引文格式：杨杰,陈小雁,李星华. 多源数据融合的激光雷达点云滤波方法研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):90-93. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.08.018

多源数据融合的激光雷达点云滤波方法研究

杨　杰[1]，陈小雁[1]，李星华[2*]
（1. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司，浙江 杭州 310014；2. 武汉大学 遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：渐进三角网加密算法（progressive TIN densification，PTD）在处理激光雷达点云数据时选择参数单一，大面积综合地形处理时自适性较差。基于此问题提出了一种多源数据融合的点云滤波方法，该方法首先对可见光遥感影像进行分类及后处理，再进一步融合激光雷达点云数据，通过PTD滤波法实现区域自适应滤波分离地面点。结果表明：基于面向对象的SVM分类方法相比于随机森林分类法在处理可见光遥感影像时效果显著，其平均总体分类精度最高为88.37%，平均Kappa系数最高为0.86；基于融合数据的PTD滤波法较单一PTD滤波法可实现区域自适应滤波，在处理复杂山区地形时可自动选择合理的参数进行点云滤波提取，极大地提高了地面点滤波精度。

关键词：机载激光雷达；PTD；滤波；分类；面向对象的SVM
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0090-04

Research on LiDAR Point Cloud Filtering Method for Multi-source Data Fusion

YANG Jie[1], CHEN Xiaoyan[1], LI Xinghua[2]
(1. Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;
2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The progressive TIN densification (PTD) algorithm faces limitations in parameter selection for laser point cloud data, particularly in comprehensive terrain processing. According to this problem, we proposed a point cloud filtering method for multi-source data fusion. We classified and post-processed optical remote sensing images at first. Then, we integrated laser point cloud data, and separated the ground points by regional adaptive filtering through the PTD filtering method. The results show that object-oriented SVM classification outperforms random forest classification for optical remote sensing images, with the highest average overall accuracy reaching 88.37% and the highest average Kappa coefficient reaching 0.86. The PTD filtering method based on fusion data demonstrates superior adaptability compared to singular PTD filtering, automatically selecting optimal parameters for point cloud filtering in complex mountainous terrains, significantly enhancing ground point filtering accuracy.

Key words: LiDAR, PTD, filtering, classify, objected-based SVM

机载激光扫描与探测系统（light detection and ranging，LiDAR）是一种通过激光对地扫描来获取地表空间信息的新型测量定位技术。其融合了激光测距系统、全球定位系统及惯性导航系统，可获取被测对象的三维坐标并生成精确的数字三维模型[1-2]。但受LiDAR传感器性能、悬空云雾及无人机飞行高度和速度等因素的影响，机载LiDAR点云会产生大量噪点，且在山区往往造成激光雷达多次回波技术“穿透”地表植被能力不佳，造成部分区域地面点丢失，点云处理软件滤波得到的地面点云通常无法直接用于制作数字高程模型（digital elevation model，DEM），需经过人工编辑后才能进一步使用。

针对去除噪声和提高地面点滤波精度，国内外学者对LiDAR点云滤波算法进行了大量研究[3-8]。但大量改进的渐进加密三角网算法在植被茂密且地貌复杂的区域内进行综合地形处理时，算法本身自适性较差，选择单一的6个参数[9]会出现近地点植被过滤效果不佳，植被冠层点被错分为地面点；同时，坡顶信息难以保留易形成山顶空洞。对此，本研究在LiDAR点云PTD滤波方法的基础上，提出了一种基于多源数据融合的点云滤波方法。

1　研究区概况

雅砻江锦屏大河湾，位于四川省凉山彝族自治州木里、盐源、冕宁三县交界处的雅砻江小金河口至巴折，全长150 km，为一条南北向长条形天然弯道，该河段年

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42171302）；浙江华东测绘与工程安全技术有限公司测绘工程院科研资助项目（ZKY2022-CA-02-02）。
第一作者简介：杨杰（1994—），硕士研究生，工程师，从事无人机摄影测量与遥感工作，E-mail：1505222549@qq.com。
通信作者：李星华（1988—），博士，副教授，博导，研究方向为多时相遥感，E-mail：lixinghua5540@whu.edu.cn 。

径流量约占全流域的9 %，多年平均流量为1 220 m^3/s，是雅砻江下游落差最大的河段[10]。本研究选取了大河湾其中一处植被茂密区域做为研究对象，如图1所示，其中1号区域作为实验区，2号区域作为验证区。

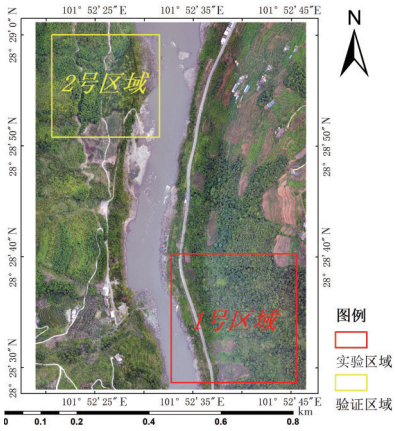


图1　雅砻江锦屏大河湾研究区范围

2　技术方法

2.1　数据采集与预处理

1）数据采集。本研究使用飞马D20多旋翼无人机搭载飞马DV-LiDAR20激光雷达获取得到研究区激光雷达点云数据；同时，使用飞马D2000无人机搭载D-cam3000正射相机获取得到研究区可见光遥感影像。

2）数据预处理。激光雷达点云数据预处理包括：轨迹数据解算、激光点云数据解算及航带数据拼接；可见光遥感影像数据预处理包括：空中三角测量、定向建模、正射影像纠正、影像镶嵌与裁剪等过程。研究区获取的同时相多源遥感数据坐标系均为CGCS2000，可见光遥感影像空间分辨率为0.05 m。

2.2　可见光遥感影像识别

本研究基于无人机获取的可见光遥感影像数据，采用支持向量机（support vector machines，SVM）和随机森林（random forests，RF）2种不同的机器学习算法进行对比研究。其中SVM算法能通过像素分割及合并产生待分类对象以减少处理单元及降低特征滤波噪声等问题，该分类算法在小样本条件下具有较强学习能力和泛化能力[11-13]。RF算法是一种统计学习理论，它是利用bootsrap重抽样方法从原始样本中抽取多个样本，对每个bootsrap样本进行决策树建模，然后组合多棵决策树的预测，通过投票得出最终预测结果[14]。分类得到研究区林地、耕地、草地、裸岩、水体、道路等主要地物，并对结果数据进行分类后处理，以消除因缺少空间连续性而产生的孤岛点。

2.3　数据融合的PTD滤波

本研究基于可见光遥感影像分类结果与激光雷达点云数据进行融合处理，使点云数据包含其所在位置的地物信息，通过点云地物范围信息建立自适应PTD分类参数，以自动提取得到地面点，如图2所示。

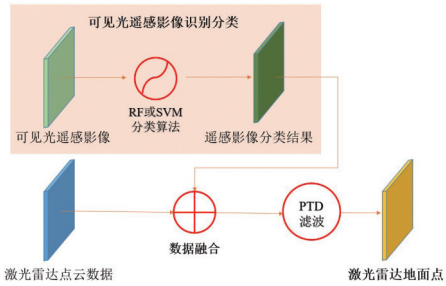


图2　数据融合的激光雷达点云滤波方法

2.4　滤波精度评价指标

地面点滤波精度评价使用以下2种指标：

1）平均绝对误差（MAE）

$$\mathrm{MAE}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|y_i-\widehat{y_i}\right|}{n} \tag{1}$$

2）平均相对误差（MAE）

$$\mathrm{MRE}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|\left(y_i-\widehat{y_i}\right)/\widehat{y_i}\right|}{n}\times 100\% \tag{2}$$

式中，y_i 为第 i 个检查点对应点云滤波后的地面高程值；$\widehat{y_i}$ 为第 i 个检查点真实地面高程值；n 为所选择的检查点个数。平均绝对误差与平均相对误差数值越小，说明点云滤波效果越好[15]。

3　结果与分析

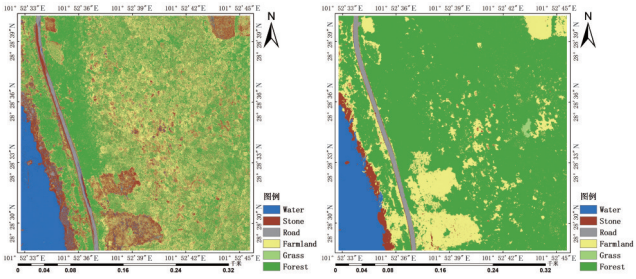
3.1　无人机影像分类结果与评价

为评价可见光遥感影像识分类效果，分别使用随机森林法与面向对象的SVM法对遥感影像进行分类，分类结果如图3所示。并计算总体精度、制图精度、用户精度和Kappa系数作为分类精度检验的定量评价方法，Kappa系数的计算公式如式（3）。

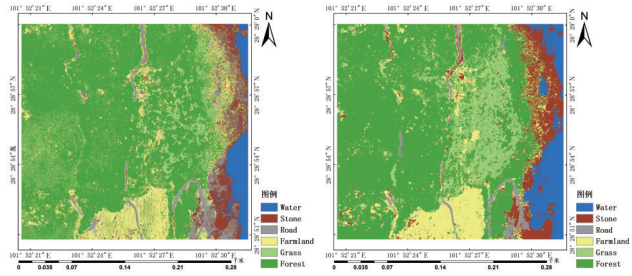
$$\mathrm{Kappa}=\frac{N\sum_{i=1}^{r}x_{ii}-\sum_{i=1}^{r}\left(x_i\times x_{+i}\right)}{N^2-\sum_{i=1}^{r}\left(x_{i+}\times x_{+i}\right)} \tag{3}$$

式中，r 为交叉表的行的数量；x_{ii} 为沿着对角线上的类型组合的数量；x_{i+} 为行 i 的总的观测数；x_{+i} 为列的总的观测数量；N 为单元格的总数量。

结果表明，基于随机森林法分类效果较差，林地、耕地及草地分类结果差，大量耕地像元被错分为裸岩，出现较多混分区域且破碎像元较多；相比于随



a 试验区随机森林法分类结果　b 试验区面向对象的SVM法分类结果



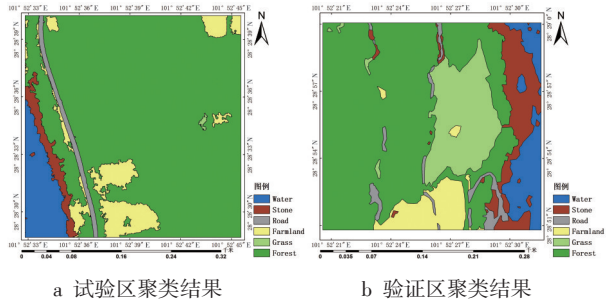
c 验证区随机森林法分类结果　d 验证区面向对象的SVM法分类结果

图3　可见光遥感影像分类结果

机森林法，面向对象的SVM分类方法对道路、水体及耕地分类效果良好，同时能提升林地、耕地及草地的分类精度，并很好地反映边界和轮廓。结果表明：两实验区内基于面向对象SVM分类法的用户精度与制图精度均优于RF分类法，2种精度分别与错分误差和漏分误差相对应，表明了面向对象SVM分类法的分类结果中被分错的像元个数与漏分的真实像元个数均最少。实验区内基于面向对象SVM分类精度显著提高，分类总体精度从51.56 %提高到85.94 %，Kappa系数从0.4提高到0.82；验证区内面向对象SVM分类总体精度从63.82 %提高到90.79 %，Kappa系数从0.56提高到0.89。基于面向对象的SVM分类方法整体分类精度高，可以很好地处理可见光遥感影像。

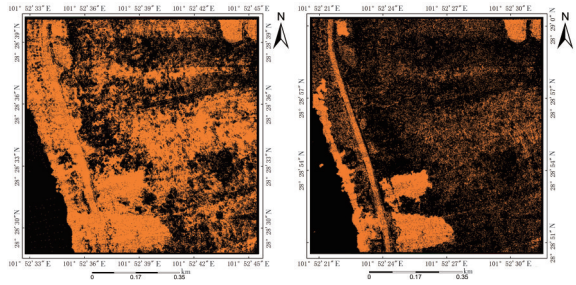
3.2　基于融合数据的PTD滤波分类结果与评价

基于面向对象的SVM分类结果，通过聚类分析对实验区和验证区数据进一步处理以消除破碎图斑，得到较为完整的地物范围线，如图4所示。通过激光雷达点云数据融合添加分类结果属性，按不同属性自动选择分类参数实现PTD自适应滤波，得到地面点数据，如图5所示；同时生成与之对应的DEM数字高程模型，如图6所示。在试验区和验证区植被茂密的山区位置，传统PTD滤波法因“穿透”地表植被点少，树木冠层点被错分为地面点，出现大量的凸起，而基于融合数据的PTD滤波分类法可单独对分块区域做参数自适应调节，通过降低迭代角度和迭代距离实现平滑滤波。

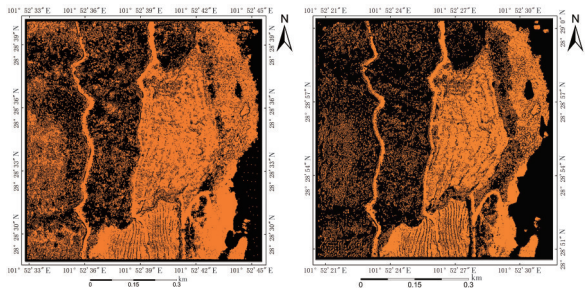


a 试验区聚类结果　b 验证区聚类结果

图4　聚类分析消除破碎图斑



a 传统PTD滤波分类地面点　b 基于融合数据的PTD滤波分类地面点



c 验证区传统PTD滤波分类地面点　d 验证区基于融合数据的PTD滤波分类地面点

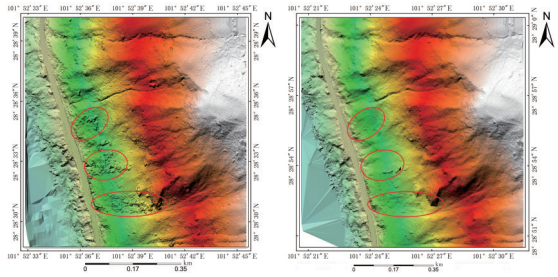
图5　不同滤波分类结果对比

通过对比分析2种不同PTD滤波分类结果的平均绝对误差和平均相对误差，见表2所示。基于融合数据的PTD滤波法效果最好，实验区平均绝对误差为0.048 m，平均相对误差高达0.003 %；验证区平均绝对误差为0.056 m，平均相对误差高达0.003 %，在山区地形复杂的条件下自适应效果显著。

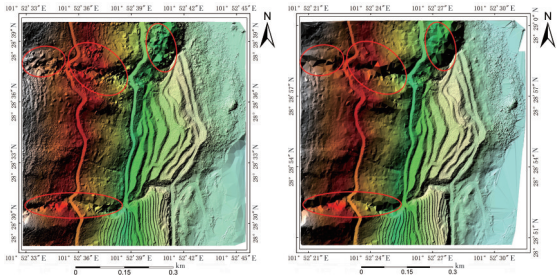
综上所述，基于可见光影像数据融合的点云滤波方法可实现自适应地面点滤波，对处理因植被茂密而造成地面点缺失导致的点云错分问题效果显著，可减少人工编辑工作量，提高DEM数据生产效率和精度。

表2　不同滤波方法的平均绝对误差和平均相对误差

研究区域	滤波方法	平均绝对误差（MEA）/m	平均相对误差（MRA）/%
试验区	传统PTD滤波法	0.523	0.035
	融合PTD滤波法	0.048	0.003
验证区	传统PTD滤波法	0.784	0.052
	融合PTD滤波法	0.056	0.003



a 试验区传统PTD滤波分类结果　　b 试验区基于融合数据的PTD滤波分类结果



c 试验区传统PTD滤波分类结果　　d 试验区基于融合数据的PTD滤波分类结果

图6　不同滤波分类DEM结果对比

4　结　语

通过使用基于融合数据的PTD滤波分类法，对锦屏大河湾激光雷达数据进行滤波处理和分析，得出以下结论。

1）基于面向对象的SVM分类方法相比于随机森林分类法在处理可见光遥感影像时效果显著，其平均总体分类精度最高为88.37%，平均Kappa系数为0.86。基于随机森林的监督分类法以单个像元作为最小分类单元，在处理可见光遥感影像时因其特征较少造成大量像元被错分等情况；面向对象的SVM分类法可通过图像分割技术，较好的抑制和解决噪声问题，在分类过程中结合了研究对象的光谱、空间位置及纹理特征进行综合分析，对可见光遥感影像处理效果显著；

2）基于融合数据的PTD滤波法较单一PTD滤波法可实现区域自适应滤波。在处理因植被茂密等原因致使点云难以穿透而造成地面点缺失中，单一PTD滤波法会将大量植被上的点错分为地面点，同时因参数单一在大面积综合处理时效果差；基于融合数据的PTD滤波法可根据地物分类结果自动选择合理的参数进行滤波，极大地提高了地面点滤波精度。

本研究数据源选取为传统正射相机采集的可见光遥感影像，未选取多光谱、高光谱遥感影像进行对比研究分析，这是今后研究的重点。

参考文献

[1] 杨必胜,梁福逊,黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 509-1 516

[2] Guo B, Huang X F, Zhang F, et al. Classification of Airborne Laser Scanning Data Using Jointboost[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 100:71-83

[3] Axelsson P. Dem Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models[J].International Archives of Ph-otogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B4/1): 110-117

[4] Zhang J X, Lin X G. Filtering Airborne LiDAR Data by Embedding Smoothness-constrained Segmentation in Progressive TIN Densification[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2013,81:44-59

[5] 隋立春,张熠斌,张硕,等. 基于渐进三角网的机载LiDAR点云数据滤波[J].武汉大学学报(信息科学版),2011,36(10):1 159-1 163

[6] Zhao X Q, Guo Q H, Su Y J, et al. Improved Progressive TIN Densification Filtering Algorithm for Airborne LiDAR Data in Forested Areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2016(10):117-119

[7] 刘洋,习晓环,王成,等. 一种改进的渐进加密三角网点云滤波算法[J]. 测绘科学,2020,45(5):106-111

[8] 王欢,张翰超,张艳,等. 针对山区点云的渐进加密三角网滤波改进算法[J]. 地理空间信息,2020,18(12):27-30

[9] 潘星. 面向茂密植被山区地质灾害精细识别的机载LiDAR点云滤波算法研究[D]. 成都:成都理工大学,2023

[10] 刘猛,宋以兴,张逸譞,等.雅砻江大河湾浮游植物多样性及群落结构[J]. 淡水渔业,2022,52(1):3-13

[11] 刘志刚,李德仁,秦前清,等. 支持向量机在多类分类问题中的推广[J]. 计算机工程与应用,2004,37(7):10-13

[12] 杨娜,秦志远,张俊. 基于支持向量机无限集成学习方法的遥感图像分类[J]. 测绘科学,2013,38(1):47-50

[13] 张学明,林清莹,于忠海,等. 面向对象的SVM分类技术在遥感影像分类上的应用研究:以威海市为例[J]. 城市勘测,2019(5):116-119

[14] 方匡南,吴见彬,朱建平,等. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛,2011,26(3):32-38

[15] 程洁,马毅,陈安娜,等. 基于GF-2多光谱数据的水深多模型探测比较研究以香港平洲岛为例[J]. 海洋技术学报,2018,37(6):66-72