基于人工智能的高速公路收费站安全管控系统研究

吴 霖,龚 林

(中交资管智慧交通事业部,重庆 401121)

摘 要:针对高速公路收费站安全管控过程中存在的人工监控效率较低、异常事件响应滞后以及多源信息协同不足等问题,提出一种基于人工智能(AI)的收费站安全管控系统。该系统融合计算机视觉、边缘计算、云计算和大数据分析等技术,实现对收费站区域内行人、非机动车、高危车辆及超限车辆等目标的实时检测、识别、告警与联动处置。通过构建多模态感知与融合分析机制,引入"边缘-云协同"架构和AI数字人交互机制,实现收费站安全事件的智能感知、分析决策和闭环管控。

关键词:计算机视觉;自动化管理;智能交通

中图分类号:TP242 **文献标识码**:A

Research on safety control system of highway toll station based on artificial intelligence

WU Lin, GONG Lin

(Intelligent Transportation Division, CCCC Asset Management Company Limited, Chongqing 401121, China)

Abstract: To address the issues existing in the safety control process of highway toll stations, including low manual monitoring efficiency, delayed response to abnormal events, and insufficient coordination of multi-source information, an Artificial Intelligence (AI)-based safety control system for toll stations is proposed. By integrating technologies such as computer vision, edge computing, cloud computing, and big data analytics, the real-time detection, recognition, alarming, and coordinated handling of targets including pedestrians, non-motorized vehicles, high-risk vehicles, and over-limit vehicles within the toll station area are achieved. Through the construction of a multimodal perception and fusion analysis mechanism, an "edge-cloud collaborative" architecture and an AI digital human interaction mechanism are introduced, by which intelligent perception, analytical decision-making, and closed-loop control of toll station safety events are realized.

Key words: computer vision, automated management, intelligent transportation

我国正加快推进"数字中国"和"交通强国"建设,AI、车路协同、边缘计算等技术逐步应用于高速公路运营管理领域。《智能交通发展战略(2021—2035年)》提出,要构建安全、高效、绿色、智能的现代化综合交通体系,推动交通基础设施数字化、网络化和智能化发展。在此背景下,将AI技术应用于高速公路收费站安全管控,有助于提升异常事件感知、分析和处置能力,降低传统人工监管模式对人员的依赖,为智慧高速建设提供技术支撑[1]。

1 收费站安全管控现状

我国高速公路传统安全管控方式主要依赖人工巡查和固定点位视频监控,存在监控覆盖范围有限、人工识别效率较低、异常事件响应滞后以及缺乏全过程闭环管理等问题。随着高速公路交通流量持续增加,以及特殊天气和突发事件发生频率提高,传统人工管控模式已难以充分满足收费站全天候、实时化和智能化安全管理需求。

传统收费站安全管控系统的局限性主要体现在以下方面:(1)监控点位相对固定,部分区域存在视觉盲区;(2)异常目标识别主要依赖人工判断,易受人员工作状态和经验水平的影响;(3)难以实现全天候、连续化实时监管,部分事件仍以事后复盘和人工追溯为主;(4)不同感知设备和管理环节之间缺乏有效联动,难以形成"感知—分析—决策—处置—反馈"的闭环管理机制。

为进一步分析收费站行人和非机动车违规通行情况,对某地4个典型高速路段2023年第四季度特情数据进行了统计,结果如表1所列。

基金项目:智慧收费AI数字人联动安全管控探索科研课题项目:智慧收费AI数字人联动安全管控探索(CQTH-0699-2025-022)

表 1 2023 年 4 个路段“行人/非机动车上高速”统计

路段	10月行人	10月非机动车	11月行人	11月非机动车	12月行人	12月非机动车
路段 1	9	10	5	13	6	2
路段 2	5	76	9	83	9	54
路段 3	0	4	2	1	1	5
路段 4	4	12	4	7	1	12

由表 1 可知，部分路段行人和非机动车违规进入高速公路的事件数量较高，其中路段 2 连续 3 个月非机动车违规事件均处于较高水平，表明相关安全风险具有一定的持续性和集中性。面对高频、连续发生的异常事件，单纯依赖人工识别和处置容易产生较大的工作压力，也难以保证响应的及时性。因此，有必要引入 AI 技术，对收费站重点区域进行持续感知和自动识别。

目前，我国高速公路智能化转型主要围绕降本增效和安全可控展开，逐步形成以智能设备、边缘计算和 AI 为核心的技术应用模式。例如，部分收费站采用无人值守收费设备和智能机器人，实现语音交互、多方式支付等功能；部分收费站通过云边协同平台实现多车道集中管理和远程特情处置；部分收费站开始采用国产化软硬件和数据库系统，提高基础设施自主可控能力。

基于上述发展趋势，本文提出一种面向高速公路收费站安全场景的 AI 管控系统。该系统具有以下特点：(1)通过多类型摄像设备和传感器协同部署扩大感知范围，降低监控盲区；(2)利用深度学习模型实现异常目标自动检测与识别，加快事件响应速度；(3)通过告警系统与 AI 数字人联动，实现语音播报、信息通知和辅助劝导；(4)支持与上级高速公路联网监控平台进行数据对接，实现安全事件的集中管理和分析。由此形成覆盖目标感知、智能识别、风险判断、告警处置和数据分析的安全管控体系[2]。

2 系统架构与关键技术

2.1 系统架构

本文设计的智能收费站安全管控系统采用分层架构，主要由前端感知、边缘计算、中心决策、交互反馈和数据分析 5 个部分组成。

(1)前端感知层：在收费站车道、广场及重点管控区域，部署高清摄像机、毫米波雷达、地磅和红外传感器等设备，对车辆、行人和非机动车等目标进行实时感知，并采集目标图像、位置、速度、重量及车辆外廓等信息，为后续分析提供多源数据。

(2)边缘计算层：利用部署在收费站现场的边缘计算设备，对视频和传感器数据进行预处理、目标检测及初步事件识别。通过在数据源附近完成部分计算任务，可以减少原始数据向云端传输的数据量，降低通信压力和响应时延。

(3)中心决策层：利用中心服务器和云计算资源，对边缘节点上传的结构化数据和关键事件进行进一步分析，并结合历史数据和管理规则完成风险判断、告警等级划分及处置策略生成，实现多收费站安全事件的集中管理。

(4)交互反馈层：当系统识别到行人闯入、非机动车进入、高危车辆或超限车辆等异常情况时，根据预设规则自动触发声光告警、语音播报和后台通知[3]。同时，通过 AI 数字人实现定向语音提示、语义劝导和辅助应急处置，形成自动告警与人工干预相结合的交互机制。

(5)数据分析层：对系统运行过程中产生的检测结果、告警记录、车辆信息和事件处置数据进行统一存储，并利用大数据分析方法开展事件统计、趋势分析和风险评估，为收费站运行管理和安全决策提供数据支持。

2.2 关键技术

(1)目标检测与分类：采用深度学习目标检测算法对收费站场景中的车辆、行人和非机动车等目标进行实时识别。检测网络主要由 Backbone 和 Head 组成，其中 Backbone 负责提取输入图像的多尺度特征，Head 利用不同层级的特征信息进行特征融合和目标预测，最终输出目标类别及目标位置等检测结果。训练数据集包含大量收费站场景图像及对应标注数据，目标检测准确率达到 95.3%，召回率达到 91.2%。

(2)多模态数据融合：针对收费站不同传感器采集的数据类型和特征差异[4]，采用数据标准化、特征嵌入和加权融合等方法，对视觉、雷达和地磅等多源信息进行统一处理，提高不同数据源之间的关联和互补能力。

(3)智能决策与自动化响应：根据目标检测结果和风险判断结果，自动生成相应的处置策略，并触发语音告警、后台通知等措施。

(4)语义联动控制：建立告警事件与 AI 数字人之间的联动规则，根据异常目标类型、位置和风险等级自动匹配对应的话术，实现检测、告警、播报和人工接管之间的协同。

(5)模型训练与性能优化：模型采用大规模、高质量标注数据集进行训练。数据集包含超过 3.5 万张覆盖不同时段、天气和收费站区域的场景图像，涵盖白天、夜间，以及晴、雨、雾、雪等不同环境，并覆盖收费车道、收费广场等典型区域。标注对象包括小汽车、货车、客车、危化品车、行人、摩托车和自行车等。训练过程中采用旋转、缩放、色彩抖动，以及 MixUp 和 Mosaic 等数据增强方法，提高模型在复杂环境下的泛化能力。最终模型在独立测试集上采用 mAP@0.5 等指标进行性能评价。

3 技术路线革新

3.1 交通目标检测技术

目前，收费站目标检测通常采用轻量化 YOLO 系列

模型部署于边缘计算设备，以满足实时检测需求。然而，在雨、雾、雪等复杂天气条件下，可见光图像质量下降，容易造成小目标漏检和误检。因此，本文在目标检测网络中引入 CBAM 注意力机制和跨阶段部分网络（CSPNet），进一步增强模型对关键目标特征的提取能力。其中，CSPNet 通过特征分流和梯度信息复用降低网络计算冗余，CBAM 通过通道注意力和空间注意力增强关键区域特征表达。经过优化后的模型部署于 Jetson AGX Orin 边缘计算设备，推理速度达到 30 FPS，可满足收费站实时检测需求。同时，引入红外热成像数据作为辅助信息，增强模型在夜间及雨雾等低能见度环境下的目标检测能力。

3.2　高危车辆及超限车辆识别

传统高危车辆和超限车辆识别主要依赖地磅检测、人工核验等方式，检测环节较多，处置效率易受人员操作影响。针对这一问题，本文构建基于多模态数据的动态权重融合机制。在车辆外廓检测方面，利用激光雷达获取车辆空间轮廓信息；在车辆属性识别方面，利用 AI 视觉模型识别危化品标识、车牌及车辆类型；在重量检测方面，通过地磅采集车辆总重及轴重信息，并与相应限值标准进行匹配。

3.3　行人及非机动车检测

行人和非机动车违规进入高速公路属于收费站典型安全事件。传统语音警示方式主要依靠固定设备进行被动提醒，对目标位置和运动状态缺乏实时感知能力，在夜间及低照度环境下容易出现漏检。

针对上述问题，本文采用可见光摄像机与红外热成像仪相结合的双光谱检测方式，对行人和非机动车目标进行协同识别。通过融合不同光谱信息，提高系统在夜间和低照度环境下的目标感知能力。在此基础上，系统进一步引入空间定位与目标跟踪技术，并结合毫米波雷达获取目标运动轨迹。当检测到目标进入危险区域时，系统根据目标位置和运动方向触发 AI 数字人定向语音告警，实现对违规目标的主动提醒，从而满足收费站全天候安全监管需求。

3.4　AI 数字人协同管理技术

传统收费站语音播报系统通常采用固定话术，难以根据事件类型、目标位置和现场情况进行动态调整，交互方式较为单一。为提高人机交互的灵活性，本文在数字人系统中引入大语言模型（Large Language Model，LLM），结合安全管控规则实现动态话术生成。

3.5　多目标融合识别与联动机制

收费站运行环境复杂，视觉、雷达和地磅等传感器易受天气、遮挡和设备误差等因素影响。若采用固定权重进行数据融合，当某一传感器受到环境干扰时，容易造成整体识别性能下降。

针对这一问题，本文采用基于 D-S 证据理论（Dempster-Shafer Theory，DST）的动态证据融合策略，对雷达点云、视觉检测结果及地磅数据进行概率融合。该方法能够根据不同传感器提供的证据对目标类别和状态进行综合判断，并在多源信息存在冲突时降低单一数据源对最终决策结果的影响。

4　系统实验结果

为验证系统的实际应用效果，在某高速收费站部署试验系统，对车辆、行人和非机动车等目标进行连续检测，并对异常事件识别、告警响应和 AI 数字人交互等功能进行测试。

系统试点期间，人工干预频次下降约 42%，事件平均处理时间由 3.7 min 缩短至 1.2 min，巡查和执勤相关人力成本预计降低约 5.4 万元/季度。系统主要性能指标如表 2 所列。

表 2　系统性能对比

指标	传统系统	本文系统	变化幅度
目标检测准确率	76.3%	95.7%	+25.4%
平均响应时延	4.8 s	1.2 s	−75%
模型更新周期	季度	周	−87.5%
能效比（TOPS/W）	2.1	5.7	+171%

由表 2 可知，本文系统在目标检测准确率、响应时延、模型更新周期和边缘计算能效等方面均具有较好的性能。目标检测准确率由 76.3% 提高至 95.7%，平均响应时延由 4.8 s 降低至 1.2 s，表明 AI 与边缘计算技术能够有效提升收费站异常事件的实时感知和响应能力。同时，模型更新周期由季度缩短至周，有利于根据新增场景数据持续优化模型性能。

5　结束语

针对传统高速公路收费站安全管控中人工依赖程度高、异常事件识别效率较低、复杂环境下检测能力不足以及多源数据协同能力有限等问题，本文提出了一种基于 AI 的收费站安全管控系统。该系统融合计算机视觉、边缘计算、云计算、多模态数据融合和 AI 数字人等技术，构建了覆盖目标感知、智能识别、风险判断、自动告警和联动处置的安全管控体系。

试点应用结果表明，该系统能够有效提高收费站异常事件的识别和响应效率。系统自动预警成功率达到 96.3%，误报率控制在 3.6% 以内，事件平均处理时间由 4.8 min 缩短至 1.2 min；在行人及非机动车检测、高危车辆识别和超限车辆监管等场景中均取得较好的应用效果。

参考文献：

[1] 肖光明，傅志俊. 浅谈高速公路交通安全问题的治理对策

（下转第 182 页）