

# 机载激光雷达数据的建筑物三维模型重建

肖 勇<sup>1,2</sup>, 王 成<sup>1</sup>, 习晓环<sup>1</sup>, 王方建<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 机载激光雷达技术可以快速获取建筑物高精度高密度的三维空间信息。文章提出一种建筑物三维模型重建方法, 该方法利用栅格数据使用 RANSAC 算法提取建筑边界上的长线段, 采用规则化策略获取建筑轮廓; 在模型生成阶段, 基于原始点云和屋顶拓扑关系约束, 获取屋顶间的交线和交点, 并结合已得到的建筑边界、屋顶间交线和交点获取三维建筑模型。实验结果表明, 该方法思路清晰、科学可行且适用性强, 提取的建筑边界和模型垂直精度高。

**关键词:** 机载 LiDAR; 三维建筑模型; RANSAC; 边界规则化

【中图分类号】P235

【文献标识码】A

【文章编号】1009-2307(2014)11-0037-05

## 1 引言

三维城市模型已广泛应用于城市规划、环境监测、城市变化检测、应急决策等领域, 建立高精度的数字城市模型显得尤为重要。机载激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)技术集激光测距、高精度姿态控制技术(INS)和动态 GPS 差分定位技术为一体, 可快速、主动、实时获取地物目标高密度的三维空间信息, 已成为当前数字城市三维信息快速获取和数字模型重建的重要技术手段<sup>[1]</sup>。

基于机载 LiDAR 数据的三维建筑模型重建可分为屋顶面片分割、边界规则化和模型生成 3 个步骤<sup>[2]</sup>。其中屋顶面片分割即利用分类算法分离屋顶面片, 通常可由随机采样一致性算法(RANdom SAmple Consensus, RANSAC)<sup>[3-4]</sup>或 Hough 变换<sup>[5]</sup>完成; 边界规则化是提取规则的建筑边界, 而模型生成则是综合利用上述 2 个步骤的结果获取最终的三维建筑模型。目前对于边界规则化和模型生成尚缺乏适用性强且精度高的方法, 因而成为

研究的热点和难点。较多学者<sup>[6-8]</sup>采用常用的图像处理算法, 如利用 canny 算子等边缘检测的方法提取建筑轮廓, 然后结合先验知识获取建筑模型。这种方法易受噪声影响, 且栅格化操作会丢失部分重要信息, 进而影响模型精度。沈蔚等<sup>[9]</sup>提取建筑边界后利用法向量判别屋顶类型, 然后采用相应的规则化策略获取规则建筑边界。但法向量的估算容易受噪声及点云密度影响, 且实际房屋类型复杂, 很难用有限的简单房屋类型表示, 因此最终模型边界精度会受到影响。Zhang, et al<sup>[10]</sup>使用 Douglas-Peucker 算法简化建筑边界进而提取关键点, 然后通过主方向调整边界。曾齐红等<sup>[11]</sup>使用不规则三角网获取建筑边界点, 然后通过相邻线段间的斜率变化寻找关键点, 在此基础上扩展边界得到建筑轮廓。而关键点的估计一般是通过边界上的斜率变化来判断, 因此边界上的一些小凸起或凹陷都会被判断为关键点; 且对于面积较小的房屋, 边界上的点通常很少, 且斜率变化大, 关键点估计方法很难达到简化边界数据的目的。上述规则化算法较依赖于参数设置, 且普适性不强。

本文利用栅格数据特点, 使用参数自适应的 RANSAC 算法和简单规则化策略, 准确获取不同房屋类型、不同面积建筑的边界。同时为提高模型精度和克服栅格化引起的信息损失, 本研究基于建筑原始点云数据, 利用拓扑约束获取屋顶面片间的交线和交点, 最终获取高精度的三维建筑模型。

## 2 基于栅格数据的建筑边界规则化

由于机载 LiDAR 点云在建筑物边缘往往呈现



**作者简介:** 肖勇(1987), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要从事激光雷达数据数据处理与三维建模方面的研究。

E-mail: yxiao@ceode.ac.cn

收稿日期: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41171267); 中科院百人计划专项

通讯作者: 王成 研究员 E-mail: chengwang@ceode.ac.cn

不规则的“之”字形<sup>[12]</sup>，为了获取规则的建筑模型，需要提取建筑边界并加入垂直或平行等约束条件，使边界尽量平行或者垂直，以保证最终模型的合理性和完整性。本文首先对建筑物点云数据重采样获取栅格点云，然后使用  $\alpha$ -shape 和 RANSAC 算法分别提取建筑边界和线段，最后连接这些线段，并调整使其相互平行或者垂直，流程如图 1。

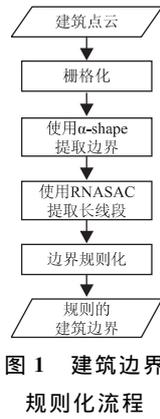


图 1 建筑边界规则化流程

### 2.1 点云栅格化和边界提取

针对单栋建筑物点云，首先进行重采样得到栅格化的点云数据。为了保证边界的精度和完整性，栅格尺寸  $c$  通过公式(1)确定<sup>[13]</sup>：

$$c = \sqrt{1/p} \quad (1)$$

其中  $p$  为点云的平均密度，即每平米的点云数。该尺寸能够保证大部分栅格中都至少包含一个激光点，且栅格后的点云能够较大幅度地保证边缘的正确性。

为了有效提取不同类型房屋的边界，本文采用  $\alpha$ -shape 算法<sup>[2,14]</sup>。该算法对凸多边形和凹多边形的建筑轮廓均适用，而且  $\alpha$  值可以根据点云密度设置。实验表明， $\alpha$  值设为点云平均距离的 2 倍可以取得较好的建筑边界。图 2 是栅格化和使用  $\alpha$ -shape 提取边界点的结果，可以看出  $\alpha$ -shape 算法能够很好地提取建筑边界。

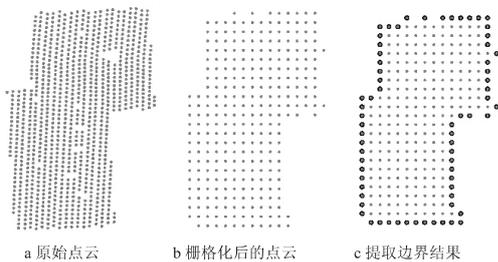


图 2  $\alpha$ -shape 提取边界结果

### 2.2 RANSAC 算法提取长线段

提取建筑边界上的离散点云后，即可利用 RANSAC 算法获取建筑边界上的长线段。该算法首先随机选取两个点，确定一条候选的直线方程  $lc$ ，然后在点集上评估  $lc$  的得分(计算该直线包含的点的个数)。如果得分足够大则认为该候选直线方程有效；否则，舍弃并重新进行随机选点和评估候选直线方程。

RANSAC 算法可以从点集中提取多条数学上正确的直线，但无法保证直线的连通性，以及建

筑边界的正确性，因此在处理过程中加入连通成分分析。



图 3 连通成分分析示意图

如图 3a 所示，图中的直线是 RANSAC 算法检测的结果，但显然不符合实际情况。因此，针对直线上点执行连通成分分析，即根据距离和连通性对直线上的点聚类，提取所含点连续分布的直线，从而得到图 3b。

由于本研究使用的边界是栅格数据，因此可根据栅格大小设置阈值。图 4 是利用 RANSAC 算法 d 的实验结果，可以看出该算法能够正确、有效地提取建筑边界上的长线段，而且能保证结果的惟一性。

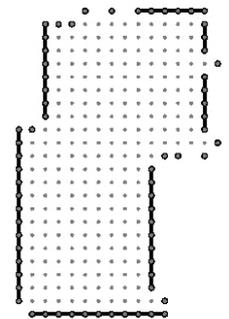


图 4 RANSAC 算法提取线段结果

### 2.3 建筑边界规则化

从图 4 可知，经 RANSAC 算法提取后的长线段往往呈现

不连续和非闭合，为方便后续规则化操作，需要生成闭合的边界。本文采用最小生成树<sup>[15]</sup>算法连接这些线段得到闭合的边界多边形。首先根据 RANSAC 提取得到的线段端点构建无向图，将一条线段的两端点之间的权重设为一个较小值(如 0.01)，而其他端点之间的权重设为其距离，生成该图的最小生成树，进而得到闭合的建筑边界(图 6a)。然后采用规则化策略使建筑边界符合实际情况，尽量相互垂直或平行。由于 RANSAC 提取的线段包含较多的激光点，可信度高，在进行规则化操作时，以这些线段为基础并减少对其方程的调整，因此引入权重系数以区分不同的线段。这些线段端点之间的权重设为 1，新加入的线段权重为 0.5。为减少人为干预，本文采用共线合并和垂直调整两项策略。

共线合并主要是由于 RANSAC 提取的线段不连续，相邻线段之间有可能相互平行，为了使建筑模型尽量简单、合理，可以合并相邻的共线线段，其权重系数设为两条线段权重的平均值。垂直调整是由于 RANSAC 算法往往无法检测出房屋中的凸出部分或较短的线段，因此生成闭合线段时会出现一些权重较小、不尽合理的线段(这些线段的权重在最小生成树的过程中被设为 0.5)。以图 5 中的两种情况(a1 和 b1)为例，需要被调整的线段(短划线线段)的权重为 0.5，且位于两条权重大于 0.5 的线段中间。垂直调整以被调整的线段中

点构建新的线段，然后使用平行线段连接其它权重大于 0.5 的线段。这两种情况经调整后的结果如图 5 中的 a2 和 b2 的虚线所示。

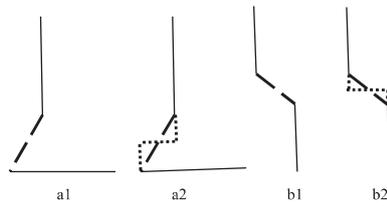


图 5 垂直调整的两种情况

基于上述两种规则化策略，通过调整即可得到规则的建筑边界。该方法无需估计建筑的主方向，因此适用于复杂建筑，且提取的边界符合测量数据(图 6b 显示垂直调整后的边界与测量数据极为相符)。

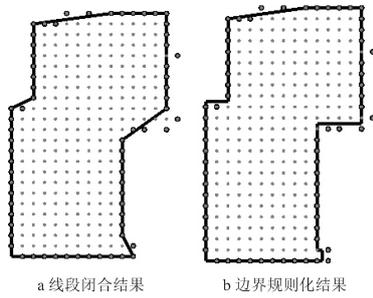


图 6 建筑边界规则化结果

### 3 基于拓扑约束的模型生成

建筑物模型生成的关键是获取屋顶间的交线和交点。通常利用屋顶的面片方程，通过求交以及交线上的点数来确定交线，进而确定这些交线的交点。但实际的屋顶交线和交点比较复杂：一方面由于机载 LiDAR 获取的真实屋顶点云并非绝对精确地落在平面上，而且目前常用的屋顶面片分割算法(RANSAC 和 Hough 变换等)不能够完全正确地将屋顶交线上的激光点分配到相应的屋顶面片上，其平面方程也不一定能精确表示该屋顶，因此由平面方程求得交线与真实的交线存在一定的偏差；另一方面机载 LiDAR 系统获取的地物线性特征不明显，较短的交线会由于所包含的激光点太少而不易得到。在屋顶间数学交线的基础上综合屋顶面片间的拓扑关系，确定最佳屋顶交线；然后通过屋顶之间的拓扑图，获取屋顶之间的交点；最后结合建筑边界和屋顶间交线的交点得到三维建筑模型。

#### 3.1 基于拓扑关系确定屋顶交线

本研究假设最佳的屋顶交线是可以将屋顶面片绝对分开且位于数学交线附近的线段，因此在数学屋顶交线  $l_m$  的基础上，在一定范围内(相邻屋顶间的邻近点)变换交线方程，然后对交线进行评分，选择得分最高的交线作为最佳屋顶交线，计算方法如下：

1) 首先根据屋顶分割的结果，通过平面方程求交，以及交点所包含的点云数目，确定有效的

数学上的屋顶交线  $l_m$  (图 7a)。

2) 根据指定的范围确定交线有可能存在的区域，变动  $l_m$  的斜率和中心点位置，得到候选屋顶交线  $l_{cand}$  (图 7b)。

3) 根据相邻屋顶的点云与  $l_{cand}$  的关系，为  $l_{cand}$  评分。

4) 依据评分结果，选择得分最大的直线作为最佳屋顶交线  $l_{opt}$  (图 7c)。

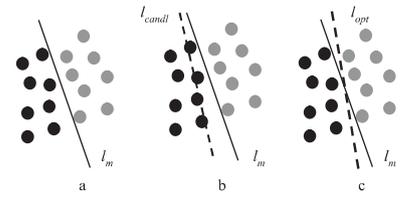


图 7 最佳屋顶交线确定

#### 3.2 基于拓扑图确定屋顶交点

确定拓扑交线后，通过屋顶间的拓扑关系构建对应的无向图，然后检测图中的最小闭合环，确定屋顶之间的交点。根据图 8a 中的拓扑关系(平面相交关系)，可以构建图 8b 中的屋顶拓扑关系无向图。图 8b 中每个端点表示一个屋顶平面，而平面之间的连线表明屋顶之间存在交线。通过检测无向图中的最小闭合环，可以确定相交于一点的平面，然后通过这些平面的交线约束求得屋顶交线的交点，结果如图 8c 所示。

#### 3.3 三维模型

由机载 LiDAR 数据获取的三维建筑模型一般假设为棱柱模型，其屋顶模型由点云数据获取，而墙面则有建筑边界向下延伸得到。建筑屋顶模型主要是由关键线段和关键点组成。因此在获取屋顶规则边界和屋顶间的交线交点后，通过求屋顶交线与规则边界的交点即可确定屋顶模型中的其它关键点，得到建筑屋顶线框模型(图 9a)，向下延伸建筑屋顶的边界便可得到建筑的三维模型(图 9b)。

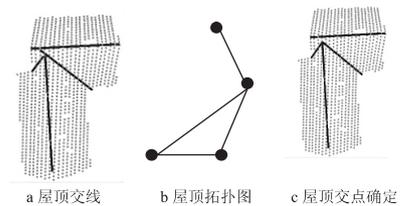


图 8 基于拓扑图的屋顶交点确定

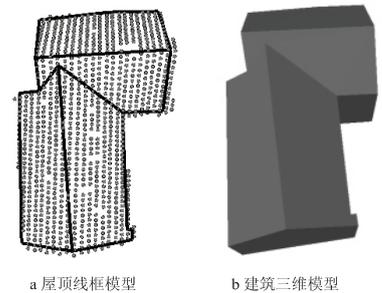


图 9 最终建筑模型

### 4 实验及结果分析

本文使用了德国摄影测量学会(German Association of Photogrammetry and Remote Sensing)发

布的 Vaihingen 数据集<sup>[16]</sup>的 Area 3 区域, 由 Leica ALS50 机载激光雷达系统于 2008 年 8 月获取, 平均飞行高度为 500m, 点云平均密度是 4 pts/m<sup>2</sup>。该数据是国际摄影测量学会发布的、用于城区三维重建精度评估研究的样例数据, 可用于不同学者利用不同方法进行建筑物三维重建效果的定量评价。图 10 显示了该区域的建筑点云和三维模型。

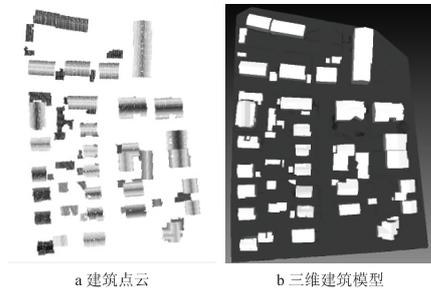


图 10 建筑点云和最终三维模型

本研究获取的三维建筑模型 (Chinese Academy of Sciences, Yong Xiao, CAS \_\_YX) 精度定量评价结果如表 1 所示。

表 1 三维重建模型定量评价结果

Abbrev	RMS [m]	RMSZ [m]
CKU	0.8	0.6
FIE	1.1	0.3
ITC1	0.8	0.1
ITC2	1	0.2
ITCX	0.7	0.1
ITCX_G1	0.7	0.1
ITCX_G2	0.7	0.1
TUD	0.7	0.1
VSK	0.8	0.1
YOR	0.6	0.2
CAS __YX	0.8	0.1

表 1 选自 ISPRS Commission III 的官方网站 [http://www2.isprs.org/commissions/comm3/wg4/results/a3\\_recon.html](http://www2.isprs.org/commissions/comm3/wg4/results/a3_recon.html); 其中 Abbrev. 表示重建结果提供者; RMS [m] 表示建筑模型边界与参考数据边界在水平方向上误差的均方根; 而 RMSZ [M] 则表示建筑模型垂直方向上的均方根误差。

由表 1 可知, 本文方法重建得到的边界水平方向上的均方根误差是 0.8 m, 说明确定的屋顶边界具有较高的水平精度; 建筑模型垂直方向上的均方根误差为 0.1 m, 可见模型的垂直精度很高。垂直方向上的误差统计是通过比较重建的平面和参考平面得到, 本文方法最终确定的模型是通过组合基于原始数据获取的屋顶交线、交点以及基于

栅格数据获得的规则边界而得到的, 说明本文方法能够准确提取屋顶交线和交点的位置, 进而保证最终建筑模型具有较高的垂直精度。

## 5 结束语

本文通过机载 LiDAR 数据构建建筑物三维模型, 技术方法和流程简单, 尤其是无需其他数据辅助, 即可快速获取高精度三维建筑模型。

1) 本文仅在边界规则化时对数据栅格化, 而在建筑点云获取以及模型生成等阶段采用原始点云数据, 有利于规则边界的获取, 也避免了栅格化造成的信息损失。实验结果表明基于栅格数据提取的边界具有较高的精度。

2) 边界规则化时采用栅格数据, 不仅简化了边界数据, 而且使得参数设置具有自适应性。同时该方法仅采用两种简单的规则化策略, 算法无需依赖建筑的复杂程度和其它先验知识, 普适性强, 而且结果精度高。

3) 在模型生成阶段, 本文提出基于拓扑关系和屋顶的邻近约束确定最佳屋顶交线, 克服了仅使用屋顶平面方程计算的缺点, 结果更加鲁棒、合理。最终模型的高垂直精度也表明该方法能够准确地估计屋顶交线的准确位置。

4) 本文在调整边界时仅考虑平行和垂直情况, 后续工作拟针对复杂、不规则的建筑引入更合理的边界调整策略。

致谢: Vaihingen 数据由德国摄影测量学会 (German Association of Photogrammetry and Remote Sensing) 提供<sup>[16]</sup>, 相关网址为: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpfd/KEP-Allg.html>。

## 参考文献

- [1] Maas Hans-Gerd, Vosselman George. Two Algorithms for Extracting Building Models from Raw Laser Altimetry Data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(02-03): 153-163.
- [2] Dorninger Peter, Pfeifer Norbert. A Comprehensive Automated 3d Approach for Building Extraction, Reconstruction, and Regularization from Airborne Laser Scanning Point Clouds[J]. Sensors, 2008, 08(11): 7323-7343.
- [3] Fischler Martin A, Bolles Robert C. Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(06): 381-395.
- [4] Tarsha-Kurdi F, Landes T, Grussenmeyer P. Extended

- RANSAC Algorithm for Automatic Detection of Building Roof Planes from Lidar Data[J]. Photogrammetric Journal of Finland, 2008, 21(01): 97-109.
- [5] Vosselman George, Dijkman Sander. 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans [J]. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2001, 34(03/W4): 37-44.
- [6] 崔建军, 隋立春, 徐花芝, 等. 基于边缘检测算法的 LiDAR 数据建筑物提取[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(02): 98-100.
- [7] 孟峰, 李海涛, 吴侃. LIDAR 点云数据的建筑物特征线提取[J]. 测绘科学, 2008, 33(05): 97-99.
- [8] 杨洋, 张永生, 马一薇, 等. 基于 LIDAR 数据的建筑物轮廓提取[J]. 测绘科学, 2010, 35(03): 203-205.
- [9] 沈蔚, 王林, 王崇倡, 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(03): 373-377.
- [10] Zhang Keqi, Yan Jianhua, Chen Shu-Ching. Automatic Construction of Building Footprints from Airborne LiDAR Data[C]//IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(09): 2523-2533.
- [11] 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(04): 383-386.
- [12] Zhou Qian-Yi, Neumann Ulrich. Fast and Extensible Building Modeling from Airborne LiDAR Data[C]//Aref Walid G., F. Mokbel Mohamed, Samet Hanan, et al. Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York: ACM, 2008: 43-50.
- [13] Chen Dong, Zhang Liqiang, Wang Zhen, et al. A Mathematical Morphology-based Multi-level Filter of LiDAR Data for Generating DTMs[J]. Science China Information Sciences, 2012, 33(20): 01-14.
- [14] 沈蔚, 李京, 陈云浩, 等. 基于 LIDAR 数据的建筑轮廓线提取及规则化算法研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(05): 692-698.
- [15] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to Algorithms[M]. Second Edition. Cambridge, MA: MIT Press and McGraw-Hill, 2001: 561-579.
- [16] Cramer M. The DGPF test on digital aerial camera evaluation-overview and test design[J]. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 2010(02): 73-82.

### 3D building model reconstruction from airborne LiDAR data

**Abstract:** Since airborne LiDAR system can obtain 3D information of buildings with a high accuracy and point density, airborne LiDAR data is widely used for 3D building model reconstruction. This paper proposed a method to obtain 3D building models that: in order to obtain regular boundaries, the building points are firstly rasterized and then boundary points are extracted by the  $\alpha$ -shape algorithm; secondly, the RANSAC method is performed to extract segments from boundary points; thirdly, regularized building outlines are derived by regularization strategies including collinear merge and orthogonal adjustment; meanwhile, building roof intersection segments and points are estimated based on their topology information and the original building points; finally, 3D building models are generated by combining regularized boundaries, roof intersection segments and points. Experimental results demonstrated that the proposed method would have strong feasibility with high planimetric accuracy of building outlines and high vertical accuracy of the reconstructed model

**Key words:** LiDAR; 3D building models; RANSAC; boundary regularization

XIAO Yong<sup>1,2</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>, XI Xiao-huan<sup>1</sup>, WANG Fang-jian<sup>1,2</sup> (1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)