

复杂山地环境下无人机群应急搜救策略研究

文汇闻,周少武[†],王 汐[†],张红强

(湖南科技大学 信息与电气工程学院,湖南 湘潭 411207)

摘 要:在复杂山地环境(坡度较大)下,利用无人机群对丢失的动态目标进行应急救援搜索,是一项非常具有挑战性和现实意义的任务。本文研究了一种基于置信区域的改进内螺旋覆盖算法(IISCA),该算法能够实现无人机全覆盖遍历并搜索到动态目标。算法以丢失目标的最后位置为基础,重点对该区域进行建模,并对地形坡度进行分析,无人机群将在坡度小于 37° 的区域展开搜索。引入置信区域的概念有助于固定搜索区域,避免无人机群进行重复搜索。仿真结果显示,相较于改进前的内螺旋覆盖算法,本文研究的算法在减少运行时间、提高搜索效率以及缩短搜索路径等方面表现更为优越。

关键词:无人机群;复杂山地环境;动态目标;应急救援搜索;置信区域;改进内螺旋覆盖算法(IISCA)

中图分类号:TP39

文献标识码:A

Research on Emergency Search and Rescue Strategy of UAV Group in Complex Mountain Environment

WEN Huiwen¹, ZHOU Shaowu[†], WANG Xi[†], ZHANG Hongqiang

(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411207, China)

Abstract: In complex mountainous terrain (with steep slopes), utilizing a swarm of drones for emergency rescue and search of lost dynamic targets is a highly challenging and practically significant task. In this paper, an improved internal spiral coverage algorithm(IISCA) based on confidence region is studied, which can achieve full coverage traversal of drones and search for dynamic target. Based on the last position of the lost target, the algorithm focuses on modeling the area and analyzing the slope of the terrain, and the swarm of drones will search in the area with a slope less than 37° . Introducing the concept of confidence region helps to fix the search area and avoid repeated searches by drones swarms. The simulation results show that compared with the improved internal spiral algorithm, the proposed algorithm is superior in reducing the running time, improving the search efficiency and shortening the search path.

Key words: swarm drones; complex mountain environment; dynamic target; emergency rescue search; confidence region; improved internal spiral coverage algorithm(IISCA)

近年来,无人机在军事领域和民用市场中均得到普遍应用。无人机搜索技术在侦察、监视、无人机武器、应急救援等军事领域以及电路巡检、农作物监察、天气分析^[1]、野生动物保护^[2]等民用领域得到广泛应用。无人机在目标搜索方面的独特优

势是其被广泛应用的主要因素。

四川甘孜州泸定县于 2022 年 9 月遭遇了一场 6.8 级的强烈地震。在这场灾难中,“泄洪英雄”甘宇与大部队走散,不幸失联。在 17 天后,甘宇才是一名当地村民发现。2023 年 5 月,3 名年轻人在贵

收稿日期:2024-03-20

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52104192);湖南省教育厅优秀青年项目(23B0459);国家自然科学基金项目(62271199);湖南省教育厅重点项目(23A0382)

作者简介:文汇闻(1999—),男,湖南湘潭人,硕士研究生,研究方向:群无人机目标搜索。

[†]通信联系人,E-mail: shaowuzhou@163.com; wangxi@hnust.edu.cn

州仙居县迷路被困山崖,相关部门派出无人机精确定位被困人员位置,并及时开展救援。这两起事件充分展示了无人机群在复杂山地环境下应急救援被困人群的优势,无人机也成了救灾行动中不可或缺的一部分。

在复杂山地环境下,无人机群应急搜救是一个高度专业化的操作,它利用多个无人机协同工作,以提高搜索效率和救援速度。这种方法适用于难以到达或人类无法直接进入的区域,例如山区、峡谷或受灾地区。无人机群的应急搜救可以视为在三维环境中对未知动态目标的搜索,该任务很复杂。鉴于此,近年来众多学者针对无人机在三维环境中飞行和动态目标的搜索两个难点进行研究,以推动无人机群应急搜救技术的发展。

吴雪利等提出一种基于混沌理论的人工势场算法^[3]来解决三维无人机路径规划问题,然而复杂地形使问题复杂化,这暴露了问题的第一个关键因素,即搜索环境的自身属性。为了解决周围地形不同的问题,提出了一种基于改进蚁群算法的优化算法^[4]用于三维航迹规划,在搜索过程中释放信息素避免陷入局部最优。但该搜索算法更适用于对静态目标的搜索,但对动态目标的搜索可能会使无人机陷入搜索盲区。张红强等提出的简化虚拟力模型的群机器人协同围捕^[5-8]更适用于二维环境下的搜索,在三维环境下并不适用。王睿等人将鸽群优化算法^[9,10]用于二维环境无人机搜索中,但对三维环境并不适用。这几种算法对无人机协作搜索的研究具有重要的理论和应用价值,但是依然存在一些问题需要深入研究,如蚁群算法存在搜索效率低、收敛速度慢等。此外,Manh Duong Phung 等人提出的一种运动编码粒子群算法^[11](MPSO)通过搜索轨迹编码来预测动态目标的运动轨迹,从而达到搜索运动目标的目的。然而,这些算法都不能保证找到动态目标,所以第二个关键因素是目标优先级。如果目的只是简单地搜索到静态目标或目标信息,上述算法已经足够。然而,如果必须检测到目标,则需要更详尽的搜索算法对该区域进行搜索。据我们所知,该种情况尚未得到充分研究。针对上述问题,Douglas Brown 等人提出了一种基于置信区域的渐进式螺旋出算法^[12,13],该算法建立起一个非侵入式的区域,保证在无人机搜索过的一定区间内目标不会进入,能确保一定找到目标。但该算法要求地势平坦,且搜索方式单一,效率不高。本文在该研究基础上针对复杂环境和动态目标两个难点提出一种基于置信区域的改进内螺旋覆盖

算法(Improved Internal Spiral Coverage Algorithm, IISCA),有效解决了在复杂山地环境下无人机群对动态目标搜索的困难任务,保证搜索准确性,提高搜索效率,避免陷入局部最优等问题。

1 问题分析与建模

问题的建模包括复杂山地环境建模、无人机群搜索建模和动态目标建模三个方面。环境建模的核心在于特征提取与处理,旨在为无人机提供环境信息,以便其有效处理复杂的地形和环境。无人机群的建模旨在量化传感器的覆盖范围和规划搜索路径,以便快速检测到目标并提供最优的搜索路径选择。动态目标建模则将目标视为连续移动的数据点,模拟目标在不同情况下的移动轨迹,以便评估搜索效率并优化应对极端情况的策略。

1.1 复杂山地环境建模

复杂山地环境建模将空间环境抽象为数学模型,为无人机在复杂山地环境中搜索动态目标提供了基础。相对于传统的二维环境,复杂山地环境的特点是坡度较大,这增加了对动态目标搜索的复杂性。本文使用 Matlab 生成了一个 3333m×3333m×833m 的复杂山地环境的点数据,即在横向面积为 3333m×3333m,高度为 833m 的三维环境中,山地高度差小于 833m(图 1)。该环境的山地坡度是连续变化的,具有悬崖、山谷等复杂地形特征。

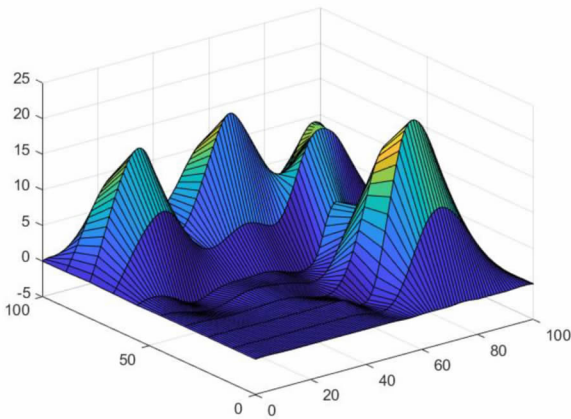


图 1 三维地势图

导出点数据后,使用 Arcgis 软件对该复杂山地环境的坡度进行分析,并绘制出该三维区域的坡度图(图 2)。对于坡度较大的区域,被认为动态目标不太可能进入,因此被视为障碍物区域(在图 2 中表示为黑色区域)。研究显示,人类在复杂环境中更倾向于选择平坦的地区前行(在图 2 中表示为

白色区域),一般不会前往坡度大于 37° 的地区。因此,本文设定两点间坡度差 37° 为标准,对坡度大于 37° 的地区认为动态目标不会进入,也被视为障碍物区域。



图 2 坡度图

采用栅格法对该坡度图进行进一步分析,根据地图构建法将平面区域划分为 100×100 个矩形单元(图 3),矩形单元的面积应与传感器的覆盖范围以及动态目标最大速度 V_T 和无人机搜索速度 V_U 相关。将位于 x 行 y 列上的矩形单元记为 (x, y) ,所有单元组成了无人机对环境的认知地图(cognitive map)。每个环境单元的状态可用一个集合来表示:

$$\Omega = \{K, Z, G, O\} \quad (1)$$

其中, K 表示可行单元集合, Z 表示障碍物单元集合, G 表示无人机搜索过的路径单元集合, O 表示置信单元集合。每个单元在无人机系统内的真实状态只能为 $\{K, Z, S\}$ 的一种, O 可以与其单元重复存在。

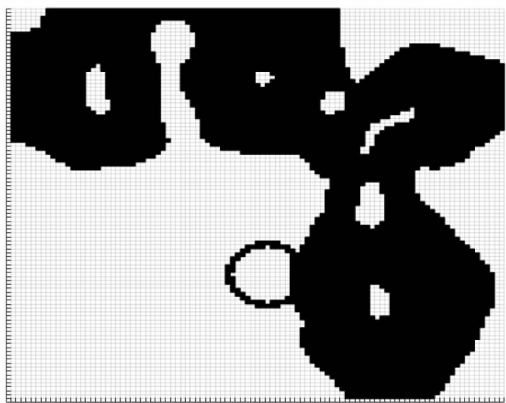


图 3 栅格图

假定已知目标丢失的最后位置为 (x, y) , 根据

公式(2)对该区域建立圆形闭环区域,该区域的半径为 R 。在重点区域中只需对地势较平坦的区域遍历覆盖搜索。

$$S = V_T \cdot t, R_0 = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \Rightarrow R_0 = \sqrt{\frac{V_T \cdot t}{\pi}} \quad (2)$$

其中 V_T 是假设已知目标的最高速度, t 是目标丢失后所经过的时间, S 表示动态目标自丢失后沿同一方向移动的最大距离。

无人机绕半径为 R_0 的圆形区域运动一圈的时间 t_0 为:

$$t_0 = \frac{2\pi R_0}{V_U} \quad (3)$$

要满足无人机在搜索时,动态目标无法逃出该区域,该区域的半径 R 应满足:

$$R = V_T \cdot (t + t_0) \quad (4)$$

将障碍物区域排出后,建立起一个动态目标无法逃出的重点区域(图 4)。

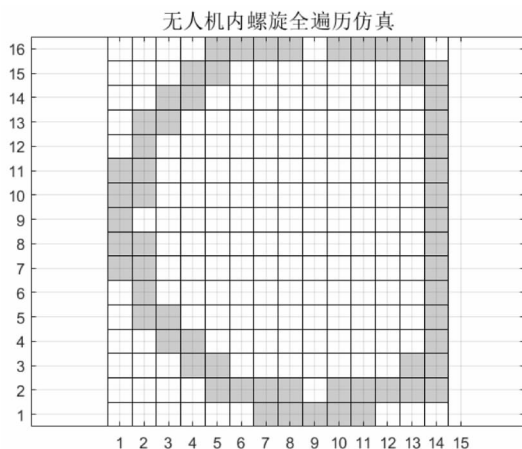


图 4 重点区域栅格图

1.2 无人机群搜索建模

将搜索过程在时间上进行离散化处理,即每个时刻无人机都会完成对当前传感器所覆盖单元的一次搜索并进行判定,随后移动到下一个单元。搜索过的单元记为 P_G ,在系统内判定下一步走向时将其视为不可行单元。在每个探测到的环境单元中,无人机会获取五种信息:可行单元(P_K)、障碍物单元(P_Z)、搜索过的路径单元(P_G)、置信单元(P_O)、目标所在单元(P_M)。无人机在搜索过程中携带认知地图,根据传感器实时探测信息更新当前时刻所处单元的上述五种信息,并基于这些信息来决定下一步的行动方向。

无人机表示为集合 $U = \{uav_i | i = 1, 2, \dots, n_u; 1 \leq n_u \leq x\}$, uav_i 表示无人机,根据重点区域面积的大小判定无人机数量。

1.3 动态目标建模

动态目标用 T 表示, t 时刻的位置用 $T(t)$ 表示, 速度为 $V_T(t)$, 方向 F_T 由公式(5)表示:

$$F_T = rand(0, 2\pi) \tag{5}$$

动态目标每移动一步, 就进行一次迭代。其移动方向是独立的, 以确保动态目标运动的随机性。移动后的点数据轨迹存储在集合 G 中。

t 时刻, uav_i 的位置分别为 $uav_i(t)$, 速度为 V_U , 传感器覆盖半径为 R_U 。无人机与目标的欧式距离 D 表示为:

$$D = \|uav_i(t) - T(t)\| \tag{6}$$

在任务环境内, 搜索目标的任务可以描述为: 考虑目标到达阈值 R_U , 若存在无人机与目标的距离 $D \leq R_u$ 时, 表示该目标已被搜索, 目标搜索任务完成。

经过 t 时间后, 目标的运动过程与无人机速度应满足:

$$V_T \cdot t \leq \frac{V_U \cdot n \cdot uav_i}{2\pi R} \tag{7}$$

其中 R 表示待搜索重点区域半径, n 表示派出的无人机数量, 由 R 决定。在已知两者速度的情况下, 该式表明运动目标始终无法逃脱无人机群的探测范围。

2 基于置信区域的改进内螺旋覆盖算法

2.1 内螺旋覆盖算法

内螺旋覆盖算法^[14]是由 Butler 等人提出的。该算法的覆盖流程如下: 无人机按照设定的初始方向沿顺时针或者逆时针方向运行, 当前方无障碍物时, 机器人直线行驶, 当遇到障碍物时, 机器人会顺时针或逆时针旋转 90° 后继续行驶, 如此循环, 直到完成整个区域的覆盖, 具体的覆盖路径图如图 5 所示。

但当前算法在遭遇障碍物时仅能执行 90° 的旋转动作, 这一局限性导致其容易陷入无法自行脱困的死区, 未能充分利用无人机在三维空间内的操作优势。

如图 6 所示, 围绕目标丢失位置点 (x, y) 建立动态目标可能移动的重点区域, 黑色部分表示障碍物区域。

当无人机按逆时针方向从下向上运行的内螺旋覆盖算法时, 即从节点 $(x, y-2)$ 开始遍历整个区域, 当运行到节点 $(x, y+2)$ 时, 会向下旋转 90° 再向左旋转 90° , 如此循环。然而, 当无人机运

行至节点 $(x-1, y-2)$ 时会陷入死区。

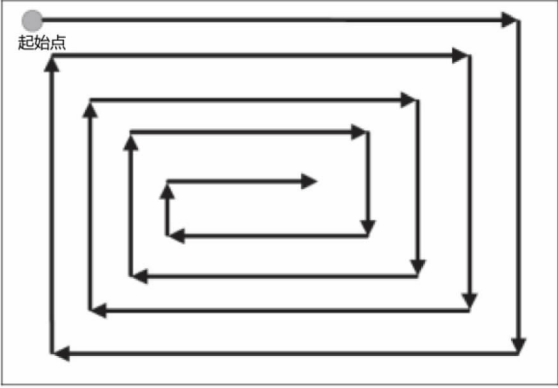


图 5 内螺旋覆盖算法示意图

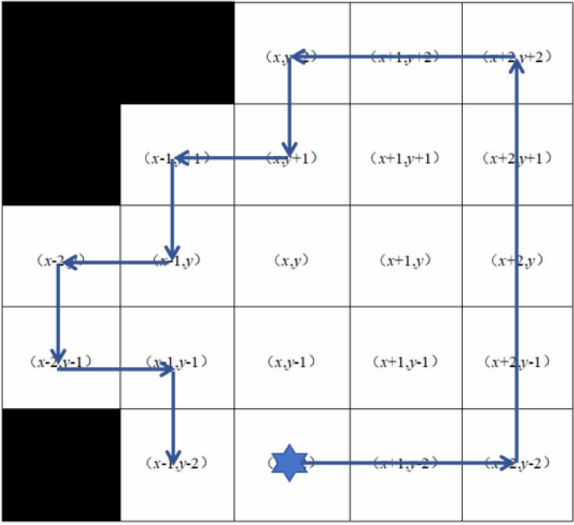


图 6 内螺旋覆盖算法搜索路径

2.2 置信区域

可以确定不存在目标的区域为置信区域^[12,13]。

示例飞行环境自上而下示例图。传感器直径 D_{fov} 、径向位置 $r_i(t)$ 和第 i 驾无人机的角距离 $\theta_i(t)$ 。置信面积和搜索区域中心的直径定义以图 7 表示。

在搜索重点区域时, 并没有关于目标的先验信息可供使用。将地形简化为栅格图后, 首先排除坡度较大的区域, 将坡度较缓和的区域视为平坦地区。在空中搜索时, 无人机无须担心与山体等障碍物碰撞。传感器的检测概率仅为 1 或 0, 置信区域是基于无人机飞行路径上传感器^[15,16]的累积建立的。一旦传感器不再覆盖特定区域, 置信区域会随着时间的推移而缩小, 这时移动目标可能进入先前搜索过的区域。置信区域的缩小可以通过竖直运动来表示, 其方向垂直于边界。

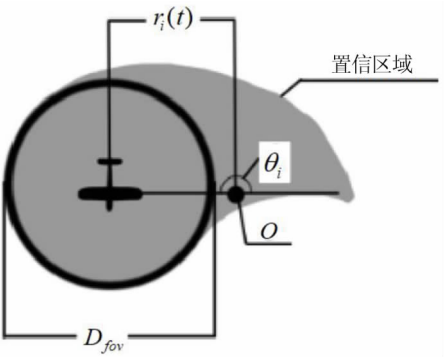


图 7 置信区域消减俯视图

如图 8 所示,无人机在时刻为 t_0 探测到目标信号,无人机的探测范围称为置信区域。在 $t_0 + \Delta t$ 时刻减少,减少的区域由公式(8)表示:

$$\Delta U = V_T \cdot \Delta t \tag{8}$$

其中, V_T 指的是运动目标的最大速度, Δt 是指首次观察置信区域后崩溃的时间,展示了置信区域随时间的演变。

考虑动态目标无法逃离无人机搜索,置信区域的消减应满足:

$$\Delta U \leq \frac{2}{3} D_{fov} \tag{9}$$

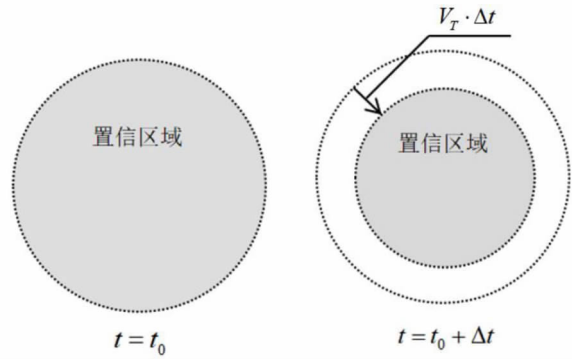


图 8 置信区域消减图

给定目标最大速度 V_T 、无人机的运行速度 V_U 和传感器的直径 D_{fov} ,目标是生成动态目标非侵入式的置信区域,这种方法的优势在于能 100% 搜索到移动目标。忽略传感器噪声和检测失败的概率。

根据公式(8),可以推导出置信区域的缩减速度仅与目标速度 V_T 及至下一次观测该区域的时间间隔有关。随着无人机按照内螺旋路径逐层向中心搜索,每一层之间的间距逐渐增加,这一现象表明无人机在接近搜索区域中心时,其搜索轨迹的间距变得更加宽敞。这种间距的调整是基于内螺旋搜索策略的一个重要特征,其背后的逻辑是:随着无人机向中心区域进发,已搜索区域的累积增加导

致未搜索区域相对减少,因此,为了优化搜索效率和覆盖面,适当增加轨道间距成为必要。该现象的数学表达式明确体现了轨道间距随内螺旋层数的增加而增大的规律,从而为无人机在复杂环境中执行高效搜索提供了理论依据,其表达式满足:

$$R(t + t_0) = \frac{V_U - 2\pi \cdot V_T}{V_U} \cdot R(t) \tag{10}$$

其中, $R(t)$ 表示 t 时刻无人机运动半径, $R(t + t_0)$ 表示经过 t_0 时刻后无人机运动半径。

2.3 改进的内螺旋覆盖算法

针对已有的内螺旋覆盖算法存在的问题,采用如下的搜索策略。采用内螺旋覆盖算法进行目标搜索时,无人机遍历整个栅格地图。坡度较大的区域被视为障碍物,而相对平坦的区域被视为待搜索区域,已覆盖的区域信息被记录在系统中。无人机会根据动态目标的位置决定是否遍历覆盖特定栅格。当无人机探测到目标时,停止遍历。当无人机接触障碍物栅格或已覆盖路径栅格时,会直接运行至斜方向 45° 栅格,避免陷入死区,并缩短搜索路径。

如图 9 所示,围绕目标丢失位置点 (x, y) 建立动态目标可能移动的重点区域,黑色部分表示障碍物区域。

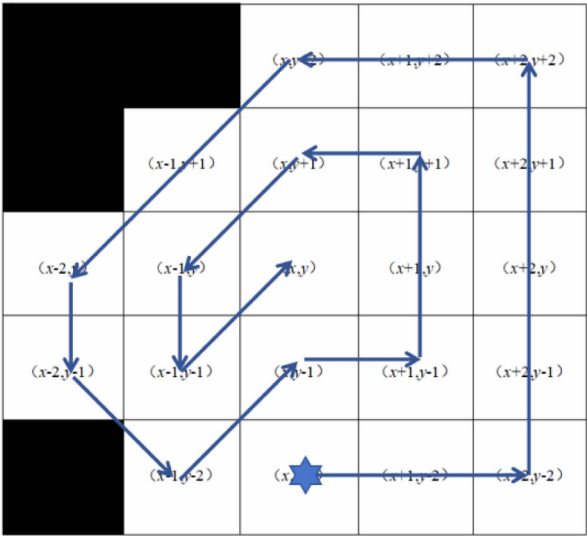


图 9 改进内螺旋覆盖算法搜索路径

当无人机按逆时针方向从下向上运行改进内螺旋覆盖算法时,即从节点 $(x, y - 2)$ 开始遍历整个区域,当运行到节点 $(x, y + 2)$ 时,会判断斜方向节点 $(x - 1, y + 1)$ 是否为可搜索路径,若是,则会直接旋转 45° 并搜索该点。此外,当运行至节点 $(x - 1, y - 2)$ 时也能脱困,直接运行至节点 $(x, y - 1)$ 。

2.4 IISCA 算法

在搜索救援场景中,假定人类的速度 V_T 为 1.5m/s,无人机的速度 V_U 为 20 m/s,无人机的探测直径 D_{fov} 为 100 m,每个栅格边长为 100/3 m。

定理 1:如果已知动态目标 T 的最后丢失位置、最大速度 V_T 、丢失时间 t ,以及无人机的最大速度 V_U 和探测直径 D_{fov} ,若单台无人机所能检测到的最大置信半径 r 满足: $r \leq \frac{100 \cdot V_U}{3\pi \cdot V_T}$,则在丢失目标的运动区域内采用 IISCA 算法一定能搜索到目标。

证:当无人机开始对区域遍历覆盖搜索时,无人机绕该圆形重点区域周长飞行的时间为 t_1 :

$$t_1 = \frac{2\pi r}{V_U} \tag{11}$$

动态目标移动两个栅格的时间为 t_2 :

$$t_2 = \frac{200}{3 \cdot V_T} \tag{12}$$

为确保能检测到动态目标,时间上应满足:

$$t_1 \leq t_2 \tag{13}$$

因此,单台无人机所能检测到的最大置信半径

$$r \leq \frac{100 \cdot V_U}{3\pi \cdot V_T} \tag{14}$$

证毕。

上述改进算法相比原算法具有更少的运行步数和更高的遍历搜索效率。即使当无人机陷入死区时也能及时自我脱困。算法的具体实现如下所示:

Step 1:围绕待搜索目标丢失的最后位置建立模型,根据目标速度 V_T 、丢失时间 t 以及无人机的运行速度 V_U 建立重点圆形区域,并计算最大置信半径 r 。

Step 2:判定重点圆形区域半径 R 与最大置信半径 r 间的关系,并派出相应数量的无人机进行搜索。

Step 3:群无人机运行 IISCA 算法对栅格图进行遍历覆盖搜索。

Step 4:判断是否达到最大迭代次数或者群无人机找到目标,若满足条件则停止运动。

根据已知数据,可以计算出置信区域的最大半径 r ,该值表示无人机在该区域内对动态目标进行搜索时,目标无法逃出的范围。如果待搜索区域的半径 R 小于或等于置信半径 r ,则可以直接派遣一架无人机对重点区域进行遍历覆盖搜索;如果待搜索区域的半径 R 大于置信半径 r ,则需要派遣多台无

人机同时对该地区进行搜索^[17-21]。具体流程如下:

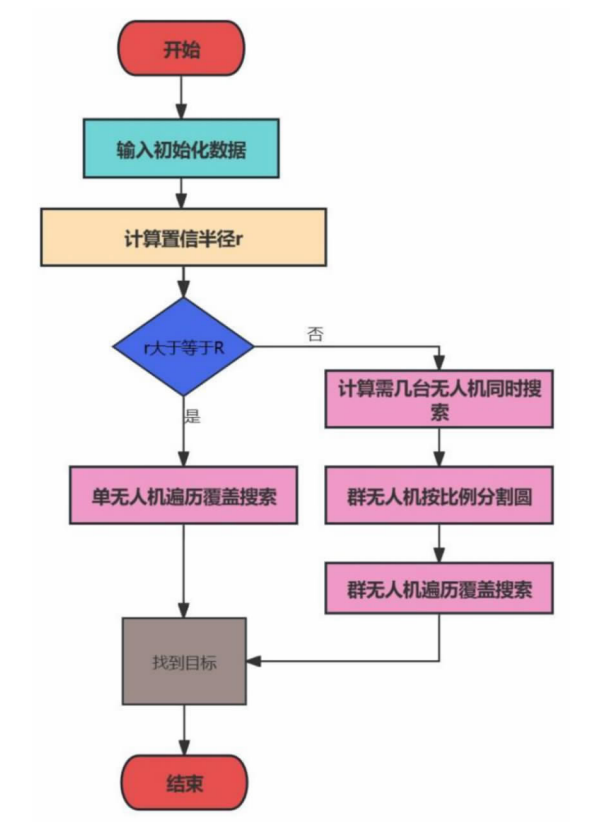


图 10 IISCA 算法流程图

3 仿真及分析

在仿真中,根据重点区域大小采用单驾无人机和两驾无人机,以测试 IISCA 算法与内螺旋覆盖算法、基线路径算法之间的比较。在每种情况下进行 100 次仿真,随机放置运动目标的初始位置,目标随机选择方向并以最大速度移动,目标被视为点质量,一旦检测到就会停止移动。

3.1 单无人机搜索仿真

在 Matlab 2023b 仿真环境下,将该移动目标的移动区域设为 14×16 的二维栅格地图,如图 4 所示,环境中的障碍物信息已知,无人机的起始位置是(2,9),考虑到目标的移动位置为圆形区域,将圆形边界设为障碍物。考虑目标沿同一方向一直运动时最难被检测到,因此优先仿真该情况。

表 1 实验参数

参数	数值	单位
V_U	20	m/s
V_T	1.5	m/s
D_{fov}	100	m

3.1.1 IISCA 算法仿真

仿真实验结果表明,如图 11 所示,证实了本研究提出的 IISCA 算法能有效遍历并覆盖搜索动态目标。实验中,动态目标在关键区域随机设定初始位置,并以最大速度沿直线方向移动。此极限条件下,无人机仍能成功定位动态目标,从而验证无论动态目标如何变换方向,动态目标的初始位置在哪里,无人机均能准确追踪并发现目标。

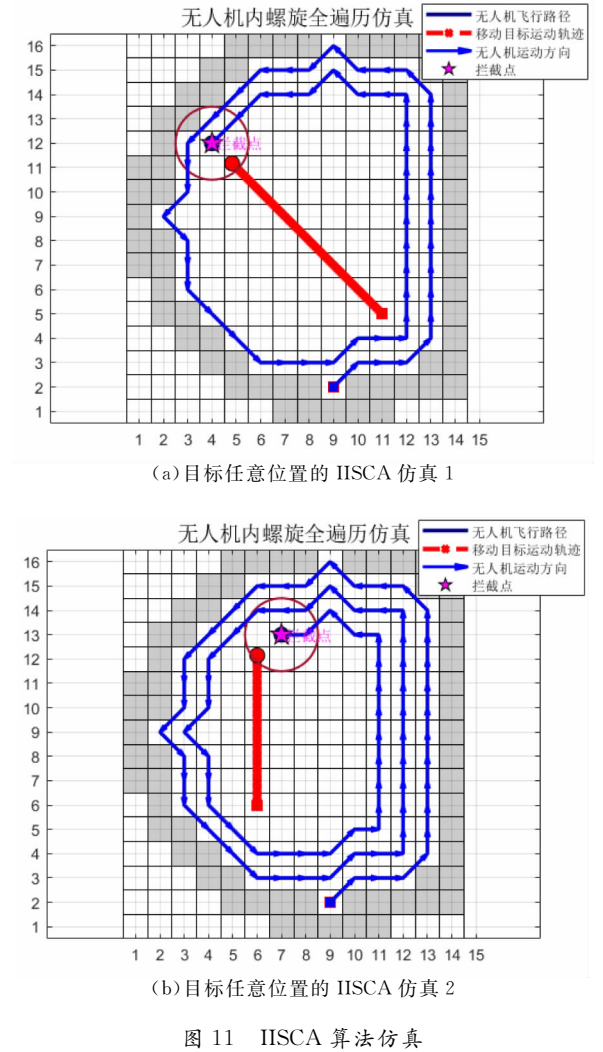


图 11 IISCA 算法仿真

3.1.2 内螺旋覆盖算法仿真

通过对比上述两种算法,可以发现原算法(图 12)容易陷入死区,无法自我脱困,因此运行时间更长,并未发挥无人机的三维优势;相比之下,改进算法(图 11)在无人机速度相同时,面对凸型障碍物的移动距离减少,因此遍历搜索时间更短。

3.1.3 基线光栅路径搜索仿真

分别使用基线光栅路径(图 13)和改进后的算法(图 11)对动态目标进行 100 次仿真。结果表明,改进后的算法能 100%地找到动态目标,而基线光栅路径并不能一定找到目标。

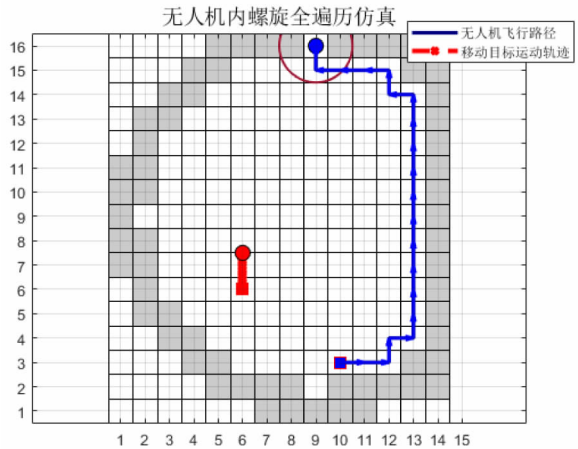


图 12 内螺旋覆盖算法仿真

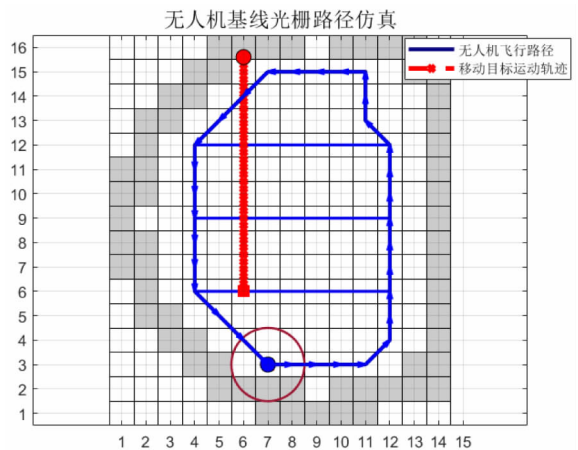


图 13 基线光栅路径搜索仿真

表 2 算法比较

算法	搜索到目标的几率
IISCA	100%
内螺旋覆盖算法	19.8%
基线光栅路径算法	42.7%

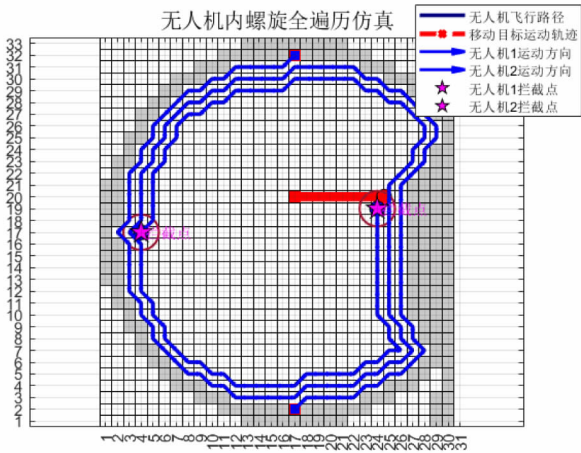
4.2 群无人机搜索仿真

在 Matlab 2023b 仿真环境下,当移动目标存在区域的半径 R 大于 r 时,采用 n 台无人机同时进行遍历覆盖搜索,仿真结果如下:

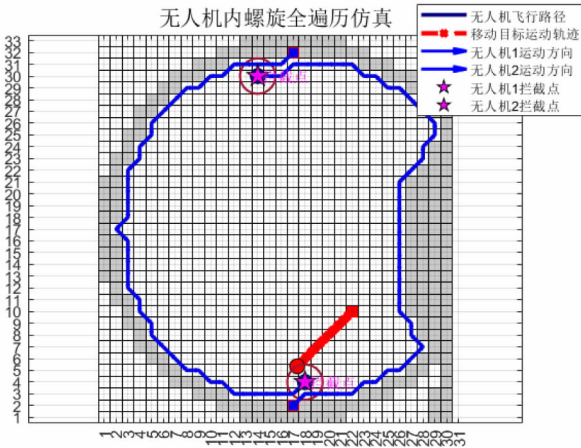
仿真实验结果表明,如图 14 所示,证实了本研究提出的 IISCA 算法同样适用于多无人机对动态目标的搜索。当存在区域较大的情况时,依据 R 与 r 的倍数 n ,派出相应数量的 n 台无人机,并将重点圆形区域周长划分为 n 等分,每台无人机相距:

$$\theta = \frac{2\pi R}{n}, n \geq 1$$

(17)



(a) 目标任意位置的 IISCA 仿真 1



(b) 目标任意位置的 IISCA 仿真

图 14 IISCA 仿真结果

4 结 论

将置信区域与内螺旋覆盖算法融合,改进了一种基于置信区域的内螺旋覆盖算法用于区域遍历覆盖搜索。通过无人机的使用,能以 100% 的检测率保证搜索到指定区域内的移动目标。根据动态目标的最大速度、无人机的最大速度以及覆盖范围,得出置信区域的最大半径,并通过严格的数学推理进行了证明。将丢失目标的移动区域与置信区域进行比较,使用无人机群对该区域进行了遍历覆盖搜索。结果表明,所改进的基于置信区域的内螺旋覆盖算法可以保证 100% 地搜索到该复杂地形内的动态目标。

参考文献

[1] NICKOL C, GUYNN M, OZOROSKI T. High altitude long endurance air vehicle analysis of alternatives and technology requirements development[J]. AIAA Paper, 2007, 1050(1).
[2] IV G P J, PEARLSTINE L G, PERCIVAL H F. An assessment of small unmanned aerial vehicles for wildlife research

[J]. Wildlife Society Bulletin, 2006. 34(3):750-758.
[3] ZHEN R, ZHEN S, WU X. An improved route planning algorithm for unmanned aerial vehicle based on artificial potential field[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(3):278-284.
[4] WEI J, WANG J J, WANG J, et al. 3D path planning based on improved ant colony algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(17):217-223.
[5] 张红强. 基于简化虚拟受力模型的群机器人自组织协同围捕研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
[6] 何昕杰, 周少武, 张红强, 等. 一种三维群无人机并行式多目标搜索协调控制策略[J]. 信息与控制, 2020, 49(5):605-614.
[7] 周少武, 张鑫, 张红强, 等. 基于简化虚拟受力模型的群机器人多目标搜索协调控制[J]. 机器人, 2016, 38(6):641-650.
[8] 王茂, 周少武, 张红强, 等. 未知环境下群机器人多目标搜索协同控制[J]. Control Theory & Applications/Kongzhi Lilun Yu Yinyong, 2022, 39(4):750-760.
[9] LUO D, SHAO J, XU Y, et al. Coevolution pigeon-inspired optimization with cooperation-competition mechanism for multi-UAV cooperative region search[J]. Applied Sciences, 2019, 9(5):827.
[10] WANG R, XIAO B S. Cooperative search for multi-UAVs via an improved pigeon-inspired optimization and Markov chain approach[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(10):1342-1350.
[11] ALANEZI M A, BOUCHEKARA H R E H, SHAHRIAR M S, et al. Motion-encoded electric charged particles optimization for moving target search using unmanned aerial vehicles[J]. Sensors, 2021, 21(19):6568.
[12] BROWN D, SUN L. Exhaustive mobile target search and non-intrusive reconnaissance using cooperative unmanned aerial vehicles[C]//2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems(ICUAS). IEEE, 2017:1425-1431.
[13] BROWN D, SUN L. Dynamic exhaustive mobile target search using unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6):3413-3423.
[14] BUTLER Z J, RIZZI A A, HOLLIS R L. Contact sensor-based coverage of rectilinear environments[C]//Proceedings of the 1999 IEEE international symposium on intelligent control intelligent systems and semiotics(Cat. No. 99CH37014). IEEE, 1999:266-271.
[15] QIN X T, SONG Z Y, HAO Y Y, et al. Joint resource allocation and trajectory optimization for multi-UAV-assisted multi-access mobile edge computing[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(7):1400-1404.
[16] 稽介曲, 朱琨, 易畅言, 等. 多无人机辅助移动边缘计算中的任务卸载和任务优化[J]. 物联网学报, 2021, 5(1):27-35.
[17] WANG X, TAN G Z, LIU X, et al. A molecular force-based deployment algorithm for flight coverage maximization of multi-rotor UAV. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 95:1063-1078.
[18] WANG X, TAN G Z, DAI Y, et al. An optimal guidance strategy for moving-target interception by a multirotor unmanned aerial vehicle swarm[J]. IEEE Access, 2020, 8:121650-121664.
[19] WANG X, TAN G Z, LU F L, et al. A molecular force field-based optimal deployment algorithm for UAV swarm coverage maximization in mobile wireless sensor network[J]. Processes, 2020, 8(3):369.
[20] 王巍, 彭力, 赵继军, 等. 基于旋翼无人机近地面空间应急物联网节点动态协同部署[J]. 自动化学报, 2021, 47(8):2002-2015.
[21] FANG X, WEN G H, FU J J, et al. Study on group confrontation of unmanned surface vessels based on game theory[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(3):492-497.