

多元信息融合的消防员险情识别与定位系统分析

林 灵 朱 江

应急管理部上海消防研究所 上海 200030

摘要: 随着城市化进程的加速, 各类火灾及灾害事故频发, 消防员在执行任务时面临着极高的风险。多元信息融合的消防员险情识别与定位系统应运而生, 成为提升消防员安全保障和救援效率的关键技术。本文深入分析该系统, 阐述其原理、架构、关键技术以及在应急管理中的重要作用, 结合实际案例探讨应用效果, 并对未来发展趋势进行展望, 旨在为应急管理部门和消防救援工作提供有益参考。

关键词: 多元信息融合; 消防员; 险情识别; 定位系统

引言:

国家消防救援局肩负着防范化解重大安全风险、及时应对处置各类灾害事故的重要职责。消防员作为灾害救援的主力军, 其生命安全至关重要。在复杂多变的灾害现场, 准确识别消防员面临的险情并实时定位他们的位置, 是保障救援行动高效开展、降低消防员伤亡的关键。传统的救援方式在面对现代复杂灾害时存在诸多局限性, 而多元信息融合技术的发展为消防员险情识别与定位提供了新的解决方案。通过整合多种来源的信息, 如传感器数据、通信信号、地理信息等, 能够更全面、准确地掌握消防员的实时状态和位置信息, 从而实现更科学、高效的救援指挥。

一、多源信息融合的消防员险情识别与定位系统原理

(一) 多源信息采集

系统通过多个传感器采集信息, 如心率传感器、体温传感器等生理参数传感器, 可用于实时监测消防员的心率、体温等生理指标。特别是在高强度灭火救援行动中, 消防人员心率会大幅度上升, 正常情况下静息心率在60-100次/分钟之间, 在火灾现场时, 由于环境压力与心理压力, 心率可能超过150/分钟, 通过监测心率变化即可判断消防员的疲劳程度、心理应激状态。

环境参数信息传感器可用于检测火灾现场的温度、烟雾浓度、有害气体浓度等环境信息。例如, 通过一氧化碳传感器实时监测现场的一氧化碳浓度, 一旦浓度超过50ppm就可能威胁到人身安全与健康, 而达到1000ppm以上时, 短时间即可致人昏迷, 甚至死亡, 及时采集这些信息可帮助消防员提前做好防护措施^[1]。

位置信息则通过全球定位系统(GPS)、室内定位技术(如蓝牙定位、Wi-Fi定位、超宽带定位等)来获取。在室外开阔区域, GPS定位精度可达5-10m, 在室内复杂环境中, 超宽带定位技术精度可达到10-30cm, 有效弥补了GPS信号在室内的不足, 能够满足消防员大致位置定位需求。

(二) 多源信息融合

采用数据层融合、特征层融合、决策层融合等多种融合措施。其中, 数据层融合可直接采集原始数据, 并对其融合处理。例如, 将来自不同传感器的温度数据合并分析, 用于提升温度监测精度。特征层融合从原始数据中提取特征信息, 将特征信息进行融合, 如从生理参数、环境参数中提取能反映消防员疲劳、危险状态的特征量, 并对这些信息综合分析。决策层融合是对各类传感器进行独立的处理与决策, 将这些决策结果信息融合, 如不同类型传感器分别判断消防员是否处于危险状态, 并根据最终的判断信息得出最终结论。

二、多源信息融合的消防员险情识别与定位系统架构

(一) 感知层

感知层由多类传感器组成, 分布在消防员的个人装备以及救援现场环境中, 感知层作为整个系统的“神经末梢”, 是信息采集的源头, 为消防员搭建起全方位的感知网络。除了有头盔、防护服、手套等基础防护, 在靴子中也可嵌入压力传感器, 用于监测消防员在行走、攀爬等动作时的受力状况, 从而分析其行动状态、疲劳程度。当消防员长时间负重行走, 靴子内压力传感器反馈的数据变化, 就能为判断其体能消耗提供依据。据研究测试表明, 单一压力数据可能受个体差异或环境干扰影响, 但结合加速度

传感器（监测步频、步态）和温湿度传感器（评估靴内微环境）可显著提高疲劳识别的准确性^[2]。通过算法优化，采用机器学习（如PNN神经网络）或信号处理技术（如FFT滤波）可有效区分疲劳与非疲劳状态，部分研究报道的分类准确率可达75%甚至更高。^[2]

（二）网络层

网络层用于传输传感器的数据，在4G/5G通信网络的基础上，还可以采用低功耗广域网（LPWAN）技术。该技术如LoRa、NB-IoT等，具有覆盖广、低功耗、低成本等特性，特别是适用于灾害现场中一些对数据传输不高，但需要长期稳定连接的传感器数据传输。例如在森林火灾救援中，大量分布在周边区域用于监测火势蔓延、环境温湿度的传感器，通过LoRa技术组成自组网，能够将数据稳定传输回指挥中心，即便在偏远山区信号薄弱的情况下，也能保障数据传输的可靠性，数据传输成功率可达90%以上^[3]。

（三）数据处理与分析层

在数据处理与分析层中融入大数据技术以及人工智能算法。采用分布式存储与并行计算技术，系统可快速对海量传感器数据有效处理。在火灾救援中，每分钟可能产生数千条各类传感器数据，借助大数据处理平台，可在数秒内完成数据清洗、分类、预处理。同时，机器学习算法通过不断学习、优化，结合消防员历史数据以及现场实时采集数据，搭建更加精准的风险预测模型。通过对消防员在各类火灾场景下的生理参数、环境因素等数据深度学习，预测消防员将会出现的热射病等危险状况。

（四）应用层

应用层直接面向应急指挥人员、消防作战员，可直接呈现系统的所有功能。在应急指挥人员方面，操作系统界面的可视化地图，除了能清晰看到消防员实时所在位置，还可以叠加显示现场环境信息，如温度分布、烟雾扩散范围等，从而做出精准决策。在火灾救援中，指挥人员通过应用层界面，结合消防员位置、现场有毒气体的扩散信息，灵活调节救援策略部署，避免消防员进入到高风险区域，保障消防员救援安全。消防员佩戴智能终端，可接收到简明的指令以及预警信息，实践操作十分简单，可保证在复杂的救援环境下快速获取关键信息，提升任务执行效率。

三、多源信息融合的消防员险情识别与定位系统的关键技术

（一）传感器技术

传感器性能优劣会直接影响系统对消防员状态及周边环境判断的精准性。在生理参数传感器方面，穿戴新型生物电传感器手环，该设备通过非入侵方式，精准采集消防员的心率、体温、血氧等各类生物信号，深度分析消防员身体机能状态^[4]。

通过手环采集数据，对心电图进行分析，除了能监测心率，还可以检测出心肌缺血等潜在健康隐患。在模拟高强度救援场景实验中，该设备对心肌缺血状态检测精准度达到90%以上，相比传统的心率手环，可提供更加全面的生理健康信息。

在环境参数传感器方面，针对火灾现场的复杂环境，多参数复合传感器头戴芯片应运而生，该头盔可实时检测温度、湿度、烟雾浓度、多种有害气体浓度等多个环境指标。若使用纳米材料敏感元件，对一氧化碳、硫化氢等有害气体的检测下限可达1ppm，响应时间小于5s，能够快速、准确地反馈火灾现场的危险环境信息，为消防员及时采取防护措施争取宝贵时间。

（二）定位技术

室外融合定位技术一直是消防领域重点应用方向。在室外开阔区域，GPS定位技术凭借其广泛覆盖与成熟的应用体系，可为消防员提供精准的位置信息。但在城市高楼林立或复杂室内环境中，GPS信号可能受到遮挡物影响而减弱或中断。超带宽（UWB）定位技术以其高精度、抗干扰性强等特点，有效补充了室内定位功能。为了实现高精度、无缝的定位切换，可将UWB与惯性导航技术相结合。惯性导航系统通过加速度计、陀螺仪实时测量消防员运动加速度以及角速度，推算位置变化。在消防员从室外进入室内GPS信号消失时，惯性导航系统可快速切换，持续提供位置信息，直至UWB信号稳定捕获。在实际测试中，该融合方案在室内复杂环境下的定位精度可达15cm以内，保证了消防员在复杂环境中的位置追踪精度，有效提升了救援行动的安全性、效率^[5]。

（三）信息融合算法

信息融合算法作为系统处理多元信息的核心，可将来自不同传感器的信息有效整合，得出更加可靠、精准的判断依据。传统的D-S证据理论算法处于多传感器信息融合中，存在冲突信息处理能力有限、计算量大等问题。对此，需采用一系列的改进算法。例如，基于加权分配的改进D-S证据理论算法，该算法可根据不同传感器可靠性、重要性，为其分配不同权重。在火灾现场，温度传感器、有害气体传感器用于判断消防员危险状态，并合理分配权重，能够使融合结果更准确地反映实际情况。实验表明，采用这种改进算法后，险情识别的准确率相比传统算法提高了15%，有效减少了误判和漏判的情况，为消防员的安全保障提供了更坚实的技术支撑。

四、多源信息融合的消防员险情识别与定位系统的应用实践

（一）概况

以某城市的一起高层建筑火灾事故为例，该城市消防

部门全面应用了多元信息融合的消防员险情识别与定位系统，为救援行动提供了强大的技术支持，极大程度上改变了传统救援模式的局限性，显著提升了救援效率和安全性。火灾发生在一栋50层的商业写字楼，火势迅速蔓延，大量人员被困，情况万分危急。消防员抵达现场后，迅速投入救援。

（二）实际应用

消防员投入救援后，系统的感知层迅速发挥作用，消防员佩戴的状态传感器即可启动。头盔中的温度传感器实时监测外部环境温度，在火灾现场核心区域，温度飙升至80℃以上；心率传感器捕捉到消防员因高强度作业和紧张环境，心率普遍维持在160次/min左右，远超正常水平。这些生理和环境数据通过网络层，以毫秒级的速度传输至指挥中心的数据处理与分析层。数据处理与分析层借助先进的算法对海量数据进行快速分析。基于大数据分析和机器学习模型，系统精准识别出多名消防员面临中暑和一氧化碳中毒的高风险。与此同时，定位技术发挥作用，超宽带定位系统在室内复杂环境中，将消防员的位置精度控制在20cm以内，确保指挥中心能实时掌握他们的精确位置。

指挥中心根据系统反馈的信息，迅速做出科学决策。通过应用层向消防员发出预警和指令，通知处于危险区域的消防员及时撤离，并调配携带降温设备和高性能空气呼吸器的救援小组前往支援。得益于系统规划的最优疏散路线，被困消防员成功避开火势凶猛和烟雾弥漫的区域，快速、安全地撤离到安全地带。

（三）应用效益

对比以往未使用该系统的类似高层建筑火灾救援，应用该系统后，救援时间缩短了33%。此次高层建筑火灾救援案例充分证明，多元信息融合的消防员险情识别与定位系统能够有效提升救援行动的安全性和效率，对保障消防员生命安全和成功营救被困人员发挥了不可替代的关键作用，为城市消防应急管理提供了极具价值的实践经验和参考范例。

未来，系统借助深度学习算法，能够依据消防员实时状态、现场环境细节及历史救援数据，自主生成个性化救援方案。此外，系统将与机器人技术、虚拟现实（VR）/增强现实（AR）技术深度融合。消防机器人可深入高危区域进行侦察，收集的环境数据与消防员信息融合，为指挥决策提供更全面依据。在某次工厂火灾实战演练中，消防机器人率先进入现场，获取高温、有毒气体分布等关键信息，与消防员定位系统结合，使救援人员提前知晓危险点，有效避免伤亡。

结束语

综上所述，多元信息融合的消防员险情识别与定位系统在应急管理中具有重要意义。通过综合运用多种技术手段，实现对消防员生理状态、环境信息和位置的实时监测与分析，为保障消防员生命安全、提升救援指挥效率提供了有力支持。随着相关技术的不断发展和完善，该系统将在未来的消防救援工作中发挥更加重要的作用，为应急管理事业的发展做出更大贡献。应急管理部门应加大对该系统的研发和应用投入，推动消防救援工作向智能化、高效化方向发展。

参考文献：

[1]王嘉盛.多元信息融合的消防员险情识别与定位系统研究[D].北京林业大学,2022.
[2]邢彦涛,狄长安,陈昊飞.基于多传感器的可穿戴疲劳检测装置设计[J].国外电子测量技术,2018,37(3):6.

[3]熊润群,张华俊,梁川,等.一种多无人机辅助的LoRa网络节能数据采集方法[J].计算机学报,2024,47(8):1970-1987.
[4]单聪森,韦明,张煜,等.基于柔性电极的穿戴式多生理参数检测系统设计与实现[J].航天医学与医学工程,2024(5).
[5]李婷婷,王琪,徐勇军,等.基于云平台的消防员自主导航与搜救系统设计与实现[J].指挥与控制学报,2023,9(3):303-313.

基金课题：应急管理部上海消防研究所科技计划项目《基于AR技术的救援人员多源数据融合系统研究及其在空呼上的应用》，课题编号：23SX30。