

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.053

基于机器视觉监测系统的地铁自动驾驶安全性保障方法研究

梅震琨

(苏州市轨道交通集团有限公司,江苏 苏州 215001)

摘 要:为提高地铁线路全自动驾驶系统安全性,设计机器视觉监测系统,基于激光雷达探测法判别站台门间人员位置,实现站台门防夹人功能;构建车载障碍物监测装置,研究点云处理与目标识别技术,实现地铁障碍物智能检测识别。在苏州地铁中进行验证试验,确定可有效保障线路运营安全。

关键词:地铁;自动驾驶系统;智能监测系统;安全保障

中图分类号:TP277 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0261-04

Research on Safety Guarantee Method of Subway Automatic Driving Based on Machine Vision Monitoring System

MEI Zhenkun

(Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., Suzhou 215001, China)

Abstract: In order to improve the safety of the subway line of the full auto drive system, this paper designs a machine vision monitoring system. Based on the laser radar detection method, the position of people between the platform doors is judged and the anti pinch function of the platform doors is realized. A vehicle mounted obstacle monitoring device is constructed, and point cloud processing and target recognition technology are studied to achieve intelligent detection and recognition of subway obstacles. Verification tests are carried out in Suzhou Metro to ensure the safety of line operation.

Keywords: subway; autonomous driving system; intelligent monitoring system; safety guarantee

0 引言

地铁具有载客量大、节能环保、准点便捷的特点,在缓解城市交通拥挤和节能高效环保等方面有着明显的优势^[1]。地铁与城市交通的需求相契合,在城市综合交通运输体系中发挥着与日俱增的骨干作用。随着列车运行速度和密度的不断提高,列车运行场景和条件的多样性和复杂性也越来越高,人工控制列车难以满足列车运行控制系统自动化水平和智能化水平提高的需求,列车自动驾驶(automatic train operation, ATO)符合时代潮流^[2]。地铁站台门防夹人的研究大多局限于门体结构,如徐步算^[3]提出的按压触发式防夹人解锁装置,能够在乘客将跌入列车门和滑动门之间间隙时,靠身体接触部位挤压本装置便可解开滑动门门锁,同时断开地铁列车发车信号回路并发出告警信号,从而起到安全保护作用。

本文从地铁自动驾驶安全性出发,基于激光雷达、毫米波雷达等先进探测设备,结合相应检测算法,设计一种智能检测系统,其包含地铁站台门防夹人装置和车载障碍物智能检测装置。该系统

能够快速、精准地识别进入站台门间的乘客和轨行区中的异物类型并及时报告运营部门,以保障地铁自动驾驶的安全,提升地铁运营的可靠性。

1 地铁站台门防夹人功能实现

在站台边缘处设置站台门,可有效防止乘客意外进入轨行区。站台门和地铁列车车体之间存在间隙,当客流量较大时,经常会出现拥挤现象,易发生间隙夹人的情况,给地铁的运行带来安全隐患。根据车站站台门安装情况及国内既有工程实际运营特点,为避免出现乘客被夹的事故发生,目前国内工程上采用了防夹挡板、防护横撑和防站人斜板等措施^[4-5],如图 1 所示。

物理防护措施普遍具有成本低、结构简单及易于安装的优点。但囿于其防护原理主要为物理隔绝,存在以下缺点:防夹挡板在滑动门关闭后失去防护功能;防护横撑无法保护门框外沿侧与列车之间的间隙;防站人斜板影响门体美观性。因此,亟需研发一种站台门防夹检测方式以保证乘客安全与地铁运营秩序。

作者简介:梅震琨(1975—),男,湖南怀化人,高级工程师,硕士,研究方向为轨道交通,lx2541@163.com。

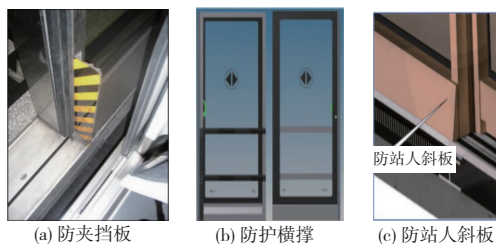


图1 屏蔽门间隙物理防护措施示意图

激光雷达应用时间飞行 (TOF) 工作原理如图2所示,即激光发射的光脉冲被物体反射回后进入光学接收器,由于物体和激光发射器之间的距离,激光脉冲从发射到被接收器收入有延迟时间(飞行时间),信号处理系统则可通过激光的飞行时间计算目标物和激光发射器之间的距离 d ,计算方法如下式所示^[6]。

$$d = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中: c 是光速; Δt 是延迟时间。

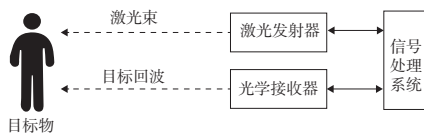


图2 激光雷达测距原理图

扫描激光雷达装置使用固态激光雷达进行扫描,其具有分辨率高、抗干扰能力强的优势,深度精度达到 2.5 cm,水平垂直分辨率可控制在 0.2°。通过对站台门与列车车门之间空间检测,无检测盲区,检测距离远,能精确探测到位置信息,可靠性高。扫描激光雷达装置的激光发射器向范围内各角度发射出激光,形成图3所示三维扇形光幕。激光脉冲到达障碍物表面后,发生漫反射,部分光被探测器接收并由信号处理系统生成点云。点云包含物体的反光位置等信息,结合目标检测算法以实现异物识别定位。结合站台门检测场景,选取固态激光雷达主要技术指标如表1所示。

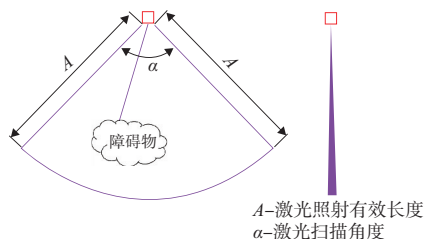


图3 激光雷达扫描检测异物示意图

表1 固态激光雷达主要技术指标

指标名称	数值或说明
波长/nm	905(不可见光)
线束/像素	300×120
视场角度/(°)	0.2×0.2
距离分辨率/cm	2.5
功率/W	15
额定电压(VDC) / V	18
通信接口	RS485
工作温度范围/℃	-20~65
光源安全等级	Class-1 eye safe

本装置由激光雷达、车站管理服务器、间隙探测主机3部分构成。其中,激光雷达通用于明确障碍物的位置。车站管理服务器通常被安装在车站设备室,直接负责雷达的关停、障碍物的报警以及数据的存储和处理。间隙探测主机被安装在车头位置的端门外,具有障碍物信息的声光报警提示和系统旁路操作等功能。系统框架如图4所示。

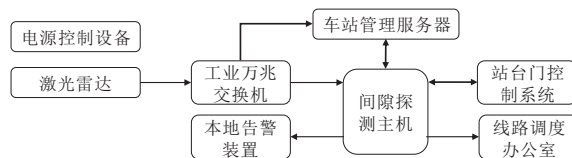


图4 扫描激光雷达站台门防夹人装置系统框架图

2 车载障碍物智能检测装置

列车运行中因异物侵袭导致的事故频发,应用车载障碍物智能检测装置进行检测识别可有效保障地铁线路的安全性,提高地铁的运营质量^[7]。由于无人驾驶线路速度一般在 120 km 甚至更高,要求检测系统的响应时间极短,以防列车高速冲撞;列车一旦发现前方的障碍物,需要至少保留 250~300 m 的刹车距离。较长的探测距离给异物检测准确性带来了巨大挑战。此外,列车在弯道的地方行驶方向被隧道壁遮挡,异物检测的难度进一步增加。

2.1 装置架构与技术方案

车载障碍物智能检测装置架构如图5所示,采用高性能行车感知激光雷达、线路故障预测激光雷达结合工业相机图像融合的方式实现隧道空间状态全面感知。首先基于轨道交通障碍物检测需要远距离、探测目标小的特点,采用混合固态激光雷达技术,综合机械式激光雷达与固态激光雷

达的优势,其角分辨率达到 0.02° ,探测距离可达 500 m。研制隧道上部线路故障预测激光雷达,该雷达扫描频率达到 7 kHz,精度达到 5 mm,可在行车过程中实时探测隧道顶部目标的变化情况,并判断隧道顶部风险出现趋势,提前给出报警。此外,本装置采用 77 GHz 毫米波雷达,探测距离达 300 m,角度分辨率达到 1.4° ,可探测车辆正前方障碍物的距离、角度和速度信息,实时获取车辆位置信息,满足雨、雪、雾等严酷天气下对隧道外障碍物探测的需求。

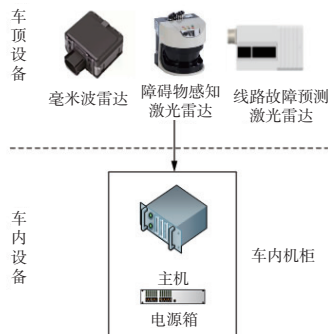


图5 车载障碍物智能检测装置架构图

考虑到不同传感器的优缺点,为提高系统检测的准确性,采用如图6所示的多维度障碍物判断决策机制。隧道内空间小、周边物体过大,采用点云目标识别检测技术;在高架线或地面线等柔性段,环境相对空旷,采用毫米波的探测技术。当探测到轨行区有行人或障碍物时,做出制动行为并将列车位置报告调度室,实现安全预警。

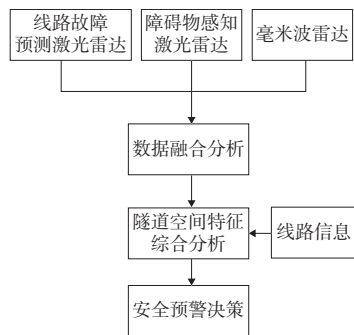


图6 车载障碍物智能检测装置决策流程图

车载障碍物别算法的技术路线为点云预处理、点云分割、聚类和目标检测分类,流程如下。

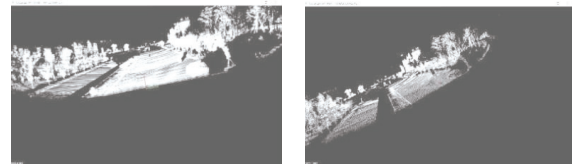
步骤1 点云数据预处理

雷达设备采集的点云数据超过 60 万个点,需要对点云数据降采样以提高算法检测速度。首先

将点云空间划分为 $N \times N \times N$ 个体素空间。按式(2)计算每个非空体素的质心 $P(v_x, v_y, v_z)$ 代替该体素内的所有点,从而降低点云的稠密度。点云预处理效果如图7所示。

$$\begin{cases} v_x = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} \\ v_y = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m} \\ v_z = \frac{\sum_{i=1}^m z_i}{m} \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 表示非空体素内的点个数; (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个点的坐标。



(a) 原始点云图

(b) 降低稠密度后的点云图

图7 点云预处理效果图

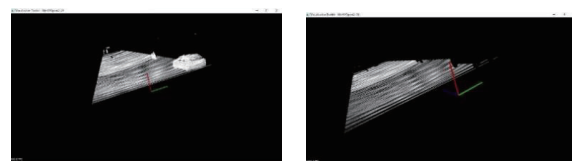
步骤2 点云分割

依据降采样后的点云特征信息将其划分为有意义的部分。为实现地铁异物检测,需要进行点云分割工作。

1) 限界分割:通过隧道限界对点云进行分割,减少外部点云干扰。

2) 轨道定位:车载障碍物主要检测位置为限界内,关注的是铁轨上的障碍物问题,严重缺陷会导致列车急停造成事故,该区域提取主要将预警等级分类,同时降低列车振动导致的点云相对位置偏移而造成定位信息不准。

3) 平面分割:以铁轨为平面进行分割,过滤地面干扰的点云信息。通过曲率与法向量的夹角作为阈值分割点云,能够分割出曲率变换较大(曲率不连续)但点云连续的区域,与地铁隧道限界和轨道的特征相符。点云分割效果如图8所示。



(a) 原始点云图

(b) 提取的地面

图8 点云分割效果图

步骤3 点云聚类

在点云分割完成后,得到包含目标的点云信息,通过聚类算法对不同目标进行分割,通过聚类物体的宽度、高度等信息过滤干扰目标,例如由于雷达角度问题导致的远处地面高于近处而未过滤干净的地面信息。

采用 kmeans 聚类法,设置相应的 k 个中心点,以最小化欧式距离为目标进行迭代并将目标高度和宽度作为约束条件。kmeans 方法对于面状和杆状点云均有较好的聚类效果,如图 9 所示,与地铁典型异物的特征具有一致性。



图 9 点云聚类效果图

步骤4 目标检测分类

对聚类后的点云数据进行分类,采用 VoxelNet 的网格网络,将点云划分为网格状,并提取网格中的特征,对聚类的点云团进行分类处理。VoxelNet 具备较高的分类准确率且处理速度快,满足地铁严苛的实时性要求。点云目标识别效果如图 10 所示。

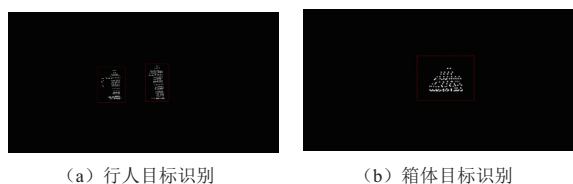


图 10 点云目标识别效果图

2.2 地铁试验验证

在某线路使用本装置,针对自动驾驶列车行进过程中需重点检测的两类障碍物:近距离(125 m)的小型异物、中等距离(250 m)下出现在轨行区的行人,分别进行检测试验。试验检测结果如图 11 所示,两类异物的平均检测用时如表 2 所示。试验结果表明,本装置能够准确识别不同距离下的典型目标,且满足实时性需求,如表 2 所示。

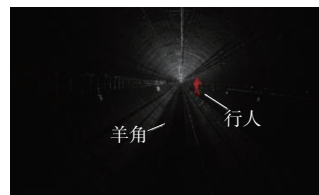


图 11 隧道内障碍物检测示意图

表 2 典型目标识别耗时表

障碍物类型	平均每帧检测耗时/(ms)
小型异物	55.3
行人	81.3

3 结语

本文从地铁自动驾驶系统的安全性需求出发,对站台门防夹人和异物检测进行研究。设计基于扫描激光雷达的地铁站台门防夹人装置和基于多源融合技术的车载障碍物智能检测装置。地铁试验证明,上述两装置均能实现设计目标,提高地铁运行的安全性,具有较好的实际推广价值。但本装置在不同地铁线路应用的鲁棒性还有待验证。

参考文献:

- [1] 张艳兵,王道敏,肖衍. 城市轨道交通全自动驾驶的发展与思考[J]. 铁道运输与经济, 2015, 37(9): 70-74.
- [2] 谭平. 城际铁路车载列控系统安全及智能控制关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [3] 徐步算. 新型地铁站台门防夹人解锁装置的研究与设计[J]. 电气化铁道, 2020, 31(增刊1): 233-235, 246.
- [4] 黄桢国,李子嘉,郭平波. 某型地铁车辆运行稳定性研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(4): 178-181.
- [5] 林耀,韩飞,戴晓彬,等. 站台门防夹系统 3D 激光雷达检测法技术应用[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(12): 157-162.
- [6] SALMANE H, KHOUDOUR L, RUICHEK Y. A video-analysis-based railway-road safety system for detecting hazard situations at level crossings[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 596-609.
- [7] JABOYEDOFF M, OPPIKOFER T, ABELLÁN A, et al. Use of LIDAR in landslide investigations: a review[J]. Natural Hazards, 2012, 61(1): 5-28.

收稿日期:2023-06-06