

# 이동 센서 로봇 네트워크에서 포텐셜 필드 기반 자율배치기법의 시뮬레이션 및 구현\*

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

## Simulation and Implementation of Potential Field Based Self-Deployment Scheme in Mobile Sensor Robot Networks

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

### 요 약

기존 센서들은 고정형 무선 네트워크로 구성되어 재난지역, 군사지역 등의 지역에서는 데이터를 획득할 수 있는 관찰영역이 제한적이다. 하지만 이동 능력을 가진 센서들이 스스로 주변 센서들의 위치와 장애물의 위치를 이용하여 자율 배치된다면 센서들의 관찰영역을 보다 많이 확보하면서 보다 더 정확한 데이터를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 로봇 공학 분야에서 많이 사용하는 Player/Stage 시뮬레이터를 이용하여 다양한 실제 환경과 같은 가상의 환경에서 포텐셜 필드 방식을 적용한 센서 로봇 집단의 자율 배치 기법을 모의실험하고 검증한다. 또한 그 자율 배치 방법을 이용한 실제 이동 센서 로봇 집단의 구현 내용 및 결과를 제시한다.

### 1. 서론

기존의 무선 센서 네트워크(WSNs)는 많은 수의 센서 노드들이 특정 상황을 감지하거나 정보를 수집하여 무선 Ad-hoc 통신으로 Sink노드까지 그 정보를 전송하는 네트워크이다. 이런 무선 센서 네트워크는 군사용 목적이나 환경 감시, 의료 복지 등의 사용 분야가 확대되고 있다.

고정형 무선 센서 네트워크는 센서들이 정보를 얻을 수 있는 지역이 한정적이다. 따라서 다양한 분야에서 활용될 예정인 센서 네트워크를 구성하는 센서들은 본래의 기능을 수행하면서도 많은 정보를 얻기 위해 전체 관심 영역 (Region of Interest, ROI)을 최대로 관측 할 수 있는 최적의 위치로 이동해야 할 필요가 있다.

최근 센서 노드들은 기본적인 센싱, 데이터 처리, 통신하는 기술 기능 이외에 이동기능까지 겸비할 수 있으며 이러한 이동 센서들로 하여금 주변 상황을 인식하고 스스로 배치하도록 하는 알고리즘 개발이 활발하다[1][2][3][4]. 이동 센서들을 활용하여 사람이 직접 접근하지 못하는 위험 지역이나, 재난 지역, 또는 미개발 지역, 군사 지역 등에서 활용할 수 있다.

본 논문에서는 2D 멀티 로봇 시뮬레이터인 Player/Stage를 이용하여 장애물을 인지하면서 전체 센싱 영역을 확장하도록 센서 스스로 이동하는 방법인 포텐셜 필드(Potential Field) 기법[1],[2]을 확장한 방법을 모의실험하고 검증한다. 또한, ROS(Robot Operating System)을 활용한 이동 로봇 3대를 사용하여 임의의 공간에서 최적의 위치를 찾아 배치되는 모습을 구현하고 그 결과를 제시한다.

### 2. 관련연구

#### 2.1 Potential Field

[2]의 연구에서는 로봇 공학 분야에서 널리 알려진 포텐셜 필드를 적용하여 모여 있던 센서들이 스스로 퍼져 센서 네트워크의 관측 가능한 지역을 최대화 하는 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘은 센서끼리 또는 센서와 장애물끼리는 척력(Repulsive Force)이 발생한다고 가정하고 그 힘을 이용해 센서들을 배치하고 배치가 완료되면 센서들이 움직이지 않는 정적 평형상태(Static Equilibrium)에 도달하도록 한다.

#### 2.2 ROS

ROS(Robot Operating System)[5]는 2007년 Stanford Artificial Intelligence Laboratory에서 만들어진 AI 로봇 프로젝트로써 로봇 소프트웨어 개발을 위한 프레임워크이다. ROS는 로봇에서 수행되어지는 기능들을 각각 노드(Node)라고 하며 노드들 사이에 전송되는 메시지를 관리

\* 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행(2010-0010499)되었으며 또한 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과입니다.

† 한연희 : 교신저자

하는 역할을 한다.

### 2.3 Player/Stage

본 논문에서 사용하는 시뮬레이터는 Player/Stage[6] 프로젝트를 통해 제공되고 있는 Stage라는 2D 멀티 로봇 시뮬레이터이다. Stage를 통해 다양한 환경과 로봇의 크기, 모양 등을 설정하고 여러 가지 센서들을 로봇에 장착할 수 있다. 또한 로봇에 장착할 센서의 수와 센서의 작동 능력을 설정하여 의도하는 실험 시나리오를 비교적 자유롭게 구성할 수 있다.

### 3. 포텐셜 필드를 사용한 자율배치 방법

본 장에서는 기존 연구 [1] [2]에서 제안한 포텐셜 필드 방식을 확장한 센서의 자율 배치 알고리즘을 설명한다.

포텐셜 필드의 기본 이론은 거리에 따라 발생하는 힘의 차이를 이용하여 작용되는 물체들의 거리를 조정하는 것이다. 본 논문에서는 총 2가지의 가상의 힘(Virtual Force), 즉 장애물로부터의 힘  $F_{obs}$ 와 이웃 센서로부터의 힘  $F_{nei}$ 의 합력을 이용해 센서를 자율배치 시킨다. 각각의 가상의 힘을 수식으로 표현해 보면 다음과 같다.

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

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

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 차이( $\mathbf{r}_i = x_i - x$ ). 또한 각 힘에서 사용되는  $K_{obs}$ ,  $K_{nei}$ 는  $F$ 를 실제 값으로 조율하기 위한 상수이다. 본 논문에서는 실험을 통해 경험적으로  $K_{obs}$ ,  $K_{nei}$ 의 값을 정하였다.

수식 (1), (2)와 운동 방정식(Equation of Motion)을 적용하여 센서의 이동 위치를 계산할 수 있다. 각 센서는 위에서 구한  $F = F_{obs} + F_{nei} = 0$ 에 의하여 움직인다고 가정되 그 힘에 대항하는 다음과 같은 감쇠력(Damping Factor)이 있다고 가정한다.

$$F_D = \nu \cdot v_{current} \quad (3)$$

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

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

$$a_{next} = \frac{F - F_D}{m} = \frac{F - \nu \cdot v_{current}}{m} \quad (4)$$

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

$$v_{next} = v_{current} + a_{next} \cdot t \quad (5)$$

$$x_{next} = x + v_{next} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_{next} \cdot t^2 \quad (6)$$

위 수식을 이용하여 센서의 Target 위치를 2차원 좌표

표 1. 포텐셜 필드를 사용한 자율배치 알고리즘

#### Notation:

$N$  : 자신의 이웃 센서 위치 저장장소  
 $O$  : 감지된 장애물 위치 저장장소  
 $S(x, y)$  : 자신의 위치  $(x, y)$ 에서의 센싱 영역  
 $threshold_o, threshold_s$  : 미리 정의된 임계 값  
 $O_{count} = 0, S_{count} = 0$

#### Procedure(종료하기 전까지 반복):

- (1) 준비단계
  - (1.1) 자신의 위치 정보  $(x, y)$ 를 획득하고 이웃 센서들에게 알림
  - (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) 구한 모든 힘을 합산 하여  $F$  계산
  - (2.3)  $F$ 로부터 다음 Target 위치  $(x', y')$ 를 계산
- (3) 종료 판단
  - (3.1) 현재 위치에서 계산된 새로운 Target 위치가 이전 Target 위치와 동일하면  $O_{count}$ 를 1 증가시키고  $O_{count}$ 가 연속적으로 증가하여  $threshold_o$ 와 같아지면 종료
  - (3.2) 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
  - (3.3) 위 종료조건에 만족하지 않으면 Target 위치로 이동 한다.

형태로 도출할 수 있으며, 이동 가능한 로봇은 Target 위치로 이동하게 된다. 위 상황을 반복하게 되면 센서들 간의 혹은 센서와 장애물 간의 척력으로 인해 센서들이 분산되어 자율배치 된다. 센서들이 배치되는 과정 중에 각각의 센서가 현재의 위치를 마지막 위치라고 판단 할 경우 이동을 종료하게 되는데, 즉 센서 스스로가 평형 상태(Equilibrium Stage)에 도달하게 된 경우이다.

본 연구에서는 평형 상태를 판단하는 조건을 평형 진동 상태(Oscillation Equilibrium Stage)와 평형 중지 상태(Stationary Equilibrium State)로 판단하였다. 평형 진동 상태란 센서의 Target 위치가 이전의 위치인 경우라면 '진동' 이라고 판단하고, 연속적으로  $threshold_o$  만큼 발생한다면 평형 상태라고 판단하여 이동을 종료한다. 평형 중지 상태란 센서의 현재 위치와 Target 위치까지의 이동한 거리가 미리 정해 놓은 이동거리 값 보다 작다면 '중지' 라고 판단하고, 연속적으로  $threshold_s$  만큼 발생한다면 평형 상태라고 판단하여 이동을 종료한다. 본 논문에서 사용하는 자세한 자율배치 알고리즘은 (표 1)과 같다.

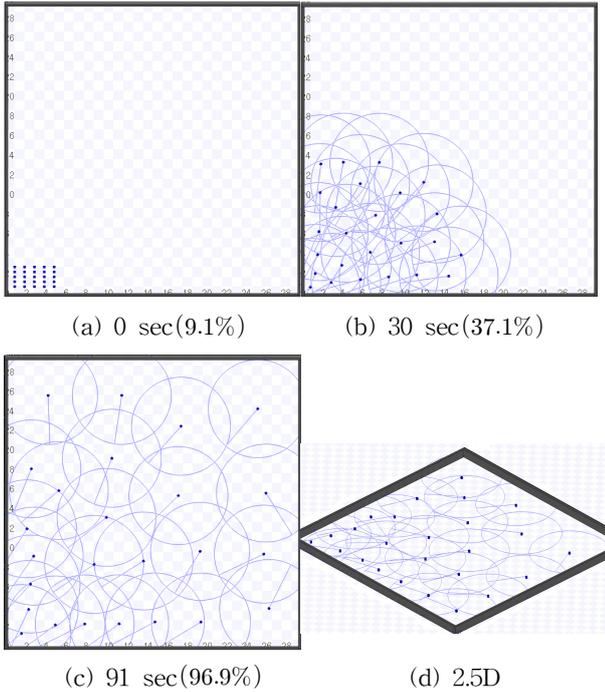


그림 1. 자율배치 알고리즘에 의한 센서의 이동 모습.

4. 시뮬레이션 및 분석

본 논문에서는 Stage 시뮬레이터를 이용하여 (표 1)에 제시된 자율배치 방법을 실험하였다. 센서는 20cm의 정육면체 크기이며, 센서의 기본설정은  $R_c = 10m$ ,  $R_s = 5m$ ,  $R_d = 5m$ 이다. 그리고 관심 영역의 크기는  $30m \times 30m$ 로 설정하여 실험 하였다.  $R_c$ 는 센서들 간의 통신반경이고,  $R_s$ 는 센서의 유효한 데이터 습득 반경이며 사용할 수 있는 센서는 조도센서, 온도센서, 카메라 센서 등이 있다. 실험상에서는 카메라 센서를 이용한다고 가정하고 유효한 데이터 습득을 위한 반경을  $5m$ 로 정하였다.  $R_d$ 는 장애물을 파악할 수 있는 초음파 센서의 반경으로 정하였다. (그림 1)의 (a), (b), (c)는 Stage 시뮬레이터 내에 배치된 25대의 센서 로봇들이 시간의 흐름에 따라 이동하면서 전체 커버리지를 확장하는 모습을 보여준다. 기본적으로 Stage는 2D 실험환경을 제공하며 2.5D까지(그림 1(d))의 실험환경을 지원한다.

본 실험에서 관심 있는 커버리지 성능지표는 다음 식 (7)과 같이 정의된다.

$$coverage(\%) = \frac{\bigcup_{i=1}^N A_i}{A} \quad (7)$$

이때,  $A_i$ 는 센서  $i$ 에 의해 커버되는 지역이며  $\pi R_s^2$ 으로 계산되고,  $N$ 은 전체 센서의 개수,  $A$ 는 전체 관심 영역의 넓이이다.

모든 실험에서 센서의 배치는 (그림 1(a))과 동일하게 하였다. (그림 2)는 센서의 수 외에 다른 파라미터 값들은 동일하게 설정하고, 단지 배치 시간에 따른 커버리지 변화를 보여준다. 센서의 수가 25개일 경우 최종적으로

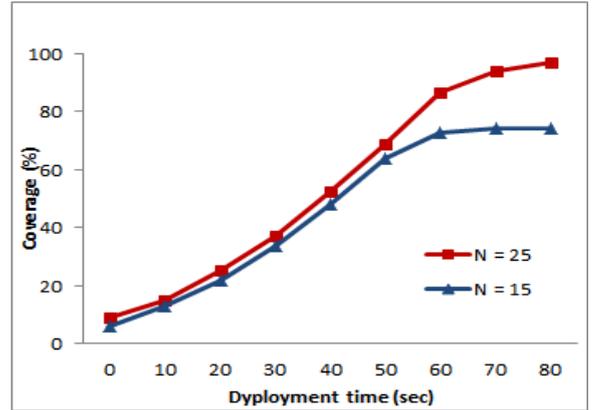


그림 2. 배치 시간에 따른 커버리지 변화

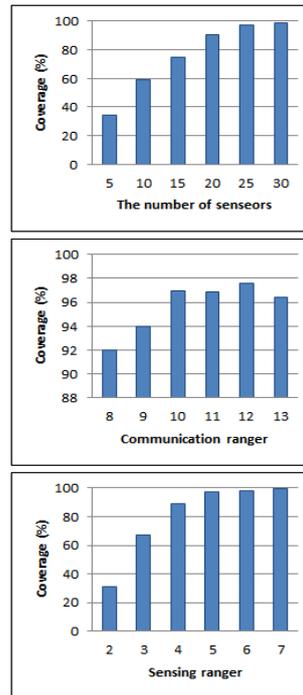


그림 3. 설정 값 변화에 따른 커버리지 변화

96.71%의 커버리지를 확보하고 센서의 수가 15개일 경우는 최종적으로 74.17%의 커버리지를 확보한다. 이는 동일한 관심 영역에서 높은 커버리지를 확보하려면 센서의 능력에 맞게 적정한 수가 필요하다는 것을 보이고 있다. (그림 3)은 각 설정 값의 변화에 따른 커버리지 변화를 나타낸 그래프이다. (a)그래프는 센서의 수에 따라 최종적인 커버리지 비율 변화를 보여준다. 한정된 관심 영역에서 센서의 수가 증가 할수록 커버리지가 증가됨을 알 수 있다. (b)그래프는  $R_c$ 의 변화에 따른 커버리지 변화를 보여주며, (c)그래프는  $R_s$ 의 변화에 따른 커버리지 변화를 보여준다. (b)(c)그래프 모두 한정된 관심 영역에서 각각의  $R_c$  또는  $R_s$  값이 증가됨에 따라 커버리지도 증가 되지만 일정 수준이 되면 최종적으로는 일정한 커버리지 비율로 수렴되는 것을 볼 수 있다. 한편,  $R_c$ 의 경우  $R_d$ 값의 두 배 이상일 때부터 그리고  $R_s$ 는  $R_d$ 와 같거나 그 이상일 때부터 넓은 범위의 커버리지를 확보하는 것을 볼 수 있다.

5. 테스트베드 구현 및 실험

본 연구에서는 (표 1)에서 제안한 자율 배치 알고리즘을 (주)Corebell사에서 개발한 이동 로봇 제품(그림 4)에 구현하고 집단 이동 센서 로봇 테스트베드를 구현하였다. 사용한 로봇 제품에는 소형 컴퓨터가 내장되어 있으며 (표 2)는 로봇을 구성하는 초음파센서, 모터 및 메인보드의 제원을 설명한다.

이동 센서 로봇의 크기는 (31cm×31cm)이며, 초음파 센서 유효범위는 3.2m까지 측정이 가능하지만 정확한 데이터를 위해 1m로 설정하였다. 이로 인해  $R_d$ 와  $R_s$ 의 반경은 1m이며, AP를 활용한 WLAN을 통해 각 로봇들이 통신하기 때문에  $R_c$ 는 본 실험과 무관하다.

이동 센서 로봇의 구현의 결과는 (그림 6)과 같으며, 자율 배치 기법에 추가적으로 초음파 센서의 데이터를 이용하여 Mapping 기능을 구현하였다. (그림 6)에서 볼 수 있듯이 각 로봇들은 자신들의 자율배치 알고리즘을 동작시키면서 주변의 전체 장애물들을 올바르게 파악할 수 있음을 알 수 있다.

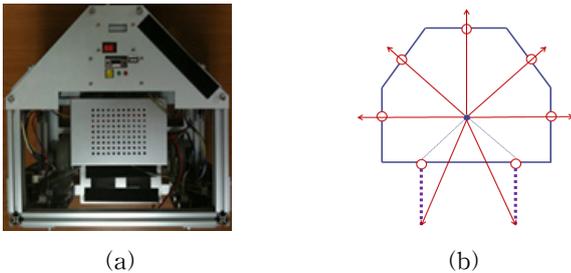


그림 4. (a) (주)corebell사의 이동 로봇(31cm×31cm) (b) 7개의 초음파 센서 방향 및 위치를 표시하며, 실제로 사용되는 값은 실선으로 된 화살표이다.

표 2. 이동 센서 로봇 구성품 및 제원

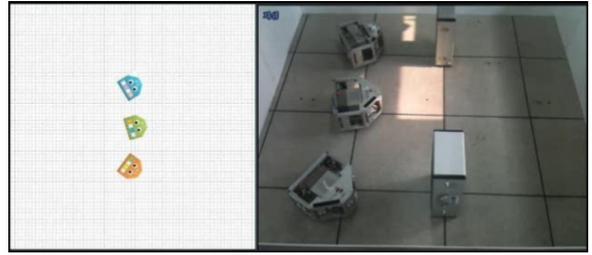
	모델명	제원
초음파 센서	NT-TS601	Range of measurement : 2cm ~ 3.3m, Precision of measurement : ± 2cm
모터	IG-32PGM	감속비:1/5 ~ 1/721, 정격회전수:990rpm ~ 8rpm, 정격토크:1kg·cm ~ 12kg·cm
메인보드	VIA EPIA PX10000G Pico-ITX Mainboard	Processor : 1GHz VIA C7, System Memory : DDR2 533 SO-DIMM 512MB

6. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 기존의 포텐셜 필드 기법을 확장하여 각 센서들이 커버리지를 확장하기 위하여 스스로 자율 배치하는 알고리즘을 제안하고 이를 Player/Stage시뮬레이션 및 테스트베드 구현을 통하여 구현하고 실험 및 검증한 결과를 제시하였다.

향후에는 보다 적은 수의 센서를 이용하여 더 넓은 커버리지를 확보할 수 있는 알고리즘을 개발할 계획이다. 추가

적으로 센서들의 에너지 소모를 최소화하기 위한 자율 배치 방법을 연구 중이며, 이전 구현 과정에서 발생했던 문제점들을 보완하고 보다 많은 수의 소형 로봇을 이용하여 향상된 자율 배치방법을 실험 평가할 계획이다.



(a)초기 배치 모습



(b)최종 배치 모습 및 Mapping  
그림 5. 자율 배치 구현 및 Mapping

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," In Proceedings of 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] G. Wang, G. Cao and T. L. Porta, "Movement-assisted Sensor Deployment", In Proc. of IEEE Infocom 2004, Vol. 4, pp. 2469-2479, March 2004.
- [4] 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.
- [5] Quigley Morgan, Conley Ken, Gerkey Brian P., Faust Josh, Foote Tully, Leibs Jeremy, Wheeler Rob, and Ng Andrew Y., "ROS: an open-source Robot Operating System", ICRA Workshop on Open Source Software, 2009
- [6] Brian P. Gerkey, Richard T. Vaughan, Andrew Howard, "The Player/Stage Project:Tools for Multi-Robot and Distributed Sensor Systems" The International Conference on Advanced Robotics pp. 317-323, Coimbra, Portugal, June 30 - July 3, 2003.