소방관의 수색 및 구조작업을 위한 실내 경로계획 시스템 개발

박희인, 이지훈, 김유단*, 박찬국, 이재홍
서울대학교 항공우주공학과

본 논문에서는 실내 재난현장에서 다수의 요구조자를 구출하기 위한 경로계획 시스템을 고려한다. 화재현장에서 경로계획 문제는 일반적인 경로계획 문제와는 다른 요구조건들을 고려해야 한다. 빠른 구조 및 회피를 위해 경로 길이가 중요한 요소이며, 화재로 인해 건물 내부 환경이 빠르게 변화할 수 있다는 특성이 있다. 본 연구에서는 이러한 요소들을 고려한 경로계획 시스템을 개발하며, 지도생성, 지도전처리, 그래프 형성 및 축소, 방문순서 결정, 그리고 경로생성 및 후처리 단계가 포함된다. 지도생성 단계에서는 건물 내부를 격자 형태로 변환하고, 지도전처리 단계에서는 위험 영역을 제거한다. 그래프 형성 및 축소 단계에서는 격자에 나타난 정보를 가중치 그래프로 변환하며, 이 과정에서 두 지점을 잇는 경로의 길이로 가중치를 설정한다. 경로계획에는 A*, RRT, RRT*, PRM-A* 알고리즘을 고려하였다. 방문순서 결정 단계에서는 모든 요구조자를 방문하고 회피하는 경로 길이가 최소가 되도록 방문순서를 결정한다. 끝으로 경로생성 및 후처리단계에서는 결정된 순서에 의해 지도에 경로를 생성하며, 경로의 특성을 개선하는 후처리를 한다. 제안된 경로계획 시스템의 성능을 검증하기 위해 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

Development of an Indoor Path Planning System for Search and Rescue Operations of the Firefighters

Heein Park, Jihoon Lee, Youdan Kim*, Chan Gook Park, Jae Hong Lee
Aerospace Engineering, Seoul National University

An indoor path planning system for search and rescue operations of the firefighters is considered. Path planning inside a building where the fire occurred requires additional considerations compared to the general indoor path planning problem. For example, mission time performing search and rescue is the main factor to be considered, and the indoor spaces of the building might change rapidly due to the fire. The proposed indoor path planning system consists of five steps; i) map generation, ii) map processing, iii) graph generation and reduction, iv) order determination, and v) path generation and processing. In the map generation step, the map of the building is transformed into grids. In the map processing step, unreachable zones are excluded. In the graph generation and reduction step, the information given in grids is transformed into a weighted graph, where the weights of each edge are determined by the length of the path connecting the nodes. To generate the path, four algorithms are considered; A*, RRT, RRT*, and PRM-A*. In the order determination step, the order for rescue is determined by minimizing the length of the path. Finally, in the path generation and processing step, the actual path satisfying the order specified in the order determination step is generated, and the path is processed. Numerical simulation is performed to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: path planning, optimization, indoor navigation

1. 서론

대한민국에서는 매년 40,000여건의 화재가 발생하며, 그로 인해 매년 약 2,000여명의 인명피해가 발생한다 (Ministry of the Interior and Safety, MOIS 2021). 건물에서 화재가 발생하면 소방관이 진입하여 구조대상자를 수색한다. 구조작업은 화재현장에 고립된 인명을 구조하기 위해 필수적인 작업이지만, 진입하는 소방관 역시 매우 위험하다. 최근 10년간 순직한 49명의 소방공무원 중 14명이 화재진압 작전 도중에 순직했다 (National Fire Service Academy, NFA 2021). 따라서 소방관들이 화재현장을 수색을 할 때 효과적으로 경로를 탐색해 줄 보조장비가 있으면 안전하고 효율적인 구조활동에 큰 도움이 될 것이다.

화재현장에서의 경로계획 시스템에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. Chou et al. (2019)은 Building Information Modeling (BIM)을 이용해서 실시간으로 최단거리의 수색경로를 찾는 시스템을 제안하였다. 그러나 이 연구에서 한 층에서의 경로만 계획할 수 있고, 최단거리만을 고려했으며, 계산시간을 고려하지 않았다는 한계가 있다.

화재가 발생한 건축물이 일반적인 건축물과 구분되는 대표적인 특성은 다음과 같다. 첫째, 전원이 차단될 가능성이 있고, 화재로 인한 짙은 연기로 가시거리가 극히 제한된다. 둘째, 화재로 인해 일부 구조가 붕괴하여 통행이 불가능한 지역이 발생할 수 있다. 셋째, 화재로 인해 건축물이 붕괴할 위험이 상존한다. 따라서 화재현장에서 사용하기 위한 경로계획 시스템은 다음과 같은 조건을 고려해야 한다. 우선, 생성되는 경로는 소방관에게 가이드라인을 주기 위해 최대한 벽을 따라서 생성되어야 한다. 둘째, 환경변화에 따라 지도가 업데이트 되었을 때 효율적으로 경로를 재탐색 해야 한다. 그리고 생성되는 경로의 길이는 가능한 한 짧아야 한다. 본 연구에서는 위와 같은 요구조건을 충족시키며 다층 건축물에도

적용할 수 있는 경로계획 시스템을 설계하고, 설계된 시스템의 특징에 대해서 분석한다.

2. 경로계획 시스템 설계

본 논문에서 제시하는 시스템은 5단계를 거쳐서 경로계획을 수행한다. 지도생성 단계에서는 도면을 격자로 변환한다. 지도전처리 단계에서는 벽으로부터 가시거리보다 멀리 떨어진 격자들을 장애물이 있는 영역으로 처리한다. 그래프 형성 단계에서는 격자로 주어진 지도를 그래프로 변환한다. 그래프의 점은 수색 시작지점, 구조대상자 위치, 각 층의 계단, 그리고 수색 종료지점으로 구성된다. 경로계획 단계에서는 그래프 형성 단계에서 얻은 그래프를 써서 수색 시작지점부터 수색 종료지점까지 모든 구조대상자의 위치를 확인해 최단경로를 생성한다. 경로후처리 단계에서는 경로의 가시성을 향상시켜 준다.

2.1. 지도생성 및 지도전처리 단계

지도생성 단계는 도면을 경로계획에 적용할 수 있는 격자로 변환하는 단계다. 격자의 각 칸은 벽과 공간으로 구분된다. 지도전처리 단계에서는 벽으로부터 가시거리보다 멀리 떨어진 칸들을 벽으로 취급하여 후에 생성될 경로가 벽으로부터 멀리 떨어지지 않게 한다. Fig. 1은 지도의 전처리 전후를 나타낸다.



Fig. 1. Map processing example; original map (left) and pre-processed map (right).

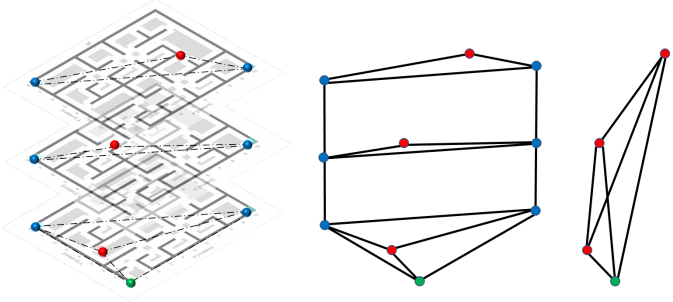


Fig. 2. raw data (left), the graph generated by graph generation (center) and the reduced graph by graph reduction (right).

2.2. 그래프 형성 및 축소

그래프 생성단계에서는 평면의 격자를 쌓아서 나타낸 2.5차원 건물 도면과 주요 위치정보(수색 시작지점, 구조대상자 위치, 수색 종료지점)와의 관계를 Fig. 2와 같이 그래프로 나타내는 과정이다. Fig. 2 좌측 그림에서 보듯이 2.5 차원으로 나타낸 건물 지도는 건물의 평면도를 쌓고 각 층을 계단으로 연결해 준 것과 같다. 각 층에 존재하는 주요지점과 계단 사이의 거리를 경로계획 알고리즘으로 구하고, Fig. 2 중앙 그림처럼 거리만 고려해 계단과 주요지점을 점으로 갖는 그래프로 추상화시킨다. 경로계획 알고리즘을 통해서 얻은 주요지점 및 계단 사이 경로는 추후 사용할 것이므로 저장한다. 한편, 구한 그래프를 주요지점만 꼭지점으로 남겨놓고 Fig. 2 우측 그림처럼 다시 축소한다. 점 사이의 거리는 앞에서 구한 그래프에서 대응되는 점 사이의 최단거리이며, 동적계획법을 이용해서 구한다 (Kirk 1970).

2.3. 방문순서 결정

구조대상자와 수색 시작 및 종료지점 사이의 최단거리는 그래프 형성 및 축소단계에서 얻어졌다. 경로계획 단계에서는 축소 그래프 상에서 수색 시작점에서 시작해서 모든 구조대상자를 방문하고 수색 종료점으로 이동하는 최단 경로를 찾는다. 구조대상자가 n명 있을 때 n!가지 경우의 수를 고려해야 하지만,

방문외판원 문제(Traveling Salesman Problem, TSP)의 동적계획법 풀이를 응용하면 $O(2^n n^2)$의 복잡도 만으로 문제를 해결할 수 있다 (Bellman 1958).

2.4. 경로생성 및 후처리

이 단계는 방문순서대로 구조대상자를 구조하고 탈출하는 실제 경로를 나타내는 단계다. 축소 그래프 상에서 얻어진 경로를 원본 그래프 상에서의 경로로 환원하며, 이때 축소 그래프 상의 두 점을 잇는 원본 그래프 상의 경로를 사용한다. 또한, 원본 그래프 상에서의 경로를 건물 도면 내의 경로로 환원하는데, 역시 도면에서 경로계획법을 이용해 얻은 경로를 사용한다. 경로계획기법에서 A*와 같은 기법을 사용하면 가독성이 좋은 경로가 생성되지만, RRT와 같은 기법을 사용하면 경로의 가독성이 떨어질 수도 있다. 이때 경로후처리 과정을 통해 생성된 경로의 가독성을 증가시킨다. Fig. 3은 RRT*기법을 통해서 얻은 경로와, 그 경로를 후처리하여 얻은 경로를 나타낸다.



Fig. 3. Path post-processing example; raw path obtained by RRT* (left), smoothened path of the raw path (right).

3. 시뮬레이션

본 장에서는 다양한 경로계획 기법들을 적용하고 성능을 비교한다. 각 층의 단면은 Fig. 1과 동일하게 주어진 3층 건물을 고려한다. 소방관은 1층의 좌측 하단에서 진입하며, 수색 종료 후에는 같은 위치로 탈출한다고 가정한다. 계단은 각 층의 좌측 상단과 우측 하단 지점에 위치하며, 구조대상자는 각 층마다 1명씩, 총 3명이 있다고 가정한다. 이를 3차원 공간에 나타내면 Fig. 4와 같다. 시뮬레이션 변수들은 Table 1에 정리하였다. 사용된 PC의 CPU는 AMD Ryzen 7 3700X 8-Core Processor 3.60 GHz이며, RAM 용량은 16 GB였고, 시뮬레이션이 구현된 환경은 MATLAB이다. 본 연구에서 고려한 알고리즘은 A*, RRT, RRT* 그리고 PRM-A* 기법이다. 각 기법들에 대한 경로 길이와 계산시간을 Fig. 5에 보여주고 있다. 샘플링기반 경로계획기법(RRT, RRT*, PRM)을 이용한 경우에는 100회의 시뮬레이션을 통해서 결과를 얻었다. 계산시간은 A* 기법이 가장 효율적이었고, 그 다음은 RRT, RRT*, PRM 순서였다. 생성된 경로 길이는 A* 기법이 가장 짧았으며, 그 다음은 PRM, RRT*, RRT 순서였다.

Table 1. Simulation parameters.

A*		RRT		RRT*		PRM-A*	
Grid size	0.2 m x 0.2 m	Growth rate	2 m	Growth rate	2 m	Node #	426
		Iteration # max	20000	Iteration # max	20000		
		Node # max	20000	Node # max	20000		
		Goal bias	0.05 m	Goal bias	0.05 m		
				Ball radius	2 m		

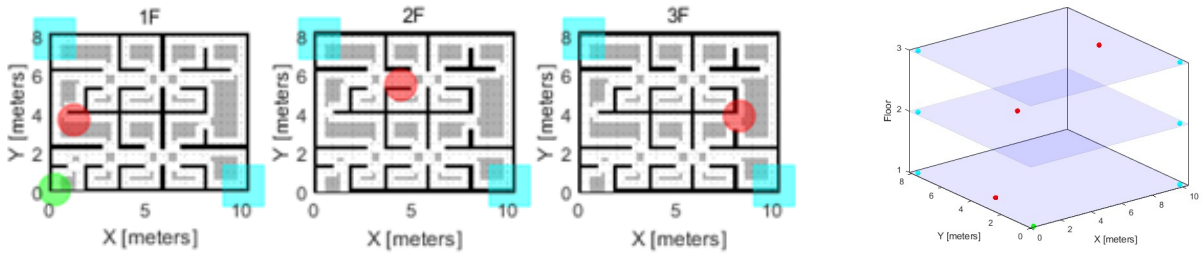


Fig 4. Simulation setting visualized: 2D (left), 3D (right).



Fig. 5. Simulation results; elapsed time (left) and path length (right).

결과에서 길이의 최적성, 계산시간, 불확실성 등 모든 측면에서 A*가 우수하지만, 항상 그런 것은 아니다. 현재는 격자의 개수가 적기 때문에 A*의 계산시간이 빨랐다. 그러나 건물의 크기가 커지면, RRT와 RRT*는 그것에 비례해서 growth rate를 같이 키워줄 수 있고, PRM의 경우에는 건물의 복잡도가 비슷하면 비슷한 개수의 점으로도 좋은 PRM을 얻지만, A*는 격자의 크기에 가시거리라는 물리적인 상한이 있으므로 격자의 개수를 줄이는데 한계가 있다. A*의 계산량은 격자의 개수에 의존하므로, 건물이 커질수록 A*를 통해 해를 얻는데 걸리는 시간이 늘어나게 된다. 따라서 건물이 작다면 A*가 좋은 선택이지만, 건물이 커지면 A*대신 다른 알고리즘을 쓰는 것이 유리해질 수 있다. RRT*의 경우는 반복을 거치면 최적경로로 수렴함이 알려져 있으므로 (LaValle 2006), 건물이 복잡하여 최적경로가 긴 경우는 RRT가 효율적이라도 경로 길이 관점에서 살펴보면 RRT*가 적절하다고 판단된다. PRM-A*의 경우에는 길이는 준최적이나 계산시간이 A*보다 길다. 그러나 PRM-A*가 PRM을 형성하고 나면 점의 개수는 500개 미만으로 빠르게 최적경로를 찾는다. A*는 건물이 커질수록 격자가 기하급수적으로 늘어나지만, PRM은 복잡도만 높아지지 않으면 같은 수의 점으로 생성해도 문제가 없으므로 PRM이 적절하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 화재현장에서 소방관이 구조대상자를 구조하기 위한 경로계획 시스템을 연구하였다. 고려된 경로계획 시스템은 벽에 근접해야 하고, 효율적으로 단거리 경로를 생성해야 하며, 이를 위해 지도생성, 방문순서 결정, 경로계획, 후처리 기법 등을 고려한 경로계획 기법을 제안하였다. 본 연구에서 고려한 3층 건물에 대한 시뮬레이션 결과를 보면 A* 기법이 우수하지만, 건물의 크기가 커질수록 계산시간이 증가할 것이다. 건물이 크더라도 구조가 단순하면 RRT가 RRT*와 비슷한 성능으로 효율적으로 해를 구하지만, 건물이 복잡해질수록 해가 달라질 것이므로 최적성과 효율성 사이에서 적절한 방법을 선택해야 할 것이다. 한편, PRM은 화재로 인한 건물 내부의 환경변화에 따른 경로 재생성에 유리하다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (NFA) (No. 2019-0-01325, Development of wireless communication tracking-based location information system in disaster scene for fire-fighters and person who requested rescue).

REFERENCES

Bellman, R. 1958, On a routing problem, Quarterly of Applied Mathematics, 16, 87-90. https://doi.org/10.1090/qam/102435

Chou, J. S., Cheng, M. Y., Hsieh, Y. M., Yang, I. T., & Hsu, H. T. 2019, Optimal path planning in real time for dynamic building fire rescue operations using wireless sensors and visual guidance, Automation in Construction, 99, 1-17. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.020

Kirk, D. E. 1970, Optimal Control Theory, An Introduction (New York: Dover Publications)

Lavalle, S. M. 2006, Planning Algorithms (Cambridge: Cambridge University Press)

MOIS 2021, [Internet], cited 2021 Sep. 9, available from: https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1632

NFA 2021, [Internet], cited 2021 Sep. 9, available from: https://www.nfa.go.kr/cherish/news/notice/?boardId=bbs_0000000000000047&mode=view&cntId=288