

校地共建视角下消防探测救援机器人多源数据融合与协同控制技术研究——以绵阳市为例

万博文, 张彬渝, 刘雨静

西南财经大学天府学院, 四川 绵阳 621000

DOI: 10.61369/SDME.2026040041

摘 要 : 针对消防救援中复杂环境探测难、应急决策效率低、设备协同性不足等问题, 本文以绵阳市校地共建消防救援新生态为背景, 开展消防探测救援机器人多源数据融合与协同控制技术攻关。通过分析绵阳市典型灾害场景特征与实战需求, 设计适配丘陵平原过渡地带的技术框架, 研发鲁棒性多源数据融合算法与动态协同控制体系, 构建 "需求驱动联合攻关成果转化" 的校地协同机制。研究结果为消防救援机器人技术国产化、场景化应用提供支撑, 为校地共建公共安全技术创新体系打造可复制的实践模式。

关 键 词 : 校地共建; 消防探测救援机器人; 多源数据融合; 协同控制; 智慧消防

Research on Multi-Source Data Fusion and Cooperative Control Technology of Fire Detection and Rescue Robots from the Perspective of University-Local Co-Construction——A Case Study of Mianyang City

Wan Bowen, Zhang Binyu, Liu Yujing

Tianfu College of SWUFE, Mianyang, Sichuan 621000

Abstract : Aiming at the problems such as difficulty in detecting complex environments, low efficiency of emergency decision-making, and insufficient equipment coordination in fire rescue, this paper conducts technical research on multi-source data fusion and cooperative control of fire detection and rescue robots under the background of the new ecology of university-local co-constructed fire rescue in Mianyang City. By analyzing the characteristics of typical disaster scenarios and actual combat needs in Mianyang City, a technical framework adapted to the hilly-plain transition zone is designed, a robust multi-source data fusion algorithm and a dynamic cooperative control system are developed, and a university-local collaborative mechanism of "demand-driven joint research and achievement transformation" is constructed. The research results provide support for the localization and scenario-based application of fire rescue robot technology, and create a replicable practical model for building a public safety technology innovation system through university-local co-construction.

Keywords : university-local co-construction; fire detection and rescue robots; multi-source data fusion; cooperative control; smart fire protection

引言

随着城市化进程加快与极端灾害天气频发, 火灾、地震坍塌、化工泄漏等灾害事故的突发性、复杂性与破坏性显著提升, 传统人工消防救援模式面临高温、浓烟、有毒气体等极端环境的多重挑战^[1]。消防探测救援机器人作为智慧消防的核心装备, 能够替代消防员进入危险场景完成环境探测、灾情评估、应急处置等任务, 是提升灾害救援效率、降低人员伤亡的关键技术手段^[2]。

校地共建作为推动科技创新与成果转化的重要模式, 能够有效整合高校科研资源与地方实战需求, 打破 "产学研用" 脱节的壁垒^[3]。绵阳市作为川渝地区重要的工业城市与丘陵平原过渡地带, 面临地震次生火灾、山地森林火灾、城市建筑火灾等多元灾害风险, 现有消防救援机器人在复杂地形适配、多灾种数据处理、校地协同应用等方面存在明显缺口。基于此, 西南财经大学天府学院与绵阳市消防救援支队开展校地共建合作, 聚焦实战需求, 开展消防探测救援机器人多源数据融合与协同控制技术研究, 旨在形成适配区域灾害特征的一体化解决方案, 构建校地协同的消防救援新生态。

基金项目: 西南财经大学天府学院2025年“校地共建”专项项目《校地共建消防救援新生态: 绵阳市消防探测救援机器人多源数据融合与协同控制技术研究》(XCTF2025ZC10) 结项成果。

一、国内外研究现状与问题剖析

（一）国外研究现状与技术特征

消防探测救援机器人技术在国外起步较早，美国、日本、欧盟等已形成较为成熟的技术体系，核心研究集中于多源数据融合与协同控制两大方向^[4]。在多源数据融合方面，美国 iRobot 公司研发的 PackBot 救援机器人集成激光雷达、视觉摄像头、红外传感器等多模态传感器，通过扩展卡尔曼滤波、粒子滤波等算法实现环境地图构建与定位；日本千叶工业大学的 RescueRobot 通过深度相机与惯性导航系统的融合，实现地震废墟场景的三维地形建模；欧盟 SAFER 项目依托区块链技术构建去中心化数据平台，实现多机器人协作中的数据安全传输。

在协同控制方面，美国卡内基梅隆大学提出分布式任务分配算法，实现多机器人在灾害场景中的自主分工；德国慕尼黑工业大学研发的集群机器人协同系统通过一致性算法实现多机器人编队控制^[5]。但现有技术仍存在局限：复杂环境下多源数据融合精度易受粉尘、电磁干扰影响；协同控制依赖预设规则的集中式模式，难以应对动态变化的灾情；人机协同机制不完善，与消防指挥系统存在“信息孤岛”。

（二）国内研究现状与发展短板

我国消防探测救援机器人研究起步于 21 世纪初，在“智慧消防”政策推动下，技术研发取得显著进展^[6]。在多源数据融合方面，清华大学提出基于深度学习的多模态数据融合模型，通过卷积神经网络融合视觉、热成像与气体浓度数据；哈尔滨工业大学研发的复合导航系统结合 UWB 定位、视觉 SLAM 与惯性导航，解决了室内复杂环境下的定位漂移问题。在协同控制方面，中国科技大学提出基于强化学习的协同决策算法；上海交通大学研发的异构机器人协同系统支持消防机器人与无人机、无人车的跨平台协作^[7]。

但与国外相比，国内研究仍存在三大短板：一是核心算法自主创新不足，部分算法依赖国外开源框架；二是实战数据积累匮乏，真实灾害场景下的机器人运行数据采集与标注体系尚未完善；三是校地协同深度不够，高校科研成果与消防实战需求存在“技术转化鸿沟”。

（三）本土化研究缺口与绵阳市特殊需求

结合国内外研究现状，消防探测救援机器人技术仍存在共性瓶颈：动态复杂环境下异构数据的时空配准、噪声抑制与鲁棒性融合算法有待突破；多机器人在任务分配、路径规划中的实时性与自适应性不足^[8]。而绵阳市作为丘陵与平原过渡地带，现有技术存在明显的本土化适配缺口：一是复杂地形导航难度大，丘陵地区的非结构化路面对机器人移动底盘与定位系统提出更高要求；二是多灾种协同处置能力不足，地震引发的次生火灾、化学品泄漏等复合灾害场景中，多源数据的跨模态关联分析技术尚属空白；三是校地协同机制不完善，缺乏“消防实战需求高校技术研发产品迭代优化”的闭环反馈体系。

二、研究方法与技术框架设计

（一）核心研究方法

本研究以校地共建为依托，采用需求驱动的实地调研法与校

地协同的实证验证法相结合的研究思路：

1. 实地调研法：联合绵阳市消防救援支队开展地震废墟、化工园区、城市综合体等典型灾害场景的实地踏勘，采集温度、粉尘浓度、地形复杂度等环境参数，分析绵阳市近十年灾害事故数据，建立灾害场景数据库与需求指标体系。

2. 实证验证法：在绵阳市消防训练基地搭建模拟灾害环境，开展机器人技术原型的反复测试与优化；组建由高校科研人员、消防指战员、行业技术人员构成的跨领域团队，定期召开需求对接会与技术研讨会，确保研发方向与实战需求高度契合。

（二）整体技术框架设计

针对绵阳市消防救援的实际需求，本研究设计“多源数据采集边缘端轻量化融合云端协同决策终端设备执行”的全链条技术路线，构建包含传感器子系统、数据融合子系统、协同控制子系统、人机交互子系统的一体化技术框架：

1. 传感器子系统：筛选耐高温（ $\geq 60^{\circ}\text{C}$ ）、抗粉尘（IP67 防护等级）的多模态传感器组合，包括固态激光雷达、非制冷红外焦平面探测器、PID 气体传感器等，实现地形、温度、气体浓度、火源位置等多维度信息的全面采集。

2. 数据融合子系统：部署边缘计算模块与云端计算平台，边缘端实现传感器数据的实时滤波、特征提取与局部地图构建，通过 5G/ 专网将关键信息传输至云端；云端基于深度学习算法实现多源异构数据的鲁棒性融合，完成灾情精准评估。

3. 协同控制子系统：构建“消防指挥系统多机器人传感器网络”的三级协同架构，研发动态任务分配与路径规划算法，实现多机器人在复杂灾害场景中的自主协作、避障导航与任务协同。

4. 人机交互子系统：开发可视化消防指挥平台，实现灾情数据、机器人状态、救援进度的实时展示，支持消防员与机器人的双向信息交互。

三、核心研究内容与技术攻关方向

（一）绵阳市典型灾害场景需求分析与指标体系构建

本研究梳理绵阳市典型灾害类型，包括地震次生火灾、山地森林火灾、化工企业泄漏火灾、城市综合体火灾等，解析各灾害场景的环境特征：地震次生火灾存在建筑坍塌、地形复杂、信号遮挡等问题；山地森林火灾存在地形崎岖、火势蔓延快、环境参数多变等特征；化工泄漏火灾存在有毒气体扩散、爆炸风险高、高温腐蚀等挑战^[9]。通过实地调研，明确核心技术指标：定位精度 $\leq 0.5\text{m}$ 、任务分配延迟 $\leq 2\text{s}$ 、浓烟环境（能见度 $<1\text{m}$ ）火源识别误差 $\leq 0.3\text{m}$ 、有毒气体检测响应时间 $<5\text{s}$ 、传感器工作温度范围 $20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 。

（二）消防探测救援机器人多源数据融合技术研发

多源数据融合技术的核心目标是解决复杂灾害环境下数据失真、信息冗余、融合精度低等问题，本研究从三个方面开展技术攻关：

1. 多模态传感器选型与部署优化：针对绵阳市灾害场景的环境特征，筛选高适应性、高可靠性的传感器组合；采用分布式传感器阵列布局，兼顾水平与垂直方向的探测范围，通过能耗优化算法实现传感器的智能启停。

2. 动态环境下的鲁棒性融合算法研发：提出基于注意力机制的多模态数据融合模型，通过自注意力网络动态分配不同传感

器数据的权重，在浓烟、低光照等恶劣环境中，自动提升红外传感器与激光雷达的权重，降低视觉传感器的干扰；开发自适应噪声抑制算法，结合实时采集的粉尘浓度、电磁干扰强度等环境参数，动态调整融合模型的滤波参数。

3. 边缘计算驱动的轻量化数据处理：在机器人终端部署边缘计算模块，搭载轻量化的神经网络模型，实现传感器数据的实时处理与特征提取；仅将关键特征数据与决策需求数据传输至云端，大幅减少数据传输量与通信延迟。

（三）多机器人协同控制技术体系构建

针对绵阳市灾害场景的动态性与复杂性，本研究构建动态自适应的多机器人协同控制体系：

1. 分布式任务分配算法：采用基于强化学习的分布式任务分配模型，将消防救援任务分解为环境探测、火源定位、人员搜救、物资运输等子任务，多机器人通过智能体间的信息交互，根据自身状态、环境特征与任务需求，自主完成任务分工与动态调整。

2. 实时路径规划算法：研发基于改进 A* 算法的实时路径规划算法，引入地形复杂度、火势蔓延速度、障碍物动态变化等约束条件，实现多机器人的避障导航与最优路径规划；设计编队控制算法，支持多机器人在森林火灾、大面积建筑火灾等场景中的编队探测与协同处置。

3. 标准化人机协同交互机制：设计消防指挥系统与多机器人之间的标准化数据接口与通信协议；开发可视化的人机交互平台，消防员可通过平台实时获取多机器人的状态数据与灾情探测数据，同时下达远程操控指令与任务调度指令。

（四）校地协同的技术验证与成果转化机制构建

本研究以校地共建为核心，构建“需求导向技术攻关应用验证成果转化”的闭环研究机制：

1. 需求导向的研发机制：由绵阳市消防救援支队提出实战需求与技术指标，高校科研团队围绕需求开展技术攻关，建立常态化的需求对接机制。

2. 校地协同的验证机制：在绵阳市消防训练基地搭建模拟灾害场景，校地双方联合开展机器人技术原型的反复测试与优化，结合真实灾害救援案例进行技术迭代。

3. 全链条的成果转化机制：依托校地合作平台，推动技术成果的产品化与工程化，研发适配绵阳市消防救援需求的消防探测救援机器人原型机；建立技术成果的迭代优化机制，根据试点应用中的反馈问题持续完善技术方案。

四、拟解决的关键问题与实施措施

（一）拟解决的核心关键问题

本研究针对绵阳市消防救援的实际需求，重点解决三大核心问题：

1. 复杂灾害环境下多源数据融合的鲁棒性与实时性问题：解决高温、浓烟、粉尘及电磁干扰等环境中，多模态传感器数据时空配准精度低、噪声干扰导致特征提取失效、云端集中处理延迟高等问题。

2. 多机器人协同控制的动态适应性与任务冲突问题：解决现有多机器人协同系统在复杂灾害场景中任务分配僵化、路径规划

冲突、人机协同机制缺失等痛点。

3. 校地协同中技术研发与实战需求的“转化鸿沟”问题：解决高校消防机器人研究与地方消防实战需求脱节、缺乏本土化灾害场景运行数据、技术成果难以落地应用等问题。

（二）针对性实施措施

1. 针对多源数据融合问题：采用“边缘计算 + 云端计算”的分层处理模式；研发基于注意力机制的自适应融合算法与噪声抑制算法；通过实地调研采集绵阳市本土化灾害场景的环境参数，建立专属数据集。

2. 针对协同控制问题：采用分布式控制架构替代传统集中式架构；研发基于强化学习的动态任务分配算法与改进 A* 路径规划算法；设计标准化的人机交互接口与通信协议。

3. 针对校地协同转化问题：组建校地跨领域研究团队；建立常态化的沟通交流与需求对接机制；在绵阳市消防训练基地与实际救援场景中开展技术验证，根据实战反馈持续优化技术方案。

五、结论与展望

消防探测救援机器人是提升灾害应急救援能力、保障人民生命财产安全的核心科技装备。本研究以绵阳市校地共建消防救援新生态为背景，针对绵阳市丘陵平原过渡地带的多元灾害特征与消防救援实战需求，开展消防探测救援机器人多源数据融合与协同控制技术研究，设计了适配区域灾害特征的一体化技术框架，研发了鲁棒性多源数据融合算法与动态自适应协同控制体系，构建了“产学研用”深度融合的校地协同研究机制。

未来研究可从三个方面进一步深化：一是结合 5G、北斗导航、数字孪生等新一代信息技术，提升消防探测救援机器人的智能化水平与远程协同能力；二是开展多灾种、多场景的消防救援机器人技术验证与迭代优化；三是进一步深化校地共建与产学研融合，推动消防探测救援机器人技术的产业化发展与规模化应用。

参考文献

- [1] 应急管理部消防救援局. 中国消防救援发展报告 (2024)[R]. 北京：应急管理出版社，2024.
- [2] 李刚，王健. 消防救援机器人的发展现状与关键技术研究 [J]. 机械设计与制造，2022(05):263267.
- [3] 王艳芬，李建军. 校地共建视角下科技创新与成果转化模式研究 [J]. 科技管理研究，2021,41(18):17.
- [4] Nourbakhsh R, Sycara K, Lewis M. Rescueroobotics: current challenges and future directions [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(4): 2026.
- [5] 陈俊龙，杨明. 国外消防救援机器人协同控制技术研究进展 [J]. 机器人技术与应用，2022(03):5663.
- [6] 应急管理部沈阳消防研究所. 消防侦察机器人技术白皮书 (2023)[R]. 沈阳：应急管理部沈阳消防研究所，2023.
- [7] 清华大学智能装备研究院. 消防机器人多模态数据融合技术研究报告 (2022)[R]. 北京：清华大学出版社，2022.
- [8] 王磊，刘军. 复杂环境下消防救援机器人多源数据融合技术研究 [J]. 传感技术学报，2023,36(07):10211027.
- [9] 周建亮，方俊. 丘陵地区消防救援机器人的地形适配性设计与研究 [J]. 中国安全生产科学技术，2024,20(02):156162.
- [10] 刘金硕，黄强. 基于强化学习的多消防机器人协同任务分配算法 [J]. 控制与决策，2023,38(09):22132220.