

# 从机载激光扫描数据中交互式提取人字形房屋模型的方法研究

吴华意<sup>1)</sup> 李新科<sup>1)</sup> 胡勇<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079) <sup>2)</sup>(地理系, 魁北克大学, 蒙特利尔, 加拿大)

**摘 要** 快速有效地从机载激光扫描 (airborne lidar) 点云数据中提取房屋模型是机载激光扫描系统应用研究的一项重要课题。鉴于交互式半自动方法是从点云数据中提取简单规则房屋模型信息的一种可行的方法, 为此采用 3 维空间中改进的 Hough 变换以及聚类分析, 提出了一种从点云数据中交互式提取人字形房屋模型的方法。该方法分为 3 个步骤: 第 1 步是用户确定房屋区域, 并分割出候选的屋顶点集; 第 2 步是对候选屋顶点集采用 3 维空间中改进的 Hough 变换, 然后对 Hough 变换后所获得的参数集进行聚类分析, 以此获得屋顶所在平面的参数表达; 第 3 步是构造完整的房屋模型。通过屋顶平面相交得到屋脊线, 通过点的范围分析确定屋顶的边缘, 最后添加竖直的墙面构造完整的房屋模型。经采用 Optech 公司提供的数据进行实验初步证实, 该方法是可行的, 且整个提取过程只需要很少的用户交互, 因此适合于大规模处理机载激光扫描数据。

**关键词** 机载激光扫描 房屋模型 Hough 变换 聚类分析

中图法分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)03-0474-08

## Approach on Interactive Extraction of Gable-roofed Building Models from Airborne Lidar Data

WU Hua-yi<sup>1)</sup>, LI Xin-ke<sup>1)</sup>, HU Yong<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing(LIESMARS), Wuhan University, Wuhan 430079)

<sup>2)</sup>(Department of Geography, University of Quebec at Montreal, Succursale Centre-ville, Montreal, Canada)

**Abstract** Fast and efficient extraction of building models from airborne lidar data is an important research topic in applications of airborne lidar system. The semi-automatic method with user's interaction is a practicable approach for extracting simple and regular buildings from point cloud data. Based on this view, a method of interactively extracting gable-roofed building models from lidar point cloud data is proposed in this paper. An improved Hough transformation in 3D space and Cluster Analysis Model are key points of this approach. The proposed method consists of three steps. First, the user roughly input a region where a building is located. The candidate points belonging to the building roof are then filtered out. Second, an improved Hough transformation in 3D space and Cluster Analysis Model are applied to the data set of roof points to acquire parametric expressions of roof planes. The third step is to construct the integrated building model. The roof's ridge line is obtained by intersecting roof planes, and the building's footprint is determined by analysis of roof points. Finally, a complete building model is created by adding vertical walls. Tested with sample lidar data from Optech Company, this approach gets good experimental results with very few user interactions needed.

**Keywords** airborne lidar, building model, Hough transformation, cluster analysis

## 1 引言

数字地球和数字城市的建设, 对城市 3 维模型

提出了巨大的需求, 其中房屋的几何模型是最重要的内容之一。为了快速获取高质量的 3 维房屋模型, 研究人员探索了应用各种数据源提取房屋模型的方法, 机载激光扫描的点云数据是目前最新的数

基金项目: 全国优秀博士学位论文专项基金项目(200244); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0438)

收稿日期: 2005-09-19; 改回日期: 2005-12-01

第一作者简介: 吴华意(1966 ~ ), 男, 教授, 博士生导师。1999 年获武汉测绘科技大学摄影测量与遥感专业博士学位。主要研究方向为地理信息处理与分析, 发表论文 40 余篇。作为主要成员获国家科技进步二等奖 1 项, 信息产业部重大发明 1 项。E-mail: wuhuay@lmasr.whu.edu.cn

据源之一。机载激光扫描技术发展已有十几年的历史,硬件技术不断完善,然而数据后处理的研究却相对滞后。从机载激光雷达数据中提取房屋模型的研究,出现了一些初步的成果,但与传统的数字摄影测量方法相比,还远没有成熟。

房屋模型的提取就是要确定其位置、地基高程、方向、尺寸和屋顶形状等属性。与大多数特征提取任务一样,房屋提取可以采用自动或半自动方式和数据或模型驱动技术。Vosselman 和 Dijkman 使用传统的 3 维 Hough 变换来提取屋顶平面,其平面提取方法的计算复杂度很高,且由屋顶点的数目和两个角度的离散化来决定<sup>[1]</sup>。Elaksher 和 Bethel 则通过假定每个屋顶只有一个斜面且所有的屋檐平行于或者垂直于房屋的主方向,从而将 3 维 Hough 变换降低到 2 维来处理<sup>[2]</sup>。Hu 遵循假设验证的途径提出了一组新算法,包括受控搜索、增强的 Hough 变换和串行链接技术,自动地将房屋的边界表示为矩形和规则多边形<sup>[3]</sup>。由于重建复杂建筑物的屋顶非常困难,许多算法着眼于检测房屋所处的范围。大多数算法还需要借助于其他辅助信息诸如航空影像、平面图等来区分建筑物和植被。即便如此,全自动的房屋检测还需要一些假设来支持,诸如矩形或其它简单的房屋形状,平面或对称斜面的屋顶形状等等,而且通过全自动算法所获取的房屋模型往往还需要较多的人工编辑。这些都给实际的应用带来了诸多不便。

相比之下,交互式半自动方法是比较切实可行的方法。所谓交互,就是在从机载激光扫描数据中提取房屋模型时,在不同的阶段输入外部知识,以保证建模的准确性和降低自动建模的计算量。输入的外部知识主要有两种交互方式:一是根据目测结果限定房屋模型的类型,减少模型参数的数目或参数的取值范围,增加模型的准确性;二是引用知识或根据目测剔除原始数据中非目标房屋的原始点,减少建模的计算量。从软件工具设计的角度考虑,外部的交互应该尽量少而且简单,更多的时候应该是机器自动地利用知识。只有在机器自动化处理特别困难的环节,才适当地利用用户的输入。

目前,GIS 系统中使用的 3 维房屋模型还主要是用半自动的方法获取的。半自动的房屋提取方法通常需要准备一些典型房屋和屋顶形状的组件。作业员指定恰当的组件并把它们组合起来构造复杂的房屋模型。CC-Modeler 是一个用于房屋重建的交互式工具<sup>[4]</sup>。它需要两步来完成:首先,由人工来

选择所有的屋顶点;然后自动地将这些点分配到不同的平面并生成屋顶和墙面。Rottensteiner 的半自动方法则是通过一种混合建模方式将房屋参数的估计集成到摄影测量处理过程中,房屋被分解为若干组件的集合,这些组件则用交互式的途经单独重建出来<sup>[5]</sup>。Santos 等人提出的半自动房屋方法是首先将点云数据栅格化,然后根据人工提供的种子点用区域生长算法来分割出房屋部分,最后检测房屋的边界并拟合出屋顶的平面方程<sup>[6]</sup>。

根据房屋屋顶结构的不同,常见的房屋可以分为平顶房屋、人字形房屋、四坡房屋、圆顶房屋等等。其中人字形房屋屋顶由两个相交平面所组成,这两个平面的交线即为房屋的屋脊线,屋脊线呈水平且分别与房屋屋顶两个平面的一条边平行。

本文提出从机载激光扫描数据中交互提取简单规则矩形人字形房屋模型的一种实用方法,其核心是采用 3 维空间中改进的 Hough 变换。该方法由 3 步组成,第 1 步是分割出候选的屋顶点集,用人工指定的空间范围从点云中分割出可能是房屋屋顶的数据,再根据房屋特征过滤掉明显不属于屋顶的点;第 2 步是探测屋顶平面,对候选屋顶点集采用 3 维空间中改进的 Hough 变换,然后对 Hough 变换后所获得的参数集进行聚类分析,以此获得屋顶所在平面的参数表达;第 3 步是建立房屋模型,通过屋顶平面相交得到屋脊线,通过点的范围分析确定屋顶的边缘,最后添加竖直的墙面构造完整的房屋模型。图 1 是本文提取房屋模型的流程图。

本文方法需要用户输入粗略地指定屋顶数据的

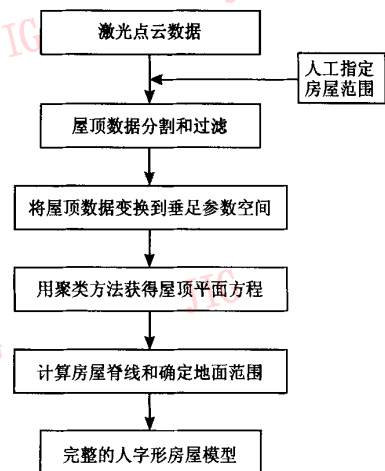


图 1 提取人字形房屋模型流程

Fig. 1 Flow of extracting the gable-roofed building model

范围以尽量排除非屋顶的数据点。指定的范围可以是矩形、圆或多边形等形状,所以该方法易于被集成到相应的工具中。本文的工作仅限于人字形简单房屋,对于复杂房屋模型,有待进一步的深入研究。

## 2 原始数据的分割和过滤

### 2.1 屋顶数据分割

利用 3 维可视化平台,如 OpenGL 或 Java3D,将机载激光扫描的点云数据显示在交互界面上。由于点云数据具有很强的立体效果,加载适当的光源,通过对 3D 视图进行缩放、旋转和平移操作,很容易区分哪里有房屋以及房屋的大致轮廓。本文采用的是 Optech 系统采集的双回波数据,总共有 471 007 个点,其中散布着一些房屋。

为了更容易辨识房屋的位置与轮廓,可以依照高程的不同赋予不同的颜色,如图 2 所示。为了能够较好地得到房屋与地面的交界,以便快速准确地裁切出房屋的屋顶数据,可以通过旋转、平移获得正射时的 2 维视图,如图 3 所示。在 3 维或 2 维视图中交互输入多边形(或简单的矩形),然后在点云数据中通过位置关系裁切出 3 维视形体或 2 维多边形内的点,这些点就是进一步提取房屋模型的候选屋顶点集。

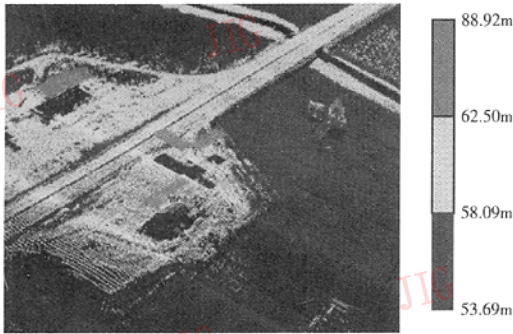


图 2 机载激光扫描点云数据 3D 视图

Fig. 2 3D view of lidar point cloud

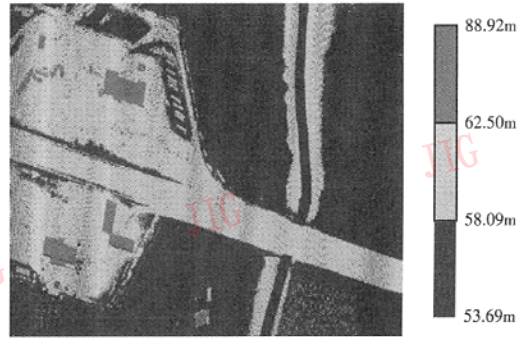
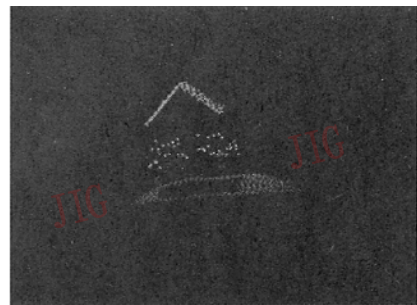


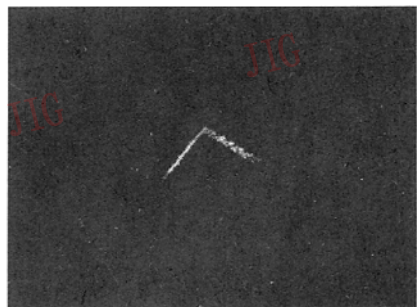
图 3 机载激光扫描点云数据 2D 视图

Fig. 3 2D view of lidar point cloud

由于在选取的房屋区域数据中,地面点的高程值相对较小,利用这一特性,设定一定阈值,很容易就能将其中的地面点过滤掉,这样即可得到最终的屋顶点云数据,如图 4(b)所示。



(a) 房屋区域点云数据 3D 视图



(b) 过滤后的房屋点云数据 3D 视图

图 4 房屋点云数据 3D 视图

Fig. 4 3D view of lidar point cloud of building

### 2.2 过滤地面点

为了在选取房屋区域时,能够保证不漏掉确实属于屋顶的点,一般选取的区域应比实际的房屋区域稍大,所以候选的屋顶点集中一般包含了一些地面点,如图 4(a)所示。为此,一方面需要将这些地面点尽可能过滤掉,以免对后续的屋顶平面检测造成干扰;另一方面,还需要通过这些房屋附近的地面点来确定房屋地基的高程。

## 3 屋顶平面提取

### 3.1 屋顶平面的参数方程

空间中任意 3 个不共线的点唯一地确定一个平

面,但这样就需要9个参数。考虑到固定其中的一个点,其他两个点还可以在这个平面中移动,所以这种表示方法有冗余参数。如果改用一个点和一个法向量,参数减少为6个。考虑到法向量的长度可变,而且法向量的方向可正可负,所以至少还可以再减少2个参数。如果用参数方程  $ax + by + cz = d$  来表示,正好是4个参数。进一步,如果  $d \neq 0$ ,方程左右两边都除以  $d$ ,方程可以表示为  $ax + by + cz = 1$ 。这样表示的平面只有3个参数,  $1/a$ 、 $1/b$  和  $1/c$  的几何意义分别是  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴上的截距,它可以表示与某个坐标轴或坐标平面平行的平面,但不能表示经过坐标原点的平面,我们把这个参数表达方式称为截距参数平面。

很显然,对于空间中任意一个不经过原点的平面,如果从原点对平面做一条垂线,则其垂足是唯一的,因此,可以建立一个平面到垂足的一一映射,采用垂足坐标作为参数,构成三参数的垂足参数空间,进行 Hough 变换。设从原点做垂线得到的垂足是  $(x_0, y_0, z_0)$ ,则平面的方程为  $x_0(x - x_0) + y_0(y - y_0) + z_0(z - z_0) = 0$ ,把这个参数表达方式称为垂足参数平面。

虽然还可以设计其他3维参数空间,如用角度表示的法向量方向(两个角度),然后加一个原点到平面的距离,它甚至可以表达包括经过原点的平面在内的任意平面。但在本项研究中,截距参数空间与垂足参数空间是比较好的参数空间,尤其垂足参数空间更好,垂足作为参数的敏感性较小,算法会更稳健。

虽然垂足参数空间无法表达经过原点的平面,但这可以在选择原始点云数据局部坐标系时避免,只要做原点平移,保证要检测的平面不经过平移后的原点。在本项研究中,我们将原点设置为房屋中间位置的地面点,如图5所示。

### 3.2 用改进的 Hough 变换检测屋顶平面

Hough 变换(Hough transformation, HT)是图像处理 and 计算机视觉中识别几何形状的基本方法之一<sup>[7-13]</sup>,由于其原理简单,结果稳健,应用很广泛,也有很多改进算法。Hough 变换的基本原理是将图像空间映射到参数空间,从参数空间中找到图像空间的特征。一般的 Hough 变换,也将参数空间离散化成图像,参数图像中数值集中的点就是图像空间的特征。

一般的机载激光扫描会在一个独立房屋屋顶得

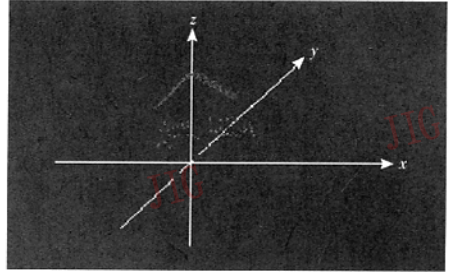


图5 坐标系平移

Fig. 5 Translation of coordinate system

到几百个回波点,如果映射到离散化的3维垂足参数空间需要很大的存储量,而且需要作大量的3维离散化计算。为此,本文采用以下改进的 Hough 变换。

(1)采用多对一映射技术 经典的 Hough 变换逐点计算每个像素对应的轨迹(多点),计算量集中在参数空间的离散化;采用多对一映射技术,每次在原始图像中选多个点(点的数目由参数的数目决定,如直线检测,每次选择两个点;本文则一次选择3个点),映射到垂足参数空间的一个点,得到垂足参数空间的点云。如果采用传统的参数空间离散化方法,就是把参数空间分割为一个一个小格子,计算每个小格子中垂足的个数,垂足个数最多的格子就是原始数据空间中的平面,本文则采用统计学中的聚类方法。

(2)由于采用多对一映射技术,每个3点组合都要计算,计算映射的次数会很多。以200个点的激光扫描数据为例,将会有1313400次计算,并在参数空间产生相应数量的垂足,因此,应尽可能地减少这个数目,方法包括随机算法和条件过滤。

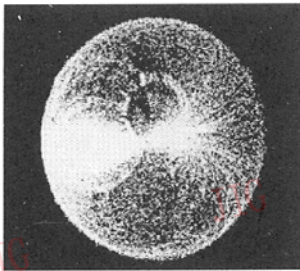
(3)随机方法就是直接将一定比例的映射删除,只保留一部分垂足,在统计的意义下保持最优,从本文的研究结果看,保留5%的组合就已经达到了很好的效果。

(4)条件过滤方法就是根据物理性质预先过滤掉一些组合,本文通过两个方面进行过滤。首先根据激光扫描双回波信号对原始激光点数据进行筛选,激光扫描在屋顶的两次回波信号所获取到的高程之差应接近为零,给定一个阈值  $T_1$ ,只有高程差(首次回波高程与尾次回波高程之差)小于或等于  $T_1$  的激光点才被认为是相对可靠的屋顶平面点。其次,一个屋顶平面应该有一定面积,而一定面积的屋顶平面应该在误差范围内包含有不少于某个数目

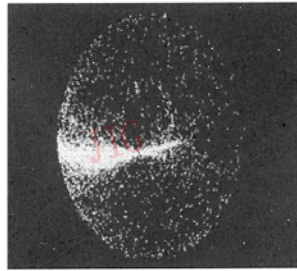
的激光点,并且该数目的大小与屋顶平面的面积以及机载激光扫描数据的地面分辨率有关,因此可以设定一个过滤条件,给定一个平面方程误差阈值  $T_2$  和平面内激光点的数目阈值  $T_3$ ,如果将激光点坐标代入平面方程满足条件

$$|A(x-x_0)+B(y-y_0)+C(z-z_0)| \leq T_2$$

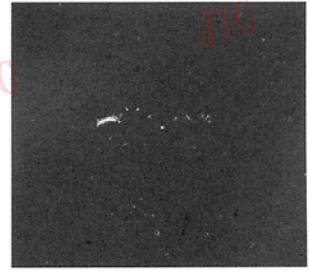
则认为该激光点位于该平面内。倘若满足条件的激光点数目小于  $T_3$ ,则有理由认为这个平面不是屋顶平面。在本文的实验中,高程差阈值设置为  $T_1 = 0.01\text{m}$ ,平面方程误差阈值设置为  $T_2 = 0.05$ ,点数目阈值设置为  $T_3 = 30$  个。



(a) 全部组合映射



(b) 5% 组合映射



(c) 算法(4) 组合映射

图 6 映射到参数空间得到的点分布

Fig. 6 Distribution of parameter points in parametric space

### 3.3 用聚类方法获得屋顶平面

聚类分析是一种多元统计分析方法,它对一批没有标出类别的模式样本集按照样本之间的相似程度进行分类<sup>[14]</sup>。本文采用应用最为广泛的系统聚类法<sup>[15]</sup>,对平面参数样本数据进行分类,其中的相似性测度选用了平方欧氏距离,聚类准则采用重心法。算法开始时,每一点都是一个类,然后将距离最近的两个类合并,以次类推,直到所有点都合并为一个类。图 7 是采用第 4 步的算法得到参数点的分类谱系图。

从分类谱系图可以看出,参数空间中所有 129 个点分为两大类,意即包含有两个房屋平面。而每一个大类又分为两个小类。究竟以大类中哪一小类别中的哪一个样本来作为房屋屋顶平面,应该遵循以下两个原则:

(1) 类别中的样本数目 选取大类别中包含样本数目最多的小类别中的样本作为房屋屋顶平面。显然真正的房屋平面中其相应的组合也较多,因此对应的小类别中的样本数目也应该较多。

(2) 类别中的样本序号 由于所有的样本是按

(5) 记录参数空间中的精确点,形成参数空间中点的分布,然后采用多元统计分析中的分步聚类方法,选择合适的类,类中序号最小的样本就是检测出来的平面。图 6(a)就是本文的例子中,采用随机选取 50% 左右激光点后的全部 187 409 个(剔除 3 点共线组合后)组合映射得到的参数空间中点的分布;图 6(b)是采用随机算法,从全部 187 409 个组合中选择 5% 计 9 370 个组合进行映射得到的参数空间中点的分布;图 6(c)是采用第 4 步中的阈值进行条件过滤的算法,得到共计 129 个组合进行映射得到的参数空间中点的分布。

照样本所代表的平面中所包含的房屋数据点的数目多少依次排序,序号愈小,则该平面中包含的房屋数据点数目愈多。显然,用该样本所代表的平面来拟合房屋平面其精度也较高。因此选用小类别中样本序号最小的平面来作为房屋屋顶平面。

根据以上原则,从图 7 所示的分类谱系图中可以很容易地确定出人字形房屋屋顶的两个平面。即 1 号样本和 31 号样本所代表的平面。

根据空间中平面的一般方程,可以利用样本所对应的 3 点组合平面中的 3 个已知点坐标获得这两个房屋平面的方程:

$$0.018(X+5.32)+0.049(Y-0.73)-0.127(Z-9.00)=0 \quad (1)$$

$$0.031(X+5.36)+0.096(Y-5.11)+0.246(Z-8.01)=0 \quad (2)$$

当然,也可以直接根据垂足坐标来得到平面方程,但是与通过 3 个已知点坐标计算得到的平面方程相比,根据垂足坐标直接得到的平面方程误差较大,其原因在于法向量的绝对值较大。图 8 是上述平面和激光扫描数据叠加显示的结果。

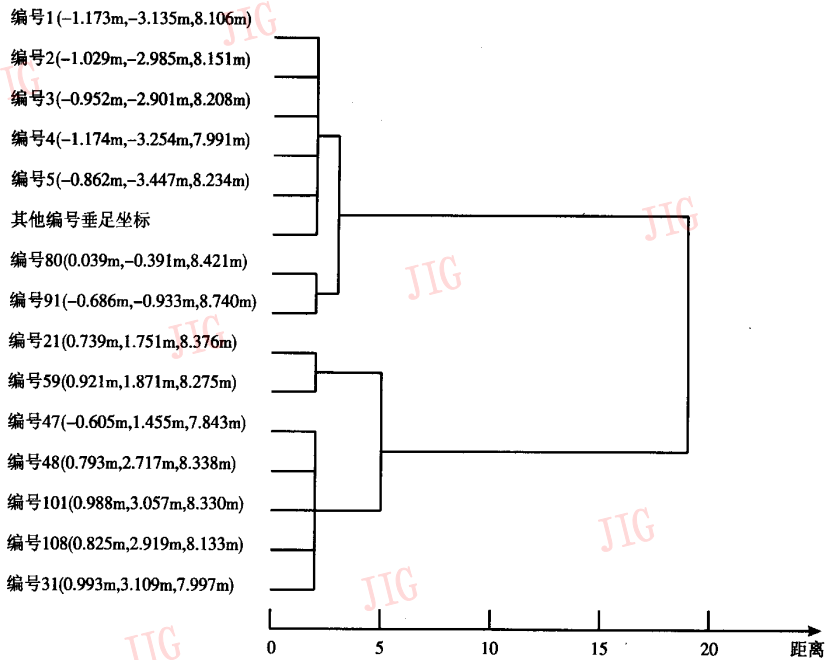


图 7 参数点的分类谱系图  
Fig. 7 Classification tree of parametric points

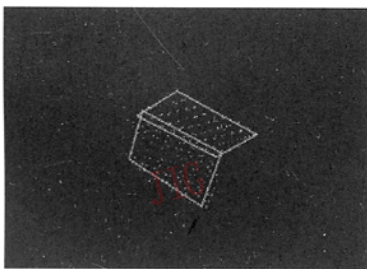


图 8 改进的 Hough 变换提取的屋顶平面与激光扫描点云数据的叠加

Fig. 8 Overlay of roof planes acquired by improved Hough Transformation with lidar point cloud

## 4 构造房屋几何模型

### 4.1 房屋脊线

房屋的脊线就是两个屋顶平面的交线,可以通过两个屋顶平面方程来确定。一般情况下,房屋屋脊线应该是与水平面平行的,但实际计算出来的结果不一定如此。有两种解决方法,一是在后面整体构造房屋模型时加以修正,二是在用聚类方法获取屋顶平面时,加入两个平面之间的这种约束关系,联

合估计同时得到两个最好的垂足。

### 4.2 房屋地面范围

求房屋地面范围的基本思路是:将屋脊线投影到地平面,分别在屋脊投影线的两边画平行线,离开屋脊投影线最近且包括所有屋顶点的地面投影的两条线就是房屋的前后地面范围。同理,在与屋脊投影线垂直的方向画两条平行线,刚好把所有屋顶点的地面投影都包含的两条平行线即使房屋左右的边界,这样就得到房屋的地面范围矩形。当然为了求得准确的地面范围,事先需要将前面所得的候选屋顶点跟解算出的屋顶平面进行比较。如果一个激光数据点的坐标代入屋顶平面方程的误差的绝对值超出某个阈值,则认为该点不是屋顶上的点,从而予以剔除。

### 4.3 构造房屋模型

将地面矩形沿 Z 轴方向平移至与屋顶平面相交,即可得到两个屋顶矩形。同时根据地形高程,分别构造前后左右 4 个墙面,得到整个房屋的模型,如图 9 所示。图 10 是房屋模型与屋顶原始点数据叠加显示效果。图 11 是房屋模型与所有原始点云数据叠加的可视化效果。

### 4.4 房屋模型效果评价

在提取屋顶平面过程中,采用改进的霍夫变换

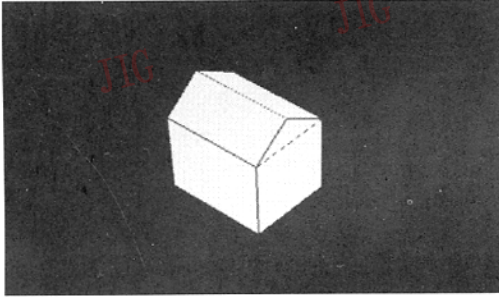


图 9 矩形人字形房屋模型

Fig. 9 Model of rectangular and gable-roofed building

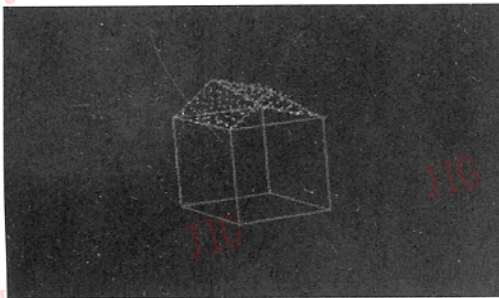
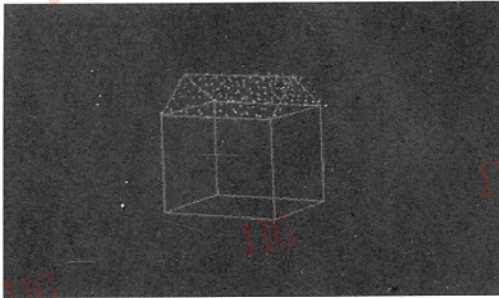


图 10 房屋模型与房屋点云叠加视图

Fig. 10 Overlay of building model with lidar point cloud

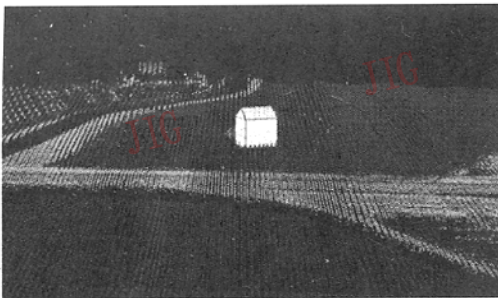


图 11 矩形人字形房屋模型效果

Fig. 11 Effect of rectangular and gable-roofed building model

并结合聚类分析,并且在聚类分析前依照每个参数平面内所包含的激光点数目多少对参数集中的参数进行排序,这样即可确保可以从分类谱系图中获取

到最适合的屋顶平面。从图 9 和图 10 可以看出,采用本方法提取出来的人字形房屋模型屋顶表面与机载激光扫描点云数据所形成的屋顶表面相符合,尤其是图 10 从两个不同的角度显示了房屋模型屋顶表面与机载激光扫描点云数据的符合情况。

另外,人字形房屋屋脊线是两个屋顶平面的交线。根据两屋顶平面的法向量  $n_1$  和  $n_2$ ,即可解算出屋脊线的方向向量  $n = n_1 \times n_2$ 。根据两屋顶平面方程(1)和(2)可知:

$$n_1 = (0.018, 0.049, -0.127)$$

$$n_2 = (0.031, 0.096, 0.246)$$

从而可以解算出屋脊线方向向量:

$$n = (0.0242, -0.0084, 0.0002)$$

由解算结果可以发现,房屋屋脊线方向向量的  $z$  分量为 0.0002,几乎趋近于零,这与人字形房屋屋脊线呈水平是相符合的。这也从另外一个角度验证了房屋模型的精度和效果。

## 5 讨论

机载激光扫描数据是安装在飞机上的传感器发射一定频率的激光束后,从接受到的回波信号得到一次或多次的回波信息。从飞机上发射的激光一般是斜向下,并且随着飞机的飞行保持前后的激光基本平行。这样的结果就是,击中房屋墙面的激光束相对较少,而且精度也较差。特别是有些房屋墙面由于屋顶挡着而无法被扫描到。如果直接采用构建三角网并简化的方法获得建筑物模型,墙面的误差会比较大,因此,本文采用屋顶建模,然后用竖直的立面作为墙面。

Hough 变换最早是针对图像数据中提取几何信息提出来的,至今也一直用于图像以及以静态或连续图像为基础的信息提取。当初提出以及以后的使用中,参数空间的离散化使得参数空间的处理与原始图像空间的处理是完全一样的,这便于计算机组织数据。

激光扫描数据与图像数据不同,可以把高程值作为图像的灰度处理,但它的数据是非规则抽样的,  $(x, y)$  不构成规则的网格,直接采用连续数据来处理更合适。同样地,在参数空间也可以采用非离散化的方法,也就是本文采用的多对一映射技术以及通过聚类的方法进行特征估计。关于多对一映射技术以及聚类的方法导致的精度问题,本文还没有涉

及,将作为后续研究展开。

## 6 结论

本文提出了从机载激光扫描数据中交互式提取人字形房屋模型的一种实用方法,方法的核心是采用3维空间中改进的Hough变换来确定屋顶平面的垂足参数方程。与经典的用于图像处理的Hough变换相比,本文选取原点到平面的垂足作为参数,并且采用连续的方法进行处理,而且垂足参数的检测采用聚类的方法来获得。通过人工指定房屋所出的范围,将属于屋顶的点分割出来。所采用的随机算法极大地降低了Hough变换的计算量。相对于现有的其他半自动房屋提取方法而言,本文方法只需要少量的人工参与,就能快速稳健地重建出完整的人字形房屋的模型。

后续工作除了在第5节中讨论的理论问题外,还将进一步评价方法的精度,以及研究如何进一步减少用户的交互和扩展到提取更加复杂的建筑物模型。

### 参考文献 (References)

- 1 Vosselman G, Dijkman S. 3-D building model reconstruction from point clouds and ground plans [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 34(3/W4): 37~44.
- 2 Elaksher A, Bethel J. Building extraction using lidar data[A]. In: *ACSM-ASPRS Annual Conference Proceedings*[C], Washington DC, 2002: 9.
- 3 Hu Y. Automated extraction of digital terrain models, road networks and buildings using airborne lidar data [D]. Calgary: Calgary University, 2003: 142~144.
- 4 Brenner C. Interactive modeling tools for 3D building reconstruction [A]. In: D. Fritsch, R. Spiller. *Photogrammetric Week* [C], Heidelberg: Wichmann Verlag, 1999: 23~34.
- 5 Rottensteiner D. Semi-automatic Extraction of Buildings Based on Hybrid Adjustment Using 3D Surface Models and Management of Building Data in a TIS [D]. Vienna: Vienna University of Technology, 2001.
- 6 Santos D, Tommaselli A M G, Dalmolin Q. Semi-automatic modeling of buildings from digital surface models [J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2004, 31(3): 179~187.
- 7 Hough P. Method and Means for Recognizing Complex Patterns[P]. US Patent 3069654, 1962.
- 8 Xu L, Oja E. Randomized Hough transform (RHT): basic mechanisms, algorithms, and computational complexities[J]. *Image Understanding*, 1993, 57(2):131~154.
- 9 Ballard D. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes[J]. *Pattern Recognition*, 1981, 13(2):111~122.
- 10 Fung P, Lee W, King I. Randomized generalized Hough transform for 2-D grayscale object detection [A]. In: *Proceeding of the 13th International Conference on Pattern Recognition* [C], Vienna Austria, 1996: 511~515.
- 11 Kalviainen H, Hirvonen P, Xu L, et al. Probabilistic and nonprobabilistic Hough transforms-overview and comparisons [J]. *Image And Vision Computing*, 1995, 13(4): 239~252.
- 12 Princen J, Illingworth J, Kitler J. Hypothesis-testing: a framework for analyzing and optimizing Hough Transform performance[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 1994, 16(4): 329~341.
- 13 Olivier E, Thiran J. Adaptive Hough transform for the detection of natural shapes under weak affine transformations [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2004, 25(12): 1411~1419.
- 14 Cai Yuan-long. *Pattern Recognition*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1992: 17. [蔡元龙著. 模式识别[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1992: 17.]
- 15 Zhang Yao-ting, Fang Kai-tai. *Introduction of Multivariate Statistical Analysis*[M]. Beijing: Science Press, 1982: 401. [张尧庭,方开泰著. 多元统计分析引论[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 401.]