

三维激光点云中建筑物立面边界特征提取方法

费鲜芸¹,戴哲¹,刘如飞²

(1.江苏海洋大学 海洋技术与测绘学院,江苏 连云港 222005;

2.山东科技大学 测绘与空间信息学院,山东 青岛 266590)

摘要:提取建筑立面中窗户等非墙面元素的边界特征是利用点云数据进行建筑物精细化建模的难点。针对该问题,提出一种基于模板匹配的建筑物激光点云立面几何特征提取方法。首先采用 RANSAC 算法粗分割建筑物立面,通过双向 DBSCAN 算法提取墙面点云,并依据墙面点云提取墙面边界和分离窗户点云;其次,对窗户点云进行欧式聚类 and 矩形拟合分类;然后对窗户的特征凸包点内插获得窗户边界模板点云;最后利用模板匹配方法获取完整的建筑物立面窗户点云边界,并获得整体建筑物立面边界点云数据。实验结果表明,该方法可以精确提取建筑物墙面点云边界,补全部分边界缺失的窗户轮廓边界点云,满足建筑物精细化建模的需求。

关键词:点云;建筑物立面;随机抽样一致性;模板匹配;边界提取

中图分类号:P237

文献标志码:A

Boundary feature extraction method of building facade in 3D laser point cloud

FEI Xianyun¹, DAI Zhe¹, LIU Rufe²

(1. School of Marine Technology and Geomatics, Jiangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu 222005, China;

2. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: To extract the boundary features of non-wall elements such as windows in building facade is a difficulty in building fine modeling by using point cloud data. To solve this problem, this paper proposed a geometric feature extraction method of building laser point cloud elevation based on template matching. Firstly, random sample consensus(RANSAC) algorithm was used to roughly segment the building facade and bi-directional density-based spatial clustering of applications with noise(DBSCAN) algorithm was used to extract the wall point cloud. The wall boundary and window point cloud were extracted according to the wall point cloud. Secondly, euclidean clustering and rectangle fitting were used to classify the window point cloud. Then the feature convex hull points of the window were interpolated to obtain the window boundary template point cloud. Finally, the template matching method was used to obtain the complete building facade window point cloud boundary and the whole building facade boundary point cloud data. The experimental results show that this method can accurately extract the boundary of point cloud between building wall and window, which can meet the needs of building fine modeling.

Key words: point cloud; building facade; RANSAC; template matching; boundary extraction

随着数字城市的发展建设,构建建筑物三维模型的需求不断增加,如何对建筑物立面进行精细化重建成三维建模过程中的一个关键问题^[1-2]。三维激光扫描技术能快速、高精度获取建筑物表面几何特征,是建

收稿日期:2021-05-13

基金项目:国家自然科学基金项目(42001414);山东省自然科学基金项目(ZR2019BD033);2020 年江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX20_1250);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2019JZZY010429)

作者简介:费鲜芸(1969—),女,山东烟台人,教授,博士,主要从事植被遥感制图及植被三维绿量地面测量的教学和研究工作。刘如飞(1986—),男,江苏南京人,副教授,博士,主要从事点云数据处理、图像目标特征识别、三维建模与可视化等方面的研究,本文通信作者。E-mail:liurufe@sdust.edu.cn

筑物建模数据的重要来源之一。对三维激光点云数据中建筑物表面特征进行识别与提取和准确获得立面窗户等非墙面元素的完整几何特征与空间相对位置,是实现建筑物精细化重建的基础。因此,基于三维激光点云数据的边界特征提取具有重要的研究价值和实践意义^[3]。

国内外学者对提取点云边界特征进行了大量研究。基于邻域分析的方法^[4-7]以采样点与邻域点的夹角大小为依据判断采样点是否为边界点。可以快速、准确地提取散乱点云的边界特征,但难以探测平面相交的折边。 α -shape 算法^[8-10]通过设置半径 α 决定的唯一多边形,滚动寻找点集 P 的边界点,该方法对半径 α 的阈值设置要求严格,易受点云密度不均与噪点的影响。凸包算法^[11]通过寻找可以包含点集所有点的最外层特征点,能够快速直观地确定散乱点云的边界点,但此方法受噪点影响严重且无法保留完整边界轮廓信息。切片法^[12]通过将点云数据切片,寻找切片内每个簇的端点、拐点与孤立点等特征点,并判断特征点是否为边界点,以此达到提取边界特征的目的,此方法不受立面几何外型影响,泛用性较广,但根据切片厚度选取大小会丢失部分细节特征。中轴变换算法^[13]通过物体中心线和骨架表示物体几何外形,并对骨架特征点进行聚类,从骨架特征点位置估计判断边界点,但此方法只能提取大致轮廓,对细节特征提取效果较差。

以上算法多以提取建筑物的外部边界轮廓线为研究目标。窗户作为建筑物立面内部地物,其研究难点在于,受窗户内部窗帘、玻璃、窗框、开合状况等特征因素影响,内部点云梯度变化大,边界点云缺失严重,边界轮廓线提取更具复杂性,已有方法无法实现其精细化提取。针对该问题,本研究提出一种基于模板匹配的建筑物激光点云立面几何特征提取方法,该方法通过计算立面窗户几何特征向量相似度,准确区分立面窗户类型,根据模板窗户点云的凸包特征点建立边界点云模板,替换立面同类型窗户,以此实现窗户边界轮廓的精细化提取,完善建筑立面整体边界轮廓,确定各个轮廓边界的几何特征与空间位置,提高建筑物立面点云边界提取精度,为后续建筑立面的精细化建模提供重要参考数据。

1 建筑物立面精细化边界提取算法基本原理

建筑物自身结构复杂多样,立面中包含门窗等多种目标物,其结构复杂点云残缺,对立面特征提取造成很大困难。本算法以单站激光扫描仪建筑物点云数据为研究对象,提取建筑物立面轮廓与内部窗户边界,流程主要包括点云预处理、墙面边界提取、窗户边界提取三个步骤,整体提取实验流程如图 1 所示。

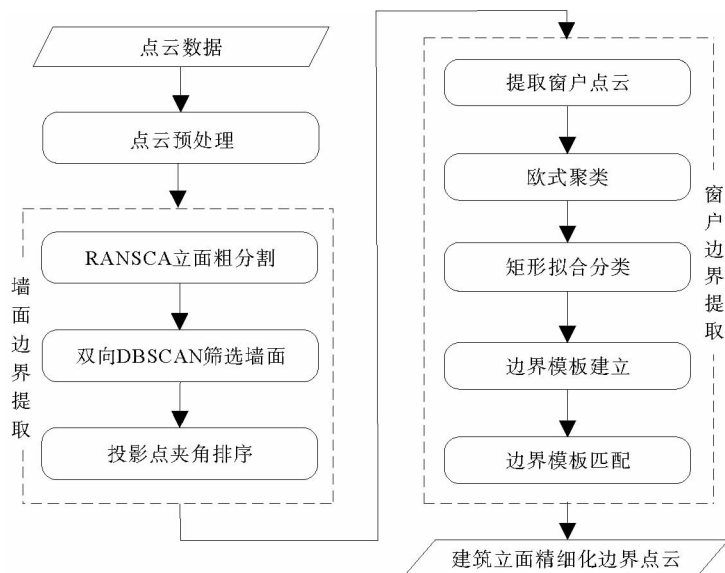


图 1 建筑立面精细化边界提取流程图

Fig. 1 Flow chart of fine boundary extraction for building facade

1.1 墙面边界提取

1) RANSAC 立面粗分割

建筑物墙面点云数据因受自身数据与拼接误差等因素的影响,使得建筑物立面存在一定厚度。若直接利用随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法进行立面分割,会造成一个平面被分割为多个平面的结果,无法准确分割每个墙面点云数据,如图 2(a)所示。所以在利用 RANSAC 算法提取立面的过程中采用动态距离阈值,设置 0.01 m 为步长,从阈值为 0 开始对立面进行 RANSAC 拟合,根据立面厚度动态调整拟合阈值,当拟合出的立面数 = FacadeNum 时输出阈值,如图 2(b)所示,提取墙面与墙面中的窗户,以保证墙面点云和窗户点云的完整性。

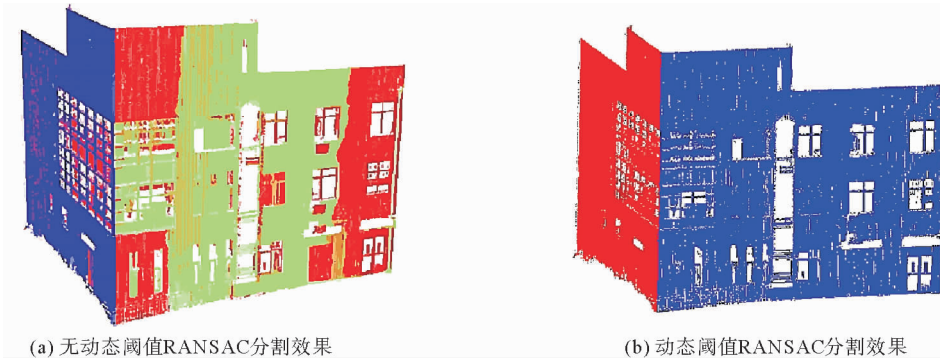


图 2 RANSAC 立面分割

Fig. 2 RANSAC elevation segmentation

2) 双向 DBSCAN 筛选墙面

利用粗分割后的立面数据提取墙面点云,粗分割后的立面主要存在墙面与窗户两种元素,墙面具有整体连通性,而窗户的分布具有离散性,且窗户距墙面所在平面有一定距离,并不属于同一平面。因此,依据两种立面元素的分布特性将两者点云准确分离是做到精确分类提取边界特征的前提。采用基于密度的聚类方法(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)对墙面进行双向提取,先将墙面点云旋转至与 YOZ 平面平行,再对另外两个方向的坐标系平面进行投影,并采用 DBSCAN 算法提取两个方向投影平面上二维点云的核心对象点及其密度直达点,将两个方向的墙面点云逆投影变换后取并集,即可分离出可完整体现墙面几何特征的点云。算法示意图如图 3 所示。

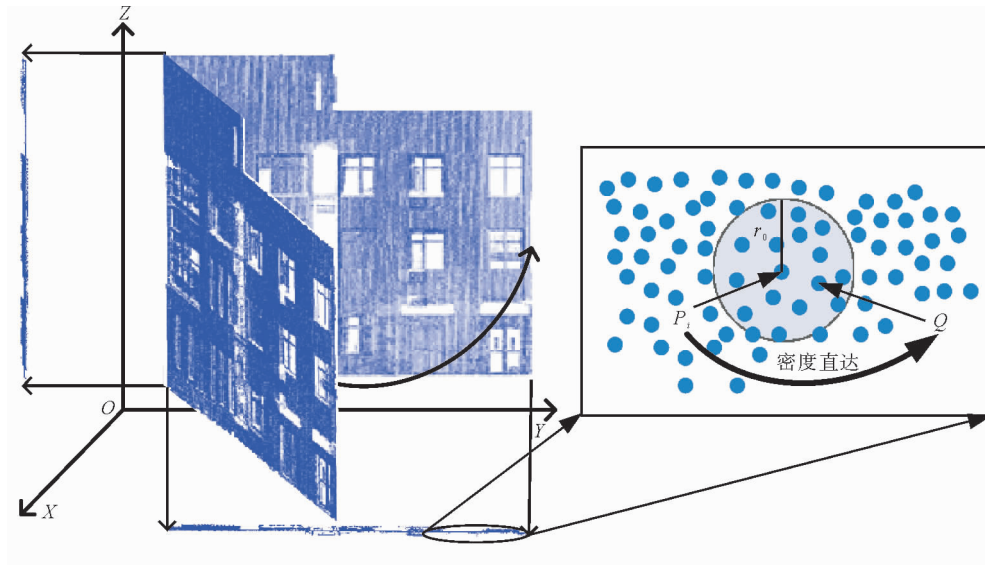


图 3 双向 DBSCAN 筛选墙面

Fig. 3 Bidirectional DBSCAN filter

3) 投影点夹角排序

分类提取立面精细化点云虽然能够消除部分噪点对细节特征的影响,但依然需要快速准确地提取边界特征,将复杂的数据点云简约化,使墙面细节特征更加直观。故本研究采用文献[7]基于投影点夹角排序的方法提取墙面边界,并依据墙面边界反映墙面整体边界轮廓和孔洞边界特征。

1.2 窗户边界提取

1) 提取窗户点云

建筑物的窗户大多处于墙面内部,且大致处于同一平面,因此窗户所在平面与建筑物外墙面之间存在一定的距离,本研究以上述距离为依据提取窗户点云。首先对墙面点云进行平面拟合,得到墙面所在几何平面。进而计算立面数据中所有点到墙面平面的欧氏距离。设置距离阈值,若满足阈值条件,则将点记为窗户待选点。统计墙面平面两侧窗户候选点的数量,数量较多一侧的点为窗户初始点云。如图 4 所示。

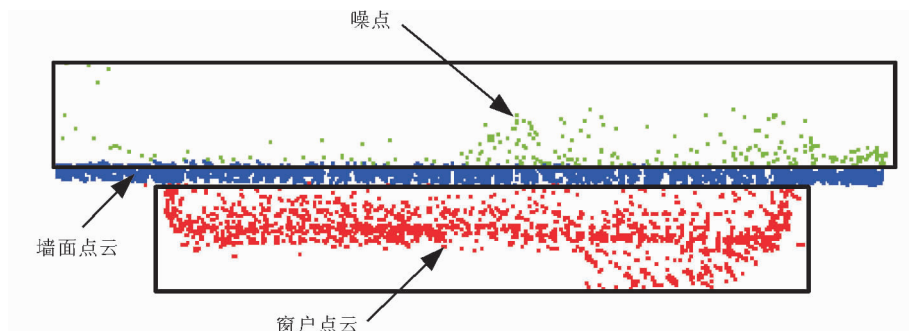


图 4 窗户初始点云提取

Fig. 4 Extraction of window initial point cloud

2) 窗户欧式聚类

得到窗户初始点云后对立面窗户进行单体化聚类分割,为后续单体窗户几何结构分析提供数据。窗户分布的离散性体现在窗户间有明显的距离间隔,但单体窗户点云的整体性好。根据以上特征,针对初始窗户点云采用欧式聚类方法将窗户单体分割出来。

3) 矩形拟合分类

对窗户完成聚类单体化后需对不同类型的窗户进行分类,由于同一建筑立面的窗户由不同类型的制式窗户组成,而不同类型制式窗户的几何形状和长宽尺寸区别明显。故对单体化窗户进行外接矩形拟合,通过判断外接矩形的相似程度达到分类的目的。将单体化窗户点云投影至墙面所在平面,计算点云数据的 4 个端点坐标最值,即可获得二维单体化点云外接矩形的 4 个角点坐标。根据此方法获得每个单体化窗户的外接矩形,并计算输出外接矩形的长 a 、宽 b ,单位为 m ,作为基础计算元素。拟合效果如图 5 所示。

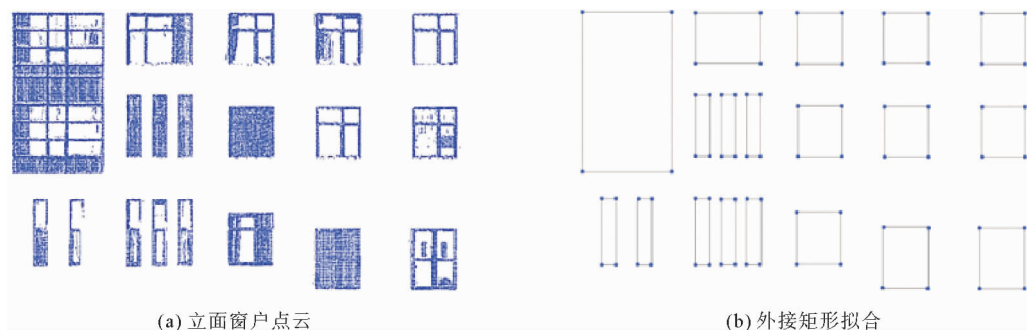


图 5 窗户外接矩形拟合效果示意图

Fig. 5 Sketch map of fitting effect of window external rectangle

得到窗户长宽特征后,避免形状大小相近的窗户在分类过程中因单一阈值设置的不准确造成分类错误,以长宽特征为基础计算元素构建特征向量,放大几何特征差异。将宽与长之比记为 P_i ,计算拟合矩形的面积与周长并做归一化处理,得到归一化面积 A_i 与归一化周长 C_i ,记归一化面积的 1.5 次幂乘 10 为 T_i ,即

$$\begin{cases} P_i = \frac{b_i}{a_i}, \\ A_i = \frac{a_i b_i}{\max(a_1 b_1 \cdots a_n b_n)}, \\ C_i = \frac{2 a_i + 2 b_i}{\max[(2 a_1 + 2 b_1) \cdots (2 a_n + 2 b_n)]}, \\ T_i = 10 \times A_i^{1.5}. \end{cases} \quad (1)$$

由此构成单个窗户的特征向量 $\mathbf{V}_i = (P_i, A_i, C_i, T_i)$,然后计算立面所有窗户拟合矩形之间特征向量的相似度,计算相似度公式为:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_1 &= (P_1, A_1, C_1, T_1), \\ \mathbf{V}_2 &= (P_2, A_2, C_2, T_2), \\ d &= \sqrt{\epsilon_1 (P_1 - P_2)^2 + \epsilon_2 (A_1 - A_2)^2 + \epsilon_3 (C_1 - C_2)^2 + \epsilon_4 (T_1 - T_2)^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

其中权重值 $\epsilon_1 = 0.2, \epsilon_2 = 0.2, \epsilon_3 = 0.2, \epsilon_4 = 0.4$ 。设置相似度阈值 Δ 。若 $d < \Delta$,则将 $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$ 表示的拟合矩形归为几何特征相似的同类矩形,反之排除。图 6 为依据图 5 立面窗户拟合矩形构建的特征向量。

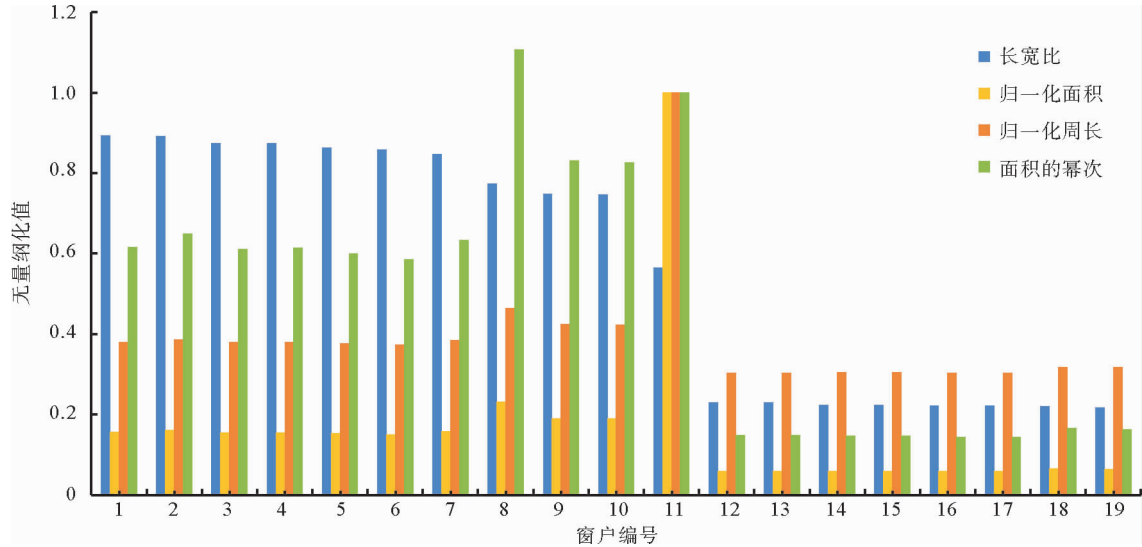


图 6 拟合矩形特征向量

Fig. 6 Fitting rectangular eigenvector

4) 边界模板建立

通过特征向量将拟合矩形分类后,依据相似度将同一立面上不同制式类型的窗户点云准确划分类别。同一制式的窗户虽然整体几何特征相同,但由于实际采集点云时现实场景的特殊性与复杂性,部分窗户存在点云缺失,影响边界提取效果。因此从实际点云中选取边界较完整的窗户样本代表此类窗户并建立边界模板,通过同种类型模板替换达到获取精细化边界提取的目的^[14]。首先将样本窗户投影到墙面所在三维平面获得二维窗户点云,然后利用凸包算法寻找窗户的边界特征点,并对特征点逆时针排序,依据点序号对相邻两特征点等距内插边界点,最后获得样本窗户的边界点云模板。模板建立效果如图 7 所示。

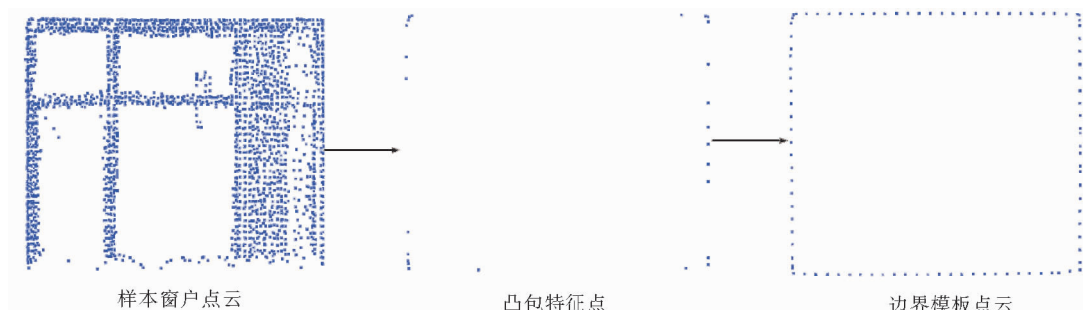


图7 边界模板建立效果

Fig. 7 Establishment effect of boundary template

5) 边界模板匹配

因为边界模板是依据原始样本窗户点云的特征点建立的,所以边界模板的拟合矩形特征向量不变,边界模板与同类型窗户间的特征向量相似度也不变。将模板与同类型窗户外接矩形的形心为基准点,依据模板基准点与窗户基准点的坐标差,将边界模板点云赋到所有此类型窗户的位置上,替换原位置的窗户点云,并根据几何距离删除墙面窗洞边界,以此区别立面窗户边界和其他墙面孔洞。

2 实验分析

2.1 实验数据与参数设置

本研究使用 C++ 编程实现提取建筑物立面中的几何特征边界,采用单站激光扫描仪所采集的点云数据进行实验。选取的实验区为含有多层规则矩形窗户的建筑立面。实验区 1 如图 8(a)所示,该建筑点云数据包含两个立面,共计 460 385 个点,立面上共存在两种非墙面元素,包括 3 扇门和 22 扇窗户。实验区 2 如图 8(b)所示,包含一个立面,共计 137 910 个点,包含 2 扇门和 16 扇窗户。根据窗户内部结构、内部点云特征和建筑物后期建模需要,本研究只提取窗户边界特征点云,内部结构特征不在研究范围内。

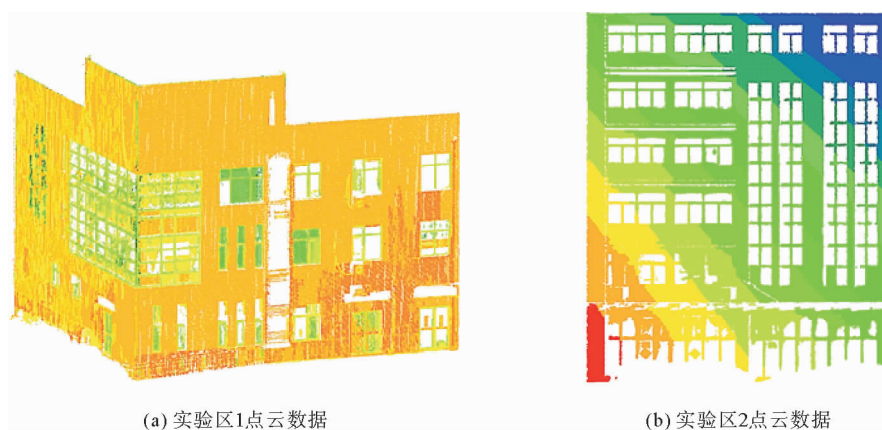


图8 原始立面点云

Fig. 8 Original elevation point cloud

首先对建筑立面进行 RANSAC 动态阈值分割,然后根据双向 DBSCAN 密度聚类算法提取建筑物立面的墙面点云,以墙面点云为基准面提取立面窗户点云和墙面边界,再采用欧式聚类方法将立面窗户点云单体化,并依据窗户外接拟合矩形进行特征向量分类,建立边界模板并对窗户模板匹配后即可得到立面窗户的精细化边界点云。分类提取点云过程中需要人工设定的参数见表 1。

表 1 立面点云分类提取参数设定

Tab. 1 Parameter setting of elevation point cloud classification extraction

参数	阈值	描述
Facade Num	2(实验一)	建筑立面数量阈值
	1(实验二)	
D_1	0.1~0.3	依据拟合平面提取窗户点云的距离阈值
D_2	0.3	欧式聚类搜索半径阈值
K_1	100	边界提取 K 个临近点的选取阈值
Δ	0.05	特征向量相似度阈值

2.2 实验结果讨论

两组实验结果如图 9 所示,图中窗户边界点云被统一赋为红色,墙面边界点云被统一赋为蓝色。图中立面窗户的边界被准确提取,不受点云缺失和内部噪声的影响。墙面的边界轮廓点云和内部孔洞边界也被准确提取,与窗户轮廓边界共同形成精细化建筑立面边界特征点云,实现了建筑墙面边界特征与窗户边界特征的精细化提取,确定了各个立面元素轮廓边界的几何特征与空间位置,提高了建筑物立面点云边界提取精度。

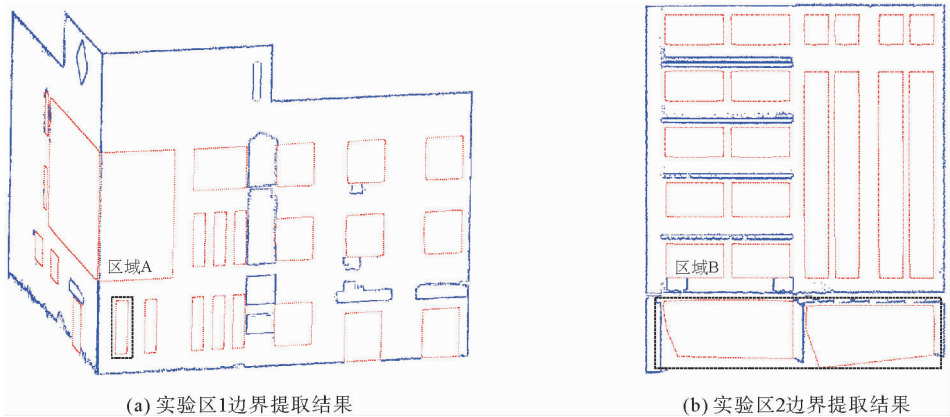


图 9 立面边界提取结果

Fig. 9 Elevation boundary extraction results

图 10(a)是图 9(a)中区域 A 的局部放大图,将提取得到的窗户边界和原始窗户点云对比显示,可体现本研究方法主要解决的实际问题与提取效果。区域 A 中窗户点云缺失较多,边界几何特征不完整但仍可根据特征点拟合矩形后依据特征向量准确分类,若直接提取边界点云,则不能体现窗户准确的边界几何特征。但利用本研究模板匹配方法,通过凸包点内插的方法得到准确完整的窗户边界点云,并形成边界模板点云。图 10(b)是图 9(b)中区域 B 的局部放大图,由于缺失大部分原始点云,所以无法提取可准确反映其几何特征的凸包特征点,导致提取错误边界。

为了对比分析本研究模板匹配方法边界特征的提取效果,选取图 8 墙体立面内部点云梯度变化大且边界点云缺失严重的窗户为例,如图 11(a),同时采用投影点夹角排序和 α -shape 算法,进行单体窗户边界特征提取,结果分别如图 11(c)~11(d)所示。由图 11(b)可见,本研究模板匹配方法可准确获取单体窗户的边界轮廓,不受内部窗帘和窗框点云噪声的影响,窗户下侧边界点云补全,得到较好的边界点云提取效果。如图 11(c)所示,基于投影点夹角排序方法不能有效去除内部窗帘和窗框点云,不能补全窗户下侧边界缺失点云,

也没有得到完整窗体轮廓边界点云。如图 11(d)所示, α -shape 算法可确定窗户大致轮廓边界,但同时保留窗户内部窗帘和窗框边界点云,内部存在冗余噪点,且下侧边界点云缺失严重,不能得到完整窗体轮廓边界点云。通过对比实验效果图可以看出,本方法可避免窗户内部结构点云影响,补全窗户边界缺失点云,准确获取体现窗户边界特征的点云数据。

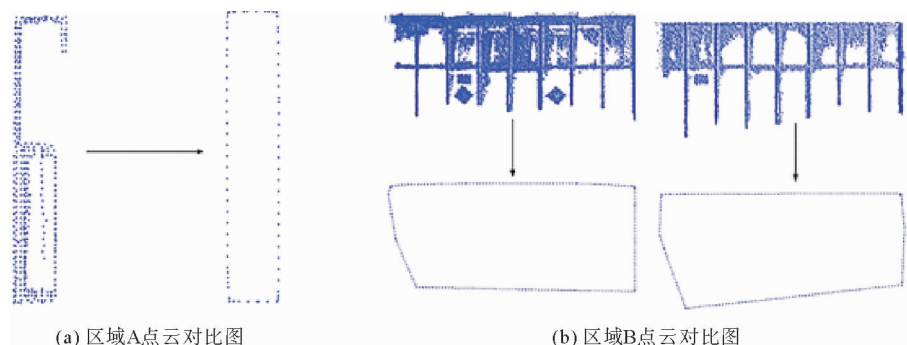


图 10 区域放大对比图

Fig. 10 Regional contrast

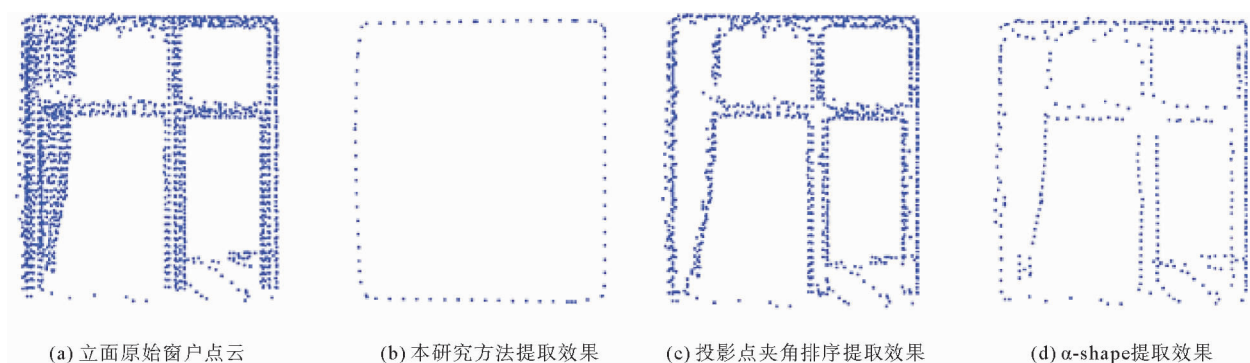


图 11 边界提取对比图

Fig. 11 Contrast graph of boundary extraction

精度评价是衡量建筑立面边界提取效果的重要指标,本研究从边界位置提取精度和边界完整性两个方面做精度评价。选取每组窗户的 4 个边界角点与原始窗户拟合矩形角点作为位置比对点,在体现窗户边界空间位置精度的同时反映窗户大小精度,并计算每组窗户的 4 组对比点间的距离标准差与平均坐标距离差。选取实验区 1 中单个立面的 19 组窗户数据进行统计分析可知,对比点平均距离差多集中于 0.04~0.08 m (图 12),求得标准差为 0.017 m,说明该方法稳定性好,平均坐标距离差在 0.06 m 以下。同类研究文献[15]选取单一类型窗户作为精度评价样本,手动选取关键特征点的偏移距离多集中于 0.04~0.06 m,提取精度误差分布在 0.06 m 左右;文献[16]通过对比所提取窗户的重心坐标与实际距离的差,偏移量多分布在 0.01~0.10 m,分布较离散,偏差平均值为 0.06 m。因此本研究提取精度较高且分布集中,结果验证了本算法提取窗户边界的准确性。

为评价边界提取完整性,本研究利用边界完整度指标评定提取窗户轮廓边界的完整程度。边界完整度即为点云数据中窗户准确完整的轮廓边数量 $N_{\text{实}}$ 与理论轮廓边数量 $N_{\text{理}}$ 之比。实验区 1 和实验区 2 的评价结果如表 2 所示。实验区 1 中共 25 扇窗户,原始窗户点云边界完整度为 91%,经过本研究模板匹配提取后,边界完整度为 100%。实验区 2 中共 20 扇窗户,原始窗户点云边界完整度为 63.75%,经过本研究模板匹配提取后,边界完整度为 92.5%。

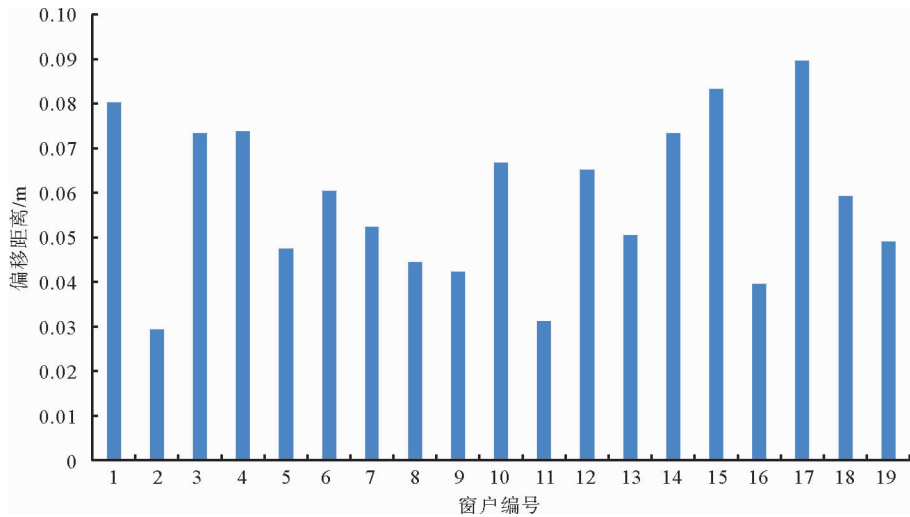


图 12 比对点偏移误差分析

Fig. 12 Error analysis of comparison point deviation

将研究结果与已有文献对比,如表 2 所示。文献[12]在建筑物立面点云数据完好情况下,基于切片法提取建筑物立面直线段特征点云,边界完整度达 92.5%;文献[17]在所选数据的漏点区域较小情况下,采用改进活动轮廓模型方法,提取建筑物屋顶边界,边界完整度达 85%。通过对比分析可以看出,本研究提出的算法,对窗户缺失点云有较好的补全效果,在点云数据不全或缺失较多时均能完整提取窗户边界的点云数据,获得较好的立面边界特征点云提取效果。

表 2 边界完整度评价分析

Tab. 2 Boundary integrity evaluation and analysis

	本研究方法(区域 1)	本研究方法(区域 2)	基于点云切片 ^[12]	改进的活动轮廓模型 ^[17]
原始边界点云完整度/%	91.00	63.75	无缺失	缺失较少
提取后边界点云完整度/%	100.00	92.50	92.50	85.00

3 结束语

单站激光扫描仪能够快速获取建筑立面的细节特征,在数字城市等方面具有较大的应用优势。本研究基于单站激光扫描仪的建筑立面激光点云数据,综合运用 RANSAC 平面分割、DBSCAN 密度聚类、欧式聚类、投影点夹角排序、模板匹配等算法,提出一种完整的精细化建筑立面边界特征提取方法。针对建筑物立面点云数据复杂和缺失部分窗户边界点云问题,能够提取建筑墙面边界,补全部分边界缺失的窗户轮廓边界点云,提取的窗户边界点云完整性好,精度较高,受噪点影响较小,适合复杂场景中建筑物完整边界的精细化提取。课题组将在今后的研究中对建筑物立面其他细节特征进行提取,使提取算法适应更加复杂的立面情况,从而构建更加完整细致的建筑模型。

参考文献:

[1]靳鑫洋,王素元,聂建亮,等.一种基于 Delaunay 三角网边长阈值与激光点云的建筑物立面结构提取方法[J].地理与地理信息科学,2019,35(5):80-84.
JIN Xinyang,WANG Suyuan,NIE Jianliang,et al.Building facade structure extraction based on the threshold of lengths of Delaunay triangulation's sides and laser point cloud[J].Geography and Geo-Information Science,2019,35(5):80-84.
[2]GUO B,LI Q Q,HUANG X F,et al.An improved method for power-line reconstruction from point cloud data[J/OL].Remote Sensing,2016,8(1):36.DOI:10.3390/rs8010036.
[3]OCHMANN S,VOCK R,WESSEL R,et alAutomatic reconstruction of parametric building models from indoor point

- clouds[J].Computers & Graphics,2016,54:94-103.
- [4]杜建丽,陈动,张振鑫,等.建筑点云几何模型重建方法研究进展[J].遥感学报,2019,23(3):374-391.
DU Jianli,CHEN Dong,ZHANG Zhenxin,et al.Research progress of building reconstruction via airborne point clouds[J].Journal of Remote Sensing,2019,23(3):374-391.
- [5]杜秋,郭广礼.三维激光扫描点云边界提取研究[J].金属矿山,2017(10):67-71.
DU Qiu,GUO Guangli.Research on boundary extraction of 3D laser scanning point cloud[J].Metal Mine,2017(10):67-71.
- [6]刘迎,王朝阳,高楠,等.特征提取的点云自适应精简[J].光学精密工程,2017,25(1):245-254.
LIU Ying,WANG Chaoyang,GAO Nan,et al.Point cloud adaptive simplification of feature extraction[J].Optics and Precision Engineering,2017,25(1):245-254.
- [7]蒋陈纯,刘科,舒敏.点云边界快速精确提取算法[J].光电子·激光,2020,31(5):531-538.
JIANG Chenchun,LIU Ke,SHU Min.Algorithm for fast and accurate boundary points extraction[J].Journal of Optoelectronics Laser,2020,31(5):531-538
- [8]王果,刘绍堂,陈超,等.基于激光点云的建筑物立面轮廓提取[J].激光与光电子学进展,2019,56(18):112-118.
WANG Guo,LIU Shaotang,CHEN Chao,et al.Boundary extraction of building facade based on laser point clouds[J].Laser & Optoelectronics Progress,2019,56(18):112-118.
- [9]朱军桃,王雷,赵苗兴,等.基于机载 LiDAR 数据的建筑物屋顶边界提取[J].桂林理工大学学报,2019,39(4):879-885.
ZHU Juntao,WANG Lei,ZHAO Miaoxing,et al.Building roof boundary extraction based on airborne LiDAR data[J].Journal of Guilin University of Technology,2019,39(4):879-885.
- [10]SANTOS R C D,GALO M,CARRILHO A C.Extraction of building roof boundaries from LiDAR data using an adaptive alpha-shape algorithm[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2019,16(8):1289-1293.
- [11]ZHAO Z Z,DUAN Y S,ZHANG Y J,et al.Extracting buildings from and regularizing boundaries in airborne LiDAR data using connected operators[J].International Journal of Remote Sensing,2016,37(3/4):889-912.
- [12]李金涛,程效军.建筑物立面点云直线段特征提取方法[J].中国激光,2019,46(11):287-298.
LI Jintao,CHENG Xiaojun.Straight-line-segment feature-extraction method for building-facade point-cloud data[J].Chinese Journal of Lasers,2019,46(11):287-298.
- [13]EWA C,RYP B,RCL A.Building outline extraction from ALS point clouds using medial axis transform descriptors-Science Direct[J/OL].Pattern Recognition,2020,106.DOI:10.1016/j.patcog.2020.107447.
- [14]张文武,李光太,徐全鹏,等.车载激光点云中道路路灯提取方法[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(1):58-67.
ZHANG Wenwu,LI Guangtai,XU Quanpeng,et al.Road streetlamp extraction method in mobile laser scanning point cloud [J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2019,38(1):58-67.
- [15]杨清科,李永强,刘聪,等.基于动态椭圆的 LiDAR 数据窗户边界提取研究[J].地理与地理信息科学,2019,35(2):61-67.
YANG Qingke,LI Yongqiang,LIU Cong,et al.Study on window boundary extraction method of introducing dynamic ellipse based on vehicle LiDAR [J].Geography and Geographic Information Science,2019,35(2):61-67
- [16]邹纪伟,刘德儿,杨鹏,等.建筑立面点云对偶深度图像中窗户提取方法[J].激光与红外,2020,50(7):875-881.
ZOU Jiwei,LIU De'er,YANG Peng,et al.Window extraction method in dual depth image of point cloud of building facade [J].Laser and infrared,2020,50(7):875-881
- [17]孙颖,张新长,罗国玮.从机载激光雷达点云提取建筑物屋顶边界的活动轮廓模型改进方法[J].测绘学报,2014,43(6):620-625.
SUN Ying,ZHANG Xinchang,LUO Guowei.Improved active contour model for building roof boundary extraction from LiDAR point cloud[J].Journal of Surveying and Mapping,2014,43(6):620-625.

(责任编辑:高丽华)