

基于三维激光扫描的建筑物平整度检测

周 卫

湖南省第一测绘院, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年8月2日; 录用日期: 2022年8月12日; 发布日期: 2022年8月24日

摘 要

建筑物平整度是衡量施工建设质量的一个重要指标。针对目前可用于大面积自动化检测建筑物平整度的技术较少, 人工检测耗时耗力的现状。研究采用了三维激光扫描技术, 采集建筑表面点云数据, 预处理后基于Matlab平台利用最小二乘法对墙面数据拟合, 通过计算点到拟合平面的距离来计算墙面的平整度。由拟合结果可知, 三维激光扫描技术用于检测墙面的平整度有较高的可行性和适用性, 取得了较好的精度。结果表明该技术比传统方法速度更快, 成本更低。

关键词

三维激光, 墙面平整度, 最小二乘法, 自动化

Building Flatness Detection Based on 3D Laser Scanning

Wei Zhou

The First Surveying and Mapping Institute of Hunan Province, Changsha Hunan

Received: Aug. 2nd, 2022; accepted: Aug. 12th, 2022; published: Aug. 24th, 2022

Abstract

Building flatness is an important indicator to measure the quality of construction. In view of the current situation that there are few technologies available for large-area automatic detection of building flatness, and manual detection is time-consuming and labor-intensive. The research uses 3D laser scanning technology to collect the point cloud data of the building surface. After preprocessing, the least squares method is used to fit the wall data based on the Matlab platform, and the flatness of the wall is calculated by calculating the distance from the point to the fitting plane. It can be seen from the fitting results that the three-dimensional laser scanning technology has high feasibility and applicability for detecting the flatness of the wall, and has achieved good accuracy.

The results show that the technique is faster and less expensive than traditional methods.

Keywords

3D Laser, Wall Flatness, Least Squares, Automation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国城市化进程不断推进，高层建筑已与人们生活息息相关，随之而来的是如何保证高层建筑在施工和运营中的安全是人们亟需面对的问题。墙面平整度的检测就是反映建筑安全关键的一环，其反映了建筑物墙体凹凸程度以及整体墙面的均匀程度，该指标是衡量建筑物工程质量是否合格的重要标准，其结果也直接关乎建筑物的美观和安全使用。传统的建筑物墙面平整度检测方法应用较广检测有全站仪检测法、红外水平检测法，白炽灯检测法[1]。这些检测方法由于分布点位不均匀，整体的检测精度低，且操作实践比较繁琐，需大量的人力劳动且工作效率较低。

三维激光扫描技术是近几十年来发展的新兴技术，它速度更快，且无需直接接触建筑，能快速精确地实现建筑三维立体的快速检测。本研究通过三维激光扫描仪自动化获取建筑物墙面数据，采用最小二乘法拟合建筑物墙面[2]，用来计算平整度。

2. 点云数据

2.1. 点云数据采集设备

研究外业数据采集过程中，使用仪器是 Riegl VZ-1000 三维激光扫描成像仪，如图 1 所示。该仪器每秒可以发射高达 300,000 点的纤细激光束，提供高达 0.0005° 的角分辨率，该扫描仪具有长距离、高精度、快速度、轻巧便携的特点，采集数据中分辨率设置为 100 米处 5 cm。



Figure 1. RIEGL VZ-1000 3D laser scanner

图 1. Riegl VZ-1000 三维激光扫描仪

2.2. 点云数据处理

2.2.1. 点云数据拼接

本次实验数据采集共设置 5 个站点，用于获取研究建筑墙面的点云数据，站点分布如图 2 所示，对五个站点数据获取后对点云数据进行拼接，获得完整的研究墙体点云数据结果。

2.2.2. 点云数据抽稀及去噪

1) 点云数据抽稀：三维激光扫描技术可以在短时间内快速的获取测量目标的海量点云数据，海量点云数据一方面可以详细描述物体特征，另一方面也为数据处理带来了困难[3]。不同测站的点云数据配准后在

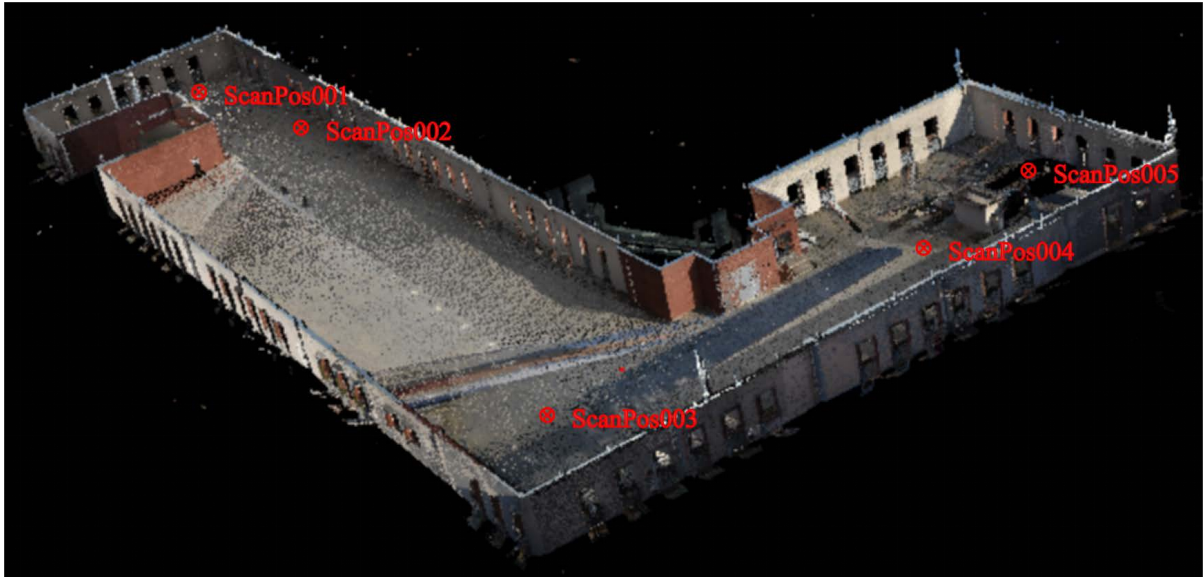


Figure 2. Scanning site distribution and overview of the study area

图 2. 扫描站点分布及研究区概况图



Figure 3. Point cloud data of research area after eliminating redundancy

图 3. 消除冗余后研究区点云数据

重叠区域往往存在大量重复的点云数据，这些重复的点云数据会导致计算机运行低效率，造成数据处理缓慢，运算效率低下[4]；由于本实验涉及的站点较多，且站点数据量较大，重复点云较多，因此在对数据使用前需对数据进行去冗和简化处理。研究经过处理后的点云数据从 29,354,954 个点减少到了 9,774,824 个，如图 3 所示，消除冗余后的点云数据很好的保持了原有的地物特征，又大大的减少了数据量。

2) 点云数据去噪：点云数据在获取的过程中，通常会受到光照、扫描设备、空中悬浮物等方面的影响[5] [6] [7] [8]，扫描的数据会受到噪声的污染，使得获取的数据不能直接投入使用，因此需要对噪声进行去除。如图 4 所示，在经过抽稀后的研究对象的点云数据周围仍然存在大量孤立的点云，所以需要对其进行去除，本实验主要通过人工参与将噪声去除，结果如图 5 所示，噪声已经去除掉，可以进行下一步的实验。



Figure 4. Point cloud data with noise

图 4. 含有噪声的点云数据

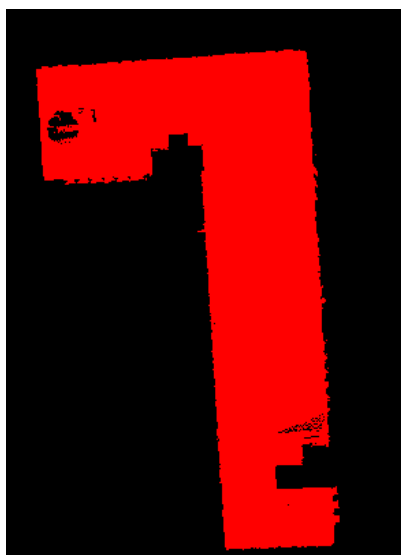


Figure 5. Point cloud data with noise removed

图 5. 除去噪声的点云数据

2.2.3. 提取研究对象点云数据

如图 6 所示，本文共选择三个区域墙面作为研究对象分布在建筑物不同的方位。



Figure 6. Schematic diagram of wall interception

图 6. 截取墙面示意图

3. 平整度计算方法

3.1. 平面拟合原理与方法

空间平面方程可以表示为：

$$f(x, y, z) = Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

A 、 B 、 C 、 D 为常数，方程两边同时除以 D ，则有：

$$f(x, y, z) = ax + by + cz + 1 = 0 \quad (2)$$

要确定一个平面，关键在于 a 、 b 、 c 三个参数的求解。

设对某平面进行扫描，得到 n 个点云数据，记为 (x_i, y_i, z_i) ($i=1, 2, \dots, n$)，根据最小二乘原理，该方法拟合平面需满足条件：

$$\sum_{i=1}^n [f(x, y, z) - f(x_i, y_i, z_i)]^2 = \min \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)，且令 $F = \min$ 则有：

$$F = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i + 1)^2 = \min \quad (4)$$

要满足式(4)即使 $\frac{\partial F}{\partial a} = 0$ ， $\frac{\partial F}{\partial b} = 0$ ， $\frac{\partial F}{\partial c} = 0$ ，则有：

$$a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i y_i + c \sum_{i=1}^n x_i z_i = -\sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

$$a \sum_{i=1}^n x_i y_i + b \sum_{i=1}^n y_i^2 + c \sum_{i=1}^n y_i z_i = -\sum_{i=1}^n y_i \quad (6)$$

$$a \sum_{i=1}^n x_i z_i + b \sum_{i=1}^n x_i z_i + c \sum_{i=1}^n z_i^2 = -\sum_{i=1}^n z_i \quad (7)$$

写成矩阵形式则有：

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^n x_i \\ -\sum_{i=1}^n y_i \\ -\sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

令

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^n x_i \\ -\sum_{i=1}^n y_i \\ -\sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

则有 $AX^T = L$ ，所以空间平面方程参数 $X = A^{-1}L$ 。

3.2. 平整度计算

墙面上每一点 (x_i, y_i, z_i) 到拟合平面的距离 d_i ，表达了点的起伏情况，其整体可以代表墙面的平整情况，其中：

$$d_i = \frac{ax_i + by_i + cz_i + 1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (10)$$

中误差对一组测量中特大或特效的误差反应非常敏感，能够很好地反映出测量结果波动的大小[9][10][11][12]，故本实验使用中误差 m 来表达墙面平整度，中误差 m 的表达式为：

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}} \quad (11)$$

4. 平整度计算实验结果

4.1. 平面拟合结果

拟合得到墙面方程参数如表 1 所示，绘制拟合平面与点云数据三维图像，如图 7 所示；将拟合平面与点云数据集叠加显示，拟合平面与点云数据贴合度较高，拟合效果较好，如图 8 所示。

Table 1. Fitting plane equation solution parameters

表 1. 拟合平面方程解算参数

墙面	a	b	c	d	中误差
1	0.0137	0.0077	-0.0096	1	0.0019
2	0.0181	0.0101	-0.0127	1	0.0011
3	-0.1592	0.3432	0.0514	1	0.0011

4.2. 墙面平整度结果分析

图 9 是墙面点到拟合平面的距离分布的统计直方图，图 10 是点云数据距拟合平面距离散点图，图 11 是墙面平整度分布状况，可以直观的观察点到拟合平面的距离近似的服从正态分布，墙面点到拟合平面距离的波动情况，以及墙面平整度分布状况，总体上分布较为均匀，且三面墙距离较小点云数据占大多数(小于 0.005 m)，统计结果如表 2 所示，墙面 1 的距离最大值为 0.0148 m，最小值为-0.0084 m，墙

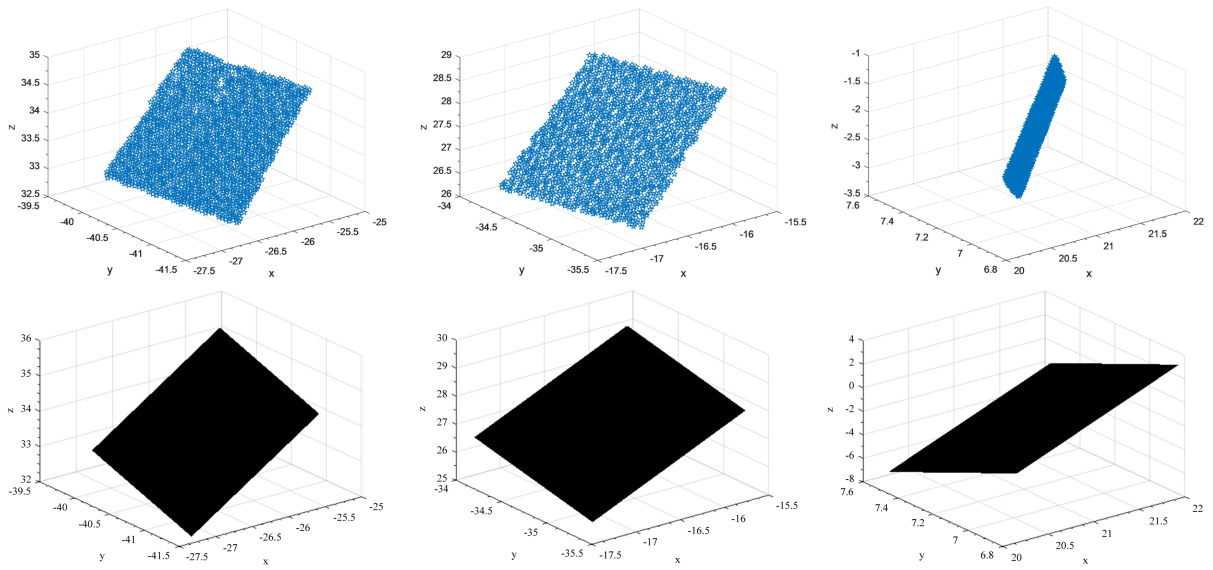


Figure 7. Point cloud data and fitting plan diagram
图 7. 点云数据及拟合平面示意图

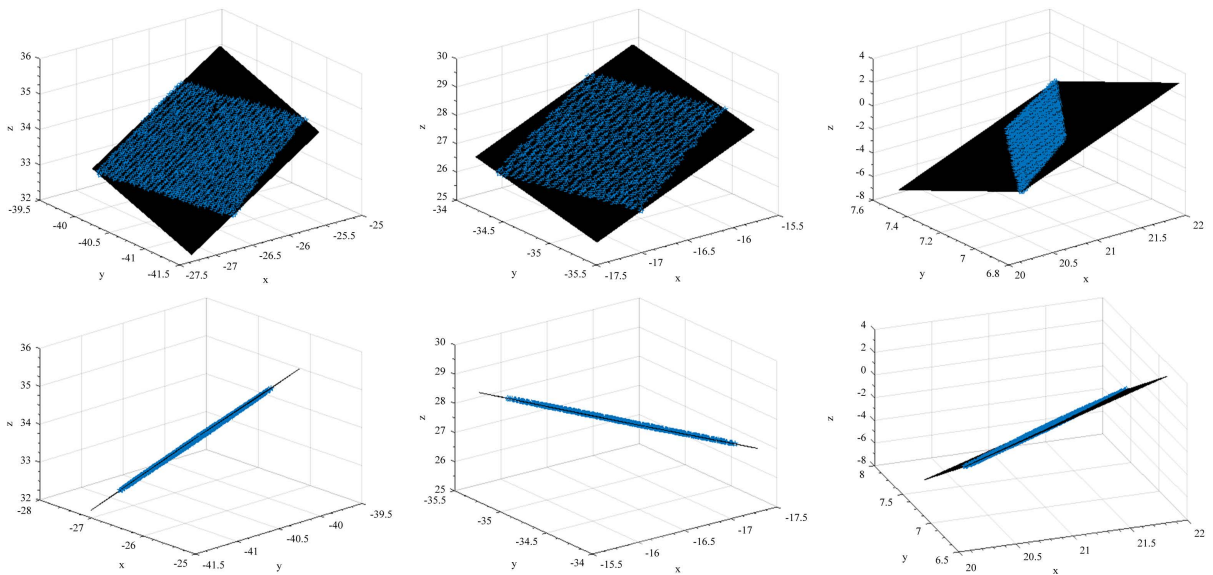


Figure 8. Point cloud data and fitting plane overlay
图 8. 点云数据及拟合平面叠加图

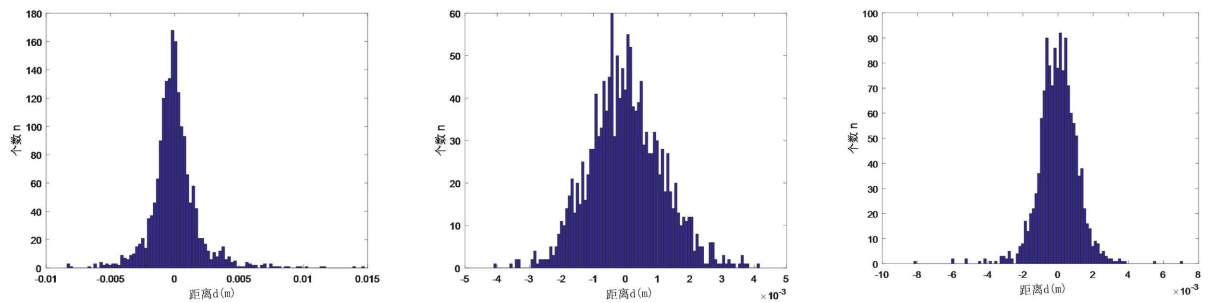


Figure 9. Statistical histogram of distance distribution from wall point to fitting plane
图 9. 墙面点到拟合平面的距离分布的统计直方图

面 2 的距离绝对值最大值为 0.0042 m，最小值为-0.0041 m，墙面 3 距离最大值为 0.0071 m，最小值为-0.0082 m。根据公式(1)计算得到三面的平整度分别为 1.9 mm、1.1 mm、1.1 mm，根据《建筑装饰装修工程质量验收规范》(GB50210-2001) [12] [13] [14] [15]规定，石砖幕墙的整体平整度是 3 mm，这三面墙的平整度均符合要求。

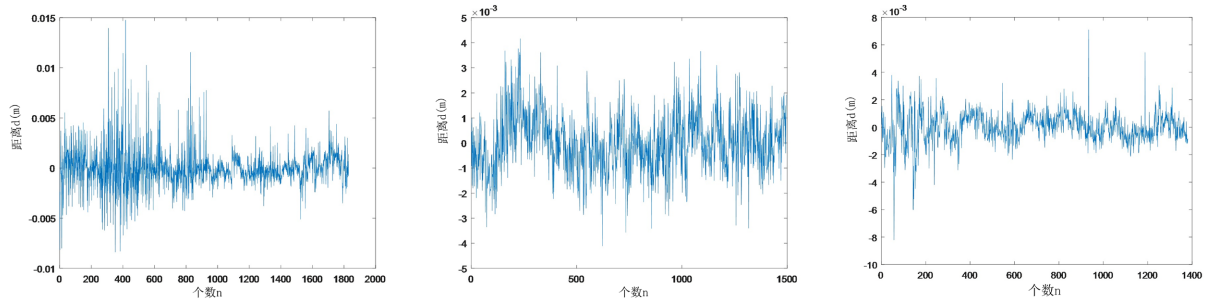


Figure 10. Scatter diagram of distance between point cloud data and fitting plane
图 10. 点云数据距拟合平面距离散点图

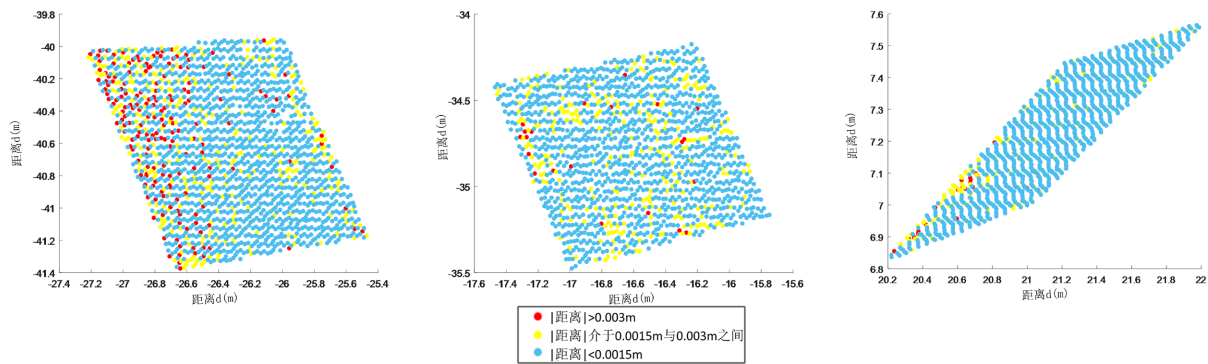


Figure 11. Distribution diagram of wall flatness
图 11. 墙面平整度分布图

Table 2. Wall distance distribution statistics
表 2. 墙面距离分布统计

距离范围(m)	<0.0015	0.0015~0.003	>0.003
墙面 1 占比	74.19%	16.29%	9.68%
墙面 2 占比	81.16%	17.75%	1.47%
墙面 3 占比	87.11%	11.15%	1.96%

5. 结论

本研究利用三维激光扫描仪进行墙面平整度的检测，使用最小二乘拟合墙面并且对墙面平整度进行了计算，主要结论如下：

- 1) 三维激光扫描仪可以快速地获取大量的点云数据，对时间和空间要求较低。
- 2) 三维激光扫描技术能大量获取整个研究建筑的点云数据，在大面积建筑平整度研究中具有优势。
- 3) 通过最小二乘能够较好地拟合平面，得到平面的空间方程，从而计算墙面点平整度，相较于传统计算方法，该方法较高效、简便。

参考文献

- [1] 李杰, 程效军. 三维激光扫描仪在墙面平整度检测中的应用[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 13-17.
- [2] 程效军, 唐剑波. 基于最小二乘拟合的墙面平整度检测方法[J]. 测绘信息与工程, 2007, 32(4): 19-20.
- [3] 陈西江, 章光, 花向红. 于法向量夹角信息熵的点云简化算法[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 336-344.
- [4] 黄飒. 三维激光扫描技术应用于古建筑测绘及其数据处理研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
- [5] 方毛林. 三维激光扫描技术在文物古迹保护中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [6] 邵正伟, 席平. 基于八叉树编码的点云数据精简方法[J]. 工程图学学报, 2010, 31(4): 73-76.
- [7] 黄源, 达飞鹏, 唐林. 基于改进八叉树的三维点云压缩算法[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 141-149.
- [8] 杨书哲. 基于动态阈值与小波变换的三维激光扫描数据去噪[J]. 北京测绘, 2019, 33(7): 843-846.
- [9] 李广, 吴长悦, 冯腾, 等. 基于三维激光扫描技术的建筑物墙面平整度检测[J]. 山西建筑, 2017, 43(11): 204-205.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50210-2001. 中华人民共和国国家标准: 建筑装饰装修工程质量验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [11] 包胜, 谢为时, 叶翔, 等. 基于三维激光扫描技术的墙面平整度评估方法[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(11): 27-31.
- [12] 杨小燕, 陈登峰, 于军琪, 等. 基于点云数据的砼地面平整度可视化方法研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2022(2): 97-101.
- [13] 张杰, 苏毅杰, 吕祺. 基于三维激光原理的桥面混凝土铺装施工技术研究与应用[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(6): 132-134.
- [14] 丁宇翔, 张俊雄, 梁佐练, 等. 激光三角法在土木工程中大平面平整度测量的应用[J]. 轻工科技, 2021, 37(12): 63-65.
- [15] 唐东跃, 肖书安, 周兴华, 等. 三维激光扫描技术在高铁隧道平整度检测中的应用[J]. 测绘通报, 2021(9): 160-164.