

基于区域预测的LiDAR点云数据形态学滤波算法

苗启广 郭雪 宋建锋 宣贺君

西安电子科技大学计算机学院, 陕西 西安 710071

摘要 点云数据滤波是机载激光雷达(LiDAR)数据处理研究中很重要的问题之一。提出了一种基于区域预测的LiDAR点云数据形态学滤波算法,该算法由点云数据建立规则网格、去除粗差点,对实验区域进行分块,然后使用各个分块区域的高程标准差预测地形坡度参数 s 从而进行渐进式形态学滤波,最终确定地面点。文中算法优点在于可以根据区域地形起伏情况自适应地得到阈值进行滤波。使用国际摄影测量与遥感学会(ISPRS)提供的测试数据进行实验,实验结果表明,提出的算法能够有效去除地物点和保留地面点,并且能有效降低总误差。

关键词 图像处理;激光雷达数据;数学形态学滤波;区域预测

中图分类号 P237 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.011003

LiDAR Point Cloud Data with Morphological Filter Algorithm Based on Region Prediction

Miao Qiguang Guo Xue Song Jianfeng Xuan Hejun

School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract The point cloud data filtering is always an important problem in the research of airborne LiDAR data. A LiDAR point cloud data filtering algorithm based on region prediction is proposed. The method creates a regular grid with point cloud data and removes outliers, divides the experimental area into different blocks and uses sub-blocks' elevation standard deviation to predict the terrain slope parameters, finally determines the ground points. The proposed algorithm has an advantage of obtaining threshold adaptively by the conditions of topographic relief of the region. The international society for photogrammetry and remote sensing (ISPRS) reference dataset is used to test the method. The experimental results show that the proposed method can effectively remove non-ground points, keep the ground points and is effective at minimizing total error rates.

Key words image processing; laser infrared radar data; mathematic morphological filter; region prediction

OCIS codes 100.6890; 280.3640; 280.4750

1 引言

机载激光雷达(LiDAR)技术采用红外和近红外波长对地面进行扫描,从而获得地面和地物的三维数据,这与传统的数字摄影测量技术不同。近十几年来,机载LiDAR技术不断发展^[1],逐渐流行于各种环境的应用领域,例如数字高程模型测绘、城市交通研究、森林生态工程^[2]和大气环境监测^[3]等方面。

利用机载激光雷达测距系统和全球定位系统/惯性导航系统(GPS/INS)扫描大面积区域获取的地面三维信息称为机载LiDAR点云数据,其中包含有真实地面、植被和人工建筑物等信息,并具有高精度、高密度、离散不规则等特点。机载LiDAR数据滤波技术是指将地面点和非地面点区分开,并利用地面点形成数字高程模型(DEM),以便后续进行建筑物和树木分类与提取^[4]、地图测绘和森林资源调查^[5]等技术的研究。

地形的多样性和地物的复杂性,以及机载LiDAR获取的点云数据本身具有数量大、空间分布不均匀等特

收稿日期: 2014-06-16; 收到修改稿日期: 2014-08-13; 网络出版日期: 2014-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(61272280, 41271447, 61272195)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0919)、中央高校基本科研业务费专项资金(K5051203020, K5051303016, K5051303018, BDY081422, K50513100006)、陕西省自然科学基金(2014JM8310)、西安市科技局项目[CXY1341(6)]

作者简介: 苗启广(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事智能图像处理与模式识别等方面的研究。

E-mail: qgmiao@163.com

点,为滤波过程带来了一定的困难^[6]。目前已经提出了一些滤波算法。Vosselman^[7]提出了基于坡度的滤波方法,定义了两点间的坡度参数。基于三角网的滤波算法是另一类滤波方法^[8],其中Axelsson^[9]提出渐进加密法,首先根据种子点建立一个稀疏的不规则三角网,然后通过一定规则不断的加密三角网并判断点的地物性。数学形态学滤波方法则是将开运算引入滤波过程,Zhang等^[10]提出了渐进式形态学滤波方法,即使用结构元素窗口递增的形态学运算来进行滤波。此外还有基于移动最小二乘法^[11]、基于曲面插值的算法^[12]等。

在传统的基于形态学算法的滤波过程中需要用户观察实验区域地形从而人工设置滤波阈值,自适应性不强。为了减少人工设置阈值,使算法根据地形的起伏情况自适应地得到地形参数用于滤波,本文提出一种基于区域滤波的形态学滤波算法,根据分块区域地形的标准差预测地形坡度参数用于渐进式形态学滤波。使用国际摄影测量与遥感学会(ISPRS)提供的样本数据进行实验,结果表明该算法可以得到较好的滤波结果并可控制总误差为较小。

2 基于区域预测的形态学滤波算法

2.1 形态学滤波原理

形态学的基本操作指腐蚀和膨胀运算^[13]。膨胀运算是在结构元素窗口确定的区域内选取最大值,在点云数据滤波中常被用来在保留数字表面模型(DSM)基本形态下提升一些低点的高程值,消除局部低地势。而腐蚀运算是在结构元素窗口确定的区域内选取最小值,被用来在保留DSM基本形态下降低一些高点的高程值,消除局部凸起地势。

$$(f \oplus g)(i, j) = \max_{(s, t) \in w} Z(s, t), \quad (1)$$

$$(f \otimes g)(i, j) = \min_{(s, t) \in w} Z(s, t), \quad (2)$$

(1)、(2)式分别为膨胀运算和腐蚀运算, f 为DSM, g 为结构元素, w 为结构元素的窗口, $Z(s, t)$ 为DSM中坐标为 (s, t) 的点云的高程值。腐蚀和膨胀经过一定次序组合得到开、闭运算,开运算是先腐蚀后膨胀,而闭运算是先膨胀后腐蚀。

$$(f \circ g)(i, j) = [(f \otimes g) \oplus g](i, j), \quad (3)$$

$$(f \cdot g)(i, j) = [(f \oplus g) \otimes g](i, j), \quad (4)$$

(3)、(4)式分别为开、闭运算。开运算能有效滤去比结构元素窗口尺寸小的突出地形,因此用来对LiDAR点云数据进行滤波^[14]。

2.2 基于区域预测的形态学滤波原理

文献[10]中的滤波算法是通过计算开运算前后点云数据的高程差来判断数据点是否为地面点,其中使用了5个参数来确定高差阈值,分别是最大、最小高差阈值、窗口尺寸、DSM的格网间距和地形坡度参数 s 。在滤波过程中,这些参数需根据不同地形设置,并且假设地形坡度恒定,但是针对复杂场景这是不现实且不合理的。在地形相似的区域中,标准差可以代表地形的起伏情况,标准差越大则说明地形起伏越剧烈。然而,通常情况下,区域地形坡度参数 s 的取值应该与地形起伏程度成正比。因此根据标准差和地形坡度参数 s 的相关性,使用分块区域的高程标准差来预测 s 的取值。

为了使算法具有普遍性和自适应能力,通过引入分块处理的思想,将原始点云数据按地形统计特性进行分块,使用各个分块区域的高程标准差来预测地形坡度参数 s ,再由结构元素的窗口尺寸、地形坡度参数 s 和DSM的格网间距确定高差阈值,然后进行渐进式形态学滤波。由于标准差代表了区域地形的基本统计特性,所以使用分块区域的标准差预测地形坡度参数 s ,不仅可以避免 s 取值的单一性,而且能最大限度地保留实验区域的地形特征。

2.3 基于区域预测的形态学滤波步骤

2.3.1 点云数据格网化

点云数据的数据量庞大而分布不均,需要先进行点云数据格网化。根据点云数据横坐标 x 和纵坐标 y 的最大值和最小值确定点云数据的 xy 平面范围,选择点云最小点间距作为格网间距构成规则格网,使得每个格网中至少包含一个激光脚点^[15]。若在一个格网中没有点云数据,需要插值来得到缺失的数据点;若一个格网中有多个点云数据,则选取格网中最低的点作为格网的取值。点云数据格网化后即形成规则化DSM。

2.3.2 去除粗差点

机载 LiDAR 点云数据在获取中一般会包含一些粗差点,分为高位粗差和低位粗差。高位粗差是由于激光打在飞鸟、飞机等物体上反射后回波造成的,在形态学滤波过程中可以被滤掉。而低位粗差是由多次回波或激光测距仪的故障造成,需要用另外的方法处理。在本文中,使用形态学方法从 DSM 中分离低位粗差^[16],即将点云数据的高程在 z 轴方向上反转,然后使用高差阈值为 5 m、结构元素窗口大小为 1 m 的形态学滤波来标记低位粗差点为非地面点。

2.3.3 渐进式形态学滤波

在应用形态学滤波的开运算操作时,结构元素窗口尺寸过大或过小都会造成滤波不完全或过度滤波。为了在滤波过程中较好地滤去地物点、保留地面点,应使用尺寸逐步增大的窗口迭代地进行滤波^[17]。窗口尺寸的逐步增大方式有两种:线性增长和指数增长。本文使用的是窗口尺寸线性增长的方式,该方法能很好地保留连续变化的地形。

由于一般实验区域的点云数据量很大,其中包含的地形特征复杂多变,所以先对区域进行分块,然后对单独分块内的地形进行形态学滤波。

1) 结合先验知识判断实验区域的地貌特征,根据经验对规则化 DSM 按一定的尺寸进行分块,尽量保证块内的地形变化有相似性,分块大小不能小于最大建筑物的大小^[18]。

2) 计算出 DSM 网格中每个分块区域的标准差,根据区域预测公式得到 s 的取值。

标准差 T_{std} 和地形参数 s 的关系描述为线性关系:

$$s = a \times T_{std} + b. \quad (5)$$

3) 使用预测的 s 对相应的分块区域进行结构元素窗口尺寸逐步增大的形态学滤波,直到处理完整个 DSM 网格。从最初结构元素窗口尺寸为 1 m 开始,对区域进行开运算,然后计算每个点云数据开运算前后的高程差,若大于高差阈值则标记为非地面点,将结构元素窗口尺寸增长 1 m,直到达到最大结构元素窗口尺寸(一般略大于实验区域中最大建筑物的尺寸)。高差阈值由滤波窗口尺寸、DSM 的网格间距和地形坡度参数确定,从而能自适应地根据地形情况得到阈值。由于分块不能完全将所有的网格包含在内,那些剩余的网格也无法得到参数 s ,则根据经验使用 $s=0.3$ 来确定高差阈值进行形态学滤波。

2.3.4 确定地面点

经过上一步滤波后,DSM 中的点就可以确定是否为地面点,但还需要对模型外的点云数据进行判断才能得到更加精确的 DEM。将滤波得到的所有地面点进行插值得到临时 DEM,然后对每个点云数据计算到临时 DEM 的垂直距离,若垂直距离小于阈值 0.5 m 则标记此点为最终地面点,最后得到所有点云的地物特

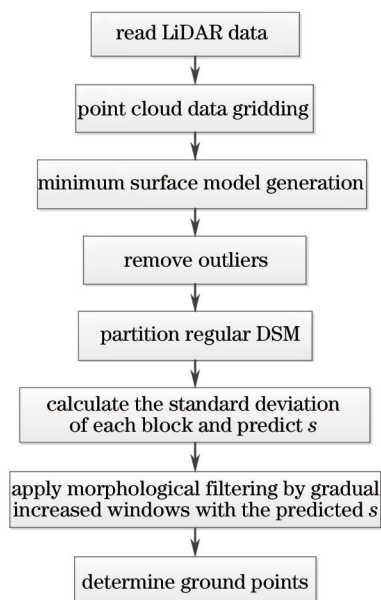


图1 基于区域预测的形态学滤波流程图

Fig.1 Workflow for morphological filter based on region prediction

性并生成最终 DEM。

基于区域预测的形态学滤波过程如图 1 所示。

3 实验结果与分析

3.1 实验数据与结果

使用 ISPRS 提供的测试数据进行实验(由网站 <http://www.itc.nl/isprswgIII-3/filtertest/>获得),由于这些数据的最小点间距是 1 m,实验使用 1 m×1 m 的网格间距构造规则化网格,预测公式中参数 $a=0.008$, $b=0.006$ 。

选取 4 个典型地形的测试数据作为实验数据,分别是: sample12、sample31、sample53 和 sample54,这些测试数据的相关信息如表 1 所示。

表 1 实验数据的相关信息

Table 1 Related informations of experimental datas

Dataset	Number of true ground points	Number of true non-ground points	Geomorphological features
sample12	26691	25428	Buildings and vegetation on the slopes
sample31	15556	13306	Complex buildings
sample53	32989	1389	Intermittent terrace terrain
sample54	3983	4625	Low-resolution buildings

实验使用的参数设置如表 2 所示,其中有分块尺寸、形态学滤波的最大结构元素尺寸的设置情况。实验结果反映了滤波算法作用在不同地形上的结果,如图 2~5 所示,其中(a)为 DSM,反应实验区域的原始地形;(b)为真实地面点,即样本数据中参考的地面点分布,所有空白为应当滤去的地物点;(c)为本文算法滤波后地面点的分布情况;(d)为最终生成的 DEM。

表 2 实验参数的设置

Table 2 Setting of experimental parameters

Dataset	Block sizes /m	Biggest structuring element windows /m
sample12	71	12
sample31	40	15
sample53	50	2
sample54	20	10

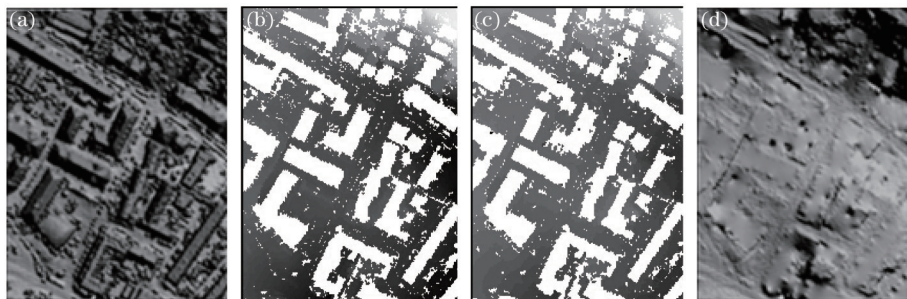


图 2 sample12 的滤波结果图。(a) DSM; (b) 真实地面点; (c) 本文算法滤波结果的地面点; (d) DEM

Fig.2 Filter results of sample 12. (a) DSM; (b) true ground points; (c) ground points for the experimental result of the proposed algorithm; (d) DEM

Samp12 的数据特征为山坡上的建筑物和植被的混合,其中建筑物形状多为长矩形。从图 2(c)中可以看出,房屋和房屋周围的植被能很好地滤去,图 2(d)中恢复的 DEM 保持了地有结构。samp31 区域中主要包含复杂建筑物、植被等目标,从图 3(c)中可以看出,提出的滤波算法的效果较好:既滤去了复杂的大型建筑物,又保留了建筑物中间围住的地面点。samp53 的数据主要为间断的地形,植被分布在梯田的斜坡上。图 4(c)中的滤波结果表明断层上的建筑物可以很好地滤除,但是断层结构上却存在较少的误判,有过度滤波的现象。samp54 数据为斜面上的低分辨率建筑物,建筑物为较密集的房屋,房屋周围的植被也很多,图 5(c)中显示本文算法表现较好,可以很好的将这些地物点滤去并保留地面点。

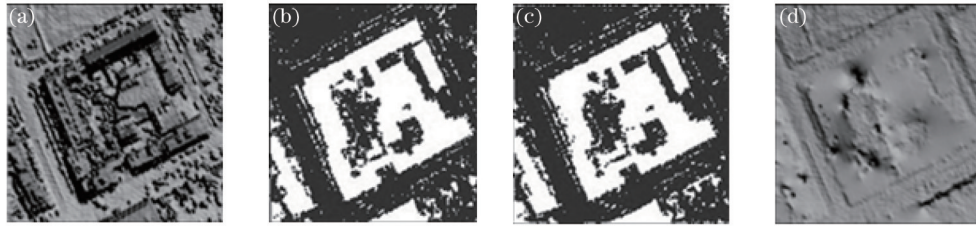


图3 sample31的滤波结果图。(a) DSM; (b) 真实地面点; (c) 本文算法滤波结果的地面点; (d) DEM

Fig.3 Filter results of sample 31. (a) DSM; (b) true ground points; (c) ground points for the experimental result of the proposed algorithm; (d) DEM

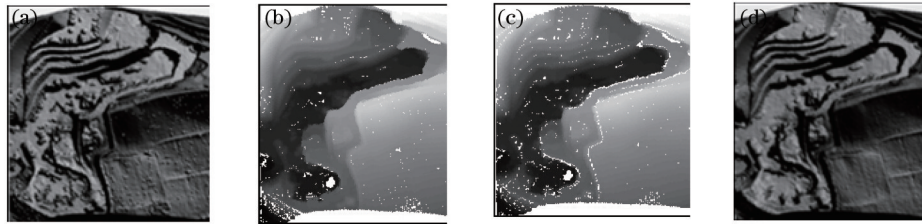


图4 sample53的滤波结果图。(a) DSM; (b) 真实地面点; (c) 本文算法滤波结果的地面点; (d) DEM

Fig.4 Filter results of sample 53. (a) DSM; (b) true ground points; (c) ground points for the experimental result of the proposed algorithm; (d) DEM

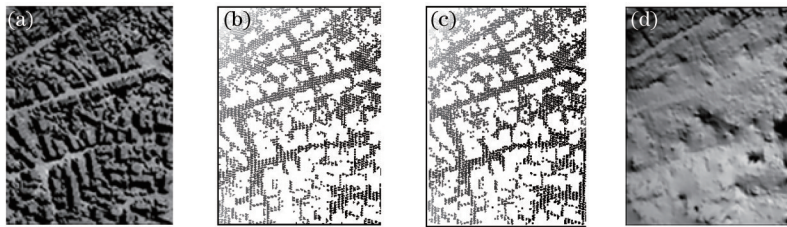


图5 sample54的滤波结果图。(a) DSM; (b) 真实地面点; (c) 本文算法滤波结果的地面点; (d) DEM

Fig.5 Filter results of sample 54. (a) DSM; (b) true ground points; (c) ground points for the experimental result of the proposed algorithm; (d) DEM

3.2 误差定义及分析

为了对滤波算法的实验结果进行定量的分析,ISPRS提出了误差评判标准^[19]。其中,第I类误差指的是地面点被误分为非地面点的数量除以正确的地面点数量,第II类误差指的是非地面点被误分为地面点的数量除以正确的非地面点数量,而总误差等于所有误分类点的数量除以点的总数。

滤波的目的在于获得地面点以得到真实地面地形,即减小各类误差的发生概率。总误差反映了滤波水平和算法的可行性,总误差越小表示滤波越精确^[20]。

ISPRS还发布了8种滤波算法对于测试数据实验的误差分析结果,分别有:Pfeifer, Wack, Axelsson, Elmqvist, Sithole, Roggero, Sohn和Brovelli。对上述sample12、sample31、sample53和sample54的实验结果计算三类误差,并与这8个滤波算法的误差进行比较,如表3所示。

从统计结果看出,本文算法能将第I类误差、第II类误差和总误差同时控制在比较小的范围内,并且与其他八种算法相比,本文算法可控制总误差相对较小。其中,sample31的三类误差可以控制在1.5%左右,并且sample31、sample53、sample54的总误差可达到最小。因此,本文算法的性能较好,可以在滤除各种地物特征的同时较好地保留地面点。

表3 几种滤波方法的误差结果比较
Table 3 Comparing the error results of several filter algorithms

Sample	Error/%	Pfeifer	Wack	Axelsson	Elmqvist	Sithole	Roggero	Sohn	Brovelli	Proposed algorithm
sample12	Type I	7.29	11.94	4.89	12.36	19.19	11.92	8.87	29.63	4.99
	Type II	1.52	0.89	1.48	3.30	0.57	0.91	7.87	2.04	2.53
	Total	4.50	6.61	3.25	8.18	10.21	6.61	8.39	16.28	3.79
sample31	Type I	1.60	3.15	7.91	8.47	4.85	3.03	4.81	21.75	1.61
	Type II	2.04	1.09	1.03	2.33	1.12	1.08	8.28	3.39	1.26
	Total	1.80	2.21	4.78	5.34	3.15	2.14	6.39	12.92	1.45
sample53	Type I	12.53	28.33	8.58	92.45	38.41	17.81	20.48	54.93	8.49
	Type II	14.23	1.02	16.76	0.18	4.81	4.74	13.24	1.62	6.12
	Total	12.60	27.24	8.91	48.45	37.07	17.29	20.19	52.81	8.4
sample54	Type I	10.66	15.93	1.25	27.91	12.38	1.01	6.72	49.54	3.59
	Type II	1.00	0.48	4.93	2.63	1.11	8.37	4.79	1.97	2.92
	Total	5.47	7.63	3.23	21.26	6.33	4.96	5.68	23.89	3.23

4 结 论

提出了一种基于区域预测的形态学滤波方法,对点云数据进行规则格网化得到 DSM,再进行区域分块,根据分块内标准差预测地形坡度参数的取值,对 DSM 进行渐进式形态学滤波。由于本文算法对地形的起伏情况有一定自适应性,解决了数学形态学滤波算法存在的坡度阈值人工选取的问题。使用本文算法对 ISPRS 提供的样本进行实验,实验结果表明该算法能够有效去除地物点并保留地面点,并且可以控制总误差较小。由于算法存在过度滤波的现象,在下一步研究过程中将解决这个问题。

参 考 文 献

- Jian Yun, Cunxiao Gao, Shaolan Zhu, *et al.*. High-peak-power, single-mode, nanosecond pulsed, all-fiber laser for high resolution 3D imaging LIDAR system[J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(12): 121402.
- Fan Shijun, Zhang Aiwu, Hu Shaoxing, *et al.*. A method of classification for airborne full waveform LiDAR data based on random forest[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0914001.
范士俊, 张爱武, 胡少兴, 等. 基于随机森林的机载激光全波形点云数据分类方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0914001.
- Ji Chengli, Tao Zongming, Hu Shunxing, *et al.*. Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0401001.
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0401001.
- Zuo Zhiqian, Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. Classification of LiDAR point clouds for urban area based on multi-echo region ratio and recognition topology model[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0414001.
左志权, 张祖勋, 张剑清. 区域回波比率与拓扑识别模型结合的城区激光雷达点云分类方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0414001.
- Zhao Yang, Yu Xinxiao. Applicability of 3D laser technology in noninvasive measurement of stand structure in forestry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 071201.
赵 阳, 余新晓. 三维激光技术无损测量林分结构因子适用性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 071201.
- G Sithole, G Vosselman. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2004, 59(1): 85-101.
- G Vosselman. Slope based filtering of laser altimetry data[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, and Spatial Information Sciences*, 2000, 33(B3): 935-942.
- Wu Congcong, Lu Xiaoping, Li Guoli, *et al.*. Research on filtering algorithm for LiDAR data based on TIN[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013, (3): 32-35.
吴丛丛, 卢小平, 李国利, 等. 基于 TIN 的 LiDAR 数据滤波算法研究[J]. *测绘通报*, 2013, (3): 32-35.
- P Axelsson. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[J]. *International Archives of*

- Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2000, 33(B4): 111-118.
- 10 K Zhang, S Chen, D Whitman, *et al.*. A progressive morphological filter for removing nonground measurements form airborne LIDAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4): 872-882.
- 11 Changjun Liu, Jian Li, Shunfu Zhang, *et al.*. A point clouds filtering algorithm based on grid partition and moving least squares[J]. Procedia Engineering, 2012, 28: 476-482.
- 12 D Mongus, B Zalik. Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2012, 67: 1-12.
- 13 Zhao Mingbo, He Jun, Tian Junsheng, *et al.*. Ladar data filtering method based on improved progressive multi-scale mathematic morghology[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0328001.
赵明波, 何峻, 田军生, 等. 基于改进的渐进多尺度数学形态学的激光雷达数据滤波方法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0328001.
- 14 Q Chen, P Gong, D Baldocchi, *et al.*. Filtering airborne laser scanning data with morphological methods[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(2): 175-185.
- 15 J Zhang, X Lin. Filtering airborne LiDAR data by embedding smoothness-constrained segmentation in progressive TIN densification[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2013, 81: 44-59.
- 16 T J Pingel, K C Clarke, W A McBride. An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 77: 21-30.
- 17 L Cheng, W Zhao, P Han, *et al.*. Building region derivation from LiDAR data using a reversed iterative mathematic morphological algorithm [J]. Opt Communications, 2013, 286: 244-250.
- 18 Luo Yiping, Jiang Ting, Gong Zhihui, *et al.*. An adaptive and multi-scale mathematic morghological filter for point cloud data filtering[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2009, 26(6): 426-429.
罗伊萍, 姜挺, 龚志辉. 基于自适应和多尺度数学形态学的点云数据滤波方法[J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(6): 426-429.
- 19 Zhou Xiaoming. Research and Application of Airborne LiDAR Point Cloud Data Filters[D]. Zhengzhou: People's Liberation Army Information Engineering University, 2011.
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, 2011.
- 20 Gong Liang, Zhang Yongsheng, Li Zhenguo, *et al.*. A filtering method of airborne LiDAR data based on hierarchical pseudo-grid concept and slope threshold[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(1): 101-103.
龚亮, 张永生, 李正国, 等. 基于多尺度虚拟网格与坡度阈值的机载LiDAR点云滤波方法[J]. 测绘科学, 2012, 37(1): 101-103.

栏目编辑: 苏岑