

基于激光雷达点云数据进行坡度、坡向分析的应用

蔡官俊

云南省有色地质局三〇六队

DOI:10.12238/gmsm.v8i3.2203

[摘要] 激光雷达点云数据凭借其高精度、高分辨率以及对复杂地形的全面感知能力,为坡度与坡向分析提供了全新的数据基础与研究视角。本研究聚焦于基于激光雷达点云数据的坡度、坡向分析应用。首先,对激光雷达数据采用统计离群值滤波算法进行点云去噪,再基于渐进三角网加密滤波(PTD)和布料模拟滤波(CSF)提取地面点。对于坡度计算,是通过构建数字高程模型(DEM),利用邻域分析算法,依据DEM中栅格单元的高程变化精确计算坡度;在坡向分析方面,借助数学模型,根据坡度计算结果确定坡向方向。将该方法应用于富宁县某矿山地地质勘查工作地形分析,结果显示,与传统测量方法相比,基于激光雷达点云数据的分析结果在精度上有所提升,且能够清晰呈现地形细节。

[关键词] 激光雷达;统计离群值滤波;渐进三角网加密滤波(PTD);布料模拟滤波(CSF);数字高程模型(DEM);坡度、坡向;邻域分析算法

中图分类号: TN95 文献标识码: A

Application of slope and slope direction analysis based on lidar point cloud data

Guanjun Cai

No.306 Team, Yunnan Provincial Bureau of Nonferrous Geology

[Abstract] LiDAR point cloud data, with its high precision, high resolution, and comprehensive perception capability of complex terrains, provides a new data foundation and research perspective for slope and aspect analysis. This study focuses on the application of slope and aspect analysis based on LiDAR point cloud data. Firstly, the point cloud denoising algorithm is used to denoise the LiDAR data, and then ground points are extracted based on Progressive Triangulated Network Densification filtering (PTD) and Cloth Simulation Filtering (CSF). In terms of slope calculation, by constructing a Digital Elevation Model (DEM) and using the neighborhood analysis algorithm, the slope is accurately calculated according to the elevation changes of grid cells in the DEM. In aspect analysis, the aspect is determined based on the slope calculation results with the help of mathematical models. The results show that compared with traditional measurement methods, the analysis results based on LiDAR point cloud data have improved accuracy and can clearly present topographic details.

[Key words] LiDAR;Statistical outlier filtering;Progressive Triangulated Network Densification Filtering (PTD);Cloth Simulation Filtering (CSF); Digital Elevation Model (DEM);slope,aspect;neighborhood analysis algorithm

引言

随着测绘技术的革新,激光雷达点云数据以其高精度、高密度及穿透植被获取真实地表信息的特性,为地形参数分析带来全新突破。坡度与坡向作为地形关键属性,直接影响生态过程、工程建设与灾害防治,传统数据常因分辨率不足或植被遮挡导致分析误差,而LiDAR点云可精准捕捉微地形特征,显著提升分析精度。运用在富宁县某矿山地地质勘查中,坡度坡向图可直观呈现矿区地形起伏态势,辅助判断岩体稳定性,识别潜在滑坡区域,为开采设计、灾害预警和生态修复提供重要数据支撑。

1 项目区概况

项目区隶属富宁县里达镇东部,地理坐标为 $N23^{\circ} 31' 06'' \sim 23^{\circ} 32' 47''$, $E105^{\circ} 36' 17'' \sim 105^{\circ} 38' 02''$,面积为 3.5km^2 ,距离富宁县里达镇直线距离约6.7公里。测区中有硬化乡村道路穿过,项目区北侧沿线与老寨村、弄劳村相接,东侧主要以大面积成林为主,毗邻板仓河,南侧距离渭苗村约550米,西侧与“木岭后山”相接,项目区中北部包含渭沙上寨、渭沙下寨,西侧包含木岭村。测区整理交通便利,除硬化路面外,有较多宽约3.5米的机耕路。种植业以水稻、玉米、为主,主要经济作物

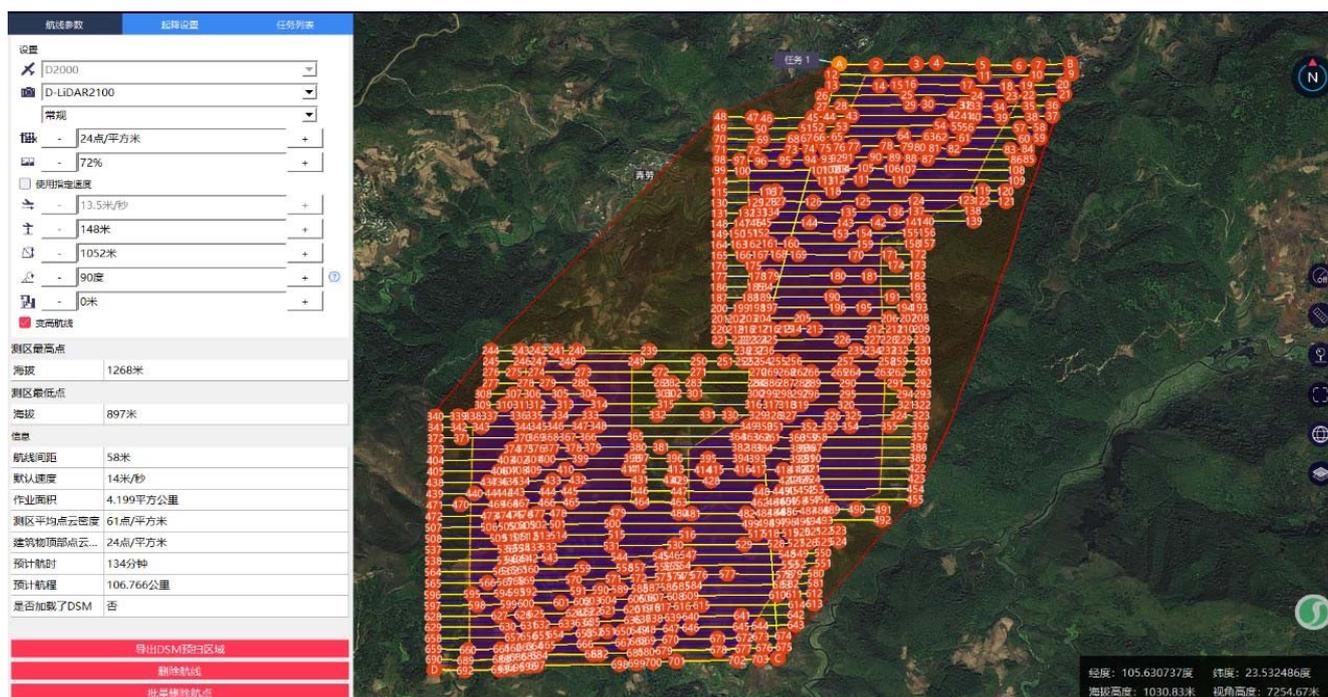


图1 机载激光雷达航线敷设

有八角, 甘蔗, 油茶等。测区属亚热带季风气候, 受季节和地形变化影响, 其立体气候十分明显, 年平均气温 19.3°C , 年平均日照时数1950小时, 年平均降雨量1213.7毫米。

2 激光雷达点云数据获取

2.1 激光雷达点云数据特点与数据获取

2.1.1 激光雷达点云数据的特点

高精度三维坐标: 通过激光脉冲测距和惯性导航系统 (INS)、全球导航卫星系统 (GNSS), 可获取地物毫米级至厘米级精度的X、Y、Z坐标, 精准还原地形和地物三维形态。**高密度点云数据:** 每秒可发射数万至数百万个激光点, 形成密集点云, 能细致捕捉地形起伏、植被结构、建筑轮廓等细节, 甚至穿透部分植被获取地面数据。**数据获取效率高:** 搭载于飞机平台, 可快速覆盖大面积区域, 不受地形复杂程度限制 (如山区、丛林), 相比传统测量方式大幅缩短作业时间。**穿透性与地物分离能力:** 激光可穿透植被冠层 (根据植被密度), 通过多次回波 (如首次回波、末次回波) 区分地面、植被、建筑等不同层次地物, 便于提取地形表面和地物三维信息。**多回波与波形数据:** 部分LiDAR系统支持记录激光脉冲的多次反射 (如树木枝叶、树干、地面的回波), 结合波形分析可进一步解译地物材质和结构。

2.1.2 数据采集设备

根据项目区的区域地形条件, 以及成果对点云密度及数据精度要求, 选择使用飞马D2000轻型无人机驾驶航空器搭载D-LiDAR2100激光雷达模块进行作业。其机载激光雷达型号为D-LiDAR2100, 搭载平台可选用飞马D20、D500、D2000S系列旋翼

平台, 航高 $50\text{m}\sim 200\text{m}$, 航速 14.0m/s , 点频 240kpts/s , 回波模式为三回波。

2.1.3 机载激光雷达数据获取

经验证D-LiDAR2100飞行最大高度建议为 150m , 过高的飞行会导致数据过于稀疏而无法解算。本次飞行区域内有高压线穿过, 为保证飞行器的安全以及数据的可靠性, 最终确定飞行速度为 14.0m/s , 飞行高度设置为 148m , 为保证飞行倾斜姿态变化较大情况下不产生数据覆盖漏洞, 保证点云密度均匀, 避免数据盲区, 故航线旁向重叠率设定为 72% 。航线至少规划两条航线, 且两条航线长度保持一致。飞行结束后下载流动站数据、IMU、激光数据等文件检查并储存。航线敷设见图1所示:

2.2 点云数据处理

2.2.1 点云数据处理流程

激光雷达数据采用飞马无人机管家软件进行解算。点云数据处理流程包括新建项目、点云解算、质量检查、去冗余、坐标转换、精度检查、导出标准点云等步骤。

点云解算前, 需使用软件智理图模块对GNSS数据进行格式转换, 转换为RINEX格式数据, 后续使用RINEX格式数据下载网络基站及数据解算。

点云解算在软件智激光模块进行, 新建项目时, 设置工程名称及工程路径, 同时设置项目区坐标系统、设置设备型号, 选择对应的差分模式, 添加对应的RTK文件、基站数据、流动站数据、IMU数据和激光数据, 完成新建项目后, 即可对点云数据进行解算。

点云解算完成后,通过质量检查工具生成质量报告图作为参考。并利用智激光的剖面功能检查数据质量,对点云以航带形式渲染,观察剖面图是否存在明显的分层情况,如果没有分层,跳过航带平差、直接进行区冗余、去噪、点云赋色、坐标转换等其他可选操作。如果有分层情况,则需要进行航带平差,改善分层情况。

对点云数据进行精度检核,导入地面检查点的三维坐标数据,对其进行精度计算(表1所示),结果符合精度要求后导出标准格式(.LAS)的点云数据。

表1 激光雷达点云数据高程精度检核

ID	实测值 X(m)	实测值 Y(m)	实测值 H(m)	地面点点云 Z(m)	D_z (m)
1	***3143.675	**1909.719	1112.400	1112.418	0.018
2	***2750.360	**2193.196	1135.445	1135.466	0.021
3	***2410.051	**2179.483	1104.966	1104.981	0.015
4	***2328.804	**2743.673	1010.700	1010.757	0.057
5	***2331.024	**2908.988	988.548	988.600	0.052
6	***2611.090	**3178.787	960.521	960.633	0.112
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
125	***5589.019	**4574.185	948.997	949.020	0.023
126	***2257.189	**2019.929	1101.257	1101.282	0.025
127	***2968.495	**3423.245	939.632	939.738	0.106
128	***4733.404	**4058.119	1091.398	1091.273	-0.125
备注	以上坐标数据均做脱密处理				
	控制点: 128个		中误差: 0.130m		

点云数据高程精度质量由点云数据处理软件进行自动计算,计算结果满足《机载激光雷达数据获取技术规范》中的规定。

2.2.2 去噪处理

高分辨率的DEM可能捕捉细微地形的变化,噪声敏感,则需要对点云数据进行去噪处理。点云去噪处理采用统计离群值滤波(Statistical Outlier Filtering)算法,核心通过点与邻域点的空间距离统计特性识别并剔除噪声点,原理是假设点云中大多数点属于真实地物,其到邻近点的距离符合正态分布,而噪声点(如孤立点、设备误差点)因缺乏邻近点,距离统计值显著偏离均值,可通过标准差倍数筛选异常点。具体算法是计算K近邻距离:对每个点搜索K个最近邻点,计算该点到所有近邻点的欧氏距离。统计距离分布:计算所有点的近邻距离均值(μ)和标准差(σ)。设定阈值筛选:若某点的近邻距离大于 $\mu + N \times \sigma$,则判定为离群噪声点并剔除。

2.2.3 地面点提取

点云地面点提取主要基于渐进三角网加密滤波(PTD)和布料模拟滤波(CSF)原理加手动提取分类点方式来完成。渐进三角网加密滤波(PTD):先将点云中的最低点作为种子点,构建初始的三角网。然后按高程顺序逐步添加邻近点,计算新点与三角网平面的夹角,若小于设定的坡度阈值,则将该点判定为地面点并加入三角网,继续迭代此过程,直至所有点处理完毕。该方法适

用于陡坡等地形,能较为精确地提取地面点,但在大数据量情况下计算量较大。布料模拟滤波(CSF):将点云视为“布料”,模拟布料在重力作用下自然下垂并与地面贴合的过程,与布料贴合的点被判定为地面点。此方法效率较高,可尽可能提取出所有地面点,但对地形较为复杂的数据提取效果可能不理想。若自动提取未能达到理想效果可进行剖面分类编辑。

2.2.4 构建数字高程模型(DEM)

提取地面点点云后使用软件基于点云创建数字高程模型(DEM),即根据DEM模型分辨率设置栅格采样间隔,本次研究对象DEM分辨率采样栅格单元大小设置为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$,能满足此区域的坡度坡向分析。

3 坡度坡向计算方法

3.1 坡度计算原理

DEM(数字高程模型)中坡度的计算基于高程数据的空间微分原理,通过相邻栅格点的高程差计算地表倾斜程度。

3.1.1 坡度的数学定义

坡度是地表单元陡缓的程度,用高程变化率(斜率)表示,数学上定义为高程函数在某点的梯度模值,单位可为弧度、角度或者百分比。

3.1.2 计算原理方法

对DEM中每个栅格点(i, j),通过邻域高程值计算东西(x)和南北(y)方向梯度分量 d_x, d_y 。在格网DEM上取 3×3 移动窗口采用二阶差分法求解 d_x 和 d_y :

东西方向高程变化率:

$$d_x = \frac{(z_{i-1,j+1} + 2z_{i,j+1} + z_{i+1,j+1}) - (z_{i-1,j-1} + 2z_{i,j-1} + z_{i+1,j-1})}{8 \times \Delta_x} \quad (1)$$

南北方向高程变化率:

$$d_y = \frac{(z_{i-1,j-1} + 2z_{i-1,j} + z_{i-1,j+1}) - (z_{i+1,j-1} + 2z_{i+1,j} + z_{i+1,j+1})}{8 \times \Delta_y} \quad (2)$$

上式中 Δ_x, Δ_y 为栅格分辨率, z 为高程值。

坡度计算:角度值,梯度向量的模长对应斜坡面斜率,通过反正切函数求解角度

$$\text{坡度(度)} = \arctan \left(\frac{\sqrt{d_x^2 + d_y^2}}{1} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

公式中分母1为水平距离单位,因为 d_x, d_y 已包含分辨率尺度

百分比制:高程变化与水平距离的比值

$$\text{坡度(\%)} = \frac{\sqrt{d_x^2 + d_y^2}}{1} \times 100\% \quad (4)$$

项目区案例

选取项目区一点计算得到 $d_x = 2\text{m/m}$, $d_y = 3\text{m/m}$

$$\text{则计算坡度(度)} = \arctan\left(\frac{\sqrt{2^2 + 3^2}}{1}\right) \times \frac{180}{\pi} \approx 74.7^\circ \quad (5)$$

$$\text{坡度(\%)} = \frac{\sqrt{2^2 + 3^2}}{1} \times 100\% \approx 360.5\% \quad (6)$$

3.2 坡向计算原理

DEM(数字高程模型)的坡向计算核心是通过分析地表相邻格网点的高程变化,确定每个格网点所面向的方向(坡度的朝向),通过以正北方向为基准,按顺时针方向从 0° 到 360° 度量。利用(1)式和(2)式两个坡度分量,通过反正切函数计算坡向:

当 d_x, d_y 为0时,坡度为 0° ,即为平地。若 d_x, d_y 不同时为0时,坡向 θ 的计算公式为:

$$\theta = \arctan(-d_x - d_y) \times \frac{180}{\pi} \text{ 再将结果调至 } 0^\circ - 360^\circ \text{ 范围,}$$

最终角度即为该点的倾斜朝向。

4 项目区坡度、坡向可视化展示

坡度、坡向分析在ArcGIS中进行,借助于Spatial Analyst工具中的表面分析。将0.5m分辨率的DEM数据以及项目范围导入ArcGIS窗口,对数据进行定义投影为CGCS2000_3_Degree_GK_CM_105E。使用项目区范围数据进行掩膜提取得到项目区内的DEM数据,对项目区内DEM进行坡度和坡向分析,表面分析中坡向工具计算地表坡度在9个方向(东、东北、北、北西、西、西南、南、东南以及平面)的朝向分布信息。坡度示意图见图2,坡向示意图见图3。

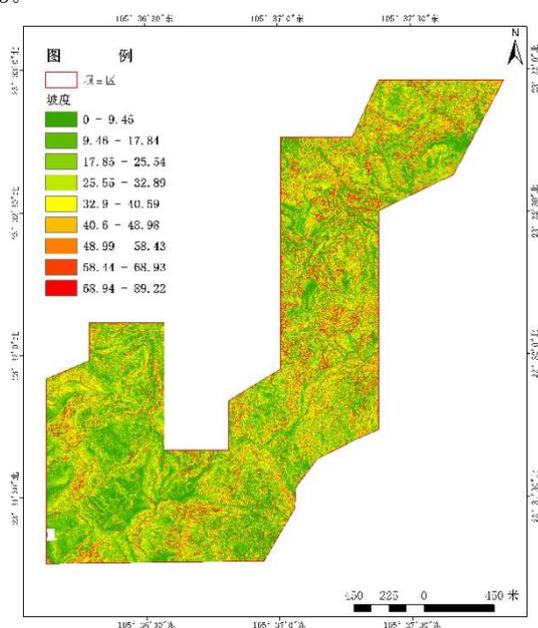


图2 坡度图

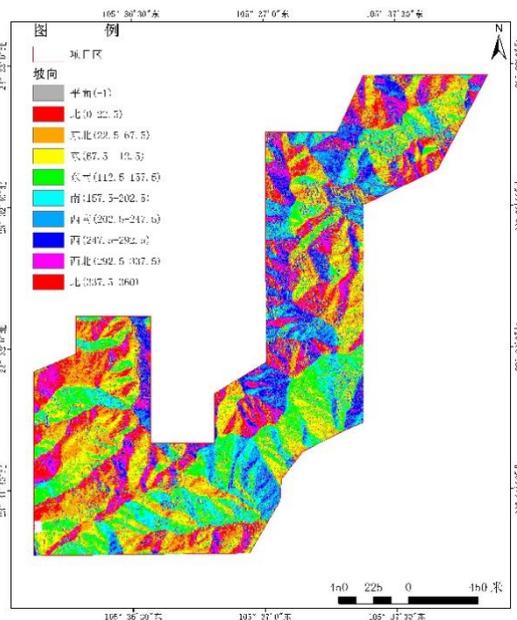


图3 坡向图

5 结语

本文基于激光雷达点云数据开展坡度、坡向分析,LiDAR技术凭借其高精度、高密度和快速获取三维空间信息的优势,能够突破传统数据采集的局限性,有效捕捉地形细微变化,为坡度、坡向分析提供了更为精准和丰富的数据基础,极大地提升了地形参数提取的准确性与可靠性。在地质灾害监测与防治领域,通过精准的坡度、坡向数据,能够快速识别高风险滑坡、崩塌区域,为灾害预警与防控方案制定提供关键支撑;在生态环境研究方面,结合坡度、坡向信息与植被分布数据,可深入分析地形因素对生态系统的影响,助力生物多样性保护与生态修复工程规划;在城市规划与土地开发领域,基于LiDAR的坡度、坡向分析能够为建筑选址、道路设计提供科学依据,有效降低工程建设成本与潜在风险。

【参考文献】

- [1]江岭,刘学军,汤国安,等.地形分析中坡度坡向算法并行化方法研究[J].计算机工程与科学,2013,35(4):18-23.
- [2]朱雷,秦富仓,苏江.基于ArcGIS9.3的等高线生成DEM及坡度坡向分析[J].内蒙古林业调查设计,2014,37(2):125-128.
- [3]刘学军,龚健雅,周启鸣,等.基于DEM坡度坡向算法精度的分析研究[J].测绘学报,2004,33(3):258-263.

作者简介:

蔡官俊(1997--),男,汉族,云南昆明人,大学本科,助理工程师,研究方向:地理信息系统。