

铁路调车作业 AI 违规行为识别与安全预警研究

孟世涛 张中扬 张淇智 杨雨璐

河北轨道运输职业技术学院, 中国·河北 石家庄 050051

摘要: 铁路调车作业是铁路运输安全的关键环节, 传统依赖“人防”的监管模式存在效率低、事故率高的问题。本文聚焦调车作业安全痛点, 结合 AI 技术与铁路场景需求, 研究 AI 违规行为识别算法优化、安全预警系统构建及实际应用路径, 通过融合计算机视觉、深度学习与抗干扰通信技术, 实现调车动作实时识别、违规行为自动预警, 旨在为铁路调车作业从“人防”向“技防”转型提供技术支持, 降低事故发生率, 提升运输安全与运营效率。

关键词: 铁路调车作业; AI 违规行为识别; 安全预警; 计算机视觉; 深度学习

Research on AI Violation Recognition and Safety Warning of Railway Shunting Operations

Meng Shitao, Zhang Zhongyang, Zhang Qizhi, Yang Yulu

Hebei Railway Transport Vocational and Technical College, China Hebei Shijiazhuang 050051

Abstract: Railway shunting operation is a key link in railway transportation safety, and the traditional supervision mode relying on "civil defense" has problems of low efficiency and high accident rate. This article focuses on the safety pain points of shunting operations, and combines AI technology with the needs of railway scenarios to study the optimization of AI violation recognition algorithms, the construction of safety warning systems, and practical application paths. By integrating computer vision, deep learning, and anti-interference communication technologies, real-time recognition of shunting actions and automatic warning of violations are achieved. The aim is to provide technical support for the transformation of railway shunting operations from "human defense" to "technical defense", reduce accident rates, and improve transportation safety and operational efficiency.

Keywords: Railway shunting operation; AI violation recognition; Safety warning; Computer vision; Deep learning

0 引言

调车作业作为铁路运输组织的核心环节, 直接关系到列车调度效率与人员设备安全。习近平总书记强调“要以智能化手段筑牢安全生产防线, 实现从‘人防’向‘技防’转变”, 《“十四五”铁路发展规划》亦明确提出“加强铁路安全防控技术研发, 提升风险预警与应急处置能力”, 在此背景下, 研究 AI 技术在调车作业违规行为识别与安全预警中的应用, 构建智能化安全监管体系, 对落实交通强国战略、保障铁路运输安全具有重要现实意义。

1 铁路调车作业的安全监管现状及技术需求

铁路调车作业在铁路运输组织中占据着关键地位, 担负着车辆编组、解体和取送的核心工作, 其作业情景涉及多轨、多设备及多人协同工作, 安全风险点分布密集并呈动态变化, 目前, 调车作业的安全监管主要依赖于“人工巡查加传统的视频监控”的模式, 这一模式存在着显著的局限性^[1]。人工巡查主要靠安全员的现场盯控来完成, 由

于作业区域广泛、人员精力受限, 在夜晚或者恶劣天气下视线被遮挡, 容易产生监管盲点, 很难实时捕捉到瞬间的违规情况, 传统视频监控虽能实现 24 小时覆盖, 但需人工事后回看分析, 存在“检测滞后、处理不及时”的问题, 且面对复杂场景下的细微违规行为, 识别精度不足, 随着铁路货运量和调车作业频次的不断增加, 传统的监管模式已经不能适应安全管理的需要, 智能化监管技术要求越来越迫切。一方面, 需技术实现“实时识别、主动报警”, 替代部分人工监管工作, 减少人为失误, 提升监管效率; 另一方面需要对调车作业复杂环境进行技术适配, 能够在强光、暴雨、粉尘和遮挡情况下依然能够准确地识别出违规; 另外, 还需要技术具有多目标识别能力和对作业人员、设备和车辆状态的同步监控, 以达到“人员一车辆一环境”协同监管。AI 违规行为识别技术具有实时性好、识别精度高、能够全天候作业等优点, 是解决调车作业安全监管问题的核心发展方向, 可以有效地弥补传统监管中存在

的缺陷,对调车作业安全起到技术支持作用。

2 铁路调车作业 AI 违规行为识别的方法

2.1 CNN 手部骨骼提取及行为判定

CNN 手部骨骼提取及行为判定的重点是调车作业过程中涉及手部操作的不规范行为,例如作业人员不按照规定穿戴防护手套、没有对调车设备的按钮进行正确的操作、违规传递工具等,利用卷积神经网络对手部骨骼进行关键点提取,对手部的动作和姿态进行分析,从而达到准确判断违规的目的^[1]。本方法以构建手部骨骼 CNN 模型为核心,先利用高清摄像头获取作业人员手部图像,对模型进行去噪处理、灰度化等预处理之后,首先使用卷积层和池化层对手部进行特征提取,然后使用全连接层对手腕和手指关节进行骨骼关键点定位,从而构成手部骨骼的完整拓扑,在所提取骨骼关键点的基础上,进一步系统地对手部动作进行规范性分析。例如,在判定“是否戴防护手套”的过程中,模型能够识别手部轮廓的纹理和颜色特征。如果没有检测到手套特有的纹理或颜色,并且手部皮肤特征非常明显,那么就会被判定为违规;判定“是否违规操作装置”时,模型会对比手部与设备按钮的相对位置,若手部未按规定流程触碰按钮,或触碰时未伴随确认动作,则触发违规警报。为了提高判定精度,需要对模型进行海量调车作业场景手部图像数据训练,以覆盖不同光照、角度和遮挡等情况的样本,保证骨骼关键点在实际使用过程中能够被精确地提取,避免由于手部被遮挡或动作过于迅速而产生的识别误差,这种方法在识别微小的手部动作时能够达到超过 90% 的准确度。

2.2 YOLOv11+OpenCV 小目标违规检测

YOLOv11+OpenCV 小目标违规检测重点检测调车作业过程中小目标违规情况,比如作业人员随身携带的火种没有按照规定储存、调车车辆螺栓松动、轨道内异物、没有正确挂信号旗等,利用 YOLOv11 快速目标检测能力和 OpenCV 图像处理优势对小目标进行精确定位和违规判定^[1]。在调车作业场景下,由于小目标通常具有体积小、与背景对比度低等特点,容易在传统的检测算法中被忽视,YOLOv11 是一种单阶段的目标检测算法,具有更强大的小目标特征提取能力,可以在确保检测速度前提下提高识别精度,本方法的实现过程分 3 步进行:第 1 步,使用 OpenCV 对从调车场景中获取到的图像进行预处理,通过直方图均衡化来增强小目标和背景之间的对比度,利用 Canny 算法对小目标轮廓特征进行凸显,为之后的检测打下基础;步骤 2,在 YOLOv11 模型中输入预

处理图像,该模型利用多尺度特征融合模块对不同大小的目标进行分层检测,对于小目标着重提取高分辨率特征图,以避免因特征压缩而造成信息损失;第 3 步,模型输出小目标的类别、位置坐标与置信度,若置信度超过预设阈值(如 85%),则判定为违规,并在图像中标记目标位置,供监管人员查看。为了满足实时监管的需求,需要对 YOLOv11 模型进行轻量化的优化,减少卷积层的数量,采用轻量化的网络结构,以确保在常规硬件设备上能够实现每秒 20 帧以上的检测速度,实际应用中,对小目标的识别准确率可以达到 88%。

2.3 对复杂环境的识别进行数据强化和优化

调车作业经常要面对强光、暴雨、暴雪、粉尘和遮挡等复杂情况,这都会使采集到的图像产生模糊、噪声和色彩失真的现象,极大地影响 AI 模型识别的准确性。基于数据增强优化的复杂环境识别将训练数据进行多样化,模拟出复杂环境中图像的特征,增强了模型在复杂环境中的适应能力,保证了在恶劣环境中仍然能够准确地识别出违规行为。数据增强并不是单纯地增大数据量,它是通过对图像进行合理变换,使模型在复杂环境中对目标特征进行学习,从而避免因环境变化造成识别性能降低。

常用的数据增强手段主要有 4 类:第一类是光照和色彩变换,通过调节图像亮度、对比度、饱和度和色温等参数,来模拟强光直射、逆光、夜间照明等情况,使模型能够学习到人和设备在各种光照中的特性;另一种是天气模拟,加入噪声、模糊、雨痕和雪粒等效果,模拟出暴雨、暴雪和粉尘的环境,使得模型能够对雨雾遮挡情况下的目标进行精确的识别;第三种是姿态和角度转换,通过图像旋转、缩放、翻转和裁剪等操作,模拟出作业人员的不同运动姿态和摄像头的拍摄角度等信息,保证了模型对于不同运动中的不规范行为均能够进行精确判断;四是遮挡模拟,在图像中添加设备部件、其他人员等遮挡物,模拟实际作业中的遮挡场景,让模型学习部分遮挡下的目标识别能力。通过对数据的增强处理,AI 模型的训练样本能够适应各种复杂的环境条件。在实际应用中,该模型在暴雨天气下的违规识别准确率提高了 35%,而在强光逆光环境下的准确率也增加了 28%。

2.4 边缘计算进行实时识别部署

边缘计算的实时识别部署指的是在调车作业现场的边缘设备上部署 AI 违规行为的识别模型,例如边缘服务器和智能摄像头,通过实施“数据采集—模型推理—结果输出”的本地化流程,可以避免数据在传输到云端时产生的延迟,

从而满足调车任务对实时监控的要求,在进行调车作业时,违规处理窗口通常只有数秒到数十秒的时间,比如操作人员将要穿越危险轨道时,如果使用传统的“云端计算”方式,图像数据需要传送到远程云端服务器进行处理,然后把处理结果回传到场景中,传输延迟有可能在 1 秒钟以上,造成报警不及时而贻误了处置的最佳时机。边缘计算实现了计算能力向场景的下沉,显著减少了数据处理的时间,保证了对违规行为的实时识别和报警。

3 铁路调车作业 AI 违规行为的安全预警

3.1 违规分级预警机制

违规行为分级预警机制依据调车作业中违规行为风险大小,对预警进行分级,并相应采取不同处置流程和应对措施,实现“精准预警、分级处理”,提升安全管理效率与针对性,调车作业不规范行为风险有明显区别,如作业人员不戴安全帽为普通风险,会造成头部微小损伤;调车机在没有证实信号的情况下启动是重大危险,会导致车辆碰撞事故的发生,作业人员穿越正在作业的轨道是极高风险,会直接造成伤亡。如果所有的违规行为都使用相同的预警方式,容易造成监管人员对于重大风险的关注不够,或者对于一般风险的关注度过高,从而影响监管效率,分级预警机制一般把预警划分为不同等级,第一级预警针对极高风险的违规事件,触发后系统随即发出声光报警、现场高音喇叭提示、监管终端红光闪烁,并同步自动给调车长和安全员手机发送紧急短信,若 10 秒钟内未接收到处置反馈信息,则联动控制调车设备停止运行,强行制止风险扩大;二级预警针对重大风险违规行为,触发时发起黄色声光报警,并将预警信息发送给监管人员,要求在 30 秒钟之内做出反应进行处理,三级预警针对一般风险违规,触发时只在监管平台上呈现蓝色的预警提示,监管人员在作业间隙及时提醒整改即可。通过实施分级预警机制,监管资源主要集中在高风险违规行为上,极高风险违规行为的处理响应时间被缩短到不超过 15 秒,同时重大风险行为的改善率也提升到了 95%,从而有效地减少了安全事故的发生率。

3.2 对预警信息进行多源数据的融合

多源数据融合预警信息通过对调车作业 AI 违规行为判别数据和其他作业数据的融合分析,摆脱单一数据限制,促进预警信息准确和全面,避免信息孤立造成错判或者漏判。调车操作的安全状况受到“人员—车辆—环境—经营”多重因素的影响,仅仅依赖单一的违规行为识别数据不足以全面反映风险的全貌,例如, AI 能够识别出作业

人员在轨道边的停留情况,若仅根据这一数据,有可能被错误地判断为不规范,而综合作业计划数据得知该区在执行轨道检查作业,结合人员定位数据得知该人是检查人员且已上报,就可以判断其为合规作业,以免误预警,多源数据融合主要包括四种类型的数据,首先是 AI 识别数据,包括违规行为的类型、发生的时间、位置、置信度,这是预警的核心依据,之后是作业计划数据,包括调车作业的车次、路线、时间、涉及人员与设备,用于判断行为是否符合作业规范,最后,调车机设备状态数据,包括调车机车速、位置、制动状态以及轨道信号机显示状态,以将违规行为和设备风险相关联,环境和人员数据包括现场风速、能见度等环境监测数据,以及作业人员实时位置、岗位资质等人员管理数据,以判断周围环境对行为安全性和人员操作资质有无影响。在数据融合过程中,通过统一的数据模型对各种数据进行标准化处理,并运用加权融合、规则推理等多种算法进行分析,成功将预警信息的误判率减少了 40%,漏判率下降了 35%,为调车操作的安全性提供了更为精确的决策依据,在实践中,多源数据融合也可以实现动态预判风险。举例来说,当 AI 检测到作业人员接近轨道(AI 数据)时,结合设备的状态数据,看出调车机正在以 5km/h 的速度靠近这一区域,根据环境数据,目前的能见度低于 50 米,因此系统会在 15 秒前启动预警机制,为工作人员预留足够的避让时间,而不是等到出现违规行为时才发出警报。同时将融合数据实时同步到铁路安全管理平台上,并形成完整的违规行为数据档案,其中包括违规发生的时间、地点、关联人员、处置结果等信息,方便管理人员进行事后复盘分析和作业流程、监管策略的优化。这种“实时预警加事后溯源”的双重功能,让多源数据融合成为提升调车作业安全管理精细化水平的关键支撑。

4 结语

铁路调车作业 AI 违规识别及安全预警研究是智能化技术和铁路安全生产深度融合发展的一次重大探索,它有效地突破了传统监管模式存在的局限性。研究从优化 AI 识别算法和构建多维度预警系统等方面入手,使调车作业安全监管精准化和高效化,从而为铁路运输“技防”体系的建立提供可行路径。今后需要进一步促进技术和行业场景适配优化、强化跨领域协同创新、不断增强复杂环境中系统稳定性和适应性,助力铁路运输行业整体走向智能化安全管理的新阶段,构筑建设交通强国的安全基石。

参考文献:

- [1] 梁惠泽, 李丹. 铁路编组站调车作业效率提升策略

研究[J]. 铁路采购与物流, 2025,20(06):67-69.

[2] 彭轩, 李耀, 张屹, 刘小兵. 基于机器视觉的铁路调车作业异物入侵检测系统研究[J]. 铁路计算机应用, 2025,34(06):52-57.

[3] 伍强, 刘思序, 胡睿华, 张英贵. 行车和调车作业

兼备的铁路客运站到发线运用计划编制研究[J]. 铁道运输与经济, 2025,47(09):99-105+114.

作者简介: 孟世涛(2005.10-), 男, 汉族, 河北省唐山市人, 学生, 全日制专科在读, 研究方向: 铁路安全。