

建筑物 LiDAR 点云的屋顶边界提取

曾齐红¹ 毛建华¹ 李先华¹ 刘学锋¹

(1 上海大学通信与信息工程学院, 上海市延长路 149 号, 200072)

摘要:提出了一种建筑物 LiDAR 点云的屋顶边界提取方法。首先构建了离散的建筑物屋顶 LiDAR 点的 TIN 模型,在 TIN 模型中根据点的空间几何关系,过滤整个三角网的边界线,从而过滤出初始边界点。在初始边界点构成的边界中,过滤出边界斜率变化显著的点作为拐点。利用所有的屋顶 LiDAR 点将拐点扩展,得到边界的扩展点,由扩展点构成的屋顶边界为最终提取的建筑物屋顶边界。

关键词:LiDAR; 建筑物屋顶; 边界提取; 不规则三角网

中图分类号:P237.3

机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)能够快速精确地获取城市表面物体的位置信息和高度信息,为城市信息提取和三维重建提供了新的数据源。从 LiDAR 点云中提取建筑物屋顶边界是建筑物信息提取中的重要部分。大部分的相关研究借助其他遥感图像来提取建筑物边界^[1-3]。

仅采用 LiDAR 数据来提取建筑物屋顶边界的方法有尤红建等^[4]对激光点进行二次内插加密生成 DSM 影像数据,以图像处理的方法通过影像分割、边缘提取和边缘规格化等步骤来提取建筑物屋顶边界。将 LiDAR 点云内插为图像的处理过程中会存在误差,从而加大了数据处理结果的误差。更多的研究是基于离散的激光点云的空间结构分析,文献[5-7]基于 LiDAR 不规则的点云构成 Delaunay 三角网提取建筑物屋顶边界。在这类方法中,某些方法假设建筑物屋顶边界多边形每条边平行或垂直于建筑物的主方向,但对于完全对称的“L”型建筑物,无法确定主方向;而且对于不规则多边形的屋顶,边界不一定与主方向平行或垂直。

1 原理和方法

本文设计的建筑物屋顶边界提取方法考虑了多种不同的建筑物屋顶多边形,如图 1 所示,分别

为典型的简单规则多边形;较规则的凸多边形,多边形的某些边不平行或垂直于建筑物屋顶主方向;具有凹角的较规则多边形,此种屋顶比较难以确定建筑物屋顶的主方向;具有凹角的不规则多边形,此种屋顶也难以确定建筑物屋顶的主方向,即使在人为设置主方向的情况下,多边形的各条边也不全平行或垂直于建筑物屋顶主方向。

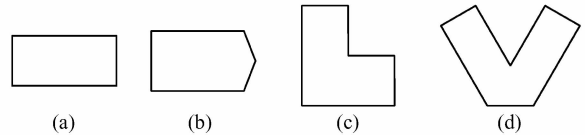


图 1 建筑物屋顶的类型

Fig. 1 Illustration of Building Roof

建筑物 LiDAR 点云数据的屋顶边界提取方法流程图如图 2 所示,该方法主要分为构建屋顶点云的不规则三角网、过滤初始边界线和边界点、计算关键边界点(即拐点)以及扩展边界 4 个部分。

本方法采用离散的 LiDAR 点云数据,首先构建建筑物点云的 TIN 模型。在 TIN 模型中根据点的空间几何关系,去除边长明显大于点间距的三角形,在余下的三角网中过滤出整个三角网的边界边,从而初步获得边界点。在初始边界点中,过滤出由点构成的向量斜率变化显著的点作为拐点。由拐点连接成的边界是比较规则的多边

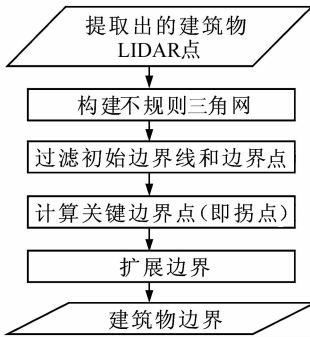


图2 建筑物 LiDAR 点云的屋顶边界提取流程图
Fig. 2 Flow of Roof Boundary Extraction from Building LiDAR Point Cloud

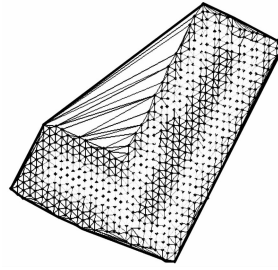


图3 屋顶点构成的不规则三角网
Fig. 3 TIN of Building

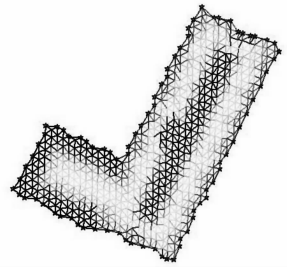


图4 建筑物屋顶的边界线与边界点
Fig. 4 Boundary Lines and Boundary Points of Building Roof

形,基本可以表示建筑物屋顶的形状。但是为了保证所有的屋顶 LiDAR 点都落在拐点构成的边界内,还需要计算边界的扩展点,由扩展点构成的屋顶边界为最终提取的建筑物屋顶边界。

1.1 过滤初始边界线和边界点

不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)经常用来存储空间离散点之间的邻近关系。屋顶离散 LiDAR 点云构建的 TIN 模型的平面三角网结构如图 3 所示。对于凸多边形的建筑物屋顶,可以直接采用不规则三角网的凸壳边界^[8]直接作为建筑物屋顶的初始边界。但是对于图 3 所示的屋顶边界,是具有一个凹角的多边形,直接从不规则三角网中获得的凸壳边界如图 3 中最外层的黑色粗线边界,该边界不能真实表达此建筑物的屋顶边界。因此,利用凸壳方法提取边界仅适合凸多边形的屋顶,不具有一般性。

本文设计了适合于所有多边形类型的初始边界提取的方法。该方法描述如下:首先在离散点构成的不规则三角网中去除边长明显大于平均点间距的三角形,然后在余下的三角网中再利用点的空间几何关系过滤出初始边界点。

如图 3 所示,在离散点构成的不规则三角网结构中,左上角的一些边长过长的边不在屋顶多边形内,不能表达屋顶的边界,因此需要去除。通过设置边长阈值 $trilen = 1.5 \times$ 平均点间距,去除边长大于边长阈值 $trilen$ 的三角形。去除大边长三角形后的不规则三角网如图 4 所示。在图 4 的三角网中,可以分析边界边与非边界边具有明显的差别:边界边仅存在于一个三角形内,非边界边同时在两个三角形内,即为两个三角形的公共边。

因此,根据以上分析,可以在处理后的三角网中过滤出仅在一个三角形内的边界边,即过滤出离散点的边界边,边界边的端点即为初始边界点,如图 4 中的“★”所示。

1.2 计算边界点中的关键点

从图 4 中过滤出的初始边界点构成的边界是极其不规则的多边形。而实际上,建筑物屋顶边界一般为规则的矩形或比较规则的多边形,因此需要对初始边界点进一步规格化。从初始边界点中过滤出斜率变化显著的点,即拐点。过滤拐点的方法是在初始边界点中,根据每个点与两个相邻点构成两个向量的夹角进行判断,超过一定向量夹角阈值的点为关键点。逐渐增大向量夹角阈值,逐层过滤关键点最终得到屋顶边界的拐点。

图 5 描述了点相邻向量的夹角关系,图中 P_{center} 、 $P_{neighbor1}$ 和 $P_{neighbor2}$ 为初始边界点,且 $P_{neighbor1}$ 、 $P_{neighbor2}$ 分别为边界点 P_{center} 的两个邻接边界点, θ 为过点 P_{center} 的两个边界直线的变化角,记为两个向量的夹角。记向量 $\mathbf{v}_1 = \overrightarrow{P_{neighbor1}P_{center}}$, 则 $\mathbf{v}_{1x} = P_{centerx} - P_{neighbor1x}$, $\mathbf{v}_{1y} = P_{centery} - P_{neighbor1y}$; 向量 $\mathbf{v}_2 = \overrightarrow{P_{center}P_{neighbor2}}$, 则 $\mathbf{v}_{2x} = P_{neighbor2x} - P_{centerx}$, $\mathbf{v}_{2y} = P_{neighbor2y} - P_{centery}$; 则有: 向量 \mathbf{v}_1 与 \mathbf{v}_2 的夹角余弦: $\cos\theta = \frac{\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2}{|\mathbf{v}_1| \cdot |\mathbf{v}_2|} = \frac{\mathbf{v}_{1x} \times \mathbf{v}_{2x} + \mathbf{v}_{1y} \times \mathbf{v}_{2y}}{\sqrt{\mathbf{v}_{1x}^2 + \mathbf{v}_{1y}^2} \times \sqrt{\mathbf{v}_{2x}^2 + \mathbf{v}_{2y}^2}}$ 。

夹角 θ 越大,点两侧的边界线的斜率变化就越大,这样的点为初始边界点中的关键点。通过夹角阈值和迭代次数阈值的设定,逐渐过滤出斜率变化比较大的关键点。夹角阈值一般设定从 10° 开始,逐渐增大,增幅为 1° 。迭代次数根据多次实验总结,一般为 30 次,即夹角阈值增大到 40° 为较佳结果。此迭代次数也会根据屋顶形状而设置不同。通过迭代过滤得到的拐点如图 6 中的“●”所示,由拐点构成的建筑物屋顶边界,能够较好地表示建筑物屋顶的轮廓。

1.3 扩展边界

从图 6 获得的建筑物屋顶的边界可以看出,

某些屋顶激光点落在了屋顶轮廓的外侧,因此需要进行屋顶边界的扩展,以保证所有屋顶的激光点都在屋顶边界内。

对于每条边界线的两个端点(拐点)及端点之间点的集合可以表示为 $P_{\text{boundaryset}_i} \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, 边界线表示为 Lineboundary_i , 由拐点构成的闭合多边形表示为 Polygon 。找边界线的扩展边界点的方法是:在集合 $P_{\text{boundaryset}_i}$ 中计算点与边界线 Lineboundary_i 距离最大的点 P_{max_i} , 再根据几何关系判断点 P_{max_i} 在屋顶多边形的内侧或外侧。若点 P_{max_i} 在多边形的外侧即为边界线 Lineboundary_i 的扩展点;若在多边形的内侧,则计算与新直线(过点 P_{max_i} 且方向向量同边界线 Lineboundary_i 的方向向量)距离最大的点 $P_{\text{max}_{\text{new}_i}}$, 即为边界线 Lineboundary_i 的扩展点。

计算边界扩展点的算法描述如下。

计算集合 $P_{\text{boundaryset}_i}$ 中各点与边界线 Lineboundary_i 的距离,距离最大的点记为 P_{max_i} ; 若点 P_{max_i} 在边界线 Lineboundary_i 上

Then 扩展点 $P_{\text{max}_{\text{new}_i}} = P_{\text{max}_i}$
Else 过点 P_{max_i} 作边界线 Lineboundary_i 的平行线 Lineparallel_i

If 平行线 Lineparallel_i 与多边形 polygon 的交点个数 $\text{num} = 0$

Then $P_{\text{max}_{\text{new}_i}} = P_{\text{max}_i}$

Else 分别计算交点分布在点 P_{max_i} 两侧的个数

If 点 P_{max_i} 两侧的交点个数分别为偶数(包括 0)个

Then $P_{\text{max}_{\text{new}_i}} = P_{\text{max}_i}$

Else $P_{\text{max}_{\text{new}_i}}$ = 距离新直线(过点 P_{max_i} 且方向向量同边界线 Lineboundary_i 的方向向量)距离最大的点。

利用上述算法计算出的边界扩展点如图 7 所示,其中“○”表示拐点,“★”表示点 P_{max_i} ,“□”表示最终的扩展点,最外层的黑色直线边界即为最终的建筑物屋顶边界。

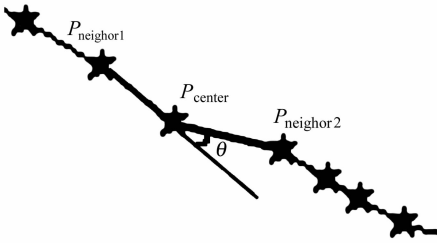


图 5 点相邻向量的夹角关系
Fig. 5 Angle between Two Neighbor Vectors

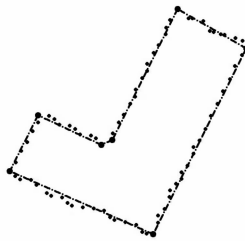


图 6 建筑物屋顶边界的拐点
Fig. 6 Inflexions of Building Roof Boundary

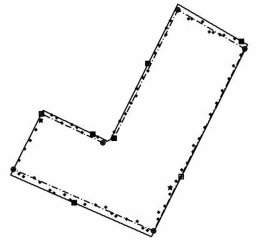


图 7 屋顶边界扩展点及最终边界
Fig. 7 Expanding Points and Final Building Roof Boundary

2 实验分析

本文采用的 LiDAR 数据是来自于 ISPRS 公开的 LiDAR 点云测试数据,在 2000 年由 Optech ALTM1210 型号激光雷达系统获取。该数据记录了每个激光脉冲的第一次回波和最后一次回波的点三维坐标以及反射强度。平均点密度为 0.67 点/m²。该区域的地物主要由较复杂的平面建筑物和稀疏的植被组成。LiDAR 点云数据如图 8 所示。

对于原始不规则分布的离散 LiDAR 点云数据,为了进行建筑物屋顶边界的提取,建筑物屋顶点云应首先被提取和分离出来。LiDAR 点云的数据过滤和特征提取的算法很多,本文采用阶层式分类策略和基于高程突变的 TIN 过滤算法及平面拟合过滤算法(详见文献[9-11]),对 LiDAR

点云进行过滤和分类,提取出建筑物屋顶点云。对提取出的建筑物屋顶点云,利用上述的边界提取方法对其进行建筑物屋顶边界提取。提取的建筑物屋顶边界结果如图 9 所示。图中,左上角的建筑物是具有弧形边界的屋顶,利用本文的方法将它提取为分段连续的凸多边形。右上角的建筑物由于屋顶上方有植被遮挡,造成屋顶 LiDAR 点缺失,因此提取的屋顶边界有空缺。从实验结果来看,本文方法能够完整地提取建筑物屋顶边界。

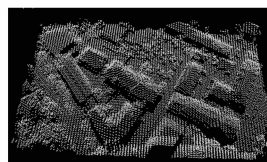


图 8 LiDAR 点云数据
Fig. 8 LiDAR Point Cloud Data

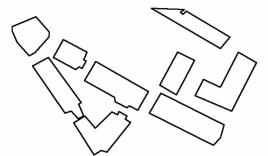


图 9 提取的屋顶边界结果
Fig. 9 Result of Building Roof Boundary

本文提出的建筑物屋顶边界的提取方法能有效地提取各种多边形屋顶的边界,避免了边界多边形的边必须与建筑物屋顶主方向平行或垂直的假设。但是,由于 LiDAR 点的精度还比较低,提取的屋顶边界还需要进一步规格化。

参 考 文 献

- [1] Rottensteiner F, Briese Ch. Automatic Generation of Building Models from LiDAR Data and the Integration of Aerial Images[C]. ISPRS, Dresden, 2003
- [2] Huber M, et al. Fusion of LiDAR Data and Aerial Imagery for Automatic Reconstruction of Building Surfaces[C]. The 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas, Berlin, 2003
- [3] Sohn G, Dowman I. Building Extraction using LiDAR DEMs and IKONOS Images[C]. ISPRS Commission III, WG III/3, Stuttgart, 2003
- [4] 尤红建, 苏林, 李树楷. 利用机载三维成像仪的 DSM 数据自动提取建筑物[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(4): 408-413
- [5] Vosselman G. Building Reconstruction Using Planar Faces in Very High Density Height Data[C]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 32(3/2): 87-92
- [6] Morgan M, Habib A. 3D TIN for Automatic Building Extraction from airborne Laser Scanning Data [C]. The ASPRS Gateway to the New Millennium, St. Louis, Missouri, 2001
- [7] Hofmann A D. Analysis of Tin-structure Parameter Spaces in Airborne Laser Scanner Data for 3D Building Model Generation[C]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2004, 35 (B3): 302, |307
- [8] 周培德. 计算几何——算法设计与分析[M]. 北京: 清华大学, 2005
- [9] 曾齐红, 毛建华, 李先华, 等. 机载激光雷达点云的阶层式分类[J]. 测绘科学, 2008, 33(1): 103-105
- [10] Zeng Qihong, Mao Jianhua, Li Xianhua, et al. LiDAR Data Filtering and Classification with TIN and Assistant Plane[J]. SPEI 2007, 6 752(6): 1-8
- [11] 曾齐红, 毛建华, 李先华, 等. 激光雷达点云平面拟合过滤算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(1): 25-28

第一作者简介: 曾齐红, 博士生。主要从事 LiDAR 数据分析与处理和 GIS 研究。
E-mail: zqihong@yahoo.com.cn

Bulding Roof Boundary Extraction from LiDAR Point Cloud

ZENG Qihong¹ MAO Jianhua¹ LI Xianhua¹ LIU Xuefeng¹

(1 School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, 149 Yanchang Road, Shanghai 200072, China)

Abstract: This paper presents a method for boundary extraction of building roof from LiDAR point cloud. Firstly, a TIN model of discrete building roof LiDAR point cloud is built. Based on spatial geometry relationship in the TIN model, after some triangles with too larger side lengths than the average point distance are deleted, the borderlines of residual irregular triangulated network can be extracted to obtain initial boundary points. From the initial boundary points, points which two vectors have distinct change of slope are filtered as inflexion points. Some LiDAR points might locate outside the polygon constructed by inflexion points. So the inflexion points need to be expanded using all building roof LiDAR points. The final building roof boundary is constructed by the expanded points. The experimental result shows that this method is able to effectively extract all kinds of polygon building roof boundary.

Key words: LiDAR; building roof; boundary extraction; TIN