

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.005

长江中下游河道岸滩低空机载 LiDAR 点云地形滤波算法

周建红¹, 杨彪², 王华³, 张行南², 蒋建平³, 李浩²

(1. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 长江下游水文水资源勘测局, 江苏 南京 210011)

摘要: 探索新兴的低空机载 LiDAR 技术, 解决长江中下游植被高覆盖、高遮挡区岸滩地形测绘难题。提出一种针对多层次、高密度植被覆盖区的低空机载 LiDAR 点云植被滤波算法, 该算法通过多回波分析对点云进行粗滤波后, 采用数学形态学运算获取地面种子点, 对地形局部进行趋势面拟合, 再通过随机采样一致性检测, 剔除植被点, 保留地面点, 从而获取测区的数字高程模型 (DEM)。典型测区试验表明, 该滤波算法能解决长江中下游河道岸滩地区地形起伏较大、植被高覆盖区域植被点云智能化剥离难题。根据测区实际情况, 设计针对性的滤波算法, 即使是植被与地面点云高度混淆、激光穿透率低于 15% 的复杂情形, 仍能有效分离出地面和非地面点。

关键词: 低空机载 LiDAR; 滤波算法; 地形测量; 长江中下游河道岸滩; 植被覆盖; 激光点云; DEM
中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)01-0026-06

Filtering algorithm of the low-attitude airborne LiDAR point clouds for topographic survey of the middle-lower Yangtze River riparian zone

ZHOU Jianhong¹, YANG Biao², WANG Hua³, ZHANG Xingnan², JIANG Jianping³, LI Hao²

(1. Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Lower Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Nanjing 210011, China)

Abstract: This paper firstly explores and applies the newly low-altitude airborne LiDAR technology to solve the mapping problem of the middle-lower Yangtze River Riparian zone covered with multi-layer and high-density vegetation. A vegetation filtering algorithm is proposed for the low-attitude airborne LiDAR point clouds collected in the complex area with multi level and dense vegetation coverage. After the coarse filtering of point clouds by multi-echo analysis, this algorithm extracts the ground seed points by morphological calculation, fits the trend surface of the local terrain, then eliminates the vegetation points and preserves the ground points using the Random Sample Consensus, thereby acquiring the DEM of measured area. The experimental results show that the proposed algorithm can intelligently remove the vegetation point clouds in the middle-lower Yangtze River riparian zone, where topographic relief is large and vegetation cover is dense. This research also shows that by designing a special filtering approach, it is possible to classify laser points into terrain and vegetation automatically even for thoroughly mixed vegetation and terrain points with low penetration rate of below 15%.

Key words: low-attitude airborne LiDAR; filtering algorithm; topographic survey; middle-lower Yangtze river riparian zone; vegetation coverage; laser point clouds; DEM

基金项目: 国家自然科学基金(51420125014)

作者简介: 周建红(1964—), 男, 高级工程师, 主要从事水文水资源勘测研究。E-mail: jhzhou2008@163.com

通信作者: 杨彪, 博士。E-mail: 792071@qq.com

引用本文: 周建红, 杨彪, 王华, 等. 长江中下游河道岸滩低空机载 LiDAR 点云地形滤波算法 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 26-31.

ZHOU Jianhong, YANG Biao, WANG Hua, et al. Filtering algorithm of the low-attitude airborne LiDAR point clouds for topographic survey of the middle-lower Yangtze River riparian zone[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 26-31.

河道地形测绘资料是江河沿岸经济建设、水资源开发利用、防洪减灾等业务的基础信息,是江河整治和水利工程规划建设的依据^[1]。长江中下游岸滩淤泥质洲滩发育,存在大片树林、芦苇、灌木、草地、菜地等多层次且高密度植被覆盖区域,给现有的地形测绘方法带来严峻挑战。采用 GPS 等常规地面测量方法,存在难以到达、施测困难、电子信号屏蔽等问题;采用航空或无人机摄影测量方法,则存在植被穿透能力差的缺陷;采用传统机载 LiDAR(light detection and ranging 激光探测与测量)技术,则存在成本高、机动灵活性差等不足。近年来,基于无人机或微型有人机平台的低空机载 LiDAR 技术的出现,为该类复杂河道地形测绘难题的解决带来了契机。然而,LiDAR 系统采集的三维点云数据中存在大量的植被反射点,因此难以直接获取测区高精度数字高程模型,解决这个问题的关键就是滤波^[2],从三维点云中提取和分离出真实的地面点。滤波是 LiDAR 数据处理的难点和热点问题^[3],虽然国内外现已研究取得了自适应三角网法(ATIN)^[4-5]、渐进形态学法(PM)^[6-7]、多尺度曲率法(MCC)^[8-9]、坡度分析法^[10]等多种优秀的地形滤波算法。但是,目前仍没有一种滤波算法能适应所有地形地物特征^[11],难以同时滤除高层和低层植被,顾此失彼,且面对低穿透率点云数据时,滤波精度和可靠性急剧下降,往往需要大量人工干预进行修正^[3,12]。为此,本文研究并提出一种融合形态学运算、趋势面拟合、随机采样一致性检测的植被点云滤波新算法。

1 本文滤波算法

1.1 多次回波分析与滤波预处理

激光脉冲在其传播路径上可能会遇到不同的物体,有些物体如建筑物只能反射一次回波信息,而由于有些地物是可以穿透的,如树叶和枝条,这样就可能会形成多次回波^[13]。商业性 LiDAR 系统中至少能获取 2 次回波,即首次回波和末次回波,目前大多数软件能够得到 4 次回波^[14]。

通过对实测 LiDAR 数据回波情况分析,可发现多回波信息能在一定程度上反映被测目标的类型。对于植被覆盖地区,单次回波包含地面激光脚点、人工建筑物、树干层、植被冠层的激光脚点;多次回波中,首次回波来自茂密且高大的植被冠层或靠近冠层的枝叶,中间次回波多为高大植被的枝叶或低矮植被,而末次回波多是植被中间层次的枝叶和地表反射得到的激光脚点。可见,生成数字高程模型的地面激光脚点应该从单次回波和尾次回波中获取。因此,可将其他回波数据点剔除,不仅可一定程度上提高后续滤波的可靠性,还可减少后续滤波的计算量,进而提高滤波效率。

1.2 数学形态学运算与地面种子点提取

1.2.1 点云密度估计

形态学运算需要首先建立点云网格索引。点云网格索引的建立,需要根据点云密度来确认划分格网的大小。长江岸滩地形扫描时,场景中不仅存在陆地,还存在大片无激光反射点的水域,激光点分布不连续。为统计出陆地的点云平均密度,首先根据相对扫描高度、角分辨率估计平均点距,建立一个初始格网,再通过连通域搜索,统计陆地总面积,进而计算点云的平均密度 ρ :

$$\rho = \frac{n}{l} \tag{1}$$

式中: l ——统计得到的陆地总面积; n ——激光点总数。

1.2.2 网格索引建立

通过统计点云平面坐标的极值,获取点云平面分布范围,为保证划分的单元格网中平均有 2 个以上激光点,根据陆地点云平均密度 ρ ,按式(2)设定单元格网尺寸,按式(3)将该矩形区域划分为一定行、列的格网,并根据式(4)判断每个激光点的格网归属。

$$d = \frac{q}{\rho} \tag{2}$$

$$\begin{cases} m_{\text{row}} = \text{int}\left(\frac{Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}}{d}\right) + 1 \\ m_{\text{col}} = \text{int}\left(\frac{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}{d}\right) + 1 \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} r_i = \text{int}\left(\frac{Y_i - Y_{\min}}{d}\right) \\ c_i = \text{int}\left(\frac{X_i - X_{\min}}{d}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: d ——单元正方形格网边长; q ——单元格网中的点数阈值($q \geq 2$); m_{row} 、 m_{col} ——格网的行、列总数; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ 、 $Y_{\min}$ ——点云 X 、 Y 坐标极值; X_i 、 Y_i ——第 i 个激光点的平面坐标; r_i 、 c_i ——第 i 个激光点所在的格网行、列号; int ——取整函数。

1.2.3 逐格网腐蚀与地面种子点提取

格网索引建立后,取每个格网中的最低点作为地面种子点候选点,将候选点高程作为该格网的代表高程,建立规则化数字表面模型(DSM,记为 f),同时记录格网最低点准确的平面坐标。再用结构元素 g 对 f 进行数学形态学腐蚀,其定义为

$$(f \otimes g)(i,j) = Z(i,j) = \min_{Z(u,v) \in w} Z(u,v) \quad (5)$$

式中: $Z(i,j)$ ——腐蚀运算后规则化的 DSM 中第 i 行第 j 列的高程值; w ——结构元素的窗口; u 、 v ——结构元素 w 中格网的行列号。

结构元素的窗口大小取 3 行×3 列以上。经过腐蚀运算,结构元素窗口中心的高程值由窗口内的高程最小值取代。为保证地面种子点的可靠性,再根据腐蚀前后格网高程变化与地形局部坡度,对格网高程的有效性进行评判,评判条件如式(6):

$$V(i,j) = \begin{cases} 1 & Z_0(i,j) - Z(i,j) < \bar{s}d + \sqrt{(\bar{s}dP_0)^2 + \Delta h_0^2} \\ 0 & Z_0(i,j) - Z(i,j) \geq \bar{s}d + \sqrt{(\bar{s}dP_0)^2 + \Delta h_0^2} \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\bar{s} = \frac{1}{k} \sum_1^k s(i,j) \quad s(i,j) \in w$$

$$s(i,j) = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial X} = \frac{Z_{i,j+1} - Z_{i,j-1}}{2d} \quad \frac{\partial Z}{\partial Y} = \frac{Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j}}{2d}$$

式中: $V(i,j)$ ——DSM 中第 i 行第 j 列的高程有效性,其值为 1 表示该格网中的候选种子点为有效种子点,否则视为无效种子点; $Z_0(i,j)$ ——腐蚀前格网高程; P_0 、 h_0 ——激光点云的平面、高程误差; $\bar{s}$ ——结构元素的平均坡度; k ——结构元素窗口中的格网总数; $s(i,j)$ ——结构元素中每个格网对应的坡度值; $Z_{i,j+1}$ 、 $Z_{i,j-1}$ 、 $Z_{i+1,j}$ 、 $Z_{i-1,j}$ ——对应行列号的格网高程。

当前计算的地形坡度仍可能包含了树木等地物坡度,为了得到地形的近似坡度,利用 3×3 以上的开算子(式(7))遍历全部地表坡度值,用以去除少部分树木坡度的影响。

$$(f \circ g) = ((f \otimes g) \oplus g) \quad (7)$$

腐蚀

$$(f \otimes g) = \min_{s \in w} s(i,j) \quad (8)$$

膨胀

$$(f \oplus g) = \max_{s \in w} s(i,j) \quad (9)$$

为了进一步剔除部分残留树木坡度的干扰,再对结构元素窗口内坡度值进行升序排序,取总坡度数的前 80% 个坡度的平均值作为近似平均坡度代入式(6)进行评判。

1.3 局部地形趋势面拟合

在候选种子点中提取出有效种子点后,逐格网进行地形局部趋势面拟合。如图 1(灰色格网表示有效格网,圆形点表示种子点,方形点表示其他激光点),以第 i 行第 j 列格网为例,首先,在当前格网及其 8 邻域格网中,搜索有效种子点,如果找到的种子点个数小于设定的“最少搜索点数”阈值 k_0 ,则扩大搜索范围继续搜索;然后,根据种子点进行趋势面拟合,考虑局部区域地形表面复杂程度有限,趋势面采用二次曲面,建立如式(10)的条件方程组。

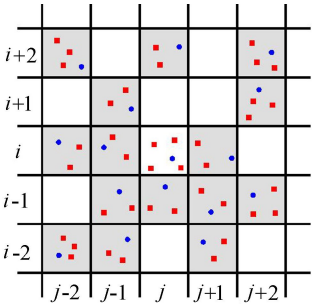


图 1 有效种子点与局部地形趋势面拟合

Fig.1 Valid seed points for the trend surface fitting of local topographic

$$\begin{cases} b_1X_1^2 + b_2Y_1^2 + b_3X_1Y_1 + b_4X_1 + b_5Y_1 + b_6 = Z_1 \\ b_1X_2^2 + b_2Y_2^2 + b_3X_2Y_2 + b_4X_2 + b_5Y_2 + b_6 = Z_2 \\ \vdots \\ b_1X_n^2 + b_2Y_n^2 + b_3X_nY_n + b_4X_n + b_5Y_n + b_6 = Z_n \end{cases} \quad (10)$$

式中: $b_1、b_2、b_3、b_4、b_5、b_6$ ——二次曲面方程系数; $X、Y、Z$ ——种子点的平面坐标和高程。

方程组(10)可以写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} X_1^2 & Y_1^2 & X_1Y_1 & X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2^2 & Y_2^2 & X_2Y_2 & X_2 & Y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^2 & Y_n^2 & X_nY_n & X_n & Y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)可以简写为

$$\mathbf{A}_{n \times 6} \mathbf{B}_{6 \times 1} = \mathbf{L}_{n \times 1} \quad (12)$$

$\mathbf{B}$ 为所求的曲面参数,则未知参数的最小二乘解为

$$\mathbf{B} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L} \quad (13)$$

1.4 RANSAC 一致性检测与点云滤波

尽管曲面拟合采用的种子点经过严格筛选,但也难免存在个别非地面点。为得到更可靠的趋势面,引入随机采用一致性(RANSAC)理论,对趋势面进行优化。

首先,将当前曲面拟合种子点所在格网中的所有激光点构建样本集 P , P 中的有效种子点集记为 S ,采用二次曲面模型(式(14)),作为 RANSAC 的模型 M ,模型的初始化参数为种子点拟合得到的曲面参数。

$$Z' = b_1X^2 + b_2Y^2 + b_3XY + b_4X + b_5Y + b_6 \quad (14)$$

然后,将样本集 P 中所有激光点平面坐标代入模型 M ,得到拟合高程 Z' ,与该点实测高程 Z 进行对比,如果满足条件(式(15)),则将该点纳入内点集 S^* (inliers),它们构成 S 的一致集。为了避免迭代向错误的趋势面发展,构建新的内点集 S^* 前,将上一次的內点集清空。

$$|Z' - Z| < \Delta h \quad \text{或} \quad Z < Z' \quad (15)$$

式中: Δh ——设定的高程偏差阈值,由地形测绘高程精度要求确定。

进而,利用内点集 S^* 重新计算新的模型 M^* ,并根据 M^* 重新随机抽取新的 S ,重复以上过程。在完成一定的抽样次数后,若未找到一致集则算法失败,将初始种子点作为最终的內点集。

最后,判断当前格网中所有的激光点,如果是內点则视为地面点保留,否则予以剔除。

按照上述方法,进行逐格网趋势面拟合与 RANSAC 检测,得到全部地面点。最后,通过地面控制点或已有地形资料对高程异常、坐标转换误差等系统误差进行改正,再通过插值得到测区 DEM。

2 实 例

2.1 原始数据

试验数据的采集设备为 HawkScan1200 扫描系统,激光扫描仪为 RIEGL VUX-1,配备 Trimble Applanix AP20 高精度 DGPS 和 IMU 装置,飞行平台采用奥地利 AEROS 动力三角翼,相对飞行高度约 500 m。采集时间为 2015 年 10 月,测区范围为长江河道江西九江至湖口张家洲河段,累计扫描面积可达 15 km×4 km。测区具有典型代表性,存在不同类型、多层次、高密度植被覆盖,其中,乔木高度 5 ~ 15 m 不等,芦苇高度 3 ~ 8 m,灌木高度 1 ~ 2 m,菜地、草丛平均高度为 0.3 m 左右。共采集 6 586 465 个激光点,平均点距为 1.4 m,点云密度为 0.51 Pts/m²,每条数据记录中包含激光点三维坐标值和回波强度、回波次数等,最多记录了 4 次回波信息。获取的点云数据如图 2 所示。

2.2 试验结果

对原始点云进行基本预处理后,采用本文提出的滤波算法对原始点云滤波,剔除植被点数 4 738 836 个,

保留地面点数 1 847 629 个(约 28%)。通过滤波前、后近 200 个点云断面分析验证本文算法,图 3 为其中一个典型断面的滤波效果。验证结果表明,在植被点云得到了有效滤除的同时,较好地保持了地形原有特征。

考虑到实际生产要求,采用验证区定量评价本文算法的滤波效果。在多层次、高密度植被覆盖的新港地区选取 1 个验证区域,验证区

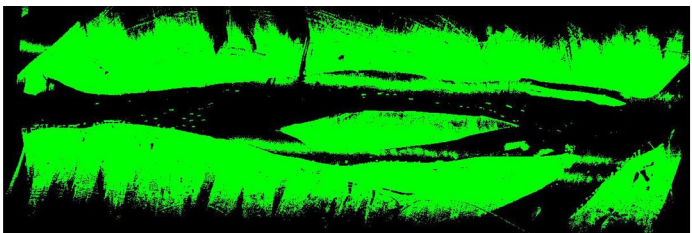
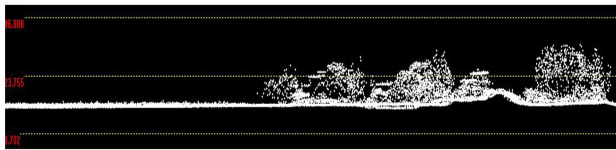


图 2 LiDAR 点云数据(激光点数:6 586 465)
Fig. 2 Raw point clouds of LiDAR with 6586465 points



(a) 滤波前



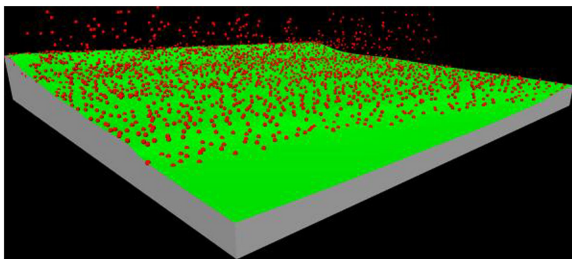
(b) 滤波后

图 3 滤波前、后点云断面(长 451 m,宽 20 m)

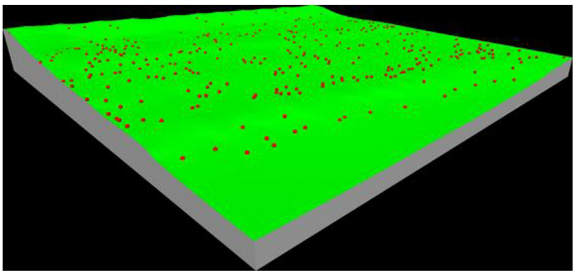
Fig. 3 Section map with point clouds before and after filtering(451 m in length and 20 m in width)

平面面积约 27 000 m²,地形起伏差超 15 m,现场采用 GPS RTK 实测地形点数 352 个,再通过 Kriging 插值,建立验证区 DEM,插值精度小于 5 cm。

在原始点云中,截取相同区域的原始点云和滤波后点云。滤波前总点数 2 686 个,如图 4(a)所示。采用本文算法滤波后,提取地面点数 327 个,见图 4(b)。根据滤波前、后验证区内 LiDAR 点云的平面坐标,在实测 DEM 中经双线性插值得出每个激光点的验证高程,与激光点的实际高程进行比较,计算高程误差,统计得出原始点云的高程中误差为 4.841 m。



(a) 原始点云与验证DEM



(b) 本文算法滤波后点云与验证DEM

图 4 滤波前后激光点空间分布对比

Fig. 4 Comparison of the spatial distribution of point clouds before and after filtering

根据 ISPRS 2003 年的滤波算法评价报告,滤波算法的质量可由第一类误差 e_1 和第二类误差 e_2 来体现, e_1 即地面点被错误分类为地物点的误差, e_2 即地物点被当作地面点的误差^[15-16]。2 类误差的计算方法如下:

$$e_1 = \frac{t_2}{t_1 + t_2} \times 100\% \tag{16}$$

$$e_2 = \frac{t_4}{t_3 + t_4} \times 100\% \tag{17}$$

式中: t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 ——Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类点的数量(Ⅰ类点是正确分类的地面点,Ⅱ类点是错误分类为地物点的地面点,Ⅲ类点是被正确分类的地物点,Ⅳ类点是被错误分类为地面点的地物点)。

根据这 2 类评价指标,结合高差中误差,分别采用本文算法和 Terrascan 滤波数据处理软件进行滤波结果对比。Terrascan 是目前主流的 LiDAR 点云处理软件,采用 Axelsson 自适应三角网滤波算法^[5]。考虑到测区的实际情况,以及 LiDAR 点云的实际定位误差,取高差阈值 Δh 为 0.3 m,铅垂距离超出验证 DEM 表面 Δh 以上的激光点认为是地物点,否则为地面点。由此,统计滤波后地面点和植被点中的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类点数,再按式(16)(17)计算出 2 类误差,对比结果如表 1 所示。

由表(1)可见,本文算法对多层次、高密度植被覆盖区 LiDAR 点云数据滤波质量明显优于 Terrascan。

表 1 本文算法与 Terrscan 滤波结果对比

Table 1 Comparison between the result of proposed algorithm and that of Terrscan

滤波方法	滤波后点数	滤波后高程中误差/m	I 类点数	II 类点数	III 类点数	IV 类点数	$e_1/\%$	$e_2/\%$
Terrscan	382	0.283	307	29	2285	65	8.63	2.77
本文方法	327	0.146	322	14	2345	5	4.17	0.21

3 结 论

- a. 提出了植被滤除算法,成功解决了长江中下游河道岸滩地区地形起伏较大、植被高覆盖区域植被点云智能化剥离难题,实现了真实地表的高精度重现。
- b. 研究表明,采用针对性的滤波算法,即使在植被与地面点云高度混淆、激光穿透率低于 15% 的复杂区域情形,依然能有效分离出地面和非地面点。
- c. 低空机载 LiDAR 技术应用于长江中下游河道岸滩地形测绘,具有高精度、高效率、高自动化等显著优势,有望革新现有的测绘手段。

参考文献:

[1] 丁贤荣,王文,杨涛,等. 河道数字地形信息系统与长江镇扬河段 GIS 研制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(4):116-119. (DING Xianrong,WANG Wen,YANG Tao,et al. River digital terrain information system and GIS for Zhengyang section of Yangtze River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2001,29(4):116-119. (in Chinese))

[2] SHAN J, APARAJITHAN S. Urban DEM generation from raw LiDAR data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(2): 217-226.

[3] POLAT N, UYSAL M. Investigating performance of airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation [J]. Measurement, 2015, 63:61-68.

[4] BLASZCZAK-BAK W, JANOWSKI A, KAMINSKI M, et al. Application of the M-split method for filtering airborne laser scanning data-sets to estimate digital terrain models[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(9):2421-2437.

[5] AXELSSON P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B4/1): 111-118.

[6] ZHANG Keqi, CHEN Shuching, WHITMAN D. 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.

[7] ZHANG Keqi, WHITMAN D. Comparison of three algorithms for filtering airborne lidar data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(3): 313-324.

[8] SU Wei, SUN Zhongping, ZHONG Ruofei, et al. A new hierarchical moving curve-fitting algorithm for filtering lidar data for automatic DTM generation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(14): 3616-3635.

[9] 王明华,张小红,曾涛. 机载 LiDAR 数据滤波预处理方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(2): 224-227. (WANG Minghua,ZHANG Xiaohong,ZENG Tao. Preprocessing algorithms for filtering airborne LiDAR data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2010, 35(2):224-227. (in Chinese)).

[10] VOSSELMAN G. Slope based filtering of laser altimetry data[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3/2): 935-942.

[11] UYSAL M, POLAT N. Investigating performance of airborne LiDAR data filtering with triangular irregular network (TIN) algorithm[J]. The International Archives of Photogrammetry(Remote Sensing and Spatial Information Sciences), 2014, 40(7): 199-202.

[12] MENG Xuelian, CURRIT Nate, ZHAO Kaiguang. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: a review of critical issues[J]. Remote Sensing, 2010, 2(3): 833-860.

[13] FRANCESCO P, ALBERTO G, ANTONIO V. Ground filtering and vegetation mapping using multi-return terrestrial laser scanning[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 76(2): 56-63.

[14] WALLACE L, LUCIEER A, WATSON C, et al. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory[J]. Remote Sensing, 2012, 4(6): 1519-1543.

[15] GEORGE S,GEORGE V. 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(12): 85-101.

[16] 黄先锋,李卉,王潇. 机载 LiDAR 数据滤波方法评述[J]. 测绘学报,2009,38(5): 465-469. (HUANG Xianfeng,LI Hui,WANG Xiao. Filter algorithms of airborne LiDAR data:review and prospects[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2009, 38(5):465-469. (in Chinese))