

文章编号: 1001-3806(2015)01-0023-05

## 机载激光雷达 3 维建筑物模型重建的研究进展

李 峰<sup>1</sup>, 吴燕雄<sup>1</sup>, 卫爱霞<sup>1</sup>, 刘文龙<sup>2</sup>, 米晓楠<sup>3</sup>

(1. 防灾科技学院 防灾工程系, 三河 065201; 2. 北京工业职业技术学院 建筑与测绘学院, 北京 100042; 3. 山西省气候中心, 太原 030002)

**摘要:** 机载激光雷达系统已经成为 3 维建筑物模型快速重建的重要手段。综述了国内外利用机载激光雷达点云进行 3 维建筑物模型重建的研究方法、进展情况, 分析讨论了模型驱动法、数据驱动法和混合法的特点及关键问题。混合法集成了模型驱动方法和数据驱动方法的优点, 是该项技术今后发展的重点领域。

**关键词:** 激光技术; 机载激光雷达; 重建; 3 维建筑物模型

**中图分类号:** P231; TN958.98 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.01.005

### Review of reconstruction of 3-D building models based on airborne lidar

LI Feng<sup>1</sup>, WU Yanxiong<sup>1</sup>, WEI Aixia<sup>1</sup>, LIU Wenlong<sup>2</sup>, MI Xiaonan<sup>3</sup>

(1. Department of Disaster Prevention Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China; 2. Institute of Architecture and Surveying Mapping, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China; 3. Shanxi Climate Center, Taiyuan 030002, China)

**Abstract:** Airborne lidar is one of the important reconstruction measures of 3-D building models. Research methods and developing progresses of 3-D building reconstruction based on airborne lidar point cloud data were reviewed. The characteristics and key issues of model-driven, data-driven and hybrid algorithms were analyzed and discussed. The hybrid algorithm integrating the merits of both the other methods is the significant developing trend of 3-D building reconstruction.

**Key words:** laser technique; airborne lidar; reconstruction; 3-D building model

### 引 言

城市 3 维(3-D)建筑物模型是数字城市的主要组分, 是 3-D 地理信息系统应用实现的前提。3-D 建筑物模型被广泛应用到城市规划、3-D 房地产管理、灾害模拟、汽车导航、电脑游戏等领域<sup>[1-2]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来, 机载激光雷达系统可用来高效地采集城市表面的精确几何信息, 获取的城市点云可达数十亿个点。这些海量的高密度点云数据中常包含城市的重要特征(屋顶面)和各类细节(地面、植被、汽车等)。相比摄影测量的方法, 利用机载激光雷达点云生成数字表面模型提取 3-D 建筑物的技术变得更加容易。另外, 从航空影像、地图或激

光点云数据中, 手动或半自动地捕捉大量高复杂度的建筑物中 3-D 信息的成本很高<sup>[3-5]</sup>。因而, 全自动生成城市 3-D 模型已成为摄影测量和地理信息系统用户以及普通客户的迫切需求。城市模型除了自动化生成外, 还需要移除不必要的特征而保留重要的特征要素, 建模方法应以尽量少的时间和空间来创建大范围的城市级别的城市 3-D 模型, 这样才能满足人们实时查询和分析的需求。

建筑物的屋顶面几乎是航空和航天遥感数据的唯一可视面。因此, 建筑物的 3-D 模型构建算法都是先提取屋顶的几何图形, 然后再加入墙体扩展形成完整的 3-D 建筑物模型。绝大多数城市 3-D 模型由简约美观的建筑物模型、树模型和地面模型, 甚至高分辨率的航空或卫星影像组成。3-D 建筑物模型可利用不同的方法来实现, 所用的模型都与细节层次(level of detail, LOD)问题相关。3-D 特别工作组发布了 5 种 LOD 的标准定义, 其中, LOD0 表示 2.5 维的数字地面模型, LOD1 表示无屋顶的简单块模型, LOD2 表示包含屋顶的粗模型, LOD3 表示包括

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(ZY20140211)

作者简介: 李 峰(1979-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为机载激光点云处理、遥感。

E-mail: lif1223@aliyun.com

收稿日期: 2014-03-24; 收到修改稿日期: 2014-05-16

建筑细部的细模型, LOD4 表示详细的内部模型<sup>[6]</sup>。根据不同 LOD 的要求, 结果模型涉及简单的块模型到详细外观模型, 也就是数字建筑物模型的生成问题。由于当前数据的限制, 本文中研究提及的模型只能提取到 LOD2 级别。

数字建筑物模型的生成过程可分为建筑物的探测和建筑物模型重建<sup>[7]</sup>两大步。建筑物的探测是从其它数据对象中区分出候选建筑物的过程, 候选建筑物用于描述假设为建筑物位置的数据; 建筑物重建是利用候选建筑物获得如高度、宽度之类的建筑物模型参量。从数据源角度看, 3-D 建筑物重建的方法可分为单一数据源法和多数据源法; 按照处理策略分类, 又可分为数据驱动、模型驱动和混合式方法<sup>[8-11]</sup>。

## 1 单一数据源的 3-D 模型重建

按照使用的数据源, 航空影像是基于传统摄影测量方法获取 3-D 建筑物模型最常用的数据源之一。航空影像若要提供可靠的模型结果, 在匹配处理过程中低自动化程度是其主要的限制, 尤其在遇到遮挡现象时<sup>[12]</sup>, 例如天气或高大城市地物阴影造成的影像质量问题。仅利用航空或航天影像匹配技术生成数字表面模型(数字表面模型)来提取建筑物的几何属性的 3-D 重建方法在建筑物自动提取和同名特征识别方面遭遇了极大的挑战。部分或完全的遮挡现象是城市影像最常见的问题。从而, 大多数的方法多依赖于半自动的方式, 即识别和解译工作由操作员来完成。而机载激光雷达系统可直接采集高密度地形点的 3-D 坐标, 省去了复杂的影像匹配过程, 在快速数字表面模型构建和建筑物识别上具有优势, 但激光雷达点云的位置属性失去了地形表面的语义信息, 且提取的建筑物边界准确度在很大程度上受到了激光雷达点云密度的制约<sup>[13]</sup>。由于单一数据源的缺陷, 多数研究人员认为多源数据可使影像和点云的优势得到互补<sup>[14-17]</sup>, 利用较高的航空影像平面精度和激光雷达点云的垂直精度, 融合高分辨率的影像和高密度点云, 可有效提高建筑物模型的重建质量。但是, 自动配准这两种不同的数据源在配准基元特征识别、配准变换模型以及影像分辨率与激光雷达点云密度尺度度量关系确立方面存在着困难<sup>[18-19]</sup>。

## 2 数据驱动的 3-D 模型重建

在建筑物重建处理策略方面, 最常用的方法是

数据驱动和模型驱动。这两种方法的不同之处在于相关建筑物的多少信息量被处理。数据驱动的方法, 又称为自下向上的处理, 并不假定建筑物的形状而直接对数据进行处理, 通过分析建筑物点云数据的特征, 唯一地确定建筑物形状。一般需要通过获取建筑物各个屋顶的面片、建立起拓扑关系, 然后通过面片相交获得屋脊线, 最后将建筑物进行重建。HENRICSSON 和 BALTSAVIAS(1997 年)利用航空影像提出了一种数据驱动方法: 从影像中手动探测感兴趣的区域, 经过影像匹配得到的 2-D 线段来提取 3-D 线段, 以共面约束和色彩信息重建多面体模型<sup>[20]</sup>。这种方法产生了良好的效果, 但不能重建高密度区建筑且为非自动的方法。最通用的数据驱动方法之一是利用激光雷达点云平面屋顶的分割。BRENNER(2000 年)以数字表面模型中的点的法向量提取建筑物区域, 然后用 RANSAC 算法提取平面并剔除伪平面和错误平面, 最后依据面片的邻接关系建立拓扑关系, 实现建筑物的重建<sup>[21]</sup>。ROTTENSTEINER(2003 年)直接从激光雷达点云中自动探测建筑物区域, 使用曲率分割技术检测屋顶, 屋顶分组后再创建多面体模型。在分组过程中, 屋顶轮廓被确定。整个模型的精度通过使用传感器信息、平面和顶点信息进行整体平差<sup>[22]</sup>。VERMA 等人(2006 年)先分割地形点和屋顶, 引入屋顶拓扑图代表复杂屋顶结构的各类面片间的关系, 通过搜索屋顶拓扑子图识别简单的参量屋顶形状, 简单的参量屋顶形状再联合构建复杂的屋顶结构<sup>[23]</sup>。YU 等人(2009 年)认为建筑物的墙面是非连续的, 将建筑物各面分割后, 用平面拟合的方法提取建筑物面和特征点, 从而得到建筑物的 3-D 线框图<sup>[24]</sup>。ZHOU 和 NEUMAN(2008 年)以支持向量机法, 不用高度和反射强度信息, 而是通过几个几何属性分类植被点, 屋顶点以分割平面面片的方式分离, 建筑物的主方向利用轮廓点的切方向统计得到<sup>[25]</sup>。KIM 和 HABIB(2009 年)集成了摄影测量和激光雷达数据重建了复杂的多面体模型<sup>[16]</sup>。SAMPATH 和 SHAN(2010 年)基于分割的方式在激光雷达数据上重建了多面体建筑物屋顶, 提取出建筑物轮廓后, 以平行和垂直线对等拓扑约束方式规则化边界<sup>[26]</sup>。激光雷达数据被用来生成候选建筑物及其初始轮廓, 接着利用这些轮廓线, 立体像对用来提取直线段。像其它数据驱动方法一样, 为了得到更准确的建筑物外形, 提取的直线段集成到带约束的匹配处理中<sup>[16]</sup>。理论

上讲,使用数据驱动的方法可以重建任意形状的建筑模型,但是,这种方法并不能完全解决模型生成过程中如何强制约束线垂直和平行的问题。图 1 中展示了一种利用数据驱动法重建 3-D 模型的实例:从原始点云中探测植被点云,实现建筑物点云和植被点云的分离,分割建筑物屋顶点云为不同的面片,提取每个面片的规则轮廓线并确立面片之间的拓扑关系,从而构建出 3-D 建筑物模型。

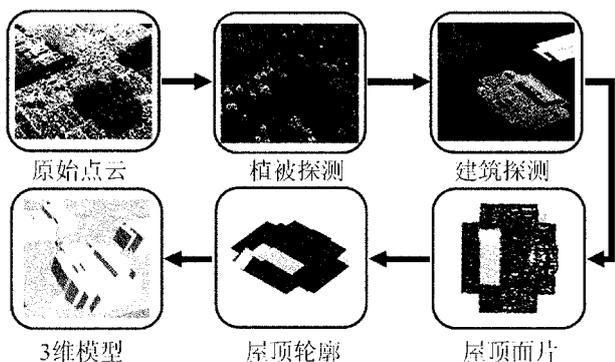


图 1 一种数据驱动的 3-D 模型重建流程

### 3 模型驱动的 3-D 模型重建

由于实现数据驱动方法的复杂性,模型驱动的方法(自上而下的过程)引起了研究人员的注意。模型驱动的方法采用与数据驱动相反的策略,需提前为模型库假定和预定义模型体元(如图 2 所示),并根据现有数据更新它们。对点云数据进行处理后,与建立的建筑物模型库进行匹配,将匹配结果最好的模型体元作为实际建筑物形状进行重建。由于模型体元本身已经包含了建筑物的平行、垂直等拓扑信息,所以模型驱动法重建的建筑物模型规则化程度较高,在数据获取过程中由局部遮挡引起的部分建筑信息损失也能得到很好的弥补。这里的 3-D 建筑物模型一般通过构造实体几何模型来描述。在构造实体几何模型中,不同模型体元通过逻辑运算符组合成复杂的曲面或者模型。

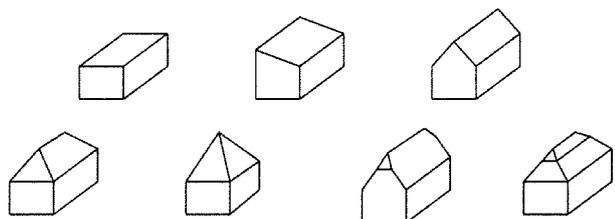


图 2 模型库中预定义的基本模型体元

模型驱动法常用半自动方式和影像来实施,当模型到影像拟合自动解决时,目标模型的选择和模

型到影像的初始校准由人工完成。各种模型驱动方法可以通过采用模型的类别与重建策略来区分。VOSELMAN 和 VELDHUIS(1999 年)提出了一种使用构造实体几何模型半自动模型驱动法,模型的选择和近似校准由人工执行,与影像的精确校准以灰度值梯度自动拟合法完成<sup>[27]</sup>。TSENG 和 WANG(2003 年)建立了一种使用影像更实际的模型驱动法,主要解决两个关键问题:建立一系列代表模型和开发以影像调整模型的算法;模型由人工选择并定位,最小二乘模型-影像拟合算法用于调整模型位置和形状参量,模型重建结果表现出了较高的水平精度,但因为所用立体影像的较小基高比导致垂直精度较低,并且建筑物底部边缘模糊会造成拟合结果较差<sup>[28]</sup>。TEO 等(2008 年)从激光雷达点云中提取内部结构线,基于这些结构线,复杂建筑物被分成几个体元,再通过体元模型匹配来重建建筑物的模型<sup>[29]</sup>。KADA 和 MCKINLEY(2009 年)将复杂建筑物的重建被减少到基本体元的构建,然后再整合到一起,因此,复杂建筑物需被分解成基本的屋顶形状<sup>[30]</sup>。LAFARGE 等人(2010 年)认为建筑物是来自于 3-D 参量模型库中简单结构的装配,首先以自动或交互式的方式提取 2-D 支撑结构,然后以吉布斯模型将 3-D 模型单元安放在 2-D 支撑结构上,通过马尔可夫链蒙特卡尔取样器进行贝叶斯推理以获取最优的模型单元和参量估计模型<sup>[31]</sup>。构造实体几何模型法重建的建筑物模型需具备完整的模型库,否则无法正确重建;正确分解后的复杂建筑物,重建后要与其实际形状相同;对城市全部建筑物分解,并与模型库匹配,过程缓慢、效率较低。

### 4 混合驱动的 3-D 模型重建

模型驱动的方法可依据 LOD 的要求构建复杂的 3-D 模型,模型体元的选择及其近似校准都离不开人工交互。因此,数据驱动和模型驱动的混合方法遵循假设检验的方式<sup>[32]</sup>。FAIG 和 WIDMER(2000 年)简要叙述了利用航空影像提取建筑物的混合式方法,这种方法集合了数据驱动法的灵活性和模型驱动法的鲁棒性<sup>[33]</sup>。WANG(2008 年)利用最小外接矩形的模型驱动法重建粗 3-D 模型,经过对模型精度计算后,挑选出大于阈值的建筑物脚点,最后以数据驱动法重建精 3-D 模型<sup>[34]</sup>。KWAK(2013 年)使用数据驱动的方式从激光雷达点云中分割、规则化建筑物,分解屋顶轮廓成图元后,利用

模型-影像匹配技术调整激光雷达图元,最后屋顶形状通过精炼的矩形图元而获得<sup>[35]</sup>。混合驱动式 3-D 重建方法继承了数据驱动法和模型驱动法的优点,既能提高 3-D 建筑物模型的重建精度,又能构建复杂的建筑物模型,是今后激光雷达点云 3-D 建筑物模型重建的重点研究方向之一。但其复杂的处理过程势必会降低程序运行的效率,对城市级 3-D 建筑物模型的快速提取会产生不利影响。

## 5 结 论

综上所述,单一航空影像提取的 3-D 建筑物模型的平面精度较高,轮廓较为准确,但遮挡问题阻碍了自动化提取的发展;只利用激光雷达点云重建 3-D 建筑物的方法不需要影像匹配技术即可获得 3-D 坐标信息,提取的建筑物轮廓质量取决于点云密度的大小;结合激光雷达点云和影像的方法可综合影像的平面精度和点云的高程精度提高建筑物模型的重建精度,但离散的激光雷达点云与影像的精确配准较难实现。从数据处理策略上讲,数据驱动法更注重模型细节的提取,但提取的建筑物轮廓的精度很难保证;模型驱动法由于直接分解建筑物并与模型库进行匹配,可以很好地解决遮挡问题,但遇到大范围数据时,执行效率不高,很难构建复杂建筑物模型;数据和模型驱动混合的方法可以集成二者的优势,但在二者的执行先后顺序及集成方法上仍需要做大量的研究。

当前,利用激光雷达数据提取 LOD1 级建筑物模型的方法已经较为成熟。因完全实现 LOD2 级模型提取精度和效率的有机统一比较困难,所以,研究人员更关注特定数据场景中模型的提取精度,而忽视了模型的提取效率。从前人的研究成果中可知,每种数据源和模型构建方法都有着各自的优缺点,在保持视觉上 3-D 模型的重建精度的条件下,如何充分利用现有的数据源和模型重建方法,完成城市级别 3-D 模型的快速重建将成为今后该领域的研究重点。

## 参 考 文 献

- [1] RAU J Y. A line-based roof model reconstruction algorithm; TIN-merging and reshaping (TMR) [C]//Proceedings of ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Hannover, Germany: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2012: 287-292.
- [2] SUN S. Automatic 3-D building detection and modeling from airborne LiDAR point clouds[D]. New York, USA: Rochester Institute of Technology, 2013:1-2.
- [3] ZHOU Q Y. 3-D urban modeling from city-scale aerial LiDAR data[D]. Los Angeles, USA: University of Southern California, 2012: 7-8.
- [4] HOSSEIN A. From LiDAR point clouds to 3-D building models [D]. Neubiberg, Germany: University of the Federal Armed Forces Munich, 2009: 15-18.
- [5] ZHANG H X. Study on building modeling based on 3-D laser scanning technology[J]. Laser Technology, 2014, 38(3):431-434 (in Chinese).
- [6] GROGER G, KOLBE T H, NAGEL C, *et al.* OGC city geography markup language encoding standard [S]. Westphalia, Germany: Open Geospatial Consortium, 2012: 11-13.
- [7] MA R. Building model reconstruction from LiDAR data and aerial photographs[D]. Columbus, USA: Ohio State University, 2004: 19-22.
- [8] ZHANG X H. Airborne LiDAR measurement technology theory and method [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2012:75-78 (in Chinese).
- [9] ZENG Q H. Airborne LiDAR point cloud data processing and 3-D building reconstruction [D]. Shanghai: Shanghai University, 2009: 10-12 (in Chinese).
- [10] HU W. Research on 3-D building reconstruction from airborne LiDAR data [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012: 6-8 (in Chinese).
- [11] KWAK E, AL-DURGHAM M, HABIB A. Automatic 3-D building model generation from LiDAR and image data using sequential minimum bounding rectangle (MBR) [C]//Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Hannover, Germany: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2012: 285-290.
- [12] BRENNER C. Building reconstruction from images and laser scanning [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005, 6(3/4):187-198.
- [13] WEI Y F, DU Zh Ch, YAO Zh Q. Fast triangulation and local optimization for scan data of laser radar[J]. Laser Technology, 2009, 33(6):642-644 (in Chinese).
- [14] CHEN L C, TEO T A, SHAO Y C, *et al.* Fusion of LiDAR data and optical imagery for building modeling [C]//Proceedings of ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Hannover, Germany: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004:732-737.
- [15] ROTTENSTEINER F, TRINDER J, CLODE S, *et al.* Using the empster-shafer method for the fusion of LiDAR data and multi-spectral images for building detection [J]. Information Fusion, 2005, 6(4):283-300.
- [16] KIM C, HABIB A. Object-Based integration of photogrammetric and LiDAR data for automated generation of complex polyhedral building models [J]. Sensors, 2009, 9(7):5679-5701.
- [17] DEMIR N, BALTSAVIAS E. Automated modeling of 3-D building roofs using image and LiDAR data [C]//Proceedings of ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Hannover, Germany: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2012: 35-40.
- [18] MA H C, YAO C J, WU J W. Registration of LiDAR point

- clouds and high resolution images based on linear features [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(2):136-140, 159(in Chinese).
- [19] ZHANG F, HUANG X F, LI D R. A review of registration of laser scanner data and optical image [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2008(2):7-10(in Chinese).
- [20] HENRICSSON O, BALTSAVIAS E. 3-D building reconstruction with ARUBA; a qualitative and quantitative evaluation [C]//Proceedings of Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images ( II ). Basel, Switzerland: Birkhauser Verlag, 1997:65-76.
- [21] BRENNER C. Towards fully automatic generation of city models [C]//Proceedings of ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Hannover, Germany: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2000:85-92.
- [22] ROTTENSTEINER F. Automatic generation of high-quality building models from LiDAR data [J]. Computer Graphics and Applications, 2003, 23(6):42-50.
- [23] VERMA V, KUMAR R, HSU S. 3-D building detection and modeling from aerial LiDAR data [C]//Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition 2006. New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006:2213-2220.
- [24] YU H X, WU K, AO J F, *et al.* Extraction of building's feature lines based on 3-D laser scanning technology [J]. Laser Technology, 2012, 36(4):553-556(in Chinese).
- [25] ZHOU Q Y, NEUMANN U. Fast and extensible building modeling from airborne LiDAR data [C]//Proceedings of 16th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York, USA: Association for Computing Machinery, 2008:7-14.
- [26] 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.
- [27] VOSSelman G, VELDHUIS H. Mapping by dragging and fitting of wire-frame models [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1999, 65(7):769-776.
- [28] TSENG Y H, WANG S. Semiautomated building extraction based on CSG model-image fitting [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(2):171-180.
- [29] TEO T A. Parametric reconstruction for complex building from LiDAR and vector maps using a divide-and-conquer strategy [C]//Proceedings of ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Hannover, Germany: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2008:133-138.
- [30] KADA M, MCKINLEY L. 3-D building reconstruction from LiDAR based on a cell decomposition approach [C]//Proceedings of the ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Hannover, Germany: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2009:47-52.
- [31] LAFARGE F, DESCOMBES X, ZERUBIA J, *et al.* Structural approach for building reconstruction from a single DSM [J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(1):135-147.
- [32] VOSSelman G, MAAS H G. Airborne and terrestrial laser scanning [M]. Boca Raton, USA: Chemical Rubber Company Press, 2010: 84-86.
- [33] FAIG W, WIDMER T. Automatic building extraction from aerial images [C]//Proceedings of ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Hannover, Germany: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2000:1708-1715.
- [34] WANG R. Research on data filtering and building-footprint detection of airborne LiDAR [D]. Zhengzhou: People's Liberation Army Information Engineering University, 2008: 30-31 (in Chinese).
- [35] KWAK E. Automatic 3-D building model generation by integrating LiDAR and aerial images using a hybrid approach [D]. Calgary, Canada: University of Calgary, 2013: 152-153.