

이동로봇의 안전한 주행을 위한 광선투사법 기반의 실내 경로계획

Path Planning based on Ray-casting in Indoor Environments for Safe Navigation of a Mobile Robot

김 종 원¹, 송 재 복²

Kim Jong-Won¹, Song Jae-Bok²

Abstract A gradient method can provide a global optimal path in indoor environments. However, the optimal path can be often generated in narrow areas despite a sufficient wide area which lead to safe navigation. This paper presents a novel approach to path planning for safe navigation of a mobile robot. The proposed algorithm extracts empty regions using a ray-casting method and then generates temporary waypoints in wider regions in order to reach the goal fast and safely. The experimental results show that the proposed method can generate paths in the wide regions in most cases and the robot can reach the goal safely at high speeds.

Keywords: Mobile Robot, Path Planning, Gradient Method, Ray-casting

1. 서론

이동로봇은 환경 정보로부터 출발점에서 목표점까지의 최적 경로를 생성하는 경로계획 기능과 목표점까지의 이동 중에 장애물과의 충돌을 회피하면서 안전하게 이동할 수 있는 충돌 회피 기능을 갖추고 있어야 한다¹⁾. 경로계획과 관련된 연구는 로드맵(road map) 방식, 셀분할(cell decomposition) 방식, 포텐셜 필드(potential field) 방식 등이 제안되었다²⁻⁵⁾. 그러나 이와 같은 경로계획 방법들은 경우에 따라서 국부 최소(local minimum)에 빠지거나, 많은 계산시간이 소요되며, 동적인 환경에 적용하기 쉽지 않은 문제점 등을 가지고 있다.

현재 실내환경에서 일반적으로 사용되고 있는 경로계획 방법으로 구배법(gradient method)이 있다⁶⁾. 이 방법은 시작점에서 목표점까지의 최소비용에 기반한 최적의 전역경로를 실시간으로 생성할 수 있으며, 국부 최소에도 빠지지

않는 장점을 가지고 있다. 그러나 경로 생성 시에 로봇의 직경보다 약간 큰 좁은 공간으로 통과하는 경로의 비용이 작은 경우에는, 로봇의 직경보다 2배 이상 큰 넓은 공간이 존재함에도 불구하고 좁은 공간으로 경로가 생성되는 단점이 있다.

그림 1에 나타난 경로는 모두 구배법으로 생성된 것으로, 점선 부분은 로봇의 직경보다 약간 큰 공간으로 충돌 발생 가능성이 높은 지역이다. 이와 같은 지역에 경로가 생성되는 이유는 이 부근에서의 경로 비용이 다른 부분보다 작기 때문이다. 그러므로 로봇이 좁은 공간에 생성된 경로로 주행하고 있을 때, 위치 불확실성이 커지거나 주변

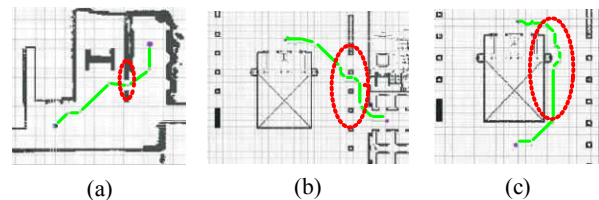


그림 1. 구배법으로 생성된 경로: (a) 좁은 공간에 생성된 경로, (b) 장애물이 밀집된 공간에 생성된 경로, (c) 장애물에 근접하여 생성된 경로

Received : Jul. 09. 2010; Reviewed : Aug. 04. 2010; Accepted : Nov. 09. 2010

※ 본 연구는 지식경제부 지원으로 수행하는 21C 프론티어 연구개발사업 및 융복합형 로봇전문인력 양성사업의 지원으로 수행되었음.

† 교신저자: 고려대학교 기계공학부 교수

¹ 고려대학교 메카트로닉스 협동과정 대학원

환경이 잘 탐지되지 않았을 경우에는 장애물과 충돌할 위험이 있다. 실제 환경에서의 주행 경험에 의하면, 레이저 스캐너 등의 정확한 거리 센서를 사용하는 경우에도 이론적으로 별 문제가 없어 보이는 좁은 공간의 통과는 실패하는 경우가 많다. 이에 대비하기 위하여 좁은 공간 주변에서는 지도의 격자 크기를 작게 하여 보다 정밀한 지도를 사용하기도 하는데, 이를 위하여는 정확한 환경 모델링이 수반되어야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 로봇이 보다 넓은 공간을 찾아 안전하게 주행할 수 있는 경로를 생성하는 기법을 제안한다. 이 때 로봇은 환경지도를 가지고 있다고 가정하며, 광선투사법(ray-casting)을 이용하여 로봇 주변의 환경을 인지하게 된다. 제안한 방식의 장점은, 로봇의 위치 불확실성으로 인해 경로를 벗어나는 경우에도 상대적으로 공간이 넓은 곳에 경로가 생성되기 때문에 국부 최소에 빠지는 현상을 방지할 수 있다. 또한, 넓은 공간에서 경로가 생성되므로 동적 장애물이 나타난 경우에 장애물과의 충돌할 가능성도 낮아진다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 경로계획의 전체 구조 및 광선투사법을 이용하여 로봇이 안전하게 주행할 수 있는 경로생성 기법에 대해 자세히 설명한다. 3장에서는 제안한 방법으로 실제환경에 적용한 결과에 대해 기술하고, 마지막으로 4장에서는 결론을 맺는다.

2. 광선투사법 기반의 경로계획

본 연구에서 새롭게 제안하는 경로계획의 전체 구조는 그림 2와 같다. 시작점에서 목표점까지 장애물이 있는지를 파악하고, 장애물이 없을 경우에는 목표점까지의 직선경로를 생성하고 경로계획을 끝낸다. 장애물이 있는 경우에는 광선투사법을 이용하여 주변 환경을 파악하고, 목표점까지 넓은 공간이면서 가까운 곳을 경유점으로 설정하여 경로를 생성하고, 그 경유점을 새로운 시작점으로 설정한다. 다음 경유점을 설정하는 과정을 반복하면서 목표점까지 경로를 생성한다.

2.1 장애물의 유무 판단

본 논문에서 제안하는 경로계획에서는 우선 주어진 환경지도를 이용하여 시작점과 목표점을 대각선으로 하는 사각형 영역을 만들고, 생성된 영역내의 모든 격자마다 장애물이 있는지를 검사한다. 그림 3(a)처럼 사각형 영역 내

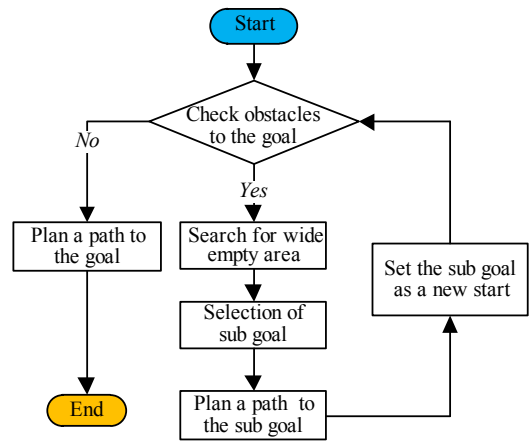


그림 2. 광선투사법을 이용한 경로계획의 전체 구조

에 장애물이 없을 경우에는 목표점까지 이르는 직선 경로를 생성하고, 경로계획을 종료한다. 만약, 그림 3(b)와 같이 시작점에서 목표점까지의 경로 상에 장애물이 존재하는 경우에는, 그림 3(a)와 같은 방법으로는 목표점까지 도달하지 못하므로 광선투사법을 통한 경로계획을 수행한다.

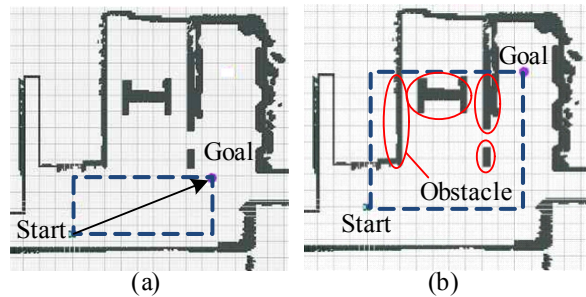


그림 3. 시작점과 목표점 사이에 장애물 유무 판단: (a) 목표점까지 장애물이 존재하지 않는 경우, (b) 목표점까지 장애물이 존재하는 경우

2.2 광선투사법을 이용한 지도정보 계산

광선투사법(ray-casting 또는 ray-tracing)은 가상의 광원에서 나온 빛이 물체의 표면에 반사될 때의 위치를 추적하는 컴퓨터 그래픽용 렌더링 기법이다⁷⁾. 광선투사법에서는, 그림 4(a)와 같이 특정 격자 A를 광원으로 가정하고, 그 격자에서 각도 θ 로 투사된 광선이 도달하는 격자까지의 거리 d_i 를 추출한다. 각도 θ 를 순차적으로 변화시키면 격자 A 주변의 거리정보를 구할 수 있다. 즉, 시작점에서 광선투사법을 수행함으로써 시작점 주변의 거리정보를 구한다. 이 때, 연산량을 줄이기 위해서 모든 각도를 검사하지 않

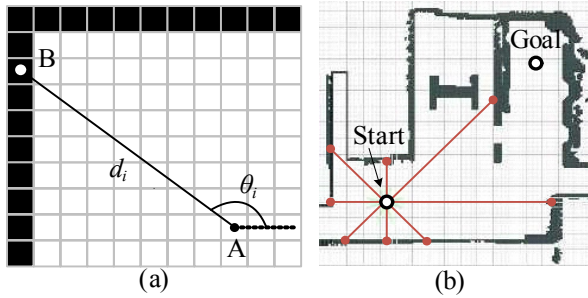


그림 4. 광선투사법: (a) 격자 A에서 격자 B로의 광선투사법, (b) 시작점에서의 광선투사법

고 그림 4(b)와 같이 45° 단위로 여덟 방향으로의 거리 정보만을 구한다.

한편, 시작점 주변 8방향으로 광선투사법을 수행하는 과정에서, 각 광선 상에 있는 격자에서도 상하좌우 4방향으로 광선투사법을 수행하는데, 이 과정을 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 시작점에서 점유격자 B에 도달할 때까지 한 격자씩 검색한다. 이 때, 검색된 격자 a, b, c에서도 상하좌우로 광선투사법을 수행하여 점유된 격자와의 거리 정보를 구한다. 이러한 거리정보를 가지고 로봇 주변의 빈 공간에 대한 지도를 작성할 수 있다. 지도 작성 시에 이미

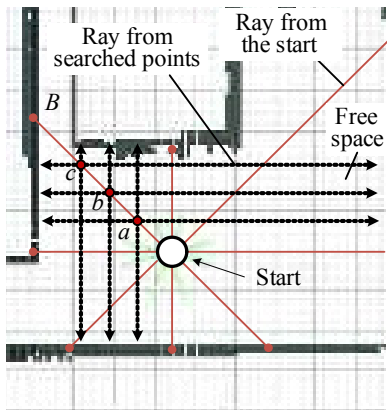


그림 5. 빈 공간에 대한 거리 정보를 얻기 위한 광선투사법

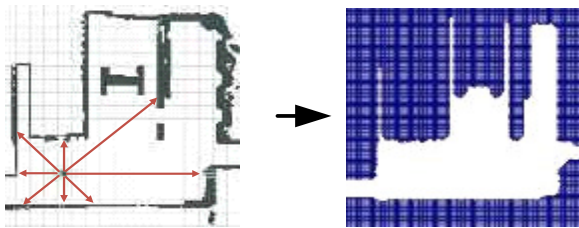


그림 6. 광선투사법을 이용하여 찾은 빈 공간에 대한 정보

검색되었던 영역은 거리정보가 누적되거나 중복되지 않고, 다음 영역으로 검색이 진행된다. 이렇게 함으로써 시작점 주변의 빈 공간을 추출할 수 있으며, 시작점에서 그림 5와 같은 방법으로 광선투사법을 수행한 결과를 그림 6에 나타내었다.

2.3 경유점의 생성

시작점에서의 빈 공간이 검색되었으면 시작점 주변에서 검색된 빈 공간 내에서 목표점까지 빠르고 안전하게 도달하게 하는 경유점을 설정한다. 경유점을 설정하기 위해서는 그림 7과 같이 시작점을 기준으로 상하좌우 및 대각선 방향으로 구성되는 8개의 영역을 만들고, 각 영역의 중심인 $G_1 \sim G_8$ 를 추출한다. 이 때, 각 영역은 로봇의 반경(이 경우, 0.35m)을 고려하여 영역 안에서 장애물을 안전하게 회피할 수 있는 4m * 4m 크기의 영역으로 정하였다.

$G_1 \sim G_8$ 의 8점 중에서 주행 가능한 영역의 넓이와 목표점까지의 거리를 고려하여 하나를 선택해서 경유점으로 선정한다. 우선 8개의 영역에서 비점유 격자의 개수를 계수한 후에, 각 영역 G_i 에서 비점유 격자의 비율과 관련된 변수 N_i 를 다음과 같이 정의한다.

$$N_i = \frac{n_i}{\max(n_i)} (n_i) \quad (1)$$

여기서 n_i 는 G_i 가 속한 영역에 포함된 비점유 격자의 수이고, $\max(n_i)$ 는 8개 영역 중 비점유 격자의 수가 가장 많은 영역의 비점유 격자의 수이다. n_i 의 값이 높을수록 주행 가능한 공간이 넓다는 것을 나타내며, 각 n_i 를 $\max(n_i)$ 로 나누어 N_i 가 0과 1 사이의 값을 갖도록 정규화시켰다. 즉, 주변에 많은 빈 공간을 갖는 영역의 중심점이 높은 값을

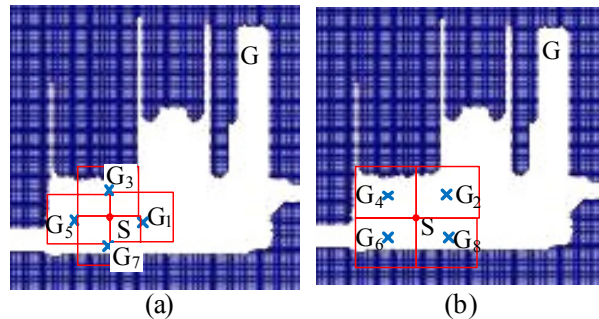


그림 7. 로봇 주변의 8영역의 설정: (a) 상하좌우 방향의 4영역, (b) 대각선 방향의 4영역

갖도록 설정하였다.

다음으로, 8개 영역의 중심에서 목표점까지의 직선 거리를 그림 8에서와 같이 구하고, 영역 중심 G_i 에서 목표점까지의 직선 거리와 관련된 변수 L_i 를 다음과 같이 정의한다.

$$L_i = \frac{\min(l_i)}{l_i} \quad (2)$$

여기서 l_i 는 영역 중심 G_i 와 목표점까지의 직선 거리이고, $\min(l_i)$ 는 8개 영역의 중심점에서 목표점까지 가장 짧은 직선거리 값이다. l_i 의 값이 낮을수록 목표점까지의 거리가 가깝다는 것을 나타내며, $\min(l_i)$ 를 각각의 l_i 로 나누어 L_i 가 0과 1 사이의 값을 갖도록 정규화시켰다. 즉, 목표점까지 짧은 직선 거리를 갖는 영역의 중심점이 높은 값을 갖도록 설정하였다.

식 (1)과 (2)로부터 구한 두 변수에 가중치를 곱하고 서로 더하여 목적함수 C_i 를 얻을 수 있다.

$$C_i = \alpha \cdot N_i + \beta \cdot L_i \quad (3)$$

여기서 α 는 빈 공간에 대한 가중치이고, β 는 목표점까지의 거리에 대한 가중치이다. 빈 공간에 대한 가중치를 훨씬 크게 설정하면 최대한 넓은 영역 위주로 경로가 생성되고, 목표점까지의 가중치를 훨씬 크게 설정하면 목표점을 향해서 직선으로 주행하는 경로가 생성되지만, 지도 상에서 벽을 통과하거나 직선 경로가 아닌 복잡한 모양의 경로가 생성 되어 실제로는 로봇이 주행할 수 없는 경로가 생성되는 경우가 있다. 따라서 주행 가능한 영역을 검사할 때 8개 영역 모든 곳이 장애물이 없을 수도 있으므로 목표점까지의 거리에 대한 가중치를 좀 더 부여하여, α 는 0.3,



그림 8. 임시 영역의 중심과 목표점까지의 직선 거리

β 는 0.7의 가중치 설정을 통해 C_i 의 값이 큰 점이 경유점으로 설정된다. 경유점이 정해지면, 출발점에서 경유점까지는 장애물이 존재하지 않는 공간이므로, 시작점에서 경유점까지는 직선 경로가 추출된다.

2.4 경로 생성

경유점까지 경로가 생성되었으면 이 경유점을 시작점으로 하고, 새로운 경유점을 설정하는 과정을 반복하였다. 즉, 그림 9에서와 같이 경로가 목표점에 도달할 때까지 경유점을 설정하는 작업을 계속하게 된다. 그림 9(a)에서는 처음 경유점이 경로의 시작점이 되어 목표점까지 장애물이 있는지 검사하였다. 그림 9(b)와 (c)에서는 광선투사법을 수행하여 빈 공간을 찾고, 8개 영역의 중심점에서 경유점을 정의하였다. 그림 9(d)에서는 다시 경유점을 시작점으로 정의하여 장애물이 있는지를 검사하고, 그림 9(e)에서는 장애물이 없어 목표점까지 바로 경로가 생성되었다.

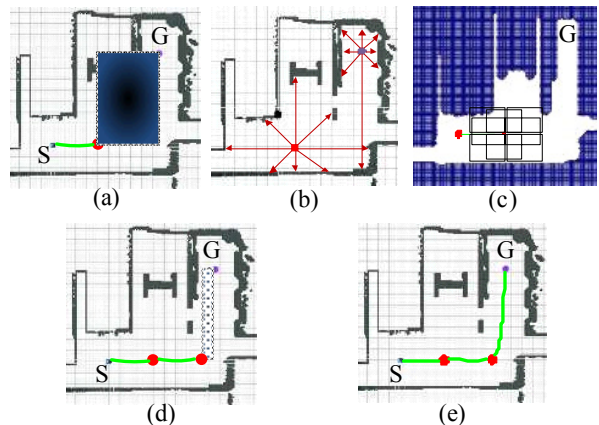


그림 9. 시작점으로부터 목표점까지의 경로 생성 과정

3. 실험 결과

다양한 실내환경에 대하여 광선투사법을 이용해서 시작점에서 목표점까지의 경로를 생성하였고, 이를 구배법으로 생성된 경로와 비교하였다. 생성된 경로로 로봇이 실제로 주행하는 실험을 통하여 로봇의 이동속도 및 도달시간 등을 비교하였고, 이동 장애물에 대한 회피 용이성을 실험하였다. 실험용 로봇으로는 MobileRobot사의 Pioneer 3DX 모델을 사용하였다. 그림 10과 11 및 표 1과 2는 각각 동일한 시작점 S와 목표점 G까지 구배법과 제안된 경로계획 기법으로 경로를 생성하고 수행시간과 생성된 경로의 길

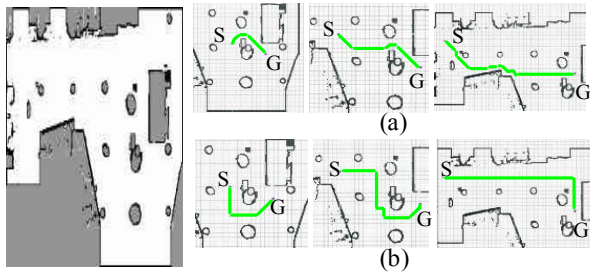


그림 10. 실내환경에 대한 지도 및 경로생성: (a) 구배법으로 생성한 경로, (b) 광선투사법으로 생성한 경로

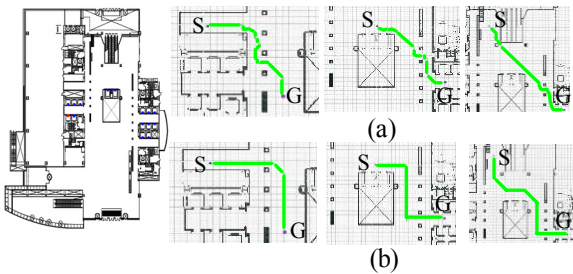


그림 11. 실내환경에 대한 지도 및 경로생성: (a) 구배법, (b) 광선투사법

표 1. 구배법과 광선투사법을 이용한 경로생성 시간과 생성된 경로의 길이

	구배법			광선투사법		
경로 거리 (m)	9.3	16.3	34.6	12.0	22.2	39.1
경로생성 시간 (s)	0.64	0.72	0.77	0.72	0.82	1.14

표 2. 구배법과 광선투사법을 이용한 경로 생성시간과 생성된 경로의 길이

	구배법			광선투사법		
경로 거리 (m)	16.5	21.6	31.5	18.7	29.0	44.1
경로 생성시간 (s)	1.11	1.50	1.52	1.25	1.51	1.92

이를 비교한 것이다.

그림 10과 11으로부터 본 논문에서 제안한 방법으로 생성된 경로가 구배법으로 생성된 경로보다 더 넓은 공간으로 경로가 생성됨으로써, 로봇이 목표점까지 더 안전하게 이동할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 경로계획으로 추출한 경로는 기존의 구배법으로 생성한 경로보다 다소 길고, 경로생성 속도 또한 구배법보다 약간 느린 단점이 존재한다. 그러나 충돌 위험이 작은 곳으로 경로가 추출되어 로봇이 고속으로 이동할 수 있으므로, 정

확도가 낮고 측정거리가 짧은 저가의 센서를 사용하는 경우 구배법에 의한 경로보다 더 적합할 수 있다.

그림 12와 표 3은 구배법으로 생성된 경로와 본 논문에서 제안한 광선투사법으로 생성된 경로에 대하여 로봇의 주행 속도별 이동시간과 실제 이동경로를 나타낸 것이다. 로봇의 센서로는 초음파센서를 사용하였고, 로봇이 목표점까지 도달하는 데 이동 장애물에 대처할 수 있도록 DWA(dynamic window approach) 기법을 사용하였다⁸⁾. 각 경로마다 20번씩 주행하며 평균 주행시간을 측정하였다.

표 3은 로봇의 주행 속도 별로 각 경로에 따른 로봇의 이동시간을 나타낸 것이다. 30cm/s의 속도로 로봇이 목표점까지 이동했을 때, 광선투사법으로 생성된 경로의 길이가 약 2m 정도 더 길게 추출되었다. 그러나 구배법으로 생성된 경로에서는 그림 12(a)에서 사각형으로 표시된 좁은 공간을 지나갈 때, 로봇의 주행속도가 느려지므로 평균 이동시간은 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 로봇이 50cm/s의 속도로 주행했을 때에는 그림 12에서 점선으로 표시된 실제 이동경로와 같이 위치 불확실성이 커져서 로봇이 주어진 경로를 벗어나는 경우가 발생한다. 이런 상황에서 좁은 공간에 생성된 경로로 지나갈 때에는 로봇이 목표점까지 도착하지 못하는 경우도 발생하였다. 반면에, 광선투사법을 이용하여 생성된 경로로 로봇이 이동할 경우에는 넓은 공간으로 이동하기 때문에 로봇의 이동속도를 50cm/s로 증가시켜도 목표점까지 실패 없이 도착하

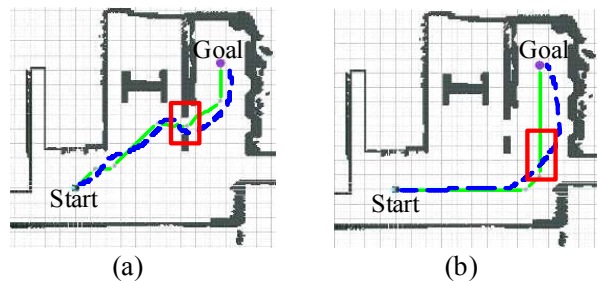


그림 12. 생성된 경로 및 실제 주행 궤적: (a) 구배법, (b) 광선투사법. (실선은 생성된 경로, 점선은 로봇의 주행궤적)

표 3. 구배법과 광선투사법으로 생성된 경로에 따른 속도별 이동시간

	구배법		광선투사법	
로봇 속도 (cm/s)	30	50	30	50
목표점까지 도달시간 (s)	59	실패	55	34

였다.

그림 13은 그림 12(b)에서 사각형으로 표시된 넓은 공간에 생긴 경로로 로봇이 주행을 할 때 이동 장애물을 회피하는 모습을 보여준다. 그림 13(b)에서 로봇의 주행 궤적을 보면 이동 장애물을 탐지하였을 때, 로봇이 정지한 후 우회하여 회피한다. 이 때 경로를 재생성 하지는 않으며 본래의 경로로 돌아와 목표점까지 도착하는 것을 알 수 있다.

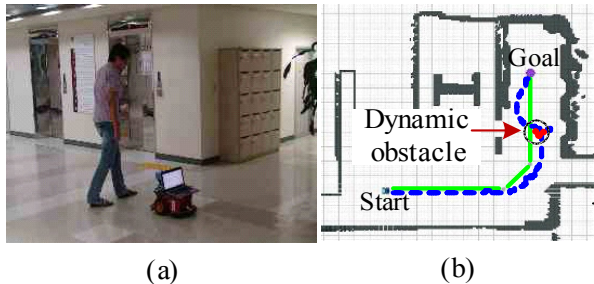


그림 13. 넓은 공간에서의 이동 장애물 회피: (a) 이동 장애물, (b) 광선투사법으로 생성된 경로 및 주행 궤적 (실선은 생성된 경로, 점선은 로봇의 주행 궤적)

4. 결론

본 연구에서는 이동로봇이 장애물과의 충돌 위험이 높은 좁은 공간을 지나지 않고 안전하게 주행할 수 있도록 광선투사법을 이용해서 경로를 생성할 수 있는 방법을 제안하였다. 광선투사법을 사용하여 지도로부터 주변환경 정보를 자세히 반영하여 목표점까지 가능한 한 넓은 공간을 사용해서 경로를 생성하도록 하였다. 구배법으로 생성된 경로보다 경로 길이는 다소 길고, 경로 생성 시간 또한 구배법보다 조금 더 소요되나, 넓은 공간으로 경로가 생성되므로 로봇이 목표점까지 더 안전하게 이동할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 실제 이동로봇을 가지고 생성된 경로로 주행 실험을 하여 구배법으로 생성된 경로보다 로봇이 빠른 속도로 이동할 수 있었고, 로봇의 위치 불확실성으로 인하여 경로를 이탈하는 경우에도 주변 공간이 넓기 때문에 국부 최소에 빠지지 않고, 다시 경로를 따라 목표점까지 안전하게 도착할 수 있었다.

Autonomous Mobile Robots, MIT Press, Cambridge, 2004.

- [2] J. C. Latombe, *Robot Motion Planning*, 4th Ed., Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [3] O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," *International Journal of Robotics Research*, Vol 5, No.1, pp.90-98, 1996.
- [4] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation," *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1398-1404, 1991.
- [5] A. Hahja, A. Stentz, S. Singh, and B. L. Brumitt, "Framed-Quadtree Path Planning for Mobile Robots Operating in Sparse Environments," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 650-655, 1998.
- [6] Kurt Konolige, "A Gradient Method for Real-time Robot Control," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 639-646, 2000.
- [7] R. E. Maeder "Ray tracing and graphics extensions," *The Mathematica Journal*, Vol.4, No. 3, 1994.
- [8] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance," *IEEE Robotics and Automation*, Vol.4, No.7, pp.23-33, 1997



김종원

2009 고려대학교 컴퓨터정보
학과(이학사)

2009~현재 고려대학교 메카
트로닉스학과 석사과정
재학중

관심분야: Mobile Robotics
Navigation

참고문헌

- [1] R. Siegwart and I. Nourbakhsh, *Introduction to*



승재복

1983 서울대학교 기계공학과
(공학사)

1985 서울대학교 기계설계학
과 (공학석사)

1992 MIT 기계공학과 (공학
박사)

1993~현재 고려대학교 기계공학부 교수

관심분야: Design and Control of Safe Manipulators,
Mobile Robotics, Haptics