

RRT-A*기반 경로 계획 알고리즘을 이용한 UAV의 실내 탐사

김 훈 희*, 신 수 용°

UAV Indoor Exploration Based on a RRT-A* Algorithm

Hoon-hee Kim*, Soo-young Shin°

요 약

본 연구에서는 경로 알고리즘인 RRT(Rapidly-exploring Random Tree)와 A*를 기반으로 한 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)의 실내 탐색을 구현하였다. 제안된 시스템은 UAV로 Bebop2가 사용되었으며, on-board로 Xavier NX, 주변 환경 감지를 위한 Rplidar S1으로 구성되어있다. RRT와 A*는 각각 Frontier 탐색과 UAV의 Trajectory를 위한 것으로 사용되었다. RRT는 Local 탐색과 Global 탐색 두 가지로 구분되고 A*는 필터를 통해 선택된 Frontier에 이동하기 위한 Trajectory로 UAV에 전달되며, UAV가 이동하면서 지도는 업데이트 된다. 탐색 시스템을 세 가지 환경에 대해서 실험하였으며, 완성된 지도로 그 성능을 평가한다.

Key Words : UAV, Autonomous, Exploration, Path Planning, RRT, A*

ABSTRACT

In this study, indoor search of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) based on path algorithms such as RRT (Rapidly-exploring Random Tree) and A* was implemented. Bebop2 was used as UAV in the proposed system, consisting of Xavier NX as an on-board and Rplidar S1 for environmental detection. RRT and A* were used for Frontier search and UAV's Trajectory, respectively. RRT is divided into two categories: Local exploration and Global exploration, and A* is delivered to UAV as a Trajectory to move to the selected Frontier through a filter, and the map is updated as UAV moves. The Exploration system was experimented on three environments, and its performance was evaluated with a completed map.

I. 서 론

UAV(Unmanned Aerial Vehicle)는 사람이 탑승하지 않는 무인 항공기이다. UAV는 이동성, 민첩성 덕분에 산업이 발전함에 따라 다양한 분야에서 사용되고 있다. 실외에서는 재난지역의 지형 탐사 및 인명 탐색, 건설 현장 조사 및 건설 진행 상황 모니터링, 원자력 발전소의 점검, 교량 점검 등과 같은 사람이 하

기에 힘들거나 다른 대형 장비를 이용해야만 하는 곳에서 UAV와 협업하여 원활하게 진행할 수 있다.^[1] 또한 UAV는 실내의 경우 초고층 건물의 조난자 탐색, 인명 검색 등 사람이나 장비가 접근하기 어려운 초고층 건물의 진입 등에 활용이 가능하다. UAV의 실내 주행에 있어서 컨트롤러로 조종하는 것이 아닌 자율 비행을 위한 동작 계획과 경로 계획, 센서의 융합 및 활용은 필수적이다.^[2] 세 가지 요소에 관한 연구는 주

* 이 연구는 금오공과대학교 대학 학술연구비로 지원되었음(2021)

• First Author : Kumoh National Institute of Technology, sdgo2363@kumoh.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Kumoh National Institute of Technology, wdragon@kumoh.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202111-323-D-RU, Received November 23, 2021; Revised December 6, 2021; Accepted December 7, 2021

로 지상 로봇에 의해 많이 연구됐다.^[3] UAV는 지상 로봇과 다르게 상하 움직임이 가능하고 더 빠르므로 경로 계획과 동작 계획은 더욱이 중요시되고 있다.^[4] 경로 계획은 로봇이 장애물과 충돌하지 않고 이동하기 위해서 장애물이 없는 경로를 생성하여 그 경로를 따르도록 한다. 모션 계획은 로봇이 경로 계획을 통해 움직일 때 동작을 계획하는 것을 말한다. 예를 들어서 경로 계획으로 생성된 경로를 로봇이 따라갈 때 경로가 복잡하거나 로봇이 지나가기 힘든 영역으로 경로가 생성된다면 로봇은 경로를 따르기 힘들고 경로를 따라갈 때 overshoots에 의해 오차가 커지면서 경로를 이탈할 수 있다. 따라서 모션계획을 통해서 경로를 로봇의 기하학 및 운동학 측면에서 오차를 줄여 움직일 수 있도록 한다. 이처럼 경로 계획의 문제만큼 모션 계획 또한 중요한 역할을 한다. 완전한 경로 계획과 모션 계획이 있다면 UAV의 자율 비행은 실현될 수 있다.^[5]

UAV의 자율 비행은 여러 가지 기능을 하는데 그 중 한 가지는 앞에서 언급한 실내 탐색이다. 실내 탐색은 시야가 확보되지 않은 미지의 실내 환경 정보를 빠르게 얻기 위함으로 주로 사용되는 Frontier 기법은 로봇의 센서로부터 얻은 지도를 미지의 영역과 탐색된 영역으로 1과 -1로써 구분하고 그 경계점을 로봇에 할당하여 그곳으로 이동할 수 있도록 한다. 이동하면서 변화한 주변 환경을 다시 감지하고 실내 환경의 정보를 빠르게 업데이트하여 실내 탐색을 할 수 있도록 한다.^[6]

본 논문에서는 UAV의 원격 조종과 센서의 패키지 및 라이브러리의 사용을 위해서 ROS(Robot Operating System) 환경에서 구현하였고 경로 계획의 기초인 RRT와 A^* 를 기반으로 한 탐색 전략을 이용하여 UAV의 자율적인 탐색을 구현한다. UAV에 Lidar를 장착하여 주변 환경을 감지하고 RRT의 Local Tree로 미지의 영역과 탐색된 영역의 경계점인 Frontier를 감지하여 로봇이 이동한다. 기존의 지상 로봇들과는 다르게 이동에 제약받지 않고 실내 환경을 탐색할 수 있다.^[7]

본 논문은 다음과 같이 구성되어있다. 본문에서는 사용된 경로 계획 및 탐색 전략과 전체적인 시스템에 대한 설명 그리고 구현과 3개의 실제 실내 환경에 대한 탐색 시스템을 실험하고, 마지막으로 결론과 향후 연구 방향에 관해서 설명한다.

II. 본 론

본문에서는 논문에서 사용된 경로 계획 및 탐색 전략과 전체적인 시스템에 관하여 논의한다. 제안된 시스템에서는 경로 계획 알고리즘으로 RRT와 A^* 그리고 탐색 전략으로 Frontier를 활용한 탐색 기법을 사용하였다. 마지막으로 제안된 시스템 구현과정을 설명하고 실제 실내 환경에서의 구현을 통해 탐색 성능을 확인하였다.

2.1 경로 계획

최단 거리 문제는 오래전부터 연구되어왔으며, 경로 계획이라는 큰 주제는 로봇의 이동에 있어서 중요하다. 경로 계획의 기법은 샘플링 기반의 경로 계획과 서칭 기반의 경로 계획으로 크게 두 가지로 나눌 수 있고 그 외 로드맵이나 APF(Artificial Potential Field)도 있다.^[8] 서칭 기반 알고리즘에는 대표적으로 시작점부터 목적지까지 휴리스틱 함수를 사용하여 최소 비용의 경로를 반환하는 A^* 알고리즘이 있고 샘플링 기반 알고리즘에는 대표적으로 PRM (Probabilistic Road-Map)과 RRT (Rapidly-Exploring Random Tree)가 있다.^[9]

2.1.1 샘플링 기반 경로 계획

RRT는 그림 1과 같이 X_{init} 에서 시작하여 구성 공간 내 무작위에 의한 점 X_{rand} 를 추출하고 Tree 내의 가장 가까운 노드인 X_{near} 사이의 장애물 유무 판별을 통해서 새로운 노드인 X_{new} 를 추가할지 결정한다. 장애물이 없다면 1 step인 ϵ 만큼 떨어진 곳의 노드 X_{new} 가 Tree에 추가된다. 위의 과정을 반복하여 Tree는 계속 확장해 나간다. 그림 2는 ROS 환경에서의 RRT 생성을 보여준 예시이다.^[10]

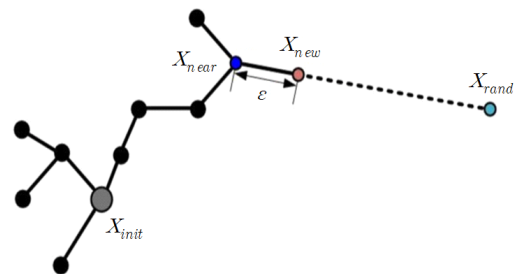


그림 1. RRT 알고리즘
Fig. 1. RRT algorithm

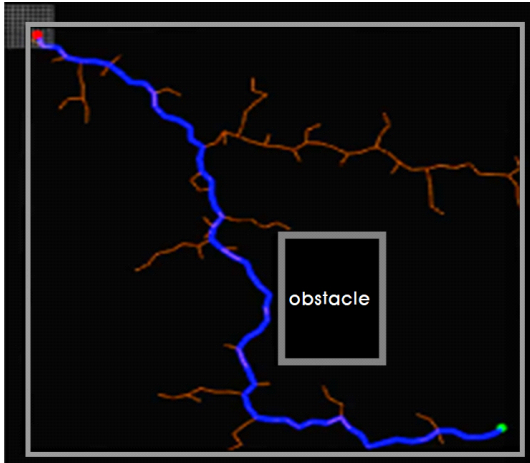


그림 2. ROS환경에서의 RRT경로 생성
Fig. 2. Generation of RRT path in ROS environment

2.1.2 서칭 기반 경로 계획

A*알고리즘은 인접한 노드의 비용을 측정하여 최단 경로를 위해서 점진적으로 확장해 나간다. A*알고리즘은 계획 전 환경의 정보를 미리 알고 있어야 하며 이를 보완하기 위한 A*의 동적인 방식인 D* 또한 많이 쓰인다. D*는 장애물이 인지 될 때마다 재생성 된다. 이러한 A*알고리즘의 특성으로 각종 게임에서도 경로 찾기 문제로 많이 사용된다.^[11]

2.2 탐색 전략

UAV의 실내 탐색은 시야의 확보가 힘든 실내에서의 탐색을 위해서 Lidar를 활용한 자율적인 탐색 전략이 필요하다.^[12] 자율적 탐색의 핵심은 미지의 영역을 자율적으로 이동하여 지도를 업데이트하고 최소한의 시간과 적은 비용으로 넓은 영역을 탐색하는 것이다.^[13] 기존의 탐색 전략에는 동심원과 같은 동일한 경로를 연속적으로 이동하는 방식의 단순한 탐색, 미지의 영역과 탐색 된 영역 경계에서의 무작위에 의한 이동을 통한 탐색, 마지막으로 본 논문에서 제안하는 시스템에 포함된 탐색 전략으로 관측 위치를 평가하고 Frontier를 활용하여 감지된 Frontier로 이동하였을 때 얻을 수 있는 정보의 양을 평가하는 효율적인 탐색 전략이 있다.^[14]

2.2.1 Frontier 기반 탐색 전략

Frontier 기반 탐색은 미지의 환경에서의 센서로부터 전송받은 정보를 이용하여 미지의 영역과 탐색 된 영역을 구분하는 경계의 경계점인 Frontier를 UAV에 전송하여 그 위치로 이동할 수 있도록 한다. 이동하면

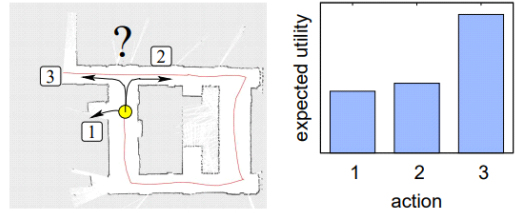


그림 3. 정보 이론 전략
Fig. 3. Information Theory Strategy

서 센서로부터 지도는 업데이트되고 감지된 Frontier는 삭제되며 새로운 Frontier를 생성하여 UAV를 계속해서 탐색하도록 한다. 지도가 확장됨에 따라 계산량은 많아지고 속도가 느려지기에 RRT와 함께 결합하여 기존에 방문한 지역에 대해서 그 정보를 저장하여 중복 탐사를 막고 Frontier의 감지 속도를 올린다.^[15]

2.2.2 정보 이론 전략

정보 이론 전략의 목적은 지도와 UAV 사이에 관련된 시간에 따라 증가하는 불확실성을 최소화함에 있다. 로봇은 항상 불확실성을 가지고 있고 다음 목적지를 결정할 때 이득이 큰 쪽으로 가는 것이 탐사 시스템에 있어서 효율적이다. 그림 3과 같이 1, 2, 3중 3에 대한 기댓값이 가장 크기 때문에 3으로 가는 것이 탐사를 목적으로 할 때는 이득이 된다.^[16]

2.3 시스템 구성

시스템은 그림 4와 같이 구성되어있다. UAV로 Bebop 2를 운용하며, Xavier NX에 Ubuntu 18.04와 Bebop을 위한 16.04가 Docker로 설치되어 있다. 다른 제품보다 비교적 가벼운 SLAMTEC의 RpLidar S1 제품을 선택하였으며 Lidar는 카메라를 사용했을 때보다 측정범위가 넓고 반사광선의 강도 측정 및 관측 물질의 반사율을 추정하여 데이터의 세분화를 높일 수 있기 때문이다. 또한 전방의 수평 시야를 통해서 시각적인 센서보다 더 상세한 지도 구성이 가능하다. 지도를 구성하기 위해서는 Lidar의 데이터를 처리하고 추론하기 위한 높은 계산 부하가 부담된다. 이와 같은 계산을 처리하기 위해서 최소한의 계산량으로 빠르게 2D Occupancy Grid Map을 생성할 수 있는 Hector SLAM을 사용한다. 이는 지상 로봇이 아닌 UAV와 같은 동적인 상황에서 사용하기에 더 적합하다. Laptop과 Xavier NX는 Bebop 2의 ip로 연결되어 있고 Laptop에서 ssh 원격 연결을 통하여 Xavier NX에 명령을 보낸다. 지도 구성을 통하여 지도가 생성되

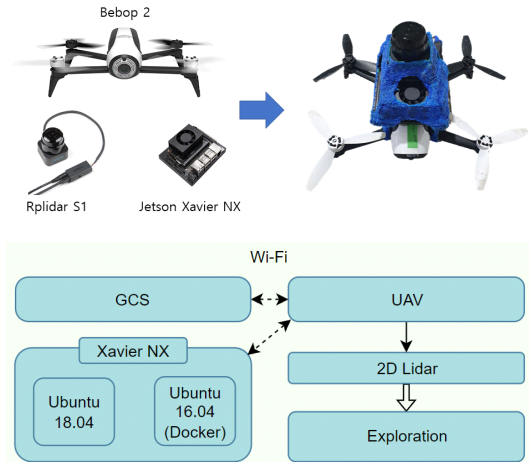


그림 4. 시스템 구성도
Fig. 4. System Architecture

면 본격적으로 탐색을 시작한다. 탐색 전략으로서 전역화를 위한 Global Tree와 지역화를 위한 Local Tree 그리고 Lidar를 통해 생성된 지도에서 얻은 정보로 UAV에 동작을 할당하기 위한 Frontier를 이용한다. 먼저 지도를 통해 얻은 미지의 영역과 탐색된 영역의 경계점을 RRT를 기반으로 구성되어있는 Global Tree, Local Tree를 실행하여 감지하고, 감지된 Frontier 들을 필터링 및 색출하여 그 점으로 이동하기 위한 경로를 계획한다. 경로는 A* 알고리즘으로 이루어져 있으며, Bebop은 Cmd_vel과 odom 패키지를 이용하여 Bebop에 속도와 방향에 대한 명령을 보내고 탐색을 시작한다. 감지되었던 Frontier로 이동한 Bebop은 Lidar를 통하여 기존의 Frontier를 제거하고 새로운 Frontier 들을 감지한다. 이 과정에서 2절 2항에서 설명한 정보 이론 전략처럼 이동하였을 때 얻는 지도의 정보 즉, 이득의 크기를 따져 이득이 큰 지역으로 이동하기 때문에 효율적인 탐색이 가능하다. 이 과정을 반복하여 UAV의 탐색을 할 수 있다.

2.3.1 Global Tree

Global Tree는 지도의 전역화를 위해 즉, 지도 전체의 Frontier를 저장 및 감지하는 데 필요하다. Global Tree는 UAV가 탐색을 수행하는 동안 초기화 되지 않으며, 탐색 범위 내에서 계속 성장한다. 따라서 탐색이 진행됨에 따라 그 속도가 느려지며 세분화 된다. 빠른 탐색에는 단점이지만 모서리와 같은 공간의 탐색을 통해서 완성도 높은 지도 구성이 가능하다.

Algorithm 1 Local Frontier Detector

```

1:  $V \leftarrow x_{init}; E \leftarrow \phi;$ 
2: while True do
3:    $x_{rand} \leftarrow \text{SampleFree};$ 
4:    $x_{nearest} \leftarrow \text{Nearest}(G(V, E), x_{rand});$ 
5:    $x_{new} \leftarrow \text{Steer}(x_{nearest}, x_{rand}, \eta);$ 
6:   if GridCheck( $map, x_{nearest}, x_{new}$ ) = -1 then
7:     PublishPoint( $x_{new}$ );
8:      $V \leftarrow x_{current}; E \leftarrow \phi;$   $\triangleright$  reset the tree
9:   else if GridCheck( $map, x_{nearest}, x_{new}$ ) = 1 then
10:     $V \leftarrow V \cup \{x_{new}\}; E \leftarrow E \cup \{(x_{nearest}, x_{new})\};$ 
11:   end if
12: end while
    
```

그림 5. Local Tree의 Frontier 감지 알고리즘
Fig. 5. Frontier detector algorithm of Local Tree

2.3.2 Local Tree

Local Tree는 그림 5의 알고리즘처럼 Global Tree의 알고리즘에 Tree를 reset 하는 8번 Line만 추가된 형태이다. reset 된 후 UAV의 주변에서 Global Tree와 동일하게 생성, 확장되며 주변의 Frontier를 감지하면 UAV의 현재 위치에서 재생성 된다는 차이점이 있다. Local Tree와 Lidar의 정보를 통해 UAV와 가까운 장애물에 대해서 경로를 다시 계획할 수 있다.^[17]

2.3.3 Frontier

Frontier는 센서를 통해 얻은 지도 정보에 미지의 영역과 탐색된 영역에 대해서 1과 -1로 구분하고 그 경계의 경계점을 감지하는 Frontier를 생성한다. 탐색 진행 중 경계에 있는 Frontier 들이 탐색된 영역(1)으로 판단되면 지도상 값 1위에 있는 기존의 Frontier 들은 삭제되고 경계의 Frontier 들을 다시 감지한다.^[18] 탐색할 때 중요한 것은 얼마나 많은 정보를 얻을 수 있는가에 있다. 이 탐색 시스템에서도 경계상 있는 Frontier들 중 미지의 영역이 UAV의 이동으로 인하여 탐색 될 때의 그 정보량 즉 이득이 큰 부분의 Frontier를 선택하여 Assigner 부분으로 전송된다.

2.3.4 Assigner

Assigner는 Frontier 부분에서 감지 및 선택된 Frontier로 UAV를 이동시키기 위한 전송자이다. move_base를 통해 UAV에 경로 계획 및 동작 명령을 전송한다.

2.4 시스템 알고리즘

그림 6은 시스템 알고리즘이다. 탐사가 시작되면 SLAM을 이용한 지도 구성이 이루어지고 기존의 경로를 초기화한다. Global Tree와 Local Tree를 활용하여 경계의 Frontier 들을 감지한다. Global Tree는 탐

사가 끝날 때까지 확장되고 Local Tree는 UAV 주변의 Frontier를 감지할 때까지 확장되며 감지가 되면 Tree는 초기화되어 UAV의 Base_link에서 재생성이 이루어진다. 그리고 UAV에 감지되었던 Frontier 포인트로 경로를 생성하여 그 경로를 따르도록 한다. 탐색이 끝나지 않았으면 다시 경로 초기화 부분으로 돌아가 탐색을 진행한다.

2.5 ROS 구조

ROS의 노드 연결 상태는 그림 7에 나와 있다. 각 노드에서 처리한 결과를 연결된 노드에 전달하고 그 정보를 사용하여 각 노드 간 소통을 가능하게 한다.

본 논문에서 제안된 시스템에 사용된 노드는 UAV를 위한 /bebop 노드, bebop의 움직임을 담당하는

/move_base와 /rplidarNode를 통한 SLAM과 탐색 전략에 사용되는 노드로 구성되어있다. 먼저 /rplidarNode에서 /scan을 실행하고 Hector_SLAM의 /hector_mapping을 이용하여 지도를 구성한다. map이 만들어지면 /clicked_point를 사용하여 4개의 점을 찍어 탐색 영역의 범위를 설정해주고 /global_detector와 /local_detector가 각각의 RRT Tree로 생성되며, 경계의 Frontier인 /detected_points를 생성한다. 이 점들은 다시 /filter를 통해 /centroids의 탐색 되지 않은 점과 /filtered_points의 탐색 된 점으로 구분되며 /assigner를 통해서 UAV에 이동 명령을 전달한다. 이때 UAV의 경로는 /move_base의 /move_base/NavfnROS/plan의 topic을 통해 filter로 들어간 A*의 경로를 따르며 경로 생성은 costmap을 기반으로 한다.

III. 실험

3.1 구현 장비 및 실험 환경

UAV 탐사 시스템은 좁은 공간의 탐색을 위해서 Bebop 2 UAV을 사용했다. Lidar는 최대 40m까지 거리 측정이 가능한 SLAMTEC의 Rplidar S1 제품을 사용하였다. UAV에는 Lidar를 사용하기 위해서 Bebop 2 Wi-Fi가 연결된 PC Xavier NX를 장착하였고 Xavier NX에는 Ubuntu 18.04와 Bebop을 위한 16.04도 Docker를 활용하여 구성되어있다. 이 시스템은 Asus UX305U 제품의 GCS(Ground Control System)로 원격 조종이 되며 사용 장비는 표 1에 나와 있다. 실험 환경은 그림 8과 같이 세 가지 환경에 대하여 진행하였다.

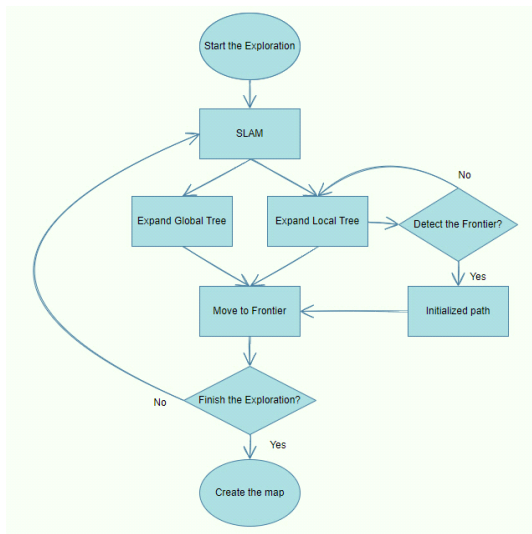


그림 6. 시스템 알고리즘
Fig. 6. System Algorithm

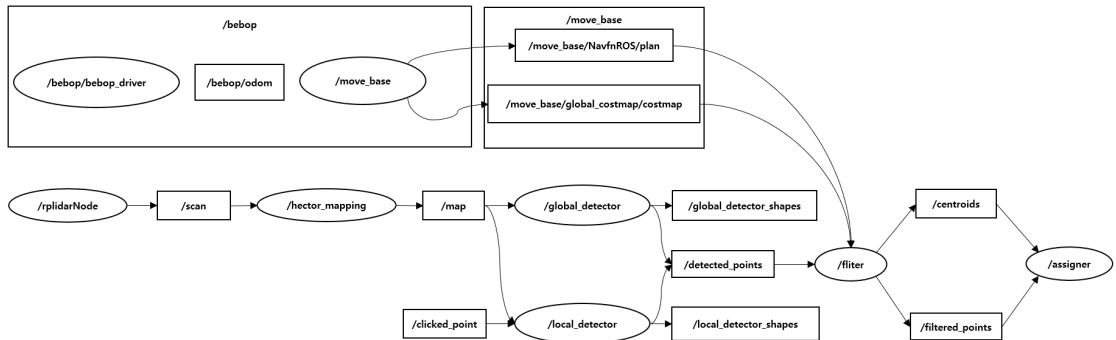


그림 7. ROS 노드 연결 상태
Fig. 7. Connection states of ROS nodes



그림 8. 실험을 위한 세 가지 환경
Fig. 8. Three environments for experiment

표 1. 사용 장비
Table 1. Equipment used

Device	GCS	PC on-board	Lidar sensor	UAV
Company	Asus	Nvidia	Slamtec	Parrot
Model name	UX305U	Xavier NX	Rplidar S1	Bebop Drone2

3.2 실험 결과

그림 9는 초기 탐색 범위설정과 Tree의 확장 및 UAV의 Trajectory를 보여준다. 첫 번째 그림에서 4개의 빨간색 포인트를 찍어줌으로써 탐색의 범위를 설정할 수 있으며, 범위설정 후 탐색은 시작된다. Global Tree와 Local Tree가 생성되고 경계의 감지된 Frontier로 주황색의 UAV가 이동하게 될 Trajectory가 생성된다. 그림 10은 실험환경 첫 번째 영역의 탐색 과정을 보여준다. 탐색 범위가 넓은 Lidar의 장점으로 넓은 구조를 빠르게 파악한 후 미지의 공간 탐색이 이루어진다. 그림 10-11에서 볼 수 있는 초록색 점들은 탐색이 되지 않은 경계의 점에서 볼 수 있는 Frontier이고 노란색 점들은 UAV의 이동으로 인해 초록색 점들이 탐색 된 영역인 노란색으로 시각화된다. 초기 설정한 범위의 탐색이 완료되면 탐색은 종료

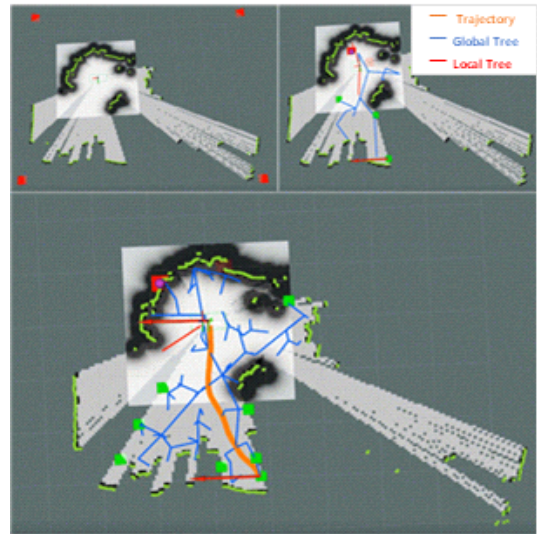


그림 9. 초기 탐색 범위 설정과 Tree 확장, UAV의 경로 시각화
Fig. 9. Setup of the initial exploration range, expansion of the tree, and visualization of UAV's path

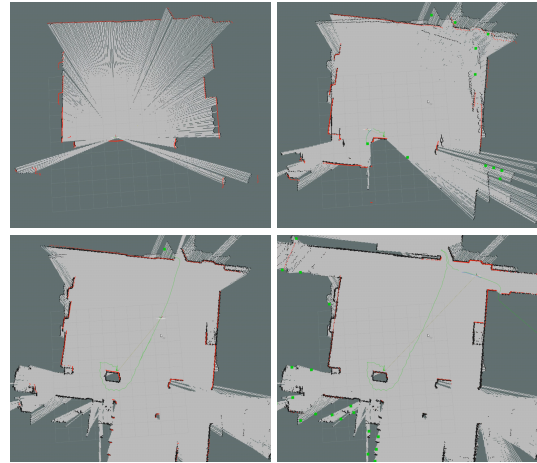


그림 10. 탐색 중 지도 업데이트
Fig. 10. Update of the map while exploring

되고 그림 12와 같이 지도가 생성된다. 각 영역의 구성 시간은 표 2에 나와 있다. 탐색 전략처럼 무작위에 의한 이동이 아닌 이득이 큰 쪽으로 이동하여 각 영역의 대략적인 구조를 파악하는데 많지 않은 시간이 소요되었지만 모서리의 작은 공간까지 탐색하는 데 많은 시간이 소요되었다. 탐색하는 동안 그려진 지도는 그림 12에서 볼 수 있다.

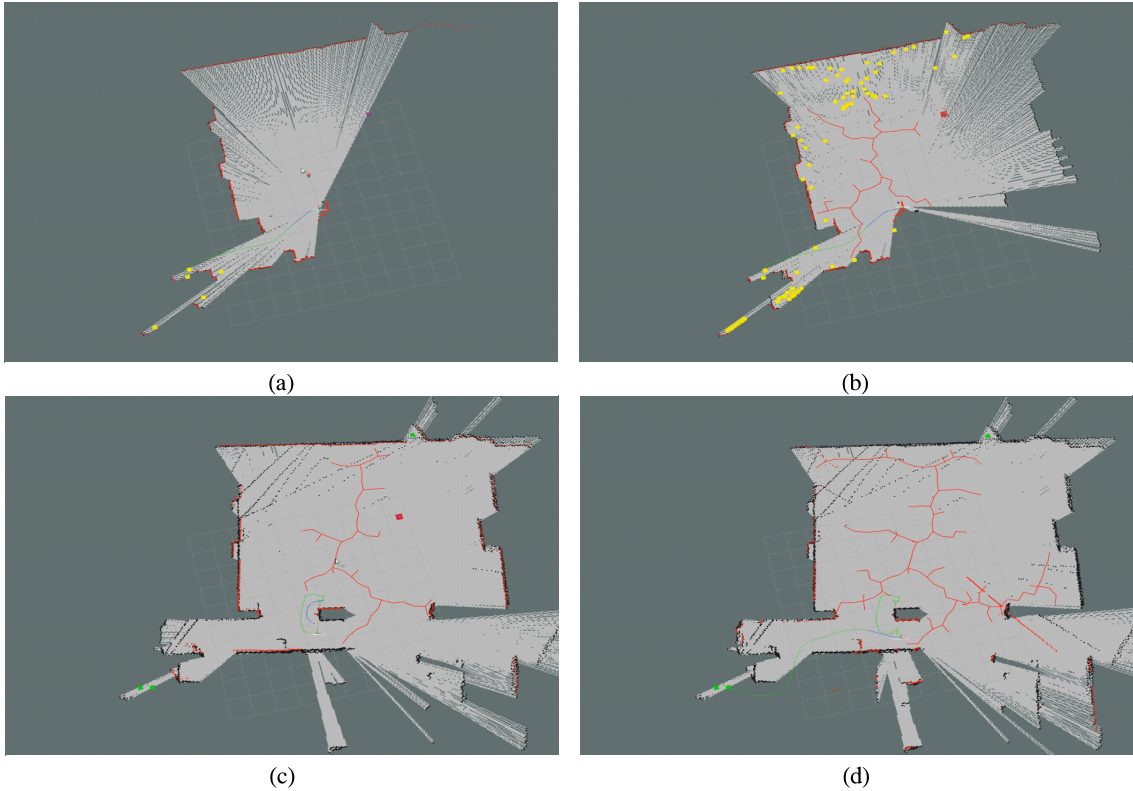


그림 11. 탐색 중 Frontier의 생성과 RRT Tree의 생성 (a) Frontier 생성, (b) Local Tree 생성, (c) Tree 초기화 후 UAV 이동, (d) Frontier를 찾기 위한 Local Tree의 확장
 Fig. 11. Generation of frontiers and RRT trees while exploring (a) Generate the Frontier, (b) Generate the Local Tree, (c) Move UAV after initializing the tree, (d) Expand of Local Tree to find Frontier

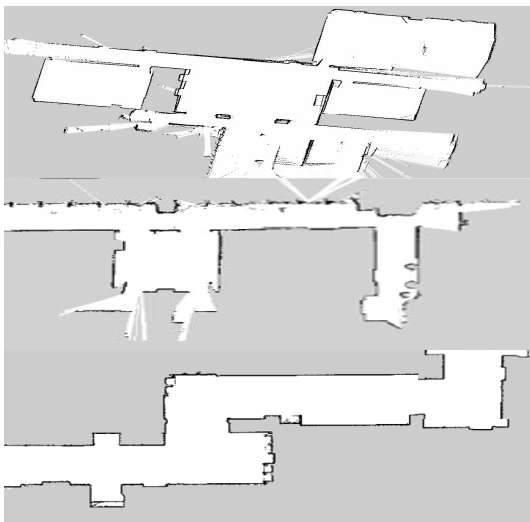


그림 12. 지도 생성
 Fig. 12. Generation of the map

표 2. 각 영역의 구성 시간
 Table 2. Configuration time of each map

Map type	multiple rooms	hallway	crooked hallway
Time	2m 43s	1m 52s	1m 30s

IV. 결 론

본 논문에서는 RRT와 A*를 기반으로 한 탐색 알고리즘을 UAV에 적용하여 실내를 탐색하는 방법을 제안하고 이를 bebop 2, Jetson Xavier NX, Rplidar S1을 이용한 실내 탐사용 드론 플랫폼을 제작하여 실제 환경에서 실험을 수행하였다. UAV의 높은 기동성을 바탕으로 신속한 공간 탐색이 가능하였고, Global Tree와 Local Tree는 각각의 영역에서 생성되어 Frontier 들을 감지하였다. 또한 모서리의 Frontier 들을 감지하고 UAV가 모서리의 공간까지 탐색하여 기존 시스템에서의 UGV에 국한된 실내탐색의 기동성

문제와 탐색 시스템에서의 닫힌 공간에서의 탐색 및 재탐색의 문제를 해결하였다.

본 논문에서는 실내 탐사와 지도 구성을 위한 탐색을 진행하였으며 향후 연구로는 카메라와 같은 다른 센서를 활용하여 지도 구성뿐만 아니라 사람이나 사물을 인식하는 기능을 통해 화재 원인을 찾고 조난자를 탐색하는 등 추가적인 연구가 필요하다.

References

- [1] S. J. Kim, "Recent research trends and implications on the use of drone in the construction industry" *Korea Inst. Construction Eng. and Manag.*, vol. 21, no. 1, pp. 45-49, 2020.
- [2] H.-Y. Ko, J. H. Baek, and H. S. Choi, "Autonomous flight system of UAV through global and local path generation," *J. Aerospace Syst. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 15-22, 2019.
- [3] S. Watkins, J. Burry, A. Mohamed, M. Marino, S. Prudden, A. Fisher, and R. Clothier, "Ten questions concerning the use of drones in urban environments," *Building and Environ.*, vol. 167, 106458, 2020.
- [4] L. Quan, L. Han, B. Zhou, S. Shen, and F. Gao, "Survey of UAV motion planning," *IET Cyber Syst. and Robotics*, vol. 2, no. 1, pp. 14-21, 2020.
- [5] F. Li, S. Zlatanova, M. Koopman, X. Bai, and A. Diakité, "Universal path planning for an indoor drone," *Automat. in Construction*, vol. 95, pp. 275-283, 2018.
- [6] A. Chakrabarty, et al., "Autonomous indoor object tracking with the Parrot AR. Drone," in *2016 ICUAS IEEE*, pp. 25-30, 2016.
- [7] Hoon-hee Kim, Soo-young Shin, "Proposed Path Planning for Improved RRT-Based UAVs Using Lidar Sensors," *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, pp. 1149-1150, Jeju Island, Korea, Jun. 2021
- [8] U. Orozco-Rosas, O. Montiel, and R. Sepúlveda, "Mobile robot path planning using membrane evolutionary artificial potential field," *Appl. Soft Comput.*, vol. 77, pp. 236-251, 2019.
- [9] P. H. Moreno, A. Paranjape, and T. Mylvaganam, "Deep Earth Drones," *Aerial Robotics Lab*, 2018.
- [10] I. Noreen, A. Khan, and Z. Habib, "A comparison of RRT, RRT* and RRT*-smart path planning algorithms," *IJCSNS*, vol. 16, no. 10, 2016.
- [11] M. Radmanesh, M. Kumar, P. H. Guentert, and M. Sarim, "Overview of path-planning and obstacle avoidance algorithms for UAVs: A comparative study," *Unmanned Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 95-118, 2018.
- [12] F. Amigoni and V. Caglioti, "An information-based exploration strategy for environment mapping with mobile robots," *Robotics and Autonomous Syst.*, vol. 58, no. 5, pp. 684-699, May 2020.
- [13] R. McFarlane, "A survey of exploration strategies in reinforcement learning," *McGill University*, 2018.
- [14] V. Krátký, P. Petráček, T. Báča, and M. Saska, "An autonomous unmanned aerial vehicle system for fast exploration of large complex indoor environments," *J. Field Robotics*, vol. 38, no. 8, pp. 1036-1058, 2021.
- [15] W. Gao, M. Booker, A. Adiwahono, M. Yuan, J. Wang, and Y. W. Yun, "An improved frontier-based approach for autonomous exploration," in *2018 15th ICARCV IEEE*, pp. 292-297, Nov. 2018.
- [16] C. Stachniss, G. Grisetti, and W. Burgard, "Information gain-based exploration using rao-blackwellized particle filters," in *Robotics: Sci. and syst.*, vol. 2, pp. 65-72, Jun. 2005.
- [17] H. Umari and S. Mukhopadhyay, "Autonomous robotic exploration based on multiple rapidly-exploring randomized trees," in *2017 IEEE/RSJ Int. Conf. IROS*, pp. 1396-1402, Sep. 2017.
- [18] T. Cieslewski, E. Kaufmann, and D. Scaramuzza, "Rapid exploration with multi-rotors: A frontier selection method for high speed flight," in *2017 IEEE/RSJ Int. Conf. IROS*, pp.

2135-2142, Sep. 2017.

김 훈 희 (Hoon-hee Kim)



2020년 2월 : 금오공과대학교 전
자공학부 졸업

2020년 3월~현재 : 금오공과대
학교 IT융복합공학과 석사과정
<관심분야> 드론 응용, 로봇프로
그래밍

[ORCID:0000-0003-3534-3276]

신 수 용 (Soo-young Shin)



1999년 2월 : 서울대학교 전기공
학부 졸업

2001년 2월 : 서울대학교 전기공
학부 석사

2006년 2월 : 서울대학교 전기공
학부 박사

2010년~현재 : 국립금오공과대
학교 전자공학부 교수

<관심분야> 5G/B5G 무선 접속 기술, 드론 응용, 혼합
현실, 블록체인, 머신러닝 및 딥러닝

[ORCID:0000-0002-2526-2395]