

恐龙谷南缘山区 DIM 点云的 PTD 滤波改进试验研究

罗为东^{1,2}, 甘 淑^{1,2}, 袁希平^{2,3}, 高 莎^{1,2}, 毕 瑞^{1,2}, 袁新悦^{1,2}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 云南省高校高原山地空间信息测绘技术应用工程研究中心, 云南 昆明 650093;

3. 滇西应用技术大学地球科学与工程技术学院, 云南 大理 671006)

摘要:无人机 DIM 点云滤波处理是地物分类、地物单体化提取和地形特征分析的关键步骤,为解决高原山区因地形复杂而导致 DIM 点云滤波处理难度大和精度低等问题。选择以滇中高原恐龙谷南缘山区为试验区,首先利用 DJI Phantom 4 RTK 采集影像数据,解算密集影像获取 DIM 点云;其次,考虑山体点与地面点有较大高程差,选择经典 PTD 滤波算法对实验区密集匹配点云进行滤波处理;最后,综合考虑实验区山顶和山脚存在较大高程差且山体两侧沟壑丛生,山体两侧地面点易被识别为非地面点,提出以脊-谷交汇地形特征点为 PTD 滤波算法的种子点,在两侧精细化构建不规则三角网的改进 PTD 滤波算法。结果表明:1) PTD 滤波算法得到地面点较为完整保留整个实验区,但明显的地物如山体两侧低矮植被和山脚蔬菜大棚基本未被剔除,且山体部分的地面点易被识别为非地面点而在出现山体 K1、K2、K3 区域的空洞现象。2) 针对恐龙谷南缘山区复杂地形,提出以脊-谷交汇地形特征点为 PTD 滤波算法的种子点,在两侧精细化构网,山体低矮植被部分清除,相对于 PTD 滤波算法蔬菜大棚大面积被清除。并且山体两侧地面点得到较为完整保留,未出现明显点云空洞的现象。

关键词: DIM 点云; 点云滤波; PTD 算法; 地形特征点

中图分类号: P237; TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.024

Experimental study on the improvement of PTD filtering for dense point clouds of UAV in the southern margin of dinosaur valley

LUO Wei-dong^{1,2}, GAN Shu^{1,2}, YUAN Xi-ping^{2,3}, GAO Sha^{1,2}, BI Rui^{1,2}, YUAN Xin-yue^{1,2}

(1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Application Engineering Research Center of Spatial Information Surveying and Mapping Technology in Plateau and Mountainous Areas Set by Universities in Yunnan Province, Kunming 650093, China;

3. West Yunnan University of Applied Sciences, Dali 671006, China)

Abstract: DIM point cloud filtering is a key step in feature classification, feature monolithic extraction and terrain feature analysis. In order to solve the difficulty and low accuracy of DIM point filtering due to complex terrain in highland mountains, an improved PTD filtering algorithm is proposed. The mountainous areas on the southern edge of the dinosaur valley in the Central Yunnan Plateau are chosen as the experimental area. Firstly, DJI Phantom 4 RTK is used to collect the image data and solve the dense image to obtain the DIM point cloud. Then, considering the large difference in elevation between the summit and the foot of the mountain, and the ground points on both sides of the mountain are

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41861054) 资助。

作者简介: 罗为东 (1996 -), 男, 彝族, 硕士研究生, 主要从摄影测量与遥感技术和高原山区点云滤波分析研究。

E-mail: 1013023574@qq.com

通讯作者: 甘 淑 (1964 -), 女, 教授, 主要从摄影测量与遥感技术方面的研究。E-mail: n1480@qq.com

收稿日期: 2021-08-16; **修订日期:** 2021-09-15

easily identified as non-groundpoints, the topographic feature point of ridge-valley intersection is the seed point of PTD filtering algorithm, and the improved PTD filtering algorithm refine the irregular triangular network on both sides of the mountain. The results show that: 1) the ground points obtained by the PTD filtering algorithm are more completely preserved throughout the experimental area, but obvious features such as low vegetation on both sides of the mountain and vegetable trellises at the foot of the mountain are basically not eliminated, and the ground points on parts of the mountain are easily identified as non-ground points and hollow phenomena in the K1, K2 and K3 areas of the mountain. 2) For the complex terrain of the mountainous area on the southern edge of the dinosaur valley, the ridge-valley intersection terrain feature points are proposed as the seed points of the PTD filtering algorithm. On both sides of the mountain refinement network, the mountain low vegetation partly cleared. Vegetable shed large area is cleared compared to the PTD filtering algorithm. The ground points on both sides of the mountain are preserved, and no obvious point cloud voids are observed.

Keywords: DIM point clouds; point cloud filtering; PTD algorithm; terrain feature points

1 引言

近年来随着科学技术的发展,复杂山区地形地貌提取分析朝着精细化方向发展,如何高效、快速获取高精度地形地貌空间数据成为了分析地形地貌特征的关键因素。无人机航测系统在对生产地面表面模型(Digital Surface Model, DSM)、数字正射影像图(Digital Orthophoto Map, DOM)、构建数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)等具有快速、高效的特点。地形数学产品均是对地形信息的详细表达。其中数字高程模型的快速获取,并满足相应的精度要求,特别是在困难山区对数字高程模型的处理,是山区数字化发展的重要趋势。目前,国内外学者利用无人机遥感技术采集构建 DEM 对地形地貌等空间特征分析展开了研究。不难发现,构建 DEM 对于无人机航测技术,主要是要对密集影像匹配(Dense image matching, DIM)点云进行滤波处理,对此 Gordana Jakovljevic^[1]等通过 LiDAR 点云和密集匹配点云进行滤波处理,构建 DEM 用于降低洪水危险,并计算 DEM 的 RMSE,结果表明平原地区适宜应用 LiDAR 采集点云,而丘陵和山区密集匹配点云构建 DEM 的 RMSE 低于 LiDAR 点云。Mustafa Zeybek^[2]等应用四种滤波算法结果提取地形特征,结果表明粗糙度和复杂地貌提取四种滤波算法表现出相似性,CSF 滤波算法在平坦地形区分地面点和非地面点正确率达到 93%。叶立志^[3]针对 DIM 点云本身的复杂性,提出了一种基于交叉线元分割的密集匹配点云滤波算法,结果表明滤波结果构建 DEM 中误差接近 1m,相对于商业软件 Terrasolid 的滤波结果和滤波效率更优。Ji Xian^[4]等应用 ISPRS 第三个工作组的七个数据集,首先构建完初试 TIN 后,再 SUSE 扩展得到更多地面点,最后进行对 TIN 进行迭代加密,结果表明与 PTD 相比,所提出的方法能够预景观的不连续性,并将遗漏误差和总误差分别减少了大约 10% 和 6%,降低了后期校正结果所需的

人工操作成本。Sheng Nie^[5]等对 PTD 滤波算法中建立 TIN 进行改进并改变原有的迭代判断标准,在 ISPRS 提供 LiDAR 点云数据集进行处理,结果表明改进的 PTD 方法能够把 I 类误差、II 误差和总误差分别减少 10.26%、0.79% 和 8.07%。为过滤机载 LiDAR 点云离散数据集滤波提供了决方案。高广^[6]等针对山区 LiDAR 点云的特点,对 PTD 滤波首先应用随机网格搜索算法获取更多精准初试种子点,其次利用地形预测角的判断准则提高地线附近滤波精度,最后在有大量地形断裂线山区进行验证,结果表明改进 PTD 滤波算法有效地保留了山区的地形断裂线特征。

对于禄丰恐龙谷南缘山区特殊地形地貌,采用低空无人机测量技术获取的影像数据,并构建 DIM 点云,首先考虑山顶、山体两侧和地面存在高程差,选择渐进加密三角网滤波算法进行处理。其次针对实验区特殊地理位置和地貌形态,改进传统渐进加密三角网滤波算法,最后对两种滤波算法处理结果进行直观分析。较为完整得到实验区地面点数据可为后续解译地貌特征信息和提取地形特征信息奠定基础。

2 PTD 改进方法研究

2.1 DIM 点云 PTD 滤波方法

目前无人机航测制作的主要数据之一是点云数据,以点集的形式表达被测物体的属性、位置信息和纹理信息。影像密集匹配获取点云,即 DIM 点云,不可透过地表的地物获取地面点,获取的地表点云与建筑物、信号塔和植被等地物构成地面表面模型(Digital Surface Model, DSM),存在噪声点及高程异常点。密集匹配点云滤波,在点云分类、三维建模、单体化提取等方面有重要作用。国内外研究者^[7-14]在点云滤波方面开展了大量工作,依据主要滤波原理形成了基于坡度、基于形态学、基于曲面拟合、基于分割、基于机器学习、布料模拟滤波和渐进

加密不规则三角网算法等主要滤波方法。基于不规则三角网的滤波算法,在丘陵地区、林区和山区等对点云数据有较好的适用性。经典的渐进加密不规则三角网(Progressive TIN Densification, PTD)滤波算法获取实验区地面点。PTD 算法在商用软件 TerraSolid 的 TerraScan 模块中采用,对实验区滤波主要进行四步:①把实验区数据划分规则格网,认定格网最低点为地面点,在实验区选取初试种子点;②利用种子点构建不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN);③判断地面点,如图 1 所示, P 点为非种子点,底面的三角平面顶点分别是 V_1 、 V_2 、 V_3 , d 表示非种子点到三角面的距离, α_1 、 α_2 、 α_3 是非种子点与底面三角形顶点连线的夹角,通过计算点 P 到三角形的距离 d 及 α_1 、 α_2 、 α_3 的最大值分别与距离和角度的阈值比较,若小于阈值则定为地面点,归入三角网中。④迭代循环步骤②、③直至分类完所有实验区点云。

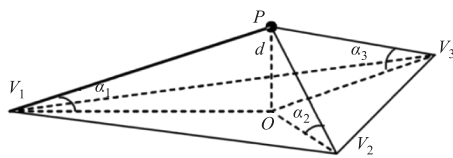


图 1 判断地面点

Fig. 1 Judging ground points

2.2 PTD 算法的改进技术

PTD 滤波算法每次迭代过程中,都对其余各点到所在三角形的反复角和反复距离进行阈值判断,将满足条件的点加到 TIN,初始构建的 TIN 对后续滤波判断影响较大。PTD 滤波算法把尺寸大于研究区最大建筑物尺寸的格网中的最低点视为地面点,从该角度出发又考虑实验区山体两侧沟壑丛生,且对于山地滤波,山体与地面存在高程差,山体的地面点更易被误识别为非地面点。因此在 PTD 滤波算法选取种子点时,加入山脊线和山谷线交汇的地形特征点,通过地形特征点使山体两侧构建密集且符合实际地形的三角网,使山体两侧的点易通过角度和距离的阈值。针对实验区特殊地形分布情况,改进种子点选择方法,使点位分类在构建 TIN 中符合实际情况。如 2 图所示, $C_1 \sim C_5$ 是初始种子点, A 和 B 是在脊-谷的位置选择特征点, AB 连线是构建三角网底边,点 G_1 和 G_2 是三角网下部的点,与 B 点在同一三角网但高程值低于 A 点。 G_2 点为非地面点, G_1 为地面点,所以仍不能将三角网的下部点均视为地面点。

为此需要不断剔除最远点和增加点构建移动曲面,确保点云规则传递并覆盖整个实验区,如 3 图

示,主要进行:①把实验区固定格网按建筑物最大尺寸划分;②确定实验区最外围格网高程最低点,以此为地面种子点;③点 A 、 B 、 C 、 D 是研究区四个角格网中心,以此构网,域内全部点为中心建立移动格网;④如图 4 示,进行多尺度迭代把移动格网内最低高程点作为地面种子点;⑤剔除重复点,并和格网外地面种子点建立实验区地面种子点。

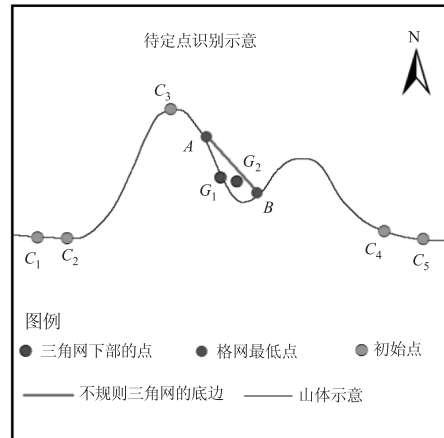


图 2 表示待定识别

Fig. 2 Shows the pending point identification

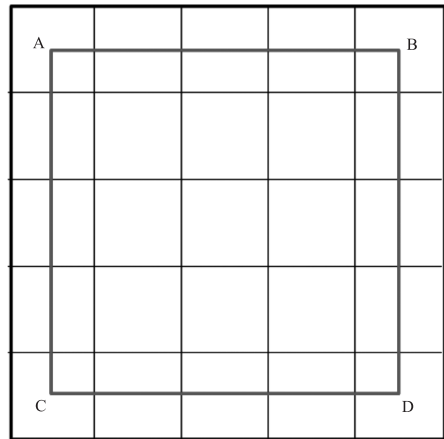


图 3 移动格网构建

Fig. 3 Mobile grid construction

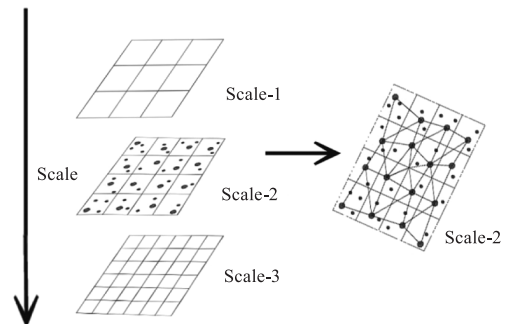


图 4 格网多尺度迭代

Fig. 4 Multi-scale iteration of the grid

为避免格网缺失产生的错误分类,格网 $ABCD$ 外部不再构建移动格网。每个移动格网均依照实验

区建筑物最大尺寸划分,既保证了所有格网均有地面点,又确保获取地面种子点无需进一步优化,直接进入三角网迭代判断的步骤。

3 试验区及试验数据采集

3.1 试验区

研究区域位于云南禄丰恐龙国家地质公园南缘山区,隶属云南楚雄彝族自治州,地理坐标为 N 24° 51'33" ~ 25°30'45", E 101°38'06" ~ 102°24'34"。测区范围内地貌类型复杂多样,以构造侵蚀地貌、方山地貌为主,地势东北高,西南低,最高海拔 2200 m,最低海拔 1302 m,干湿分明。由于测区内存在小型中生代红色沉积盆地,成土母岩由中生代紫色砂页岩和元古代的碳酸盐岩交错分布,受母岩影响,土壤类型呈带分布,紫色和红色土壤分布广泛,测区位置如图 5 所示。

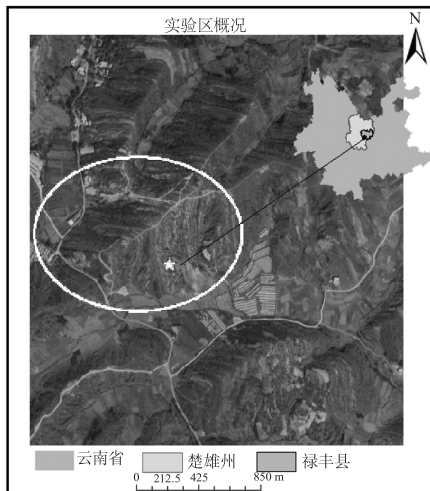


图 5 实验区概况

Fig. 5 Overview of the experimental area

3.2 试验数据采集

试验区影像数据获取是通过 DJI Phantom 4 RTK 进行影像数据采集。首先根据测区实际周边地理环境,交通状况,结合 Google earth 平台对测区进行航线规划,其次通过前期航线规划以及后期数据质量要求,选择合适的参数设置。鉴于本次数据获取主要面向微地貌特征分析应用,故本次飞行参数设置为:航向重叠度 80%,旁向重叠度 80%,平均飞行高度 150 m。本次航测天气条件良好,共采集 392 张影像,影像平均分辨率为 0.07 m。

4 实验分析

4.1 基于 DIM 点云可视化分析

通过对实测影像进行提取同名像点、特征匹配、计算旋转矩阵、对选择矩阵进行畸变校正和光束法平差迭代完成影像密集匹配获取 DIM 点云。点云

密度为 154.66 个/m²,标准差为 16.13 m。因无人机航测影像仅包含可见光波段,不具备透过地表已有地物如:植被、建筑物、信号塔等,即 DIM 点云含有噪声点和高程异常点,初步获得地表 DIM 点云生成 DSM,如图 6 所示。

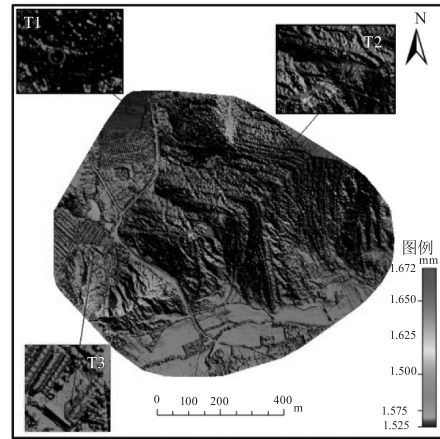


图 6 数字表面模型(DSM)

Fig. 6 Digital surface model(DSM)

由图 6 可知,恐龙谷南缘山区受亚热带低纬度高原季风气候影响山体沟壑交错,常年干湿分明,也导致山体右侧坡度通过目视解译判断接近 90°。DSM 中明显高程异常有 T₁、T₂ 和 T₃ 的三个区域,在数字正射影像(Digital Orthophoto Map; DOM)图 7 中选定同样三个区域,DOM 包含真实色彩信息,可判断出 T₁ 区域表示实测区域植被覆盖区域,主要是低矮独立树和灌木。T₂ 区域是山顶的信号塔,信号塔在一定程度上确保了免像控无人机对山区进行航测时获取 POS 的精度,但因信号塔自身高程值,后续构建 DEM 同样需先进行点云滤波处理。T₃ 区域是山脚的建筑物和蔬菜大棚,经实地勘察该区域建筑物不超两层,除上述三个区域的地表地物,实验区西北角和东南角分布的低矮灌木和农作物均需要滤波处理。

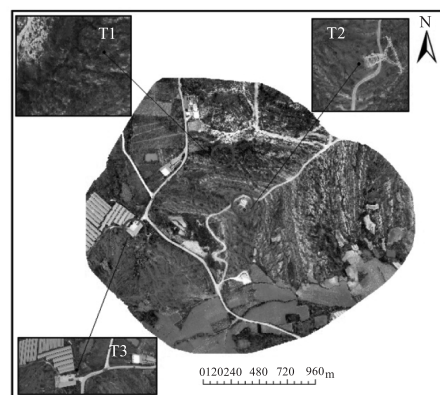


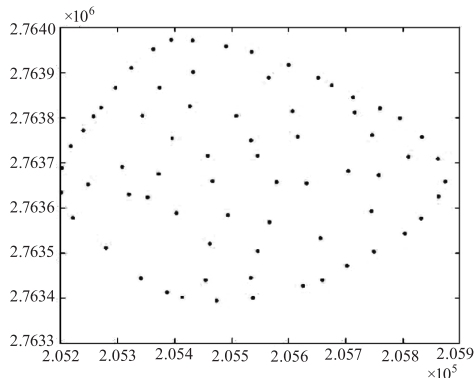
图 7 正射影像图(DOM)

Fig. 7 Digital orthophoto map(DOM)

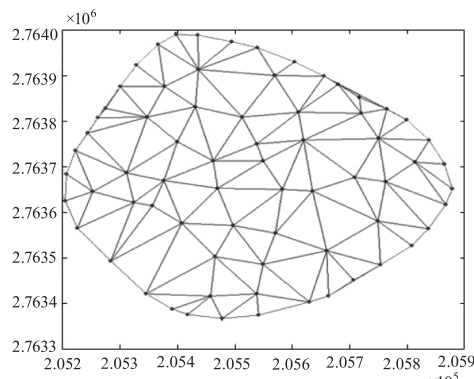
4.2 基于 PTD 改进的点云滤波处理成效对比分析

4.2.1 PTD 滤波处理及去噪成效分析

实验通过“试错法”调整阈值,选定最大地形坡度角为 88° ,迭代角度阈值设置为 6° ,迭代距离设置为 1.4 m。70 个初试种子点选取如图 8(a) 示,种子点除了边界点,其余均匀分布于实验区,由 70 个种子点构建 TIN 如图 8(b) 示,构建三角网较为规整。



(a) 滤波种子点



(b) 种子点构建不规则三角网

图 8 滤波种子点及种子点构建不规则三角网

Fig. 1 Distribution representing filtered seed points and seed points constructing an irregular triangular network

实验区采集 DIM 点云有 17271784 个点,由初试种子点构建 TIN 进行 PTD 滤波,剔除非地面点并进行冗余数据抽稀,最后保留地面点 5723274 个点。

4.2.2 改进 PTD 滤波处理技术应用

对于上述 PTD 滤波算法对实验区造成山体部分区域地面点被误识别为非地面点,实验区位于滇中高原,山体顶部两侧与山底存在高程差,山顶和山脊区域易误选为非地面点。因此,在 PTD 滤波算法基础上选取种子点时,依据实验区特性,在 ArcGIS 中基于地表水流分析和几何分析相结合的方法提取山脊线和山谷线,二者交汇的脊-谷地形特征点为改进 PTD 滤波算法的种子点。图 9 为主要山脊线、山谷线分布和脊-谷交汇点示意。

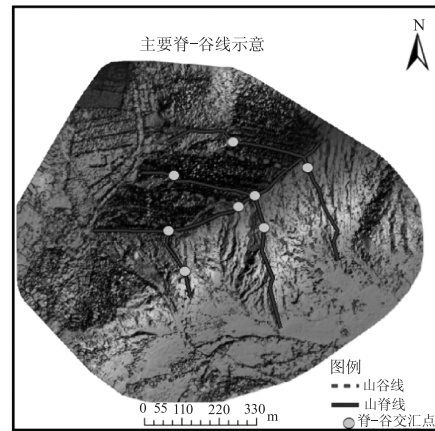


图 9 主要脊-谷线示意

Fig. 9 Schematic representation of the main ridge-valley lines

对于地形特征点的选取精度评价需构建一个评价模型。评价模型的构建主要包含:①剔除冗余数据,保留主要脊-谷特征线;②统计地形特征点数量,用 M 表示;③主要脊-谷特征线以 1 m、5 m、10 m 和 15 m 为线性单位构建缓冲区,计算落入缓冲区范围内地形特征点数量,压盖边缘的点同样算入,用 N_i ($i=1, 5, 10, 15$) 表示其数量;④ Q_i ($i=1, 5, 10, 15$) 表示在缓冲区内地形特征点数量占总点数的比,具体如式 1,以此为地形特征点选取精度标准。

$$Q_i = \frac{N_i}{M} \times 100\% \quad (1)$$

统计分析如表 1 所示,本次共提取 486 个地形特征点,以 1 m 为距离的缓冲区中涵盖 27 个点,仅占总数的 5%,5 m 为距离的缓冲区包含 132 个点,占总数的 27.16%,15 m 为距离的缓冲区有 429 个点,占 88.27%。后续试验较少的种子点会造成滤波精度低,较多的种子点在处理过程中导致处理效率不高,故以 10 m 为缓冲距离覆盖地形特征点为改进 PTD 滤波算法的种子点。

表 1 地形特征点提取精度评价

Tab. 1 Accuracy evaluation of terrain feature point extraction

缓冲区距离/m	N_i /个	M /个	Q_i /%
1	27	486	5.56
5	132		27.16
10	364		74.89
15	429		88.27

以图 8(a) 初始种子点并叠加提取的脊-谷交汇的地形特征点,二者共有 300 个点为种子点,如图 10 所示。通过此类改进使选取种子点贴合实验区地形分布,并对选取种子点完成 TIN 构建如图 10

(b)所示。通过改进方法构建三角网,位于山体两侧相对于初始构建,三角网更为密集。改进滤波算法并进行冗余点抽希保留 6692859 个地面点,相对于 PTD 滤波算法保留地面点更充足。

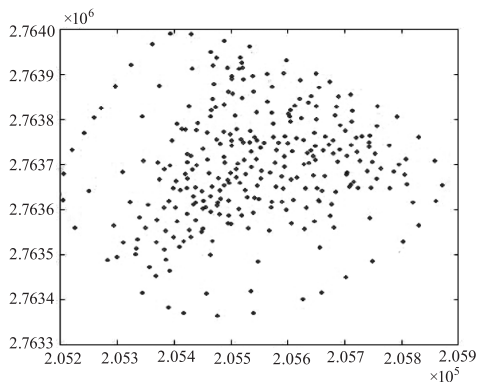


图 10 (a)地形特征点

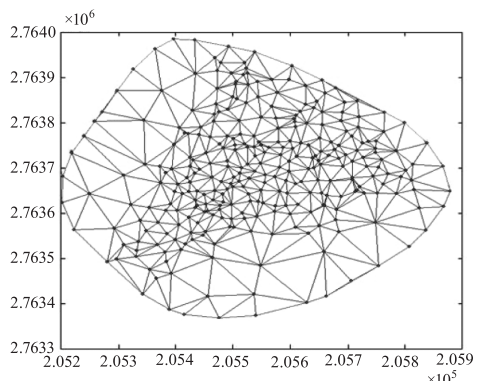


图 10 (b)特征点构建不规则三角网

图 10 地形特征点及特征点构建不规则三角网

Fig. 10 The terrain feature points and the feature points constructing an irregular triangular network

4.2.3 改进 PTD 去噪结果对比分析

对两种滤波方法保留的地面点进行目视解译,对 PTD 滤波算法得到地面点结果和脊 - 谷交汇特征点叠加初始选取种子点结合构建不规则三角网云滤波结果均显示真实色彩信息,以图 11 和图 12 示。对比分析两种点云滤波结果,结果表示:①两种方法均保留山体整体轮廓特征,上述可视化分析地表地物 T_1 区域的低矮植被 PTD 滤波算法结果基本保留原有特征而改进 PTD 滤波算法剔除部分低矮植被,并未完全清除,植被覆盖区域点云出现小面积空洞现象; T_2 区域两种滤波算法均把信号塔剔除; T_3 区域建筑物被两种算法过滤,但 PTD 滤波算法对蔬菜大棚仍有冗余信息,而改进 PTD 相对来说剔除大部分蔬菜大棚。②实验区山体按道路划分左侧 K_1 区域和右侧 K_2 、 K_3 区域 PTD 滤波算法均误把山体面点识别为非地面点剔除,从而在山体两侧出现点云空洞的情况。而改进 PTD 滤波算法对 K_1 、 K_2 和 K_3 区域的山体地面信息都较为完整保留。

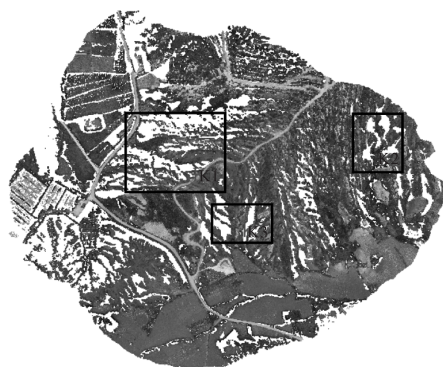


图 11 PTD 滤波算法结果

Fig. 11 Results of PTD filtering algorithm

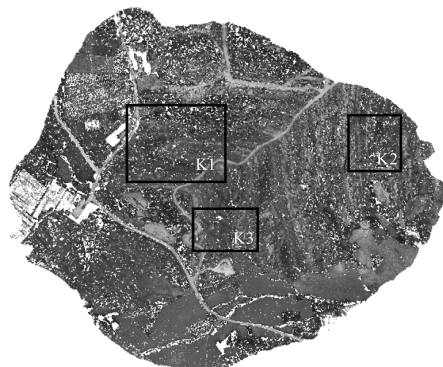


图 12 改进 PTD 滤波算法结果

Fig. 12 Results of the improved PTD filtering algorithm

5 结论

无人机 DIM 点云滤波处理不仅在地物分类、地物单体化提取和地形特征分析中起决定性作用,剔除地物点对后续生成相关产品也是核心步骤。对于恐龙谷南缘山区 DIM 点云,考虑实验区位于滇中高原和山体本身与地面就存在高程差,选择使用 PTD 滤波算法对山区进行滤波处理并依据地形特征点对 PTD 滤波算法进行改进试验研究。结果表明:①明显地物在被剔除的同时,较为完整保留整个实验区,明显地物中山体两侧低矮植被和山脚蔬菜大棚基本未被剔除,山顶信号塔和山脚建筑物全部清除,但山体部分的地面点易被识别为非地面点而在出现山体 K_1 、 K_2 、 K_3 区域的空洞现象。②对此,针对恐龙谷南缘山区复杂地形,提出以脊 - 谷交汇地形特征点为改进 PTD 滤波算法的种子点,在山体两侧精细构网,山体低矮植被部分清除,相对于 PTD 滤波算法蔬菜大棚大面积被清除。且山体两侧未出现明显点云空洞的现象。

DIM 点云通过脊 - 谷交汇地形特征点改进 PTD 算法对山区点云滤波相对于经典 PTD 算法更为精准区分地面点和非地面点,为后续地形地貌提取和分析提供了空间数据支持依据。但对于复杂地形和地形起伏度较大区域,对于地形特征点作为种子点

的 PTD 滤波算后续研究中对提高提取地形特征点的精确性有待进一步加强。

参考文献:

- [1] Gordana Jakovljevic, Miro Govedarica, Flor Alvarez-Ta-
boada, et al. Accuracy assessment of deep learning based
classification of LiDAR and UAV points clouds for DTM
creation and flood risk mapping [J]. *Geosciences*, 2019,
9 (7) :.
- [2] Mustafa Zeybek, İsmail Şanlıoğlu. Point cloud filtering on
UAV based point cloud [J]. *Measurement*, 2018, 133 :.
- [3] Ye Lizhi. Intelligent terrain extraction from airborne Li-
DAR and dense stereo matching point clouds [D]. Wu-
han; Wuhan University, 2016. (in Chinese)
叶立志. 机载 LiDAR 与影像密集匹配点云数据的滤波
方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [4] Sheng Nie, Cheng Wang, Pin Liangdong, et al. A revised
progressive TIN densification for filtering airborne LiDAR
data [J]. *Measurement*, 2017, 104: 70 - 77.
- [5] Gao Guang, Ma Hongchao, Zhang Liang, et al. A ground
filtering algorithm for airborne LiDAR in consideration of
terrain break lines [J]. *Geomatics and Information Science
of Wuhan University*, 2015, 40 (4) : 474 - 478. (in Chi-
nese)
高广, 马洪超, 张良, 等. 顾及地形断裂线的 LiDAR 点
云滤波方法研究 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*,
2015, 40 (4) : 474 - 478.
- [6] Zhang Jixian, Lin Xiangguo. Filtering airborne LiDAR da-
ta by embedding smoothness-constrained segmentation in
progressive TIN densification [J]. *ISPRS Journal of Photo-
grammetry and Remote Sensing*, 2013, 81 (Jul) : 44 - 59.
- [7] Junichi Susaki. Adaptive slope filtering of airborne LiDAR
data in urban areas for Digital Terrain Model (DTM)
generation [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4 (12) : 1804
- 1819.
- [8] Wang Jingxue, Zhang Xueyang, Hong Shaoxuan, et al.
Aerial LiDAR point cloud filtering algorithm combining
mathematical morphology and TIN [J]. *Acta Geodaetica et
Cartographica Sinica*, 2019, 44 (5) : 151 - 156, 183. (in
Chinese)
- 王竞雪, 张雪洋, 洪绍轩, 等. 结合形态学和 TIN 三角
网的机载 LiDAR 点云滤波算法 [J]. *测绘科学*, 2019,
44 (5) : 151 - 156, 183.
- [9] Han Hu, Yu Linding, Qing Zhu, et al. An adaptive surface
filter for airborne laser scanning point clouds by means of
regularization and bending energy [J]. *ISPRS Journal of
Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 92 (2) :
98 - 111.
- [10] Li Raobo, Yuan Xiping, Gan Shu, et al. Point cloud sim-
plification optimization strategy and experimental research
based on multiple algorithms [J]. *Laser & Optoelectronics
Progress*, 2020, 57 (23) : 190 - 198. (in Chinese)
李绕波, 袁希平, 甘淑, 等. 综合多种算法的点云精简
优化策略与实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*,
2020, 57 (23) : 190 - 198.
- [11] Li Yameng, Li Chaokui, Wang Shuhan, et al. A CSF-modi-
fied filtering method based on topography feature [J]. *Re-
mote Sensing Technology and Application*, 2019, 34 (6) :
1261 - 1268. (in Chinese)
李雅盟, 李朝奎, 王书涵, 方军. 一种顾及地形特征的
布料模拟滤波改进方法 [J]. *遥感技术与应用*, 2019,
34 (6) : 1261 - 1268.
- [12] Yang Na, Qin Zhiyuan, Zhu yan, et al. Object-oriented fil-
tering method for airborne LiDAR point clouds [J]. *Jour-
nal of Geomatics Science and Technology*, 2014, 31 (2) :
157 - 161. (in Chinese)
杨娜, 秦志远, 朱艳, 等. 面向对象的机载 LiDAR 点云滤
波方法 [J]. *测绘科学技术学报*, 2014, 31 (2) : 157 - 161.
- [13] Wu Congcong, Lu Xiaoping, Li Guoli, et al. Research on
filtering algorithm for LiDAR data based on TIN [J]. *Bul-
letin of Surveying and Mapping*, 2013, (3) : 32 - 35. (in
Chinese)
吴丛丛, 卢小平, 李国利, 等. 基于 TIN 的 LiDAR 数据
滤波算法研究 [J]. *测绘通报*, 2013, (3) : 32 - 35.
- [14] Zhan Qiao, Gan Shu, Yuan Xiping, et al. Point cloud sam-
pling analysis and change detection of landslide body in
debris flow valley [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50 (2) :
136 - 142. (in Chinese)
詹俏, 甘淑, 袁希平, 等. 泥石流沟谷滑坡体的点云采样分
析及变化检测 [J]. *激光与红外*, 2020, 50 (2) : 136 - 142.