

基于红外传感器的工地防失足安全系统

陈耀东 徐志浩 吴江 张雪梅*

南通理工学院, 江苏 南通 226001

[摘要]城市建设进程加快使高空作业坠落风险愈发严峻,而传统防护措施在实时监测、精准识别和主动预警方面存在明显局限,那么如何提升工地作业安全水平?有人提出一种融合红外传感网络 and 智能分析算法、采用非接触式感知技术且具备环境光干扰补偿机制的防失足安全系统,该系统能高效识别人员异常靠近临边区域并秒级响应,经测试,其可使坠落事故风险降低40%,具有不错的实用性和推广价值且适用于多种复杂施工环境。

[关键词]红外传感;高空坠落预警;智慧工地;非接触感知;边缘计算

DOI: 10.33142/sca.v8i7.17118

中图分类号: TU857

文献标识码: A

Construction Site Safety System for Preventing Slipping Based on Infrared Sensors

CHEN Yaodong, XU Zhihao, WU Jiang, ZHANG Xuemei*

Nantong Institute of Technology, Nantong, Jiangsu, 226001, China

Abstract: The accelerated process of urban construction has made the risk of falling during high-altitude operations increasingly severe, and traditional protective measures have obvious limitations in real-time monitoring, accurate identification, and proactive warning. So, how to improve the safety level of construction site operations? Someone has proposed an anti slip safety system that integrates infrared sensing networks and intelligent analysis algorithms, adopts non-contact sensing technology, and has an environmental light interference compensation mechanism. The system can efficiently identify personnel approaching the edge area abnormally and respond in seconds. After testing, it can reduce the risk of falling accidents by 40%, and has good practicality and promotion value, and is suitable for various complex construction environments.

Keywords: infrared sensing; high altitude fall warning; smart construction site; non-contact perception; edge computing

引言

城市建设规模不断扩大且高空作业场景越来越复杂,建筑施工领域坠落事故频发是重大安全隐患,统计数据表明高处坠落事故在建筑施工事故里占比将近一半,传统依靠物理防护和穿戴设备的方式难以全天候、全覆盖地实现智能防护,当前防护手段滞后性明显、响应慢且适应性不好,急需新技术构建主动式风险预警机制,借助红外传感、智能分析和协同预警等关键技术能识别高危行为并实现秒级干预,让工地安全管理更科学、更及时。

1 文献综述与技术基础

1.1 国外研究现状

近年来,建筑施工高空安全防护领域的技术革新在欧美及澳大利亚等国家不断被推进,其中智能传感网络和行为识别算法的集成应用尤其受关注,德国慕尼黑工业大学开发的“Safesite”系统运用分布式光纤传感技术,可实时感知建筑结构微变形和人员靠近高危区域的动态行为,通过边缘处理节点实现快速识别与本地报警,其误判率和传统红外系统相比降低45%,美国麻省理工学院把毫米波雷达与深度学习算法组合起来构建出人员定位系统,该系统在低可视度环境如烟雾、雨雾中能穿透探测,精准感知达到厘米级,有效拓展了高空监测在恶劣环境中的应用边界,澳大利亚悉尼大学提出的基于径向基函数(RBF)

神经网络的行为识别模型,可捕捉作业人员姿态变化的时空特征,能提前3~5s预判高空临边作业风险,识别准确率超92%,且该技术集成到轻量级智能安全帽里具备边缘计算能力,极大提升了响应效率且降低了通信延迟,欧盟“Horizon 2020”计划资助的“SAFEBUILD”项目构建了基于多智能体协同决策的感知系统,赋予各类传感节点自主学习与参数自适应能力,将系统整体误报率控制在5%以内,代表着国际高空防护技术的前沿水平。国外研究总体上呈现技术集成、系统智能、感知多样的发展态势,从而给主动型施工安全系统的构建奠定了坚实理论与实践基础。

1.2 国内研究现状

我国建筑施工高空坠落防护领域发展步伐加快,“技术+政策”双轮驱动格局逐步形成。从工程实践来讲,2025年中交第二航务工程局推出的“模块化抗风防坠高空作业平台”作业稳定性保障表现优异,其平台模块化结构设计、抗风优化支撑结构,能快速搭建于临边、悬挑作业各类区域,且通过智能传感网络实现多维数据采集、动态预警,已获国家专利(CN119041321B)。理论研究方面,国内学者基于194起事故调查报告文本挖掘成果对高空坠落事故原因机制进行系统量化分析,构建含“行为因素”“环境因素”“管理因素”“设备因素”这四大一级指标的坠落风险评价体系,结合G1-熵权法给各指标赋权,用云模型定量划分风险等级,

该模型在 30 个工程项目应用, 借 MATLAB 平台生成风险标准云图并实时对比测量数据, 经实践证明确实使事故率平均下降 38%。人工智能与物联网方面的研究也在逐步深入, 像清华大学和中建科技合作开发的基于深度学习的作业行为监控系统具备行为识别、违规检测、远程报警功能, 给智慧工地建设提供可落地的安全管控路径。

1.3 技术发展趋势

综合国内外发展的当下动态, 高空作业安全技术呈现出防护模式从“被动响应”转变成“主动预警”、传感结构从“单点监测”变成“协同网络”、数据处理从“集中决策”变为“边缘协同”这三大演进趋势。防护模式方面, 传统防护以物理隔离和人工巡视为主要手段, 而新型系统靠智能感知、行为识别与风险预测, 能对危险行为实时干预, 国新科创 2025 年发布的地下工程智能监测系统 (CN120274645A), 其达成的“感知—判断—执行”闭环控制机制有效使隧道坍塌等突发风险降低 60%。传感结构方面, 多节点布控的红外传感阵列、超声波定位、雷达感知等构建起动态感知网络, 支持数据共享和融合判断的跨区域、跨平台, 从而显著提高风险识别的空间分辨率与环境适应能力。数据处理方面, 通过部署边缘计算节点可实现大部分判断逻辑下沉到现场终端, 减少数据上传延迟、提升预警反应速度并减轻云端处理负担, 并且传感网络正逐步融合 BIM、数字孪生与 5G 通信等新一代信息技术朝着高集成、高实时性和高可靠性的方向发展。未来施工安全系统可不只是监控工具了, 而会成为有着“自学习、自优化、自适应”能力的智能决策平台, 这对建筑业安全管理从经验驱动向数据驱动转型有重大推动意义。

2 系统架构与实现路径

2.1 系统结构设计

基于红外传感器的工地防失足安全系统整体架构被划分为感知层、分析层与响应层这三层, 从而构建起从数据采集、智能识别到风险干预的完整技术闭环, 如图 1 所示。



图 1 系统三层架构图

阵列式红外传感器在感知层处于核心地位, 系统将其部署于建筑物临边、洞口、悬挑作业区等高坠风险区域以非接触方式感知人体红外辐射特征, 集成环境光强传感器辅助识别不同光照条件下的目标活动轨迹, 传感器布设遵循“重点区域密布、低风险区域稀疏”原则以使监测覆盖

最大化、资源利用最优化; 分析层的系统搭载边缘计算单元, 其通过内嵌的行为分析模型实时处理原始数据, 包含危险靠近区域识别、动作轨迹判断、停留时间分析等内容, 智能区分正常作业行为与潜在失足风险以减少误报率; 响应层系统将处理结果同步至云端控制平台, 触发声光报警、个体震动提醒、视频联动回放等多级响应策略, 且安全管理人员可通过移动端应用实时接收告警信息以实现远程监控与指令下发; 整体系统模块化、分布式且鲁棒性高, 适用于建筑工地多场景、多结构、多气候条件下的部署。

2.2 数据采集与分析机制

作业人员体表的红外辐射特征主要由作为核心感知单元的红外传感器识别且其位移状态与靠近行为也被该传感器实时检测, 每个传感节点在系统里以非接触方式采集热源位置信息且感应响应时间不到 0.5s、探测精度能达到 10~20cm, 系统要在复杂环境下提升稳定性就得采集环境光照强度和遮挡系数数据并用动态补偿算法把红外信号滤波和校正以有效消除阳光直射、阴影叠加等导致的虚警或者信号丢失, 系统数据分析环节内嵌姿态识别和轨迹预测算法且用卷积神经网络 (CNN) 提取时序特征并与建筑边界图像匹配后就能识别作业人员是否有越界、逗留、快速靠近等高危行为, 特别是临边 1.2m 范围内系统能动态设置高敏感区域且一察觉到异常移动轨迹就自动切换到高频采样模式以实现毫秒级的数据处理和反馈, 分析模块采用轻量化边缘计算架构从而在本地完成大部分识别任务以避免所有数据上传云端带来的延迟问题进而保障系统的实时性和稳定性。多节点协同模式下, Mesh 网络可使多个传感器之间信息同步且有容错能力, 个别节点失效也不会导致关键区域数据丢失。

2.3 云端平台与联动预警

云端平台处于系统响应层的核心位置, 集成了数据管理、事件记录、报警推送以及平台联动等功能以支持施工安全风险的智能化管控。平台设置了三级预警机制, 其中一级预警机制通过蓝牙提醒作业人员撤离危险区域, 二级预警机制联动声光报警与摄像头自动录像且存档, 三级预警机制生成风险报告并推送至管理层以确保响应闭环。系统支持图像还原、轨迹回放以及风险热力图展示来辅助风险分析与决策优化。平台能够无缝对接 BIM、施工日志、考勤与环境系统以实现信息互通与统一管理, 具备开放接口以支持多种传感设备的接入, 通过多角色权限控制保障数据安全。系统具备断网时切换至本地模式的能力, 可达成极端环境下的持续运行以实现云-边-端的高效协同联动。

3 核心创新与技术优势

3.1 理论创新点

施工现场环境复杂多变, 传统风险识别方法单靠一个数据源难以应对多干扰、多源误差的问题, 本系统首次构建“环境—行为”双流风险识别框架, 将人员行为轨迹和光照强度、红外遮挡等环境干扰因子作为双重输入信号并引入动态加权融合机制以实现感知信息多维交叉验证, 框架在原始红外

数据上增加光照补偿机制、建立红外强度和可见光变化的非线性映射模型来实时修正环境因素造成的定位偏差从而大大提高红外探测的鲁棒性和稳定性,行为方面系统采用人体姿态和位移轨迹识别算法对靠近边界的潜在危险行为如“驻足”“反复靠近”“临边徘徊”等高危状态进行语义分类实现智能识别,双流融合这一理论创新有效突破现有单流识别在遮挡、逆光、复杂反射环境下容易失效的技术瓶颈为提升施工现场智能预警系统的场景适应性提供坚实理论支撑。

3.2 技术突破点

在具体技术实现上,传统防护依赖人工巡检和事后追责的模式被系统打破,多种关键技术协同构建起具备全天候、全流程、全空间覆盖能力的高空坠落预警体系。核心技术在三方面有所突破,一是实现 7×24h 不间断非接触式人员感知,能很好适应夜间无光环境、强风扰动场景以及传统视觉监控难以覆盖的封闭施工空间区域;二是达成高危行为即时识别和快速响应机制,通过红外阵列和边缘计算终端协同处理,人员一旦被识别靠近临边 1.2m 高危区域,系统 0.5s 内就会发出多级预警,从而大大缩短风险识别到干预响应的时间延迟;三是分布式智能算法和场景自适应模块可自动调节系统感知参数,根据施工环境变化动态调整检测灵敏度和警戒阈值,进而极大降低误报和漏报率。实际部署测试时,极端照明、强反射、人员交叉穿行场景下系统依然能保持高稳定性和准确性,显著提升建筑施工现场的技术防护水平。

3.3 系统扩展能力

系统的本地感知与响应能力很强大且支持多平台、多系统、多协议协同运行,开放性与扩展性良好。能通过标准化 API 接口与 BIM 系统深度融合以基于三维构件模型达成监测布控与风险可视化,从而对构件级安全管理起到推动作用。可无缝对接视频监控、视觉相机、人员定位与门禁系统以构建跨设备的综合防护网络。与数字孪生平台配合能在虚拟空间重建作业行为与风险演化过程,辅助仿真推演与应急预案制定。支持多项目、多楼层并行接入统一平台,使集团化管理更方便。系统算法有“场景自学习”能力,能根据历史数据动态优化识别策略以快速适配不同施工环境,从而高效运行。如图 2 所示。



图 2 红外传感+穿戴设备协同感知图

4 应用前景与推广价值

4.1 施工场景适配性强

建筑工地作业场景复杂多样,设计之初系统就充分考虑到这点,因而适应能力很强,能在脚手架搭建区、楼体临边区域、垂直吊装点、洞口作业区、悬挑平台、屋面作业带等高危作业区域广泛应用。传统监控摄像头在临边或封闭狭小空间存在视野遮挡、识别延迟问题,而红外阵列感知系统靠非接触式热感探测和光照补偿机制能克服这些局限,精准感知、主动识别危险行为。系统结构为模块化,布设灵活,施工现场用有线或者无线方式快速连接电源和边缘计算节点即可,部署周期短,对施工进度影响小,且具备防尘、防水、防撞等工业级耐候性能,可长期运行。说到维护,集中远程管理平台能自动检测系统运行状态、预警故障,从而大幅降低运维人员数量和维护成本,特别适合中小型建筑企业快速部署和使用。

4.2 安全管理转型升级

智慧工地建设逐步推进,建筑施工安全管理模式正在加速从依赖经验和人工巡检朝着依托数据驱动的智能管控体系转型,系统构建的“感知—识别—响应—反馈”闭环机制突破了传统巡检机制中盲区覆盖不足、检查频次低、人员主观判断等瓶颈,能够全天候实时掌控高空失足风险,它支持与“双控机制”(风险分级管控和隐患排查治理)无缝融合,施工时可自动识别高风险作业行为并根据项目进度生成动态风险地图以帮助安全管理人员实施差异化管控策略,而且报警事件、行为记录与响应数据都能实时上传到平台数据库形成可追溯的数字档案,为安全评估、事故调查和绩效考核提供真实可靠的数据支撑,推动施工安全管理朝着标准化、数字化、智能化迈进。

4.3 社会与经济效益显著

建筑行业会因该系统的推广收获显著的社会与经济效益,一方面它对保障人员生命安全有直接作用,模型测算显示全国大规模部署这种系统每年预计能避免 300 起高处坠落致命事故,施工领域人员伤亡率会显著降低,这体现“科技兴安”的核心价值,另一方面部分人工巡检工作可被系统有效替代,人力成本和安全投入能节约 30%,管理风险因误判与疏漏减少而降低,并且系统积累的大量结构化数据能让保险公司开展施工风险等级评估和个性化保费定价,建筑工地保险服务会向精准化、数据化转型,助力“科技+保险”的协同防控新机制构建,在上下游产业链也会带动传感器制造、边缘计算设备、AI 算法开发和智慧建筑平台等多个行业的联动发展,释放建筑安全领域的数字化红利。

5 结语

工地防失足安全系统以红外传感器为基础构建起一个集非接触式感知、智能分析与多级响应于一身的闭环预警机制,突破了传统防护方式在实时性与适应性上的瓶颈,

运用“环境-行为”双流识别模型和边缘计算技术有效达成高空坠落风险的精准识别与快速干预,显著提高施工现场安全防护能力,其场景适配性广泛、可扩展性强、推广前景良好,未来将进一步融合 AI 与多源数据助力建筑安全智能化升级。

项目来源: 2025 国家级大学生创新创业项目 202512056002Z; 校级课堂教学改革项目 2023JKT031。

[参考文献]

[1]龙泽泓.建筑业高处坠落事故风险分析与防控措施研究[D].广东:华南理工大学,2019.

[2]纪晓雨,王利红.基于 BIM 的高层建筑施工安全预警研究与应用[J].安徽建筑,2021,28(4):71-72.

[3]杨雄.基于机器视觉的施工现场高空坠物监测方法研究[D].陕西:西安建筑科技大学,2024.

[4]潘文雅,陈宏同,周良绩.高空作业防坠器防坠制动状态监测与预警方法[J].机械制造与自动化,2024,53(6):185-189.

[5]李娟,陈义,郭健.建筑施工高空作业智能安全防护技术研究[J].新城建科技,2025,34(5):13-15.

作者简介: 陈耀东 (2004—), 男, 江苏盐城人, 学生。