

논문 2014-09-13

# 모바일 로봇의 네비게이션을 위한 빠른 경로 생성 알고리즘 (Fast Path Planning Algorithm for Mobile Robot Navigation)

박정규, 전흥석\*, 노삼혁  
(Jung Kyu Park, Heung Seok Jeon, Sam H. Noh)

Abstract : Mobile robots use an environment map of its workspace to complete the surveillance task. However grid-based maps that are commonly used map format for mobile robot navigation use a large size of memory for accurate representation of environment. In this reason, grid-based maps are not suitable for path planning of mobile robots using embedded board. In this paper, we present the path planning algorithm that produce a secure path rapidly. The proposed approach utilizes a hybrid map that uses less memory than grid map and has same efficiency of a topological map. Experimental results show that the fast path planning uses only 1.5% of the time that a grid map based path planning requires. And the results show a secure path for mobile robot.

Keywords : Mobile robot, Navigation, Path planning, Hybrid map

## 1. 서론

현대 사회의 발달로 인해 다양한 측면에서 보안 및 순찰의 중요성이 증대되고 있다. 특히 보안을 강화해야하는 지역과 환경이 급속히 증가하고 있어 모든 곳의 보안을 유지하기 위해서는 많은 인력 수요가 필요하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 지능형 모바일 로봇을 사용하는 연구가 많이 수행되었다[1, 2].

지능형 모바일 로봇을 보안 및 순찰에 활용하기 위해서는 네비게이션 문제를 해결해야 한다. 모바일 로봇이 네비게이션 문제를 해결하기 위해서는 몇 가지 문제를 해결해야 한다[3]. 첫 번째로 모바일 로봇은 다양한 서비스 임무를 수행하기 위해서 주변 환경을 표현하는 지도와 경로 계획 알고리즘을 가지고 있어야 한다. 로봇은 환경 지도를 바탕으로 목적지까지 스스로 이동할 수 있어야 한다. 두 번째

\*Corresponding Author (hsjeon@kku.ac.kr)

Received: 29 Jan. 2011, Revised: 10 Feb. 2011.

Accepted: 12 Feb. 2011.

J.K. Park: Dankook University

Sam. H. Noh: Hongik University

H.S. Jeon: Konkuk University.

로 모바일 로봇은 장애물 회피 알고리즘을 가지고 있어야 한다. 환경 지도를 바탕으로 생성한 경로를 이동하는 동안 장애물이 발생하면 로봇은 자신이 가지고 있는 센서를 사용하여 주변을 파악하고 장애물을 회피할 수 있어야 한다.

로봇의 안전한 경로를 생성하기 위해 많은 연구들이 이루어졌다[4-7]. 경로 생성 알고리즘은 크게 점유 그리드 기반의 지도를 사용하는 알고리즘과 토폴로지 지도를 사용하는 알고리즘 두 가지로 구분할 수 있다. Distance transform은 점유 그리드 기반의 지도를 활용하여 경로를 생성하는 알고리즘으로 현재까지 경로 생성에 많이 사용되고 있다[6]. Distance transform 알고리즘에서는 목적지에서 로봇의 시작 위치까지 거리 값을 전달한 후 로봇은 현 위치 보다 값이 낮은 곳으로 이동하여 목적지를 찾는 방법을 사용하고 있다. 그리드 기반의 경로 탐색 알고리즘은 정확한 경로를 생성할 수 있지만 경로 이동 중 새로운 장애물을 처리할 수 없는 문제와 지도의 크기에 따라 경로 계산 시간이 증가하는 문제를 가지고 있다.

토폴로지 지도를 사용하는 경로 생성 알고리즘으로 DFS (Depth First Search)를 들 수 있다. DFS 알고리즘을 사용하기 위해서는 환경이 그래프

형태의 자료구조로 변경되어 있어야 한다. DFS 알고리즘에서 경로 탐색 시간은 그래프의 노드 제곱에 비례하지만 그리드 기반의 지도 보다는 빠른 경로 성이 가능하다. 그러나 생성된 경로 정보를 이용하여 로봇은 정확한 이동을 할 수 없다는 문제점을 가지고 있다[7].

앞에서 언급한 점유 그리드 기반의 경로 생성 알고리즘과 토폴로지 지도 기반의 경로 생성 알고리즘은 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 첫 번째, 두 알고리즘은 로봇이 동작하기 전에 사전에 생성된 지도를 가지고 있음을 가정하고 있다. 이런 이유로 사전에 생성된 지도 정보가 없을 경우 로봇은 경로 생성을 할 수 없다. 두 번째, 점유 그리드 기반 지도를 사용할 경우 지도의 크기에 따라 경로 생성 시간이 증가하는 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 앞에서 언급한 점유 그리드 지도의 장점과 토폴로지 기법 지도의 장점을 수용한 하이브리드 맵의 구조를 설명하고 이를 이용하여 빠른 경로 생성 방법을 제안한다.

본 논문의 나머지 구성은 다음과 같다. 다음 2장에서는 논문과 관련된 연구를 설명하며, 3장에서는 빠른 경로 생성에 사용되는 하이브리드 지도의 구조에 대해서 설명한다. 5에서는 하이브리드 지도를 사용하는 빠른 경로 생성에 대해서 설명하며, 6장에서는 실험 결과를 설명한다. 마지막으로 7장에서는 결론과 향후 계획에 대해서 설명한다.

## II. 관련 연구

본 논문은 모바일 로봇이 경로 생성을 위해 사용하는 환경 지도와 경로 생성 알고리즘을 고려하고 있다. 기존에 경로 생성 알고리즘은 특정한 위치에서 목적지까지의 최단 시간의 거리 및 최소 거리만을 고려하는 경로만을 고려하였다. 경로 생성의 대표적인 연구로 Distance Transform 알고리즘을 들 수 있다[6]. Distance Transform 알고리즘은 그리드 기반의 지도를 기반으로 로봇의 최단 경로를 생성한다. 이렇게 생성된 경로는 모바일 로봇의 특성을 고려하지 않았기 때문에 로봇이 이동할 수 없는 좁은 경로나 장애물의 바로 옆을 지나는 경로를 생성하여 실제 로봇에 적용하기 힘들다는 문제를 가지고 있다.

지능형 모바일 로봇이 지도를 스스로 생성하기 위해서는 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 알고리즘을 사용해야 한다[8-10].

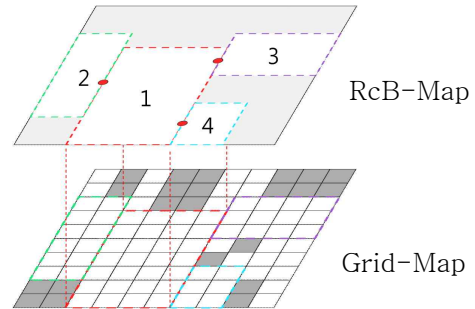


그림 1. RcB-Map과 그리드 지도

Fig. 1 RcB-Map and Grid Map

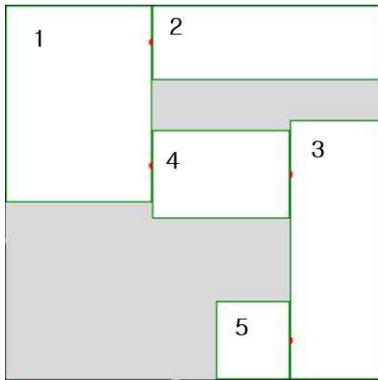
SLAM 알고리즘으로 생성되는 환경 지도는 주로 점유 그리드 형태의 지도를 사용한다. 점유 그리드 방식은 전체 대상 공간을 그리드 모양으로 구분하여 각각의 셀을 Free(빈 공간), Occupied(장애물), Unknown(미확인)의 상태로 표현하는 방식을 말한다. 그러나 점유 그리드 방식의 지도는 정확한 표현을 위해 메모리 용량을 많이 요구하고 프로세서의 높은 성능을 요구하는 문제를 가지고 있어 모바일 로봇에 바로 적용하기 어렵다는 문제를 가지고 있다.

점유 그리드 지도의 문제점을 해결하기 위한 지도 표현 방법으로 토폴로지 분할 기법(Topological Decomposition)이 있다[7]. 이 방법은 주변 환경에 대한 정확한 표현 보다는 모바일 로봇의 위치 인식을 위해서 벽, 코너, 장애물 등 주변의 특징점을 찾아내는 방식이다. 이런 특징점을 사용하여 그래프 형태의 표현을 사용한다. 그래프 상에서 노드가 연결되어 있으면 로봇이 이동할 수 있는 경로가 존재하는 것이다. 그러나 이 방식은 로봇의 이동에는 용이하나 주변 환경을 정확히 표현하지 못하는 문제를 가지고 있다.

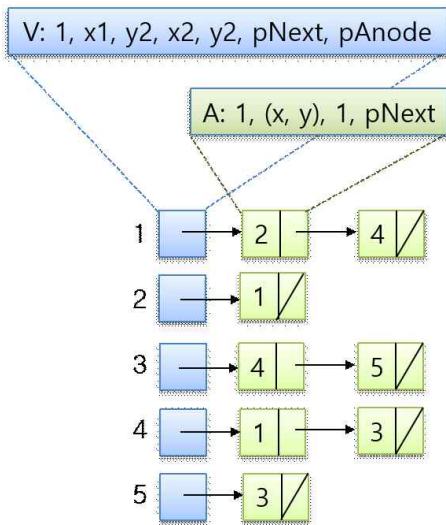
## III. 하이브리드 지도

이 절에서는 점유 그리드 지도와 토폴로지 지도의 장점을 수용하는 하이브리드 지도에 대해서 설명한다.

제안하는 RcB-Map(Rectangle Based)은 로봇이 생성하는 그림 1의 점유 그리드 지도를 분석하여 메모리를 적게 사용하면서 빠른 경로를 생성할 수 있도록 만들어진 하이브리드 지도이다. RcB-Map 알고리즘을 탑재한 로봇이 어떠한 공간에 주어지면 자신의 센서를 사용하여 주변 정보를



(a) RcB-Map의 시각적 표현  
(a) Visual representation of RcB-Map



(b) RcB-Map의 자료 구조  
(b) Data structure of RcB-Map

그림 2. RcB-Map의 구현  
Fig. 2 Implementation of RcB-Map

획득하고 이를 기반으로 지도를 생성하고 이를 업데이트하게 된다. RcB-Map을 생성하는 알고리즘은 이전 연구에서 설명하고 있다[11].

본 논문에서는 RcB-Map의 구조를 설명하고 이를 이용하여 모바일 로봇이 경로 계획을 세워 해당 공간을 빠른 순찰을 할 수 있음을 보이고자 한다. 그림 1은 RcB-Map과 점유 그리드 지도의 차이를 보여주고 있다. RcB-Map은 점유 그리드 지도의 Free 영역을 사각형 형태로 나누고 각 사각형을 하나의 노드로 표현하고 사각형의 좌표 정보만 유지

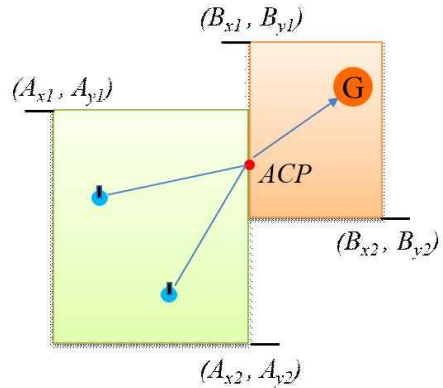


그림 3. 인접한 노드의 예  
Fig. 3 An example of adjacent nodes

하기 때문에 셀 단위의 점유 그리드 지도의 비효율적인 메모리를 사용하여 환경이 표현이 가능하다.

그림 2(a)에서는 RcB-Map의 자료 구조를 이용하여 시각적으로 표현한 것이다. 실 구현에서 RcB-Map은 그림 2(b)와 같이 그래프 형태의 자료 구조로 저장하고 있다. 이는 적은 메모리 사용과 빠른 검색을 위해 선택한 구조이다. 하나의 노드(V)는 공백인 영역의 사각형 위치 정보와 노드의 연결을 관리하는 정보 그리고 인접한 노드(A)의 정보를 가지고 있다. 제안하는 하이브리드 지도 RcB-Map은 기존의 토폴로지 지도와 다음과 같다. 일반 토폴로지 지도에서 노드는 표현하고자 하는 영역의 기본 정보만 유지하지만 RcB-Map에서는 사각형을 하나의 노드로 지칭하고 해당 영역의 좌표 정보를 유지하여 그리드 지도의 정확한 표현력을 유지하고 있다. 또한 ACP(Adjacent Center Point)를 사용하여 노드간의 연결을 나타내며 노드 간 이동 경로 생성에 사용한다. ACP는 4장 경로 생성에서 설명한다.

#### IV. 경로 생성

RcB-Map에서는 빠른 경로 생성을 위해서 ACP (Adjacent Center Point) 개념을 도입하였다. ACP는 인접하는 두 노드의 중심점을 의미하고 두 노드

$$node : A(A_{x1}, A_{y1}, A_{x2}, A_{y2}) \quad (1)$$

$$node : B(B_{x1}, B_{y1}, B_{x2}, B_{y2}) \quad (2)$$

$$ACP(x, y) = \left( B_{x1}, \frac{A_{y1} + B_{y1}}{2} \right) \quad (3)$$

$$ACP(x, y) = \left( \frac{B_{x1} + A_{x1}}{2}, B_{y1} \right) \quad (4)$$

가 상하 또는 좌우로 인접할 때 존재할 수 있다. 그

림 3은 A, B 노드가 좌우로 인접할 때를 나타낸 것이다. 두 노드 A, B가 수식 (1)과 (2)와 같을 때 그림 3과 같이 좌우로 인접한 노드의 ACP는 수식 (3)으로 표현할 수 있고, 좌우로 인접한 두 노드의 ACP는 수식 (4)로 표현할 수 있다.

RcB-Map이 생성된 이후 모바일 로봇이 모든 공간을 순찰하기 위해서 ACP를 이용하여 경로를 생성할 수 있다. 예를 들어 그림 3의 왼쪽 A 노드에서 로봇이 있고 그 로봇이 노드 B의 G 위치로 이동할 때 노드 A에 있는 로봇은 바로 ACP로 이동 그 후 G 위치로 이동할 수 있다. 이 방법을 사용하여 그리드 기반의 경로 생성에 비해서 빠른 경로 생성이 가능하다.

알고리즘 1. 최단 경로 검색

Algorithm 1. Shortest Path Search

```

1  Require : G(V, E), Start node, Goal node
2  for each node v in V do
3      distance[v] = cost[start][v];
4      path[v] = start;
5      found[v] = 0;
6  end for
7  found[start] = 1; // 시작노드 방문 표시
8  distance[start] = 0; // 시작 -> 시작 노드
9  for each node v in V do
10     u = Choice();
11     found[u] = 1; // 방문한 노드
12     for each node w in V do
13         if (found[w] == 0)
14             if(distance[u]+cost[u][w]< distance[w])
15                 distance[w]=distance[u]+cost[u][w];
16                 path[w] = u; // 경유노드 저장
17             end if
18         end if
19     end for
20 end for
    
```

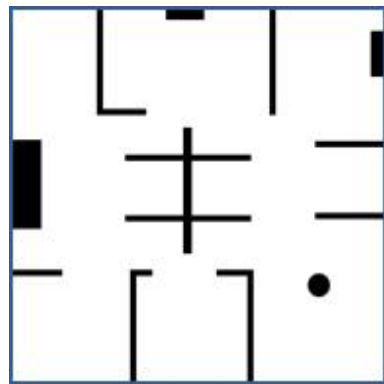
모바일 로봇이 현재의 공간에서 다음 최종 목적지까지 이동하는 것을 RcB-Map에서는 노드간의 이동으로 볼 수 있다. 현재 위치에서 바로 인접한 공간의 ACP로 이동하고 다시 인접한 노드의 ACP로 이동하는 것을 반복하여 최종 목적지까지 이동할 수 있다. 이때 ACP로 이동하는 것은 최단 경로가 아닐 수 있다. 그러나 로봇의 안전한 이동을 고려할 때 Free인 공간의 노드에서 ACP 까지의 이동은 로봇의 상황에서 적합한 선택이다.

RcB-Map을 사용하는 경로 탐색 알고리즘은 최적의 경로를 탐색하기 위해서 G(V, A)의 토폴로지 형태의 데이터와 시작 노드, 목적지 노드가 필요하다. RcB-Map 은 일반적인 그래프 형태의 데이터



(a) 100m<sup>2</sup> 실 주거 환경

(a) 100m<sup>2</sup> Actual living Environment



(b) 100m<sup>2</sup> 실험용 주거 환경

(b) 100m<sup>2</sup> Modeling Environment

그림. 4. 실험 환경

Fig. 4 Experimental Environment

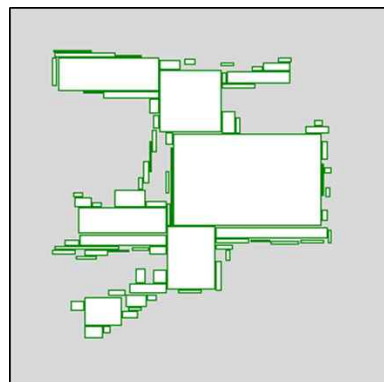
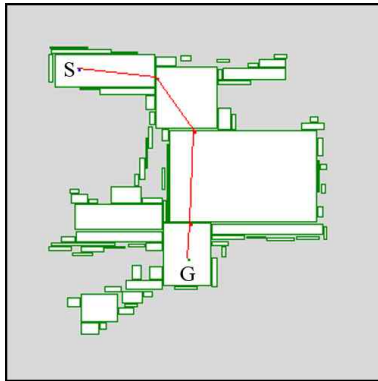
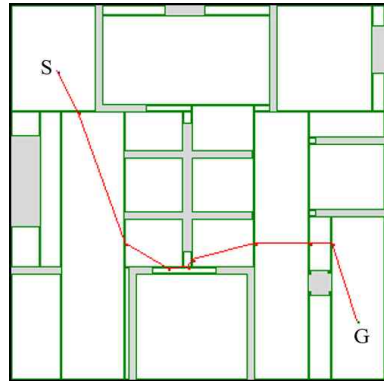


그림 5. RcB-Map의 시각적 표현

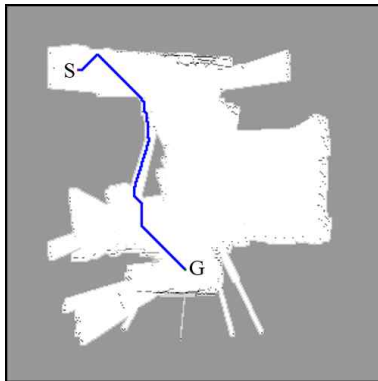
Fig. 5 Visual Expression of RcB-Map



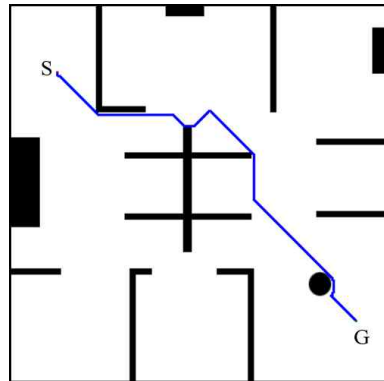
(a) RcB-Map의 경로  
(a) Path of RcB-Map



(a) RcB-Map의 경로  
(a) Path of RcB-Map



(b) Wavefront의 경로  
(b) Path of Wavefront



(b) Wavefront의 경로  
(b) Path of Wavefront

그림 6. 경로 생성 결과  
Fig. 6 Results of Path Planning

그림 7. 경로 생성 결과  
Fig. 7. Results of Path Planning

형태로 되어 있어 다양한 그래프 검색 알고리즘을 활용할 수 있다. 본 논문에서는 그래프에서 최단 경로 문제를 풀기위해 많이 사용되는 Dijkstra 알고리즘을 RcB-Map 자료구조에 맞게 동작할 있도록 수정하여 사용하였다[12].

### V. 실험 결과

본 논문에서 제안하는 RcB-Map을 사용하여 빠른 경로 생성이 가능한 것을 보이기 위해서 시뮬레이션 실험을 수행하였다. 실험을 위해서 그림 4(a)와 같은 실 주거 환경을 모델링한 것과 그림 4(b)와 같은 가상 주거 환경을 만들어 사용하였다.

그림 5는 그림 4(a)의 실험 환경을 RcB-Map으

로 표현한 것이다. 이때 약 80개의 V 노드와 204개의 A 노드가 사용되었으며 8,768 byte의 메모리가 사용되었다. 이는 300x300 크기 그리드 지도의 약 3%에 해당한다.

그림 6은 그림 4(a)의 실험 환경에서 RcB-Map을 사용하는 경로 생성 결과와 Distance Transform 경로 생성을 사용한 경로 생성 결과를 보여 주고 있다. RcB-Map을 사용했을 때 총 이동 거리는 7.19m 였고 Distance Transform 방법을 사용할 때 총 이동 거리는 6.18m 였다. 총 이동 거리로 보면 RcB-Map이 더 많은 거리를 이동하였지만 이동간 회전 수는 RcB-Map이 6회, Distance Transform이 40회를 보이고 있다. 이는 Distance Transform을 사용하는 로봇은 그림 6(b)의 중간

부분처럼 좁은 이동 경로를 이동하며 많은 회전을 하며 이동하는 것을 보여줌을 알 수 있다. 이런 문제로 로봇은 더 많은 배터리를 사용하는 문제를 가지게 된다. 이에 비해 RcB-Map은 그림 6(a)와 같이 로봇이 자유롭게 이동할 수 있는 공백 영역의 노드를 이동하여 목적지로 이동함을 알 수 있다.

그림 6의 경로를 생성하기 위해서 RcB-Map은 총 10ms의 시간이 소요 되었으며 Distance Transform은 740ms 시간이 소요되었다. 이는 임베디드 보드를 사용하는 모바일 로봇의 경우 중요한 이슈가 될 수 있다.

그림 7은 그림 4(b)의 실험 환경에서 RcB-Map을 사용하는 경로 생성 결과와 Distance Transform 경로 생성을 사용한 경로 생성 결과를 보여 주고 있다. RcB-Map을 사용했을 때 총 이동 거리는 18.87m, 총 회전 수는 10회, 경로 생성 시간은 15ms가 소요되었다. Distance Transform 방법을 사용할 때 총 이동 거리는 9.64m, 총 회전 수는 19회, 경로 생성 시간은 1238ms 가 소요되었다. 실험 결과는 앞의 그림 6과 같은 결과를 보이고 있다. 그러나 그리드 지도의 복잡도에서 따라 Distance Transform의 경로 생성 계산 시간이 RcB-Map에 비해서 많은 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 그리드 지도를 사용할 경우 지도의 해상도와 복잡도에 증가에 따라 Distance Transform 경로 생성 시간도 증가하는 것을 알 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 모바일 로봇에서 사용할 수 있는 하이브리드 지도는 RcB-Map을 설명하고 이를 이용한 빠른 경로 생성 방법을 제안하였다. 제안하는 경로 생성방법은 그래프 형태의 하이브리드 지도를 하여 기존 그리드 지도를 사용하는 것 보다 적은 메모리를 사용하며, 그리드 지도의 해상도와 복잡도에 따른 경로 생성 시간 증가 문제를 해결 하고 있다.

앞으로는 RcB-Map을 활용하여 다양한 분야에 적용시켜볼 예정이다. 또한 좀더 최적화된 경로를 생성할 수 있도록 RcB-Map을 수정할 예정이다.

## References

- [1] X. Wu, H. Gong, P. Chen, Z. Zhong, Y. Xu, "Surveillance Robot Utilizing Video and Audio Information," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 55, No. 4-5, pp.403-421, 2009.
- [2] T. Theodoridis, H. Hu, "Toward Intelligent Security Robots: A Survey," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 42, No. 6, pp.1219-1230, 2012.
- [3] O. Hachour, "Path planning of Autonomous Mobile robot ," *International Journal Of Systems Applications, Engineering & Development*, Issue 4, Vol. 2, pp.178-190, 2008.
- [4] A. Yang, Q. Niu, W. Zhao, K. Li, G. W. Irwin, "An Efficient Algorithm for Grid-Based Robotic Path Planning Based on Priority Sorting of Direction Vectors," *Life System Modeling and Intelligent Computing*, Vol. 6329, pp.456-466, 2010.
- [5] M. A. Marzouqi, "Efficient path planning for searching a 2-D grid-based environment map," *Proceedings of IEEE GCC Conference and Exhibition*, pp.116-119, 2011.
- [6] Y. Choi, T. Lee, S. Baek, S. Oh, "Online complete coverage path planning for mobile robots based on linked spiral paths using constrained inverse distance transform." *Proceeding of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.5788-5793, 2009.
- [7] N. Hazon, F. Mieli, G.A. Kaminka, "S. Yun and D Rusy, "Distributed coverage with mobile robots on a graph: Locational optimization," *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.634-641, 2012.
- [8] H. Durrant-whyte, T. Bailey, "Simultaneous Localization and Mapping: Part I," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 13, No. 2, pp.99-110, 2006.
- [9] A.I. Eliazar, R. Parr, "DP-SLAM: Fast, Robust Simultaneous Localization and Mapping Without Predetermined Landmarks," *Proceeding of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp.1135-1142, 2003.
- [10] D. Kim, S. Jo, Y. Yang, "On the Design of an Efficient Mobile Robot Framework by

- Using Collaborative Sensor Fusion,” Journal of IEMEK, Vol. 3, No. 3, pp.124-131, 2011 (in Korean).
- [11] J.K. Park, H.S. Jeon, M. Ko, S.H. Noh, “R-Map : A Hybrid Map for Mobile Robot In Ubiquitous Computing Environment,” Information Journal, Vol. 16, No. 4, pp.2599-2606, 2013.
- [12] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest, C. Stein, “Introduction to Algorithms Second Edition,” MIT Press and McGraw-Hill, pp.595 - 601, 2001.

**저 자 소 개**

**박정규**



2000년 대전대학교 컴퓨터공학과 학사.  
 2002년 홍익대학교 컴퓨터공학과 석사.  
 2013년 홍익대학교 컴퓨터공학과 박사.

현재, 단국대학교 컴퓨터학과 연구 교수.  
 관심분야: 지능형 로봇, 임베디드 시스템  
 Email: jkpark@dankook.ac.kr

**전홍석**



2001년 홍익대학교 전자계산학과 박사.  
 2007년~2008년 아이오와대학교 컴퓨터과학과 객원 교수.  
 2002년~현재, 건국대학교 자연과학대학 컴퓨터응용과학부 교수.

관심분야: 지능형 로봇, 임베디드 시스템.  
 Email: hsjeon@kku.ac.kr

**노삼혁**



1986년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사.  
 1993년 매릴랜드대학교 컴퓨터과학과 박사.  
 1993년~1994년 조지워싱턴대학교 객원 조교수.  
 1994년~현재, 홍익대학교 정보컴퓨터공학부 교수.

관심분야: 운영체제, 플래시메모리소프트웨어, 차세대저장장치.  
 Email: samhnoh@hongik.ac.kr