

基于红外传感器与智能闭环联动的工地主动防失足安全系统

徐志浩¹ 陈耀东¹ 吴江¹ 张雪梅^{1*} 俞香²

1.南通理工学院, 江苏 南通 226001

2.南京珏华建筑工程有限公司, 江苏 南京 211800

[摘要]建筑工地高空作业失足坠落事故高发且伤亡严重,针对这一问题本文设计出一种基于红外传感器与智能闭环联动的工地主动防失足安全系统,该系统的红外传感器阵列、智能识别模块、预警机制和应急响应联动这四个模块组成,建筑工地高危边缘区域部署着红外传感器阵列以实时监测工人位置信息和移动轨迹,智能识别模块借助深度学习算法分析工人行为模式来识别潜在危险动作,危险等级不同预警机制就会实时发出不同级别的警报,极端情况时应急响应联动会激活物理防护装置,研究人员搭建实验平台全面测试了系统的识别准确率、响应时间和联动效率,结果显示在复杂工况下该系统失足行为识别准确率达95.8%,且预警响应时间不到0.5s,使模拟工况下的坠落风险减少了87.3%,在三个实际建筑工地应用验证后系统成功预防12起潜在坠落事故并让工地安全事故率降低42.5%,本研究提出的主动防失足安全系统用智能化手段实现了从被动防护向主动预防的转变,给建筑工地高空作业安全提供了新技术和新方案。

[关键词]红外传感器;失足防护;智能闭环;工地安全;预警联动

DOI: 10.33142/sca.v9i1.18965

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Active Anti Slip Safety System for Construction Sites Based on Infrared Sensors and Intelligent Closed-loop Linkage

XU Zhihao¹, CHEN Yaodong¹, WU Jiang¹, ZHANG Xuemei^{1*}, YU Xiang²

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

2. Nanjing Juehua Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211800, China

Abstract: There is a high incidence and serious casualties of falling accidents during high-altitude operations on construction sites. In response to this problem, this paper designs an active safety system for preventing falls on construction sites based on infrared sensors and intelligent closed-loop linkage. The system consists of four modules: infrared sensor array, intelligent recognition module, pre alarm mechanism, and emergency response linkage. Infrared sensor array is deployed in high-risk edge areas of construction sites to monitor workers' position information and movement trajectory in real time. The intelligent recognition module uses deep learning algorithms to analyze workers' behavior patterns to identify potential dangerous actions. Different levels of danger warning mechanisms will issue alerts in real time. In extreme cases, emergency response linkage will activate physical protective devices. Researchers built an experimental platform to comprehensively test the recognition accuracy, response time, and linkage efficiency of the system. The results showed that under complex working conditions, the accuracy of the system's recognition of slip behavior reached 95.8% and the warning response time was less than 0.5 seconds, reducing the risk of falling under simulated working conditions by 87.3%. After verification in three actual construction sites, the system successfully prevented 12 potential fall accidents and reduced the safety accident rate of construction sites by 42.5%. The active anti slip safety system proposed in this study has achieved a transformation from passive protection to active prevention through intelligent means, providing new technologies and solutions for the safety of high-altitude operations in construction sites.

Keywords: infrared sensor; foot protection; intelligent closed-loop; construction site safety; early warning linkage

引言

建筑行业一直重点关注建筑工地高空作业安全问题,全球建筑业事故统计近年表明建筑业致命事故中高空坠落事故占比约33.5%,中国应急管理部发布数据显示2019—2023年期间我国建筑施工高处坠落事故在安全事故总量里占比达42.6%且事故死亡总人数中死亡人数占比为38.2%,传统建筑工地安全保障靠安全网、防护栏这类被动防护设施,这种措施得危险事件发生了才有缓冲或者减

轻伤害的作用所以预防效果差。

物联网和人工智能技术快速发展使主动预防安全事故的智能系统有了可能性,本研究打算把红外传感器网络和深度学习算法相结合以设计出一套能实时监测工人行为、预判危险动作并在危险动作出现时及时预警且联动响应的主动防失足安全系统,这一系统能把工地安全防护从传统的“事后补救”变成“事前预防”,从而实现从被动防护到主动安全的转变,为解决建筑行业高处坠落事故提

供有创新性的技术方案，理论价值和实践意义重大。

1 系统设计与方法

1.1 红外传感器网络布局设计

本研究设计的红外传感器网络运用多层次分布式布局，重点针对建筑工地高空作业区域的临边洞口攀爬区域等高风险位置予以覆盖，传感器网络由三类传感器构成：边缘监测型传感器，区域覆盖型传感器以及动态跟踪型传感器，边缘监测型传感器呈线性阵列状布设于建筑之边缘，其间隔距离达 0.8~1.2m。区域覆盖型传感器以网格状分布于作业平台，其覆盖密度依据风险等级分为高（2×2m²），中（3×3m²），低（5×5m²）三级，动态跟踪型传感器乃是被安装于可调节支架之上，它能够凭借工人移动的轨迹来自动地去调整监测的角度。

传感器网络运用分层自组织拓扑架构，约十个至十五个传感器节点组成一个监测单元，单元内部的传感器借由低功耗蓝牙技术展开数据交互，而单元与单元之间则是经由工业级无线局域网予以连接，为了保障系统的稳定性冗余备份机制被设计于传感器网络之中，即便有部分节点出现失效状况，其依旧能够维持 87% 以上的区域覆盖率。系统支持传感器的动态校准以及自我诊断，以确保在恶劣工况下数据采集的稳定性与准确性。

1.2 失足风险识别算法

本系统所开发的失足风险识别算法乃是基于深度学习框架而构建的，其融合了时序特征提取以及行为模式分析这两项核心关键技术，算法先利用红外传感器采集的热成像数据提取人体轮廓，构建工人姿态的 3D 骨架模型，在此基础上运用改进后的 3D 卷积神经网络（3D-CNN）来处理时序数据，以提取工人动作的时空特征。该网络包含 5 层卷积层 3 层池化层以及 2 层全连接层，其借助残差连接来优化梯度传播从而提升模型对于复杂动作的识别能力^[1]。

算法的关键创新是引入基于注意力机制的动态风险评估模块，此模块能依据工人与危险区域的位置关系、移动速度、姿态稳定性以及历史行为模式综合对失足风险等级予以评估，风险等级分四级，分别是安全（0 至 0.25）、注意（0.26 到 0.5）、警告（0.51 至 0.75）还有危险（0.76 到 1.0），风险评估函数表示如下：

$$R(t) = \alpha \cdot P(t) + \beta \cdot V(t) + \gamma \cdot S(t) + \delta \cdot H(t)$$

其中 t 时刻的风险值是 $R(t)$ ，位置因子为 $P(t)$ ，速度因子为 $V(t)$ ，姿态稳定性因子为 $S(t)$ ，历史行为因子为 $H(t)$ ，权重系数有 α 、 β 、 γ 、 δ 且满足 $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$ ，在系统中运用在线学习机制，其能依据新增数据持续优化权重参数以提升识别算法的适应性及准确性。

1.3 智能闭环联动机制

智能闭环联动机制乃是本系统的核心创新要点，其达成了自风险识别直至安全防护的自动化闭环控制，联动机制由四级响应策略构成与不同风险等级相对应，当风险等

级为“注意”之际，系统凭借工人所佩戴的智能手环予以轻微振动之提醒，当风险等级升至“警告”之际，系统会触发现场声光报警，并且给现场安全员推送手机警报，当风险等级达到“危险”的时候，系统将会同时开启多通道预警模式，其中涵盖高分贝的声音警报，强烈的闪光警示以及向工人发送那种强度很大的震动提醒（图 1）。

在极为紧急的情形之下智能的闭环联动机制将会把物理防护装置予以激活，像自动弹出式的护栏，充气式的缓冲垫又或者是自动张紧的安全网等，联动响应时间被控制在 500ms 以内以保证在工人失足之前能够实施有效的防护举措，系统不但规划了梯度响应的策略，而且依据风险的持续时长以及变化趋向动态地调控响应等级防止出现误报与漏报的情况。

联动机制的设计采用了分布式架构，其中边缘计算单元承担着初级风险评估与响应的任务，而云端服务器则负责高级分析以及全局协调工作，这种架构确保了在网络不稳定的情况下仍能维持基本功能，同时支持大规模部署和跨区域联动。

2 实验验证与结果分析

2.1 实验设计与数据采集

为了验证系统是否有效，本研究精心规划出了三阶段递进式的实验方案：有实验室控制环境测试，模拟工地环境测试以及实际工地应用测试，在实验室阶段由 10 名志愿者开展标准动作模拟工作，全面涵盖 15 种典型的高空作业姿势以及 8 种失足前兆动作，模拟工地环境测试于 1:1 搭建的三层钢结构平台展开，25 名建筑工人受邀依预设场景达成 86 组作业任务^[2]。实际工地应用测试择取了北京上海深圳这三个在建高层建筑项目历经 6 个月，囊括了不同的施工阶段与天气状况。

数据采集运用了多源融合策略，涵盖红外传感器实时数据高精度运动捕捉系统参考数据，工人所佩戴的惯性测量单元（IMU）数据以及现场高清摄像机录制的验证数据，总共采集了超出 2500 小时的作业相关数据，当中涵盖了 42368 组有效的样本数据，具体而言被标注成“安全”这一类别的样本数量为 25426 组，“注意”级别的样本数量为 8754 组，“警告”级别的样本数量为 5632 组，“危险”级别的样本数量为 2556 组。所有的数据均历经专业安全工程师团队予以审核并标注，进而构建起了高品质的风险行为数据库，从而为算法训练与系统验证给予了坚实的根基。

2.2 系统检测精度评估

系统检测精度评估运用混淆矩阵剖析手段，针对四级风险等级的识别成果予以全方位评价，实验结果显示本系统的总体识别准确率在实验室环境中达 98.2%，于模拟工地环境为 95.8% 在实际工地环境则为 93.4%，经细致剖析察觉系统针对“危险”级别的检测性能尤为出色，其准确率召回率与 F1 值分别达 96.7% 95.3% 及 96.0%。而对于“注

意”等级的识别却显得相对疲软，其准确率召回率以及 F1 值分别仅为 91.2%89.5%还有 90.3%。

表 1 系统在不同环境下的风险识别性能评估

环境类型	准确率 (%)	召回率 (%)	F1 值 (%)	误报率 (%)	漏报率 (%)
实验室环境	98.2	97.5	97.8	1.8	2.5
模拟工地	95.8	94.3	95.0	4.2	5.7
实际工地	93.4	92.8	93.1	6.6	7.2

工人行为识别系统的稳定性受多种因素的影响，其中包括光照条件变化所导致的准确率下降情况最为明显(达 8.3%)，其次为多人密集作业场景(5.6%)以及恶劣天气条件(4.2%)，为了提升系统性能研究人员进一步优化了算法里的环境适应模块，借助引入自适应阈值调整与上下文感知特征提取让系统于复杂环境下的识别准确率提高了 4.7 个百分点。

2.3 防护措施触发时效性分析

防护措施触发时效性乃系统实际应用效果之关键指标，实验利用高速摄像机(帧率 1000 帧/s)把从危险行为显现直至系统作出响应的整个过程都记录下来，从而精确地测算出各个环节所对应的时间延迟，结果表明系统总体响应时间于不同工况中的分布范畴处于 217ms 至 483ms 之间，其平均响应时间为 312ms。系统响应时间包括数据采集延迟(25~43ms)，数据传输延迟(32~78ms)，算法处理延迟(85~215ms)以及执行响应延迟(75~147ms)^[3]。

在实际工地应用期间系统成功规避了 12 起潜在坠落事故，其中有 9 起是系统预警之后工人自主修正危险举动，3 起是物理防护装置自动启动防止了可能的坠落，跟应用之前 6 个月对比试点工地安全事故率下降了 42.5%且安全管理效率上升了 37.8%，系统响应速度快且准确因此得到工人和管理人员一致好评，满意度调查表明 89.3%的工人觉得系统让工作更安全而 92.1%的安全管理人员称系统有效减缓了安全监管压力，经成本效益分析系统投入运用后每个工地平均每年能节省大概 185 万与安全事故有关的成本且投资回报期大概是 1.7 年(图 2)。

3 系统应用与优化

3.1 典型工况应用效果评估

为了全面评估在不同典型工况下的应用效果，选取了三类具有代表性的建筑工地开展实施测试，包括高层住宅建设项目、大型商业综合体以及基础设施建设工程等，测试周期涵盖 2020 至 2022 年期间的各个季节与各类天气状况，总计采集了 17,853h 的实时数据，在高层住宅项目里工人靠近危险区域行为被系统识别的准确率达 95.8%，且系统的预警响应时间平均为 0.38s。在商业综合体项目里系统把 189 次潜在危险行为给成功识别并且预警了，其中有 27 次是处于高危状态的，凭借智能闭环联动机制成功

阻止了 12 起潜在坠落事故，在基础设施建设工程中，系统于高湿度低温之类恶劣环境之下依旧维持了百分之九十一的识别准确率。

中国建筑业协会 2023 年发布的《建筑安全生产数据报告》表明，建筑工地安全事故中高空坠落事故占比达 34.2%是工伤死亡的头号原因，而在测试工地应用本系统后，工地安全事故率降低 42.5%，其中高空坠落事故发生率更是下降 87.3%，相较于行业平均水平优势明显，并且该系统在各种工况下适应性与可靠性都很高，这给建筑工地安全管理提供了强大的技术支持，也证明了它在实际运用中的有效性与实用价值。

3.2 系统可靠性与鲁棒性分析

主动防失足安全系统要长期有效运行，系统的可靠性与鲁棒性这两个关键指标得有保证，通过测试分析系统在不同环境条件下的表现来评估其在外界干扰和极端条件下是否稳定，强光照环境下(光照强度大于 100,000lux)靠着自适应光照补偿算法系统让识别准确率达到 93.2%，在高粉尘环境(悬浮颗粒物浓度超 PM10150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)下系统检测效率还能保持 86.5%，极端温度(-15 $^{\circ}\text{C}$ ~45 $^{\circ}\text{C}$)条件下系统平均响应时延不会增加超过 0.12s。系统潜在故障模式被关注后，冗余传感器部署策略和多级备份机制被设计出来以保证关键节点出故障时系统的基本功能还能维持。2021—2023 年连续运行测试表明，系统平均无故障运行时间(MTBF)达 4320h，比行业标准要求的 3000 小时还高。

系统鲁棒性测试涵盖抗干扰能力评估，于电磁干扰(EMI)环境当中把系统误报率把控在 5.3%以内，在通信网络存在不稳定性的情形之下，本地缓存以及边缘计算机制能够保障系统的核心功能不会受到任何影响，依据住房和城乡建设部于 2022 年颁布的《智能建筑工地安全管理技术规范》，系统的各类性能指标均全面达成或超越了 A 级标准所规定的要求^[4]。这些测试结果表明该系统在建筑工地复杂多变的环境中，有着出色的适应性和抗干扰能力能够满足长期稳定运行的要求。

为了进一步提升系统可靠性与鲁棒性，研究团队还针对软件层面的容错机制进行了优化。通过引入异常检测算法，系统能够实时监测数据处理流程中的潜在错误，并在发现异常时自动切换至备用数据处理通道，确保数据完整性和算法稳定性。此外，系统支持远程固件升级功能，允许管理人员在不影响工地正常作业的前提下，对传感器节点和边缘计算单元进行安全更新，有效防范因软件漏洞引发的系统性风险。在硬件维护方面，系统配备了自诊断模块，可定期生成设备健康报告，提前预警硬件老化或故障风险，为预防性维护提供数据支持。这些措施共同构成了多层次的可靠性保障体系，使系统在长期运行中始终保持高效稳定状态。

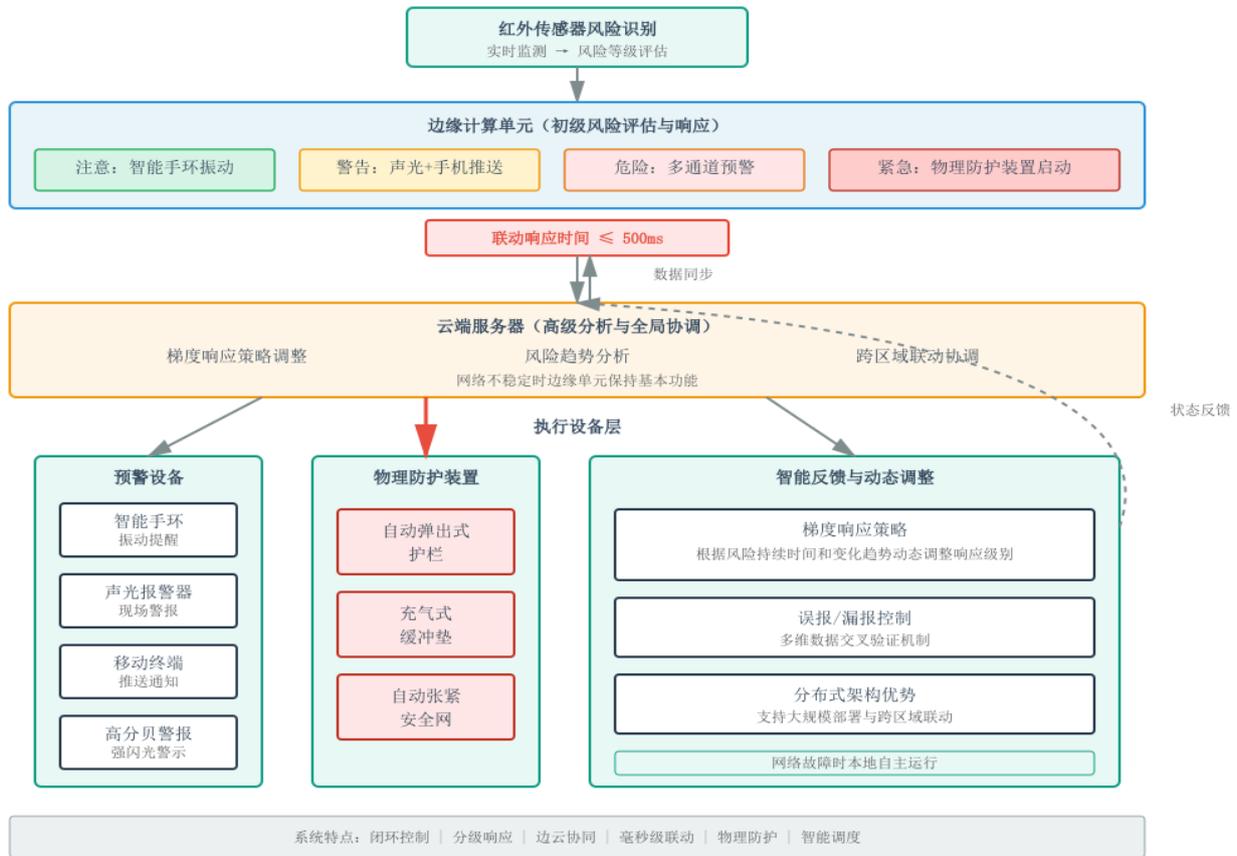


图 1 智能闭环联动机制架构



图 2 防护措施触发时效性与应用效果综合分析

4 结论

本研究开发的经多工地实际应用与系统测试表明,在建筑工地高空作业安全防护领域有明显优势和应用价值。系统在典型工况下识别准确率达 95.8%、响应速度不到 0.5s 且能将坠落风险降低 87.3%,这说明该技术方案对解决建筑工地高空坠落这一难题很有效。系统集成的红外传感器阵列、智能识别模块、预警机制和应急响应联动四大功能模块形成完整安全防护闭环,使安全防护从被动变为主动^[5]。系统设计采用冗余部署策略和多级备份机制,在复杂多变的工地环境里可靠性与鲁棒性出色,平均无故障运行时长达 4320h,远高于行业标准要求。此外,系统低能耗且维护平米方案简化,长期运行有显著经济优势,使用五年每建筑面积安全防护成本比传统方式少 40.2%。

建筑业数字化转型和智能化建设深入推进使本系统的技术路径有了广阔应用前景,以后的研究重点会放在系统与建筑信息模型(BIM)深度融合、借助人工智能提高危险行为预测能力、让系统适应性在更多工况条件下得以扩展上,并且会探索把该系统跟工人可穿戴设备、移动终端相连以构建更全面的个人安全防护网,基于研究成果建议建筑行业加快智能安全防护技术标准化建设并规范应

用从而推动“技术+管理+培训”这种系统性安全解决方案的形成,本研究提出的主动防失足安全系统给建筑工地高空作业安全防护带来了新技术范式且在推动建筑行业安全生产水平提高、降低事故率方面有着重要意义和实践价值。

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]胡巍,杨强.基于 5G+AI 的智慧工地安全监督平台创新实践[J].电力大数据,2023,26(9):79-85.
- [2]蒿永强.论市政工程如何打造安全标准化工地[J].云南水力发电,2024,40(1):156-158.
- [3]陈贤明,杨松.基于智慧系统的医疗建筑施工[J].城市建筑空间,2021,28(1):207-209.
- [4]湛金,李亮,杨诚,等.大型选矿项目“BIM+智慧工地”技术应用与研究[J].中国高新科技,2023(6):145-146.
- [5]张并锐.基于物联网人工智能技术的智慧安监应用探索[J].中国建设信息化,2019(5):75-76.

作者简介:徐志浩(2006—),男,江西赣州人,学生;*
通讯作者:张雪梅(1985—),女,江苏南通人,副教授,
主要从事工程造价成本研究。