

# 建立包裹圆提取建筑物 LiDAR 点云边缘点的算法

聂玉泽, 程英蕾, 何曼芸

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

**摘要** 机载激光雷达(LiDAR)数据是离散的三维点云,同一个建筑面的三维激光脚点具有随机分布的特性,并且由于建筑本身形状的多样性和复杂性,以及建筑物周围环境的复杂性,导致从 LiDAR 数据提取建筑物轮廓线变得更加困难。提取建筑物的轮廓线,最关键的就是提取 LiDAR 数据中建筑物的边缘点。文中提出一种改进的提取 LiDAR 点云数据边缘点方法:设定具体的半径和阈值,把 LiDAR 点云数据中存储的每个点作为圆心建立包裹圆,求得点云数据中其他点到该点的距离,并统计落在包裹圆内点的个数,通过每个包裹圆内点的个数跟设定的阈值进行比较,从而确定该点是否为边缘点。通过仿真发现,文中算法与 alpha shape 算法相比,在保持边缘点提取效果的基础上,极大减少了运行时间,总体效率有了显著地提高。

**关键词** 机载激光雷达;包裹圆;边缘点

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.012

**中图分类号** TP23 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)03-0063-05

## An Algorithm of Building Pack Circle to Extract LiDAR Edge Point

NIE Yuze, CHENG Yinglei, HE Manyun

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The data of Light Detection And Ranging(LiDAR) is a discrete three-dimensional point cloud, and the 3D laser foot points belonging to the same building have the characteristics of random distribution. Owing to the varied shapes of building, and the complex environments around building, the extraction of building borderlines becomes more difficult. In extracting borderline, the most important is to extract the edge point. In the paper, a new algorithm of extracting the edge point is presented. Firstly, a specific radius and threshold are set. Secondly, taking the first point as the centre of a circle, a pack circle is built. Thirdly, the distances between the centre and other points are acquired, and the number in the pack circle is counted. And then, the operation throughout all point in the point cloud is done repeatedly. Finally, the point number in every pack circle is compared with threshold to extract the edge point. Compared to the alpha shape algorithm, this algorithm can reduce the running time on the basis of keeping the extraction effect of edge point, and can improve the overall effect obviously.

**Key words:** LiDAR; pack circle; edge point

**收稿日期:** 2015-10-20

**基金项目:** 陕西省自然科学基金(2015JM6346)

**作者简介:** 聂玉泽(1991—),男,山东潍坊人,硕士生,主要从事机载 LiDAR 点云处理研究.E-mail:515160842@qq.com

**引用格式:** 聂玉泽,程英蕾,何曼芸. 建立包裹圆提取建筑物 LiDAR 点云边缘点的算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(3):63-67. NIE Yuze, CHENG Yinglei, HE Manyun. An Algorithm of Building Pack Circle to Extract LiDAR Edge Point[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(3): 63-67.

机载激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)是以飞机为探测平台的利用激光扫描仪、全球定位系统、惯性导航系统的能够快速高效地获取地表及地物目标三维空间信息的主动探测技术<sup>[1-4]</sup>。LiDAR技术具有效率高、获取信息丰富、全天候的特点,这也是GPS技术之后测绘界的又一项革命性技术。

基于LiDAR数据进行建筑物的提取与重建一直是LiDAR数据处理研究中的重点与难点。在三维重构中,作为城市制图和建立三维建筑模型的基础,建筑物轮廓线的提取是非常重要的。对于简单、规则的房屋例如大多数平顶建筑来说,得到了轮廓线并赋予其高程信息就可得到建筑物的三维模型。对于二维的数字图像来说,现有的边缘提取技术已经比较成熟了。但是,LiDAR原始数据是离散的三维点云,同一个建筑面的三维激光脚点具有随机分布的特性,没有明确的轮廓线,并且由于建筑本身形状的多样性和复杂性,以及建筑物周围环境的复杂性,导致从LiDAR数据提取建筑物轮廓线变得非常困难。而提取建筑物轮廓线,关键就是将LiDAR数据中建筑物的边缘点提取出来。大部分研究都是利用其它图像融合来进行建筑物边界的提取<sup>[5-7]</sup>,对经过滤波<sup>[8-10]</sup>和地物点分割过的单纯的LiDAR建筑物点云数据的边缘点的提取,现有的算法有alpha shape算法,多边形拟合算法<sup>[11]</sup>等,尤建红<sup>[12]</sup>等对激光点进行2次内插加密生成DSM影像数据利用了图像处理方法进行边界提取,文献<sup>[13~15]</sup>建立Delaunay三角网利用建筑物主方向提取建筑物屋顶边界,曾齐红<sup>[16]</sup>等人提出的利用不规则三角网的三角边提取轮廓线的方法,程亮等人<sup>[17]</sup>利用正射影像提取建筑物边界的方法。不过多边形拟合算法只能求出整体点的凸边,不能将每个单独的建筑物边缘点提取出来,利用三角网提取轮廓线的算法只对单个建筑物形成不规则三角网格后适用,不方便同时对多个建筑物建立三角网。本文主要对alpha shape这一经典算法进行分析,并针对其运算速度慢的缺点提出了利用包裹圆提取边缘点的算法。

## 1 LiDAR点云数据建筑物轮廓线提取

对于LiDAR点云数据,提取建筑物的轮廓线,首先要将建筑物点从数据库中提取出来,提取出来的建筑物点以X坐标和Y坐标显示(即三视图中的俯视图),然后利用边缘点提取算法对建筑物的边缘点进行提取,最后将提取出来的边缘点进行拟合,形成建筑物的轮廓线。

LiDAR点云数据提取轮廓线比较经典的是alpha shape算法。算法思想如下:假设有1个点云数据集S,并且外部有1个半径为 $\alpha$ 的圆沿着S在滚动,则点云S的边缘点将被点云S和半径 $\alpha$ 唯一确定。当 $\alpha$ 足够大时,这个圆将在点云的外围滚动,当 $\alpha$ 小时,将落到点云的内部,见图1。

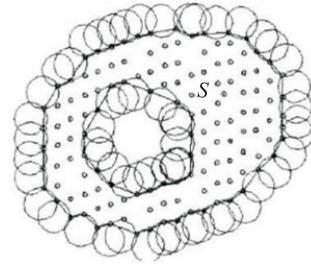


图1 alpha shape算法提取轮廓线示意图

Fig.1 The diagram of alpha shape algorithm

沈蔚<sup>[18]</sup>等通过以下方法实现alpha shape算法:先设定好半径 $\alpha$ 的大小,在点云S里任意选取2点,当2点距离小于2倍的 $\alpha$ 时,则这2点达到了共圆的条件;以这2点共圆,半径为 $\alpha$ ,求得圆心的位置;由于是利用2点及半径,求得的结果有2个,其中一个圆心是内部圆,另一个是外部圆,这个外部圆就是要求得的滚动圆;然后求其它点到滚动圆圆心的距离 $d$ ,当 $d < \alpha$ 时,则点落在了圆内部,当 $d > \alpha$ 时,点落在圆的外部,并统计落在滚动圆内部点的个数,当没有点落在圆内部的时候这2个点为点云S的边缘点,对LiDAR点云数据中每2个点都进行以上运算,将得到离散点的边缘点。

alpha shape算法具体实现步骤:

**步骤1** 设定一个滚动圆的半径 $\alpha$ 。

**步骤2** 选取LiDAR点云库S内任意2点,并求出它们的距离 $d$ 。

**步骤3** 用距离 $d$ 与滚动圆的直径 $2\alpha$ 比较,若大于直径,则回到**步骤2**,继续选取另外2个点,若小于直径,则进行**步骤4**。

**步骤4** 以这2点为圆上点,半径 $\alpha$ 做圆,求出圆心。

**步骤5** 求点云库S内各点与圆心的距离,统计落到滚动圆内部点的个数。

**步骤6** 判断这2点是否为边缘点,若没有点落到滚动圆内部,则这2个点为边缘点,若有点落到滚动圆内部,则这点不是边缘点。

**步骤7** 循环**步骤2**运算,直到将数据集中的2点组合遍历完。

alpha shape算法的优点是能够很好地实现对内边缘和外边缘的提取,并且可以通过调整圆半径 $\alpha$ 的大小,调整获取的轮廓线的精细程度,当 $\alpha$ 足够

大, alpha shape 算法将提取出点集合的凸包, 当半径略小(但大于平均点距)时, alpha shape 算法能够很好地将点集合的边缘点细节都提取出来。但是由于 alpha shape 算法要先利用 2 个点建立滚动圆, 导致 alpha shape 算法计算量巨大, 算法复杂度较高, 运算速度比较慢。

## 2 改进算法

### 2.1 改进算法原理

针对 alpha shape 算法运算速度慢的缺点, 本文提出一种建立包裹圆的改进方法求 LiDAR 点云数据库的边缘点。

建立包裹圆的算法是通过设定一个半径  $r$ , 以 LiDAR 点云数据集内每个点为圆心做圆(称作包裹圆), 并统计落在包裹圆内的点的个数。由于已经对点云数据集进行了地形滤波以及建筑物的提取, 以矩形为例, 在边缘部分以边缘点为圆心形成包裹圆, 包裹圆内圆心角有  $180^\circ$  范围内没有点的存在; 而在直角拐角部分以拐点为圆心建立包裹圆, 包裹圆内圆心角有  $270^\circ$  范围内没有点的存在。因此, 根据包裹圆内点的个数的多少, 可以将边缘点与内部点分离开。如图 2 所示, 以 1.5 倍点距作为包裹圆的半径, 理论上以角点为圆心的包裹圆将包裹进 4 个点, 以边缘点为圆心的包裹圆将包裹进 6 个点, 以内部点为圆心的包裹圆将包裹进 9 个点。在 LiDAR 点云数据中, 因为经过了滤波处理, 点的分布相对均匀, 所以利用包裹圆的算法在理论上是可行的, 利用落在包裹圆内部点的个数不同这一特征, 可以将边缘点提取出来。

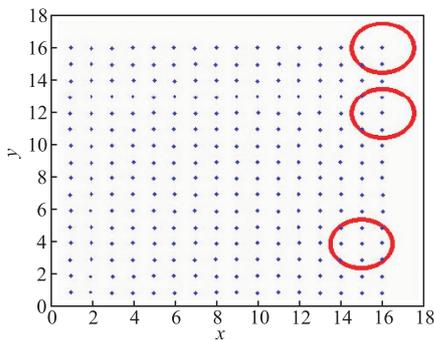


图 2 包裹圆算法仿真示意图

Fig.2 The diagram of pack circle algorithm  
算法具体流程见图 3。

与 alpha shape 算法不同的是, alpha shape 算法是以点云数据集中 2 个点做滚动圆, 而包裹圆的算法是以 1 个点做包裹圆, 减少了算法对数据的使用次数, 很大程度上减小了对数据处理的次数, 在对数据的循环使用次数上减少了一个幂级。另外, al-

pha shape 算法需要滚动圆的圆心, 而包裹圆算法不需要包裹圆的圆心, 在算法步骤上得到了很大地简化, 提高了算法的效率。

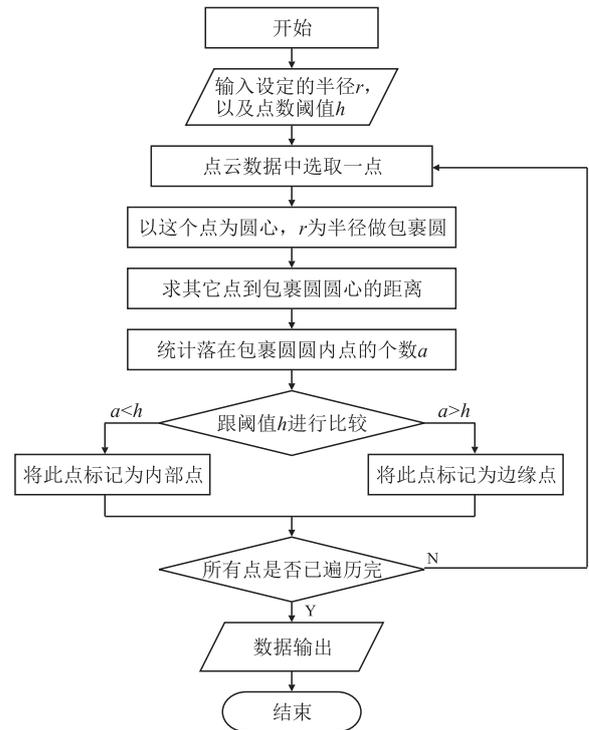


图 3 包裹圆算法流程图

Fig.3 The flow chart of pack circle algorithm

### 2.2 时间复杂度分析:

alpha shape 算法主要步骤的时间复杂度分析: 设 LiDAR 点云数据集内有  $n$  个点, 对于算法的时间复杂度, 算法的步骤 1 可以直接忽略。

步骤 2 取点云库内的 2 点, 因为要遍历点云库中任意 2 点, 总数为  $c_n^2$ , 则时间复杂度为  $O(n^2)$ ;

步骤 3 时间复杂度为 2;

步骤 4 求滚动圆的圆心, 时间复杂度为  $O(a)$ ;

步骤 5 求点与圆心的距离, 时间复杂度为  $O(n)$ ;

步骤 6 对每 2 个点形成的滚动圆进行判断, 时间复杂度为  $O(n)$ 。

由于步骤 3 到步骤 6 都是嵌套在步骤 2 里面的, 而步骤 6 跟前面的是串行关系, 所以 alpha shape 算法总的时间复杂度为  $O(2an^3)$ 。

包裹圆算法时间复杂度分析:

步骤 2 要将点云库中的点遍历, 时间复杂度为  $O(n)$ ;

步骤 3 求距离时要将点云库中每一个点计算一遍, 时间复杂度为  $O(n)$ ;

步骤 4 将每一个点都跟阈值进行比较, 时间复杂度为  $O(n)$ 。

步骤3与步骤4是嵌套在步骤2里面的,同时步骤3与步骤4是串行关系,所以包裹圆算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

对 alpha shape 算法和包裹圆算法进行比较,由于 alpha shape 算法是要同时利用点云集里面的2个点,而包裹圆算法一次只利用1个点;另外, alpha shape 算法还要对2个点求圆心,而包裹圆算法不用再对圆心求解,从而大大降低了计算上的时间复杂度,能够很好地提高算法的运行效率。alpha shape 算法时间复杂度为 $O(2an^3)$ ,而包裹圆算法时间复杂度为 $O(n^2)$ ,极大地提高了边缘点的提取速度。

### 3 算法仿真结果分析

本文以 Matlab 为仿真平台,以实际 LiDAR 量测数据为实验数据。由于实验中使用的是点密度 1 point/m<sup>2</sup>左右的点云数据,对于 alpha shape 算法,实验采用 2 m 作为滚动圆的直径,实验效果见图 4,为了更清晰地展示实验效果,图 5 为实验效果的局部放大图。

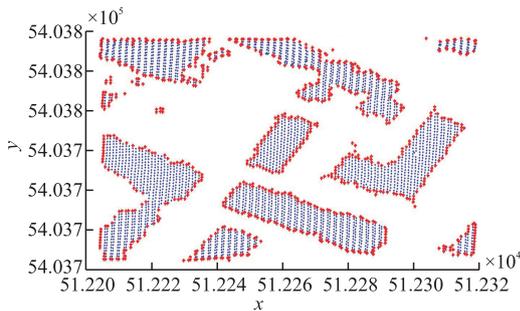


图4 alpha shape 算法实验效果图

Fig.4 The result of alpha shape algorithm

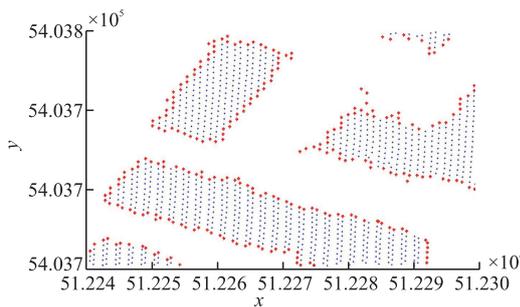


图5 alpha shape 算法实验效果图(局部放大)

Fig.5 The result of alpha shape algorithm(partical enlarge)

由于实验中使用的是点密度 1 point/m<sup>2</sup>左右的点云数据,考虑到实际 LiDAR 扫描到的建筑物种类的不规则性以及复杂性,以及实验数据横向纵向平均点距不同等因素,实验中将 2.5 m 作为包裹圆的半径,以 9 作为区分边缘点的阈值。实验效果见图 6,其中蓝色点为内部点,红色点为边缘点。图 7 为图 6 的局部放大图。

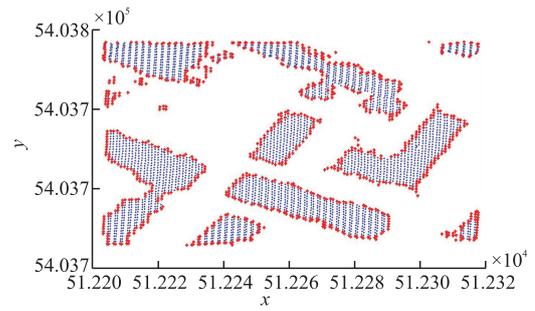


图6 包裹圆算法实验效果

Fig.6 The result of pack circle algorithm

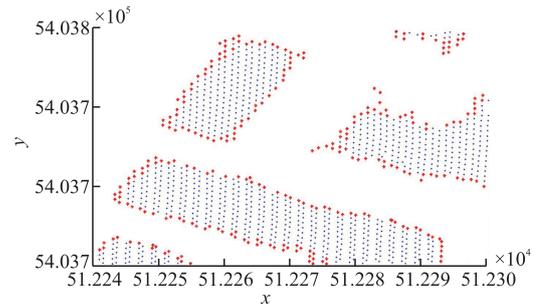


图7 包裹圆算法实验效果(局部放大)

Fig.7 The result of pack circle algorithm(partical enlarge)

实验结果显示,利用包裹圆算法能够很好地将 LiDAR 数据的边缘点检测出来,与 alpha shape 算法检测效果相当,而在运算速度上比 alpha shape 算法提升了一个幂级。本文在相同环境下分别用包裹圆算法和 alpha shape 算法对相同的数据进行处理,在边缘点检测效果一致的情况下,包裹圆算法处理数据耗费时间大幅度降低,边缘点的检测速度明显提高。具体耗时见表 1。

表1 alpha shape 算法和包裹圆算法耗时比较

Tab.1 Comparing the time of alpha shape with pack circle algorithm

| 点数/个   | alpha shape 算法耗时/s | 包裹圆算法耗时/s |
|--------|--------------------|-----------|
| 100    | 0.230 000          | 0.027 5   |
| 600    | 9.571 254          | 0.031 4   |
| 1 000  | 25.735 486         | 0.041 4   |
| 2 000  | 102.463 812        | 0.064 6   |
| 3 000  | 271.112 137        | 0.109 4   |
| 10 000 | 3 160.617 681      | 0.901 3   |

由表中数据可以看出,随着处理点的个数的增加,包裹圆算法耗时缓慢上升,而 alpha shape 算法随着处理点的个数的增加,耗时呈指数速度增加,处理点的个数越多,2 种算法耗时差距越大,见图 8,其中红线为 alpha shape 算法,蓝线为包裹圆算法。

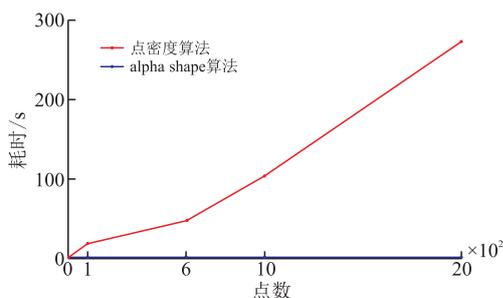


图8 包裹圆算法与 alpha shape 算法耗时比较

Fig.8 Time of alpha shape and pack circle algorithm

## 4 结语

本文针对 LiDAR 点云数据经典的边缘点检测 alpha shape 算法进行了分析,找到了限制算法运算效率的关键步骤:利用 2 点求滚动圆的位置。针对这一问题,本文提出建立包裹圆,利用包裹圆包裹点数不同的方法,改进利用 2 点做滚动圆为利用一点做包裹圆。通过仿真检验此算法效果,实验表明,在相同环境下,处理相同的点,利用包裹圆的算法处理速度明显快于 alpha shape 算法。不过,此算法的应用是在经过滤波之后,并且建筑物点云的获取分布较为均匀时使用,当点的密度分布不均匀时,包裹圆算法将受到限制。

### 参考文献 (References):

- [1] BRENINER C. Building Reconstruction from Images and Laser Scanning[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005, 6(3-4): 187-198.
- [2] SAMPATH A, SHAN J. Segmentation and Reconstruction of Polyhedral Building Roofs from Aerial LiDAR Point Clouds [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3): 1554-1567.
- [3] CHEN L, TEO T, KUO C, et al. Shaping Polyhedral Buildings by the Fusion of Vector Maps and LiDAR Point Clouds[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2008, 74(9): 1147-1157.
- [4] ELBERINK S, VOSSERMEN G. Quality Analysis on 3D Building Models Reconstructed from Airborne Laser Scanning Data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(2): 157-165.
- [5] ROTTENSTEINER F. Automatic Generation of Gugg-Qyakuty Building Models from LiDAR Data[J]. IEEE Computer Graphics & Application, 2003, 23(6): 42-50.
- [6] HUBER M, SCHICKIER W, HINZ S, et al. Fusion of LiDAR Data and Aerial Imagery for Automatic Reconstruction of Building Surface[C]//Workshop on Remote Sensing & Data Fusion over Urban Areas. Berlin, Germany: IEEE, 2003: 82-86.
- [7] SOHN G, DOWMAN I. Building Extraction Using LiDAR DEMs and IKONOS Images[C]//Processing of the ISPRS Working Group III 3 Workshop, 2003.
- [8] 屈亚运,程英蕾,邱浪波.改进的八邻域搜索提取建筑物特征方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):66-69. QU Yayun, CHENG Yinglei, QIU Langbo. An Improved Method of Extracting 3D Features of Building Based on Eight

- Neighborhood Search Method[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 66-69. (in Chinese)
- [9] 魏征,董震,李清泉,等.车载 LiDAR 点云中建筑物立面位置边界的自动提取[J].武汉大学学报:信息科学版,2012,37(11):1311-1315. WEI Zheng, DONG Zhen, LI Qingquan, et al. Automated Extraction of Building Façade Footprints from Mobile LiDAR Point Clouds[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(11): 1311-1315. (in Chinese)
- [10] 赵慧珍,程英蕾,屈亚运.基于最小二乘法的激光雷达数据滤波方法[J].科学技术与工程,2014,14(33):234-239. ZHAO Huizhen, CHENG Yinglei, QU Yayun. A Filtering Algorithm of Airborne LiDAR Points Cloud Based on Least Square[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(33): 234-239. (in Chinese)
- [11] RAFAEL C Gonzalez, RICHARD E Woods. Digital Image Processing[M]. Third Edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2007.
- [12] 尤红建,苏林,李树楷.利用机载三维成像仪的 DSM 数据自动提取建筑物[J].武汉大学学报:信息科学版,2002,27(4):408-413. YOU Hongjian, SU Lin, LI Shukai. Automatic Extraction of Building from DSM acquired by Airborne Three-Dimensional Imager[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(4): 408-413. (in Chinese)
- [13] VOSSERMAN G. Building Reconstruction Using Planar Faces in High Density Height Data[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 32(3/2): 87-92.
- [14] HOFMANN A D. Analysis of TIN-Structure Parameter Spaces in Airborne Laser Scanner Data for 3D Building Model Generation[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 35(B3): 302-307.
- [15] MORGAN M, HABIB A. 3D TIN for Automatic Building Extraction from airborne Laser Scanning Data[C]//Proceeding of the ASPRS, 2001.
- [16] 曾齐红,毛建华,李先华,等.建筑物 LiDAR 点云的屋顶边界提取[J].武汉大学学报:信息科学版,2009,34(5):383-386. ZENG Qihong, MAO Jianhua, LI Xianhua, et al. Building Roof Boundary Extraction from LiDAR Point Cloud[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(5): 383-386. (in Chinese)
- [17] 程亮,李满春,龚健雅,等. LiDAR 数据与正射影像结合的三维屋顶模型重建方法[J].武汉大学学报:信息科学版,2013,38(2):208-211. CHENG Liang, LI Manchun, GONG Jianya, et al. 3D Reconstruction of Building Rooftops from LiDAR Data and Orthophoto[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(2): 208-211. (in Chinese)
- [18] 沈蔚,王林,王崇昌,等.基于 LiDAR 数据的建筑三维重建[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2011,30(3):373-377. SHEN Wei, WANG Lin, WANG Chongchang, et al. Reconstruction of 3D Building Models Based on LiDAR Data[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2011, 30(3): 373-377. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)