

形态学滤波关键参数阈值的等值线确定方法

邢承滨, 邓兴升*, 徐康

长沙理工大学交通运输工程学院测绘工程系, 湖南 长沙 410004

摘要 形态学滤波算法的提出,在很大程度上提高了雷达点云的滤波效果。准确高效地分离地面点和地物点,是滤波算法的关键,其中滤波阈值的确定更是学者研究的重点。等值线是空间分析中重要的研究内容。基于渐进形态学滤波算法,利用等值线生成法快速实现了对滤波算法关键阈值的获取。相较于传统人工确定阈值的方式,等值线确定阈值的方法比较直观,可以快速确定合适的阈值。为了检验等值线-形态学滤波算法的效率和精度,将其与渐进型三角网滤波算法进行对比,并通过实验证实本文算法的优势。

关键词 遥感; 激光雷达; 点云滤波; 形态学; 等值线; 阈值

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.162802

Contour Determination Method for Threshold of Morphological Filtering Key Parameters

Xing Chengbin, Deng Xingsheng*, Xu Kang

Department of Surveying and Mapping Engineering, School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410004, China

Abstract The proposed morphological filtering algorithm improves the filtering effect of the radar point cloud greatly. Separation accurate and efficient for the ground points and non-ground points has always been the key problem to the filtering algorithm. Many scholars focus on the determination of the filtering threshold. The contour is an important research content in spatial analysis. Based on the progressive morphology filtering algorithm, the contour is used to obtain the key threshold of the filtering algorithm quickly. Comparing with the traditional manual testing threshold, the contour threshold determination method is more intuitive, and the appropriate threshold can be determined relatively quickly. In order to test the filtering efficiency and accuracy of the contour-morphological filtering algorithm, this paper uses the progressive triangulation filtering algorithm for comparing purpose, and the advantages of the proposed algorithm have been proved.

Key words remote sensing; LiDAR; point clouds filtering; morphology; contour; threshold

OCIS codes 280.3640; 280.4750; 280.3420; 280.4788

1 引言

激光雷达(LiDAR)是近年来发展迅猛的新型遥感技术。LiDAR采用主动扫描的方式获取数据,与传统摄影测量的被动扫描手段相比,具有受天气影响小、可持续扫描的优点。LiDAR具有一定的穿透性,在植被鉴别、建筑物提取方面有着巨大的优势。因此,激光雷达获得越来越多专业人士的认可。

由于地形复杂多样,雷达点云的滤波处理一直是难点。当前滤波算法主要分为4类:1)数学形态学滤波方法;2)逐渐加密滤波算法;3)基于表面滤波方法;4)基于分割滤波方法^[1]。Lindenberger^[2]将数学形态学应用于雷达点云滤波;文献[3-5]中尝试了自适应滤波算法,但是仍然存在误差较大的问题;文献[6]中提出了区域预测点云滤波算法,通过确定斜率阈值,提高了形态学滤波精度。

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-02-22; 录用日期: 2019-03-22

基金项目: 湖南省教育厅资助科研项目(17B004)

* E-mail: 383500135@qq.com

相比其他滤波算法,数学形态学滤波算法具有实现效率高、原理简单的优点。准确的阈值参数可大幅提高滤波精度,但形态学算法的难点同样在于阈值参数的选取。

本文针对阈值参数难以确定的问题,提出等值线-形态学滤波算法,利用等值线的闭合性和相邻等值线高度差,选取形态学滤波算法的关键阈值。

2 等值线法快速获取滤波阈值

2.1 渐进型形态学滤波算法

机载雷达在飞行和扫描中会产生粗差,激光雷达获取的是无序且缺少拓扑关系的离散点云数据,因此利用经验模态分解(EMD)算法去除点云噪声是一个必要的过程^[7-8]。本文采用形态学滤波算法进行点云滤波,需将点云数据划分为规则格网。文献^[9]中提出虚拟网格法形态学滤波算法,该算法对于格网选择、形态学运算(腐蚀、膨胀、开运算、闭运算)、滤波窗口等都有明确表述,本文不再赘述。

采用一维滤波算子,对滤波窗口内的数据点进行处理。梯度定义为

$$d_h = f - f \cdot g, \quad (1)$$

式中: d_h 为梯度; f 为规则化的表面模型; g 为结构元素。

梯度为数据点高程减掉数据点开运算后的高程。为了保证每一次滤波的准确性,引入梯度作为检验条件。人工定义高差阈值 d_T ,取梯度 d_h 与 d_T 进行对比,满足条件即为地面点,否则为地物点。渐进滤波算法的实现过程如图1所示。

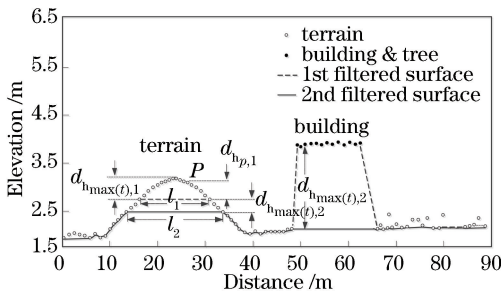


图1 渐进滤波算法实现过程

Fig. 1 Progressive filtering algorithm implementation process

对地形分别采用 l_1 滤波窗口(l_1 窗口为滤波中某一次的滤波窗口大小, l_1 遍历完成后窗口增大为 l_2 ,重复 l_1 的遍历工作)计算窗口内每个点的梯度。在 l_1 窗口中, P 为窗口中的任意一个数据点,如果 $d_{h_{p,1}} < d_{T,1}$,则 P 点为地面点,否则为非地面点。

$d_{h_{p,1}}$ 为 P 点在 l_1 的梯度, $d_{T,1}$ 为 l_1 窗口中的高差阈值。如果某窗口内梯度最大值小于阈值,则窗口内全部为地面点。

为解决固定窗口无法很好地保留地形特征的问题,Zhang等^[10]提出渐进型形态学滤波算法,将滤波窗口从小依照一定规律逐步增大,每一个窗口都会对数据进行一次遍历,逐渐增大的窗口使数据点经过数次遍历判断。本文采用线性变化滤波窗口,窗口变化公式为

$$\omega_k = 2kb + 1, \quad (2)$$

式中: ω_k 为第 k 次迭代的窗口大小; k 为迭代次数,当 k 最大时, ω_k 取得最大滤波窗口 ω_{max} ; b 为初始窗口大小。第 k 次高差阈值的设置为

$$\begin{cases} d_{T,k} = d_{h_0}, & \omega_k \leq 2 \\ d_{T,k} = C(\omega_k - \omega_{k-1})S + d_{h_0}, & \omega_k > 2, \\ d_{T,k} \geq d_{h_{max}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: d_{h_0} 为初始高差; C 为格网大小; S 为斜率; $d_{h_{max}}$ 为人工定义的最大高差阈值,当逐渐变化的高差阈值超过人为规定的最大阈值时,阈值就会停止增加。为增加高差阈值与窗口阈值的相关性,通常斜率的表达式为

$$S = \frac{d_{h_{T,k}}}{0.5(\omega_k - \omega_{k-1})}. \quad (4)$$

2.2 形态学滤波算法阈值的选取

由渐进性形态学滤波算法可知,该算法需要人工选取阈值,包括最小高差 d_{h_0} 、最大高差 $d_{h_{max}}$ 、最小窗口大小 b 、最大窗口大小 ω_{max} 等参数。准确的阈值可以快速提高滤波算法的准确率,本文采用等高线生成方法判断测区的阈值。

2.2.1 等值线生成流程

文献^[11]中提出规则格网和不规则三角形等值线生成算法,本文利用区域内离散无序的高程数据点,通过内插方法得到规则格网点的高程值,利用格网点的横坐标值、纵坐标值和高程值生成等值线,等值线生成流程如图2所示。

2.2.2 等值线法选择最大滤波窗口阈值

雷达点云中的建筑物由于高差和面积较大,一直是滤波算法的难点。建筑物具有明显的特征,建筑边缘大多数都为规则图形,而且建筑边缘的高程值非常接近。基于这一特性,将高程值近似点绘制成等值线。由于建筑物的等值线是闭合的,因此会生成建筑区域内的等值线,等值线所确定的范围即为建筑物的大小。形态学滤波最大窗口阈值需要满

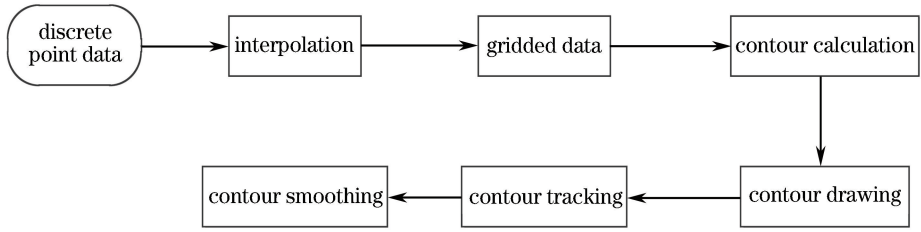


图2 等值线生成流程图

Fig. 2 Contour generation flow chart

足最大建筑物的大小。某测区航拍实景图与等值线示意图如图3~4所示。



图3 测区航拍体育馆影像图

Fig. 3 Aerial photography of the survey area

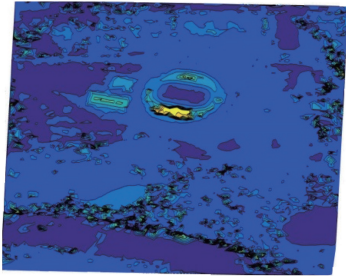


图4 等值线确定测区体育馆形状

Fig. 4 Contour to determine the shape of the stadium

本文采用的是一维线性滤波窗口,而闭合等值线常用于确定二维闭合形状。为使一维窗口能够准确确定建筑物大小,本文提出改进方案:利用等值线内所有数据点,计算等值线区域内所有点之间的最大距离,最大距离判定为最大滤波窗口大小。最大距离既保留了建筑物的特性,又能避免二维滤波窗口带来的计算量过大的问题。

$$D_{\max} = \max(D_{i,j}) = \max[\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}], \quad (5)$$

式中: D_{\max} 为区域内两点之间的最大距离; $D_{i,j}$ 为区域内任意两点间的距离; x_i 为*i*点横坐标; x_j 为*j*点横坐标; y_i 为*i*点纵坐标; y_j 为*j*点纵坐标; i,j 为闭合区间任意两点。

激光扫过的高程变化明显的位置既可能被判断

为建筑物,也可能被判断为陡坎地形。但建筑物的等高线是一个封闭的图形,而陡坎则通常不是。因此,使用等高线关联有其优势。等高线方法可能会带来阈值误差,但其阈值通常都是偏小的。这是因为:由激光扫描点所构造的等高线与建筑物的外轮廓线并不完全一致,而且始终偏小。为解决该阈值误差,可以增加一个小的常量。事实上,该阈值误差可以忽略,因为建筑物未扫描到的轮廓边界点云是不需要滤波的,而扫描到的建筑物点云则会出现在最大滤波窗口范围内。

2.2.3 等值线法选择最大高差阈值

最大高差是滤波算法中的另一重要阈值。建筑物不同于缓慢变化的山体,建筑梯度变化的陡变性是识别建筑高程的重要依据。等值线的疏密代表地形的平缓与陡峭。建筑底部的激光脚点与顶部的激光脚点虽然会存在横纵坐标的近似,但是高差阈值变化很大。徐旭^[12]在等值线填充的基础上,利用相邻等值线色彩梯度差异,可以快速判断出建筑物的最大高差。建筑区点云等值线填充分布及其雷达点云分布示意如图5~6所示。

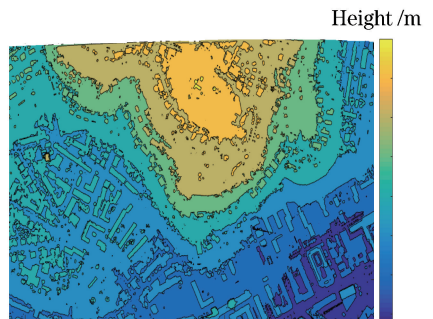


图5 建筑区点云等值线填充分布

Fig. 5 Point cloud contour filling distribution in the building area

2.2.4 坡度角度对于最大高差的检验

对于地面和建筑、地面和大型植被的高差值近似的临界点,高差不足以判断点的属性,因此引入倾斜角作为判断的依据。



图 6 建筑区雷达点云分布

Fig. 6 LiDAR point cloud distribution in the building area

$$\tan \theta = \frac{\Delta h}{\Delta l}, \quad (6)$$

式中： θ 为倾斜角； Δh 为相邻点的高差； Δl 为相邻点的水平距离。建筑临界点具有陡变性，坡度近似垂直；而高大植被的坡度相对较小。根据倾斜角判断相同高差的地物如图 7 所示。

2.3 形态学滤波阈值参数的确定

算法步骤如下：

- 1) 雷达点云去噪。
- 2) 点云通过虚拟格网法建立规则格网。
- 3) 对点云数据建立等值线，根据建筑物等值线的闭合性和规律性判断最大建筑的大小，定义最大滤波窗口。

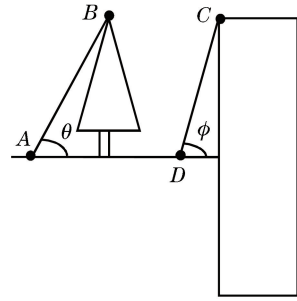


图 7 根据倾斜角判断相同高差地物

Fig. 7 Tilt angle to determine the same height difference

4) 对等值线进行填充，依据建筑物高差梯度变化和倾斜角定义窗口内的最大高差阈值，确定初始滤波窗口大小。

5) 对滤波窗口的数据进行开运算，判断梯度是否小于阈值；如果满足条件，为地面点；如果不满足条件，为非地面点。

6) 利用(2)式增大滤波窗口，利用(3)式定义不同高差阈值。

7) 滤波窗口最大化，完成滤波。

等值线-形态学滤波算法的流程图如图 8 所示。

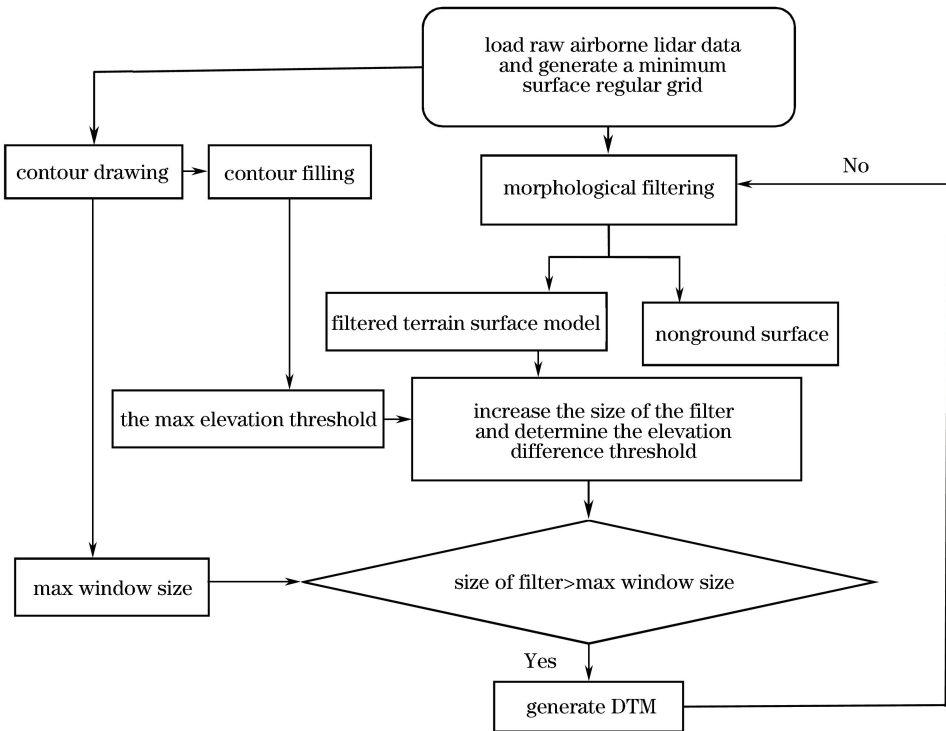


图 8 等值线-形态学滤波算法流程图

Fig. 8 Isometric line-morphological filtering algorithm flow chart

3 实验结果与分析

雷达点云滤波存在 3 种误差：1) I 类误差，将地

面点误分为非地面点；2) II 类误差，将非地面点误分为地面点^[13]；3) 总误差，两类误差总数与数据点个数的比。实验数据选取国际摄影测量与遥感学会

(ISPRS)提供的数据集,用于定量、定性分析滤波精度,通过3组实验进行验证分析。

3.1 实验一:验证形态学滤波精度

选取 ISPRS 中 Samp23 数据集用于实验。Samp23 有标准的属性,0 表示地面点,1 表示地物点。等值线法确定测区最大滤波窗口大小和测区雷达点云分布,如图 9~10 所示。

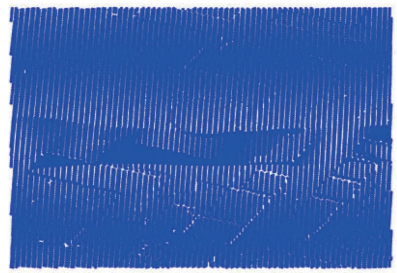


图 10 测区点云分布

Fig. 10 Distribution of point cloud

采用 MATLAB 软件实现改进型形态学滤波算法,利用等值线生成的最大滤波窗口为 30 m,最大高差为 15 m,判断地面点与地物点,并统计 I、II 两类误差。实验结果如表 1、图 11 所示。

通过对表 1 的精度分析,判断形态学滤波可以较为准确地得到地面点,等值线生成的阈值真实有效。比较滤波前后点云分布,发现滤波算法可以较好地过滤地物,获得地面点。

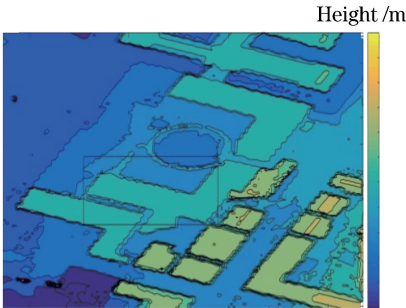


图 9 等值线确定窗口阈值

Fig. 9 Contour determination window threshold

表 1 Samp23 测区点云点个数与两类误差统计

Table 1 Number of point cloud points in Samp23 survey area and two types of error statistics

Samp23 survey point cloud	Number of sample points	Number of ground points	Number of features	Type I error / %	Type II error / %
Sample point	25095	13223	11872		
Calculated point	25095	11452	13643	13.3	14.9

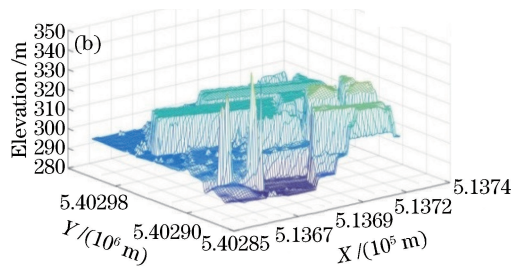
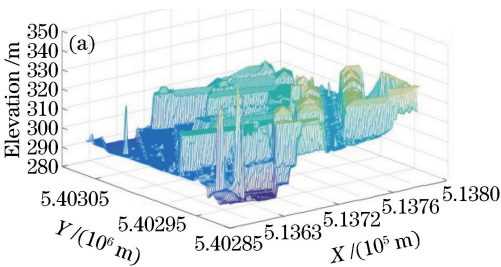


图 11 Samp23 测区滤波前、后的点云分布。(a)滤波前;(b)滤波后

Fig. 11 Samp23 survey area before and after filtering. (a) Before filtering; (b) after filtering

3.2 实验二:验证等值线法确定阈值的滤波精度

为了判断最大窗口阈值和最大高差阈值分别对于滤波结果的影响,引入总误差作为衡量滤波精确度的标准。选取 Samp42 作为实验样本,样本地形为一大型建筑区。等值线法确定的最佳高差阈值为 20 m,最大窗口阈值为 30 m。实验二包括窗口阈值不变条件下,高差变化对于滤波结果的影响;和高差阈值不变条件下,窗口变化对滤波结果的影响。实验结果如图 12~13 所示。

分析图 12~13 可知,等值线方法确定阈值速度快且更加准确,减少了多次阈值选取造成的人力物力损失,有针对性地提取测区范围内的阈值,进一步

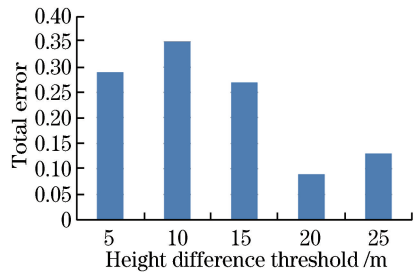


图 12 不同高差阈值的滤波精度(窗口阈值为 30 m)
Fig. 12 Filtering accuracy of different height difference thresholds (window threshold is 30 m)

提高了滤波精度,而过大的阈值误差则会直接影响整个测区的滤波精度。

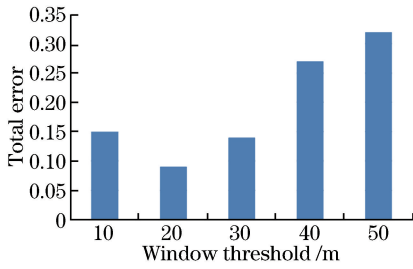


图 13 不同窗口阈值的滤波精度(高差阈值为 20 m)

Fig. 13 Filtering accuracy of different window thresholds (height difference threshold is 20 m)

3.3 实验三:验证等值线-形态学滤波算法的精度

同时采用三角网(TIN)渐进加密算法^[14]对该样本数据进行定性定量验证,对比不同算法的滤波效果。定量实验选取 Samp41 中测区样本,采用形

表 2 两种算法在 Samp41 中数据点地面点、地物点、I 类错误、II 类错误

Table 2 Two algorithms in Samp41 data point ground point, feature point, type I error, and type II error

Samp41 survey point cloud	Number of sample points	Number of ground points	Number of features	Type I error /%	Type II error /%
Sample point	11231	5602	5629		
Morphology filtering	11231	6294	4937	12.3	12.2
TIN filtering	11231	6732	4499	20.1	20.0

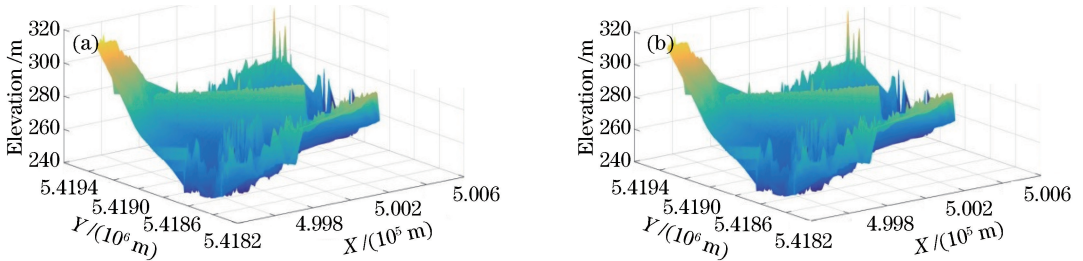


图 14 不同算法在 FSite8_red2 测区内的滤波结果。(a) TIN 算法;(b)形态学算法

Fig. 14 Filtering results of different algorithms in the FSite8_red2 survey area. (a) TIN algorithm; (b) morphology algorithm

从图 14 可以看出滤波后的地面点分布。相较于 TIN 滤波算法,形态学算法较好地保留了地貌特征,更精确地还原地貌,而 TIN 算法由于逐级三角形迭代加密,对于地型易产生 I 类误差,将树木等较小地物纳入地面点,从而造成较大误差。

4 结 论

等值线-形态学滤波算法相较于传统形态学滤波算法,在阈值选取上有更强的目的性,可以更快地确定准确的阈值参数,对于不同测区可以选取恰当的滤波阈值,滤波结果的精度更高。但是本文方法仍然没有解决点云滤波的自适应问题,目前的等高线阈值算法确定部分还需要借助人工设置,阈值的自动生成仍有待于进一步研究。

态学和不规则 TIN 两种方式分别计算。TIN 选取区域内最大尺度阈值为 30 m,点到平面的阈值为 1 m,倾斜角阈值为 6°;形态学滤波最大高差阈值取 60 m,最大窗口取 20 m。实验结果如表 2 所示。

表 2 通过对两种误差数据的定量分析发现:等值线-形态学滤波算法的 I、II 类误差明显小于 TIN 滤波算法,说明等值线-形态学滤波算法在这一测区的滤波精度优于 TIN 滤波算法。

定性实验数据选取 FSite8_red2 中数据点作为数据集。根据等值线-形态学滤波算法确定最大窗口为 20 m,最大高差为 30 m;TIN 滤波算法设置研究区域最大格网阈值 30 m,点到平面距离阈值 1 m,最大倾斜角阈值为 6°。TIN 算法与形态学算法的实验对比结果如图 14 所示。

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: 4-8.
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: 4-8.
- [2] Lindenberger J. Laser-profilmessungen zur topographischen geländeaufnahme [D]. Stuttgart: Stuttgart University, 1993: 131-134.
- [3] Sui L C, Zhang Y B, Liu Y, *et al.* Filtering of airborne LiDAR point cloud data based on the adaptive mathematical morphology [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(4): 390-396.

- 隋立春, 张熠斌, 柳艳, 等. 基于改进的数学形态学算法的 LiDAR 点云数据滤波[J]. 测绘学报, 2010, 39(4): 390-396.
- [4] 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.
- [5] Liu Z Q, Li P C, Zhang B M, *et al.* Application of robust estimation to airborne lidar point cloud filtering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 122801.
刘志青, 李鹏程, 张保明, 等. 抗差估计在机载激光雷达点云滤波中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122801.
- [6] Miao Q G, Guo X, Song J F, *et al.* LiDAR point cloud data with morphological filter algorithm based on region prediction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 011003.
苗启广, 郭雪, 宋建锋, 等. 基于区域预测的 LiDAR 点云数据形态学滤波算法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011003.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Zhou X M. Research and application of airborne LiDAR point cloud filters [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2014: 43-51.
周晓明. 机载激光雷达点云数据滤波算法的研究与应用[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2014: 43-51.
- [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] Zhao J H. The research in the drawing of contour lines and filling which is based on the rectangular grid method in irregular areas [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013: 9-48.
赵敬和. 基于矩形网格法的不规则区域的等值线生成与填充算法的研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 9-48.
- [12] Xu X. Research of contour line generation and color fill based on triangulation [D]. Changsha: Central South University, 2011: 16-45.
徐旭. 基于三角网的等值线生成及填充算法[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 16-45.
- [13] Sithole G, Vosselman G. Automatic structure detection in a point-cloud of an urban landscape[C]// 2003 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, May 22-23, 2003, Berlin, Germany. New York: IEEE, 2003: 67-71.
- [14] 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.