

引文格式:劳奕臻,张宇,薛逸飞,等.复杂玻璃环境下地面激光雷达点云去噪方法[J].城市勘测,2025(3):1-5.

文章编号:1672-8262(2025)03-1-05

中图分类号:P225.2

文献标识码:A

复杂玻璃环境下地面激光雷达点云去噪方法

劳奕臻,张宇,薛逸飞,邵万朋*

(湖南大学信息科学与工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:在地面激光扫描仪的建筑测量中,由于镜面反射和透明玻璃物体产生的反射干扰,测量数据中含有大量噪声点。这些反射噪声会严重影响后续数据分析的准确性。本研究提出了一种高效的反射噪声滤除方法:首先基于点云反射强度估计玻璃区域(即反射噪声源);结合激光扫描仪位置与玻璃区域进行光束路径追踪,以确定可能产生反射噪声的空间范围;最后通过融合基于噪声点云-实体对称性的几何约束和三维特征相似性估计网络的深度特征联合判别机制检测反射噪声,并实现针对性去除。实验结果表明,该方法反射噪声去除率可达 90%,能有效实现测量点云的选择性降噪。

关键词:镜面反射;反射强度;对称性与几何相似性;反射噪声去除

0 引言

地面激光雷达扫描技术作为一种地基高精度激光雷达系统,能够快速获取一定距离内建筑结构表面的完整三维形状信息^[1]。然而,当使用地基激光雷达对含有

大量玻璃(如玻璃门窗)的目标建筑进行点云测量时,激光扫描仪会收到来自建筑内部的反射噪声(如图 1 所示)。这些位于目标建筑玻璃平面后方的不必要噪声点会降低三维建筑立面重建^[2]、场景理解^[3]等应用。

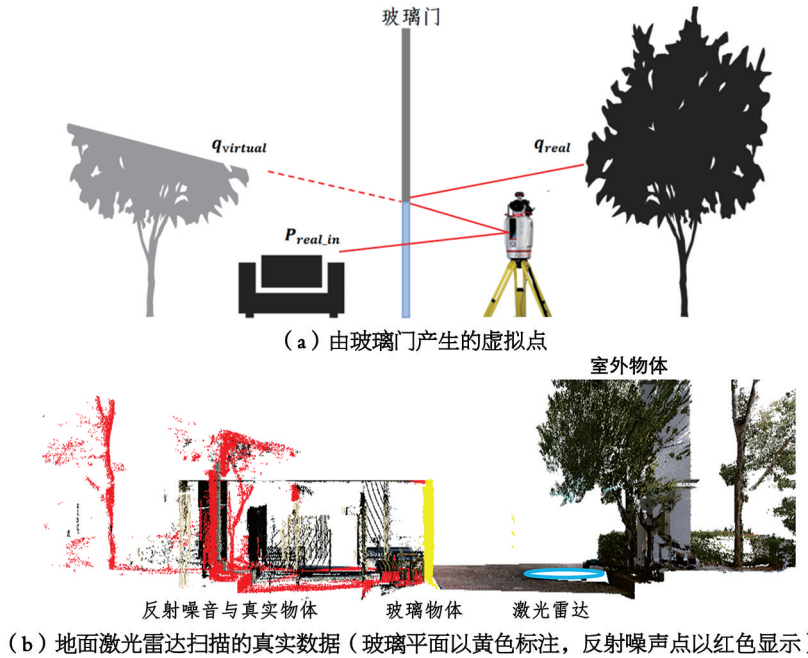


图 1 激光雷达玻璃反射原理

根据光学原理,无纹理的透明玻璃几乎不会产生散射,仅存在透射和镜面反射现象。在使用激光扫描

仪测量具有多个小型窗户和玻璃门的建筑时,当激光脉冲击中玻璃门或橱窗时,同一玻璃表面会同时发生

收稿日期:2025—01—21

第一作者:劳奕臻(1991—),男,博士,副教授,博士生导师,研究方向为计算机视觉以及计算摄影学。E-mail:yizhenlao@hnu.edu.cn

* 通信作者:邵万朋(1991—),男,博士,助理研究员,研究方向为三维计算机视觉、点云处理。E-mail:wpshao@hnu.edu.cn

基金项目:新一代人工智能国家科技重大专项(2022ZD0119003);湖湘青年英才计划(2024RC3092);湖南省重点研发计划(2024JK2020、2024JK2021);

湖南省 5G 专项“基于 VR/AR 的自然资源实景三维时空基底研发及应用”(2024ABC03A05);湖南省自然科学基金(2024JJ10027)。

透射和反射——透射激光束击中建筑内部实体物体形成真实点云,而反射激光束击中玻璃前方的实体物体后,会在玻璃对侧产生对应反射点如图 1(a)所示。图 1(b)中用红色标注了由玻璃门产生的反射噪声,必须选择性剔除这些噪声点才能正确使用测量点云。

针对室内复杂场景中的镜面反射噪声,Gao 等^[4]将扫描点转换为距离图,通过滑动窗口计算反射率方差来去噪。但该方法依赖相邻扫描数据。鉴于深度学习直接处理大规模点云的挑战性,Gao 等^[5]提出基于 Transformer 的范围图反射区域检测方法,但仅适用于商场等封闭空间。Koch 等^[6-7]通过比较同一传输路径上的多回波距离来过滤镜面反射点,将最近回波判定为镜面反射点。确定窗户位置后,移除镜面后方受影响区域内的点云。这些方法虽能有效处理 SLAM 区域的反射噪声,但难以直接应用于室外场景。现有研究在室外环境反射噪声去除方面存在明显不足。Yun 等^[8]基于多重回波特征提取玻璃物体后,通过局部邻域点特征相似度评估来识别虚拟点,但该方法仅适用于单一主导玻璃平面的情况。

本文通过结合强度属性和约束条件的分割方法,分析不同物体的反射强度特征来识别玻璃构件。当受影响区域内的点云在玻璃平面对侧存在几何特征相似的对应该实体点时,即判定为反射噪声点。针对含有多扇玻璃门窗的建筑实验表明,该方法可去除约 90% 的反射噪声点。

1 研究方法

1.1 玻璃平面提取

Kashani 等人^[9]与 R.Koch 团队^[7]的研究表明,玻璃物体在户外场景中的回波强度值远低于其他物体。然而,已有实证表明强度值不仅与物体材质相关,还受激光束入射角影响^[10]。具体而言,当激光束与玻璃表面垂直入射时,回波强度会非常高,但随入射角轻微偏离而急剧下降。这导致同一玻璃区域的强度值存在显著差异。在此情况下,从激光雷达数据中选取合适的强度阈值来完整提取玻璃成分具有挑战性。鉴于玻璃物体通常呈现相似的几何特征,我们首先将全部点云分割为多个具有同质特征的简单形状单元。方法流程如图 2 所示。

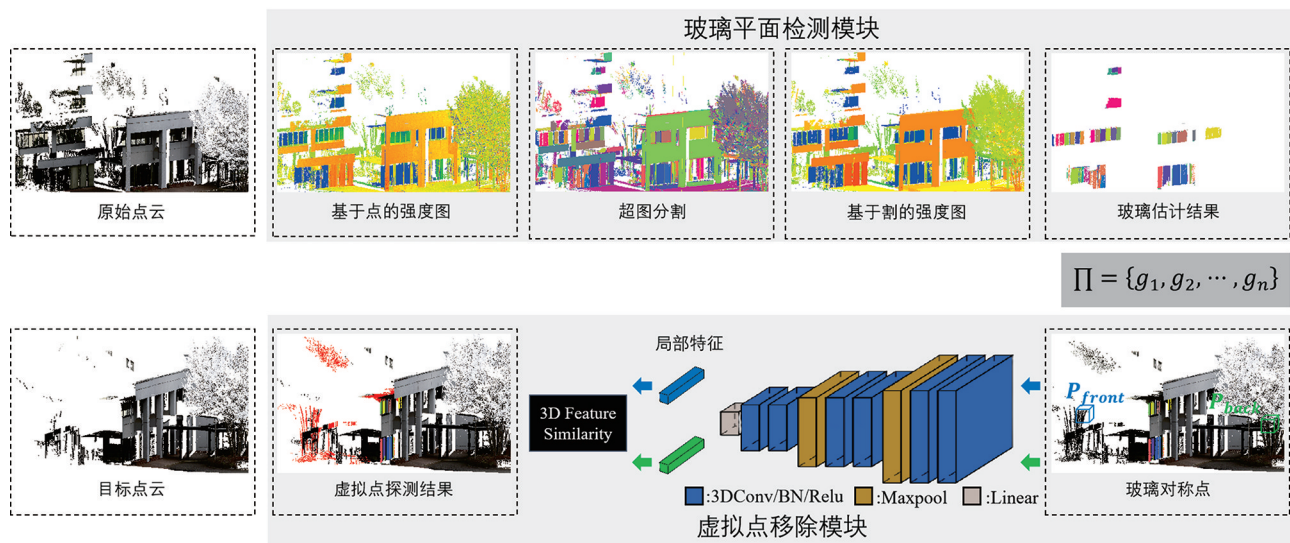


图2 方法流程示意图(实验数据来自“S001”数据集)

随后,基于同一分区内所有点的强度值计算平均值,并将该值赋予分区内各点。经此处理,同一分区的点将呈现一致强度值,从而能更便捷地从基于割的强度图中筛选出完整的玻璃分区。

本方法采用文献^[3]提出的全局能量几何超图分割法,需特别说明的是,该流程完全无须监督。对于每个点,输入特征包含其局部邻域的三种几何约束特征(线性度、平面度、散射度)以及强度值,这些特征用于表征邻域形状特征。需要注意的是,所有输入数据的特征在

进入几何分割前均需进行归一化处理。文献^[3]所述的几何同质分割算法,被定义为下述优化问题的常数连通分解:

$$\arg \min_{g \in 4 \times V} \sum_{i \in V} \|g_i - f_i\|^2 + \mu \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} [g_i - g_j \neq 0] \quad (1)$$

V 表示具有对应特征的 N 个三维点输入数据。第一项描述分割结果 L 与局部特征 ϕ 的拟合度。第二项 w_{ij} 中的艾弗森括号用于判定相邻分量是否合并,系数 μ 用于衡量相邻分割结果的平滑度。该方程为非凸且

不连续的数学形式,无法直接求解大规模特征输入,但可通过图割迭代算法有效求解^[10]。本方法无须预先设定分割单元尺寸。经过无监督分割后,具有相似特征的点被归并为同一分割标记,整个场景被分解为多个结构规整的简单几何形状。

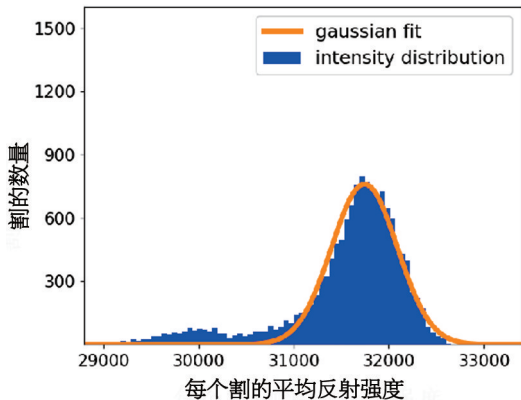


图3 “S001”数据集所有割的平均强度分布

本研究聚焦于从户外场景的分割点云中提取玻璃物体。完成分割后,为从各分割区块中筛选类玻璃材质,首先计算所有分区块的平均强度值如图3所示。从图3中,我们可以观察到采用以下形式的高斯函数对强度直方图进行拟合:

$$y = \omega \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (2)$$

由于玻璃物体的回波强度值显著低于其他物体,本研究选取 $\tau = \mu - k\sigma$ 作为阈值(其中 μ 为平均强度, σ 为标准差),用于户外场景中类玻璃物体的筛选。参数 k 可根据不同扫描数据调整,在“S001”数据中, k 的值

$$L_{\text{triplet}}(P_{\text{anc}}, P_{\text{pos}}, P_{\text{neg}}) = \max\{\|\Phi(P_{\text{anc}}) - \Phi(P_{\text{pos}})\| - \|\Phi(P_{\text{anc}}) - \Phi(P_{\text{neg}})\| + \gamma, 0\} \quad (3)$$

其中 P_{anc} 为玻璃后噪音点, P_{pos} 噪音点对应的真实点, P_{neg} 为玻璃后的真实点。为提高网络鲁棒性,在输入阶段引入了随机旋转数据增强,并设置了遮挡处理机制(忽略点数少于10的空体素)。该网络通过最大化虚拟点与对应真实点特征向量的相似度,同时最小化与干扰点的特征相似度,有效解决了对称位置相似几何形状的区别难题。

2 实验分析

2.1 数据来源

我们提出了一种高效的合成训练数据生成方法,用于解决直接采集带有反射伪影的激光雷达点云(1S3DPC)数据耗时费力的问题。具体而言,我们从

为1.5。需注意的是,金属围栏、灯杆及部分树叶等低强度物体也可能被误提取。

基于建筑立面特征,我们对“S001”数据集定义以下约束条件:法向量约束(分割区块与 z 轴夹角需大于 85°),面积阈值(最小投影面积大于 2 m^2),宽高比(矩形结构宽高比大于0.5)。

通过上述约束可剔除不可靠的候选目标。尽管展示窗、玻璃门等安装在不同建筑结构上,但同一立面上的窗户和玻璃门可构成连续平面。随后对候选点云(排除灰色干扰点),采用 RANSAC 算法进行多次平面拟合^[11],最终提取出构成门窗的大面积玻璃平面。

1.2 噪音去除

然而,要找到与给定虚拟点相对应的真实点存在挑战。虚拟点的密度通常比其对应真实点的密度要低。此外,由于遮挡,玻璃内部区域中的某些虚拟点在室外区域的对称位置上可能没有对应的真实点。为了应对这些特性,我们首先对点云进行体素化,然后在所提出的3D特征相似性估计网络中依次应用3D卷积和最大池化操作来处理体素化后的点云数据。本研究提出了一种基于多尺度3D卷积神经网络的激光雷达点云虚拟点检测方法。该方法的核心是一个精心设计的3D特征相似性估计网络,该网络采用层次化架构处理体素化点云数据:首先通过大尺度体素化捕捉全局特征,然后依次应用3D卷积和最大池化操作进行特征提取和下采样。针对虚拟点检测的特殊性,网络训练采用改进的三元组损失函数:

武汉大学激光雷达数据集中选取了100个无反射噪音点的场景作为基础数据^[12],在每个场景中随机放置10块尺寸为 $1 \sim 3 \text{ m}$ (宽) $\times 1 \sim 3 \text{ m}$ (高)的玻璃平面,共生成1000个带有反射噪音的激光雷达数据。为增强数据真实性,我们采用了两项关键措施:①随机剔除1/3穿过玻璃平面的光线,以模拟真实环境中的光线损失;②对玻璃平面和虚拟物体上的采样点各进行50%的随机剔除,以模拟实际扫描中的噪声。最终,我们在一个包含多玻璃立面的场景“S002”中验证我们方法的有效性。

2.2 实验结果

(1) 玻璃提取结果

图4展示了“S002”数据集玻璃检测过程, k 的设

置参数为1。如图4所示,大多数低强度玻璃物体均被成功检测,部分带有玻璃框架的相连玻璃物体由于欠分割现象容易被整体提取,导致检测到的玻璃区域通常大于真实玻璃面积。然而,随着楼层升高,可获取的窗户点云数据逐渐减少,这是由于玻璃表面的高反射特性导致镜面反射现象,特别是在大入射角情况下会发生全反射,从而造成玻璃表面点云数据的严重缺

失。当检测到的窗户面积小于实际面积时,所估计的反射噪声影响区域也会小于真实范围,这可能引起对方法反射噪声检测率下降的担忧。但需特别说明的是,高层窗户区域的激光脉冲因传播高度超过树木遮挡,实际产生反射噪声的概率较低。因此,即便对此类窗户的反射影响区域估计小于实际面积,反射噪声的检测率仍可能保持稳定。

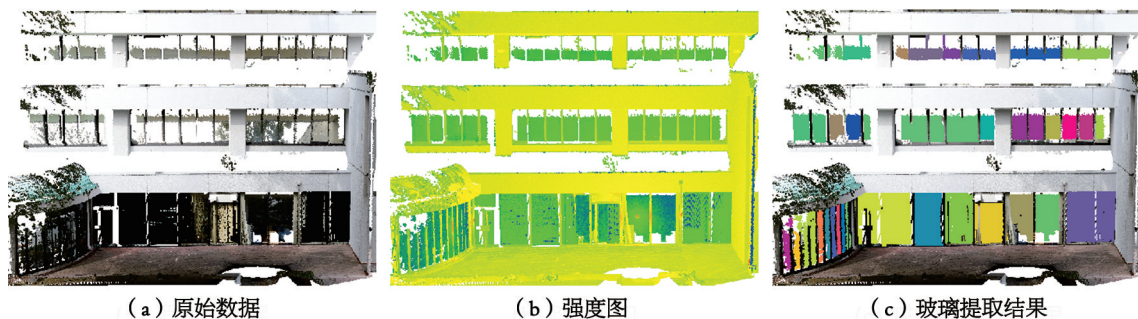


图4 “S002”外立面玻璃检测结果

(2) 噪音去除结果

为定量评估虚拟点去除效果,我们首先依据真实玻璃平面对建筑内部点云进行坐标变换。若变换后的点能在现实场景中找到对应实体点,则标记为反射噪声点。我们采用 $\text{recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN})$, $\text{precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP})$ 和 $F_1\text{-score} = 2 * (\text{recall} * \text{precision}) / (\text{precision} + \text{recall})$ 三个指标进行评估,其中,TPs表示正确识别的虚拟点数量;FPs指被误判为虚拟点的真实建筑内部真实点的数量;FNs则为被误判为有效点的虚拟点数量。

如图5所示,反射噪声点不仅来源于底层的玻璃门,高层窗户同样会产生此类噪声。表1第一行数据显示,本方法能有效去除建筑物中底层玻璃产生的大部分噪声点。表1第二行表明,真实场景中二层窗户产生的一些噪声点会被误判为有效点,其根本原因在于实际扫描中未能获取该区域的采样点——由于激光扫描仪位于树木下层,受底部枝叶遮挡无法采集树冠顶部的实际点云。而当激光脉冲射向三层窗户时,反射光束会指向天空,此时噪声点仅来自窗台上部区域且能被有效检测。

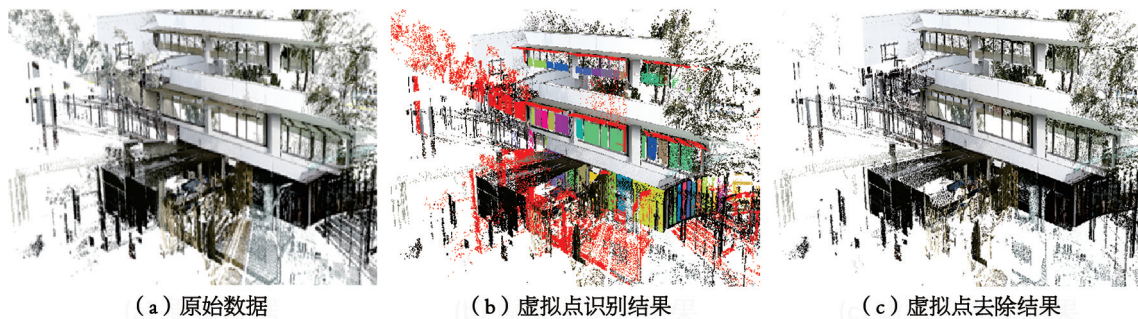


图5 “S002”噪音去除结果

表1 “S002”场景中不同楼层的噪声去除效果评估

数据	楼层	噪音移除结果		
		Recall	Precision	F ₁ -score
S002	一层	0.901	0.71	0.794
	二层	0.803	1.00	0.891
	三层	0.900	1.00	0.947

万方数据

3 结 论

本研究提出了一种针对地面激光雷达建筑点云数据中玻璃门窗反射噪声的去除方法。该方法首先利用激光雷达的固有物理特性——玻璃材质的反射强度显著低于其他物体,实现建筑立面玻璃区域的检测;其次基于镜面反射原理,构建了基于体素的三维特征相似性估计网络,通过提取三维点云的深度特征来捕捉真

实点与虚拟点之间的几何相似关系。我们使用合成反射噪音点的模型数据训练该网络,并在人工标注的真实数据集上进行测试。实验结果表明,所提方法能够选择性地移除不大部分的激光雷达反射噪音点。

4 参考文献

[1] B. Muralikrishnan. Performance Evaluation of Terrestrial Laser Scanners—a Review[J]. Meas. Sci. Technol.,2021,32(7):072001.

[2] M. B,H. C,M. E. Evaluation of 3D Building Model Using Terrestrial Laser Scanning and Drone Photogrammetry[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2021, XLVI-4/W4-2021:39-42.

[3] M. Weinmann, B. Jutzi, C. Mallet. Feature Relevance Assessment for the Semantic Interpretation of 3D Point Cloud Data[J]. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., vol. II-5/W2, pp. 313-318, Oct. 2013.

[4] Rui G,Jisun P,Xiaohang H, et al. Reflective Noise Filtering of Large-Scale Point Cloud Using Multi-Position LiDAR Sensing Data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(16):3058-3058.

[5] Rui G,Mengyu L,SeungJun Y, et al. Reflective Noise Filtering of Large-Scale Point Cloud Using Transformer[J]. Remote Sensing,2022,14(3):577-577.

[6] R. Koch,S. May,P. Koch,et al. Detection of Specular Reflections in Range Measurements for Faultless Robotic

SLAM[J]. In Robot 2015:Second Iberian Robotics Conference,L. P. Reis,A. P. Moreira,P. U. Lima,L. Montano, and V. Muñoz-Martinez, Eds., in Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 417. Cham:Springer International Publishing,2016:133-145.

[7] Rainer K,Stefan M,Patrick M,et al. Identification of Transparent and Specular Reflective Material in Laser Scans to Discriminate Affected Measurements for Faultless Robotic SLAM[J]. Robotics and Autonomous Systems,2016.

[8] J.-S. Yun and J.-Y. Sim. Reflection Removal for Large-Scale 3D Point Clouds[J]. In 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,Salt Lake City, UT;IEEE,Jun. 2018,pp. 4597-4605.

[9] Kashani A,Olsen M,Parrish C,et al. A Review of LiDAR Radiometric Processing:From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration[J]. Sensors,2015,15(11):28099-28128.

[10] Loic L,Guillaume O. Cut Pursuit:Fast Algorithms to Learn Piecewise Constant Functions on General Weighted Graphs[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences,2017,10(4):1724-1766.

[11] Schnabel R,Wahl R,Klein R. Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection[J]. Computer Graphics Forum,2007,26(2):214-226.

[12] Dong Z,Yang B,Liang F,et al. Hierarchical Registration of Unordered TLS Point Clouds Based on Binary Shape Context Descriptor[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2018,144:61-79.

Reflection Noise Removal for Terrestrial Laser Scanning Point Clouds in Complex Glass Environments

LAO Yizhen,ZHANG Yu,XUE Yifei,SHAO Wanpeng
(School of Information Science and Engineering,Changsha 410082,China)

Abstract:In terrestrial laser scanning (TLS) measurement for architectural measurement, specular reflections and interference from transparent glass objects introduce significant noise points into the measured data. These reflective noises severely compromise the accuracy of subsequent data analysis. This study proposes an efficient reflective noise filtering method;First,glass regions (i.e.,noise sources) are estimated based on point cloud intensity. Next,beam path tracing is performed by combining the laser scanner’s position and the identified glass regions to delineate spatial ranges prone to reflective noise. Finally,a joint discrimination mechanism integrates geometric constraints derived from reflection symmetry and deep features from a 3D feature similarity estimation network to detect reflective noise,enabling targeted removal. Experimental results demonstrate a 90% reflective noise removal rate,achieving selective denoising of measured point clouds.

Key words:specular reflection;intensity;reflection symmetry and geometric similarity;reflective noise removal