

三维激光扫描技术在城市空间测绘中的应用研究

袁晓艳

安徽云涯方寸地理信息技术有限公司, 安徽 宁国 242300

[摘要]城市空间高密度、复杂的特点对测绘精度、效率的要求也越高。三维激光扫描技术依靠非接触、高密度点云采集的优势, 给城市测绘开辟出一条新的技术途径。从数据采集、点云配准和滤波、坐标转换等技术过程入手, 对城市地形测绘、建筑物信息提取、三维建模、城市更新等典型应用进行梳理。就多源数据协同缺乏、复杂环境作业受限、成果更新缓慢等问题而言, 提出融合多源测绘数据、提高点云处理精度、改善复杂环境作业方案、推进成果动态更新等方法, 期望给城市空间测绘技术升级给予参照。

[关键词]三维激光扫描; 城市空间测绘; 三维建模; 测绘精度

DOI: 10.33142/ucp.v3i3.20374

中图分类号: P235.2

文献标识码: A

Research on the Application of 3D Laser Scanning Technology in Urban Spatial Mapping

YUAN Xiaoyan

Anhui Yunya Fangcun Geographic Information Technology Co., Ltd., Ningguo, Anhui, 242300, China

Abstract: The high-density and complex characteristics of urban space require higher surveying accuracy and efficiency. 3D laser scanning technology, relying on the advantages of non-contact and high-density point cloud acquisition, has opened up a new technological path for urban surveying and mapping. Starting from the technical processes of data collection, point cloud registration and filtering, coordinate transformation, etc., this paper summarizes typical applications such as urban terrain surveying, building information extraction, 3D modeling, and urban renewal. In terms of the lack of multi-source data collaboration, limited operations in complex environments, and slow results updates, methods such as integrating multi-source surveying and mapping data, improving point cloud processing accuracy, improving complex environment operation plans, and promoting dynamic results updates are proposed to provide reference for upgrading urban spatial surveying and mapping technology.

Keywords: 3D laser scanning; urban spatial surveying and mapping; 3D modeling; calculating accuracy

引言

城市空间测绘属于规划、建设以及管理的基础性工作。传统的全站仪和 RTK 测量在密集建筑区存在着通视条件不好、工作效率低等缺点。三维激光扫描技术以激光测距为主, 不需要接触目标就可以快速得到高密度三维坐标, 在城市复杂环境中表现出明显的优势。近些年来, 背包式、车载式扫描系统的出现又使它的应用范围得到扩展。怎样在城市高密度环境里达成高效、精确的空间信息采集和表现, 成了测绘领域的重要课题。本文主要对城市空间测绘中该技术的应用进行系统的分析, 主要研究它的技术流程、典型应用场景和优化策略。

1 三维激光扫描技术与城市空间测绘概述

三维激光扫描技术是利用激光测距原理, 通过记录激光脉冲从发射到接收的时间差或者相位差来计算扫描仪到目标点的距离, 再结合水平角、垂直角观测值来解算目标点的三维坐标。按搭载平台可以分为地面固定式、背包式、车载式和机载式, 不同的平台在精度、效率和适用范围上有所不同。地面固定式扫描精度最高, 单点精度可达毫米级, 但是作业效率受站点数量的限制; 背包式系统使用 SLAM 技术进行连续采集, 适合在无 GPS 环境下工作; 车载式系统适合于道路走廊的大范围快速扫描; 机载式适合于大面积地形的获取。各个平台技术特征如图 1 所示。

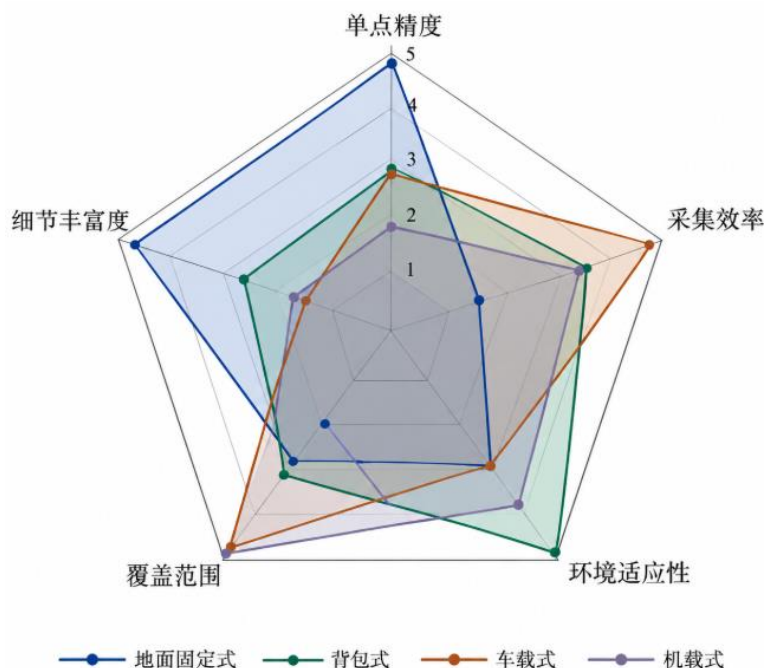


图1 三维激光扫描平台技术特征对比

城市空间测绘对象有地形、建筑物、道路、管线、地下空间等，密度大、结构复杂、现势性要求高。传统的测绘方式不能满足立面测量、异形结构表达、复杂空间信息的获取。三维激光扫描技术的应用使城市空间信息的获取由原来的离散点变成连续面，给高精度三维表达打下了数据基础。与此同时，城市空间测绘对于成果的语义丰富度以及更新频率也有了更高的要求，从而使得三维激光扫描技术由原来的单点数据采集发展为全流程的解决方案。

2 三维激光扫描城市空间测绘的数据处理与技术流程

2.1 三维激光扫描数据采集与点云获取

城市空间扫描作业要依照场景特点挑选契合的采集方案。地面固定式扫描适合于建筑物立面、雕塑等精细目标近距离高精度获取，站点间距一般控制在 15m 以内保证重叠率。背包式扫描系统用 SLAM 技术，在无 GPS 的环境下连续采集，适合于地下通道、人行步道等场景。车载式系统可以对道路走廊进行大范围、快速的扫描。多平台协同作业时，需要先布设控制点来实现数据基准的一致性，控制网的平面、高程精度一般控制在 5cm 以内。采集方案的设计还要考虑到目标表面的反射特性。对玻璃幕墙、抛光金属等高反射表面的点云进行扫描时，会因为激光束发生镜面反射而造成点云缺失或者噪声增大，这时需要改变扫描的角度或者使用喷涂显影剂等辅助手段。对植被覆盖区来说，激光脉冲可以穿透部分间隙得到地面点，但是

需要结合滤波算法来提取真实的地形。扫描分辨率的选择要在精度和效率之间取得平衡，过高分辨率虽然可以提高细节表现，但是会使得数据量增大、处理时间变长。实际作业时要按照测绘比例尺以及成果用途来确定采样间距。

2.2 点云配准、滤波与坐标转换

点云配准就是把不同的站点或者平台获得的数据统一到同一个坐标系中。迭代最近点算法是最常用的一种配准方法，它的基本思想就是通过不断的搜索对应点对，并计算出刚体变换参数，使得源点云和目标点云逐渐接近。对城市环境里出现的特征重复现象加以改善，依靠改进 ICP 点云配准算法并结合多角度数据融合技术，可以较好地解决复杂的环境下噪声消除以及拼接精度方面的问题。在配准的过程中，粗配准和精配准相结合可以明显提高收敛速度以及配准的可靠性，粗配准阶段利用特征点匹配或者 GPS 信息来给出初始的位姿估计，精配准阶段通过迭代优化来减小残差。对于特征稀疏、平坦的区域或者有重复纹理的幕墙表面，用人工靶标或地面控制点配准可以提高对应点搜索的稳定性。多站点配准还要考虑误差累积的问题，用全局平差模型对多站点的位姿进行联合优化，可以有效地控制长测段数据的漂移。

滤波处理就是去除噪声点和非目标点云。点云去噪技术被应用到激光雷达传感器上，可以得到更好的点云数据。常用的有统计滤波法、半径滤波法和基于深度学习的去噪方法。统计滤波利用邻域点距离分布剔除离群点，可以去

除稀疏噪声,半径滤波是用邻域半径内最小点数阈值来完成过滤的。根据城市环境中植被、行人、车辆等非目标要素的影响,可以使用语义分割的方法来区分点云中的建筑、地面和动态目标。坐标转换把配准后的点云从扫描仪坐标系转到城市统一坐标框架,需要利用公共控制点求解转换参数,常用的转换模型有七参数相似变换和基于罗德里格矩阵的转换方法。

3 三维激光扫描技术在城市空间测绘中的主要应用

3.1 城市地形与大比例尺地形图测绘

城市大比例尺地形图测绘具有区域零散、要素繁多等特点。背包式三维激光扫描系统可以沿着测量路径连续采集点云,对于城市大比例尺地形图测量的区域零散性、测量要素多样性、复杂性等特点进行了梳理和优化,提出了背包三维激光扫描作业流程。从精度上讲,用天宝 X7 三维激光扫描仪进行改进的方案实验结果表明,地形图平面中误差为 0.026m,外业时间比原来缩短了 0.5 天。该技术对于植被覆盖区域的地面点提取也有明显的优势,可以穿透植被间隙得到真实的地面高程。车载式扫描系统可以在道路上快速获取点云,配合惯性导航系统进行厘米级定位,大大提高外业效率^[1]。地形图要素的自动提取属于提高作业效率的重要工作。根据点云数据提取道路边界、路缘石、人行道等要素可以采用几何特征分析以及区域生长算法来完成半自动提取。建筑物边界线提取需要点云投影和轮廓跟踪算法相结合。目前的研究热点是用深度学习网络对点云做语义分割,实现地形要素的自动分类和提取,在复杂的城市环境中泛化能力还需要提高。

3.2 城市建筑物空间信息提取

建筑物立面测绘属于城市更新、改造的前期基础工作。三维激光扫描可以得到立面的全部几何信息,门窗洞口、装饰构件、不规则轮廓都可以被获取。针对老旧建筑外立面提升改造过程中传统测量方法自动化程度低、复杂建筑物细部轮廓信息采集不完整等问题,三维激光扫描技术可以高效地完成建筑立面测绘。根据点云数据可以直接得到建筑物的轮廓线,生成立面图,还可以对面积进行统计。在历史建筑保护中,三维激光扫描可以采用非接触的方式对建筑现状进行记录,给修缮设计提供准确的几何基础。建筑物空间信息提取的精度是由点云密度、配准精度两个因素决定的。立面点云投影到二维平面之后,用边缘检测算法可以得到轮廓特征。对装饰构件等复杂的细节使用高分辨率扫描模式得到精细的点云^[2]。在建筑信息模型创建过程中,点云数据可以作为建模的参照底图,帮助技术人

员快速建立构件级模型。目前,从点云到建筑信息模型的自动转换还存在构件语义识别、拓扑关系重建等困难。

3.3 城市三维模型构建与空间表达

三维模型创建属于城市空间测绘的高级阶段。根据点云数据可以生成三角网格模型,再用纹理映射来达到真实的表达效果。利用激光扫描技术完成地上地下空间一体化建模,经过控制点布设、点云获取和处理等步骤,建模精度可以达到 0.016m。在数字孪生城市架构当中,三维模型还要同建筑信息模型、地理信息系统数据融合起来,借助地形网格重建以及无缝嵌入技术,除去冗余网格,消除几何间隙,创建出拓扑连续的整体三维场景。三维模型的分辨率、细节层次要根据应用需求分层设置,城市规划层面可以简化,建筑改造层面要保留全部的细节。

表 1 三维激光扫描技术典型应用场景与精度指标

应用场景	扫描平台	精度指标
地形图测绘	背包式/车载式	平面中误差 0.026m
建筑物立面测量	地面固定式	立面中误差 0.011m
三维建模	多平台融合	建模精度 0.016m
土石方测量	无人机+背包	满足规范精度要求

三维模型的应用已经由原来的静态展示变为现在的动态分析。根据模型进行空间分析,可以对日照分析、通视分析以及洪水淹没模拟等场景提供支持。在三维模型和物联网数据融合上,用传感器实时数据同模型构件联系起来,就能达成城市基础设施运行状况的监测。该种模型加数据的融合模式正成为数字孪生城市建设的主要模式。

3.4 城市更新与复杂空间测绘应用

城市更新项目牵涉到历史建筑保护、地下空间改造以及复杂管线探测等诸多情况。三维激光扫描技术在上述领域中有着非常大的优势。空地协同测绘技术把地面三维激光扫描数据同空中无人机倾斜摄影数据融合起来,能快速得到大范围、高密度的点云数据,精度符合有关规范的要求,给城市综合体的规划设计和竣工验收赋予可靠的支撑。地下空间测绘时背包式 SLAM 扫描系统可以在没有 GPS 信号的情况下对通道、管廊进行三维数据采集^[3]。复杂管线探测属于城市更新的难题。传统的管线探测依靠物探手段,存在定位精度低、效率不高等缺点。三维激光扫描可以得到管线出露部分的三维坐标,利用探地雷达数据对地上地下管线进行联合表达。在老旧小区改造过程中,三维激光扫描可以快速得到建筑群的现状数据,为方案的设计以及工程量的统计提供支持。城市更新项目动态性要求测绘成果及时更新,这就对扫描作业的灵活性、数据处理效率提出更高的要求。

4 三维激光扫描城市空间测绘应用的优化策略

4.1 完善多源测绘数据融合与协同采集

单一扫描平台难以兼顾精度与效率。地面扫描精度高但是覆盖范围小,无人机采集效率高但是受到空域和天气的限制。空地协同测绘技术可以快速获取大规模、高密度的点云数据,达到优势互补的目的。数据融合过程中要处理多平台点云空间基准统一、密度差异调平、语义一致性问题。多源点云数据融合的建筑物精细化建模是该领域的一个重要研究方向。协同采集方案的设计要根据项目的精度要求以及现场情况,合理安排各个平台的工作比例以及衔接方式,保证数据完整并且冗余适当。

4.2 提升点云数据处理与测绘成果精度

点云处理质量好坏直接影响到最终测绘成果的可靠程度。配准时采用关键点对应回归网络的点云匹配模型,可以达到亚厘米级的标定精度,在复杂的城市场景下投影误差可以收敛到0.012m,比传统的ICP算法精度提高了80%。去噪的时候,深度学习的方法可以学习复杂的几何先验,比传统的滤波方法有更强大的泛化能力。未来要继续完善自动化处理过程,减少人工的介入。在成果精度控制上要创建起数据采集到成果产出全过程的质量检查体系,包含点云重叠度检查,配准残差剖析以及模型几何精度验证这些环节。

4.3 优化复杂城市环境下的扫描作业方案

城市环境中遮挡、反射、人流等都会对扫描的效率造成影响。优化策略有合理规划扫描路线和站点位置,保证数据重叠率达到配准的要求,采用多平台组合的方式应对不同的场景,利用激光脉冲穿透植被间隙得到地表三维点云数据,内置高精度惯性导航系统在没有信号的情况下也能实现厘米级的定位。高反射表面、玻璃幕墙等需要改变扫描角度或者使用辅助手段。人流密集处可以选非高峰时段施工或者采取快速扫描方式来缩减现场停留时间。另外对于城市峡谷效应造成的GPS信号遮挡问题,可以使用SLAM技术和惯性测量单元组合定位的方法。

4.4 推进测绘成果数字化应用与动态更新

测绘成果的价值就在于应用和更新。以点云为基础建立的三维模型要和城市规划、建设审批以及运维管理平台相衔接。采用八叉树空间索引和全局唯一标识符相结合的方法可以有效地对大量的三维场景数据进行组织以及快速的查找。动态更新方面,可以采用定期扫描或者移动测量的方式进行变化检测,用比较不同时相点云数据来评价地表的变化情况,保证测绘成果的现势性。更新机制的设计可以采用分级更新的方式,对于变化频繁的区域更新频率加大,对于稳定的区域更新周期变长,从而保证成果的现势性又降低更新成本。

5 结语

三维激光扫描技术由于具有高精度、高效率、非接触采集等特点,正在彻底改变城市空间测绘的技术形态。从地形图测绘到建筑物信息提取,从三维建模到城市更新应用,它在诸多场合里体现出无法取代的价值。目前的应用中存在多源数据协同、复杂环境适应、成果动态更新这三个主要问题。伴随着SLAM技术、深度学习点云处理以及数字孪生平台的不断发展,三维激光扫描在城市空间测绘中的应用会向着越来越自动、越来越智能、越来越实时的方向发展。将未来同城市信息模型平台深度融合,变成城市精细化治理的技术支持。

[参考文献]

- [1]江雅菁.城市地上地下空间一体化三维空间建模研究[J].智能城市,2025,11(11):113-116.
 - [2]王富渊.新型三维激光扫描技术在立面测量、地形测量中的应用[J].大众标准化,2025(19):155-157.
 - [3]罗保林,王继斌,罗亮,等.背包三维激光扫描在城市大比例尺地形图测量中的应用[J].测绘通报,2024(2):187-190.
- 作者简介:袁晓艳,女,汉族,安徽省亳州人,测绘工程师,本科,毕业院校安徽大学江淮学院通信工程专业,研究方向为测绘工程。