

基于激光雷达与 SLAM 系统的研究与实现

赵可丽 胡鑫 彭舟 赵天豪

上海工程技术大学，上海松江区，201620；

摘要：随着物联网技术的快速发展与智能感知需求的日益增长，环境感知与高精度空间建模已成为当前研究的热点领域，而激光雷达（LiDAR）凭借毫米级测距精度、抗干扰能力强等优势，在 SLAM（Simultaneous Localization and Mapping，同时定位与建图）系统中展现出不可替代的作用，本文创新性提出融合激光雷达与物联网技术的智能 SLAM 系统解决方案，通过“硬件架构优化-数据采集处理-核心算法创新-系统集成实现”的完整技术路线，构建具有实时性、鲁棒性和可扩展性的建图系统；在技术实现层面，本研究采用模块化 Python 架构作为系统核心开发语言，结合 Open3D 开源库实现高效的三维点云处理与可视化，同时引入物联网边缘计算框架实现定位数据的低延迟远程传输，并基于 WebGL 技术构建跨平台的实时监控系統；实验结果表明，本系统在定位精度、建图完整性和通信时效性等关键指标上均优于传统 SLAM 方案，为智能仓储、服务机器人等物联网应用场景提供了可靠的技术支撑。

关键词：激光雷达；SLAM；Open3D；Python；系统集成

DOI：10.69979/3041-0673.26.02.006

1 技术原理

1.1 激光雷达技术

激光雷达（LiDAR, Light Detection and Ranging）是一种基于激光测距的主动遥感技术，通过发射激光束并接收其反射信号来精确测量目标物体的距离、方位及表面特性。自 20 世纪 60 年代问世以来，LiDAR 技术已广泛应用于自动驾驶、机器人导航、地理测绘、智慧城市等领域，并成为高精度环境感知的核心传感器之一^[1]。LiDAR 系统的核心工作原理是飞行时间法（ToF, Time of Flight），即通过计算激光脉冲从发射到接收的时间差来推算距离，其计算公式为 $d = \frac{C \cdot \Delta t}{2}$ ，其中 d 为测量距离， C 为光速（ $\approx 3 \times 10^8$ m/s）， Δt 为激光往返时间；此外，部分 LiDAR 系统采用相位测距法或三角测距法，适用于不同精度与测距范围的需求。

1.2 SLAM 技术

SLAM，即同步定位与建图技术，是帮助移动机器人、无人机或自动驾驶系统在陌生环境里既能自己确定位置，又能实时画出环境地图的关键技术，它的核心难题就像“先有鸡还是先有蛋”的问题——机器人得有准确的地图才能知道自己在哪儿，可画地图又得先清楚自己的位置，不过 SLAM 能通过把各种传感器收集到的数据整合起来，再结合概率估计的方法，让定位和建图

这两件事同时进行并不断优化；一个完整的 SLAM 系统一般包含前端、后端、回环检测和地图构建这四个主要部分，其中前端主要负责对传感器收集到的原始数据进行初步处理，还会估算不同时刻机器人位置和姿态的变化，比如通过特征匹配、点云配准等方式实现；后端则是通过图优化工具（像 g2o、GTSAM）或者滤波算法（如 EKF、粒子滤波）来消除随着时间积累的误差，让整个系统的全局一致性变得更好；回环检测的作用是认出机器人之前已经去过的场景，从而修正位置出现的偏移误差，常用的方法有基于词袋模型 BoW；地图构建则是生成能供机器人导航使用的地图，常见的类型有拓扑地图、栅格地图以及三维点云地图^[2]。

2 系统设计与实现

2.1 硬件搭配

本研究将 YDLIDAR X3 激光雷达选定为核心硬件设备，它具备支持室内外多场景使用的特性，400 次/秒的采样频率能够确保在单位时间内采集到充足的数据，40KLux 的抗环境光强度使其可以适应复杂的光照环境，而 5Hz-10Hz 的扫描频率与 8 米的测量半径则进一步满足了多数场景下的感知需求，这些性能参数共同为系统后续的数据采集与处理工作提供了稳定的硬件基础。

表 1 YDLIDAR X3 激光雷达性能参数表

型号	采样频率	抗环境光强度	扫描频率	测量半径
YDLIDAR X3 激光雷达	400 次 /s	40KLux (支持室内 / 户外使用)	5Hz-10Hz	8m

系统总体框架采用分层设计，自下而上依次为数据层、业务逻辑层、应用层与表示层，各层不仅功能界定清晰，还能通过标准接口实现顺畅的数据交互；数据层作为整个系统的数据基石，主要承担原始点云数据的存储与管理职责，它借助 PostgreSQL 数据库并结合 PostGIS 空间扩展功能，既能实现海量点云数据的高效存储与索引，同时也支持 LAS/LAZ、PLY 等多种格式数据的导入与导出操作；业务逻辑层封装了点云处理的核心算法，里面包含数据预处理模块、配准模块、重建模块和质量控制模块，其中数据预处理模块负责对原始点云数据进行前期处理，配准模块实现点云数据的配准工作，重建模块完成点云的重建任务，质量控制模块则把控点云处理的质量，而且各模块之间通过标准接口进行数据交互，确保数据流通的顺畅性^[3]；应用层为系统提供数据处理流程管理、任务调度以及并行计算等功能，它采用微服务架构设计，会将复杂的处理任务拆分为多个独立的服务，再通过消息队列实现服务之间的异步通信，以此提高系统的处理效率与可扩展性；表示层采用浏览器/服务器架构，借助 Web Graphics Library（即 WebGL）这一 3D 绘图技术实现三维可视化展示，为用户提供直观、清晰的点云数据展示界面。

2.2 激光点云数据处理

激光点云数据的处理需遵循一套规范化流程，该流程具体涵盖数据采集、预处理、特征提取、点云分类、点云配准及模型构建等环节，这些环节层层递进、环环相扣，共同保障着从原始数据到三维模型的处理质量；在数据采集这一基础环节中，当使用激光雷达对周围环境进行扫描时，设备会按照固定的时间间隔来采集三维点云数据，而要想得到高质量的点云数据，就需要先对激光雷达的扫描频率、分辨率等关键参数进行合理设置，比如扫描频率较高时，就能在单位时间内采集到更多的数据，分辨率较高时，点云所呈现的细节就会更加丰富。

数据采集完成后，为确保数据的准确性与完整性，还需要开展预处理工作；一方面，原始点云数据中常常存在离群点和噪声，这些干扰会影响后续的分析工作，因此可以采用统计滤波、半径滤波等方法来去除它们，其中统计滤波是通过计算每个点的邻域分布情况，把不符合统计规律的点认定为噪声并剔除，半径滤波则是根

据某个点与周围其他点的距离，将距离异常的点剔除，通过这些操作就能构建出高精度、高可靠性的点云数据；另一方面，原始激光点云的数据体量非常庞大，这对数据处理效率和存储容量提出了更高的要求，针对这一问题，可以通过精简操作来应对，比如采用随机采样或均匀采样等策略，其中随机采样是指以随机的方式从激光点云中选取特定数量的点，这种方法虽然具有较高的采样效率，但存在丢失部分关键特征信息的风险，均匀采样则通常依据特定规则对数据点进行均匀选取，能够有效规避上述问题，从而保障信息的完整性与代表性^[4]。

3 SLAM 算法分类

SLAM（同步定位与地图构建）算法主要分为两类，一类是基于相机的 visualSLAM（视觉 SLAM），另一类是基于激光雷达的 LiDAR-SLAM（激光 SLAM）；虽然通过图像进行特征提取与匹配的方法相对简单，但图像对初始化条件、光照变化以及距离都比较敏感，这就导致 VSLAM 在实际应用中可靠性不足，而 LiDAR-SLAM 相比之下拥有更好的准确性和鲁棒性，所以本研究选择 LiDAR-SLAM 作为核心算法技术^[5]。LiDAR-SLAM 的核心本质上是定位与建图两大技术的协同配合，通过对这两项技术进行同步优化，能够让移动设备在未知环境中实现自主感知与地图构建，以 Cartographer 框架为例的 SLAM 结构就清晰展现了这种协同过程，从传感器数据输入到地图最终输出的各个环节都紧密衔接，进而保障了定位与建图的高效性和准确性。

4 系统集成与测试

4.1 系统集成

在硬件集成环节，我们会将优化后的激光雷达硬件与控制模块、数据传输模块等进行深度整合，以此确保所有硬件组件能够协同运作，同时通过优化通信协议来减少数据传输延迟，进一步提升系统整体稳定性，让激光雷达采集到的数据可以快速且准确地传递到其他模块，为后续的数据处理工作提供及时支持；在软件集成环节，我们会把优化后的 SLAM 算法融入系统软件，

实现激光雷达数据的实时处理与建模,并且借助 Python 编程语言,搭配 open3D 等工具库,这一方式不仅能提高算法的开发效率,还能增强系统运行性能,最终让系统可以高效处理海量点云数据,实时生成高精度地图^[6]。

4.2 数据传输与云端集成

在数据传输环节,我们借助物联网技术来完成数据的远程传送,具体是通过 Wi-Fi 或者 4G/5G 网络,把激光雷达收集到的数据以及定位信息一起发送到云端服务器,并且在整个传输过程中,会采用加密技术来保障数据安全,避免数据被别人盗取或修改,从而确保数据既完整又不会泄露;到了云端集成环节,当相关数据和定位信息成功发送至云端服务器后,会利用云平台本身强大的计算能力和存储能力对这些数据做进一步的处理与分析,同时通过云平台提供的 API 接口,实现数据的实时更新和共享,让不同的终端设备都能及时获取到最新的数据和地图信息,最终提升整个系统的实用性和扩展能力。

4.3 系统测试

系统测试主要涵盖硬件测试、软件测试和系统联调三个方面,其中硬件测试是对集成后的激光雷达硬件展开全面检测,重点评估其测量精度、稳定性、抗干扰能力等关键性能指标,并且会通过在不同环境下的测试来验证硬件在各类复杂条件下的稳定工作能力,从而为整个系统提供可靠的硬件支撑;软件测试则聚焦于系统软件的功能与性能两大维度,功能测试包含 SLAM 算法的准确性、数据处理的完整性等内容,性能测试则涉及系统的响应时间、数据传输速率等指标,通过这些测试能够及时发现软件中存在的问题,进而针对性地进行优化改进,最终提升软件的可靠性与高效性^[7];系统联调环节会将硬件与软件进行联合调试,核心目标是确保系统的整体性能达标,具体会在实际应用场景中测试系统的建模精度、实时性、稳定性等关键指标,同时通过联调不断优化系统参数,进一步提高系统的整体性能与可靠性,让系统能够更好地适应实际应用需求。

4.4 优化与改进

基于测试结果的优化改进将从硬件、软件和系统三个核心层面展开,其中硬件优化需针对测试过程中发现的具体问题对激光雷达硬件进行针对性调整,比如通过技术升级提高硬件的测量精度、采用低功耗组件降低硬件的能耗消耗、增加抗干扰设计增强硬件在复杂环境下

的抗干扰能力,这些硬件层面的优化措施能够直接提升系统的整体运行性能与长期稳定性;软件优化则聚焦于系统软件本身的改进,一方面通过算法迭代提高核心算法的运行效率与计算准确性,另一方面优化数据从采集到处理的全流程传输机制,减少数据延迟以缩短系统响应时间,通过这些软件层面的优化可显著提升系统的实时数据处理能力与运行可靠性;系统优化需要从整体视角出发对整个系统进行统筹调整,不仅要进一步提升系统的综合性能与稳定运行水平,还要对现有系统架构进行重构以提高系统的可扩展性与后期维护便捷性,通过系统层面的全面优化能让系统更好地适配不同应用场景的需求,最终提升系统在多样化场景下的适应性与长期运行可靠性。

5 总结

本研究构建了融合激光雷达与 SLAM 系统,具体采用 YDLIDAR X3 激光雷达搭建硬件平台,同时以 Python 模块化架构为核心,还结合 Open3D 库实现高效的点云处理,并且引入物联网边缘计算框架来保障数据传输与监控,最终提供了一种更加轻便准确且更具经济性的激光雷达成图系统;未来研究将进一步优化网络结构以提升系统实时性,为城市规划、生态环境监测等领域提供更有效的解决方案,进而推动激光雷达与 SLAM 技术在更多领域的应用与发展。

参考文献

- [1]游绍彦.基于激光雷达的三维测绘数据处理系统设计[J].信息记录材料,2025,26(5):220-222+225.
- [2]张杜雨.无人机测绘中的激光点云数据处理研究[J].北斗与空间信息应用技术,2025,(1):11-13.
- [3]张红彦,赵昊阳,赵焕峰,等.一种显式几何特征匹配的激光雷达 SLAM 方法[J/OL].中国机械工程,2025(1):8-9.
- [4]周苏,李伟嘉,郭军华.基于激光雷达的停车场车辆定位算法[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(7):1029-1038.
- [5]宋绍京,李新建,方非易.点云融合技术综述:方法、应用与挑战[J].雷达学报(中英文),2025,14(3):528-547.
- [6]李泉凯,李广云,索世恒,等.激光 SLAM 技术进展[J].导航定位学报,2023,11(4):8-17.
- [7]张景娴.近接施工参数化建模系统的设计与开发[D].西安西京学院,2023(5):48-49.