

文章编号:2095-3046(2016)03-0050-06

DOI:10.13265/j.cnki.jxlgdxxb.2016.03.009

基于渐进加密三角网机载 LIDAR 点云滤波改进算法研究

柳红凯¹, 徐昌荣¹, 徐晓²

(1.江西理工大学建筑与测绘工程学院,江西 赣州 341000;2.江西省基础测绘院,南昌 330000)

摘要:机载三维激光扫描获取的原始点云中通常包含大量的非地面点,无法直接用于制作高精度 DEM。基于渐进三角网,提出了融合点云聚类及点云拓扑特征分析的滤波算法。首先对点云数据进行以区域增长算法对点云进行聚类分割;然后通过对每个聚类中的关键点进行拓扑特征分析来剔除低矮人工地物和低矮植被;最后利用关键点与三角网的位置关系判断每个聚类是否为地面点。通过对某地点云数据实验分析,过滤后的点云能较好地保持地形特征。文中以少量特征点判定聚类是否为地形数据的思想,极大减少运算量,提高效率;加入点云特征分析,提高点云滤波效果。新算法适用于海量点云数据处理,可应用于获取高精度 DEM、地形测绘等领域。

关键词:DEM;滤波;三角网;点云;拓扑特征

中图分类号:P237 **文献标志码:**A

Study on improved algorithm of point clouds from airborne scanner based on progressive encryption TIN

LIU Hongkai¹, XU Changrong¹, XU Xiao²

(1.School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2.Jiangxi Province Basic Surveying and Mapping Institute, Nanchang 330000, China)

Abstract: The original point cloud acquired from airborne three-dimensional laser scanning usually contains a lot of non-terrain points and can't be directly used for obtaining high-precision DEM. Based on progressive TIN, the filtering algorithm which combines point cloud clustering and topological feature analysis is put forward. Firstly, point cloud is segmented by using region-growing method. Then low-rise buildings and vegetation are eliminated by topological feature analyzing key points which are extracted from each cluster. Finally, each cluster is determined whether it is terrain points or not by the relationship between key points and TIN. Filtering point cloud can keep topographical features better via analyzing point cloud data of a land. The thought of using feature points instead of the traditional methods to determine terrain point can reduce the computation greatly and improve efficiency. Furthermore, point cloud filtering effect is improved by using topological feature analysis. The new algorithm is suitable for processing massive point cloud and can be applied to many fields, such as obtaining high-precision DEM and topographic mapping.

Key words: DEM; filtering algorithm; TIN; point cloud; topological feature

收稿日期:2015-11-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41361078)

作者简介:柳红凯(1989-),男,硕士研究生,主要从事点云数据处理的研究,E-mail:2854928286@qq.com.

通信作者:徐昌荣(1964-),男,教授,主要从事测量数据处理、地理信息系统开发方面的研究,E-mail:xmap2002@qq.com.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

三维激光扫描技术(LIDAR)是继 GPS 后又一新兴的测量新技术,能够在很短的时间内获得大量地形表面信息,这些 LIDAR 点云数据除了包括地面点外,还包括诸如汽车,房屋及植被等一些非地面信息.复杂的地形和大量非地面点的存在极大增加点云滤波的复杂性,目前该领域仍处于发展和研究阶段,也是点云数据处理的热点和难点问题.

为了分离出真实地面点,得到高精度 DEM 模型.多年来国内外不少学者专注于点云滤波的处理研究上^[1-3],并取得了不错的成果,具有代表性的有以下几种滤波算法:以内插不规则三角形的算法^[4-7]、基于形态学的算法^[8-10]、基于多分辨率法^[11]、基于坡度的算法^[12-13]、区域增长算法^[14]、基于聚类分割滤波算法^[15]等,这些算法在地形表面连续性较好的情况下能得到较好的滤波效果,但是当地形起伏较大、地物分布复杂等条件下滤波效果较差,这些算法普适性较差.国外学者 Sithole 等将 8 种最具代表性的滤波算法进行对比试验,通过对比这些算法应用到不同情况和不同地形条件下统计 类错误和 类错误的概率得到一些有价值的参考信息,即 8 种算法中渐进三角网算法最具普遍适应性,在复杂地形条件下也能取得不错的成果.但是点云数据量大,该算法执行效率较低且对低矮植被和建筑滤波有待增强.

文章在渐进三角网算法的基础上提出改进方法.将点云格网化取每个格网最低点,构建初始 TIN,而后对点云数据以欧式距离进行聚类分割并获取每个聚类的特征点,判定特征点与 TIN 的位置关系判断点云区域是否为地面点,将得到的地面点加密 TIN,直到没有符合条件的点为止.本文在渐进三角网点云滤波算法基础上结合点云拓扑特征分析和点云聚类提出新算法,选择不同的实验区数据进行实验,证明该算法能有效性,对地形特征保持较好.并且与传统算法进行比较.

1 渐进三角网滤波算法

1.1 渐进三角网滤波算法原理

在对渐进三角网进行算法改进之前,现将原始渐进加密三角网的滤波原理详解如图 1.

- 1) 获取点云数据.
- 2) 将点云进行格网划分,取格网中高程最小的

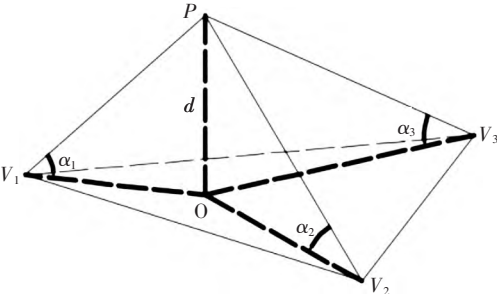


图 1 渐进加密三角网的滤波原理图

点作为地面点构建初始 TIN. 初始的格网划分较为粗糙,一般格网尺寸略大于最大建筑物尺寸.

3) 逐个计算每个点距离三角形的垂距和 3 个顶点的夹角判断是否为地形点. 图 1 中, P 点为待判断点, 获取垂距 d 和 3 个夹角($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$)的最大值与阈值比较, 然后判断 P 点是不是地面点.

4) 将(3)中判断的地形点加入到三角网中, 加密 TIN.

5) 反复(3)(4)直到没有符合条件的点为止.

1.2 渐进加密三角网滤波的几点不足

1)效率低下. 该算法的原理如图 1 所示, 首先计算 P 点到三角形 $V_1V_2V_3$ 所在平面 $Ax+By+Cz+D=0$ 的垂距 d 如公式(1), 若 d 小于设定的垂距阈值, 则当前点为待定地面点; 然后计算待定点 P 到三个顶点(A, B, C)的距离 PV_1, PV_2, PV_3 如公式(2), 两两比较选择出三个值中的最小值, 计算最小边对应的角度值 α_i 如公式(3), 若角度值 α_i 小于设定的角度阈值时才认为待定点为真实地面点.

点 P 到平面 $V_1V_2V_3$ 的垂距 d 和倾斜角为:

$$d=\left|\frac{Ax_p+By_p+Cz_p+D}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}}\right|$$

(1)

点 P 到三角形顶点的斜距:

$$PV_i=\sqrt{(X_p-X_{vi})^2+(Y_p-Y_{vi})^2+(Z_p-Z_{vi})^2} \quad i=1,2,3$$

(2)

最小边对应的角度值:

$$\alpha_i=\arcsin\frac{d}{PV_i} \quad i=1,2,3$$

(3)

综上每个待定点需要进行 9 次数据计算才能完成基本判定, 在利用三维激光进行数据采集时, 即便是小范围数据采集亦有几百万甚至上千万个点数据, 在如此海量数据中, 此种判定方法造成数据处理效率极低.

2) 类和 类错误较难剔除. 同大多滤波算法一样, 渐进三角网滤波算法对一些较为明显的地物滤波效果较好, 但是当遇到低矮建筑和陡坎这些特征极具相似度的条件下, 该滤波方法也很难获得较为理想的效果. 如以下几种情景:

①低矮植被与小山包. 如图 2 所示, 由于二者具有极度相似的外形尤其是高度相当, 在设定阈值时, 当阈值设定太小, 虽然可以将低矮植被正确剔除, 但是同时将小山包削平; 相反, 当设定的阈值太大, 虽然小山包得到完整保存但是无法剔除低矮植被.



图 2 低矮植被与小山包

②陡坎和低矮建筑. 如图 3 所示, 二者具有更加相似的特征, 仅仅根据传统方法中的角度和高度变化与设定的阈值进行数据判定更容易造成两类错误的产生. 针对以上问题提出下文点云聚类 and 点云拓扑特征分析, 达到精确分析两类错误和提高点云处理效率的目的.

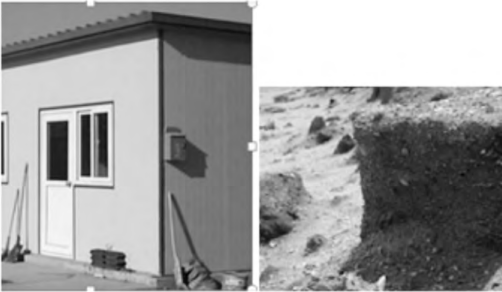


图 3 低矮建筑与陡坎

2 点云聚类 and 点云拓扑特征

2.1 点云聚类

考察 m 个数据点, 在三维空间内利用点与点之间的高差相近性聚类, 设 m 个数据点组成 n 类, 然后将具有最小距离的两类合为一类, 并重新计算类与类之间的距离, 迭代直到任意两类之间的距离大于指定的阈值, 完成聚类. 本文算法采用区域增长算法进行聚类分割, 先将点云进行格网划分, 选取格网中的最低点作为种子点, 搜索邻域点与种子点的高差是否小于设定的阈值, 当小于阈值时标记为同一类并作为新的种子点, 直到没有满足条件的点为止. 同理, 将格网中未分类的高程最低点作为新的种子点重复上面操作直到所有的点均被分类为止.

2.2 点云拓扑特征描述

利用点与邻域点之间高程的高差得到点云之间的位置关系, 例如建筑边缘的点云数据点与邻近点呈现一边高差较大, 一边高差较小, 结合示意图 4, 对常见的几种邻域拓扑特征描述如图 5, 以 A_4 邻近点 A_2, A_3, A_5, A_7 为例, A_4 与 A_3, A_5, A_7 高差较小, 与 A_2 高差较大, 高差呈现 K 字形, 常见点云特征还有米字形、丁字形等.

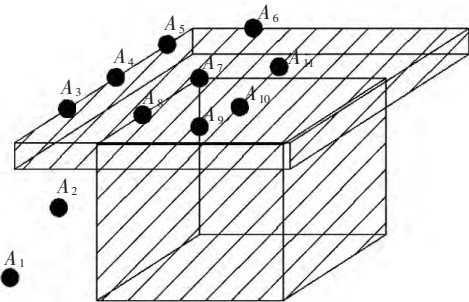


图 4 点云分特征示意图

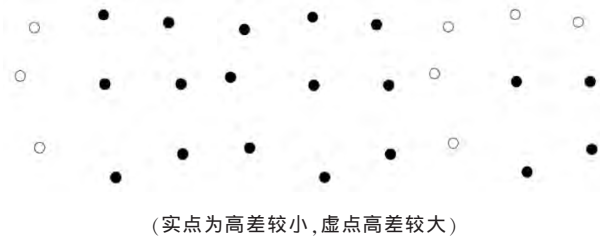


图 5 几种常见的点邻域拓扑特征

3 改进算法

3.1 理论依据

在对低矮建筑和植被的分离方面, 低矮植被、陡坎等虽分别与小山包、低矮建筑具备相似的外形特征, 但是自然地物不会像人工建筑那样精细, 比如人工建筑房顶平面非常平整, 边缘一般相互垂直, 这些精细特征不是自然地物可以比拟的, 在高精度 DEM 构建时, 可以借助点云特征点与其邻域点的拓扑特征特点精细分析这类问题, 通过设定较小高差特征值过滤建筑物, 由于房子与陡坎在进行拓扑特征分析时, 两者差距特别明显在此不做详细阐述; 在区分低矮植被与小山包时, 如图 6、图 7 所示, 将点云数据聚类后提取点云特征点(示意为边缘特征点), 以特征点为中心进行邻域搜索并进行精细拓扑特征分析时, 低矮植被由于受躯干高程的影响, 边缘一侧高差相对较大; 而山包特征点邻域特征点相对平缓, 并不会出现高程突变的特征, 在

实际应用时通过邻域高差阈值的设定可有效剔除低矮植被的点云数据,从而获取高精度 DEM.

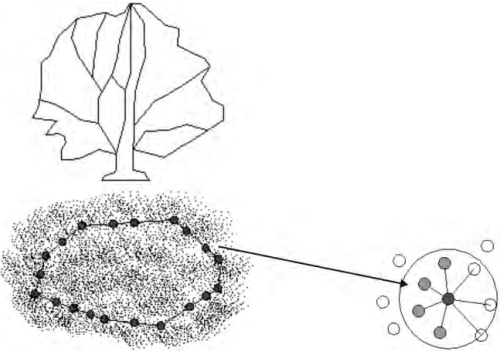


图 6 植被边缘特征点邻域特征示意图

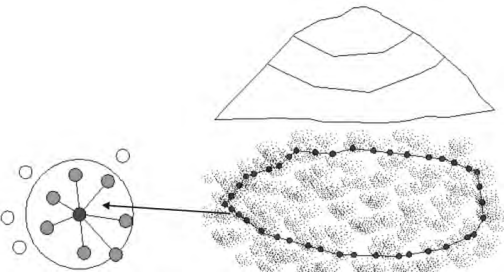


图 7 山包边缘特征点邻域特征示意图

3.2 算法过程

针对传统算法存在的以上不足,结合点云聚类 和拓扑特征原理,将渐进三角网滤波算法加以改 进,具体步骤如下:

- 1)去除离群点. 以 K-D 树组织点云数据,当一 个点在指定半径 d 内的点数小于指定的阈值 k 时, 将该点做为离群点删除.
- 2) 点云重采样. 三维激光扫描数据冗余量大,

对点云数据处理产生极为不利的影响,在点云滤波 之前,对点云数据进行重采样以减少点数量. 在削 减点云数量的同时必须要确保点云的形状特征不 被改变,为了满足以上要求,本文将点云整个点云 数据划分为体素栅格,以体素栅格内点的重心代替 体素被所有点,这样既大大减少了点云数量,又保 证了点云特征不被破坏.

3)将点云进行网格划分,取网格中高程最小的 点作为地面点构建初始 TIN. 初始的网格划分较为 粗糙,一般网格尺寸略大于最大建筑物尺寸.

4)将点云以高程值进行聚类分割. 本文采用以 区域增长算法方式分割点云数据,该算法进行聚类 分割时,先选择一定量的种子点,然后以种子为中 心进行八邻域搜索,将高程值与当前种子点高程进 行比较,当高差在阈值范围内,则包含在当前聚类 中并成为新的种子点,迭代直到不再有符合条件的 点为止.

5)提取点云特征点. 在提取特征点时,要特别 注重有邻域存在高程突变的点数据,该过程为本算 法的非常重要环节. 主要针对低矮建筑物和低矮 植被的剔除.

6) 从每个类中选取若干点计算每个点距离三 角形的垂距和 3 个顶点的夹角判断是否为地形点. 若选取的点为地面点,将整个类加入 TIN,否则被 过滤.

7)迭代(6)直到没有符合条件的类为止.

参照原始点云图 8 所示,对比图 9、图 10 效果 图,可得出新算法对地形特征保持很好. 在进行点 云拓扑特征分析时,应先设置较小的阈值剔除人 工建筑,而后设置较大的阈值去除植被. 技术路线 如图 11 所示.

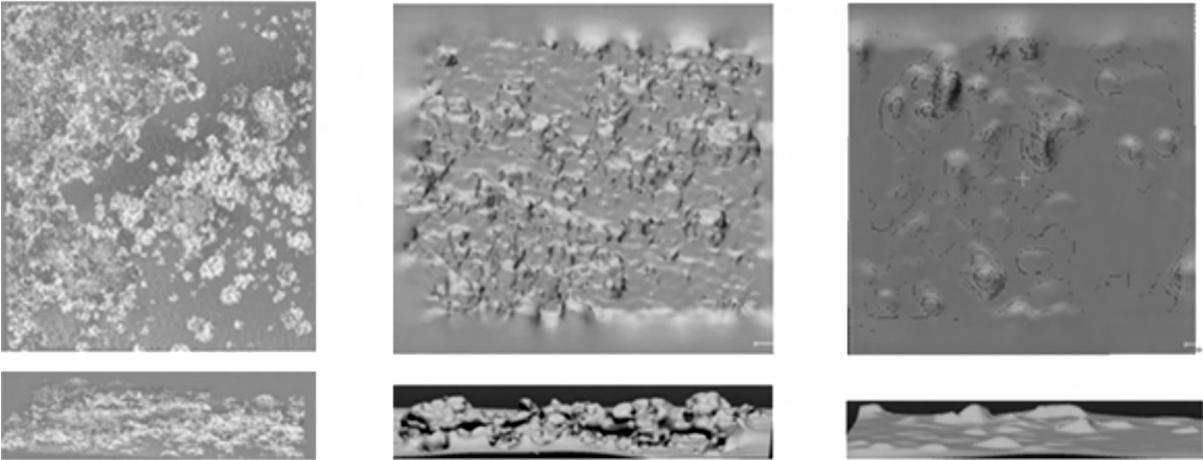


图 8 原始点云俯视(上)、侧视图(下) 图 9 原始点云俯视(上)、侧视(下)DEM 图 10 滤波后俯视(上)、侧视(下)DEM

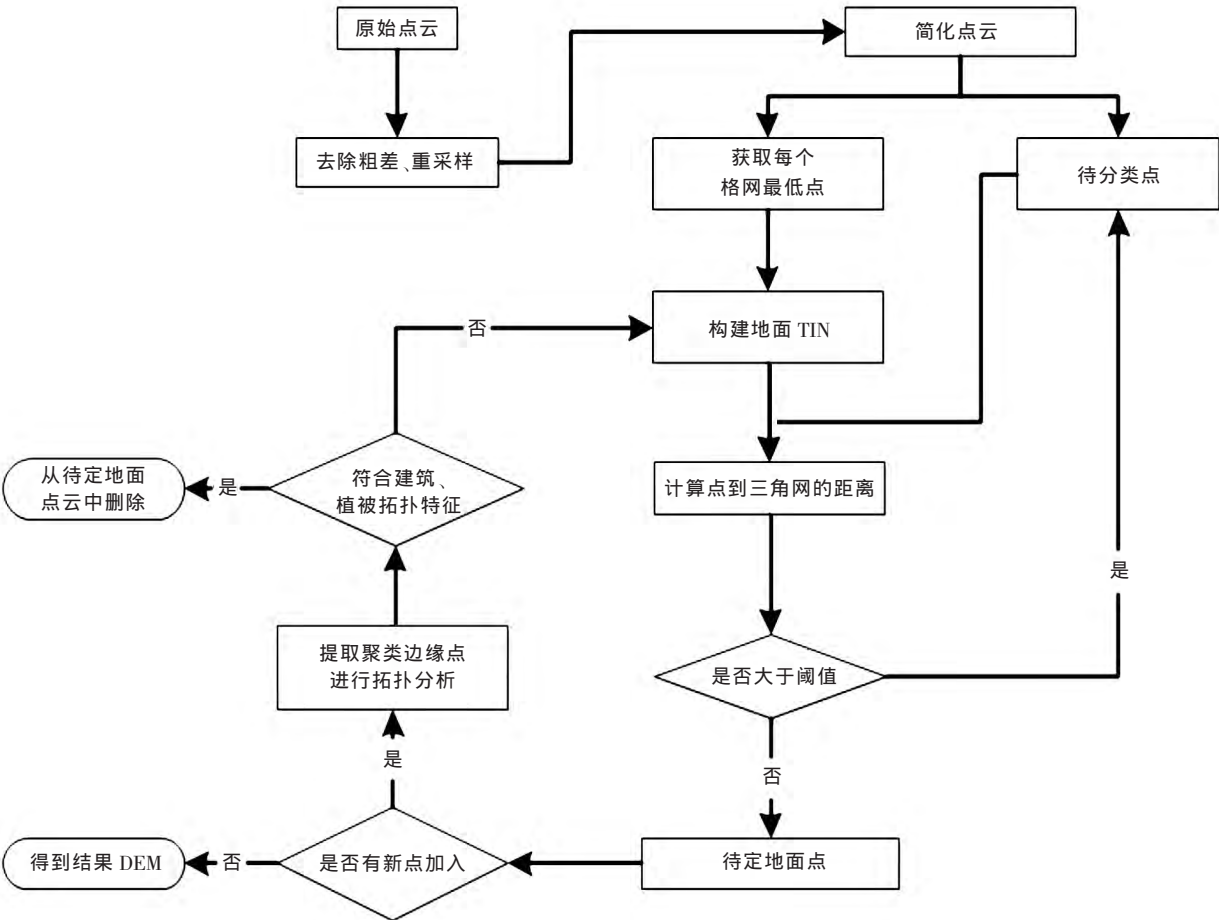


图 11 技术路线图

4 实 验

文章选取了 2 个具有代表性的实验数据了来验证新算法的可靠性,试验区 1 为混合地形,区域地物分布较为复杂,尤其是包含了植被、陡坎、道路和建筑等,区域范围为 1000 m×1000 m,最大高差约为 35 m,点云平均间距约为 2.5 m,共计 412647 个离散点;试验区 2 为地形起伏较大的山地地形,区域中包含了大量的高大树木、植被和陡坎等,区域范围 2250×2100,最大高差约为 70 m,点云平均间距 2.6 m,共计 698876 个离散点。

本文基于融合了点云拓扑分析和点云聚类的渐进三角网滤波改进算法对实验区地形数据进行提取. 为了验证算法的高效性和有效性,本文选取传统的基于渐进三角网滤波算法对同一地区进行地形提取,通过计时对比两者之间的用时差距,验证新算法的高效性. 通过对比 I 类错误 (漏选的地面点)和 II 类错误(未去除的地物点)验证新算法的

有效性. 采用人机交互的方式分别计算出地物和地形的点云总数,作为 I 类错误和 II 类错误统计的参考依据.

如图 12(a)为点云原始数据,原始数据中包含了大量的低矮房屋、植被、道路等,图中有些房屋为连接房 (如左上角处高大房屋旁连接着低矮房屋),在地形测绘中,人工建筑均不能算为基本地形. 由于原始点云中低矮植被和建筑较多,无法一一在图上标注,现将图中几个明显的区域进行标注,如图 12(b)为传统算法滤波后的点云图像,从图中可以看出高大房屋剔除效果整体不错,但是低矮建筑仍然保留在点云数据中,图 12(c)为新算法滤波后的点云图像,可以明显看出低矮植被被剔除,整体效果更好. 图 13 为山地滤波效果图,对比图 13(b)、图 13(c)可发现新算法对低矮植被滤除效果具有明显优势. 下面采用国际比较认可的评价点云滤波好坏的 ISPRS 指标(统计 I 类错误和 II 类错误的出现概率) 来证明新算法的有效性. 数据统计见表 1.

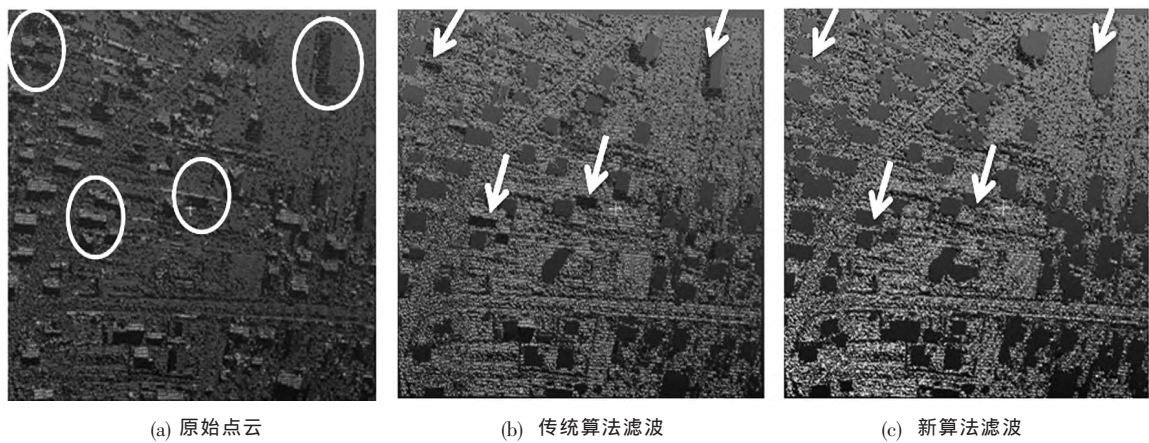


图 12 试验区 1 滤波结果

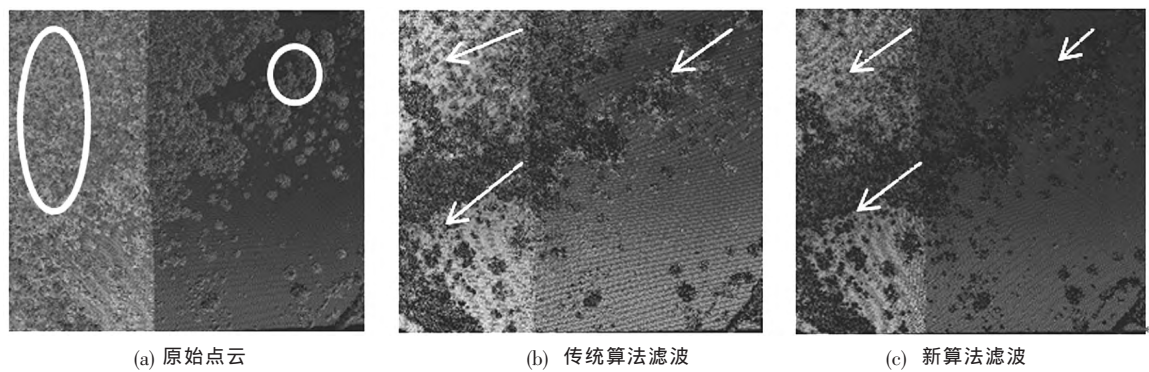


图 13 试验区 2 滤波结果

表 1 传统算法与新算法的错误率和滤波用时表

试验区	使用算法	地面点	类错误 /%	类错误 /%	用时 /ms
试验区 1	传统滤波算法	301545	19.05	9.49	746590
	改进后算法	282479	5.16	2.57	298686
试验区 2	传统滤波算法	323516	10.09	7.32	1231870
	改进后算法	309345	5.38	3.82	517385

新算法尤其注重低矮建筑和植被的剔除,所以 类错误发生的概率很低,试验区中由于存在大量的低矮植被导致传统算法中 类错误率非常高.由于新算法摒弃原始算法中每个点进行地面点与非地面点间的判定,在对点云分类时只通过每个点云聚类中的关键点作为判断依据,极大的减少了运算量,提高点云处理效率.

5 结束语

1) 由于改进算法不必采用原始算法中每个点的多次解算来判断地面点和非地面点的处理方式,

改进算法只需读取点云的高程数据进行聚类,而后选择每个类的代表点进行数据判定达到整体判定的目的,而不像原始渐进三角网中逐点判定的计算方式,所以处理效率有极大提高.

2) 由于改进算法加入拓扑属性进行分析,充分考虑点云数据的整体特征而不像原始算法只针对单个点的计算判定,在大多区域尤其是地形复杂区域整体的分析一定优于离散点分析,所以改进算法在处理一些特殊地形中一定能取得更好的效果.为了定量评价滤波质量,本文采用两类误差统计分析.其中第一类误差是地面点被错误认为是地物

在用浓度为 2 %硫酸铵溶液浸矿时,在注液早期的 24 h 内需要加大对山体的监测,防止因黏聚力 C 和内摩擦角 φ 的改变导致山体滑坡.

参考文献:

[1] 徐水太. 赣州稀土产业可持续发展的问题与对策研究[J]. 江西理工大学学报, 2014, 35(4):47-51.

[2] 黄紫彬,蔡昶,袁宪强,等. 浅析原地浸矿开采的离子型稀土矿山安全问题[J]. 稀土, 2013, 34(4):99-102.

[3] 饶运章,张永胜,饶睿,等. 离子型稀土原地浸矿边坡稳定影响因素敏感性分析[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(9):60-63.

[4] 金艳丽,戴福初.灌溉诱发黄土滑坡机理研究[J]. 岩土工程学报, 2007(10):241-246.

[5] 罗嗣海,袁磊,王观石,等. 浸矿对离子型稀土矿强度影响的试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2013, 4(3):58-61.

[6] Ahmed M, Iskander M. Analysis of tunneling -induced ground movements using transparent soil models[J]. Journal of Geotechnical

and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2011, 137(5): 525-535.

[7] Jiang X Y, Wang Z G, Liu L Y. The determination of reduction ratio factor in homogeneous soil-slope with finite element double strength reduction method[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2013(7):205-209.

[8] Jerry A Yamamuro, Poul V Lade. Steady-state concepts and static liquefaction of silty sands[J]. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 866-877.

[9] 陈力华, 靳晓光. 有限元强度折减法中边坡三种失效判据的适用性研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9):136-146.

[10] 马秀婷,邵生俊,杨春鸣,等. 非饱和结构性黄土的强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1):68-75.

[11] 周跃峰,谭国焕,甄伟文,等. 入渗诱发黄土滑坡的力学机制[J]. 岩土力学, 2013, 34(11):3173-3179, 3186.

[12] 刘斯文,黄园英,朱晓华,等. 离子型稀土采矿对矿山及周边水土环境的影响[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6):25-32.

[13]金解放,陶伟,邱灿,等. 离子型稀土一维垂直入渗规律及最大粒径的影响试验研究[J].有色金属科学与工程, 2015, 6(6):125-131.

.....

(上接第 55 页)

点的百分比;第二类为地物点被错误认为地面点的百分比.

3) 现在三维激光扫描设备越来越重视多传感器设备的运用,获取的点云数据中包含了颜色、激光强度等多种信息,本算法下一步的研究重点应结合更多的点云属性信息进行数据分类,获得更加准确分类等.

参考文献:

[1] 孙正林. 三维激光扫描点云数据滤波方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.

[2] 王金亮,陈联君. 激光雷达点云数据的滤波算法述评[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(5):632-638.

[3] 熊晓光,王毅. 激光雷达点云数据截面提取计算方法研究[J]. 江西理工大学学报, 2013, 34(3):42-46.

[4] 李卉,李德仁,黄先锋,等. 一种渐进加密三角网 LIDAR 点云滤波的改进算法[J].测绘科学, 2009, 34(3):39-40, 216.

[5] 左志权,张祖勋,张剑清.知识引导下的城区 LiDAR 点云高精度三角网渐进滤波方法[J].测绘学报, 2012(2):246-251.

[6] Axeleson P. DEM from laser scanner data using adaptive TIN

models [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000,33(B4/1):110-117.

[7] 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(10):1159-1163.

[8] 李鹏程,王慧,刘志青,等. 一种基于扫描线的数学形态学 LIDAR 点云滤波方法[J]. 测绘科学技术学报, 2011, 28(4):274-277, 282.

[9] 张熠斌,隋立春,曲佳,等. 基于数学形态学算法的机载 LIDAR 点云数据快速滤波[J]. 测绘通报, 2009(5):16-18, 65.

[10] 孙美玲,李永树,陈强,等. 基于扫描线的渐进式形态学机载 LIDAR 点云滤波[J].光电工程, 2013, 40(11):71-75.

[11] 万幼川,徐景中,赖旭东,等. 基于多分辨率方向预测的 LIDAR 点云滤波方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(11):10-11.

[12] 杨洋,张永生,邹晓亮,等. 一种改进的基于坡度变化的机载激光雷达点云滤波方法[J]. 测绘科学, 2008, 33(增刊 1):12-13, 280.

[13] Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3/2; PART 3): 935-942.

[14] 成晓倩,赵红强. 基于区域生长的 LIDAR 点云数据滤波[J]. 国土资源遥感, 2008, 78(4):6-8, 21.

[15] Roggero M. Airborne laser scanning-clustering in raw data[J]. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2001, 34(3): 227-232.