

YANG Bisheng, DONG Zhen, WEI Zheng, et al. Extracting Complex Building Facades from Mobile Laser Scanning Data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(3): 411-417. (杨必胜, 董震, 魏征, 等. 从车载激光扫描数据中提取复杂建筑物立面的方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(3): 411-417.)

从车载激光扫描数据中提取复杂建筑物立面的方法

杨必胜^{1,2}, 董震^{1,2}, 魏征^{1,2}, 方莉娜^{1,2}, 李汉武¹

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学 时空数据智能获取技术与应用教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430079

Extracting Complex Building Facades from Mobile Laser Scanning Data

YANG Bisheng^{1,2}, DONG Zhen^{1,2}, WEI Zheng^{1,2}, FANG Lina^{1,2}, LI Hanwu¹

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Engineering Research Center for Spatio-Temporal Data Smart Acquisition and Application, Ministry of Education of China, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract : An efficient method of extracting complex building facades from mobile LiDAR data in large scale urban environment is proposed. The proposed method firstly eliminates the noise in the data. An adaptive neighborhood algorithm based on dimensionality is then adopted to calculate the local geometric features of each point, such as local normal vector and dimensionality feature. Then, a region growing segmentation method with adaptive growing rules is applied to segment the point cloud. Finally, knowledge based feature recognition method is developed for detecting facade planar patches, which are combined to represent the whole facades of complex buildings. Experiments show that the proposed method has a promising solution for building facade extracting from mobile LiDAR point clouds.

Key words : point cloud segmentation; building facade extraction; adaptive neighborhood; local geometrical feature; mobile LiDAR

摘 要: 提出一种从车载激光扫描数据中提取复杂建筑物立面的新方法。该方法首先利用“维数特征”方法确定每个扫描点的最佳邻域,进而计算得到每个扫描点精确的局部几何特征(法向量、主方向、维数特征);然后基于“维数特征”对扫描点进行粗分类,并设置相应的生长准则对不同类别的扫描数据分别进行分割;最后综合建筑物立面的语义知识对建筑物立面区域进行精确提取。试验结果和比较分析表明,本文的方法不但能提取建筑物平面和非平面立面,而且可消除点密度差异(变化)对建筑物立面提取结果的影响,提高建筑物立面提取的正确率和完整性。

关键词: 点云分割;建筑物立面提取;自适应邻域;局部几何特征;车载 LiDAR

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2013)03-0411-07

基金项目:国家 973 计划(2012CB725301);国家自然科学基金(41071268)

1 引 言

机载激光扫描数据在 DEM 生成、建筑物屋顶重建等方面的处理技术已经相对成熟^[1-4],但机载激光扫描只能获取建筑物的顶部数据,缺乏立面的细节信息^[5]。以车辆为平台,集成 GPS、INS、激光扫描仪、CCD 相机等多种传感器的车载激光扫描系统与航空摄影测量数据获取手段形成了优势互补,成为智慧城市基础设施数据快速获取的重要手段。因此,研究基于车载激光扫描数据的建筑物立面提取方法对充分发挥车载激光扫描系统的实效具有重要的理论价值和现实意义。

文献[6—8]在提取建筑物立面时需要扫描线

信息的支持,难以从散乱的激光扫描数据中提取建筑物立面。文献[9—10]通过投影点密度和阈值分割的方式实现建筑物边界提取。这种方法对于单个建筑物处理比较有效,但对复杂场景而言,上述方法提取结果并不理想,而且效率低下^[11]。文献[12—13]将三维扫描数据投影为二维规则网格进行检测,但当存在因遮挡导致的数据缺失时,立面提取结果的完整性较低。文献[14—17]直接对三维激光扫描数据进行平面分割,然后利用每个分割区域的特征属性提取立面。但这类方法没有考虑到点密度的变化对局部几何特征计算及分割结果的影响,并且只适用于建筑物的平面立面提取。

针对建筑物立面提取方法的不足,本文提出了一种适合于城区大场景中复杂建筑物立面的提取方法。该方法的主要贡献是:① 在计算扫描点的局部几何特征时,引入了邻域大小自适应的方法,克服了点密度变化对局部几何特征计算及数据分割结果的影响;② 首先将扫描点粗分类为“杆状”、“面状”、“球状”3类,然后根据不同的类别采取不同的生长准则进行分割,提高了运算速度、分割的准确性和可靠性;③ 有效地提取出了建筑物的平面和非平面立面;④ 综合了建筑物立面的语义知识,提高了大场景中复杂建筑物立面提取结果的正确率和完整性。

2 建筑物立面提取

本文的建筑物立面提取方法的流程如图 1。

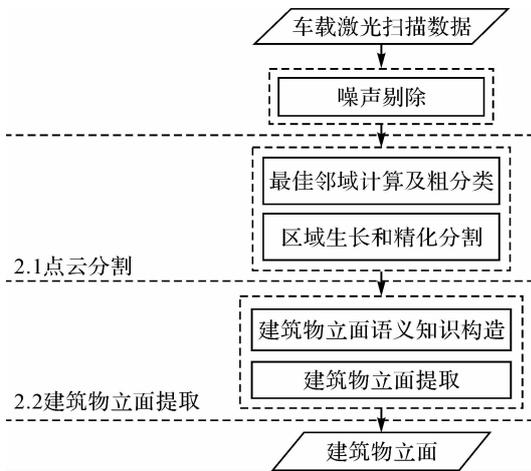


图 1 建筑物立面提取的流程
Fig. 1 Flow chart of building facade extraction from mobile LiDAR point

对测量过程中的各种系统误差和随机误差(如测量仪器的震荡、被测物表面粗糙不平、镜面反射、遮挡物遮挡等各种因素)导致的噪声点,本文利用三维邻域内点的密度以及点到局部拟合平面的距离将噪声点剔除^[19],从而为进一步的点云分割提供高质量的数据。

2.1 点云分割

为消除点密度差异(变化)对数据分割结果的影响,本文针对车载激光扫描数据的特点,提出了一种面向车载激光扫描数据目标提取的点云分割算法。

2.1.1 最佳邻域计算及扫描点粗分类

由于扫描的距离不同以及遮挡、噪声等原因,

导致点云密度变化较大,因此通过传统的 K 近邻(KNN)、固定邻域半径(FDN)、TIN 三角网等固定邻域尺寸或邻域点个数的方法计算扫描点的局部几何特征将导致较大的计算误差,从而导致分割结果的过度分割。为消除扫描点的密度变化对分割结果的影响,本文方法利用基于“维数特征”的邻域选择方法计算每个扫描点的最佳邻域(如图 2)。

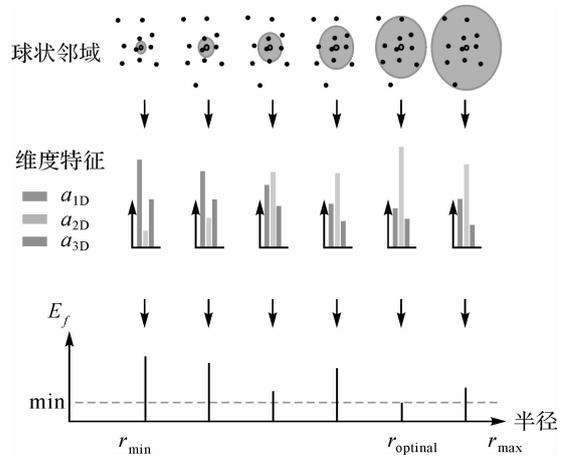


图 2 基于维数的最佳邻域选取示意图
Fig. 2 Schematic diagram of optimized neighborhood size

根据图 2,为确定每个扫描点的最佳邻域大小,首先需要确定每个扫描点的最大邻域半径 r_{max} ,最小邻域半径 r_{min} ,半径的增量 r_{Δ} ,并初始化当前半径 $r_c = r_{min}$ 。

然后逐步增大邻域半径 $r_c (r_c += r_{\Delta})$,直到 $r_c \geq r_{max}$ 。对邻域 r_c 内的数据进行主分量分析(PCA)得到点云数据分布的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3)$,并定义维数特征

$$\left. \begin{aligned} a_{1D} &= \frac{\sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{\lambda_1}} \\ a_{2D} &= \frac{\sqrt{\lambda_2} - \sqrt{\lambda_3}}{\sqrt{\lambda_1}} \\ a_{3D} &= \frac{\sqrt{\lambda_3}}{\sqrt{\lambda_1}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

和熵函数

$$E_f = -a_{1D} \ln(a_{1D}) - a_{2D} \ln(a_{2D}) - a_{3D} \ln(a_{3D}) \quad (2)$$

其中, $a_{1D} + a_{2D} + a_{3D} = 1$ 。

维数特征取值如图 3 (a)所示。当熵函数值越小时,该扫描点属于某一类别(“杆状”、“面状”、“球状”)的可能性越大,不确定度越低,熵函数的取值如图 3(b)所示。因此,函数 E_f 为最小值时

的半径即为最佳的邻域半径 $r_{optimal}$ 。

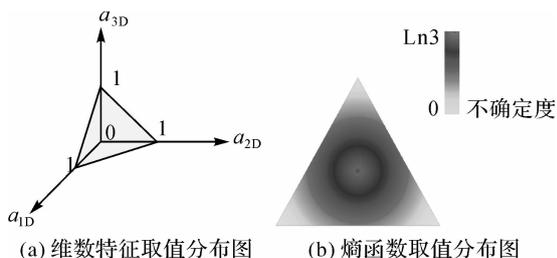


图 3 维数特征与熵函数取值分布图

Fig. 3 Schematic diagram of dimensionality feature and entropy function

最后根据扫描点的维数特征,并依据公式(3)

$$d_i = \operatorname{argmax}[a_{dD}] \quad d \in [1, 3] \quad (3)$$

把扫描点粗分类为“杆状”($d_i = 1$)、“面状”($d_i = 2$)、“球状”($d_i = 3$) 3 类。其中,每个扫描点的法向量和主方向的计算方法参照文献[20]。

2.1.2 区域生长和精化分割

通过分析发现,属于同一“杆状”地物上的扫描点在空间上相邻并且具有相同或相近的主方向;属于同一“面状”地物上的扫描点在空间上相邻并且具有相同或相近的法向量;由于“球状”地物没有方向性,所以属于同一“球状”地物上的扫描点在空间上相邻且没有主方向和法向量的约束。为兼顾各类地物的不同特点,克服传统区域生长方法单一生长准则的不足,本文对上述 3 种不同类别的扫描点分别采取不同的生长准则进行区域生长。

本文对区域生长中的几个关键问题处理如下:

(1) 种子点的选取。从未分割的 3 类扫描点中分别随机选取出每一类别的初始种子点;在区域生长过程中,把满足生长准则的点作为下次生长的种子点。

(2) 生长的准则。对于分类为“杆状”的扫描点,生长准则为空间上相邻并且相邻点的主方向之间的夹角余弦值大于阈值 T_a ;对于分类为“面状”的扫描点,生长准则为空间上相邻并且相邻点的法向量之间的夹角余弦值大于阈值 T_a ;对于分类为“球状”的扫描点,生长准则为空间上相邻。

(3) 终止条件。该算法递归调用,直到所有的点都已分割完毕。

经过上述步骤即可把激光扫描数据分割为不同的区域,每个区域具有相似的特征属性。

为了消除琐碎区域(总点数少于 T_N 的分割区域)对后续建筑物立面提取结果的影响,本文对区域生长后的琐碎区域进行重分割,其主要步骤为:

(1) 对琐碎区域中的点 P_i ,利用“KD 树”寻找点 P_i 的 k 近邻点 $Q_j (j = 1, 2, \dots, k)$,以及 Q_j 点对应的分割区域标号 ID_j ,其中 k 为 P_i 的最佳邻域 $r_{optimal}$ 内扫描点的个数。

(2) 找出 k 近邻中出现频率最大的分割区域标号 ID_F ,将点 P_i 对应的分割区域标号修改为 ID_F ;

(3) 循环调用(1)~(2),直到所有琐碎区域的点遍历完毕。

2.2 建筑物立面提取

为提高建筑物立面提取结果的准确度和完整性,本文方法首先对每个分割区域的尺寸(面积、高度、宽度)、方向(法向量、主方向)和拓扑关系等进行计算,并作为建筑物立面提取的先验语义知识。其中分割区域的尺寸、方向和拓扑关系分别定义如下。

尺寸:分割区域的宽度、高度、面积等,是最有效的识别建筑物立面的几何特征。例如,属于建筑物立面的分割区域应该具有较大的面积,而属于路灯或电线杆的分割区域的面积较小。

方向:分割区域的法向量、主方向等,是有效的识别建筑物立面的几何特征。例如,属于建筑物立面的分割区域的法向量应该与 z 轴近似垂直,而属于地面的分割区域的法向量与 z 轴近似平行,属于路灯、电线杆的分割区域的主方向与 z 轴近似平行等。

拓扑关系:分割区域之间的相邻、相交、相离等,也可以为建筑物立面的识别提供重要的线索。例如,建筑物的立面与地面相交,而建筑物屋顶与地面相离等。

6 种常见的地物:地面、路灯或电线杆、屋顶、建筑物立面、植被以及篱笆的先验语义知识如表 1 所示。

根据表 1 的先验语义知识以及车载激光扫描数据中建筑物立面的具体特点,本文提出的方法将建筑物立面的语义规则定义为:宽度大于 T_s ,高度大于 T_H ,法向量与 z 轴夹角的余弦值绝对值小于 T_β ,与地面相交。根据上述语义规则对分割区域进行逐次判断,如满足上述条件则为建筑物立面区域。

表 1 6 种地物的先验语义知识

Tab. 1 Semantic knowledge for 6 kinds of objects

	尺寸	方向	拓扑关系
地面	面积:很大 宽度:很大 高差:较小	水平或有 坡度	
路灯电线杆	面积:较小 宽度:很小 高差:很大	主方向与 z 轴近似平行	与地面相交
屋顶	面积:与屋顶类型和 扫描仪安装角度有关 宽度:与屋顶类型和 扫描仪安装角度有关 高差:与屋顶类型和 扫描仪安装角度有关	水平或有 坡度	与地面相离
建筑物立面	面积:较大 宽度:很大 高差:很大	法向量与 z 轴近似垂直	与地面相交
植被	面积:较小 宽度:不确定 高差:不确定	无方向	与地面相交
围墙篱笆	面积:较大 宽度:很大 高差:较小	法向量与 z 轴近似垂直	与地面相交

3 试验与分析

为了验证本文方法的有效性,本文采用点密度、扫描仪类型、扫描场景各不相同的两份车载激光扫描数据进行试验。数据 1 是加拿大 Optech 公司的激光扫描系统 LYNX Mobile Mapper 采集的居民区扫描数据,其扫描范围大致为 400 m × 350 m,扫描密度为 180 个/m² 左右,共 8 139 716 个数据点(如图 4(a))。该数据中包括大量的房屋、电线杆、栅栏、围墙等地物。数据 2 是德国 Sick 公司的激光扫描仪 LMS291-S05 采集的城市街区扫描数据,其扫描范围大致为 200 m × 80 m,扫描的密度大致为 120 个/m²,共 1 582 347 个数据点(如图 4(b))。该数据包含高层建筑物立面信息,茂盛的行道树,以及大量的路灯等地物,其中,建筑物的立面为非平面的立面。

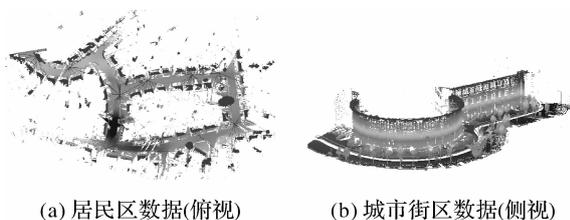


图 4 试验数据
Fig. 4 Tested datasets

3.1 扫描点粗分类与区域生长

为确定局部特征计算时的最佳邻域,表 2 给出了最佳邻域计算需要的最大半径、最小半径、半径增量等阈值。

表 2 最佳邻域试验参数设置

Tab. 2 Parameters and their values used in the experiment

参数	居民区数据	城市街区数据
最小半径 r_m	0.05	0.1
半径增量 r_Δ	0.05	0.1
最大半径 r_M	0.5	0.8

根据试验经验得出:最小半径取值为略大于数据的平均点间距,最大半径取值为平均点间距的 5~10 倍,半径增量取值为平均点间距时,可以取得理想的试验结果。

根据计算出的每个点的“维数特征”,利用公式(5)将扫描点粗分类为“杆状”、“面状”、“球状”3 类。图 5(a)、(b)分别给出了粗分类的结果,其中,图 5(a)是数据 1 的粗分类结果,图 5(b)是数据 2 的粗分类结果。可以看出:树干、路灯、电线杆等地物被分类为“杆状”;地面、建筑物、围墙等地物等被分类为“面状”;树冠、植被等地物被分类为“球状”。

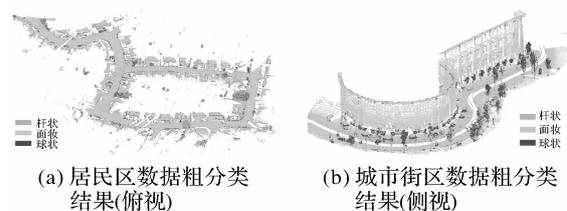


图 5 居民区和城市街区试验数据的粗分类结果
Fig. 5 Classification of residential data and downtown data

为对粗分类后的点进行区域生长,表 3 设置了区域生长过程中法向量夹角余弦、主方向夹角余弦、生长邻域半径等参数的阈值。

表 3 区域生长试验参数设置

Tab. 3 Parameters and their values used in the region growing

参数	居民区数据	城市街区数据
生长邻域半径	$r_{optimal}$	$r_{optimal}$
法向量夹角余弦阈值 T_θ	0.985(cos(10°))	0.985(cos(10°))
主方向夹角余弦阈值 T_α	0.985(cos(10°))	0.985(cos(10°))

根据试验经验得出:一旦确定了每个扫描点的最佳邻域半径 $r_{optimal}$,相邻点之间法向量的夹角

余弦阈值、主方向的夹角余弦阈值在 $\cos 15^\circ \sim \cos 5^\circ$ 之间时,可以取得理想的试验结果,本文取夹角余弦阈值为 $0.985(\cos 10^\circ)$ 。

图 6(a)和图 6(b)是数据 1 的分割结果和局部的细节图,图 6(c)是数据 2 的分割结果图。从分割的结果可以看出,由于在区域生长过程中考虑到了每类地物的不同特点,该方法得到了较好的分割结果。此外,根据不同的分割目的,可以通过调整参数 T_θ 控制分割的程度,增大 T_θ 的值可以得到更细致的分割结果;相反,减小 T_θ 的值可以得到更粗略的分割结果。

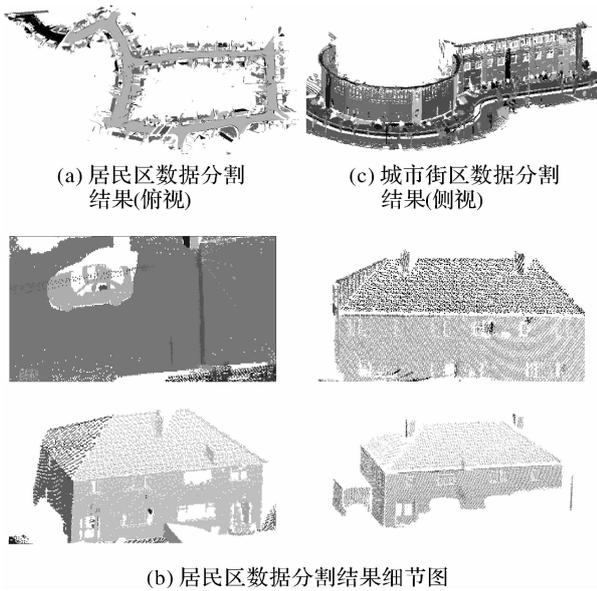


图 6 两份试验数据分割结果
Fig. 6 Segment results of dataset-1 and dataset-2

3.2 建筑物立面提取

现实生活中,建筑物立面的高度一般大于 3 m,宽度也大于 3 m,并且建筑物立面一般垂直于地面。因此根据建筑物立面的语义规则,本文分别将建筑物立面宽度 T_s ,高度 T_H 和法向量与 z 轴夹角的余弦值 T_β 的阈值设定如表 4。

表 4 建筑物立面提取试验参数设置

Tab. 4 Parameters and their values used in the building facade extraction

参数	居民区数据	城市街区数据
宽度阈值 T_s/m	3	3
高度阈值 T_H/m	3	3
余弦值绝对值阈值 T_β	$0.087(\cos(85^\circ))$	$0.087(\cos(85^\circ))$

图 7(a)、(b)和(c)给出了建筑物立面的提取

结果,其中,图 7(a)是数据 1 的建筑物立面提取结果;图 7(b)是数据 1 中 4 个局部区域的细节图;图 7(c)是数据 2 的建筑物立面提取结果。本文采用文献[21]中的精度评定方法对试验结果的正确性、完整性、准确率进行了评价。通过手工标记在数据 1 中得到 86 个建筑物立面,本文提出的算法共检测出 81 个目标,其中 77 个正确检测,4 个误检测,提取结果的完整性为 89.5%,正确率为 95.0%,平均准确率 92.3%。从评定结果可以看出该方法克服了点密度差异(变化)对立面提取的影响,提取出了平面的立面(如图 7(b))和非平面的立面(如图 7(c)),提高了建筑物立面提取的正确性和完整性。

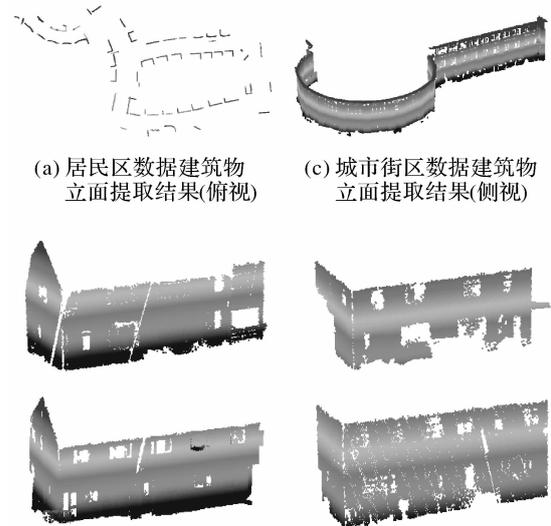


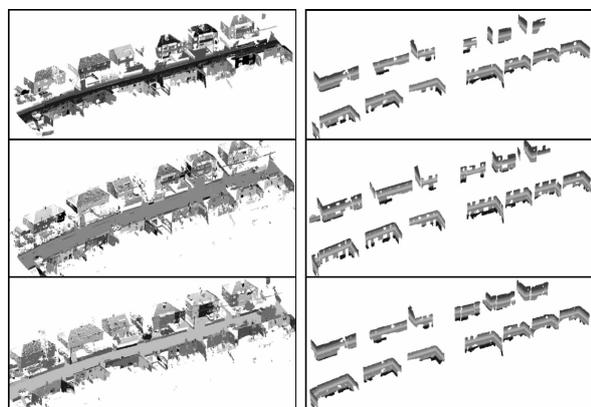
图 7 两份试验数据建筑物立面提取结果
Fig. 7 Result of building facade extracting

3.3 试验结果比较分析

为了验证本文采用的“自适应邻域”方法相比于传统的固定邻域半径(FDN)方法、K 近邻(KNN)等方法在建筑物立面提取方面的优势,笔者利用 FDN 方法、KNN 方法、本文的方法分别对数据 1 中的某条街道(如图 8)进行了试验处理。在局部几何特征计算阶段,FDN 方法的参数值为:邻域半径 $r=0.4$ m;KNN 方法的参数值为:近邻点个数 $k=16$;本文方法设定的参数值为:最小半径 $r_m=0.05$ m,半径增量 $r_i=0.05$ m,最大半径 $r_M=0.5$ m。上述 3 种方法在区域生长和立面提取步骤中采用相同的方法和参数值(如表 3、4 中居民区数据的参数值)。同时考虑到本

文的方法需要对每个激光脚点分别进行多次不同半径的邻域计算、主成分分析、熵函数计算、局部几何特征计算等,计算量很大,为了加快运算的速度,本文没有对每次不同的邻域重复计算,而是只对邻域变大后增加的点进行了叠加运算^[22]。

图 8 从上到下依次给出了 FDN、KNN 和本文方法的分割以及立面提取结果。从图 8 和表 5 中可以看出,尽管 FDN 和 KNN 算法计算简单,耗时短,但由于局部几何特征计算不准确,FDN 和 KNN 算法的分割结果会出现严重的“过分割”(如图 8(a))。相比而言,本文方法提取的建筑物立面信息更加完整(如图 8(b)所示),能更好地用于后续建筑物框架提取以及立面细节(窗户、门等)的建模。此外,FDN 和 KNN 算法更适用于点密度变化不大的点云数据,对于点密度变化很大的数据,其阈值将难以设定。



(a) 居民区数据分割结果 (侧视) (b) 居民区数据立面提取结果 (侧视)

图 8 居民区数据分割和建筑物立面提取结果

Fig. 8 Segmentation and building facade extraction

表 5 本文方法的处理效率分析

Tab. 5 Time performance of the proposed approach

计算方法	计算耗时/s	分割区域数/个	提取完整立面数/个
FDN 方法	75	621	18
KNN 方法	62	452	20
本文方法	146	328	24

4 结 论

本文以车载激光扫描数据为研究对象,提出了一种适合于城区大场景中复杂建筑物立面的提取方法。试验结果表明,因顾及了邻域尺寸对局部特征值计算结果的影响,本文的方法较之现有

的建筑物立面提取方法更能有效地提取完整的建筑物立面信息;同时,在立面提取方法中综合了建筑物的语义知识,因而提高了建筑物立面提取的准确率。此外,本文提出的分割算法还可以应用到车载激光扫描数据的智能化解译、点云特征提取、目标识别以及分类等问题中,具有很强的可行性和实用性。尽管采用自适应邻域方法计算局部几何特征较传统方法所需计算量稍大,但该方法能有效克服点密度差异(变化)对分割结果的影响。下一步的研究将融合序列影像进行建筑物立面的提取以及建筑物立面精细建模等。

参考文献:

- [1] SITHOLE G, VOSSelman G. Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 59(1-2): 85-101.
- [2] HUANG Xianfeng, LI Hui, WANG Xiao, et al. Filter Algorithms of Airborne LiDAR Data: Review and Prospects [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(5): 466-469. (黄先锋,李卉,王潇,等. 机载 LiDAR 数据滤波方法评述[J]. 测绘学报, 2009, 38(5): 466-469.)
- [3] SUI Lichun, ZHANG Yibin, LIU Yan, et al. Filtering of Airborn LiDAR Point Cloud Data Based on the Adaptive Mathematical Morphology [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(4): 390-396. (隋立春,张熠斌,柳艳,等. 基于改进的数学形态学算法的 LiDAR 点云数据滤波[J]. 测绘学报, 2010, 39(4): 390-396.)
- [4] CHENG Liang, GONG Jianya. Building Boundary Extraction Using Very High Resolution Images and LiDAR [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(3): 391-394. (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): 391-394.)
- [5] YANG Bisheng, WEI Zheng, LI Qingquan, et al. A Classification-oriented Method of Feature Image Generation for Vehicle-borne Laser Scanning Point Clouds [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(5): 540-545. (杨必胜,魏征,李清泉,等. 面向车载激光扫描点云快速分类的点云特征图像生成方法[J]. 测绘学报, 2010, 39(5): 540-545.)
- [6] MANANDHAR D, SHIBASAKI R. Auto-extraction of Urban Features from Vehicle-borne Laser Data [C]// International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Ottawa: ISPRS, 2002.
- [7] MANANDHAR D, SHIBASAKI R. Vehicle-borne Laser Mapping System (VLMS) for 3-D GIS [C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney: [s. n.], 2001: 2073-2075.
- [8] ABUHADROUS I, AMMOUN S, NASHASHIBI F, et

- al. Digitizing and 3D Modeling of Urban Environments and Roads Using Vehicle-Borne Laser Scanner System [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Paris: [s. n.], 2004: 76-81.
- [9] LI Bijun, Fang Zhixiang, Ren Juan. Extraction of Building's Feature from Laser Scanning Data [J]. Geometrics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(1): 65-70. (李必军, 方志祥, 任娟. 从激光扫描数据中进行建筑物特征提取研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(1): 65-70.)
- [10] LI B J, LI Q Q, SHI W Z, et al. Feature Extraction and Modeling of Urban Building from Vehicle-borne Laser Scanning Data [C]// International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Istanbul: ISPRS, 2004: 934-939.
- [11] WEI Zheng, YANG Bisheng, LI Qingquan. Automated Extraction of Building Footprints from Mobile LiDAR Point Clouds [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(2): 286-296 (魏征, 杨必胜, 李清泉. 车载激光扫描点云中建筑物边界的快速提取 [J]. 遥感学报, 2012, 16(2): 286-296.)
- [12] HAMMOUDI K, DORNAIKA F, PAPARODITIS N. Extracting Building Footprints from 3D Point Clouds Using Terrestrial Laser Scanning at Street Level [J]. ISPRS/CMRT09, 2009, (38): 65-70.
- [13] HAMMOUDI K, DORNAIKA F, SOHEILIAN B, et al. Extracting Outlined Planar Clusters of Street Facades from 3D Point Clouds [C]// Canadian Conference on Computer and Robot Vision. Ottawa: [s. n.], 2010: 122-129.
- [14] RUTZINGER M, OUDE E S, VOSELMAN G. Automatic Extraction of Vertical Walls from Mobile and Airborne Laser Scanning Data [C]// International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vienna: ISPRS, 2009: 7-12.
- [15] NING Xiaojuan, ZHANG Xiaopeng, WANG Yinghui, et al. Segmentation of Architecture Shape Information from 3D Point Cloud [C]// Proceedings of the 8th International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications in Industry. Yokohama: [s. n.], 2009.
- [16] JOCHEM A, HÖFLE B, RUTZIGNER M. Extraction of Vertical Walls from Mobile Laser Scanning Data for Solar Potential Assessment [J]. Remote Sensing, 2011(3): 650-667.
- [17] RUTZINGER M, HÖFLE B, OUDE E S, et al. Feasibility of Facade Footprint Extraction from Mobile Laser Scanning Data [J]. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 2011, (3): 97-107.
- [18] DEMANTKÉ J, MALLET N, DAVID B, et al. Dimensionality Based Scale Selection in 3D Lidar Point Cloud [C]// International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Calgary: [s. n.], 2011.
- [19] JIANG Jingjue, ZHANG Zuxun, MING Ying. Filtering of Lidar Point Clouds for Complex Cityscapes [J]. Geometrics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(5): 402-405. (蒋晶珏, 张祖勋, 明英. 复杂城市环境的机载 LiDAR 点云滤波 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(5): 402-405)
- [20] LALONDE J F, VANDAPEL N, HUBER D F, et al. Natural Terrain Classification Using Three-dimensional Ladar Data for Ground Robot Mobility [J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(10): 839-861.
- [21] PU S, RUTZINGER M, VOSELMAN G, et al. Recognizing Basic Structures from Mobile Laser Scanning Data for Road Inventory Studies [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(6): 28-39.
- [22] PAULY M, KEISER R, GROSS M. Multi-scale Feature Extraction on Point-sampled Surfaces [J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3): 281-289.

(责任编辑: 陈品馨)

收稿日期: 2012-03-17

修回日期: 2012-07-04

第一作者简介: 杨必胜(1974—), 男, 博士, 教授, 研究方向为激光雷达数据处理、多尺度三维重建与位置服务。

First author: YANG Bisheng (1974—), male, PhD, professor, majors in LiDAR data processing, multiple representation of 3D modeling and LBS.

E-mail: bshyang@whu.edu.cn

通信作者: 董震

Corresponding author: DONG Zhen

E-mail: dongzhenwhu@whu.edu.cn