doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.01.027

# 机载LiDAR在林地面积调查中的工程应用

李轶波[1]，李文山[1]
（1. 山西华冶勘测工程技术有限公司，山西 太原 030000）

**摘　要：**针对传统林地测量方式困难、计算面积结果不准确的问题，采用机载LiDAR系统进行林地面积计算。首先通过外业数据采集、内业数据解算、点云去噪和分离地面点等步骤，得到林地范围的点云；然后通过高程判断，获取林地范围的边界；最后将几何计算得到林地面积与实地调查计算得到的面积进行偏差对比，从而验证该方案的可行性与准确性。实验结果表明，大部分区块的点云测量面积大于人工测量，说明机载LiDAR技术在林地面积调查方面具有较大优势，为复杂地形测量提供了较高效的新型测绘技术方法。

**关键词：**机载LiDAR；林地面积；点云；工程应用；技术流程
**中图分类号：**P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）01-0131-04

## Engineering Application of Airborne LiDAR in Forest Area Survey

LI Yibo[1], LI Wenshan[1]
(1. Shanxi Huaye Survey Engineering Technology Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulties of traditional forest measurement methods and inaccurate calculation results, we adopted the airborne LiDAR system to calculate the forest area. Firstly, through the steps of field data collection, internal data calculation, point cloud denoising and post-processing of separating ground points, we obtained the point cloud of forest range. Then, we obtained the boundary of forest range by the elevation judgment. Finally, we compared the forest area obtained by geometric calculation and field investigation to verify the feasibility and accuracy of the scheme. The experimental results show that the point cloud measurement area in most blocks is larger than the manual measurement, indicating that the airborne LiDAR technology has great advantages in forest area survey, which can provide a more efficient new surveying and mapping technology method in complex terrain measurement.

**Key words:** airborne LiDAR, forest area, point cloud, engineering application, technical process

土地资源是重要的生产资料，是人们赖以生存和发展的基础，土地利用现状和变化，不仅影响社会经济的持续发展，而且还间接影响环境的变化[1-2]。因此，人们迫切期望能快速、客观、准确地监测土地利用现状，并及时掌握变化信息，以实现土地资源的科学管理[3]。由于地形、气候和交通的影响和限制，传统生态调查是非常艰辛的工作，不仅采集数据困难、获取的结构化信息十分有限，而且测量结果受人为主观因素的影响较大。

对于林地面积调查，以往采用的是人工测量与遥感卫星影像的方式。人工测量方式需耗费大量人力和时间成本，存在效率低、精度低和更新周期冗长等问题；采用遥感卫星影像计算林地面积的方式虽然节省了人力和时间成本，但普通卫星影像的分辨率较低，实时性相对落后，一般单位获取高分辨率卫星影像较困难。三维激光扫描和无人机技术的出现，给林业测量工作提供了新的技术方法。机载激光雷达（LiDAR）技术可在短时间内获取大范围的地形与地表数据，大大降低了野外测量的工作量，极大地提高了数据获取效率和精度以及林业资源调查的效率和准确度[4-5]，特别是在人员难以到达的地区。利用获取的高精度点云数据，可分析林木覆盖面积变化情况，林木类型、分布情况和生长阶段概况等[6]。本文利用LiDAR系统获取某区域的点云数据来调查该区域的林地面积以及分布情况。

## 1　机载LiDAR系统

机载LiDAR系统以无人机为平台，传感器包括激光扫描仪（LS）、全球导航卫星系统（GNSS）和惯性测量单元（IMU）等。LS安装在无人机的下端，用于向地面发射激光脉冲，并采集从发出到返回所用的时间、反射强度和扫描角度等信息[7-8]。通过GNSS测得

收稿日期：2021-11-19。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41201193）。

的平台坐标和IMU获得的无人机姿态信息，计算得到激光达到的地面与激光发出点的距离。GNSS和IMU用于确定无人机飞行时的位置和姿态，从而定义了距离测量值的原点，经过坐标变换，可精确获得激光到达物体表面的三维坐标信息。

机载LiDAR系统搭载的LS具有多次回波特性，激光脉冲在穿越植被空隙时，可返回树冠、树枝、地面等多个回波数据，具有更强的穿透性[9]；同时，系统获取的点云数据可达约10 cm的精度，数据精度较高；无人机载体相对于车辆载体，其作业更加灵活，通达性更好，能在车载不易采集和无法采集区域获取点云数据，在林业精准调查、电力线巡检和海岸带检测等方面具有更强的适用性。

## 2 作业方案

在正式开展项目的全流程中，按照相关规范进行工程过程控制与管理。

1）成立项目组。为保证工程项目生产的顺利进行，成立项目组，由组长全面协调内外业人员的工作。

2）工作质量控制。项目组成员严格按照质量相关要求开展数据处理和资料整理工作，严格执行相关数据处理规范，做好资料的互检与审核工作，成果资料必须经过质量审核方可交付。为达到质量管理要求需做到：①切实重视成果质量，对不合格的测量数据坚决予以否定，推倒重来；②严格按照相关数据处理规范进行作业，并严格遵守操作规程，确保按时完成；③进行工序管理控制，严格抓好各道工序间的过程控制，以保证每一阶段数据的真实可靠。

3）安全管理。严格按照安全管理体系要求进行信息安全管理，所有测量资料数据及其存储均按照要求严格控制。

4）生产计划与接收准则。按照计划对数据进行生产，生产过程中严把质量关，从数据预处理到后处理层层把关，数据提交质检小组进行检查。

整体工作方案分为外业数据采集、内业数据解算和数据处理与分析3个部分，如图1所示。

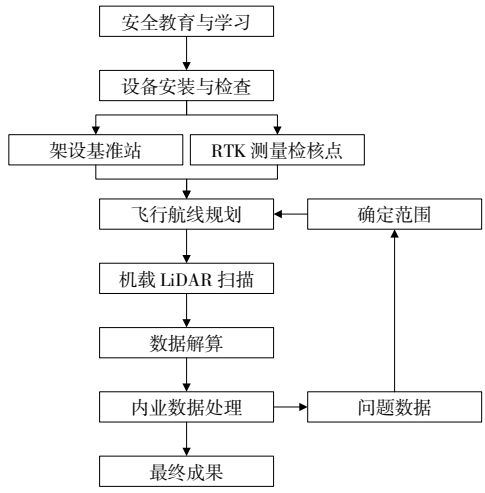



图1 整体工作方案流程图

### 2.1 外业数据采集

外业数据采集严格按照相关技术标准规范，测量前充分做好准备工作，测量中实时关注测量数据的完整性，按照计划进行数据获取，确保获取的数据完整有效。

1）检核点测量。利用GNSS接收机链接千寻CORS，在测区内采集一定数量的检核点，用于后期成果的精度检查。

2）基准站架设。为保证POS系统的定位精度，航摄飞行前30 min，需在测区附近（距离小于30 km）建立GNSS基准站，基准站上架设高精度GNSS信号接收机，该接收机与无人机POS同步记录。基准站架设时严格对中整平，量取天线高，基准站开机采集采样间隔为1 Hz的静态数据。后处理中利用PPK后处理差分技术解算得到无人机的精确位置。

3）仪器安装。不用时仪器应存放于常温、干燥的环境中，保持机身清洁。长时间使用后，镜头上往往会沾有灰尘，需用专用镜头纸擦拭干净。

仪器安装过程中应确保每一根连接线和每一个连接件都连接紧。检查通电后的指示灯情况，确保仪器正常工作。若无人机长期不用或无人机飞行方向明显不正确，则需进行磁罗盘校准。检查通电后3个指示灯的情况（表1），3个灯常亮表示仪器正常工作。

4）飞行航线规划。航线设计可在测量实施前或现场进行规划，利用地面站软件生成相应测区的测线。

表1 仪器灯状态说明表

| 灯 | 关 | 开 | <1 Hz闪烁 | >1 Hz |
|---|---|---|---|---|
| Power（红） | 没通电 | 通电 | 未知情况或不支持IMU | 程序出错 |
| GNSS（绿） | 等GPS时间 | GPS信号良好、对准良好 | 对准不好或信号不好 | |
| INS（绿） | 等GPS时间 | 链接IMU | | 启动和加载固件 |

5）机载LiDAR扫描。由于IMU易受累计误差的影响，因此正式开始测量前，需对IMU进行初始化，以提高IMU的后处理精度。具体实施方法为：无人机绕“8”字飞行，观察仪器的PDOP值，若PDOP值稳定在1.5以下，说明初始化已完成，可开始测量。无人机按照行高50 m，飞行速度5 m/s，航线间隔60 m的规划进行作业。飞行过程中无人机飞行范围超出规定范围线50 m，以保证飞行数据的精度和数据的完整性。

6）过程实时监控。测量中可实时观察INS数据和激光数据的存储量，INS存储数据量稳定在0.01 MB/s，激光存储数据量控制在2.50 MB/s左右。

### 2.2　内业数据解算

利用Inertial Explorer软件对无人机POS系统的数据与基准站获得的GNSS数据进行联合解算，得到作业过程中无人机的准确位置信息与姿态信息；再将导出的POS数据导入ScanLookPC软件，解算得到具有准确姿态位置的点云。如图2所示，经过高程渲染的点云数据满足后续作业处理要求。

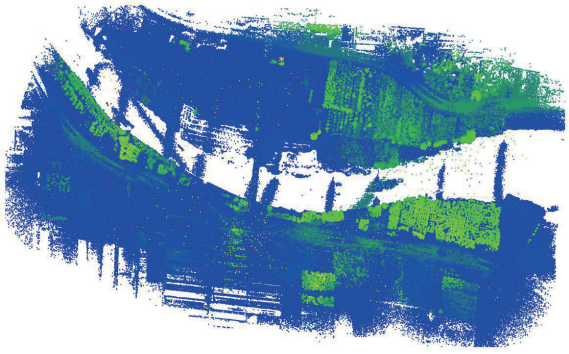


图2　机载LiDAR点云（高程渲染）

## 3　数据处理与分析

### 3.1　基于统计规律的点云去噪

LiDAR点云是通过LiDAR扫描获得的，以离散、不规则的方式分布在三维空间中的点的集合[10]。由于周围环境或扫描仪本身特性，激光束在数据获取过程中有时会产生异常点，即噪声点。常见的噪声点主要包括高位粗差和低位粗差，高位粗差通常是由于数据采集过程中受鸟类等低飞飞行物的影响，误将这些物体反射回来的信号当作被测目标的反射信号记录下来所产生的；低位粗差则是由于测量过程中的多路径误差或扫描仪误差产生的极低点，如由水渍导致的低于路面的点。如图3所示，a区域的离散点为高位噪声点，b区域的离散点为低位噪声点。

这两类噪声点以及路面上方的电力线等将影响后续处理，针对该问题，根据点云数据的高程直方图统计规律，将高低噪声和路面上方的散乱点去除。首先将分段后的点云数据垂直投影到XOY平面，根据式（1）和式（2）建立$C$列$R$行的规则格网，确定每个点的格网行列号；然后对每个格网内的点进行高程直方图统计，绘制高程频数分布直方图，横轴为高程值，纵轴为单组高程范围的点数量；再根据地物点云的高程连续性和频数差值特征，判断高程阈值$Z_1$、$Z_2$，保留该格网内高程值大于$Z_1$且小于$Z_2$的点；最后将高程较小或较大，且数量较少的异常点删除，如高低位噪点，路面正上方的电力线点、交通标志牌等。

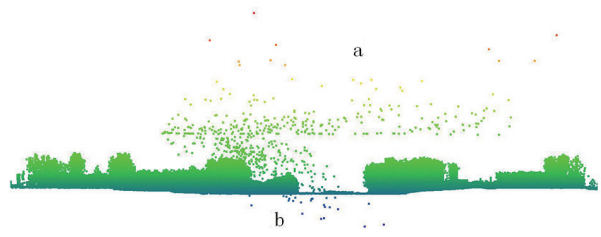



图3　噪声示意图

$$\begin{cases} C=\mathrm{int}\left(\dfrac{X_{\max}-X_{\min}}{\mathrm{GSD}}\right)+1 \\ R=\mathrm{int}\left(\dfrac{Y_{\max}-Y_{\min}}{\mathrm{GSD}}\right)+1 \end{cases} \tag{1}$$

式中，$X_{\max}$、$X_{\min}$、$Y_{\max}$、$Y_{\min}$分别为点云区域$X$、$Y$坐标的最大值和最小值；GSD为格网分辨率。

$$\begin{cases} \mathrm{col}=\mathrm{int}\left(\dfrac{X-X_{\min}}{\mathrm{GSD}}\right)+1 \\ \mathrm{row}=\mathrm{int}\left(\dfrac{Y-Y_{\min}}{\mathrm{GSD}}\right)+1 \end{cases} \tag{2}$$

式中，col、row为当前点的格网列号和行号；$X$、$Y$为当前点的平面坐标值。

对原始点云数据进行去噪，得到的数据通过高程渲染如图4所示。该数据为乡村区域的点云，地形复杂、起伏较大；林地分布散乱，且高度不均，既有多年的乔木，又有栽种不久的小树苗；同时存在低洼区域和房屋，以及零星的灯杆等。通过高程渲染，大部分树木和灯杆等被渲染为红色，道路和大棚区域被渲染为黄色，地面被渲染为绿色，低洼区域被渲染为蓝色，因此可通过高程区分得到林地范围。

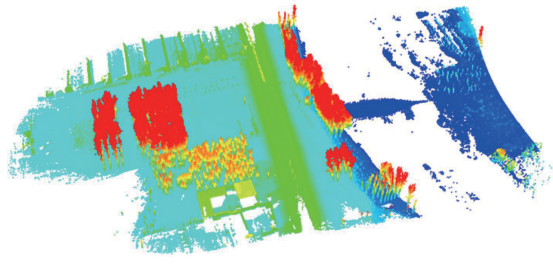


图4　去噪后的点云

### 3.2 地面点分离

为减少不必要的数据量，本文采用CSF[11]方法将地面点分离，选取陡坡模式，设置分辨率为0.5 m、距离阈值为0.3 m、迭代次数为500，去除地面点后的结果如图5所示，可以看出，地面点被分离，树木点云仍然保留，减少了数据量，便于后期处理。

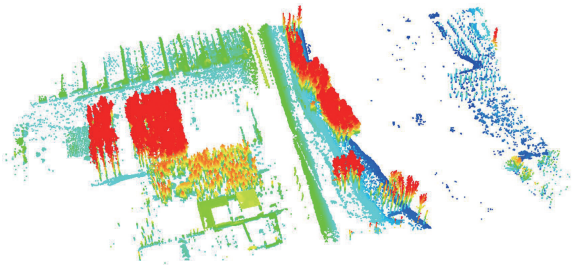


图5 分离地面点

### 3.3 林地面积计算对比

获取非地面点云后，通过高程判断，利用点云处理软件在三维视图中勾画林地范围，如图6所示；再根据式（3），利用软件自动计算单个多边形的面积，并将林地区域的多边形面积累加，即可得到准确的林地面积。

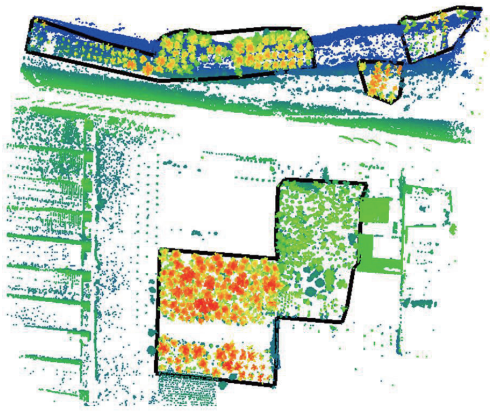


图6 林地范围示意图

$$S=\frac{1}{2}\left|\sum_{i=1}^{n}(X_iY_{i+1}-X_{i+1}Y_i)\right| \quad (3)$$

式中，$S$ 为多边形面积；$n$ 为多边形顶点数量；$X$、$Y$ 为顶点的坐标；$X_{n+1}=X_1$；$Y_{n+1}=Y_1$。

为验证该技术的可行性和准确性，通过人工多次测量的手段取均值，统计不同区块的林地面积记为 $S_P$，通过软件在点云中多次计算取均值的林地面积记为 $S$，并计算偏差 $P$。测量结果以及对比数据如表2所示，可以看出，大部分区块的点云测量面积大于人工测量，经过计算，人工测量面积为9 001.15 m²，点云数据经过几何计算的面积为9 665.67 m²，偏差平均值为6.11%，结果偏差符合要求，同时机载LiDAR系统获取机载点云数据计算林地面积的测量计算方法减少了人工作业难度，提高了效率。

表2 不同方式调查的林地面积对比

| 区块 | $S_P$ /m² | $S$ /m² | $P$ /% |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 965.45 | 2 069.77 | 5.04 |
| 2 | 752.49 | 822.03 | 8.46 |
| 3 | 2 365.05 | 2 704.77 | 12.56 |
| 4 | 656.46 | 634.08 | 3.53 |
| 5 | 235.49 | 230.87 | 2.00 |
| 6 | 1 569.34 | 1 644.67 | 4.58 |
| 7 | 1 456.87 | 1 559.48 | 6.58 |

## 4 结 语

机载LiDAR系统是一种较为高效的新型测绘技术方法，实现了测区三维点云数据的快速采集，数据精度高、测区覆盖全，对地貌地形具有三维实景还原能力。本文利用机载LiDAR系统获取某区域的机载点云数据，通过内业数据解算和后处理，根据高程判别林地范围，利用点云处理软件在三维视图中确定林地范围并计算林地面积。通过实际工程实验证明了机载LiDAR技术在林地面积调查等领域具有较大优势，是一种较为完善的解决方案。

## 参考文献

[1] 袁枫. 机载LiDAR数据处理与土地利用分类研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2010

[2] 刘黎明. 土地资源学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2010

[3] 王桥,杨一鹏,黄家柱,等. 环境遥感[M]. 北京科学出版社,2005

[4] 穆喜云,张秋良,刘清旺,等. 基于机载LiDAR数据的林分平均高及郁闭度反演[J]. 东北林业大学学报,2015,43(9):84-89

[5] 曾伟生,孙乡楠,王六如,等. 基于机载激光雷达数据估计林分蓄积量及平均高和断面积[J]. 林业资源管理,2020(2):79-86

[6] 刘清旺,李世明,李增元,等. 无人机激光雷达与摄影测量林业应用研究进展[J]. 林业科学,2017,53(7):134-148

[7] 张小红. 机载激光扫描测高数据滤波及地物提取[D]. 武汉:武汉大学,2002

[8] 周建红,杨彪,王华,等. 长江中下游河道岸滩低空机载LiDAR点云地形滤波算法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):26-31

[9] 董保根. 机载LiDAR点云与遥感影像融合的地物分类技术研究[D]. 郑州:信息工程大学,2013

[10] 国家测绘地理信息局. 数字表面模型 机载激光雷达测量技术规程:CH/T 3014-2014[S]. 北京:测绘出版社,2015

[11] ZHANG W M, QI J B, WAN P, et al. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation[J]. Remote Sensing,2016,8(6):501

**第一作者简介：**李轶波（1983—），硕士研究生，工程师，从事工程测量工作。