

무인 항공기를 위한 실시간 경로 재계획 기법: RRT*와 LOSPO를 활용한 환경 변화 고려

Real-time Path Replanning for Unmanned Aerial Vehicles: Considering Environmental Changes using RRT* and LOSPO

안정우* · 우지원 · 김현섭 · 박상윤 · 남경래
LIG넥스원 드론개발단

Jung Woo An* · Ji Won Woo · Hyeon Seop Kim · Sang Yun Park · Gyeon Rae Nam

Ground Control System S/W, LIG Nex1, Deajoen 34127, Korea

[요 약]

무인 항공기는 다양한 분야에서 널리 활용되고 있으며, 실시간 경로 재계획은 이들 기기의 안전성과 효율성을 향상하는 핵심 요소이다. 본 논문에서는 RRT*와 LOSPO를 기반으로 한 실시간 경로 재계획 기법을 제안한다. 제안된 기법은 먼저 RRT* 알고리즘을 활용하여 초기 경로를 생성하고, LOSPO를 이용하여 경로를 최적화한다. 또한 최적화된 경로를 궤적으로 변경하여 실제 시간과 항공기의 동적한계를 고려할 수 있다. 이 과정에서 환경 변화와 충돌 위험을 실시간으로 감지하고, 필요한 경우 경로를 재계획함으로써 안전한 운영을 유지한다. 이 방법은 시뮬레이션을 통한 실험을 통해 검증되었다. 본 논문의 결과는 무인 항공기의 실시간 경로 재계획에 관한 연구에 중요한 기여할 것으로 기대한다. 또한 이 기법을 다양한 상황에 적용함으로써 무인 항공기의 안전성과 효율성을 향상시킬 수 있다.

[Abstract]

Unmanned aerial vehicles are widely used in various fields, and real-time path replanning is a critical factor in enhancing the safety and efficiency of these devices. In this paper, we propose a real-time path replanning technique based on RRT* and LOSPO. The proposed technique first generates an initial path using the RRT* algorithm and then optimizes the path using LOSPO. Additionally, the optimized path can be converted into a trajectory that considers actual time and the dynamic limits of the aircraft. In this process, environmental changes and collision risks are detected in real-time, and the path is replanned as needed to maintain safe operation. This method has been verified through simulation-based experiments. The results of this paper make a significant contribution to the research on real-time path replanning for UAVs, and by applying this technique to various situations, the safety and efficiency of UAVs can be improved.

Key word : Path planning, Rapidly-exploring random tree, Path optimization, Line-of-Sight path optimization Trajectory generation.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.4.365>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 26 July 2023; Revised 10 August 2023

Accepted (Publication) 24 August 2023 (30 August 2023)

*Corresponding Author : Jung woo an

Tel: +82-031-8038-0032

E-mail: jungwoo.an@lignex1.com

1. 서론

최근 무인 항공기 사용이 증가함에 따라 무인 항공기의 자율화에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]. 무인 항공기는 다양한 산업 분야에서 활용되고 있으며, 환경 탐사, 자원 탐사, 재난 대응, 무인 물류 등 다양한 응용 분야에서 큰 가능성을 가지고 있다. 특히, 도심 항공 교통(UAM: urban air mobility) 분야에서는 무인 항공기가 도시 내의 물류 및 인력 이동 등에 효과적으로 활용될 가능성이 커지고 있다.

무인 항공기의 실시간 경로 계획은 항공 교통 시스템의 안전성과 효율성을 보장하기 위한 중요한 과제로 인식되고 있다. 특히, 동적 환경에서의 무인 항공기의 비행은 환경 변화를 고려한 실시간 경로 재계획이 필요하다. 환경 변화는 동적 장애물, 날씨 변화, 비행 규정 등 다양한 요소로 인해 무인 항공기의 초기 계획된 경로에 영향을 미치며, 이에 대응하여 실시간으로 경로를 재계획하는 것이 필요하다.

기존에는 RRT(rapidly-exploring random trees) 알고리즘을 활용하여 무인 항공기의 경로를 계획하는 연구들이 많이 진행되었다. RRT 알고리즘은 무인 항공기의 초기 경로 계획에 효과적이며, 빠른 계획 속도를 가지고 있다. 그러나 기존 RRT 알고리즘은 최적성을 보장하지 않는다는 한계가 있어, 최적 경로를 찾는 데에는 한계가 있다. 또한, RRT 알고리즘은 경로를 구성하는 노드의 수가 많아 저장공간과 연산 시간이 크게 요구되는 단점이 있다.

본 연구에서는 RRT 알고리즘의 한계를 극복하고자, 가시선(LOS: line-of-sight) 개념에 착안한 LOSPO(line-of-sight path optimization) 기법을 제안한다. LOSPO 기법은 RRT 알고리즘에 비해 효율적인 저장공간과 연산 시간을 가지면서도 최적 경로를 찾을 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 무인 항공기를 위한 실시간 경로 재계획 기법으로 RRT*(rapidly-exploring random trees star)와 LOSPO를 결합하여 제안한다. 이를 통해 무인 항공기의 초기 경로 계획에서부터 최적 경로 탐색까지의 과정을 효율적으로 수행할 수 있다.

본 논문의 주요 기여는 다음과 같다. 첫째, RRT*와 LOSPO를 결합한 실시간 경로 재계획 기법을 제안하여 무인 항공기의 최적 경로 탐색을 가능하게 한다. 둘째, 환경 변화를 고려하여 실시간으로 경로를 재계획하는 기능을 도입하여 무인 항공기의 동적 환경 대응 능력을 향상한다. 셋째, 실험을 통해 제안된 기법의 성능을 평가하고 기존의 알고리즘들과의 비교를 통해 제안된 기법의 우수성을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 경로 계획 알고리즘을 적용할 디지털 환경과 RRT* 알고리즘을 소개하고, 기존 RRT* 알고리즘의 한계를 논의한다. 다음으로, 제안하는 RRT*와 LOSPO를 결합한 경로 기법에 대해 상세하게 제시하고, 이를 통한 최적 경로 탐색과 환경 변화 대응 능력을 설명한다. 그다음으로, 실제 시간을 고려하는 방법으로 착안한 궤적 변환 기법을 소개한다. 본 연구에서 적용한 궤적 변환 기법은 7차 spline

interpolation을 적용하였다. 마지막으로, 본 논문의 결론을 도출하고, 향후 연구 방향에 대한 제언을 제시한다.

II. 디지털 지형 환경 및 경로 계획 알고리즘

디지털 지형 환경은 실세계 지형 정보를 가상으로 표현한 데이터 구조로, 본 논문에서는 경로 계획 알고리즘을 적용하기 위해 사용된다. 이 장에서는 구현된 디지털 지형 환경과 RRT* 알고리즘에 대한 소개를 통해 실시간 경로 재계획 기법에 대한 사전 이해를 돕고자 한다. 또한, 효과적인 경로 최적화 기법인 LOSPO 기법을 소개한다.

2-1 디지털 지형 환경 구현

본 연구에서 사용한 디지털 지형은 실제 지형 정보를 바탕으로 생성하였으며, 37° 25'20.2" N, 127° 01'21.9" E 인근의 지형을 채택하였다. 그림 1은 생성된 디지털 환경을 나타내며, 약 $1.5876 \times 10^8 m^2$ 평면에 최대 높이 600 m 산이 있는 지형이다. 해당 지형은 높고 낮은 산이 많이 있어서, 앞으로 다룰 경로 계획 알고리즘이 장애물을 회피하는 경로를 적절히 계획할 수 있는지 확인하기에 적합하다고 판단하였다.

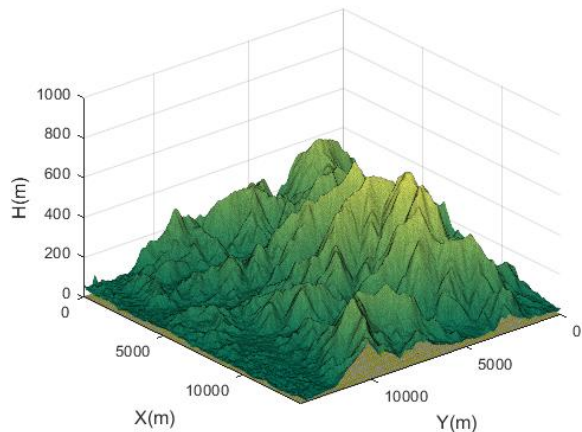


그림 1. 디지털 지형
Fig. 1. Digital terrain

2-2 Rapidly-exploring Random Tree Star 알고리즘

본 논문에서 제시하는 실시간 경로 계획 기법을 이해하기 위해 RRT*를 이용한 경로 계획에 대한 기본적인 이해가 필요하다.

RRT*은 확률 기반의 경로 탐색 알고리즘 중 하나로, 최적 경로를 찾는 데 효과적이다. 이 알고리즘은 RRT 알고리즘을 확장하여 만들어졌으며, 최적 경로를 더 빠르게 찾는 방법을 제공한다.

우선 이동체가 이동을 시작하는 초기 지점(initial point) x_i 과 목표 지점(goal point) x_{goal} 에 대한 정의가 필요하다. 이 지점들의 정보는 x, y, z-축에 대한 정보로 나타나며 (x, y, z)으로 표현된다. 다음으로 임의의 정점 x_{rand} 을 샘플링(sampling) 함으로써 RRT 기반 알고리즘의 경로 계획이 이루어진다. 이때 샘플링의 의미는 디지털 환경에 위치할 수 있는 정점 중 하나를 선택하는 것을 의미한다.

임의의 정점 x_{rand} 을 어떻게 이동시키고 다른 정점들과 연결하는 방법에 따라 다양한 알고리즘으로 나눌 수 있으며, P-RRT*, Q-RRT*, spline-based RRT* 등과 같은 파생 알고리즘들이 있다[2]-[4]. RRT* 알고리즘은 트리(tree)를 선언하는 것으로 시작된다. 트리는 프로그램상에 행렬 형태로 저장되며, 경로를 찾는 형태가 나무의 가지가 뻗는 형태와 비슷하다고 하여 트리라고 불린다. RRT* 알고리즘은 RRT 알고리즘과 같이 트리를 확장한다. RRT 알고리즘의 트리 확장 방법은 참고를 통해 학습할 수 있다.[5] 한편, RRT*는 연결된 정점들의 관계를 개선하기 위하여 "rewire" 과 "ChooseBestParent" 라고 불리는 재결합, 최적 부모 선택 절차를 추가한 것이다.[6],[7] 이 두 과정은 정점들의 연결이 최적 경로를 찾을 수 있게 하기 위한 것이다. 이때 본 논문에서 다루는 최적 경로는 계획된 경로 중 물리적인 거리가 가장 짧은 것을 의미한다.

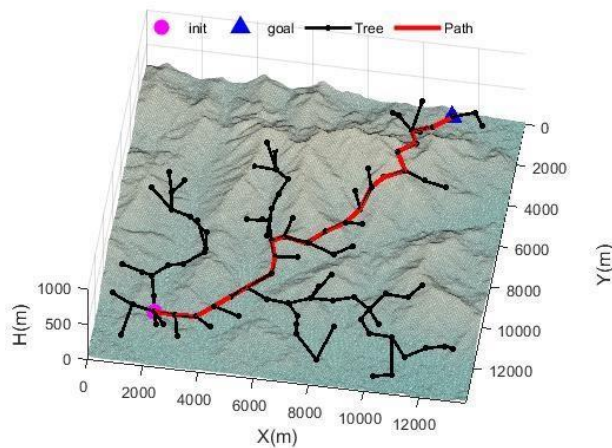


그림 2. RRT*를 이용한 경로 계획 결과(정점 100개)
Fig. 2. Result of path planning applying RRT* (100 nodes)

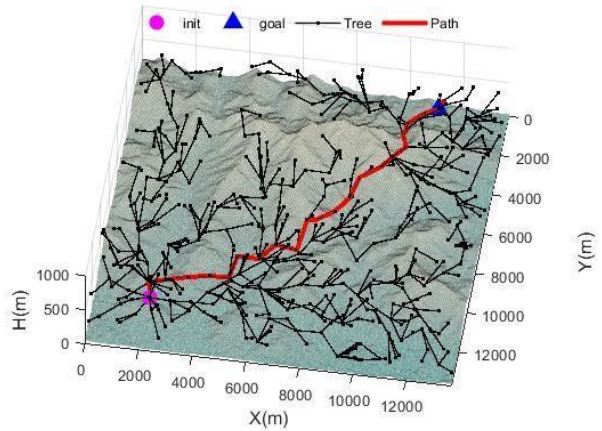


그림 3. RRT*를 이용한 경로 계획 결과(정점 500개)
Fig. 3. Result of path planning applying RRT* (500 nodes)

그림 3과 그림 4은 그림 1에 나타난 디지털 환경에 RRT*를 적용한 결과다. 그림 3은 정점 100개를 샘플링한 결과를 나타내며, 그림 4은 정점 500개를 샘플링한 결과다. RRT* 알고리즘은 샘플링한 정점의 개수가 많을수록 최적 경로를 찾을 수 있는 확률이 상승한다[8]. 그림 3에 나타난 경로의 길이는 1.4035e+07m이며, 그림 4에 나타난 경로의 길이는 1.3593e+07m로 샘플링한 정점이 500개인 경우에 경로가 단축된 것을 알 수 있다. 본 연구에서 최적 경로를 물리적 거리가 짧은 경로로 정의하였으므로, 그림 2의 경로보다 그림 3의 경로가 최적화되었다고 할 수 있다.

2-3 Line-Of-Sight Path Optimization

RRT* 기반의 알고리즘을 사용하여 경로를 최적화할 수 있지만, 샘플링되는 정점을 지속해서 추가해야 하므로 큰 저장공간과 많은 연산 시간이 요구된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 RRT*-smart와 같은 경로 최적화 알고리즘이 제안되었다[7], [8]. 하지만 해당 알고리즘 역시 많은 정점을 무작위로 샘플링해야 하기 때문에 같은 단점을 갖고 있다. 참고[9]에서는 많은 정점을 샘플링하지 않고 생성된 경로에서 최적 경로를 찾기 위한 방법을 제안하였으며, 이는 LOSPO라고 불린다. 해당 알고리즘은 작은 저장공간을 이용하여 빠르게 경로를 최적화할 수 있으므로, 실시간 경로 계획에 적합하다. 따라서 이 절에서는 실시간 경로 계획 기법에 적용될 LOSPO 기법을 소개한다.

우선 RRT*를 이용하여 초기 경로를 계획한다. 초기 경로를 계획하는데 RRT*를 이용하는 이유는 RRT, P-RRT* Q-RRT*와 같은 알고리즘과 비교하여 짧은 시간 안에 최적 경로와 근접한 경로를 계획할 수 있기 때문이다. LOSPO를 이용한 경로 최적화 예시는 그림 5에 나타난 바와 같다.

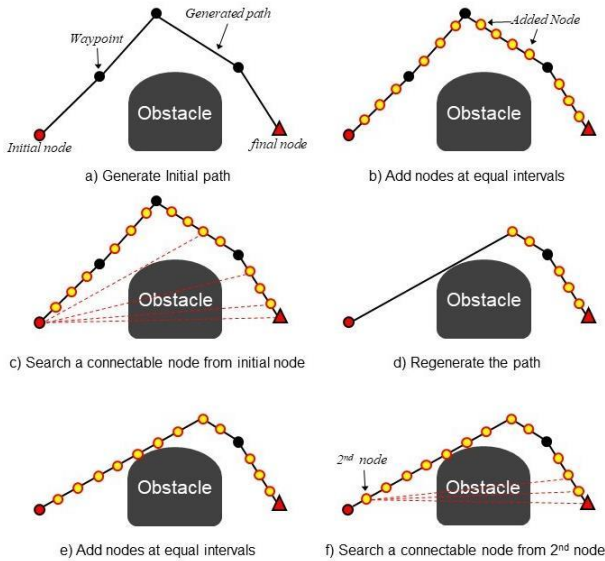


그림 4. LOSPO를 이용한 경로 최적화 예
 Fig. 4. Example of path optimization using LOSPO

LOSPO는 가시선의 개념에 착안하여 제안된 기법으로써, 경로를 구성하는 정점들을 일직선으로 잇는 최적화 방법이다. 그림 5의 b)와 같이 계획된 초기 경로에 일정한 간격으로 새로운 정점을 추가한다. 추가되는 정점의 간격은 본 장의 3절에서 다루도록 하겠다. 기존에 경로를 구성하는 정점과 새롭게 추가된 정점을 바탕으로, 최초 정점이 연결할 수 있는 가장 먼 정점을 탐색한다. 이때 알고리즘의 반복 수행을 줄이기 위하여, 최초 정점과 연결할 수 있는 정점을 탐색하는 순서는 목표 지점을 먼저 탐색하고 역순으로 연결 가능성을 확인한다. 다음으로 그림 5의 d)와 같이 최초 정점과 연결할 수 있는 정점을 연결한 새로운 경로를 생성한 후, 그림 5의 e)와 같이 다시 일정한 간격으로 새로운 정점을 추가한다. 최초 정점은 더 이상 연결할 수 있는 정점을 찾는 것이 의미 없으므로(경로가 바뀌지 않기 때문에), 다음 정점이 연결할 수 있는 정점을 탐색한다. 이러한 과정을 반복하다가, 목표 지점과 한 번에 연결할 수 있는 정점이 생기면 반복을 종료한다.

그림 6은 그림 3에 나타난 결과에 LOSPO를 적용한 결과를 보여준다. 그림 6에서 점선은 RRT*를 이용하여 계획한 초기 경로를, 실선은 LOSPO를 적용한 최적 경로를 나타낸다. LOSPO를 이용하여 계획한 최적 경로의 비용은 1.1740e+08m로 초기 계획된 경로와 비교하여 16.35% 단축된 결과를 보인다.

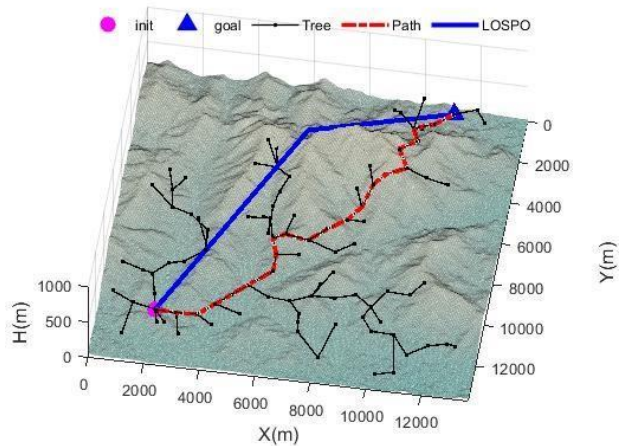


그림 5. LOSPO를 이용한 경로 최적화 결과
 Fig. 5. Result of path optimization using LOSPO

III. 궤적 변환을 이용한 경로 재계획

무인 항공 이동체나 로봇은 동적 환경에서 발생하는 사건과 사물 위치의 변화에 대응하기 위하여 즉각적인 경로 계획이 요구된다. 이동체가 기존의 경로를 따라 이동하면서 동적 환경에 대응하여 장애물을 회피하거나 기존의 경로보다 최적화된 경로를 찾는 기법을 실시간 경로 계획 기법 (real-time path planning algorithms)이라고 한다[10],[11]. 실시간 경로 계획 문제는 동적 환경에서 운용되는 무인 항공기나 무인 이동체에 요구되는 까다로운 문제대[12].

실시간 경로 계획 문제를 해결하기 위하여 RRT, RT-RRT, RRTX, RRT* GL과 같은 다양한 알고리즘이 제안되었다 [13]-[15]. 하지만 해당 알고리즘들은 무인 항공기에 적용하는데 두 가지 한계가 있다. 첫 번째는 이들은 경로를 계획하는 데 초점을 맞추었기 때문에, 비행이 진행되는 실제 시간에 대해 고려하지 않는다. 최근에는 무인기를 이용한 군집 운용이나 운송 임무, 항공 택시, 군사 임무 등에 사용하려는 시도가 많다[16], [17]. 이러한 임무들은 정확한 시간에 임무를 수행하는 것이 중요하다[18].

다음으로 기존 알고리즘들의 두 번째 한계는 무인기의 동적 한계를 고려할 수 없다는 것이다. 항공기는 지상에서 이동하는 이동체와 다르게 실속 속도(stall speed)나 회전반경, load factor 등에 대한 동적 한계가 존재한다. 계획된 경로만으로 항공기의 동적 한계를 벗어나는지 확인하는 것은 불가하므로 추가적인 기법이나 작업이 필요하다. 본 연구에서는 경로를 궤적으로 변환하여 기존 알고리즘들의 한계를 해결하였고 경로를 궤적으로 변환하는 기법으로는 참고[19]에서 제안한 7차 spline 보간법을 채택하였다.

3-1 7차 spline 보간법을 이용한 궤적 변환

7차 보간법을 이용한 궤적 변환 방법은 다음과 같다. 계획된 경로의 N+1개의 경로점 waypoint 들을 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_j = (x_j, y_j, h_j)^T \mid \begin{matrix} (j=N) \\ (j=0) \end{matrix} \quad (1)$$

이때 P_j 는 j번째 경로점을 나타내며, 오직 위치에 대한 정보만 갖고 있다. 7차 spline 보간법을 이용하는 목적은 식(1)에 나타난 경로점에 무인기가 도달해야 하는 시간과 방향각(heading angle)을 할당하는 것이다. 우선 j=0일 때 시간을 식 (2)와 같이 정의한다.

$$t_0 = 0 \quad (2)$$

무인기가 경로를 따라 비행하는 속도가 V_{ref} 으로 일정하다고 가정한다면, 각 경로점을 이동하는 데 걸리는 시간은 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$t_j = \frac{\sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2 + (h_j - h_{j-1})^2}}{V_{ref}} \quad (3)$$

$j = 1, \dots, N$

식 (3)을 통하여 경로점의 위치와 무인기가 해당 경로점에 도달하는 시간을 식 (4)과 같이 정의할 수 있다.

$$\widehat{P}_j = (t_j, x_j, y_j, h_j)^T \mid \begin{matrix} (j=N) \\ (j=0) \end{matrix} \quad (4)$$

식(4)에 나타난 경로점을 일직선으로 이어 궤적을 생성할 수 있지만, 그림 7의 예시처럼 각 경로점을 기준으로 방향각이 급격하게 꺾이는 궤적이 생성될 수 있다. 이때 방향각이 완만하게 변하는 궤적을 생성하기 위해 spline 보간법이 적용된다.

또한 그림 7에 나타난 spline 보간법을 적용한 궤적의 예시는 기존 경로에 크게 벗어나는 구간이 존재한다. 이를 보완하기 위하여 그림 8과 같이 기존 경로점 사이에 일정한 간격을 두어 추가 경로점을 할당한다.

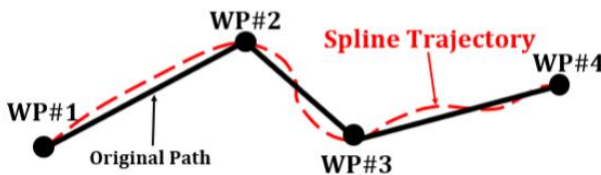


그림 6. spline 보간법을 이용한 궤적 변환 예
Fig. 6. Example of trajectory transformation using spline interpolation

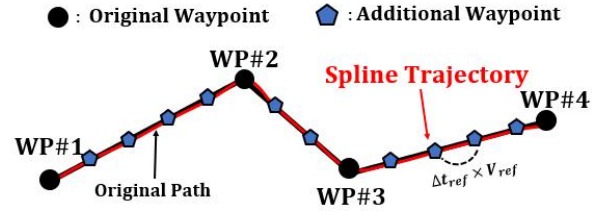


그림 7. 경로점 추가 후 spline 보간법을 이용한 궤적 변환 예
Fig. 7. Example of trajectory transformation using spline interpolation adding way points

이때 경로점 사이에 추가되는 경로점은 본 논문의 2장 3절에서 살펴보았던 LOSPO 기법에 추가되는 정점을 이용하면 프로그램 효율적으로 사용할 수 있다. 추가된 경로점과 기존의 경로점을 이용하여 spline 보간법을 적용하여 모든 경로점을 연속적으로 잇는 궤적을 생성할 수 있다.

7차 spline 보간법의 적용 방법을 예를 들기 위해 x-축의 궤적을 생성하는 방법에 대해 다루도록 하겠다.

무차원 계수 τ 를 이용하여 식 (5)와 같이 x-축의 궤적을 7차 방정식으로 나타낸다. 이때 식 (5)의 M은 기존 경로 점과 추가된 경로 점의 개수를 합한 값을 의미한다. M개의 경로 점들을 잇는 M-1개의 방정식을 계산함으로써 궤적을 생성할 수 있다.

$$x(\tau) = \sum_{k=0}^{k=7} a_{j,k} \tau^k, \quad j = 1, \dots, M \quad (5)$$

$$\tau = \frac{t - t_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} \in [0, 1] \quad (6)$$

식 (5)에 나타난 각 항의 계수 $a_{j,k}$ 는 각 경로점을 기준으로 연속 조건을 만족시키도록 결정된다. 연속 조건은 함수값, 미분값, 2계 미분값, 3계 미분값을 연속적으로 잇도록 하는 것이고, 이는 선형 대수 방정식(linear algebraic equation)으로 정리할 수 있다. 이런 방법으로 y-, z-축에 대한 궤적을 계산하고, 각 경로점에 할당된 궤적을 정리하면 식(7)과 같다.

$$\bar{r}_j = (t_j, x_j, y_j, h_j)^T \mid \begin{matrix} (j=M) \\ (j=0) \end{matrix} \quad (7)$$

식 (7)에 나타난 궤적 정보를 이용하여 식 (8)과 같이 각 경로점에서 무인기의 방향각을 계산할 수 있다.

$$\psi_j = \tan^{-1} \left(\frac{x_{j+1} - x_j}{y_{j+1} - y_j} \right), \quad j = 0, \dots, M-1 \quad (8)$$

$\psi_M = \psi_{M-1}$

식 (7)과 (8)을 이용하여 무인기가 따라가야 할 궤적과 방향각이 식 (9)와 같이 정리할 수 있다.

$$\mathbf{r}_j = (t_j, x_j, y_j, h_j, \Psi_j)^T |_{(j=0)}^{(j=M)} \quad (9)$$

7차 spline 보간법을 이용한 궤적 변환이 적절한 결과를 생성하는지 확인하기 위하여 그림 6에 나타난 LOPSO를 이용한 경로를 궤적으로 변환하여 그림 9에 나타냈다. 그림 9으로 경로와 궤적의 차이가 거의 없으며 완전한 궤적이 생성된 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 채택한 7차 spline 보간법이 경로를 궤적으로 변환하는데 타당하다는 결론을 내릴 수 있다.

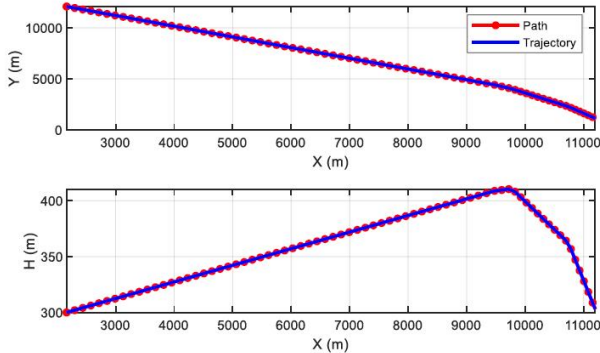


그림 8. 7차 spline 보간법을 이용한 궤적 변환 결과

Fig. 8. Result of trajectory transformation using 7th order spline interpolation

3-2 궤적 변환 결과를 이용한 경로 재계획

표 1. 그림 10의 장애물의 제원

Table 1. Specifications of obstacles in Figure 10.

	Obstacle		
	A	B	C
Major axis (m)	1,200	1,500	1,500
Minor Axis (m)	1,200	1,500	1,050
Initial point (m)	x = 4,900 y = 5,400	x = 9,800 y = 6,900	x = 6,000 y = 6,600
Final point (m)	x = 10,400 y = 5,400	x = 2,200 y = 6,900	x = 11,600 y = 11,600
Velocity (m/s)	60	70	80

앞 절에서 다른 궤적 변환 기법을 통해 비행시간에 따른 무인기의 예상 위치를 제공할 수 있다. 이를 이용하여 동적 환경에서 무인기가 비행하는 동안 움직이는 장애물을 회피하는 경로를 재계획할 수 있다. 그림 8에서 나타낸 일정한 시간 간격 t_{ref} 마다 무인기의 위치와 장애물의 위치를 업데이트하여 경로를 재계획한다면, 무인기는 움직이는 장애물과 충돌 없이 목적지에 도달할 수 있게 된다. 궤적 변환 기법을 이용한 경로 재계획 기법을 검증하기 위하여 그림 1에 나타난 탐색 환경에 움직이는 장애물이 3개 있는 환경을 구성하였으며, 이는 그림 10과 표 1에 나타냈다. 그림 10에 나타낸 장애물(A, B, C)에는 각각 초기 점과 종단점이 설정되었으며, 각각 설정된 속도로 해당 지점을 반복하여 이동한다.

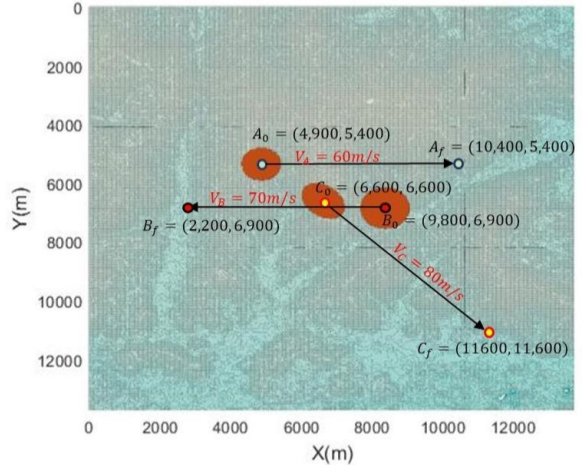


그림 9. 움직이는 장애물이 있는 환경

Fig. 9. Environment with moving obstacles

그림 10에 나타낸 동적 환경에 경로 재계획 기법을 적용한 결과는 그림 11에 나타내었다. 이때 경로 재계획 기법을 적용한 대상 무인기는 $V_{ref} = 50m/s$ 으로 등속 비행하고 $t_{ref} = 0.1s$ 으로 설정했다.

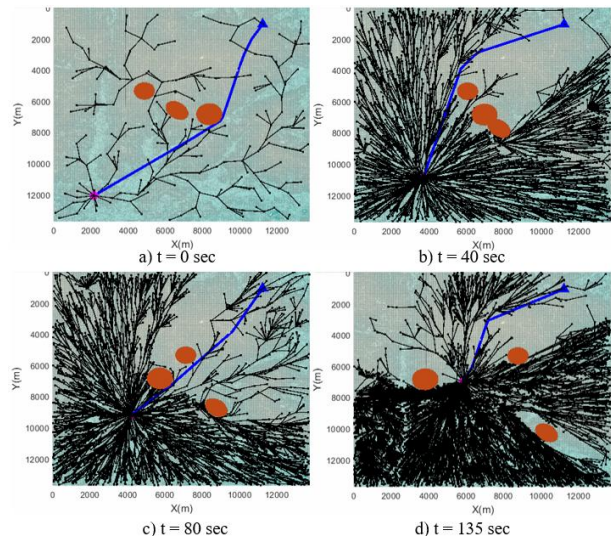


그림 10. 그림 10에 나타낸 동적 환경에서 경로 재계획 결과

Fig. 10. Result of path re-planning in dynamic environment shown in Figure 10.

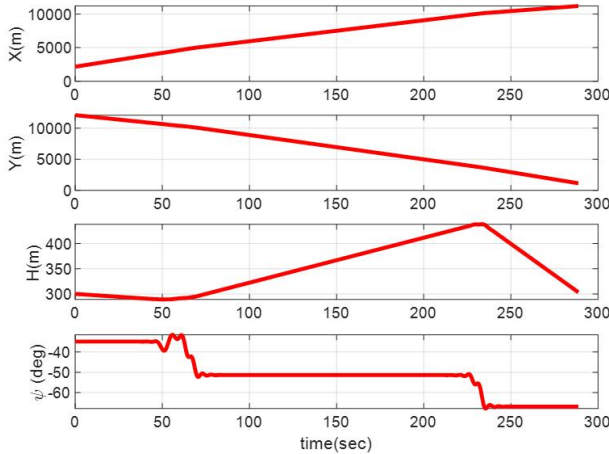


그림 11. 그림 11에 나타난 궤적 정보

Fig. 11. Information of trajectories shown in Figure 11.

그림 11은 궤적 변환을 이용한 경로 재계획 기법의 결과를 보여준다. 그림 11의 a)에서 나타난 것과 같이 초기 경로는 LOSPO를 이용하여 최적화되었으며, 장애물을 피해 경로가 생성된 것을 알 수 있다. 한편 그림 11의 b)에서 나타난 것과 같이 장애물들이 이동하면서 경로를 침범하게 된다. 경로는 침범되는 순간에 RRT*의 정점들을 추가하고, 새로운 경로를 생성하게 된다. 이러한 경로 재 계획 과정으로 그림 11의 c)와 d)에서도 움직이는 장애물을 회피하여 경로를 재계획하는 것을 확인할 수 있다. 그림 12는 그림 11에서 계획된 경로가 궤적으로 변환된 결과를 나타낸다. 여기서 주목할 점은 그림 11의 위치정보가 시간에 따라 제시되었다는 것이다. 기존 경로 계획 관련 연구들은 위치정보만 생성하여 항공기의 속도 및 가속도와 같은 동적 정보를 제공할 수 없다. 하지만 그림 11처럼 나타난 궤적 정보를 사용하게 되면 비행체의 동적 정보를 얻을 수 있으며, 이를 통하여 생성된 궤적을 비행체가 안전하게 비행할 수 있는지 확인해 볼 수 있다. 비행체가 안전하게 비행할 수 있는지 확인하는 지표로는 실제 속도와 최소 선회 반경 등이 있다.

그림 11와 12에 나타난 결과를 통하여 본 논문에서 제안한 궤적 변환을 이용한 경로 재계획 기법이 지형과 움직이는 장애물을 회피하는 적절한 경로를 성공적으로 생성한 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문은 무인 항공기가 동적 환경에서 환경 변화에 실제 시간을 고려한 경로 재계획 기법에 대해서 다뤘다. 초기 경로는 많은 기존 연구들에서 채택한 RRT* 알고리즘을 이용하여 빠른 시간에 계획하였고, 경로의 최적성을 보장하기 위하여 가시선 개념에 착안한 LOSPO 기법을 이용하였다. LOSPO 기법은 기존 RRT 기반의 경로 최적화 알고리즘보다 저장공간과 연산 시간에 대해 효율적이며, 직관적으로 경로를 최적화하는 알고리

즘인 것을 확인하였다. 한편, 항공기는 동적 특성의 한계가 까다롭게 존재하기 때문에 계획된 경로를 안전하게 비행할 수 있는지 확인해 볼 필요가 있고, 할당된 임무에 따라 실제 시간에 대한 고려가 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 7차 spline 보간법을 이용한 궤적 변환 기법을 적용하였다. 해당 기법을 통하여 계획된 궤적에 비행시간과 방향각에 대한 정보를 부여할 수 있다. 또한 RRT*와 LOSPO를 이용하여 계획한 경로와 오차를 줄이기 위하여 경로점을 추가하여 보간법을 적용하는 방법에 대해서도 제안하였다.

본 연구에서 제안한 기법을 검증하기 위하여 본 논문에서는 실제 지형 데이터에 동적 장애물이 3개 존재하는 동적 환경을 구성하였다. 각 동적 장애물은 서로 다른 크기와 속력을 가졌으며, 본 연구에서 제안한 기법을 이용하여 계획된 경로를 침범하도록 이동 경로를 설정하였다. 구성된 환경에서 시뮬레이션을 수행한 결과, 경로 재계획은 0.1초마다 무인기의 위치와 장애물의 위치를 고려하여 수행되었으며 무인기는 장애물과 충돌 없이 목적지에 성공적으로 도착하였다.

본 연구의 후속 연구로는 다수의 무인기가 군집을 이루었을 때, 군집 무인기의 경로 재계획에 관해서 본 연구의 기법을 적용하는 것으로 설정하였다. 추가로 본 연구의 기법과 임무 계획 및 스케줄링 알고리즘과 결합하여 통합 시뮬레이션 환경을 구성하는 것으로 설정했다. 본 논문에서 다룬 기법과 후속 연구들은 도심 항공 교통과 군집 드론의 실시간 경로 재계획 기법 연구에 효과적으로 적용될 것으로 판단한다.

References

- [1] L. Gupta, R. Jain, & G. Vaszkun. "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), pp. 1123-1152, Nov. 2015
- [2] A. H. Qureshi, K. F. Iqbal, S. M. Qamar, F. Islam, Y. Ayaz, & N. Muhammad. "Potential guided directional-RRT* for accelerated motion planning in cluttered environments," In *2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 519-524, Aug. 2013
- [3] I. B. Jeong, S. J. Lee, & J. H. Kim. "Quick-RRT*: Triangular inequality-based implementation of RRT* with improved initial solution and convergence rate," *Expert Systems with Applications*, 123, pp. 82-90, Jun. 2019
- [4] K. Yang, S. Moon, S. Yoo, J. Kang, N. L. Doh, H. B. Kim, & S. Joo. "Spline-based RRT path planner for non-holonomic robots," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 73(1-4), pp. 763-782, Oct. 2014
- [5] S. M. LaValle. "Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning," 1998
- [6] S. Karaman & E. Frazzoli. "Sampling-based algorithms for

- optimal motion planning," *The International Journal of Robotics Research*, 30(7), pp. 846-894, Jun. 2011
- [7] F. Islam, J. Nasir, U. Malik, Y. Ayaz, & O. Hasan. "RRT*-smart: Rapid convergence implementation of RRT* towards optimal solution," In *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1651-1656, Aug. 2012
- [8] I. Noreen, A. Khan, & Z. Habib. "A comparison of RRT, RRT* and RRT*-smart path planning algorithms," *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, 16(10), pp. 20.2016.
- [9] J. W. Woo, J. Y. An, M. G. Cho, & C. J. Kim. "Integration of path planning, trajectory generation and trajectory tracking control for aircraft mission autonomy," *Aerospace Science and Technology*, 118, 107014, Nov. 2021
- [10] J. S. Gutmann, M. Fukuchi, & M. Fujita. "Real-time path planning for humanoid robot navigation," In *IJCAI* pp. 1232-1237, July. 2005
- [11] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *The International Journal of Robotics Research*, 5(1), pp. 90-98, Jan. 1986
- [12] M. N. Rastgoo, B. Nakisa, M. F. Nasrudin, & M. Z. Ahmad Nazri, "A critical evaluation of literature on robot path planning in dynamic environment," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 70(1), 177-185, Dec. 2014
- [13] K. Naderi, J. Rajamäki, & P. Hämäläinen, "RT-RRT*: a real-time path planning algorithm based on RRT," In *Proceedings of the 8th ACM SIGGRAPH Conference on Motion in Games*, pp. 113-118, Nov. 2015
- [14] M. Otte, E. Frazzoli, & X. RRT, "Real-time motion planning/replanning for environments with unpredictable obstacles," *Algorithmic Foundations of Robotics XI*, pp. 461-478, Jan. 2015.
- [15] Y. Kuwata, J. Teo, G. Fiore, S. Karaman, E. Frazzoli, & J. P. How, "Real-time motion planning with applications to autonomous urban driving," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(5), 1105-1118, Sep. 2009
- [16] H. Lee & H. J. Kim, "Trajectory tracking control of multirotors from modelling to experiments: A survey," *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15(1), 281-292, Dec. 2016
- [17] O. A. Jasim & S. M. Veres, "A robust controller for multi rotor UAVs," *Aerospace Science and Technology*, 105, 106010, Oct. 2020
- [18] E. Pereira, R. Bencatel, J. Correia, L. Félix, G. Gonçalves, J. Morgado, & J. Sousa, "Unmanned air vehicles for coastal and environmental research," *Journal of Coastal Research*, 1557-1561, Jan. 2009.
- [19] C. J. Kim, D. H. Lee, & S. W. Hur, "Efficient and robust inverse simulation techniques using pseudo-spectral integrator with applications to rotorcraft aggressive maneuver analyses," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 20, 768-780, Mar. 2019.



안 정 우 (Jung Woo An)

2021년 2월 : 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 (공학사)
2023년 2월 : 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 (공학석사)
2023년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 드론개발단 연구원
항공우주정보시스템공학과 공학석사
※관심분야: 실시간 임무/경로 계획, 모델링 & 시뮬레이션, 비행 제어 시스템



우 지 원 (Ji Won Woo)

2020년 2월 : 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 (공학사)
2022년 2월 : 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 (공학석사)
2021년 11월 ~ 현재 : LIG넥스원 드론개발단 연구원
항공우주정보시스템공학과 공학석사
※관심분야: 임무계획, 경로계획, 자율 비행 제어



김 현 섭 (Hyeon Seop Kim)

2014년 2월 : 명지대학교 전자공학과 (공학사)
2014년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 드론개발단 선임연구원
전자공학과 공학사
※관심분야: 촬영계획 자동 생성, 촬영 센서 임무통제, 임무영상 데이터 표준 프로토콜



박 상 윤 (Sang Yun Park)

2014년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
2014년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 드론개발단 선임연구원
전자공학과 공학사, 컴퓨터공학과 공학사
※관심분야: 임무 계획, 무인기 지상통제, 무인시스템 지상통제장치 아키텍처/인터페이스/프레임워크



남 경 래 (Gyeong Rae Nam)

2007년 8월 : 경희대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
2020년 2월 : 고려대학교 소프트웨어보안학과 (공학석사)
2007년 10월 ~ 현재 : LIG넥스원 드론개발단 수석연구원
소프트웨어보안학과 공학석사
※관심분야: 멀티모데인 무인이동체 통제, 동적 임무계획, 무인시스템 지상통제장치 아키텍처/인터페이스/프레임워크