

考虑局部点云密度的建筑立面自适应分割方法

王 果^{1,2} 沙从术^{1,2} 王 健³

¹河南工程学院土木工程学院, 河南 郑州 451191

²煤化工资源综合利用与污染治理河南省工程实验室, 河南 郑州 451191

³山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590

摘要 三维散乱点云数据具有不均匀性,局部点云密度的不断变化会对点云分割提取等处理造成影响,针对这一问题,提出考虑局部点云密度的建筑立面自适应分割方法,在介绍局部点云密度的基础上,设计了自适应分割的流程和算法,通过实验验证了考虑局部点云密度的方法能够较好的对建筑立面进行分割。

关键词 图像处理;点云;局部点云密度;KD树;点云分割

中图分类号 P237.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.061001

Study on Segmentation of Building Facade Considering Local Point Cloud Density

Wang Guo^{1,2} Sha Congshu^{1,2} Wang Jian³

¹College of Civil Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou, Henan 451191, China

²Engineering Laboratory of Comprehensive Coal Resource Utilization and Pollution Control in Henan Province, Zhengzhou, Henan 451191, China

³College of Surveying and Mapping Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China

Abstract Because of the uniformity of three-dimensional scattered point cloud, the varying of local point cloud density affects the point cloud segmentation. To solve the problem, a method considering local point cloud density for automated segmentation of building facades from point clouds is presented. Based on the introduction of local point cloud density, self-adaptive segmentation processes and algorithms are designed. Results of contrast experiments show that the proposed method is better than that without considering the local point cloud density.

Key words image processing; point cloud; local point density; KD tree; point cloud segmentation

OCIS codes 100.2000; 120.5800; 150.1135; 150.6910

1 引言

激光雷达(LiDAR)技术作为一种新的技术手段被广泛应用于城市规划,应急响应,城市三维(3D)建模等方面^[1],因此,对研究激光点云数据处理具有较大的应用价值^[2]。由于扫描视角的互补性,地面LiDAR已成为智慧城市基础设施三维数据快速获取的重要手段,为了获取精细的城市建筑三维模型,实现基于地面扫描数据的建筑物立面分割提取具有重要的理论价值和现实意义^[3]。

针对建筑物立面分割提取,已有大量的研究,却很少有针对局部点云密度变化进行建筑立面点云分割方面的研究。例如,文献[4-5]利用扫描线数据进行建筑物立面提取,文献[6]采用蚁群算法对建筑物立面数据进行提取,文献[7]利用投影点密度和阈值方式进行建筑物立面提取,文献[8-9]通过将三维数据投影为规

收稿日期: 2014-11-17; 收到修改稿日期: 2015-01-05; 网络出版日期: 2015-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(41001304)、十二五国家科技支撑计划新疆自然资源精细遥感监测技术与应用(2012BAH27B04)

作者简介: 王 果(1986—),男,博士,讲师,主要从事三维激光扫描数据处理方面的研究。

E-mail: wangguo0123@foxmail.com

则格网进行提取,文献[10]研究了如何从距离信息中提取建筑物几何特征,文献[11]研究了从建筑物顶部开始,提取建筑物的立面信息,文献[12]利用水平点参照系特征提取方法进行建筑物立面特征信息提取,文献[13-16]直接对三维激光扫描数据进行平面分割,并没有考虑局部点云密度不断变化的特性。

然而,局部点云密度作为激光点云数据的内部属性依赖于激光脉冲重复速度和扫描速度,会随着载体运行轨迹的扰动、待测目标的反射属性的变化以及扫描仪的配准等多方面因素影响,对信息的提取产生重要的影响。

为了增强建筑立面点云信息分割提取的灵活性,在借鉴原有原始点云提取方法的基础上,提出了考虑局部点云密度的自适应建筑立面分割方法,将局部点云密度作为点云分割的一个因素,有针对性地消除局部点云密度变化的影响,实现对建筑立面点云数据进行分割的目的。

2 局部点云密度

点云密度通常是指整个点云的平均密度,单位为点每平方米,而局部点云密度作为一种点云内部属性,与点云间隔有关,是每个点固有的属性,有别于整体点云密度,局部点云密度的变化如图1所示。

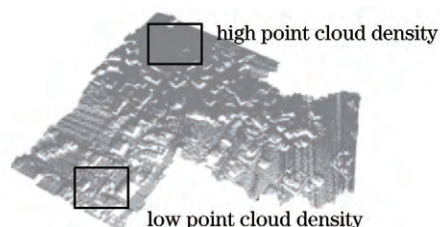


图1 局部点云密度不均匀性

Fig.1 Uniformity of local point cloud density

对于局部点云密度,最常用的方法有:1) 盒子计数法^[17],该方法将LiDAR点云投影到二维平面上并利用预先定义好的格网管理点云,局部密度通过格网内LiDAR点云的个数确定,由于格网的尺寸大小不定,因此相同点会因为格网大小不同而产生不同的局部点云密度^[18]。2) 基于不规则三角网(TIN)的方法^[19],利用在TIN基础上生成的泰森多边形的面积进行计算,该方法仅考虑点云的二维分布,因此只适合于具有2.5维的机载激光LiDAR点云。考虑到建筑物立面真三维数据的性质,采用文献[20]提出的局部点云密度计算方法,

$$I_{LPD} = \frac{k}{\pi r_k^2}, \quad (1)$$

式中 I_{LPD} 为局部点云密度, k 为当前点的 k 近邻点, r_k 为当前点到最远 k 近邻的距离。

3 考虑局部点云密度的分割方法

3.1 KD树点云组织

Friedman等^[21]提出用于管理和组织一系列点集的KD树数据结构。该结构通过不断的三维空间剖分而建立,空间在 X, Y, Z 方向不断剖分,剖分平面垂直于对应的轴向,直到所有的点云数据被剖分并结构化到KD树结构中,该空间剖分方法使得所有点集存储于平衡树。

3.2 有效邻域定义和法向量生成

在利用散乱点云对法向量进行估算的时候,需要大小为 k 的局部邻域,而 k 与点云噪声密切相关。通过 k 近邻获取的点云邻域由于受到点云噪声的影响,并不能准确代表进行有效分割的邻域。所以,为了进行准确的分割和法向量计算,采用了有效邻域,轴向的包围球位于当前点和其 k 近邻点(候选邻域点)上,利用主成分分析获取估计的法向量 \mathbf{n}_e ,通过点到切平面的最大距离进行约束,如果候选邻域点到切平面的距离小于设定的阈值 d ,则候选邻域被选择为有效邻域,否则作为平面分割的无效邻域被舍弃,其原理如图2所示。

局部的相似性和连续性约束使得在同一面上的点被定义为有效邻域,被选择的邻域点将位于以当前点为重心,高度为 $2d$ 的缓冲区内,缓冲区的高度与不同数据噪声程度 σ 有关,新的法向量 \mathbf{n} 通过选取的有效邻域进行重新计算。此过程不断迭代,直到有效邻域筛选前后两次的法向量夹角小于设定的角度阈值 T_a 则迭代停止。迭代停止后,法向量由最终选择的有效邻域运用主成分分析方法计算得到。

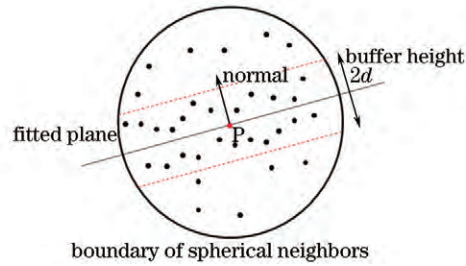


图2 有效邻域示意图

Fig.2 Schematic map of effective neighbors

3.3 考虑局部点云密度的自适应立面点云分割

对于一个绝对平整的区域(无噪声的理想情况)而言,兴趣点及其邻域会处于点集所定义的平面上,相对特征值 $\bar{\lambda}$ 应该为零。但由于噪声和现实世界中绝对平面的不存在性,当 $\bar{\lambda}$ 小于阈值 λ_r 时,则认为该点为分割的种子点,相对特征值 $\bar{\lambda}$ 表示为

$$\bar{\lambda} = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3). \quad (2)$$

由于三维散乱点云数据具有不均匀性,点云分割过程中生长半径的大小会影响分割精度,半径过大或过小会分别造成欠分割和过分割现象,所以,在考虑建筑立面为平面特性的基础上,通过引入局部点云密度进行分割半径的计算,从而达到立面点云自适应分割的目的。

按照局部点云密度确定的自适应生长半径为

$$r_{SN} = \sqrt{\frac{n}{\pi \times I_{LPD}}}, \quad (3)$$

式中 r_{SN} 为区域生长的半径, n 为 k 邻域中有效邻域的个数,整个算法流程如图3所示。

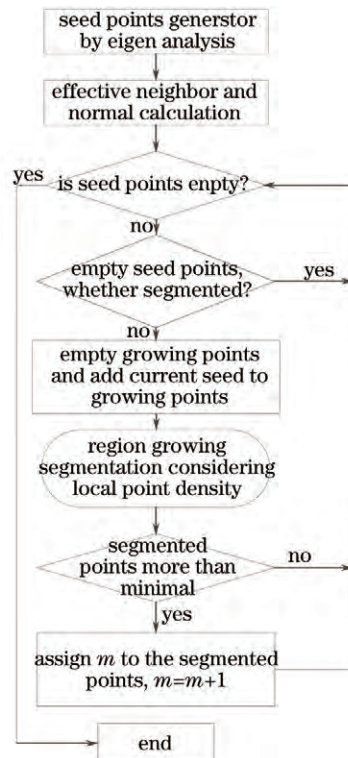


图3 考虑局部点云密度的点云分割流程图

Fig.3 Flow chart of segmentation considering local point cloud density

图3顾及了局部点云密度的区域生长分割,通过局部点云密度进行分割半径的自适应计算并对分割半径内有效邻域点进行分割,为了保证有效提取,忽略了小点云面片的影响,设定面片包含的最小点个数, m 为点云所属的面片编号。

4 实验与分析

4.1 实验一

为了验证该方法的可行性与有效性,以河南理工大学二号实验楼为研究对象,按 1:60 比例制作模型,采用徕卡 Scanstation2 扫描设备扫描获得局部点云密度变化的实验数据,实验数据如图 4 所示。分别采用未考虑局部点云密度和考虑局部点云密度进行对比实验,其中,未考虑局部点云密度变化的分割方法采用传统固定生长半径的分割方法,考虑局部点云密度的分割方法参数阈值如表 1 所示。

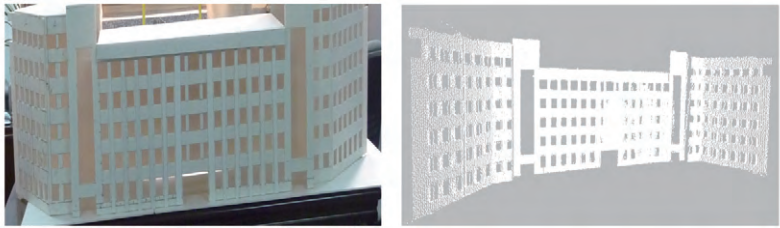


图 4 实验数据一

Fig.4 Experimental data I

表 1 本文方法实验参数

Table 1 Experimental parameters of the proposed method

Parameter	λ_T	k	$2d$	T_a	min	$\theta_{\text{threshold}}$
Threshold	0.05%	25	0.04 m	1°	50	5°

表 1 中 $\theta_{\text{threshold}}$ 为分割的角度阈值,min 为面片最小点个数阈值。

分割后的对比效果利用自主研制的 LiDAR 处理软件(LPS)进行显示,如图 5 所示,不同颜色代表分割和提取的不同立面信息。

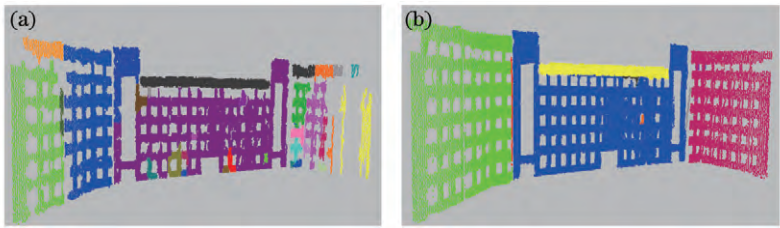


图 5 实验数据一分割效果对比图。(a) 未考虑局部点云密度; (b) 考虑局部点云密度

Fig.5 Segmentation result contrast of experimental data I. (a) Without local point cloud density; (b) with local point cloud density

4.2 实验二

对建筑立面因损坏而出现裂缝的数据进行实验,实验数据如图 6 所示。分别采用未考虑局部点云密度和考虑局部点云密度进行对比实验,考虑局部点云密度的分割方法参数阈值如表 1 所示,分割后的对比效果如图 7 所示。

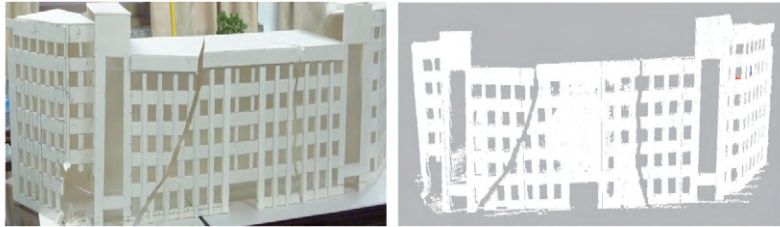


图 6 实验数据二

Fig.6 Experimental data II

4.3 实验结果分析

由图 5 和图 7 可知,如果不考虑局部点云密度变化,以相同的生长半径进行分割,会造成建筑立面点云出现比较严重的过分割现象,如图 5(a)和图 7(a)所示,而考虑局部点云密度变化的建筑立面分割效果明显优于未考虑局部点云密度的情况,其原因在于将局部点云密度作为点云分割生长半径的计算依据,根据局部

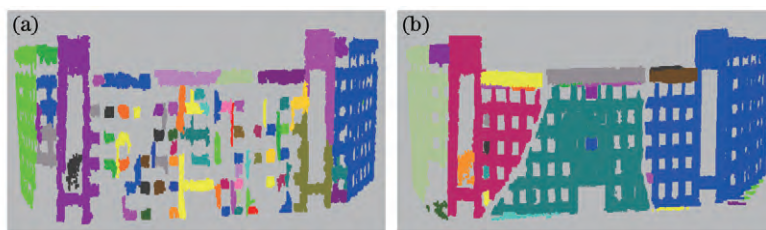


图7 实验数据二分分割效果对比图。(a) 未考虑局部点云密度; (b) 考虑局部点云密度

Fig.7 Segmentation result contrast of experimental data II. (a) Without local point cloud density; (b) with local point cloud density

点云密度大小自适应的确定生长半径,将局部点云密度作为点云分割的一方面因素,考虑了点云的不均匀性,同时,通过平面特性约束,对有效邻域内的点进行分割,从数据处理结果看,考虑局部点云密度的点云分割,保证了建筑物立面信息的完整性,但同时也增加了参数项,需要设定有效邻域的缓冲区高度。

5 结 论

考虑局部点云密度的建筑立面自适应分割方法是针对局部点云密度变化的点云数据分割方法,其出发点是在保留原始点云信息的基础上兼顾局部点云密度变化对信息提取的影响,通过对比实验验证了其具有较好的效果。总体上所设计的方法具有以下特点:1) 从原始点云数据入手,避免内插造成精度和信息损失,提取结果保留建筑物立面信息和窗户等轮廓信息,保证了建筑立面信息的完整性,基本满足后续提取和建模需求;2) 将局部点云密度作为点云分割的一个性质,考虑局部点云密度变化对点云建筑立面分割和提取的影响;3) 通过数据自动确定建筑立面个数,适合多建筑立面提取,自动化程度高。需要指出的是,本文方法在提取过程中需要设定针对有效邻域的缓冲区高度。

参 考 文 献

- 1 Fan Shijun, Zhang Aiwu, Hu Shaoxing, *et al.*. A method of classification for airborne full waveform LiDAR data based on random forest[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0914001.
范士俊, 张爱武, 胡少兴, 等. 基于随机森林的机载激光全波形点云数据分类方法[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0914001.
- 2 Zuo Zhiqun, Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. Classification of LiDAR point clouds for urban area based on multi-echo region ratio and recognition topology model[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0414001.
左志权, 张祖勋, 张剑清. 区域回波比率与拓扑识别模型结合的城区激光雷达点云分类方法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0414001.
- 3 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.
- 4 Manandhar D, Shibasaki R. Feature extraction from range data[C]. Conference on Remote Sensing, 2001, 5: 9.
- 5 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 Intelligent Robots and Systems, 2004, 1: 76-81.
- 6 Liu Yawen, Pang Shiyan, Zuo Zhiqi. Ant colony algorithm for building facade points extraction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(11): 1307-1310.
刘亚文, 庞世燕, 左志奇. 蚁群算法的建筑立面点云数据提取[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2012, 37(11): 1307-1310.
- 7 Shi Wenzhong, Li Bijun, Li Qingquan. A method for segmentation of range image captured by vehicle-borne laserscanning based on the density of projected points[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, (2): 95-99.
史文中, 李必军, 李清泉. 基于投影点密度的车载激光扫描距离图像分割方法[J]. 测绘学报, 2005, (2): 95-99.
- 8 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.
- 9 Hammoudi K, Dornaika F, Soheilian B, *et al.*. Extracting outlined planar clusters of street facades from 3D point clouds[C]. Computer and Robot Vision IEEE, 2010: 122-129.
- 10 Li Bijun, Fang Zhixiang, Ren Juan. Extracting of building's feature from laser scanning data[J]. Geomatics 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.
- 11 Wang Jian, Jin Fengxiang, Lü Haiyan, *et al.*. Extraction of building facade information based on vehicular laser scanner[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2004, 23(4): 8–11.
- 王 健, 靳奉祥, 吕海彦, 等. 基于车载激光测距的建筑物立面信息提取[J]. 山东科技大学学报自然科学版, 2004, 23(4): 8–11.
- 12 Huang Lei, Lu Xiushan, Chen Chuanfa. Extraction of building facade information from laser scanning data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(6): 141–143.
- 黄 磊, 卢秀山, 陈传法. 基于激光扫描仪数据的建筑物立面特征信息提取[J]. 测绘科学, 2006, 31(6): 141–143.
- 13 Rutzing M, Elberink S O, Pu S, *et al.*. Automatic extraction of vertical walls from mobile and airborne laser scanning data[J]. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2009, 38 (Part 3): W8.
- 14 Ning X, Zhang X, Wang Y, *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, 2009: 127–132.
- 15 Jochem A, Höfle B, Rutzing M. Extraction of vertical walls from mobile laser scanning data for solar potential assessment[J]. Remote Sensing, 2011, 3(4): 650–667.
- 16 Rutzing M, Höfle B, Oude Elberink S, *et al.*. Feasibility of facade footprint extraction from mobile laser scanning data[J]. Photogrammetrie–Fernerkundung–Geoinformation, 2011, 2011(3): 97–107.
- 17 County K. LiDAR digital ground model point density[J]. King County. Accessed August, 2003, 6: 2013.
- 18 Raber G T, Jensen J R, Hodgson M E, *et al.*. Impact of LiDAR nominal post-spacing on DEM accuracy and flood zone delineation[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(7): 793–804.
- 19 Shih P T, Huang C M. Airborne LiDAR point cloud density indices[C]. AGU Fall Meeting Abstracts, 2006, 1: 0919.
- 20 Lari Z, Habib A. New approaches for estimating the local point density and its impact on Lidar data segmentation[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2013, 79(2): 195–207.
- 21 Friedman J H, Bentley J L, Finkel R A. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 1977, 3(3): 209–226.

栏目编辑: 苏 岑