

动态料堆场景下无人装载机鲁棒定位算法研究

魏朝晖 姚黎琼 叶孟意 袁红涛

国家能源集团浙江省舟山发电有限责任公司 浙江舟山 316000

摘要: 舟山电厂煤场空间受限、地面起伏大、车辆频繁穿梭,导致无人装载机定位面临鲁棒性与精度挑战。本文提出“动态目标语义滤除-多源融合-自适应地面约束”方法:利用轻量化 PointPainting-Lite 实现点云与 RGB 图像像素级融合,实时识别装载机、卡车、推耙机、人员、料堆边坡及散落煤;结合 Dynamic-PatchFilter 在配准前滤除动态区域,降低外点率;在 LIO-SAM 框架中加入 IMU 退化检测,保障姿态连续;建立实时地面高度图作为柔性约束。实地 48 小时实验表明,1.9km 路径上算法 ATE 仅 0.34m (1σ),动态目标滤除准确率 97.8%,满足无人装载机 0.5m 级路径跟踪精度要求,为煤场无人化转运提供支撑。

关键词: 无人装载机;动态料堆;语义分割;多传感器融合;鲁棒定位

引言

无人驾驶在煤电、港口、矿山等复杂环境应用广泛,无人装载机可提升效率、降低安全风险。但舟山电厂煤场空间狭窄、地面不平、粉尘光照干扰显著,且堆取料机、卡车、人员频繁穿梭,导致点云退化与视觉受限,传统定位难以长期高精度运行。

现有研究多依赖几何特性,通过点云匹配、运动补偿或地面提取剔除动态物体,却在目标复杂、环境剧变时失效;部分研究尝试多模型融合或语义分割辅助,虽提升鲁棒性,但实时性与适应性不足;多传感器融合可缓解退化问题,却在粉尘或高度波动场景下易漂移。

为此,本文提出结合语义滤除、多源融合与地面约束的算法,并在舟山电厂实测验证。结果显示,该方法可长期稳定运行,满足煤场无人装载机精度要求。

1 研究背景与创新点

1.1 舟山电厂场景特点与痛点

舟山电厂煤场为封闭作业环境,地面凹凸不平、散落煤块多、坡度起伏大,车辆与设备运行线路交叉、动态干扰多,且空间狭小、移动装备行驶不确定性高。粉尘、潮湿会影响激光雷达回波信号,易形成点云稀疏或信号消失;高峰期间堆取料机、卡车、装载机交叉路径多,环境动态性强。在此场景下,无人装载机需同时保证定位准确性、稳定性与鲁棒性,以应对复杂地形、传感器退化及动态目标干扰。

1.2 动态环境下的 SLAM 研究:几何基动态物体剔除综述

1.2.1 基于几何的动态物体剔除

传统几何方法通过点云时序特性区分静态与动态区域,常用点云配准、地面提取静态约束及轨迹一致性识别动态目标。此类方法在规则环境有效,但面对煤场高动态场景,因车辆、人员、散落煤块类别多、几何特征区分度不足,难以完全排除动态干扰。

1.2.2 深度学习驱动的语义 SLAM 探索

语义信息为动态干扰解决提供新思路,卷积神经网络在图像分割、点云识别中应用成熟,使语义 SLAM 可通过识别环境典型类别实现高级别动态目标筛选。研究表明,图像与点云跨模态融合可显著提升动态物体识别精度,且在复杂环境鲁棒性强。煤场场景中,深度学习可识别车辆、人员、料堆边坡等,为后端定位优化提供干净数据输入,但存在计算量大、模型推理时延影响实时性的问题。

1.2.3 退化环境中的多传感器融合策略研究

激光雷达在地形起伏大或表面缺特征时易退化,单传感器定位难稳定。研究逐渐转向 IMU、里程计、激光雷达多传感器融合,在退化场景提供互补信息:IMU 短期保持姿态与速度估计连续性,里程计提供里程辅助,激光雷达提供几何约束;通过因子图或滤波框架统一优化,可在特征缺乏时增强系统鲁棒性,但仍存在权重分配不合理、实时优化负担重的问题。

1.3 现有方案局限

现有几何方法无法应对煤场复杂动态环境，动态剔除不彻底、定位误差累积；深度学习方法语义信息准确，但对计算资源需求高，在嵌入式平台适配困难；多传感器融合可缓解传感器退化，却在煤尘浓或地面特征少的场景精度下降，且融合算法复杂度增加系统负担。这些局限导致无人装载机在煤场长时间自主运行时稳定性与鲁棒性不足。

1.4 本文贡献与创新点

针对舟山电厂煤场特点，提出实时鲁棒定位算法：语义层面设计轻量化 PointPainting-Lite，实现 32 线激光点云与 RGB 体素级融合，准确识别装载机、卡车、推耙机、料堆边坡、散落煤、人员，结合 Dynamic-PatchFilter 去除动态区域；融合层面设计基于 LIO-SAM 的因子图，加入退化检测模块，地面特征不足时增加 IMU 权重，保障姿态估计稳定；约束层面建立实时地面高度图提供软约束，减少不平整地形影响。实验表明，该方法动态环境下 ATE 降至 0.34m，动态目标滤除率达 97.8%，满足无人装载机路径跟踪精度要求。

2 系统模型与硬件配置

2.1 无人装载机平台与传感器布局

无人装载机定位依赖多传感器实时数据融合，为保障实验信息完整性与算法工程适用性，本文对硬件平台与系统架构进行详细设计，实现多源信息时空一致性，为语义识别与鲁棒定位提供支撑。

2.1.1 32 线激光雷达 + 前向 RGB 相机

无人装载机搭载 32 线激光雷达与前向 RGB 相机：激光雷达水平、垂直方向点云密度高，可获取料堆、车辆、人员三维结构信息，为空间感知核心；RGB 相机提供丰富语义信息，可在煤尘或光照变化时补充激光数据不足。二者通过空间外参标定完成坐标系对齐，保证点云与图像跨模态融合精度。

2.1.2 IMU 与轮速里程计安装方案

惯性测量单元 (IMU) 安装于车辆重心附近，减少运动偏置积累，可在激光特征稀少或煤尘遮挡时为激光雷达持续提供姿态估计，降低激光雷达退化场景下的不稳定性；轮速里程计安装于驱动轴，实时记录车辆行驶速度与位移，为因子图优化增加额外约束，尤其在长时间运行与大范围路径跟踪中起辅助作用。

2.2 时间同步与标定流程

多传感器系统需严格时间同步，为保证点云、图像、IMU、里程计数据时序一致，采用硬件触发与软件时戳结合同步方式：激光雷达与相机由同一硬件时钟触发，IMU 与里程计通过软件时戳校正，实现毫秒级同步精度，其准确度对动态目标识别与配准精度影响显著。

传感器标定分为内参与外参：相机内参通过标定板获取，激光雷达角度与距离误差经静态采样修正；外参标定采用联合优化法，利用已知标志点与多帧观测信息，获取激光雷达与相机空间变换矩阵，校准 IMU 与雷达坐标系，实现不同传感器数据在同一坐标系下处理。

2.3 软件系统总体架构 (ROS2 实时节点)

软件系统基于 ROS2 架构搭建，采用节点化设计，各模块独立且实时通信：语义分割模块在 GPU 节点运行，处理相机图像生成语义标识；点云预处理模块去除动态部分并对点云降采样；融合定位模块联合激光、IMU、里程计，在因子图优化框架中融合；地图构建模块实时更新地面高度图。系统通过话题传递数据，各节点间时延控制在数百毫秒，满足无人装载机作业实时性要求。

硬件与软件设计保障数据采集与处理高效完成，实验表明该系统在煤场动态环境中运行稳定，为语义识别与鲁棒定位提供可靠硬件支撑与灵活软件平台。

3 动态目标识别与滤除

3.1 深度学习驱动的动态目标识别架构

针对舟山电厂煤场动态性强、目标多样的特点，设计基于轻量级 PointPainting-Lite 的语义识别框架：先通过前向 RGB 相机图像完成初步语义分割，获取像素级概率语义图，再映射至 32 线激光雷达点云，实现跨模态体素级融合。相比传统几何特征提取，该框架可直接识别煤场动态目标（装载机、卡车、推耙机、人员、料堆边坡、散落煤）。网络嵌入稀疏卷积与跨模态注意力结构，在保证特征表达能力的同时减轻计算负担，适配煤场实时作业需求。

3.2 动态目标数据集与标签体系框架

为训练与验证识别框架，在舟山电厂煤场现场采集大规模多模态数据，覆盖白天、夜晚、粉尘干扰、车辆密集等典型场景，保证样本多样性与泛化性。基于此构建六类动态目标标签集，采用点云 - 图像联合标注，确保动态目标边界清晰、标签一致。为避免样本不均影响训练效果，标注

后对小样本类别进行数据增强,并在损失函数中加入类别权重,保障模型对少数类(如人员)的识别能力。

3.3 动态目标滤除方法

语义识别完成后,提出用于点云动态剔除的 Dynamic-PatchFilter:通过时序滑动窗口计算点云块运动一致性与局部方差,若连续帧序列中某局部区域表现不一致,则判定为动态补丁并在点云配准前剔除。为实现完整去除,算法采用邻域膨胀策略,确保动态物体边缘被识别。相较于单纯依靠语义结果剔除,该方法结合几何一致性与语义概率,在语义分割存在误差时仍保持高可靠性。实验表明,此过程可使点云外点率降低约 30%,有效提升后续配准稳定性。

3.4 实时性与轻量化优化

煤场无人装载机连续作业要求算法高实时性,语义识别部署时采用 TensorRT 量化算子融合,将网络从 FP32 压缩至 INT8 推理格式,精度损失小于 1%,推理速度提升约 2.5 倍。为实现嵌入式 GPU 平台 30Hz 实时工作,采用滑动窗口批处理与流水线异步调度,结合 Dynamic-PatchFilter 完成动态目标识别与点云剔除,为后续鲁棒定位提供清洁稳定的观测数据。

4 鲁棒多源融合定位算法及其框架结构

4.1 基于 LIO-SAM 的因子图框架

为保障无人装载机在动态料堆与复杂地形下正常工作,在 LIO-SAM 因子图基础上设计多源融合定位方案:将点云里程计、IMU 预积分、轮速里程计多源信息以约束形式加入因子图优化,通过滑动窗口增量优化动态调整各传感器权重,既保留激光雷达精确性,又兼顾 IMU 与轮速里程计在退化场景下的稳定性。相比单传感器方案,该方案在复杂煤场环境中鲁棒性与全局一致性更优。

4.2 退化场景下 IMU 增强机制的探究

煤场环境中,激光点云易因粉尘遮挡、煤堆边坡遮挡或平整地面特征稀疏产生退化。为此添加 IMU 预积分退化检测模块,实时检测激光里程计观测品质:当特征点数量不足、残差过大或点云配准熵值下降时,自动判定退化,此时增大因子图中 IMU 约束权重,使定位结果更多依赖惯性数据,保障姿态与位移估计连续性,避免退化场景下定位中断或大幅漂移。

4.3 自适应地面高度图约束

舟山电厂煤场地面起伏大、散落煤块多、坡度变化复杂,

常规平面约束难以适配。本文提出基于 ElevationMap 的自适应地面约束:系统运行时持续创建地面高度图,以栅格为单位存储局部平均高度与方差,通过贝叶斯更新保持地图动态可用性;因子图优化时,地面约束以柔性残差形式加入,为无人装载机高度估计提供合理约束,既抑制垂直方向漂移,又避免对异常地形过度拟合。实验表明,该方法在坡度超 15° 区域漂移下降超 30%,显著提升不平整地面定位精度。

4.4 故障恢复与动态重定位

无人装载机长时间自主作业时,传感器噪声积累或意外遮挡可能导致系统大幅漂移甚至跟踪失败。为此设计动态重初始化与故障恢复机制:当累计漂移超阈值、外点率骤增或 IMU 检测到饱和信号时,触发重定位流程——依靠关键帧回环检测与几何一致性快速生成候选匹配,再通过语义外观特征实现高置信度重定位;回环闭合成功后,局部重建因子图,系统可在数百毫秒内回归正确轨迹,保障无人装载机长时间作业的持续稳定性。

5 实验与评估

在舟山电厂开展 48 小时实测,采集数据覆盖昼夜、粉尘、动态干扰等工况,总路径长度 1.9km,实验结果如下:

- 语义分割性能: PointPainting-Lite 模型 mIoU 达 78.6%,识别精度 91.3%,推理帧率 30Hz,时延 80ms,在粉尘、弱光环境下仍保持鲁棒性。
- 定位精度对比:传统 LOAM 漂移率 2.3%,LIO-SAM 算法 ATE 1.21m,STD-SLAM 算法 ATE 0.82m;本文算法 ATE 仅 0.34m,漂移率 0.6%,在退化走廊场景中漂移仅 0.29m。
- 长时运行稳定性:48 小时实验内,系统闭环误差 < 0.5m,CPU 与 GPU 负载 < 75%,延迟 < 100ms,整体运行稳定。

实验结果表明,本文提出的定位算法在动态煤场环境中具备长期部署可行性。

6 结论

针对煤场动态环境与地形起伏问题,本文提出“语义滤除-多源融合-地面约束”定位方法:通过 PointPainting-Lite 实现点云与 RGB 融合,结合 Dynamic-PatchFilter 有效剔除动态区域;在 LIO-SAM 框架中引入 IMU 退化检测与地面高度约束,搭配重定位机制实现长期稳定运行。实测验证显示,该方法在动态、退化场景下仍保持高精度与实时性,为煤场无人装载机规模化应用提供工程依

据,对港口、矿山等类似场景也具有参考价值。

参考文献:

[1] 白中浩,朱磊,李智强.基于多模型融合与重新检测的高精度鲁棒目标跟踪[J].仪器仪表学报,2019.

[2] 侯志强,王帅,余旺盛等.融合检测机制的鲁棒相关滤波视觉跟踪算法[J].应用光学,2019.

[3] 王金戈,邹旭东,仇晓松等.动态环境下结合语义的

鲁棒视觉 SLAM[J].传感器与微系统,2019.

[4] 黎子良.地面约束下无人车激光 SLAM 研究[D].电子科技大学,2024.

基金项目:项目名称:国能浙江舟山发电有限责任公司-基于 5G 的煤场激光实施盘煤及装载机无人值守技术应用研究,项目编号:NZS-JF-2024041。