

# 基于多约束连通图分割的机载 LiDAR 点云滤波方法

惠振阳\*, 胡海英, 李娜, 李卓宣

东华理工大学测绘工程学院, 江西 南昌 330013

**摘要** 点云滤波是机载 LiDAR 点云后处理应用的必要环节。现有的大多数点云滤波方法往往在地形平坦的区域滤波效果比较好,而在地形起伏较大区域滤波效果较差。为进一步提升点云滤波方法的精度及对复杂环境的适应能力,提出一种基于多约束连通图分割的滤波方法。通过设定垂直性、高差、距离三个约束条件构建点云连通图,实现点云分割,并基于地面覆盖率和格网化高程实现地面种子点集获取与筛选。最后,基于点到邻近地面种子点集拟合平面的距离实现地面点集优化。采用国际摄影测量与遥感学会(ISPRS)网站发布的 15 组专门用于检验滤波效果的点云数据进行实验。实验结果表明,所提方法针对不同的地形环境均可以获得良好的滤波结果。在与其他四种滤波方法的对比中,所提方法能够取得最小的平均总误差(5.44%)。此外,所提方法的平均一类误差和平均二类误差都相对较小,表明所提方法在去除地物点的同时能够有效保护地形细节。

**关键词** 遥感; 机载 LiDAR; 多约束连通图; 点云分割; 点云滤波

中图分类号 P237

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0428004

## Airborne LiDAR Point Cloud Filtering Method Based on Multiconstrained Connected Graph Segmentation

Hui Zhenyang\*, Hu Haiying, Li Na, Li Zhuoxuan

Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China

**Abstract** Point cloud filtering is a necessary step in the application of airborne LiDAR point cloud post-processing. Most existing point cloud filtering methods have a better filtering effect in areas with flat terrain but a poor filtering effect in areas with high terrain fluctuation. To improve the accuracy of point cloud filtering methods and their adaptability to complex environments, this paper proposes a filtering method based on multiconstrained connected graph segmentation. In this paper, three constraint conditions, verticality, height difference, and distance, were set to construct the point cloud connectivity graph to achieve point cloud segmentation, and the ground seed point set was acquired and screened based on the ground coverage rate and the grid elevation. Finally, the ground point set optimization was realized based on the distance between the points and the adjacent ground seed point set. To test the filtering effect, 15 sets of point cloud data published on the website of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) were used. The experiment results show that the proposed method can produce good filtering results in various terrain environments. Compared with the other four filtering methods,

收稿日期: 2021-03-30; 修回日期: 2021-04-05; 录用日期: 2021-04-14

基金项目: 中国博士后科学基金(2019M661858)、国家自然科学基金(41801325)、江西省自然科学基金(20192BAB217010)、江西省教育厅科技项目(GJJ170449)、江西省数字国土重点实验室开放基金(DLLJ201806)、东华理工大学博士启动基金(DHBK2017155)

通信作者: huizhenyang2008@163.com

the proposed method has the lowest average total error (5.44%). In addition, the average type I error and the average type II error of the proposed method are relatively small, indicating that the proposed method can effectively protect terrain details while removing ground object points.

**Key words** remote sensing; airborne LiDAR; multiconstrained connected graph; point cloud segmentation; point cloud filtering

## 1 引言

机载激光雷达 (LiDAR) 系统是一种主动式对地观测系统。由于具有自动化程度高、受天气影响小、数据生产周期短、精度高、不受外界条件影响等优点<sup>[1]</sup>, 此系统已广泛用于获取数字地面模型 (DTM)、提取城市道路、建立城市三维模型等地球空间信息学科的众多领域, 被誉为对地观测三大核心技术之一<sup>[2]</sup>。

在对点云进行后续处理前, 需要将地面点和地物点分离, 这个过程称为点云滤波。国内外许多学者对点云滤波进行了大量研究, 现有的滤波算法大致可以分为 6 类: 基于形态学的滤波方法、基于坡度的滤波方法、基于曲面拟合的滤波方法、基于分割的滤波方法、基于统计的滤波方法、基于机器学习的滤波方法<sup>[3-4]</sup>。

基于形态学的滤波方法利用形态学的开运算达到滤波目的, Lindenberger<sup>[5]</sup>最早将其应用于点云滤波。该方法首先对点云进行腐蚀运算, 滤除与地面点较远的地物点, 然后进行膨胀运算, 将过度去除的地物点还原。该方法缺点是需要选择合适的滤波窗口, 并且在插值过程中可能会引入新的误差<sup>[6]</sup>。李峰等<sup>[7]</sup>根据形态学滤波器窗口大小、点云平面误差和平面坡度重新估算得到高差阈值, 将格网分为地面点所在格网和地物点所在格网两类, 再依据点与最低点的坡度和高差是否小于阈值这个准则判定是否为地面点。Li<sup>[8]</sup>利用形态学方法计算各点的多梯度, 再迭代进行多梯度约束下的改进开运算, 逐步去除地物点。吴军等<sup>[9]</sup>结合形态学和不规则三角网的思想进行滤波。Hui 等<sup>[10]</sup>利用克里金插值计算出小范围区域地形起伏度, 设计的方法能够有效保护地形细节。

基于坡度的滤波方法利用地物点与邻近地面点之间坡度较大的特点进行滤波, 最早由 Vosselman<sup>[11]</sup>提出, 通过计算各个点与邻近点之间的坡度值, 将坡度大于阈值的点判定为地物点。Sithole<sup>[12]</sup>针对坡度阈值固定导致滤波精度不高的问题, 根据地形变化而变化坡度阈值。Wang 等<sup>[13]</sup>提

出一种双向坡度滤波方法, 互相补充不同方向的滤波结果。Susaki<sup>[14]</sup>通过迭代获取粗略的数字地面模型, 从而获取动态坡度阈值滤波。

基于曲面拟合的滤波方法的代表算法是不规则三角网 (TIN), 首先选取若干个局部最低点作为种子点构建不规则三角网, 计算剩余点到三角网的距离, 将小于阈值的点加入三角网, 进行迭代直到没有新的点加入<sup>[15]</sup>。Chen 等<sup>[4]</sup>与 Mongus 等<sup>[16]</sup>对地面点进行薄板样条迭代曲面插值。曾繁轩等<sup>[17]</sup>结合移动最小二乘曲面与 Lagrange 算子进行插值滤波, 可以解决迭代次数过多的问题。李鹏程等<sup>[18]</sup>基于加权拟合曲面的思想, 结合 Levenberg Marquardt 算子进行滤波。

基于分割的滤波方法的思想是先对点云数据进行分割, 再判断分割后各个类是否属于地物点集或是地面点集。Zhang 等<sup>[19]</sup>结合分割与不规则三角网思想进行滤波, 降低了不规则三角网在地形坡度大处和地形断裂处的敏感度。Lin 等<sup>[20]</sup>、Chen 等<sup>[21]</sup>与胡举等<sup>[22]</sup>使用区域生长思想分割点云, 再进行滤波。

基于统计的滤波方法假设自然情况下的地面点服从正态分布, 将混有地物点的点云数据看作高斯模型的混合。Bartels 等<sup>[23]</sup>利用该特性, 迭代去除地物点, 直到剩余点的偏度为 0。Bartels 等<sup>[24]</sup>改进 Bartels 等<sup>[23]</sup>的方法, 改进后的方法能够适应坡度起伏的地形。Hui 等<sup>[25]</sup>利用混合高斯模型对点云进行分割, 通过计算混合参数的最大似然估计, 利用估计的参数计算每个点属于地面点的可能性, 得到地面点。

基于机器学习的滤波方法将点云滤波看作二分类问题, 将点云滤波问题转换为地面点与地物点的分类问题。Lu 等<sup>[26]</sup>通过构建条件随机场模型进行滤波。Jahromi 等<sup>[27]</sup>基于神经网络获取地面点。Hui 等<sup>[28]</sup>提出一种基于主动学习的点云滤波方法, 通过渐进增加两类样本的数量并更新训练模型, 最后基于坡度优化滤波结果。

上述方法均有良好的滤波效果, 但滤波精度仍可以进一步提高。为了达到更高的滤波精度, 本文提出一种基于连通图分割的滤波方法。首先使用

三个约束条件构建连通图,分割获取地面种子点;将地面种子点格网化,向空白格网中加入地面种子点;最后使用局部平面拟合方法进行迭代,判断剩余候选点是否属于地面点。

## 2 基本原理

所提滤波方法流程如图 1 所示。使用 Cloud Compare 软件自带的 SOR 方法去噪后,使用垂直性、高差、距离三个约束条件将点云分割为多个连通图,提取最大的连通图中包含的所有点作为地面

种子点。为了构建完整的地面种子点网,需要将地面种子点二维格网化,寻找空白格网中高程最低的候选点,取其所属的连通图中所有点加入到地面种子点。依次判断剩余候选点到其邻近地面点拟合的平面的距离,若小于阈值,则判定为地面点,继续迭代直到没有点判定为地面点。所提方法具体包括三个步骤:使用三个约束条件构建连通图,分割得到初始地面种子点;从候选点中筛选地面种子点连通图,构建完整地面种子点网;基于局部平面拟合迭代判断剩余候选点是否属于地面点。

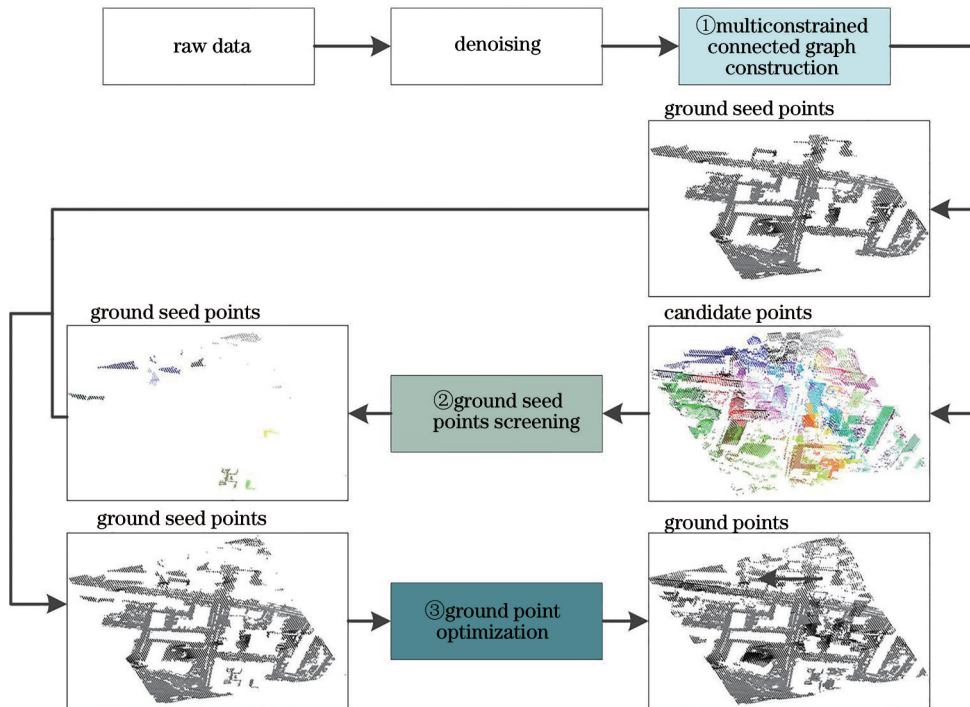


图 1 点云滤波流程

Fig. 1 Flow chart of point cloud filtering

### 2.1 多约束连通图构建

在一个无向图中,若节点  $i$  到节点  $j$  至少存在一条路径,则称节点  $i$  和节点  $j$  是连通的,若无向图中任意两个节点都可以连通,则称该无向图为连通图<sup>[29]</sup>。

基于连通图分割点云数据,将传统的区域生长方法转换成计算图的连通分量的问题,对于无向图  $G=(V, E)$ ,其中  $V=v_1, \dots, v_n$  代表节点集合,每个节点  $v_i \in V$  代表点云数据中的一个点,每条边  $e_{ij} \in E$  连接某个点与该点的邻近点。点云数据中每个点连接其  $k$  个最近邻点,得到  $k$  条边。

使用垂直性、高差以及距离三个约束条件构建连通图分割点云。垂直性即法向量在  $Z$  方向上分量的绝对值,记作  $N_v, N_v \in (0, 1)$ 。点云局部坡度变化

越平缓,邻近点之间的垂直性差值越小。图 2 为垂直性示意图,处于同一平面  $a$  的  $n_1$  和  $n_2$  两个法向量

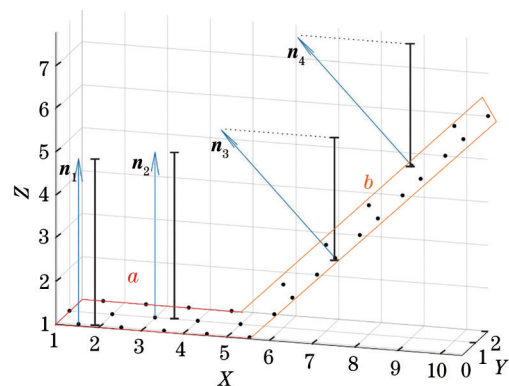


图 2 垂直性示意图

Fig. 2 Diagram of verticality

在 Z 方向上的分量大致相等,而处于另一平面  $b$  的  $\mathbf{n}_3$  和  $\mathbf{n}_4$  两个法向量在 Z 方向上的分量有较大差异。

针对高差的约束,去除了与中心点高差大于阈值  $Z_{th}$  的邻近点;针对距离的约束,去除了与中心点距离大于平均距离  $\bar{d}_{ij}$  加上一倍标准差  $\sigma_{d_{ij}}$  的邻近点。如图 3 所示,空心点为中心点,其余与之相连的实心点为其邻近点。其中有两个邻近点需要断开与中心点的连接边,其中一个邻近点不满足高差条件,另一个邻近点不满足距离条件。

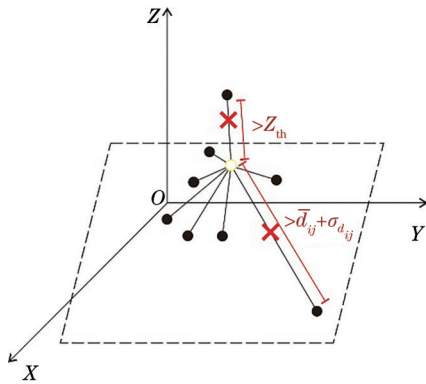


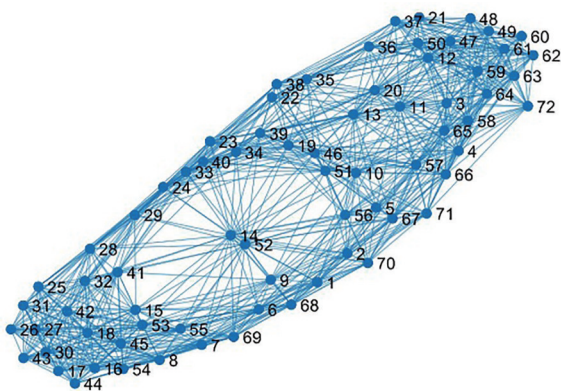
图 3 高差与距离条件约束示意图

Fig. 3 Diagram of height difference constraint and distance condition constraint

所设的三个约束条件为

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } \begin{cases} \text{condition 1 } |N_{zi} - N_{zj}| < N_{z,th} \\ \text{condition 2 } |Z_i - Z_j| < Z_{th} \\ \text{condition 3 } d_{ij} < \bar{d}_{ij} + \sigma_{d_{ij}} \end{cases} \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (1)$$

(a)



式中:  $e_{ij}$  表示节点  $i$  到节点  $j$  的边; 1, 0 分别表示两个节点之间有边连接, 无边连接;  $N_{zi}$  和  $N_{zj}$ 、 $Z_i$  和  $Z_j$ 、 $d_{ij}$  分别表示两个节点的垂直性、高程、距离;  $N_{z,th}$ 、 $Z_{th}$  分别表示两个节点垂直性差值的阈值, 高差的阈值;  $\bar{d}_{ij}$  和  $\sigma_{d_{ij}}$  分别表示两个节点之间的距离平均值和标准差。通过约束每个点的邻近点, 减少连接边的数量, 分割为多个连通图。

垂直性  $N_z$  由  $k$  个邻近点集  $S_x = \{p_1, \dots, p_k\}$

构建协方差张量  $C_x$  再计算最小特征值得到:

$$\begin{cases} C_x = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (p_i - \hat{p})(p_i - \hat{p})^T \\ |\hat{p}| = \arg \min_p \sum_{i=1}^k \|p_i - p\| \end{cases}. \quad (2)$$

条件 1 控制点云垂直性变化幅度, 阈值  $N_{z,th}$  越小, 则连通图中包含的点的坡度变化越平缓。条件 2 控制点云高程变化幅度, 阈值  $Z_{th}$  越小, 则连通图中包含的点的高程变化越平缓。条件 3 通过删除距离过远的邻近点控制图的边长。使用三个条件对图边约束后, 点云数据被分割并落入多个连通图中。相较于植被, 地面点在垂直性变化上和高程变化上具有较强的连续性; 相较于建筑物, 大部分地面点在三维坐标中是相邻的, 拥有较小的距离, 而建筑物之间则相距较远, 距离较大。因此, 通过提取最大的连通图可获得地面种子点。图 4(a) 为无约束条件构成的连通图, 图 4(b) 为有约束条件构成的连通图, 通过约束条件分割数据。

(b)

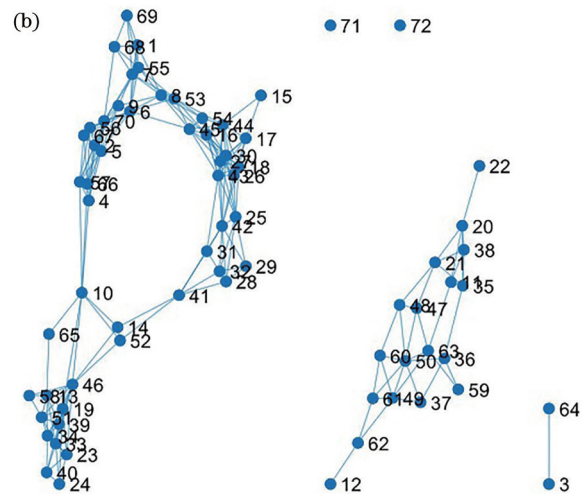


图 4 连通图示意图。(a) 无约束条件的连通图; (b) 有约束条件的连通图

Fig. 4 Diagram of connected graph. (a) Connected graphs without constraints; (b) connected graphs with constraints

### 2.2 地面种子点筛选

由于部分地面点坡度变化较大,或者距离其他地面点较远,通过连通图分割获取的地面种子点无法覆盖全部地面。为了能获得地面覆盖率较大的地面种子点,首先将地面种子点投影至  $XOY$  平面,以最大建筑物边长作为格网尺寸,将地面种子点格网化,寻找落入空白格网中的高程最低的候选点,取其所属的连通图中包含的所有点加入地面种子点点集。如图 5 所示,红色点为地面种子点,黄色点、绿色点以及蓝色点以颜色作为区分,属于三个不同连通图中的候选点,灰色格网表示无地面种子点落入的空白格网。取空白格网中高程最低的候选点,如图 5 中的蓝色点,并取其属于同一连通图的所有蓝色点加入红色地面种子点点集,从而获得地面覆盖率更大的地面种子点点集。

图 6 为在空白格网中加入地面种子点的效果示意图,虽然通过连通图分割能获得覆盖大部分地面的地面种子点,但仍然存在部分地面无法被地面种子点覆盖的情况。图 6 左图为点云数据经过连通图

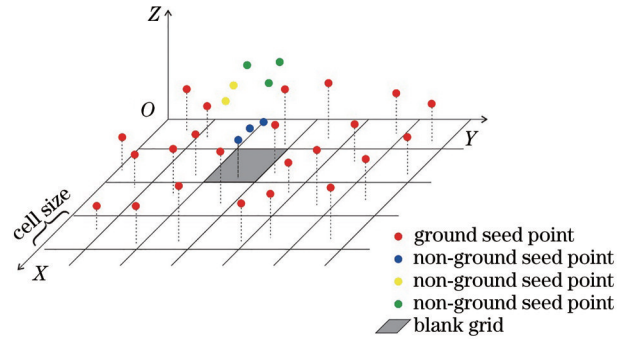


图 5 种子点二维格网化示意图

Fig. 5 Two dimensional grid diagram of seed points

分割后获取地面种子点的结果,可以看出,获得的地面点较平滑,但是与图 6 右图标记圈出的部分相比,地面种子点有所缺失。标记 1,2,3 处地面点距离其他地面点距离较远,标记 4 处高程较高,且坡度变化较大。上述原因造成连通图的边断裂,部分点没有成功加入地面种子点所属的连通图中。通过向地面种子点的空白格网中添加地面种子点,可以构建较完整的地面种子点网。

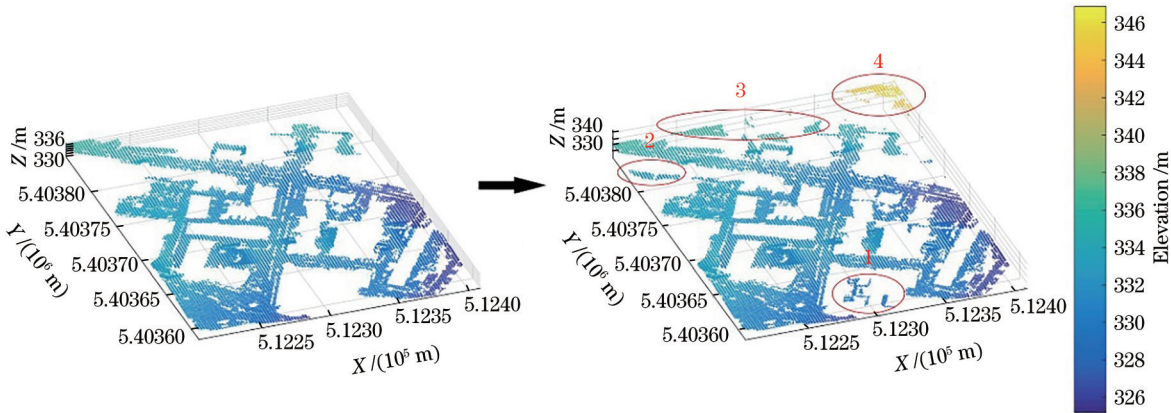


图 6 在空白格网中加入新的地面种子点

Fig. 6 Add new ground seed points to the blank grid

### 2.3 地面点集优化

获取了地面覆盖较完整的地面种子点后,依次判断剩余候选点是否为地面点。计算点至  $k$  个邻近地面种子点的拟合平面的距离  $d$ :

$$d = \frac{|Ax + By + Cz + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \quad (3)$$

式中:  $A, B, C, D$  为拟合平面方程的参数;  $x, y, z$  是点的三维坐标。若  $d$  小于高差阈值  $H_{th}$ , 则将点判定为地面点。重复上述过程,直到没有点被判定为地面点。如图 7 所示,该平面为空心圆点的邻近点的拟合平面,判断空心圆点至拟合平面的距离  $d$  是否小

于阈值,若小于阈值判定为地面点,反之为地物点。

平面拟合算法流程为

- 1) 输入候选点点集  $C_{NGrPts}$ , 地面种子点点集  $C_{GrPts}$ , 邻近点数量  $k$ , 高差阈值  $H_{th}$ ;
- 2) 取候选点点集  $C_{NGrPts}$  中的一点  $P_i$ , 查找距离点  $P_i$  最邻近的  $k$  个地面种子点;
- 3) 计算点  $P_i$  距离  $k$  个地面种子点的拟合平面的距离,若小于阈值  $H_{th}$ , 则将该点判定为地面点;
- 4) 更新候选点点集  $C_{NGrPts}$  与地面种子点点集  $C_{GrPts}$ ;
- 5) 重复步骤 2)~4), 直到没有任何点被判定为地面点, 输出地面点集  $C_{GrPts}$ 。

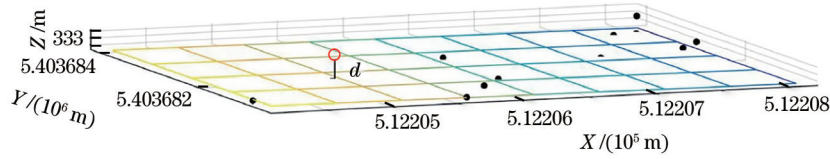


图 7 点到拟合平面距离示意图

Fig. 7 Diagram of distance from point to fitted plane

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验数据

为了检验所提滤波方法的可行性,使用 ISPRS 网站中提供的 15 组点云数据用于滤波精度测试。15 组点云数据由 Optech ALTM 扫描仪获取,分别来自 7 个地点,包括 4 个城市区域和 3 个农村区域,每组数据包含的地物特征如表 1 所示。其中城市区域数据样本为 sample 11~42,点间距为 1~1.5 m,农村区域数据样本为 sample 51~71,点间距为 2~3.5 m。每组样本都经过精细的人工分类,每个点被手动标记为地物点或者地面点,使用该组数据进行实验能有效检测滤波方法的精度。

#### 3.2 实验结果与分析

实验结果评定由 I 类误差 ( $T_1$ )、II 类误差 ( $T_2$ )、总误差 ( $T_{total}$ ) 以及 kappa 系数 ( $c_{kappa}$ ) 决定。其中 I 类误差又叫拒真误差,是将地面点错误判定为地物点的个数占有所有正确地面点个数的比例;II 类误差又叫纳伪误差,是将地物点错误判定为地面点的个数占有所有正确地物点个数的比例。误差矩阵如表 2 所示,计算公式为

$$T_1 = \frac{b}{a+b}, \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{c}{c+d}, \quad (5)$$

$$T_{total} = \frac{b+c}{e}, \quad (6)$$

表 1 15 组点云数据及其特点

Table 1 15 groups of point cloud data and their characteristics

Environment	Site	Sample	Feature
City	1	11	Hillsides, low vegetation, buildings
		12	Hillsides, buildings
	2	21	Large buildings, bridges
		22	Irregular structure
		23	Large irregular structure
		24	Steep sides
	3	31	Complex building complex
	4	41	Blank data
42		Train tracks and trains	
Country	5	51	
		52	Steep sides, low vegetation,
		53	blank data
	54		
	6	61	Roads, buildings, data gaps
7	71	Bridges, roads, an underground passage	

$$c_{kappa} = (p_o - p_c) / (1 - p_c), \quad (7)$$

式中: $a$ 为地面点正确判定为地面点的个数; $b$ 为地面点错误判定为地物点的个数; $c$ 为地物点错误判定为地面点的个数; $d$ 为地物点正确判定为地物点的个数; $e = a + b + c + d$ ;  $p_o = (a + d) / e$ ;  $p_c = [(a + b) \times (a + c) + (c + d) \times (b + d)] / e^2$ 。

表 2 误差矩阵

Table 2 Error matrix

Category	Filtering result	
	Number of ground points	Number of object points
Reference result	Number of ground points	$a$
	Number of object points	$b$
		$c$
		$d$

所提方法涉及 5 个参数,分别为邻近点个数  $k$ ,约束垂直性差值的阈值  $N_{z\_th}$ ,约束高差的阈值  $Z_{th}$ ,网格化尺寸  $s_{cell}$ ,点到拟合曲面的距离阈值  $H_{th}$ 。设置  $k=20$ ,  $N_{z\_th}=0.1$ ,  $Z_{th}=0.1$ 。根据最大建筑物边长设置  $s_{cell}$ ,取值范围为 10~30 m,当点云数据存在

建筑物群时,  $s_{cell}$  取较大值,当点云数据为农村场景无较大型建筑物时,  $s_{cell}$  取较小值。 $H_{th}$  根据坡度变化大小进行设置,  $H_{th}$  的取值范围为 0.2~1 m,当点云数据坡度变化较小时,  $H_{th}$  取较小值,反之,取较大值。

使用 ISPRS 网站中提供的 15 组点云数据用于滤波精度测试,结果如表 3 所示,15 组点云数据滤波结果的平均 I 类误差为 5.72%,平均 II 类误差为 9.29%,平均总误差为 5.44%。为了保护地形细

表 3 所提方法的 15 组实验数据滤波误差

Table 3 Filtering error of 15 experiment data of the proposed method

Sample	$T_1 / \%$	$T_2 / \%$	$T_{total} / \%$	$C_{kappa}$
Sample 11	26.74	13.26	21.04	0.58
Sample 12	7.92	1.39	4.76	0.90
Sample 21	2.71	2.94	2.76	0.92
Sample 22	3.21	15.60	7.03	0.83
Sample 23	8.00	4.33	6.27	0.87
Sample 24	6.10	10.06	7.15	0.82
Sample 31	0.37	1.85	1.05	0.98
Sample 41	1.01	4.63	2.75	0.94
Sample 42	11.10	0.43	3.55	0.91
Sample 51	1.33	6.73	2.42	0.92
Sample 52	3.09	17.35	4.41	0.75
Sample 53	6.36	19.34	6.84	0.44
Sample 54	2.46	3.91	3.24	0.94
Sample 61	3.47	7.51	3.57	0.56
Sample 71	1.93	30.03	4.81	0.72
Average	5.72	9.29	5.44	0.81

节,采用 I 类误差优先原则,虽然 II 类误差较大,但是总误差能控制在较小范围。

为了更直观地分析所提方法的滤波效果,挑选了具有一定代表性的三组数据,分别为 sample 11、sample 31 以及 sample 52。Sample 11 包含大量低矮植被以及建筑物,且坡度变化较大,有很大的滤波难度。Sample 31 和 sample 52 分别为所提方法滤波结果较好和较差的两组实验数据。图 8 展示了 3 组点云数据的滤波结果图,图 8(a)为原始点云数据数字表面模型(DSM),图 8(b)为真实的地面点对应的地面高程模型(DEM),图 8(c)为所提方法的滤波结果的地面高程模型,图 8(d)为所提方法的滤波结果的误差分布图,其中蓝色点代表 I 类误差,红色点代表 II 类误差。

从图 8(c)sample 11 中可以看出,该数据滤波结果包含了部分建筑物。由于 sample 11 的地形特点,大部分滤波方法无法在该组数据上取得较好效果。从图 8(d)sample 11 中可以看到有较大的 I 类误差以及 II 类误差, I 类误差大部分是山坡上的建筑物导致的, II 类误差大多集中在地面点与地物点的交界处。从图 8(c)sample 31 与图 8(d)sample 31 中可以看出,所提滤波方法对该数据的效果较好,滤波

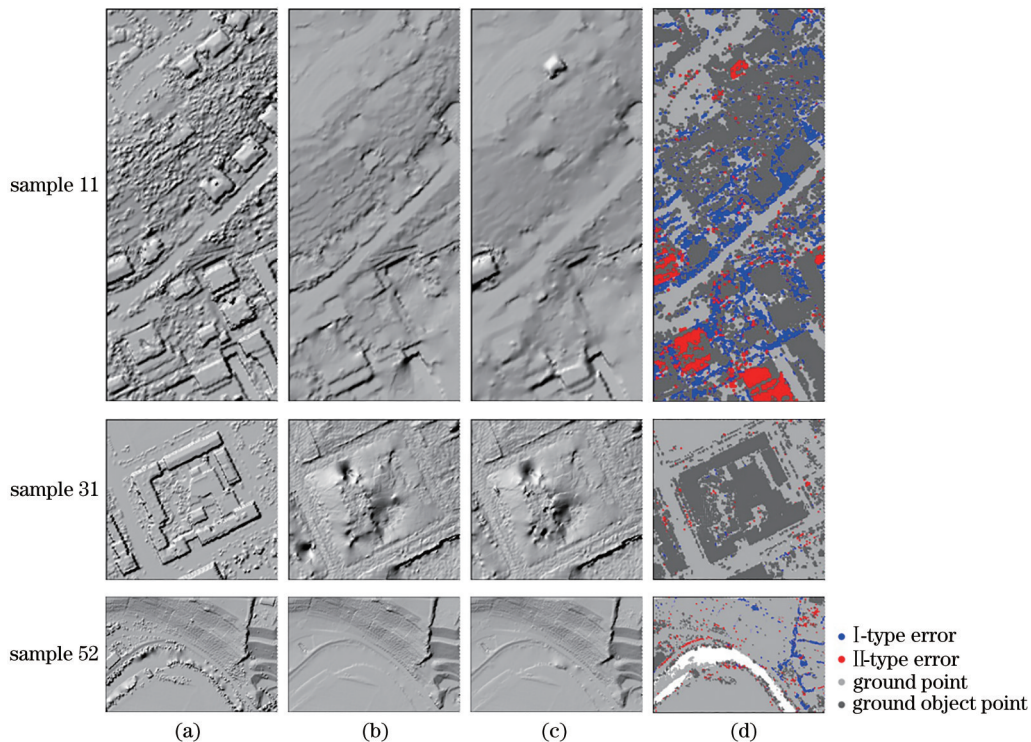


图 8 点云数据滤波结果。(a)原始数据 DSM;(b)真实 DEM;(c)所提方法滤波结果 DEM;(d)所提方法滤波结果的误差分布  
Fig. 8 Point cloud data filtering results. (a) DSM of raw data; (b) true DEM; (c) DEM of the filtering results of the proposed method; (d) error distribution of filtering results of the proposed method

效果接近真实滤波结果,因为该组数据地形情况简单,坡度平缓。从图 8(c) sample 52 与图 8(d) sample 52 中可以看出,该组数据在平坦地区几乎不存在滤波误差,其 I 类误差与 II 类误差大多出现在坡度变化幅度较大处,II 类误差常聚集于坡度变化边界处,如图 8(d) sample 52 右边地形呈阶梯状下降。

选取四种近几年的滤波方法的 15 组实验数据的滤波精度作对比分析,四种滤波方法分别来自文献[7],文献[8],文献[16]以及文献[19]。图 9 展示了 15 组实验数据总误差的折线图。可以看出:5 种方法的 sample 11 滤波总误差都较高,这是由于 sample 11 的地形情况较复杂特殊;5 种方法的 sample 21、sample 31 与 sample 51 都有较小的总误差,因为三组数据地形起伏较小,且 sample 21 与 sample 31 为城市场景,地面点多为建筑物, sample 51 虽然为农村场景,但是坡度变化较为平缓,地表连续无断裂处,三组数据都有较低的滤波难度。

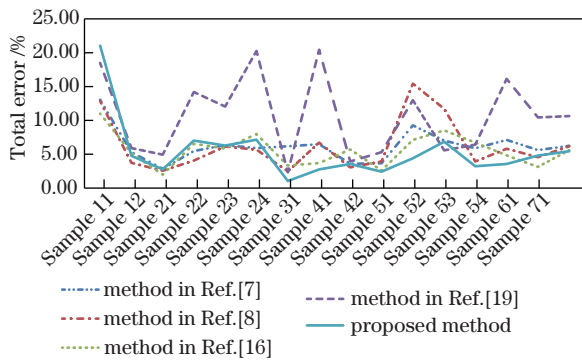


图 9 五种方法总误差对比

Fig. 9 Comparison of total errors of the five methods

图 10 为所提方法与 4 种方法的平均 I 类误差、平均 II 类误差以及平均总误差的对比,从中可以看

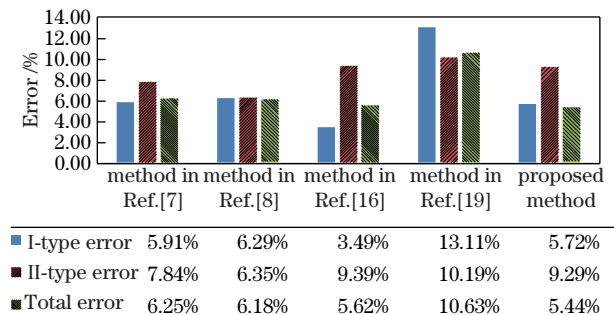


图 10 五种方法三类误差平均值对比

Fig. 10 Comparison of mean values of the three kinds of error of the five methods

出,5 种方法均能达到较小的 I 类误差,其中所提方法的平均 I 类误差仅次于文献[16]中的方法,表明所提方法能较好保护地形细节。所提方法的平均 II 类误差与另外 4 种方法对比,有较差的精度,因为需要保留地形细节,在获得较小的 I 类误差时,会产生较大的 II 类误差。所提方法的平均总误差是 5 种方法中最小的,这表明所提方法能较好地平衡 I 类和 II 类误差,在保护地形细节的同时,能有效去除地面点。综上所述,所提方法能获取最小的平均总误差,其平均 I 类误差仅次于文献[16]中的方法,而文献[16]中的方法的平均 II 类误差和平均总误差均大于所提方法。由此可见,所提方法可以获取较小的平均 I 类误差和最小的平均总误差。

### 3.3 参数设置

将三个约束条件垂直性、高差以及距离设为固定值,这些固定的参数经过大量的实验测试确定。较小的垂直性阈值使得分割后的点云更为平滑;高差阈值大小控制分割后处于同一连通图中点云的起伏程度,高差阈值越大,起伏程度越大;距离阈值控制连通图的边长。为了定量评估三个约束条件的影响,使用不同的垂直性阈值、高差阈值进行实验,分别将阈值设置为从 0.05 开始至 0.3,步长为 0.05。距离阈值分别设置为平均点间距+1 倍点间距标准差、平均点间距+2 倍点间距标准差以及平均点间距+3 倍点间距标准差。15 组数据控制其他参数变化,只依次改变垂直性阈值、高差阈值以及距离阈值进行实验,15 组数据滤波结果的平均总误差如图 11~13 所示。从图 11 可以看出,垂直性阈值在大于 0.05 时 15 组数据的平均总误差得到降低,在 0.1 处获得了最低的总误差。从图 12 可以看出,高差阈值在 0.1 处获得了最低的总误差。过小的的高差阈值无法在地形起伏处有效获取地面种子点,而过大的高差阈值则可能将距离地面点较近的地物

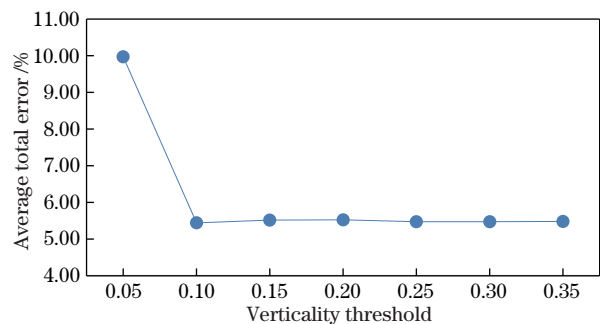


图 11 不同垂直性阈值的平均总误差

Fig. 11 Average total errors of different verticality thresholds



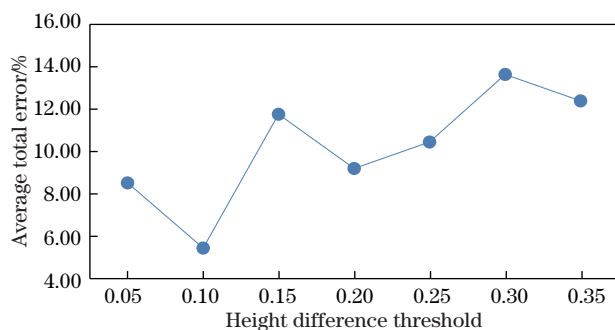


图 12 不同高差阈值的平均总误差

Fig. 12 Average total errors of different height difference thresholds

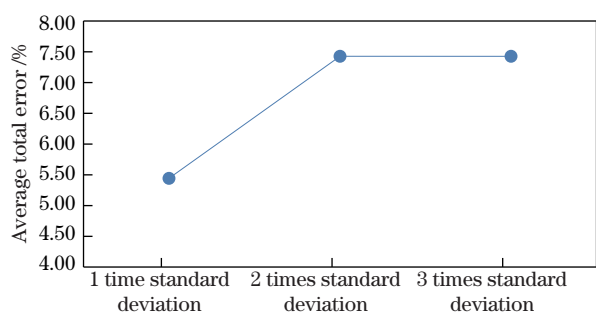


图 13 不同距离阈值的平均总误差

Fig. 13 Average total errors of different distance thresholds

点误判为地面点,导致总误差过大。从图 13 可以看出,总误差在距离设定为平均点间距+1 倍点间距标准差时最小。若点间距标准差的倍数设置过大时,所有点满足距离条件,则会失去距离约束的意义。

## 4 结 论

点云滤波是点云数据进行后续处理前的一个必要环节,滤波结果的好坏直接影响后续处理结果的精度。针对现有滤波方法滤波精度较低且难以适应复杂地形环境的问题,提出一种基于多约束连通图分割的机载 LiDAR 点云滤波方法。通过设定垂直性、高差以及距离三个约束条件构建点云连通图,实现点云分割,并基于地面覆盖率和格网化高程实现地面种子点集获取与筛选。最后,基于点到邻近地面种子点集拟合平面的距离实现地面点集优化。使用 ISPRS 网站发布的 15 组点云数据进行实验,实验结果表明,所提方法能够获得较高的滤波精度。在与其他的方法对比中,所提方法可以获取较小的平均 I 类误差(5.72%)以及最小的平均总误差(5.44%)。此外,所提方法针对部分复杂地形同样能够获得良好的滤波效果,具有较强滤波鲁棒性。

## 参 考 文 献

- [1] Hui Z Y. Research on some key techniques of extracting city road networks from airborne LiDAR point cloud[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.  
惠振阳. 从机载 LiDAR 点云中提取城市道路网的关键技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
- [2] Zhang X H. Airborne LiDAR measure technique theory and method[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007.  
张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [3] Hui Z Y, Cheng P G, Guan Y L, et al. Review on airborne LiDAR point cloud filtering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 060001.  
惠振阳, 程朋根, 官云兰, 等. 机载 LiDAR 点云滤波综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 060001.
- [4] Chen C F, Wang M Y, Chang B T, et al. Multi-level interpolation-based filter for airborne LiDAR point clouds in forested areas[J]. IEEE Access, 2020, 8: 41000-41012.
- [5] Lindenberger J. Laser-profilmessungen zur topographischen gel[D]. Stuttgart: Stuttgart University, 1993.
- [6] Shen J, Liu J P, Lin X G. Airborne LiDAR data filtering by morphological reconstruction method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(2): 167-170, 175, 254.  
沈晶, 刘纪平, 林祥国. 用形态学重建方法进行机载 LiDAR 数据滤波[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(2): 167-170, 175, 254.
- [7] Li F, Cui X M, Yuan D B, et al. Slope improved morphological filtering algorithm for lidar point clouds [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32 (5): 128-132.  
李峰, 崔希民, 袁德宝, 等. 改进坡度的 LiDAR 点云形态学滤波算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(5): 128-132.
- [8] Li Y. Filtering airborne lidar data by an improved morphological method based on multi-gradient analysis [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013, XL-1/W1: 191-194.
- [9] Wu J, Li W, Peng Z Y, et al. Integrating morphological grayscale reconstruction and TIN models for high-quality filtering of airborne LiDAR points[J]. Geomatics and Information Science of

- Wuhan University, 2014, 39(11): 1298-1303.  
吴军, 李伟, 彭智勇, 等. 融合形态学灰度重建与三角网分层加密的 LiDAR 点云滤波[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(11): 1298-1303.
- [10] Hui Z Y, Hu Y J, Yevenyo Y, et al. An improved morphological algorithm for filtering airborne LiDAR point cloud based on multi-level kriging interpolation [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(1): 35.
- [11] Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data[J]. *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2000, 33: 935-942.
- [12] Sithole G. Filtering of laser altimetry data using slope adaptive filter[J]. *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2001, 3: 203-210.
- [13] Wang C K, Tseng Y H. DEM generation from airborne LiDAR data by adaptive dual-directional slope filter[J]. *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2010, 38: 628-632.
- [14] Susaki J. Adaptive slope filtering of airborne LiDAR data in urban areas for digital terrain model (DTM) generation[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(6): 1804-1819.
- [15] Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33 (B4/1): 110-117.
- [16] Mongus D, Žalik B. Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 67: 1-12.
- [17] Zeng F X, Li L. Research on point cloud filtering based on Lagrange operator and surface fitting[J]. *Laser Journal*, 2016, 37(8): 75-78.  
曾繁轩, 李亮. 基于 Lagrange 算子与曲面拟合的点云滤波研究[J]. *激光杂志*, 2016, 37(8): 75-78.
- [18] Li P C, Xu Q, Xing S, et al. Weighted curve fitting filtering method based on full-waveform LiDAR data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(3): 420-427.  
李鹏程, 徐青, 邢帅, 等. 利用波形信息的加权曲面拟合 LiDAR 点云滤波[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(3): 420-427.
- [19] 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.
- [20] Lin X G, Zhang J X. Segmentation-based filtering of airborne LiDAR point clouds by progressive densification of terrain segments[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(2): 1294-1326.
- [21] Chen C F, Li Y Y, Yan C Q, et al. An improved multi-resolution hierarchical classification method based on robust segmentation for filtering ALS point clouds[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(4): 950-968.
- [22] Hu J, Yang L, Shen J X, et al. Filtering of LiDAR based on segmentation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3): 318-321.  
胡举, 杨辽, 沈金祥, 等. 一种基于分割的机载 LiDAR 点云数据滤波[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(3): 318-321.
- [23] Bartels M, Wei H, Mason D C. DTM generation from LiDAR data using skewness balancing[C]//18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06), August 20-24, 2006, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2006: 566-569.
- [24] Bartels M, Wei H. Threshold-free object and ground point separation in LiDAR data[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(10): 1089-1099.
- [25] Hui Z Y, Li D J, Jin S G, et al. Automatic DTM extraction from airborne LiDAR based on expectation-maximization[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 112: 43-55.
- [26] Lu W L, Murphy K P, Little J J, et al. A hybrid conditional random field for estimating the underlying ground surface from airborne LiDAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2913-2922.
- [27] Jahromi A B, Zoj M J V, Mohammadzadeh A, et al. A novel filtering algorithm for bare-earth extraction from airborne laser scanning data using an artificial neural network[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(4): 836-843.
- [28] Hui Z Y, Jin S G, Cheng P G, et al. An active learning method for DEM extraction from airborne LiDAR point clouds[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 89366-89378.
- [29] Wang D, Takoudjou S M, Casella E. LeWoS: a universal leaf-wood classification method to facilitate the 3D modelling of large tropical trees using terrestrial LiDAR[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2020, 11(3): 376-389.