

手持激光雷达的SLAM空间测绘精度研究

郭晓辉

上海华测导航科技股份有限公司, 中国·上海 201702

摘要: 智慧城市创建、工业数字化转型以及应急安全保障的发展, 为空间测绘的精确度、适应性以及时效性赋予了更高要求。传统的测绘手段因设备形态、作业环境、定位条件等限制, 无法满足狭小、封闭、无卫星信号、突发事件等环境下测绘的要求。手持激光雷达 SLAM 技术可以在进行定位的同时完成建模, 克服传统测绘的很多缺点。明确三维测绘技术的工作原理、应用价值与精度限制因素, 提出系统化的优化方案, 对三维测绘技术的推广、提高空间数字化作业水平具有重要意义。

关键词: 激光雷达; SLAM; 空间测绘

Research on the Spatial Surveying Accuracy of SLAM Systems Utilizing Handheld LiDARs

Guo Xiaohui

Shanghai Huace Navigation Technology Co., Ltd., China Shanghai 201702

Abstract: The development of smart city initiatives, industrial digital transformation, and emergency safety assurance has imposed higher demands on the accuracy, adaptability, and timeliness of spatial surveying. Traditional surveying methods, constrained by limitations such as equipment configuration, operational environments, and positioning conditions, are unable to meet surveying requirements in confined, enclosed, satellite-free, or emergency scenarios. In contrast, handheld LiDAR-based SLAM technology can simultaneously perform positioning and model construction, thereby overcoming many of the shortcomings inherent in traditional surveying methods. Clarifying the working principles, application value, and precision constraints of 3D surveying technologies, and proposing systematic optimization schemes, holds great significance for promoting 3D surveying technologies and enhancing the overall level of spatial digital operations.

Keywords: LiDAR; SLAM; Spatial mapping

1 手持激光雷达 SLAM 技术核心原理

1.1 手持激光雷达工作机制

手持激光雷达主要依靠激光测距原理进行空间数据采集, 设备发射高频激光光束照射到场景内的物体表面, 接收反射回来的激光信号, 根据光束发射和接收的时间差、相位差来计算出设备与被测物体之间的距离。设备自带的惯性测量单元可以对手持设备的姿态变化、运动轨迹进行实时的监测, 并且把设备的三维坐标以及角度参数一同记录下来。多组传感数据实时融合之后, 可以连续获取场景内大量的三维点云数据, 完全覆盖被测空间的地形、结构、轮廓等信息。手持设备比固定式测绘设备更灵活, 可以跟随作业人员移动, 在狭窄空间、不规则环境里实现全覆盖的数据采集, 具有很强的场景适应性。

1.2 SLAM 空间测绘运行流程

SLAM 技术在手持激光雷达测绘作业中, 大致可以分为数据采集、数据预处理、定位解算、地图创建、模型优化这五个主要部分。设备移动时不断获取高密度点云数据

和惯性传感数据, 原始数据有环境噪声、离散杂点和姿态偏差。系统用滤波算法去掉无效数据, 规范点云密度, 从而实现数据预处理。根据匹配算法对连续帧的点云数据进行配准, 得到设备实时的空间位置和运动姿态。根据定位结果拼接整合全局点云数据, 得到场景初始三维空间地图。最后用闭环检测、全局优化修正累计误差来得到高精度的空间模型, 从而达到未知场景的实时同步定位和测绘建模。

2 手持激光雷达 SLAM 测绘精度应用价值分析

2.1 室内空间精细测绘应用

建筑室内空间结构复杂、管线繁杂, 传统的测绘设备作业难度大、效率低。手持激光雷达 SLAM 技术能快速获取室内全屋三维数据, 准确地得到墙体、梁柱、管线、装饰结构等各方面的空间尺寸和位置。经过精度优化的测绘系统可以达到厘米级的空间测绘精度, 满足室内装修设计、建筑竣工验收、旧房改造测绘等场景的精度要求。轻量化手持设备可以适应楼梯、夹缝、吊顶等狭小空间作业, 较好地克服了传统测绘方式的不足, 提高了室内空间数字化

建模的速度和精度。优化后的技术可以准确地获取细微结构尺寸偏差,符合 BIM 建模数据采集的标准。

2.2 户外小型场景测绘应用

园林景观、小型场地、临街建筑等户外小型场景不需要大型机载、车载测绘设备作业。手持激光雷达 SLAM 设备灵活方便,可以迅速完成场景三维测绘和地形建模,改进后的精度体系可以达到场地规划、景观设计、户外工程监测的行业标准。设备可以适应复杂的户外地形,避免由于固定站点测绘视野盲区而造成的测量问题,对场景的三维空间数据进行完整的采集。高精度的测绘结果可以给户外空间数字化存档、工程施工复核、场地改造设计提供可靠的依据,大大降低户外小型测绘项目的工作量和时间成本。

2.3 应急测绘与巡检应用

灾害现场、事故现场等应急场景具有环境未知、地形复杂、作业时间紧迫等特点,传统的测绘方式不能很快地完成场景建模。手持激光雷达 SLAM 设备可以迅速进入未知环境,对现场进行实时的三维空间建模,精确地建立现场三维空间模型。精度优化过的系统可以很好地保证复杂干扰环境下测绘的稳定,避免不规则地形、杂乱障碍物造成的建模误差。精准的空间测绘数据可以给应急救援、灾情评估、现场隐患排查提供直观的空间依据,提高应急测绘作业的实用性、可靠性。

2.4 工业设施与地下空间测绘应用

工业厂区、地下管廊、隧道、矿井等封闭特殊空间,普遍存在着无卫星信号、光线昏暗、设备密集、通道狭窄等特点,传统的全站仪、静态扫描仪测绘作业受限制严重,容易造成数据缺失、建模失真的问题。手持激光雷达 SLAM 设备依靠无依托自主建模的优势,可以脱离卫星定位和固定基准点来完成作业,适合各种封闭、遮挡型工业和地下场景的数据采集工作。经过精度优化的测绘系统可以一直保持厘米级的测绘精度,准确地获取工业设备布置、管道走向、隧道内壁形变、管廊结构尺寸等重要数据,把复杂的三维空间结构和位置关系完整的展现出来。设备轻量化特性可以使得人员在狭小的巷道、设备夹层、地下走廊里自由移动进行全方位扫描,从根本上克服了传统固定站点测绘存在的视野盲区和数据断层问题。

3 手持激光雷达 SLAM 空间测绘精度影响因素

3.1 硬件设备性能影响

硬件参数、设备性能属于决定测绘基础精度的重要因素。激光雷达的测距精度、扫描频率、角度分辨率都会影响到单点数据的采集准确性。低扫描频率设备采集的点云

密度太低,会造成场景细节的缺失,不能准确地复现出微小结构的尺寸。惯性测量单元的采样精度和稳定性决定了姿态数据采集质量的好坏,精度低的惯性元件会产生不断的姿态偏差,随着作业时间的增长就会产生累积误差。手持设备的机身防抖结构、传感校准精度也会对测绘效果产生影响,手持作业过程中产生的轻微震动、设备出厂校准偏差都会导致点云错位、坐标偏移,从而降低整个测绘精度。

3.2 SLAM 算法性能影响

算法模型运算能力、优化机制决定数据处理、建模的精度。点云配准是 SLAM 算法的重要部分,传统的配准算法对初始点云的状态很敏感,在复杂的环境下很容易产生局部最优解的问题,从而导致帧间匹配出现偏差。闭环检测算法的精度影响全局误差修正的效果,场景特征单一、重复结构较多的时候,闭环检测容易产生误判,不能有效地修正长期作业造成的累计误差。数据融合算法的适配性也会对精度造成影响,激光点云数据和惯性数据融合时序错位、权重分配不合理,会造成定位结果偏移,导致最终建立的空间模型出现变形、拉伸等问题。

3.3 作业环境条件影响

作业场景的环境特性会直接对激光传输以及数据采集造成影响。室外强光环境下,激光信号的接收会受到影响,反射信号的强度也会变小,从而造成一些远距离测点的数据缺失或者测距出现误差。透明材质、高反光物体表面会使得激光折射、漫反射产生大量的虚假点云数据,影响有效的点云数据的识别。空旷无特征场景、结构重复的室内场景缺少足够的特征点进行点云匹配,定位解算的稳定性就会受到影响。复杂的地形和遮挡都会造成激光扫描盲区,造成局部数据缺失,破坏空间模型的完整性,从而影响整个测绘精度。

3.4 人为操作因素影响

操作人员作业熟练程度、操作规范性以及作业习惯,都是造成测绘数据精度偏低的人为变量,也是现场作业中容易出现误差的可控变量。手持设备移动速率、扫描姿态控制不规范是常见的误差来源,作业时移动速度过快会造成点云采样稀疏、帧间匹配不够充分,速度忽快忽慢、设备倾斜抖动会造成点云分布不均匀,引起建模错位和畸变。操作人员的路线规划不合理,会出现漏扫、重复扫、局部停留时间过短或者过长等现象,造成场景数据缺失或者重复,破坏了点云数据的完整性、一致性。

4 手持激光雷达 SLAM 空间测绘精度优化策略

4.1 优化硬件设备配置与校准

根据测绘作业场景的需求选择适合的参数手持激光雷

达设备, 优先选用高角度分辨率、高扫描频率的激光传感模块, 保证点云数据的密度和精度。采用高精度的惯性测量单元进行姿态数据的采集, 从源头上降低原始数据的误差。创建设备校准的常态长效机制, 作业前对激光测距参数、惯性传感参数进行校准修正, 消除由于长时间使用引起的参数偏差。改善手持设备的物理结构, 升级防抖减震的设计, 弱化手持操作时由于震动、抖动造成的数据偏差, 提高设备作业过程的稳定性。另外定期做激光和惯性单元的联合标定, 修正传感器安装偏差和时序错位问题, 用专业的标定板做参数核验, 避免硬件兼容误差, 全方位提高原始数据采集精度, 满足多场景高精度测绘需求。另外可以建立设备使用台账, 记载每次校准、作业和损耗的情况, 及时发现设备老化、部件磨损的问题, 给硬件精度的稳定性提供长期的保障。

4.2 改进 SLAM 核心算法模型

优化点云配准算法, 用特征提取机制筛选出场景稳定的特征点, 避免无效杂点对配准运算造成干扰, 提高帧间点云匹配的精度和稳定性。改进闭环检测算法, 把视觉特征和点云特征结合起来创建双重检测体系, 改善单一特征、重复场景的闭环识别精确度, 较好地修正全局累积误差。优化多源数据融合算法, 根据设备不同的运动状态改变激光数据和惯性数据的融合权重, 使数据时序对准。在模型建立时用全局优化算法来修正由于坐标偏差、模型变形造成的误差, 使整个空间建模更加精确。另外在原有行人跟踪模块上添加动态噪声剔除模块, 对行人、移动物体等动态干扰点云做实时过滤, 用自适应阈值来优化匹配搜索范围, 降低算法运算误差, 提高复杂动态场景的建模鲁棒性。同时对算法运行算力分配方式进行改进, 去掉多余的计算步骤, 在保证模型准确性的基础上提高复杂场景建模的运算速度。

4.3 规范现场测绘作业流程

按照作业环境制定标准化的测绘流程, 防止由于环境干扰造成精度损失。强光室外作业可以采用遮光辅助设备减弱自然光对激光信号的干扰, 保证远距离测点数据完整。对高反光、透明材质密集的场景, 改变设备扫描角度和测距参数, 减小激光反射引起的虚假点云。作业时保持平稳匀速移动速度, 防止设备快速晃动、突然停止动作造成姿态数据偏差。对空旷、特征稀疏的环境进行全覆盖扫描路径规划, 在多角度、多频次扫描的基础上加入场景特征点以保证定位和建模的稳定性。另外, 建立作业前后数据抽检机制, 实时对点云缺失、畸变等进行检查, 统一各个操

作人员的作业标准, 防止人为操作的差异造成精度误差, 使测绘作业全流程精度可控。同时划分出标准化作业分区, 确定各个区域的扫描优先次序和作业时长, 细化流程控制的细节, 从而减少由于环境、作业随机性引起的精度波动。

4.4 规范人员操作与管控

对由于人为操作而产生的各种精度误差进行系统的人员操作规范和管控, 从作业主体的角度来杜绝人为的偏差, 从而达到操作的标准化、精度的可控化。进行常态化的操作人员专项培训, 重点对设备手持姿势、移动速度、扫描手法等操作内容进行专项培训, 规范匀速平稳的操作节奏, 坚决杜绝快起快落、突然停止、倾斜扫描等不规范操作, 提高操作人员操作熟练程度和操作标准化程度。制定标准化的扫描路线规划准则, 根据场景大小、结构复杂度提前布置扫描路径, 明确全覆盖扫描的要求, 避免漏扫、重复扫描、局部采样不足等现象的发生, 保证点云数据完整均匀。加强作业前参数调试培训, 对操作人员在现场环境下按照工作场景的特点调节设备的扫描频率、测距范围等参数, 保证设备参数符合作业环境的要求。同时建立作业考核和复盘制度, 对作业成果进行定期检查、总结操作问题, 不断改善人员的操作标准, 形成测绘精度的人为控制防线。

5 结语

手持激光雷达 SLAM 测绘技术是轻量化三维空间建模的主要方法, 满足了多场景精细化测绘作业的要求, 很好地解决了传统测绘效率低、盲区多、适配性差的行业难题。采用硬件校准升级、算法更新改进、作业程序规范、人员管控加强等各方面措施来消除各种精度误差, 保证复杂场景下厘米级测绘的效果。该技术的升级可以持续给建筑、工业、应急、园林等各个领域提供数字化发展的持续动力, 为空间测绘行业的高质量发展注入持久的动力。

参考文献:

- [1] 李昊. 手持激光雷达 SLAM 三维重建精度评估与优化研究[D]. 山东科技大学, 2023(09): 12-14.
- [2] 张泽宇. 移动激光雷达 SLAM 点云测绘精度影响因素研究[D]. 河南理工大学, 2022(11): 77-79.
- [3] 王浩宇. 手持三维激光 SLAM 系统室内外测绘精度试验研究[D]. 西安科技大学, 2024(08): 58-61.
- [4] 周扬. 激光惯性融合 SLAM 手持扫描系统建模与精度分析[D]. 武汉大学, 2021(05): 67-69.

作者简介: 郭晓辉(1990.11.26), 汉族, 河南省虞城县, 本科学历, 中级工程师, 研究方向: 激光、影像三维重建。