

分类号：
学号：20222108021

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学 硕士学位论文



基于协同调度的野外应急搜救覆盖路径规划 方法与应用

学位申请人	庄建滨
指导教师	赵庆展教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子
2025年06月

分类号：
学号：20222108021

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学 硕士学位论文



基于协同调度的野外应急搜救覆盖路径规划 方法与应用

学位申请人	庄建滨
指导教师	赵庆展教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子
2025年06月

**Collaborative scheduling-based coverage path planning method and
application for wilderness emergency search and rescue**

A Dissertation Submitted to
Shihezi University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Professional

By

Zhuang Jian-bin
(Electronic Information)

Dissertation Supervisor: Prof. Zhao Qing-zhan

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：



时间：2025年5月26日

使用授权声明

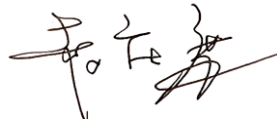
本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：



时间：2025年5月26日

导师签名：



时间：2025年5月26日

摘要

在野外发生遇险或失踪的人员，由于缺乏必要的自我保护意识和自救能力，通常只能等待相关管理部门实施救援。野外遇险人员搜救技术主要依赖“地毯式”人力搜索，但人力搜索容易受到主观判断、情绪和个人经验的影响，导致搜索不全面、重复覆盖等问题。对于大范围搜救任务，需要多个编组协同作业。然而多编组协同的覆盖路径规划是一个复杂的组合优化问题，在任务规模较大时，搜索空间将呈几何倍数增长。因此，合理的任务分配和路径规划是提升搜救效率以及全面性的关键。本文基于地形特征，构建野外环境地图模型作为数据基础。结合先验环境信息，对全覆盖路径规划方法展开研究，为应急搜救任务提供辅助支持。具体研究内容如下：

(1) 针对传统“地毯式”人力搜索存在搜索不全面、重复覆盖的问题，提出一种结合历史改进信息的自适应模拟退火算法（History-aware Adaptive Simulated Annealing, HASA）的单编组全覆盖路径规划方法。利用 Boustrophedon 分解法（Boustrophedon Cellular Decomposition, BCD）将覆盖问题转化为旅行商问题（Traveling Salesman Problem, TSP），结合历史改进信息动态调整温度参数，提升算法的全局搜索能力与收敛速度，并通过路径平滑策略优化子区域间的路径衔接。该方法在三种地形地图中覆盖重复率在 3.3% 以下，相比于遗传算法（Genetic Algorithm, GA）和基于贪心搜索的自适应模拟退火算法（Adaptive simulated annealing algorithm with greedy search, ASA-GS）运行时间缩短 55.5%~77.1%。该方法能够有效降低路径重复率与运行时间，在保证覆盖精度的同时提升整体规划效率。

(2) 针对任务规模扩大、环境复杂度提升时，单编组覆盖路径规划效率受限的问题，提出一种基于初始位置划分（Divide Areas based on Robots Initial Positions, DARP）的多编组协同覆盖路径规划方法。该方法根据编组初始位置划分任务区域，并引入奖惩机制以增强子区域的连通性，提升区域划分的合理性。在路径生成阶段，结合生成树（Spanning Tree Coverage, STC）算法构建生成树，通过环绕生成树生成路径点，构建连续的覆盖路径。该方法针对不同地形条件、编组数量、障碍物密度及环境规模等因素进行了性能分析。结果表明，编组数量在合理范围内有助于提高路径规划效率，但过多编组将导致计算负担上升，优化效果趋于饱和。同时，环境规模与障碍物密度与算法运行时间呈现线性相关趋势。为实际应用中的编组数量配置与任务组织方案提供了重要参考。

(3) 构建基于协同调度的应急搜救系统。系统采用 C/S 架构，通过应用界面与数据后台的结合，实现高效指引与动态交互。应用界面基于 Android Studio 与 ArcGIS Runtime SDK，构建了底图加载、多功能标绘、全覆盖路径规划和导航指引四大模块。后台基于 Python 与 Django 框架，利用视图函数和 WebSocket 实现路径规划计算与数据交互，通过集成全覆盖路径规划算法，兼顾不同任务需求，为应急搜救任务提供高效的解决方案。

关键词：全覆盖路径规划；多编组协同；路径规划；区域划分；旅行商问题

Abstract

Persons in distress or missing in the wilderness, lacking the necessary awareness of self-protection and the ability to save themselves, usually have to wait for the relevant management authorities to carry out rescue. Search and rescue techniques for people in distress in the wilderness mainly rely on "carpet-type" human searches, but human searches are susceptible to subjective judgments, emotions and personal experience, leading to incomplete searches, duplicate coverage and other problems. For large-scale search and rescue missions, it is necessary for multiple organizations to work together. However, the coverage path planning of multi-group coordination is a complex combinatorial optimization problem, and the search space will increase geometrically when the mission scale is large. Therefore, reasonable task allocation and path planning is the key to improve the efficiency and comprehensiveness of SAR. In this thesis, based on the terrain feature data, the field environment map model is constructed as the data base. Combined with the a priori environmental information, the full-coverage path planning method is studied to provide auxiliary support for emergency SAR missions. The specific research contents are as follows:

(1) Aiming at the problems of incomplete search and repeated coverage in traditional "carpet-style" human search, a single-group full coverage path planning method based on History-aware Adaptive Simulated Annealing (HASA) combined with historical improvement information is proposed. The coverage problem is transformed into the Traveling Salesman Problem (TSP) by using the Boustrophedon Cellular Decomposition (BCD) method. The temperature parameter is dynamically adjusted in combination with historical improvement information to improve the global search ability and convergence speed of the algorithm, and the path connection between sub-areas is optimized through the path smoothing strategy. The coverage repetition rate of this method is less than 3.3% in three terrain maps, and the running time is shortened by 55.5% to 77.1% compared with the Genetic Algorithm (GA) and the Adaptive simulated annealing algorithm with greedy search (ASA-GS). This method can effectively reduce the path repetition rate and running time, and improve the overall planning efficiency while ensuring the coverage accuracy.

(2) Aiming at the problem that the efficiency of single-group coverage path planning is limited when the task scale is expanded and the environment complexity is increased, a multi-group collaborative coverage path planning method based on the Divide Areas based on Robots Initial Positions (DARP) is proposed. This method divides the task area according to the initial position of the group, and introduces a reward and punishment mechanism to enhance the connectivity of the sub-area and improve the rationality of the area division. In the path generation stage, the spanning tree (Spanning Tree Coverage, STC) algorithm is combined to construct a spanning tree, and the path points are generated by circling the spanning tree to construct a continuous coverage path. The performance of this method is analyzed for different terrain

conditions, group numbers, obstacle density and environment scale. The results show that the number of groups within a reasonable range is helpful to improve the efficiency of path planning, but too many groups will lead to an increase in the computational burden and the optimization effect tends to saturation; at the same time, the environment scale and obstacle density show a linear correlation trend with the algorithm running time. It provides an important reference for the configuration of the number of groups and task organization schemes in practical applications.

(3) Construct emergency search and rescue system based on cooperative scheduling. The system adopts C/S architecture to realize efficient guidance and dynamic interaction through the combination of application interface and data background. The application interface is based on Android Studio and ArcGIS Runtime SDK, and four modules are constructed: base map loading, multifunctional mapping, full-coverage path planning and navigation guidance. The backend is based on Python and Django framework, utilizing view functions and WebSocket to realize path planning calculation and data interaction, and integrating full-coverage path planning algorithms to take into account the needs of different tasks, so as to provide efficient solutions for emergency search and rescue missions.

Key words: Coverage path planning; multicomponent coordination; Regional division; Traveler's problem

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 可通行性地图构建研究现状.....	2
1.2.2 全覆盖路径规划方法研究现状.....	3
1.2.3 协同覆盖路径规划方法研究现状.....	5
1.3 论文研究目的与内容.....	7
1.3.1 研究目的.....	7
1.3.2 研究内容.....	7
1.4 技术路线.....	8
1.5 论文组织结构.....	9
第 2 章 结合地形特征的野外环境可通行性地图构建.....	10
2.1 示范区概况.....	10
2.2 数据获取与预处理.....	11
2.2.1 无人机可见光影像数据获取.....	11
2.2.2 无人机影像预处理.....	12
2.3 野外环境可通行性地图构建.....	13
2.3.1 数字高程模型.....	14
2.3.2 数字高程模型数据结构.....	14
2.3.3 坡度、坡向、起伏度计算.....	15
2.3.4 可通行地图构建.....	17
2.4 本章小结.....	18
第 3 章 基于 HASA 算法的单编组全覆盖路径规划.....	19
3.1 区域划分.....	19
3.1.1 障碍物规则化.....	19
3.1.2 BCD 单元分解法.....	21
3.2 基于 HASA 算法的区域遍历顺序规划.....	23
3.2.1 新解产生机制.....	23

3.2.2 自适应温度更新机制	24
3.2.3 Metropolis 准则的优化	25
3.2.4 实验对比分析	26
3.3 子区域的衔接路径规划	30
3.3.1 子区域覆盖起始位置	31
3.3.2 Bresenham 算法	31
3.3.3 Bresenham 算法与 Theta*算法的结合应用	32
3.4 实验结果分析	34
3.4.1 实验设置及评价指标	34
3.4.2 实验结果分析	35
3.5 本章小结	38
第 4 章 基于 DARP 方法的多编组协同覆盖路径规划	39
4.1 多编组协同覆盖问题优化	39
4.1.1 问题描述	39
4.1.2 问题优化	40
4.2 基于 DARP 方法的区域划分	41
4.2.1 分配策略	41
4.2.2 建立子区域的连通性	42
4.2.3 区域划分结果及分析	43
4.3 子区域覆盖路径规划	45
4.3.1 生成树	45
4.3.2 路径生成	47
4.4 实验结果分析	49
4.4.1 不同地形下覆盖路径规划结果	49
4.4.2 算法性能的影响因素分析	50
4.5 本章小结	53
第 5 章 基于协同调度的应急搜救系统的设计与实现	54
5.1 需求分析	54
5.2 系统总体架构设计	55
5.3 功能模块设计	56
5.4 系统部署	57
5.4.1 硬件与软件环境配置	57
5.4.2 任务请求处理	58
5.5 系统功能测试	59

5.5.1 地图加载模块测试	59
5.5.2 多功能标绘模块测试	59
5.5.3 覆盖路径规划模块测试	61
5.5.4 导航指引模块测试	63
5.6 本章小结	64
第 6 章 结论与展望	66
6.1 结论	66
6.2 展望	66
参考文献	68
致谢	74
作者简介	75

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

发生人员遇险或失踪，遇险人员往往会陷入复杂的野外环境，大多数人没有经过专业的野外知识培训，缺乏必要的自我保护意识和自我营救能力^[1]，只能等待相关管理部门的营救。并且在应急情况下，救援资源可能受限，如人员、设备通信等^[2]，现有的野外遇险人员搜救技术多以“地毯式”人力搜索^{[3],[4]}为主。虽然传统的“地毯式”人力搜索有一定的优点，但是也存在着一些缺陷和局限性^[5]。首先，人力搜索效率受到人员数量、搜索区域的复杂性以及搜索范围等因素的影响，导致搜索效率低下。其次，传统“地毯式”人力搜索容易受到主观判断、情绪和个人经验的影响，可能导致搜索不全面，覆盖率低等情况^[6]。并且在多个搜索团队之间进行信息共享和协调存在困难，导致重复搜索区域等问题。区别于城市等结构化环境，野外环境具有地形起伏大、物理特性多样、地面结构复杂等特点，难以实现高精度地图建模。当前在野外等非结构化环境中的覆盖路径规划研究相对较少。已有研究多以增加障碍物数量来模拟环境复杂性，而对地形起伏等地貌特征的考虑不充分^[7]。因此，在复杂的野外环境中，搜救难度大，遇险人员生还率低，救援效果不明显。

如今随着遥感技术的发展，可以通过卫星成像或无人机成像的方式获得人员遇险地区的高分辨率遥感影像或点云数据，并从中提取数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）^[8]。利用 DEM 数据的高程计算坡度坡向等信息，能够帮助搜救团队分析人员遇险地区的地形崎岖程度。

全覆盖路径规划^{[9],[10]}首先将搜索区域智能分割成多个子区域，然后可以根据高程信息建立详细的区域模型，考虑地形起伏以及潜在目标区域。通过将这些区域信息融入算法，全覆盖规划能够智能地优化搜索路径，从而最大限度地提高搜索效率和覆盖率。在搜索路径规划阶段，全覆盖规划算法能够综合考虑多个因素，例如每个子区域的复杂程度、难以到达的地点、可能的障碍物等。这样的综合分析有助于规划出最优路径，确保搜救团队能够高效地覆盖每个子区域，尽可能地减少重复搜索和遗漏。此外，全覆盖路径规划在资源优化方面也发挥着关键作用。可以设计基于协同调度的应急搜救系统，合理的进行任务分配，协调多搜救编组间的资源，确保每个子区域都能得到适当的覆盖，通过与资源分配算法结合，全覆盖路径规划算法能够在保证全面性的前提下，最大程度地节省资源成本。综合而言，全覆盖路径规划算法是一种强大的工具，能够优化传统“地毯式”人力搜索的每个环节。通过精确的区域划分、智能

的搜索路径规划以及综合资源管理，它能够在提高搜索效率的同时，增强搜索的准确性和全面性，为应急搜救任务带来了新的可能性和活力。

1.2 国内外研究现状

近年来，我国自然灾害、突发事件频发。许多遇险人员被困在荒漠、山林、高原等野外事故时有发生。随着无人机遥感技术的提升和高速发展，能够通过无人机获取目标区域的遥感影像，对地形进行建模，利用全覆盖路径规划算法可以有效的为救援人员提供技术支持。本文从以下三个方面对现有的国内外研究现状进行总结：（1）野外环境地图模型构建研究现状；（2）全覆盖路径规划方法研究现状；（3）协同覆盖路径规划方法研究现状。

1.2.1 可通行性地图构建研究现状

全覆盖路径规划中会使用到的地图主要分为三种^[11]：栅格地图、几何特征图以及拓扑地图。其中栅格地图是全覆盖路径规划问题中最常见的一种地图。1985年由Moravec和Elfes首次提出地图栅格化^[12]，首先通过传感器等手段获取到环境信息的原始数据，然后将其离散化为一个个格点信息，由此转化为一个栅格地图，其中每一个格点都带有特定的信息用来表示这块区域是自由区域还是障碍区域，可以用二进制数字或者概率值来表示。地图栅格化的提出为全覆盖路径规划的环境建模奠定了基础，环境建模是全覆盖路径规划的第一步^{[13],[14]}。

Kriging等人^[15]提出了一种基于DEM数据的插值方法。从而估计任意点的高程信息。但是，该方法只能提供指定点处的高程信息。更好的方法是从离散的数字高程模型（DEM）中导出分析模型，该模型能够更好地描述空间中的地形表面，这能够帮助计算坡度和坡向^{[16],[17]}。考虑地形起伏的地图建模方式，在覆盖路径规划是必不可少的。对于地形建模，具有许多山脊和山谷的田地需要更高次的多项式模型。另一方面，需要低次多项式来避免过拟合。为了避免多项式模型的这些问题，可以使用样条模型，样条模型是由多项式分段定义的特殊函数。样条插值通常优于多项式插值，使用较低的次数，能够避免使用较高次数而出现的龙格现象^[18]。但是B样条插值要求节点一阶导数已知，针对B样条拟合DEM数据的问题，采用张量积样条对栅格化DEM数据进行插值，从而完成对地形的建模^[19]。不难发现，田地的地形较为平坦并且没有地表覆盖物，若采用该方法对野外的复杂环境进行建模，使用张量积样条对栅格化插值的计算量是巨大的，时间开销是难以接受的。

在复杂野外环境中，坡度、坡向、起伏度是影响路径规划的关键地形参数。基于DEM数据提取地形特征，可识别不同地形区域，划分出可通行和不可通行的区域，为

路径规划任务提供基础数据支持。Zhonghua Hong 等人^[20]通过 DEM 数据计算坡度值，将研究区的 DEM 转换成坡度图，结合可行坡度阈值生成地形数据图。任何斜率大于阈值的栅格都是不可行的，并且具有高可行斜率阈值的车辆可以通过低可行斜率阈值区域。还可以通过将给定的地形通过地形数据分析处理，在从多个方面进行地形可穿越性的评估，使用包括基于数字高程数据的坡度分析以及基于卫星地图的地形分割分类两方面，将目标区域地形转化为图的数据结构^[21]。齐立哲等人^[22]针对荒漠复杂地形提出了一种变分辨率的三维栅格地图模型。首先，通过深度相机获取机器人周围的环境信息，利用分辨率较高的 DEM 数据对局部高程图进行构建。其次，在局部高程图的基础上利用邻域极差检测法以及最小二乘法斜面拟合对局部斜面栅格图进行构建。最后，通过坐标映射以及信息更新构建全局地图。但该方法通过深度相机获取的信息进行建模，只适用于较小区域。

不仅可以通过分析地形地貌数据对通行性的影响还可以评估移动物体的属性来评估地面机动物体的通行性和通行效率^[23]。Xu Qing 等人^[24]采用网格法对基本地形地貌数据进行量化处理。首先，将环境的矢量数据转换为栅格数据，然后分别对栅格像素对应的各类地形地貌信息进行数字编码合并。其次，将矢量几何信息转换为网格像素，对栅格数据对应的地表要素信息编码为对应的整数。最后，利用层次分析法以及专家打分系统对地表要素信息、地形信息、机动物体自身属性信息进行加权，将权重叠加到栅格地图中。

综上所述，对于应急搜救管理部门来说，由于环境的复杂性，导致搜救难度大，遇险人员生还率低，救援效果不明显。如果能够有效的结合地形信息对环境进行建模，可以为搜救团队提供有力的支持。从地图栅格化的首次提出发展到栅格地图中叠加考虑地形地貌信息、地表要素类型等因素，环境建模技术日益完善，完备的地形建模技术能够帮助搜索团队根据地理、环境和目标的特点，对区域进行划分，并确定搜索方向、选择搜索方法等。本课题将基于研究区获取的 DEM 数据构建结合地形因素野外环境可通行性地图，在减少模型内存占用的同时充分考虑地形对通行性的影响。以实现面向应急搜救的精确全覆盖路径规划，为应急管理部门提供决策支持。

1.2.2 全覆盖路径规划方法研究现状

十九世纪八十年代全覆盖路径规划算法被提出，到目前为止很多学者提出了不同的方案来解决覆盖路径规划问题，这些方法主要分为以下两类^[25]：随机碰撞法、单元分解法。

随机碰撞法是一种行为全覆盖算法，也称为随机碰撞式导航，但这并非是指真正与环境中的物体产生碰撞，也非毫无章法的在环境中随机移动，而是按照一定的轨迹进行移动，如果碰到了障碍物则执行对应的转向函数，这是一种以时间换空间的低成

本策略^[26]。Palleja 等人^[27]定义了径向遮挡因子 (ROF) 以及转向相对因子 (BRF) 来比较不同移动状态下的覆盖率, 但是最后结果表明大多数区域会导致重复覆盖, 并且覆盖率不能达到 100%。行为全覆盖算法工作效率低, 路径规划策略过于简单, 面向复杂地形进行陷入死区。并且随机性高等问题, 一般适用于小区域的全覆盖路径规划。并不适用于本文的应用场景。

单元分解法是将整个区域的路径规划的流程分为四个部分: 整体区域的分解、子区域间的覆盖顺序规划、子区域间的衔接路径规划以及子区域内的全覆盖路径规划。常用的区域分解方法有 Trapezoidal 分解法^[28]、BCD 单元分解法^[29]、^[30]以及 Morse 分解法^[31]。Trapezoidal 分解法通过扫描线扫描目标区域, 在遇到多边形障碍物的顶点时产生 IN, OUT, MIDDLE 三种事件。依据不同情形将环境划分成梯形子区域。BCD 方法在 Trapezoidal 分解法基础上进一步合并 MIDDLE 操作产生的子区域, 减少子区域个数, 但相邻子区域边界仍有重复覆盖问题。

Li Yang 等人^[32]提出了一种时间复杂度为 $O(n)$ 的基于梯形分解的 BCD 方法。该方法将凸多边形内的覆盖问题转化为最小宽度计算问题, 以降低路径规划复杂度。并且还证明了所提出的方法是一个多项式时间算法, 在此基础上, 根据已知的环境信息, 对原有的 BCD 方法的分解规则进行改进, 将垂直扫描线修改为水平扫描线, 能够有效地减少分解后的凸多边形的数量^[33]。Coombes M 等人^[34]使用凸多边形的凸包将 BCD 方法拓展为外部细胞分解方法, 有效的减少了分解的凸多边形的数量。由于沿不同的角度分解凸多边形的效果不同, 沿着凸多边形长轴平行的方向分解凸多边形也能够有效地减少分解的凸多边形个数以及路径的转弯次数^[35]。有的研究者发现原有的 BCD 方法难以快速找到绕过障碍物的正确路径, 并针对此问题, 提出了一种新的分解规则。针对此问题, 提出了一种新的分解规则。当扫描线的连通性不变但某段连通线长度发生了变化, 若变化的大小超过当前单元最大宽度的一半, 则旧单元结束, 新单元生成。新的分解规则能够有效地减少凸多边形的数量^[36]。

利用区域分割算法是可以将一个复杂的工作区域划分成多个简单的子区域, 分解后问题的复杂度降低, 从覆盖问题转义为广义的旅行商问题 (Travelling Salesman Problem, TSP)^[37]。但区域分割算法的缺点是子区域间的路径需要另外进行合理的规划, 因为这部分路径都会出现重复覆盖的现象^[38]。研究者们努力寻找最大位数最优化的算法的同时, 构造了许多近似求解法, 如遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)^[39]、局部搜索算法 (Local Search Algorithm, LS)^[40]、蚁群算法 (Ant Colony Optimization, ACO)^[41]等。王俭等人^[42]受 TSP 启发, 在单元分解法的基础上, 提出一种改进的子区域衔接策略。通过构建以子区域重心为节点的环境拓扑图, 并以重心间的欧式距离作为边的权重, 建立区域间的连接关系, 从而形成广义距离矩阵模型, 用于描述子区域之间的可达性。张赤斌等人^[43]将局部遍历与全局遍历相结合用于全覆盖路径规划中。