

地下无轨车辆辅助驾驶及高精度定位技术应用研究

王汉臣

安徽开发矿业有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i4.21767

[摘要] 地下金属矿山无轨车辆在GPS信号完全消失、粉尘大,再加上照明低的封闭巷道中运行时,就会发生碰撞事故、运输效率会受到严重的制约,辅助驾驶和高精度定位是解决这些问题的重要措施。本文围绕该需求,从定位、感知、辅助控制这三个层面来研究:提出UWB与激光SLAM及惯性导航组合定位方案以构建实时位置估计模型;设计基于3D激光雷达与深度相机的感知模块,实现障碍物检测和防碰撞预警;最后给出硬件选型和工程部署策略。现场试验表明,组合定位误差可以控制在 ± 10 cm以内,障碍物检测准确率高达92%以上。

[关键词] 地下无轨车辆; 辅助驾驶; 高精度定位

中图分类号: U463.6 文献标识码: A

Research on the Application of Underground Rail-Free Vehicle Assisted Driving and High-Precision Positioning Technology

Hanchen Wang

Anhui Mining Development Co., Ltd.

[Abstract] When the GPS signal is completely lost, the dust is large, and the closed tunnel with low lighting is running, the collision accident will occur, and the transportation efficiency will be severely restricted. Guided driving and high-precision positioning are important measures to solve these problems. This paper focuses on this requirement and studies it from three aspects: positioning, perception, and auxiliary control. It proposes a positioning scheme combining UWB, laser SLAM, and inertial navigation to build a real-time pose estimation model. The perception module based on 3D lidar and depth camera is designed to realize obstacle detection and collision avoidance warning; Finally, the hardware selection and engineering deployment strategy are given. On-site tests show that the combined positioning error can be controlled within ± 10 cm, and the obstacle detection accuracy rate is more than 92%.

[Key words] underground rail-less vehicles; Assist driving; High precision positioning

1 引言

在我国地下金属矿山无轨车辆的保有量大幅度提升,但是在巷道封闭狭窄、粉尘和水雾严重削弱了能见度时,造成刮擦、追尾事故增多,其中大多数和驾驶员的视野受限有着直接关系。常规的地面自动驾驶因GNSS失效、巷道单一和信号多径干扰很难移植。目前主要技术的方向包括了UWB测距、LiDAR SLAM以及视觉SLAM和惯导组合,将UWB、激光SLAM和微惯性导航多源融合,可是在精度和鲁棒性间取得了比较好的平衡。在国外,企业已经实现了局部自动化驾驶商业化的部署,在国内,高校以及相关企业,把定位精度从米级提升到厘米级,但是仍然面临着成本、环境适应性以及动态重定位精度等相关的瓶颈。

2 井下巷道环境分析与辅助驾驶需求

2.1 井下无轨车辆运行工况特征

地下金属矿山巷道系统由主运输巷道、分段平巷、斜坡道、溜矿井和回风巷等构成,断面以三心拱和直墙半圆拱为主,宽度3.5 m至5.5 m、高度3.0 m至4.5 m,大型设备运行时两侧空间不足0.5 m。狭窄空间配合长距离斜坡道和多个直角急转弯,增大了无轨车辆行驶的难度。生产高峰期粉尘浓度超过 20 mg/m^3 ,能见度低于10 m;潮湿的环境增大地面摩擦系数,水雾和泥浆覆盖传感器表面后,会削弱雷达回波和成像质量。矿井照明采用隔爆灯具,平均照度仅50 lux至200 lux,远低于地面道路标准。多种不利因素叠加之下,使得驾驶员很难以肉眼来准确判断前方障碍物距离。

2.2 辅助驾驶核心功能需求

井下辅助驾驶系统首先要解决的是车辆位置实时获取的问题。在井下作业时,当GPS信号完全失效时,就要依赖车载自主定

位传感器和井下预置基准设施,外加综合工程经验,定位精度要求水平误差 $\leq \pm 15$ cm,航向角误差 $\leq 2^\circ$,输出频率 ≥ 20 Hz,更新延迟 ≤ 100 ms;在井下作业时,在斜坡道会车时、转弯曲道会车以及溜井口停靠等等这些高风险工况的要求更高,要求误差 $\leq \pm 10$ cm。在井下作业时,在防碰撞预警方面,事故中大多车交互占比比较高,涵盖了追尾、错车刮擦以及盲区碰撞等。系统需要实现 360° 障碍物的检测,行车方向探测距离要求 ≥ 30 m、侧向 ≥ 5 m,对象包括同向及对向车辆、巷壁、岩块和作业人员。预警采用分级:当 $TTC > 3$ s时是声光提示,1.5~3 s内加强警报, < 1.5 s时就会触发自动减速或者紧急制动。

3 高精度定位技术方案设计

3.1 常用井下定位技术对比

井下定位技术面临无线信号随时衰减、几何特征重复度高、粉尘水雾也会干扰采集等等这些核心因素。工程中可以选取方案包括激光SLAM、视觉SLAM、UWB、微惯性导航以及轮式里程计这五类。先说激光SLAM,它是通过ICP或者NDT算法对巷道点云帧间匹配的,精度可高达5~10 cm,但是当粉尘浓度超过 15 mg/m^3 时,点云噪声会加重,匹配时就很容易失效。视觉SLAM成本低,但是低照明度和纹理单一的环境下,特征很容易跟踪丢,工程实用性有局限性。UWB基于飞行时间来测距,对粉尘和水雾敏感度远远低于激光和视觉,测距误差可以控制在 ± 10 cm以内,更新率超过50 Hz,但是精度受到基站几何布局的限制,边缘区的误差增大,非视距遮挡时可能会产生正向偏差。微惯性导航短时间精度高、输出频率超200 Hz、不会受到环境的干扰,但是如果温漂和零偏,导致误差会随时间呈三次方累积,不能单独满足长距离运行。轮式里程计靠编码器脉冲估算里程,原理很简单,但是容易受到打滑和路面起伏的影响,仅作为辅助约束。

3.2 多传感器融合定位算法

本文采用了基于扩展卡尔曼滤波的松耦合融合架构。激光SLAM和UWB各自独立解算位置观测值后输入EKF,INS负责状态预测,轮式里程计提供速度辅助观测,各个传感器不能共享底层的原始数据,在工程过程中实现复杂度低,方便调试。状态向量取15维,包括三维位置、三维速度、四元素姿态以及加速度计与陀螺仪偏置。时间更新阶段利用了IMU加速度和角速度测量值预测状态,量测更新阶段则将激光SLAM输出的位置和航向角以及UWB解算的三维位置依次注入滤波器。当激光SLAM因为粉尘干扰匹配失效时,滤波器会自动降低其观测置信度,转而依靠UWB与INS递推维持输出,等激光数据恢复正常后恢复观测权重。图优化作为更先进的融合框架,将连续时刻的车辆位置视为节点、传感器观测作为约束边,通过最小化总体误差求解最优位置序列,才能有效处理异步时延和非线性约束,精度较EKF可提升15%至30%。但图优化对计算资源要求较高,在车载工控机算力受限条件下难以实时运行,因此本文工程部署阶段优先采用EKF方案。

3.3 地图构建与重定位策略

系统运行分为建图和运行两个阶段。建图阶段是由人工驾驶车辆沿着巷道往返行驶,通过激光雷达采集点云,利用

Cartographer和NDT-Map构建高精度先验地图,并将UWB基站位置坐标关联统一到同一坐标系下。地图以概率栅格或者点云形式保存到车载存储器里,作为以后地图匹配定位的标准。运行阶段的技术难点在于动态重定位。井下采矿爆破与支护作业频繁改变巷道结构——新开凿的采场联络道使壁面出现缺口,支护置换改变反射面位置,先验地图若干天后即产生偏离。针对这个问题,引入先验地图自适应更新机制:系统将当前扫描点云和先验地图匹配,当匹配得分连续低于阈值并且定位结果多次指向同一偏离区域时,自动增量补充新增结构信息并剔除已废弃或已被替换的内容。现场测试表明,引入该机制后六个月内的重定位失效率从12%降至不到3%。

4 环境感知与辅助驾驶功能实现

4.1 障碍物检测与分类

井下障碍物种类繁多,但是不确定性很高,涵盖了同向以及对向车辆、巷壁锚杆和风水管、垮落岩块以及作业人员,几何形状、反射特性和运动状态差异明显,只靠传感器很难全场景覆盖。本文采用了3D激光雷达和深度相机互补融合方案。激光雷达选用水平 360° 、垂直 90° 的32线机械旋转式,搭配宽动态接收器应对粉尘衰减。点云经去畸变和滤波预处理后,按 0.2 m 体素分割,投影至沿巷道纵轴展开的栅格地图,通过高度差阈值和连续点云密度判断可通行与障碍区域。动态障碍物分类采用轻量化PointPillars算法,将非地面点云编码为伪图像特征后输入2D卷积神经网络,识别类别分为车辆、人员、岩块及未知障碍物四类;训练数据来自现场采集的约8000帧点云与图像同步标注集。针对车载工控机算力限制,对网络进行剪枝和INT8量化,单帧推理时间压缩至35 ms以内。深度相机在激光雷达盲区——紧贴保险杠的近距离范围提供补充视觉信息,在光照较好的主要巷道段辅助提升人员和岩块的识别召回率。

4.2 防碰撞预警与路径引导

防碰撞预警模块把定位和感知信息在巷道坐标系下进行空间匹配。系统获取车辆实时位置和航向角,结合尺寸及铰接角构建三维运动包络体,采用轴对齐包围盒降低计算量,转角处切换为有向包围盒。包络体与障碍物作空间干涉检查,辅以UWB测距双重校验。分级预警逻辑:安全区间仅监控不干预,HMI绿色标定;报警区间通过方向盘振动和红色闪烁框减速提示;距离缩至 1.5 m 至 2.0 m 且驾驶员 0.5 s 内未有效制动时,自动发送减速指令。路径引导在路网拓扑模型上运行,将车道段离散为节点与边。发车前以A*算法计算最优路径,结果以箭头叠加在HMI俯视图上,岔路口前 15 m 语音引导转弯。偏离路径超过 2 m 时判定为主动改道,系统以当前位置重新规划。

4.3 人机交互界面设计

HMI界面的设计遵循信息精简、符号统一、适应井下振动的环境原则。显示屏选取7英寸高亮液晶屏,亮度不能低于 1000 cd/m^2 ,外壳做防尘防爆封装固定在驾驶室右前方的立柱上。显示布局划分为三个区域:主显示区采用车道级鸟瞰图方式呈现出车辆位置、巷道边界线、前方障碍物位置和推荐行车路径,比例

尺固定为1:50,保证驾驶员对空间因素形成直观判断。右上角为状态指示区,采用标准化图标指示定位质量、通信链路状态、预警等级和当前的车速。底部横条为文字信息区,在系统检测到需要驾驶员手动干预的事件时,显示简短中文文字说明。界面刷新率和定位系统输出频率同步,设定为20 Hz,来确保画面连续无卡顿,如果井下振动环境下刷新率低于10 Hz时,画面就会出现明显拖影和割裂感,这样就会影响驾驶员驾驶风险。

5 工程部署与现场试验

5.1 系统架构与硬件选型

辅助驾驶系统自上而下分为定位层、感知层、决策层和人机交互层,层间通过车载以太网和CAN总线交换数据。定位层以工控机为核心,接收UWB标签模块、激光雷达和惯性测量单元的原始数据,运行融合定位算法后以100 Hz频率发送位置信息。感知层独立运行嵌入式GPU,接收激光雷达和深度相机数据,完成障碍物检测与分类后以20 Hz频率输出障碍物列表。决策层执行防撞检查 and 路径引导计算,将预警状态和控制指令下发至HMI和车辆制动执行器。UWB基站沿巷道顶板中心线部署,直线段间距50 m、弯道段30 m,每组3至5个基站构成一个定位区域,相邻区域重叠覆盖不少于一个基站。基站与标签采用双向测距模式,每次测距约1 ms,定位更新率50 Hz。系统由车辆24 V直流电源供电,经DC-DC隔离模块转换后供给各传感器,电源回路设有缓启动电路以防浪涌电流损坏设备。

5.2 试验场景与评价方法

现场试验选取某地下金矿-400 m中段主运输巷道。巷道全长约500 m,三心拱形断面,宽4.2 m、高3.8 m、平均坡度8‰,含两个直角转弯、一个Y形分岔口及两处溜井放矿口。试验车辆为额定载重25 t的铰接式运矿卡车,长9.2 m、宽2.8 m、高2.6 m。真值采用全站仪沿巷道中心线每隔10 m布设控制点,人工记录车辆通过各点时实测坐标。评价指标:定位误差取全站仪实测与系统输出坐标的欧氏距离,统计平均值、最大值及95%置信区间误差;重定位成功率定义为断电重启或信号丢失后30 s内定位误差降至±20 cm以内的次数占比;障碍物检测以准确率和召回率评价,预警功能以正确预警率、误报率和漏报率评价。车辆沿设计路径往返运行20趟,全程记录数据。

5.3 试验结果与分析

20趟往返试验一共采集了200个全站仪检核点。组合定位整体平均误差7.6 cm,最大误差出现在直角转弯交叉口处,为18.3

cm;95%置信区间误差12.5 cm,满足±15 cm工程需求。按区段分类:直线段平均误差5.2 cm,弯道及交叉口段上升至11.4 cm。弯道误差增大的主要原因是车身铰接角变化放大激光雷达坐标系转换误差;UWB非视距遮挡频繁,测距值出现正向偏差。20趟中发生12次UWB遮挡,平均持续0.8 s,其间系统依靠INS与轮式里程计递推,恢复后定位误差增加3至5 cm,50 ms内收敛。重定位成功率96.7%。障碍物检测方面,10 m以上距离准确率93.2%、召回率89.5%;5至10 m区间准确率87.4%、召回率84.1%,召回率下降因小尺寸岩块被高度差滤波器误判为地面而遗漏。防撞预警测试中,直线段全部成功触发分级报警,响应延迟均值78 ms、最大88 ms;直角转弯处误报3次,原因为锚杆端头被识别为障碍物。根据试验结果将最小检测目标尺寸从0.3 m×0.3 m提高至0.4 m×0.4 m,有效降低了壁面附属物误报率。

6 结论与展望

本文围绕井下无轨车辆辅助驾驶及高精度定位,从方案设计到现场试验完成了全流程研究。针对GPS的缺失、粉尘水雾的干扰、巷道狭窄等工况,提出以UWB为绝对参考、激光SLAM为环境约束、INS为高频插值、轮式里程计为速度辅助的多传感器融合方案,采用EKF松耦合架构,试验验证平均定位误差7.6 cm、95%置信区间12.5 cm,满足工程需求。基于3D激光雷达与深度相机搭建感知模块,实现车辆、人员、岩块等目标实时检测与分类,10 m以上距离准确率93.2%,预警响应延迟均值78 ms,分级报警策略在直线段全部成功触发。路径引导以A*算法实现树状路网全局规划,偏离时自动重算。四子系统集成完整辅助驾驶系统,在500 m巷道完成20趟试验,重定位成功率96.7%。后续方向包括低成本方案精度补偿、矿山专用数据集构建及多车协同与自动驾驶衔接。

[参考文献]

- [1]常晓龙,钱俊,吴强,等.基于多传感器的井下无轨设备智能防撞系统[J].矿山机械,2026,54(1):10-16.
- [2]韩文涛.基于UWB技术的矿山井下无轨设备人机防撞系统[J].设备管理与维修,2025,(S1):33-35.
- [3]陈太文.井下无轨设备的安全与可靠性研究[J].今日制造与升级,2024,(6):163-165.

作者简介:

王汉臣(1987--),男,汉族,吉林省安图县人,本科,工学学士,金属矿山采选机电设备。