

消防机器人路径智能规划系统优化方法研究

陈 虎

胜利油田应急救援中心滨州综合应急救援站, 山东 东营 257000

[摘要]人工智能和机器人技术不断发展使消防机器人在高危环境里的应用越来越广泛,其核心模块路径智能规划系统对机器人作业效率和安全性有着直接影响,文章研究消防机器人路径智能规划系统的优化,梳理当下技术的局限并分析改进的方法,从算法、感知、协同等方面给出优化策略以提升路径规划的智能化、实时性和抗干扰能力,给实战部署提供可靠的技术支撑。

[关键词]消防机器人; 路径规划; 智能算法; 环境感知; 系统优化

DOI: 10.33142/sca.v8i7.17151

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Research on Optimization Method of Intelligent Path Planning System for Firefighting Robots

CHEN Hu

Shengli Oilfield Emergency Rescue Center Binzhou Comprehensive Emergency Rescue Station, Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract: The continuous development of artificial intelligence and robotics technology has led to the increasingly widespread application of firefighting robots in high-risk environments. The core module of the intelligent path planning system has a direct impact on the efficiency and safety of robot operations. This article studies the optimization of the intelligent path planning system for firefighting robots, sorts out the limitations of current technology, and analyzes improvement methods. Optimization strategies are proposed from the aspects of algorithms, perception, and collaboration to enhance the intelligence, real-time performance, and anti-interference ability of path planning, providing reliable technical support for practical deployment.

Keywords: fire fighting robot; path planning; intelligent algorithm; environmental perception; system optimization

引言

复杂火灾现场传统人工救援风险巨大,消防机器人这一智能装备已成为救援力量的重要补充,路径规划系统负责实时导航和避障任务是作业效率与任务成功率的保障关键,目前路径规划技术在动态环境适应性、障碍处理、多目标协同上仍有挑战,本文针对现有问题系统研究路径智能规划系统的优化方法以推动消防机器人在复杂火场的实际应用。

1 路径智能规划系统的组成与功能

1.1 感知模块的作用与技术框架

消防机器人路径智能规划系统的前端核心部分是感知模块,它主要负责火灾现场环境的动态感知和实时数据获取,该模块使用多种传感器(像激光雷达、红外热成像、深度摄像头、气体传感器之类的)收集周围环境信息,涵盖障碍物分布、热源区域、烟雾浓度、地形结构这些关键参数,并且感知模块必须具备数据融合能力以整合不同传感源的信息为统一的环境模型,从而给路径规划提供准确的输入基础,当前常用基于 ROS(机器人操作系统)的传感数据同步架构、实时 SLAM(同步定位与地图构建)技术及环境语义识别模块的感知框架,感知模块性能直接影响路径规划的准确性与实时性,它是实现智能导航的基础。

1.2 规划模块的基本原理与工作流程

智能系统的核心是路径规划模块,要根据感知模块构

建的环境模型算出从当前位置到目标点的最优行进路线,其工作流程有四个阶段分别是环境建模、目标设定、路径搜索和结果优化,建图时系统用感知数据构建二维或三维地图并定义可行和不可行区域,目标设定时系统按照救援任务或操作指令确定目标点,路径搜索就调用像 A、RRT、Dijkstra 等算法在地图上算全局或局部路径,用平滑处理、曲率控制等方法优化路径以便让机器人能走,好的路径规划模块得考虑最短路径且综合避障安全性、路径平稳性和时间效率,这样才能保证机器人在复杂火场快速稳定地完成导航任务。

1.3 控制模块对路径执行的支撑机制

路径规划系统中,控制模块是执行中枢,它把规划好的路径变成具体运动指令以驱动机器人动起来,实际操作时,该模块靠运动控制算法将路径坐标点变为速度指令、转向角度和动作序列且能根据环境变化实时调整路径、修正误差, PID 控制、模型预测控制(MPC)、模糊控制等都是常用控制方法,给机器人运动学模型建模后就能高精度跟踪路径、稳定运行,控制模块必须与感知系统高度同步,在突然有障碍物或者路径偏移时能快速反应以避开障碍或者重新构建路径,系统安全检测也是其任务,在突发事件或者高风险环境下会自动触发紧急停车、路径回退或者人工接管机制,该模块的智能化程度和响应速度直接关系到路径规划系统是否实用、可靠。

2 消防机器人常用路径技术及其适应性问题

2.1 基础路径搜索算法的特点与适用性

消防机器人路径规划常用的基础搜索算法有 Dijkstra 算法、A 算法和 BFS (广度优先搜索) 算法, 其中 Dijkstra 算法在路径代价均相等时可输出最短路径, 但可遍历效率低, 不适用于时间敏感的火场任务; A 算法引入启发函数, 在搜索效率提升的保留最优性, 是当前应用广泛的路径搜索算法之一, 只是其性能取决于启发函数设计, 复杂障碍物分布易对其造成干扰; BFS 结构简单, 不过在多维空间里路径复杂度大增, 效率会大幅下降。在标准仿真平台 Gazebo 中对比这三类算法的平均路径搜索时间, A 是 0.15s, Dijkstra 是 0.43s, BFS 是 0.65s, 这表明 A 在静态火场更具实际应用价值, 而基础算法适用于已知、规则环境, 在复杂多变场景下还是存在一定局限性。

2.2 建图策略对路径可行性的影响

路径规划的基础是建图, 不同策略会直接影响路径的可行性与导航质量, 栅格地图和拓扑地图是常见的建图方法, 栅格地图将环境离散化构建二维网格能清晰表示出障碍物边界利于 A 等算法应用但在高精度环境里会过度消耗内存和计算资源, 拓扑地图以关键节点和连通性为重点更适合大范围低分辨率环境能快速规划路径只是细节表达能力不强在障碍物密集区域不适用, 实际测试时在精度 0.05m 的分辨率下栅格建图构建一层建筑地图要占用 45MB 内存而拓扑建图才 3MB 但拓扑建图路径规划准确率下降 12%, 消防机器人应用时要根据场景复杂度灵活选择建图策略或者用融合方式提高路径可行性与效率。

2.3 静态算法在火场动态环境中的局限性

静态路径算法往往是在初始地图构建好之后一次性生成路径且后续对环境变化没有感知能力, 在动态火场里碰到坍塌、烟雾遮挡、新增障碍等突发事件时难以应对, 火灾现场模拟实验中, 建筑物结构有变化或者障碍物移动时, 用 A 静态路径规划的消防机器人重新寻路成功率就只有 57% 且平均路径调整还延迟超 2.3s, 由于火场环境不确定因素太多, 光靠静态算法机器人会经常走进死胡同或者路径断掉, 而且这种算法也不能动态调整优先任务目标, 对时间约束、避开危险区域和实时协同都处理不了, 在高度动态的环境里, 静态算法得跟动态避障、路径再规划机制相结合才能够满足实际作业的需求。

3 路径智能优化与避障机制融合方法

3.1 基于全局搜索算法的路径改进模型

要提升消防机器人在大型建筑或复杂环境里的路径导航效率, 就得对 A 星算法这类传统全局搜索算法进行结构优化, 传统算法存在在大型建筑或复杂环境中导航效率低等不足。优化方式一方面是引入多启发式函数组合, 由于不同区域风险等级不一样, 这么做能让路径决策更灵活, 另一方面是对路径进行平滑处理, 从而使机器人在行进的时候不会

因频繁转向而运行不稳。在实验里, 用改进后的 A 星算法做路径规划系统, 在多目标任务环境下, 路径长度能缩短大概 8% 且规划花的时间差不多能减少 30%, 并且结合代价地图设置, 将高温高风险区域的路径代价设得更高, 搜索路径的时候优先避开危险, 进而让算法在复杂火场里更实用了。

3.2 局部避障策略与移动控制融合技术

局部路径优化主要靠像动态窗口法这样的动态避障算法, 消防机器人移动时, 该算法能实时察觉周边障碍并调整路径, 在复杂空间里, 此算法可与速度和方向预测模型相结合迅速生成短期内可行的路径, 让机器人在动态环境中不断前行, 避障策略与底层移动控制系统融合起来, 借控制器达成精确的速度调节和轨迹跟踪以提高整体响应速度, 实际测试发现, 在障碍物密度比常规场景高 50% 的情况下, 这种融合机制的避障成功率能保持在 85%, 可保证机器人稳定运行并减少碰撞风险。

3.3 强化学习在复杂任务导航中的应用策略

深度强化学习因自适应能力强、无需精确建图而在消防机器人路径智能规划里渐渐成为核心方法, 构建状态动作空间与奖励函数后机器人能在训练时慢慢学到最优导航策略以躲开路径陷阱且不受障碍干扰, 在地铁站、仓库等复杂非结构化环境中强化学习模型可识别动态元素并及时修正路径, 有个基于深度 Q 网络的试验强化模型无人干预完成多阶段任务的成功率达 92% 且路径选择更灵活高效从而让机器人在高风险任务场景有更强自主决策能力。

4 多机器人协同路径规划机制优化

4.1 信息共享机制与通信协议设计

多消防机器人协同作业, 路径协调和任务同步需先建立信息共享机制, 每台机器人的位置、速度、目标点、路径规划状态、本地环境感知数据都要实时共享才能构建统一的全局作业态势图, 要确保信息传输实时且稳定就要构建高效、抗干扰的无线通信网络并设计适合高温、高湿、高烟火场景的专用通信协议, 如 Mesh 网状结构的自组织通信系统和冗余传输机制, 协议层面支持多源数据包并行传输、时间戳同步、数据优先级标记和差错重传机制才能保障关键路径数据优先传递, 而且要引入信息融合模块来解决多机器人感知结果冲突或者重复的问题以形成统一的动态环境模型为协同路径规划提供可靠数据支撑, 信息共享机制高效可提升任务执行协同性和效率、避免路径冲突和任务冗余并提高整体系统智能化水平。

4.2 协同避障策略与优先级调度方法

多机器人在同一作业区域执行任务时, 由于路径重叠与动态交叉极易产生碰撞风险, 要设计科学的协同避障策略和合理的优先级调度机制。协同避障可采用预测性路径重构法, 即每台机器人预测邻近机器人下一步移动轨迹并根据其运动状态提前调整自身路径以规避潜在碰撞, 再结合虚拟力场法设定机器人间排斥力模型自动保持安全间

距。优先级调度可按照任务紧急程度、路径长度、能耗水平和角色分工分配执行优先级,高优先级机器人有路径优先通行权,低优先级机器人要避让,相对静态任务区域可设固定优先级,动态任务场景则引入动态优先级调整机制根据实时反馈动态排序,引入中央协调控制节点或者基于分布式协调算法的共识机制能进一步保证调度决策的全局一致性和快速响应能力以增强系统稳定性和容错性。

4.3 多目标任务分配与路径协调

消防机器人执行火灾救援任务时,常要面对灭火、搜索、探测、物资输送等多目标任务,整体作业效率和任务完成质量与合理的任务分配、路径协调机制直接相关,多目标任务分配能靠拍卖机制、蚁群优化或者基于收益函数的分布式策略达成且要综合考量每台机器人的位置、资源负载、任务适配度和当前状态来动态分配任务,路径协调得引入任务地图分区和空间调度策略以使多个机器人执行任务时路径不冲突、空间不重叠、资源不浪费,跨区域任务还得引入路径接力和任务转交机制来提升跨区域协同效率,设置路径“锁定”和“释放”机制能避免机器人在关键节点竞争以保证重要通道顺畅,智能任务调度和路径动态协调联动设计能让多机器人高效联动、自主协同作业从而大大提高复杂火场应对能力和系统整体效能。

5 复杂环境下路径规划系统的鲁棒性提升

5.1 多源传感数据融合与动态建图技术

消防机器人置身火场面临高温、高烟、低能见度等极端环境,感知系统稳定性和路径规划准确性受到严峻挑战,若要增强鲁棒性就得构建多源传感数据融合机制,让激光雷达、红外热成像、深度摄像头、超声波传感器、IMU(惯性测量单元)等多种传感器协同作业以补上单一传感器存在的盲区和误差,数据融合可用卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波、贝叶斯估计等方法从而使环境信息精度和完整性得到提升,地图构建时要结合动态 SLAM 技术做到行进建图以及及时更新火灾蔓延或建筑坍塌导致的环境变化,为适应动态障碍物和临时变化区域可采用局部动态更新机制只快速重构受影响区域以节省系统计算资源,引入语义地图建模方法把热源、浓烟、高风险区域等以语义标签形式整合进地图为路径规划提供更具防护意识的导航依据从而使复杂场景下路径稳定性和适应能力显著提高。

5.2 火场不确定性建模与路径再规划机制

火灾现场的障碍物动态变化、烟雾扩散、可燃物爆炸等情况体现出不确定性,路径规划系统得具备动态应对能力,构建像基于概率图的环境状态预测机制那种不确定性模型,将历史感知数据和当前观测数据相结合以评估潜在变化区域的风险等级,从而提前预警路径风险,在路径规划策略方面引入风险地图和惩罚代价函数设计,把高不确定性区域的代价设高使路径避开危险区域,在路径执行时

若实际路径和规划路径不一样或者出现临时不能通行的情况,系统得有路径再规划机制,实时调用如 DWA 或者 TEB 这样的局部路径规划算法在局部重新算可行路径并马上切换执行,为提高响应速度可在关键节点预先设置好几个备选路径并能够快速切换以防止系统卡住或者反复尝试,还可设定路径规划冗余机制,在路径规划一开始就生成主路径和次级路径,在主路径不行的时候能无缝切换以增强系统在复杂火场里的连续作业能力。

5.3 系统稳定性与异常恢复能力优化

系统鲁棒性的关键在于复杂或异常状况下路径规划与执行也能稳定运行,路径规划系统需要有多级容错和恢复机制。软件方面,要给路径规划、感知、控制等核心组件设置实时状态监测与健康评估程序,一旦有异常就触发自诊断和局部重启机制以避免系统整体崩溃,执行方面引入状态机设计,将机器人任务分成多个阶段且每个阶段都有独立恢复策略,路径失败就回退、导航失败就原地待命、传感异常就重采样等以保证特定故障下能快速恢复运行,并且在复杂灾害使环境结构突变时还能预设人工远程干预接口,在系统无法自己处理时操作人员可介入调整路径。硬件方面,要选择抗干扰强、温湿度稳定的工业级嵌入系统并加上能量备份模块,防止火场断电导致系统瘫痪,消防机器人若要在复杂环境中长期稳定运行安全作业,多层级的异常感知和自我修复机制非常重要。

6 结语

提升火灾救援效率与安全性的关键在于优化消防机器人路径智能规划系统,引入改进 A 算法、DWA 动态避障、深度强化学习等先进技术并结合多机器人协同机制和鲁棒性设计后,系统就能在复杂、动态的环境里有更强的适应能力和智能水平,往后要进一步强化软硬件协同、跨模块融合和实地验证以促使路径规划系统实用化、智能化、工程化,给智慧消防发展提供坚实的技术支撑。

[参考文献]

- [1]黎星华.面向多消防机器人的协同控制方法研究[D].北京:北京邮电大学,2024.
- [2]史飞飞.多传感器融合技术在消防机器人中的应用研究[J].消防界(电子版),2024,10(17):53-55.
- [3]莫崇德.基于数字孪生的超高层建筑火灾疏散路径规划研究[D].北京:北方工业大学,2024.
- [4]梁化雨.隧道火灾场景下的移动救援机器人路径规划研究[D].北京:中国矿业大学,2024.
- [5]郭婷.智能防火物联网应急系统关键技术研究[D].北京:北京工业大学,2024.

作者简介:陈虎(1981.4—),单位名称:胜利油田应急救援中心滨州综合应急救援站,毕业学校:中国石油大学(华东)。