들을 60m×60m 지역에 배치시키고 이동하지 않을 경우 센서 수에 따른 커버리지 증가를 나타낸 그림이다. 실험 결과 평균적으로 70개의 센서를 배치하였을 때 전체 네트워크의 커버리지는 99.68%를 나타냈다. 이는 본 논문

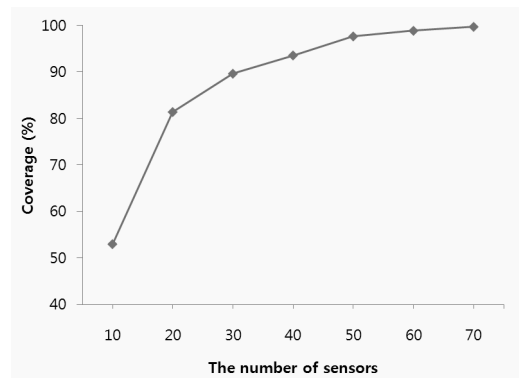


그림 8. 이동하지 않을 경우 센서 개수에 따른 커버리지의 변화

서 제시하는 자율 배치 방법을 사용한다면 25개의 센서로 도달할 수 있는 수치이다. 같은 지역에 센서의 개수가 많아진다면 센싱 영역에 불필요한 중복이 많아지고 트래픽 또한 증가하여 네트워크의 성능이 낮아질 수 있으므로 센서 스스로 이동하여 재배치하는 것이 효율적임을 알 수 있다.

그림 9는 센서 15개 또는 25개를 표준편차를 1로 하는 정규분포를 통해 관심 지역의 중간지점에 모여 있도록 초기 배치(초기 커버리지는 약 13%)한 뒤, 시간에 따른 커버리지의 변화를 나타낸 그림이다. 모든 경우에 있어서 제안한 알고리즘이 반발력만을 활용하는 포텐셜 필드 알고리즘 보다 빠르게 커버리지를 확보하며, 110초가 경과한 후에도 약간의 우위를 보이고 있다. 따라서 긴급 구조 같은 센서의 빠른 배치를 필요로 하는 상황에서는 보다 커버리지 확보 속도가 빠른 제안하는 알고리즘이 보다 유용하다고 할 수 있다.

그림 10은 60m×60m 지역에 센서의 수를 15에서 40으로 증가하여 배치 할 때 (a) 커버리지, (b) 배치시간, (c) 이동거리를 이전 알고리즘과 비교한 그림이다. 각각 센서 개수를 변화시켜 실험할 때마다 10번의 무작위 배치 상태를 만들어 수행하였으며 그러한 배치마다 5회 실험을 수행하여 평균치를 내었다. 그림 10 (a)에서 보듯이 배치된 센서의 개수가 적을수록 제안하는 알고리즘이 보다 높은 커버리지에 도달하는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 그림 10 (b), (c)에서 보이는 것처럼 대부분의 경우에 제안하는 알고리즘이 기존 포텐셜 필드 알고리즘보다 이동거리가 짧으며 배치시간도 짧은 것을 알 수 있다. 그 이유는 제안하는 개선된 포텐셜 필드를 사용한 자율 배치 알고리즘이 지역 정보 내에서 최대한 커버리지를 확보할 수 있는 도심으로 향하는 가

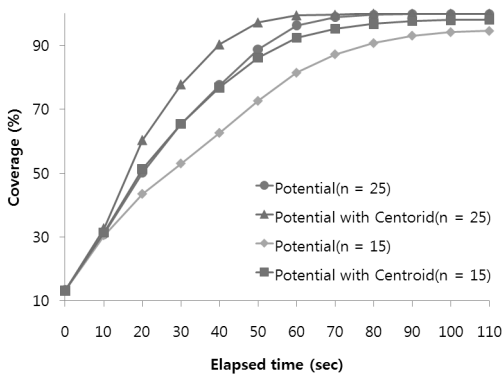
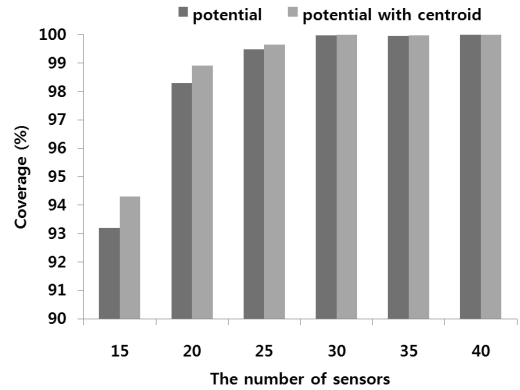
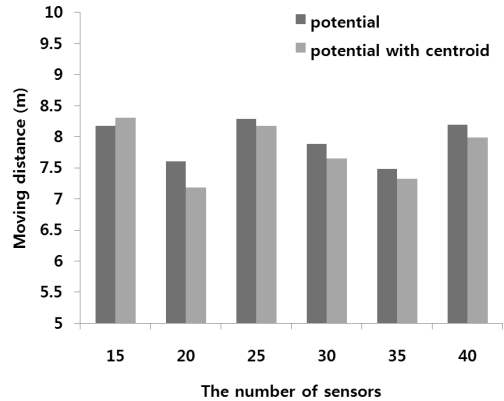


그림 9. 배치 시간 경과에 따른 커버리지 변화

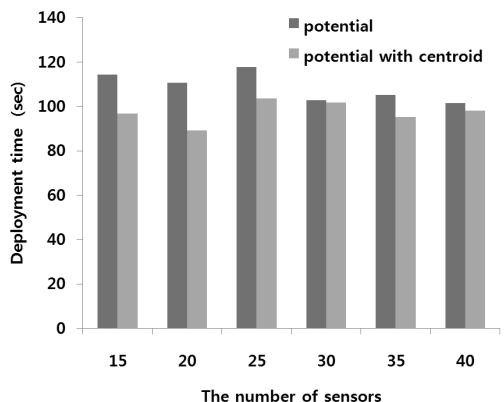
상의 힘을 활용하여 반발력만을 활용하는 포텐셜 필드 방식보다 커버리지를 확보하는 측면에서 최적의 경로로 이동하기 때문이다. 따라서 본 논문에서 제안하는 배치 방식이 기존 포텐셜 필드 방식보다



(a) 커버리지



(b) 이동거리



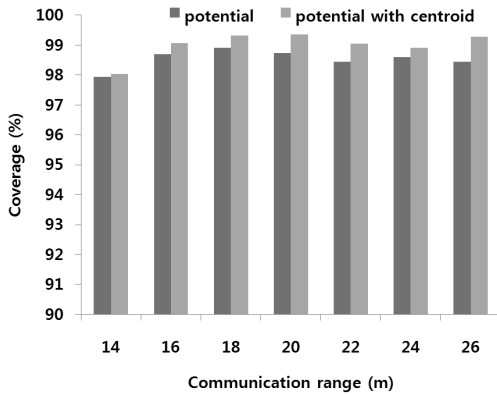
(c) 배치 시간

그림 10. 센서 개수 따른 성능의 측정(R_s : 10m, R_c : 20m)

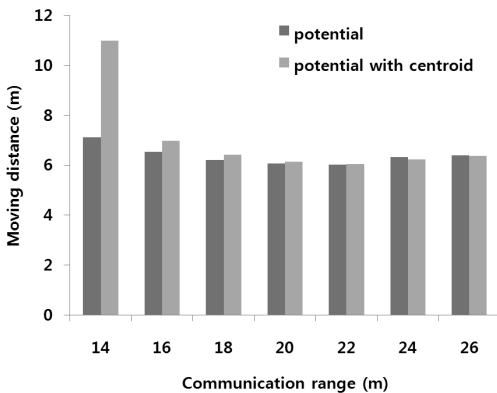
커버리지를 잘 확보할 뿐만 아니라 에너지를 효율적으로 활용하면서 빠르게 배치된다고 할 수 있다.

5.3.2 통신 반경의 영향

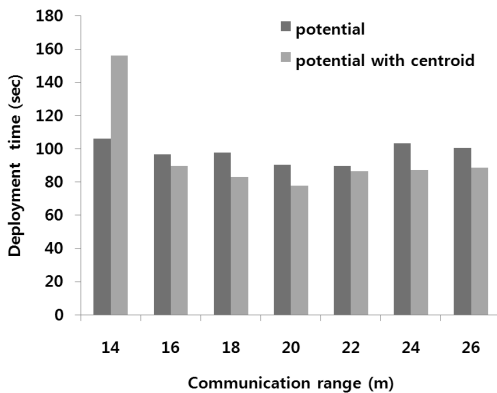
통신 반경 R_c 또한 센서 네트워크의 배치를 위한



(a) 커버리지



(b) 이동거리



(c) 배치 시간

그림 11. R_c 변화에 따른 성능의 측정(R_s : 10m, 20개의 센서)

중요한 고려 요소이다. 특히, 제안하는 기법은 통신 반경 내에 위치한 이웃 센서들의 위치 정보에 따라 각 센서들이 보로노이 다각형을 그리기 때문에 통신 반경에 더욱 민감하다. 통신 반경이 작아 제대로 된 보로노이 다각형을 그리지 못하게 되면 도심에서 유도되는 F_{att} 가 오히려 센서의 올바른 배치를 방해할 수도 있다. 그림 11은 20개의 센서를 $60m \times 60m$ 에 무작위로 배치하였을 때 R_c 의 변화에 따른 성능을 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 통신 반경의 크기에 상관없이 최종적으로는 비교적 높은 커버리지를 확보하긴 하지만, 통신 반경이 작아질수록 이동거리와 배치 시간은 반발력만을 활용하는 포텐셜 필드 방식과 차이가 없거나 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. R_c 가 매우 작은 경우에는 한 센서가 이동할 때마다 작은 통신 반경 때문에 달라진 이웃 위치 정보를 가지고 보로노이 다각형을 계속 다르게 산출하게 되고 그에 따라 F_{att} 또한 많이 변화하여 센서가 평형 상태에 진입하지 않은 상태에서 많은 진동을 하는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 R_c 가 증가할수록 보로노이 다각형을 보다 정확하게 그려 그 도심으로 이동을 유도함으로써 이동거리와 배치시간이 기존 포텐셜 필드 알고리즘 보다 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안하는 자율 배치 알고리즘은 각 센서가 보로노이 다이어그램을 잘 그릴 수 있는 조건 (예를 들어, R_c 가 R_s 의 두 배 이상)일 때 그 성능을 잘 발휘한다고 할 수 있다.

VI. 결론

본 논문은 기존에 저자들이 연구하였던 보로노이 다각형의 도심으로 각 센서들이 이동하는 알고리즘을 활용하여 관심 영역의 센싱 커버리지를 최대화하는 센서 집단의 자율 배치 알고리즘을 제안하였다. 센서들이 서로 밀어내어 커버리지를 확장하는 기본적인 포텐셜 필드 활용 방식에 도심으로부터 끌어당기는 힘을 추가하여 센서들이 보다 빠른 시간에 적은 움직임으로 넓은 센싱 영역을 확보하는 개선된 포텐셜 필드를 사용한 자율 배치 알고리즘을 제시하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 제안 기법이 기존의 반발력만을 활용하는 포텐셜 필드 알고리즘보다 성능이 뛰어나다는 것을 입증하였다. 향후 추가적인 연구를 통해 통신 반경이 작은 환경에서의 자율 배치 방법, 빌딩 등의 장애물이 있는 환경에서의 자율 배치 방법 등을 제안하겠다.

참 고 문 헌

[1] A. Alemdar and M. Ibnkahla, "Wireless sensor networks: Applications and challenges," *9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, pp.1-6, Feb., 2007.

[2] D. Culler, D. Estrin, and M. Srivastava, "Overview of Sensor Networks," *IEEE Computer*, Vol.37(8), pp.41-49, August, 2004.

[3] J. Wu and S. Yang, "SMART: A Scan-Based Movement-Assisted Sensor Deployment Method In Wireless Sensor Networks," *In Proc. of Infocom 2005*, pp.2313-2324, March, 2005.

[4] Li Shijian, Xu Congfu, Pan Weike and Pan Yunhe, "Sensor Deployment Optimization for Detecting Maneuvering Targets," *8th International Conference on Information Fusion*, Volume 2, pp.7, July, 2005.

[5] Francesco Bullo, Jorge Cortes, Sonia Martinez, "Distributed Control of Robotic Networks: A Mathematical Approach to Motion Coordination Algorithms," *Princeton University*, July, 2009.

[6] 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.

[7] G. Wang, G. Cao and T. L. Porta, "Movement-assisted Sensor Deployment," *IEEE INFOCOM 2004*, Vol.4, pp.2469-2479, March, 2004.

[8] Heon-Jong Lee, Yong-hwan Kim, Youn-Hee Han, Chan Yeol Park, "Centroid-based Movement Assisted Sensor Deployment Schemes in Wireless Sensor Networks," *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall)*, 2009 IEEE 70th, pp.1-5, Sep., 2009.

[9] Nojeong Heo, Varshney and P.K, "Energy-efficient Deployment of Intelligent Mobile Sensor Networks Systems," *IEEE Transactions on Man and Cybernetics*, Part A, Vol.35, Issue 1, Jan., 2005.

[10] S. Slijepcevic and M. Potkonjak, "Power Efficient Organization of Wireless Sensor Networks," *IEEE International Conference on Communications*, Vol.2, pp.472-476, June., 2001.

이 헌 종 (Heon-Jong Lee)

준회원



2005년 8월 한국기술교육대학교 인터넷미디어공학부 학사
2008년 9월~현재 한국기술교육대학교 정보미디어공학과 석사과정
<관심분야> 이동 센서 네트워크, RFID/USN

김 용 환 (Yong-hwan Kim)

준회원



2005년 8월 한국기술교육대학교 인터넷미디어공학부 학사
2008년 9월~현재 한국기술교육대학교 정보미디어공학과 석사과정
<관심분야> WSN, Network Topology Control, 센서 네트워크 스케줄링

한 연 희 (Youn-Hee Han)

중신회원



1996년 2월 고려대학교 수학과(이학사)
1998년 5월 고려대학교 컴퓨터학과(이학석사)
2002년 2월 고려대학교 컴퓨터학과(이학박사)
2002년 2월~2006년 2월 삼성중

합기술원 전문연구원

2006년 3월~현재 한국기술교육대학교 조교수

<관심분야> 지능형 센서 네트워크, IPv6 Mobility, Cross-Layer Optimization

정 영 식 (Young-Sik Jeong)

정회원



1989년 2월 고려대학교 전산과 학과(이학석사)
1993년 2월 고려대학교 전산과 학과(이학박사)
1993년~현재 원광대학교 컴퓨터공학과 교수
1997년 미시간 주립대학교 전산학과 객원교수

2004년 웨인 주립대학교 컴퓨터공학과 객원교수

<관심분야> 그리드컴퓨팅, 유비쿼터스 컴퓨팅, 클라우드 컴퓨팅, 차세대 인터넷 컴퓨팅