

应用 BIM 技术的大型建筑综合体外立面三维重建算法

3D Reconstruction Algorithm of Large Building Exterior Facade with BIM Technology

赵云莉

(中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北 武汉 400083)

摘要: 为了获得高质量外立面三维重建模型, 三维展现细节元素, 研究基于 BIM 技术的大型建筑综合体外立面三维重建算法。运用双边滤波算法, 进行大型建筑综合体外立面的初始三维点云数据去噪, 结合 RANSAC 算法与欧式聚类算法, 进行外立面三维点云数据的分割处理, 得到不同平面外立面的三维点云数据, 分析各平面外立面内的不同元素特征线, 向 BIM 技术的 Revit 软件内导入此类元素特征线, 通过函数连接同平面外立面内各元素特征线后, 得到不同平面的外立面重建模型, 合并后获得整体大型建筑综合体外立面三维重建模型。试验结果表明, 可去除外立面初始三维点云数据内噪声, 高效精准地分割不同平面的外立面三维点云数据, 最终所得大型建筑综合体外立面三维重建模型整体质量较高, 可清晰呈现模型内细节元素, 为城市规划建设提供保障。

关键词: BIM 技术; 大型建筑; 综合体外立面; 三维重建; 双边滤波; Revit 技术

中图分类号: P232 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 03-0018-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.018

ZHAO Yunli

(China Coal Science and Industry Group, Wuhan Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 400083, China)

Abstract: In order to obtain a high-quality 3D reconstruction model of the external facade and display the detail elements in 3D, the 3D reconstruction algorithm of the external facade of large-scale buildings based on BIM Technology is studied. The bilateral filtering algorithm is used to denoise the initial 3D point cloud data of the comprehensive external facade of large buildings. Combined with the RANSAC algorithm and the European clustering algorithm, the 3D point cloud data of the external facade are segmented to obtain the 3D point cloud data of different plane external facades, analyze the different element characteristic lines in each plane external facade, and import such element characteristic lines into the revit software of BIM technology. After connecting the characteristic lines of each element in the same plane facade by function, the facade reconstruction models of different planes are obtained. After merging, the 3D reconstruction model of the comprehensive external facade of the whole large-scale building is obtained. The experimental results show that the noise in the initial 3D point cloud data of the facade can be removed, and the 3D point cloud data of the facade of different planes can be segmented efficiently and accurately. Finally, the overall quality of the 3D reconstruction model of the comprehensive external facade of large-scale buildings is high, which can clearly show the details in the model, and provide a guarantee for urban planning and construction.

Keywords: BIM technology; large buildings; comprehensive exterior facade; 3D reconstruction; bilateral filtering; revit technology

作者简介: 赵云莉 (1980—), 女, 本科, 高级建筑师, 一级注册建筑师。主要研究方向: 建筑设计。

收稿日期: 2022-06-06

0 引言

大型建筑综合体外立面三维模型被大量地运用在城市规划建设以及地图导航等领域中，属于当代智慧城市发展中无法缺少的关键信息数据库^[1]。通常此类三维模型需以各种方式所获取到的相关信息数据为基础数据，结合科学合理的重建算法与相关技术，实现此类三维模型的重建^[2-3]。

BIM（建筑信息模型）技术在建筑领域内的三维模型重建方面发挥着至关重要的作用，它不仅具备建筑的所有信息数据，还能够呈现出建筑的二维平面与三维空间信息^[4]。在该技术中，重点运用的相关软件包括 CAD、Revit、AE 及 Navisworks 等。其中，Revit 软件的主要优点是具备强大的功能性、所提供的应用程序接口（API）丰富等，是专门为 BIM 技术设计的软件，同时也是目前建筑领域内 BIM 技术中应用最多的软件之一^[5-6]。双边滤波算法属于一种去噪处理算法，其应用范围十分广泛，其中以点云数据处理与数字图像处理领域为主^[7]。该算法可依据邻近区域中像素点的灰度差异信息与空间几何间距信息，以不改变初始数据边缘信息为前提，完成初始数据的去噪处理^[8]。随机抽样一致性（RANSAC）算法属于一类平稳的模型参数预估算算法，能够以存在非正常数据的某组数据集样本为依据，获取数据的相关数学模型参数，提取出所需的数据样本，该算法可作为数据分割算法使用，应用范围广泛^[9,10]。欧式聚类算法属于一类将欧式距离作为依据实施聚类的算法，可用于建筑领域内相关信息数据的细致分割处理中，提取到所需信息数据^[11]。

综合以上分析，本文结合 BIM 技术的 Revit 软件、CAD 软件以及双边滤波算法和两种分割算法，共同构建大型建筑综合体外立面三维重建算法，实现大型建筑综合体外立面的高精度高质量三维模型重建，为智慧城市的规划建设提供关键数据支撑。

1 大型建筑综合体外立面三维重建算法

1.1 三维点云数据去噪处理

通过三维激光扫描技术采集待重建大型建筑

综合体外立面三维点云数据，作为外立面三维重建的初始数据。但由于所采集的大型建筑综合体外立面三维点云数据内混合着诸多小尺度噪声，需采取双边滤波算法去除掉此类噪声，提高该建筑综合体外立面三维点云数据的精度与质量，为获得精准的大型建筑综合体外立面三维重建模型奠定高质量的数据基础。

双边滤波算法可在保证大型建筑综合体外立面初始点云数据的边缘细节不变的前提下，运用邻域内像素点的灰度与空间两种邻近度信息，经运算及相关删除等操作达到去除初始三维点云数据内噪声的目的^[12]。其中，双边滤波权因子的确定属于该算法的关键，其主要与邻近两点的灰度差、距离差相关^[13]。大型建筑综合体外立面初始三维点云数据的双边滤波方程可表示为：

$$q' = q + \lambda \sigma \quad (1)$$

式中，双边滤波权因子通过 σ 表示；大型建筑综合体外立面初始三维点云数据中的随机一点通过 q 表示；此点的单位法矢量通过 λ 表示；与 q 点对应的空间点通过 q' 表示。其中，双边滤波权因子 σ 的运算式为：

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^k v_a(\|q - q_i\|) v_u(\|\langle q - q_i, \lambda \rangle\|) \langle q - q_i, \lambda \rangle}{\sum_{i=1}^k v_a(\|q - q_i\|) v_u(\|\langle q - q_i, \lambda \rangle\|)} \quad (2)$$

式中，初始三维点云数据内的第 i 个点通过 q_i 表示；在外立面初始三维点云数据内，同该点具有最短间距的 k 个点即为该点的 k 邻域；特征保持权函数通过 v_u 表示；光顺滤波权函数通过 v_a 表示；其中， $v_u = e^{-\frac{\|\langle q - q_i, \lambda \rangle\|^2}{2\sigma^2}}$ ， $v_a = e^{-\frac{\|q - q_i\|^2}{2\delta_u^2}}$ ， q 点与邻近点的标准偏差和相邻半径分别通过 δ_u 和 δ_a 表示。

通过双边滤波算法去除大型建筑综合体外立面初始三维点云数据内噪声的详细过程为：

(1) 初始点云数据输入：向双边滤波算法内输入待处理的大型建筑综合体外立面初始三维点云数据 Q ，并将其设定为 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ ，且 $q_i \in Q$ ；

(2) k 邻域的建立：在外立面初始三维点云数

研究与应用

据 Q 内, 同 q_i 点具有最短间距的 k 个点即为该点的 k 邻域, 通过 $k(q_i)$ 表示; k 邻域在外立面初始点云数据去噪处理过程中属于一种局部去噪邻域, 可按照实际去噪需求随机改变其取值, 通常需通过多次实际应用试验将其恰当的取值确定;

(3) 平面的拟合: 通过最小二乘法将 $k(q_i)$ 的切平面 $W(q)$ 构建;

(4) 单位法向量 λ 的运算: 对所构建的切平面 $W(q)$ 的单位法向量 λ 实施运算, 同时该单位法向量 λ 也是 q 点的单位法向量, 通过其运算值将初始三维点云数据在此点位置的部分几何特征呈现;

(5) 双边滤波权因子 σ 的构建: 以公式 (2) 为依据, 得出双边滤波权因子 σ ;

(6) 调整点坐标: 以公式 (1) 的滤波方程为依据, 对大型建筑综合体外立面初始三维点云数据实施双边滤波去噪处理, 获取滤波去噪之后的各三维点云坐标。

1.2 三维点云数据分割

针对去噪处理后的大型建筑综合体外立面三维点云数据实施分割, 其目的是提取出属于相同平面的外立面点云数据。在此选用欧式聚类与随机抽样一致性 (RANSAC) 相融合的分割算法, 实现对上一小节获得的去噪后大型建筑综合体外立面三维点云数据的有效分割。通过 RANSAC 算法粗分割去噪后的大型建筑综合体外立面三维点云, 获取到相同平面内的大面积点云外立面, 也就是相同平面内包含窗沿与墙面点云的建筑综合体相同外立面; 剩余部分的外立面点云可通过欧式聚类算法实现细分割, 通过设定较高的欧式距离阈值, 将相同平面内的外立面窗户元素点云数据分割提取出来; 合并二者所获得的相同平面点云数据后, 得到各个同平面外立面三维点云数据。整体分割过程见图 1。

具体分割过程如下:

(1) RANSAC 算法的粗分割: 设大型建筑综合体外立面内共包含 N 个平面, 以其中任意平面为例, 设此平面的三维点云数据内具备的误差点与异常点数量分别通过 n_b 与 n_c 表示, 当误差点与异常点重合时, 此情况的概率 P_1 可表示为:

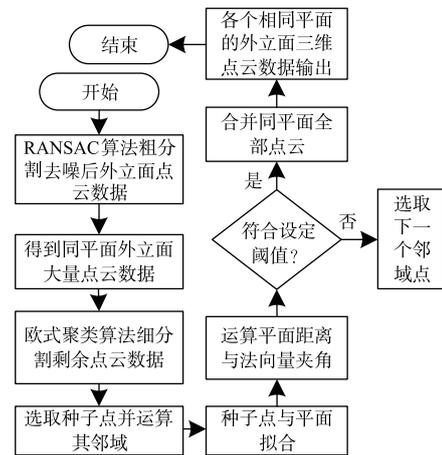


图 1 去噪后外立面三维点云数据的整体分割过程图
Fig. 1 Overall segmentation process of 3D point cloud data on the exterior facade after denoising

$$P_1 = \frac{E^{n_c}}{E^{(n_c+n_b)}} \quad (3)$$

式中, 所选取平面的拟合参数通过 E 表示。通过增加迭代次数, 能够由所选取平面的三维点云数据内挑选出恰当的点, 在所挑选的点数最低值等于 b 的情况下, 得到较好抽样子集的概率 P_2 可表示成:

$$P_2 = 1 - (1 - \varphi^d)^b \quad (4)$$

式中, 该平面内点云数据的数学模型参数运算时所需的最低数据通过 d 表示; 该平面内总体点云数据中无误差点所占比例通过 φ 表示; $P_2 \in (0.9, 0.99)$ 。则有:

$$b = \frac{\lg(1 - P_2)}{\lg(1 - \varphi^d)} \quad (5)$$

迭代终止的判别条件包括: 当迭代点数量比最优拟合平面的点数量高时, 或者当迭代点数量等于最优拟合平面的点数量, 同时迭代点的阈值较低时, 用当前的迭代点取代最优拟合平面内的点, 结束迭代过程, 完成去噪后大型建筑综合体外立面三维点云的粗分割。

(2) 欧式聚类算法的细分割: 欧式距离作为此分割算法实现相同平面的外立面点云聚类的参考依据, 并通过运用 KD-tree 分割聚类后的同平面外立面点云。设欧式空间内的某个 3D 平面为 $Cx + Dy + Ez + F = 0$, 其中, C 、 D 、 E 、 F 均代表欧式空间的拟合参数, 可经由最小二乘法拟合获取到; 由 RANSAC 算法粗分割后剩余的外立面三维点云

数据内随机取 q_i 点，其三维坐标为 (x_i, y_i, z_i) ，那么该点与欧式空间内此 3D 平面之间的间距能够表示成：

$$l_i = \frac{|Cx_i + Dy_i + Ez_i + F|}{\sqrt{C^2 + D^2 + E^2}} \quad (6)$$

则 q_i 点到欧式空间的此 3D 平面的最优拟合条件可表示成：

$$\sum_{i=1} l_i^2 = \min \quad (7)$$

式中，RANSAC 算法粗分割后剩余的外立面三维点云集合中点的总数量通过 m' 表示。

在此基础上，对不同分割平面的法向量夹角与平面间距实施运算，当运算结果符合设定阈值时，合并相同平面内两种算法分割后所获得的点云，得到数个相同平面的外立面点云数据。

1.3 外立面三维重建算法

在此选用 CAD 技术与 Revit 技术相结合的方式，实现 BIM 技术的大型建筑综合体外立面三维模型重建。向 CAD 软件内导入分割后大型建筑综合体各个平面的外立面点云数据，获得大型建筑综合体各个平面的外立面内的墙面、窗沿、窗户等元素特征线；向 Revit 软件内导入 CAD 软件所得到的各个平面外立面内各元素特征线，经该软件内相关函数实施各个元素特征线的连线之后，获得大型建筑综合体各个平面的外立面三维模型，合并后将最终的整体大型建筑综合体外立面三维重建模型获取到，实现三维重建。基于 BIM 的大型建筑综合体外立面三维重建算法过程如图 2 所示。

具体过程如下：

(1) 获取各个平面的外立面特征线：①通过 Autodesk Recap 软件变换分割后大型建筑综合体各个平面的外立面点云数据为 RCS 格式文件^[14]，向 CAD 软件内导入转换后的点云数据；②依据外立面的特点，通过平面分割的方法，将点云数据分成平面和非平面两部分，其中平面部分就是建筑物的墙面和地面。将点云数据中的平面部分提取出来，并进行去噪处理和灰度化操作。通过墙面分割的方法，将平面部分的点云数据进一步分割

研究与应用

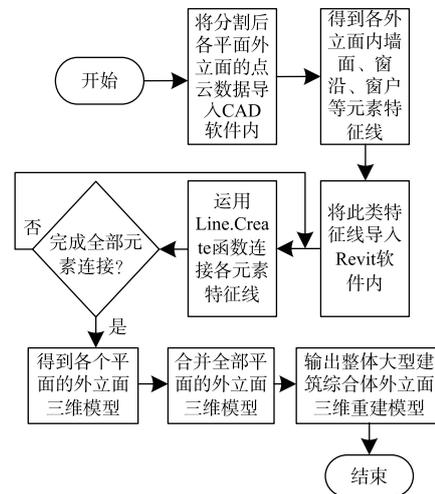


图 2 基于 BIM 的大型建筑综合体外立面三维重建算法过程图
Fig. 2 Process diagram of BIM based 3D reconstruction algorithm for comprehensive exterior facade of large buildings

成墙壁和窗户等部分。以墙面为例，选取一个点作为起点，然后以这个点为中心，搜索周围的点，将它们分成不同的线段，并进行线拟合，最终形成一条独立的特征线。通过上述方法在所导入的点云数据内将墙面、窗沿、窗户等元素的特征线提取出来。

(2) Revit 软件构建外立面三维模型：①向 Revit 软件内导入 CAD 软件所得到的各个平面外立面内各种元素的特征线；②通过 Revit 软件内的 Line.Create 函数^[15]，运用所导入的单个平面的外立面内各元素特征线，结合以往量测所得的相关数据，实现各元素特征线的循环连线，得到单个外立面的三维重建模型；③按照以上方式获得不同平面的外立面三维重建模型，合并此类模型后，得到最终的整体大型建筑综合体外立面三维重建模型。

2 实验

以某市区内的某个大型建筑为例，该建筑为 30 层的大型写字楼，运用本文算法重建其综合体外立面三维模型，通过三维模型重建过程中各阶段的应用效果，检验本文算法的实际应用性能。通过三维激光扫描技术采集实验大型建筑综合体外立面初始三维点云数据，所采集的初始三维点云数据的整体数量为 707532 个，通过本文算法对

研究与应用

此类初始三维点云数据实施去噪、同平面分割、特征线提取及特征线连接等处理后,获得实验大型建筑综合体外立面三维重建模型。

首先为了保证三维模型重建的精度,需先通过本文算法对所采集的实验大型建筑综合体外立面初始三维点云数据实施去噪处理,去噪后的实验大型建筑综合体外立面三维点云数据总量为76016个。由本文算法去噪后的实验大型建筑综合体外立面三维点云数据内随机抽取部分数据,与此部分数据对应的初始三维点云数据实施对比,检验本文算法的去噪效果。对比结果如图3所示。



(a) 局部初始点云数据



(b) 局部去噪后点云数据

图3 本文算法去噪前后的局部外立面点云呈现对比

Fig. 3 Comparison of local facade point cloud presentations before and after denoising by the algorithm in this article

通过图3能够看出,经本文算法去噪处理之后,实验大型建筑综合体外立面三维点云数据中的噪声被有效去除掉,去噪效果理想,去噪后的外立面三维点云呈现效果更清晰,可为后期的三维模型重建奠定扎实的基础。

在此基础上,继续检验本文算法三维重建实验大型建筑综合体外立面过程中对去噪后不同平面外立面点云数据的分割效果,首先呈现粗分割部分的分割效果。设检验过程中迭代条件中剩余三维点云数据量的阈值为去噪后总点云数据量的25%~55%,检验在此条件的变化下,本文算法粗分割的错误分割点云数量及分割时间开销情况,

所得检验结果如图4所示。

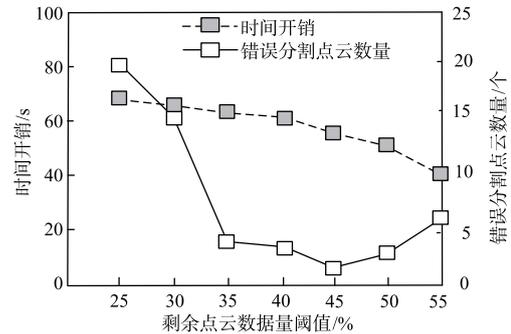


图4 粗分割结果

Fig. 4 Rough segmentation results

由图4可知,本文算法在粗分割去噪后实验大型建筑综合体外立面三维点云数据过程中,当迭代条件中剩余三维点云数据量的阈值增大时,粗分割的时间开销逐渐降低,即二者为反比关系,错误分割点云数据量呈现起伏式降低趋势,由此可见,迭代条件中剩余三维点云数据量阈值的设定,对本文算法粗分割的时间开销与分割精度均有着直接的影响作用,综合看来,本文算法的粗分割开销少、精度高,可实现高效精准地三维点云数据粗分割,其中在剩余三维点云数据量阈值为35%~50%时,本文算法粗分割出现错误分割的点云数据量最低。

在粗分割的基础上,需继续对粗分割后所剩余的实验大型建筑综合体外立面三维点云数据实施细分割,实现以各个平面为单位的实验大型建筑综合体外立面三维点云数据分割,为后续的精准三维模型重建提供保障。此实验中设定点与欧式空间平面的距离阈值为6~12cm,在每种距离阈值的设定下各实施两次实验检测,两次实验检测中设定最低三维点云数据量分别为40个与80个,对本文算法细分割过程中的分割时间开销、过分割点云数据量及未分割点云数据量分别实施统计,所得统计结果详如表1所示。

分析表1能够得知,本文算法在对粗分割后剩余部分外立面三维点云数据实施细分割的过程中,随着所设定距离阈值的升高,分割的时间开销呈现小幅度稳定增长,但整体增长趋势不大;过分割的点云数据量呈现逐渐下降趋势,当距离阈值在8~15 cm之间时,过分割点云数据量低于5

个；未分割的点云数据量呈现逐渐增长趋势，当距离阈值在 6~9 cm 之间时，未分割点云数据量低于 5 个；另外，在相同距离阈值下，最低三维点云数据量越高，分割的时间开销越高，未分割点云数据量相对越高，而过分分割点云数据量相对越低。总体看来，当距离阈值设定为 8 cm 与 9 cm 时，本文算法的细分精度相对更高，且分割效率也较高，综合分割效果相对更理想。

表 1 细分割结果

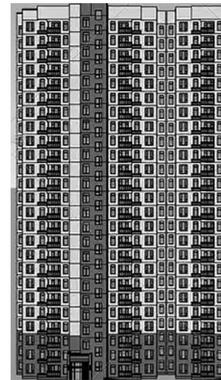
Table 1 Fine segmentation results

距离 阈值/cm	最低三维点云 数据量/个	时间 开销/s	过分分割点云 数据量/个	未分割点云 数据量/个
6	40	25.57	15	1
	80	27.85	10	2
7	40	27.13	10	2
	80	29.16	5	3
8	40	28.56	5	2
	80	30.03	4	4
9	40	29.75	4	3
	80	31.11	3	5
10	40	31.26	4	8
	80	33.07	2	14
11	40	33.08	3	13
	80	35.15	2	20
12	40	35.75	2	18
	80	38.02	1	25
13	40	38.87	1	21
	80	40.62	1	28
14	40	42.56	1	27
	80	44.73	0	35
15	40	45.75	0	36
	80	47.85	0	44

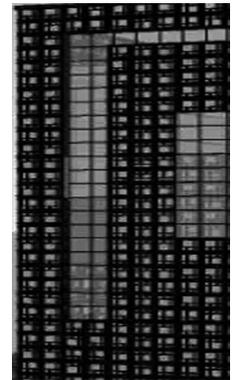
在以上的分割基础上，合并粗分割与细分割后的分割结果后，获得实验大型建筑综合体不同平面的外立面三维点云数据，继续通过本文算法运用此类分割后三维点云数据，重建该建筑综合体各个平面的外立面模型，以其中四个平面（A~D）的外立面重建模型为例，呈现出的重建效果如图 5 所示。

通过图 5 可看出，本文算法所重建的实验大型建筑综合体各个平面的外立面模型呈现效果清晰，质量较高，可充分呈现实验大型建筑综合体各个平面外立面的窗户与墙体等元素特征。

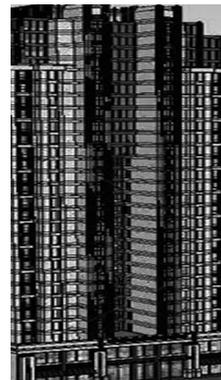
研究与应用



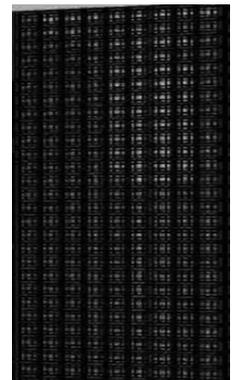
(a) A 平面的外立面



(b) B 平面的外立面



(c) C 平面的外立面



(d) D 平面的外立面

图 5 本文算法重建的各平面外立面模型呈现效果

Fig. 5 The rendering effect of each plane facade model reconstructed by the algorithm in this article

经本文算法合并所重建的全部平面外立面模型后，获得的最终实验大型建筑综合体外立面三维重建模型整体效果如图 6 所示。



图 6 本文算法最终获得的实验大型建筑综合体外立面三维重建模型效果图

Fig. 6 The final rendering of the experimental large-scale building comprehensive external facade 3D reconstruction model obtained by the algorithm in this article

研究与应用

由图 6 可看出, 本文算法最终获得的实验大型建筑综合体外立面三维重建模型整体精度较高, 呈现效果理想, 能够满足实际应用需求。

3 结论

通过应用 BIM 相关技术, 研究一种针对大型建筑综合体外立面的三维重建算法, 重建过程中结合双边滤波算法、RANSAC 算法及欧式聚类算法, 完成对所采集的大型建筑综合体外立面初始三维点云数据的去噪处理与分割处理, 获取到不同平面外立面的三维点云数据, 在此基础上, 通过 CAD 与 Revit 两种 BIM 相关技术, 运用分割后三维点云数据实现大型建筑综合体外立面的三维模型重建, 去噪效果与分割效果均较为理想, 能够得到高质量的各平面外立面三维点云数据, 最终重建的大型建筑综合体外立面三维模型整体呈现效果清晰, 精度较高, 重建效果可达到实际应用需求。

参 考 文 献

- [1] 程笑, 冯国军, 樊警雷. 基于 BIM 技术的复杂建筑结构三维激光扫描验收 [J]. 施工技术, 2019, 48 (S1): 369-371.
- [2] 初士立, 夏绵丽, 封明明, 等. 基于 BIM 技术的岩土工程三维地质模型创建方法研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2019, 39 (S1): 152-157.
- [3] 王森援, 蔡国榕, 王宗跃, 等. 基于加权约束的单体建筑物点云表面重建算法 [J]. 地球信息科学学报, 2019, 21 (5): 654-662.
- [4] 马小秋, 刘丹丹. 基于透视式增强现实的 BIM 建筑三维重建仿真 [J]. 计算机仿真, 2020, 37 (3): 229-233.
- [5] 闫泽文, 王子庠, 闫伟文, 等. 基于 BIM 技术的古建筑典型构件参数化建模方法研究 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2020, 53 (S1): 323-329.
- [6] 惠之瑶, 张爱琳, 王昆, 等. 集成 BIM-3D 扫描技术的斗拱建模方法 [J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37 (2): 151-157.
- [7] 杨宜林, 李积英, 王燕, 等. 基于改进双边滤波的深度图像修复算法研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57 (16): 216-222.
- [8] 魏赞, 欧阳鹏. 基于快速亮通双边滤波器的 Retinex 图像增强算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42 (9): 1944-1949.
- [9] 段虎荣, 闫全超, 李闰, 等. 基于随机抽样一致性-网格搜索方法反演断面倾角 [J]. 地震学报, 2019, 41 (5): 585-599+680.
- [10] 苏云龙, 平雪良, 李楠. 基于 RANSAC 三维点云的平面提取算法 [J]. 激光与红外, 2019, 49 (6): 780-784.
- [11] 党倩, 崔阿军, 尚闻博, 等. 采用欧式形态距离的负荷曲线近邻传播聚类方法 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56 (1): 165-176.
- [12] 王惠琴, 吕佳芸, 张伟. 基于双边滤波-BM3D 算法的 GPR 图像去噪 [J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48 (1): 91-97.
- [13] 王晓辉, 吴禄慎, 陈华伟. 基于法向量距离分类的散乱点云数据去噪 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2020, 50 (1): 278-288.
- [14] 冯国正, 马耀昌, 孙振勇, 等. 地面三维激光点云数据拼接与坐标转换方法研究 [J]. 人民长江, 2019, 50 (2): 151-154.
- [15] 黄莹, 李雷, 蒋明轩, 等. 基于 Revit 的铁路构件三维建模方法研究与应用 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (7): 1732-1739.