

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)09-1681-08

论文索引信息: 余焯, 刘晓平, 韩江洪, 袁晓辉, Bill P. Buckles. 从稀疏 LiDAR 数据中重建居民区建筑物[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1681-1688

# 从稀疏 LiDAR 数据中重建居民区建筑物

余焯<sup>1),3)</sup>, 刘晓平<sup>1),2)</sup>, 韩江洪<sup>1),2)</sup>, 袁晓辉<sup>3)</sup>, Bill P. Buckles<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (合肥工业大学计算机与信息学院 VCC 研究室, 合肥 230009)

<sup>2)</sup> (安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 合肥 230009)

<sup>3)</sup> (北德克萨斯大学计算机科学与工程系, Denton 76201)

**摘要:** 针对美国新奥尔良地区稀疏的 LiDAR (light detecting and ranging) 点云数据, 提出一种基于此数据的居民区建筑物重建方法。该方法利用最小包围轮廓来描述居民区建筑物形状, 在 TIN 模型的基础上进行屋顶分割, 得到属于每个建筑物的屋顶点; 然后, 基于三角面片的法向量方向信息对其进行聚类, 根据法向量之间的关系进行屋顶类型识别和模型匹配, 重建居民区建筑物。实验结果表明, 该方法在进行居民区建筑物重建时, 能达到 95% 的重建率, 且重建所需时间合理, 能够满足虚拟现实系统的需要。

**关键词:** 建筑物重建; 最小包围轮廓; LiDAR; 屋顶分割; 模型匹配

## Residential building reconstruction research based on sparse LiDAR data

Yu Ye<sup>1),3)</sup>, Liu Xiaoping<sup>1),2)</sup>, Han Jianghong<sup>1),2)</sup>, Yuan Xiaohui<sup>3)</sup>, Bill P. Buckles<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (VCC Division, School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009 China)

<sup>2)</sup> (Engineering Research Center of Safety Critical Industry Measure and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009 China)

<sup>3)</sup> (Department of Computer Science & Engineering, University of North Texas, Denton 76201 America)

**Abstract:** Facing the sparse LiDAR (light detecting and ranging) data of the New Orleans area in America, a new residential building model reconstruction method is proposed. The main contributions of this work are the automatic isolation of roof points and the roof type recognition. Using the minimum bounding contour to describe the outline of residential buildings, we are able to automatically identify individual buildings from clustered residential areas. Then, based on the relationship of normal vectors, building types are recognized; through model matching, the buildings models are reconstructed. Experiments show that our method can successfully reconstruct residential buildings given relatively sparse LiDAR samples in a reasonably short time.

**Keywords:** building reconstruction; minimum bounding contour; LiDAR; roof isolation; model matching

## 0 引言

3 维重建技术是计算机视觉、人工智能、虚拟现

实等前沿领域的研究热点和难点之一。城市场景中的建筑物重建在城市规划、灾害仿真、地图绘制、无线网络规划、虚拟导游等领域具有广泛的应用, 是一项十分具有挑战性的工作。传统的建模方式主要局

收稿日期: 2010-10-25; 修回日期: 2011-03-22

基金项目: 国家自然科学基金中美国际合作交流项目(60573174); 国家自然科学基金项目(61070124); 安徽省自然科学基金项目(11040606Q43); ORAU (Oak Ridge Associated Universities) 资助项目。

第一作者简介: 余焯(1982—), 女, 讲师。2010年在合肥工业大学获得计算机应用技术专业工学博士学位, 主要研究方向为场景建模、虚拟现实和可视化。E-mail: yuyeyue3841@sina.com。

限于 3DMAX、MAYA、AUTOCAD 等商业建模软件,其建模速度慢,模型尺寸、位置等信息获取困难。

目前,在建筑物重建方面的研究很多,根据数据源的不同,可以分为两大类:基于图像数据的重建和基于点云的重建。LiDAR 数据是一种激光扫描点云数据,由于其具有精确度高、采集速度快、不受天气因素影响等优点,因而被广泛地应用于城市 3 维建模<sup>[1]</sup>、城市建筑变化检测、突发事件的快速测量等领域。

在基于 LiDAR 数据的建筑物识别和重建方面,已有一些研究。

很多方法都首先将带有高度信息的 LiDAR 数据转化为深度图,如:DSM (digital surface model)<sup>[2]</sup>,或进行水平、垂直方向上的投影<sup>[3]</sup>,然后,利用图像分割的方法来检测建筑物。文献[4]利用相邻 DSM 法向量的方差为特征查找平面片段,然后将平面片段进行聚类,以确定建筑物轮廓,从而进行建筑物的分割。文献[5]利用一种形态滤波器来分隔地面点和非地面点,然后利用区域增长法来识别建筑物。文献[6]在文献[5]方法的基础上进行改进,通过一个 clean-up 和分类的步骤来获得更精确的建筑物轮廓。

由于在将 LiDAR 数据转换为高度图时会产生插值误差,因此,一些研究者们直接在原始的点云数据上进行操作。这类方法通常都是利用高度值、高度的连续性<sup>[7]</sup>以及高度的方差<sup>[8]</sup>等几何属性来判断哪些点属于建筑物,然后基于法向量的相似性来进行平面拟合和聚类<sup>[9]</sup>,从而识别建筑物。

为了提高几何重建精度,很多研究者试图将 LiDAR 与图像等其他数据进行融合,以克服单种数据源带来的缺陷。文献[10]通过融合从航空图像中提取的边缘信息和从 LiDAR 数据中提取的面信息来进行建筑物的重建。文献[11]通过融合激光深度数据和航空图像来进行建筑物屋顶的重建,并提出了一个 CSR (construct-shape-refine) 的重建过程。文献[12]把 2 维 GIS (geographic information system) 数据和 LiDAR 点云数据进行融合,通过一种投影的方法来生成建筑物模型。然而,这些方法中重建结果的精度不仅受数据质量的影响,还受不同数据之间注册、校正误差的影响。

尽管有上述的一些研究成果,在建筑物识别和重建方面的研究空间仍然很大,尤其是针对稀疏的

LiDAR 数据。高密度 LiDAR 数据的获取会增加数据获取时间,增大开销。统计表明,在一个 500 m<sup>2</sup> 的扫描任务中,获得 3 m 间隔的 LiDAR 数据点(约为 0.11 点/m<sup>2</sup>)比获得 1 m 间隔的 LiDAR 数据点(约为 1.0 点/m<sup>2</sup>),每平方米的平均费用增加了 150 美元<sup>[13]</sup>。因此,研究基于稀疏 LiDAR 数据的建筑物重建可以缩短数据获取时间,节省费用,同时减少对于海量数据存储和处理所消耗的时间。

2005 年 9 月, Katrina 飓风袭击了美国的新奥尔良城市,在飓风袭击之后,美国政府计划进行该城市的重建工作。在 2002 年,美国联邦应急管理局 (FEMA) 开展了路易斯安那州的 LiDAR 扫描项目,该项目中获得的 LiDAR 数据是唯一能反映 Katrina 飓风发生之前新奥尔良城市面貌的数据。为了支持该城市重建工作方面的研究,政府在官方网站上公开了这些数据。然而,由于当时 LiDAR 技术的限制,其数据密度小,仅为约 0.16 点/m<sup>2</sup> (与一些参考文献中 LiDAR 数据密度的比较如表 1 所示),点间隔为 2.5 m,平均用来表示每个屋顶平面的点不超过 20 个。因此,这也给重建工作带来了困难。

表 1 LiDAR 数据密度比较

Tab. 1 LiDAR point data density comparison

文献	LiDAR 数据密度/(点/m <sup>2</sup> )	数据格式
[2]	2.8	深度图
[4]	10	深度图
[5]	0.25 ~ 1	深度图
[7]	7	点云
[8]	9	点云
[9]	0.67	点云
[10]	1.6	深度图
[12]	0.67	点云

我们在基于 LiDAR 的城市建模方面已经做了一些研究<sup>[14-16]</sup>,包括道路的重建和大型建筑物的重建等,如图 1 所示:(a)为原始 LiDAR 数据的可视化结果;(b)为对原始 LiDAR 数据进行三角网格化的结果;(c)为大型建筑物重建和道路重建的结果。在这里,大型建筑物可能是商业建筑、一些政府机关的建筑等,而居民区建筑物通常都很小,如图 1(c)所示,图中左下角灰色四边形区域内显示的就是一个居民区域。

由于表示居民区建筑物的 LiDAR 数据点很少,因此其重建难度远远大于大型建筑物的重建。

针对美国新奥尔良地区稀疏的 LiDAR 点云数据,提出一种基于 LiDAR 数据的居民区建筑物重建方法。该方法利用最小包围轮廓(MBC)来进行屋顶

分割,以得到分别属于每个建筑物的屋顶数据,然后通过屋顶类型识别和模型匹配,来实现建筑物的重建。

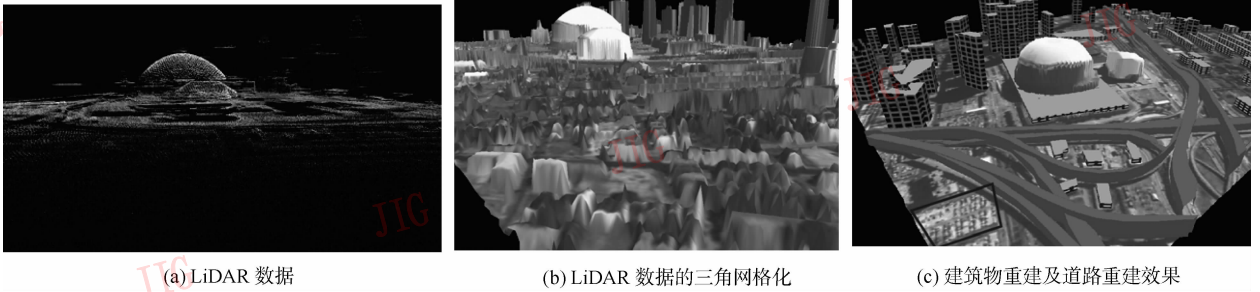


图1 已有工作及相关效果图

Fig.1 Related results of the former research

## 1 算法描述

算法由3个部分组成:预处理、屋顶分隔和建筑物重建,算法流程如图2所示。

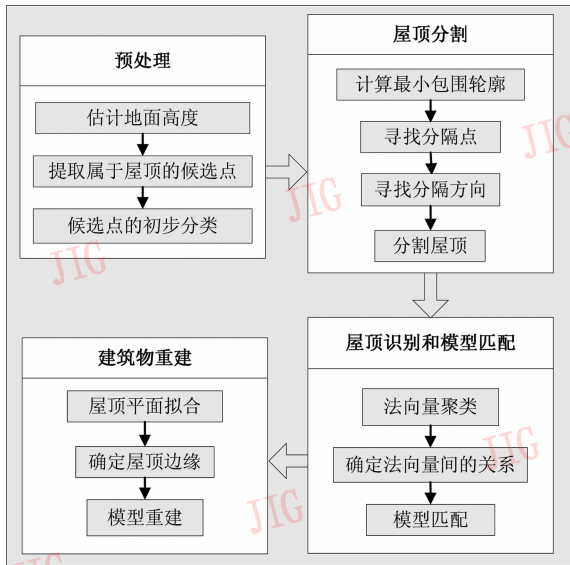


图2 算法流程示意图

Fig.2 Workflow of the building reconstruction method

### 1.1 预处理

为了形象地对 LiDAR 点云数据进行分析,首先将其转化为深度图,图3(a)所示为某部分城市区域转化为深度图的效果。然后通过对道路的识别<sup>[17]</sup>来对这些区域进行分块,每一块近似对应于一个小区。通过分块,可以对每块单独进行研究,通过对每块的重建从而重建整个城市。图3(b)为对图3(a)中

的A块区域放大的结果,可以看出,由于 LiDAR 点数据过于稀疏,因而无法从中检测出建筑物的轮廓。尽管可以通过插值的方法进行处理,但这会导致模糊和不连通现象(如图3(c)所示)。因此,论文直接基于原始 LiDAR 点云数据进行处理。

首先,基于点云数据构造出 TIN (triangulated irregular network) 模型,如图3(d)所示。然后,判断哪些点属于地面,并估计地面的高度,这一步的判断原则是:

- 1) 由地面点构成的三角面片,其法向量近似垂直向上;
- 2) 地面点的高度具有局部最低性<sup>[18]</sup>。

由于城市地形变化缓慢,因此,针对每一块区域,我们认为其地面高度是不变的。基于上述原则,首先计算每个三角形的高度  $H_{triangle} = (H_{p1} + H_{p2} + H_{p3})/3.0$ ,其中, $H_{triangle}$ 表示三角形的高度, $H_{p1}, H_{p2}, H_{p3}$ 分别表示各个顶点的高度。然后,计算三角形的法向量

$$v_{normal} = Normalize(p2 - p1 \times p3 - p2)$$

其中, $v_{normal}$ 为法向量,Normalize为正规化操作, $p1, p2, p3$ 为呈逆时针方向的顶点坐标。

根据法向量和三角形的高度,按上述判断原则,找出属于地面的 LiDAR 点,取其平均高度为地面的高度。

在每块区域中提取属于屋顶的候选点,其判断步骤如下:

- 1) 屋顶候选点高度与地面高度的差值超过一个阈值(在这里,设为2 m);
- 2) 屋顶候选点与相邻点的距离不超过一个阈

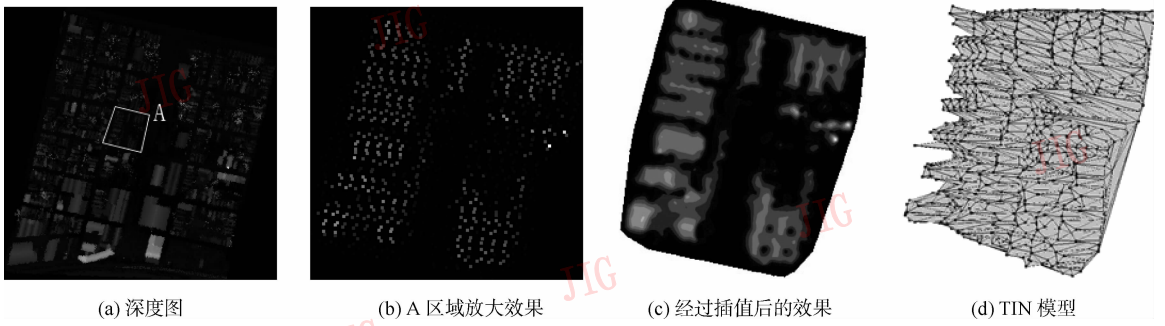


图 3 LiDAR 数据集

Fig. 3 LiDAR data set

值(在这里,设为点的平均距离的 1.5 倍),因为超过这个阈值的点很可能来自一些植物。

提取结果如图 4(a)所示,其中红色的点为屋顶候选点。遍历 TIN 模型中连接屋顶候选点的边,根据图的联通性,可以把这些点聚类为几个集合,如

图 4(b)所示。

图 4(c)为相对应的卫星图像,从此图中可以看出,很多 LiDAR 点集仍对应多个建筑物屋顶,如图中的 A、B、C 所示,这给后面的屋顶类型识别和模型匹配操作带来困难,因此,需要进一步进行分割。

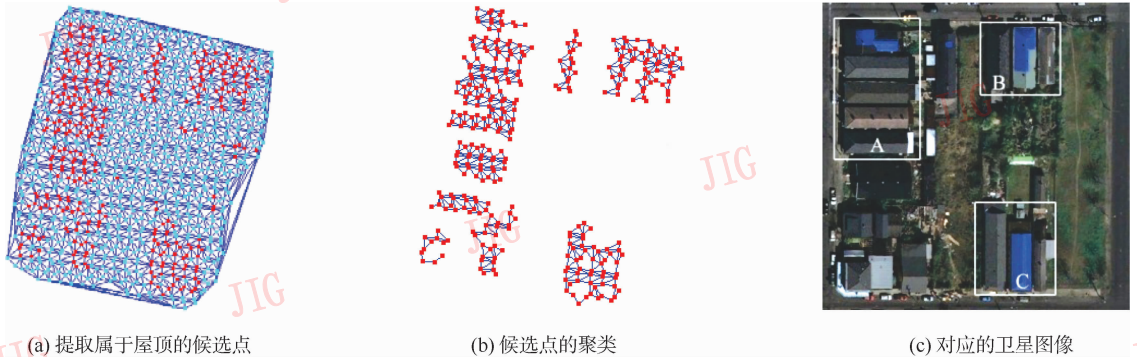


图 4 屋顶候选点提取和聚类结果

Fig. 4 The extraction and classifying result of roof candidate points

### 1.2 基于最小包围轮廓的屋顶分割

相邻居民区建筑物通常都具有相同的几何结构,且方向相似,因此,可以基于最小包围轮廓(MBC)来进行屋顶的进一步分割。由于在新奥尔良地区中居民区建筑物基本呈矩形形状,因此,本文中利用矩形来表示其轮廓。

在这里,把不属于屋顶且高度比屋顶候选点低的 LiDAR 数据点定义为分割点,这些点位于两个相邻的建筑物之间。位于最小包围矩形中的分割点,可以起到屋顶分割的提示作用,从而进行屋顶的分割。

#### 1.2.1 计算最小包围矩形

包围一个凸多边形的最小包围矩形有一边和多边形的某条边是共线的<sup>[19]</sup>。因此,需要首先计算 LiDAR 数据点集的凸包。本文中,选用格雷厄姆扫

描法进行计算,结果如图 5 所示。

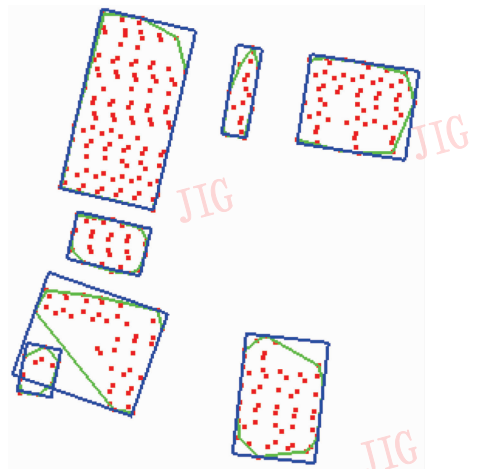


图 5 点集的凸包和最小包围矩形

Fig. 5 Convex hull and minimum bounding rectangle of points

基于凸包的每条边,计算相应的包围矩形。计算每个包围矩形的面积,面积最小者即为所求。

### 1.2.2 寻找分割点

分割点位于两个建筑物之间,但并不是屋顶候选点,因此,需要判断在非屋顶候选点中,哪些位于点集内部,由于凸包更精确地表示了点集的轮廓,因此可以利用凸包进行判断,判断步骤如下:

1) 分别计算凸包的最小、最大  $X$ 、 $Y$  坐标值  $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 、 $Y_{\min}$  和  $Y_{\max}$ , 如果点的坐标  $(x_i, y_i)$  不满足  $(X_{\min} < x_i < X_{\max}) \& (Y_{\min} < y_i < Y_{\max})$ , 则点不在凸包内,被删除;

2) 假设凸包的面积为  $A_{ch}$ , 计算由目标点和凸包的每两个相邻顶点构成的三角形面积之和, 记为  $A_p$ 。如果  $A_{ch} = A_p$ , 则可以确定目标点在凸包内部。

离边界很近的非屋顶候选点不可能是屋顶分割点,因而被排除。而对于一些属于同一点集的建筑物,他们的尺寸不一定会一样,这样会导致较短的建筑物的一端或两端出现很多非屋顶候选点(如图6所示),这些点也不可能是屋顶分割点,同样需要进行排除。基于数据点的密度,设计了一个滤波窗口,利用活动框运算法 (gliding box algorim) 在最小包围矩形内移动窗口,从而进行判断。

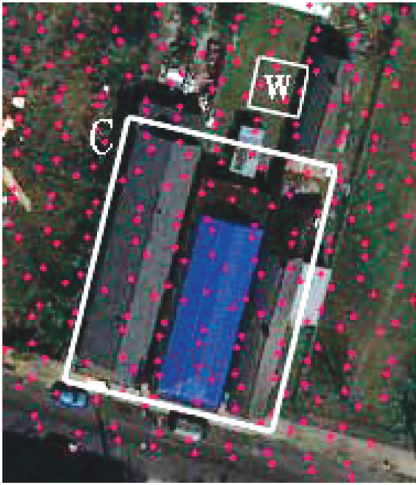


图6 较短的建筑物两端出现很多非屋顶候选点

Fig.6 Non-roof candidate points appear at the end of short buildings

### 1.2.3 确定分割方向

找到分割点后,需要确定分割方向,且分割方向平行于最小包围矩形的一组边。

在忽略较小距离(小于某个阈值)的情况下,分割点在平行于分割方向上的平均距离  $D_p$  会小于垂

直于分割方向上的距离  $D_v$ 。这是因为,在分割方向上,分割点之间的平均距离是和 LiDAR 数据点间的平均距离一致的,而在垂直于分割的方向上,其平均距离和建筑物的宽度是一致的,很明显,  $D_p < D_v$ 。如图7(a)所示,  $n_1$  方向上的平均距离  $D_{n_1} = (D_{L_1L_2} + D_{L_3L_4})/2$ , (其中,  $D_{L_2L_3}$  由于太小而被忽略),  $n_2$  方向上的平均距离  $D_{n_2} = D_{L_7L_8}$  (其中,  $D_{L_5L_6}$ ,  $D_{L_6L_7}$  被忽略)。由于  $D_{n_1} < D_{n_2}$ , 因而确定  $n_2$  为屋顶分割方向。

由于 LiDAR 点很稀疏,因而会存在一种特例,即只有1个分割点存在的情况,如图7(b)所示。此时,无法进行分割方向的判断。在这里,采取保留2个分割方向的办法,即在两个方向上分别进行分割,保留分割后的点集,等到在下一步进行屋顶类型识别时再作进一步的判断。这样,正确分割方向上的屋顶会被识别并重建,而错误分割方向上的点集会由于无法判断属于哪种屋顶类型而被抛弃。

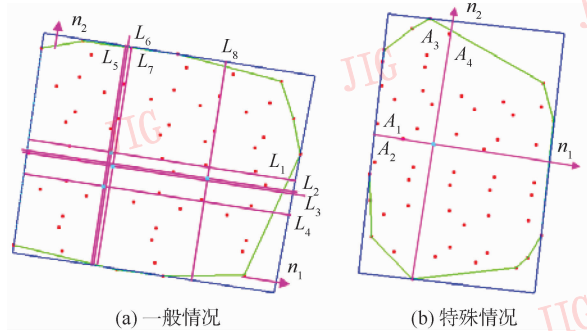


图7 判断屋顶分割方向

Fig.7 Determining the building roof separating direction

## 1.3 屋顶类型识别及模型匹配

在我们的研究区域中,存在几种不同类型的屋顶,如 Gable 和 Hip 屋顶。每种屋顶都由一个或更多的平面组成,不同平面的法向量间存在约束关系,基于这些约束关系,可以进行屋顶类型的识别。

在进行模型匹配时,将 TIN 模型中的三角面片按其法向量朝向的不同进行聚类,每类代表一个屋顶平面。假设总共有  $N$  个三角面片的集合,每个集合中的三角面片数记为  $n_i, i = 0, 1, 2, \dots, N$ , 按升序对  $n_i$  进行排列,即  $n_1 > n_2 > \dots > n_N$ 。考虑到噪声的影响,仅取集合中的前几类进行计算。如果这几类中法线之间的关系满足上述特征,屋顶的类型即被识别。

## 1.4 建筑物的重建

建筑物重建分为平面拟合,屋顶边界确定和模

型重建 3 个步骤:

1) 基于聚类后的 LiDAR 点数据, 进行平面拟合, 以确定每个屋顶平面的倾斜度和走向, 从而绘制出屋顶平面。

2) 屋顶平面的交线即为屋脊线。以屋脊线为基准, 计算构成屋顶平面的 LiDAR 点数据的最大包围矩形(屋脊线为最大包围矩形的一条边), 将除屋脊线外的其他 3 条边按照点云密度向外扩展, 即可得到屋顶的边界。

3) 简单建筑物模型重建, 屋顶边界确定后, 根据房屋所处位置的地面高度(在预处理中计算得出), 即可重建建筑物模型。

4) 复杂建筑物模型重建, 复杂建筑物通常由几个简单建筑物组成, 因此, 在进行复杂建筑物重建时, 将其分解为简单建筑物进行类型识别, 模型匹配和重建。对新奥尔良地区的复杂建筑物进行研究, 发现其均由 Hip 和 Gable 屋顶组成, 一共存在 4 种组合情况, 如图 8 所示。其中, 第 1 类和第 2 类为新奥尔良地区著名的 Camelback 类型的屋顶, 组成这两类屋顶的简单建筑物高度是不同的, 基于此可以对此复杂建筑物进行分解。第 3 类和第 4 类中, 由于组成这两类屋顶的简单建筑物高度相同, 因此, 只有通过图像处理的方法来识别建筑物屋顶边界, 然后通过边界分解的方法来进行划分。

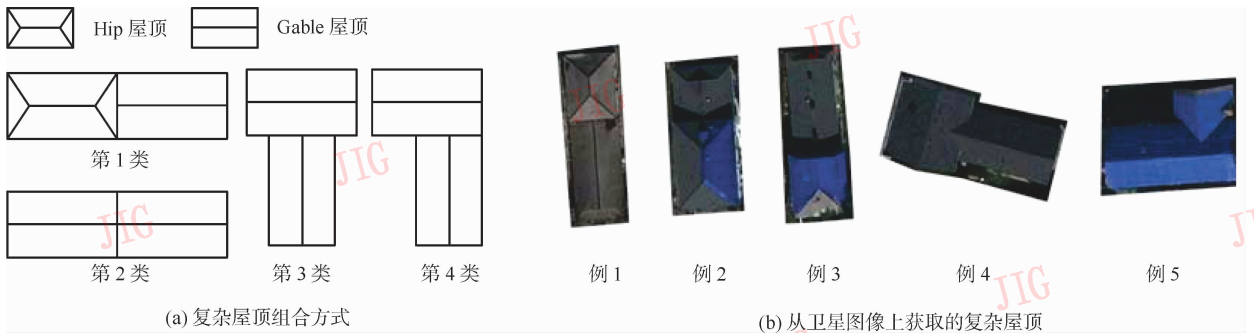


图 8 复杂屋顶

Fig. 8 Complex building

## 2 实验结果与分析

论文中的实验数据来源于美国联邦应急管理局于 2002 年执行的路易斯安那州的 LiDAR 项目。该数据是利用 Leica Geosystems ALS40 工具获取的, 其规范如表 2 所示。

表 2 LiDAR 数据规范  
Tab. 2 LiDAR data specifications

规则参数	规范
视角	40°
重叠度/%	30
每秒脉冲数	30 000
获取高度/英尺	8 000
采样点间隔/m	3
垂直精度/英尺	0.5 ~ 1
水平精度/英尺	3 ~ 6

利用论文中的方法对新奥尔良城市区域的居民区建筑物进行重建, 其重建结果如图 9 和图 10 所示。对重建的精确性(表 3)和计算代价进行分析: 在例 1 中(图 9), 一共有 20 个居民区建筑物, 19 个被成功识别并进行了重建, 重建率为 95.0%, 其中, 用椭圆标识的建筑物没有被重建, 这是由于用来表示这个建筑物的 LiDAR 样本点太少的原因。而在例 2 中(图 10), 一共有 21 个居民区建筑物, 20 个被成功识别并进行了重建, 重建率为 95.2%。其中, 用椭圆标识的建筑物没有被重建, 这是由于其他 LiDAR 点数据的影响。在图 10(b)中, 白色矩形处的区域似乎为建筑物, 但是从图 10(a)中给出的高度信息可以判断出它不是。

在电脑配置为双核 Intel Core 处理器, 频率为 2.4 GHz, 内存为 2 GB 的情况下, 基于 C++ 和 Matlab 库, 算法的时间耗费如表 4 所示。

由上述可知, 论文中提出的基于稀疏 LiDAR 数据的建筑物重建方法能够基本实现居民区建筑物的重建, 获得较好的重建率和重建效果, 且计算时间耗费较少, 能够满足虚拟现实系统的需要。

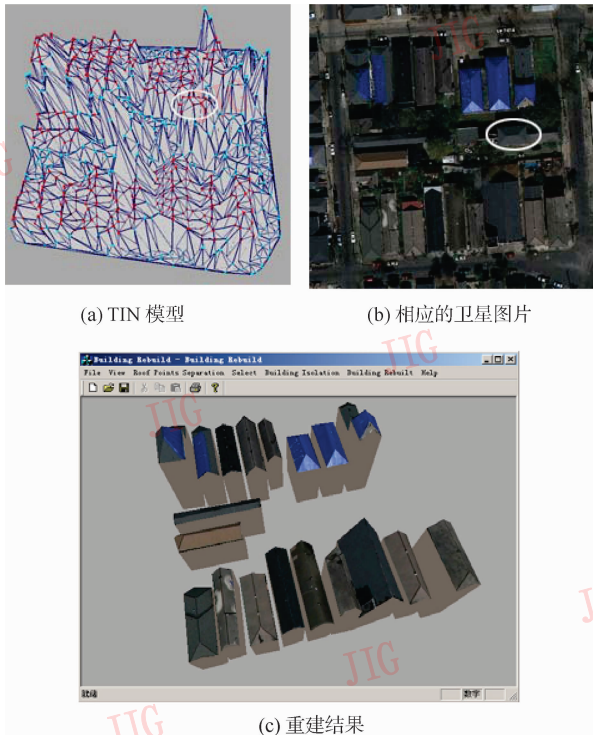


图 9 建筑物重建示例 1

Fig. 9 Residential building reconstruction example 1

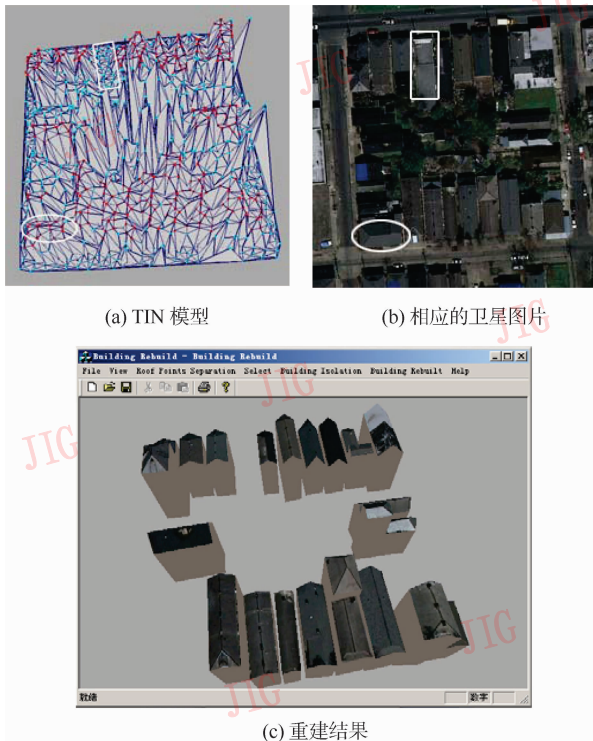


图 10 建筑物重建示例 2

Fig. 10 Residential building reconstruction example 2

表 3 建筑物重建率评估

Tab. 3 Reconstruction rate assessment

	建筑物总数	重建的建筑物数量	重建率/%
例 1	20	19	95
例 2	21	20	95.2

表 4 建筑物重建所需的时间

Tab. 4 Computational time for reconstruction

	例 1	例 2
LiDAR 点数量	1 448	1 623
三角面片数	2 874	3 226
重建所需时间/ms	8 375	8 809

### 3 结 论

在进行居民区建筑物重建时,在面对稀疏 LiDAR 数据的情况下,提出了一种新的建筑物重建方法。该方法的核心是基于最小包围轮廓的屋顶分割,基于此,确定了属于建筑物屋顶的数据点集,从而为屋顶识别、屋顶类型匹配以及建筑物重建打下了基础。

以美国新奥尔良地区的 LiDAR 数据为实验依据,对论文中提出的方法进行了验证。实验结果表明,该方法能够基于稀疏 LiDAR 数据重建居民区建筑物,达到较高的重建效率,且重建结果和计算速度均可以满足虚拟现实系统的需要。而如何扩大模型库,以支持更多类型的建筑物的重建,将是进一步工作的目标。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Liu Bo, Wang Zhangye, Wang Liying, et al. Efficient modeling and real-time rendering of large-scale urban scenes [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2008, 20 ( 9 ): 1153-1162. [ 刘波,王章野,王丽英,等. 大规模城市场景的高效建模及其实时绘制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20 ( 9 ): 1153-1162. ]
- [ 2 ] Ren Zizhen, Cen Minyi, Zhang Tonggang, et al. Building extraction from LiDAR data based on shape analysis of contours [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44 ( 1 ): 83-88. [ 任自珍,岑敏仪,张同刚,等. 基于等高线形状分析的 LiDAR 建筑物提取[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44 ( 1 ): 83-88. ]
- [ 3 ] Liang Xinlian, Zhang Jixian, Li Haitao. Regular building model reconstruction from airborne laser Scanning data [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12 ( 4 ): 641-647. [ 梁欣廉,张继贤,

- 李海涛. 基于机载激光雷达数据的简单规则建筑物模型重建[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12 (4): 641-647. ]
- [ 4 ] Rottensteiner F. Automatic generation of high-quality building models from LiDAR data [ J ]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2003, 23 (6) : 42-50.
- [ 5 ] Zhang K, Yan J, Chen S. Automatic construction of building footprints from airborne LiDAR data [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44 (9) : 2523- 2532
- [ 6 ] George H C, Charalampidis D, Alphonso K. On the determination of building footprints from LiDAR data [ C ]//Proceedings of the 40th Southeastern Symposium on System Theory. New Orleans, LA: IEEE, 2008: 132-136.
- [ 7 ] Vosselman G. Building reconstruction using planar faces in very high density height data [ C ]//Proceedings of ISPRS Conference on Automatic Extraction of GIS Objects from Digital Imagery. München: ISPRS, 1999: 87-92.
- [ 8 ] Verma V, Kumar R, Hsu S. 3D building detection and modeling from aerial LiDAR data [ C ]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE, 2006: 2213-2220.
- [ 9 ] Zeng Q, Lai J, Li X, et al. Simple building reconstruction from LiDAR point cloud [ C ]//Proceedings of International Conference on Audio, Language and Image Processing. Shanghai: IEEE, 2008: 1040-1044.
- [ 10 ] Chen L C, Teo T A, Rau J Y, et al. Building Reconstruction from LIDAR Data and Aerial Imagery [ EB/OL ]. [ 2011-03-10 ]. [http://dpl.csr.sr.ncu.edu.tw/Journalpapers/J2005\\_IGARSS\\_DBM.pdf](http://dpl.csr.sr.ncu.edu.tw/Journalpapers/J2005_IGARSS_DBM.pdf).
- [ 11 ] Jaw J J, Cheng C C. Building Roof Reconstruction by Fusing Laser Range Data and Aerial Images [ EB/OL ]. [ 2011-03-10 ]. [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/3b\\_pdf/120.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/3b_pdf/120.pdf).
- [ 12 ] Schwalbe E, Maas H G, Seidel F. 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections [ C ]//ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005". Enschede, the Netherlands: ISPRS, 2005: 209-214.
- [ 13 ] Fugro Earthdata, inc. LiDAR Mapping Fact Sheet [ EB/OL ]. (2010-11-07) [ 2011-03-10 ]. [http://www.fugroearthdata.com/pdfs/FCT\\_Lidar-Educational\\_11-07.pdf](http://www.fugroearthdata.com/pdfs/FCT_Lidar-Educational_11-07.pdf).
- [ 14 ] Liu Xiaoping, Zhu Xiaoqiang, Yu Ye, et al. Building algorithm of triangulation based on LiDAR point clouds [ J ]. Journal of Software, 2008, 19 (Sup. ) : 1-9. [ 刘晓平, 朱晓强, 余烨, 等. 基于 LiDAR 点云数据的三角网格算法 [ J ]. 软件学报, 2008, 19 (增刊) : 1-9. ]
- [ 15 ] Liu Xiaoping, Zhu Xiaoqiang, Yu Ye, et al. The improved extraction of urban roads based on dynamic programming [ J ]. Journal of Engineering Graphics, 2010, 31 (4) : 183-188. [ 刘晓平, 朱晓强, 余烨, 等. 基于动态规划的城市道路提取改进算法 [ J ]. 2010, 31 (4) : 183-188. ]
- [ 16 ] Yu Ye, Liu Xiaoping, Yuan Xiaohui, et al. City modeling and simulation for flood disaster assessment [ J ]. Journal of System Simulation, 2010, 22 (9) : 2136-2140. [ 余烨, 刘晓平, 袁晓辉, 等. 面向洪水灾害评估的城市建模与仿真 [ J ]. 系统仿真学报, 2010, 22 (9) : 2136-2140. ]
- [ 17 ] Sama V, Yuan X, Hu L, et al. Road Extraction from LiDAR using Geometric and Elevation Features [ DB/CD ]. The 2nd International Conference on Earth Observation for Global Changes, Chengdu, China, May 25-29, 2009.
- [ 18 ] Matei B C, Sawhney H S, Samarasekera S, et al. Building segmentation for densely built urban regions using aerial LiDAR data [ C ]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage, AK: IEEE, 2008: 1- 8.
- [ 19 ] Toussaint G. Solving geometric problems with the rotating calipers [ C ]//Proceedings of IEEE Melecon. Athens, Greece: IEEE, 1983: 1- 8.