引文格式：郑斌,邹学忠,李小昱. 一种DEM辅助下的LiDAR点云PTD滤波改进算法[J]. 地理空间信息, 2024, 22(1): 13-15. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.01.003

一种DEM辅助下的LiDAR点云PTD滤波改进算法

郑　斌[1]，邹学忠[1]，李小昱[1]
（1. 江苏省测绘工程院，江苏 南京 210013）

摘　要：针对传统渐进加密不规则三角网（PTD）滤波算法在复杂地形环境下需要反复调试地面点判断参数才能获得较好结果的局限性，以往期DEM数据提取的地形高程和地形梯度为辅助，改进PTD中初始地面种子点的选取方法，优化地面点判断参数，并对往期DEM数据和现势LiDAR点云数据之间的地形变化进行检测和处理，适用于不同坡度地形条件的复杂地形，滤波效果较好。对比分析实验数据精度可知，该算法能有效降低I类与II类误差，且样本分类精度均在90%以上，说明DEM辅助可切实提高PTD滤波算法的精度。

关键词：LiDAR点云；PTD滤波；DEM辅助分类
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）01-0013-03

Improved LiDAR Point Cloud PTD Filtering Algorithm Assisted by DEM

ZHENG Bin[1], ZOU Xuezhong[1], LI Xiaoyu[1]
(1. Jiangsu Province Surveying and Mapping Bureau, Nanjing 210013, China)

Abstract: In view of the limitations of traditional progressive TIN densification (PTD) filtering algorithm, which needed to repeatedly debug the ground point judgment parameters to obtain better results in complex terrain environment, we took the terrain elevation and terrain gradient extracted from previous DEM data as an auxiliary to improve the selection method of initial ground seed points in the PTD and optimize the ground point judgment parameters. Then, we detected and processed the terrain changes between previous DEM data and current LiDAR point cloud data. This algorithm is suitable for complex terrain with different slope terrain conditions, and the filtering effect is good. Through the comparative analysis of experimental data accuracy, the algorithm can effectively reduce Class I and Class II errors, and the sample classification accuracy is more than 90%, which proves that the filtering accuracy of PTD algorithm can be effectively improved based on DEM assistance.

Key words: LiDAR point cloud, PTD filtering, DEM assisted classification

LiDAR作为一种主动式、高精度、快速、智能化实现地物三维形态特性的测绘高新技术，已广泛应用于基础测绘、电力、林业和城市三维建模等领域，其中点云滤波是点云数据后处理的关键步骤[1]。点云滤波技术是从LiDAR数据点中获取地形表面点的过程，大致分成基于坡度、基于数学形态学、基于TIN、基于聚类分割、基于曲面拟合以及基于机器学习的滤波6类[2-4]。近年来，一些研究者通过实验测试对上述主流滤波算法进行了精度对比，其中基于机器学习的滤波算法在训练样本足够的情况下能获得较好的滤波效果，但数据处理时间较长，对计算机硬件的要求较高[5-6]；基于聚类分割的滤波算法因能获得更多聚类后的语义信息，可达到较高的滤波精度[7-8]；基于TIN和曲面拟合的滤波算法采用渐进迭代的方式也能获得较好的滤波精度[9-12]。复杂环境下的点云滤波技术仍是当前LiDAR点云研究的热点方向。本文在经典渐进加密不规则三角网（PTD）滤波算法的基础上，提出了一种DEM辅助下的PTD滤波改进算法。该算法将往期DEM数据提取的地形高程信息和地形梯度信息作为辅助，改进PTD中初始地面种子点的选取方法，优化地面点判断参数，并对往期DEM数据和现势LiDAR点云数据之间的地形变化进行检测和处理，以改善滤波效果。

1　算法原理

传统PTD滤波算法的稳定性和滤波效果均较好，能适应相对复杂的地形，但初始种子点的选取对滤波结果影响较大，在不同坡度地形条件下需输入不同的地面点判断参数才能获得较好的结果[13]。因此，本文提出了一种DEM辅助下的PTD滤波改进算法，旨在优化初始种子点的选取，降低不同地形对修改参数的依

收稿日期：2022-06-05。
项目来源：江苏省水利科技资助项目（2020061）。
第一作者简介：郑斌（1979—），高级工程师，研究方向为摄影测量与遥感、地理信息，E-mail：2354412613@qq.com。

赖，最终提升点云处理的自动化程度、减少后期人工作业的工作量。

1）通过统一坐标系统、组织点云数据和剔除点云噪声点对LiDAR点云数据进行预处理，再按照DEM地形面约束将预处理后的点云数据分为非地面点和待分类点，分别加入非地面点集合$V_{\text{Non-Ground}}$和待分类点集合$V_{\text{Non-Classfication}}$。具体处理流程为：①遍历点云数据中的每个点，若不是仅一次回波点或多次回波中的末次回波点，则该点为非地面点，加入$V_{\text{Non-Ground}}$，否则保留为待分类点，加入$V_{\text{Non-Classfication}}$；②设定高差阈值$H_{\text{Threshold}}$，并判断$H_{\text{Non-Classfication}}$中的每个点与相同平面坐标位置DEM的高程差值是否超过$H_{\text{Threshold}}$，若超过，则判断为待定非地面点，加入$V_{\text{Non-Ground}}$，否则保留为待分类点，加入$V_{\text{Non-Classfication}}$（图1）。

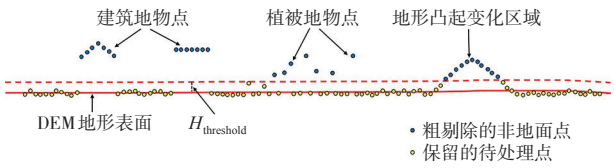


图1 非地面点剔除示意图

2）利用DEM数据的高程信息，从点云数据中选取可信的地面点，加入地面点集合V_{Ground}。首先对LiDAR点云数据建立规则格网索引；然后在每个格网内选择高程最小点作为种子点加入V_{Ground}，格网尺寸应不小于车辆、低矮植被等近地面地物的尺寸，实验中设置为5~10 m；再从DEM数据中提取断裂线区域，将落入断裂线区域的格网划分为更小的格网，并分别在每个小格网内选择高程最小点作为种子点加入V_{Ground}（图2）。

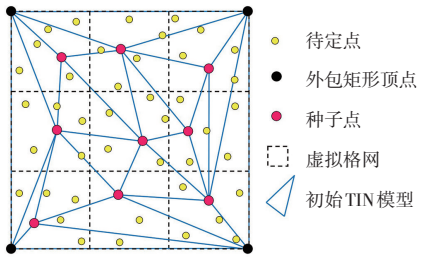


图2 种子点选取示意图

3）将地面点作为地面种子点构建初始地形TIN模型，并利用DEM数据的坡度信息对地面点判断参数进行优化；然后在初始地形TIN模型的基础上对$V_{\text{Non-Classification}}$进行地面点判别，并加入$V_{\text{Ground}}$。具体处理流程为：①遍历$V_{\text{Non-Classification}}$中的所有点，按照式（1）计算该点处的相对地面高度阈值T_d、地形角阈值T_θ、d和θ；②判断是否满足$d<T_d$，且$\theta<T_\theta$，若满足，则该点标记为地面点，加入V_{Ground}。

$$\begin{cases} T_d = \mathrm{a}_0 \left|\vec{n}\right| + \mathrm{a}_1 \\ T_\theta = \mathrm{b}_0 \left|\vec{n}\right| + \mathrm{b}_1 \end{cases} \tag{1}$$

式中，a_0、a_1、b_0、b_1分别为常数系数；$\vec{n}$为某激光脚点所处位置的DEM地形梯度，$\vec{n}=(f(x),f(y))$；$f(x)$、$f(y)$分别为x和y方向的坡度值；$\left|\vec{n}\right|$为地形梯度向量的模。

4）利用TIN模型对非地面点进行分析处理，将$V_{\text{Non-Ground}}$中地形凸起变化区域的点重新分类到地面点，并加入V_{Ground}。基于区域生长的变化区域地面点探测原理见图3。具体处理流程为：①遍历$V_{\text{Non-Ground}}$中的所有点，计算该点与TIN模型中所在三角形的相对地面高度d、地形角θ和最近地面点距离L；②判断是否同时满足$d<T_d$、$\theta<T_\theta$、$L<T_L$，若满足，则该点标记为地面点，加入V_{Ground}，插入到初始地形TIN模型中并更新，其中$L=\sqrt{(x_p-x_{p'})^2+(y_p-y_{p'})^2}$，$x_p$、$y_p$为待判断点$P$的$x$、$y$坐标，$x_{p'}$、$y_{p'}$为距离待判点最近的地面点$P'$的$x$、$y$坐标；③重复步骤②，直至不再有新的点满足条件为止。

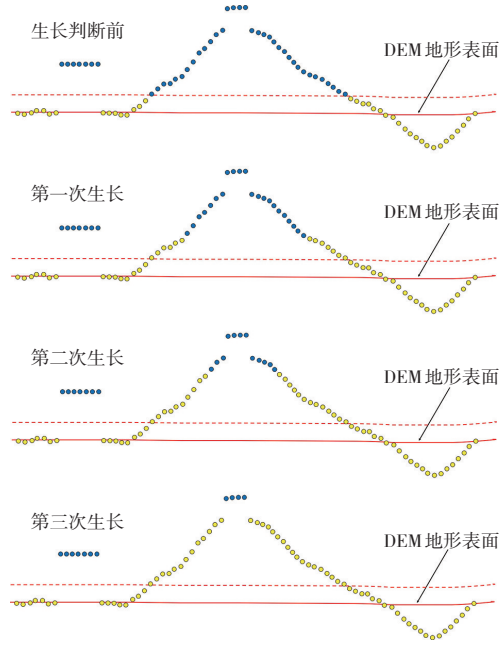


图3 基于区域生长的变化区域地面点探测原理

由于在地形变化区域，地形情况已发生明显变化，往期DEM数据不能提供可靠的参考信息。实验中T_d小于非地面点粗剔除中的$H_{\text{Threshold}}$，T_θ应设置较大，T_L为格网索引尺寸的两倍。

2 算法实现

2.1 DEM辅助下的PTD滤波实验

本文以6 km的DEM标准图幅作为实验样本（图4），样本区内包含平原、丘陵、水域、山地等地物类型，可充分验证概率波策略对于复杂地形的适应性和对于不同地形的普适性。样本区LiDAR点云获取时间为2017年3月，平均点密度为1 m；用于辅助滤波的DEM为航摄法获取并制作的往期基础测绘成果，

数据现势性为2007年10月，格网间距为5 m。辅助滤波完成后生成的DEM模型见图5，可以看出，实验样本的滤波效果良好，尤其在城区和山区，无需人工编辑；但由于水面会吸收或反射激光雷达信号，使得水面上的激光脚点较少，导致河流或水塘等区域的滤波效果不佳（图6），因此仍需单独进行补点和添加特征线等处理，以保证地表模型的真实与自然。

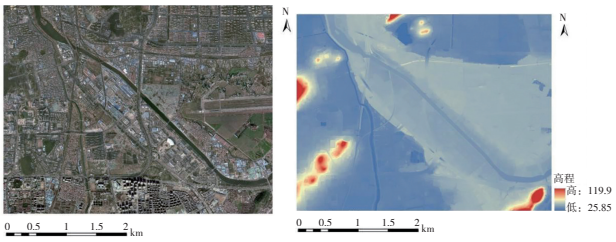


图4　实验样本区域影像与往期DEM示意图

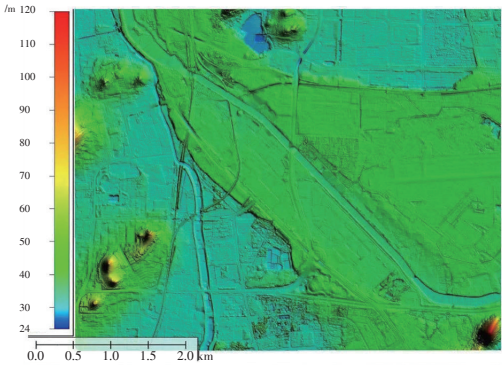
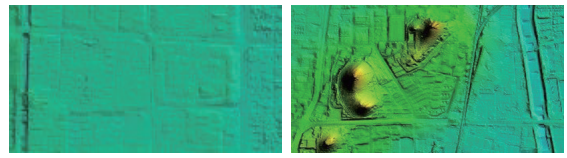


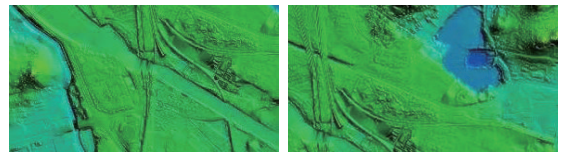
图5　实验样本辅助分类DEM效果图

2.2　实验结果评价与分析

本文采用激光点云数据的3类误差评价对本文的滤波效果进行定量评价[14-15]。I类误差又称去真误差，即将地面反射的激光脚点数据误归为地物反射的激光脚点并滤波；II类误差又称纳伪误差，即将地物反射的激光脚点数据误归为地面反射的激光脚点数据并保留；对两种误差进行加权求和，可有效判断激光点云



a 居民区　　b 山地



c 路桥　　d 水面

图6　实验样本局部地形示意图

数据滤波分类的结果，反映滤波方法的可行性，滤波总体精度的计算公式为：

$$P_0=\frac{b+d}{a+b+c+d} \tag{2}$$

式中，a 为将地面激光点误认为地物激光点的数目；b 为正确分类的地面激光点数目；c 为将地物反射的激光点误认为地面激光点的数目；d 为正确分类的地物激光点数目。

Kappa系数常用于一致性检验，基于混淆矩阵计算得到所需参数的精度指标，范围在0~1之间，其中0.61~0.80表示高度一致性，0.81~1表示几乎完全一致，计算公式为：

$$k=\frac{p_o-p_\varepsilon}{1-p_\varepsilon} \tag{3}$$

$$p_\varepsilon=\frac{a\times b+b\times c+a\times d+c\times d}{(a+b+c+d)^2} \tag{4}$$

本文将经典PTD滤波算法结果与改进的PTD滤波算法结果进行对比，结果见表1，可以看出，改进算法的I类误差从6.12%降至3.3%，II类误差从25.59%降至15.45%，总体精度从83.57%提升至90.27%；且Kappa系数为0.81，表示分类结果几乎完全一致。

表1　实验样本滤波分类精度统计表

类别	改进PTD滤波		经典PTD滤波		样本
	地面点	地物点	地面点	地物点	
地面点	21 679 541	739 945	21 046 863	1 372 623	22 419 486
地物点	3 894 417	21 304 225	6 449 518	18 749 124	25 198 642
列和	25 573 958	22 044 170	27 496 381	20 121 747	47 618 128

在江苏省“十三五”基础测绘机载LiDAR点云数据获取与处理项目中，利用该算法对江苏省全域10.26万km²范围内的点云数据进行滤波精细化分类，达到了良好的效果。江苏省测绘产品质量监督检验站对项目生产的机载激光LiDAR数据和DEM进行了抽样检测，结果表明各样本的LiDAR激光点云高程中误差、DEM高程中误差质量均合格，符合GB/T 18316-2008《数字测绘成果质量检查与验收》的指标要求[16-17]。

3　结　语

本文提出的DEM辅助下的PTD滤波算法，对经典PTD滤波进行了改进和优化。经过实验验证，改进算法提高了实验样本的总体精度和Kappa系数，改善了滤波效果。在江苏省“十三五”省级基础测绘机载LiDAR项目中，利用往期5 m格网DEM辅助完成了全省1 m点密度的点云滤波分类，经检验成果质 （下转第28页）