



智能感知融合技术在干散货堆场 动态环境中的应用^{*}

杨晗芳，孙伟哲，周保华

(中国交通信息科技集团有限公司，北京 100032)

摘要：以干散货码头堆场为代表，针对其大型设备自动化作业在堆场复杂动态环境的感知问题，提出多传感器智能感知融合技术框架，基于激光雷达、惯性传感器(IMU)和实时动态(RTK)等多种传感器数据融合，利用原始的RTK数据信息对前端里程计输出的位姿进行优化，应用动态物体移除技术实现稳健、精准的动态要素感知，结合八叉树立方体查询实现高效、实时的全局地图更新，最终建立一个高精度且实时更新的散货堆场地图，为后续的堆场作业提供支持。将智能感知融合技术应用于大型干散货码头，结果证明该技术可实现堆场动态环境的高精度和实时性能，有效提高干散货码头自动化作业的感知能力。

关键词：自动化码头；动态环境感知；即时定位与地图构建；三维点云建图；激光雷达

中图分类号：U65

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)09-0177-06

Application of intelligent perception fusion technology in dynamic environment of dry bulk yard

YANG Hanfang, SUN Weizhe, ZHOU Baohua

(China Communications Information and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: This article takes the dry bulk terminal yard as a representative and proposes a multi-sensor intelligent perception fusion technology framework for the perception problem of large-scale equipment automated operations in the complex dynamic environment of the yard. Based on the fusion of multiple sensors such as LiDAR, inertial sensor (IMU), and real time kinematic (RTK), the article uses the original RTK data information to optimize the bit pose of front-end odometer output. It also uses dynamic object removal technology to achieve robust and accurate dynamic element sensing and utilizes the octree cube query to achieve efficient and real-time global map updates to finally establish a highly accurate and up-to-date bulk yard map and support the subsequent yard operations. The intelligent perception fusion technology framework is applied to a real-world large dry bulk terminal. The results prove that the technology can achieve its high accuracy and real-time performance effect for the yard's dynamic environment, effectively improving the perception ability of automated operations in dry bulk terminals.

Keywords: automated terminal; dynamic environment perception; simultaneous localization and mapping; 3D point cloud map construction; LiDAR

大型干散货码头是国际航运网络中的关键节点。堆场作为干散货临时储存的缓冲区，以堆场为核心实现干散货的接卸、储存、中转。传统堆

场作业通过人力操纵堆取料机械实现单点作业，不仅劳动强度大、危险系数高，且精度难以预知，更无法与全域堆取料进度实现联动，制约了货物

收稿日期：2022-12-08

*基金项目：中国交通建设集团科技研发项目（2021-ZJKJ-QNCX13）

作者简介：杨晗芳（1989—），女，硕士，工程师，研究方向为散货港口大型设备自动控制技术。

流通和码头运营效率，亟待借助数字技术实现高效转型。

构建智慧码头是干散货码头运营效率提升的突破口。由于干散货不同于集装箱货，货品不加包装，直接以块状、颗粒状、粉末状等初级形态参与流通，难以通过射频识别(RFID)等技术实现库存盘存、货物全程跟踪与精细化管理。新冠疫情期间，持续、广泛的干散货运拥堵不畅给全球供应链造成巨大压力，为保障疫情期间码头运转，对堆场作业提出无接触的要求，驱动新兴技术应用与运营变革。

干散货码头堆场在复杂动态环境中的感知能力为机器自主协同、任务规划、堆取料作业等提供基础支撑，是干散货码头数字化、智能化的关键。近年应用即时定位与地图构建 SLAM(simultaneous localization and mapping)，通过激光雷达扫描堆场现场感知环境要素并构建地图。剪欣等^[1]提出基于实时动态定位(RTK-GPS)和3D激光扫描仪的三维成像系统实现散货码头堆场建模。目前较为优秀的激光 SLAM 算法有 LOAM(lidar odometry and mapping)^[2]，它是一种激光匹配方法，通过提取边缘点和平面点特征，进行畸变矫正(时间戳)。该算法缺点是没有回环检测和后端优化，长时间建图会产生漂移，不能处理大规模的旋转变换。然而，动态的现场环境限制了堆取料机智能化的进度，应用激光雷达的感知精度会因大机的移动、抖动等造成折损，也会因动态要素(如人员、车辆)的参与而干扰对目标货物的感知。

为满足干散货堆场作业数字化转型的关键技术需求，本文提出智能感知融合技术框架，针对干散货堆场作业现场的复杂动态环境，实现高精度、实时智能感知，并应用于现实大型干散货码头。对比应用智能感知融合技术后场景内动态要素的感知效果，分析全局地图更新算法的更新时间性能和效果。

研究表明：1) 大型干散货码头存在堆取料作业中的真实动态环境感知问题；2) 智能感知融合技术框架与传统的策略相比，通过考虑动态物体

移除的多传感器融合动态要素感知，以及全局环境地图的实时更新，使动态环境可进行更精准的实时感知；3) 将智能感知融合技术应用于现实堆取料机作业中，达到了更好的实时性和准确性。

1 智能感知融合技术

1.1 即时定位与地图构建

SLAM 是自动化的核心智能技术，支撑建立多图像关联的实时三维地图，并借助语义场景理解丰富三维环境的表示。按传感模式区分，SLAM 可分为基于视觉的 VSLAM 和激光 SLAM 两类。VSLAM 在局部区域拥有非常好的准确性，但只维持了一个稀疏的特征地图，且易受光线明暗、运动模糊等情况的影响。另一方面因需要较多的计算资源，在一些性能受限的环境下难以应用。而激光 SLAM 则能直接提供密度更高、距离更远、测量更精确的数据。

1.2 动态物体移除

目前在动态物体移除方面已经有些研究工作，Schauer 等^[3]采用射线投射的方式，基于栅格是否被击中和穿过的情况判断格子是否为动态点，虽符合直觉，但有很多实际应用问题。如遍历每条射线经过的所有栅格，易出现计算性能瓶颈。另外栅格的大小影响结果的准确性，尺寸过大将导致误杀、漏杀，过小则进一步引起计算资源消耗。Kim 等^[4]采用一种基于视点可见的方法，假如给定一组由 SLAM 得到的原始扫描帧，选择若干个相邻扫描帧拼成 1 个含有残影的局部子地图，从这些扫描帧中选择 1 个作为查询帧，投影到子地图中，如果查询帧中某个点的光路被地图中的某个点遮挡，那么子地图中的这个点即为动态点。该方法的缺点是对 SLAM 位姿精度、点云畸变敏感，以及容易误杀地面等。

1.3 全局地图更新

短时建立的局部地图要实时准确地更新到长期维护的全局干散货堆场点云地图。在点云地图的更新方面有很多研究工作，Hyppä 等^[5]使用点到点匹配的方法来检查 3D 城市场景变化，但错误

的配准可能导致匹配不准确点对, 引起假的变化检测。谢诗超^[6]基于八叉树结构和二值贝叶斯滤波实现对点云地图数据的高效组织和不确定度建模, 并对现有光线投射法进行改进, 实现自动驾驶点云地图动态更新, 但此方法因涉及光线投射及邻域点的查询, 在计算性能上仍不适用于有高频更新需求的场合。

2 干散货堆场动态环境智能感知融合技术框架

本文在激光雷达、惯性传感器 IMU (inertial measurement unit) 和实时动态 RTK (real time kinematic) 等多种传感器数据融合的基础上, 建立了一个紧耦合的前端里程计算法。首先根据概率因子图框架, 利用原始的 RTK 数据信息对前端里程计输出的位姿进行优化; 再输出优化后的局部点云地图, 融合模块将局部地图数据更新到全局地图中; 最终建立一个高精度且实时更新的散货堆场地图,

为后续的堆场作业提供支持。

2.1 框架概览

整个框架的处理流程见图 1, 该框架由动态要素感知模块与全局地图更新模块组成。融合激光雷达、IMU 和 RTK 3 种传感器, 分别以 10、100 及 20 Hz 的频率发布数据。首先动态要素感知模块接收到激光雷达的点云数据, 进行滤波预处理, 处理后的点云即 1 次扫描; 另外扫描中的点通过紧耦合的迭代卡尔曼滤波框架被注册到 KD-Tree 地图中, 用于计算残差。在状态估计环节, 对 IMU 数据进行预积分后对扫描的点云进行畸变校正, 再识别动态物体并移除, 增加 RTK 传感器数据作为新的观测量来计算残差, 从而提高建图精度; 状态估计完成之后, 将前端里程计的位姿信息、优化后的点云以及 RTK 原始信息发送到全局地图更新模块, 在因子图框架下再次进行优化; 最后将优化后的点更新到最终的全局地图中。

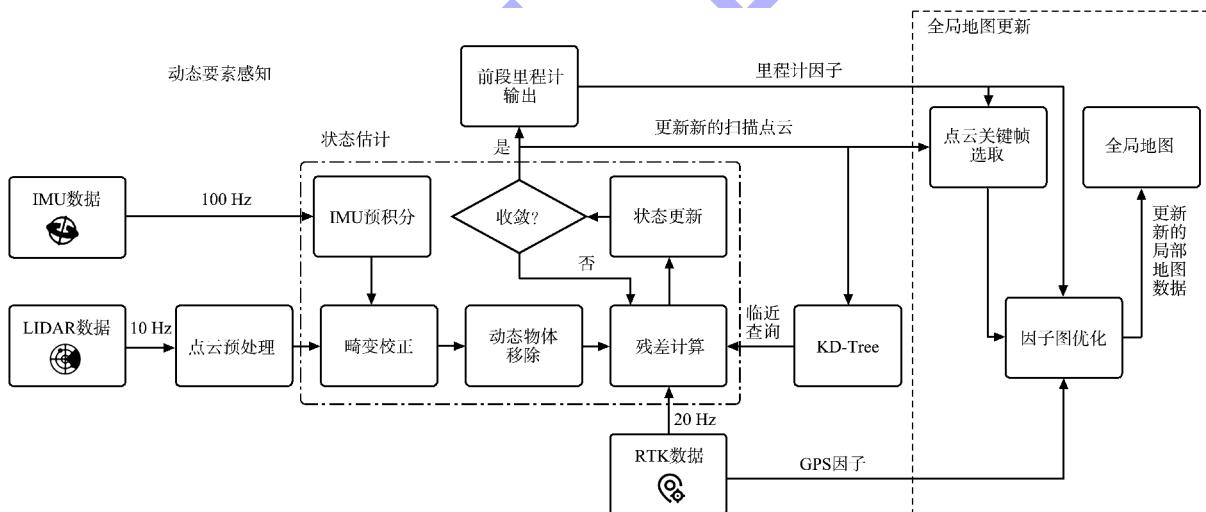


图 1 干散货堆场动态环境智能感知融合技术框架

2.2 动态要素感知模块

在 SLAM 建图中动态要素感知是极其重要的环节, 其准确与否直接关系到建图的准确性和精度, 而高质量地图也是机器人路径规划、环境感知的前提。对于本文研究的干散货堆场动态点的类型(多种工程车辆)基本已知的情况下, 采用了一种基于点云特征实时分割的方法, 从扫描的实时帧点云中识别并移除动态物体。

记 P^L 为激光雷达扫描的原始点云, $T_w = (^wR_L, ^wP_L)$ 为从雷达坐标系到 ENU 坐标系之间的变换矩阵, P^w 为 P^L 经 T_w 变换后 ENU 坐标系的点云, $F(P^w)$ 为特征提取函数, 用于提取点云的特征, 如 OBB(oriented bounding box) 质心、长宽高、体积、面积等, $H(h, a, v, l, z_{\min}, z_{\max})$ 为基于移动物体特征手动设计的比对函数, 根据提取的点云特征进行判断是否为动态点, 其中 h 为高度; a 为

面积; v 为体积; l 为长度; z_{\min} 为点云最小 z 坐标; z_{\max} 为点云最大 z 坐标。整个动态点移除流程见图 2。

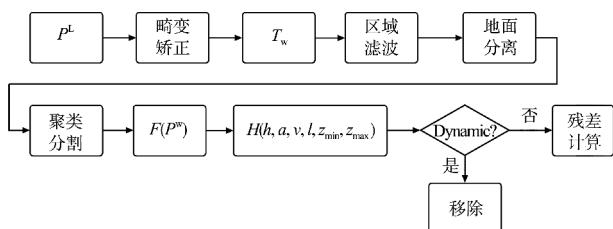


图 2 动态物体移除流程

由于激光雷达采集数据的过程中，随载体运动导致一帧点云中的点不是在同一时刻采集的，即不同激光点的坐标系原点不一致，因此需进行畸变矫正。鉴于应用环境是将雷达安装在震动较强的堆取料机上，本文采用 IMU 的高频数据进行补偿。为方便提取出动态物体点云，根据移动物体可能出现的区域进行过滤；然后通过采样一致性分割算法分离地面，并将地面上的点云进行欧几里得聚类，提取出候选的点云簇；再对各个点

云簇采用上述的 $F(P^w)$ 特征提取函数计算几何特征，将提取到的特征输入手动设计的移动物体特征比较函数 $H(h, a, v, l, z_{\min}, z_{\max})$ ；最终判断该点云簇是否属于动态点，如是则进行移除操作，反之则保留用于后续残差计算和建图。

2.3 全局地图更新模块

针对同一时间有多个更新请求的情况，每个请求有几百万个点的干散货堆场地图更新场景，提出了基于八叉树立方体查询的快速更新方法。该立方体查询比光线投射方式更高效快速，实现了点云地图的快速更新，算法流程见图 3。其中两处较为重要，一是在做点云更新之前需将待更新点云重新降采样并插入一个临时的八叉树地图，此地图的分辨率要比目标全局地图的分辨率高 4 倍左右，目的是提高查询密度，防止因分辨率太低造成更新不全。二是查询待更新点周围的 BoxSearch 函数，由于只需比较点或八叉树格子坐标是否在立方体范围内，因此非常高效。

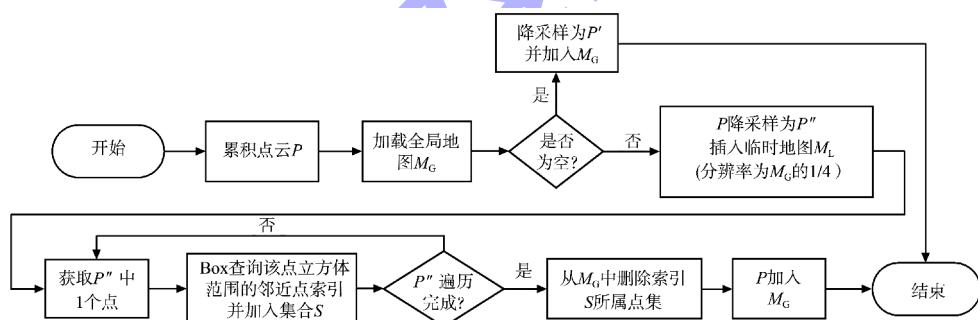


图 3 全局地图更新模块

3 应用与讨论

3.1 应用设备

选择的激光雷达需适应干散货堆场粉尘浓度大、各种工况和恶劣天气下的作业要求；雷达的角分辨率、扫描精度和扫描距离需满足点云数据的数量和精度要求，从而决定垛形轮廓的细腻程度和精度；雷达需考虑不同反射率的煤炭、矿石等散货对点云数据的影响。为雷达配备高精度工业级云台，通过控制云台旋转使雷达获取完整的料堆数据，且云台姿态数据和雷达的信息应时刻同步。此外，为雷达配备 RTK 定位装置，以获取

点云数据的精确坐标。

3.2 结果讨论

激光雷达对料堆连续扫描，获取料堆点云数据。未扫描到轨道外侧缺失的点云数据可通过相邻轨道大机采集到的点云数据进行匹配共享，或通过修补算法得到完整的料堆点云数据。不仅对比应用本框架动态点云移除前后的效果，还将框架全局地图更新的八叉树立方体查询方法与光线投射方法进行对比。

3.2.1 动态点云移除效果对比

干散货堆场的动态要素主要为工程车辆。从

应用框架动态点云移除前后的三维点云地图(图4)可以看出,有效去除了动态车辆的点云残影,为后续自动作业提供了精确的三维模型数据。

动态点云移除效果具体而言,首先根据未处

理车辆轨迹残留的全局点云地图(图5),重建有车辆轨迹残留的三维料堆模型(图6);随后对车辆轨迹的污染进行处理即可看到车辆轨迹残留移除后的料堆模型(图7)。

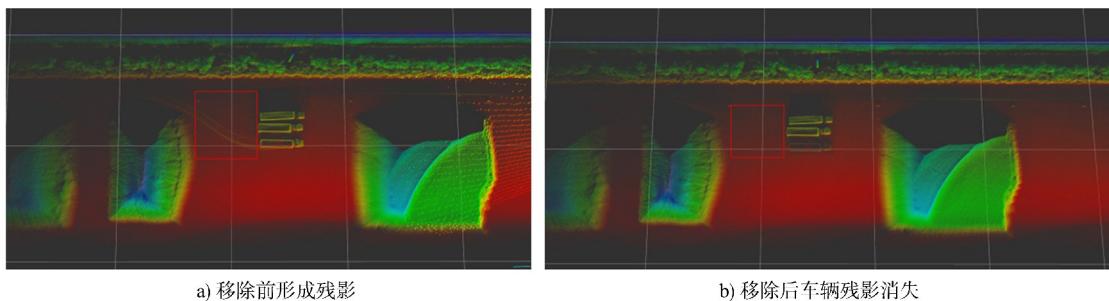


图4 动态点云移除前后的三维点云地图

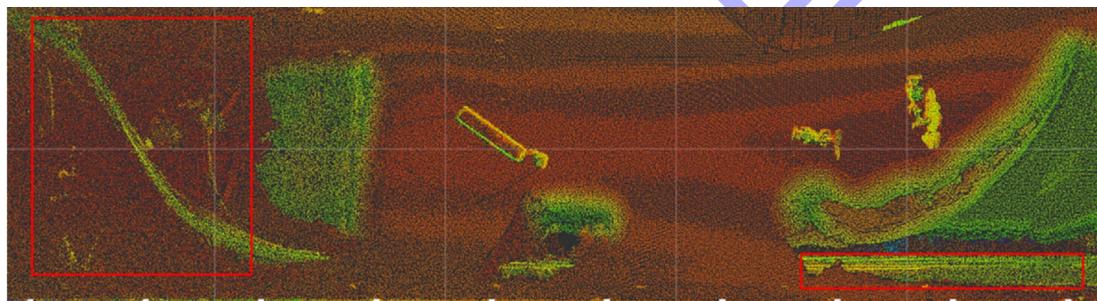


图5 有轨迹残留的全局点云地图



图6 基于有轨迹的残留三维重建的料堆模型



图7 车辆轨迹残留移除后的料堆模型

3.2.2 全局地图更新效果对比

某大型干散货码头应用基于八叉树立方体查询的全局地图更新效果见图8。对框架全局地图更

新的八叉树立方体查询方法与光线投射方法进行对比,在进行的6次随机试验中,每次待更新点云数分别为3 223 055、3 366 270、3 374 301、

1 662 098、1 196 508、2 352 582。结果显示：应用光线投射方法的全局地图更新时间为 3.947 584~6.028 366 s，应用八叉树立方体查询方法的全局地图更新时间为 2.250 239~4.021 613 s，见图 9。测试中应用八叉树立方体查询方法相较应用光线投射方法的全局地图更新时间平均缩短了 1.647 35 s。

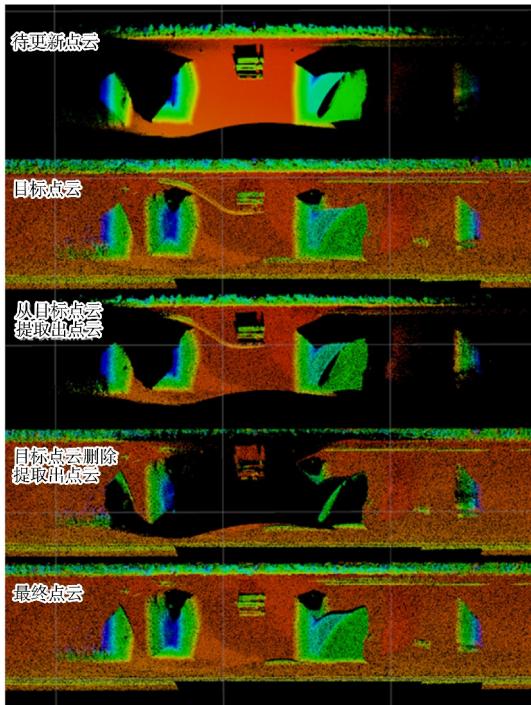


图 8 全局点云地图更新

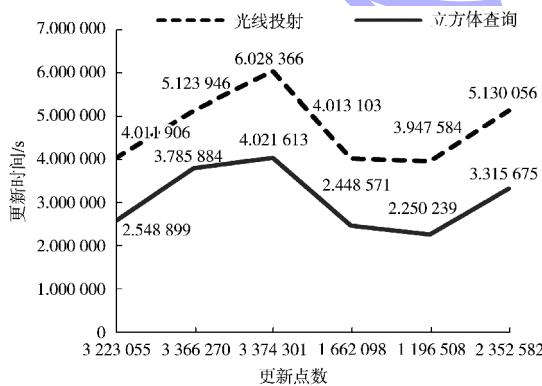


图 9 点云更新方法时间比较

4 结论

1) 应用动态物体移除技术和基于八叉树立方体查询的快速更新方法可有效去除干散货堆场动态车辆的点云残影，缩短全局地图点云更新时间，实现堆场动态环境高精度、实时的性能效果。

2) 智能感知融合技术可有效提高干散货堆场的感知能力，高效支撑后续堆取料机的全自动作业。

参考文献：

- [1] 剪欣, 周泉, 黄欢. 3D 激光扫描仪在散货料场三维建模中的应用 [J]. 港口装卸, 2018(1): 32-35.
- [2] ZHANG J, SINGH S. Loam: Lidar odometry and mapping in realtime [J]. Robotics: Science and systems, 2014, 2(9): 1-9.
- [3] SCHAUER J, NUCHTER A. The people remover—removing dynamic objects from 3-d point cloud data by traversing a voxel occupancy grid [J]. Robotics and automation letters, Institute of electrical and electronics engineers (IEEE), 2018, 3(3): 1679-1686.
- [4] KIM G, KIM A. Remove, then revert: Static point cloud map construction using multiresolution range images [C]// 2020 IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS). Las Vegas: IEEE, 2020.
- [5] HYYPPÄ J, JAAKKOLA A, HYYPPÄ H, et al. Map updating and change detection using vehicle based laser scanning [C]// 2009 Joint urban remote sensing event. Shanghai: IEEE, 2009: 1-6.
- [6] 谢诗超. 多传感器融合的自动驾驶点云地图构建与更新方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2019.

(本文编辑 赵娟)

欢迎投稿 欢迎订阅