

基于反射强度偏度平衡的道路点云提取算法

惠振阳¹, 胡友健², 康妍斐³

¹东华理工大学测绘工程学院, 江西 南昌 330013;

²中国地质大学(武汉)信息工程学院, 湖北 武汉 430074;

³武汉市勘察设计有限公司, 湖北 武汉 430074

摘要 反射强度信息是机载激光雷达(LiDAR)系统所获取数据的重要组成部分,利用反射强度信息提取道路点云的主要难点在于道路点云通常包含在地面点云中,而区分道路点云与非道路点云的反射强度阈值较难获取。针对该问题,提出了基于偏度平衡的道路点云提取算法,该算法可以自动、准确、无参地确定反射强度阈值,进而获取纯净的道路点云。分别采取位于我国山西省某地和德国某城市的两组 LiDAR 点云数据来检验该算法在不同地理环境下的有效性。实验结果表明所提算法简单有效,并且能够得到良好的道路点云提取结果。

关键词 遥感;激光雷达;反射强度;偏度平衡;道路点云

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.022801

Road Point Cloud Extraction Algorithm Based on Reflection Intensity Skewness Balancing

Hui Zhenyang¹, Hu Youjian², Kang Yanfei³

¹ Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China;

² Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

³ Wuhan Geotechnical Engineering and Surveying Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Reflection intensity information is an important component of data acquired by airborne light detection and ranging (LiDAR) system. The main difficulty in realizing road point cloud extraction using reflection intensity information is that road point cloud is always contained in ground point cloud, whereas the reflection intensity threshold to discriminate road point cloud and non-road point cloud is hard to obtain. To solve this problem, an extraction algorithm of road point cloud based on skewness balancing is proposed, which can obtain the reflection intensity threshold automatically, accurately and parameter-freely. After that pure road point cloud can be obtained. We adapt two datasets of LiDAR point cloud located in somewhere of Shanxi province and a certain city in Germany to test the effectiveness of the proposed algorithms at different environments, respectively. The experimental results show that the proposed algorithm is easy and effective, and has a good performance of road point cloud extraction.

Key words remote sensing; light detection and ranging; reflection intensity; skewness balancing; road point cloud

OCIS codes 280.3640; 280.3400; 280.3420

1 引言

机载激光雷达(LiDAR)是近年来发展十分迅速的遥感新技术。它在获取点云三维坐标的同时,

还可以记录激光脚点所在位置地面目标物体的反射强度信息。目前针对机载 LiDAR 数据的研究有很多,如数字地面模型提取^[1-2]、建筑物提取^[3-4]及电力线提取^[5-6]等。

收稿日期: 2017-07-25; 收到修改稿日期: 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(41374017)

作者简介: 惠振阳(1989—),男,博士研究生,讲师,主要从事机载 LiDAR 点云数据处理方面的研究。

E-mail: huizhenyang2008@163.com

导师简介: 胡友健(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事沉降监测及机载 LiDAR 点云数据处理方面的研究。

E-mail: 2434288475@qq.com

反射强度是 LiDAR 点云数据的重要组成部分。反射强度数据主要与反射介质有关,不同的反射介质对应不同的反射系数,而不同的反射系数则对应不同的反射强度。当激光脉冲打到相似介质的表面时,回波信号的反射强度会较为接近;反之则不然。反射系数通常由激光脉冲的波长、介质表面的明暗程度以及介质质地共同决定。反射介质的表面越亮,反射率就越高。一般而言,自然地物(如植被)对激光的反射能力要高于人工地物(如沥青道路)^[7]。

虽然不同材料的反射强度与多种因素有关,但对于同一区域,当飞行条件相近时,可以近似地认为不同材料的反射强度只与介质表面相关。如果能够建立一组不同材料反射强度与介质的对应关系,那么根据点云反射强度值所属的区间范围就能判定该点云所对应的地物。为了识别不同地物,张小红^[8]采用强度标定的方法进行判断。所谓的标定即指在同一航带下确定相邻区域不同介质表面对激光脉冲散射强度的量化指标^[8]。但该量化指标只适用于同一区域、同一飞行条件下的 LiDAR 点云,对于其他区域的点云数据只具有参考意义,不能直接按照该量化指标进行地物分类。

近年来越来越多的专家学者利用点云反射强度信息作为辅助进行地物分类,如 Lang 等^[9]利用强度信息实现对森林冠层下湿地的探测,Ohashi^[10]利用强度信息对树木种类进行了分类,Minh 等^[11]运用神经网络结合 LiDAR 点云的反射强度数据、高程数据、全色影像以及 RGB 影像来实现对土地的精确定类等。

道路是城市的重要组成部分,道路信息的准确获取将有利于车辆导航、交通安全管理以及城市规划等。道路点云通常包含于地面点云中,道路由于其材质的特殊性与统一性,往往与其周围的其他地面点云在反射强度上会有明显的不同。基于此特点,国内外许多研究人员都采用反射强度约束,从地面点云中提取道路点云。然而由于道路材质的复杂性,并不容易确定反射强度阈值。徐景中等^[12]利用直方图对点云强度值进行统计分析来确定道路点云的反射强度阈值;Choi 等^[13]通过航片在点云中人工选出若干个准确的道路种子点,计算其反射强度均值和方差,然后将均值减去方差设定为阈值的最小值,均值加上方差设定为阈值的最大值;Clode 等^[14]通过多次样本训练来获得更准确的道路反射强度阈值。以上这些确定反射强度阈值的方法都缺乏普遍

适用性,而且无法确保所获取的阈值为最佳阈值。针对以上问题,本文提出一种基于偏度平衡算法的最佳阈值确定算法。该算法可以自动、准确、无参地计算出道路点云的反射强度阈值,进而获得纯净的道路点云。

2 偏度平衡

2.1 偏度的定义

在统计学中,偏度是表征统计数据不对称程度的统计量,又称为偏度系数,通常用 s_k 表示^[15]。从统计数据的概率密度分布函数(PDF)曲线的偏斜方向来看,可以将统计数据的分布分为右偏态(正偏态)分布、正态分布以及左偏态(负偏态)分布。

假设统计量 x 的三阶矩存在,则 s_k 可表示为

$$s_k = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3, \quad (1)$$

式中 N 为样本总数, x_i 为第 i 个样本值, μ 为样本均值, σ 为样本方差。其中, μ 和 σ 的表达式为

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}. \quad (3)$$

s_k 为无量纲的量,当 $s_k > 0$ 时,对应的样本统计分布为右偏态;当 $s_k < 0$ 时,对应的样本统计分布为左偏态。从 PDF 曲线直观上看, s_k 表示的是其尾部的相对长度, $|s_k|$ 越大,表示其偏离程度越大。

2.2 偏度平衡算法的基本思想

Bartels 等^[16]首先于 2006 年将偏度统计量引入到点云滤波中,提出一种无监督、无阈值的偏度平衡点云滤波法。随后, Bartels 等^[17]对该算法进行改进,使得该算法在地形坡度变化较大区域也能获得较好的滤波效果。Bartels 等提出的偏度平衡算法主要基于中心极限定理,即自然状态下测量的样本数据总是呈正态分布^[18]。在此基础上, Bartels 等作出了以下两个假设:1) 自然状态下, LiDAR 点云中的地面点数据的概率密度函数总是呈正态分布;2) LiDAR 点云中的非地面点数据干扰了地面点数据的正态分布,使得 LiDAR 点云数据呈正偏态分布。

偏度平衡滤波法对点云数据组织方式无特定要求,即无论是离散点云还是规则格网点云都可以应用该方法。但由于该算法实现的基础是地面点呈正态分布,所以对地面点的数量有最低限制的要求,即

$$n_{\min} = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \sigma_0}{E} \right), \quad (4)$$

式中 $Z_{\alpha/2}$ 为水平值, σ_0 为种群的标准差, E 为可接受的边缘误差。

一般而言,可设置 $Z_{\alpha/2} = 1.96$, $E = 0.1$, σ_0 则需要根据实际样本进行估算。现有文献计算出来的地面点的最低数目通常为 $800 \sim 900$ ^[15, 17], 显然对于大多数实验区域,地面点的个数要远大于这个数值,所以对于大部分实验区域,偏度平衡滤波法均适用。

3 算法原理

道路一般由混凝土或者沥青铺制而成,其材质与相邻的低矮植被或者裸露地面会有较大区别,所以通过设置反射强度阈值可以将道路点云从地面点云中提取出来。一般情况下,沥青或者混凝土的反射率很低,对应的反射强度阈值也很小。因此,一般只需要设置道路反射强度阈值的上确界即可将道路点云提取出来。

在 Bartels 等最初提出的偏度平衡滤波算法中,主要是通过对点云的高程数据进行偏度计算,然后逐次剔除高程数据最高点以实现点云滤波。在此,试图将偏度平衡算法引入到道路点云强度阈值的获取中来,通过处理点云强度数据来自动、准确、无参地获取强度阈值。由于在城市区域,道路点云是地面点云的主要构成部分,所以对于几乎所有区域都满足道路点云呈正态分布的基本要求,即道路点云个数大于最小要求点数($800 \sim 900$)。本文采用与 Bartels 等所提方法相似的思路,设立以下假设:1) 自然状态下, LiDAR 点云中道路点云的强度数据的概率密度函数总是呈正态分布;2) 地面点云中非道路点云的强度数据干扰了道路点云强度数据的正态分布,使得地面点云强度数据呈正偏态分布。

该算法的处理流程图如图 1 所示。

具体实现步骤如下:1) 输入地面点云数据 (x_i, y_i, z_i, I_i) , $i = 1, 2, \dots, N$, N 为点云总数;2) 获取点云的最大反射强度值 I_{\max} , 并令反射强度阈值 $I = I_{\max}$;3) 计算点云强度数据的 s_k , 如果 $s_k > 0$, 执行步骤 4), 否则执行步骤 5);4) 反射强度阈值自动减 1, 即 $I = I - 1$, 并剔除点云中所有大于此强度阈值的点云, 然后继续执行步骤 3);5) 输出道路点云最佳强度阈值 I_{th} 。

获取强度阈值后,将所有反射强度值大于该阈值的点进行剔除便可获取道路点云。

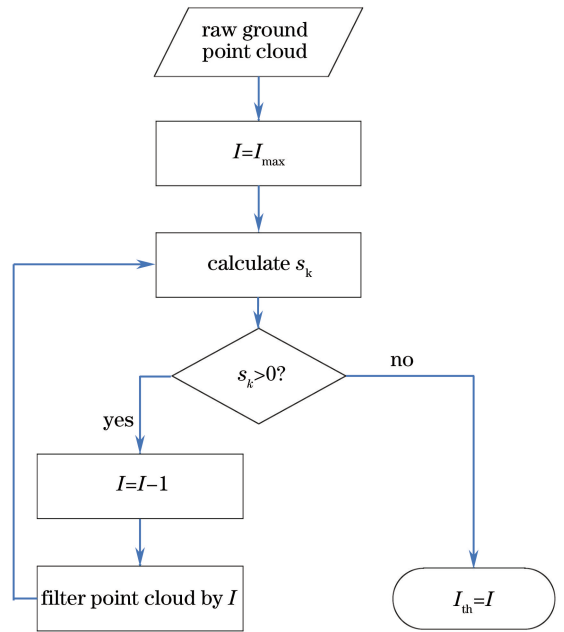


图 1 基于偏度平衡算法的道路强度阈值获取流程图
Fig. 1 Flowchart of road intensity threshold acquiring based on skewness balancing algorithm

4 实验分析

本文选用的第一组实验数据位于我国山西省某地,该实验数据由瑞士 Leica Geosystems 公司的 ALS50-II 型号的机载激光扫描系统采集获得,点云平面误差小于 1.5 m , 高程误差小于 0.5 m 。此实验数据位于主城区,道路分布较为复杂,有较多低矮植被以及大型建筑物,该点云数据经高程分层渲染后的结果如图 2 所示。采用 Hui 等^[19]提出的形态学滤波改进算法,可得到地面点云按反射强度数据渲染的结果,如图 3(a)所示;图 3(b)为地面点云反射强度数据的 PDF 曲线图,从图中可以清楚地看出该 PDF 曲线相对于正态分布的 PDF 曲线属于正偏态,满足前文所作出的假设,即地面点云中非道路点云的强度数据干扰了道路点云强度数据的正态分布,使得地面点云强度数据呈正偏态分布。采用所提算法计算地面点云反射强度数据的偏度,并进行多次迭代,得到偏度的变化曲线如图 4 所示。当点云反射强度数据的偏度不再大于 0 时,获取此时的 $I_{\text{th}} = 20$, 并将所有强度值大于此阈值的点云从地面点云中剔除,获取的道路点云如图 5(a)所示;由图 5(b)可以看出此时道路点云强度数据的 PDF 曲线接近正态分布的 PDF 曲线,满足之前所作出的假设,即自然状态下, LiDAR 点云中道路点云的强度数据的概率密度函数总是呈正态分布。

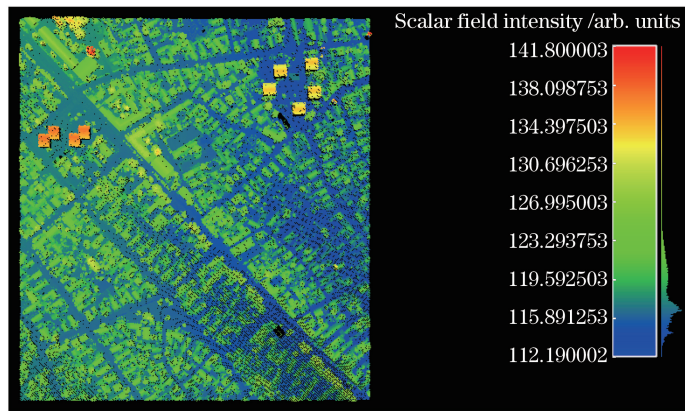


图 2 样本 1 点云高程渲染示意图

Fig. 2 Point cloud elevation rendering sketch map of sample 1

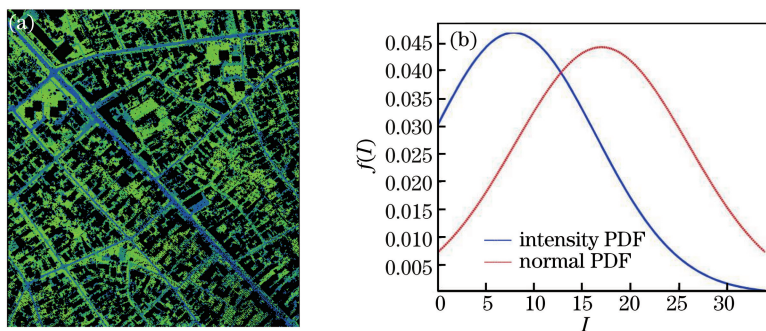


图 3 地面点云反射强度及对应的 PDF 曲线。(a)地面点反射强度渲染示意图;(b)对应的 PDF 曲线

Fig. 3 Ground point cloud reflection intensity and corresponding PDF curves.

(a) Ground points rendered by reflection intensity; (b) corresponding PDF curves

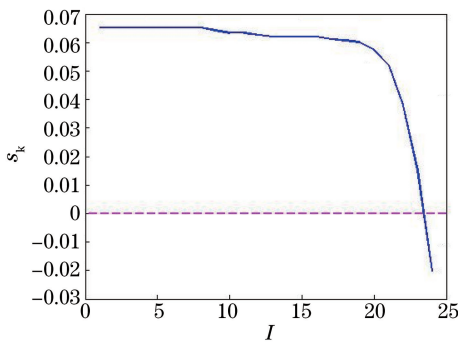


图 4 偏度变化曲线图

Fig. 4 Changing curves of skewness

第二组实验数据位于德国某城市,该实验数据由加拿大 Optech 公司的 ALTM 型号的机载激光扫描系统采集获得,点密度为 4 m^{-2} 。该实验区域共包含 436835 个点,点云的高程渲染结果如图 6 所示。从图中可以看出,该实验区域中的点云与上一组实验区域中的点云有很大不同。首先,第二组点云数据反射强度值的范围区间不大(最大值为 50),使得道路点云与非道路点云之间的反射强度值差异较小;其次,第二组实验区域内道路分布较为复杂,

道路周围多被密集植被覆盖,此外还存在有较多的停车场、空地等似道路区域。

第二组实验数据道路提取前的 PDF 曲线如图 7(a)所示。从图中可以看出该曲线满足前文所作出的假设,属于正偏态。采用所提算法提取道路点云后的 PDF 曲线如图 7(b)所示,该曲线虽然接近正态分布的 PDF 曲线,但并不严格符合。这是因为该实验区域点云的反射强度幅度变化较小,故基于反射强度值较难区分道路点云与非道路点云^[20]。此外,该实验区域还包含有较多的似道路区域(停车场、空地等),此类区域的反射强度值与道路区域的反射强度值十分接近,导致提取出来的道路点云中仍然包含有部分非道路点云,如图 8 所示。

通过上述实验可以看出所提出的自动获取道路阈值的算法在城市区域表现良好。这是因为在城市区域道路是地面的主要构成部分,容易满足最小种群个数的要求;其次,在城市区域道路材质较为统一,并且与周围地物在反射率上有较大的差别,所以较容易将道路点云自动判别出来。但在部分城市区域,由于存在较多的似道路区域且区域内点云的反

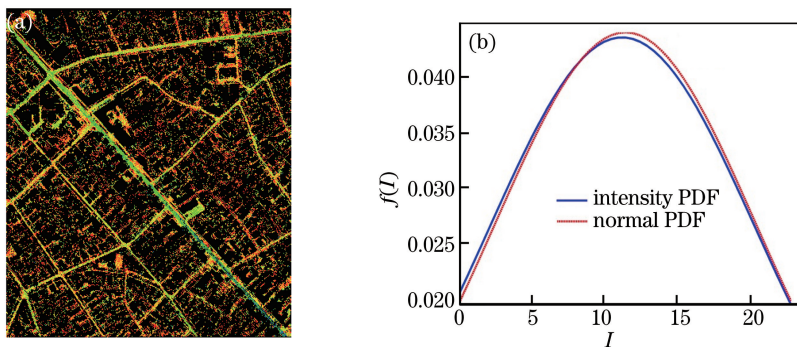


图 5 (a)道路点云提取结果及(b)对应的 PDF 曲线

Fig. 5 (a) Road point cloud extraction result and (b) corresponding PDF curves

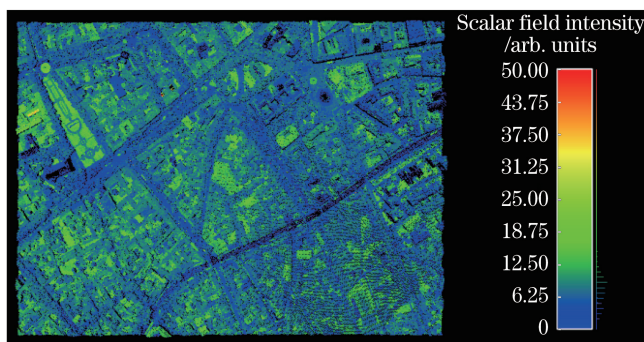


图 6 样本 2 点云高程渲染示意图

Fig. 6 Point cloud elevation rendering sketch map of sample 2

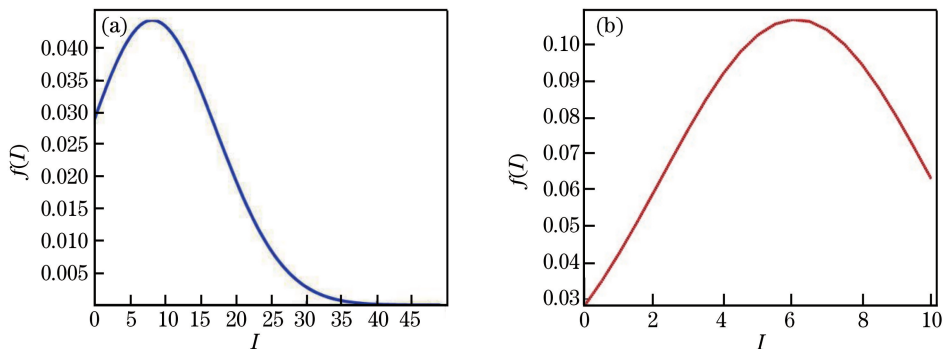


图 7 道路点云提取前后的 PDF 曲线。(a)道路点云提取前的 PDF 曲线;(b)道路点云提取后的 PDF 曲线

Fig. 7 PDF curves of road point cloud before and after extraction.

(a) PDF curve before road point cloud extraction; (b) PDF curve after road point cloud extraction

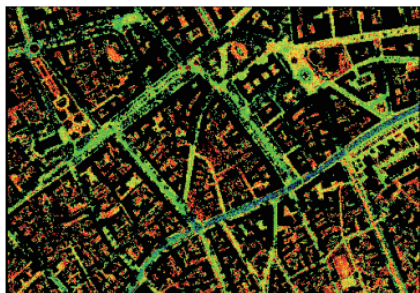


图 8 样本 2 道路点云提取结果

Fig. 8 Road point cloud extraction result of sample 2

射强度值变化幅度较小,此时采用所提算法并不能获得良好的道路点云提取结果。一般而言,地面点云强度数据的变化幅度范围越大,本文所提算法计算出的道路强度阈值越准确。

5 结 论

反射强度数据是机载 LiDAR 系统所获取数据的重要组成部分,合理有效地利用反射强度信息将有利于更精确地进行点云分类。为了能准确获取道路点云的反射强度阈值,进而获取纯净的道路点云,

本文将偏度统计量引入到反射强度数据处理中。通过对 Bartels 等提出的两个假设进行改进,以使其适用于道路点云强度数据分析,并以此为基础提出基于偏度平衡算法的道路点云反射强度阈值确定方法。经实验表明,此算法在城市区域能够自动、准确、有效地对道路点云进行获取。但该方法仍然有一定的局限性,比如在部分城市区域,道路材质与周围地物材质相近时,所提算法较难准确地获取道路点云,如何更好地解决此类问题将是接下来进一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Hui Z Y, Hu Y J. Review on morphological filtering algorithms based on LiDAR digital elevation model construction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080001.
惠振阳, 胡友健. 基于 LiDAR 数字高程模型构建的数学形态学滤波方法综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080001.
- [3] Cheng X J, Cheng X L, Hu M J, *et al.* Buildings detection and contour extraction by fusion of aerial images and LIDAR point cloud [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0514002.
程效军, 程小龙, 胡敏捷, 等. 融合航空影像和 LIDAR 点云的建筑物探测及轮廓提取 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0514002.
- [4] Zhao Z Z, Zhang Y J. Building extraction from airborne laser point cloud using NDVI constrained watershed algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1028002.
赵宗泽, 张永军. 基于植被指数限制分水岭算法的机载激光点云建筑物提取 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1028002.
- [5] Lin X G, Zhang J X. 3D power line reconstruction from airborne LiDAR point cloud of overhead electric power transmission corridors [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 347-353.
林祥国, 张继贤. 架空输电线路机载激光雷达点云电力线三维重建 [J]. *测绘学报*, 2016, 45(3): 347-353.
- [6] Chen C, Mai X M, Song S, *et al.* Automatic power lines extraction method from airborne LiDAR point cloud [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(12): 1600-1605.
陈驰, 麦晓明, 宋爽, 等. 机载激光点云数据中电力线自动提取方法 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(12): 1600-1605.
- [7] Liu J N, Zhang X H. Classification of laser scanning altimetry data using laser intensity [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(3): 189-193.
刘经南, 张小红. 利用激光强度信息分类激光扫描测高数据 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2005, 30(3): 189-193.
- [8] Zhang X H. Theory and methods of technology for airborne LiDAR measurements [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007.
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.
- [9] Lang M W, Mccarty G W. Lidar intensity for improved detection of inundation below the forest canopy [J]. *Wetlands*, 2009, 29(4): 1166-1178.
- [10] Ohashi M. A study on tree species classification by using LIDAR intensity [C]. *Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan*, 2011: 879-880.
- [11] Minh N Q, Hien L P. Land cover classification using LiDAR intensity data and neural network [J]. *Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, 2011, 29(4): 429-438.
- [12] Xu J Z, Wan Y C, Lai Z L. Multi-scale method for extracting road centerlines from LIDAR datasets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1099-1103.
徐景中, 万幼川, 赖祖龙. 机载激光雷达数据中道路中线的多尺度提取方法 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 1099-1103.
- [13] Choi Y W, Jang Y W, Lee H J, *et al.* Three-dimensional LiDAR data classifying to extract road point in urban area [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 725-729.
- [14] Clode S, Rottensteiner F, Kootsookos P, *et al.* Detection and vectorization of roads from lidar data [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007, 73(5): 517-535.
- [15] Dong B G, Qin Z Y, Chen J, *et al.* Threshold-free method for airborne LiDAR point clouds data filtering [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013,

49(15): 219-223.

董保根, 秦志远, 陈静, 等. 无需阈值支持的机载 LiDAR 点云数据滤波方法 [J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(15): 219-223.

- [16] Bartels M, Wei H, Mason D C. DTM generation from LIDAR data using skewness balancing [C]. Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition, 2006: 566-569.
- [17] Bartels M, Wei H. Threshold-free object and ground point separation in LIDAR data [J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(10): 1089-1099.

[18] Duda R O, Hart P E, Stork D G. Pattern classification[M]. New Jersey: Wiley, 1973.

[19] Hui Z Y, Hu Y J, Yeveyo Y Z, *et al.* An improved morphological algorithm for filtering airborne LiDAR point cloud based on multi-level kriging interpolation [J]. Remote Sensing, 2016, 8: 35-50.

[20] Hui Z Y, Hu Y J, Jin S G, *et al.* Road centerline extraction from airborne LiDAR point cloud based on hierarchical fusion and optimization [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 118: 22-36.