

文章编号:1001-5078(2024)09-01358-08

· 激光应用技术 ·

利用相对密度迭代分析的地基点云过滤方法

杜诗韵¹, 陈茂霖¹, 潘建平¹, 田思忆², 王 帅¹

(1. 重庆交通大学 智慧城市学院, 重庆 400074; 2. 武汉市测绘研究院, 湖北 武汉 430022)

摘要:地面激光扫描(Terrestrial Laser Scanning, TLS)是广泛用于点云数据采集方法之一,而地面过滤是点云数据处理中的重要步骤。受扫描视角和设站方式影响, TLS数据的非地面点分布范围通常远大于地面点,而现有地面滤波方法通常假定地面点云分布在整个扫描场景,不完全适用于 TLS数据。针对该问题,本文提出了一种利用地基点云扫描线进行相对密度迭代分析地面过滤方法。首先,还原无序地面激光点云的角分辨率及扫描线信息;然后,进行逐扫描线相对密度分析,得到地面候选点集与非地面点集:通过反复将地面候选点集加入相对密度分析环节,直至新生成的非地面点数量小于设置的阈值,迭代终止,而剩余的候选点则输出为最终的地面点集。将本文中所提出的方法在3组数据上进行了实验验证,并与现有方法进行对比,研究结果表明,该方法有效约束了地面点的范围,并且在墙脚、路缘和杆状物等地面与非地面邻接部分过滤效果更加精准,更适用于 TLS数据地面过滤。

关键词:地面激光雷达;点云过滤;相对密度分析;迭代;扫描线;密度

中图分类号:P237;TN958.98 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.004

Terrestrial laser scanning point cloud ground filtering method utilizing iterative relative density analysis

DU Shi-yun¹, CHEN Mao-lin¹, PAN Jian-ping¹, TIAN Si-yi², WANG Shuai¹

(1. School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Wuhan Geomatic Institute, Wuhan 430022, China)

Abstract: Terrestrial laser scanning (TLS) is a widely adopted method for acquiring point cloud data, and ground filtering represents a crucial step in the processing of such data. Due to scanning angle variations and station setup conditions, the distribution range of non-ground points within TLS data tends to be significantly broader than that of ground points. Moreover, existing ground filtering methods often assume a uniform distribution of ground points throughout the entire scanning scene, a presumption not entirely applicable in the context of TLS. To address this challenge, this study proposes an iterative analysis approach for ground filtering utilizing relative density and based on the scanning lines of the ground-based point cloud. The methodology involves the restoration of the angular resolution and scanline information of the disordered ground laser point cloud. Subsequently, scanline-by-scanline relative density analysis is conducted to derive both the ground candidate point set and the non-ground point set. The ground candidate point set is incrementally integrated into the relative density analysis, iteratively combined with the scanline, until

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(No. 2022CMG02014);重庆市研究生联合培养基地建设项目(No. JDLHPYJD2019004);重庆市研究生科研创新项目(No. CYS23533)资助。

作者简介:杜诗韵(1997-),女,硕士研究生,主要研究点云数据处理技术。E-mail:622220900022@mails.cqjtu.edu.cn

通讯作者:陈茂霖(1991-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事摄影测量与遥感、三维激光扫描数据处理技术研究。E-mail:maolinchen@cqjtu.edu.cn

收稿日期:2023-11-15

the number of newly generated non-ground points falls below the predefined threshold. Upon satisfying this criterion, the iteration is terminated, and the remaining candidate points are designated as the final ground point set. The proposed method is experimentally validated using three sets of data, and comparisons with existing approaches are presented. The results demonstrate the method's effective constraint on the range of ground points, showcasing a more accurate filtering effect, particularly in the transitional zones between ground and non-ground, such as wall footings, curbs, and poles. These results highlight the method's suitability for ground filtering in TLS data.

Keywords: terrestrial laser scanning; point cloud filtering; relative density analysis; iteration; scanline; density

1 引言

激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)通过发射激光脉冲并返回激光脚点获得被测物体表面三维数据,目前已广泛应用于文物保护与修复^[1]、环境感知与自动驾驶^[2-4]、建筑施工^[5]和地质灾害评估^[6]等行业。激光雷达的平台类型可分为机载激光扫描(Airborne Laser Scanning, ALS)、车载激光扫描(Mobile Laser Scanning, MLS)和地面激光扫描(TLS)等。TLS由于其高密度的数据采集、便捷的操作流程以及易于操作的特点,适用于复杂地形测绘和精细化建模等领域。但是,高精度的扫描也伴随着更多的噪声,需要处理更多细节信息。总体而言,对地面激光点云进行地面过滤是一项具有挑战性的任务。

点云地面过滤的目的是分离地面和非地面点^[7],是点云数据处理中的主要过程之一,从而为后续操作提供基础数据支持。过滤的方式可分为基于坡度的算法、基于聚类或分割的算法和基于渐进加密三角网的算法。利用地形的坡度特征进行过滤是一种常用的过滤方法^[8-10],在确定当前点之后对临近点进行坡度值逐点计算。该算法对坡度阈值敏感,通常引入其他类别特征提高过滤的准确性。唐菓^[11]提出一种利用密度聚类的点云滤波算法,以点云的空间密度特征为依据,用聚类的方式进行滤波。由于地形的高低起伏,点云密度特征多变,需要划分点云测区和多次聚类。部分学者^[12-13]则通过改变窗口大小适应不同类型地物的密度来提高地面提取的效果,根据局部密度的变化来动态调整密度阈值,提高了地面识别的效率。渐进加密不规则三角网(Progressive TIN Densification, PTD)^[14-16]在各种复杂地形中均能获得较好的效果,但是该算法占用内存较大,处理时间较长,而且不规则三角网的构建对后续滤波影响较大。布料滤波(Cloth Simulation Filter, CSF)^[17]从物理力学模型出发,提供了点云过滤

的新思路。其基本思想是将原始点云倒置并覆盖一层布料,通过分析布的节点与点云之间的相互作用,确定布的最终形状,从而分离地面点和非地面点。然而布料滤波算法主要针对机载激光点云数据特性设计,直接用于高精度扫描的地面激光数据会导致部分非地面错误为地面点。针对该问题,部分学者引入高程或地物特征等约束条件来改进布料滤波^[18-19],但是作用有限,无法适应较为复杂的地形。

在上述研究中,现有地面过滤方法通常假定扫描所得地面点云分布在整个扫描场景。该假定在机载和车载激光点云中适用性较好,但地面激光点云的扫描中心为固定位置,受前视遮挡的影响较大,地面点云分布范围通常显著小于整个扫描场景范围,边缘位置通常采集不到地面点,识别到的地面点密集分布在扫描中心周围。所以,上述方法会在未扫描得到地面点云的位置错误检测到地面点,例如远距离建筑物、植物、车辆等位置。此外,PTD和CSF这类算法由于视角过高,无法顾及地面点和非地面点相接区域,例如树干和栏杆的底部、墙角等位置。为了克服现有地面滤波技术在地面激光扫描数据处理中的限制,本文提出了一种面向地面激光点云的逐扫描线相对密度迭代分析过滤方法。首先,该方法通过还原点云数据的扫描角分辨率和扫描线信息,接着,在不同搜索范围下计算了扫描线上点云的相对密度。最后,通过相对密度迭代分析,对非地面点进行排除并反复优化点云滤波结果,直至达到迭代终止条件。该方法充分考虑了地面激光扫描采集的地物点云特性,通过利用不同对象的几何结构引起的点云投影密度差异来提取地面点,有效地限制了地面点提取的范围。与现有方法相比,更适用于地面激光扫描的数据。

2 实验方法

2.1 扫描角分辨率和扫描线还原

地面激光扫描仪的工作原理是利用安装在地面的扫描仪发射激光,激光光束依次通过被测区域,返

回激光点所接触物体表面的 x, y, z 等信息。地面激光扫描仪竖直方向扫描范围接近 180° , 水平方向可绕仪器竖轴进行 360° 全圆扫描, 竖直角 α 为激光光束与 XOY 平面的夹角, 水平角 θ 为激光光束与起始扫描方向 (即 X 轴) 所形成的夹角, 如图 1 所示。

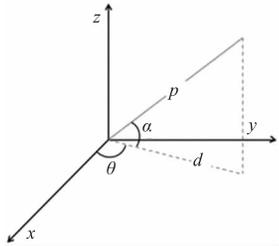


图 1 地面激光扫描原理

Fig. 1 Principle of terrestrial laser scanning

扫描角分辨率作为点云数据处理的参数, 在扫描线重建与扫描线密度分析中发挥重要的作用, 针对扫描的角分辨率未知的情况, 本文采用了一种用随机邻域分析的采样间隔估算方法还原水平和竖直方向的扫描角分辨率^[20]。首先, 随机挑选 n 个点作为随机点集 p_i , 并构建邻域点集 $N(p_i)$, 计算随机中心点集以及邻域点集的方位角 θ 、竖直角 α 以及方位角间隔和竖直角间隔 $\Delta\theta_{ij}$ 和 $\Delta\alpha_{ij}$, 然后, 以不同的区间宽度 Δ_i 分别对所有 $\Delta\theta_{ij}$ 和 $\Delta\alpha_{ij}$ 值进行统计并构建直方图, 最后, 取 $\theta_{\text{sampling}}(\Delta_i)$ 和 $\alpha_{\text{sampling}}(\Delta_i)$ 的中位数, 以确定地面激光点云在水平和竖直方向的扫描角分辨率 θ_{hori} 和 α_{vert} 。

地面激光扫描模式是逐行、逐列扫描, 但点云数据通常以 x, y, z 数据格式存储, 不包含单点扫描线信息, 而水平方向上连续激光点云的扫描角度差值为固定值 (即激光扫描仪的水平方向角度分辨率 θ_{hori}), 因此, 利用点云扫描模式的特性和水平角分辨率可以实现扫描线重建。通过并对无序点云的水平角进行大小排序, 将水平角属于同一区间的点云数据识别为同一条扫描线上的点, 水平角 θ_h 通过公式 1 可得。经过上述计算后得到每个点的水平角, 利用仪器的水平角分辨率 θ_{hori} 对扫描线进行排序编号, 从与起始扫描方向所夹水平角最小的一条扫描线开始编号, 由下式得:

$$\theta_h = \begin{cases} \arctan \frac{y}{x} + \pi, & (x < 0) \\ \arctan \frac{y}{x}, & (x > 0, y > 0) \\ \arctan \frac{y}{x} + 2\pi, & (x > 0, y < 0) \end{cases} \theta_h \in [0, 2\pi] \quad (1)$$

$$SL = \text{floor}\left(\frac{\theta_{hi} - \theta_{\min}}{\theta_{\text{hori}}}\right) + 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中, SL 代表扫描线序号; θ_{hi} 为每个点的水平角数据; n 为点云的数目; θ_{\min} 为水平角最小值; θ_{hori} 为水平扫描角分辨率; floor 为向下取整的函数。

2.2 扫描线密度分析

点云密度通常定义为某一范围内点云的数量, 是点云数据的重要特征之一, 主要受扫描分辨率、扫描仪设站位置和被测物体几何形状的影响^[21]。扫描分辨率包括竖直和水平扫描角分辨率, 决定了扫描的精细程度。激光扫描仪的位置定位关系到与扫描目标之间的距离和角度, 进而影响了激光光束的发射方式。被扫描对象的几何结构在地物类型识别中扮演关键角色, 因为它们反映了与其他对象不同的特征, 有助于人们进行地物的鉴别。TLS 数据高精度的特点伴随着被测物体种类的复杂性增加, 同时点云密度呈现出随扫描距离增加而减少的趋势, 这使得扫描仪的位置和扫描目标的形状对点云密度的影响显得更为重要。本文充分考虑了影响 TLS 数据点云密度变化的因素, 并提出了一种利用相对点云密度来区分地面点云和非地面点云的方法。

通常情况下, 地面点和非地面点的交界处会在较短的水平距离内导致点云密度的明显高度跳变, 而地面点云的内部则表现出较小的高度变化。地面点云的整体点云密度在水平投影面上变化平稳, 而非地面点受到物体几何形状的影响, 点云密度会出现波动。然而, TLS 数据点云密度也受到扫描距离的影响, 导致远离仪器的建筑物点云密度小于靠近仪器的地面点云, 所以, 直接使用投影密度可能无法准确识别所有非地面点。本文采用相对点云密度分析方法, 以削弱设站位置对密度的影响, 强调了物体几何形状对点云密度变化的显著性, 从而实现对面点的精确鉴别。

相对点云密度定义为单位距离内点云投影密度 ρ_p 与理论投影密度 ρ_{ref} 的比率, 记为 RD , 如等式 (3) 所示。相对点云密度的计算始于给定扫描线上的最远投影点, 并使用一系列搜索窗口 SW_i 获取不同搜索范围下的点云相对密度, 这些窗口之间具有固定的间隔 ΔSW 。假设搜索窗口的最大距离为 SW_{max} , 则可以根据式 (4) 和式 (5) 来确定搜索窗口的数量 n_{sw} 以及每个搜索窗口的尺寸 SW_i :

$$RD = \frac{\rho_p}{\rho_{ref}} \quad (3)$$

$$n_{SW} = \frac{SW_{max}}{\Delta SW} \quad (4)$$

$$SW_i = \Delta SW \times i \quad (i = 1, 2, \dots, n_{SW}) \quad (5)$$

投影密度定义 ρ_p 为点云沿扫描线方向的单位距离内点云的数量,通过式(6)可得出。大多数 TLS 系统使用固定的角度分辨率进行扫描,可以生成一个三维空间中点密度保持一致模拟点云,其采集参数与实际点云数据相同。在模拟点云上,点 p 的球极坐标为 (ρ, θ, α) ,以扫描仪所在位置为球心,生成的球面半径等于点 p 到原点 O 的距离 ρ 。同时,模拟点云垂直方向的扫描角分辨率对应竖直角分辨率 α_{vert} 。扫描线理论投影密度即为搜索窗口内模拟点云的密度 ρ_p ,计算过程如公式(7)所示,图 2 展示了当前点 p 投影密度 ρ_{pi} 和理论投影密度 ρ_{refi} 的计算过程:

$$\rho_{pi} = \frac{n_p}{SW_i} \quad (6)$$

$$\rho_{refi} = \frac{n_{ref}}{SW_i} \quad (7)$$

其中, n_p 每一个搜索窗口内的点云数目; n_{ref} 为搜索窗口内的模拟点云点数; SW_i 是不同尺寸的搜索窗口。

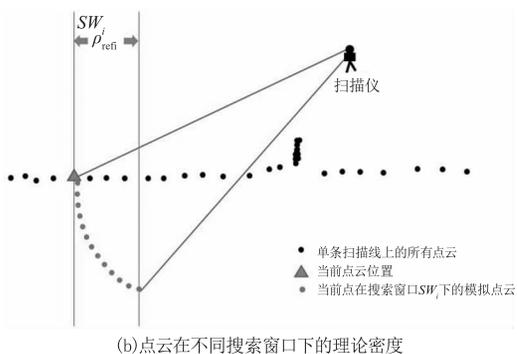
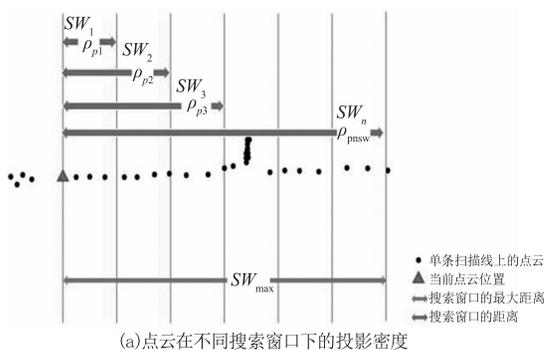


图 2 点云密度计算流程

Fig. 2 Flow of point cloud density calculation

在计算当前点所有窗口下的相对点云密度 RD 后,找到具有最大相对密度 RD_{max} 的搜索窗口 SW_{RDmax} 。如果 SW_{RDmax} 是第一个窗口 (SW_1),则将 SW_{RDmax} 范围内的所有点云定义为密度特征点 $pt_{density}$;否则,将 SW_{RDmax} 范围内的点云定义为地面候选点 $pt_{candidate}$ 。

$$pts = \begin{cases} pt_{density} & (SW_{RDmax} = SW_1) \\ pt_{candidate} & (SW_{RDmax} \neq SW_1) \end{cases} \quad (8)$$

其中, pts 为单条扫描线上所有的点云; $pt_{density}$ 为密度特征点; $pt_{candidate}$ 为地面候选点; SW_{RDmax} 为最大的相对密度所在的搜索窗口; SW_1 为第一个窗口。

将 2.1 中带有扫描线信息的点云数据做为输入点集,进入扫描线密度计算,分离出的密度特征点 $pt_{density}$ 与地面候选点 $pt_{candidate}$ 为这一步骤的结果。

2.3 相对密度迭代分析

相对密度 RD 的计算主要依赖于两个参数,即搜索窗口 SW_i 和窗口间隔 ΔSW ,没有其他类型参数的限制。然而,采用单次相对密度分析处理地面点云存在一定局限性。在实际情况中, TLS 数据包含多种不同类别的物体,可能会出现同一扫描线下相对密度相似的情况,这使得单次相对密度计算难以有效分离全部的非地面点云,例如植被、倾斜的屋顶和墙体与窗户的组合。倾斜的屋顶由于点云密度与地面点相似,因此单次相对密度计算只能过滤较为密集的点簇。而墙体与窗户通常垂直于地面,它们在扫描线上的点云相对密度最大,但当同时考虑它们时,点云密度稍小的窗户点云可能会受到墙体的干扰,导致无法成功分离。为了应对以上问题,引入相对密度迭代分析,可以将扫描线分解为多次相对密度计算,每一次迭代都是前一次的结果作为输入,从而逐渐逼近最优地面点目标。在本文中,采用相对密度迭代方法,当扫描线上新生成的密度特征点 $pt_{density}$ 数目少于 10 时,终止迭代过程,最终,通过点云聚类方法消除剩余的少量离散点。

为了详细阐述相对密度迭代分析的原理,选取了一条特定的扫描线进行分析,这条扫描线逐一穿越地面、植被、墙壁、窗户、屋顶等不同区域。如图(3)所示。在第一次扫描线相对密度计算后,获得了地面候选点集,其中包括窗户、少量植被和屋顶等非地面点结构。然而,在进行二次迭代时,窗户点云不再受到墙体点云的干扰,成为该条扫描线上相对

密度最高的点集,成功地被过滤掉。与此同时,相对于垂直结构而言,点云投影密度较低的植被和屋顶逐渐被滤除。整个迭代过程中,有效分离的非地面点数量随着迭代次数的增加而迅速下降,为了提高计算效率,规定当扫描线上新生成的密度特征点 $pt_{density}$ 数目少于 10 时,终止迭代过程。最后,剩余的离散点通过点云聚类产生空间连续的同质点簇来消除,得到最终的过滤结果。

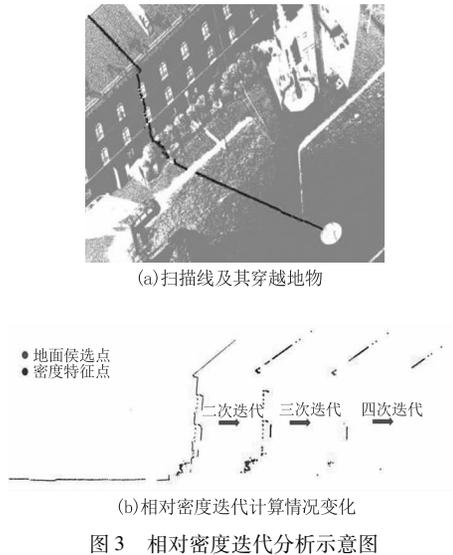


Fig. 3 Schematic diagram of the iterative analysis of relative density

3 实验结果及分析

3.1 数据介绍

本文采用的三组数据如图 4 所示,其中数据 1~2 来源于开源数据网站 semantic3d.net^[22],分别为城市和农村场景,数据 3 为城市场景。利用三组数据分别测试扫描线密度分析的地面点过滤效果,基本信息如表 1 所示。



图 4 实验数据(高程渲染)

Fig. 4 Experimental data (elevation rendering)

3.2 相对密度迭代的地面过滤实验

数据 1 内包含大型建筑物、汽车、路灯以及低矮植被等类型的非地面点。地面点的分布较为均匀,分布在建筑物所围的范围内,部分地面点之间不相邻,有明显的人工整饰痕迹。点云数据分布密集,扫描角分辨率为 0.03° 。地面过滤后的点云分布如图

5、图 6 所示,深色区域为滤除的非地面点部分,浅色区域为保留的地面点范围。通过实验结果比较,可以明显观察到本文方法成功实现了非地面点(例如建筑物、汽车、行人、路灯等)的去除,并有效地保留了地面部分。

表 1 实验数据信息

Tab. 1 Experimental data information

Data set	Number of point and angular resolution	Non-ground point sources	Number of non-ground point
1	14657121 (0.03°)	Buildings, cars, low-vegetation, street lamp, et al.	4721998
2	23979697 (0.03°)	Man-made terrain, natural terrain, buildings, road signs, trees, et al.	12891178
3	1876543 (0.09°)	Buildings, cars, high-vegetation, low-vegetation, tree, et al.	829770



图 5 数据 1 过滤结果整体图

Fig. 5 Overall graph of data 1 filtering results

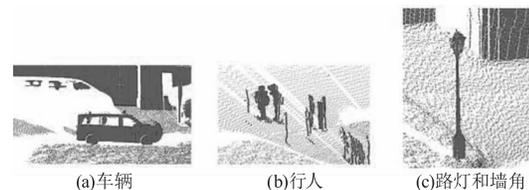


图 6 数据 1 过滤结果细节图

Fig. 6 Detailed view of the filtering results for data 1

数据 2 是农村类型的点云数据,包含人造地面与自然地形,自然地形起伏较大。被测区域内植被茂盛,房屋稀疏分布在测区边缘。此外,人造地面还包括一条道路,道路周围存在路标、护栏等非地面结构。由于激光光束受到仪器附近树木的遮挡,数据整体呈现向四周放射性分布。总体而言,农村类型的地面过滤比数据 1 更有难度。过滤结果如图 7、图 8 所示。



图 7 数据 2 过滤结果整体图

Fig. 7 Overall graph of data 2 filtering results

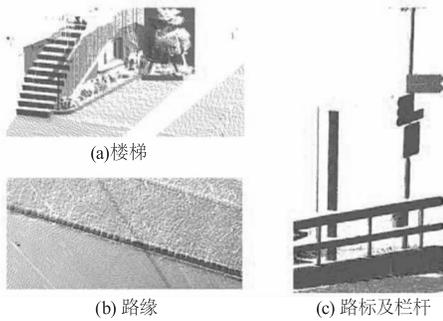


图8 数据2 过滤结果细节图

Fig.8 Detailed view of the filtering results for data 2

数据3 包含建筑物、车辆以及大量的植物等地物。与前两组数据不同,数据3 的扫描分辨率较低,点云分布稀疏,地面点的密度随着到扫描仪的距离增加而显著减少,过滤结果如图9 ~ 图10 所示。



图9 数据3 过滤结果整体图

Fig.9 Overall graph of data 3 filtering results

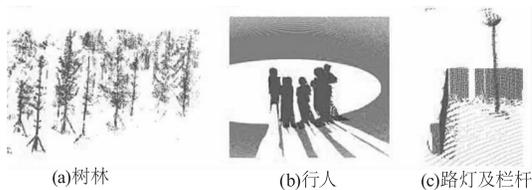


图10 数据3 过滤结果细节图

Fig.10 Detailed view of the filtering results for data 3

3.3 不同地面过滤方法精度对比

为了检验本文中地面过滤方法的可靠性,将实验分别与三角网滤波、布料滤波(CSF)进行对比。评价指标包括评价指标包括召回率、精确率、F1 指数,对比结果如表2 所示。在CSF 过滤中,布料分辨率是指用于覆盖地形的网格尺寸,设置的布料分辨率越大,得到的结果就越粗糙。同样,在三角网滤波中要先将测区分块,分块大小取决于最大建筑物的尺寸。因此,精度对比采用是最佳布料分辨率和建筑物尺寸下的三角网滤波、布料滤波过滤效果。

基于逐扫描线相对密度迭代分析的地面过滤方法,三组数据分别获得了F1 指数为94.44 %、90.35 % 和95.20 % 的结果,平均精度达到了93.33 %,这表明本文所提出的过滤方法具有高精度和可靠性。需要注意的是,三角网滤波方法被视为一种保守型过滤方法,它仅保留了极少量的地面点,虽然准确性很

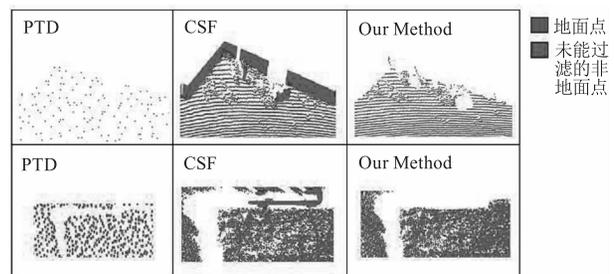
高,但召回率很低。与之不同的是,CSF 过滤方法认为地面点广泛分布于整个扫描场景,而 TLS 数据地面点有限,导致 CSF 在识别地面点的范围上存在误差,从而降低了准确性。此外,PTD 和 CSF 过滤方法在墙角位置、树桩等地物与地面相接的位置的分离效果不佳,如图11 所示,这也是准确性下降的原因之一。需要指出的是,TLS 具有高密度的特征,它采集到的数据比其他类型平台更为精细。因此,即使设置了最佳的布料分辨率和建筑物尺寸,也无法处理所有非地面点。

表2 不同过滤方法的精度指标

Tab.2 Accuracy indexes of different filtration methods

Method	Method	F1 %	Recall %	Precision %
1	PTD	61.99	0.31	99.63
	CSF	95.05	99.89	90.66
	Our method	94.44	98.92	90.35
2	PTD	77.70	0.39	99.90
	CSF	90.25	99.84	82.34
	Our method	90.35	93.80	87.14
3	PTD	85.42	0.43	92.45
	CSF	94.72	99.77	90.15
	Our method	95.20	97.51	93.00

本文所采用的方法相对于前述两种过滤方式具备显著优势,主要表现在以下几个方面:(1)逐扫描线地面点分析:对每个点进行更细致的独立处理,可以最大程度地保留所有地面点。(2)考虑地面扫描密度和范围:考虑地面激光扫描数据的高密度特性以及地面点分布有限的特点,有效地过滤掉细小的非地面点和遥远的非地面点,从而减少了噪声的影响。(3)相对密度迭代分析:本文采用相对密度分析迭代计算,能够精确地识别地面点与非地面点的接地部分,这种分析方法有助于更准确地区分不同类型的点,提高了地面点云的质量。综合而言,本文所提出的方法在地面点云过滤中具有明显的优势,能够更好地适应 TLS 数据特性,从而提高了地面点云提取的精度和效率。



(a)墙角、车辆和栏杆

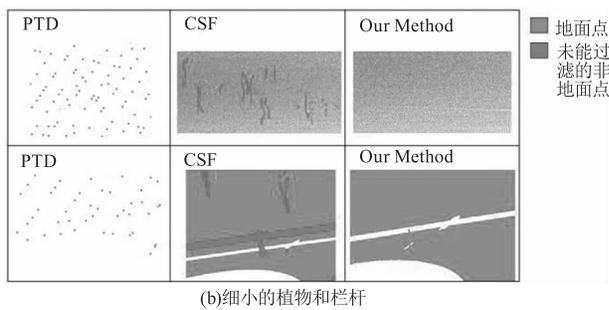


图11 不同过滤方法精确性比较

Fig. 11 Comparison of the accuracy of different filtration methods

4 结论

本文提出了一种利用相对投影密度差异进行点云地面过滤的方法。通过还原扫描线,进行逐扫描线相对密度迭代分析,不断逼近最佳地面点集。通过测试城市和农村场景的数据集证明了该方法具有较好适用性,平均精度达到93.33%,总体精度接近CSF算法,但是本文方法的精确度更高。特别是在处理与地面相接的部分,如墙角、路缘、树干底部等位置,过滤效果明显优于现有方法。该方法充分考虑地面激光扫描的特性,做到对每条扫描线以及每个点独立分析,实现对地面点提取范围的有效控制,提高地面过滤的准确性。

在未来的研究中,可以改进计算流程,使其能够同时处理多条扫描线,或引入其他点云特征,以进一步提升过滤效率。同时,基于其在路缘和杆状物检测中的卓越性能,可以考虑将该方法应用于道路提取以及场景分类的研究中。

参考文献:

- [1] Pan Y, Dong Y Q, Wang D L, et al. Three-dimensional reconstruction of structural surface model of heritage bridges using UAV-based photogrammetric point clouds[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1-20.
- [2] Ye Y T, Li B J, Fu L M. Fast object detection and tracking in laser data for autonomous driving[J]. Wuhan Daxue Xuebao: Xinxue Ban, 2019, 44(1): 139-144, 152. (in Chinese)
- 叶语同, 李必军, 付黎明. 智能驾驶中点云目标快速检测与跟踪[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2019, 44(1): 139-144, 152.
- [3] He Y, He X C, Dong X. 3D virtual environment perception system based on multilayer LiDAR[J]. Laser Journal, 2023, 44(1): 199-204. (in Chinese)

何忧, 何晓程, 董星. 基于多层激光雷达的3D虚拟环境感知系统[J]. 激光杂志, 2023, 44(1): 199-204.

- [4] Zhao Y, Wu B, Wu J, et al. Mapping 3D visibility in an urban street environment from mobile LiDAR point clouds[J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57(6): 797-812.
- [5] Ma Z J, Qiao S Y, Wen D R. Application of 3D laser scanner in tunnel construction discussion[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020, (3): 157-159. (in Chinese)
- 马自军, 谯生有, 闻道荣. 2020 三维激光扫描仪在隧道工程施工中的应用[J]. 测绘通报, 2020, (3): 157-159.
- [6] Zhong G W. Application of airborne LiDAR in geological disaster emergency surveying and mapping[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2023, 46(4): 197-200. (in Chinese)
- 钟国文. 机载 LiDAR 在地质灾害应急测绘中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(4): 197-200.
- [7] Meng X, Currit N, Zhao K. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: a review of critical issues[J]. Remote Sensing, 2010, 2(3): 833-860.
- [8] SITHOLE G, VOSSelman G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2004, 59(1/2): 85-101.
- [9] Yang Y, Zhang Y S, Zou X L, et al. An improved method of slope based filtering of airborne LiDAR point cloud[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(S1): 12-13, 280. (in Chinese)
- 杨洋, 张永生, 邹晓亮, 等. 一种改进的基于坡度变化的机载激光雷达点云滤波方法[J]. 测绘科学, 2008, 33(S1): 12-13, 280.
- [10] Ding S P, Liu R F, Cai Y N, et al. 2019. Point cloud adaptive slope filtering method considering terrain[J]. Remote Sensing Information, 34(4): 108-113. (in Chinese)
- 丁少鹏, 刘如飞, 蔡永宁, 等. 一种顾及地形的点云自适应坡度滤波方法. 遥感信息, 2019, 34(4): 108-113.
- [11] Tang G, Deng X S, Wang Q Y. Point cloud filtering algorithm based on density clustering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 436-447. (in Chinese)
- 唐菓, 邓兴升, 王清阳. 基于密度聚类的点云滤波算法研究. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 436-447.
- [12] Rodriguez-Caballero E, Afana A, Chamizo S, et al. A new

- adaptive method to filter terrestrial laser scanner point clouds using morphological filters and spectral information to conserve surface micro-topography[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*,2016,117:141 – 148.
- [13] FANG L N, YANG B S. Automated extracting structural roads from mobile laser scanning point clouds[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2013,42(2):260 – 267. (in Chinese)
方莉娜,杨必胜. 车载激光扫描数据的结构化道路自动提取方法[J]. *测绘学报*,2013,42(2):260 – 267.
- [14] ZHANG K, CHEN S C, WHITMAN D, et al. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*,2003,41(4):872 – 882.
- [15] Mao J H, He T, Zeng Q H, et al. A filtering algorithm for LIDAR point cloud with TIN [J]. *Laser Journal*, 2007, (6):36 – 38. (in Chinese)
毛建华,何挺,曾齐红,等. 基于 TIN 的 LIDAR 点云过滤算法[J]. *激光杂志*,2007,(6):36 – 38.
- [16] Wu C C, Lu X P, Li G L, et al. 2013. Research on filtering algorithm for LiDAR data based on TIN[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (3):32 – 35. (in Chinese)
吴丛丛,卢小平,李国利,等. 基于 TIN 的 LiDAR 数据滤波算法研究. *测绘通报*,2013,(3):32 – 35)
- [17] Zhang W, Qi J, Wan P, et al. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation[J]. *Remote Sensing*,2016,8(6):501.
- [18] Chen X L, Wang X, Bi X W. Cloth simulation filtering algorithm based on elevation normalization [J]. *Computer and Modernization*,2021,(5):6 – 12. (in Chinese)
陈曦亮,王雪,毕晓伟. 基于高程归一化的布料模拟滤波算法[J]. *计算机与现代化*,2021,(5):6 – 12.
- [19] Song C Y, Wang Q, Gao H D, et al. Optimization of cloth simulation filter considering the feature of neighborhood characteristics of object for LiDAR point cloud[J]. *Laser & Infrared*,2023,53(1):51 – 56. (in Chinese)
宋晨洋,王强,高德涵,等. 顾及地物邻域特征的 LiDAR 点云布料模拟滤波优化[J]. *激光与红外*,2023,53(1):51 – 56.
- [20] Chen M L, Zhang X Y, Ji C C, et al. Using relative projection density for classification of terrestrial laser scanning data with unknown angular resolution [J]. *Remote Sensing*,2022,14(23):6043.
- [21] Che, E Z, Olsen M J. Fast ground filtering for TLS data via scanline density analysis [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*,2017,129:226 – 240.
- [22] Timo H, D. J W, Nikolay S, et al. Large-scale supervised learning for 3D point cloud labeling: Semantic3d. Net [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*,2018,84(5):297 – 308.