

LAS 点云数据在地形测绘中的处理与精度控制研究

文 / 胡其红 甘肃省地图院

摘要: 随着地形测绘技术的进步, LAS点云数据因其高精度和高效率的特性被广泛应用于地形测量领域。本研究致力于探索LAS点云数据在地形测绘中的处理与精度控制方法。通过分析LAS数据的基本特性, 结合实际测绘工程需求, 开发了一系列数据预处理、精度评估与优化算法。此外, 本研究还通过具体的工程案例, 验证了方法的实用性和有效性, 为地形测绘领域提供了有力的技术支持和实践指导。

关键词: LAS点云数据; 地形测绘; 数据处理; 精度控制; 测绘工程

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.03.117

引言

地形测绘作为获取地球表面形态信息的重要手段, 对城市规划、灾害管理及环境监测等多个领域至关重要。在众多地形测绘技术中, 激光扫描测量技术以其高效和高精度的特点, 特别是在采用LAS格式的 point cloud 数据后, 极大地推动了地形数据获取的精确度与处理速度。然而, 尽管点云数据带来了测绘作业的便利, 其数据处理和精度控制仍面临一定的挑战。精确的数据预处理、准确的精度评估以及高效的算法优化是提高测绘成果质量的关键。随着计算技术的发展, 开发适用于LAS点云数据的高效处理方法, 对于满足现代测绘高标准精确性和效率要求显得尤为重要。本文深入研究了点云数据的处理与精度控制技术, 旨在为地形测绘提供一套优化的解决方案, 以支持更广泛的实际应用需求。

一、点云数据采集技术

(一) LAS 点云数据的基本特性

1. 数据格式和结构解析

LAS格式是一种标准的文件格式, 用于存储三维点云数据, 主要应用于激光遥感测量和地形测绘。每个点在LAS文件中不仅记录了其X、Y、Z坐标, 表示地理位置和高程, 还包括反射强度、颜色、和分类信息等多种属性。这些属性的详细记录使LAS数据在地形分析、对象识别和分类中具有非常高的应用价值。

LAS文件结构具有高度标准化的特点, 通常包括公共头部、可变长记录(VLR)以及实际的点云数据记录。公共头部描述了点云数据的基本信息, 如文件源、版本、系统标识符、预留空间、时间戳、数据量以及点云的格式和尺寸。可变长记录则提供了扩展属性, 如波形数据包、额外的投影数据或其他任何自定义的额外信息。实际的点云数据则是按照头部文件中声明的格式和尺寸结构化存储的^[1]。

2. 数据采集设备与技术

激光扫描仪是采集LAS点云数据的核心设备, 其工作原理基于激光距离测量技术。通过发射激光脉冲并接收其从目标反射回来的激光, 设备能够计算出激光脉冲的飞行时间, 从而推算出距离。现代激光扫描仪配备有高速、高精度的扫描能力, 能够在短时间内产生大量高精度的三维空间点, 极大地提高了地形测绘的效率和

精度。

激光扫描仪的类型多样, 包括地面静态激光扫描仪、车载激光扫描仪、无人机搭载的激光扫描仪和航空激光扫描仪等。不同类型的扫描仪在应用场景、数据精度和采集效率上有所不同。例如, 地面静态激光扫描仪适用于需高精度测量的小范围区域, 而航空激光扫描仪则适合进行大范围的地形测绘。这些设备通常还配备有高精度的GPS系统和惯性测量单元(IMU), 以实现数据的精确地理定位和校正。

(二) 数据采集的精度要求

在地形测绘领域, 精度是衡量数据质量的关键指标之一。LAS点云数据的精度直接影响最终测绘成果的可用性和可靠性。设置合理的精度标准是确保数据满足后续应用需求的前提。

数据精度主要包括两个方面: 一是几何精度, 指的是点云数据中点的位置精确度; 二是属性精度, 包括点的反射强度、颜色和其他附加信息的准确性。几何精度通常通过点的坐标误差来评估, 这个误差是由点云中每个点的实际位置与其理论位置之间的偏差决定的。对于地形测绘来说, 几何精度是最重要的, 一般要求误差在几厘米到几十厘米范围内, 具体标准依赖于项目的具体需求和应用场景。

点云数据采集的精度受多种因素的影响, 主要包括以下几点, 一是设备因素, 激光扫描仪的类型和性能是决定数据精度的关键。高质量的扫描仪能提供更高的测量精度和分辨率。设备的光学系统质量、激光的波长、脉冲频率、接收器的灵敏度等都直接影响数据的质量。二是环境因素, 测绘环境对数据精度也有重大影响。例如, 气候条件(如雨、雾等)可以影响激光的传播, 减少激光反射强度, 从而影响精度。此外, 测量环境中的光线条件和被测面的材质、颜色、角度等也会影响激光的反射率和散射, 进而影响精度^[2]。三是操作因素, 操作人员的专业技能和操作方法同样关键。正确的扫描角度、扫描距离和数据采集策略可以最大限度地减少误差。此外, 对设备的校准和维护也是保证数据精度的重要环节。四是数据处理技术, 数据预处理包括去噪声、数据滤波和配准等, 处理的效果会对数据精度产生影响。使用先进的数据处理算法可以有效提高精度, 但算

法本身的选择和参数设置也需要精确控制。五是地理定位系统，对于移动激光扫描系统，如车载或航空激光扫描系统，其配备的GPS和惯性测量单元（IMU）的精度也至关重要。这些系统提供的地理定位和姿态数据直接影响最终点云数据的准确性。

二、地形测绘中的LAS点云数据处理

（一）数据清洗与噪声移除

在点云数据处理的初级阶段，数据清洗和噪声移除是关键步骤，它们直接影响后续分析和模型构建的质量和效率。噪声和异常点通常来源于测量误差、环境干扰或设备本身的性能限制，这些因素都需要通过有效的技术手段加以解决。

在进行噪声移除之前，首先需要识别出数据中的噪声点和异常点。噪声点通常表现为与周围点显著不同的孤立数据点，而异常点则可能是由于反射错误、遮挡或其他外部因素造成的非典型数据。通过统计分析方法，如局部密度估计和离群值检测，可以有效地识别这些异常数据。例如，可以计算每个点与其邻近点的距离，通过设置阈值来判断是否为噪声或异常点。

一种常用的噪声移除方法是统计分析滤波，如高斯统计滤波器。该方法利用点云数据的局部统计信息，通过计算每个点周围邻域内点的平均值和标准差，移除那些偏离平均位置超过几个标准差的点。这种方法适用于去除随机噪声，特别是在点云密度较高的区域效果较好。

形态学滤波是另一种有效的噪声移除技术，特别适合处理点云数据中的结构噪声。这种方法通过构建点云数据的形态学模型，如使用膨胀和腐蚀操作来处理数据，从而平滑点云并去除孤立的噪声点。形态学滤波特别适用于去除物体边缘或表面的小规模噪声^[3]。

在某些复杂的应用场景中，如多次扫描数据的整合过程中，可以使用迭代最近点（ICP）算法进行数据校正和噪声移除。ICP算法通过迭代比较和调整多个数据集中相对应点的位置，最终达到高度一致的数据集成，同时减少由扫描视角变化等因素引入的误差和噪声。

（二）数据分类与特征提取

在地形测绘中，区分地面点和非地面点是数据处理的初步且至关重要的步骤。地面点是指那些直接与地球表面接触的点，而非地面点则包括建筑物、植被、车辆等障碍物上的点。有效的区分方法是使用数字地面模型（Digital Elevation Model, DEM），该模型能够帮助分析和解释地面和非地面点。

一种常见的技术是基于高度差的滤波算法，通过设置一个阈值来判断点云中每一个点的高度是否超过预设的地面高度。此外，更复杂的机器学习算法，如随机森林和支持向量机，也被用于分类，这些方法可以通过训练数据学习地面和非地面点的特征，以提高分类的准确性。

特征点识别是点云数据处理中的另一个关键环节，它涉及从大量数据中识别出具有代表性或关键信息的

点。这些特征点对于后续的数据匹配、目标识别和场景重建等都是基础。常用的特征点识别算法包括主成分分析（PCA），该算法通过数据的主方向来判断点云的分布特性，从而识别出结构性特征点。此外，基于局部表面特征的识别方法，如法线向量分析和曲率计算，也常被用来提取更加复杂的地形特征。

（三）三维重建与模型精化

数字地面模型（DEM）是通过地面点来构建的，它是一个连续的地表高度值网格，用于表示真实地形的高度信息。DEM的构建通常开始于地面点的选取，随后利用插值方法如克里金或反距离加权等，将这些点云数据转化为一个平滑的高度场。DEM不仅对测绘有重要用途，也是水文模型、土地使用规划和灾害管理等领域的基础数据。

与DEM相对应，数字表面模型（DSM）包括了地表上所有物体的高度，例如建筑物和树木等。而DTM通常指的是除去非地面物体后的纯地形高度模型。在实际应用中，DSM和DTM的比较分析对于理解地形和城市空间关系至关重要。通过对比DSM和DTM，可以更精确地获取地表覆盖情况和地形变化，如建筑物高度分析和植被分布调查。

在地形测绘项目中，精确的数据分类、特征提取以及三维模型的构建和精化是保证最终输出数据质量的关键。这些过程需要综合考虑技术选择、算法优化和实际应用需求，以实现高效和准确的地形数据处理^[4]。

三、精度控制与优化方法

（一）精度评估标准与方法

在地形测绘中，精度评估是确保数据可靠性和有效性的关键步骤。评估测绘精度涉及使用一系列标准和工具来量化数据的准确性和一致性。

精度评估通常基于以下几个标准：一是均方根误差（RMSE），这是评估点云数据准确性的常用指标，用于计算点云数据与参考数据之间的平均误差平方的平方根。RMSE越低，表示测量结果与真实值的偏差越小，精度越高。二是绝对精度和相对精度，绝对精度指的是点云数据与地面实际坐标之间的误差，而相对精度则关注数据集内部点与点之间的相对位置精度。三是完整性和一致性，完整性衡量的是数据覆盖范围的全面性，一致性则评价数据集之间的匹配程度和一致性。

为了实现这些评估，可以使用各种软件和工具，主要有以下几种，一是地理信息系统（GIS）软件，如ArcGIS和QGIS，它们提供了强大的工具来分析和比较地理数据，从而评估精度。二是专用测绘软件：如Leica Geosystems和Trimble Business Center，这些软件提供了专业的工具集来进行精度分析和报告。三是自定义脚本和算法，使用Python或MATLAB等编程语言开发的脚本和程序，可以自定义精度评估流程，适应特定的数据处理需求。

（二）算法优化

在地形测绘的数据处理过程中，算法优化是提高精

度的关键环节。通过优化滤波和数据融合算法，可以有效增强数据的处理精度。

滤波算法可以用于去除点云数据中的噪声和异常值，增强数据的准确性和可靠性。常用的滤波算法包括：高斯滤波，这是一种基于统计的滤波方法，通过对邻近点的属性进行加权平均，其中权重由高斯函数确定，有效去除随机噪声^[5]。中值滤波，适用于去除椒盐噪声，通过替换每个点的值为其邻域内的中值，可以有效消除孤立的异常点。边缘保持滤波，如双边滤波，这种算法在去除噪声的同时保持边缘特征，适用于复杂地形的处理。

数据融合算法通过整合来自不同源的数据，增强数据的完整性和多维度信息。常见的数据融合技术包括：多视角融合，结合来自不同视角的测量数据，提高覆盖率和减少遮挡区域，特别是在城市和复杂地形中非常有效。传感器融合，结合如雷达、红外和可见光数据，提供更丰富的环境信息，增强数据的可解释性和应用价值。时间序列分析，对于连续或周期性的测绘任务，通过融合时间序列数据，可以分析和预测地形变化，提供动态监测的能力。

四、实证分析

（一）案例背景

该案例设计一个大型基础设施建设项目。该项目位于多变地形的山区，包括陡峭的斜坡和不规则的山谷。传统的测绘技术在此地形下面临许多挑战，尤其是在达到高精度和高数据完整性的要求上。项目对地形数据的精度有严格要求，包括均方根误差（RMSE）不超过5厘米，绝对精度至少达到10厘米，相对精度应在5厘米以内。此外，数据的完整性和一致性是进行准确工程规划不可或缺的。

（二）问题与挑战

在项目开始时，项目方采用了传统的航空摄影和地面测量技术，但在复杂地形条件下，这些方法未能满足精度要求，尤其是在高度变化较大的区域。由于地形的复杂性，存在数据收集不全和测量点间距过大导致的数据不连续问题。

（三）LAS 点云数据的采用与精度优化

为了解决这些问题，项目组决定采用搭载激光扫描仪的无人机进行LAS点云数据采集。这种方法可以在短时间内覆盖大面积且提供高密度、高精度的地形数据。数据处理和精度控制流程如下：一是使用无人机搭载高精度激光扫描仪在指定飞行高度和路径上进行数据采集，确保数据的高覆盖率和重复性^[6]。二是对收集到的原始点云数据进行噪声滤除和异常值去除，确保数据质量。三是进行精度控制与优化，利用地面控制点进行精度校准，提高绝对位置精度。

应用多种滤波算法（如高度滤波和密度滤波）对数据进行细分，优化地面点与非地面点的分类精度。通过

三维重建技术，构建高精度的数字地面模型（DEM），进一步精化地形模型。

（四）测量结果分析

采用了新的测量方法后，项目组对测量精度进行了评估，主要采用了以下方法：一是使用ArcGIS进行空间分析，比较DEM和已知的地理标志点，以验证精度。二是使用Trimble Business Center软件分析点云数据的精度，生成详细的精度报告。三是开发了Python脚本，进行数据的批量处理和自动化精度检验，特别是在均方根误差（RMSE）和数据一致性方面。具体的结果如表1所示：

表1 使用LAS点云数据后地形测绘的精度提升效果

评估指标	传统方法	LAS点云数据方法
均方根误差（RMSE）	10cm	3cm
绝对精度	15cm	8cm
相对精度	10cm	4cm
数据完整性	80%	98%

由表中数据可以看出，引入LAS点云技术，明显提高了数据的精度和完整性。均方根误差（RMSE）显著减少，说明测量更为准确；绝对精度和相对精度的提升，为工程设计和施工提供了可靠的数据支持；数据完整性的提高，确保了在复杂地形下也能进行有效的地形分析和决策。这一案例表明，通过合适的技术选择和精度控制策略，即使在地形复杂和访问困难的区域，LAS点云数据也能显著提高地形测绘的质量和效率。

结语

研究探讨了LAS点云数据在地形测绘中的处理与精度控制方法，展示了其在现代测绘技术中的核心价值与应用潜力。本文不仅通过案例分析验证了所提方法的有效性，而且为未来地形测绘技术的发展提供了创新思路。未来的工作可以进一步探索LAS点云数据与其他地理信息系统技术的集成应用，以提高数据处理效率和测绘精度，为复杂地形的地理信息采集提供更为全面和深入的技术支持。

参考文献

- [1] 李佳恩. 基于TLS点云数据的建筑物提取研究[D]. 吉林建筑大学, 2023.
- [2] 陈进启. 基于机载LiDAR点云数据的地形特征提取[D]. 桂林理工大学, 2023.
- [3] 董倩茹. LiDAR-DP软件对点云数据自动分类结果分析[J]. 北京测绘, 2022, 36(08): 1030-1035.
- [4] 徐旺. 机载LiDAR点云数据滤波算法研究[D]. 东华理工大学, 2022.
- [5] 唐上. LiDAR点云数据滤波与配准方法研究[D]. 中国石油大学(华东), 2021.
- [6] 尚大帅. 机载LiDAR点云数据滤波与分类技术研究[D]. 解放军信息工程大学, 2012.