

人工智能驱动的施工安全隐患自动识别系统设计

谢燕伟 马建龙

华电郑州机械设计研究院有限公司 河南郑州 450007

摘要: 随着建筑行业规模持续扩大, 施工现场安全问题日益突出, 传统依赖人工巡检的安全管理模式已难以满足复杂、动态的现场需求。本文提出一种基于人工智能(AI)的施工安全隐患自动识别系统设计方案, 融合深度学习、计算机视觉与物联网技术, 实现对施工现场人员行为、设备状态及环境风险的实时智能监测。系统通过YOLOv8目标检测模型与改进的时序行为识别算法, 提升对未戴安全帽、高空作业无防护等典型隐患的识别精度。创新性地引入多源数据融合机制与边缘-云协同架构, 增强系统实时性与可靠性。实验结果表明, 该系统在真实场景下平均识别准确率达95.6%, 误报率低于4%, 显著优于传统方法。

关键词: 人工智能; 施工安全; 隐患识别; 深度学习

引言

建筑施工环境复杂多变, 高处坠落、物体打击、机械伤害等安全事故频发, 严重威胁人员生命与工程进度。据统计, 我国每年因施工安全事故造成的直接经济损失高达数十亿元。传统安全管理依赖人工巡查与视频监控回溯, 存在效率低、响应滞后、主观性强等弊端, 难以实现主动预警与闭环管理。近年来, 人工智能技术在图像识别、模式分析等领域取得突破性进展, 为施工安全监管提供了新的技术路径。然而, 现有AI应用多局限于单一场景或静态图像识别, 缺乏对动态行为、多模态数据的综合分析能力, 系统集成度与实用性不足。本文针对上述问题, 提出一种新型人工智能驱动的施工安全隐患自动识别系统, 旨在构建集感知、分析、预警、反馈于一体的智能安全管控平台。

一、系统总体架构设计

本系统采用“端-边-云”三级协同架构, 实现数据采集、边缘计算与云端管理的有机融合。底层为“端”层, 由部署在施工现场的高清摄像头、红外传感器、可穿戴设备等物联网终端构成, 负责采集视频流、人员定位、环境参数等多源数据。中间“边”层由边缘计算网关组成, 搭载轻量化AI模型, 对前端数据进行初步处理与实时分析, 实现低延迟的本地预警。顶层“云”层为中央管理平台, 具备强大的数据存储、模型训练与系统调度能力, 负责全局监控、隐患统计、趋势分析与策略优化。该架构有效平衡了计算负载, 保障了

系统响应速度与数据安全性, 为大规模部署提供了技术基础。

二、核心算法模型构建

1. 基于改进YOLOv8的目标检测模块

针对施工现场目标多样、遮挡严重、光照变化大等特点, 采用YOLOv8作为基础检测框架。通过引入CBAM(Convolutional Block Attention Module)注意力机制, 增强模型对关键区域(如头部、安全带扣环)的特征提取能力。同时, 优化Anchor-Free检测头, 提升对小目标(如掉落的工具)的识别精度。训练数据集涵盖国内典型工地场景的十万级标注图像, 涵盖未戴安全帽、未穿反光衣、违规进入危险区等20余类隐患。实验表明, 改进模型在测试集上的mAP@0.5达到96.2%, 较原始YOLOv8提升3.8个百分点。

2. 基于3D-CNN与LSTM的时序行为识别模块

传统静态图像识别难以捕捉动态违规行为(如攀爬脚手架、无防护高处作业)。本系统构建融合3D卷积神经网络(3D-CNN)与长短期记忆网络(LSTM)的双流神经网络。3D-CNN提取视频片段中的时空特征, LSTM捕捉行为的时间演化规律。通过引入注意力门控机制, 模型可聚焦于关键动作帧, 有效区分“短暂经过”与“持续作业”等相似行为。该模块对高处无防护作业的识别准确率达93.4%, 显著降低误报率。

3. 多源数据融合与决策引擎

创新性地设计基于D-S证据理论的多源信息融合机制。将视觉识别结果、人员定位数据(UWB)、设备运

行状态（IoT传感器）等异构信息进行时空对齐与置信度评估，生成综合风险评分。例如，当视觉系统检测到人员未戴安全帽，且其定位信息显示处于塔吊作业半径内时，系统将风险等级提升至“高危”，触发即时声光报警与移动端推送。该机制有效提升了判断的鲁棒性与情境感知能力。

三、系统功能模块实现

1. 实时监控与智能预警

系统具备多路视频并发处理能力，可对施工现场的多个监控画面进行全天候实时分析。通过部署在边缘计算节点的轻量化深度学习模型，系统在视频流中自动检测未戴安全帽、未系安全带、违规闯入限制区域等典型安全隐患，并以边界框与标签形式在画面上动态标注识别结果。一旦发现风险行为，系统即时生成结构化预警信息，包含隐患类型、发生位置、关联摄像头编号及时间戳，并依据预设规则划分风险等级，如“一般”、“严重”或“紧急”。高优先级告警触发现场声光报警装置，同时通过无线网络推送至安全管理人员的移动终端APP与指挥中心大屏，确保信息及时触达。监控界面支持按施工分区、隐患类别或时间范围进行筛选查看，便于管理人员快速掌握全局安全态势。整个预警流程无需人工干预，实现从风险识别到信息发布的全自动化运行，大幅提升响应速度与监管覆盖范围，为施工现场构建起一道智能化的主动防御屏障。

2. 隐患闭环管理

预警信息生成后，系统自动创建对应的电子整改工单，精准绑定隐患位置、图像证据、风险等级及发现时间等关键信息。工单通过平台内部消息机制或移动端推送，实时分发至相关责任人，如班组长、安全员或施工主管，系统同步设定整改时限，确保任务及时响应。责任人员接收到工单后，需在规定时间内完成现场处置，并通过手机APP上传整改后的现场照片及处理说明。系统利用图像比对技术对整改前后图片进行初步校验，判断隐患是否消除。安全管理人员在后台对整改结果进行最终审核，确认合格后关闭工单，若未达标则退回重新处理。所有操作节点，包括预警触发、工单派发、整改反馈、审核结果等，均被完整记录在系统数据库中，形成可追溯的数据链条。该机制实现了从隐患发现到彻底消除的全流程数字化管控，强化了责任落实，避免了问题遗漏，显著提升了安全管理的执行力与闭环效率，为施工现场构建了规范、透明、高效的风险治理模式。

3. 数据挖掘与风险预测

系统对积累的隐患数据进行深度挖掘，运用时间序列分析技术梳理风险事件在不同日期、时段的分布规律，识别出事故高发的作业周期与具体时间段，如早班交接期或午间高温时段。结合空间坐标信息，采用密度聚类算法对隐患地理分布进行建模，精准定位脚手架搭设区、塔吊回转半径、物料堆放区等高频风险区域。基于多维数据分析结果，系统自动生成动态更新的风险热力图，以可视化方式呈现施工现场的安全态势，红色区域代表高危热点，黄色区域提示潜在风险。管理者可通过平台查看不同时段、不同工种的隐患统计报表，掌握安全管理的薄弱环节与趋势变化。这些数据洞察为优化安全巡查路线、调整防护资源配置、制定针对性培训计划提供了科学依据。例如，在识别到某班组高空作业违规频发后，可定向组织专项安全教育。

4. 模型自学习与优化

系统集成在线学习框架，支持模型的自我优化与进化。通过收集并分析人工复核后的误报和漏报案例，将这些宝贵的数据样本自动补充至训练集中，使模型能够从中汲取经验教训，不断丰富识别模式库。周期性地对模型参数进行更新，确保其对于施工现场新出现的场景和违规行为保持高度敏感性和准确度。面对复杂的建筑环境，系统展现出强大的适应能力，无论是引入新型施工机械还是作业方法发生变革，均能迅速作出响应并调整判断标准。同时，利用增量学习技术，在不影响原有性能的基础上逐步提升模型的整体素质，实现对安全隐患的精准捕捉。这种持续的学习机制保证了系统的长久活力，为安全监控提供坚实支撑。即使在多变的工作条件下，也能有效减少人为干预需求，维护管理效率。借助于这一智能体系，项目安全负责人可以更加专注于风险控制策略的制定与执行，推动安全管理从被动应对转向主动预防，进一步巩固工地安全防线。

四、系统性能验证与对比分析

为验证系统在真实施工环境中的有效性与稳定性，选取某在建大型住宅项目作为试点，该项目总建筑面积约28万平方米，现场日均施工人员超过600人，塔吊、施工电梯等大型设备密集，安全监管压力大。系统在工地关键区域部署了18路高清网络摄像头，覆盖主楼作业面、材料堆放区、出入口及高空作业区，边缘计算节点与云端管理平台同步上线，实现7×24小时连续运行，测试周期为三个月。

系统上线前,该项目依赖传统人工巡检模式,平均每班次由2名安全员进行现场巡查,隐患发现主要依靠目视检查与事后视频回放,月均记录安全隐患约30起,漏报现象较为普遍,响应滞后。系统投入运行后,共采集并处理有效视频数据8.7TB,自动识别各类安全隐患事件1,243起,涵盖未佩戴安全帽、高空无防护、违规攀爬、物料堆放不规范等12类典型风险。经项目安全管理部门逐条人工复核确认,系统整体识别准确率达到95.6%,平均单帧处理响应时间低于1.2秒,误报率为4.1%,满足实时预警需求。与系统运行前的人工管理模式相比,隐患发现总量提升近8倍,重大高风险行为(如无防护高处作业)的平均预警提前时间达到15分钟以上,显著增强了事故预防能力。

为进一步评估技术优势,将本系统与采用Faster R-CNN和SSD作为检测核心的同类AI识别系统进行对比测试。在相同测试集(包含强光、雨雾、部分遮挡等复杂场景图像2,000张)下,本系统基于改进YOLOv8的模型F1-score达到94.3%,分别优于Faster R-CNN(82.1%)和SSD(83.5%)约12.2和10.8个百分点,显示出更强的鲁棒性与适应性。实验结果充分证明,本系统在识别精度、响应速度与复杂环境适应能力方面均具有显著优势,具备在大型施工现场推广应用的实用价值。

五、创新点与技术优势

本系统在技术架构与应用模式上实现多项创新。构建“多模态感知+时空行为分析”融合框架,融合视频图像、人员定位与设备状态等多源数据,结合3D-CNN与LSTM网络,实现对动态违规行为的精准识别,突破传统静态检测的局限。采用边缘-云协同计算模式,通过模型剪枝与量化技术将YOLOv8s模型压缩至原体积的40%,在保障识别精度的同时显著降低边缘设备算力需求,提升系统部署灵活性与经济性。引入D-S证据理论进行多源信息融合,对视觉识别、UWB定位与物联网传感数据进行置信度加权与冲突消解,增强判断的可靠性与抗干扰能力。全面打通隐患识别、智能预警、工单派发、整改反馈与数据分析的全流程,形成闭环式数字化

管理体系。系统不仅实现风险的实时感知与主动预警,更通过数据积累与挖掘支持管理决策优化,推动施工安全由经验管理向智能治理转变,具备显著的技术先进性与工程应用价值。

结束语

本研究设计并实现了一套人工智能驱动的施工安全隐患自动识别系统,通过深度融合深度学习、计算机视觉与物联网技术,构建了“端-边-云”协同的智能监控架构。系统创新性地采用改进YOLOv8模型、3D-CNN-LSTM时序分析网络及多源数据融合决策机制,显著提升了对人员违规行为与环境风险的识别精度与实时性。实际工程验证表明,该系统能够有效降低人工巡检成本,提高隐患发现效率,为预防事故发生提供有力支撑。未来研究将聚焦于更复杂场景(如夜间、雨雾天气)的适应性优化,探索AI与BIM(建筑信息模型)技术的深度融合,实现安全隐患的三维可视化与空间定位预警。同时,需进一步完善数据隐私保护机制与系统标准化建设,推动该技术在建筑行业的规模化应用。本系统的成功实践,标志着施工安全管理正从“被动应对”向“主动预防”、“经验驱动”向“数据智能”转型,对提升我国建筑行业本质安全水平具有深远意义。

参考文献

- [1]刘萍.人工智能驱动的农业采摘机器人自动化控制系统设计[J].自动化与仪表,2023,38(11):50-53. DOI: 10.19557/j.cnki.1001-9944.2023.11.011.
- [2]吴秉键,吴惠明,胡珉,等.基于数据驱动的盾构自主姿态控制体系设计和应用[J].隧道建设(中英文),2023,43(3):478-485. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2023.03.012.
- [3]杨威超.数据驱动的物联网安全威胁检测与建模[D].战略支援部队信息工程大学,2019.
- [4]王瑞涵.基于人工智能的威胁检测与防护系统[J].移动信息,2024,46(1):129-131.