

利用倾斜摄影三维点云制作数字高程模型技术方法

胡小鹏¹, 陈振宇², 陈敏铭³, 陈建忠⁴

¹云南信大空间信息技术有限公司, 云南 昆明

²甘肃省地质矿产勘查开发局第一地质矿产勘查院, 甘肃 天水

³常州星图科技有限公司, 江苏 常州

⁴南京邮电大学物联网工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年3月2日; 录用日期: 2026年3月25日; 发布日期: 2026年4月2日

摘要

对SOR滤波后的点云进行布料模拟滤波处理是大规模自动化生成数字高程模型(DEM)的关键技术, 但是, 如何从点云中“剔除”树木、房屋等点, 只留下真正的地面点, 从而生成DEM, 技术方法仍然需要提升。本文基于Python开放生态, 开发了一整套点云文件边界矢量提取、点云文件批量筛选、点云区块文件批量选择与复制、统计离群点移除滤波方法删除离群点、布料模拟滤波处理与参数确定的数据处理系统。利用该系统处理了甘肃某地区45平方公里的DEM, 利用320个检查点对高程质量进行检查, 高程点位中误差为0.087米, 成果精度符合规范要求, 为后续地理信息系统应用提供了可靠的基础数据。

关键词

倾斜摄影测量, 点云, Python, 布料模拟滤波处理

Technical Method of Producing Digital Elevation Model Using Oblique Photography 3D Point Cloud

Xiaopeng Hu¹, Zhenyu Chen², Minming Chen³, Jianzhong Chen⁴

¹Yunnan Xinda Space Information Technology Co., Ltd., Kunming Yunnan

²The First Institute of Geology and Mineral Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Tianshui Gansu

³Changzhou Xingtu Technology Co., Ltd., Changzhou Jiangsu

⁴School of Internet of Things Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu

Abstract

Fabric simulation filtering of SOR filtered point clouds is a key technology for large-scale automated generation of digital elevation models (DEMs), but how to “exclude” trees, houses and other points from point clouds, leaving only real ground points, so as to generate digital DEMs, the technical method still needs to be improved. Based on the Python open ecosystem, this paper develops a complete set of data processing systems for point cloud file boundary vector extraction, point cloud file batch filtering, point cloud block file batch selection and copying, statistical outlier removal filter method to delete outliers, cloth simulation filter processing and parameter determination. The system was used to process the DEM of 50 square kilometers in a certain area of Gansu, and the elevation quality was checked by 320 inspections. The error in the elevation point was 0.087 meters, and the accuracy of the results met the requirements of the specification, which provided reliable basic data for the subsequent application of geographic information system.

Keywords

Oblique Photogrammetry, Point Clouds, Python, Fabric Simulation Filtering

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

数字高程模型(DEM)作为地理信息系统(GIS)及遥感应用中的基础数据[1],其高精度和自动化生产技术始终是学界和行业关注的重点。随着激光雷达(LiDAR)、摄影测量等多源点云数据的快速发展,针对地面点云的滤波和DEM生成技术日益成熟。

1) 基于规则和阈值滤波的方法

此类方法通过设置坡度变化、高程差或邻域距离等简明规则,对点云进行分类和剔除非地面点。其计算过程简单、效率较高,适合地形较为平缓、地物分布规律明确的区域[2]。然而,在复杂地形或密集植被覆盖区往往难以准确区分地面与非地面点,容易造成误剔除或遗漏。

2) 基于统计分析的滤波方法

统计方法通常利用点云的高度分布特征、邻域密度及离群点检测等技术,有效去除异常点和显著噪声[3]。相比简单规则方法,统计滤波更具灵活性和鲁棒性,但对复杂城市建筑等结构物的识别仍存在一定局限。

3) 基于机器学习与深度学习的方法

随着计算能力提升,机器学习特别是深度学习技术被广泛应用于点云分类[4]。该方法可通过训练模型自动识别地面与非地面点,在复杂环境下表现出良好的泛化能力和判别精度。但其依赖大量标注数据且计算资源需求较高,限制了部分场景的推广应用。

4) 物理模拟滤波方法

布料模拟滤波通过模拟柔性布料覆盖点云表面,利用布料“下垂”至地面点的物理特征[5],实现地

面点的提取。该方法能自适应复杂地形和密集植被覆盖区域，自动剔除树木、建筑等非地面点，滤波效果自然且鲁棒。尽管参数调试对结果影响较大，且计算过程较为复杂，但其在大规模自动化 DEM 生成中表现出显著优势。

5) 多方法融合技术

实践中，多数系统结合多种滤波策略，例如先用统计方法剔除噪声点，继而应用布料模拟或机器学习处理细节，通过算法融合提升处理效率和最终 DEM 精度[6]。这种复合策略兼顾了方法各自优势，更适应复杂多变的点云数据特性。

当前 DEM 生产技术在处理效率与滤波精度之间寻求平衡[7]，简单规则及统计方法虽高效但存在精度瓶颈，机器学习技术精度较高但资源消耗大。布料模拟滤波基于物理机制，能够较好适应多变地形且实现较高的自动化水平，特别适合大规模点云数据的处理。将此类物理模拟方法与 Python 等开放生态系统结合，形成集成自动化处理流程，已成为高质量 DEM 生产的重要发展趋势。

本文依据《基础地理信息数字成果 1:500 1:1000 1:2000 数字高程模型》(《规范》)相关技术要点，系统地总结了 13 个区块 45.3 平方公里 DEM 的生产技术流程与方法。

本文采用倾斜摄影测量获取的三维点云数据，通过自动化处理与人工编辑相结合的方式，确保了 DEM 成果的精度与可靠性。

2. 项目任务与技术要求

2.1. 项目任务

项目任务为生产 45.3 平方公里的数字高程模型，覆盖马跑泉镇、甘泉镇、花牛镇、桥南街道及社棠镇等区域。按照《规范》二级精度要求，确保 DEM 成果满足规范标准。

2.2. 精度指标

DEM 精度指标如表 1 所示。

Table 1. DEM accuracy index

表 1. DEM 精度指标

| 比例尺 | 高程中误差(m) | |
|--------|----------|-----|
| | 二级 | |
| 1:2000 | 平地 | 0.5 |
| | 山地 | 1.5 |

3. 技术路线与方法

本文采用的技术路线包括数据检查、区块划分、点云去噪、布料模拟滤波(CSF)、人工精修、质量检查、像控点验证、区块拼接、DEM 裁剪及报告撰写等 10 个关键环节。技术路线如图 1 所示。

4. DEM 生产流程

4.1. 原始数据整理检查

本文将二个工作区分为 13 个区块，区域面积为 50.28 平方公里。

利用 Python 开发点云瓦片空间分布形态生成工具和点云文件处理工具，对点云文件进行处理，读取点云文件中的空间坐标信息，计算点云瓦片的长度和宽度，生成空间位置 shp 文件，将 shp 文件与二个

工作区范围矢量进行空间比较，确定二个工作区所涉及的点云瓦片文件。

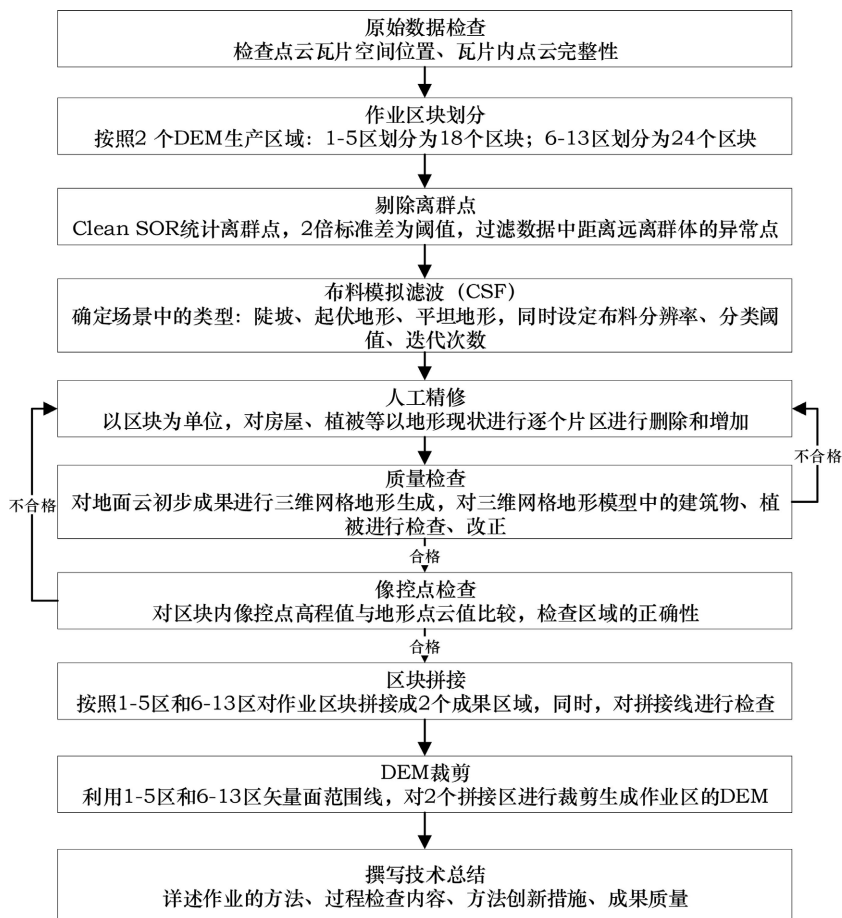


Figure 1. DEM production technology roadmap
图 1. DEM 制作技术路线图

1) 点云瓦片的空间分布(图 2)



Figure 2. Point cloud file boundary generation tool
图 2. 点云文件边界生成工具

利用点云文件边界生成工具,对二个工作区内的点云进行处理,生成相应的点云瓦片文件矢量 shp 范围,判断其空间分布与二个工作区范围的一致性。

2) 点云文件处理

确定项目区点云瓦片文件齐全后,用工作区矢量的空间位置,对点云瓦片文件进行空间选择获得点云瓦片的文件名称和存放文件位置,将区域空间选择的结果表制作成点云文件对照表,如图 3。

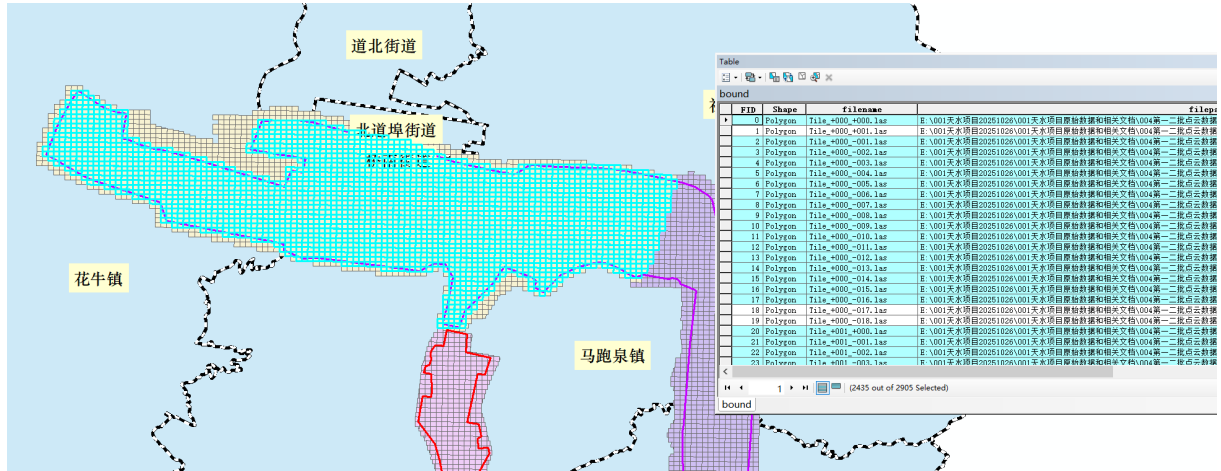


Figure 3. Selecting a point cloud file from the location of the project area to create a file copy comparison table
图 3. 用项目区位置选择点云文件制作文件拷贝对照表

开发点云文件拷贝文件工具,如图 4,按 DEM 制作的二个工作区对应的点云文件拷贝到工作文件夹内。点云瓦片名称放在对照表的第 2 列,用的是全文件名,有扩展名.las,其余目录等信息是通过工具相应栏目进行选择,与对照表无关。



Figure 4. Copying point cloud files using the batch copy tool for point cloud files
图 4. 利用点云文件批量复制工具复制点云文件

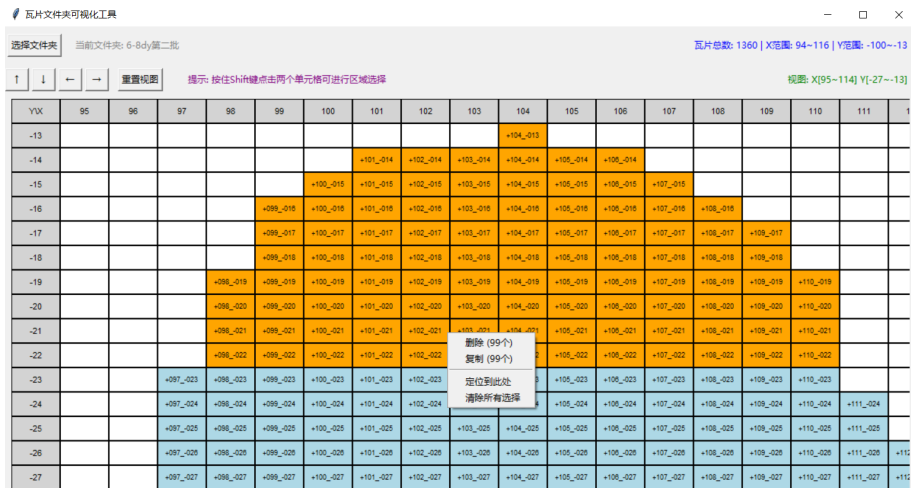


Figure 7. Tile file space location visualization tool
图 7. 瓦片文件空间位置可视化工具

确定工作区块后，依次建立区域文件夹，将对应点云瓦片文件批量拷贝其中，如图 8。

| | | | | | |
|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|----------|------------|
| HundredSecond1 | 2025/1/16 7:45 | Tile_+008_019.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 64,106 KB |
| HundredSecond2 | 2025/1/16 7:46 | Tile_+008_018.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 45,564 KB |
| HundredSecond3 | 2025/1/16 7:46 | Tile_+008_017.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 51,555 KB |
| HundredSecond4 | 2025/1/16 7:46 | Tile_+008_016.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 69,495 KB |
| HundredSecond5 | 2025/1/17 13:16 | Tile_+008_015.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 73,358 KB |
| HundredSecond6 | 2025/1/16 7:46 | Tile_+008_014.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 69,781 KB |
| HundredSecond7 | 2025/1/16 7:46 | Tile_+008_013.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 102,657 KB |
| HundredSecond8 | 2025/1/16 7:46 | Tile_+008_012.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 34,675 KB |
| HundredSecond9 | 2025/1/16 7:46 | Tile_+008_011.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 43,564 KB |
| HundredSecond10 | 2025/1/16 11:21 | Tile_+008_010.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 59,185 KB |
| HundredSecond11 | 2025/1/16 7:46 | Tile_+008_009.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 58,386 KB |
| HundredSecond12 | 2025/1/16 7:46 | Tile_+008_008.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 38,504 KB |
| HundredSecond13 | 2025/1/16 7:46 | Tile_+007_019.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 60,996 KB |
| HundredSecond14 | 2025/1/15 10:25 | Tile_+007_018.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 48,484 KB |
| HundredSecond15 | 2025/1/16 7:47 | Tile_+007_017.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 51,370 KB |
| HundredSecond16 | 2025/1/16 7:47 | Tile_+007_016.las | 2025/10/31 16:17 | Reshaper | 71,125 KB |
| HundredSecond17 | 2025/1/16 7:47 | Tile_+007_015.las | 2025/10/31 16:16 | Reshaper | 73,769 KB |
| HundredSecond18 | 2025/1/16 7:47 | Tile_+007_014.las | 2025/10/31 16:16 | Reshaper | 85,258 KB |
| HundredSecond19 | 2025/1/16 7:47 | Tile_+007_013.las | 2025/10/31 16:16 | Reshaper | 107,634 KB |

Figure 8. Block folder creation and tile file copying
图 8. 区块文件夹建立与瓦片文件拷贝

以工作区块为单元，对单个点云瓦片文件进行合并，建立一个点云处理工程，如图 9。

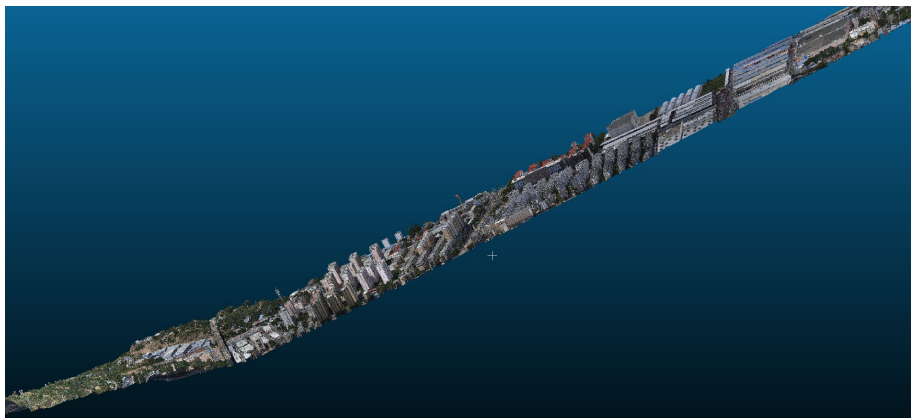


Figure 9. Block point cloud files are merged into one project
图 9. 区块点云文件合并为一个工程

4.3. 删除离群点

本文采用 Clean SOR (统计离群点移除)滤波方法删除离群点[8]，主要用于去除点云数据中的噪声点或离群点，从而提高点云质量和后续处理的准确性

1) 邻域统计分析

对于点云中的每一个点，计算它与其邻域内，通常是固定数量的近邻点，如 K 个最近邻，其他点的距离统计特征，主要是计算该点到邻居点距离的平均值。

2) 计算距离均值和标准差

统计所有点的邻域平均距离，得到整体的均值(Mean)和标准差 STD。

3) 判定离群点

本文采用均值加上 2 倍的标准差设定阈值。如果某个点的邻域平均距离明显大于这个阈值，说明它相对周围点离得比较远，是孤立点或者噪声点，被判定为离群点。否则，该点被认为是合理的正常点。

4) 剔除离群点

依据上述判定结果，将被认为离群的点删除或标记，从而“清理”点云。

据统计，经过 SOR 滤波后的本文区块，滤波前后区块点云文件相差 1~2 GB，SOR 滤波后的区块点云如图 10。

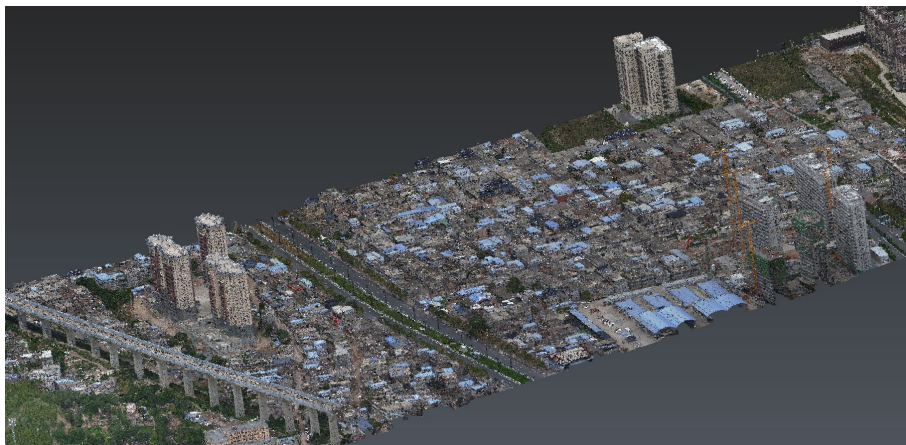


Figure 10. Block point cloud after SOR filtering
图 10. SOR 滤波后的区块点云

4.4. 布料模拟滤波

对 SOR 滤波后的点云区块工程进行布料模拟滤波处理(CSF)。CSF 从点云中“剔除”树木、房屋等点，只留下真正的地面点，从而生成数字高程模型(DEM)。

CSF 把点云当作一张不规则地形表面。在该点云的上方放置一块“虚拟布料”或者“弹性薄膜”。通过模拟布料的重力和弹性，使布料自然“贴合”点云表面。布料低垂的部分贴近真实地面，高于地面或悬空部分则对应植被、建筑物等障碍物。最后，通过布料位置和点云点之间的距离阈值，判断某个点是否属于地面点。处理流程：

1) 预处理

为了提高模拟效率，对点云数据进行网格化、空间索引处理。

设定布料的初始“高度”位置在点云上方一定距离。

2) 布料模拟

将布料看成一张由质点和弹簧连接构成的网格。

布料受到向下的重力作用和对节点间距离的弹性约束。

通过迭代求解布料质点的位置，模拟布料收敛稳定下垂状态。

3) 地面点判定

对每个点云点，计算其到布料表面的垂直距离。

距离小于阈值的点判为地面点，大于阈值判为非地面点。

4) 后处理

对地面点进行平滑滤波、连接等操作，得到完整的数字地形模型。

本文处理的地形属于高山、山区、丘陵、谷地混合地形，采用陡坡场景，经过单一地形和复合地形参数调试，最终确定了地形类型、布料分辨率、分类系数、刚度系数，相关参数如表 2。

Table 2. Reference table for topography, fabric, classification, and stiffness coefficient

表 2. 地形、布料、分类、刚度系数设置参考表

| 地形类型 | 布料分辨率 | 分类系数 | 刚度系数 |
|---------|---------|-----------|------|
| 平地 + 宽路 | 0.5~1.0 | 0.3~0.5 | 12 |
| 陡坡 + 窄路 | 0.3~0.4 | 0.15~0.25 | 2 |
| 人工平台 | 0.3~0.5 | 0.2~0.3 | 23 |
| 密集建筑 | 0.5 | 0.3 | 3 |

通过 CSF 处理，将地形点云提取出来，如图 11。在做 CSF 处理的过程中，为保证作业效率，同时，做了一次严格参数的地形处理，主要为单独高山和陡坡。

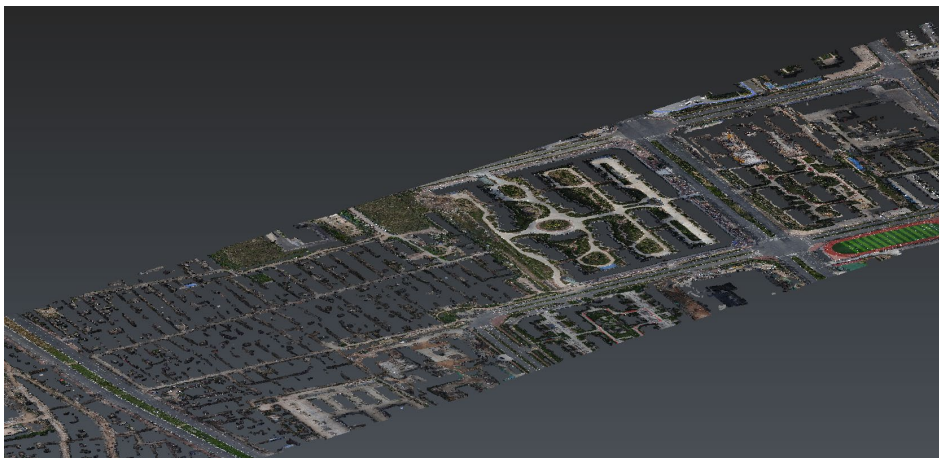


Figure 11. CSF-Processed block terrain point cloud

图 11. 经过 CSF 处理后的区块地形点云

4.5. 人工精修

对经过 CSF 处理后的地形点云通过人工逐区块进行修正，主要对建筑物、植被进行人工删除与增加要素。

1) 建筑物

CSF 处理后的点云由于高度阈值与特殊地形会出现房屋屋顶保留在地形点云里的情形，予以删除即可，如图 12。

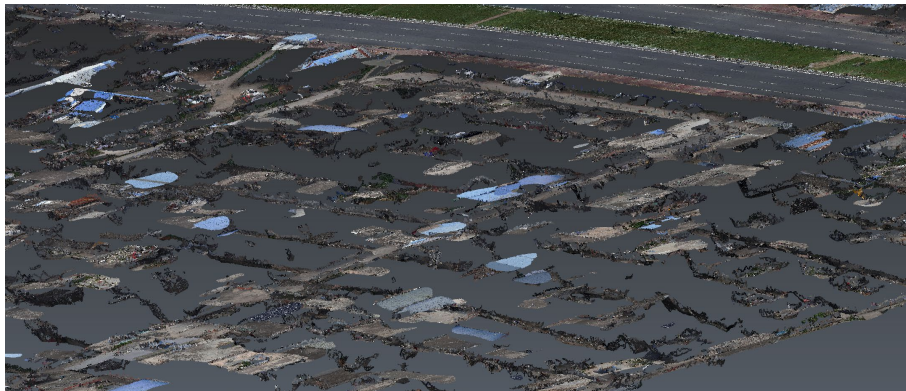


Figure 12. There are roofs that should not be retained in the CSF-treated terrain point cloud

图 12. CSF 处理后的地形点云中存在不应保留的屋顶

对建筑物屋顶保留在地形点云上的做删除处理，如图 13。

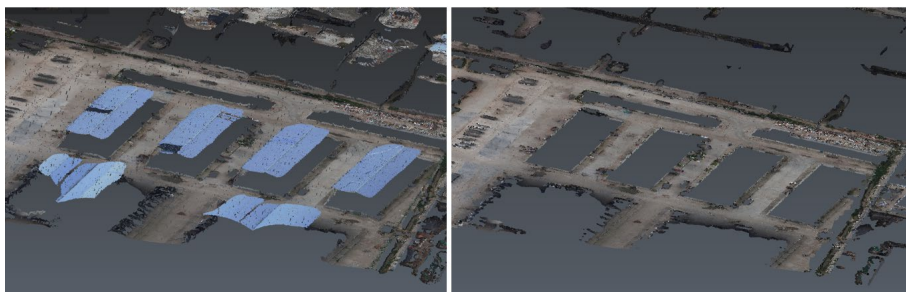


Figure 13. Deleting the roof point cloud

图 13. 删除屋顶点云

对删除后的建筑投影面与邻近地形无连接要素的，利用建筑投影面构建建筑地基以保证地形完整，如图 14。

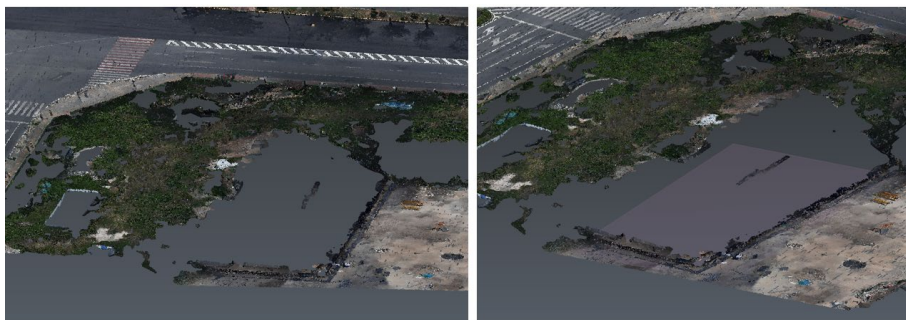


Figure 14. Filling in the foundation of the building with a plane

图 14. 用平面补齐建筑物地基

2) 植被

对地形由植被(树林)构成时,对树木统一降低高度,同时,保留 0.3~0.6 米保持地形的连续性,如图 15。

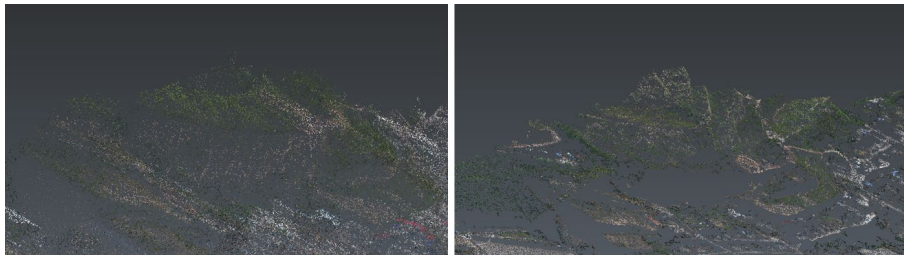


Figure 15. Reserving 0.3~0.6 m of woods to maintain terrain continuity

图 15. 保留 0.3~0.6 米的树林以保持地形的连续性

对稀疏树林、独立树木,则删除上述点云,利用周边地形要素构建地形点云,如图 16。

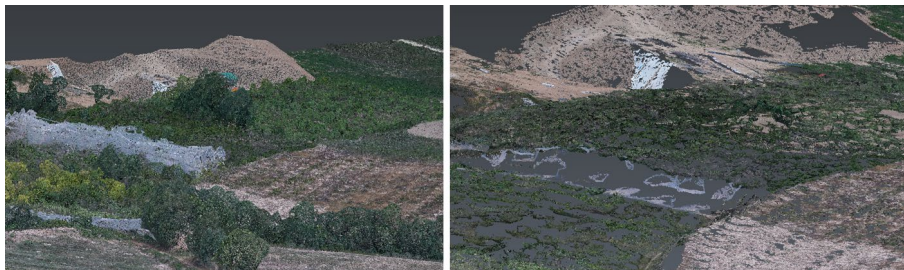


Figure 16. Deletion point cloud processing of trees

图 16. 对树木进行删除点云处理

4.6. 质量检查

对区块地形点云制作完成后采用 2 种方法对其质量进行检查、修正。

1) 全局检查点云的合理性

对区块点云调整到一定角度,根据局部地形对其进行截面查看,同时,对高于地面一定高度的点云进行选中,一般作删除处理,如图 17。

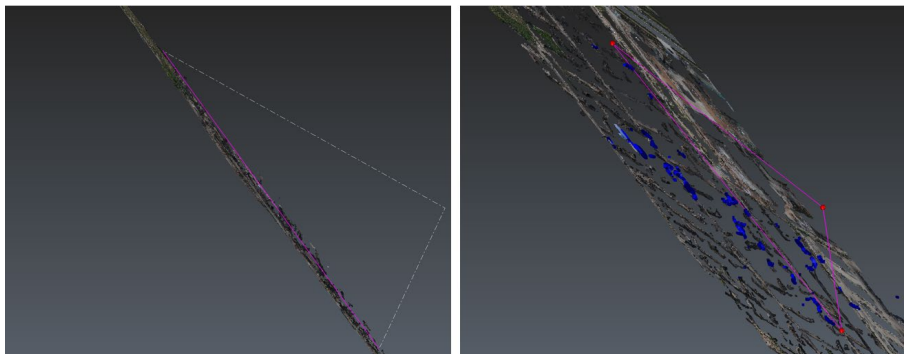


Figure 17. Cross-sectional inspection of local point clouds

图 17. 对局部点云作截面检查处理

2) 用三维地形检查地形点云

将区块点云构建三维地形，检查其地理要素的合理性和漏修要素的再修正，如图 18。

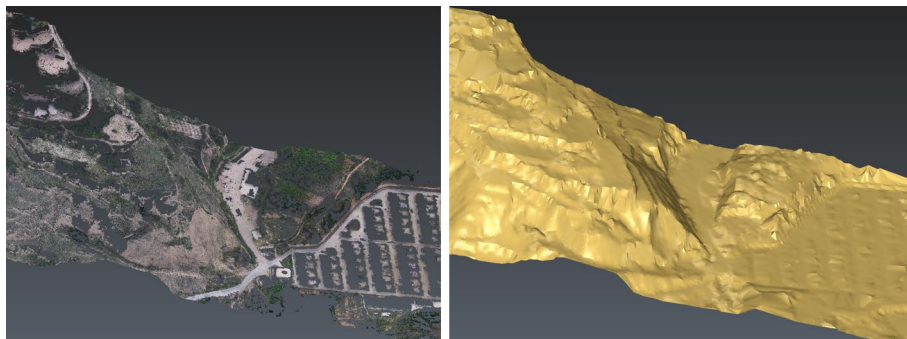


Figure 18. Examining the terrain point cloud using 3D topography
图 18. 利用三维地形检查地形点云

4.7. 区块拼接

本文分为二个工作区，一区位于马跑泉镇和甘泉镇的 13 平方公里的区域，二区位于花牛镇、桥南街道、马跑泉镇、社棠镇的 30 平方公里的区域，将对应的 18 个和 24 个区块点云进行下采样(抽稀)合并为一个点云文件，对点云建立新的点云集，将点云集采用反距离加权法点间最大距离设置为 0.5 米生成 DEM，如图 19(a)。

4.8. DEM 裁剪

利用项目区范围分区矢量，分别建立 5 米外扩缓冲区面，用 5 米缓冲区面分别对二个工作区的 DEM 进行裁剪，网格设置为 0.5 米，无值区为 0。经裁剪后的 DEM 成果如图 19(b)。

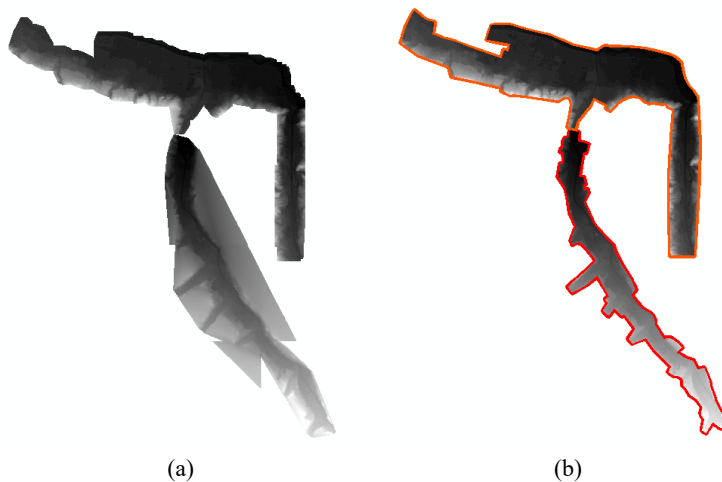


Figure 19. (a) DEM splicing diagram of the project area; (b) DEM cropping result diagram of the project area
图 19. (a) 项目区 DEM 拼接图; (b) 项目区 DEM 裁剪成果图

5. 结束语

本文通过自动化处理与人工编辑相结合的方式，高效完成了 45.3 平方公里 DEM 的生产任务。关键

技术包括点云滤波、区块化管理及质量控制,利用 320 个检查点计算出高程点位中误差为 0.078 米,成果精度符合规范要求,为后续地理信息系统应用提供了可靠的基础数据。

参考文献

- [1] 国家测绘局. 基础地理信息数字成果 1:500 1:1000 1:2000 数字高程模型: CH/T 9008.2-2010 [S]. 北京: 国家测绘局, 2010.
- [2] 张凯, 等. 基于布料模拟的点云滤波算法研究[J]. 测绘学报, 2018, 47(5): 123-130.
- [3] 李伟, 等. 倾斜摄影测量在城市 DEM 生产中的应用[J]. 遥感信息, 2020, 35(2): 89-95.
- [4] Zhang, K., Chen, S.-C., Whitman, D., Shyu, M.-L., Yan, J. and Zhang, C. (2003) A Progressive Morphological Filter for Removing Nonground Measurements from Airborne LIDAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**, 872-882. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2003.810682>
- [5] Sithole, G. and Vosselman, G. (2004) Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **59**, 85-101. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2004.05.004>
- [6] Wang, L. and Shan, J. (2009) A Comprehensive Review of the Methodologies Used for Filtering Airborne LiDAR Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **2**, 232-243.
- [7] Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., et al. (2016) An Easy-to-Use Airborne Lidar Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*, **8**, Article 501. <https://doi.org/10.3390/rs8060501>
- [8] Liu, R., Zhang, Y. and Zhang, S. (2021) Deep Learning-Based Point Cloud Filtering for Digital Terrain Model Generation: A Review. *Remote Sensing*, **13**, Article 5150.