

수동형 지상-공중 이중 모드 다개체 로봇시스템의 에너지 소모 가중치 기반 경로계획

Energy Consumption-weighted Path Planning for Passive Dual-mode Terrestrial-aerial Multi-robot Systems

박진영¹, 이성진², 이승목^{3,*}

(Jinyoung Park¹, Sung-Jin Lee², and Seung-Mok Lee^{3,*})

¹Department of Mobility Convergence Security, Soonchunhyang University

²Department of Smart Automobile, Soonchunhyang University

³Department of Future Mobility, Kookmin University

Abstract: This study proposes an energy-aware path planning algorithm for passive terrestrial-aerial dual-mode multi-robot systems that accounts for mode-dependent energy consumption. The proposed method employs a priority-based sequential planning and generates paths using energy consumed per unit distance in each mode. Energy consumption models derived from rotor angular speed are used to define a mode-specific cost function, enabling energy-efficient path generation. An aerial movement weight factor is also introduced to balance energy efficiency against mission completion time. The proposed method is evaluated in a ROS and Gazebo simulation environment with four robots across two scenarios: a cluttered environment and a narrow passage. Simulation results reveal that the proposed path planning method generates collision-free paths while reflecting the mode-specific energy consumption, and that tuning the aerial movement weight enables a trade-off between energy efficiency and mission duration.

Keywords: multi-robot, path planning, terrestrial-aerial robot, collision avoidance

1. 서론

지상-공중 이중 모드 로봇은 단일 모드 로봇의 운용 한계를 극복하여 에너지 효율성과 기동성을 동시에 확보할 수 있어 많은 연구가 이루어지고 있다[1-3]. 대표적인 형태는 쿼드콥터에 바퀴를 부착한 구조로 평탄한 지형에서는 지상 이동을 통해 에너지를 절약하고 장애물 극복이나 고속 이동이 필요한 경우에는 공중 모드로 전환하여 효율적인 운용이 가능하다. 지상-공중 이중 모드 로봇의 하드웨어는 구동 방식에 따라 능동형(Active)과 수동형(Passive)으로 구분할 수 있다. 능동형 방식은 바퀴에 구동을 위한 모터를 장착하여 지상 이동과 공중 이동을 독립적으로 수행하는 구조이다[4-6]. 반면 수동형 방식은 바퀴에 모터를 장착하지 않고 프로펠러의 추력만으로 지상과 공중 이동을 모두 수행하는 구조이다[7-9]. 대표적인 예로 쿼드콥터를 원통형 보호 케이지로 감싸고 이를 베어링을 통해 회전축에 연결하여 케이지 자체가 구르며 지상 주행할 수 있는 구조[7]와 쿼드콥터 본체에 축을 고정하고 축의 양단에 베어링을 통해 수동 바퀴를 부착하여 프로펠러의 추력으로 바퀴가 지면과 접촉하며 굴러가는 구조의 연구[8-9]가 제안되었다.

수동형 지상-공중 이중 모드 로봇은 지상에서 지면이 로봇 무게를 지지하기 때문에 에너지 효율적이지만 비홀로노믹 제약에 의해 기동성에 제한이 있고, 공중에서는 3차원 이동

이 자유로워 기동성이 뛰어나지만 로봇의 전체 중량을 프로펠러의 추력을 통해 극복해야 하기 때문에 에너지 소모량이 크다는 특성이 있다. 따라서 수동형 지상-공중 이중 모드 로봇을 효율적으로 운용하기 위해서는 지상 모드와 공중 모드의 특성을 고려하여 로봇의 에너지 소모를 최소화하고 추종 가능한 경로를 생성하는 경로계획 기술이 필수적이다.

단일 수동형 지상-공중 이중 모드 로봇을 대상으로 한 다양한 경로계획 연구[9-11]가 진행되어 왔다. 전역 경로를 생성한 후 미분평탄성 기반의 모션 프리미티브를 활용한 지역 경로 계획기를 통해 지상 및 공중 모드 모두에서 동역학적으로 실현 가능한 경로를 생성하는 계층적 하이브리드 방식이 제안되었다[9]. 또한 에너지 및 시간 제약을 고려한 수동형 지상-공중 이중 모드 로봇 모션 플래너를 통해 지상과 공중 하이브리드 궤적을 생성하는 연구[10]와 3D 맵에서 이동 유형에 따른 비용을 로봇의 실제 에너지 소모량으로 직접 모델링하고 이를 A* 알고리즘과 결합하여 총 에너지 소모가 최소가 되는 경로를 생성하는 연구[11]가 제안되었다.

수동형 지상-공중 이중 모드 로봇을 군집으로 운용하면 단일 로봇 시스템의 한계를 극복하여 더욱 효율적인 임무 수행이 가능하다. 단일 수동형 지상-공중 이중 모드 로봇을 대상으로 한 선행 연구[9-11]는 로봇의 특성을 고려하여 에너지 효율적이고 추종가능한 경로 생성에 기여하였으나 단일 로

* Corresponding Author

Manuscript received October 30, 2025; revised November 18, 2025; accepted November 18, 2025

박진영: 순천향대학교 모빌리티융합보안학과 대학원생(jdinyoung1@sch.ac.kr, ORCID[®] 0009-0005-6652-1559)

이성진: 순천향대학교 스마트자동차학과 조교수(sungjinlee@sch.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-3159-8394)

이승목: 국민대학교 미래모빌리티학과 조교수(seungmok@kookmin.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-2197-1116)

※ Following are results of a study on the "Convergence and Open Sharing System" Project, supported by the Ministry of Education and National Research Foundation of Korea.

봇은 배터리 소진이나 고장 시 임무가 중단되며 넓은 영역의 동시 탐색이나 다중 지점 감시 같은 복잡한 임무 수행에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 군집 로봇 시스템이 활용되고 있다[12-13]. 특히 수동형 지상-공중 이중 모드 로봇을 군집으로 확장할 경우 운용 환경에 따라 모드를 전환함으로써 단일 모드만 이동할 수 있는 로봇으로 이루어진 군집 로봇 시스템보다 더욱 효과적으로 활용할 수 있다. 이러한 군집 수동형 지상-공중 이중 모드 로봇의 효율적인 운용을 위해서는 운용 환경에 따라 로봇의 모드별 특성과 로봇간 충돌 회피를 고려한 경로계획 기술이 필요하다.

군집 지상-공중 이중모드 로봇의 경로계획 연구로는 능동형 로봇을 대상으로 우선순위 기반 SIPP (Safe Interval Path Planning)를 통해 로봇 간 충돌을 회피하고 ILP (Integer Linear Programming)를 적용하여 모드 전환 시점을 최적화하는 방법이 제안되었다[14]. 그러나 여전히 군집 지상-공중 이중모드 로봇을 대상으로 한 연구는 부족한 실정이고 대부분의 연구는 단일 로봇을 대상으로 진행되었다. 특히 군집 수동형 지상-공중 이중 모드 로봇을 대상으로 한 경로계획 연구는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 동일한 사양을 가진 다수의 수동형 지상-공중 이중 모드 로봇이 각자의 시작점에서 목표점까지 충돌 없이 이동하면서 로봇의 모드별 특성을 고려한 경로계획 방법을 제안한다. 첫 번째로 시뮬레이션을 통해 로봇이 지상 이동, 공중 이동, 지상 대기할 때의 로터 각속도를 측정하고, 로터의 각속도로부터 전력을 추정하기 위해 모델링한 수식을 적용하여 모드별 단위 에너지 소모량을 산출한다. 모드별 단위 에너지 소모량은 경로계획의 비용함수에 적용되어 지상 모드와 공중 모드의 에너지 소모량 차이를 고려한 에너지 효율적인 경로를 생성한다. 이는 로봇의 물리적 에너지 소모를 직접 반영하여 배터리 제약이 있는 실제 운용 환경에서 효과적이다. 두 번째로 우선순위 순차 경로계획을 통해 로봇 간 충돌 회피를 고려한 경로를 생성하고 경로 후처리를 통해 로봇이 추종 가능한 경로를 생성한다. 세 번째로 공중 이동 가중치를 도입하여 에너지 효율성과 임무 수행 시간 사이의 trade-off를 조절한다. 이는 가중치 조절을 통해 공중 경로 생성 비율을 조절함으로써 긴급 상황에서 임무 수행 시간을 단축하거나 배터리 제약이 있는 상황에서 에너지 소모를 최소화하는 등 운용 목적에 맞는 경로 생성이 가능하다. 제안하는 방법은 시뮬레이션 환경에서 가중치 설정에 따른 실험 결과를 분석하고, 임무 우선순위에 따른 가중치 설정 방안을 제시한다.

II. 수동형 지상-공중 이중 모드 다개체 로봇 경로계획

수동형 지상-공중 이중 모드 다개체 로봇의 충돌 회피를 고려한 경로 생성을 위해 사전에 정의된 우선순위에 따라 경로를 계획하는 우선순위 기반 순차 경로 계획을 적용한다. 모든 로봇은 경로를 생성할 때 정적 장애물 정보를 포함한 3D 맵을 공유한다. 단일 로봇의 경로는 경로계획 비용함수를 통해 로봇의 에너지 소모량을 반영하여 에너지 효율적인 초기 경로를 생성한다. 생성된 초기 경로는 로봇이 추종할 수

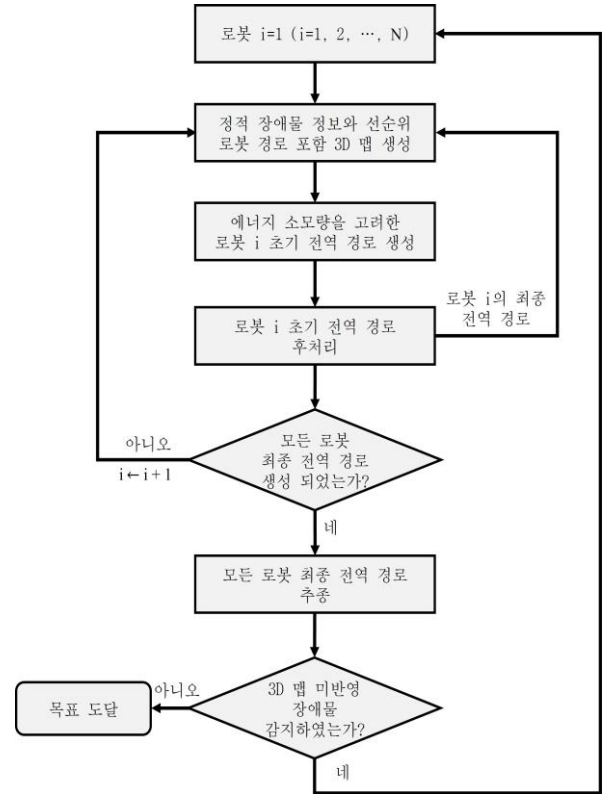


그림 1. 제안하는 방법의 전체 순서도.

Fig. 1. Overall flowchart of the proposed method.

있도록 경로상의 불필요한 중간 노드를 제거하는 후처리 과정을 통해 품질을 개선한 후 최종 경로로 생성되고 로봇의 안전반경만큼 확장하여 3D 맵의 노드에 위치와 해당 위치의 점유 시간을 저장한다. 후순위 로봇은 이 정보를 참조하여 경로를 탐색한다. 모든 로봇의 최종 경로가 생성되고 나면 로봇이 추종할 수 있는 지역 경로 단위로 샘플링하여 로봇 제어기에 전달 후 로봇 운용을 시작한다. 또한 사전에 3D 맵에 정의되지 않은 장애물 발견 상황을 가정하고 대응하기 위해 경로 재계획을 수행한다. 본 논문에서 제안하는 방법의 전체 구조는 그림 1에 표기되어 있으며, 각 과정에 대한 상세한 내용은 다음과 같다.

1. 에너지 소모량을 고려한 초기 전역 경로 생성

본 논문에서 수동형 지상-공중 이중 모드 로봇의 경로 생성은 사전에 정의해놓은 로봇의 우선순위에 따라 순차적으로 생성하며, 3차원 위치 (x, y, z) 와 시간 t 에 대해 탐색하는 경로계획 알고리즘과 로봇의 모드별 에너지 소모량을 반영할 수 있도록 설계한 비용함수를 통해 이루어진다. 노드 n 에 대한 경로계획의 비용 함수 $F_i(n)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$F_i(n) = G_i(n) + H_i(n) \quad (1)$$

식 (1)에서 $F_i(n)$ 은 전체 비용을 나타내며, $G_i(n)$ 은 시작 노드부터 현재 노드 n 까지의 누적 에너지 비용을 의미한다.

$H_i(n)$ 은 휴리스틱으로 현재 노드 n 에서 목표 노드 g 까지의 예상 에너지 비용이다.

$$G_i(n) = \sum_{k=0}^{n-1} E_i(x_k, x_{k+1}) \quad (2)$$

누적 에너지 비용 $G_i(n)$ 은 식 (2)와 같이 시작 노드부터 현재 노드까지의 모든 노드 간 비용 $E_i(x_k, x_{k+1})$ 의 총합을 의미한다. 본 논문에서의 노드 확장은 지상 이동, 공중 이동, 지상 대기과 같이 총 세 가지 유형의 확장이 가능하며, 각 에너지 비용은 다음과 같이 정의된다.

$$E_i(x_k \rightarrow x_{k+1}) = \begin{cases} e_{grad}d(x_k, x_{k+1}) \\ \lambda_{air}e_{air}d(x_k, x_{k+1}) \\ p_{wait}\tau(x_k, x_{k+1}) \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)에서 e_{grad} , e_{air} , p_{wait} 은 사전에 정의된 로봇의 모드별 단위 에너지 소모량을 의미한다. e_{grad} 는 로봇이 지상에서 1m를 이동할 때의 에너지 소모량, e_{air} 는 공중에서 1m를 이동할 때의 에너지 소모량을 의미한다. p_{wait} 은 지상에서 1초 대기할 때 소모되는 전력을 의미한다. $d(x_k, x_{k+1})$ 은 노드 x_k 에서 노드 x_{k+1} 의 거리를 의미한다. $\tau(x_k, x_{k+1})$ 은 노드 x_k 에서 노드 x_{k+1} 로 확장하는데 선순위 로봇에 의해 점유되어 필요한 대기 시간을 의미한다. λ_{air} 는 공중 이동 가중치로 e_{air} 의 값을 조절할 수 있는 무차원 매개변수이다. 지상-공중 이중 모드 로봇의 모드별 에너지 소모량을 비용함수에 그대로 반영할 경우 공중 이동할 때의 에너지 소모량이 지상 이동할 때의 에너지 소모량보다 훨씬 크기 때문에 지상으로의 경로만 편향 생성될 수 있다. 지상과 공중 이동이 가능한 로봇의 특성을 고려하여 공중 이동 가중치 λ_{air} 를 통해 e_{air} 의 비중을 조절하여 상황에 따라 공중 경로의 생성을 유도한다. 휴리스틱 함수 $H_i(n)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$H_i(n) = e_{grad}\sqrt{(x_g - x_n)^2 + (y_g - y_n)^2} + \lambda_{air}e_{air}|z_g - z_n| \quad (4)$$

A*와 같은 그래프 탐색 기반의 경로계획 알고리즘에서 최적성을 보장하기 위해 휴리스틱 비용은 항상 실제 비용보다 작거나 같은 값으로 admissible 해야 한다. 제한하는 휴리스틱은 식 (4)와 같이 이동 경로를 수평 이동 성분과 수직 이동 성분으로 분리하여, 각 성분에 대해 가장 에너지 소모가 낮은 이동 방식의 비용을 반영함으로써 이 조건을 만족시킨다.

로봇 i 가 현재 노드 n 에서 목표 노드 g 로 이동하는 경우는 네 가지의 경우로 구분할 수 있다. 첫 번째로는 지상에서 지상, 두 번째로는 지상에서 공중, 세 번째로 공중에서 지상, 마지막으로는 공중에서 공중으로 이동하는 경우이다. 수동형 지상-공중 이중 모드 로봇은 공중에서 이동할 때 로봇의 총 중량을 프로펠러의 추력으로 극복해야 하기 때문에 지상에서의 에너지 소모량보다 항상 크다. 따라서 수평 이동 거리에는 지상 단위 에너지 소모량을 수직 이동 거리에는 공중 단위 에너지 소모량을 곱하여 표현한다. 이를 통해 현재 위치부터 목표 위치까지 이동하는 네 가지의 모든 경우에 대해서 실제 소모 에너지를 과대 추정하지 않으면서 하한을 보장할 수 있다.

다음은 위의 비용함수에서 사용된 단위 에너지 소모량 산출 과정에 대해 설명한다. 본 논문에서 사용한 단위 에너지 소모량은 지상 이동, 공중 이동, 지상 대기에 대한 경우이다. 공중 대기는 지상에서 대기할 때에 비하여 에너지 소모량이

현저히 크기 때문에 공중에서 대기하여 충돌을 회피하는 경우는 배제하였다. 본 논문에서는 로봇 로터의 각속도로부터 Shaft Power 중심의 에너지 소모량을 산출하였다. RotorS의 모터 모델에서 단일 로터의 추력 T 와 항력 토크 Q 는 다음과 같이 표현된다[15].

$$T = k_T\omega^2, \quad Q = \kappa T \quad (5)$$

식 (5)에서 ω 는 로터의 각속도(rad/s)이고, κ 는 추력 대비 항력 토크의 비율을 나타내는 momentConstant이다. k_T 는 motorConstant로 각속도를 추력으로 변환하는 추력 성능 상수를 의미하며, T 는 추력을 의미한다. 단일 로터의 Shaft Power(P_i)는 토크와 각속도의 곱으로 정의되므로 식 (5)를 대입하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$P_{Total} = (\kappa \cdot k_T) \sum_{i=1}^4 |\omega_i(t)|^3 \quad (6)$$

식 (6)은 단일 로터의 Shaft Power를 로터 4개에 대해 합산하여 구하기 위함이고, 절댓값 표기는 로터의 회전 방향과 무관하게 모든 로터의 전력을 반영하기 위함이다. 로봇의 모드별 단위 에너지 소모량을 산출하기 위한 과정은 다음과 같이 표현한다.

$$e_{grad} = \frac{\int_0^{t_{grad}} P_{Total}(t) \cdot dt}{D_{grad}}, \quad e_{air} = \frac{\int_0^{t_{air}} P_{Total}(t) \cdot dt}{D_{air}},$$

$$p_{wait} = \frac{\int_0^{t_{wait}} P_{Total}(t) \cdot dt}{t_{wait}} \quad (7)$$

식 (7)에서 D_{grad} 는 지상 이동 실험에서 t_{grad} 시간 동안 로봇이 이동한 총 거리를, D_{air} 는 공중 이동 실험에서 t_{air} 시간 동안 이동한 총 거리를, t_{wait} 은 지상 대기 실험에서의 총 대기 시간을 의미한다. $\int_0^t P_{Total}(t) \cdot dt$ 는 식 (6)을 적용하여 0초부터 t 초까지의 순간 전력 P_{Total} 을 시간에 대해 적분하여 구한 총 에너지 소모량을 의미한다. 모드별 단위 에너지 소모량을 구하기 위한 실험은 독립적으로 수행되었다. 이와 같이 산출한 모드별 단위 에너지 소모량과 비용함수에 의해 생성된 로봇의 초기 전역 경로는 로봇의 모드별 특성을 반영하여 에너지 효율적인 경로 생성이 가능하다.

2. 초기 전역 경로 후처리

생성된 초기 전역 경로는 A*의 격자 기반 이산 확장 방식에 의해 경로상에 불필요한 중간 노드와 잦은 방향 전환을 포함하여 실제 최단 경로와는 차이가 존재한다[16]. 이러한 문제를 해결하기 위해 경로상의 두 점을 직선으로 연결했을 때 연결된 직선이 장애물과 충돌이 없을 경우 두 점 사이의 불필요한 중간 노드를 제거하는 후처리 방식[17]을 확장하여 적용한다.

각 로봇은 선순위 로봇의 경로를 동적장애물로 간주하여 순차적으로 경로 후처리를 수행한다. 경로 후처리를 적용할 후보 구간을 찾기 위해 현재 노드 P_a 부터 직선 연결 시 정적 장애물과 충돌하지 않는 가장 먼 노드 P_b 를 탐색한다. 이때 P_a 와 P_b 그리고 두 노드 사이의 모든 중간 노드는 모두 지상 또는 모두 공중으로 이루어진 노드이어야 한다. 이는 로봇의 모드별 에너지 소모량 기반으로 생성된 경로의 오차를 방지하기 위함이다. 후보 구간이 결정되면 P_a 에서 P_b 까지의 직선

경로를 일정 간격으로 샘플링한다. 이때 원래 노드 P_a 와 P_b 에서의 시간 정보 (t_a, t_b)를 유지한 채, 각 샘플 지점에 등속 운동을 가정하여 시간을 할당한다. 이렇게 생성된 각 샘플 지점에서의 위치, 시간 정보를 선순위 로봇에 의해 점유된 노드별 위치, 시간 정보와 비교하여 충돌 여부를 검사한다. 충돌이 발생하지 않을 경우, 원래 경로에서 P_a 와 P_b 사이에 존재하던 중간 노드들을 제거하고, 충돌이 검출되면 목표 노드를 한 단계 축소하여 재시도한다. 이 과정을 경로의 시작 점부터 종료점까지 순차적으로 적용한다. 이 방식은 원래 경로의 시간 정보를 보존하여 후속 경로에 영향을 주지 않으며, 불필요한 중간 노드만 제거하여 로봇이 추종 가능한 경로를 생성한다.

3. 장애물 대응 및 경로 재계획

로봇을 운용중 사전에 정의한 3D 맵에 반영되지 않은 정적 장애물을 발견했다는 상황을 가정하고 대응하기 위해서 다음과 같은 절차를 수행한다. 모든 로봇의 경로가 생성되면 추종 가능한 참조 경로 단위로 샘플링하여 제어 노드에 전달한다. 로봇을 운용중 장애물 발견 토픽을 전역 경로 생성 노드, 참조 경로 생성 노드, 로봇 제어 노드에 전달한다. 장애물 발견 토픽을 각 노드에서 전달받으면 그 시점에서의 위치에 로봇을 멈추고 각 로봇은 현재 위치를 새로운 시작점으로 설정한다. 그 이후 사전에 정의된 3D 맵에 새로운 장애물 정보를 반영하여 3D 맵을 다시 생성하고 갱신된 3D 맵 정보를 반영하여 로봇 우선순위에 따라 경로를 재계획한다.

III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하는 수동형 지상-공중 이중 모드 다개체 로봇 경로계획 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 통해 검증한다. 시뮬레이션은 Ubuntu 20.04 운영체제에서 Gazebo 3D 시뮬레이터를 사용하여 구축하였다. 로봇 제어 시스템은 PX4 SITL과 ROS Noetic 기반으로 구현하였으며, 두 시스템 간의 통신 인터페이스는 MAVROS 패키지를 활용하였다. 로봇의 지상, 공중 제어는 모두 MAVROS 토픽을 활용하여 제어하였다. 지상에서는 로봇의 추력과 기체 자세를 직접 계산하여 제어 명령을 생성하고 공중에서는 목표 Setpoint를 전달하면 PX4 펌웨어의 내부 Attitude Controller가 이를 기반으로 각 모터의 제어 신호를 생성하여 목표를 추종하는 방식을 사용하였다.

실험 환경은 OctoMap[18]을 활용하여 3D 복셀맵으로 구성하였으며, 정적 장애물 정보를 0.5 m 반경만큼 팽창하여 반영하였다. 해상도는 0.2 m로 설정하였다. 모든 실험은 20 m × 10 m × 5 m 크기의 3D 환경에서 수행되었으며, 4대의 동일한 사양을 가진 수동형 지상-공중 이중 모드 로봇을 대상으로 실험을 진행하였다. 사용 로봇 모델은 Wheelbird 로봇[19]을 사용하였다. 해당 로봇의 사양은 표 1과 같다.

시뮬레이션에서 모든 로봇은 동일 시각에 출발하도록 설정하였고 각 로봇이 경로를 생성할 때 0.55 m/s의 동일한 속도 정보를 반영하도록 하였다. 시뮬레이션 기반으로 산출된 로봇의 모드별 단위 에너지 소모량은 표 2와 같다. Gazebo 시뮬레이션 환경에서 RotorS 모터 모델을 기반으로 측정하였으며, 지상과 공중을 등속으로 이동하는 로봇의 Shaft Power를 측정하

표 1. 로봇 사양.

Table 1. Robot specifications.

구분	파라미터	
기본 정보	로봇 타입	수동형 이중 모드 로봇
	총 무게	1.13 kg
	쿼드콥터	Hummingbird[15]
로봇 구조	바퀴 반지름	0.22 m
	바퀴 개수	2개
	로터 개수	4개(X형 배치)
에너지	κ	$8.55 \times 10^{-6} (\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{rad}^2)$
산출 상수	k_T	0.016 m

표 2. 사용 모드별 단위 에너지 소모량.

Table 2. Energy consumption per mode.

파라미터	속도 (m/s)	값	단위
e_{air}	0.55	185	J/m
e_{grd}	0.55	55	J/m
p_{wait}	0	20	W

여 도출한 값이다. 지상 대기 단위 에너지 소모량은 로봇이 제자리에서 대기할 때 로봇의 시동을 유지하고 즉각적인 이동을 위해 필요한 최소한의 추력을 측정한 값이다.

제한된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 두 개의 대표적인 시나리오를 설계하였다. 그림 2는 Gazebo 시뮬레이션에서의 실험 환경을 Top view로 나타낸다. 그림 2에서 시나리오 1은 복합 장애물 환경으로 지상 장애물 구간과 공중으로 뛰어넘어야 할 벽으로 구성되어 있다. 이는 운용 환경에 따라 로봇의 모드별 에너지 소모량을 고려하여 효율적인 경로를 생성하는지 확인하기 위함이다. 지상 장애물은 1 m × 1 m × 1 m 크기의 정육면체 형태의 장애물 7개로 구성하였고 벽의 높이는 2.5 m로 설정하였다. 시나리오 2는 좁은 통로 환경으로 구성되어 있다. 이는 모든 로봇이 좁은 통로를 통과할 때 로봇간 충돌이 발생하지 않고 목표지점에 도달하는지 확인하고 가중치 설정에 따른 경로 생성 경향을 확인하기 위해 설계되었다. 통로의 폭은 1.5 m이다.

공중 이동 가중치 설정은 산출된 로봇의 모드별 단위 에너지 소모량을 변하게 하지 않는 기준값 1과 공중 이동 단위 에너지 소모량을 인위적으로 변하게 하여 지상 이동 단위 에너지 소모량과 비슷하게 만드는 0.3으로 설정한다. 이는 경로 계획 결과에서 가중치 설정에 따른 경로 생성 경향과 생성된 경로를 추종하였을 때의 결과로부터 시간과 에너지의 관계를 직관적으로 확인하기 위함이다.

성능 평가는 출발부터 도착까지의 총 소요 시간, 총 소모 에너지, 총 이동 거리, 평균 속도, 공중 경로 비율, 단위 거리당 에너지 소모량으로 총 6개의 지표를 통해 수행되었다. 모든 실험 결과는 로봇의 평균값으로 산출하였으며 공중 경로 비율(Air Ratio)은 전체 경로 길이 대비 공중 경로 길이의 비율로 정의하여 0부터 1사이의 무차원 값으로 표현하였다. 그림 3과 4는 시나리오 1에서 공중 이동 가중치 설정에 따른 생성된 경로 결과를 나타낸다. 그림 3과 4와 같은 경로계획 결과에서 동그라미와 별 모양의 도형은 빨간색, 주황색, 노란색,

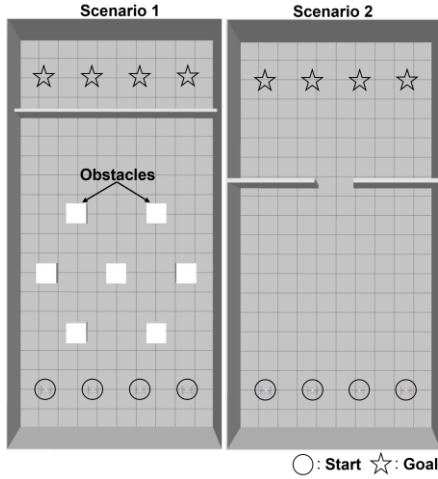


그림 2. 시뮬레이션 시나리오.

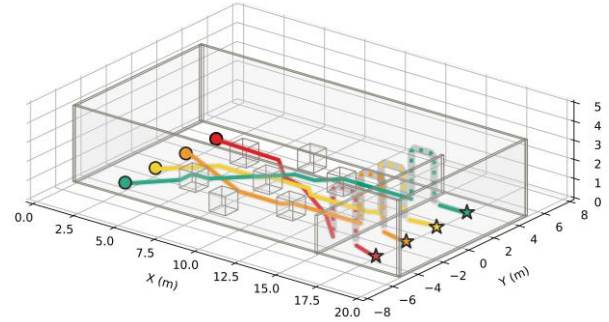
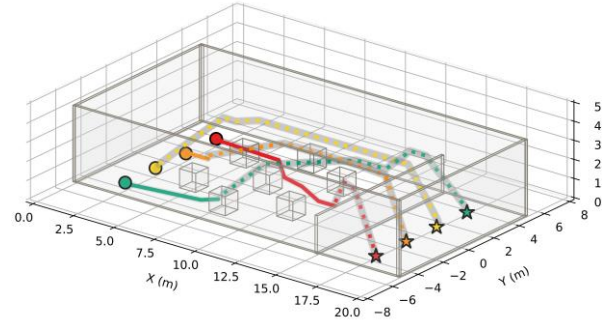
Fig. 2. Simulation scenarios.

초록색 순으로 로봇의 우선순위를 의미한다. 지상 경로는 실선, 공중 경로는 점선으로 표시하였다. 그림 3은 공중 이동 가중치를 1로 설정했을 때의 생성된 경로 결과이다. 산출된 로봇의 모드별 단위 에너지 소모량을 반영하여 경로를 생성하였기 때문에 목표점에 도달하기 위해 최소한의 공중 경로만 생성되었다. 지상 장애물이 존재하는 구간에서는 모든 로봇이 지상으로의 경로가 생성되었고, 벽을 뛰어넘기 위해서 공중 경로가 생성된 것을 확인할 수 있다. 이는 로봇의 모드별 특성에 따른 에너지 소모량을 반영하여 에너지 효율적인 경로를 생성하였음을 의미한다. 공중 이동 가중치를 0.3으로 설정하였을 때의 경로 결과는 그림 4와 같다. 그림 3보다 공중 경로의 생성 비율이 많이 늘어난 것을 볼 수 있다. 이는 단위 에너지 소모량이 지상 이동 단위 에너지 소모량과 비슷해져서 다른 로봇과의 충돌 회피를 고려한 경로를 탐색할 때 공중 경로 생성을 더욱 적극적으로 활용하기 때문이다.

시나리오 1에서 그림 3과 4와 같이 공중 이동 가중치 설정에 따라 생성된 경로를 추종했을 때의 결과를 표 3과 같이 정리하였다. 공중 이동 가중치를 1로 설정했을 때 목표까지 도달하는 데 더 오랜 시간을 기록하였지만 로봇의 에너지 소모량은 낮은 값을 기록하였고, 공중 이동 가중치가 0.3일 때는 시간은 크게 단축되었으나 에너지 소모량이 크게 증가한 것을 보여주었다.

시나리오 1에서 공중 이동 가중치를 1로 설정했을 때의 생성된 경로를 Gazebo 시뮬레이션에서 추종한 결과는 그림 5와 같다. 지상 장애물이 분포하는 병목 구간에서는 로봇간 충돌 회피를 위해 에너지 소모량이 가장 낮은 지상 대기를 통해 충돌을 회피하는 것을 확인하였다. $t=30$ 일 때 1번 로봇이 가장 먼저 공중으로 진입하였고, $t=36$ 일 때 모든 로봇이 공중으로 진입하여 벽을 뛰어 넘은 후 목표에 도달하는 것을 확인하였다.

시나리오 2에서 그림 6과 7은 공중 이동 가중치 설정에 따른 경로계획 결과를 보여준다. 공중 이동 가중치를 1로 설정했을 때의 결과는 그림 6과 같고, 공중 이동 가중치를 0.3으로 설정했을 때의 경로계획 결과는 그림 7과 같다. 그림 6과 같이 모든 로봇의 경로가 지상으로 생성된 이유는 비용이 저

그림 3. 시나리오 1의 경로계획 결과($\lambda_{air} = 1$).Fig. 3. Path planning results of Scenario 1 ($\lambda_{air} = 1$).그림 4. 시나리오 1의 경로계획 결과($\lambda_{air} = 0.3$).Fig. 4. Path planning results of Scenario 1 ($\lambda_{air} = 0.3$).

렴한 지상 이동과 지상 대기를 통해 로봇간 충돌을 회피하는 경로를 생성하는 것이 에너지 효율적이기 때문이다. 공중 이동 가중치를 0.3으로 설정했을 때의 경로계획 결과는 그림 7과 같다. 공중 이동 가중치를 통해 좁은 통로 같은 교착 상황에서 공중 경로 생성을 유도함으로써, 로봇 간 충돌을 회피하기 위하여 로봇 2대의 경로는 지상으로 다른 2대의 경로는 공중으로 생성된 것을 볼 수 있다.

시나리오 2에서 공중 이동 가중치 설정에 따른 경로를 추종했을 때의 결과는 표 4와 같이 정리하였다. 공중 이동 가중치를 0.3으로 설정했을 때 시간은 2.3초 정도 단축되었고 에너지 소모량은 1로 설정했을 때 현저히 낮은 값을 기록하였다.

시나리오 1과 시나리오 2와 같은 환경에서 시뮬레이션 기반으로 실험한 결과 모든 실험에서 공중 이동 가중치 설정에 따라 에너지 효율을 증시하는 경로와 시간 단축을 증시하는

표 3. 시나리오 1의 실험 결과

Table 3. Experimental results of scenario 1.

λ_{air}	1	0.3
Time[s]	46.18	38.61
Energy[J]	2368.56	3270.47
Distance[m]	24.74	20.64
Speed[m/s]	0.53	0.53
Air Ratio	0.26	0.72
Energy per meter[J/m]	95.73	158.45

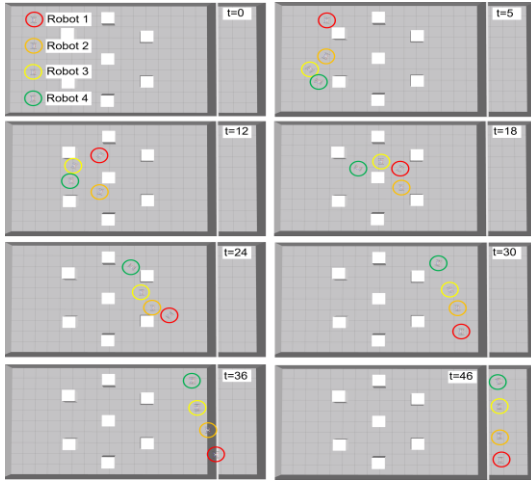


그림 5. 시나리오 1에서 생성된 경로를 Gazebo 시뮬레이션에서 추종한 결과($\lambda_{air} = 1$).

Fig. 5. Path tracking results of the generated paths in Gazebo Simulation for Scenario 1 ($\lambda_{air} = 1$).

표 4. 시나리오 2의 실험 결과.

Table 4. Experimental results of scenario 2.

λ_{air}	1	0.3
Time[s]	37.69	35.38
Energy[J]	856.79	1947.57
Distance[m]	17.4	17.86
Speed[m/s]	0.46	0.5
Air Ratio	0	0.38
Energy per meter[J/m]	49.24	109.04

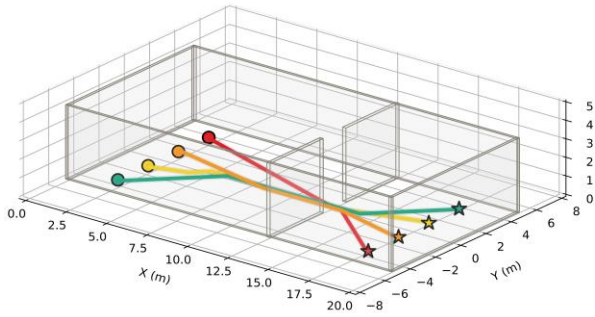


그림 6. 시나리오 2의 경로계획 결과($\lambda_{air} = 1$).

Fig. 6. Path planning results of Scenario 2 ($\lambda_{air} = 1$).

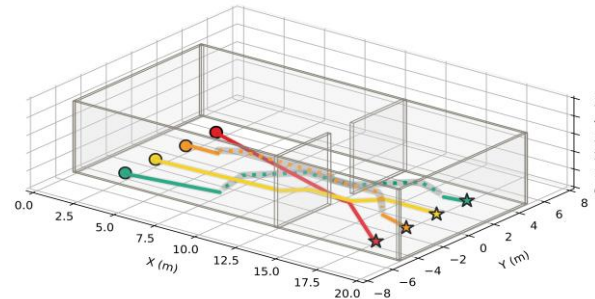


그림 7. 시나리오 2의 경로계획 결과($\lambda_{air} = 0.3$).

Fig. 7. Path planning results of Scenario 2 ($\lambda_{air} = 0.3$).

경로가 생성됨을 보여주었다. 만약 임무 우선순위가 목표까지 도달하는데 걸리는 시간 단축일 경우에는 시나리오 2보다 시나리오 1과 같은 비교적 지상에 장애물이 많은 환경에서 직선으로 생성된 공중 경로를 활용함으로써 더욱 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 시나리오 2와 같이 좁은 통로를 통과해야 하는 시나리오에서는 공중 이동 가중치 설정을 통해 공중 경로를 생성함으로써 교착 상태를 해소할 수 있음을 확인하였다. 또한, 실험을 통해 모든 로봇이 시작 지점부터 목표 지점까지 로봇간 충돌 없이 안전하게 도달하는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제안하는 방법은 공중 이동 가중치 설정을 통해 사용자가 원하는 임무 순위에 따라 경로 생성이 가능하다. 긴급한 상황에서는 신속한 임무 수행을, 배터리 제약 상황에서는 에너지 효율적인 운용을 임무 특성에 맞게 선택할 수 있다는 장점이 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 수동형 지상-공중 이중 모드 다개체 로봇 시스템의 에너지 소모 가중치 기반 경로계획 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 우선순위 기반 순차 경로계획을 적용하고 시뮬레이션으로 측정한 로봇의 모드별 에너지 소모량을 비용함수에 적용하여 로봇의 에너지 특성을 고려한 경로를 생성할 수 있도록 하였다. 또한 공중 이동 가중치 도입을 통해 에너지 효율성과 임무 수행 시간 사이의 trade-off를 전략적으로 조절할 수 있도록 설계하였다. ROS와 Gazebo 시뮬레이션 환경에서 4대의 로봇에 대해 두 가지 시나리오 실험을 수행한 결과 공중 이동 가중치 설정에 따라 에너지 효율적인 경로와 시간 단축을 위한 경로를 생성함과 모든 로봇이 충돌 없이 목표까지 도달하는 것을 확인하였다. 또한, 환경 특성에 따라 동일한 가중치가 서로 다른 효과를 나타내는 것을 보였다. 향후 연구에서는 제안한 알고리즘을 실제 하드웨어에 적용하여 현실 환경에서의 성능을 검증할 계획이다.

REFERENCES

- [1] J. P. Ramirez and S. Hamaza, "Multimodal locomotion: Next generation aerial-terrestrial mobile robotics," *Advanced Intelligent Systems*, vol. 7, no. 7, Art. No. 2300327, Dec. 2023.
- [2] J. Yang, Y. Zhu, L. Zhang, Y. Dong, and Y. Ding, "SytaB: A class of smooth-transition hybrid terrestrial/aerial bicopters," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 9199-9206, Oct. 2022.
- [3] H. Jia, S. Bai, R. Ding, J. Shu, Y. Deng, B. L. Khoo, and P. Chirattananon, "A quadrotor with a passively reconfigurable airframe for hybrid terrestrial locomotion," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 27, no. 6, pp. 4741-4751, Dec. 2022.
- [4] H. Xu, X. Zheng, Y. Wang, and L. Liao, "Flybot: A dual active wheel hybrid land-air robot with five-link leg joints," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 10, no. 2, pp. 1361-1368, Feb. 2025.
- [5] H. C. Choi, I. Wee, M. Corah, S. Sabet, T. Kim, T. Touna, D. H. Shim, and A. A. Agha-mohammadi, "BAXTER: Bi-modal aerial-terrestrial hybrid vehicle for long-endurance versatile

- mobility,” *Proc. of International Symposium on Experimental Robotics, Springer Proceedings in Advanced Robotics*, vol. 19, pp. 60-72, Mar. 2021.
- [6] A. Kalantari, T. Touma, L. Kim, R. Jitsho, K. Strickland, B. T. Lopez, and A. A. Agha-mohammadi, “Drivocopter: A concept hybrid aerial/ground vehicle for long-endurance mobility,” *Proc. of IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-10, 2020.
- [7] A. Kalantari and M. Spenko, “Design and experimental validation of HyTAQ, a hybrid terrestrial and aerial quadrotor,” *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4445-4450, 2013.
- [8] R. Zhang, Y. Wu, L. Zhang, C. Xu, and F. Gao, “Autonomous and adaptive navigation for terrestrial-aerial bimodal vehicles,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 3008-3015, Apr. 2022.
- [9] D. D. Fan, R. Thakker, T. Bartlett, M. Ben Miled, L. Kim, E. Theodorou, and A. A. Agha-mohammadi, “Autonomous hybrid ground/aerial mobility in unknown environments,” *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3070-3077, 2019.
- [10] Y. Gao, R. Zhang, T. Lai, Y. Cao, C. Xu, and F. Gao, “Autonomous exploration with terrestrial-aerial bimodal vehicles,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 10, no. 10, pp. 9987-9994, Oct. 2025.
- [11] A. Sharif, H. M. Lahiru, S. Herath, and H. Roth, “Energy-efficient path planning of hybrid fly-drive robot (HyFDR) using A* algorithm,” *Proc. of 15th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pp. 201-210, 2018.
- [12] Y. Song, H. Park, Y. You, M. Lee, and H. Oh, “Swarm mode design and hybrid flocking control algorithm for swarm operation of small fixed-wing UAVs,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 11, pp. 1277-1286, Nov. 2024.
- [13] K. Lee, S. Baek, P. Jung, T. H. Kim, and J. Jeon, “Cooperative multi-agent reinforcement learning for multiple anti-aircraft target surveillance,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 6, pp. 587-595, Jun. 2024.
- [14] B. Araki, J. Strang, S. Pohorecky, C. Qiu, T. Naegeli, and D. Rus, “Multi-robot path planning for a swarm of robots that can both fly and drive,” *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5575-5582, 2017.
- [15] F. Furrer, M. Burri, M. Achtelik, and R. Siegwart, “RotorS—A modular Gazebo MAV simulator framework,” *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference*, Springer, Cham, pp. 595-625, 2016.
- [16] K. Daniel, A. Nash, S. Koenig, and A. Felner, “Theta*: Any-angle path planning on grids,” *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 39, pp. 533-579, Oct. 2010.
- [17] R. Geraerts and M. H. Overmars, “Clearance based path optimization for motion planning,” *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2386-2392, 2004.
- [18] A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss, and W. Burgard, “OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees,” *Autonomous Robots*, vol. 34, no. 3, pp. 189-206, Feb. 2013.

- [19] M. Pimentel and M. Basiri, “A bimodal rolling-flying robot for micro level inspection of flat and inclined surfaces,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 5135-5142, Apr. 2022.



박진영

2024년 순천향대학교 스마트자동차학과 졸업. 2024년~현재 순천향대학교 대학원 석사 과정, 관심분야는 군집 로봇 시스템, 군집 UAV 시스템.



이성진

2011년 연세대학교 전기전자공학부 박사 졸업. 2025년~현재 순천향대학교 스마트자동차학과 조교수. 관심분야는 VLM, 자율주행 시스템, 5G/6G, V2X, AIoT, 의료/바이오 딥러닝.



이승목

2014년 한국과학기술원 건설및환경공학과 (로봇공학학제) 졸업. 2024년~현재 국민대학교 미래모빌리티학과 조교수. 관심분야는 로봇항법, SLAM, 군집로봇시스템, 군집 UAV시스템.