

基于顶点向量角的改进型扫描线滤波算法

蒋志祥, 邓兴升*, 邢承滨

长沙理工大学交通运输学院测绘工程系, 湖南 长沙 410000

摘要 扫描线滤波算法可以在一定程度上简化滤波问题,并在复杂地形中可以取得较好的滤波效果,但该算法难以滤除一些地面下方的噪声点以及正、反坡度角相差较大的点。针对上述问题,提出顶点向量角-扫描线滤波算法,利用顶点向量角并结合高差阈值对扫描线进行后处理,可以进一步提高所提算法的滤波效果。通过实验将传统算法与改进后的算法进行对比,证明顶点向量角-扫描线滤波算法能够取得更佳的滤波效果。

关键词 遥感; 激光雷达; 点云滤波; 扫描线; 顶点向量角; 阈值

中图分类号 O436 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.232801

Improved Scan Line Filtering Algorithm Based on Vertex Vector Angle

Jiang Zhixiang, Deng Xingsheng*, Xing Chengbin

*Department of Surveying and Mapping Engineering, School of Traffic & Transportation Engineering,
Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410000, China*

Abstract The scan line filtering algorithm can simplify the filtering problem to a certain extent and achieve improved filtering results in complex terrains. However, it is difficult to filter out some noise points under the ground and points with large difference between positive and negative slope angles. To resolve these problems, a vertex vector angle-scan line filtering algorithm is proposed, where the vertex vector angle and height difference threshold are used to perform postprocessing on the scan line, further improving the filtering effect. The traditional algorithm is compared with the improved algorithm through experiments, proving that the latter can achieve improved filtering results.

Key words remote sensing; laser radar; point cloud filtering; scan line; vertex vector angle; threshold

OCIS codes 280.3640; 280.4750; 280.3420

1 引言

随着激光雷达测量技术的发展,为获取高时空分辨率的地球空间信息提供一种全新的技术手段,该技术是将传统人工单点数据的获取变成连续自动数据的获取。相比于传统的摄影测量技术,该技术不仅提高了观测的精度和速度^[1],而且使数据的获取和处理朝着更智能化和自动化的方向发展^[2]。

由于地形复杂且多样,点云数据的滤波处理一直是数据后处理的难点问题之一。许多国内外的学者对点云滤波算法进行了相关的研究实验,目前根据滤波原理^[3]将算法分为基于坡度的滤波算法^[2]、

基于形态学滤波算法^[4-5]、基于分割的滤波算法^[6]、基于不规则三角网的滤波算法^[7]和曲面拟合的滤波算法^[8-9]。

文献[10-11]提出了基于偏度平衡的点云滤波算法,假设大量的离散地面点在自然状态下服从正态分布,非地面点则影响地面点服从正态分布,而算法需在滤波样本足够大且没有其他因素干扰的前提下进行,因此滤波效果难以保证。文献[12]提出了基于动态阈值的点云滤波算法,该算法首先采用多尺度格网对点云进行划分,然后计算点云的真实值和拟合值之间的差值后对点云进行滤波。文献[13]利用了置信区间来判断滤波算法的种子点是否存在

收稿日期: 2020-04-05; 修回日期: 2020-04-23; 录用日期: 2020-04-27

基金项目: 长沙理工大学公路工程教育部重点实验室开放基金(kfj190203)、湖南省自然科学基金(2020JJ4601)

* E-mail: 383500135@qq.com

粗差点。上述算法都是在建立格网的前提下进行处理,而基于扫描线的滤波算法是在扫描线上进行处理,不是整个点云数据,并且不需要建立规则格网或不规则三角网等数据结构,因此不会造成数据精度的损失。

2004年,Sampath^[14]提出了基于扫描线的滤波算法,该算法为扫描线算法的发展奠定了基础,但该算法仅通过判断高差及坡度是否超过阈值来确定点云属性,并未考虑整个扫描区域地形以及一些复杂城区地形的坡度,所以造成数字地面模型(DTM)的精度较低。文献[15]对基于扫描线的滤波算法进行了改进,改进算法不仅考虑了地形的连续性,也考虑了整个扫描区域地形的特征,因此有效提高了DTM的精度;文献[16]针对扫描线法阈值单一和误差积累的缺点,提出了基于扫描线的自适应角度偏差法,该方法对扫描中心、基准点和待判断点之间的角度进行限差,从而实现角度对地形的自适应,为此较好地解决起伏较大地形点云的滤波问题。

综上所述,基于扫描线的滤波算法是将三维问题转化为二维,处理效率高并对复杂建筑物的提取比较有效,但也存在缺陷,比如不能去除地面下方的噪声点,以及对于一些正、反坡度角相差较大的点容易判断错误。为了解决扫描线法滤波的缺陷以及提高算法滤波后的精度,本文提出顶点向量角-扫描线滤波算法,将顶点向量角与高差阈值作为判断条件,可以进一步改善扫描线算法的滤波效果。

2 顶点向量角-扫描线滤波算法

经典的一维地形特征提取算法需预先设定高差阈值 $Z_{\text{threshold}}$ 和坡度阈值 $S_{\text{threshold}}$,假设扫描线的第一个点为地面点,通过判断激光点与最近地面点的高差与坡度是否小于预先设定的阈值,来判定激光点是否为地面点,但上述算法与文献[15]都无法处理地面下方的漫反射噪声点以及正、反坡度角相差较大的点。

针对上述问题,将顶点向量角与高差阈值作为判断条件,对非地面点进行进一步的滤除,并对扫描线滤波算法进行改进。

2.1 定义

在划分好的扫描线中,从某一点向两相邻点引直线,由该点沿直线指向两相邻点的两个向量之间的夹角称为该点的顶点向量角。顶点向量角表示顶点处小于 180° 的角,如图 1 所示。若某一点的顶点向量角越小,说明该点越突兀,一般顶点

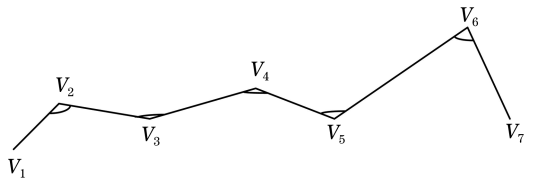


图 1 顶点向量角示意图

Fig. 1 Schematic of vertex vector angle

向量角的阈值设定范围为 $\pi/3 \sim 2\pi/3$,具体情况根据地形的陡峭程度而决定。传统的扫描线算法首先判断相邻点之间的坡度变化,再根据前一个点的属性来判断后一个点的属性,这对成群地物点的去除具有很好的效果。对于单个地物点的去除,顶点向量角更能凸显地物点的特点。顶点向量角既能考虑地面下方未被预处理滤除的噪声点,又能考虑正、反两个方向的坡度角,因此适用于判断单个存在的非地面点。

2.2 数据预处理

预处理的主要目的是为了剔除激光束打在飞鸟或低空飞行器等产生的噪声点,这类噪声点一般位于点云数据的极大值或极小值处,因此采用频率直方图去极值法对点云数据进行处理以达到去噪的目的。首先使用该方法来找到整块数据的最大值与最小值并求解差值,接下来将整块数据按照差值的大小分成若干份,一般约为 10 份。由于噪声点与地物点的高程差较大,因此大部分的噪声点会在这一过程中被找到,进而对这些噪声点进行滤除^[16-17]。

2.3 扫描线的划分及索引

扫描线的基本单元是由同一条线上的点云构成的,扫描线的划分结果如图 2 所示。使用同样宽度

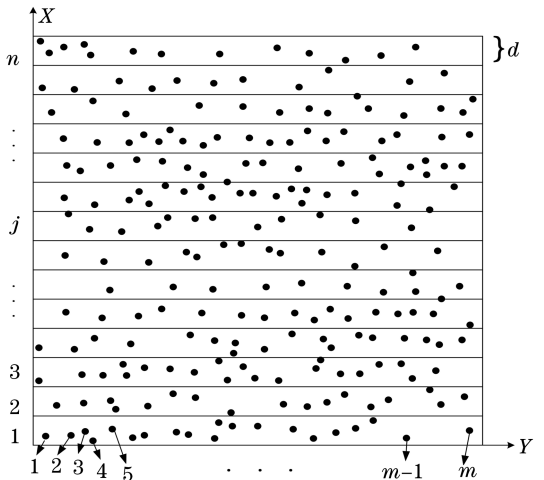


图 2 扫描线的划分结果

Fig. 2 Division result of scan line

的扫描线将点云数据全部覆盖,将点云数据按照平面坐标分配到相应的扫描线中。扫描线的划分步骤如下。

1) 旋转点云数据。使整块点云数据的边界平行或垂直于平面坐标系的 X 轴,使整块数据左下方的点正好位于原点。点云数据的获取并不都是沿着 X 轴或 Y 轴的方向进行激光扫描,因此得到的整块数据的边界也不一定是平行或垂直于 X 轴的。滤波处理的过程中,只需要知道点云数据之间平面的相对位置关系即可。为了方便后续处理,需预先求解测试区域内所有点的旋转角,表达式为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y_{v_4} - y_{v_1}}{x_{v_4} - x_{v_1}}\right), \quad (1)$$

式中: x_{v_1} 和 y_{v_1} 为测试区域中横坐标值最小的采样点 v_1 的坐标; x_{v_4} 和 y_{v_4} 为测试区域中纵坐标值最大的采样点 v_4 的坐标。通过

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

对点云数据进行旋转,以便将扫描线都能够划分为大致相同的长度。式中: x_i 和 y_i 为测试区域中第 i 个点的原始坐标; x'_i 和 y'_i 为测试区域中第 i 个点旋转后的坐标。

2) 设定扫描线宽度。当划分扫描线时,需要在一个方向上设定好宽度,扫描线的宽度与实验数据采样点的密度有关,使扫描线既能展现出真实地形的起伏情况,又不会忽略地面上的最小地物。实验过程中,将扫描线宽度 d 设定为 0.5 m,并在 X 轴上进行划分。因为步骤 1) 已将整块点云数据的边界平行或垂直于 X 轴,划分后的整块点云数据都被划分成宽度相同且长度也基本相同的扫描线。测试区域中扫描线的最大索引号及 v_i 点所属扫描线的索引号分别为

$$n = \text{ceil}\left[\frac{\max(x') - \min(x')}{d}\right], \quad (3)$$

$$j = \text{floor}\left[\frac{x'_i - \min(x')}{d}\right] + 1, \quad (4)$$

式中: x 为测试区域中数据点的横坐标; $\text{ceil}(\cdot)$ 为向上取整; $\text{floor}(\cdot)$ 为向下取整。

3) 对扫描线中的数据进行排序。首先按照步骤 2) 划分好的扫描线并按照 (4) 式,根据点云数据的横坐标将点云数据全部划分至各个已建立索引的扫描线中;然后将各条扫描线中的点按照横坐标值的大小进行再次排序以建立索引号,从而完成扫描

线的划分。

2.4 算法具体流程

算法的具体步骤如下。

1) 对测试区域中的点云数据进行预处理,并对点云数据进行旋转操作。

2) 根据点云密度来设置适当的扫描线宽度 d ,根据旋转后点云数据的横坐标以及扫描线宽度 d 对测试区域进行数据划分。

3) 对同一扫描线内的点按照纵坐标从小到大的顺序进行排序以建立索引号。

4) 将扫描线中的第一个点定为地面点,计算后一个点与前一个点的坡度 S_{i1} ,若 $|S_{i1}|$ 值小于设定的阈值 $S_{\text{threshold}1}$,则判断该点的属性与前一个点相同。

5) 当 $|S_{i1}|$ 值大于设定的阈值 $S_{\text{threshold}1}$ 且 S_{i1} 值小于零时,若前一点为地面点,则该点也为地面点,若前一点为地物点,计算该点与最近地面点的高差 Z_i 与坡度 S_{i2} ,如果都小于设定的高差阈值 $Z_{\text{threshold}}$ 与坡度阈值 $S_{\text{threshold}2}$,则该点判断为地面点,否则判断为地物点;当 S_{i1} 值大于设定的阈值 $S_{\text{threshold}1}$ 且 S_{i1} 值大于零时,若前一点为地物点,则判断该点为地物点,若前一点为地面点,计算该点与最近地面点的高差 Z_i 与坡度 S_{i2} ,如果都小于设定的高差阈值 $Z_{\text{threshold}}$ 与坡度阈值 $S_{\text{threshold}2}$,则判断该点为地面点,否则判断为地物点。

6) 将判断为地面点的点云数据再次按照纵坐标从小到大的顺序进行排序,重新建立索引号,并计算顶点向量角 S_{top} 以及该点与最近地面点的高差 Z_{top} ,若该点的顶点向量角大于顶点向量角阈值 $S_{\text{top,threshold}}$ 且高差大于第二个设置的高差阈值 $Z_{\text{top,threshold}}$,则该点为地物点,否则为地面点。

7) 遍历所有扫描线,完成滤波。

顶点向量角-扫描线滤波算法的流程如图 3 所示。

3 实验结果与分析

为了验证所提算法的滤波精度,实验采用 ISPRS 公开发布的激光雷达数据集,该数据集是使用 OptechALTM 系统采集的 15 组机载 LiDAR 样本数据,其中样本 samp12~samp42 的点间距为 1.0~1.5 m,每平方米约有 0.67 个点,样本 samp51~samp71 的点间距为 2.0~3.5 m,每平方米约有 0.18 个点。对该样本数据集进行手工分类,将激光脚点数据集精确分为地面点和地物点^[18]。

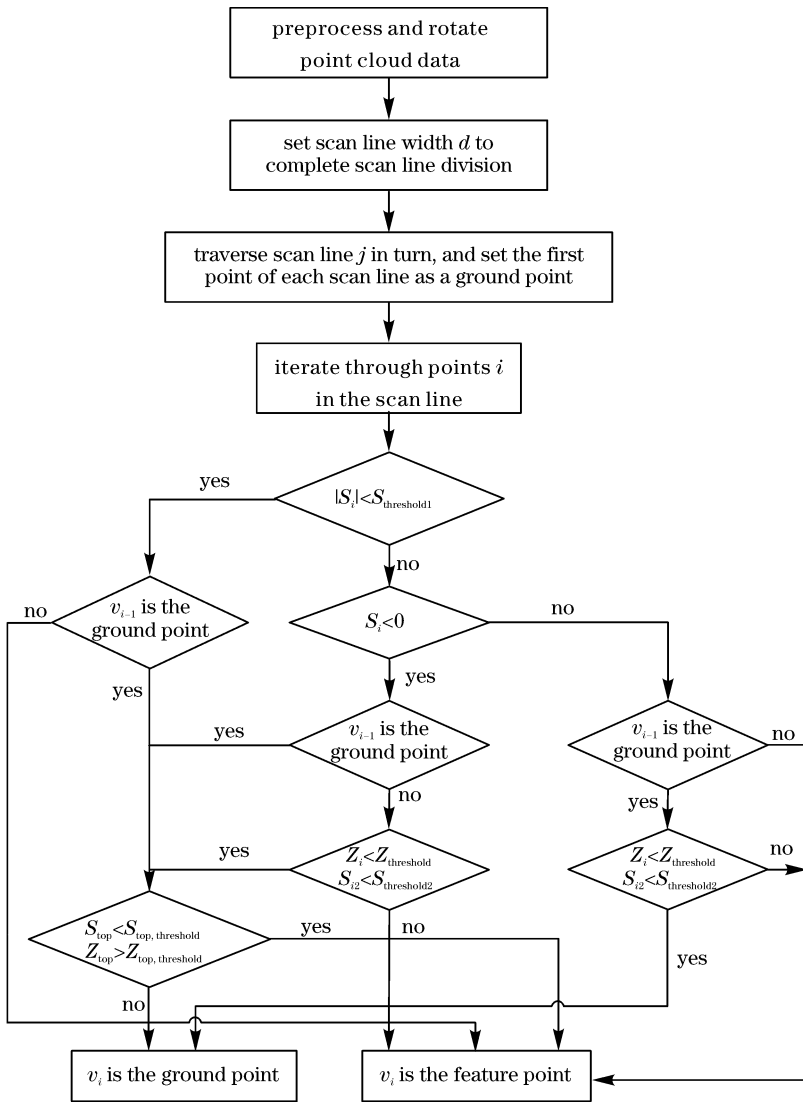


图 3 顶点向量角-扫描线滤波算法的流程示意图

Fig. 3 Flow chart of vertex vector angle-scan line filtering algorithm

实验主要对 samp12 数据集进行三组实验,分别验证顶点向量角对地面下方噪声点和正、反坡度角相差较大点的判断效果,以及对整块数据的滤波精度。

对于滤波精度的评价,采用 ISPRS 在 2003 年提出的滤波误差评判标准。第 I 类误差为地面点中被误分为地物点的误差,第 II 类误差为地物点中被误分为地面点的误差,总误差为判断错误的点数占总点数的比例。

使用 MATLAB 编程来实现滤波算法,并对扫描线进行处理。为了验证所提算法的改进效果,实验主要与文献[15]算法进行对比。

3.1 顶点向量角对地面下方噪声点的判断精度

实验选取 samp12 数据集中 $x_{min} + 20.0 < x < x_{min} + 20.5$ 的点云数据,其中 x_{min} 为横坐标最小的

值,将数据按照纵坐标从小到大的顺序并使用折线连接起来,所得结果如图 4 所示,其中圆圈点为地面点,星星点为地物点,误差统计结果如表 1 所示。

从图 4(b)和表 1 可以看到,当 $S_{threshold1}$ 、 $S_{threshold2}$ 和 Z 分别设定为 0.1 rad、0.5 rad 和 3 m 时,扫描线有较好的处理结果,此时 I 类误差为 13.43%,II 类误差为 4.29%,总误差为 8.76%,但还是有三个 II 类误差点难以滤除,并且对地形的影响较大。传统算法若要进一步滤除误差点,则需要进一步减小阈值的大小,当 $S_{threshold1}$ 、 $S_{threshold2}$ 和 Z 分别设定为 0.1 rad、0.2 rad 和 3 m 时,II 类误差点可以进一步减少,但此时 I 类误差值成倍的提高,提高至 31.34%,而且标注的大圆圈中原有的一块地形也被滤除,如图 4(c)所示。此外,图 4(c)中小圆圈标注的地面下方噪声点仍然没有滤除,这是因为传统扫

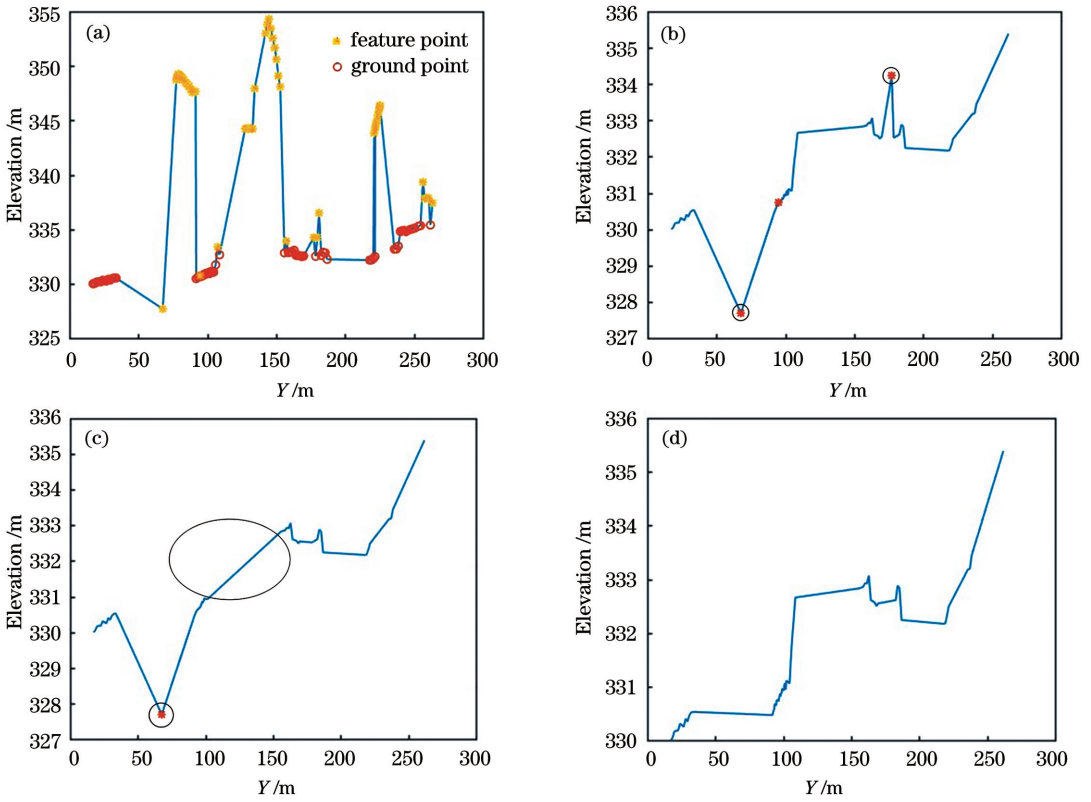


图 4 samp12 数据集中 $x_{\min} + 20.0 < x < x_{\min} + 20.5$ 的点云数据在不同算法处理后的滤波结果。(a)滤波前;(b)传统算法;(c)传统算法减小阈值;(d)所提算法

Fig. 4 Filtering results of point cloud data in samp12 dataset $x_{\min} + 20.0 < x < x_{\min} + 20.5$ after processing with different algorithms. (a) Before filtering; (b) traditional algorithm; (c) traditional algorithm reduces threshold; (d) proposed algorithm

表 1 samp12 数据集中 $x_{\min} + 20.0 < x < x_{\min} + 20.5$ 在不同算法处理后的误差

Table 1 Errors of $x_{\min} + 20.0 < x < x_{\min} + 20.5$ in samp12 dataset after processing by different algorithms

Algorithm	Number of sample points	Number of ground points	Number of features	Type I error / %	Type II error / %	Total error / %
Traditional algorithm	137	61	76	13.43	4.29	8.76
Traditional algorithm reduces threshold	137	47	90	31.34	1.43	16.06
Proposed algorithm	137	59	78	13.43	1.43	7.30

描线算法无法处理地面下方的噪声点。从图 4(d) 可以看到,当顶点向量角 S_{top} 设定为 $2\pi/3$ 和高差 Z_{top} 设定为 1.5 m 时,所提算法不仅可以去除地面下方的噪声点,而且未除去应有的地形。

从表 1 可以看到,所提算法处理后的 I 类误差为 13.43%, II 类误差降至 1.43%,总误差降至 7.30%,在保证 I 类误差没有增大的基础上减小了 II 类误差,从而验证所提算法在此类地形的处理优势。

3.2 顶点向量角对正、反坡度角相差较大点判断的精度

实验选取 samp12 数据集中 $x_{\min} + 15.0 < x <$

$x_{\min} + 15.5$ 的点云数据,同样按照 3.1 节的方法将数据连成扫描线,所得结果如图 5 所示,其中小圆圈点为地面点,星星点为地物点,误差统计结果如表 2 所示。

从图 5(b) 可以看到,当 $S_{\text{threshold1}}$ 、 $S_{\text{threshold2}}$ 和 Z 分别设定为 0.1 rad、0.1 rad 和 2 m 时,传统算法可以滤除大部分的地物点,但仍存在少量的地物点未被滤除,并且发现未滤除点的正、反坡度角相差较大,原因在于非地面点的正向坡度角较缓,反向偏陡,因此难以滤除。从图 5(c) 可以看到,当顶点向量角 S_{top} 设定为 $\pi/2$ 和高差 Z_{top} 设定为 1 m 时,所提算法能够很好地滤除地物点。

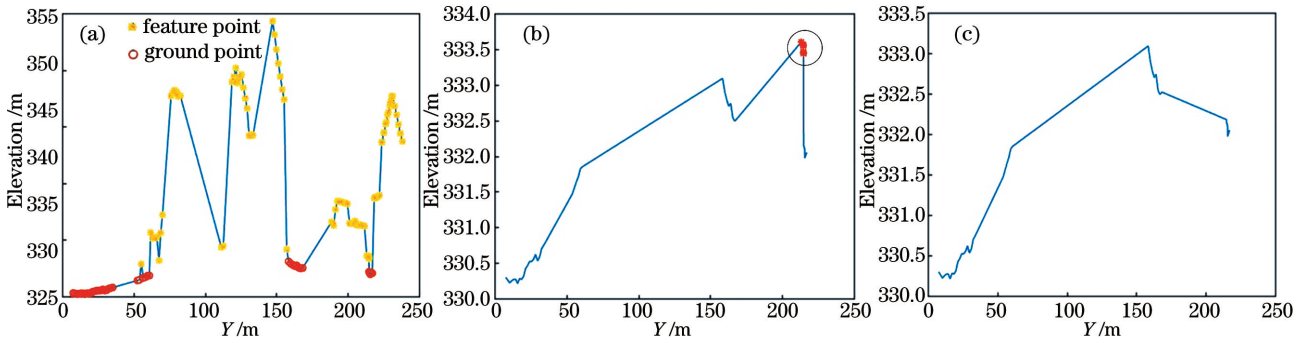


图 5 samp12 数据集 $x_{min} + 15.0 < x < x_{min} + 15.5$ 的点云数据在不同算法处理后的滤波结果。(a)滤波前;(b)传统算法;(c)所提算法

Fig. 5 Filtering results of point cloud data in samp12 dataset $x_{min} + 15.0 < x < x_{min} + 15.5$ after processing with different algorithms. (a) Before filtering; (b) traditional algorithm; (c) proposed algorithm

表 2 samp12 数据集中 $x_{min} + 15.0 < x < x_{min} + 15.5$ 在不同算法处理后的误差统计

Table 2 Errors of $x_{min} + 15.0 < x < x_{min} + 15.5$ in samp12 dataset after processing by different algorithms

Algorithm	Number of sample points	Number of ground points	Number of features	Type I error/%	Type II error/%	Total error/%
Traditional algorithm	134	48	86	8.51	5.75	6.72
Proposed algorithm	134	43	91	8.51	0	2.99

从表 2 可以看到,所提算法在没有增大 I 类误差的前提下可以大大减小 II 类误差,II 类误差由 5.75% 降至 0,总误差由 6.72% 降至 2.99%,原因在于所提算法可以考虑该点两边的坡度,所以在处理此类地形具有优势。

3.3 所提算法的滤波精度

对 samp12、samp21 和 samp31 三组数据集进行滤波处理实验,并与传统的扫描线滤波算法进行对比。samp12 数据集在传统算法中的 $S_{threshold1}$ 、 $S_{threshold2}$ 和 Z 分别设定为 0.1 rad、0.8 rad 和 3 m,所提算法中的阈值与传统扫描线滤波算法相同,顶点向量角 S_{top} 和顶点高差 Z_{top} 分别设定为 $2\pi/3$ 和 1.5 m。两种算法的实验对比结果如图 6 和图 7 所

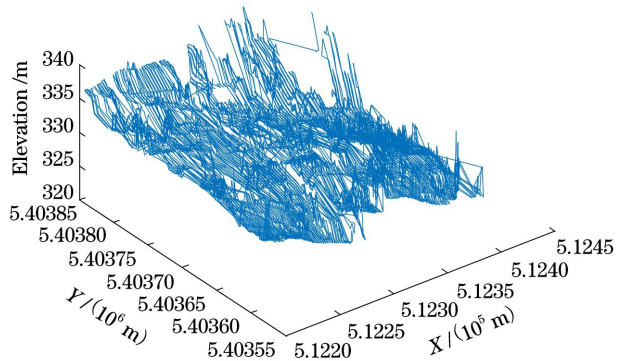


图 7 所提算法滤波后的点云分布

Fig. 7 Point cloud distribution after proposed algorithm filtering

示。从图 6 和图 7 可以看到,传统算法存在地面下方点无法滤除的情况,而所提算法对此类点的处理效果更好。

对 samp12、samp21 和 samp31 三组数据集进行滤波处理实验,samp21 数据集中传统扫描线滤波算法中的 $S_{threshold1}$ 、 $S_{threshold2}$ 和 Z 分别设定为 0.1 rad、0.5 rad 和 2.5 m,所提算法的阈值设定与传统扫描线滤波算法相同,顶点向量角 S_{top} 和顶点高差 Z_{top} 分别设定为 $2\pi/3$ 和 1.5 m;samp31 数据集中传统扫描线滤波算法中的 $S_{threshold1}$ 、 $S_{threshold2}$ 和 Z 分别设定为 0.1 rad、0.3 rad 和 2 m,所提算法的阈值设定与传统扫描线滤波算法相同,顶点向量角 S_{top} 和顶点高差 Z_{top} 分别设定为 $\pi/2$ 和

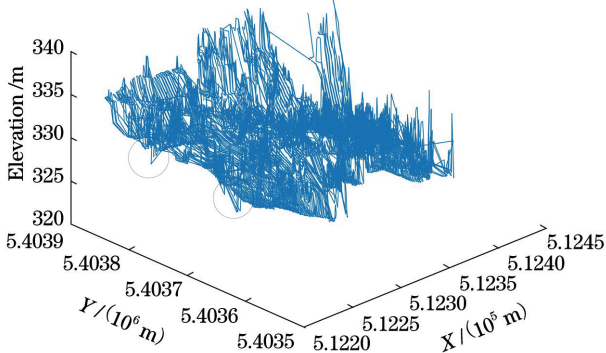


图 6 传统算法滤波后的点云分布

Fig. 6 Point cloud distribution after traditional algorithm filtering

2 m。统计三组数据的滤波误差,结果如表3所示。从表3可以看到,所提算法在保证I类误差没有变大的前提下,可以减小II类误差和总误差,所得结果可以验证所提算法的滤波效果更好,精度

更好。由于I类误差并不会对生成DEM产生比较大的影响,但II类误差直接影响生成DEM的真实性,因此尽可能在不增大I类误差的前提下,减小II类误差。

表3 不同算法处理不同数据集的误差统计

Table 3 Error statistics of different algorithms processing different datasets

Sample	Algorithm	Number of sample points	Number of ground points	Number of features	Type I error/%	Type II error/%	Total error/%
	Sample point	52119	26691	25428			
Samp12	Traditional algorithm	52119	24339	27580	17.52	9.93	13.82
	Proposed algorithm	52119	23741	27378	17.61	6.89	12.38
	Sample point	12960	10085	2875			
Samp21	Traditional algorithm	12960	9983	2977	7.66	23.30	11.14
	Proposed algorithm	12960	9703	3257	7.74	13.90	9.10
	Sample point	28862	15556	13306			
Samp31	Traditional algorithm	28862	15928	12934	6.51	10.41	8.31
	Proposed algorithm	28862	15177	13685	6.79	5.09	6.00

4 结 论

顶点向量角-扫描线滤波算法是传统扫描线滤波算法的改进算法,该算法能够处理更多的地形类别,滤波效果更好,尤其在处理地面下方的噪声点以及一些正、反坡度角相差较大的点,传统算法处理后的误差很大,但改进后的顶点向量角-扫描线滤波算法有着非常好的效果。对于阈值自适应的问题,许多阈值需要根据经验而人为设置,如果能够自适应设置阈值,为每条扫描线设置适合该扫描线的阈值,滤波效果会得到进一步的提升,顶点向量角的作用也会更明显,所以扫描线滤波算法的阈值自适应问题仍有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Yang S J, Zhang K S, Shao Y S. DEM interpolation algorithm of data from spiral scanning lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1110006. 杨书娟, 张珂殊, 邵永社. 螺旋式扫描激光雷达数据的DEM内插算法[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1110006.
- [2] Zhang X H. Theory and method of airborne lidar measurement technology[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007: 1-3, 101-105. 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: 1-3, 101-105.

- [3] Li Q. Research on combined filtering of airborne lidar point cloud and building feature extraction[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019: 1-4. 李强. 机载LiDAR点云的组合滤波及建筑物特征提取研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019: 1-4.
- [4] 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.
- [5] Xing C B, Deng X S, Xu K. Contour determination method for threshold of morphological filtering key parameters[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(16): 162802. 邢承滨, 邓兴升, 徐康. 形态学滤波关键参数阈值的等值线确定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(16): 162802.
- [6] Zhang G, Liu W B, Zhang N. Progressive morphological filtering method of dense matching point cloud based on region feature segmentation[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(4): 615-622. 张刚, 刘文彬, 张男. 基于区域特征分割的密集匹配点云渐进形态学滤波[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(4): 615-622.
- [7] Sui L C, Zhang Y B, Zhang S, et al. Filtering of airborne LiDAR point cloud data based on progressive

- TIN [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(10): 1159-1163.
- 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): 1159-1163.
- [8] Xiong J H, Fang Y M, Deng D B. Surface fitting filtering based on least square method from LiDAR data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(4): 74-76.
- 熊俊华, 方源敏, 邓德标. 最小二乘曲面拟合的 LiDAR 数据滤波方法[J]. 测绘科学, 2013, 38(4): 74-76.
- [9] Auer S, Hinz S. Automatic extraction of salient geometric entities from LIDAR point clouds [C] // 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 23-28, 2007, Barcelona, Spain. New York: IEEE, 2007: 2507-2510.
- [10] 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, 2006: 566-569.
- [11] Bartels M, Wei H. Threshold-free object and ground point separation in LIDAR data[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(10): 1089-1099.
- [12] Hui Z Y, Lu T D, Hu Y J, et al. Airborne LiDAR point cloud filtering algorithm based on dynamic threshold [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 062802.
- 惠振阳, 鲁铁定, 胡友健, 等. 基于动态阈值的机载 LiDAR 点云滤波法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 062802.
- [13] Xing C B, Deng X S, Xu K. Improved moving surface algorithm based on confidence interval estimation theory[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0328001.
- 邢承滨, 邓兴升, 徐康. 基于置信区间估计理论的改进型移动曲面算法 [J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0328001.
- [14] Sampath A. Urban modelling based on segmentation and regularization of airborne lidar point clouds[C]// IAPRS 2004, July 12-23, 2004, Istanbul, Turkey. [S.l.: s.n.], 2004: 937-941.
- [15] Guan H Y, Zhang J Q, Deng F, et al. On the filtering algorithm for airborne laser scanning data of urban area based on scanning line [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007(12): 9-13.
- 管海燕, 张剑清, 邓非, 等. 基于扫描线的城区机载激光扫描数据滤波算法研究 [J]. 测绘通报, 2007(12): 9-13.
- [16] Guo J, Liu J Y, Zhang Y L, et al. Filtering of ground point cloud based on scanning line and self-adaptive angle-limitation algorithm [J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(8): 2243-2245.
- 郭杰, 刘建永, 张有亮, 等. 基于扫描线自适应角度限差法的地面点云滤波 [J]. 计算机应用, 2011, 31(8): 2243-2245.
- [17] Zhu X X, Wang C, Xi X H, et al. Hierarchical threshold adaptive for point cloud filter algorithm of moving surface fitting[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(2): 153-160.
- 朱笑笑, 王成, 刁晓环, 等. 多级移动曲面拟合的自适应阈值点云滤波方法 [J]. 测绘学报, 2018, 47(2): 153-160.
- [18] ISPRS. ISPRS test on extracting DEMs from point clouds: a comparison of existing automatic filters [EB/OL]. (2006-09-06)[2020-04-14]. <http://www.itc.nl/isprswgiii-3/filtertest>.