

# 结合薄板样条插值的机载 LiDAR 渐进形态学滤波算法

徐旺, 官云兰\*, 张钊, 章紫辉

东华理工大学测绘工程学院, 江西 南昌 330000

**摘要** 滤波是机载激光雷达点云数据处理的关键步骤之一, 形态学滤波算法作为一种经典有效的机载激光雷达点云滤波算法受到广泛使用。针对大多数形态学滤波算法地形特征保留不佳、滤波效果不好的问题, 提出一种基于薄板样条多级插值的形态学滤波算法。该算法结合形态学开运算滤波窗口不断减小的特点, 采用薄板样条插值在不同尺寸的窗口下进行处理, 此过程由上往下迭代进行, 直至窗口大小小于设定的最小滤波窗口尺寸。采用国际摄影测量与遥感协会提供的测试数据集进行实验, 结果表明, 所提算法精度有明显提高, 在建筑物或山坡等地区的滤波效果尤为突出, 有效保留了地形特征。

**关键词** 遥感; 机载激光雷达; 点云滤波; 薄板样条插值; 形态学滤波

中图分类号 P237 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1028002

## Progressive Morphological Filtering Algorithm Combined with Thin-Plate Spline Interpolation for Airborne LiDAR

Xu Wang, Guan Yunlan\*, Zhang Zhao, Zhang Zihui

School of Surveying and Mapping Engineering, East China University of Technology,  
Nanchang 330000, Jiangxi, China

**Abstract** Filtering is a key step in the processing of airborne LiDAR point cloud data, and the morphological filtering algorithm has long been considered a classic and effective filtering algorithm for airborne LiDAR point cloud. Because the traditional morphological filtering algorithm retains poor terrain characteristics, which affords poor filtering results, a new morphological filtering algorithm based on thin-plate spline multilevel interpolation was proposed. In this algorithm, the filtering window was considered to reduce continuously during the morphological open-operation process and the thin-plate spline interpolation under different windows was used for processing. This process was iterated from top to bottom until the window size was smaller than the set minimum filter window size. Experiments were conducted using the test data set provided by the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Results show that the accuracy of the proposed algorithm increases significantly, the filtering effect improves in areas such as buildings or slopes, and topographic features are effectively retained.

**Key words** remote sensing; airborne LiDAR; point cloud filtering; thin-plate spline interpolation; morphological filtering

## 1 引言

机载激光雷达(LiDAR)是一种汇集光电、导航、

测绘等技术于一体的新型测量技术,通过主动传感器快速、准确、密集地采集地面目标信息,已被广泛用于数字地面模型提取<sup>[1-2]</sup>、森林参数提取<sup>[3-4]</sup>、电力线提

收稿日期: 2021-04-20; 修回日期: 2021-05-13; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(41401437)、江西省学位与研究生教改项目(JXYJX-2016-113)、江西省教育厅教改项目(JXJG-17-6-9)

通信作者: \*ylguan@ecut.edu.cn

取<sup>[5-6]</sup>等领域。在大多数机载 LiDAR 点云数据应用中,点云滤波是数据处理的关键步骤,目的是将点云数据分离为地面点和非地面点,滤波结果直接影响生成数字高程模型(DEM)的准确性与精度。根据前人的研究结果,可将滤波方法分为基于坡度的滤波算法、基于表面的滤波算法、基于分割的滤波算法和基于形态学的滤波算法<sup>[7]</sup>。形态学滤波因原理简单、易于实现、处理效率较高<sup>[7]</sup>及适合处理大量点云数据而受到广泛关注,成为一种应用广泛的滤波算法。

数学形态学方法最早由 Lindenberger<sup>[8]</sup>引入到点云滤波中。该滤波算法借助数学形态学思想,运用先腐蚀后膨胀的开运算过程,根据非地面点开运算后高程变化较大的特点设定高差阈值,若开运算后点的高程与原始高程之差小于阈值,则判为地面点。形态学滤波算法的关键在于窗口大小的设置,窗口过小则不能够剔除大型建筑物,窗口过大又会导致地形过于平滑,细节得不到保留。Kilian 等<sup>[9]</sup>采用不同尺寸的窗口进行反复形态学滤波,根据窗口的大小对结果进行加权,最终的权值决定滤波结果,但这种方法效率过低且没有结合地形信息。Zhang 等<sup>[10]</sup>提出了一种经典的渐进形态学滤波方法,在这种方法中,滤波窗口从小到大,并且不同的窗口对应不同的高差阈值,通过计算开运算前后的高程差来判断是否剔除地物点,多次迭代直至窗口尺寸大于最大建筑物尺寸,得出最终结果。但该方法假设地形坡度是连续的,不适用于复杂环境,地形细节保留效果不好。Chen 等<sup>[11]</sup>在 Zhang 等<sup>[10]</sup>的基础上,将算法从一维扩展到二维,这提升了算法在起伏地形中的处理效果,但需要大量的实验来设置参数。Li 等<sup>[12]</sup>提出了一种梯度约束的形态学滤波算法,该算法首先采用形态学梯度识别梯度特征点,形态学梯度在滤波前定位潜在的目标点,目的是提高计算效率和保留地形特征,但该算法依赖于数据的采样间距。谷延超等<sup>[13]</sup>提出一种点云数据由粗到精的两级滤波策略,该策略解决了形态学滤波存在的地形过腐蚀问题,但错分误差偏大。

针对形态学滤波算法在复杂地形区域误差较大,保留地形细节特征效果较差的问题,本文提出一种基于薄板样条(TPS)插值的多级改进形态学滤波算法,该算法的本质是渐进形态学滤波算法与多级插值滤波算法的结合。利用薄板样条插值对不同窗口进行处理,计算形态学膨胀运算后的地形起伏度,同时计算窗口下形态学开运算后的高程差,将地形

起伏度与高程差作差,最后比较作差值与阈值的大小,得出结果。利用国际摄影测量协会提供的测试数据集对不同算法进行实验,结果表明,所提算法有效保留了各类地形细节特征,总体精度得到提高。

## 2 改进算法原理

### 2.1 渐进形态学滤波算法

数学形态学是建立在拓扑学基础上的图像分析与识别方法,其最基本运算为腐蚀和膨胀。腐蚀运算的过程是在自定义的结构元素(窗口)内寻找数据集中每个元素的最小值来替代中心元素的值,当此窗口足够大,就能移除那些面积小、作用不大的物体;膨胀运算的过程是在自定义的结构元素内寻找数据集中每个元素的最大值来代替中心元素的值,此时窗口的大小可用来填充集合内部的孔洞。开运算和闭运算是数学形态学中两个主要操作。开运算是先腐蚀后膨胀的联合运算过程,一般可平滑集合的边缘、消除毛刺等;闭运算则是先膨胀后腐蚀的过程。目前经典的形态学滤波算法的思路是先使用栅格化的点云数据,取每个栅格内最低点进行形态学开运算,计算开运算前后栅格的高程差,并与计算的阈值相比较,将高程差大于阈值的点判别为地物点从而实现过滤,通过持续迭代至窗口大小大于最大建筑物的尺寸,最终获得滤波结果。该方法中阈值是结合地形坡度信息和不同的窗口大小计算得出的,不同窗口对应不同的阈值。这种滤波算法适用于连续的坡度区域,在复杂的城市等地区滤波效果较差,而且在地形特征信息处理上存在缺陷,保留地形特征效果较差。

在处理细节地形方面对经典的渐进形态学滤波算法进行优化改进,针对地形细节存在高程上的突变,采用不同窗口下的最低高程点进行 TPS 插值,获得一个初始的近地表面 DEM;然后对其进行膨胀运算,同时计算地形起伏度,得到对应地形坡度;通过将点的高程与地形起伏度作差值再与阈值比较,得出最后的滤波结果。

### 2.2 薄板样条插值

薄板样条插值是一种有效的、鲁棒的空间数据插值方法,通过给定的不规则分布的控制点建立平滑表面,同时使所有点的坡度变化最小,即达到最小曲率面<sup>[14]</sup>。弯曲能量的表达式为

$$J_s = \iint \left[ \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right)^2 \right] dx dy, \quad (1)$$

式中： $S(x, y)$ 表示 TPS 近似表面函数。

$$S(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + \sum_{i=1}^n w_i R\left\| (x_i, y_i) - (x, y) \right\|, \quad (2)$$

式中： $a_0, a_1$ 和 $a_2$ 是趋势函数的系数； $n$ 是计算薄板样条函数控制点的数目； $w_i$ 是控制点的权重； $R$ 为核函数。

$$R(r) = r^2 \log r, \quad (3)$$

式中： $r$ 为两点间的欧氏距离。为了使表面函数 $S(x, y)$ 可二次积分,需满足条件:

$$\sum_{i=1}^n w_i = \sum_{i=1}^n w_i x_i = \sum_{i=1}^n w_i y_i = 0, \quad (4)$$

式中： $(x_i, y_i)$ 表示第 $i$ 个控制点的坐标。根据式(4)可得到线性方程式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{P} \\ \mathbf{P}^T & \mathbf{O} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{O} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中： $\mathbf{K}$ 是 $n \times n$ 矩阵，可由 $K_{ij} = R\left\| (x_i, y_i) - (x_j, y_j) \right\|$ 得到； $\mathbf{W}$ 由 $w_i$ 获得； $\mathbf{a}$ 是趋势函数的系数矩阵； $\mathbf{T}$ 是第 $i$ 个控制点的高程值； $\mathbf{P}$ 是

$n \times 3$ 矩阵。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix}. \quad (6)$$

TPS 插值方法能较好模拟地形,与其他插值法相比,更能反映出高程变化的物理特性,具有平滑、连续等特点;另外 TPS 插值不需要控制点规则排列,适合离散点插值,特别是在复杂环境中也能得到较好的插值结果。

### 2.3 算法流程

以多级形态学滤波算法为基础,引入薄板样条插值,根据不同的滤波窗口在不同的层级上进行插值,目的是计算地形起伏度。地形起伏度由插值后的结果经膨胀运算后减去原始的拟合面所得出,可一定程度上保留地形细节,提高滤波精度。所设置的窗口尺寸从上到下减小,直至窗口大小近似等于最大建筑物尺寸。改进算法的流程如图 1 所示。地形起伏度的计算公式为

$$\sigma_{\text{DEM}} = \delta_{\text{DEM}} - O_{\text{DEM}}, \quad (7)$$

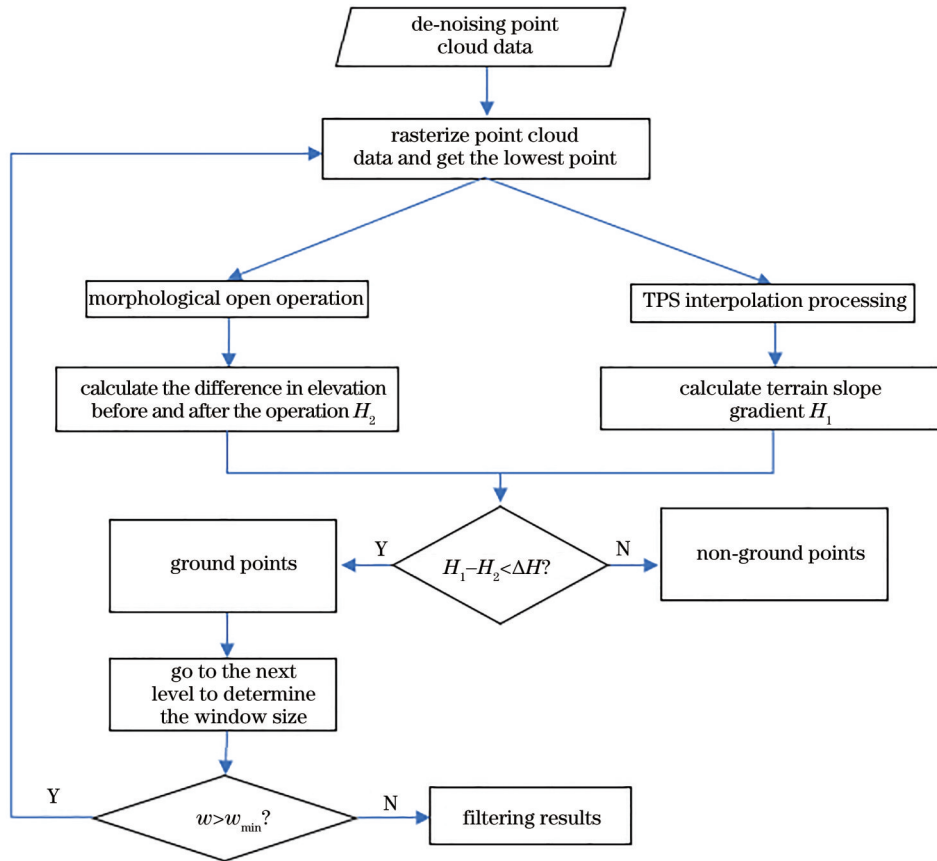


图 1 改进的滤波算法流程

Fig. 1 Flowchart of improved filtering algorithm

式中:  $\sigma_{\text{DEM}}$  表示地形起伏度;  $\delta_{\text{DEM}}$  表示对原始  $O_{\text{DEM}}$  进行膨胀运算。

首先,对点云进行去噪,对去噪后的点云数据建立格网索引,对当前滤波窗口下的格网数据进行形态学开运算,计算开运算前后的栅格高程差  $H_1$ ,同时寻找每个格网中的最低高程点;然后根据最低高程点参考面进行 TPS 插值,得到拟合的地形参考面,此时采用 TPS 插值是因为针对离散点插值可以获得较好的插值结果,得到的地形参考面也与实际地形面较为符合;接着对拟合面进行形态学膨胀运算,得到对应膨胀结果,将膨胀后的拟合面减去原拟合面,得到地形的地形起伏度  $H_2$ ,最后得到  $H_1$  和  $H_2$  的差值,比较其与高差阈值  $\Delta H$  的大小来判断点属于地面点还是非地面点。算法中,若点被判别为地面点,则保留到下一级操作,另外随滤波的完成,窗口的大小也会减小,高差阈值  $\Delta H$  也会相应改变,当前级别滤波结果将保留,生成新的格网索引,重复此过程,直至窗口大小小于最小窗口结束。算法的具体实施步骤如下。

### 2.3.1 点云去噪

噪声点主要是高程值的异常造成的,由于噪声点与周围激光脚点存在高程差,所以可以把噪声点分为高、低位噪声点。采取两个步骤来去除噪声点:基于密度去噪算法先设置密度,计算每个点云阈值距离内的点云数量,低于所设置数量阈值的噪声点则被剔除;基于第一个步骤的检测结果再进行人工校正。

### 2.3.2 建立格网

首先,对去噪后的点云数据进行格网化,即在  $X$ - $Y$  平面对点云进行格网划分,再建立格网索引和确定格网边界,索引行号和列号分别为  $i$  和  $j$ 。将每个格网内的高程最低点赋予给该格网。格网化后会存在部分栅格不包含点云的情况,针对这类栅格,采用最邻近法将距离最近的点赋予该格网,避免数据缺失影响,此步骤不采用 TPS 插值,避免误差传递。

### 2.3.3 形态学开运算

对于当前已栅格化的点云数据,根据当前的窗口尺寸进行形态学开运算,计算开运算前后该层的高差变化  $H_1$ 。

### 2.3.4 TPS 插值计算地形起伏度

从栅格化的点云数据中选取每个栅格的最小高程点,并指定给该栅格,对当前窗口下所有最小高程点进行 TPS 插值,得到拟合的参考面,再对

拟合的参考面进行形态学膨胀运算,计算得到地形起伏度值  $H_2$ 。地形起伏度可通过式(7)得到。

### 2.3.5 滤波判断

通过对初始点云进行 TPS 插值处理后,得到对应栅格的地形起伏度  $H_2$ 。由于 Zhang 等<sup>[10]</sup>的方法中地形坡度  $S$  为常量,为了增强在实际地形中的适用性,得到地形起伏度后,要计算不同层级的地形坡度,进而求出高差阈值  $\Delta H$ ;再将其与该点窗口下形态学开运算前后的高差  $H_1$  作差,若差值大于阈值  $\Delta H$ ,则被视为地物点剔除,若小于阈值  $\Delta H$ ,则可接纳为地面点,并代入下一级重新建立格网索引,重复此过程直到窗口大小小于最小窗口尺寸。不同层级的地形坡度计算式为

$$\begin{cases} S_{(i,j)} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} + n_c \\ F_X^2 = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2C} \\ F_Y^2 = \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2C} \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $S_{(i,j)}$  表示格网  $(i, j)$  处的地形坡度;  $F_X$ 、 $F_Y$  分别为水平、垂直梯度;  $n_c$  为坡度变化常量,这里设置为 0.1;  $z$  对应参考高程值;  $C$  指栅格尺寸。

## 3 实验及结果分析

### 3.1 实验数据

采用国际摄影测量与遥感协会 (ISPRS) 第三委员会提供的专门测试 LiDAR 点云滤波算法的数据进行实验,共有 12 组样本数据,包含不同特征(建筑物、公路、植被、陡坡等)的 6 个场景,位于城市和林区场景之中,如表 1 所示。对数据集已经提前手动

表 1 样本数据特征

Table 1 Sample data characteristics

Environment	Sample	Feature
Urban	S11	Vegetation and buildings on hillside
Urban	S21	Large buildings and bridge
Urban	S22	Irregular shaped buildings
Urban	S23	Large irregular buildings
Urban	S24	Steep slopes
Urban	S31	Large complex buildings
Urban	S41	Data gaps
Rural	S51	Lots of vegetation on hillside
Rural	S52	Low vegetation on steep slopes
Rural	S54	Irregular shaped buildings
Rural	S61	Discontinuous steep slopes
Rural	S71	Data gaps and bridge

分类出地面点和地物点,点云平均间距为 1~1.5 m 和 2~2.5 m。采集数据的地点位于 Vaihingen/Enz 测试场和 Stuttgart 市中心,仪器为 Optech ALTM 型激光扫描仪<sup>[15]</sup>。所提算法采用 Matlab 语言实现。

### 3.2 精度评价指标

2003 年国际摄影测量与遥感协会第三委员会提出了由混淆矩阵推导的 I 类误差 ( $T_I$ )、II 类误差

( $T_{II}$ ) 和总误差 ( $T_e$ ) 检验滤波效果的精度评价指标。I 类误差、II 类误差、总误差分别表示地面点被误分为非地面点、非地面点被误分为地面点、地面点和非地面点都被误分,如表 2 所示。其中  $a$  是地面点分类正确的点个数, $b$  是地面点被误分为非地面点的个数, $c$  是非地面点被误分为地面点的个数, $d$  是非地面点分类正确的个数。

表 2 精度评价指标

Table 2 Precision evaluation indicators

Parameter	Filtering result		Total
	Terrain point	Non-terrain point	
Terrain point	$a$	$b$	$e = a + b$
Non-terrain point	$c$	$d$	$f = c + d$
Total	$g = a + c$	$h = b + d$	$n = e + f$
Error	$T_I = b / (a + b)$	$T_{II} = c / (c + d)$	$T_e = (b + c) / n$

### 3.3 实验结果与分析

首先分别使用 Zhang 等<sup>[10]</sup>的经典形态学滤波算法和所提算法对 12 组数据进行实验并比较,得到的

I 类误差, II 类误差和总误差的结果如表 3 所示,图 2 为经典算法和改进算法对 12 组数据的总误差折线图。

表 3 不同算法的精度评价指标

Table 3 Precision evaluation indicators of different algorithms

unit: %

Sample	Classical algorithm			Proposed algorithm		
	I-type error	II-type error	Total error	I-type error	II-type error	Total error
S11	16.16	16.38	16.25	10.22	17.60	13.37
S21	15.14	23.04	16.89	1.73	4.09	2.27
S22	14.74	43.30	23.34	4.32	9.31	5.85
S23	12.46	8.52	10.59	7.51	8.90	8.17
S24	14.80	18.12	15.71	3.42	12.66	5.96
S31	8.48	12.81	10.47	4.85	6.92	5.81
S41	21.00	15.70	18.35	11.33	9.71	10.52
S51	5.02	24.62	9.30	3.19	13.27	5.39
S52	8.62	30.19	10.89	6.02	16.08	7.07
S54	13.26	15.22	14.31	2.41	7.70	5.28
S61	3.56	37.03	4.71	3.10	34.11	4.16
S71	8.85	39.62	12.34	5.09	18.39	6.58

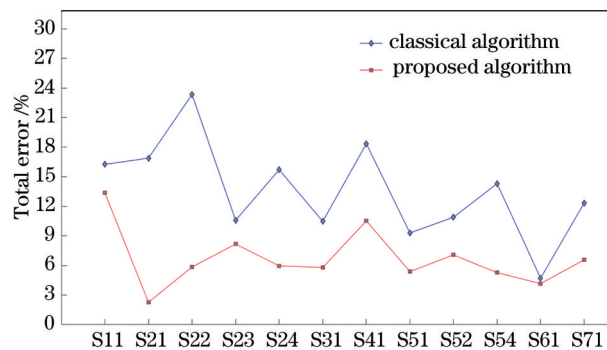


图 2 总误差

Fig. 2 Total error

根据表 3 和图 2 可看出,改进算法的 I 类误差、II 类误差均小于经典形态学滤波算法。

从表 3 中可看出:经典形态学滤波算法有 5 组数据的 I 类误差低于 10%, 数据 S41 的 I 类误差高于 20%, 只有数据 S23 的 II 类误差低于 10%, 有两组数据的总误差低于 10%, 总误差介于 4.71%~23.34%; 所提改进算法所得的实验结果中 I 类误差有 10 组数据都小于 10%, 数据 S21 最低, 为 1.73%, II 类误差有 6 组数据小于 10%, 数据 S21 最低, 为 4.09%, 总误差有 10 组数据小于 10%, 最低

为数据 S21, 为 2.27%, 总误差介于 2.27%~13.37%, 改进算法的各类误差均有明显改善。

所提算法在处理数据 S11、S23 和 S41 时得到的 I 类误差较大, 这说明所提算法在处理陡坡、低矮植被、山坡和数据间断地形环境时更多地把地面点判别为非地面点, 地形的细节保留较差, 尤其是对于数据 S41 的地形间断区域; 处理数据 S11、S52、S61 和 S71 时得到的 II 类误差较大, 这说明所提算法在处理陡坡和道路地形区域时容易将非地面点判别为地面点, 而 II 类误差可通过人工检测方式容易剔除; 处理数据 S11 时得到的总误差最大, 这说明所提算法在 S11 数据地形中表现最差, 在 S11 数据包含的陡坡、坡上低矮植被及建筑地区容易将地物

点误判为地面点, 可能是因为植被等地物与地面过于贴合, 另一方面, 陡坡坡度变化较大, 也是地面点错判为非地面点被剔除的原因; 处理数据 S21 时得到的总误差最小, 这说明所提算法在处理地面上有明显建筑物, 存在明显的高差突变地区时的滤波效果最好, 适应性最强, 这也说明在此地区的细节保留效果更好。

图 3 显示了原始点云生成的数字表面模型、经典形态学滤波处理后的点云数据生成的数字高程模型、所提算法处理后的点云数据生成的数字高程模型。从图 3 可直观看出, 相比经典形态学滤波处理, 所提改进滤波算法更好地剔除了非地面部分, 同时地面细节也得到更好的保留。

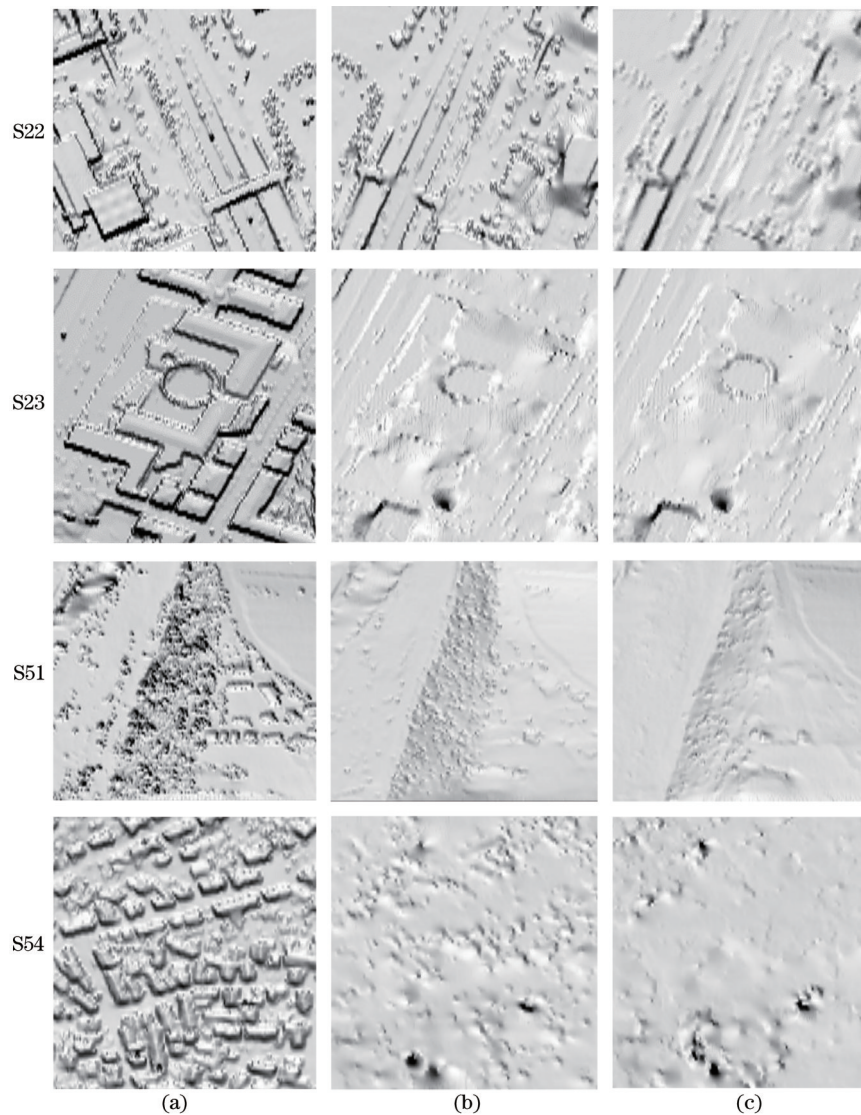


图 3 滤波结果。(a)原始数据数字表面模型;(b)经典形态学滤波处理后地面点数字高程模型;(c)所提算法处理后地面点数字高程模型

Fig. 3 Filtering results. (a) Digital surface models of raw data; (b) digital elevation models of ground points processed by traditional morphological filtering; (c) digital elevation models of ground points processed by proposed algorithm

图 4 显示了经典算法和所提算法对样本 S23 和 S51 的第 I 类和第 II 类误差的空间分布。可以看出,在经典算法中,第 I 类误差点主要分布在建筑物、街道以及大面积的山坡边缘,第 II 类误差点主要分布在街道和山坡的低矮树木上;所提算法中,第 I 类误差点只存在于建筑物的边缘,而第 II 类误差点也主要存在于 S23 样本街道上的低矮树木中。这说明,建

筑物附近的一些接地点可以归为非接地点,一些低高度的物体点也可以被归类为地面点,它的发生是因为一些建筑边缘太接近地面而将建筑边缘视为地面。对于 S51,第 I 类误差点存在于地形边缘的一侧,第 II 类误差点存在于山坡上。这说明在实际地形起伏的影响下,有些地点可以被划分为非地点,山坡上的非地点因高度过低而被判定为地点。

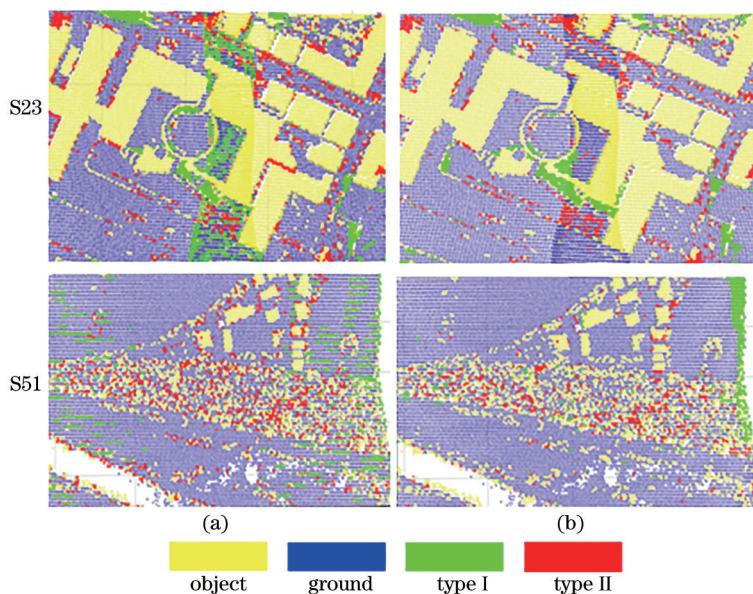


图 4 样本 S23 和 S51 的第 I 类和第 II 类误差的空间分布。(a)经典算法;(b)所提算法

Fig. 4 Spatial distribution of the I-type and the II-type errors for S23 and S51. (a) Classical algorithm; (b) proposed proposed

为了更客观、清楚地评判所提改进滤波算法的优劣性,对所提算法的滤波结果(PM)与已测试过的其他 7 种滤波算法的精度进行比较,包括 Sohn 等<sup>[16]</sup>的规则化滤波算法、Axelsson<sup>[17]</sup>的 PTD 算法、Pfeifer 等<sup>[18]</sup>的多层级稳健内插滤波算法、Li<sup>[19]</sup>的多

梯度形态学算法、Zhang 等<sup>[20]</sup>的基于点云改进的 PTD 滤波算法、Wack 等<sup>[21]</sup>的多层级改正的最小块滤波算法等。所采用的评价指标是滤波算法对 12 组样本数据的总误差和平均整体精度,总误差对比结果如表 4 所示,平均整体精度对比如图 5 所示。

表 4 不同算法的总误差

Table 4 Total error of different algorithms

unit: %

Sample	Sohn	Axelsson	Pfeifer	Elmqvist	Li	Zhang	Wack	PM
S11	20.49	10.76	17.35	22.40	12.85	18.49	24.02	13.37
S21	8.80	4.25	2.57	8.53	2.55	4.95	4.55	2.27
S22	7.54	3.63	6.71	8.93	4.06	14.18	7.51	5.85
S23	9.84	4.00	8.22	12.28	6.16	12.06	10.97	8.17
S24	13.33	4.42	8.64	13.83	5.67	20.26	11.53	5.96
S31	6.39	4.78	1.80	5.34	2.47	2.32	2.21	5.81
S41	11.27	13.91	10.75	8.76	6.71	20.44	9.01	10.52
S51	9.31	2.72	3.71	21.31	3.92	5.31	11.45	5.39
S52	12.04	3.07	19.64	57.95	15.43	12.98	23.83	7.07
S54	5.68	3.23	5.47	21.26	3.93	6.40	7.63	5.28
S61	2.99	2.08	6.91	35.87	5.81	16.13	13.47	4.16
S71	2.20	1.63	8.85	34.22	4.58	10.44	16.97	6.58
Ave	9.15	4.87	8.38	20.89	6.17	11.99	11.42	6.69

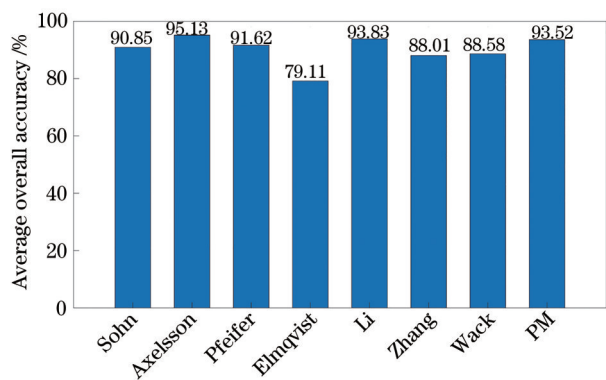


图 5 不同滤波算法的平均总体精度比较

Fig. 5 Comparison of average overall accuracy of the different filtering algorithms

从表 4 可知:所提算法针对 12 类数据的总误差都比较小,尤其对于数据 S21,比其他 7 种方法表现更好,这说明所提算法更适合含不规则建筑等的地形区域;而在其他数据中,只有数据 S11、S23 和 S41

与该组的最小总误差差值大于 8%,其他组差值均相差很小;在 12 组数据的平均总误差中,所提算法的总误差与最小总误差相差 1.82%;虽然所提算法的平均总误差要稍高于 Axelsson 算法,但在数据 S21 和 S41 的总误差要低于 Axelsson 算法。总体来看,所提算法的滤波精度已经在目前的算法精度中处于较高水平,而且在地形复杂区域特别是复杂建筑物地区的滤波效果也让人满意,算法的适应性也较强。

由于所提算法是基于 Mongus 等<sup>[22]</sup>提出的多级插值方法和 Li 等<sup>[23]</sup>提出的形态学滤波方法得到的,将这三种方法应用于 12 个样本数据,得到各方法的总误差如图 6 所示。所提算法在样本 S21、S24、S52 和 S61 中均取得了较好的滤波效果,其中 S24 具有典型的坡度特征,S52 和 S61 具有突出的地形特征。在样本 S21 和 S61 中,所提算法的总误差低于其他两种方法。

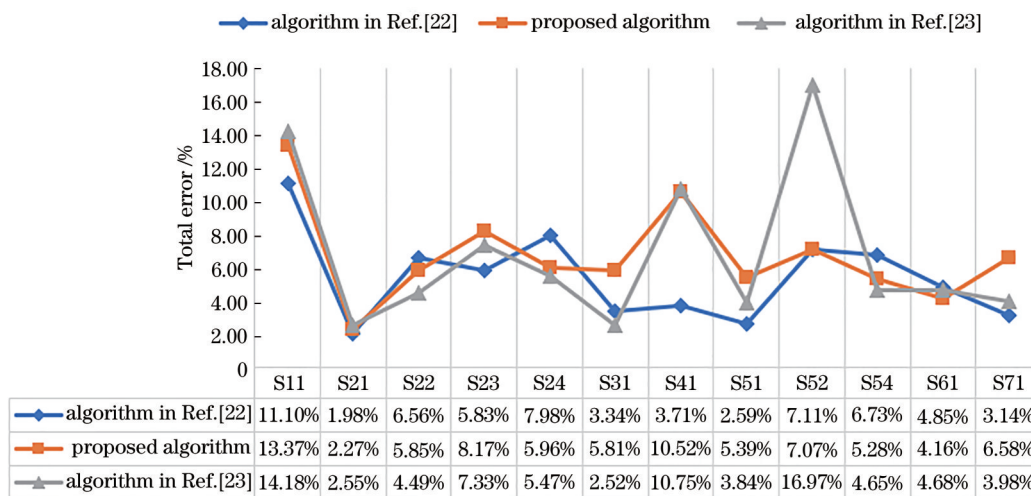


图 6 三种滤波算法对 12 个样本的总误差比较

Fig. 6 Comparison of the total error of three filtering algorithms for 12 samples

## 4 结 论

滤波作为激光雷达点云数据处理中的关键步骤,算法的精度和实用性一直是研究热点。形态学滤波算法作为经典的点云滤波算法已经得到长期的发展,也是应用较为广泛的一种算法。针对形态学滤波算法一直存在的地形特征保留效果不佳的问题,为了提高点云滤波的总体精度,提出了一种基于 TPS 插值的渐进形态学滤波算法。该算法结合了 TPS 多级插值曲面拟合算法和形态学滤波算法的优势,使用 ISPRS 公布的测试数据集进行了滤波实验。结果表

明,相比传统形态学滤波算法,所提算法的精度在整体上有明显的提高,在存在明显建筑物地区的误差最小,适应性好,但是在陡坡、坡上存在低矮地物和数据间断地区的效果不佳,原因是错误地将地面点误判为非地面点。总体来说,所提算法较好地保留了地形细节,提高了滤波精度,在复杂地区的适应性也较强。同时与其他 7 种滤波算法相比,所提算法的总误差要好于多数滤波算法,精度处于较高水平。下一步,需研究如何提高算法参数设置的自适应性和算法总体效率,同时要对在极端地形陡坡和数据间断地区等的地面点误判为地物点问题进行改进。



## 参 考 文 献

- [1] 黄作维, 刘峰, 胡光伟. 基于多尺度虚拟格网的 LiDAR 点云数据滤波改进方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0828004.  
Huang Z W, Liu F, Hu G W. Improved method for LiDAR point cloud data filtering based on hierarchical pseudo-grid[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0828004.
- [2] 张凡, 李华山, 江涛. 基于布模拟算法在 LiDAR 点云中生成数字高程模型[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130104.  
Zhang F, Li H S, Jiang T. Digital elevation model generation in LiDAR point cloud based on cloth simulation algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130104.
- [3] 李旺, 牛铮, 王成, 等. 机载 LiDAR 数据估算样地和单木尺度森林地上生物量[J]. 遥感学报, 2015, 19(4): 669-679.  
Li W, Niu Z, Wang C, et al. Forest above-ground biomass estimation at plot and tree levels using airborne LiDAR data[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(4): 669-679.
- [4] 赵宗泽, 张永军. 基于植被指数限制分水岭算法的机载激光点云建筑物提取[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1028002.  
Zhao Z Z, Zhang Y J. Building extraction from airborne laser point cloud using NDVI constrained watershed algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1028002.
- [5] 杨业, 李宏宁. 基于机载 LiDAR 点云数据的电力线自动提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 090102.  
Yang Y, Li H N. Automatic power line extraction method based on airborne LiDAR point cloud data[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 090102.
- [6] 吴建军, 陈灵, 李磊, 等. 机载 LiDAR 点云中电力线的提取和重建研究[J]. 激光技术, 2019, 43(4): 64-69.  
Wu J J, Chen L, Li L, et al. Power line extraction and reconstruction from airborne LiDAR point cloud [J]. Laser Technology, 2019, 43(4): 64-69.
- [7] 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.  
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.
- [8] Lindenberger J. Laser-Profilmessungen zur topographischen geländeaufnahme[D]. Munich: Deutsche Geodatische Kommission, 1993.
- [9] Kilian J, Haala N, Nglich M. Capture and evaluation of airborne laser scanner data[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 31: 383-388.
- [10] Zhang K Q, Chen S C, Whitman D, et al. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4): 872-882.
- [11] Chen Q, Gong P, Baldocchi D, et al. Filtering airborne laser scanning data with morphological methods[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(2): 175-185.
- [12] Li Y, Wu H Y, Xu H W, et al. A gradient-constrained morphological filtering algorithm for airborne LiDAR[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 54: 288-296.
- [13] 谷延超, 范东明, 余彪, 等. 基于形态学与区域生长的机载 LiDAR 点云数据滤波[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(5): 811-815.  
Gu Y C, Fan D M, Yu B, et al. Filtering of airborne LiDAR point cloud data based on mathematical morphology and region growing[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(5): 811-815.
- [14] 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.
- [15] Sithole G, Vosselman G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 59(1/2): 85-101.
- [16] Sohn G, Dowman I. Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2007, 62: 43-63.
- [17] Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 23(B4): 110-117.
- [18] Pfeifer N, Kostli A, Kraus K. Interpolation and filtering of laser scanner data-implementation and first results[EB/OL]. [2021-04-16]. <http://citeseerx.ist.psu>.

- edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.221.9625.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Wack R, Wimmer A. Digital terrain models from airborne laser scanner data-a grid based approach[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2002, 34 (3/B): 293-296.
- [22] Mongus D, Lukač N, Žalik B. Ground and building extraction from LiDAR data based on differential morphological profiles and locally fitted surfaces[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 93: 145-156.
- [23] Li Y, Yong B, Wu H Y, et al. An improved top-hat filter with sloped brim for extracting ground points from airborne lidar point clouds[J]. Remote Sensing, 2014, 6(12): 12885-12908.