

低空复杂环境下的多无人机协同路径覆盖与任务分配研究

金泊宇 田佳豪 曹阳

2025 年 5 月 15 日

摘要

在灾害救援、军事侦察、应急物资投送等任务中，多无人机协同执行覆盖任务具有重要意义。本文围绕在低空复杂环境中，多无人机协同路径规划与任务分配的问题，建立数学模型并提出相应的分配与路径优化算法，结合贪心策略与协同控制机制，实现任务完成、避障、安全返航与充电策略的统一优化。最后，通过实例模拟验证模型有效性。

1 引言

随着无人机技术的快速发展，群体协同飞行被广泛应用于覆盖式侦察、物资投放等任务。在低空复杂环境中，存在动态障碍、通信限制与能源约束，增加了路径规划与任务调度的复杂度。本文重点研究如下问题：

- 路径优化：如何在最短总飞行距离或时间下完成目标点覆盖；
- 通信与安全：无人机间需保持通信与降落安全间距；
- 动态变化：任务过程中出现新的目标点或障碍；
- 能源管理：需考虑统一返航与充电机制。

2 问题描述与建模

2.1 任务基本约束

- 无人机最大飞行速度为 50 m/s，可瞬时转向。
- 最长续航时间不超过 600 s，需预留返航时间。

- 无人机间距不低于 50 m，通信范围不超过 1 km。
- 降落时无人机之间保持最小安全间隔（时间/空间）。
- 每个目标点需被至少一架无人机访问一次。

2.2 模型变量定义

设有 m 架无人机 U_1, \dots, U_m , n 个目标点 T_1, \dots, T_n , 目标点坐标为 (x_i, y_i) 。

- d_{ij} : 无人机 U_i 到目标点 T_j 的距离;
- C_i : 无人机 U_i 的剩余续航时间;
- a_{ij} : 若 U_i 执行 T_j , 则 $a_{ij} = 1$, 否则为 0;
- L : 任务总耗时或飞行总距离。

3 算法设计

3.1 长机-僚机协同机制

指定一架长机，采用贪心策略优先访问高优先级目标点，其他僚机在保持通信约束内，自主完成周边任务，并向长机靠拢。

3.2 任务分配与返航机制

每次任务分配时，考虑如下因素：

- 当前无人机是否具备完成任务的载重或悬停能力;
- 执行任务 + 返回起点是否在剩余续航时间内;
- 一旦任一无人机续航不足，全队集体返航并充电;
- 返回时降落延迟分布，保证最小间距。

3.3 避障策略

若某路径穿过障碍区域，则采用最短绕行策略（可拓展为 A*、RRT 等）；同时若僚机绕障碍导致脱离编队，全队等待其归位后继续。

4 模拟实验与结果

以如下无人机参数与任务集为例：

无人机	最大载重 (kg)	最大续航时间 (s)	侦察悬停时间 (s)
U1	15	500	30
U2	10	600	60
U3	20	450	20

任务示例包含 10 个目标点，涵盖紧急/普通物资投放与侦察任务，优先级从高到低排序。具体路径与任务完成情况如下图所示。

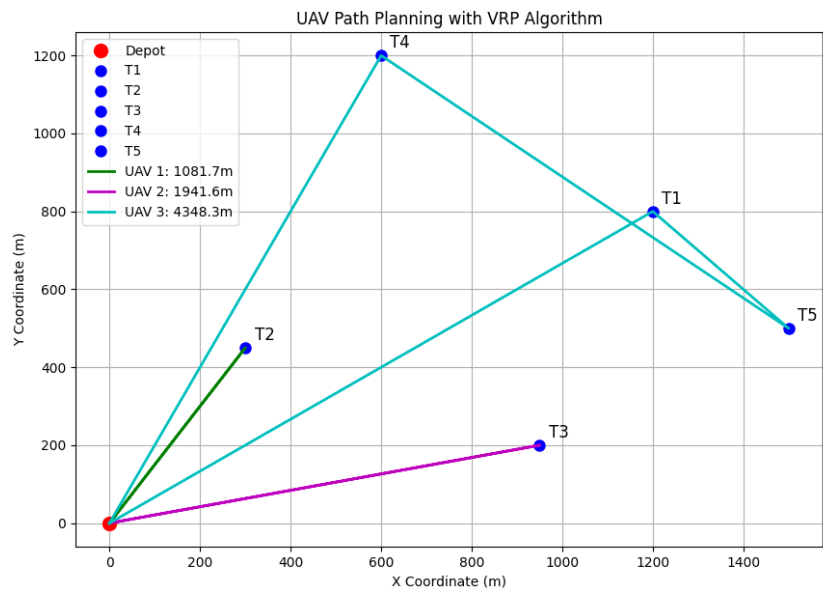


图 1: 无人机任务路径示意图

5 结论

本文建立了适用于低空复杂环境的多无人机路径与任务协同模型，引入长机-僚机机制与能源管理策略。通过统一返航、避障规避、任务优先级排序等手段，实现了协同高效执行多目标任务的路径优化，为实际部署提供理论参考。