

图像识别技术在工程现场安全违规行为检测中的研究

刘诗妍 陈思琦 郑佳元

西安市物联网应用实验室 陕西西安 710000

摘要: 本文聚焦图像识别技术在工程现场安全监管中的实战应用, 构建了从数据采集到模型部署的完整技术链路。通过设计轻量化时空特征融合网络, 实现了对未佩戴防护装备、危险区域侵入等典型违规行为的实时检测, 并结合领域自适应迁移学习解决了现场环境复杂多变的难题。在模型部署层面, 提出边缘计算终端的异步推理优化方案, 使系统在嵌入式设备上达到 30fps 的检测速度。实际应用表明, 该技术可将人工巡检频次降低 60%, 违规行为识别准确率提升至 92.3%, 为工程建设数字化监管提供了可落地的技术方案。

关键词: 工程安全监管; 实时违规检测; 轻量化模型; 边缘计算; 时空特征融合

1 面向工程场景的图像采集与标注体系

1.1 多模态数据采集硬件部署方案

工程现场环境具有空间开阔、设备密集、光照条件复杂等特点, 传统单模态摄像头难以满足全天候监测需求。本研究采用可见光摄像头、红外热成像仪与深度相机的多模态融合部署方案, 通过硬件层数据互补提升场景感知能力。可见光摄像头负责捕捉色彩与纹理细节, 红外设备用于夜间或低照度环境下的热辐射成像, 深度相机则获取作业人员与设备的空间位置信息。三套设备通过时间同步模块实现毫秒级校准, 确保多源数据在时空维度上的严格对齐。在塔吊作业区、基坑边缘等高危区域, 采用云台控制的多视角采集阵列, 通过预设巡检路线与动态跟踪模式结合的方式, 覆盖传统固定摄像头难以监测的视觉盲区。

1.2 动态场景下目标标注策略

工程行为具有瞬时性与多样性特征, 传统静态图像标注方法难以适应施工场景的动态特性。本研究提出基于工程行为特征的三级标注体系: 一级标注针对人员防护装备(安全帽、反光衣等)的穿戴状态, 采用轮廓关键点检测实现像素级标注; 二级标注聚焦设备操作规范(如挖掘机铲斗开合角度), 通过参数化模板匹配实现行为约束条件标记; 三级标注则定义高危行为事件(如临边堆载、支模架违规拆除), 结合工程规范文档建立结构化标签库。为解决动态遮挡问题, 开发半自动标注工具, 利用光流法追踪目标运动轨迹, 仅对关键帧进行人工复核, 使单场景标注效率提升 40%。

1.3 施工环境干扰因素数据增强

现场采集的原始数据存在光照不均、粉尘遮挡、设备反光等干扰因素, 直接影响模型泛化能力。本研究构建物理模拟与数字合成相结合的数据增强 pipeline: 在物理模拟环节, 通过可控光源阵列模拟日出至日落的光照强度变化, 使用雾化装置生成 0-50mg/m² 浓度的模拟扬尘环境; 在数字合成阶段, 开发基于物理引擎的场景渲染器, 随机生成雨滴轨迹、镜头污渍等特效叠加层。针对金属设备反光导致的过曝问题, 采用 HSV 色彩空间自适应调整算法, 结合高斯模糊与直方图均衡化处理, 使模型在强反光场景下的目标检测 Recall 值提升 18.7%。最终构建的数据集包含 12 类典型干扰场景, 总样本量达 15 万帧, 为后续模型训练提供坚实数据基础。

2 基于时空特征融合的违规行为识别模型

2.1 轻量化骨干网络设计

针对工程现场边缘计算设备算力受限的痛点, 本研究构建了基于 MobileNetV3 与 ShuffleNetV2 的混合骨干网络。通过参数共享机制将两个网络的底层特征提取模块进行解耦重组, 在 ImageNet 数据集上的预训练表明, 该混合架构在保持 78.3% Top-1 准确率的同时, 参数量较 ResNet-50 减少 62%。为适配工程场景目标尺度变化大的特性, 设计多尺度感受野增强模块(MSRF), 通过并行 3×3、5×5 卷积核捕获不同粒度特征, 并采用通道注意力机制实现特征图动态加权。在施工电梯违规载人检测任务中, 该模块使小目标检测 mAP 提升 9.1%, 而额外计算开销仅增加 4.7%。

2.2 时序行为建模模块

针对施工行为的连续性特征,构建双流时序建模网络。空间流采用改进的 SlowFast 网络架构,以 4fps 帧率捕获外观特征;时间流则部署轻量级时序偏移模块(TSM),通过帧间特征偏移实现运动建模。为解决传统 3D 卷积计算量大的问题,设计时空分离卷积算子,将空间卷积与时间卷积解耦为两个独立分支,并引入 Transformer 自注意力机制捕捉长时依赖关系。在安全带使用行为识别任务中,该模块使动作分类准确率从 67.4% 提升至 89.2%,同时保持 25fps 的推理速度,满足实时监测需求。

2.3 关键帧特征增强策略

针对施工视频中存在大量冗余帧的问题,提出基于运动显著性的关键帧筛选算法。通过计算光流幅值与方向方差构建运动活跃度图,结合 YOLOv7 检测框的 IoU 变化曲线,动态确定关键帧采样间隔。在特征增强层面,设计空间-通道联合注意力模块(SCA),将运动显著图与语义分割结果进行像素级融合,生成空间注意力权重图;同时引入通道维度上的 Squeeze-and-Excitation 结构,对特征通道进行重要性重标定。在临边堆载检测实验中,该策略使误报率从 12.7% 降至 3.4%,关键特征响应强度提升 2.3 倍。

3 复杂工程场景下的模型优化技术

3.1 领域自适应迁移学习框架

工程场景存在显著的领域差异,实验室训练数据与现场真实分布往往存在偏差。本研究构建双阶段领域自适应框架,首阶段采用最大均值差异(MMD)损失约束源域与目标域的深层特征分布,通过梯度反转层(GRL)实现对抗式特征对齐。次阶段引入伪标签自训练机制,利用时序一致性约束筛选高置信度样本,通过动态权重调整策略防止错误伪标签的累积传播。在跨工地场景的迁移实验中,该框架使模型在目标域的初始准确率提升 31.5%,经三轮自训练后收敛至 90.2% 的检测精度,显著优于直接微调基线。

3.2 模型量化部署方案

针对边缘计算设备的资源约束,提出混合精度量化与知识蒸馏协同压缩方案。采用通道维度非均匀量化策略,对骨干网络的深层特征提取模块实施 INT8 量化,而保持浅层特征融合层的 FP32 精度以维持数值稳定性。设计基于注意力迁移的知识蒸馏损失函数,将教师网络的多尺度特征响应图作为监督信号,引导学生网络在量化后的低精度表示空间

中重建关键特征分布。

3.3 边缘计算终端实时性优化

为突破边缘设备的算力瓶颈,开发异步推理与模型分片加载机制。通过双缓冲队列实现视频流解码与模型推理的并行执行,利用推理延迟预测模型动态调整任务优先级,使关键帧处理时延波动范围控制在 $\pm 8\text{ms}$ 以内。针对深度可分离卷积的内存访问特性,设计 IM2COL 缓存优化策略,减少卷积运算中的冗余内存拷贝操作。在 RTX 3060 移动端 GPU 的测试中,优化后的推理引擎使模型吞吐量达到每秒 34.7 帧,端到端检测延迟压缩至 28.7ms,满足工程现场实时监管的严苛要求。

4 典型安全违规行为检测系统实现

4.1 多任务检测系统架构

本研究构建了三级递进式检测架构,实现从底层特征提取到高层行为理解的完整链路。首级部署轻量化目标检测网络,采用改进的 YOLOv7-tiny 架构,通过通道剪枝与知识蒸馏技术,在保持 92.3% mAP 的同时将参数量压缩至 6.3MB,满足嵌入式设备部署需求。该网络可实时检测安全帽、反光衣、设备操作手柄等 8 类关键目标。次级为行为分类模块,基于时空迁移学习框架,将预训练的 SlowFast 网络权重迁移至工程场景,通过时序偏移模块(TSM)捕获动作时序特征,实现对 23 种典型违规行为的分类,如临边作业未防护、设备违规启动等。末级构建风险评估引擎,融合行为类型、空间位置、历史违规记录三维信息,采用模糊逻辑推理机制生成风险等级。在塔吊作业场景测试中,该架构使高危行为识别响应时间缩短至 187ms,较传统两级架构提升 41.3%。

4.2 典型违规行为识别案例

在煤矿巷道场景,针对车辆闯红灯违规行为,设计红绿灯状态编码器与车辆轨迹预测器。通过 YOLOv7 检测车辆位置,利用 LSTM 网络预测未来 3 秒运动轨迹,结合红绿灯相位数据判断违规概率。实验表明,该方案对闯红灯行为的识别准确率达 95.7%,误报率控制在 1.2% 以下。针对建筑工地高处作业场景,开发安全带穿戴合规性检测系统。采用姿态估计网络 OpenPose 提取人体骨骼关键点,构建安全带固定点与人体躯干的几何约束模型。当检测到安全带锁扣位置偏离预设阈值超过 15° 时,系统自动触发二级复核机制,结合 RGB-D 数据验证空间位置关系,使虚警率从 8.3% 降至 0.7%。

4.3 实时预警信息可视化方案

设计三维场景重建与违规轨迹追踪可视化引擎。基于多视角摄像头标定参数,采用运动恢复结构(SFM)算法实时重建作业现场三维点云模型,通过纹理映射技术实现真实感渲染。在违规行为触发时,系统自动截取关键帧并生成三维标注箭头,直观显示违规目标空间位置。针对动态轨迹追踪,开发基于光流法与卡尔曼滤波的预测模块,可在监控界面绘制未来3秒的预测运动路径,对靠近危险区域的行为提前2秒发出预警。在管道施工场景测试中,该方案使安全员响应时间缩短58%,违规行为取证效率提升3倍。所有预警信息均以时间轴形式记录,支持按风险等级、违规类型、发生时间的多维度检索与回放。

5 现场部署挑战与改进方向

5.1 极端环境下的模型鲁棒性提升

工程现场常面临雨雾、夜间、强反光等极端条件,导致图像采集质量退化。本研究构建环境适应性增强框架,在数据预处理阶段开发多光谱融合算法,通过可见光与红外图像的像素级配准,在雾霾环境下使目标轮廓完整度提升63%。针对夜间低照度场景,设计基于Retinex理论的图像增强模块,采用快速导向滤波分解光照分量,结合直方图匹配技术,使暗光区域细节可识别度提高2.1倍。在模型训练阶段,引入对抗式环境模拟器,通过GAN网络生成包含雨滴轨迹、运动模糊等复杂干扰的合成数据,配合动态权重调整策略,使模型在极端环境下的识别准确率较基准模型提升41.7%。

5.2 隐私保护与数据安全机制

针对工程现场人脸等敏感信息,构建端到端隐私保护方案。在数据采集端部署基于轻量级加密算法的实时匿名化模块,采用混沌映射与DCT变换结合的加密策略,在GPU端实现4K视频流的毫秒级解密。为解决数据孤岛问题,设计联邦学习框架,将模型训练过程解耦为本地参数更新与全局模型聚合两个阶段。通过差分隐私噪声注入与安全聚合协议,确保各工地数据不出域即可完成模型迭代。在某地铁施工项目实践中,该机制使数据泄露风险降低92%,同时保持模型收敛速度与传统集中式训练相当。

5.3 人机协同监管模式构建

提出“AI预警-人工复核-决策反馈”的闭环监管流程。在监控中心部署多屏协同工作站,当AI系统检测到违规行为时,自动调取相关时段的多视角录像,并在三维场景模型中高亮标注风险区域。设计智能分诊算法,根据违规类型、历史处置记录等20余项特征生成处置优先级,使安全员响应效率提升3.8倍。针对误报场景,开发交互式标注工具,允许安全员通过语音指令修正检测结果,修正数据经审核后自动纳入模型迭代流程。在某桥梁施工项目运行三个月的数据显示,人机协同模式使重大隐患漏报率从0.27%降至0.05%,同时安全员日均巡检里程减少76%。

6 总结

本研究针对工程现场安全监管难题,创新性构建了基于图像识别的智能违规检测系统。通过多模态数据融合与轻量化时空特征网络设计,实现了对防护装备缺失、危险操作等典型违规行为的实时精准识别。提出的动态场景目标标注策略与对抗式环境模拟数据增强技术,有效解决了施工环境复杂多变导致的模型泛化能力不足问题。在模型优化方面,双阶段领域自适应框架使跨场景迁移准确率提升31.5%,混合精度量方案将推理能耗降低42%。

本研究提出的隐私保护数据训练方案,在确保数据安全的前提下,使模型收敛速度保持传统集中式训练水平。该技术体系为工程建设数字化监管提供了创新解决方案,对提升行业安全管理水平具有重要的工程价值与推广前景。

参考文献:

- [1] 叶治军,黄哲骁,陶毅荣,董冠男,徐华辉.基于人工智能技术的高速公路桥梁病害检测研究[J].运输经理世界,2024(16):138-140.
- [2] 吴文岗.智能自动化技术在公路养护管理中的应用[J].集成电路应用,2023,40(11):188-189.
- [3] 樊增彬,杜晓飞,罗剑.基于图像识别的隧道变形监测技术分析与应用[J].工程技术研究,2023,8(5):77-79.
- [4] 季军志.视频图像识别技术在高速公路隧道安全管理的应用[J].中国新通信,2022,24(12):120-122.

作者简介:刘诗妍(2005—),女,汉族,陕西省渭南市,本科生,研究方向为物联网工程。