

激光雷达测绘不仅能够直接获取地形数据，还可与其他传感数据融合，提高地理信息的完整性，为精细测绘和空间建模提供可靠的基础数据支持^[2]。

2.2 激光雷达的分类与特点

激光雷达根据工作方式、测量平台及应用领域可分为不同类型。按测量平台划分，包括机载、车载、无人机载和地面激光雷达，机载激光雷达覆盖范围广，适用于大面积地形测绘，车载激光雷达适用于城市道路与建筑环境，无人机载激光雷达机动性强，适合复杂或难以接近的区域，地面激光雷达精度高，常用于精细测绘。按探测技术划分，时间飞行法通过测量光脉冲往返时间计算距离，相干测距法利用相干光干涉提高测量精度，三角测距法利用已知基线角度解析目标坐标。激光雷达具有高精度、高分辨率、快速获取点云数据的特点，能够适应各种复杂环境，在测绘、导航、地质勘测等领域具有广泛应用价值。

2.3 激光雷达测绘的优势

激光雷达测绘具有高精度、高效率和环境适应性强的特点，能够在复杂地形中快速获取高密度三维点云数据。相比传统测绘方法，该技术不受光照条件限制，可在昼夜及不同气象条件下稳定工作。激光雷达测距精度高，可探测地表微小起伏，并利用多回波技术穿透植被，获取真实地形信息，为森林、峡谷、山区等难以测绘的区域提供数据支持。激光雷达可搭载于机载、车载、无人机及手持设备，满足不同场景下的测绘需求。系统自动化程度高，可实现实时数据采集和快速处理，提高测绘效率。点云数据精度高、信息丰富，可构建高精度数字高程模型，为工程勘测、地质灾害监测和城市规划提供精准数据支撑。

3 复杂地形测绘的技术需求

3.1 复杂地形的定义与分类

复杂地形是指具有较大高程起伏、地貌形态复杂、地物遮挡严重或地质条件不稳定的区域，测绘工作在此类环境中面临较大挑战。高山地形因坡度陡峭、地表崎岖导致传统测量方式难以实施，峡谷地形由于地势狭窄、高差显著影响测距精度和信号传输，森林覆盖区由于植被密集阻碍地面观测，沙漠及湿地地形因地表特性变化频繁增加测绘难度。地质灾害多发区域如滑坡、泥石流和塌陷区地形变化剧烈，测绘工作需要具备高精度和高时效性。复杂地形的多样性使得传统测绘手段难以全面覆盖，现代技术的发展为解决此类测绘问题提供了新的方法，提高了测绘精度和数据获取效率。

3.2 传统测绘方法的局限性

传统测绘方法主要依赖全站仪、GPS 测量和摄影测量等技术，在复杂地形环境中存在明显局限性。全站仪测绘需要布设测站，受地形起伏和视线遮挡影响较大，难以在高山、峡谷和森林中精确测量。GPS 测量依赖卫星信号，在密集植被和陡峭山谷区域易受遮挡导致定位精度降低。摄影测量

通过影像进行地形重建，但在地表反射率差异较大、光照条件不稳定的情况下，数据精度受影响，无法有效获取真实地形信息。人工测绘方式在地质灾害区域具有较大安全风险，数据采集效率低且难以满足高精度测绘需求。复杂地形对传统测绘手段提出严峻挑战，需要引入先进的测绘技术以提升数据获取能力和作业效率^[3]。

3.3 激光雷达在复杂地形测绘中的适用性

激光雷达凭借主动发射激光测距的方式，具备在复杂地形环境中稳定获取高精度数据的能力。该技术能够穿透部分植被，获取地表三维点云信息，克服传统测绘方式在森林、峡谷等区域的数据缺失问题。激光雷达测绘不受光照影响，可在昼夜不同天气条件下作业，提高测绘工作的连续性和时效性。系统可搭载机载、车载和无人机平台，灵活适应不同地形环境，实现大范围快速测绘。高精度点云数据可直接用于数字高程模型构建和地形分析，为地质灾害监测、山区基础设施规划和生态环境评估提供科学依据。激光雷达技术的广泛适用性使其成为复杂地形测绘领域的重要工具，提高了数据采集效率和精度。

4 激光雷达测绘系统与数据处理

4.1 激光雷达测绘系统组成

激光雷达测绘系统由激光扫描仪、全球导航卫星系统、惯性测量单元、数据处理模块和存储设备组成。激光扫描仪采用波长为 905nm、1550nm 或 1064nm 的脉冲激光，每秒可发射 50 万至 200 万次脉冲，实现高精度测距。全球导航卫星系统提供定位数据，常见精度在 1cm 至 5cm 之间，保证测绘结果的地理参考精度。惯性测量单元通过加速度计和陀螺仪获取传感器姿态变化，精度可达 0.01°，用于补偿动态环境中的数据偏差。数据处理模块集成点云存储、滤波和分类功能，支持数据实时处理，提高外业测绘效率。存储设备容量通常在 1TB 至 5TB，可满足长时间测绘任务需求。

4.2 数据获取与预处理

数据获取过程依赖激光雷达扫描系统，每秒可采集百万级点云数据，测距精度通常在 2cm 至 5cm 范围内，受激光波长、目标反射率和扫描角度影响。扫描过程中，系统获取目标物的三维坐标、反射强度和回波信息，为后续数据处理提供基础。预处理中需要对点云数据进行坐标转换、噪声去除和地面点提取，减少测量误差。坐标转换通过结合全球导航卫星系统和惯性测量单元数据，将点云转换至统一参考系，误差控制在 5cm 以内。噪声去除基于统计滤波和均值滤波方法，剔除异常点，提高数据质量。不同应用场景对数据预处理要求不同，地质灾害监测关注高程变化，城市测绘注重建筑物轮廓提取，森林测绘则需要保留多回波信息以分析植被结构。

4.3 三维点云数据分析与建模

三维点云数据分析主要包括分类、建模和精度评

估, 数据处理规模可达数十亿个点, 存储容量需求超过100GB。分类过程利用机器学习或规则算法区分地面、植被、建筑物和水体, 分类准确率通常在90%以上。地面分类采用地形梯度分析和高程拟合方法, 建筑物分类基于点云拓扑关系和法向量计算, 植被分类依赖多回波特征提取。建模过程中, 地形建模使用数字高程模型重建, 精度可达1m以内, 城市建模采用三角网或体素方法生成建筑物模型, 误差控制在0.5m以内。地质灾害建模结合高精度点云和形变分析, 识别滑坡、沉降区域, 数据更新周期通常小于1个月。精度评估采用参考点对比、误差统计和误分类率分析, 确保建模数据满足工程应用需求, 提高测绘成果的可靠性^[4]。

5 激光雷达在复杂地形测绘中的应用实践

5.1 高山与陡坡地区测绘

高山与陡坡地区地形起伏剧烈, 传统测绘方式受地势陡峭、视线遮挡和气象条件限制, 数据获取难度大。激光雷达采用机载或无人机载平台, 可在500m至3000m高度范围内进行扫描, 每秒发射50万至200万次激光脉冲, 获取高精度三维地形数据。陡坡区域的测量误差受地表反射率、扫描角度和大气条件影响, 点云数据精度通常在5cm至10cm范围内。激光雷达能够穿透薄云层和轻雾, 实现全天候测绘, 适用于高海拔和复杂地形环境。激光雷达测绘相比传统方法, 数据获取效率提高3倍以上, 特别适用于高风险区域作业, 减少人工测量的安全隐患, 提高测绘数据的可靠性和覆盖范围。

5.2 森林与植被覆盖区测绘

森林和植被覆盖区的测绘受树冠遮挡影响, 传统光学遥感和摄影测量难以直接获取地表数据, 导致测绘精度降低。激光雷达利用多回波技术, 能够记录树冠、树干和地面的回波信息, 实现植被层穿透, 获取高精度地形数据。机载激光雷达常采用1550nm波长激光, 每秒发射100万次脉冲, 可获取50点/m²以上的高密度点云数据。森林地区地形复杂, 坡度超过30°的区域点云稀疏度增加, 数据精度下降5%至10%。数据处理阶段采用分类算法区分植被层和地表点云, 去除植被影响后的数字高程模型精度可达0.5m以内。植被结构分析依赖多回波信息, 树高计算误差小于0.2m, 森林覆盖率评估精度超过90%。激光雷达可用于森林资源调查、生物量估算和生态环境监测, 相比传统测绘方式, 数据获取效率提高4倍以上, 并可在短时间内覆盖大面积区域, 为森

林管理和生态保护提供精确的数据支持。

5.3 地质灾害监测与评估

地质灾害区域地形变化剧烈, 传统测绘方式难以满足高频次、高精度监测需求。激光雷达技术可在滑坡、泥石流、地面塌陷等灾害区域进行周期性扫描, 通过高精度点云数据分析地形变化趋势。无人机激光雷达在50m至500m高度范围内作业, 每秒发射80万至150万次激光脉冲, 测距精度在3cm至8cm之间, 可快速获取灾害区域的三维地形数据^[5]。滑坡监测采用差分分析方法, 计算两期数据的高程变化, 高程变形误差小于5cm。泥石流监测依赖河道剖面点云分析, 堆积物体积误差小于2%。地面塌陷监测结合激光雷达和GPS数据, 形变速率计算误差在0.1mm/天以内。激光雷达可实现自动化数据处理, 提高灾害监测效率, 数据获取周期缩短至1天, 满足紧急灾害响应需求, 为地质灾害预警和风险评估提供精准数据支持。

6 结语

激光雷达技术在复杂地形测绘中的应用展现出高精度、高效率 and 广泛适应性的优势。通过主动激光测距和多回波技术, 该技术能够克服传统测绘方法在高山、森林和地质灾害区域的局限, 实现高密度点云数据获取和高精度三维建模。测绘系统结合全球导航卫星系统和惯性测量单元, 确保数据的空间参考精度, 提高测绘成果的可靠性。数据处理过程中, 点云滤波、分类和建模技术的优化进一步提升了测绘精度, 为地理信息分析提供高质量数据支撑。激光雷达测绘在地形监测、生态评估和工程规划中的应用日益广泛, 推动了测绘技术的发展。随着传感器性能提升和数据处理智能化发展, 该技术将在更复杂环境中发挥作用, 为地形测绘、地质灾害防治和生态环境保护提供精准可靠的技术支持。

参考文献

- [1] 于子博. 基于激光雷达的无人机自适应降落系统设计[D]. 导师: 刘振宇. 沈阳工业大学, 2024.
- [2] 张逸飞. 基于点云统计特征的复杂地形机器人导航系统[D]. 导师: 王世元. 西南大学, 2024.
- [3] 宋凌寒. 南方复杂地形下马尾松林冠层三维结构提取机制研究[D]. 导师: 王帆. 福建农林大学, 2024.
- [4] 左亚龙. 无人机在复杂带状地形测量中的应用[J]. 长江信息通信, 2024, 37(02): 126-128.
- [5] 张俊元, 牛天伟, 王亮, 王帅, 王光德. 基于复杂地形车速自适应控制技术探讨[J]. 物探装备, 2023, 33(05): 314-317.

Research on the high-precision mapping technology of tilt photography and lidar fusion

Youqing Feng Zhiyong Deng

Architectural Design Institute, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621000, China

Abstract

The high-precision mapping technology integrating tilt photography and lidar has been widely applied value in the fields of surveying and mapping, urban planning and geographic information system. Tilt photography provides rich texture information and multi-perspective images, while lidar has the ability of high-precision three-dimensional data acquisition. The fusion of the two effectively makes up for the limitations of a single technology. In this paper, we study the fusion principle of tilt photography and lidar data, discuss the key technologies of data registration, spatial consistency guarantee, multi-source data fusion, and analyze the methods of data quality control and accuracy evaluation. On this basis, the core technologies, such as joint solution of image and point cloud, application of deep learning in data fusion, and optimization of automatic mapping process, are studied to improve the efficiency and accuracy of mapping. The results show that a reasonable data processing strategy and fusion algorithm can significantly improve the mapping accuracy and efficiency, and provide reliable technical support for high-precision mapping.

Keywords

tilt photography; lidar; data fusion; high precision mapping; 3 D reconstruction

倾斜摄影与激光雷达融合的高精度测图技术研究

冯游清 邓智勇

中国工程物理研究院建筑设计院, 中国 · 四川 绵阳 621000

摘 要

倾斜摄影与激光雷达融合的高精度测图技术在测绘、城市规划与地理信息系统等领域具有广泛应用价值。倾斜摄影提供丰富的纹理信息与多视角影像,而激光雷达具备高精度三维数据采集能力,两者的融合有效弥补了单一技术的局限性。本文研究了倾斜摄影与激光雷达数据的融合原理,探讨了数据配准、空间一致性保障、多源数据融合等关键技术,分析了数据质量控制与精度评估方法。在此基础上,研究了影像与点云的联合解算、深度学习在数据融合中的应用、自动化测图流程优化等核心技术,提升测图效率与精度。研究结果表明,合理的数据处理策略与融合算法可显著提升测绘精度与效率,为高精度测图提供可靠技术支撑。

关键词

倾斜摄影; 激光雷达; 数据融合; 高精度测图; 三维重建

1 引言

随着测绘技术的发展,高精度测图在城市管理、基础设施建设、地理信息系统等领域的需求日益增长。传统测绘方法受限于单一数据源,难以在精度、效率与适用性之间取得平衡。倾斜摄影技术可获取不同视角的高分辨率影像,为三维建模提供丰富的纹理信息,但在高精度测图中易受遮挡和影像畸变的影响。激光雷达技术通过主动发射激光脉冲获取高精度点云数据,适用于复杂环境下的精确测绘,但在纹理表达方面存在不足。因此,倾斜摄影与激光雷达的融合成为当前高精度测图技术的重要发展方向。本文围绕两者的融

合原理、数据处理方法及关键技术展开研究,并探讨核心技术的发展,为测绘行业提供技术支持。

2 倾斜摄影与激光雷达的融合原理

2.1 倾斜摄影数据获取与处理

倾斜摄影通过多镜头相机或单镜头多角度拍摄的方式获取地物的多视角影像数据,确保目标区域的完整覆盖。航摄过程中,相机按照预设航线与重叠率进行连续拍摄,生成不同角度的影像,进而提高影像冗余度和三维信息获取能力。影像数据经过预处理,包括辐射校正、几何校正和影像拼接,以保证影像的一致性与几何精度。基于光束法平差技术进行空三解算,求取相机外方位元素和三维地面点坐标,提高影像的定位精度。结合深度学习与特征匹配算法,提取影像特征点,实现高精度影像配准。基于稀疏点云构建数字

【作者简介】冯游清(1991-),男,中国四川成都人,本科,工程师,从事测绘研究。