

改进的 Alpha-shapes 建筑物轮廓线提取算法

惠振阳*, 胡海瑛, 李娜, 李卓宣

东华理工大学测绘工程学院, 江西 南昌 330013

摘要 建筑物轮廓线提取是三维城市重建的关键环节。传统 Alpha-shapes 轮廓线提取算法具有鲁棒性强且易于实现的优点, 但所提取的轮廓线容易受噪声点的干扰, 难以获得准确的轮廓边缘。针对该问题, 提出了一种改进的 Alpha-shapes 轮廓线提取算法。首先, 采用随机抽样一致性算法筛选由 Alpha-shapes 算法提取的初始轮廓点; 然后, 用道格拉斯普克算法确定关键轮廓点; 最后, 通过强制正交优化提取准确的轮廓线。用三组不同形状建筑物的点云进行实验, 结果表明, 本算法能获得更准确的建筑物边缘, 有效克服了传统 Alpha-shapes 算法提取的轮廓边缘锯齿状现象, 正确率、完整率、质量也均优于传统 Alpha-shapes 算法。

关键词 遥感; 点云; 建筑物; 轮廓点; Alpha-shapes 算法; 强制正交

中图分类号 P237

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1028006

Improved Alpha-shapes Building Profile Extraction Algorithm

Hui Zhenyang*, Hu Haiying, Li Na, Li Zhuoxuan

Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China

Abstract Building profile extraction is crucial in three-dimensional urban reconstruction. The traditional Alpha-shapes profile extraction algorithm has strong robustness and easy implementation, but the extracted profile is easily interfered by noise points, making it difficult to obtain an accurate profile edge. This paper proposes an improved Alpha-shapes profile extraction algorithm to solve the abovementioned problem. First, the initial profile points extracted via the Alpha-shapes algorithm are selected by a random sample consensus algorithm. Thereafter, the key profile points are determined using the Douglas-Peucker algorithm. Finally, an accurate profile is extracted through forced orthogonal optimization. Three groups of point clouds with different building shapes are used for experimental analysis. The experimental results demonstrate that the algorithm is superior to the traditional Alpha-shapes algorithm as the improved algorithm can obtain more accurate building edges and effectively overcome the jagged edges of the traditional Alpha-shapes algorithm, and the accuracy, completeness and quality are also better than those of the traditional Alpha-shapes algorithm.

Key words remote sensing; point cloud; building; profile points; Alpha-shapes algorithm; forced orthogonal

1 引言

建筑物轮廓线在城市三维建模、建筑物类别统

计与灾后重建等领域有着重要作用, 而传统半自动化轮廓线提取方法很难满足当前城市迅速发展的需求。机载激光雷达(LiDAR)具有自动化程度高、

收稿日期: 2021-04-10; 修回日期: 2021-05-13; 录用日期: 2021-05-25

基金项目: 中国博士后科学基金(2019M661858)、国家自然科学基金(42161060, 41801325)、江西省自然科学基金(20192BAB217010)、江西省教育厅科技项目(GJJ170449)、江西省数字国土重点实验室开放基金(DLLJ201806)、东华理工大学博士启动基金(DHBK2017155)

通信作者: huizhenyang2008@163.com

精度高、数据获取速度快、不受外界条件影响等优点^[1-3],成为建筑物信息获取的重要方式,如何从点云数据中快速准确地提取建筑物轮廓线也成为当前亟待解决的问题。现有的建筑物轮廓线提取算法主要有基于图像、基于点云数据以及基于不规则三角网的算法。

基于图像的建筑物轮廓线提取算法最早由 McKeown^[4]提出,需要将三维点云数据进行格网化,利用已有的图像处理方法识别建筑物轮廓线,但该算法在点云格网化时容易引入误差。赖旭东等^[5]利用点云格网化后建筑物与地面之间的灰度差值,分别用经典的 Roberts 算子、Prewitt 算子以及 Sobel 算子提取建筑物边缘,均得到了较好的提取效果。Zhou 等^[6]提出了一种基于拓扑性质的建筑物轮廓线提取算法,该算法可有效分离植被,快速获取建筑物轮廓线,但需要较高质量的点云数据。Jarzabek-Rychard^[7]将图像转化为高程图像后获取建筑物的粗略边界,然后通过随机抽样一致性 (RANSAC) 算法拟合边界进一步精细化轮廓线。王双喜等^[8]将建筑物边界进行多边形拟合,选择最佳外接矩形,然后将最佳外接矩形和建筑物轮廓进行逐段等分,计算线段之间的 Hausdorff 距离,并根据替换规则选择性地用外接矩形边线段进行边界替换。

基于点云数据特征信息提取建筑物轮廓线的算法通常利用法向量、斜率、坡度等特征信息提取建筑物轮廓线,对凹槽处的轮廓线不敏感,在复杂区域容易出现边界遗失现象。赵传^[9]基于点云数据信息提取屋顶轮廓,通过构建投票模型,解决了屋顶面片的竞争问题。程亮等^[10]先根据每栋建筑物的缓冲区和外接矩形估算建筑物的主方向,并在主方向的约束下检测轮廓线,最后通过密度分析和 K-means 动态聚类算法获取精确的建筑物轮廓。钟文彬等^[11]利用该思想获取了电路板点云的关键轮廓信息。Zhang 等^[12]先使用渐进滤波算法分离地物点,再使用平面区域生长得到建筑物点,通过连接边界点得到初始边界,简化和规则边界后最终得到建筑物的轮廓线。Chen 等^[13]基于 Voronoi 子图无缝追踪建筑物边界,使相邻面片间不存在缝隙,先将原始边界划分为多个线段,然后用生成的关键点与投影点表示边界。

相较于前两种算法,基于不规则三角网的建筑物轮廓线提取算法避免了格网化导致的误差,且能

较好地表示凹槽处的轮廓线变化,如 convex-hull、Alpha-shapes 算法^[14]。convex-hull 算法也被称为 concave-hull 算法,最初由 Andrew^[15]提出,通过连接最外层的点包围所有的离散点集。Tseng 等^[16]用平面拟合获取多个集合,然后设定屋顶集合的点云数量阈值,将集合中点云数量大于阈值的点云判定为屋顶,最后结合 convex-hull 算法获取屋顶边界点,并用 Hough 变换提取轮廓线。建筑物轮廓线的顶点不是有序排列,导致基于图像和点云数据特征的轮廓线提取算法极易出错^[17]。Alpha-shapes 算法最早由 Edelsbrunner 等^[18]提出,该算法用一个固定半径的圆遍历离散点集,从而抽象出点云的直观形状^[19],能稳定获取建筑物线的轮廓点,鲁棒性较强。沈蔚等^[20]首次将 Alpha-shapes 算法用于建筑物轮廓线提取,实验结果表明,该算法适用于多种类型建筑物的轮廓线提取,且鲁棒性较强。李云帆等^[21]对单一阈值的 Alpha-shapes 算法进行改进,提出了一种双阈值的 Alpha-shapes 算法,能获得较完整的建筑物轮廓线,但需要人工设定阈值,自适应性不强。Peethambaran 等^[22]针对参数设置问题,提出了一种无参的 Alpha-shapes 算法,对规则建筑物轮廓的提取效果较好,但该算法比较依赖点云数据的密度。郭亚栋等^[23]提出了一种基于方向预测规则化算法的机载激光雷达建筑物正交轮廓线提取算法,利用 Alpha-shapes 算法提取轮廓点,用 RANSAC 算法简化轮廓线,并对轮廓线进行规则化。Alpha-shapes 算法能快速有效地提取建筑物的轮廓点,但获取的轮廓线锯齿状严重。针对该问题,本文提出了一种改进的 Alpha-shapes 算法,对 Alpha-shapes 算法提取的初始轮廓点不断进行精简与优化,从而消除轮廓线的锯齿状现象。

2 基本原理

改进 Alpha-shapes 建筑物轮廓线提取算法的流程图如图 1 所示。首先,利用图割方法移除建筑物的立面扫描点;然后,用 Alpha-shapes 算法提取屋顶点云的初始轮廓点,用 RANSAC 算法对初始轮廓点进行拟合,获取轮廓线,只保留距离轮廓线较近的轮廓点;最后,用道格拉斯普克 (D-P) 算法获取关键轮廓点,并利用强制正交的方式优化关键轮廓点,获取最终的轮廓线。具体步骤包括初始轮廓点提取、轮廓点筛选、关键轮廓点提取以及关键轮廓点优化。

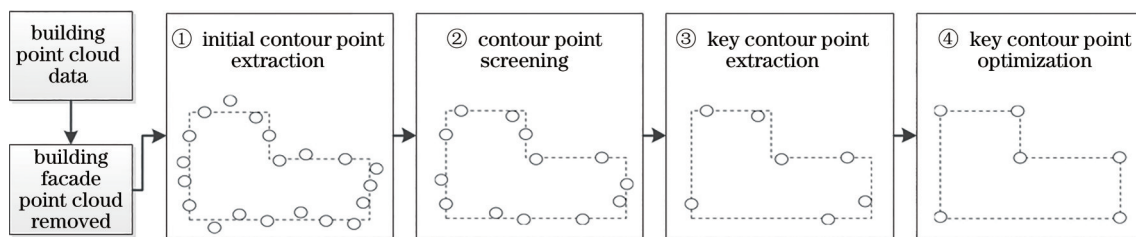


图 1 建筑物轮廓线提取算法的流程图

Fig. 1 Flow chart of the building profile extraction algorithm

2.1 建筑物立面扫描点的移除

由于激光脉冲通过斜向下方式对地面进行扫描,部分激光束会从建筑物的侧面反射回接收器,导致建筑物点云数据中可能会保留立面数据,如图 2 所示。当激光脉冲斜向下扫描时,会有部分激光脉冲打到屋顶,形成屋顶点云,如图 2 中的黑色圆点;也会有部分激光脉冲打到建筑物侧面,形成立面点云,如图 2 中的黑色星点。若不去除立面扫描点,建筑物点云投影后会导致边界点云与中心点云之间的密度差异较大,影响后续 Alpha-shapes 算法提取建筑物轮廓点的效果。因此,先基于距离以及法向量两个约束条件构建连通图,提取屋顶点云。由于屋顶点云相较立面扫描点规整且密集,通过连通图分割后,可将屋顶点云集合同一连通图中。

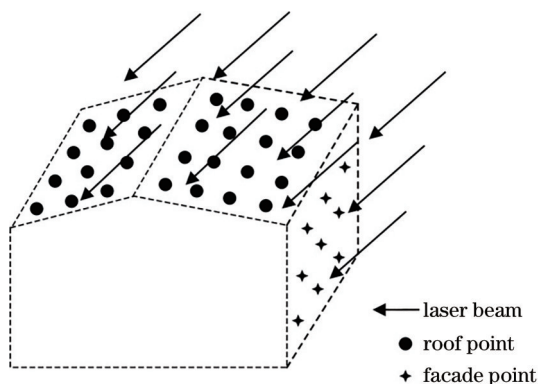


图 2 LiDAR 扫描示意图

Fig. 2 Diagram of the LiDAR scanning

经过连通图分割后,建筑物点云被分为多个连通子图,构成连通子图的数量差异较大,最大的连通子图对应的是屋顶。由于屋顶点云间距较小,且表面平整,法向量方向变化缓慢,几乎所有的屋顶点云都位于同一连通图中。虽然立面扫描点的法向量方向变化不大,但分布散乱,基于点云距离的约束条件会被分在多个连通图中。通过提取最大连通图可获取屋顶点云,从而去除建筑物的立面扫描点。

2.2 轮廓点筛选

获取建筑物屋顶点后,用 Alpha-shapes 算法提取屋顶的初始轮廓点。设屋顶点集 $S = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ 包含 n 个点, n 个点可以构成 $n \times (n - 1)$ 条线段。在点集 S 中,过任意两点 p_1, p_2 绘制半径为 α 的圆,若圆内无其他点存在,则判定 p_1, p_2 为建筑物轮廓点。

图 3(a)为建筑物屋顶点在二维平面的投影,图 3(b)为通过 Alpha-shapes 算法提取的初始轮廓点。为了精简轮廓点使其更具代表性,用 RANSAC 算法拟合初始轮廓点获得多条直线,仅保留距离拟合直线较近的轮廓点,筛选轮廓点的步骤如下。

1) 随机抽取两个初始轮廓点 p_1, p_2 , 过 p_1, p_2 作直线,用与直线 $p_1 p_2$ 距离小于阈值 h_i 的点作为直线的拟合点,并计算拟合点的数量;重复该过程 i 次,记录拟合点数量最多的直线方程,将拟合点加入建筑物轮廓点集 S'' 。

2) 将拟合点从初始轮廓点集 S' 中删除,将步骤 1) 获取的直线方程斜率作为主方向,以主方向的斜率以及与主方向正交的斜率在剩余初始轮廓点中寻找拟合点最多的直线方程,并将拟合点加入轮廓点集 S'' 。

3) 重复步骤 2) 直到初始轮廓点集 S' 的点数少于 S_{num} 。

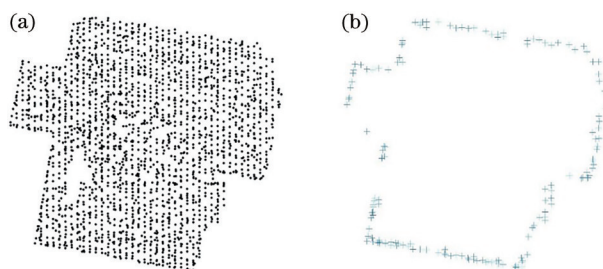


图 3 Alpha-shapes 算法提取的初始轮廓点。(a) 屋顶点云; (b) 初始轮廓点

Fig. 3 Initial contour points extracted by Alpha-shapes algorithm. (a) Roof point cloud; (b) initial contour points

2.3 关键轮廓点的提取

虽然 RANSAC 算法可去除距离拟合轮廓线较远的初始轮廓点,但依旧不能很好地表达规则建筑物的轮廓,仍需进一步规整轮廓线。因此,用 D-P 算法提取关键轮廓点,以减少轮廓线的锯齿状现象。D-P 算法的原理如图 4 所示。首先,将曲线的首尾点即第 1 点与第 8 点相连(虚线),判断位于其区间的点到虚线的距离,如图 4(a)所示。第 5 点到虚线的距离最大且大于设定阈值,因此,将其

设为关键点,并分别将第 5 点与第 1 点和第 8 点相连,得到图 4(b)中的虚线。第 6 点与过第 5 点和第 8 点的虚线距离较远,但距离小于设定阈值,因此将位于第 5 点与第 8 点区间的第 6 点与第 7 点舍弃;第 3 点与过第 1 点与第 5 点的虚线距离较远,且距离大于设定阈值,因此保留第 3 点。根据点到虚线的距离大小将图 4(c)中的第 4 点去除,将第 2 点设为关键点,最终简化的关键点如图 4(d)所示,算法的具体步骤如下。

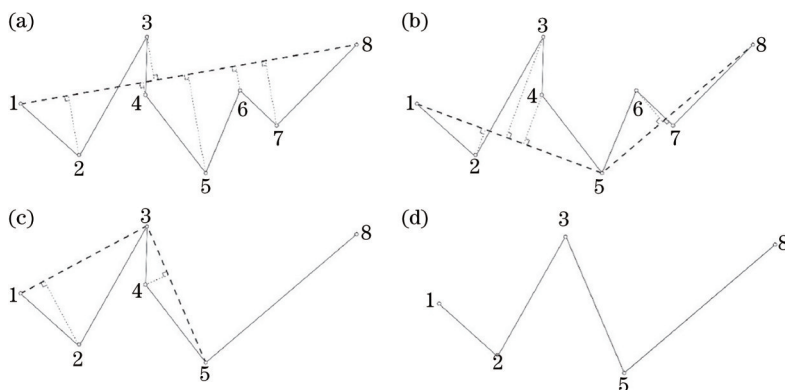


图 4 D-P 算法的步骤。(a) 轮廓线首尾点相连; (b) 关键轮廓点 5 的识别; (c) 关键轮廓点 3 的识别; (d) 关键轮廓点的提取结果
Fig. 4 Steps of the D-P algorithm. (a) End points of the contour line are connected; (b) identification of the key contour point 5; (c) identification of the key contour point 3; (d) extraction result of the key contour point

1) 将轮廓线的首尾点连成一条直线。

2) 计算所有轮廓点到该直线的距离,得到最大的距离值 D_{max} 。若 $D_{max} > D_{th}$,则将位于该线段区间的点去除;若 $D_{max} < D_{th}$,则以此时的 D_{max} 将曲线分为两部分。其中, D_{th} 为设定阈值。

3) 重复步骤 2),直到没有点到直线的距离大于 D_{th} ,输出剩余点 $S_{KeyPoint}$ 。

通过 D-P 算法获取的关键轮廓点连线如图 5 所

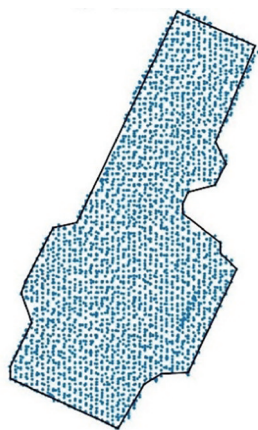


图 5 D-P 算法获取的建筑物关键轮廓
Fig. 5 Key contour of the building obtained by D-P algorithm

示。可以发现,由关键轮廓点连接成的轮廓线较为平整,但在 90° 转角处的处理效果较差,仍需进一步优化处理。

2.4 关键轮廓点的优化

为了避免拐点处出现相邻两边不垂直的情况,对两种情况下的关键轮廓点进行优化,如图 6 所示。其中,实线表示原始轮廓线,虚线表示校正关键轮廓点后的理想轮廓线。

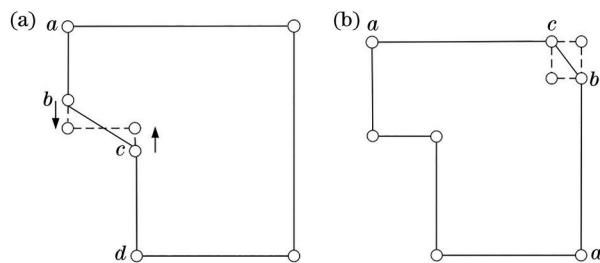


图 6 关键轮廓点的校正结果。(a) 情况 1; (b) 情况 2
Fig. 6 Correction results of key contour points. (a) Case 1; (b) case 2

首先,遍历所有两个关键轮廓点间的连线,若连线斜率与主方向斜率以及与主方向正交方向的斜率相差均超过阈值,表明该连线既不平行于主方向也不平行于和主方向正交的方向,需要对这两个关键

点进行优化。如图 6 所示,优化点 b 与点 c 时,将点 b 与点 b 的上一点 a 相连,得到直线 ab ,将点 c 与点 c 的下一点 d 相连,得到直线 cd 。若直线 ab 与直线 cd 的夹角小于设定的角度阈值,则判定直线 ab 与直线 cd 平行。计算点 b 和点 c 的中点,以与直线 ab 垂直的方向过该中点做直线,该直线与直线 ab 、 cd 的交点分别为点 b 与点 c 校正后的关键轮廓点。若判断直线 ab 与直线 cd 不平行,则计算菱形交点直线 ab 与 cd 延长线的交点(菱形交点)以及过点 b 与直线 ab 垂直的直线和过点 c 与直线 cd 垂直的直线交点(星形交点)。根据两个交点邻近的轮廓点数量选择交点,将半径设置为交点到直线 bc 的距离。两个交点的选择情况如图 7 所示。其中,实心圆点表示轮廓点。当星形交点范围内的轮廓点较多时,表明实际轮廓线向内凹陷,应选择星形交点作为关键点;当菱形交点范围内的轮廓点较多时,表明实际轮廓向外延展,应选择菱形交点作为关键点。对关键轮廓点优化后得到的最终建筑物轮廓线如图 8 所示。

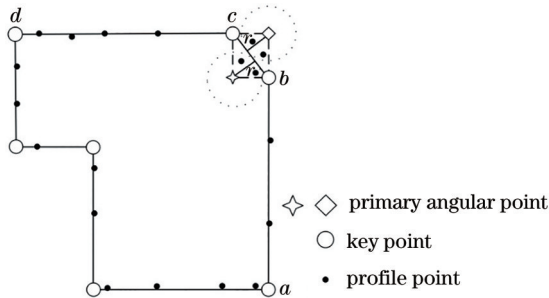


图 7 关键轮廓点的选择

Fig. 7 Selection of key contour points

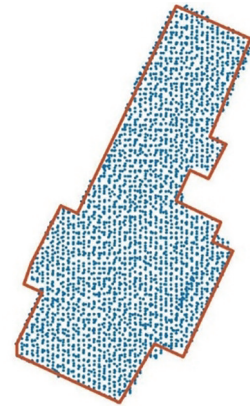


图 8 建筑物轮廓线的最终提取结果

Fig. 8 Final extraction result of the building profile

3 分析与讨论

3.1 实验数据

为了验证本算法的有效性,采用三组不同区域的点云数据进行实验,三组点云数据均经过人工分类,包括地面、植被、建筑物等 6 类,且仅对建筑物点云(包含屋顶点与部分立面扫描点)进行实验分析。样本 1~样本 3 的数据信息如表 1 所示,可以发现,三组数据中的建筑物大小不一且形状各异,非常适合检测建筑物轮廓线提取算法的效果。本算法对三组点云数据的处理结果如图 9 所示,可以发现:样本 1 的建筑物具有多转角、不对称的特点,轮廓线较为复杂,由多条线段组成;样本 2 的建筑物尺寸较大,轮廓线较为简单;样本 3 的建筑物呈小而密集分布,多数轮廓线呈规则的矩形状。

表 1 实验数据信息

Table 1 Experimental data information

Sample	Number of buildings	Average spacing of points /m ²	Number of points	Minimum building size /(m×m)
Sample 1	14	0.25	37570	16.29×16.62
Sample 2	2	0.24	12676	16.52×21.89
Sample 3	43	0.30	180396	6.34×11.99

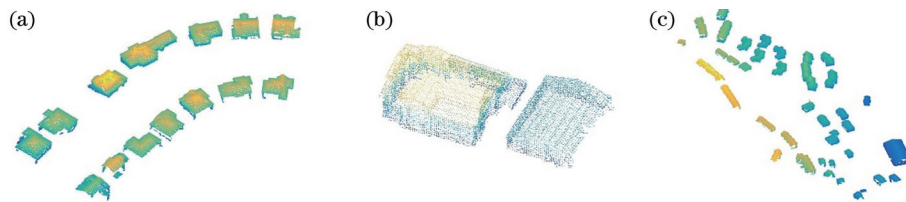


图 9 本算法提取的建筑物轮廓线。(a)样本 1;(b)样本 2;(c)样本 3

Fig. 9 Building profile extracted by our algorithm. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3

3.2 实验结果与分析

将传统 Alpha-shapes 算法与本算法提取的建筑

物轮廓线进行对比,结果如图 10 所示。其中,数字表示多栋建筑物的序号。可以发现:传统 Alpha-

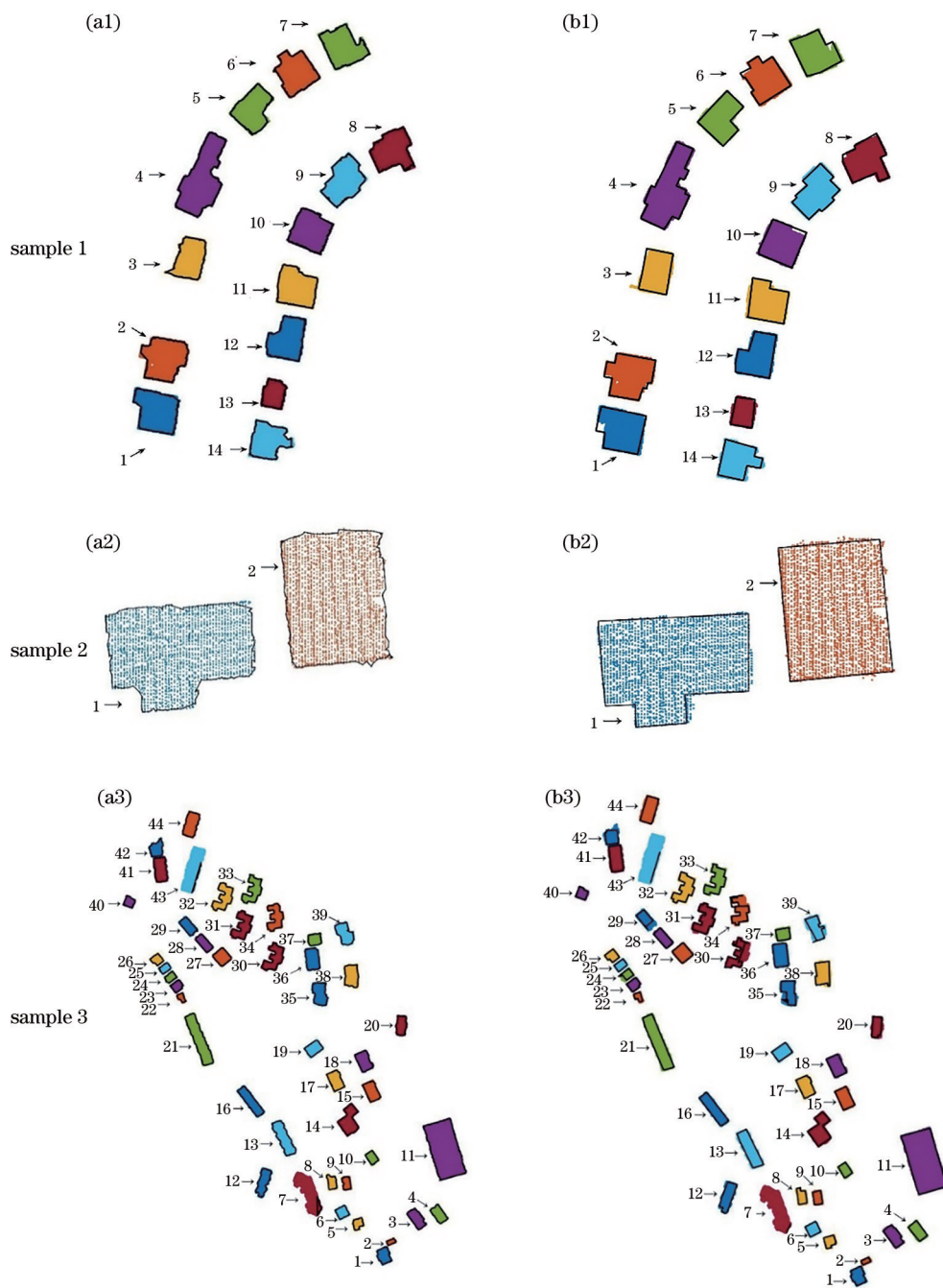


图 10 不同算法提取的建筑物轮廓线。(a) Alpha-shapes 算法; (b) 本算法

Fig. 10 Building profiles extracted by different algorithms. (a) Alpha-shapes algorithm; (b) our algorithm

shapes 算法虽然能识别出轮廓线的转角变化情况,但锯齿状明显,无法很好地体现建筑物的规则形状,如图 10(a1)中 3 号建筑物提取的屋顶点包含其他点,投影时左下角存在多余角点;采用本算法提取轮廓线时,能获取规整的矩形轮廓线,如图 10(b1)所示。本算法提取的建筑物轮廓能较好地识别凹槽以及凸起处的轮廓线,但在部分角点变化非常小的地方无法识别,且只适用于规则建筑物,无法应用于具有非直角结构的其他建筑物。如:图 10(b1)中的 10 号建

筑物无法获得轮廓点变化较小处的轮廓线;7 号建筑物存在未能识别的非直角结构。从图 10(a2)与图 10(b2)可以发现,本算法能去除轮廓线的锯齿状。从图 10(a3)与图 10(b3)中的 7 号与 43 号建筑物可以发现,用传统 Alpha-shapes 算法提取轮廓点失败时,本算法也不能获取最终的轮廓线。综上所述,本算法能有效消除建筑物轮廓线的锯齿现象,且对大型建筑物轮廓线的提取效果优于小型建筑物的提取效果,但同时也存在一定的局限性。

采用基于面积的精度评定指标^[24]对 Alpha-shapes 算法与本算法的性能进行评价,包括完整率 (X_{Comp})、正确率 (X_{Corr})以及质量 (X_{Qual}),可表示为

$$\begin{cases} X_{Comp} = \frac{X_{TP}}{X_{TP} + X_{FN}} \\ X_{Corr} = \frac{X_{TP}}{X_{TP} + X_{FP}} \\ X_{Qual} = \frac{1}{1 + X_{FN}/X_{TP} + X_{FP}/X_{TP}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中, X_{TP} 为真正类,表示提取轮廓线包围的正确面积; X_{FN} 为假负类,表示提取轮廓线未包围的正确面积; X_{FP} 为假正类,表示提取轮廓线包围的非正确面积。 X_{TP} 、 X_{FN} 、 X_{FP} 的面积示意图如图 11 所示,其中,实线表示参考轮廓线,虚线表示算法提取的轮廓线。两种轮廓线的相交区域面积为 X_{TP} ,参考轮廓线与提取轮廓线未相交的区域面积为 X_{FN} ,算法提取的轮廓线与参考轮廓线未相交的区域面积为 X_{FP} 。

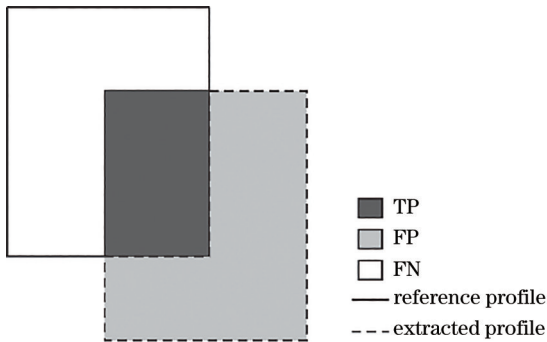


图 11 精度评价指标中面积的示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the area in precision evaluation index

本算法和 Alpha-shapes 算法提取的三组数据建筑物轮廓线精度如图 12~图 14 所示。可以发现,两种算法的精度表现大致相同,尤其是正确性指标。图 15 为三组样本数据评价指标的平均值,可以发现,两种算法的评价指标平均值均能达到 85%。样本 1 与样本 2 中本算法的平均指标精度高于 Alpha-shapes 算法,而样本 3 中 Alpha-shapes 算法的表现更佳,这表明 Alpha-shapes 算法提取小型建筑物时更具优势,能贴合轮廓线的变化。本算法在小型建筑物轮廓线上的提取精度虽然比 Alpha-shapes 算法低,但也能去除轮廓线的锯齿状,表现出建筑物的直角特性,且在大型建筑物轮廓线提取中的表现优于 Alpha-shapes 算法。

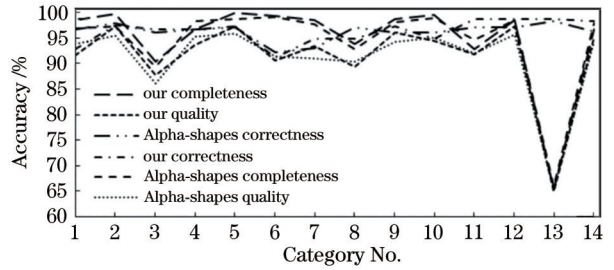


图 12 不同算法对样本 1 的精度

Fig. 12 Accuracy of different algorithms for sample 1

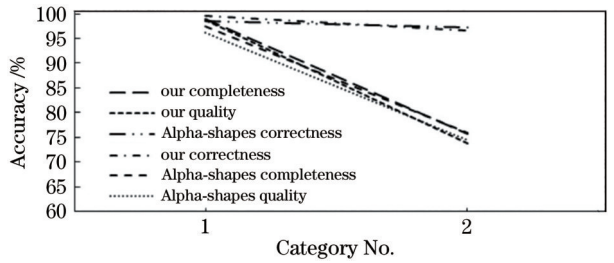


图 13 不同算法对样本 2 的精度

Fig. 13 Accuracy of different algorithms for sample 2

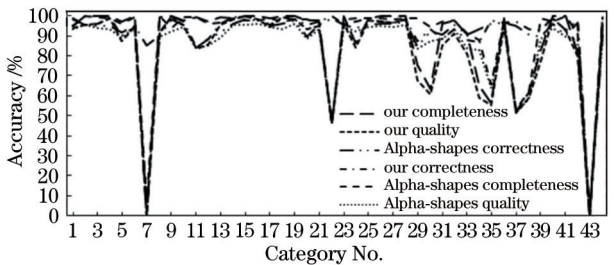


图 14 不同算法对样本 3 的精度

Fig. 14 Accuracy of different algorithms for sample 3

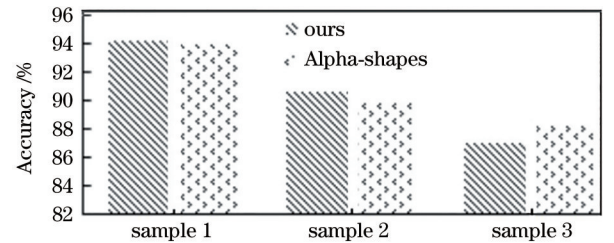


图 15 三组样本的评价指标平均值

Fig. 15 Average value of the evaluation indicators of the three groups of samples

4 结 论

建筑物在城市中占据主要面积,其三维模型是数字城市的重要组成部分,建筑物轮廓线是辅助三维建模的主要数据源。针对 Alpha-shapes 轮廓线提取算法轮廓线呈锯齿状的缺点,提出了一种改进算法。首先,用图割法去除建筑物立面扫描点,用

Alpha-shapes 算法提取初始轮廓点,用 RANSAC 算法筛选轮廓点;然后,用 D-P 算法确定关键轮廓点,通过移动或添加关键轮廓点的方式进行优化;最后,用三组特点各异的建筑物点云数据进行实验。结果表明,本算法能在复杂建筑物群中提取准确的建筑物轮廓线,克服 Alpha-shapes 算法提取轮廓线呈锯齿状的缺点。采用完整率、正确率和质量三个指标进行定量分析,结果表明,本算法提取的大型建筑物轮廓线效果优于 Alpha-shapes 算法,但也存在一定的局限性。

参 考 文 献

- [1] 惠振阳. 从机载 LiDAR 点云中提取城市道路网的关键技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
Hui Z Y. Research on some key techniques of extracting city road networks from airborne LiDAR point cloud[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [2] 张小红, 耿江辉. 机载激光扫描测高中激光脚点点群分割新方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(7): 586-588.
Zhang X H, Geng J H. A new method for airborne laser altimetry points cloud patch segmentation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(7): 586-588.
- [3] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
Zhang X H. Theory and method of airborne LiDAR measurement technology[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007.
- [4] McKeown D M. Knowledge-based aerial photo interpretation[J]. Photogrammetria, 1984, 39(3): 91-123.
- [5] 赖旭东, 万幼川. 机载激光雷达距离图像的边缘检测研究[J]. 激光与红外, 2005, 35(6): 444-446.
Lai X D, Wan Y C. The study of the edge detection to the depth-image of light detection and ranging[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(6): 444-446.
- [6] Zhou Q Y, Neumann U. Fast and extensible building modeling from airborne LiDAR data[C]//16th ACM SIGSPATIAL International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, November 5-7, 2008, Irvine, California, USA. New York: ACM Press, 2008.
- [7] Jarzabek-Rychard M. Reconstruction of building outlines in dense urban areas based on lidar data and address points[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, XXXIX-B3: 121-126.
- [8] 王双喜, 杨元维, 常京新, 等. 高分辨率影像分类提取建筑物轮廓的优化方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 022801.
Wang S X, Yang Y W, Chang J X, et al. Optimization of building contours by classifying high-resolution images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 022801.
- [9] 赵传. 基于机载 LiDAR 点云数据的建筑物三维模型重建技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017.
Zhao C. Research on 3D model reconstruction from airborne LiDAR point cloud data[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2017.
- [10] 程亮, 龚健雅. LiDAR 辅助下利用超高分辨率影像提取建筑物轮廓方法[J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 391-393, 399.
Cheng L, Gong J Y. Building boundary extraction using very high resolution images and LiDAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(3): 391-393, 399.
- [11] 钟文彬, 李旭瑞, 孙思, 等. 印制电路板点云的关键轮廓特征提取[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 141001.
Zhong W B, Li X R, Sun S, et al. Key contour feature extraction of printed circuit board point cloud [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 141001.
- [12] Zhang K, Yan J, Chen S C. Automatic construction of building footprints from airborne LiDAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2523-2533.
- [13] Chen D, Wang R S, Peethambaran J. Topologically aware building rooftop reconstruction from airborne laser scanning point clouds[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(12): 7032-7052.
- [14] 霍芃芃, 侯妙乐, 杨溯, 等. 机载 LiDAR 点云建筑物屋顶轮廓线自动提取研究综述[J]. 地理信息世界, 2019, 26(5): 1-13.
Huo P P, Hou M L, Yang S, et al. Automatic extraction of building rooftop outlines using airborne LiDAR: a review[J]. Geomatics World, 2019, 26(5): 1-13.
- [15] Andrew A M. Another efficient algorithm for convex hulls in two dimensions[J]. Information Processing Letters, 1979, 9(5): 216-219.
- [16] Tseng Y H, Hung H C. Extraction of building boundary lines from airborne lidar point clouds[J].

- The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLI-B3: 957-962.
- [17] 王丽青, 陈正阳, 陈树强, 等. 一个改进的简单多边形凸包算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(3): 200-201.
Wang L Q, Chen Z Y, Chen S Q, et al. An improved algorithm of simple polygon convex hull[J]. Computer Engineering, 2007, 33(3): 200-201.
- [18] Edelsbrunner H, Kirkpatrick D, Seidel R. On the shape of a set of points in the plane[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(4): 551-559.
- [19] 洪绍轩, 袁枫, 王竞雪, 等. 机载 LiDAR 点云建筑物边界线规则化算法研究[J]. 测绘科学, 2020, 45(7): 100-105, 125.
Hong S X, Yuan F, Wang J X, et al. Research on buildings boundary regularization algorithm for aerial LiDAR point clouds[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(7): 100-105, 125.
- [20] 沈蔚, 李京, 陈云浩, 等. 基于 LIDAR 数据的建筑轮廓线提取及规则化算法研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(5): 692-698.
Shen W, Li J, Chen Y H, et al. Algorithms study of building boundary extraction and normalization based on LIDAR data[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(5): 692-698.
- [21] 李云帆, 谭德宝, 高广, 等. 双阈值 Alpha Shapes 算法提取点云建筑物轮廓研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(11): 1-4.
Li Y F, Tan D B, Gao G, et al. Extraction of building contour from point clouds using dual threshold Alpha Shapes algorithm[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(11): 1-4.
- [22] Peethambaran J, Muthuganapathy R. A non-parametric approach to shape reconstruction from planar point sets through Delaunay filtering[J]. Computer-Aided Design, 2015, 62: 164-175.
- [23] 郭亚栋, 王贤昆, 宿殿鹏, 等. 基于方向预测规则化的机载激光雷达建筑物正交轮廓线提取[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(6): 062801.
Guo Y D, Wang X K, Su D P, et al. Building orthogonal boundary extraction for airborne LiDAR based on directional prediction regularization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 062801.
- [24] Potůčková M, Hofman P. Comparison of quality measures for building outline extraction[J]. The Photogrammetric Record, 2016, 31(154): 193-209.