



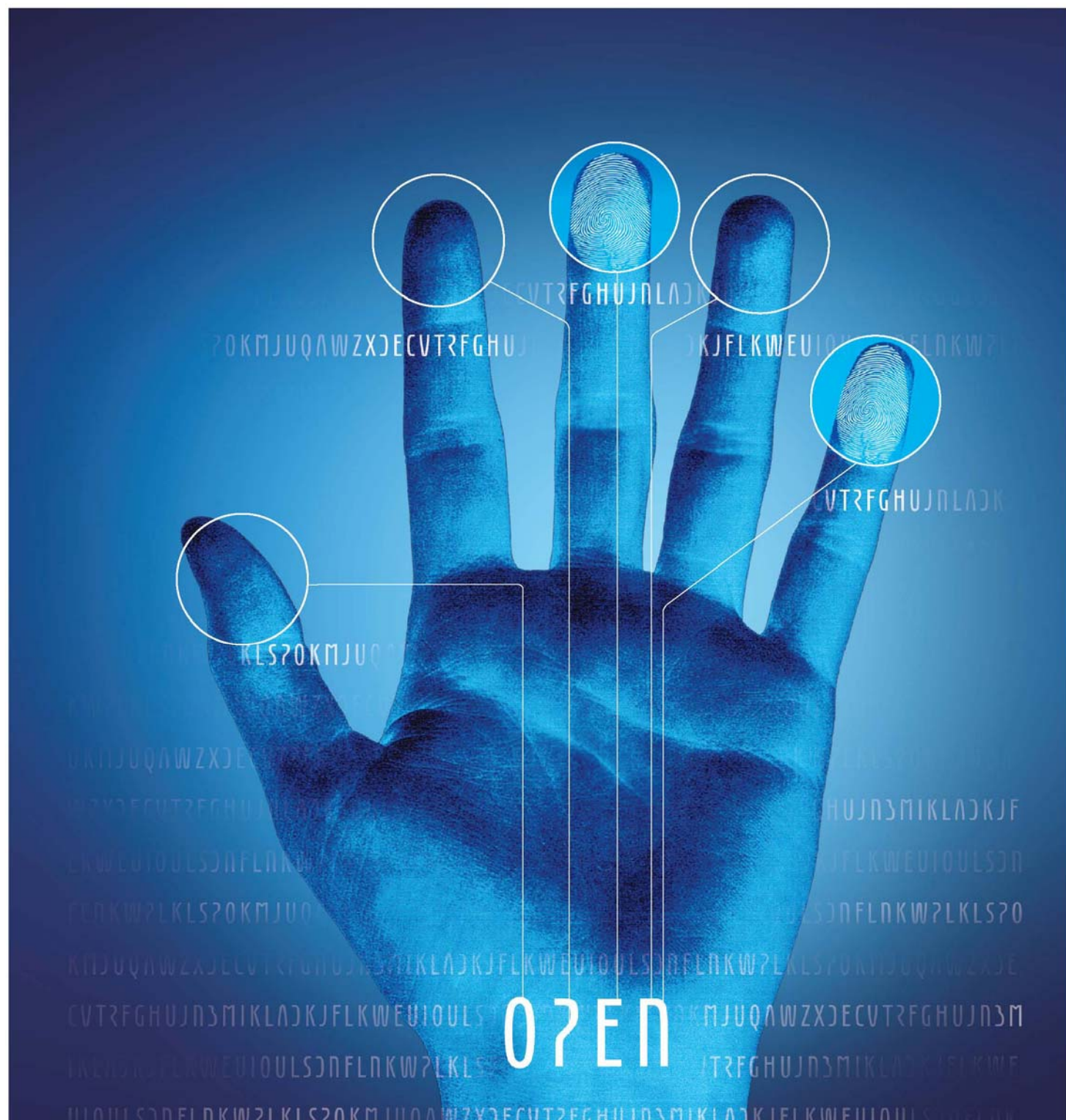
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2013
07
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第18卷第7期 (总第207期)

2013年7月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿, 均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版, 所刊载论文已获得著作权人的授权。所有内容, 未经许可, 不得转载或以其他方式使用。本刊所有图片均为非商业目的使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(中国国际书店, 邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100044)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100044, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

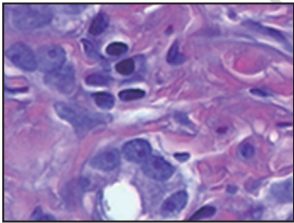
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

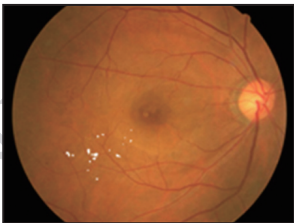
国内定价 50.00元



彩色纹理图像恢复的非局部TV模型 (第753页)



基于Nyström密度值逼近的减法聚类 (第790页)



RBF神经网络和阈值分割实现视网膜硬性渗出自动检测 (第859页)

图像处理 and 编码

各向异性的均衡化网状扩散模型 熊辉, 赖剑煌	731
特征提取和匹配的图像倾斜校正 钟金荣, 杜奇才, 刘炎, 林嘉宇	738
先进边界区分噪声检测的改进算法 祁冰露, 黄宴姿, 陈少斌	746
彩色纹理图像恢复的非局部TV模型 端金鸣, 潘振宽, 台雪成	753
相似性约束的视频超分辨率重建 张义轮, 干宗良, 朱秀昌	761

图像分析和识别

低质量指纹图像方向场提取 卞维新, 徐德琴, 俞庆英	768
方向微分分块统计的运动模糊方向鉴别 李均利, 储诚曦	776
参数自适应的KPCA先验形状约束目标分割 沈霁, 李元祥, 周则明	783
基于Nyström密度值逼近的减法聚类 孙志海, 孔万增	790
空间目标检测序列图像中恒星目标抑制 黄宗福, 孙刚, 陈曾平	799

图像理解和计算机视觉

人体动作的超兴趣点特征表述及识别 王扬扬, 李一波, 姬晓飞	805
轮廓编组中的线索合并模型 王娇, 罗四维, 钟晶晶, 邹琪	813
全局图像特征分析与实时层次化消失点检测 孙愿, 卢鸿波, 张志敏	818
彩色图像特征捆绑的自动模型构建 徐洁, 邓红霞, 李海芳	829

计算机图形学

偏离映射的烙画风格绘制 钱文华, 徐丹, 岳昆, 官铮, 普园媛	836
点云模型法矢调整优化算法 孙金虎, 周来水, 安鲁陵	844

医学图像处理

基于惩罚最大似然优化模型的各向异性约束磁共振成像方法 邓梁, 史仪凯, 张均田	852
RBF神经网络和阈值分割实现视网膜硬性渗出自动检测 高玮玮, 沈建新, 王玉亮	859

遥感图像处理

衡量结构保持性能的SAR图像去噪质量评价 唐益明, 杨学志	866
地面LiDAR数据中建筑轮廓和角点提取 童礼华, 程亮, 李满春, 陈焱明, 王亚飞, 张雯	876

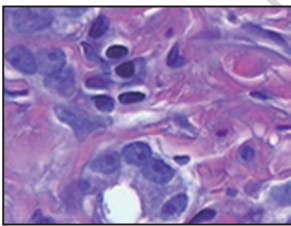
《中国图象图形学报》论文摘要写作要求	884
--------------------	-----

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Non-Local TV models for restoration of color texture images (P753)



Density value approximation for subtractive clustering based on Nyström method (P790)



Automatic detection of hard exudates based on RBF neural network and threshold segmentation (P859)

Image Processing and Coding

Equalized net diffusion model based on the anisotropy diffusion Xiong Hui, Lai Jianhuang	731
Robust method of skew correction based on feature points matching Zhong Jinrong, Du Qidai, Liu Ying, Lin Jiayu	738
Modification of advanced boundary discriminative noise detection algorithm Qi Binglu, Huang Yanwei, Chen Shaobin	746
Non-Local TV models for restoration of color texture images Duan Jinming, Pan Zhenkuan, Tai Xuecheng	753
Video super-resolution method based on similarity constraints Zhang Yilun, Gan Zongliang, Zhu Xiuchang	761

Image Analysis and Recognition

The orientation field extraction method for low quality fingerprints Bian Weixin, Xu Deqin, Yu Qingying	768
Identification of motion blur direction from motion blurred image by directional derivation and block statistics Li Junli, Chu Chengxi	776
Shape prior constrained KPCA object segmentation with parameter adaption Shen Ji, Li Yuanxiang, Zhou Zeming	783
Density value approximation for subtractive clustering based on Nyström method Sun Zhihai, Kong Wanzeng	790
Stellar targets suppression in image sequences for space targets detection Huang Zongfu, Sun Gang, Chen Zengping	799

Image Understanding and Computer Vision

Human action recognition based on super-interest points features Wang Yangyang, Li Yibo, Ji Xiaofei	805
Cue combination model for contour grouping Wang Jiao, Luo Siwei, Zhong Jingjing, Zou Qi	813
Hierarchical real-time vanishing point detection based on holistic image feature Sun Yuan, Lu Hongbo, Zhang Zhimin	818
Construction of the automatic model for feature binding of color image Xu Jie, Deng Hongxia, Li Haifang	829

Computer Graphics

Rendering pyrography style painting based on deviation mapping Qian Wenhua, Xu Dan, Yue Kun, Guan Zheng, Pu Yuanyuan	836
Optimal algorithm for normal adjustment of point clouds Sun Jinhu, Zhou Laishui, An Luling	844

Medical Image Processing

Anisotropically constrained MR imaging based on penalized maximum likelihood optimality model Deng Liang, Shi Yikai, Zhang Juntian	852
Automatic detection of hard exudates based on RBF neural network and threshold segmentation Gao Weiwei, Shen Jianxin, Wang Yuliang	859

Remote Sensing Image Processing

Image quality assessment of SAR image despeckling for measuring structure-preserving capability Tang Yiming, Yang Xuezhi	866
Extraction of building contours and corners from terrestrial LiDAR data Tong Lihua, Cheng Liang, Li Manchun, Chen Yanming, Wang Yafei, Zhang Wen	876

中图法分类号: P237 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)07-0876-08

论文引用格式: 童礼华,程亮,李满春,陈焱明,王亚飞,张雯. 地面 LiDAR 数据中建筑轮廓和角点提取[J]. 中国图象图形学报,2013,18(7): 876-883. [DOI:10.11834/jig.20130718]

地面 LiDAR 数据中建筑轮廓和角点提取

童礼华,程亮,李满春,陈焱明,王亚飞,张雯

南京大学江苏省地理信息技术重点实验室,南京 210046

摘要: 建筑轮廓和角点作为多平台激光雷达数据常用的配准基元,其提取方法正受到越来越多的关注。投影密度法是一种常用的从地面 LiDAR 数据中提取建筑轮廓和角点的方法,然而以往研究对于直接影响建筑轮廓提取结果的格网密度阈值考虑较少。提出一种轮廓密度估计的方法,能够根据点云实际情况自动准确地计算出格网密度阈值,从而提取较为准确的建筑轮廓格网。在此基础上,利用轮廓线段高程分割和密度延伸的方法对轮廓进行分割和恢复,能够提取完整的建筑轮廓。最后,利用轮廓线段的相交关系获得建筑角点。实验结果表明,本文方法能够有效从地面 LiDAR 数据中提取建筑轮廓和角点,正确性、完整性和定位精度较高。

关键词: 地面 LiDAR;建筑轮廓和角点;格网密度阈值;轮廓密度估计法

Extraction of building contours and corners from terrestrial LiDAR data

Tong Lihua, Cheng Liang, Li Manchun, Chen Yanming, Wang Yafei, Zhang Wen

Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210046, China

Abstract: Building contours and corners, as common registration primitives of multi-platform LiDAR data, are drawing more and more attraction on their extraction. Density of projected points (DoPP) method is a usual approach for building contours and corners extraction from terrestrial LiDAR, however previous studies paid little attention on the determination of grid density threshold, which directly affects the extraction results. In this paper, we propose a building contour density estimation method, which can provide a grid density threshold according to the actual point cloud, so that accurate building contours can be extracted. On this basis, the extracted contours are segmented and recovered using contour segmentation and density extension method, thus complete building contours are obtained. Finally, building corners are gained through the intersection of building contours. The experiment shows that the proposed method can effectively extract building contours and corners from terrestrial LiDAR with high correctness, completeness and positioning precision.

Key words: terrestrial LiDAR; building contours and corners; grid density threshold; contour density estimation method

0 引言

目前,激光雷达技术发展迅速,激光雷达大家庭迎来了航空激光雷达、地面激光雷达、车载激光雷

达、室内激光雷达等。不同平台的激光雷达性能和应用范围各不相同,但又是互相补充的^[1],伴随着激光雷达技术的不断进步,多平台激光雷达数据的集成处理逐渐成为一种趋势^[2],其中航空和地面 LiDAR 数据的集成尤为显著。航空激光雷达具有较

收稿日期:2012-12-18;修回日期:2013-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41001238)

第一作者简介:童礼华(1988—),男,南京大学地图学与地理信息系统专业硕士研究生,主要研究方向为激光雷达遥感与3维重建。

E-mail: buqingyuntlh@sina.cn

通讯作者:程亮, E-mail: lcheng@nju.edu.cn

大的扫描范围,能够获取地物顶部信息,但地物侧面信息缺失;地面激光雷达能够获取地物详尽的侧面信息,扫描精度极高,然而扫描范围有限,顶部信息也难以获得。两种数据各有优缺点,通过两者的集成能够获取地物全方位的信息。近年来,两者的集成应用已经很多,涉及地形制图^[3]、地质勘探^[4]、森林研究^[5]、水文研究^[6],以及虚拟现实^[7]等。

为了集成航空和地面 LiDAR 数据进行一些应用研究,首先需要对数据进行配准。点云的配准方法包括基于点云自身的配准和基于特征基元的配准^[8]。点云自身的配准,如 ICP^[9],计算量极大,易出现局部最优,很少直接使用。目前使用较多的方法是基于特征基元的配准,主要包括点基元、线基元、面基元以及多种基元的结合,对应于实际 LiDAR 数据即建筑轮廓、角点、屋顶面片、线状道路等特征。由于建筑轮廓提取是 3 维城市构建的重要环节,目前航空 LiDAR 特征基元尤其是建筑轮廓的提取已经很成熟,如文献[10-12]。

相对于航空 LiDAR 数据建筑轮廓提取方法的多样性,地面 LiDAR 数据轮廓提取的方法还比较少。文献[13]提出了一种八叉树分割合并算法能够将地面 LiDAR 点云聚类为各个面,从而获得建筑轮廓,然而该方法的生长过程依赖于初始种子的选择,种子的不同直接影响最终的聚类结果。文献[14]对点云数据构建不规则三角网,根据三角网高程确定屋顶和地面,进而确定各面片边缘,算法采用 TIN 获取边缘,误差和计算量都较大。文献[15]使用线基元对航空和地面 LiDAR 数据进行配准,对每个 LiDAR 点构建半径为 R 的 3 维球体,根据球体内点云特征确定建筑轮廓点,该方法对每个 LiDAR 点进行特征统计计算量较大,且提取结果受原始数据轮廓点云的质量影响较大。为了从地面 LiDAR 中提取建筑轮廓,一种常用的方法是投影密度法(DoPP),如文献[16-18]。该方法将 3 维点云投影至规则格网,统计格网内的点数,根据预先设定的格网密度阈值进行建筑轮廓格网的提取。由于地面 LiDAR 仪器仰视或平视地获取数据,数据中包含大量地物侧面信息,尤其是建筑墙面信息。当把地面 LiDAR 点云投射至 XY 平面时,墙面点云处投影密度会明显大于其他部分。图 1(a)(b)中,B 处墙面点云密度在 XY 平面上远远大于地面 A 处,设定格网密度阈值对格网进行筛选,就能够准确提取 B 处的建筑轮廓。地面 C 处由于靠近仪器,点云密度也

较高,但考虑到仪器往往架设于视野开阔的区域,地势较为平坦,可以设定高差阈值剔除 C 处的非建筑格网。投影密度方法具有简单、快速、提取结果准确的优点,然而其中格网密度阈值的选择直接关系到建筑轮廓提取的结果,如何自动准确地确定用于建筑轮廓筛选的格网密度阈值,相关研究很少涉及。

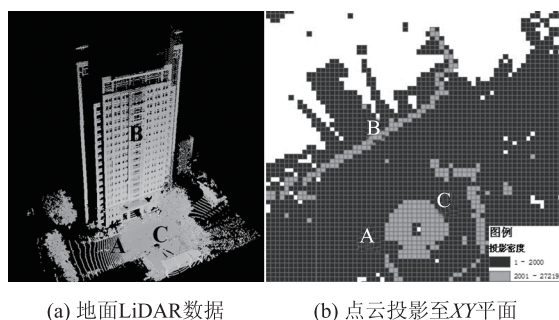


图 1 投影密度法提取建筑轮廓

Fig. 1 Building contour extraction using DoPP

为了自动准确地确定格网密度阈值,从而更有效地提取建筑轮廓,提出一种轮廓密度估计的方法,能够根据点云实际情况自动计算出准确的格网密度阈值。考虑到建筑本身可能存在的复杂情况,在投影密度方法提取建筑轮廓的基础上,使用一种轮廓延伸密度的方法对建筑轮廓进行恢复,以提高建筑轮廓的完整性。本文方法主要包括 4 个步骤:1) 2 维建筑轮廓线段提取,构建 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 和 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 的格网,采用投影密度方法进行 2 维建筑轮廓线段的提取;2) 轮廓线段高程分割,对于 2 维轮廓线段,根据对应点云的高程信息进行分割并赋予高程值,得到 3 维建筑轮廓;3) 基于延伸密度的轮廓恢复,提出一种延伸密度的方法,对提取的 3 维轮廓线段进行延伸,恢复完整的建筑轮廓;4) 建筑角点提取,利用提取的轮廓线段,根据线段之间的相交关系,得到建筑角点。

1 2 维建筑轮廓线段提取

1.1 基于层次格网的轮廓线段提取

考虑到投影密度法进行建筑轮廓提取时,网格的大小与提取的轮廓精度密切相关,采用一种层次格网的策略,利用较宽的格网提取粗略建筑轮廓格网,在此基础上细化格网,提取精确建筑轮廓格网。此处,粗格网可以设为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 或者更大;精细格网的设定与点间距相关,一般要求大于平均点间距,

$$\angle NOI = \arctan\left(\frac{H_L}{D_V / \cos(\beta + i \times 2 \times \alpha)}\right) \quad (9)$$

3) 将每列 LiDAR 点数相加, 得到格网中 LiDAR 点总数为

$$N = \sum_{i=1}^{N_{col}} N_{row}^i \quad (10)$$

4) 由于墙体的凹凸变化和玻璃的反射作用, 墙面激光点云分布并不均匀。在此情况下, 同一墙面的点云投影到 XY 平面时, 该墙面格网的密度会产生较大的差异。此时, 如果将计算得到的格网点云数作为格网密度阈值筛选格网, 就会丢弃部分建筑格网, 因此有必要根据墙体的凹凸情况以及窗户占墙面面积的比例设定一个阈值, 与 N 相乘, 作为最终的格网密度阈值, 即

$$d_{thre} = r \times N \quad (11)$$

式中, r 代表墙体凹凸情况及窗户所占墙面比例。

由于以上轮廓密度的计算是针对单个建筑进行的, 当实验区存在多个建筑时, 为了有效提取整个实验区的建筑物, 需要确定具有最小轮廓密度的建筑物。图 2 中, 若 D_M 和 D_R 减小, 格网范围将可能增加 n_1 列点云, 格网密度随之增加 $n_1 \times N_{row}$, 由于 N_{row} 数值较大, 格网密度的变化较大。若 H_B 增加, 格网范围将可能增加 n_2 行点云, 格网密度相应增加 $n_2 N_{col}$, 由于 N_{col} 较小, 对格网密度影响有限。由此可知, 距离测站的远近对建筑轮廓密度影响最大。基于此, 选择实验区中距离测站最远的建筑, 以其轮廓密度值作为整个实验区的格网密度阈值, 能够实现所有建筑物的有效提取。

2 轮廓线段高程分割

由于投影密度方法得到的建筑轮廓是 2 维的, 因此需要结合点云信息给轮廓线段赋予高程。同时, 在投影密度方法中, 实际对应于两条建筑轮廓的线段, 经过投影后可能就被检测为一条 2 维轮廓线段, 如图 3(a) 中的人字形建筑边缘实际为两条轮廓, 使用投影密度方法仅提取到一条轮廓, 因此需要结合点云的高程信息对 2 维轮廓线段进行分割。

1) 图 3(b) 中, 过投影轮廓线构建与 XY 平面相垂直的面, 将建筑轮廓格网内的 LiDAR 点云投影至该平面。

2) 图 3(c) 中, 对于投影点云, 设定较小的距离间隔, 划分投影平面, 计算落于各矩形区间的 LiDAR

最高点。

3) 计算相邻矩形中最高点之间的斜率与高程差异, 从左至右对各矩形最高点进行聚类; 如果相邻点斜率或高差大于指定阈值, 则形成新的聚类, 即新的轮廓线段。

4) 对于各聚类的点使用随机采用一致性算法拟合直线, 得到 3 维轮廓线段。

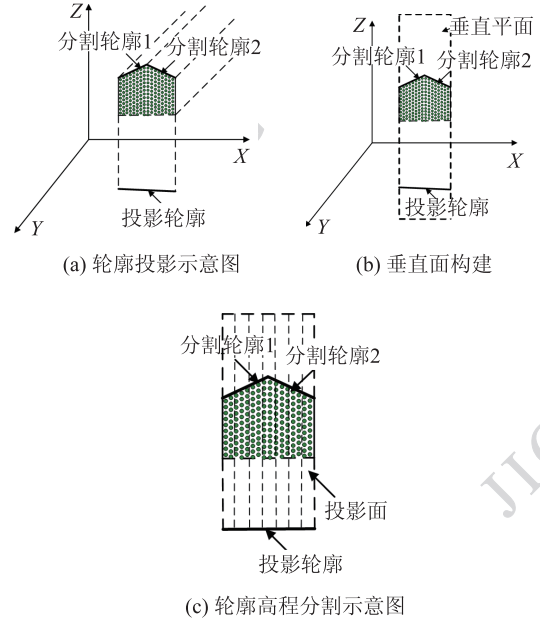


图 3 轮廓线段高程分割

Fig. 3 Contour segmentation using point elevation

3 基于延伸密度的轮廓恢复

轮廓密度估计法虽然从理论的角度推算了合适的格网密度阈值, 但由于一些极端情况, 如完全的玻璃覆盖、建筑周围大面积的走道等, 几乎不可能找到一个合适的阈值能够将所有建筑轮廓格网都提取出来 (如图 4(a) 中 A 和 B)。基于此, 为了恢复更为完整的建筑轮廓, 提出一种基于延伸密度的轮廓恢复方法, 通过对比待延伸线段点云密度与已有线段周围点云密度的差异, 确定延伸与否。图 4(b) 中, 黑色实线为提取的轮廓线段, 大的圆柱体为其 3 维缓冲区间, 黑色点为落于其中的点云, 小的圆柱体为待生长线段缓冲区, 灰色点为其中的点云。

1) 对轮廓线段构建 3 维缓冲区间, 确定落于其中的点云数量, 并将其除以缓冲区的体积, 得到原有轮廓的点云密度。

2) 以单位距离沿轮廓线段方向延伸, 以与步

骤 1) 同样的方式计算待延伸方向的点云密度。

3) 比较待生长方向密度与原有轮廓密度差异, 若待延伸方向的 LiDAR 点密度与原有轮廓 LiDAR 点密度的差异小于指定阈值(20%), 则延伸轮廓线段, 并重复步骤 2); 否则停止延伸。

4) 对所有轮廓线段重复步骤 1) — 3), 完成建筑轮廓线段的恢复。

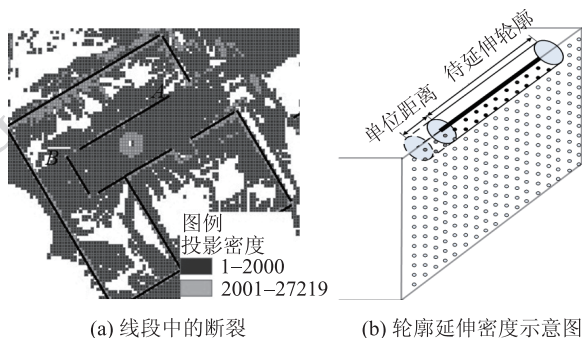


图 4 轮廓线段恢复

Fig. 4 Contour segment recovery

4 建筑角点提取

当得到了较为完整的建筑轮廓后, 线段两两相交就能得到建筑角点。首先在 XY 平面上检测线段交点, 再根据线段高程判断两条线段在 3 维空间上是否相交。具体方法如下:

1) 将提取的 3 维建筑轮廓投影到 XY 平面, 寻找 2 维相交点。

2) 如果组成相交点的两条轮廓在该相交点处的高程差小于阈值(0.5 m), 则认为两条轮廓在 3 维空间中相交, 其相交点即为一个建筑角点; 将轮廓相交点处的高程均值作为该建筑角点的高程。

3) 重复步骤 1) — 2), 完成所有轮廓角点的提取。

5 实验与分析

5.1 实验数据

选取南京大学鼓楼校区西北部作为实验区域, 总大小约 $450\text{ m} \times 450\text{ m}$, 使用 Leica ScanStation2 获取实验区地面 LiDAR 数据, 点云总数约 3 000 万, 如图 5 所示。ScanStation2 是一种快速的脉冲式 3 维激光扫描仪, 具有全方位视场角, 有效测距达到 300 m, 其单点扫描精度为 50 m 远处 $\pm 6\text{ mm}$ 误差,

距离精度为 50 m 远处 $\pm 4\text{ mm}$ 误差, 扫描点间距最小可达到 1 mm。在实际扫描作业中, 共设置了 9 个测站, 点云水平和垂直方向上的点间距都为 100 m 远处 20 cm 一个点, 由于每一站数据最大景深都小于 100 m, 故点云间距基本都在 20 cm 之内。



图 5 实验数据

Fig. 5 Experimental data

5.2 实验过程与分析

5.2.1 层次格网的 2 维线段提取

图 6 为从地面 LiDAR 数据提取建筑轮廓和角点的相关过程。图 6(a) 为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的格网, 可以看到建筑轮廓处格网密度都明显较高。根据轮廓密度估计法, 结合点云获取过程中测站的布置情况, 得知实验区距离测站最远的建筑约 50 m (如图 6(b) 中 A 处), 该建筑高约 40 m, 仪器高 1.5 m, 仪器至墙面水平距离约 25 m。通过计算得到格网大小为 1 m 时, 建筑轮廓格网内点云总数约为 2 214, 由于该建筑窗户占墙面近一半的面积, 故设置 r 值为 0.5, 则格网密度阈值为 1 107, 得到图 6(b) 中的粗略建筑轮廓格网。使用同样的参数计算精细格网下的格网密度阈值为 389, 得到精确建筑轮廓格网, 如图 6(c)。最后, 设置高差筛选阈值为 15 m, 得到图 6(d) 中的结果, 可以看到图中几乎所有的建筑轮廓都得到了有效提取, 非建筑格网基本都被剔除了。

为了定量评价提取的建筑轮廓格网精度, 手工数字化了实验区的建筑轮廓, 并将其转换为 0.2 m 的栅格数据, 作为实际建筑轮廓格网, 以便将其与提取的建筑轮廓格网进行比较, 如图 6(e) 所示, 共 6 262 个建筑轮廓格网。由于手工数字化的建筑轮廓格网是单像素的, 考虑到墙面厚度可能大于 0.2 m , 即建筑轮廓可能对应于 1 个以上的格网, 因此在确定格网正确与否的时候, 认为在实际格网 ± 1 个格网范围内都是正确格网。为了说明使用轮廓密度估计法确定的格网密度阈值的可靠性, 选取了其他 5 个格网密度阈值来提取 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 下的建筑

格网, 将其与轮廓密度估计法的结果相比较。表 1 为不同格网密度阈值下建筑轮廓提取情况。可以看到, 从 100 至 900, 伴随着格网密度阈值的逐渐变大, 提取的建筑格网正确性逐渐增加, 而完整性逐渐

降低。表中, 使用轮廓密度估计法确定的格网密度阈值(389)得到的结果, 正确性和完整性都较高, 在提取尽可能多的建筑轮廓格网的同时, 最大程度地剔除了非建筑格网。

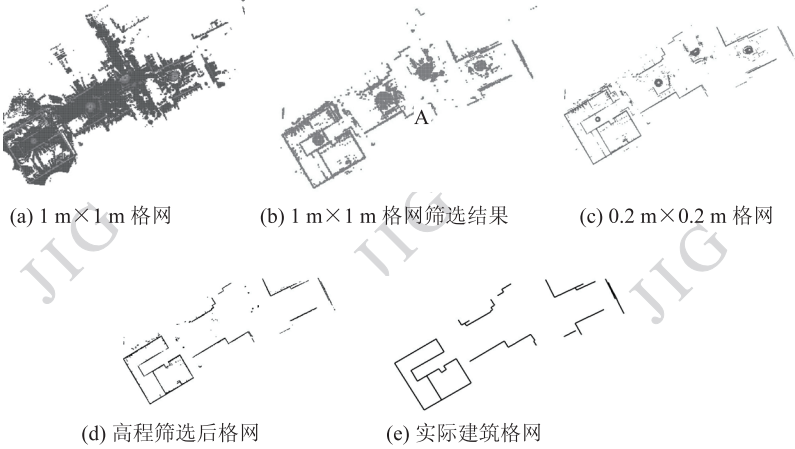


图 6 层次格网的线段提取

Fig. 6 Segments extraction with hierarchic grids

表 1 不同格网密度阈值的建筑轮廓提取比较
Table 1 Building contours comparison under different grid density thresholds

阈值	正确格网数	错误格网数	正确性/%	完整性/%
100	6 014	3 204	65.2	96.0
300	5 793	1 856	75.7	92.5
389	5 682	1 481	79.3	90.7
500	5 503	1 054	83.9	87.9
700	4 422	430	91.1	70.6
900	3 801	242	94.0	60.7

5.2.2 轮廓高程分割与轮廓恢复

图 7(a)中, 将完整实验区划分为 3×3 的 9 个分块。对于整体数据, 设定 Hough 变换峰值为累积空间最大值的 0.6 倍, 填充间隔为 10, 最短线段为

20; 对于分块数据, 设定峰值为最大值的 0.3 倍, 填充间隔为 20, 最短线段为 5。对图 7(a)中 Hough 变换得到的线段进行编组、融合, 得到图 7(b)中的 30 条建筑轮廓, 图中存在着一些较为明显的断裂, 如 A 和 B。将提取的轮廓长度与实际轮廓长度比较, 得到 Hough 变换后的轮廓完整性为 93.1%。图 7 中 C 和 D 线段实际分别为两条高程不同的建筑轮廓, 经过 Hough 变换后被检测为同一建筑轮廓。图 7(c)中, 利用密度延伸的方法对轮廓线段进行延伸, A、B 处的断裂都得到了有效恢复, 此时的轮廓线段完整性为 97.8%, 恢复后轮廓的完整性更高。图 7(d)为 3 维显示的恢复后的建筑轮廓线, 2 维平面中的轮廓线段 C 经过高程分割后被有效地划分为两条轮廓 C_1 和 C_2 , 线段 D 被划分为 D_1 和 D_2 , 最终提取到的轮廓线段数量为 32 条。

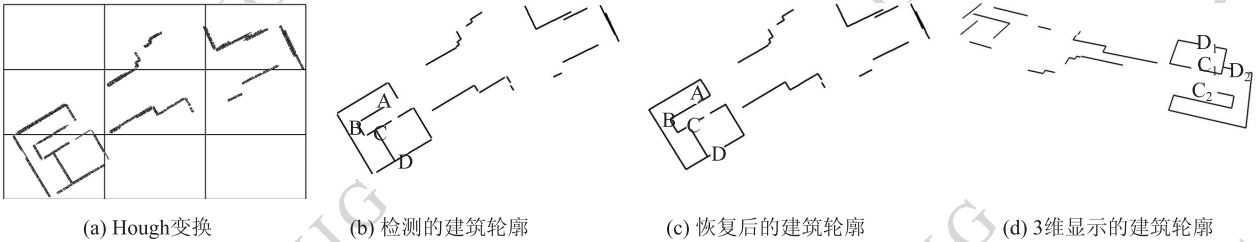


图 7 轮廓分割与恢复

Fig. 7 Contour segmentation and recovery

5.2.3 轮廓和角点精度评价

图8为本文方法提取得到的建筑轮廓和角点。本文数字化了实际建筑轮廓,将其与提取的建筑轮廓进行比较,从正确性、完整性和定位精度3个方面进行评价。由于建筑角点是在建筑轮廓的基础上直接获取的,对于轮廓的评价能够直接反映角点的情况,因此这里着重对建筑轮廓进行评价。

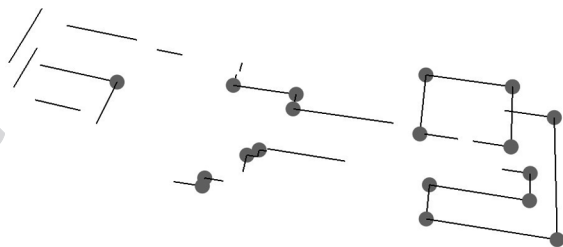


图8 提取的建筑轮廓和角点

Fig. 8 Extracted building contours and corners

正确性是指提取的建筑轮廓是否对应于实际中的某一条建筑轮廓,完整性是指提取的建筑轮廓与实际建筑轮廓长度的比值,定位精度是指提取的建筑轮廓与实际建筑轮廓之间的横截线距离。通过统计得到,本文方法提取的32条建筑轮廓都为实际的建筑轮廓,即正确性为100%,遗失的建筑轮廓数量为5条,主要为一些细小的结构。提取的轮廓总长度为8425 m,而实际轮廓的总长度为8613 m,轮廓完整性为97.8%。计算提取的轮廓与实际轮廓之间的横截线距离,得到轮廓线段水平方向上的平均误差为0.19 m,垂直方向上的平均误差为0.09 m,总误差约0.25 m。

6 结 论

提出一套从地面LiDAR数据提取建筑轮廓和角点的完整流程,包括层次格网的2维线段提取、轮廓线段高程分割、延伸密度的轮廓恢复以及建筑角点提取4个部分。首先提出一种轮廓密度估计的方法,根据地面LiDAR数据实际情况自动准确地确定格网密度阈值,从而保证了建筑轮廓格网的有效提取。在此基础上,利用轮廓线段高程分割技术,将提取的二维轮廓线段划分为3维轮廓线段。考虑到实际情况的复杂性和不确定性,为了获得更为完整的建筑轮廓,使用一种延伸密度的轮廓恢复方法,对分割后的3维轮廓线段进行恢复。最后利用提取的3维轮廓,根据线段相交关系获取建筑角点。实验结

果证明,本文轮廓密度估计的方法确定的格网密度阈值准确性较高,能够最大程度地提取完整的建筑轮廓格网。在此基础上,通过对轮廓格网的高程分割和恢复,最终获取建筑轮廓和角点,其正确性、完整性和定位精度都较高。

参考文献(References)

- [1] Van Leeuwen M, Hilker T, Coops N C, et al. Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(9): 1467-1478.
- [2] Heritage G, Large A. *Laser Scanning for the Environmental Sciences* [M]. Chichester: Wiley-Blackwell, 2009: 288.
- [3] Ruiz A, Kornus W, Talaya J, et al. Terrain modeling in an extremely steep mountain: a combination of airborne and terrestrial lidar [J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004, 35: 281-284.
- [4] Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellón A, et al. Use of LIDAR in landslide investigations: a review [J]. *Natural Hazards*, 2012, 61(1): 1-24.
- [5] Jung S E, Kwak D A, Park T, et al. Estimating crown variables of individual trees using airborne and terrestrial laser scanners [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(11): 2346-2363.
- [6] Hohenthal J, Alho P, Hyypä J, et al. Laser scanning applications in fluvial studies [J]. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(6): 782-809.
- [7] Fruh C, Zakhor A. Constructing 3D city models by merging aerial and ground views [J]. *Computer Graphics and Applications*, 2003, 23(6): 52-61.
- [8] Jaw J J, Chuang T Y. Registration of ground-based LiDAR point clouds by means of 3D line features [J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2008, 31(6): 1031-1045.
- [9] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [10] Aparecida Dos Santos Galvanin E, Porfirio Dal Poz A. Extraction of building roof contours from LiDAR data using a Markov-random-field-based approach [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(3): 981-987.
- [11] Cheng L, Gong J, Chen X, et al. Building boundary extraction from high resolution imagery and lidar data [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37: 693-698.
- [12] Xu J Z, Wan Y C, Yao F. A method of 3D Building Boundary Extraction from airborne LIDAR points cloud [C] // 2010 Symposium on Photonics and Optoelectronic. New York, USA: IEEE, 2010: 1-4.
- [13] Wang M, Tseng Y H. Lidar data segmentation and classification

- based on octree structure [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 35: 308-313.
- [14] Böhm J, Haala N. Efficient integration of aerial and terrestrial laser data for virtual city modeling using LASERMAPs [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2005, 36: 192-197.
- [15] Von Hansen W, Gross H, Thoennessen U. Line-based registration of terrestrial and airborne LIDAR data [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37: 161-166.
- [16] Hammoudi K, Dornaika F, Paparoditis N. Extracting building footprints from 3D point clouds using terrestrial laser scanning at street level [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2009, 38: 65-70.
- [17] Hammoudi K, Dornaika F, Soheilian B, et al. Extracting outlined planar clusters of street facades from 3D point clouds [C]//Proceedings of 2010 Canadian Conference on Computer and Robot Vision. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2010: 122-129.
- [18] Li B J, Li Q Q, Shi W Z, et al. Feature extraction and modeling of urban building from vehicle-borne laser scanning data [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences, 2004, 35: 934-939.
- [19] Duda R O, Hart P E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures [J]. Communications of the ACM, 1972, 15(1): 11-15.