

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416017

# 基于复合探索点的主动 SLAM 建图方法研究<sup>\*</sup>

梁天<sup>1</sup> 陈丽<sup>1</sup> 马转转<sup>1</sup> 董哲明<sup>2</sup> 孙中元<sup>3</sup>(1. 上海工程技术大学航空运输学院 上海 201600; 2. 大唐国际托克托发电有限责任公司 呼和浩特 010200;  
3. 苏州热工研究院有限公司 苏州 215004)

**摘要:** 为了提升电厂内部巡检效率,本文提出了基于智能机器人的电厂巡检方案。考虑电厂内部场景复杂,实现机器人在未知环境下自主建图的高效性和准确性尤为重要。本文设计一种基于复合探索点的主动 SLAM 建图方法,基于平面分割和矢量合成法,对探索轨迹施加牵引,减少随机探索带来的地图不确定性并改进边界点评价函数,考虑到边界长度的增益,提高探索效率。首先采用平面分割法在目标点所在区域进行边界点搜索,以运动距离和边界线长度为参数设计评价函数,确定探索范围最大的最佳边界点,并通过最佳边界点和目标点的矢量合成,设计复合探索点,引导机器人同步建图和跟踪。并利用实时定位建图技术,构建当前环境栅格地图,通过探索点的依次探索,最终达到目标点,并完成自主建图,通过再次设定目标点实现跟踪扩大建图范围。所提出的算法具备探索的趋向性,是对栅格地图深度优先搜索,并考虑目标点对其路径存在牵引作用,避免了机器人轨迹多次覆盖和陷入回路的情况。实验结果表明,本方法能以较少的探索次数和较短的探索路径完成未知环境下的目标点跟踪和高精度建图。

**关键词:** 自主移动机器人;主动 SLAM;区域分割;复合探索点;自主建图

**中图分类号:** TP391.9;TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Research of active SLAM with composite exploration points

Liang Tian<sup>1</sup> Chen Li<sup>1</sup> Ma Zhuanzhuan<sup>1</sup> Dong Zheming<sup>2</sup> Sun Zhongyuan<sup>3</sup>

(1. College of Air transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China;

2. Datang International Togtoh Power Generation Co., Ltd., Hohhot 010200, China;

3. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China)

**Abstract:** To improve the efficiency of internal inspections in power plants, this paper proposes an inspection scheme based on intelligent robots. Given the complexity of power plant environments, achieving efficient and accurate autonomous mapping by robots in unknown settings is crucial. We designed an active SLAM method using composite exploration points, incorporating plane segmentation and vector synthesis to guide exploration trajectories, thereby reducing map uncertainty from random exploration. The boundary point evaluation function is enhanced by considering boundary length gain to improve exploration efficiency. The method involves using plane segmentation to search for boundary points around the target, with an evaluation function based on movement distance and boundary length to determine the optimal boundary point with the largest exploration range. Composite exploration points are created through vector synthesis of the optimal boundary and target points, guiding the robot for simultaneous mapping and tracking. Real-time positioning and mapping technology is used to construct the current environmental grid map, achieving target point tracking and autonomous mapping through sequential exploration points. By setting new target points, tracking and expanding the mapping range are achieved. The proposed algorithm exhibits a tendency towards exploration, performing depth-first search on the grid map while considering the traction effect of target points, thereby avoiding multiple trajectory overlaps and loops. Experimental results demonstrate that this method achieves target tracking and high-precision mapping in unknown environments with fewer exploration steps and shorter paths.

**Keywords:** autonomous mobile robots; active SLAM; planar segmentation; composite exploration points; autonomous mapping

## 0 引言

发电厂有着生产规模大、监控仪表多、安全系数高的特

点。然而目前发电厂存在设备老化问题,需要对各监控仪表的数据进行实时监测,以确保生产的安全<sup>[1]</sup>。传统的电厂监测方式以人工监测为主,该方法效率低,巡检精度低,

收稿日期:2024-05-11

\* 基金项目:临近空间浮空器多场耦合伺服弹性机理研究(52175103)项目资助

有时还对工人人身安全存在隐患。目前较为先进的巡检方式是机器人巡检,机器人巡检效率高、精度高、应用范围广,使得安全问题能被及时发现并解决。但是电厂环境错综复杂,且环境变化较大,传统的基于确定地图导航可能无法满足其巡检要求<sup>[2-3]</sup>,机器人在未知环境中自主探索移动路径成为研究重点。机器人自主探索建图是一种基于同步定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)的方法,能够自主寻找具有建图潜力的目标点来探索环境中的未知区域,并实现环境的完整构图<sup>[4]</sup>。近年来,研究者提出了多种自主探索算法来提高机器人自主探索能力,自主探索算法包括基于边界优化的 Frontier-Based 算法<sup>[5-6]</sup>和基于轨迹优化的探索算法<sup>[7-8]</sup>,文献[5]中的 Frontier-Based 探索算法,以未知区域构建的边界点为驱动指引机器人进行探索,不断更新证据网格,寻找边界点;文献[6]针对边界点选取问题提出了一种边界检测算法(free-form deformation, FFD)。该算法虽然降低了检测边界的时间,但是对候选边界的评估有所欠缺,同样容易产生无效不可达边界。文献[7]采用局部生成随机树与前沿混合引导的方式,并通过对节点的剪枝和重新生成达到减少计算量的目的,该方法的局部随机树只用于随机生成节点,无法处理局部动态障碍物;文献[8]中提出了一种完全基于快速探索随机树的自主探索策略(reflection file download, RFD)算法,利用 RRT 算法对于未知区域的倾向性,通过 RRT 树的随机生长获取到边界点来引导机器人前往未知区域。但由于 RRT 生成树的随机性,生成的边界点分布并不均匀,不能很好地完成自主探索任务。

现有 SLAM 方法中存在的产生不可达区域和反复探索已知区域问题,导致的探索效率低,地图精度差的问题,论文提出的基于复合探索点的跟踪探索建图方法,该方法在 Frontier-Based 算法基础之上,对地图进行分割,在探索区间内评估出最优边界线,确定最佳边界点,设计复合探索点,可以实现目标跟踪,通过目标点设计,在接收到目标点后,确定目标探索边界,并通过 A\* 全局规划和 DWA 局部避障算法实现目标导航,借助 Cartographer 建图技术完成建图。可以有效地避免这些问题,满足智能机器人在电厂环境下的巡检需求。

相较于现有的探索算法相比,本文算法的探索速度更快、趋向性更强,并加以目标点的牵引作用,生成路径更加平滑,建图清晰。

## 1 自主探索建图系统构架

自主探索建图系统采用 2D 激光雷达实时采集周围环境,构建出周围环境的 2D 栅格地图<sup>[9]</sup>,根据机器人的实时位置及得到的目标点的位置,将地图探索区域限制为指向目标点的半平面;在确定的半平面内,根据栅格地图所携带的信息,找寻所有的边界点,并将相邻的边界点构建为边界线;建立评估函数,评估所有边界点,综合参考最佳边界点

和目标点位置,采用线性规划得到中间探索点;结合 2D 栅格地图信息,确定机器人位置和障碍物的位置,对地图探索点进行跟踪,同时更新地图。

目标跟踪及地图构建系统如图 1 所示。本论文主要创新工作为复合探索点设计部分。

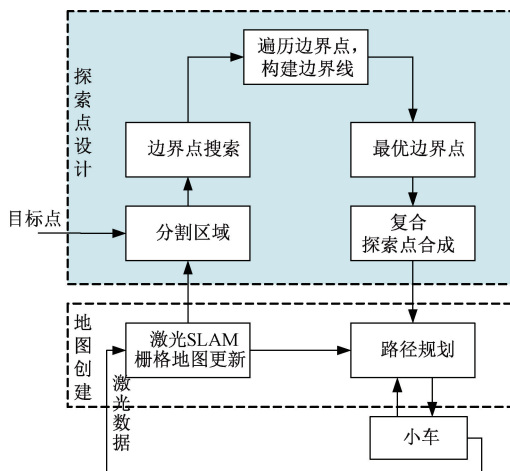


图 1 目标跟踪及地图构建系统框图

Fig. 1 System block diagram for target tracking and map construction

## 2 基于 Frontier-Based 的自主探索算法

### 2.1 证据网格

Frontier-Based 算法采用的地图表示是证据网格,如图 2 所示,一是空闲状态(白色):表示已探索的单元格处没有障碍物;二是占用状态(黑色):表示已探索的单元格处有障碍物;三是未知状态(灰色):表示当前网格还没有被传感器扫描到,属于未知的区域<sup>[10]</sup>。

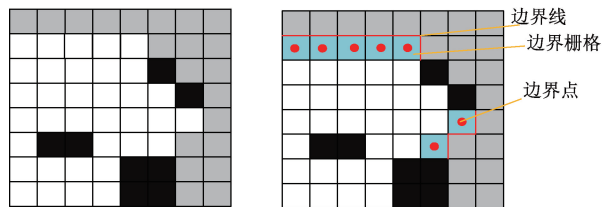


图 2 网格表示

Fig. 2 Grid representation

Frontier-Based 探索方法将“边界”定义为环境中介于已探测区域和未探测中间的边,边界网格是空闲的,且其周围八邻域存在未知的网格,边界点则是将边界离散后在边界网格中的点,如图 2 所示。

证据网格通过传感器的距离数据得到环境的占用状态,提供详细的环境特征数据来表示该网格被占用的概率值:

$$S^+ = S^- + \log \frac{p(z | s = 0)}{p(z | s = 1)} \quad (1)$$

其中,  $S^+$  为更新后的网格状态,  $S^-$  为更新前网格状

态,  $\frac{p(z | s = 0)}{p(z | s = 1)}$  为网格所被占用的概率比值, 网格的初始状态为:

$$S_{init} = \log \text{Odd}(s) = \log \frac{p(s = 0)}{p(s = 1)} = \log \frac{0.5}{0.5} = 0 \quad (2)$$

网格的状态数值越大表示它越可能是占据状态, 越小表示它越可能是空闲状态, 状态值为初始值则表示它是未知状态<sup>[11]</sup>。

### 2.2 边界点提取

根据边界及边界点的定义, 可得所遍历到的边界点为

$$B = \{m_{ij} | m_{ij} \in F \wedge \text{Adj}(m_{ij}, U)\} \quad (3)$$

其中,  $B$  表示边界;  $m_{ij}$  表示地图  $M$  中的一个网格;  $F$  表示已探索的空闲区域;  $U$  表示未探索区域;  $\text{Adj}(m_{ij}, U)$  表示网格有至少一个未探索区域  $U$  的相邻网格; 边界点  $B_p$  是指落在边界  $B$  上的网格点,  $\wedge$  表示取其交集。

已知机器人此时位置  $P_{car}$ , 通过实时的激光数据  $(\varphi, \omega)$  构建网格地图<sup>[12]</sup>, 在机器人周围通过检验地图  $M$  所携带的信息可得到边界点。首先从机器人所处位置  $P_{car}$  开始扫描周围八邻域单元格<sup>[13]</sup>, 判断其八邻域栅格是否为边界栅格, 若判断不是边界栅格且为空闲状态, 则将该栅格加入至队列  $E$  中, 若判断为边界栅格, 则通过该栅格进行扩展, 找出与其相连的所有边界栅格, 所有边界栅格与其未知栅格的公用边相连即为一条边界线  $B_L$ , 如图 3 所示。

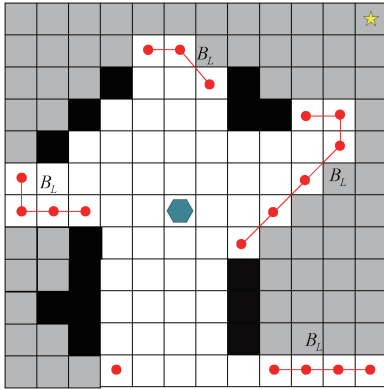


图 3 网格状态与边界线

Fig. 3 Grid states and boundary lines

## 3 基于复合探索点的主动探索策略

为了更好地筛选边界点, 使探索更具有趋向性, 本文算法对 Frontier-Based 算法进行改进, 首先对构建的周围地图进行平面分割, 将平面划分为不同的子空间, 并以子空间的区域对探索点进行限制, 优化评价函数, 使更加高效地对未知环境进行跟踪探索。

### 3.1 二维栅格地图

论文采用 Cartographer 建图算法进行实时定位和地图更新, 使用栅格地图为模型来表示边界点与单元格状态, 栅

格地图与证据网格在表示环境占用状态及更新的策略相同。Cartographer 根据保存的激光传感器数据建立约束关系<sup>[14]</sup>, 机器人的姿态由节点表示, 姿态之间的空间约束由节点之间的边表示, 得到位姿图, 该算法采用图优化的方法实现定位与建图<sup>[15]</sup>。

通过对机器人的运动轨迹和已构建的地图进行回环检测, 调整机器人的位姿, 更新当前地图, 最终构建出当前环境下的栅格地图, 并与现有地图进行拼接, 获得整个区域的地图。

### 3.2 探索区域分割

首先机器人的当前位置点和目标点可以确定一条线, 以机器人的当前位置点为垂足, 做该直线的垂线并将其定义为区域分割线, 区域切割线的斜率和截距, 如下:

$$\begin{cases} k = -\frac{dx}{dy} \\ b = y_p - k \cdot x_p \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $(x_p, y_p)$  为机器人当前坐标,  $(x_c, y_c)$  为所得目标点的坐标,  $dx = x_p - x_c, dy = y_p - y_c$ , 得到区域分割线的方程式为  $y = kx + b$ , 可写为  $Ax + By + C = 0$ 。那么两侧的任意点至该垂线的垂直距离为:

$$d = \frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (5)$$

判断目标点  $(x_c, y_c)$  及边界线的质心  $(x_1, y_1)$  与该分割线的位置, 通过判断  $Ax_c + By_c + C$  与  $Ax_1 + By_1 + C$  是否同号, 来判断是否与目标点同侧, 如图 4 所示, 边界线将地图分为两个部分, 目标点所在部分进行地图探索, 该区域的边界点为所考虑的边界点, 红色点即为筛选后的边界点。

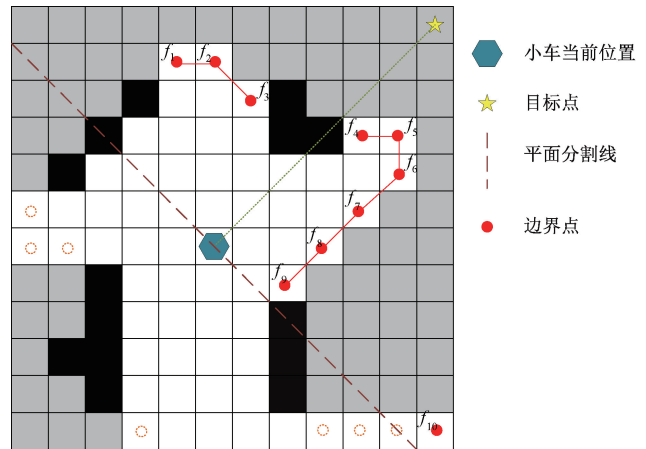


图 4 探索区域分割

Fig. 4 Segmentation of exploration region

### 3.3 边界质心点评估

对边界线的质心进行评估, 质心点的代价值主要由 3 部分组成: 行进代价、未来代价因素及收益因素。行进代价为质心点距离机器人当前位置的欧式距离, 距离越长则到达的成本越高; 未来代价因素为质心点距离目标点的欧氏



示,场底面积为  $15 \times 10 \text{ m}$ ,障碍物主要是桌子、纸箱,模拟电厂环境下的仪表箱体设备,实验机器人为一台搭载 Sick TiM-571 激光测距雷达的 IR-C100 移动平台,内部主机处理器为 Intel<sup>®</sup> Core™ i7-7567U CPU@3.50 GHz,内存为 8 GB。



图 7 实验环境

Fig. 7 Experimental environment

相关实验设置参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

参数	数值
激光雷达扫描频率	15 Hz
激光雷达水平扫描范围	$230^\circ$
激光雷达测量范围	$0.05 \sim 25 \text{ m}$
地图分辨率	$0.05 \text{ m}$
每步最长规划时间	2 s
边界长度阈值	$0.5 \text{ m}$

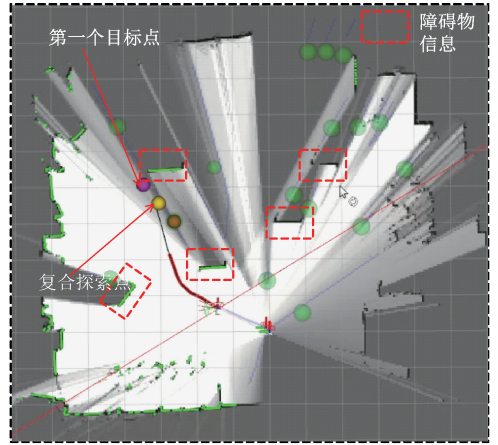
#### 4.1 实验设计

机器人在起点处上电开启 Cartographer 建图,获得初始地图信息,在已知地图上,距离当前位置较远处任选一点作为目标点,如图 8(a)所示,为机器人在当前帧接收到第一个目标点时的运动路径;图 8(b)为切换新的目标点后的运动路径。Cartographer 建图时,通过比较当前位姿与上一个被记录的位姿之间的变化,包括间隔时间、距离、角度,当任一条件超过阈值时,新的位姿将会被记录,即当出现较大角度偏转或快速旋转时,会在原地留下坐标,即子图位姿。本实验设定阈值为  $t_{\max} = 5, d_{\max} = 0.1, r_{\max} = 0.03 \text{ rad}$ 。

从图 8(b)位姿坐标系的分布来看,本文算法实现了有目的的路径规划,当到达第 1 个目标点后向第 2 个目标点行进,并未走重复路径,探索环境的逻辑较为合理。未出现坐标点密集的现象,表明了行进路径较为平滑,有效提高了建图效率。

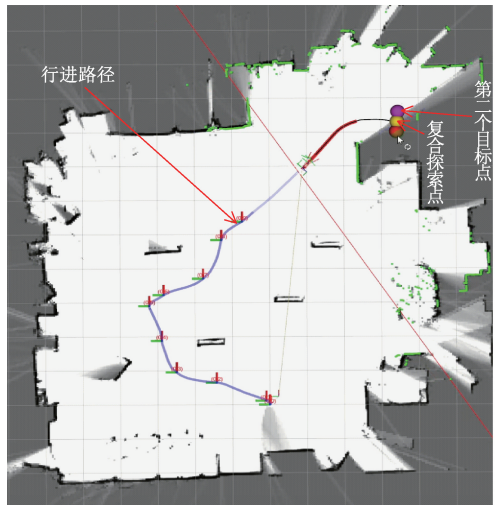
#### 4.2 算法改进前后实验对比

本实验将从探索效率及完整度、建图精度、建图稳定性等多个指标对本文方法与 Frontier-Based 算法进行评估对比。



(a) 前往第一个目标点的地图效果

(a) The map effect of heading to the first target point



(b) 前往第二个目标点的地图补充

(b) Map supplement of heading to the second target point

图 8 切换目标点示意图

Fig. 8 Target point switching diagram

##### 1) 探索效率

已知占据栅格地图  $M$  把空间划分为有限多个栅格  $m_i$ , 每个地图栅格是独立的, 若对每个栅格计算占用概率, 可得整个栅格地图的所有已探测区域的联合概率, 即整个栅格地图的完整度描述:

$$I = \prod_{i=1}^n P(m_i | z_{1:i}, x_{1:i}) \quad (12)$$

本文算法通过设计复合探索点引导机器人不断趋向目标点行走, 为了达到全局地图的构建, 可以采用多目标点跟踪的策略。

本文对 Frontier-Based 算法及本文算法的地图完整度进行比对, 图 9 给出地图完整度与探索次数关系, 其中, 横坐标是每 10 s 统计一次完整度, 记录 12 次。

Frontier-Based 边界探索算法的随机取点存在不确定性, 在判断下一探索点时, 容易陷入摇摆状态, 采用

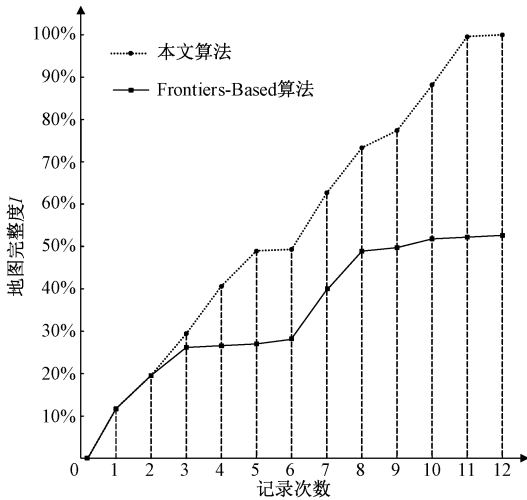


图 9 地图完整度对比

Fig. 9 Comparison of map completeness

Frontier-Based 算法时,在第 8 次探索时陷入摇摆状态,即图 10(a)框 10 放大部分的坐标姿态分布。

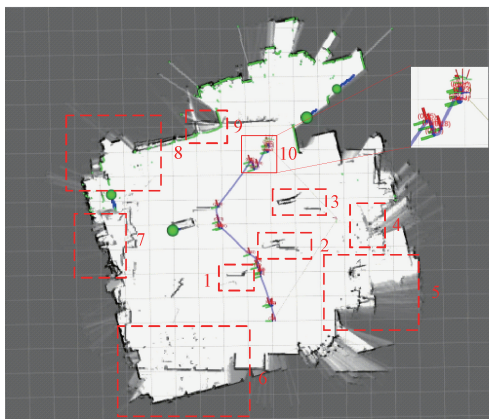
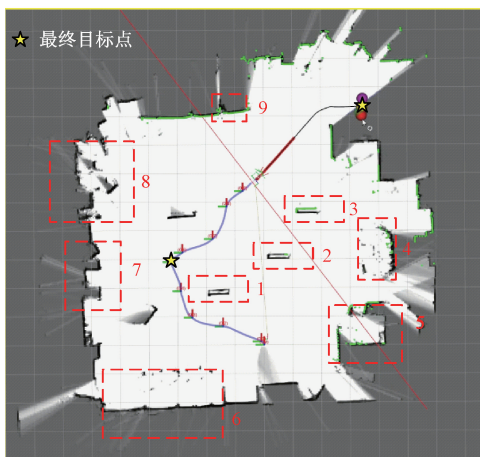
(a) Frontier-based 算法  
(a) Frontier-based algorithm(b) 本文方法  
(b) Methodology of this paper

图 10 算法建图效果对比

Fig. 10 Comparison of mapping effects

本文算法设计两个目标点就能完成全局地图构建,图 10(b)中黄色五角星表示两次目标点位置,当接收到第 1 个目标点,地图完整度随着行进距离稳步上升,机器人到达第 1 个目标点后,如图 9 中第 5 次记录,此时由于到达设定的目标点,机器人在等待下一步指令,此时周围环境已探索完毕,故地图完整度没有变化,接收到第 2 个目标点后,机器人继续探索,在第 11 次探索时,地图覆盖率达到 99.82%,本文算法在建图效率的优势在于有更好的启发性和倾向性,可以搜索到所有可能的边界,并通过代价函数合理选择探索顺序,改进后的算法相较改进前建图完整度可提高 46.22%,具体探索地图完整度如表 2 所示。

表 2 建图完整度对比

Table 2 Comparison of graph completeness

场景规模/m <sup>2</sup>	使用算法	用时/min	I/%
15×10	Frontier-Based 算法	2	99.82
	本文算法	2	53.6

## 2) 建图精度

电厂中有着非常多的精密仪器,此时巡检机器人的建图精度就显得尤为重要,以便未来后续的维修机器人的路径规划。图 10 给出建图的效果,由于 Frontier-Based 边界探索算法随着探索次数的增多,没有全局目标的牵引,机器人位置波动大,建图误差逐渐累积,增大了定位误差,导致机器人反复构建已扫描区域的地图,因而造成地图构建不完整,并有多处重影(如图 10(a)中的框 4)、噪声(如图 10(a)框 5);并且有局部障碍物信息不明确的问题(如图 10(a)中的框 1、2、3),缺少了障碍物的矩形边框。

本文方法所构建的地图在相应缺陷位置均有改善,且通过间断给出两次目标点,构建出完整地图,本文方法创建的地图边界增强,闭合边界比例明显提升,如图 10(b)所示。

## 3) 建图稳定性

由于实验地面过于光滑,实验中可能存在轮胎打滑现象,从而影响建图的精度。由于 Frontier-Based 算法目标点选取的不确定性,构建地图完整度较低,易出现地图重影(如图 10(a)框 8)、错位(如图 10(a)框 6)、扭曲(如图 10(a)框 7)、大幅度倾斜(如图 10(a)框 9),即使通过建图算法的回环检测进行优化,也无法得到较好的地图完整度,如图 10(a)整体所示。

Frontier-Based 算法出现多个聚集的子图位姿坐标系,如图 10(a)框 10 处,这是由于机器人陷入摇摆状态,由于没有目标牵引作用,缺乏有效的机制来避免探索的不确定性,导致机器人未能从当前位置找到最佳的新探索区域,在此处反复摇摆、重复探索。由于在使用 Frontier-Based 算法时不断变换角度,车身快速抖动及大角度偏转,导致累计误差持续增大,进而导致出现墙体以外仍存在可探索区域不

断生成的错误现象,空间重叠现象严重,例如图 10(a)中 5、6、7、8 框选处,所建地图误差较大。

与之对比,本文方法构建的地图,在相应的序号标注的地方均有清晰的边界,建图完整度、精度有显著提升。

### 4.3 改进算法与前沿算法对比

目前主流的主动探索建图方法为 Frontier-Based 算法及 RRT 随机探索算法,实验中均采用 Cartographer 进行地图更新,区别是不同的边界点设计方法和导航方案,本节实现本文方法与 RRT 随机探索法的建图对比。为增加对比结果的可信度,实验场景考虑更多的障碍物且周围环境更为复杂,如图 11 所示。



图 11 增强的实验环境

Fig. 11 Enhanced experimental environment

#### 1) 建图精度

根据式 (12) 计算构建地图的完整度,其中,  $x$  轴为 Cartographer 构建关键帧的次数,每 3 次记录一次,其地图完整度关系如图 12 所示。

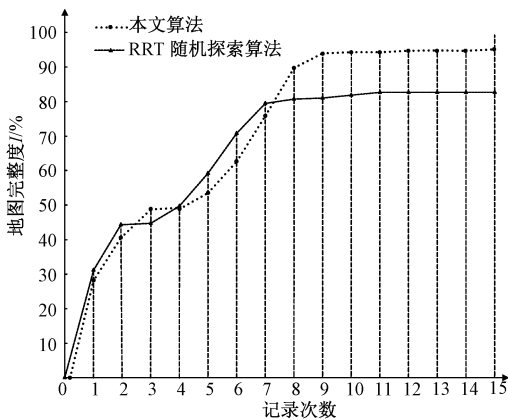


图 12 地图完整度对比

Fig. 12 Comparison of map completeness

在第 3 次记录时,此时本文算法到达第 1 个目标点,第 4 次记录时接续给出第 2 个目标点,机器人继续探索。

由于 RRT 探索算法的随机性,在第 2、3 次和 7、8 次之间发生路径折返,如图 15(a)中蓝色虚线框所示。重复建图导致地图完整率停滞不前,且由于 RRT 随机探索算法在初始设置需要对探索范围与生长树父节点的位置进行估

计,并没有目标的牵引,若初始框估计的不够准确,则无法继续对完整环境进行探索,图 13 给出 RRT 随机探索算法的限制区域,在该区域外不能进行探索建图,如红色虚线框处。

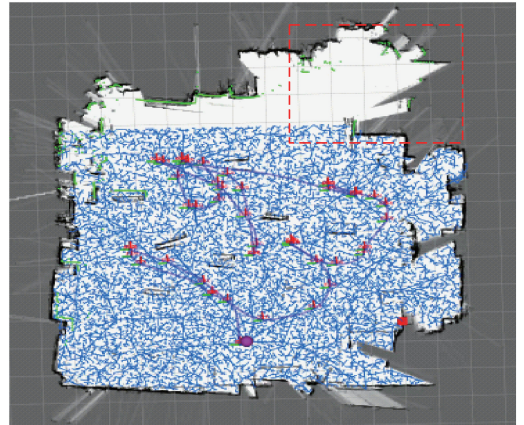


图 13 RRT 随机探索算法的限制范围

Fig. 13 Limitations of the RRT random

本文算法在建图效率的优势在于有更好的启发性和倾向性,可以搜索到所有可能的边界,并通过代价函数合理选择探索顺序,能够对未知环境进行完整探索,事先不需对探索范围进行限制且构建地图速度快。相比 RRT 随机探索树算法,建图完整度提高了 10.4%,具体探索地图完整度如表 3 所示。

表 3 建图完整度对比

Table 3 Comparison of graph completeness

场景规模/m <sup>2</sup>	使用算法	用时/min	I/%
15×10	RRT 随机探索树算法	5	83.6
	本文算法	5	94

#### 2) 建图精度

RRT 随机探索算法由于探索树的随机生成,如图 14(a)的路径显示,由于目标点的无序生成,进而导致机器人的大角度偏转,使障碍物在栅格地图上表现出边框不全、重叠等问题,影响机器人的行进轨迹(如图 14(a)中的框 1、2)。本文方法通过合理的选择边界点,因此行进的路径更为平滑,建图更为准确。

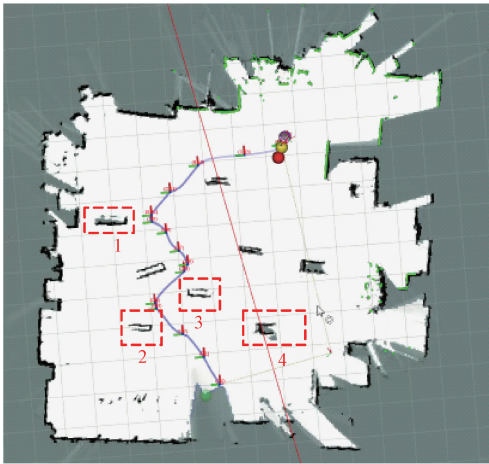
#### 3) 建图稳定性

当出现时角度偏移时,可能存在轮胎打滑现象,从而影响建图的精度。故前后边界点选取的时候应避免大角度偏转。RRT 算法没有考虑这样的约束,因此会造成相邻间隔内的角度突变。本文算法由于算法的趋向性引导,减少了角度突变的可能性。本文算法与 RRT 算法构建地图效果如图 15 所示。

对比图 15(a)和(b)的相同框编号 1 和 2,可以看出本文方法构建的地图,在相应的序号标注的地方均有清晰的



(a) RRT随机探索算法  
(a) RRT exploration algorithm



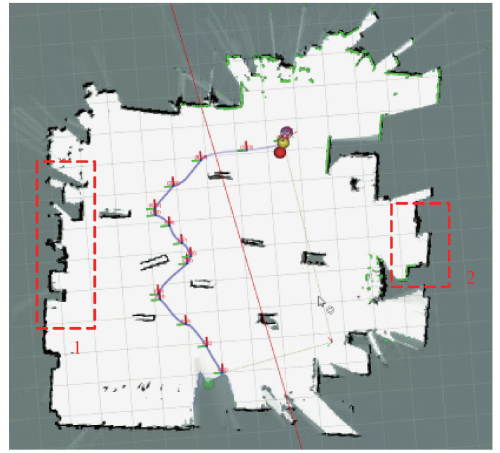
(b) 本文探索算法  
(b) Methodology of this paper

图 14 路径及障碍物识别效果

Fig. 14 Path and obstacle recognition effect



(a) RRT随机探索算法  
(a) RRT exploration algorithm



(b) 本文探索算法  
(b) Methodology of this paper

图 15 算法建图效果

Fig. 15 Mapping effects

边界,精度有显著的提升。

## 5 结 论

为提高电厂巡检机器人的效率,提高先验信息与人机交互在复杂未知环境下的地图构建的作用,提高建图准确性及速度,本文提出平面分割法确定探索区域,建立最优边界点评价指标,设计复合探索点增加目标牵引项,通过这些改进增加建图的趋向性,提高建图的精度。实验结果表明本方法的机器人行走路径光滑,建图效率较传统的 Frontier-Based 算法提高 1 倍;与近期提出的基于 RRT 探索随机树建图算法相比,本文算法建图稳定性和精度较好,满足电厂巡检的应用需求。

## 参考文献

- [1] 李磊, 魏铭毅, 张雨蓉. 基于 5G 的电厂电气设备智能巡检系统设计[J]. 信息与电脑(理论版), 2024, 36(5): 198-200.  
LI L, WEI M Y, ZHANG Y R. Design of intelligent inspection system for electrical equipment in power plants based on 5G [J]. Information & Computer (Theoretical Edition), 2024, 36(5): 198-200.
- [2] 张玮. 基于测量定位的电厂智能巡检机器人系统设计[J]. 电力勘测设计, 2023(S2): 111-117.  
ZHANG W. Design of intelligent inspection robot system for power plants based on measurement and positioning [J]. Electric Power Survey & Design, 2023(S2): 111-117.
- [3] 邓家利, 刘劲涛, 那腾及, 等. 发电厂巡检机器人导航控制算法研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2024, 20(1): 39-47.  
DENG J L, LIU J T, NA T J, et al. Research on navigation control algorithm of power plant inspection robot [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2024, 20(1): 39-47.

- [4] TAHERI H, ZHAO CH X. SLAM; definition and evolution[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 97: 104032.
- [5] 杨曦. 基于 ROS 的自主移动机器人系统设计[D]. 西安: 长安大学, 2019.  
YANG X. Design of autonomous mobile robot system based on ROS[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [6] BRUGALI D, YUGRA J R L. Simultaneous frontier-based exploration and topological mapping[C]. 2023 Seventh IEEE International Conference on Robotic Computing(IRC), 2023: 219-222.
- [7] ZHU H B, CAO C, XIA Y K, et al. DSVP: Dual stage viewpoint planner for rapid exploration by dynamic expansion[C]. 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS), 2021: 7623-7630.
- [8] MUKHOPADHYAY S, UMARI H, KOIRALA K. Multi-robot map exploration based on multiple rapidly-exploring randomized trees[J]. SN Computer Science, 2023, 5(1), DOI: 10.1007/s42979-023-02193-2.
- [9] 马哲伟, 周福强. 一种改进回环的多传感器融合 SLAM 算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(22): 131-138.  
MA ZH W, ZHOU F Q. An improved loop multi-sensor fusion SLAM algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(22): 131-138.
- [10] 唐嘉宁, 刘雨晴, 周思达, 等. 复合边界点驱动的未知三维环境探索路径规划方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(3): 708-716.  
TANG J N, LIU Y Q, ZHOU S D, et al. Research on exploration path planning method driven by composite boundary points in unknown 3D environment [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(3): 708-716.
- [11] 闫鹏, 林迎春. 基于改进 Gmapping 的室内 ROS 智能车同步定位与建图系统设计[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(19): 61-66.  
YAN P, LIN Y CH. Design of indoor ROS smart car simultaneous localization and mapping system based on improved Gmapping [J]. Automotive Practical Technology, 2023, 48(19): 61-66.
- [12] 王子润, 燕必希, 董明利, 等. 基于激光雷达与改进 AMCL 的爬壁机器人定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 220-227.  
WANG Z R, YAN B X, DONG M L, et al. Localization method of wall-climbing robot based on LiDAR and improved AMCL[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 220-227.
- [13] 顾文斌, 陈泽宇, 吴亚伟, 等. 融合栅格地图模型的改进 AGV 路径规划算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(9): 1-6.  
GU W B, CHEN Z Y, WU Y W, et al. Research on an improved AGV path planning algorithm integrating grid map model [J]. Computer Technology and Development, 2021, 31(9): 1-6.
- [14] 余联想, 郑明魁, 欧文君, 等. 多传感器融合的移动机器人室外激光 SLAM 算法优化与系统实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(2): 48-55.  
YU L X, ZHENG M K, OU W J, et al. Optimization and system implementation of outdoor laser SLAM algorithm for mobile robot with multi-sensor fusion[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(2): 48-55.
- [15] 唐浩, 黎东, 王成, 等. 基于图优化的激光 SLAM 点云整体配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(10): 281-289.  
TANG H, LI D, WANG CH, et al. Point cloud global registration method for laser SLAM based on graph optimization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(10): 281-289.
- [16] 王超, 梅瑛, 张溢, 等. 基于改进 DWA 算法的移动机器人避障研究[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(1): 92-96.  
WANG CH, MEI Y, ZHANG Y, et al. Research on obstacle avoidance of mobile robots based on improved DWA algorithm[J]. Journal of Mechanical Design and Research, 2024, 40(1): 92-96.
- [17] 杨敏豪, 张国良, 罗国攀, 等. 融合间隙与 DWA 的移动机器人动态避障规划[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(11): 190-196.  
YANG M H, ZHANG G L, LUO G P, et al. Dynamic obstacle avoidance planning for mobile robots integrating gap and DWA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(11): 190-196.
- [18] 蔡明珠, 刘肖燕, 唐志伟. 基于多传感器融合 SLAM 的 ROS 服务机器人研究[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(2): 65-70.  
CAI M ZH, LIU X Y, TANG ZH W. Research on ROS service robots based on multi-sensor fusion SLAM [J]. Laboratory Research and Exploration, 2024, 43(2): 65-70.
- [19] 陶树林, 刘祚时, 唐雨. 基于 SLAM 物流移动机器人导航技术研究[J]. 机电工程技术, 2024, 53(6): 100-104.  
TAO SH L, LIU Z SH, TANG Y. Research on SLAM-based navigation technology for logistics mobile robots [J]. Electromechanical Engineering Technology, 2024, 53(6): 100-104.

### 作者简介

**梁天**, 硕士研究生, 主要研究方向为激光 SLAM 与路径规划。

E-mail: liangtian2233@163.com

**陈丽**(通信作者), 教授, 主要研究方向为机器人运动控制。

E-mail: cl200432@tom.com

**马转转**, 硕士研究生, 主要研究方向为路径规划与机器人控制。

E-mail: mzz25740971118@163.com

**董哲明**, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化检测。

E-mail: 13347120805@163.com

**孙中元**, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统智能监控。

E-mail: yuanzhongsun@126.com