

基于数据融合的居民区建筑物重建方法研究

余 焯¹, 刘晓平¹, Bill P. Buckles²

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院 VCC 研究室, 安徽合肥 230009; 2. 北德克萨斯大学计算机科学与工程系, 美国丹顿 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, 提出了一种基于 LiDAR 数据和卫星图像进行融合的居民区建筑物重建方法. 该方法利用 LiDAR 数据点集的边界来定位卫星图像上的感兴趣区域, 利用从感兴趣区域中提取的关键提示线来实现屋顶的分割, 从而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, 从而实现居民区建筑物的重建. 实验表明, 该方法在进行居民区建筑物重建时, 能达到较高的重建率, 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: 数据融合; 建筑物重建; 关键提示线; LiDAR; 屋顶分割

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2014)02-0250-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.02.007

Residential Building Reconstruction Based on Data Fusion

YU Ye¹, LIU Xiao-ping¹, Bill P. Buckles²

(1. VCC Division, School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

2. Department of Computer Science & Engineering, University of North Texas, Denton 76201, USA)

Abstract: Facing the sparse LiDAR (Light Detecting and Ranging) data of New Orleans area in America, a new residential building reconstruction method based on the fusion of LiDAR and satellite imagery is proposed. The main contribution of this work is the automatic isolation of roof points and roof type recognition. Using LiDAR data boundary to identify the ROI area in satellite imagery, and using cue lines extracted from ROI areas, the building roofs are isolated. Then, based on the relationship of normal vectors, building types are recognized, and then buildings are reconstructed. Experiments show that our method can successfully reconstruct residential buildings given relatively sparse LiDAR samples, achieve a high reconstruction rate in a reasonably short time, which meet the requirement of virtual reality systems.

Key words: building reconstruction; data fusion; cue lines; LiDAR; roof isolation

1 引言

三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限于 3DMAX、MAYA、AutoCAD 等商业建模软件, 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. 普通可见光图像受阴影^[1]、纹理影响较大, 在对建筑物进行分割时受到一定限制. 随着可获取 SAR

(Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达) 图像分辨率的提高, 单栋建筑物在图像上的几何特征越来越明显, 使得基于高分辨率 SAR 图像进行建筑物提取和三维重建成为可能. 文献[2]、[3]分别提出了基于高分辨率 SAR 图像进行建筑物分割及高度反演的的方法, 使得基于 SAR 图像提取高程数据、进行建筑物重建成为可能. 尽管如此, SAR 图像分辨率仍然受限, 且斑点噪声严重、建筑物区域纹理结构复杂, 因此, 基于 SAR 图像进行居民区建筑物的重建尚有许多研究难点有待解决.

LiDAR (Light Detecting and Ranging) 数据是一种激光扫描点云数据, 具有精确度高、采集速度快、不受天气因素影响等优点, 被广泛地应用于城市三维建模、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.

很多方法首先将带有高度信息的 LiDAR 数据转化为深度图,如:DSM (Digital Surface Model)^[4],然后利用图像分割的方法来检测建筑物.文献[5]利用相邻 DSM 法向量的方差为特征查找平面片断,将平面片断进行聚类,以确定建筑物轮廓,进行建筑物分割.文献[6]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.为避免在将 LiDAR 数据转换为高度图时产生的插值误差,一些研究者们直接在原始的点云数据上进行操作.这类方法通常利用高度值、高度的连续性^[7]以及高度的方差^[8]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^[9],从而识别建筑物.

为提高几何重建精度,研究者们试图将 LiDAR 数据与图像等其它数据进行融合,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]把二维 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.

而针对建筑物建模方法本身,其选取受 LiDAR 数据密度和建模效果需求的影响很大.文献[12]提出了一种利用基元(如球体、圆柱体、坡面、平面等)来拟合 LiDAR 数据的建筑物重建方法;文献[13]采用预先定义好的重建约束,如共面性、对称性、凸包性等对复杂的建筑物进行分解,通过对分解后基本单元的重建来实现整个居民区建筑物的建模.这类方法可以达到很好的重建效果,但对 LiDAR 数据的密度要求较高.文献[14]利用拉伸建筑物轮廓,并利用平面或多边形网格来表示屋顶的方法重建建筑物,该方法对 LiDAR 数据密度的要求相对较低,同时,也能达到较好的重建效果.在对重建效果要求不高的场合,可以仅仅通过拉伸轮廓^[15]或基于点元构建三角网格^[16]的方法实现建筑物重建.

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 平方米的扫描任务中,获得 3 米间隔的 LiDAR 数据点(约为 0.11 点/米²)比获得 1 米间隔的 LiDAR 数据点(约为 1.0 点/米²),每平方米的平均费用节省了 150 美元^[17].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.在我们的研究中,所使用的数据来源于美国路易斯安娜州的新奥尔良地区,密度仅为约 0.16 点/米²(与一些参考文献中 LiDAR 数据密度的比较见表 1 所示),点间隔为 2.5 米,平均用来表示每个屋顶平面的点不超过 20 个.

表 1 LiDAR 数据密度比较

参考文献	LiDAR 数据密度(点/米 ²)	数据格式
文献[4]	2.8	深度图
文献[5]	10	深度图
文献[6]	0.25 ~ 1	深度图
文献[7]	7	点云
文献[8]	9	点云
文献[9]	0.67	点云
文献[10]	1.6	深度图
文献[11]	0.67	点云

本文针对美国新奥尔良地区稀疏的 LiDAR 点云数据,提出了一种基于 LiDAR 数据和卫星图像的居民区建筑物重建方法.该方法利用关键提示线来进行屋顶分割,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.

2 课题背景

该课题来源于中美国际合作交流项目“一种新的经济和环境规划分析工具, LiDAR 应用领域的扩展”.

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, The Federal Emergency Management Agency)开展了路易斯安娜州的 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,因此,这也给重建工作带来了困难.

作者所在研究团队在基于 LiDAR 的城市建模方面已经做了一些研究^[18,19],包括道路的重建和大型建筑物的重建等.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.

论文中所使用的卫星图像来源于 Google Map.在 2005 年的 Katrina 飓风之后, Google Map 迅速更新了新奥尔良地区的卫星图像,使大家可以看到城市的受灾程度.然而,在 2007 年 3 月,灾后的卫星图像又被灾前的所代替,这也为 new 奥尔良地区城市重建的研究提供了另外一种数据源支持.

由于 LiDAR 数据来源于 1983 年的北美数据集 (North American Datum of 1983, 简称 NAD83), 采用的是通用墨卡托投影 (Universal Transverse Mercator, 简称 UTM), 因此, LiDAR 点云数据的投影坐标和卫星图像上点的像素坐标之间可以通过如下方式建立相互联系 (如图 1 所示):

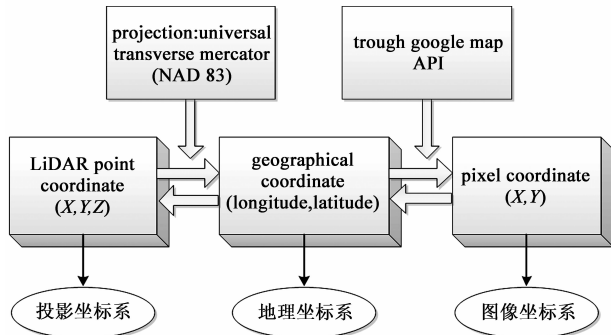


图1 坐标系之间的转换

(1) LiDAR 点云的投影坐标系和地理坐标系之间的转换可以利用 UTM 的投影原理来实现。

(2) Google Map API 提供了地理坐标系和卫星图像的像素坐标间相互转换的功能。

注意: 当从图像坐标系转化为投影坐标系时, 点的深度信息会丢失。

因此, 通过坐标转换, 可以建立 LiDAR 点云数据和卫星图像之间的关联, 将两种数据对应起来, 进行相互融合, 以实现建筑物的重建。

3 算法描述

该算法充分利用了 LiDAR 点云和卫星图像各自的特点, 进行建筑物屋顶的分割, 其整体思路描述如下:

(1) 基于 LiDAR 点云数据的高度特性, 提取屋顶候选点, 并对其进行初步划分, 划分后的每个点集可能对应几个建筑物。

(2) 在上述初步划分的基础上, 计算每个点集的边界, 寻找此边界在卫星图像上的对应边界, 以对应边界内的图像为感兴趣区域, 在该区域内提取关键提示线。

(3) 将关键提示线反投影到点云数据的三维空间中, 形成屋顶间的分隔线, 以此分隔线为依据, 对第一步中的点集进行进一步的分割。

(4) 针对分割后的每个屋顶, 进行屋顶类型识别及房屋的重建工作。

该算法的特点体现在:

(1) 利用点集的边界在卫星图像上的对应边界为感兴趣区域, 缩小了对卫星图像进行处理的范围, 提高了关键提示线提取的精度。

(2) 利用从图像中提取的关键提示线对三维点集进行分割, 克服了 LiDAR 点集内部屋顶无法进一步进行分割的缺点, 成功利用点云和卫星图像的融合, 实现了屋顶的分割。

从算法的处理过程进行分析, 该算法由三个步骤组成: 预处理、屋顶分割和建筑物重建 (如图 2 所示)。针对每个步骤的详细描述如后续各小节所示。

3.1 预处理

为避免将点云数据转化为深度图时造成的精度损失, 本文算法直接基于原始 LiDAR 点云数据进行。首先, 基于点云数据构造 TIN (Triangulated Irregular Network) 模型; 然后判断哪些点属于地面, 在此基础上, 提取属于屋顶的候选点^[20]。

提取结果如图 3(a) 所示, 其中红色的点为屋顶候选点。图 3(b) 为对应的卫星图像, 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, 这会给后面的屋顶类型识别和模型匹配操作带来困难, 因此, 需要进行进一步的分割, 最终的目标是分割出的每个点集对应一个屋顶。进一步的分割将基于从卫星图像上提取的关键提示线进行, 详细描述如下节所示。

3.2 基于关键提示线的屋顶分割

首先计算上一步中获取点集的边界, 将此边界投影到卫星图像上, 利用其在卫星图像上的对应边界为感兴趣区域, 从感兴趣区域中提取关键提示线。将关键提示线反投回三维空间, 以其在三维空间中的对应提示线为分割线, 进行屋顶的进一步分割。

3.2.1 候选点集边界提取

若能获得每组候选屋顶点的边界, 并将这些边界投影到对应的卫星图像上, 则可以获得卫星图像上对应的感兴趣区域 (屋顶的边缘线只可能在感兴趣区域之内)。

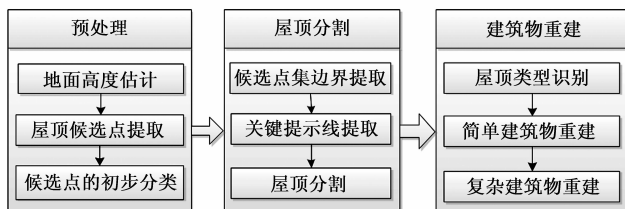
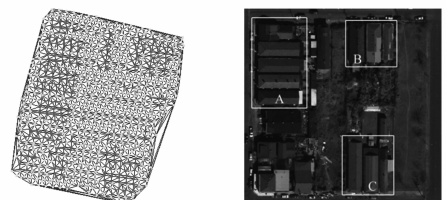


图2 算法流程示意图



(a) 提取属于屋顶的候选点

(b) 对应的卫星图像

图3 屋顶候选点提取和聚类结果

候选屋顶点的边界有几种描述方式:凸包、非凸包或点集的最小包围矩形.非凸包是点集的最紧密边界,但由于点集的不规则性,非凸包形状复杂;而为了避免在后续的步骤中引入过多的计算,边界的形状越简单越好.因此,需要在简单的形状和紧密的边界之间寻找平衡.

分别用 \widehat{B}_j , \check{B}_j ,和 \hat{B}_j 来表示点集 $B_j = \{p_1, p_2, \dots, p_r\}$ 的非凸包、凸包和最小包围矩形,用 $\alpha(\cdot)$ 来表示面积,已知:

$$(1) \widehat{B}_j \subseteq \check{B}_j \subseteq \hat{B}_j$$

(2) $\check{B}_j \setminus \widehat{B}_j$ 和 $\hat{B}_j \setminus \check{B}_j$ 分别表示两个边界之间的多边形区域,该区域内无屋顶候选点.

(3)若 $r \neq 0$,则存在 p_m 使得 $\alpha(p_m) \geq \alpha(p_i), i = 1, 2, \dots, r$.

则点集边界的表示方法可以按如下规则依次进行选择:

(4) \widehat{B}_j ,若 $\alpha(\check{B}_j) \gg \alpha(\widehat{B}_j)$ 或 $\alpha(p_m)/\alpha(\check{B}_j \setminus \widehat{B}_j)$ 很大(即 \check{B}_j 内没有屋顶候选点的部分中,有一块区域面积很大)

(5) \check{B}_j ,若 $\alpha(\hat{B}_j) \gg \alpha(\check{B}_j)$ 或 $\alpha(p_m)/\alpha(\hat{B}_j \setminus \check{B}_j)$ 很大

(6) \hat{B}_j

3.2.2 关键提示线提取

从卫星图像中可以提取房屋投影上的直线,然而由于阴影、遮挡、建筑物纹理的不一致性等因素,提取屋顶边缘直线仍然是一个挑战.若将屋顶边缘线投影到三维 LiDAR 数据点集中,可起提示作用,用于分割屋顶,因此,此处将屋顶边缘线称为关键提示线.

为了降低关键提示线的提取难度,将候选点集边界投影到卫星图像上,形成对应的边界,为了确保屋顶分割线均在此边界内,对其进行扩展,扩展的距离为 LiDAR 点云的平均距离,扩展后边界形成了感兴趣区域(如图 4 所示).对感兴趣区域进行对比度增强,然后利用 Canny 算子进行边缘提取,用 Hough 变换检测直线(非连接的、共线的、距离较近的直线被相互连接、和感

兴趣区域边界重合的直线被忽略).如图 4(c)所示,一些屋脊线也被检测出来了,这些直线可以通过结合 LiDAR 数据中的高度信息将其去除.

3.2.3 屋顶分割

将关键提示线投影到三维空间中,则可将屋顶候选点进行分割.如图 5(a)所示, LiDAR 数据点被关键提示线分割成了 4 个区域.在第一个区域中,有少量的数据点,在第 4 个区域中,没有数据点,这些区域都将在后续的重建步骤中被忽略,只有在第 2、3 个区域中的 LiDAR 点数据才会被成功重建.

图 5(b)中显示的是一个更加复杂的例子,在这个例子中,屋顶分割线不是完全平行的,这时,需要计算交点,即图中的 A、B、C、D 点,然后将点集划分为图示的 8 个区域.同样,区域 1 和区域 8 中的点将在重建步骤中被忽略,而其它区域内的点则会被重建.

3.3 建筑物重建

通过对所研究区域居民区建筑物屋顶的类型进行分析和总结,基于每种建筑物屋顶平面间存在的约束关系,进行屋顶类型的识别.在已知建筑物屋顶类型的基础上,进行简单建筑物及复杂建筑物的重建.

3.3.1 屋顶类型识别

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.如:Gable 屋顶的特征描述如下(如图 6(a)所示):

(1)两个具有不同法向量的平面存在.

(2) $25^\circ < \theta_1, \theta_2 < 45^\circ, \theta_1 \approx \theta_2$.

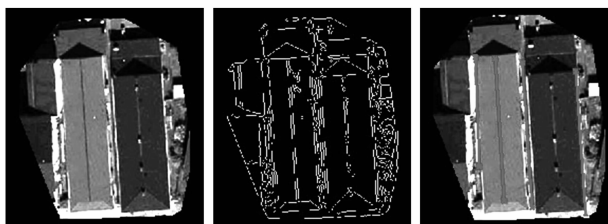
(3)位于两个平面上的 LiDAR 点数目基本相等.

Hip 屋顶的特征描述如下(如图 6(b)所示):

(1)四个具有不同法向量的平面存在.

(2) $25^\circ < \theta_1, \theta_2 < 45^\circ, \theta_1 \approx \theta_2; 15^\circ < \theta_3, \theta_4 < 55^\circ, \theta_3 \approx \theta_4$.

(3)平面 n_1 和 n_2, n_3 和 n_4 上 LiDAR 点的数目大致相等,且较小平面对上的点较少.

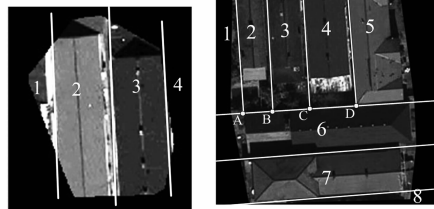


(a) 对比度增强

(b) 边缘

(c) 关键提示线生成

图4 关键提示线提取



(a) 例1

(b) 例2

图5 屋顶分割结果

基于这些约束关系,进行模型匹配,可以进行屋顶类型的识别.

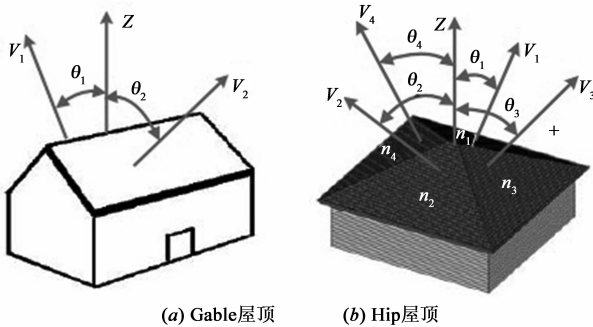


图6 组成屋顶的平面间存在的约束关系

3.3.2 建筑物重建

建筑物重建分为平面拟合、屋顶边界确定和模型重建三个步骤:

(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),将除屋脊线外的其它三条边按照点云密度向外扩展,即可得到屋顶的边界.

(3) 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.

针对复杂的建筑物,首先将其分解为简单建筑物,通过对简单建筑物进行类型识别、匹配,实现复杂建筑物的重建^[20].

4 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 年执行的路易斯安娜州的 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.相应的卫星图像来源于 Google Map.

利用论文中方法对新奥尔良城市区域的居民区建

表 2 LiDAR 数据规范

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

筑物进行重建,重建结果如图 7、8 所示.对重建的精确性(如表 3 所示)和计算代价进行分析:例 1 中(如图 7 所示),共有 20 个居民区建筑物,均被成功识别并重建,重建率为 100.0%.例 2 中(如图 8 所示),共有 21 个居民区建筑物,也均被成功识别并重建,重建率为 100.0%.即使考虑到极小的建筑物(用于表示该建筑物的点数量 < 10,非规则建筑物),例 1 中的重建率可以达到 95%,例 2 中的重建率可以达到 81%,能够满足虚拟现实系统中建筑物重建的需要.

表 3 建筑物重建率评估

	是否包括极小的建筑物	建筑物总数 Number	重建的建筑物数量	重建率
例 1	不包括	20	20	100%
	包括	21	20	95%
例 2	不包括	21	21	100%
	包括	26	21	81%

在重建过程中,用白色椭圆标识处的区域为复杂建筑物,他们是通过分解成简单建筑物而实现重建的.在图 8(b)中,白色矩形标识处的区域似乎为建筑物,但是从图 8(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 2GB 的情况下,基于 C++ 和 Matlab 库,算法的时间耗费如表 4 所示.

表 4 建筑物重建所需的时间

参数	值(示例 1)	值(示例 2)
LiDAR 点数量	1448	1623
三角面片数	2874	3226
重建所需时间	9275	9859

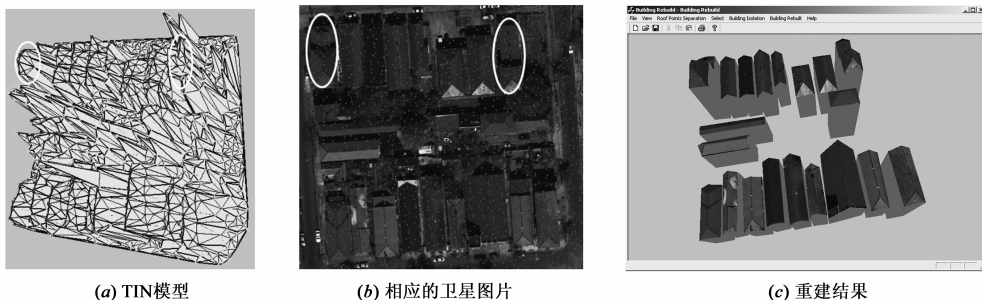


图7 建筑物重建示例1



图8 建筑物重建示例2

5 结束语

在进行居民区建筑物重建时,面对稀疏 LiDAR 数据,提出了一种新的建筑物重建方法.该方法的核心是基于关键提示线的屋顶分割,基于此确定属于单个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基础.

以美国新奥尔良地区的 LiDAR 数据为实验数据,结合从 Google Map 上获取的卫星图像,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

- [1] 唐亮,谢维信,黄建军,等.城市航空影像中基于模糊 Retinex 的阴影消除[J].电子学报,2005,33(3):500-503.
Tang Liang, Xie Weixin, Huang Jianjun, et al. Removing shadows from urban aerial images based on fuzzy retinex[J]. Acta Electornica Sinica, 2005, 33(3): 500-503. (in Chinese)
- [2] 傅兴玉,尤红建,付琨.基于改进 Markov 随机场的高分辨率 SAR 图像建筑物分割算法[J].电子学报,2012,40(6):1141-1147.
Fu Xingyu, You Hongjian, Fu Kun. Building segmentation from high-resolution SAR images based on improved markov random field[J]. Acta Electornica Sinica, 2012, 40(6): 1141-1147. (in Chinese)
- [3] 蒋李兵,王壮,雷琳,等.基于模型的单幅高分辨率 SAR 图像建筑物高度反演方法[J].电子学报,2012,40(6):1086-1091.
Jiang Libing, Wang Zhuang, Lei Lin. Model-based building height retrieval from single HR SAR image[J]. Acta Electornica Sinica, 2012, 40(6): 1086-1091. (in Chinese)
- [4] 任自珍,岑敏仪,张同刚,等.基于等高线形状分析的 Li-

DAR 建筑物提取[J].西南交通大学学报,2009,44(1):83-88.

Ren Zizhen, Cen Minyi, Zhang Tonggang, et al. Building Extraction from LiDAR data based on shape analysis of contours [J]. Journal of Sounthwest Jiao Tong University, 2009, 44 (1): 83-88. (in Chinese)

- [5] Rottensteiner F. Automatic generation of high-quality building models from lidar data [J]. Computer Graphics and Applications, IEEE, 2003, 23(6): 42-50.
- [6] Zhang K, Yan J, Chen S-C. Automatic construction of building footprints from airborne LIDAR data [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2006, 44 (9): 2523-2533.
- [7] Vosselman G. Building reconstruction using planar faces in very high density height data [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 32(3; SECT 2W5): 87-94.
- [8] Verma V, Kumar R, Hsu S. 3d building detection and modeling from aerial lidar data [A]. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (v2) [C]. New York: IEEE Computer Society, 2006. 2213-2220.
- [9] Zeng Q, Lai J, Li X, et al. Simple building reconstruction from LIDAR point cloud [A]. Proceedings of International Conference on Audio, Language and Image Processing [C]. 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 [A]. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Seoul: IEEE, 2005. 2846-2849.
- [11] 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 [A]. Proceedings of ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop on Laser Scanning [C]. Enschede: CiteSeerX, 2005. 209-214.
- [12] You S, Hu J, Neumann U, et al. Urban site modeling from li-

- dar[A]. Computational Science and Its Applications – ICCSA 2003[C]. Montreal: Springer, 2003. 579 – 588.
- [13] Lin H, Gao J, Zhou Y, et al. Semantic decomposition and reconstruction of residential scenes from LiDAR data[J]. ACM Transactions on Graphics, (Proc of SIGGRAPH 2013), 2013, 32(4): 10 – 20.
- [14] Sohn G, Huang X, Tao V. A data-driven method for modeling 3D building objects using a binary space partitioning tree[A]. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing[C]. New York: CRC Press, Taylor Francis Group, 2009: 479 – 509.
- [15] Cho W, Jwa Y-S, Chang H-J, et al. Pseudo-grid based building extraction using airborne LIDAR data[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 35 (B3): 378 – 381.
- [16] Tse R, Gold C, Kidner D. A new approach to urban modelling based on lidar[A]. Proceedings of the 14-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision[C]. Campus Bory: CiteSeerX, 2006. 279 – 286.
- [17] Fugro Earthdata, inc. LiDAR Mapping Fact Sheet[J/OL]. http://www.fugroearthdata.com/pdfs/FCT_Lidar-Educational.11-07.pdf. 2013-04-01.
- [18] 刘晓平, 朱晓强, 余焯. 基于 LiDAR 点云数据的三角网格算法[J], 软件学报, 2008, 19(9): 1 – 9.
Liu Xiaoping, Zhu Xiaoqiang, Yu Ye, et al. Building algorithm of triangulation based on LiDAR point clouds[J]. Journal of Software, 2008, 19(9): 1 – 9. (in Chinese)
- [19] 刘晓平, 朱晓强, 余焯. 基于动态规划的城市道路提取改进算法[J]. 工程图学学报, 2010, (4): 183 – 188.
Liu Xiaoping, Zhu Xiaoqiang, Yu Ye, et al. The Improved Extraction of urban roads based on dynamic programming[J]. Journal of Engineering Graphics, 2010, (4): 183 – 188. (in Chinese)
- [20] 余焯, 刘晓平, 韩江洪, 等. 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.
Yu Ye, Liu Xiaoping, Han Jianghong, et al. Residential building reconstruction research based on sparse LiDAR data[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(9): 1681 – 1688. (in Chinese)

作者简介



余焯 女, 1982 年 3 月生, 安徽安庆人. 2010 年获得合肥工业大学计算机应用技术专业工学博士学位, 现在合肥工业大学计算机与信息学院任教, 讲师, 硕导. 主要研究方向为场景建模、虚拟现实和可视化.

E-mail: yuyue3841@sina.com



刘晓平 男, 1964 年 3 月生, 山东济南人. 教授、博导, 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心主任, 中国计算机学会 CAD/CG 专业委员会委员、中国仪器仪表学会微型计算机应用学会秘书长、中国系统仿真学会理事. 1998 年获合肥工业大学计算机应用技术专业工学博士学位. 主要研究方向为 CAD/CG.