

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<sup>[1]</sup>,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<sup>[2]</sup>,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<sup>[3]</sup>、地质勘探<sup>[4]</sup>、森林研究<sup>[5]</sup>、水文研究<sup>[6]</sup>,以及虚拟现实<sup>[7]</sup>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<sup>[8]</sup>。点云自身的配准,如ICP<sup>[9]</sup>,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<sup>[10-12]</sup>。

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<sup>[13]</sup>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<sup>[14]</sup>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<sup>[15]</sup>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<sup>[16-18]</sup>。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。

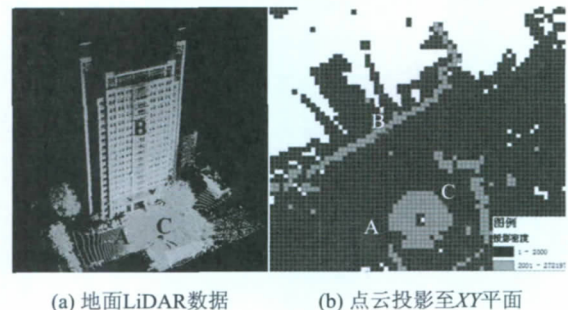


图1 投影密度法提取建筑轮廓

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,格网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,

以免出现建筑轮廓对应的格网内无点云或点云数量极少的情况。具体步骤如下:

1) 地面 LiDAR 点云投影至  $XY$  平面,保留各点的  $X、Y、Z$  属性。

2) 粗略建筑轮廓格网筛选。构建粗格网( $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ );根据点面空间关系,计算各格网内点云数量,得到格网密度;设定粗格网下格网密度阈值,根据该阈值筛选格网,保留大于阈值的格网。

3) 精确建筑轮廓格网筛选。对于筛选后的粗格网,在其中构建精细格网( $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ );根据点面空间关系,计算精细格网内点云数量,得到格网密度;设定精细格网下的格网密度阈值,根据该阈值对精细格网进行筛选,得到精确建筑轮廓格网。

4) 格网高差筛选。遍历所有精确建筑轮廓格网,如果格网内的最高 LiDAR 点和最低 LiDAR 点的高差大于实验区最矮建筑高程则保留,否则剔除。

5) 轮廓线段获取。Hough 变换<sup>[19]</sup>将图像空间中的曲线转变为参数空间的点,将曲线检测问题转化为参数空间的峰值寻找问题,能够有效从图像中提取几何形状。这里为了从轮廓格网中获取较完整的建筑轮廓,分两个尺度进行了 Hough 变换。对于整个实验区,设定较严格的参数,提取较明显的轮廓;将实验区划分为若干分块,采用较为宽松的参数,提取各细节的轮廓;通过对所有轮廓进行叠合、编组与融合,得到 2 维建筑轮廓线段。

## 1.2 格网密度阈值设定

格网密度阈值的设定直接关系到轮廓格网筛选的结果,提出一种轮廓密度估计的方法以确定该阈值。图 2 中,  $O$  点为仪器中心点,  $A$  点为水平垂直于仪器的墙面点,  $BC$  为一个投影格网,  $B$  点为格网靠近仪器一侧,  $C$  点为格网远离仪器一侧,  $D$  点为  $B$  点竖直方向上墙面最高点, 图中圆点为 LiDAR 点云。设  $OA = D_V$ ,  $CO = D_M$ , 格网边长  $D_C$ , 建筑高  $H_B$ , 仪器高  $H_L$ , 距离  $O$  点  $OA$  距离处点云水平方向上的点间距  $D_R$ , 垂直点间距  $D_C$ 。则格网密度阈值计算方法如下:

1) 计算水平方向上格网内 LiDAR 点的列数。记  $\alpha$  为扫描仪水平方向上每次旋转角度的一半, 则

$$\alpha = \arctan\left(\frac{D_R}{2 \times D_V}\right) \quad (1)$$

$E$  点为格网外水平方向上最靠近  $B$  点的扫描点(即  $E$  点后面的一个扫描点落入格网范围之内), 则

$$\angle AOE = \left[ \frac{\angle AOB - \alpha}{2 \times \alpha} \right] + \alpha$$

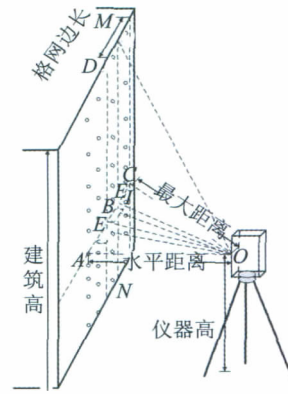


图 2 轮廓密度估计法

Fig. 2 Theoretical estimation method

$$\angle AOB = \arctan\left(\left(\sqrt{D_M^2 - D_V^2} - D_C\right) / D_V\right) \quad (2)$$

$F$  点为格网中水平方向上最靠近  $B$  点的点, 扫描仪从  $A$  点扫描至  $F$  点所转过的角度记为  $\beta$ , 则

$$\beta = \left( 2 \times \left[ \frac{\arctan\left(\left(\sqrt{D_M^2 - D_V^2} - D_C\right) / D_V\right) - \alpha}{2 \times \alpha} \right] + 3 \right) \times \alpha \quad (3)$$

根据角度  $\beta$  可算出  $BC$  线段上点数为

$$N_{col} = \left[ \frac{\arccos\left(D_M / D_V\right) - \beta}{2 \times \alpha} \right] + 1 \quad (4)$$

2) 计算每一列上 LiDAR 点的数量。记  $\theta$  为扫描仪垂直方向上每次旋转角度的一半, 则

$$\theta = \arctan\left(\frac{D_C}{2 \times D_V}\right) \quad (5)$$

记当前为  $N_{col}$  列中的第  $i$  列, 其与水平方向  $AC$  的交点为  $I$  点, 与建筑物顶部交点为  $M$  点, 与建筑物底部交点为  $N$  点, 则扫描仪从  $B$  点扫描至  $I$  点所转过的角度为

$$\angle BOI = \beta + i \times 2 \times \alpha \quad (6)$$

由于第  $i$  列点云的数量包括仪器水平线以上的点数和仪器水平线以下的点数, 因此第  $i$  列点云的数量为

$$N_{row}^i = N_{above}^i + N_{below}^i + 1 \quad (7)$$

线段  $MI$  上 LiDAR 点数为

$$N_{above}^i = \left[ \frac{\angle MOI - \theta}{2 \times \theta} \right] + 1$$

$$\angle MOI = \arctan\left(\frac{H_B - H_L}{D_V / \cos(\beta + i \times 2 \times \alpha)}\right) \quad (8)$$

线段  $NI$  上的 LiDAR 点数为

$$N_{below}^i = \left[ \frac{\angle NOI - \theta}{2 \times \theta} \right] + 1$$

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

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  $n_2 \times N_{col}$ , 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。

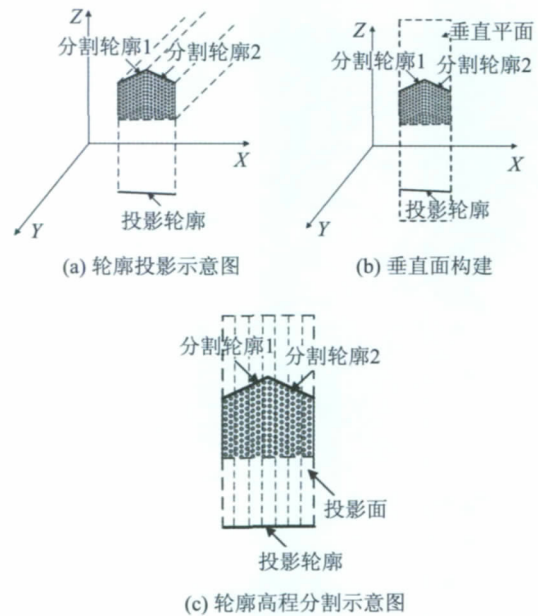


图 3 轮廓线段高程分割

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, 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, 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

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。

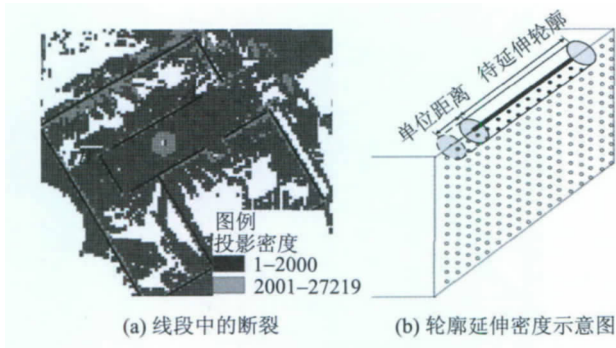


图 4 轮廓线段恢复

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。

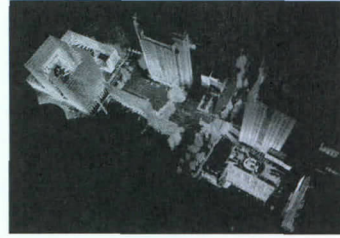


图 5 实验数据

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  $\pm 1$  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。

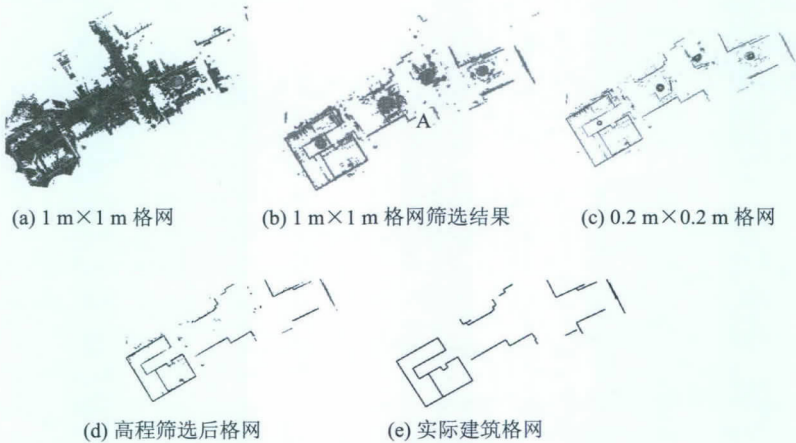


图6 层次格网的线段提取

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 $3 \times 3$ 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(c)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。

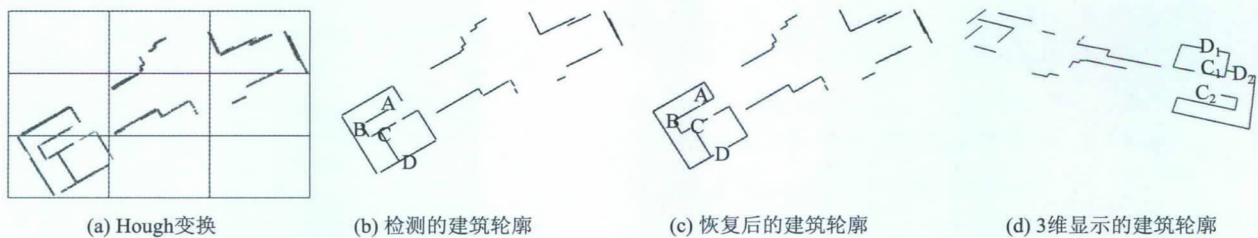


图7 轮廓分割与恢复

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。

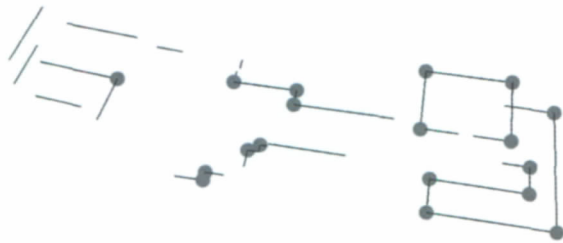


图8 提取的建筑轮廓和角点

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8425m,而实际轮廓的总长度为8613m,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0.19m,垂直方向上的平均误差为0.09m,总误差约0.25m。

## 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, Abellán 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, Hyyppä 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.