

船载 LiDAR 在水库测绘中的应用研究

顾健 曹锡军 顾伟

南通市江海测绘院有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i2.7734

[摘要] 由于地形的要求, 水库周边具有地貌复杂、地形破碎、植被覆盖茂密等特点。针对陆上地形测绘采用人工走测方式难度大、效率低、风险大; 采用航空摄影测量空域申请手续程序多、周期长、禁飞区多、受风力影响航飞风险大等问题, 提出利用船载 LiDAR 获取水库陆上地形空间三维信息的方法。本文根据实验区检验点分析了船载 LiDAR 点云的精度。定性结果表明: 船载 LiDAR 具有作业效率高、非接触等优点, 适用于陡岸水库地形测绘。定量结果表明: 高程较差中误差为 0.211m, 点云精度满足大比例尺地形图测量规范要求。

[关键词] 陡岸水库; 船载 LiDAR; 陆上地形; 点云; 中误差

Study on the application of shipborne LiDAR in reservoir mapping

Gu Jian Cao Xijun Gu Wei

Nantong Jianghai Surveying and Mapping Institute Co., LTD.

[Abstract] Due to the requirements of terrain, the surrounding reservoir has the characteristics of complex landform, broken terrain and dense vegetation cover. In view of the difficulty, low efficiency, high risk, many application procedures, long cycle, no-fly zone, and high risk of wind influence, the method is proposed to obtain the 3 D information of the reservoir by LiDAR. This paper analyzes the accuracy of the ship LiDAR point cloud according to the inspection points in the experimental area. The qualitative results show that LiDAR has the advantages of high operation efficiency and non-contact, which is suitable for topographic mapping of steep bank reservoir. The quantitative results show that the error in the poor elevation is 0.211m, and the point cloud accuracy meets the requirements of the large scale topographic map measurement specification.

[Key words] steep bank reservoir; LiDAR; onshore terrain; point cloud; medium error

1 引言

LiDAR (激光雷达) 技术是一种高精度的测绘技术, 通过发射激光脉冲, 测量激光脉冲返回的时间来获取地表的高程信息。船载 LiDAR 技术在水库测绘中具有很大的应用潜力, 该技术能够实现水库及周边地区的高精度地形测量, 包括水库水面高程、堤坝高程、周边地形等, 为水库工程设计和规划提供精确的地形数据。船载 LiDAR 技术可以实现对水库及周边地区的快速测量, 大大提高了测绘效率, 节省了时间和人力成本。船载 LiDAR 技术可以获取水库及周边地区的多维数据, 包括地形、植被、建筑物等信息, 为水库管理和规划提供全面的数据支持。船载 LiDAR 技术获取的数据可以通过三维可视化技术展示, 直观呈现水库及周边地区的地形特征, 为水库管理者和决策者提供直观的信息。总之, 船载 LiDAR 技术在水库测绘中具有很大的应用潜力, 可以提高水库管理和规划的效率和精度, 为水资源的合理利用和管理提供重要的技术支持。21 世纪初,

美国等西方国家以测船为载体, 通过集成三维激光扫描技术、高精度动态定位定姿技术和计算机技术为一体, 开展船载 LiDAR (Light Detection and Ranging) 系统论证研究^[1]。经过长期发展, 船载 LiDAR 技术趋于成熟, 国内外各大高校、公司都推出了多款实用型船载 LiDAR 系统。2010 年, 美国 Geosolutions iLinks 公司推出 PMLS-1 便携式激光雷达系统; 2012 年, 中国中海达公司推出 HiScan 船载三维激光移动测量系统; 2018 年, 中国华测公司推出 HA-200 船载三维激光雷达系统。因其具有精度高、自动化程度高和较强的植被穿透性以及非接触测量方式等特点, 被广泛应用于海岸线测绘^[2]、崩岸监测^[4]、岛礁测绘、湖泊测量等领域。

本文试验区域是一大型水库群, 位于高山峡谷地区, 气候条件恶劣, 地形地貌复杂、植被覆盖茂密。高陡边坡陆上地形测量, 采用全站仪、RTK 作业效率低、周期长、成本高、风险源多。航空摄影测量空域申请手续程序多、周期长、禁飞区多、

受风力影响，航飞风险大。因此，本文基于船载 LiDAR 技术开展陡岸水库陆上地形测绘应用研究，并采用传统测绘方法验证该技术的绝对精度，平面与高程中误差均符合相关规范的要求。文中试验结果可为数字孪生流域数据采集提供技术参考。

2. 船载 LiDAR 技术及地面点过滤

2.1 船载 LiDAR 系统原理

船载 LiDAR 技术以测船为移动载体，主要由三维激光扫描仪、GPS/IMU 组合导航单元、CCD 相机等组件构成，如图 1 所示。在测船航行过程中，时间同步控制器协同各组件获取河道陆上地形空间三维信息。三维激光扫描仪发射并接受激光束，记录点云的相对坐标；GPS/IMU 组合导航单位定位 POS 中心大地坐标，继而解算点云的绝对坐标；CCD 相机获取陆上地形纹理信息，图像融合形成真彩色点云。与机载雷达不同，船载 LiDAR 姿态矫正与控制较为复杂。其精度容易受到海浪影像较多，需要增加垂直方向上的补偿。船载 LiDAR 的扫描方式多为双轴扫描，以及水平与垂直两个方向同时进行扫描工作。

2.2 点云滤波处理

(1) 渐进加密三角网滤波算法

船载 LiDAR 点云场景中包含丰富且复杂的非地面点属性物，如植被、桥梁、河堤、泊船、房屋等。生成数字高程模型 (DEM) 前，应通过点云滤波算法剔除非地面点。2000 年 Axelsson 提出渐进加密三角网滤波算法得到广泛使用，并被集成到了 TerraSolid、绿土 360 等商用软件。该算法主要思想是将整个点云数据划分成 n_{Row} 行、 n_{Column} 列格网区块，如下式

$$n_{Row} = \text{ceil}\left(\frac{h}{m}\right) \text{ and } n_{Column} = \text{ceil}\left(\frac{w}{m}\right) \quad (1)$$

式中， m 是最大建筑物尺寸； h 是点云长度； w 是点云密度。

将每一个区块的高程最低点作为种子点，以种子点建立初始三角网 TIN，该初始三角网 TIN 代表点云数据的概略地面点，通过对潜在点 P_p 和镜像点 P_m 逐点判定，依次迭代加密，过滤出地面点和非地面点。

(2) Ostu 滤波算法

船载 LiDAR 激光扫描点云包含沿路建筑物点、城市部件点、行道树点、灌木丛点以及地面点等。海量的点云数据影响后续算法处理效率，相较于地面点，其他地物点的高程明显更高，因此可通过设置高程阈值的方式将非地面点滤除。对于不同水库周长里程，选择适合该段水库大坝点云的高程阈值尤为重要。

本文引入 Otsu 算法计算不同水库大坝长度的高程分割阈值，保留低于高程分割阈值的点，将高于分割阈值的点剔除。该算法的具体实现步骤为：

1) 输入数据量为 N 的点云数据，获取场景中点的最大高程值 H_{max} 与最小高程值 H_{min} ，根据高程最大值与最小值将高程分为 L 个等级，那么每个等级出现概率为：

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

式 (1) 中， n_i 表示每个等级中点云的个数。

2) 根据高程阈值 k 将原始点云分为两个部分，各部分出现概率为：

$$\begin{cases} \omega_0 = P(C_0) = \sum_{i=1}^k p_i = w(k) \\ \omega_1 = P(C_1) = \sum_{i=1}^k p_i = 1 - w(k) \end{cases} \quad (3)$$

式 (2) 中， C_0 为高于高程阈值的部分； C_1 为低于高程阈值的部分。

高程平均值为：

$$\begin{cases} \mu_0 = \sum_{i=1}^k iP(i/C_0) = \sum_{i=1}^k \frac{ip_i}{\omega_0} = \frac{\mu(k)}{w(k)} \\ \mu_1 = \sum_{i=k+1}^L iP(i/C_1) = \sum_{i=1}^k \frac{ip_i}{\omega_1} = \frac{\mu_T - \mu(k)}{1 - w(k)} \end{cases} \quad (4)$$

式 (3) 中， μ^T 为点云总体平均高程。

3) 计算地面点与非地面点间的高程类间方差：

$$g = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (5)$$

4) 重复上述步骤，将最大类间方差对应阈值 T 为最优分割阈值，保留高程小于 T 的点，剔除高程大于 T 的点。



图 1 船载 LiDAR 系统

Fig 1 Shipborne LiDAR System



图 2 船载 LiDAR 试验区

Fig 2 Shipborne LiDAR Test Area

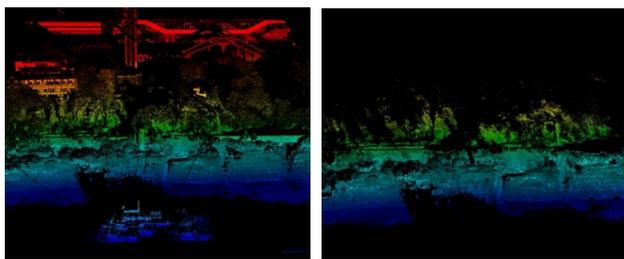
3 试验与分析

3.1 试验区概况

为验证船载 LiDAR 系统的可靠性与适用性，选择某一水库

测绘项目为试验。展开船载 LiDAR 在水库测绘中的应用研究。实验区位于某河流上游，属于典型的陡岸山区地貌，地形复杂破碎，人工走测难度大；区域内建筑物林立、植被覆盖茂密，通航条件较差；大部分河道位于禁飞区内，能有效验证船载 LiDAR 技术在复杂环境下的适用性和点云数据的精度。选择一风力较小，天气晴朗，能见度较高的时间。搭载该 LiDAR 设备的船只为 applanix 船。

本次试验共采集水库周长 5.6 km 的陆上地形点云数据，为保证数据的详细与准确，仪器设置的采样密度、重叠度均符合规范要求。船载 LiDAR 点云，如图 3 所示。由图中可知，植被、滩涂、加固堤坝、建筑物等地物被成功扫描；滤波后，非地面点被有效滤除，部分误过滤、欠过滤区域进行手动交互保留地面点，可用于生产高精度 DEM、DLG、断面图等数字产品。



(a) 滤波前点云 (b) 滤波后点云
(a)Point cloud before filtering (b)Point cloud after filtering

图 3 船载 LiDAR 点云展示 (按高程渲染)

Fig 3 Shipborne LiDAR point cloud display (rendered by elevation)

3.2. 精度分析

为了验证船载 LiDAR 点云的高程精度，本文使用 RTK 在测区采集检验点，并以检验点为中心提取邻近点云的高程进行精度分析，高程中误差如下式：

$$H_{RMS} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{2n}} \quad (2)$$

式中， H_{RMS} 为高程中误差； \hat{H}_i 为第 i 个检查点的高程； H_i 为第 i 个邻近点云的高程； n 为检验点总数。

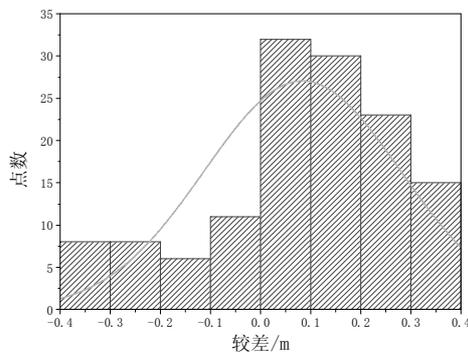


图 4 检验点与临近点云高程较差分布图

Fig 4 Distribution map of elevation difference between inspection points and adjacent point clouds

检验点与邻近点云高程较差分布图，如图 4 所示。由图 4 可知试验区的检验点与邻近点云高程较差分布均呈高斯分布，高程较差分布为 $-0.3 \sim 0.3m$ 和 $-0.4 \sim 0.4m$ ，均值 μ 都趋近 0。验证结果表明：船载 LiDAR 技术具有鲁棒性，测量误差整体稳定。

检验点与邻近点云高程较差中误差统计表，如表 1 所示。由表 1 可知，试验区点云高程较差中误差为 0.211m。根据中华人民共和国水利行业标准《水利水电工程测量规范 (SL197-2013)》中规定，1: 500~1: 10, 000 比例尺地形图 (山地、高山地) 的高程注记点允许中误差是 $\pm 1/3h$ (h 为基本等高距, m)，最高标准 1: 500 比例尺地形图的高程注记点允许中误差是 $\pm 0.33m$ 。

表格 1 检验点与邻近点云高程较差中误差统计表

Tab 1 Statistical Table of Mean Square Error of Elevation Difference between Inspection Points and Adjacent Point Clouds

地区	检验点 (个)	中误差 (m)
试验区	130	0.211

4. 结论

本文针对陡岸水库地形复杂、风险源多、植被茂密、通航条件差、禁飞区多、无人机无法起降等问题，基于船载 LiDAR 技术开展了陡岸水库陆上地形测绘应用研究，得到结论如下：

- 1) 船载 LiDAR 具有自动化程度高、测量精度高等优点，较同等人工走测作业，作业效率显著提高 400%以上。
- 2) 三维激光扫描技术属于非接触主动遥感技术，能有效降低野外作业风险，适用于陡岸水库陆上地形测绘。
- 3) 两份实验区，高程较差中误差分别为 0.145m 和 0.211m，取得了较高的精度，点云精度满足大比例尺地形图测量规范要求。
- 4) 船载 LiDAR 点云成果表达丰富，可用于制作 DEM、DLG、断面图等三维可视化数字产品，能有效为数字孪生流域建设提供数据支撑。

[参考文献]

[1]白斌.机载 LiDAR 在大比例尺地形图测绘中的应用分析[J].测绘与空间地理信息, 2024, 47 (04) : 186-188+192.
 [2]柴香, 杨文锋, 章彭, 等.机载 LiDAR 与船载单波束协同的水上水下一体化测绘模型融合实现[J].吉林水利, 2024 (02) : 31-36.
 [3]王博.船载测量手段结合无人机载 LiDAR 技术在长江口水道地形测量中的联合应用[D].江苏海洋大学, 2023.
 [4]刘津泽, 李雪杉.船载 LiDAR 技术在海岛礁测绘中的应用[J].测绘与空间地理信息, 2021, 44 (S1) : 231-232+236.
 [5]李贤标.船载移动测量在水库地形测绘中的应用探析[J].珠江水运, 2020 (12) : 61-62.
 [6]姜怀刚, 于英, 务宇宽, 等.LiDAR 技术用于我国海岸线测量的优势对比分析[J].海洋测绘, 2020, 40 (02) : 41-46.
 [7]曹岳飞, 高航.船载移动测量在水库地形测绘中的应用探析[J].测绘与空间地理信息, 2018, 41 (03) : 57-60+64.