

벽추종 경로계획 기반의 효과적인 방 찾기 탐사

Efficient Exploration for Room Finding Using Wall-Following based Path Planning

박 중 태, 송 재 복*

(Joong-Tae Park and Jae-Bok Song)

Abstract: This paper proposes an exploration strategy to efficiently find a specific place in large unknown environments with wall-following based path planning. Many exploration methods proposed so far showed good performance but they focused only on efficient planning for modeling unknown environments. Therefore, to successfully accomplish the room finding task, two additional requirements should be considered. First, suitable path-planning is needed to recognize the room number. Most conventional exploration schemes used the gradient method to extract the optimal path. In these schemes, the paths are extracted in the middle of the free space which is usually far from the wall. If the robot follows such a path, it is not likely to recognize the room number written on the wall because room numbers are usually too small to be recognized by camera image from a distance. Second, the behavior which re-explores the explored area is needed. Even though the robot completes exploration, it is possible that some rooms are not registered in the constructed map for some reasons such as poor recognition performance, occlusion by a human and so on. With this scheme, the robot does not have to visit and model the whole environment. This proposed method is very simple but it guarantees that the robot can find a specific room in most cases. The proposed exploration strategy was verified by various experiments.

Keywords: exploration, SLAM, intelligence, mobile robot

I. 서론

그랜드 챌린지 (GC: Grand Challenge)라는 로봇 경진대회가 2007년부터 2009년까지 한국에서 개최되었다. 다수의 사람과 장애물이 존재하는 넓은 환경에서, 다양한 작업을 수행할 수 있는 서비스 로봇을 개발하는 것이 GC의 목표이다. GC에서 로봇이 수행해야 하는 임무는 목표 방(예를 들어, 2204호)으로 이동하여, 사용자가 원하는 물건을 30분이라는 제한된 시간 내에 가져오는 것이다. 이를 위해 로봇은 다양한 기술들을 필요로 하지만, 그 중 GC에서는 주행 환경에 대한 정보를 제공하지 않기 때문에 탐사(exploration) 기술은 없어서는 안될 중요한 기술이다.

로봇 스스로 미지의 환경을 탐사할 수 있는 연구들이 많이 수행되었다. 프론티어(frontier)기반 탐사기법은 센서로 작성한 격자지도에서 미지의 영역(unknown area)과 기지의 영역(known area)의 경계면을 추출하여 프론티어라고 정의하고, 추출된 프론티어 영역을 탐사 목적지로 정하여 환경 내에 프론티어 영역이 존재하지 않을 때까지 추출된 프론티어 영역을 방문하는 방식이다[1].

호주 ACFR에서 제안한 통합된 탐사 기법은 프론티어 탐사기법을 바탕으로, 미지의 공간에 대해 가장 많은 정보를 얻을 수 있고, 이동거리가 짧으며 위치추정을 위한 표식이 많은 곳을 우선적으로 탐사하는 방식이다[2].

고려대학교에서는 세신화 정보를 이용한 탐사기법을 제안하였다[3]. 이 방법에서는 센서정보로 생성한 격자지도에 세

신화 기법을 적용하여 위상지도를 실시간으로 추출한 후에, 추출된 위상지도의 노드와 에지를 이용하여 미지의 공간을 효과적으로 탐사할 수 있었다. 이외에도 다양한 탐사기법들이 제안되었다[4,5].

앞선 탐사기법들은 모두 좋은 성능을 보이며 미지의 공간을 탐사할 수 있었다. 하지만 제안된 방법들은 모두 미지의 환경을 모델링 하는데 초점이 맞춰져 있기 때문에, 넓은 환경에서 목표 방을 효과적으로 찾기에는 부적합하였다. 예를 들어, 프론티어 탐사 기법은 프론티어 영역만을 탐사하기 때문에, 목표 방이 프론티어 영역 이외에 위치하게 된다면, 목표 방을 찾지 못하게 된다. 따라서 효과적으로 목표 방을 찾기 위해서는 다음과 같은 요구사항을 만족하는 탐사 기법이 필요하다.

1) 방 번호 인식을 위한 효과적인 경로 계획: 미지의 공간에서 목표 방을 찾기 위해서는 필수적으로 벽 또는 방문에 붙어 있는 방 번호를 인식해야 한다.

2) 환경 재탐사: 미지의 공간을 모두 탐사한 후에도, 이동물체에 의한 방 번호 가림(occlusion) 또는 낮은 인식 성능으로 인해 목표 방을 찾지 못 할 가능성이 존재한다. 따라서 미지의 공간을 탐사하며 얻은 기존의 환경정보를 바탕으로 목표 방이 존재할 만한 공간을 재탐사해야 한다.

본 논문에서는 앞선 요구사항에 명시된 기능을 통해 미지의 넓은 공간에서 효과적으로 목표 방을 찾을 수 있는 탐사기법을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 일반적인 탐사기법을 이용해 방 찾기를 수행했을 때 발생하는 문제점에 대해 기술하였고, III 장에서는 본 논문에서 제안된 탐사기법에 대한 전반적인 내용을 설명하며, IV 장과 V 장에서는 벽추종에 기반한 경로계획 및 환경 재탐사 방법에 대해 설명한다. VI 장에서는 본 연구에서 제안된 방법을 통한 방 찾기를 수행하는 과정에 대해 기술하였으며, VII 장에서는

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 9. 7., 수정: 2009. 10. 9., 채택확정: 2009. 10. 27.

박중태: 고려대학교 메카트로닉스 협동과정 대학원(geullu@korea.ac.kr)

송재복: 고려대학교 기계공학부(jbsong@korea.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 지원으로 수행하는 21C 프론티어 연구개발사업(인간기능 생활지원 지능로봇 기술개발사업)의 일환으로 수행되었음.

결론을 제시한다.

II. 문제점 도출

1. 벽추종 경로 계획

로봇 스스로 미지의 공간에서 환경에 대한 정보 없이 목표 방을 찾기 위해서는 그림 1과 같이 벽 또는 문에 붙어 있는 방 번호를 인식할 수 있어야 한다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 Videre [6] 및 Bumblebee [7]사의 스테레오 카메라를 이용하여 그림 1에 나와 있는 21cm x 30cm 크기 (GC 규정)의 방 번호를 인식하기 위해서는, 방 번호와 카메라 사이의 거리가 1~1.5m 이내여야 한다. 그러나 일반적인 환경에서는 방 번호의 크기가 그림 1의 방 번호보다는 작기 때문에, 방 번호를 인식할 수 있는 거리는 방 번호의 크기에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 방 번호와 카메라 사이의 거리를 그랜드 챌린지 (GC)에 사용되는 방 번호의 크기를 기준으로 설정하였다.

카메라에 부착된 렌즈와 초점 거리에 따라 인식 가능한 거리가 달라지겠지만, 일반적으로 인식하려는 물체와 카메라 사이의 거리가 멀어질수록 인식률은 현저히 저하된다. 따라서 로봇이 미지의 공간에서 원하는 방 번호 찾기 위해서는 벽과의 거리를 1~1.5m로 유지하며 환경을 탐사하는 것이 중요하다. 그러나 기존의 탐사 기법에서는 로봇을 탐사 영역까지 안전하고도 최적으로 이동시키기 위한 경로계획 방법을 사용하기 때문에, 벽과 로봇의 거리를 일정하게 유지시켜 줄 수가 없다. 이에 대한 한 예가 그림 2에 나타나있다. 그림 2(a)는 구배법(gradient method) [8]을 통해 탐사 노드까지의 경로를 추출한 모습을 나타낸다. 로봇이 그림 2의 경로를 통해 이동하면, 로봇의 이동 경로와 벽과의 거리는 10m 이상 떨어져 있어서, 방 번호 자체를 인식할 수 없다. 하지만 만약 탐사 노드까지의 이동 경로가 그림 2(b)와 같이 생성된다면 로

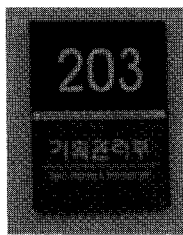


그림 1. 문에 붙어 있는 방 번호.
Fig. 1. Room number on the door.

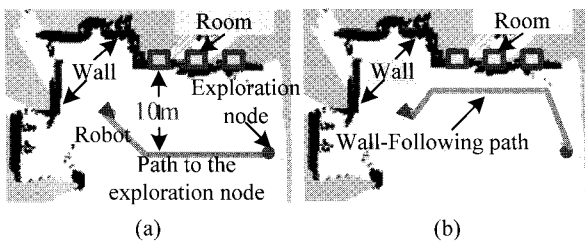


그림 2. 탐사노드까지의 경로: (a) 구배법에 의한 최적경로, (b) 벽추종 경로.
Fig. 2. The path to the exploration node: (a) optimal path generated by the gradient method, and (b) wall-following path.

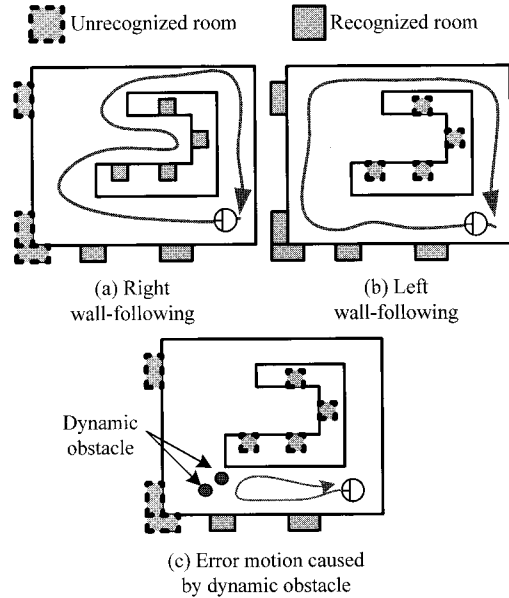


그림 3. 벽추종 행위를 통한 탐사기법의 문제점.
Fig. 3. Problems with room exploration strategy based on wall-following motion.

봇은 방 번호를 인식할 수 있는 확률이 높아지게 되며 이는 목표 방을 찾을 수 있는 확률이 높아짐을 의미한다.

그림 2(b)와 같은 벽추종 경로를 생성하지 않더라도 센서 정보를 이용한 벽추종 행위를 통해 환경 내의 모든 벽을 따라 이동하면 원하는 목표 방을 찾을 수도 있다. 하지만 그림 3에 나타난 바와 같이, 단순히 벽을 따라 이동하는 방법은 효율성도 떨어지며, 로봇이 어떠한 벽을 따라 이동하는지에 따라 환경 내에 탐사하지 못한 영역이 발생할 수 있는 문제점을 가지고 있다. 이외에도 동적 장애물을 벽으로 인식하여 원활한 방 탐색작업을 수행하지 못하는 문제도 발생할 수 있다.

그림 3(a)는 로봇 기준으로 로봇의 우측 벽을 따라 이동하며 방을 탐색한 결과를 나타내며, 그림 3(b)는 좌측 벽을 따라 방을 탐색한 결과를 나타낸다. 그림 3(c)는 동적 장애물을 벽으로 인식하여, 잘못된 탐색작업을 수행하는 모습을 나타낸다. 그림 3(a), (b), (c) 모두 일정 부분 탐사하지 못한 영역이 발생한 것을 확인할 수 있다. 따라서 위와 같은 문제점을 해결하며 보다 많은 방 번호를 인식하기 위한 벽추종 경로 계획기법이 필요하다.

2. 환경 재탐사

로봇이 벽추종 경로를 통해 미지의 공간을 탐사하여도 여러 불확실성으로 인해 목표 방을 못 찾는 경우가 발생한다. 한 예로 로봇의 위치 불확실성으로 인해, 로봇과 벽과의 거리가 카메라가 인식할 수 있는 범위보다 멀어지게 되면, 로봇은 방 번호를 인식하지 못한 상태에서 다른 곳으로 이동하게 된다. 만약 위치 불확실성으로 인해 인식하지 못한 방 번호가 로봇이 찾아가야 하는 목표 방의 호수였다면, 로봇은 환경의 탐사를 다 끝마친 후에도 목표 방을 찾을 수 없는 상황이 발생한다. 이외에도 이동 장애물에 의한 방 번호 가림, 계산 부하에 따른 인식 실패 등으로 방 번호를 인식하지 못하는 상황이 발생한다. 따라서 미지의 공간을 탐사하며 얻은

기존의 환경정보를 바탕으로 목표 방이 존재할 만한 공간을 재탐사할 수 있는 방법이 필요하다.

III. 방 찾기 탐사 기법

미지의 공간에서 방 찾기를 시작하면 로봇은 비전 PC에 위치한 방 번호 인식기를 수행 시킨다. 동시에 벽면에 위치한 방 번호를 보다 잘 인식하기 위해 카메라가 장착되어 있는 로봇의 머리를 왼쪽 또는 오른쪽으로 90° 회전 시킨다. 본 연구에서는 로봇의 머리를 왼쪽으로 90° 회전 시켰다. 이후 방 번호 인식기는 카메라로부터 얻는 영상정보를 분석하여, 영상 내에 방 번호가 존재할 경우 인식한 방 번호를 주행 PC로 전송하는 과정을 목표 방을 찾을 때까지 반복한다.

주행 PC에서는 레이저 스캐너와 초음파 센서를 이용하여 미지의 공간을 탐사하는 과정을 수행한다. 환경 탐사의 첫 번째 단계는 그림 4(a)와 같이 거리센서(레이저, 초음파)를 통해 환경내의 장애물과 벽을 탐지하여, 그림 4(b)와 같은 격자 지도를 작성한다. 작성된 격자지도에서 미지의 영역과 기지의 영역의 경계면인 프론티어(Frontier)영역을 추출해 낸다.

두 번째 단계는 앞서 추출한 프론티어 영역들을 그림 5(a)와 같이 군집화한 후, 그림 5(b)와 같이 군집화된 각각의 프론티어 영역의 무게중심을 구한다. 각 프론티어에서 구해진 무게중심은 탐사노드 후보가 되며, 로봇이 미지의 공간을 탐사하기 위해 방문해야 하는 탐사지점이 된다.

방 탐사 과정의 세 번째 단계는 추출된 탐사노드 후보들 중에서 어떠한 노드를 선택하여 방문할 것인지를 판단하는

것이다. 노드 선택은 그림 5(b)와 같이 추출된 노드마다 노드 선택 이득(node selection gain)을 계산하여, 노드 선택 이득이 가장 큰 노드를 방문 노드로 설정한다. 노드 선택 이득은 다음과 같이 구한다.

$$U_{NS} = \alpha_{info} \cdot G_{info} + \alpha_{dist} \cdot G_{dist} + \alpha_{dir} \cdot G_{dir} \quad (1)$$

여기서, G_{info} , G_{dist} , G_{dir} 는 각 노드에서 얻을 수 있는 정보량, 로봇과의 거리, 방향에 관련되는 이득이며, α_{info} , α_{dist} , α_{dir} 은 G_{info} , G_{dist} , G_{dir} 의 가중치이다.

정보이득(information gain) G_{info} 는 다음과 같이 구한다[2].

$$H_i = -p_i \log p_i - (1 - p_i) \log(1 - p_i)$$

$$G_{info} = \frac{\frac{1}{n} \sum_i (H_i - H_{i+1})}{\Delta H^*} \quad (2)$$

여기서 p_i 는 한 노드에서 일정각도(예를 들어, 10°) 간격으로 360° 범위를 거리센서의 최대 범위 또는 장애물이나 미지의 영역을 만날 때까지 광선추적(ray casting)을 수행하여, 광선추적이 끝난 격자의 점유확률을 나타내며, H_i 는 p_i 를 통해 계산한 정보 엔트로피이다. ΔH^* 는 정규화 상수이며, H_i 와 H_{i+1} 차 값 중에서 가장 큰 값을 이용한다.

G_{info} 가 큰 높은 노드일수록, 미지의 공간에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다.

거리이득(distance gain) G_{dist} 는 다음과 같이 구한다.

$$G_{dist} = 1 - \frac{D}{D_{total}} \quad (3)$$

여기서, D 는 로봇에서 노드까지 생성된 경로의 길이를 뜻하며, D_{total} 은 로봇에서 모든 노드까지 구한 경로들의 길이의 총합을 나타낸다. G_{dist} 은 로봇과 노드와의 거리가 가까울수록 큰 값을 갖는다.

방향이득(direction gain) G_{dir} 는 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \theta_i - \theta_{robot}, G_{dir} = 1 - \left| \frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{max}} \right| \quad (4)$$

여기서 θ_i 는 i 번째 노드와 로봇과의 각도를, θ_{robot} 은 글로벌 좌표계 상에서의 로봇 각도를 나타낸다. G_{dir} 은 로봇이 향하는 방향과 로봇과 노드를 잇는 선이 향하는 방향 간의 차이가 작을수록 큰 값을 갖는다.

본 연구의 목적은 환경을 모델링하기 위해 미지의 공간을 탐사하는 것이 아니라 빠른 시간 안에 목표 방을 찾는 것이다. 따라서 일반적으로 많은 방들이 존재하는 복도와 같은 공간에서는 탐사 방향을 변경하지 않는 것이 목표 방을 찾기에는 유리하다. 또한 보다 많은 미지의 공간에 대한 정보를 얻는 것이 탐사에 유리하기 때문에 본 연구에서는 α_{info} , α_{dist} , α_{dir} 의 값을 0.4, 0.2, 0.4로 각각 설정하였다.

그림 6에서 보듯이, 방 탐사과정은 앞서 설명한 세 단계를 목표 방을 찾거나 미지의 공간이 더 이상 존재하지 않을 때까지 반복적으로 수행한다. 그림 6(a)는 미지의 공간에서 프론티어 영역을 추출한 모습을 보여주며, 그림 6(b)는 프론티어 영역을 이용하여 로봇이 방문해야 할 노드들을 추출한 모습을 나타낸다. 그림 6(c)는 각각의 노드에서, G_{info} , G_{dist} , G_{dir} 를

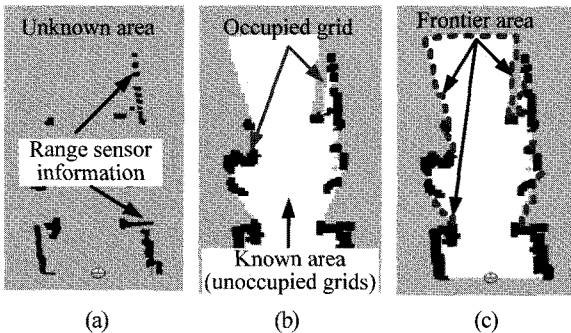


그림 4. 프론티어 영역 추출과정.
Fig. 4. Procedure of frontier area extraction. (a) range sensor information, (b) occupied and unoccupied grids, (c) frontier grids.

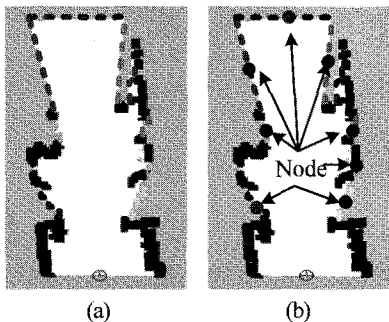


그림 5. 탐사노드 후보의 추출과정.
Fig. 5. Procedure for extracting exploration node candidates. (a) clustered frontier grids, (b) candidates of exploration node.

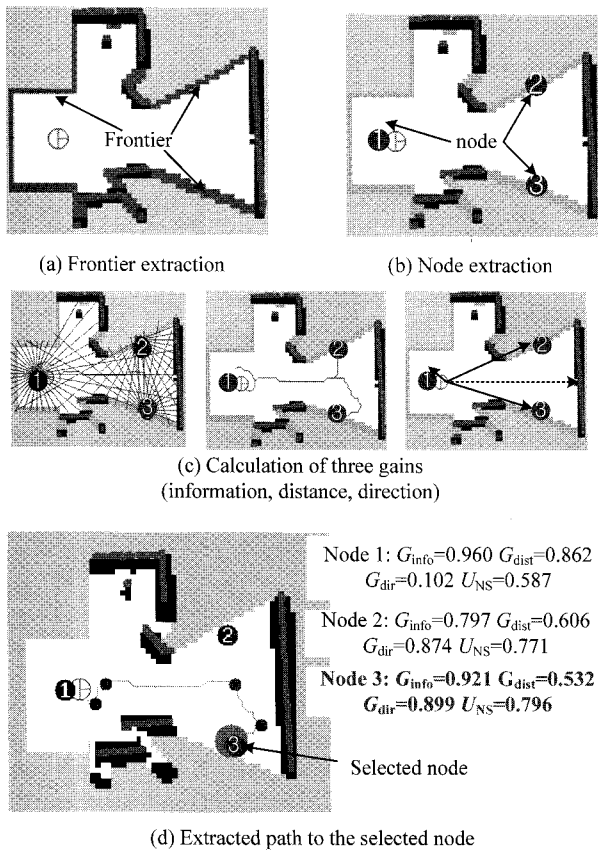


그림 6. 전체적인 방 탐사 과정.
Fig. 6. Overall procedure for exploration for room fining.

계산하는 과정을 나타내며, 그림 6(d)는 각 노드의 U_{NS} 를 계산하여, U_{NS} 가 가장 큰 3번 노드를 로봇의 방문노드로 설정하는 모습을 나타낸다. 본 장에서는 전체적인 방 탐사 과정에 대해서 기술하였다. 다음 장에서는 노드까지 보다 많은 방 번호를 인식하며 이동할 수 있는 벽추종 경로계획 기법에 대해 설명하도록 한다.

IV. 벽추종 경로계획 기법

벽추종 경로계획의 첫 번째 단계는 세선화(thinning)기법 [9]을 통해 벽에서부터 1m 떨어진 지점들의 좌표정보를 추출하는 작업이다. 그림 7은 해상도가 10cm인 격자지도에 세선화 기법을 적용한 모습을 나타낸다. 그림 7(a)는 환경을 나타낸 격자지도이며, 그림 7(b)는 격자지도 내에서 세선화 기법이 적용될 미점유지역(free space or unoccupied area)을 나타낸다. 세선화 과정이란 벽과 물체로부터 한번에 한 격자만큼씩 겹질을 벗겨내듯이 미점유격자를 제거해 나가서 궁극적으로는 벽과 물체의 중앙에 한 격자 두께의 세선(thin line)을 추출해 내는 기법이다. 그림 7(c)는 세선화 과정을 한번 수행한 결과이며, 그림 7(f)는 모든 세선화 과정이 끝난 후의 결과로 한 격자 두께의 세선이 형성되어 있다.

본 연구에서는 벽과 1m의 일정 거리만큼 떨어진 지점들을 추출하면 되므로 미점유 지역에 세선화 과정을 10번 수행하여 그림 7(d)와 같이 벽과 거리가 균일하게 1m만큼 떨어진 격자들의 좌표들을 포함한 미점유 집합을 얻을 수 있다. 벽추종 경로계획의 두 번째 단계는, 그림 7(d)의 미점유 집합에

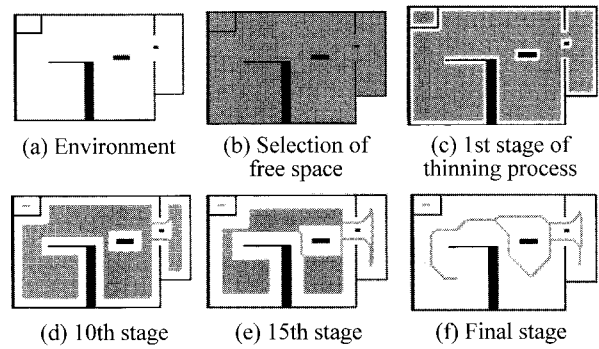


그림 7. 세선화 과정.
Fig. 7. Thinning process.

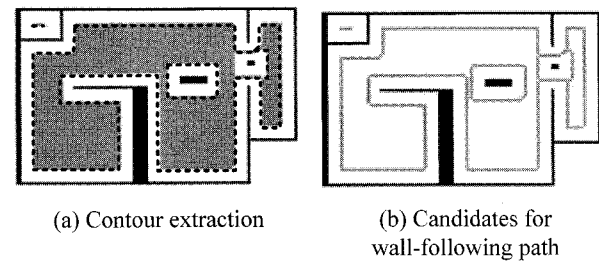


그림 8. 벽추종 경로 후보군 생성.
Fig. 8. Extraction of candidates for wall-following path.

서 벽과 1m만큼 떨어진 지점만을 추출하는 것으로, 그 과정을 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)의 점선들은 그림 7(d)의 미점유 집합에서 윤곽선 추출 기법을 통해 추출한 점들이며, 그림 8(b)는 윤곽선 추출을 통해 최종적으로 획득한 벽추종 경로 후보군(CWFP : Candidates for Wall-Following Path)이다.

$$CWFP = \{c_1, c_2, \dots, c_N\} \tag{5}$$

여기서, c_i 는 각 격자의 좌표를, N 은 CWFP를 구성하는 격자의 수를 나타낸다.

벽추종 경로계획의 세 번째 단계는, 시작점과 목표점을 CWFP와 연결하는 과정이다. 여기서 시작점은 로봇의 현재 위치를, 목표점은 로봇이 방문해야 할 탐사노드를 의미한다. 그림 9를 통해 시작점과 목표점을 CWFP에 연결하는 방법을 설명하도록 한다. 그림 9(a)에서 빨간 원으로 표시된 부분이 시작점이며, 녹색으로 표시된 격자들이 CWFP를 나타낸다. 시작점을 CWFP에 연결하기 위한 첫 번째 과정으로, 그림 9(b)에서와 같이 시작점에서 1° 간격으로 360° 범위를 CWFP 내의 격자들을 만날 때까지 광선 추적을 수행하며, 각 광선들은 점선으로 된 화살표로 나타낸다. 설명의 편의를 위해 360개의 광선 중 일부 광선만을 나타내었다. 그림 9(c)에는 광선이 지나가는 격자들을 빗금으로 표시하였으며, 이들을 광선격자 집합이라고 정의하였다. 하나의 광선은 하나의 광선격자 집합을 가지고 있으며, 그림 9(c)에는 서로 다른 무늬로 표시된 3개의 광선격자 집합이 나타나 있다. 즉, 광선의 개수가 360개 존재하면, 광선격자 집합의 개수 또한 360개가 존재한다.

시작점과 CWFP를 연결하는 두 번째 과정은, 그림 9(d)의 검색영역을 이용하여 그림 9(c)와 같이 각각의 광선격자 집합을 검사한다. 검색영역은 로봇 몸체의 직경을 반경으로 한

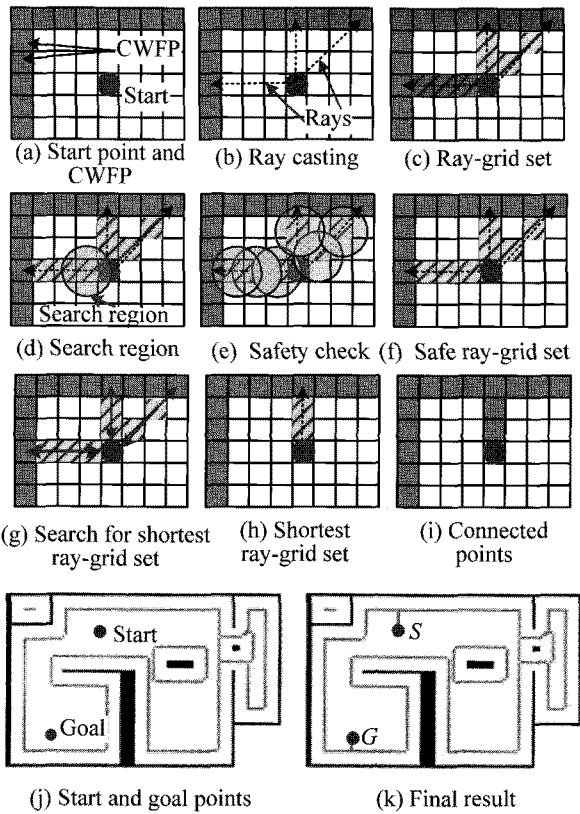


그림 9. CWF와 시작점 및 도착점의 연결과정.
 Fig. 9. Process of start and goal positions-connecting with CWF.

원의 형태로 정의하였다. 검색영역 내에 장애물(점유격자)가 존재하는 광선격자 집합은 시작점과 CWF를 연결하는 과정에서 제외된다. 그림 9(f)에는 광선격자 주변에 장애물이 존재하지 않은 안전한 광선격자 집합이 나타나 있다.

시작점과 CWF를 연결하는 세 번째 과정은 그림 9(f)에 나타나 있는 광선격자 집합 중 CWF와의 거리가 가장 짧은 광선격자 집합을 찾는다. 광선의 길이를 광선격자 집합의 길이로 정의하면, 최단거리 광선격자 집합을 찾아낼 수 있다. 그림 9(j)에는 최단거리 광선격자 집합의 좌표들을 CWF에 추가하여, 기존의 CWF와 시작점이 연결된 모습을 나타낸다. 그림 9(j)에는 시작점과 도착점이 나타나 있으며, 그림 9(k)에는 시작점과 도착점을 포함한 최종경로가 나타나 있다.

벽추종 경로계획의 네 번째 단계는, 시작점과 도착점을 CWF에 연결한 후, CWF에서 에지와 노드를 추출하고 이들 간의 연관관계를 찾는 것이다. 그림 10(a)는 [10]에서 제안된 방법을 통해 추출한 분기노드(branch node)와 단말노드(end node)가 표현되어 있으며, 시작점 및 도착 점 또한 하나의 노드로 정의된다. 추출된 노드들은 다음과 같은 노드 집합 V 에 저장된다.

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (6)$$

여기서 v_i 는 노드 좌표이다. 다음 과정은 V 내에 존재하는 모든 v_i 들과 연결된 에지들을 추출하고, 추출된 에지 정보를 이용하여 노드 간의 연관관계를 생성하는 것이다. 그림 10(b)~(d)를 통해 그 과정을 설명한다. 그림 10(b)에서 노드 1과 연결된 CWF 내의 격자들은 모두 세 점이다. 이 점들을 각 에

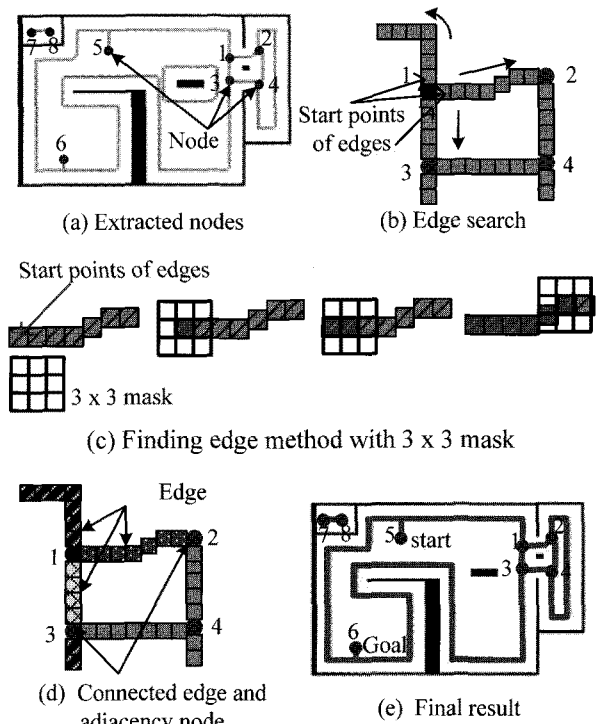


그림 10. 노드 및 에지간의 연관관계 생성.
 Fig. 10. Process of generation of association relationship between nodes and edges.

지의 시작점으로 가정하고 그림 10(c)에서와 같이 시작점을 중심으로 주변 8격자를 3x3 마스크로 검색한다. 마스크 내에 CWF 격자가 존재하면, 그 점을 에지의 구성요소로 등록하며 마스크의 중심을 새롭게 찾은 점으로 이동한다. 이와 같은 과정을 V 내에 존재하는 노드와 만날 때까지 반복하면 다음과 같은 에지 집합 E 를 얻을 수 있다.

$$E = \{e_{v_1-v_2}, e_{v_1-v_3}, \dots, e_{v_i-v_j}, \dots\} \quad (7)$$

여기서, $e_{v_i-v_j}$ 는 노드 v_i 와 v_j 간에 연결된 에지를 의미한다. 앞선 에지 추출과정을 통해 그림 10(d)의 노드 1은 노드 2, 3, 5와 연결되어 있음을 알 수 있으며, 그림 10(e)에는 모든 노드에서 추출한 에지 집합 E 와 노드 집합 V 가 표현되어 있다. 또한 그림 10(e)는 E, V 를 통해 가중치가 부여된 그래프 구조의 형태를 나타낸다. 가중치는 에지의 길이로 설정하며, 에지의 길이는 에지를 구성하는 격자 수를 통해 구할 수 있다. 예를 들어, 그림 10(d)에서 노드 1과 2 사이를 연결하는 에지는 7개의 격자로 구성되어 있으며, 한 격자의 해상도는 10cm 이기 때문에, 이 에지의 가중치는 70으로 설정된다.

벽추종 경로계획의 마지막 단계는, 가중치가 부여된 그래프와 Dijkstra 알고리즘 [11]을 통해 목적지까지의 벽을 추종하는 최단 경로를 추출하는 과정이다. 본 논문에서는 E, V 와 Dijkstra 알고리즘을 통해 최단경로를 추출하는 부분은 생략하고, 시뮬레이션 환경 및 실제 탐사 과정에서 앞서 설명한 모든 과정을 통해 생성된 벽추종 경로를 그림 11에 나타내었다. 그림 11(a)는 시뮬레이션 환경에서 추출한 벽추종 경로계획의 결과이며, 그림 11(b)는 실제 탐사과정에서 추출한 탐사 노드까지의 벽추종 경로를 나타낸 것이다.

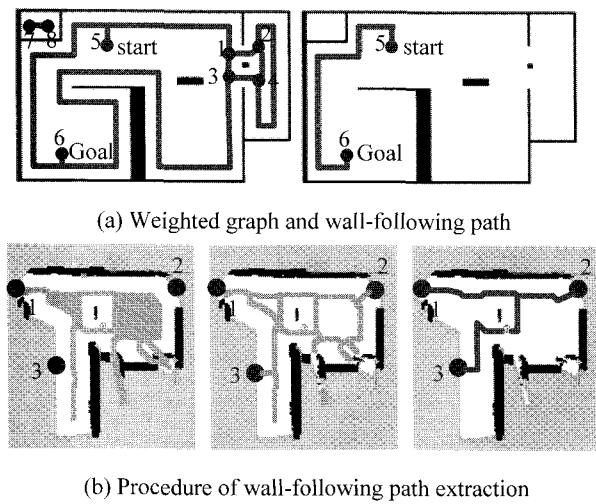


그림 11. 벽추종 경로.
Fig. 11. Wall-following path.

V. 환경 재탐사

환경 재탐사는 로봇이 모든 미지의 공간을 이동하며 환경을 모델링한 후에도 목적 방을 찾지 못했을 때 수행된다. 환경 재탐사 방법은 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째 방법은 환경을 모델링하며 얻은 방 번호에 대한 정보가 충분치 않을 때, 모델링된 환경지도를 이용하여 환경 전체를 재탐사 하는 방법이며, 두 번째 방법은 환경의 일부만을 재탐사 하는 방법이다. 방 번호에 대한 정보가 충분치 않다고 판단하는 기준은 다음과 같다.

$$NR = \underset{R_i}{\operatorname{argmin}} |TR - R_i|$$

$$|TR - NR| > \Delta \Rightarrow \text{Reexp}_1 \quad (8)$$

$$|TR - NR| < \Delta \Rightarrow \text{Reexp}_2$$

여기서, TR 은 목표 방(target room) 번호이고, R_i 는 탐사과정 중 인식한 방 번호들이며 Δ 는 임계값으로써, 다수의 실험을 통해 가장 좋은 성능을 낼 수 있는 값으로 설정하였다. 본 실험에서는 7로 설정하였다. Reexp_1 은 첫 번째 재탐사 방법을 뜻하며, Reexp_2 는 두 번째 재탐사 방법을 뜻한다.

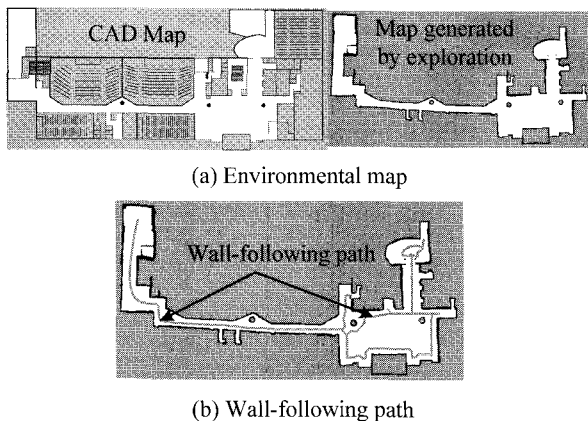


그림 12. 전체 지도에 대한 벽추종 경로.
Fig. 12. Wall-following path of whole environmental map.

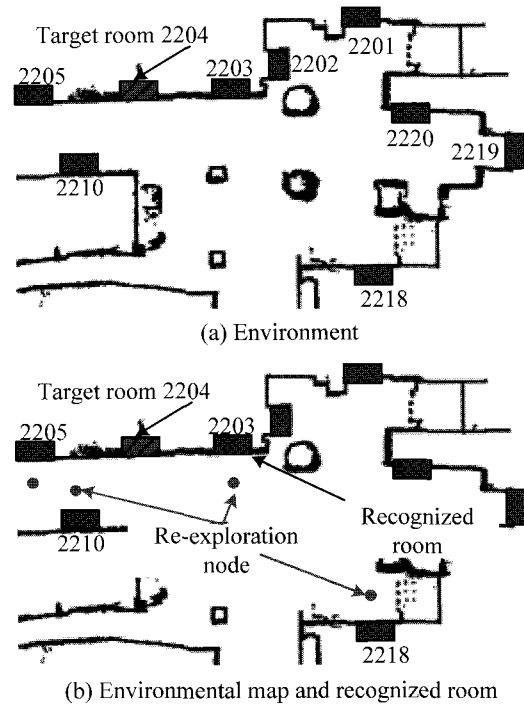


그림 13. 환경 지도와 인식된 방 번호.
Fig. 13. Environmental map and recognized room.

그림 12(a)는 실제 환경에 대한 CAD 지도와 탐사 과정을 통해 환경을 모델링한 지도를 표현하였으며, 그림 12(b)에는 탐사를 통해 얻은 지도에서 추출된 벽추종 경로의 모습을 나타낸다. 그림 12(b)와 같이 추출된 경로는 환경 내에서 로봇이 갈수 있는 모든 공간에서 벽과 1m만큼 떨어진 지점들의 집합을 나타내기 때문에, 추출된 경로를 따라 이동하면 로봇은 환경 전체를 재탐사 할 수 있게 된다. 본 방법은 다소 효율적이지 못한 부분이 있지만, 방에 대한 정보가 부정확한 상황에서 목적 방을 찾을 수 있는 가장 확실한 방법이다.

환경의 일부분만을 재탐사하는 두 번째 방법은 그림 13, 14를 통해 설명한다. 그림 13(a)는 탐사를 수행할 실제 공간을 나타내며, 그림 13(b)는 탐사를 통해 모델링한 환경지도와 인식한 방 번호를 나타낸다. 방 번호가 나타나 있지 않은 곳은 방 번호를 인식하지 못한 곳이다. 그림 13(b)에서 빨간 원으로 표시한 점은 재탐사 과정에서 로봇이 방문해야 하는 지점을 나타내며 본 연구에서는 재탐사 노드로 정의하였다. 재탐사 노드의 위치는 초기 탐사과정에서 방 번호를 인식한 순간의 로봇 위치이다. 재탐사 노드들은 인식된 방의 개수와 동일하게 존재하며, 각 방마다 하나의 재탐사 노드를 가진다.

그림 13(b)와 같이 환경에 대한 탐사가 끝난 상태에서 목표 방을 찾지 못한 경우에, 로봇은 목표 방 번호와 가장 근접한 방 번호의 위치를 확보해야 한다. 그림 13(b)에서 목표 방 번호와 가장 근접한 방 번호는 식 (8)을 통해 NR (2203)임을 알 수 있다. 로봇은 NR 에 대응하는 재탐사 노드를 방문하여 주변을 재탐사 하면 효율적으로 목표 방을 찾을 수 있다. 예를 들어, 목표 방이 NR 의 좌측에 존재함을 예측할 수 있다면 그림 14(a)와 같이 최적의 경로를 이용하여 NR 의 재탐사 노드까지 이동한 후, NR 의 좌측방향으로 재탐사를 수행하면 매우 효율적으로 목표 방을 찾을 수 있다. 하지만 로봇은 목

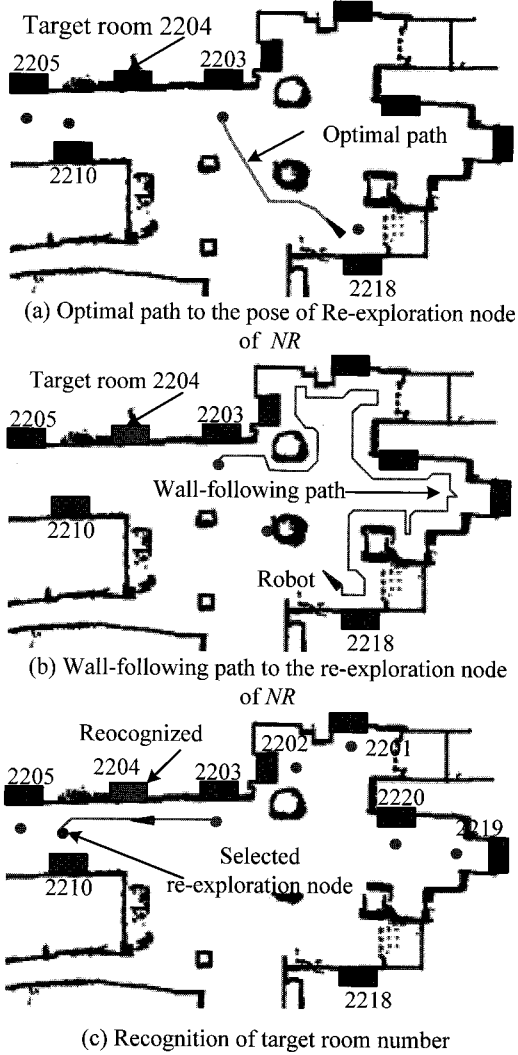


그림 14. 방 찾기를 위한 재탐사 과정.
 Fig. 14. Procedure for re-exploration for room finding.

표 방이 NR의 재탐사 노드를 기준으로 어느 방향(좌측 또는 우측)에 존재하는지 쉽게 판단할 수 없다.

따라서 우선 그림 14(b)와 같이 NR을 기준으로 우측 벽면을 추종하는 경로를 통해 NR의 재탐사 노드까지 방 번호를 인식하며 이동한다. 이동 중에 목표 방이 존재하면, 재탐사 과정을 끝마친다. 만약 로봇이 NR의 재탐사 노드에 도착할 때까지 목표 방을 찾지 못했다면, 현재 로봇 위치를 기준으로 모든 재탐사 노드들의 G_{dir} 와 G_{dist} 를 계산하여 G_{dir} 와 G_{dist} 의 합이 가장 큰 재탐사 노드를 새로운 목표 지점으로 하여 이동한다. 그림 14(c)에서 로봇 뒤에 위치한 재탐사 노드들의 G_{dir} 은 로봇 앞에 위치한 재탐사 노드들의 G_{dir} 보다 현저히 작기 때문에 그림 14(b)에서 이미 탐사한 지역을 재탐사할 경우는 발생하지 않는다. 그림 14(c)는 목표지점까지의 벽추종 경로를 따라 재탐사를 수행하여 목표 방을 찾은 모습을 나타낸다.

VI. 방 찾기

1. 시스템 구성

그림 15에는 본 연구에서 사용된 차륜구동 방식의 로봇과 탐사에 사용된 센서조합에 대하여 나타내었다. 이 로봇에는

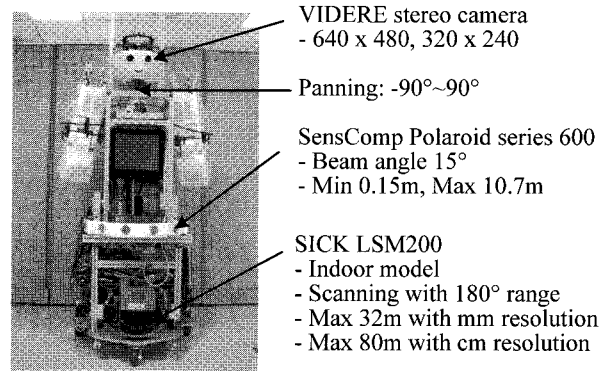


그림 15. 로봇 시스템.
 Fig. 15. Robot system.

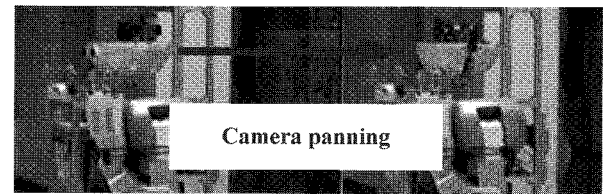


그림 16. 카메라 회전.
 Fig. 16. Camera panning.

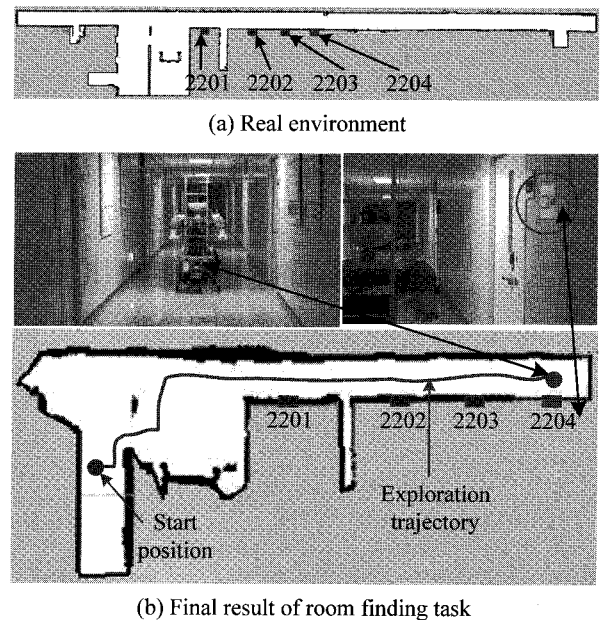


그림 17. 방 찾기 작업의 최종 결과.
 Fig. 17. Final result of room finding task.

총 4대의 PC (CPU: P4-M 2.2GHz, OS: Linux Fedora core5)가 탑재되어 있어 각 PC는 비전, 주행, 음성, 조작을 담당하는데, 본 연구에서는 비전 및 주행 PC만을 사용하였다. 주행에는 레이저 스캐너, 스테레오 카메라, 초음파 센서 등을 사용하였다.

2. 방 찾기

본 연구에서 로봇이 찾아야 하는 방 번호는 2204호로 설정하였다. 방 찾기가 수행되면 로봇은 그림 16과 같이 자신의 머리를 왼쪽으로 90도 회전시키며 방 번호 인식을 시작한다.

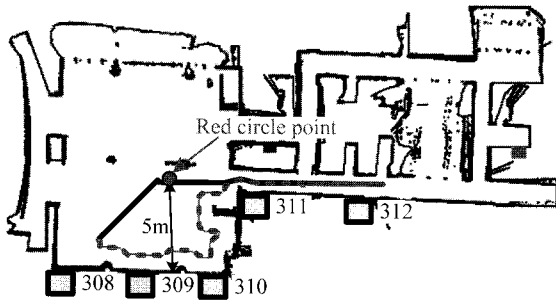


그림 18. 넓은 환경에서의 실험.

Fig. 18. Experiment in large scale environment.

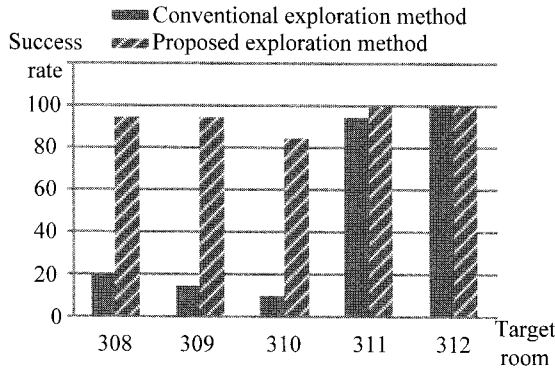


그림 19. 넓은 환경에서의 방 찾기 실험결과.

Fig. 19. Experiment result of room finding task in large scale environment.

그림 17(a)에는 방 찾기 작업이 수행된 전체 환경이 표현되어 있으며, 그림 17(b)에는 로봇이 미지의 공간에서 목적 방을 찾은 모습과 함께 탐사 과정을 통해 작성한 지도가 표현되어 있다.

두 번째 방 찾기 실험은 목적 방을 그림 18에 표시된 308호에서 312호로 변경하면서 각 20번씩 수행하였다. 그림 18에서 파란색 직선은 최적 경로계획기를 이용해 방 찾기를 수행할 때의 로봇 궤적 일부를 나타내며, 빨간색 점선은 벽추종 경로계획기를 이용할 때의 로봇 궤적 일부를 나타낸다. 직관적으로 보더라도, 최적 경로계획기를 이용한 탐사 방법은 308-310호를 찾을 확률이 높지 않음을 알 수 있다. 반면 제안된 탐사 방법을 통해서 모든 방을 찾을 확률이 높음을 알 수 있다. 전체적인 실험결과는 그림 19에 나타나 있으며, 본 실험을 통해 환경이 커짐에 따라 기존의 탐사 방법보다는 제안된 탐사방법이 목적 방 찾기에 더욱 유리함을 알 수 있다.

VII. 결론

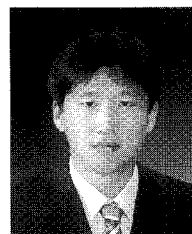
본 연구에서는 벽추종 경로계획 기법 및 환경 재탐사 기법을 통해 보다 효율적이며 안정적으로 목적 방을 찾을 수 있는 탐사 기법을 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 1) 벽추종 경로계획 방법을 통해 로봇은 기존의 탐사 기법보다 효율적으로 방 찾기를 수행 할 수 있었으며, 실제 대회에서도 빠른 시간 안에 목표 방을 찾을 수 있었다. 제안된 경로계획 방법은 탐사 이외에도 비전 정보를 획득해야 하는 다양한 작업에 유용하게 사용될 수 있다.
- 2) 본 연구에서 제안한 환경 재탐사 방법을 통해 방 찾기

성공률을 향상시킬 수 있었다. 그러나 부족한 환경의 예측능력으로 인해, 비 효율적으로 재 탐사를 수행하는 경우 또한 발생하였다. 따라서 추후 연구에서는 확률기법을 이용해 보다 안전하고 효율적으로 환경을 재 탐사 할 수 있는 방법이 필요하다.

참고문헌

- [1] B. Yamauchi, "A frontier-based approach for autonomous exploration," *Proceedings of the IEEE international conference on Robotics and Automation*, Monterey, CA, pp. 146-151, July 1997.
- [2] A. Makarenko, S. B. Williams, F. Bourgault, H. F. Durrant-Whyte, "An experiment in integrated exploration," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Systems*, EPFL, Lausanne, Switzerland, vol. 1, pp. 534-539, Oct. 2002.
- [3] T. B. Kwon and J. B. Song, "Thinning-based topological exploration using position possibility of topological nodes," *International Journal of Advanced Robotics*, vol. 22, no. 2-3, pp. 339-359(21), 2008.
- [4] H. H. Gonzalez-Banos and J.-C. Latombe, "Navigation strategies for exploring indoor environments," *International Journal of Robotics Research*, vol. 21, pp. 829-848, 2004.
- [5] L. Freda and G. Oriolo, "Frontier-based probabilistic strategies for sensor-based exploration," *Proceedings of the IEEE international conference on Robotics and Automation*, pp. 3881-3887, 2005.
- [6] <http://www.videredesign.com/>
- [7] <http://www.ptgrey.com/>
- [8] K. Konolige, "A gradient method for realtime robot control," *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 639-646, 2000.
- [9] J. R. Parker, *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*, John Wiley & Sons, pp. 203-218, 1998.
- [10] 권태범, 송재복, "지역 및 전역 환경에 대한 세션화 기반 위상지도의 작성," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, vol. 4, no. 7, pp. 693-699, 2006.
- [11] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische Mathematik I*, 269-271, (1959).



박종태

2005년 고려대학교 전산학과(이학사).
2007년 고려대학교 메카트로닉스학과(공학석사). 현재 메카트로닉스학과 박사과정 재학중. 관심분야는 이동로봇의 탐사 기법 및 시스템 아키텍처.



송재복

1983년 서울대학교 기계공학과(공학사).
1986년 서울대학교 기계공설계학과(공학석사). 1992년 MIT 기계공학과(공학박사). 1993년~현재 고려대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 이동로봇의 주행, 안전 머니플레이터, 지능로봇 시스템의 설계 및 제어.