

苏州高新有轨电车车地综合感知系统应用研究

张传习¹ 于 喆² 冯俊逸¹

(1. 上海富欣智能交通控制有限公司, 200100, 上海;

2. 苏州高新有轨电车集团有限公司运营分公司, 215011, 苏州)

摘 要 [目的]在有轨电车半独立路权运营场景下,尤其是在路口区域,存在行人或社会车辆进入有轨电车轨行区的潜在风险。通过布设在车载及地面的感知系统,可对轨行区及有轨电车周围进行监视,识别出潜在风险。为保护有轨电车运行安全,提高线路运营效率,有必要对有轨电车车地综合感知系统的应用进行深入研究。[方法]依托苏州高新有轨电车,分析了有轨电车感知系统和 V2X 通信技术在城市轨道交通领域的应用场景,包括车辆调控、环境感知、超视距感知、车车通信和车地通信等。介绍了车地综合感知系统在苏州高新有轨电车上的应用情况。通过实际运营数据对该系统性能进行了测试评估。[结果及结论]试验结果表明,基于深度学习方法对车载相机和激光雷达数据进行处理后,有轨电车可在距离其 250 m 处检测出道路交通中常见的社会车辆和行人;通过 V2X 通信技术,有轨电车在距离路口 600 m 以外,即可获得路口的地面感知信息,实现对路口的超距感知;通过车载 V2X 设备,当前有轨电车可与其他有轨电车和地面控制系统实时交换运行信息及其周围环境数据。车地综合感知系统的响应时间小于 0.33 s,漏识别率小于 0.1%。

关键词 有轨电车;车地综合感知系统;障碍物检测;无人驾驶

中图分类号 U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.061

Application Research on Vehicle-ground Integrated Sensing System of Suzhou High-tech Zone Tram

ZHANG Chuanxi¹, YU Zhe², FENG Junyi¹

(1. Shanghai Fuxin Intelligent Transportation Solutions Co., Ltd., 200100, Shanghai, China; 2. Operating Branch of Suzhou High-tech Tram Group Co., Ltd., 215011, Suzhou, China)

Abstract [Objective] In the semi-independent right-of-way operation scenario of the tram, there exists the potential risk of pedestrians or vehicles entering the track area, especially in the intersection area. The sensing system deployed on the tram and the ground can monitor the track area and the area around the tram to identify potential risks. In order to ensure the operation

safety of the tram and improve the operation efficiency of the line, it is necessary to conduct in-depth research on the application of the tram vehicle-ground integrated sensing system.

[Method] Based on Suzhou Hi-tech Zone tram project, the application scenarios of the tram sensing system and V2X communication technology in the field of urban rail transit are analyzed, including vehicle control, environment sensing, over-the-horizon sensing, vehicle-to-vehicle and vehicle-to-ground communication, etc. The application of the vehicle-ground integrated sensing system in Suzhou Hi-tech Zone tram is introduced, and the performance of the system is tested and evaluated by the actual operation data. [Result & Conclusion] The test results show that the tram can detect the common social vehicles and pedestrians in road traffic at a distance of 250m after the on-board camera and LiDAR data are processed based on the deep learning method. And with the V2X communication technology, the tram can obtain the ground sensing information of the intersection 600 meters away, realizing the over-the-horizon sensing of the intersection. With on-board V2X equipment, the current tram can implement real-time exchange of the operation information and surrounding environment data with other trams and ground control systems. The response time of the vehicle-ground integrated sensing system is less than 0.33s, and its missing detection rate is less than 0.1%.

Key words tram; vehicle-ground integrated sensing system; obstacle detection; autonomous driving

随着我国城市轨道交通的快速发展,有轨电车作为城市公共交通的重要组成部分,其运营安全、效率与舒适性日益受到关注。而在半独立路权场景下,社会车辆与有轨电车混行,不仅影响运营效率,还存在行人或社会车辆闯入有轨电车线路的风险^[1]。本文所探讨的车地综合感知系统作为实现有轨电车无人驾驶的关键技术之一,在有轨电车运行时,能够实现对有轨电车周围环境信息的全面感知,结合地面设备可实现对路口超视距感知,能够避免因行人或社会车辆闯入而造成的风险,可为有

轨电车的安全运营提供有力保障。

苏州高新有轨电车1号线列车单日运行里程超过7 600 km。2024年3月赏樱季期间,苏州高新有轨电车总客流量达84.87万人次,单日最高客流量达4.20万人次,创历史新高。本文通过对苏州高新有轨电车车地综合感知系统的应用研究,探讨车地综合感知技术在有轨电车运营环境中的应用与优化,为有轨电车的智能化发展提供理论支持与实践参考。

1 车地综合感知技术

车地综合感知技术是指通过集成多种传感器和通信技术,实现对有轨电车周围环境信息的全面感知与处理^[2]。在有轨电车运营环境中,车地综合感知系统主要包括车辆状态调控、轨道线路感知、环境目标感知、路口超视距感知,以及车车、车地通信感知等。由车载及轨旁传感器采集线路上各类数据信息,发送至主控处理单元进行分析,处理结果被分发至本车及线路上的其他有轨电车,为无人驾驶有轨电车提供决策依据。

车地综合感知系统主要构成如图1所示,包括车载及地面的传感器系统、数据处理单元和通信模块。传感器系统负责采集有轨电车周围环境信息,由摄像头、毫米波雷达和激光雷达等组成;数据处理单元负责对采集到的信息进行预处理、特征提取和目标检测,并分析影响有轨电车安全行驶的目标;通信模块则负责收集轨旁数据,并将处理后的信息传输给地面控制系统或其他有轨电车,实现信息共享及协同运行。

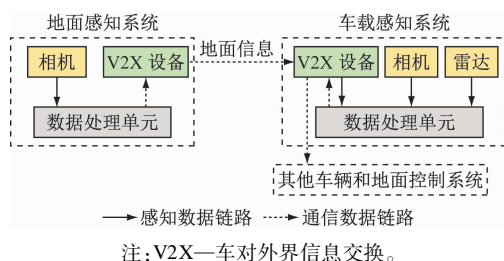


图1 车地综合感知系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vehicle-ground integrated sensing system

2 车地综合感知技术应用场景

车地综合感知技术在有轨电车运营环境中的应用场景主要包括以下几个方面。

1) 有轨电车状态调控。通过对有轨电车内部各部件进行实时监测,获取有轨电车运行状态信息,如速度、加速度、制动状态等;然后结合车地综合感知结果,对有轨电车运行状态进行调控,为有轨电车安全运行提供数据支持。

2) 轨道状态感知。通过车载相机识别有轨电车运行前方轨道状态,包括轨道曲率、轨行区范围、道岔状态等信息,为判断环境障碍物是否侵限、调控列车行驶速度、路径规划等提供决策依据。

3) 环境感知。利用摄像头、雷达等车载传感器,识别有轨电车周围的行人、社会车辆、障碍物等信息,实时监控有轨电车运行周围环境;结合其他模块数据信息,实现有轨电车自动避障,保障运营安全。

4) 路口超视距感知。为避免因路口行人或社会车辆滞留在轨行区导致的风险,通过轨旁布设的传感器设备,实时监测轨行区内的侵限状态,判断该区域当前是否可以安全通行。通过V2X通信技术将轨旁状态发送至即将接近的有轨电车,实现车载感知范围外的超视距感知,提前获取路口信息。

5) 车地、车车通信。通过V2X通信技术,采集轨旁数据进行车地综合感知,实现有轨电车与其他社会车辆以及地面控制系统的实时信息交换,提高有轨电车协同运行效率。

在以上应用场景中,车地综合感知技术可以有效提高有轨电车运营效率、保障行车安全,但同时也面临着诸多技术挑战,如复杂环境下的感知、高精度定位、实时通信等。

3 苏州高新有轨电车车地感知综合系统应用实践

为降低因社会车辆或行人闯入有轨电车轨行区而引发的风险,提高有轨电车运营效率和安全性,苏州高新有轨电车采用了车地综合感知系统。该系统采用先进的传感器与通信技术,通过在车载和轨旁布设的感知系统,实现有轨电车对周边环境信息的全面、精准感知与处理。

车地综合感知系统的感知模块基于深度学习算法,对于图像数据,采用CNN(卷积神经网络)自动提取并学习障碍物的特征,通过多层次的卷积、池化和全连接操作,实现对障碍物的精准定位、分类和距离估计,VGG、ResNet和DenseNet等经典CNN结构在此领域均有广泛应用^[3];而针对激光雷

达数据,PointNet 和 VoxelNet 等基于点云的三维物体检测网络可以实现对前方障碍物感知^[4]。PointNet 检测网络能够直接处理点云数据,学习其变换中的不变特征;VoxelNet 检测网络则通过体素化处理提高计算效率,进而提升识别准确性。对于图像和点云的检测结果,感知模块采用多传感器融合算法进行数据融合,并将融合结果发送至决策模块进行处理。

车地综合感知系统的通信模块采用 V2X 技术^[5],实现车地、车车通信。轨旁感知系统如图 2 所示。通过轨旁路口布置的相机、V2X 设备及处理单元,轨旁感知系统对路口轨行区内的行人或社会车辆进行实时感知,并将感知结果通过 V2X 通信技术发送至即将接近的有轨电车,使有轨电车提前预知路口的通行状态并及时做出相应的操作。此外,车载 V2X 设备还可将当前有轨电车及其周围环境数据与其他有轨电车和地面控制系统进行实时信息交换,提高整条线路有轨电车运营效率。



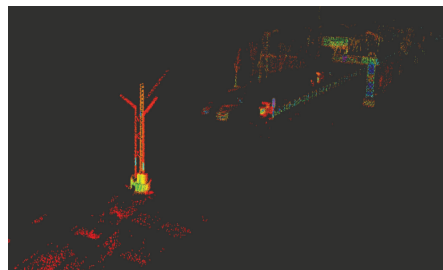
图 2 轨旁感知系统

Fig. 2 Trackside sensing system

采用多模态数据集进行验证测试试验。该数据集包括图像和激光雷达两种数据,激光雷达数据收集不同天气和光照条件下的实际路况信息,如图 3 a) 所示;图像数据涵盖了城市道路、交通路口和乡村道路等多种场景信息,如图 3 b) 所示。所有数据在标注过程中确保信息的准确性和完整性。

采用一台配备高性能 GPU(图形处理单元)的工控机,利用 TensorFlow 或 PyTorch 等深度学习框架进行模型搭建、训练和评估。可视化感知结果如图 4 所示。

试验结果表明,通过采用深度学习方法,车地综合感知系统在障碍物感知任务上的表现显著优于传统图像处理技术和激光雷达技术。有轨电车



a) 激光雷达



b) 相机

图 3 数据集类型

Fig. 3 Types of data set

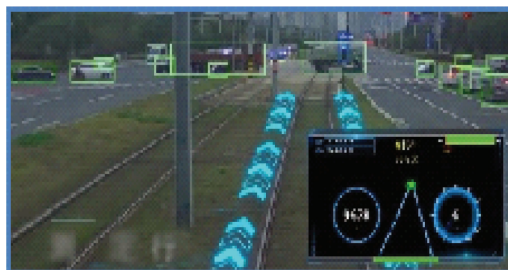


图 4 可视化感知结果

Fig. 4 Visual perception results

可在距离 250 m 时检测到道路交通中常见的社会车辆和行人;通过 V2X 通信技术,有轨电车在距离路口 600 m 以外时,即可获得路口的地面感知信息,实现对路口的超距感知,进而驱动有轨电车及时做出相应的安全操作,保障行车安全。此外,针对不同场景和环境的测试结果也验证了车地综合感知系统的鲁棒性和泛化能力。试验结果证明,采用深度学习方法的车地综合感知系统可有效保障现代有轨电车安全运营。以中国城市轨道交通协会发布的团体标准《城市轨道交通 车辆运行安全监测系统 第 3 部分:障碍物监测系统》为对照,测试结果如表 1 所示。

4 结语

本文以苏州高新有轨电车为背景,结合车地综合感知技术,深入探讨了车地综合感知系统在有轨电车各种运营环境中的应用。该系统通过集成多

表 1 车地综合感知系统测试结果对比表

Tab.1 Comparison of test results for vehicle-ground integrated sensing system

指标项	纵向检测 范围/m	横向检测 范围/m	有轨电车检 测距离/m	行人检测 距离/m	小障碍物检 测距离/m	响应时间/ s	误(漏)识 别率/%	列车定位 精度	路口行人 检测率/%	V2X 通信 距离/m
预期值	5 ~ 300	3 ~ 5	280	200	100	0.33	<0.1	厘米级	90	300
实际测试值	5 ~ 350	3 ~ 5	350	250	100	0.30	<0.1	厘米级	95	600
团标参考值			280	200	100	0.33	<0.1			

种传感器及 V2X 通信技术,能够实时监测有轨电车内部各部件的运行状态、感知轨道及有轨电车运行环境障碍物、远距离获取地面路口信息,然后通过综合各模块数据执行决策,保障有轨电车安全运行。同时,该系统通过 V2X 通信技术,实现了有轨电车与其他有轨电车以及地面控制系统的实时信息交换,有效提高了线路运营效率。

试验数据表明,苏州高新有轨电车车地感知综合系统具备良好的性能和系统稳定性。后续还需对复杂光照、恶劣天气环境下的系统性能做进一步的优化研究。

车地综合感知系统在苏州高新有轨电车的应用实践证明,该系统能够提升有轨电车运营的安全性及运营效率。本文的研究也丰富了现代有轨电车车地综合感知系统的设计理念,为进一步实现有轨电车无人驾驶技术提供了重要参考。

参考文献

[1] 李国龙,朱永辉. 基于车联网的有轨电车站口优先方案[J]. 交通与运输(学术版), 2017(2): 124.
LI Guolong, ZHU Yonghui. Intersection signal priority solution of tram based on network of vehicles[J]. Traffic & Transportation, 2017(2): 124.

[2] 朱永辉,梁霄,袁魁. 基于车路协同技术的自动驾驶有轨电车站口通过优化技术[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(10): 233.
ZHU Yonghui, LIANG Xiao, YUAN Kui. Optimization technology of tram autonomous driving through crossing based on V2X technology[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(10): 233.

[3] 郑泽熙,范楷,邓晶雪. 基于改进 Mask-R-CNN 网络的轨道交通运行环境感知技术应用研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(1): 184.
ZHENG Zexi, FAN Kai, DENG Jingxue. Application research of rail transit operating environment perception technology based on improved mask-R-CNN network[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(1): 184.

[4] 彭育辉,郑玮鸿,张剑锋. 基于深度学习的道路障碍物检测方法[J]. 计算机应用, 2020, 40(8): 2428.
PENG Yuhui, ZHENG Weihong, ZHANG Jianfeng. Deep learning-based on-road obstacle detection method[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(8): 2428.

[5] 李永波,罗钊,刘刚,等. 基于 5G 与 V2X 的智能有轨电车无线通信系统设计与性能测试[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(10): 67.
LI Yongbo, LUO Zhao, LIU Gang, et al. Design and performance test of radio communication system based on 5G and V2X for intelligent tram[J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(10): 67.

[6] 韩宝明,余怡然,习喆,等. 2023 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(1): 1.
HAN Baoming, YU Yiran, XI Zhe, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations worldwide in 2023: a review[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2024, 37(1): 1.

· 收稿日期:2024-06-07 修回日期:2024-06-28 出版日期:2024-09-10
Received:2024-06-07 Revised:2024-06-28 Published:2024-09-10

· 通信作者:张传习,工程师,zhangchuanxi@fitsco.com.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

Commentary

Commercial Use of Carbon Fiber Metro Trains Opening A New Era of Rail Vehicle Materials

GU Baonan

(Vice president of Urban Mass Transit, Professor)

On June 26, 2024, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd. (hereinafter referred to as CRRC Sifang) and Qingdao Metro Group