

LiDAR 数据与正射影像结合的 三维屋顶模型重建方法

程 亮¹ 李满春¹ 龚健雅² 单 杰^{3,4}

(1 江苏省地理信息技术重点实验室,南京大学,南京市汉口路 22 号,210093)

(2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(3 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(4 美国普渡大学土木工程学院,印第安纳州,美国)

摘 要:为提高三维屋顶模型重建的准确性与定位精度,本文集成机载 LiDAR 数据与正射影像,以“屋顶面片提取-屋脊线生成-三维屋顶重建”为框架,提出了三角形簇和三角形动态传播相结合的屋顶面片提取策略。基于 LiDAR 数据和影像的屋脊线精确提取算法,有效挖掘影像高分辨率特性和 LiDAR 数据高程点云特性的互补优势,实验证明了算法的优越性。

关键词:三维重建;屋顶模型;LiDAR;正射影像

中图法分类号:P237

三维屋顶模型重建是三维建筑物模型重建的关键和难点。目前,摄影测量技术仍然是获取三维建筑物模型最经济快捷的手段,但其处理的自动化水平依旧很低^[1]。机载激光雷达(LiDAR)技术直接提供高程点云数据,已经成为三维建筑物模型获取的一种重要手段^[2-3],越来越多的研究开展了基于 LiDAR 数据的三维屋顶模型重建工作^[4-13]。

现有的三维重建方案大致将建筑物顶部分为两类处理:人字型屋顶和阶跃型屋顶。阶跃型屋顶多采用规则化方法,在屋顶边界提取时,由于屋顶边界走向多样而受到很大制约;同时,其质量受制于 LiDAR 数据的空间分辨率与滤波、分类等处理的质量。针对这一问题,本文介绍了一种新的三维屋顶模型重建方法。

1 屋顶面片提取

综合利用 LiDAR 数据和影像数据,介绍了一种三角形簇和三角形动态传播相结合的屋顶面片提取策略,主要步骤包括:

1) 初始面片检测。① 基于三角形簇的点法

向量计算。如图 1(b)所示,为了计算点 P_i 的法向量,根据“点-面”拓扑关系,得到与之相关的三角形簇,即三角形(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5);计算每个三角形的法向量,以其平均值为点 P_i 的法向量;依此法计算每个点的法向量。② 初始面片提取。根据点法向量,判断点集内两两点间法向量的差异,形成初始面片,如图 1(c)所示。

2) 面片区域收缩。① 格网索引建立。建立格网(图 1(d)背景),采用 3~5 倍的 LiDAR 数据平均采样距离作为格网尺寸(文中取 3 m);建立 LiDAR 点与格网空间的关系,即“点-格网”关系。② 初始面片收缩。针对某一屋顶面片,根据“点-格网”关系,获得该屋顶面片的边缘网格,如图 1(d)中的黑色格网;以此格网做缓冲,得到图 1(e);过滤缓冲区格网中所有的 LiDAR 点,收缩初始面片,剔除可能存在于边缘的不确定点,如图 1(f)所示。

3) 屋顶面片精化。① 基线选择。基于面片区域收缩结果,构建三角网,如图 1(g)所示;根据“线-面”拓扑关系,对于任意线,若其存在左右三角形,则说明其不是基线,若只在单侧存在三角形,说明其处于外缘,则被选为后续三角形动态传

收稿日期:2012-12-05。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41001238);国家 973 计划资助项目(2012CB719904);国家科技支撑资助项目(2012BAH28B02)。

播的基线,如图 1(h)所示。② 候选点确定。选定某一条基线,根据“点-线”拓扑关系,获得其两个端点,即图 1(i)中白色点;根据“点-格网”关系,得到其中某点的所在格网,以此格网获取其八邻域格网;同法获取另一点的八邻域格网;合并格网,即图 1(i)中黑框,以框中尚未参与三角网构建的 LiDAR 点为候选点。③ 三角形动态传播。在候选点中,以与基线形成最大夹角的点为最优先考虑点,以此点与基线形成新三角形,根据判断准则考量该新入点是否可靠。若不可靠,则删除新点;若可靠,则更新三角网,以新基线传播。该判断准则顾及坡度、粗糙度、光谱、熵等 4 个方面的信息。

通过三角形簇和三角形动态传播相结合的屋顶面片提取策略,最终获得图 1(l)所示的屋顶面片分割结果,LiDAR 点被归类入各个面片,形成如图 1(l)之点集 1-8。

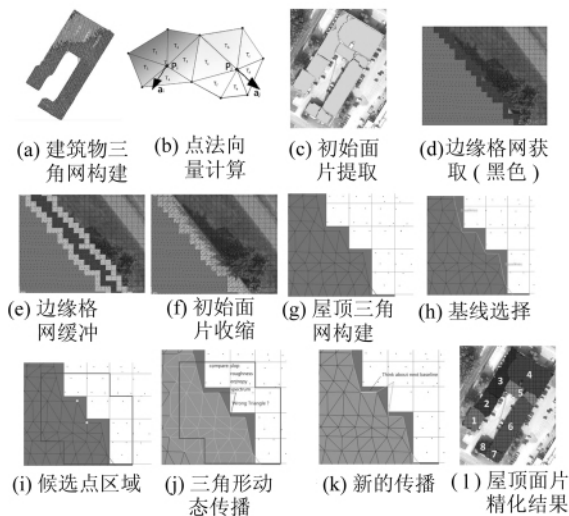


图 1 一种三角形簇和三角形动态传播结合的屋顶面片提取策略

Fig. 1 Rooftop Patch Extraction by Integration of Triangle Clusters and Dynamic Triangle Propagation

2 屋脊线生成

屋脊线提取包括影像线段提取、屋脊线筛选、屋脊线融合、完整屋脊线恢复等 4 个部分。

1) 影像线段提取。具体算法参见文献[14]。利用 edison 算子,作用于工作影像,进行边缘检测。在边缘检测的基础上,利用 Hough 变换,提取直线段,如图 2(b)所示。

2) 屋脊线筛选。针对在图 2(b)中的每条线段,垂直于自身向两侧外推,形成其左右矩形,图 2(d)中黑色线段为图 2(c)中黑框内线段,图中浅

灰色矩形与深灰色矩形即为其左右矩形。通过“点-面”空间关系分析,如图 2(d)所示,若左右矩形中某一矩形内有点而另一矩形内无点,说明该线段为建筑物外围轮廓线,可获取分别落在左右矩形中的 LiDAR 点,进行屋脊线筛选,得到屋脊线筛选结果,如图 2(e)所示。

3) 屋脊线融合。根据屋脊线筛选结果,将相互平行且距离小于阈值(文中为垂直距离小于 1 m,平行距离小于 2 m)的线段编组。当组内存在多条线段时,根据这些线段的端点,利用随机采样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法拟合出一条新的线段,完成屋脊线的融合处理,得到图 2(g)中的灰色线段(断裂)。

4) 完整屋脊线恢复。采用文献[15]中提及的“LiDAR 数据支撑下改进的分割-合并-成型算法”,完成图 2(g)中的拓扑关系恢复,得到图 2(i)中的结果。

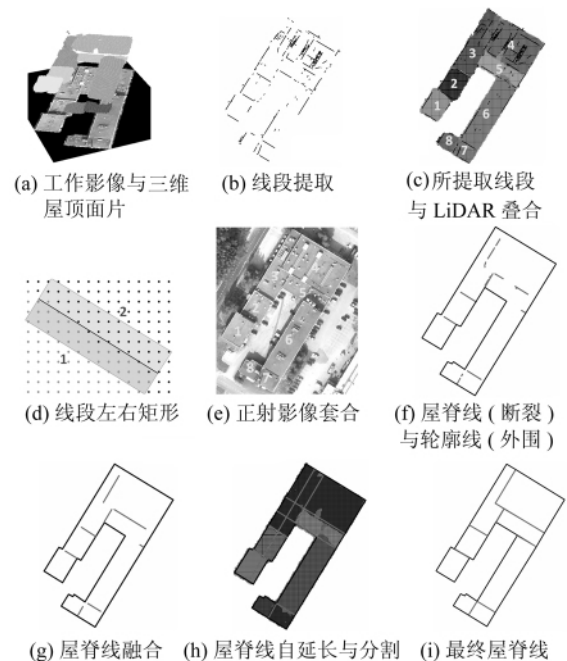


图 2 一种基于 LiDAR 数据和正射影像的精确屋脊线提取算法

Fig. 2 Precise Rooftop Line Determination Based on LiDAR Data and Orthophoto

3 三维屋顶重建

利用文献[15]中提出的“基于 LiDAR 的成型处理”方法,完成三维屋顶模型重建,如图 3 所示。屋顶面片拟合利用 RANSAC 算法。相对最小二乘算法,RANSAC 算法更具鲁棒性,特别是当屋顶存在明显突起构造或者数据存在噪声时,RANSAC 算法有利于获取高程定位更准确的屋顶面片。

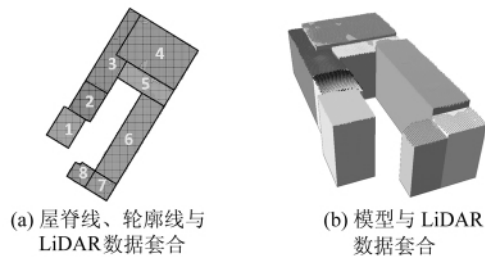


图3 三维屋顶模型重建

Fig. 3 3D Rooftop Model Reconstruction

4 实验

实验区大小约为 $1\ 500\ \text{m} \times 850\ \text{m}$, 实验数据包括 LiDAR 数据(图 4(a))与正射影像(图 4(b)). LiDAR 数据以不同灰度表示不同高程, 平均点间距约为 $1\ \text{m}$, 高程精度约为 $15\ \text{cm}$, 平面精度约为 $30\ \text{cm}$, 正射影像空间分辨率约为 $5\ \text{cm}$. 将实验区人工建立的三维建筑物模型作为参考数据. 实验区内包含了不同屋顶结构(包括阶跃型屋顶与人字型屋顶)、不同走向、不同复杂程度的多个建筑物. 针对实验区之区域 1、2, 进行屋顶三维模型重建, 从定性(目视判断)、定量(准确性、完整性与定位精度分析)两个方面, 评价所重建三维屋顶模型的质量.

4.1 视觉效果

图 4(c)、图 4(d)是三维屋顶模型效果图, 通过与参考数据(正射影像、人工建模结果)对照观察, 发现除了一些细节有所不同外, 在较大结构处基本未见明显不同, 建筑物结构重建准确, 说明本文方法可以有效重建三维屋顶.

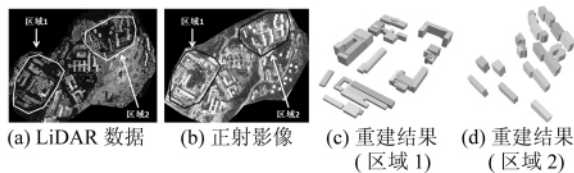


图4 三维屋顶模型重建实验

Fig. 4 Experiments of 3D Rooftop Model Reconstruction

4.2 准确率与完整率

以三维模型的每块屋顶面片为单位, 根据式(1), 评价所重建三维屋顶模型准确性与完整性.

$$\left. \begin{aligned} \text{Completeness} &= TP / (TP + FN) \\ \text{Correctness} &= TP / (TP + FP) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, TP 指屋顶面片重建正确的数目; FN 指屋顶面片遗漏重建的数目; FP 指屋顶面片重建错误的数目. 对于屋顶面片重建正确、遗漏、错误的判定如下: 通过人工目视判断屋顶面片的形状与

拓扑关系是否正确; 在此正确的基础上, 以人工建模结果为参考数据, 将所重建屋顶面片与人工建模结果投影到二维分别形成多边形 A 、 B , 获取两多边形的重叠区域 C . 计算重叠区域 C 与多边形 A 的面积比值, 若比值大于 80% , 则认为屋顶面片重建正确, 否则视为重建错误. 遗漏是指本身存在的屋顶却未被重建. 区域 1、2 中所重建三维屋顶模型的正确率与完整率数据见表 1.

进一步, 将本文方法的重建结果与人工建模结果进行对比, 则自动建模的问题主要表现在: ① 细微结构易发生错误, 如图 5 中标注 A 所示; ② 产生了一些虚构的建筑物屋顶结构, 如图 5 中标注 B 所示; ③ 细微结构丢失, 如图 5 中标注 C 所示.

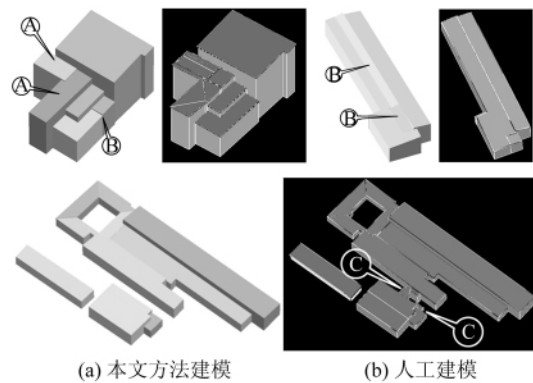


图5 三维屋顶模型重建的准确性与完整性分析

Fig. 5 Analysis of 3D Building Rooftops Reconstructed

4.3 定位精度

三维屋顶模型的定位精度包括平面精度与高程精度, 重点考察其平面精度. 具体是在实验区中区域 1、2 内, 通过评价屋顶面片角点的平面精度进行. 精度评定中, 采用平均误差、均方根误差和最大偏移三项指标. 从重建正确的屋顶面片入手, 挑选出一定数量的屋顶角点(区域 1、2 分别挑选 25、20 个角点), 以真正射影像图为地面真值, 将其与真正射影像图上的对应点进行比较, 衡量本文方案所重建三维屋顶模型的定位精度. 精度评定结果如表 2 所示, 屋顶角点的平面误差向量图如图 6 所示, 其中加粗短线表示屋顶角点定位误差, 其方向表示误差方向, 其长度表示误差大小. 图 6 为放大 20 倍显示的结果.

表1 三维屋顶模型重建的正确率与完整率

Tab. 1 Correctness and Completeness of Reconstructed 3D Building Rooftops

实验区	正确	错误	遗漏	正确率/%	完整率/%
1	52	7	9	86	85
2	38	4	5	90	88

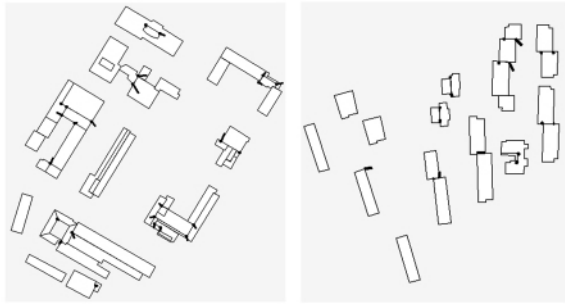


图 6 三维屋顶模型平面误差向量图

Fig. 6 Geoposition Accuracy of Reconstructed 3D Building Rooftops

表 2 三维屋顶模型重建的定位精度

Tab. 2 Geoposition Accuracy of Reconstructed 3D Building Rooftops

实验区	平均误差/m	均方根误差/m	最大偏移/m
区域 1	0.35	0.39	0.74
区域 2	0.28	0.31	0.63

5 结 语

本文提出了一种基于 LiDAR 数据与正射影像的三维屋顶模型重建方法,通过充分融合 LiDAR 数据与影像数据,使得三维屋顶模型重建具有较高的准确性与定位精度。本文方法可有效重建三维建筑物顶部,其应用于实验区 1、2 的实验结果为:正确率分别为 86%、90%,完整率分别为 85%、88%,定位精度(屋顶角点点位均方根误差)分别为 0.39 m、0.31 m。

参 考 文 献

- [1] Suveg I, Vosselman G. Reconstruction of 3D Building Models from Aerial Images and Maps[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 58(3/4): 202-224
- [2] Brenner C. Building Reconstruction from Images and Laser Scanning[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005, 6(3-4): 187-198
- [3] Ackermann F. Airborne Laser Scanning—Present Status and Future Expectations[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2-3): 64-67
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Elberink S, Vosselman 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
- [7] Haala N, Brenner C. Virtual City Models from Laser Altimeter and 2D Map Data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1999, 65(79): 787-795
- [8] McIntosh K, Krupnik A. Integration of Laser-derived DSMs and Matched Image Edges for Generating an Accurate Surface Model[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 56: 167-176
- [9] Peternell M, Steiner T. Reconstruction of Piecewise Planar Objects from Point Clouds[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(4): 333-342
- [10] Forlani G, Nardinocchi C, Scaiono M, et al. Complete Classification of Raw LiDAR and 3D Reconstruction of Buildings[J]. Pattern Analysis and Applications, 2006, 8(4): 357-374
- [11] Cheng Liang, Gong Jianya, Li Manchun, et al. 3D Building Model Reconstruction from Multi-view Aerial Imagery and LiDAR Data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2011, 77(2): 125-139
- [12] 程亮, 龚健雅, 杨晓霞, 等. 面向宽基线立体影像匹配的高质量仿射不变特征提取方法[J]. 测绘学报, 2008, 37(1): 77-82
- [13] 程亮, 龚健雅. 遥感影像仿射不变特征匹配的自动优化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(4): 418-422
- [14] 程亮, 龚健雅. LiDAR 辅助下利用超高分辨率影像提取建筑物轮廓方法[J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 391-394
- [15] 程亮, 龚健雅, 李满春, 等. 集成多视航空影像与 LiDAR 数据重建三维建筑物模型[J]. 测绘学报, 2009, 38(6): 494-501

第一作者简介:程亮,博士,副教授。研究方向为激光雷达遥感及其地学应用。

E-mail:lcheng@nju.edu.cn

(下转第 216 页)

and gets four independent components, then sets noise components to the minimum, third utilizes the mixed matrix to calculate the four intensity image without noise, finally uses the original phase to work out the scattering matrix haven been filtered speckle. For verifying the validity of the method, the EMISAR data of Foulum is tested. Experiment results demonstrate that the method proposed can effectively filter speckle, and also has many advantages in preserving detail information. Even though polarization signatures of the scattering matrix after filtering have changed, differences and distinctive of objects are kept. Therefore, the proposed filter has large potential application in the fields of classification, edge and small target detection based on the statistical characteristics.

Key words: fully PolSAR; ICA; filter; speckle; details preservation; scattering matrix

About the first author: YU Jie, professor, Ph.D, Ph.D supervisor, majors in remote sensing data processing.

E-mail: yuj2011@whu.edu.cn

.....
(上接第 211 页)

3D Reconstruction of Building Rooftops from LiDAR Data and Orthophoto

CHENG Liang¹ LI Manchun¹ GONG Jianya² SHAN Jie^{3,4}

(1 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology,
Nanjing University, 22 Hankou Road, Nanjing 210093, China)

(2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(4 School of Civil Engineering, Purdue University, Indiana, USA)

Abstract: A method to reconstruct 3D building rooftops by the integration of LiDAR data and orthophoto is proposed. It consists of three main steps: rooftop patch extraction, rooftop line determination and 3D rooftop model reconstruction. Two new algorithms are proposed: a method on rooftop patch detection by integrating triangle clusters and dynamic triangle propagation; an algorithm based on LiDAR data and imagery for precise rooftop line extraction. The results demonstrate that complex building rooftops can be reconstructed well by proposed method. For the reconstructed 3D rooftop models in test area 1 and 2, the correctness are 86%, 90%, respectively; the completeness are 85%, 88%, respectively; the geoposition accuracy are 0.39 m, 0.31 m, respectively.

Key words: 3D reconstruction; building rooftop; LiDAR; orthophoto

About the first author: CHENG Liang, Ph.D, associate professor, majors in LiDAR remote sensing and its application.

E-mail: lcheng@nju.edu.cn