

激光SLAM测量技术在地下空间中的方法研究

侯军强 李玉峥 史云硕

航天规划设计集团有限公司 北京 100071

摘要：针对地下空间无卫星信号、环境封闭、纹理稀疏、粉尘干扰等特殊工况，传统测量方式作业效率低、数据采集不全，精度难以保障。本文围绕激光SLAM测量技术展开研究，结合地下空间作业特点，优化点云预处理流程，改良定位建图算法，提升系统在退化场景的稳定性。经实验验证，该技术能实现无基准自主定位建模，精度满足工程规范，可高效完成地下空间三维测绘、形变检测等任务，为地下工程数字化建设提供技术保障。

关键词：激光SLAM测量技术；地下空间；测量方法

引言：随着城市地下空间开发不断深入，隧道、地下管廊、矿山巷道等工程测量需求日益增长。地下空间缺乏定位参考，环境复杂恶劣，传统人工测量耗时费力，无法实现全域三维建模，难以适配现代化工程管控。激光SLAM技术无需卫星导航信号，可同步完成定位与地图构建，适配地下无信号场景。本文针对地下测量痛点，优化激光SLAM应用方法，攻克技术难题，完善测量体系，推动地下空间测量向智能化、高效化转型。

1 激光 SLAM 技术及地下空间环境分析

1.1 激光SLAM核心原理

(1) SLAM技术基本概念与核心流程。SLAM即同步定位与地图构建技术，其核心在于让移动设备在未知且无基准的环境中，同步完成自身位姿的精准估算与环境地图的全面搭建，有效解决了无卫星信号环境下定位的难题。该技术的核心流程涵盖数据感知、位姿推算、地图构建以及闭环优化四大环节，是地下空间实现自主测量的关键技术支撑。(2) 激光雷达工作原理与数据采集机制。激光雷达通过发射激光束，利用回波的飞行时间精确测算目标物体的距离，经过全方位扫描生成三维点云数据。这些数据不仅包含物体的空间坐标信息，还带有反射强度等特征，且不受光照条件的影响，能够精准捕捉环境的轮廓细节，为SLAM系统提供了可靠且丰富的数据基础。(3) 经典激光SLAM算法分类与对比。目前主流的激光SLAM算法主要分为滤波类和图优化类。滤波类算法运算量相对较小，在小场景应用中表现出色，但在大范围场景下容易积累误差，影响定位精度。而图优化类算法则以其高精度和强鲁棒性著称，能够更好地适应复杂多变的大场景环境，因此更符合地下工程测量的实际需求。

1.2 地下空间测量环境特征分析

(1) 地下空间封闭性与信号遮挡问题。地下空间多

为封闭或半封闭状态，完全屏蔽了卫星信号，无法借助卫星定位进行辅助。同时，巷道、管廊等空间狭长，墙体与构筑物会遮挡激光的传播路径，造成点云数据的缺失，从而大幅提升了定位建模的难度。(2) 地下场景纹理缺失与环境退化特性。地下场景的墙面、路面往往单调平整，视觉纹理匮乏，几何特征单一，属于典型的退化环境。在这种环境下，设备容易出现点云匹配失效、位姿漂移等问题，常规算法难以保持稳定作业。(3) 粉尘、潮湿等干扰因素对测量的影响。地下空间中粉尘、水雾较多，会散射激光信号，产生噪声点云，降低数据质量。同时，潮湿环境还会侵蚀设备，损耗测量精度，干扰点云匹配与位姿解算过程，进而影响测量的稳定性^[1]。

2 地下空间激光 SLAM 测量方法优化设计

2.1 测量系统硬件选型与集成

(1) 激光雷达设备选型依据与方案。在选择激光雷达设备时，抗干扰性、测距精度和扫描频率是核心指标。考虑到地下空间狭长封闭的特点，中短程激光雷达能够兼顾探测范围和点云密度，满足测量需求。同时，为了应对地下环境中的粉尘和潮湿等恶劣条件，应优先选用抗粉尘、防潮湿的工业级设备。这类设备具有良好的密封性和防护性能，能够在恶劣环境下稳定作业，避免信号衰减和数据失真。此外，控制设备体积也是重要的考虑因素，小巧便携的设备更适配现场作业需求，方便操作人员在狭窄的地下空间中进行移动测量。(2) 辅助传感器适配与组合方案。为了弥补激光雷达在退化场景中的定位短板，搭配惯性测量单元(IMU)和里程计组成多传感器融合体系是一种有效的解决方案。惯性测量单元能够快速捕捉设备的瞬时位姿变化，提供高频率的姿态信息，而里程计则可以辅助低速运动轨迹的推算，提供距离信息。通过将激光雷达、惯性测量单元和里程计的数据进行融合，多源数据相互补充，能够有效

削弱环境干扰带来的位姿漂移,提升系统整体的稳定性和定位精度^[2]。(3)硬件系统集成与便携化设计。将激光雷达、传感器、主控单元与供电模块进行一体化集成,采用紧凑的架构设计,可以减少线路干扰,提高系统的可靠性和稳定性。在设备设计过程中,优化设备配重和外形,制作成手持或背负式便携形态,能够降低现场作业难度。这种便携化设计使得操作人员可以在地下狭窄的巷道、管廊等复杂工况中灵活移动,实现快速、高效的测量,提高工作效率。

2.2 点云数据预处理方法

(1)地下空间点云噪声去除方法。针对地下空间中粉尘、水雾产生的悬浮噪声点,可以采用直通滤波和半径滤波算法相结合的方式去除。直通滤波通过设定空间范围,截取有效测区的数据,剔除明显超出范围的离群点。半径滤波则根据邻域密度筛查噪声,在一定半径范围内,如果点云数量过少,则认为该点为噪声点并予以剔除。通过这两种算法的结合使用,能够有效保留真实环境的点云数据,减少干扰数据对后续配准和建模的影响。(2)点云降采样与特征提取优化。体素栅格降采样法是一种常用的点云降采样方法,它将点云空间划分为多个体素栅格,在每个栅格内选取一个代表性点,从而均衡点云密度。在保留完整几何特征的前提下,减少数据冗余,提升运算速度。在特征提取方面,重点提取墙角、棱角、断面轮廓等刚性特征,这些特征具有较高的辨识度和稳定性,能够更好地适应地下低纹理场景的匹配需求。同时,弱化平面冗余信息,减少不必要的计算,提高特征提取的效率和准确性。(3)点云数据配准前期准备。对预处理后的点云进行坐标归一化处理,统一数据基准,确保不同数据之间的可比性。剔除残缺、重叠过多的片段,避免这些数据对配准结果产生干扰。对点云进行平滑滤波,修复局部数据漏洞,使点云轮廓更加规整。这些前期准备工作能够为后续的里程计算和点云配准打下良好的基础,减少匹配误差,提高配准的准确性和稳定性^[3]。

2.3 激光SLAM算法改进

(1)针对地下退化场景的前端里程计优化。在地下退化场景中,改进点云匹配策略是关键。加大刚性特征的权重,采用特征匹配与平面约束相结合的方式,能够有效解决平面单一场景匹配失效的问题。同时,优化运动畸变去除算法,使其更适配低速平稳作业,提高位姿推算的精度。通过这些改进措施,前端里程计能够在复杂地下环境中更准确地估计设备的位姿变化,为后续的地图构建提供可靠的基础。(2)回环检测机制改进与

误差修正。增设局部回环检测模块,缩短检测间隔,能够及时发现设备运动过程中的闭环情况。结合点云特征与位姿信息双重判定,减少误匹配的发生。一旦发现闭环,及时修正累积误差,打破传统算法长距离作业漂移严重的局限,保证全局轨迹的一致性。通过改进回环检测机制,能够有效提高激光SLAM系统的精度和稳定性^[4]。

(3)位姿优化与地图构建精度提升。采用图优化框架,融合多传感器数据构建约束关系,通过非线性优化求解最优位姿。这种方法能够充分利用各种传感器的信息,提高位姿估计的准确性。细化地图构建网格,对关键帧点云进行精细化拼接,修正局部形变,使构建的三维地图更贴合真实的地下环境,满足高精度测量的要求。

3 实验验证与结果分析

3.1 实验设计与实验环境

(1)实验场地选取与场景设置。为验证优化后激光SLAM测量方法的有效性,选取地下管廊和地下巷道两类典型地下场地作为实验区域,其中地下管廊长度100米、宽度2.5米、高度3米,地下巷道长度150米、宽度3米、高度2.8米,还原地下封闭无卫星信号、纹理单一、粉尘干扰的真实工况。将实验区域划分为常规区域(无明显遮挡、纹理相对丰富)、退化区域(墙面单调、无明显特征)、复杂干扰区域(粉尘浓度高、存在多处遮挡)三类,全面模拟实际工程作业环境,确保实验结果的代表性和实用性。(2)实验设备与软件平台。实验选用优化后的激光SLAM测量系统作为测试对象,同时选用传统全站仪(精度 $\pm 1\text{mm}$)、水准仪(精度 $\pm 0.5\text{mm}$)作为对比设备,用于提供高精度真值数据。软件平台选用专用点云处理软件(Cloud Compare)、SLAM算法运行平台(ROS系统)、数据分析软件(MATLAB),搭建完整的实验测试平台,统一实验数据的采集、处理和分析标准,确保实验条件的一致性,减少无关因素对实验结果的影响。(3)实验方案与对比组设置。设置三组对照实验,分别为传统测量组(采用全站仪+水准仪测量)、常规SLAM组(未优化的激光SLAM系统)、优化SLAM组(本文设计的优化方案),三组实验在同一测区开展重复测量,每组测量3次,采集点位坐标、三维模型、作业耗时等核心数据。实验过程中控制无关变量,如测量人员、作业时间、环境条件等保持一致,确保实验结果的客观可信,便于后续的精度对比和实用性分析。

3.2 精度验证与误差分析

(1)测量精度评定方法。选用平面误差、高程误差、模型拼接误差作为核心精度评定指标,以传统全站仪和水准仪测量的数据作为真值,分别计算三组实验的

测量偏差,统计误差均值、方差和最大偏差,通过量化指标评定各组测量方法的精度。其中平面误差和高程误差反映点位定位精度,模型拼接误差反映地图构建的一致性,三者结合能够全面评价测量系统的综合精度^[5]。

(2)与传统测量方法精度对比。实验结果显示,优化后SLAM测量系统的平面误差均值为2.3mm,高程误差均值为2.8mm,模型拼接误差均值为3.5mm,误差均控制在毫米至厘米级,满足地下工程测量的精度要求。与传统测量方法相比,优化SLAM组的精度无明显差距,且在全局地图构建的一致性上表现更优,传统测量方法受控制点布设影响,容易出现局部点位偏差,而优化SLAM系统能够实现全局无偏差建模,更适配地下大范围测量需求。

3.3 实用性与稳定性测试

(1)复杂地下环境适应性测试。在实验的复杂干扰区域(粉尘浓度高、遮挡严重)和退化区域(低纹理),优化后的激光SLAM系统均可稳定作业,未出现点云匹配失效、位姿漂移等问题,能够精准捕捉环境轮廓,生成完整的三维地图;而常规SLAM组在退化区域和复杂干扰区域出现多次匹配失效,位姿漂移量超过10cm,无法完成稳定测量,说明优化后的系统具备良好的复杂环境适应性,能够适配各类恶劣地下工况。(2)作业效率与耗时对比分析。优化SLAM系统无需布设控制点,单人即可完成操作,单次测量(100米管廊)耗时约40分钟;传统测量组需要2-3人配合布设控制点、进行点位测量,单次测量耗时约120分钟;常规SLAM组单次测量耗时约60分钟。实验结果表明,优化SLAM系统的作业效率远超传统测量方式和常规SLAM系统,能够大幅缩短

地下工程测量周期,适配工程加急作业需求。(3)系统运行稳定性评估。对优化SLAM系统进行长时间连续作业测试,连续作业8小时,系统无死机、卡顿、数据丢失等情况,运行流畅,数据输出连贯,点云数据质量稳定,位姿推算精度波动控制在1mm以内,具备良好的工程实用稳定性,能够满足地下工程长期、连续测量的作业需求。

结束语

本文针对地下空间测量的各项难题,对激光SLAM测量技术进行优化改进,有效弥补了传统测量方式的短板,解决了常规算法在地下场景的定位漂移问题,实现了高精度自主测量。该技术应用前景广阔,能广泛用于地下施工管控、安全监测、数字化存档等工作,具备良好的实用价值。后续将继续深化算法研究,融合多传感器数据,提升极端环境适配性,进一步推广激光SLAM在地下空间领域的应用。

参考文献

- [1]李嘉禾.三维激光扫描技术在地下空间测量中的应用[J].城市勘测,2022,12(3):109-113.
- [2]李照永,侯至群.融合定位及三维激光扫描技术获取地下空间数据的应用研究[J].城市勘测,2022,32(1):215-218.
- [3]孟庆年.三维激光扫描技术在狭窄地下空间测量中的应用[J].测绘通报,2020,10(S1):168-172.
- [4]吕华新.基于SLAM技术的地下空间三维实景建设关键技术研究[J].测绘地理信息.2022,47(3):157-160.
- [5]彭浩,吴凯华.3D SLAM背包式扫描仪在旧建筑改造辅助测量中的应用[J].测绘地理信息.2022,47(4):175-177.