

doi: 10.7690/bgzdh.2026.02.021

## 排爆机器人全覆盖路径规划方法

董天天<sup>1,2</sup>, 宋先鲁<sup>2</sup>, 夏玉果<sup>1</sup>, 张少华<sup>1</sup>, 夏庆峰<sup>3</sup>

(1. 江苏信息职业技术学院微电子学院, 江苏 无锡 214153; 2. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044; 3. 无锡学院自动化学院, 江苏 无锡 214105)

**摘要:** 为提高军事战场中复杂地形、危险区域的路径规划效率, 提出一种基于螺旋生成树的全覆盖路径规划方法。利用多源传感器数据融合技术, 界定排爆环境不可穿越区域, 锁定连续弓形路径区块。根据创新性相邻区域连接准则, 在全覆盖规划的前提下减少重复覆盖, 提升规划效率与质量。实验结果表明: 在 2 种典型规格模拟排爆地图场景和实际测试中, 排爆机器人全覆盖路径规划算法的路径规划覆盖率达 100%, 重复覆盖率为 4% 与 5.4%, 转弯次数为 12 与 8 次, 减少了无效重复路径, 在排爆机器人路径规划领域性能优异, 具有广阔的应用潜力。

**关键词:** 机器人; 全覆盖路径规划; 机器人操作系统

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A

## Full Coverage Path Planning Method for EOD Robot

Dong Tiantian<sup>1,2</sup>, Song Xianlu<sup>2</sup>, Xia Yuguo<sup>1</sup>, Zhang Shaohua<sup>1</sup>, Xia Qingfeng<sup>3</sup>(1. School of Microelectronics, Jiangsu Vocational College of Information Technology, Wuxi 214153, China;  
2. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Automation, Wuxi University, Wuxi 214105, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of path planning in complex terrain and dangerous areas in military battlefield, a full-coverage path planning method based on spiral spanning tree is proposed. The multi-source sensor data fusion technology is used to define the impenetrable area of the explosive disposal environment and lock the continuous arch path block. According to the innovative adjacent regional connection criteria, the duplicate coverage rate is reduced under the premise of full coverage planning, and the planning efficiency and quality are improved. The experimental results show that the path planning coverage rate of EOD robot is 100%, the repeated coverage rate is 4% and 5.4% respectively, and the number of turns is 12 and 8, which reduces the invalid repeated path sections and has excellent performance in the field of EOD robot path planning. It has wide application potential.

**Keywords:** robot; full coverage path planning; robot operating system

### 0 引言

近年来, 机器人技术在应对复杂危险任务场景中的重要性与日俱增, 排爆机器人便是其中的典型代表<sup>[1]</sup>。随着国际安全形势的变化, 各类爆炸物威胁不断增加, 促使机器人技术在排爆领域的应用成为必然<sup>[2]</sup>。机器人技术得以快速发展, 形成了涵盖机械设计、电子工程、计算机科学等多学科交叉的综合性技术体系<sup>[3]</sup>。移动机器人设备, 在民用危险环境清理、军事作战场景均发挥着关键作用, 承担着爆炸物探测、拆除等高风险任务<sup>[4]</sup>。

路径规划是解决排爆机器人在执行任务时如何有效规划路径<sup>[5]</sup>, 并全面覆盖指定区域内的所有任务点, 确保在复杂环境下能够自主规划出最优路径, 实现无遗漏的全面覆盖, 对于提升机器人作业效率具有现实意义<sup>[6]</sup>。在全覆盖遍历路径规划的研究中,

栅格分解法是最基础且广泛使用的方法之一。此外, 受自然界生物行为启发的算法, 如蚁群算法、遗传算法、粒子优化算法等<sup>[7]</sup>, 也被用于解决全覆盖路径规划问题。这些算法通过模拟生物种群的行为来搜索最优或最近的覆盖路径, 能够处理复杂的环境和动态变化, 但是算法计算复杂度较高<sup>[8]</sup>。针对机器人全覆盖路径规划方面的内容展开了大量研究, 刘翔宇等<sup>[9]</sup>利用人工势场算法改进传统 A\*算法中估值函数, 有效减少了无效重复路径段。

根据移动机器人在军事、民用等排爆现场代替工作人员进行救援这一需求, 笔者开发了排爆机器人自主的全覆盖路径规划技术。

### 1 排爆机器人系统

系统架构由中央处理模块、底盘控制器、遥控器装置、激光雷达、GPS 模块、惯性测量模块、自

收稿日期: 2024-11-15; 修回日期: 2024-12-25

基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金(24KJD510004)

第一作者: 董天天(1990—), 男, 江苏人, 博士。

主导航软件和电机驱动电路组成，实现机器人的运动、导航、作业等全方位功能，如图 1 所示。

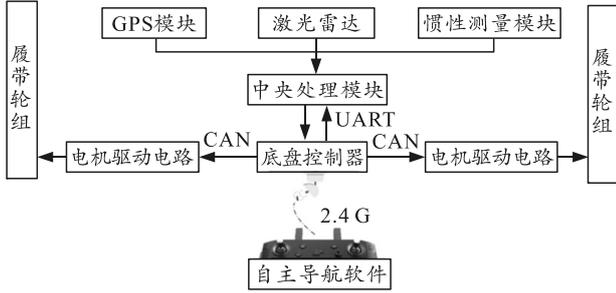


图 1 系统架构

采用 Jetson NX 作为中央处理模块，通过串口通信连接 3 种传感器实现导航定位与主动避障，数据融合过程先对激光雷达点云数据进行滤波去噪、特征提取等预处理；接着，将 GPS 定位信息与激光雷达局部地图信息配准，同时利用 IMU 的姿态和位移信息实时估计和校正机器人运动状态，补偿激光雷达测量误差和在 GPS 信号受遮挡时进行短期位置推算；最后，通过卡尔曼滤波等算法融合数据，得到准确稳定的位姿估计，为路径规划提供可靠数据。底盘控制模块采用 STM32 单片机，通过 CAN 总线通信连接电机驱动电路，控制电机运动。通过笔者设计的路径规划算法部署到中央处理模块，可以计算出机器人需要行驶的最佳路径和自主导航作业。

排爆机器人作为一种全地形无人移动平台，设计了高效双电机驱动系统，为其提供强劲而稳定的动力输出，确保在各种地形条件下都能顺畅运行，如图 2 所示。履带采用耐橡胶材质，并配合 KEVLAR 增强层，这种特殊的组合使得机器人能够很好地适应长耐久的工作要求。

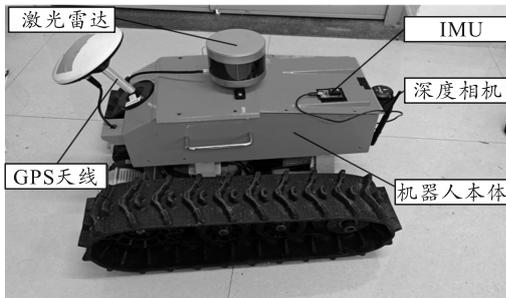


图 2 排爆机器人装备

## 2 全覆盖路径规划算法

排爆机器人路径规划需要考虑到野外复杂环境，规划最优路径，实现路径规划任务的全覆盖。

### 2.1 MSTC\* 算法设计

通过物理约束下的机器人覆盖路径规划算法

(multi-robot spanning tree coverage with physical constrains, MSTC\*) 进行路径规划，基于螺旋生成树覆盖的路径规划具有全局优化能力和高效性。流程包括初始化路径集合，定义不可通过区域，分区表示、覆盖路径划分和合并相邻的分区等步骤。

1) 初始化路径集合  $P$ 。最小化路径成本，路径成本即累计成本的最大值，设计目标是计算一组覆盖路径，通过最小化  $W_{\Pi_i}$  的最大值，问题可以表述为：

$$\arg \min_{\{\Pi_i\}} (\max_{1 \leq i \leq k} (W_{\Pi_i}))。 \quad (1)$$

2) 定义不可通过区域。地图环境中陡峭的区域是无法到达的，对于地面移动机器人有很高的翻转和滑动风险，指定一个坡度阈值为  $25^\circ$ ，此外滑坡风险  $\hat{\theta}_e$  被定义为：

$$\hat{\theta}_e = (\theta_e - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min})。 \quad (2)$$

式中： $\theta_{\max}$  和  $\theta_{\min}$  为最大和最小斜率， $\hat{\theta}_e$  是斜率阈值； $\theta_e$  为当前边坡度。

3) 分区表示，为覆盖路径分区开始的节点索引为  $\rho_i$ ，公式如下：

$$P = \{\pi_{\rho_1}^*, \pi_{\rho_2}^*, \dots, \pi_{\rho_k}^*\}。 \quad (3)$$

式中： $\pi_{\rho_i}^*$  为关键节点； $P$  为路径分区的节点索引。

4) 覆盖路径划分问题。定义每个覆盖路径分区的组成，表示机器人由关键节点公式  $\pi_{\rho_i}^*$  开始(包括该节点)，到下一个关节节点  $\pi_{\rho_{i+1}}^*$  之前的所有节点组成。明确每个分区内具体包括哪些节点，机器人覆盖路径分区  $\Pi_i$ ：

$$\Pi_i = \{\pi_{\rho_i}^*, \pi_{\rho_{i+1}}^*, \pi_{\rho_{i+2}}^*, \dots, \pi_{\rho_{i+1}-1}^*\}。 \quad (4)$$

5) 合并相邻的分区。减少转角次数以及路径成本进行新一轮的路径迭代，将覆盖路径的转弯次数迭代至最小，公式如下：

$$\Pi_i = \bigcup_{j=i \cdot \frac{n}{k}}^{(i+1) \cdot \frac{n}{k} - 1} \Pi'_j。 \quad (5)$$

式中： $\Pi_i$  为路径分区； $\Pi'_j$  为子路径。

### 2.2 基于螺旋生成树策略的算法

首先，初始化路径集合为整个路径规划搭建基础框架，为后续操作提供初始条件；明确定义不可通过区域，考虑到野外环境存在障碍物、沟渠等不适宜移动机器人行驶的地方，提前进行标注，以便

在规划路径时避开这些区域；然后，分区表示，将地图按照一定的规则划分成不同的区域，每个区域都有其独特的特征和规划需求；再进行覆盖路径划分，根据作业任务要求，为每个区域规划合适的覆盖路径；合并相邻的分区，将相邻且具有关联性的分区进行合理整合，使整个路径规划更加连贯。

### 3 仿真验证

#### 3.1 仿真对比实验

如图 3 所示，在 10 m×20 m 和 8 m×6 m 2 种规格的地图中开展测试，通过构建栅格占位地图，定义黑色标志为障碍物，开展软件仿真测试试验，验证全覆盖路径规划算法的覆盖率、重复覆盖率和转弯次数。

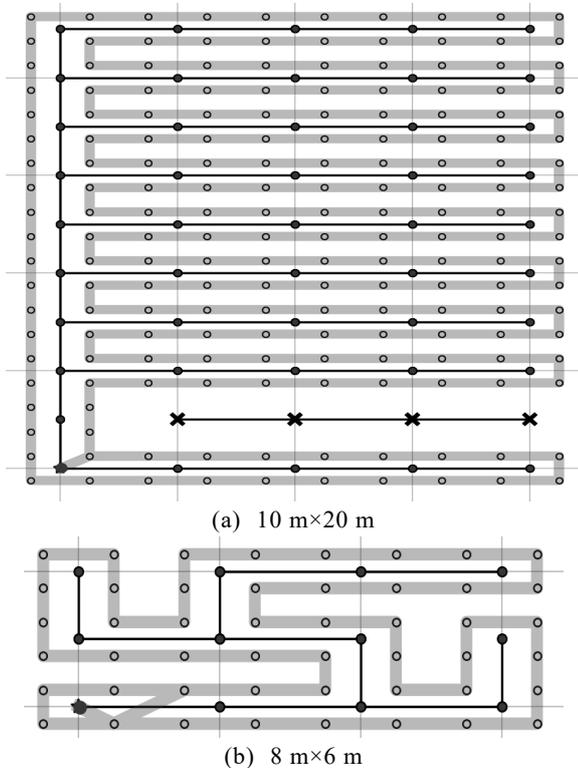


图 3 仿真测试结果

在 2 种不同的地图下执行了机器人全覆盖路径规划实验。笔者提出的方法表现出较低的路径冗余和较高的整体覆盖率，解决了机器人全面覆盖路径规划的效率问题。该方法的优势在于通过改进的螺旋生成树策略，结合了野外实际地形等物理限制，确保了路径规划的精确性，能更有效地指导机器人行驶，实现最大程度的覆盖。此外，通过应用连接相邻区域的原则来整合地图上的路径线段，进一步降低了路径冗余，提升了路径规划的效率。随着路径的连通，形成的弓形路线结构也对路径规划的优

化起到了显著效果。

#### 3.2 性能对比分析

为全面评估方法的效能，笔者选择了覆盖率、重复覆盖率及转弯次数作为验证的量化标准，对 2 种类型的地图分别进行了覆盖率、重复覆盖率及转弯次数的测试分析，在 2 种地图环境下，对全覆盖路径规划算法进行测试，共进行 50 次模拟验证实验，结果如表 1 所示。

表 1 全覆盖路径规划参数

地图规格/m	覆盖率/%	U 型转弯次数	重复覆盖率/%
10×20	100	12.5	4.0
8×6	100	8.7	5.4

由表 1 可知：在 10 m×20 m 和 8 m×6 m 2 种规格的地图中路径规划的覆盖率达到 100%，其中，重复覆盖率分别为 4%、5.4%，每次测试的转弯次数均值分别为 12.5 和 8.7 次。本文中方法在覆盖率、重复覆盖率及转弯次数均具有比较明显的优势，降低了作业路径长度，解决了作业区域无法全部覆盖的问题。

### 4 实验验证

如图 4 所示，开展实际场景 2 维栅格地图测试。

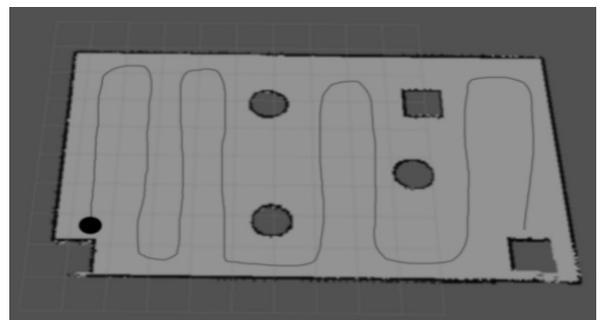


图 4 栅格地图测试

小车的起点被标记为黑色，其行驶轨迹则通过线条清晰呈现。这一测试验证该研究中全覆盖路径规划算法的有效性。实验环境设定在一个约 20 m 长、15 m 宽的规则矩形 2 维平面工作区域内，该区域内随机散布着形状各异的障碍物，既有圆形也有方形。

从起点出发，由线条表示的路径开始延伸。在遇到障碍物时，路径能够平滑地绕过其边缘，整个小车的路径几乎完全覆盖了工作区域。该实验结果验证了本文中算法在处理复杂环境下全覆盖路径规划问题的有效性。

开展履带式排爆机器人全覆盖路径规划系统野外实验如图 5 所示。



图 5 野外实验

实验时间为 2024 年 6 月 7 日,用于测试机器人的导航与路径规划功能。过程中,机器人基于激光雷达等传感器获取的环境信息,利用(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术实现同时定位与地图构建。在机器人运动过程中,SLAM 算法实时处理激光雷达的点云数据,通过特征匹配、数据关联等方法,将机器人在不同时刻的观测信息进行融合,从而构建出周围环境的地图,并同时确定机器人在地图中的准确位置。结合笔者提出的全覆盖路径规划算法,为机器人规划出最优的行驶路径,使其能够在未知环境中自主导航并完成任务。

在应用现场主要测试本文中方法的 3 个数据:覆盖率、重复覆盖率及转弯次数。如图 6 所示,白线表示规划的路径,路径两侧是种植的树木。

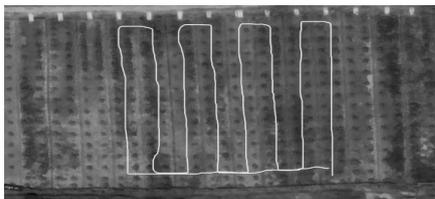


图 6 真实场景测试

从图 6 可知:本文中算法能够高效地规划出规则性的路径,确保路径均匀覆盖整个可行的实验区域。此外,算法还表现出了出色的避障能力。在路径规划过程中,算法在规划的过程中能够有效地避免与两侧树木的碰撞,保证路径的连续性与平滑性,从而最大化地利用了场地的有效空间。

## 5 结论

笔者提出一种排爆机器人自主的全覆盖路径规

划技术。在对排爆机器人的系统架构与硬件系统进行介绍的基础上,明确排爆机器人在野外环境下自主导航的技术要求;对排爆机器人工作环境分析,提出排爆机器人基于螺旋生成树的全覆盖路径规划的技术方案;基于 SLAM 技术实现排爆机器人在未知环境中的自主导航,开发适合于机器人路径规划方法。实验结果表明:该机器人全覆盖路径规划技术能使排爆机器人在环境中进行自主导航,经 50 次模拟仿真实验,其路径规划覆盖率达 100%,重复覆盖率分别为 4%与 5.4%,转弯次数为 12.5 与 8.7 次,实现全覆盖路径规划的同时提升了规划效率。

## 参考文献:

- [1] 蒋海刚, 蒋小强, 吴增强. 建筑设施巡检软件机器人系统设计与实现[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(5): 44-55.
- [2] 牟春鹏, 孙家升, 张涵, 等. 便携式反恐排爆机器人[J]. 兵工自动化, 2020, 39(8): 86-90.
- [3] 杨丹丹, 高礼华, 沈悦, 等. 基于多学科交叉的国家重点实验室数字展厅设计创新[J]. 包装工程, 2024, 45(20): 500-512, 517.
- [4] 戴慎超, 顾保虎, 孙景富, 等. 未知环境下的消防机器人智能灭火技术[J]. 兵工自动化, 2023, 42(1): 86-91, 96.
- [5] 许娜, 周炜明. 采摘机器人全局覆盖路径规划研究——基于自适应蚁群算法[J]. 农机化研究, 2023, 45(11): 213-216, 221.
- [6] 焦嵩鸣, 梁嘉义, 杨晨渤, 等. 一种改进的跳点搜索移动机器人路径规划算法[J]. 信息与控制, 2025, 54(3): 525-535.
- [7] 金宝龙, 夏长高, 韩江义. 多机协同作业全覆盖路径规划[J]. 农机化研究, 2024, 46(12): 28-33.
- [8] 孙玉山, 王力锋, 吴菁, 等. 智能水下机器人路径规划方法综述[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(7): 1-7.
- [9] 刘翔宇, 骆云志, 樊鹏, 等. 未知环境中基于 A\*算法改进的遍历式路径规划算法[J]. 兵工自动化, 2024, 43(1): 88-91.
- [8] 吴爱国, 吴绍华, 董娜. 机械臂非奇异快速终端滑模模糊控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(5): 862-871.
- [9] VO A T, KANG H J. An Adaptive Terminal Sliding Mode Control for Robot Manipulators With Non-Singular Terminal Sliding Surface Variables[J]. IEEE Access, 2019(7): 8701-8712.
- [10] 李俊麟, 王宏博, 张伟, 等. 机械臂自适应反演超螺旋全局终端滑模控制[J]. 测控技术, 2023, 42(10): 74-81.

(上接第 91 页)

- [6] 孙国法, 赵尔全, 张国巨, 等. 基于扰动观测器补偿的机械臂非奇异快速终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(8): 1506-1515.
- [7] BRAHMI B, LARAKI M H, BRAHMI A, et al. Improvement of sliding mode controller by using a new adaptive reaching law: Theory and experiment[J]. ISA transactions, 2020, 97: 261-268.