

关于无人化复杂道路驾驶在高价值目标搜救中的应用研究

陈福强 杨玉涛 李欣 路余 于立辉 陈志敏

63628 部队, 河北 廊坊 065201

摘要: 特殊应急救援工程的持续发展对目标对象搜救保障体系提出了更高要求, 传统搜救作业模式在复杂野外道路环境中存在响应效率与机动灵活性的固有局限, 无人化复杂道路驾驶技术为搜救体系智能化升级提供了全新支撑。为适配高价值目标搜救应急保障核心需求, 本文开展该技术在高价值目标搜救领域的应用研究, 梳理作业场景特征与技术需求, 探究适配的核心技术体系, 完成辅助决策系统的设计与性能验证。经测试验证, 优化后的路径规划算法平均规划耗时低至 7.6ms, 复杂野外搜救场景下的车辆通行成功率达 94.7%, 可大幅压缩搜救路线动态调整的时间损耗, 有效适配应急搜救任务的强实时性需求。研究成果可弥补传统搜救模式短板, 提升高价值目标搜救体系应急响应能力, 为搜救体系智能化升级提供理论依据与技术路径。

关键词: 无人化复杂道路驾驶; 高价值目标搜救; 路径规划; 轨迹跟踪; 应急救援

DOI: 10.64649/yh.shfzykjcx.issn3078-8994.202609034

0 引言

特殊应急救援工程的持续发展对目标对象搜救保障体系建设提出了更高的标准与要求, 高价值目标搜救任务往往需要面对地形复杂、环境多变的陆地道路场景, 传统搜救作业模式在复杂道路环境与突发应急工况下, 存在响应效率、决策精准度与机动灵活性方面的固有局限。智能无人化驾驶技术是智能交通与人工智能领域深度融合的核心成果, 其成熟的路径规划、环境感知与自主运动控制技术体系, 能够高度适配高价值目标搜救任务的应急响应与快速机动需求, 为复杂道路环境下的搜救机动作业提供全新的技术支撑。姜路等人的研究针对复杂道路场景下的智能驾驶车道线检测技术开展了深度优化, 有效提升了非结构化道路的环境感知精度^[1]; 刘辉等人围绕复杂道路目标检测算法展开改进, 为无人驾驶障碍精准识别提供了成熟的技术支撑^[2]。但现有研究多聚焦于无人驾驶单一技术模块的优化, 针对目标搜救全流程的无人化驾驶技术体系与系统集成研究较为匮乏, 难以完全适配野外复杂搜救场景的强实时性、高可靠性实战要求。当前我国载人高价值目标搜救体系正处于智能化转型升级的关键阶段, 无人化复杂道路驾驶技术与高价值目标搜救应用场景的深度融合, 成为提升搜救体系应急响应能力、保障目标对象安全返回的重要研究方向, 相关技术的落地应用也将持续推动高价值目标搜救体系向自动化与智能化方向稳步发展。

1 复杂搜救场景下无人化复杂道路驾驶的应用基础

1.1 复杂搜救区域地面作业的场景特征

复杂目标搜救地面作业覆盖载人高价值目

标正常返回搜救场景搜救区域与应急返回搜救场景搜救区域, 作业区域多分布在地形地貌复杂的野外环境, 区域内路网结构稀疏, 非铺装路面占比高, 路面平整度与通行条件存在极强的不确定性。高价值目标出现位置存在随机偏差, 搜救作业的行驶路线无固定预设轨迹, 需要根据实时落点信息动态调整行进方向, 作业过程中还可能遭遇突发路况阻断、气象条件突变等不可预见因素, 对行驶路线的灵活性与适应性提出严苛要求。

搜救作业具备极强的时间紧迫性, 地面搜救单元需要在最短时间内抵达着陆现场, 行驶过程中需兼顾通行效率与行驶安全, 同时还要适配多搜救单元协同作业的编队行驶需求, 作业场景与常规城市道路、封闭园区的无人驾驶运行环境存在本质差异, 对复杂道路环境下的自主行驶能力形成了全面考验^[1]。

1.2 高价值目标搜救地面作业的核心技术需求

高价值目标搜救地面作业对无人化驾驶技术形成了多维度的核心需求, 需要技术体系适配野外非结构化道路的环境感知与通行能力如软硬戈壁、沙漠、梭梭林等无道路依托区域, 能够精准识别复杂地形下的可通行区域, 规避各类静态与动态障碍, 保障车辆在无标准车道路的路面上稳定行驶^[2]。需要具备全局路径的快速规划与动态重构能力, 能够结合实时落点信息与路况变化, 在大范围作业区域内快速生成最优通行路线, 并在路线受阻时完成无延迟的二次寻优, 始终保障搜救行进的最高效率。需要适配搜救任务的高可靠性要求, 构建具备强鲁棒性的轨迹跟踪与运动控制体系, 在复杂路面与极端工况下保持稳定的行驶控制精度, 同时实现与搜救指挥决策系统的深度融合, 能够接收指挥端的任务指令并同步作业态势, 支

撑多搜救单元的协同调度与联合作业,全面匹配高价值目标搜救任务的应急保障要求。全工况作业环境下,无人车辆行驶控制平均无故障工作时间不低于120h,复杂非铺装路面障碍识别准确率不低于98%,极端工况下行驶失效率低于0.1%,满足搜救全流程无中断作业要求。针对路径动态重构的无延迟需求,结合搜救任务分秒必争的核心特性,要求全局路径动态重规划响应时间不高于20ms,局部避障规划响应时间不高于10ms,突发路况下路线切换无明显迟滞,确保搜救行进效率始终处于最优状态。

2 面向高价值目标搜救的无人化复杂道路驾驶核心技术

2.1 全局路径规划优化技术

随着无人驾驶汽车智能化水平的不断提高,其运行范围越来越广,全局路径规划是高价值目标搜救无人化驾驶的顶层核心,直接决定搜救单元能否以最高效率抵达目标搜救场景搜救区域。该技术以搜救区域全要素地理信息为基础,构建适配野外复杂路网的交通网络拓扑图,将搜救待命点、道路交叉节点、目标预判区域转化为拓扑节点,以实际道路通行条件为依据建立节点间的关联关系,完整还原搜救区域的路网通行逻辑,精准匹配高价值目标搜救大范围、广域化的作业特征。基于改进的群智能优化算法,可在拓扑网络中生成多条覆盖不同通行路线的初始可行路径,突破传统单一路径规划的局限,同步完成多条局部最优路径的筛选与排序,适配高价值目标着陆点的随机偏差特性,为搜救路线预留充足的调整空间,应着陆预报动态更新带来的路线调整需求。

针对高价值目标搜救任务的应急特性,对传统人工萤火虫算法的亮度更新规则进行优化,构建适配搜救场景的荧光素更新公式:

$$l_i(t+1) = \gamma J(x_i(t))$$

式中 $l_i(t+1)$, $t+1$ 为时刻萤火虫 i 的荧光素值, γ 为荧光素更新率, $J(x_i(t))$ 为 t 时刻萤火虫 i 所处路径对应的目标函数适应度值,以路径通行总耗时为核心评价指标。

在此基础上,构建萤火虫在邻域集内的移动概率公式,如式(2)所示:

$$p_{ij}(t) = \frac{l_j(t) - l_i(t)}{\sum_{k \in N_i(t)} (l_k(t) - l_i(t))}$$

式中, $p_{ij}(t)$ 为 t 时刻萤火虫 i 向萤火虫 j 移动的概率, $N_i(t)$ 为萤火虫 i 的动态决策域邻域集,邻域集内仅包含荧光素值高于自身的萤火虫个体。

结合搜救任务的应急特性设计路径调优切换机制,可在实时落点预报更新后,快速完成不同路径的通行效率比对与最优路线切换,无需重新启动全区域路径搜索流程,最大限度压缩路线调整的时间损耗。针对搜救过程中突发

的道路阻断情况,设计的快速二次寻优算法可依托已生成的路径库,快速筛选可绕行的可行路线,在极短时间内完成全局路径的动态重构,彻底规避传统算法重新规划带来的时间损耗,始终保障搜救行进路线的最优性与时效性,契合高价值目标搜救任务分秒必争的核心要求。

2.2 局部动态避障规划技术

局部动态避障规划是无人化车辆在复杂野外道路中安全稳定行驶的核心支撑,直接决定车辆对突发路况与未知障碍的应对能力。该技术以模型预测控制为核心框架,结合车辆自身的运动学特性与执行机构约束,构建适配非结构化道路的局部路径规划体系,可在全局路径的基础上,根据实时感知的环境信息完成局部行驶路线的动态生成如毫米波雷达、激光雷达、3D地理信息系统兼顾了全局搜救路线的贴合度与局部行驶的安全性。针对野外道路无标准车道线、障碍形态不规则的特点,采用多圆近似方法完成车辆本体与各类障碍物的等效建模,并结合复杂地形与车身通过性相匹配的算法大幅简化车辆与障碍间最短距离的计算流程,提升避障判断的响应速度,适配野外环境中障碍形态多样、分布无规律的特征。通过多项式拟合方法完成可通行区域的边界拟合与曲率求解,精准判别路面的凹凸性与通行条件,为局部路径生成提供精准的几何参考,同时适配直道通行、弯道减速、障碍规避、多车编队跟驰等搜救作业典型场景,针对不同场景构建对应的目标函数,将避障安全、行驶平顺性、路线贴合度纳入优化目标,在保障车辆不偏离全局搜救路线的前提下,完成各类静态与动态障碍的平稳规避,确保车辆在复杂野外环境中始终保持安全、连续的行驶状态,满足多搜救单元协同作业的编队行驶需求。

2.3 轨迹跟踪实时控制技术

轨迹跟踪实时控制技术是无人化驾驶系统的底层核心,决定了规划路径能否被精准执行,直接影响搜救车辆在软硬戈壁、沙漠、梭梭林等复杂地表环境的行驶稳定性与控制精度。该技术构建前馈控制与模型预测控制柔性结合的控制方案,以前方规划路径的航向角变化为基础,生成对应预测时域的前馈控制量,为车辆转向与速度控制提供基础参考,大幅降低控制算法的求解难度,弥补传统闭环控制在复杂路面响应滞后的短板。将前馈控制输出的控制量作为群智能优化算法的参考基准,以此为核心划定优化求解域,大幅缩小算法的搜索范围,减少优化求解所需的粒子数量与迭代次数,在保证控制精度的前提下,大幅缩短单次优化求解的时间,完美适配搜救车辆高速行驶过程中的实时控制需求^[3]。针对车辆行驶过程中的多维度约束条件,采用广义拉格朗日乘子法构造广义代价函数,将带约束的控制优化问题转化为无约束问

题，简化求解流程的同时保障控制量始终处于车辆执行机构的合理区间，契合搜救车辆野外行驶的物理极限与安全要求。结合量子粒子群算法的全局搜索能力完成并行化设计，进一步提升优化求解的效率与全局最优性，有效规避传统算法易陷入局部最优的问题，在复杂路面与极端工况下，依然能够保持对规划路径的高精度跟踪，保障搜救车辆在各类复杂道路环境中稳定、高效行驶，为搜救任务的顺利推进提供底层控制保障。经测试验证，该控制方案可实现复杂非铺装路面下横向位置跟踪偏差不大于 $\pm 0.3\text{m}$ ，航向角跟踪偏差不大于 $\pm 0.5^\circ$ ，高速行驶工况下仍可保持稳定的跟踪精度，完全满足搜救车辆野外高速机动的控制要求。

3 无人化复杂道路驾驶在复杂目标搜救中的系统集成与验证

3.1 复杂搜救任务无人驾驶辅助决策系统设计

复杂搜救无人驾驶辅助决策系统以高价值

表 1 不同路径规划算法在高价值目标搜救场景下的性能对比

算法类型	平均规划耗时 (ms)	路径最优性 (偏差率 %)	动态重规划响应时间 (ms)	复杂场景通行成功率 (%)	工程落地性
传统 A* 算法	45.2	8.3	128.6	72.5	优
传统人工萤火虫算法	89.7	3.1	76.3	85.2	良
改进人工萤火虫算法	7.6	2.8	18.5	94.7	优
模型预测控制融合算法	32.4	5.6	22.1	98.3	良

注：测试数据基于高价值目标搜救区域仿真环境获取，路径最优性以理论最短路径为基准计算偏差率，复杂场景包含非铺装路面、突发障碍阻断、弯道等搜救典型工况，工程落地性根据算法代码实现难度、硬件适配性综合评定。

3.2 系统性能测试与应用验证

系统性能测试分为仿真环境验证与实际任务场景验证两个阶段，全面检验系统在高价值目标搜救典型工况下的运行稳定性与技术性能。仿真测试阶段搭建适配高价值目标搜救区域环境的数字仿真平台，还原野外复杂道路、非铺装路面、突发障碍阻断等典型搜救场景，对系统的路径规划精度、动态重规划响应速度、多车协同控制能力开展系统性测试，重点验证不同算法在搜救场景下的实际性能表现，完成系统功能的全维度调试与参数优化。实际场景验证依托特殊应急救援飞行任务的搜救联试与实战任务开展，将系统接入搜救指挥体系，在主搜救区域与应急搜救场景搜救区域开展全流程搜救作业验证，检验系统在真实野外复杂道路环境下，对无人搜救车辆的行驶控制效果与决

策支撑能力^[4]。测试过程中，将辅助决策系统全面接入搜救指挥体系，实现与指挥中心、无人搜救车辆的全链路数据实时交互，全流程验证系统的路径规划、动态重规划、轨迹跟踪控制与多车协同调度能力，累计完成有效测试轮次超 40 次。验证结果表明，系统可稳定实现高价值目标落点预报数据的实时接收与处理，快速生成适配复杂道路环境的搜救行驶路线，无人车辆可精准完成规划路径的跟踪行驶与突发障碍的平稳规避，多车协同作业模式下可保持稳定的编队行驶状态，系统运行稳定可靠，各项性能指标均满足高价值目标搜救任务的实战要求，可有效提升搜救作业的响应效率与智能化水平，为载人高价值目标搜救体系的智能化升级提供了可落地的系统解决方案。

4 结论

本文围绕无人化复杂道路驾驶技术在复杂搜救领域的应用展开系统研究，梳理了高价值目标搜救地面作业的场景特征与核心技术需求，深入探究了适配搜救应急场景的三大核心技术体系，完成了复杂目标搜救无人驾驶辅助决策

系统的架构设计与全维度性能验证。研究成果可为载人复杂目标搜救任务提供成熟的智能化技术支撑,有效弥补传统搜救模式的固有短板,提升复杂目标搜救体系的应急响应能力与作业

效率,为复杂目标搜救体系智能化转型升级提供理论依据与技术路径,也为该技术在特种应急救援领域的深度拓展应用奠定了研究基础。

参考文献:

- [1] 娄路,胡振坤,魏文洁,等.复杂道路场景下智能驾驶单目 3D 车道线检测[J].计算机应用研究,2025,42(12):3807-3814.
- [2] 刘辉,刘鑫满,刘大东.面向复杂道路目标检测的 YOLOv5 算法优化研究[J].计算机工程与应用,2023,59(18):207-217.
- [3] 邓资文,陈智,马幸,等.基于灰色层次分析法的高价值目标搜救行动能力评估[J].舰船电子工程,2021,41(06):124-127.
- [4] 葛亚华,卞韩城,李振海,等.空间站工程搜救区域目标对象应急搜救体系建设研究[J].特殊应急救援,2013,19(04):23-29.

作者简介: 陈福强(1986.11—),男,汉族,山东德州人,工程师,本科,研究方向:搜索救援。