

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.03.011

基于激光点云的钢结构几何形态自动评估方法

张子瑜,傅中秋,任浩,张宏成,吉伯海

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098)

摘要:针对传统钢结构几何形态评估效率低、主观性强等问题,提出了一种融合激光点云的钢结构几何形态自动评估方法。该方法基于降噪与聚类经典算法,实现了目标点云数据的自动分割;针对复杂钢结构点云数据难以精细分割的问题,提出了一种基于点云局部空间关系的制造偏差计算方法来检测复杂钢结构点云数据,同时给出了合理的参数配置范围建议;基于点云的局部投影和相互之间的三角拓扑关系,完成了对表面缺陷的自动识别和定量分析,解决了以往视觉检测中定量评估指标缺失的难题。室内试验结果表明,该方法能够有效评估具有复杂结构配置的钢结构几何形态,具有可靠性和实用性。

关键词:装配式钢结构;三维激光扫描;几何形态评估;点云数据

中图分类号:TU997;U443.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2025)03-0087-07

Automatic assessment method for geometric morphology of steel structures based on laser point clouds

ZHANG Ziyu, FU Zhongqiu, REN Hao, ZHANG Hongcheng, JI Bohai

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To address the issues of low efficiency and strong subjectivity in traditional geometric morphology assessment of steel structures, an automated assessment method for geometric morphology of steel structures by incorporating laser point clouds was proposed. Grounded in classical algorithms including denoising and clustering techniques, the proposed method achieved automatic segmentation of target point cloud data. To overcome limitations in precise segmentation of point clouds data of complex steel structure, a manufacturing deviation calculation method based on local spatial relationships of point clouds was developed, which was then applied to detect point cloud data of complex steel structure while providing recommended parameter configuration ranges. Through local projection analysis and triangular mesh topological relationship evaluation, the method completed the automatic surface defect identification and quantitative analysis, resolving the long-standing challenge of quantitative metric deficiency in visual inspections. Laboratory results demonstrate that the proposed method effectively evaluates geometric morphologies of steel structures with complex configurations, verifying its reliability and practical utility.

Key words: assembled steel structure; 3D laser scanning; geometric morphology assessment; point cloud data

相比现浇结构,装配式钢结构采用工厂生产、现场组装施工的方式,具有工业化程度高、绿色环保、施工周期短等优势^[1-3],已广泛应用于厂房及桥梁等大型建筑。然而,预制钢结构通常由众多部件组成,其整体配置更加复杂,受切割设备系统误差及焊接变形等影响,在生产环节中容易产生制造偏差^[4];而在运输与现场存放环节,由于车辆振动、结构意外碰撞等因素,其结构表面还易造成表面缺陷损伤。整体制造偏差会增加现场安装难度,有可能导致相邻钢段的连接截面匹配失效甚至返厂重修^[5-6]。表面缺陷则会引起局部应力集中,导致结构产生裂纹,影响其使用寿命^[7]。因此,为确保装配式钢结构的施工质量,施工前对预制钢节段开展几何形态评估尤为重要。

传统的几何形态评估采用钢尺、全站仪等设备定位结构的关键点坐标,通过计算关键点的空间关系来评

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52378153)

作者简介:张子瑜(2002—),男,硕士研究生,主要从事钢结构数字检测研究。E-mail:zhangziyu20010916@163.com

通信作者:傅中秋(1983—),男,教授,博士,主要从事钢桥疲劳与智能建造研究。E-mail:fuzhongqiu@hhu.edu.cn

引用本文:张子瑜,傅中秋,任浩,等.基于激光点云的钢结构几何形态自动评估方法[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):87-93.

ZHANG Ziyu, FU Zhongqiu, REN Hao, et al. Automatic assessment method for geometric morphology of steel structures based on laser point clouds[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(3): 87-93.

估目标结构的几何形态。由于空间关系复杂、关键点较多,依靠人工难以全面且快速完成大型复杂钢结构的几何形态评估^[8]。此外,人工评估具有较强的主观性,会影响关键点的定位准确性且无法保证扫描信息的完整获取。

陆地激光扫描仪利用激光测距原理获取结构表面的几何信息(点云数据),结合计算机处理可实现目标结构的三维场景重现^[9-10]。陆地激光扫描利用激光反射开展大规模信息采集,能避免人工评估的主观性误差,同时还能全天候自动化测量,非常适合大型工业化结构的几何形态评估。Kim 等^[11]提出了基于激光点云的预制混凝土板几何形态评估方法,该方法利用点云数据投影获取边界点与角点的平面位置,并基于相对位置关系评估混凝土板的几何形态;周绪红等^[12-13]也提出了相似方法。但上述方法依赖预定义的几何关系处理数据,无法解决复杂结构的投影重叠问题,故仅适用于简易单层构件。Liu 等^[14]利用目标构件点云数据与标准点云模型(根据设计尺寸生成的点云模型)中的两点最短距离表征制造偏差,但由于点云的随机分布,该方法通常导致评估结果偏大。总体而言,目前还没有不受构件构造限制且能准确评估几何形态的方法。此外,当前表面缺陷多采用图像识别进行评估^[15],但图像识别需要大量训练样本,且依赖人工标定尺寸。

本文提出了一种基于激光点云的钢结构几何形态自动评估方法,可对复杂结构配置的钢结构开展精确评估,且能自动识别表面缺陷并定量分析影响范围。有效性试验结果表明,提出的评估方法可对复杂结构配置的钢结构几何形态开展精确评估,且能自动识别表面缺陷并定量分析影响范围。

1 试验方法

1.1 数据采集原理

陆地激光扫描仪拥有非接触式主动测量系统,基于激光测距原理获取物体表面的几何信息,可以对构件开展全方位的激光扫描。陆地激光扫描技术利用高速激光束扫描目标物体,通过精确测量激光束反射回来的时间或相位变化,计算出物体表面的几何形态。由于激光扫描的非接触性,在有干扰物的情况下陆地激光扫描仪也能完成高精度测量,10 m 范围内的测距精度可达 0.2 mm,极大地提高了测量的安全性和便捷性。陆地激光扫描技术具有测量精度高、效率高、受外界环境影响小等优点^[16-17],可广泛应用于工程测量、建筑保护、地质监测等领域。

由于激光的直线传播,现场测量时一站激光扫描仅能获取位于当前视角的点云数据。为获取被测目标表面的完整几何信息,通常采用多站式扫描方式^[18],即从不同角度对结构进行扫描,并通过设置扫描标靶配准统一各站数据的坐标系进行三维重构来获取完整的被测目标几何信息。

1.2 试件设计

钢结构主要包括顶板、底板、腹板、横隔板等部件。为避免局部屈曲失稳,通常布置加劲肋改善局部受力情况,但由此也导致局部构造变得复杂。为控制结构自重,钢结构通常使用不同板厚的钢板制造。本文采用的钢结构试件如图 1 所示,包括顶板、底板、腹板、横隔板、翼缘板、加劲肋等典型部件,并采用不同板厚的钢板焊接制造。其中,顶板、底板、腹板、翼缘板的厚度为 15 mm,横隔板及加劲肋的厚度为 10 mm。试件横隔板预留 4 个孔洞,其中下面 2 个用于模拟表面缺陷,上面 2 个用于对比。使用陶泥模拟凸起、凹陷两种典型钢结构缺陷损伤,并分别装配于横隔板下面预留孔中。试件表面使用反差增强剂喷涂,在提高激光表面反光率的基础上,模拟实际生产过程中的喷漆防腐工艺。该缩尺试件具有与钢结构相似的局部构造特征,能够近似反映装配式钢结构的实际情况。

1.3 现场扫描

为降低天气及外界光源对扫描试验的影响,现场扫描在室内进行,如图 2 所示。使用支撑物将试件垫高,既能保证对试件底板进行完整的扫描,又能模拟钢结构在工厂的真实储存状态。在试件四周放置 4 个用

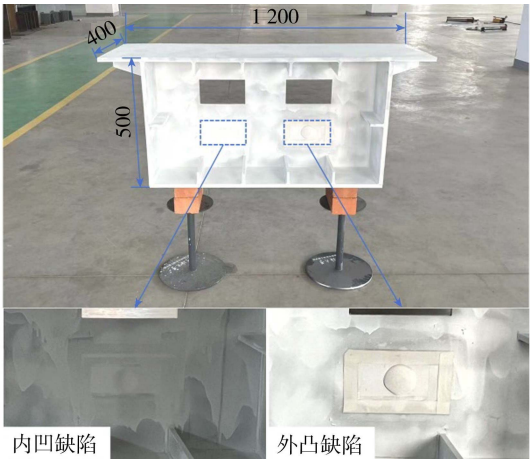


图 1 钢结构试件(单位:mm)

Fig. 1 Specimen of steel structure (unit: mm)

于配准的扫描标靶,扫描标靶采用配准精度高、扫描效果好的球形标靶(标靶球)。角分辨率影响陆地激光扫描仪的激光束发射夹角,为充分捕捉试件的几何形态,将扫描仪的角分辨率设置为 0.0036° 。为确保数据采集的完整性,采用 6 站式扫描,分别架设于试件正前方、正后方和两侧,每站扫描距离为 3 m。其中试件正前方和正后方各架设一站,采集试件顶底板上侧和腹板两侧的几何信息;其余 4 站架设于试件两侧,采集顶底板下侧及加劲肋的几何信息。试验期间试件和标靶球的位置保持固定不动,避免配准拼接误差过大导致点云数据重叠、分层。图 3 为三维激光扫描全景视图。

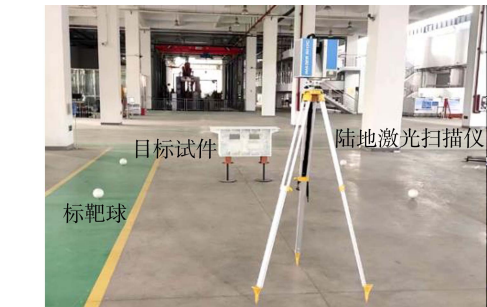


图 2 现场激光扫描
Fig. 2 On-site laser scanning

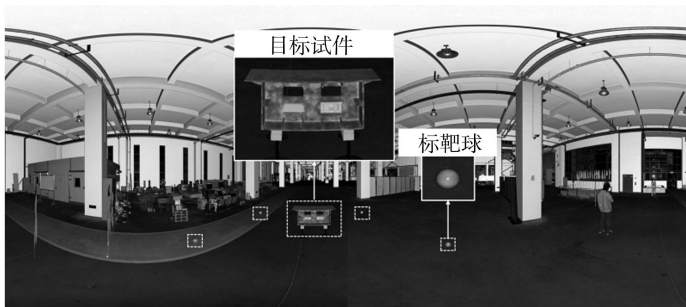


图 3 三维激光扫描全景视图
Fig. 3 Panoramic view of a 3D laser scanning

2 几何形态评估

基于三维激光扫描获得扫描场景激光点云的钢结构几何形态评估方法包括降噪与分割、偏差计算和缺陷评估等 3 个环节:①降噪与分割环节利用点云数据的空间关系,通过降噪与聚类算法实现目标点云数据与初始点云数据的自动分割;②偏差计算环节利用获得的目标点云数据计算试件的制造偏差;③在缺陷评估环节根据缺陷点云的几何特征对试件的表面缺陷进行自动识别和定量分析。该评估方法可确定试件的制造质量,并获取表面缺陷的基本信息。

2.1 降噪与分割

试件的初始点云数据如图 4 所示(红色点为噪点),包括试件、干扰物、地面及支撑物等的点云数据。受扫描环境中灰尘、振动等因素及混合像素效应的影响,初始点云数据中不可避免地存在噪点,可采用半径滤波算法去除。半径滤波算法通过逐点计算初始点云中各点邻域内的点云数量快速去除噪点,并可通过调整搜索邻域范围及距离阈值来提高滤波质量^[19]。



图 4 初始点云与降噪后点云对比
Fig. 4 Comparison of initial point clouds and denoised point clouds

地面点云通常呈现典型的平面特征,可采用 RANSAC 算法通过拟合最大平面点云移除地面点云。实际扫描时地面通常为最大平面,通过增加 RANSAC 算法的迭代次数可以保证地面点云的滤波效果^[20]。去除地面点云后剩余点云数据包含试件与其他物体。因物体之间存在间距,各点云集合呈现出明显的聚类特征。DBSCAN 聚类算法可通过比较点云间的马式距离,将特征相近的点云进行聚类^[21-22],从而能够有效提取试件的点云集合,如图 5 所示。DBSCAN 聚类算法计算原理简单、效率高,在处理具有明显聚类特征的点云数据时具有显著的优势。由于采用多站式扫描,试件的点云密度远大于其他点云集合,通过调整最小聚类密度可有效提高 DBSCAN 聚类算法的准确性。

支撑物与试件是直接接触的,无法通过降噪及聚类等方法直接剔除支撑物的点云。本文采用标准点云模型剔除支撑物的点云,标准点云模型的构建方法^[23]如下:先消除标准实体模型内部实体填充并转换为表

面模型,然后对表面模型进行单位网格划分,将实体模型转化为网格模型,最后根据点云数据设计密度在单位网格中生成三维散点,得到标准点云模型。具体操作为:使用 SolidWorks 建立标准实体模型,然后使用 CloudCompare 软件将标准实体模型转化为标准点云模型。使用迭代最近点算法可将试件的点云数据与标准点云模型进行配准^[24]。配准完成后通过比较两者间的空间特征差异即可分割支撑物点云,得到完整的目标点云数据,如图 6 所示。

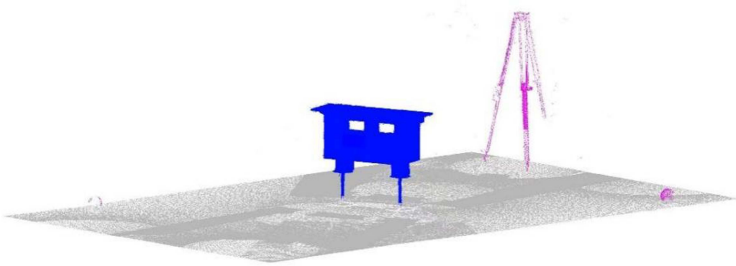


图 5 试件点云数据的提取
Fig. 5 Extraction of point cloud data of specimen

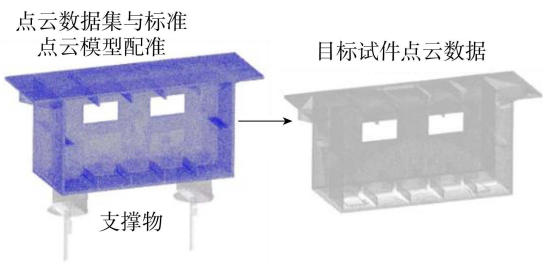


图 6 点云数据与标准点云模型分割
Fig. 6 Point cloud data and segmentation of standard point cloud model

2.2 偏差计算

2.2.1 尺寸偏差

试件的制造偏差包括试件的尺寸偏差和方向偏差。针对钢结构的点云数据,由于局部构造复杂,钢结构构件长度和宽度远大于厚度,因此在钢结构点云数据的精细化分割中,容易忽略沿厚度方向的点云数据,无法满足几何形态评估的需求。为此,本文利用标准点云模型表征试件的理想设计尺寸,提出一种基于局部点云的钢结构尺寸偏差计算方法,其计算步骤如下:①如图 7 所示,从配准后的目标点云数据中选择一点 P ,在标准点云模型中搜索与点 P 欧式距离最近的一点 D ;②以点 D 为中心,提取标准点云模型中半径 r_p 范围内的全部点云,定义为集合 A ,并使用最小二乘法将集合 A 中点云数据拟合为局部平面;③计算点 P 到该局部平面的垂直距离 d_l ,由 d_l 即可确定试件在该位置的尺寸偏差;④遍历目标点云数据,得到完整的尺寸偏差结果。尺寸偏差计算原理如图 7 所示。

为确保点云平面拟合的合理性, r_p 应小于试件的最小厚度。本文制造偏差计算方法基于局部点云的空间关系计算尺寸偏差,避免了目标点云数据的精细化分割,能够适用于不同的结构形式。但该方法在计算角点与边界点的尺寸偏差时,容易因平面过拟合导致计算结果偏大(图 8),因此采用目标点到标准点云模型中角点的最短欧式距离(点 P 到点 D)表征该位置的尺寸偏差。由于角点与边界点存在多平面相交,其点云呈现明显的凸起特征,因此点到点的最短距离更能准确反映目标构件在该位置的真实情况。

本文尺寸偏差计算方法利用目标点云数据到标准点云模型的相对距离表征尺寸偏差,而表面缺陷可由不同高度的点云表示,因此也可用于计算表面缺陷的尺寸偏差。

2.2.2 方向偏差

当目标点云数据位于标准点云模型对应表面之外时,表明试件在该位置凸起,反之则为凹陷。因此可利用局部点云的空间关系判断试件的偏差方向,具体步骤如下:①如图 9 所示,从配准后的目标点云数据中选择一点 P ,在标准点云模型中搜索与其欧式距离最近的一点 D ;②以点 D 为中心,提取标准点云模型中半径 r_p 范围内的点云拟合成局部平面;③将点 P 投影到局部平面获得投影点 V ,以点 V 为原点,沿 VP 方向在距离 L_y 处得到延长点 E ;④在标准点云模型中以点 E 为中心,以 r_s 为半径进行搜索,若搜索范围内未发现标准点

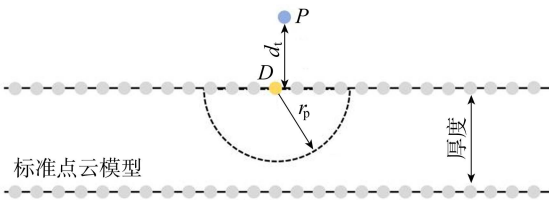


图 7 尺寸偏差计算原理
Fig. 7 Principle of dimensional deviation calculation

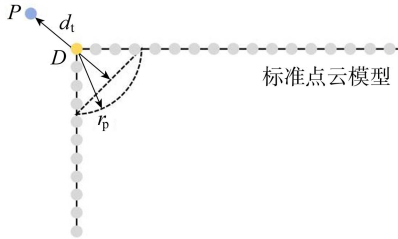


图 8 角点处尺寸偏差
Fig. 8 Dimensional deviation at corner

云模型中的点,则判定点 P 在对应平面外侧,反之在内侧;⑤遍历目标点云数据,得到完整的方向偏差结果。

延长距离 L_y 与搜索半径 r_s 是判断偏差方向的关键参数, L_y 设置过大会导致延长点 E 超出标准点云模型的对应平面,过小则会影响搜索结果,本文设置为 $0.5H_{\max} < L_y < H_{\max}$ ($H_{\max}$ 为试件的最大厚度)。另一方面,计算凸起点的方向偏差时,需保证与点 E 距离 r_s 范围内无标准点云模型的数据 ($r_s < L_y$),同时为确保搜索效率,需 $r_s > 0.5H_{\max}$,即搜索半径需满足条件 $0.5H_{\max} < r_s < L_y$ 。同理计算凹陷点的方向偏差时,应确保 $r_s + L_y > H_{\max}$ 。此外,由于试件的厚度不同,为合理计算薄板凹陷点的方向偏差,还应保证 $r_s + H_{\min} > L_y$ ($H_{\min}$ 为试件的最小厚度)。在计算角点与边界点的方向偏差时,应限制 r_s 与点 P 、 E 间的空间关系,保证点 P 、 E 间距离小于 r_s 。

2.2.3 偏差结果与分析

基于提出的制造偏差计算方法,使用 C++语言编写计算程序,得到试件的制造偏差计算结果如图 10 所示。由图 10 可见,试件的整体制造质量较好,顶板、底板、腹板、横隔板等部件均无明显制造偏差(约在 $\pm 2\text{ mm}$ 内)。除预制缺陷外,仅翼缘板下侧加劲肋存在偏差,这是焊接控制不当导致此加劲肋与试件主体发生相对倾斜导致的,与试件的真实状态一致。本文制造偏差计算方法对凸起和凹陷两种典型表面缺陷进行了有效的判断,精准计算出缺陷的形态、尺寸偏差和方向偏差。总体而言,计算结果与试件的真实几何形态一致,相较于传统人工形态评估,本文制造偏差计算方法通过逐点计算点云数据得到试件的制造偏差,评估范围更全面。

基于获得的制造偏差计算结果可得到试件的制造偏差曲线和制造偏差概率分布,结果如图 11 所示。由图 11 可知,试件的平均制造偏差为 1.12 mm ,且 95%的制造偏差在 $\pm 2\text{ mm}$ 范围内,这些指标可为几何形态评估提供定量参考。

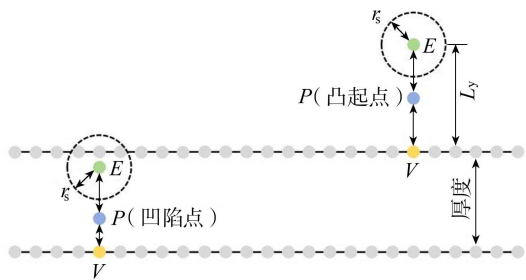


图 9 方向偏差计算原理
Fig. 9 Principle of orientational deviation calculation

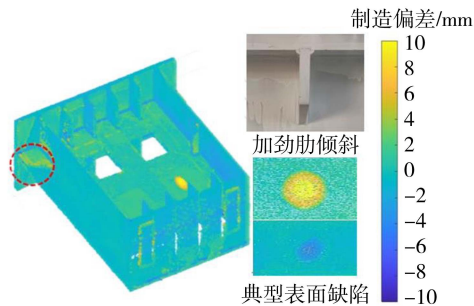


图 10 制造偏差计算结果
Fig. 10 Calculation results of manufacturing deviation

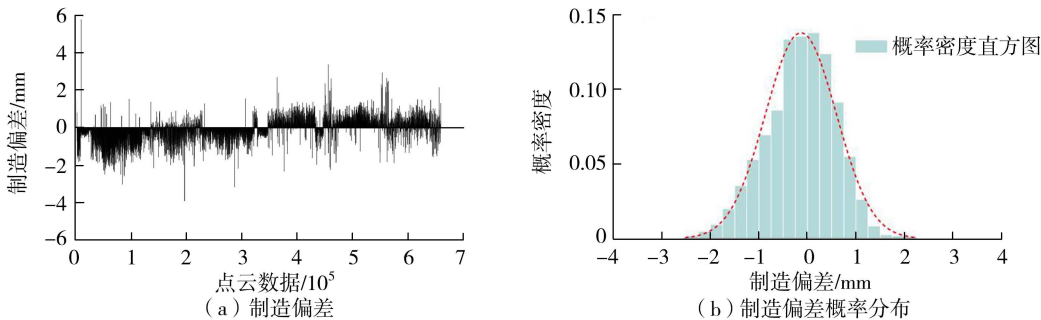


图 11 制造偏差统计结果
Fig. 11 Statistics of manufacturing deviation

2.3 缺陷评估

利用获得的目标点云数据可进一步识别结构中的表面缺陷,从而对试件缺陷进行评估。表面缺陷可定义为结构中制造偏差超出容许公差的范围,因此通过比较计算得到的制造偏差与容许公差,即可得到表面缺陷的点云数据。实际工程中,各表面缺陷之间通常存在一定的距离,缺陷的点云将呈现高度的聚类特征,通过区域生长算法可对各缺陷点云进行分类。统计分类后的缺陷点云制造偏差结果可得到缺陷的最大偏差,统计方向偏差结果可判断缺陷形态。当方向偏差均为正时,缺陷形态为凸起,反之为凹陷。本文以 5 mm 为容许公差。由于凹陷缺陷偏差结果整体小于设定公差,因此在识别过程中被忽略,凸起缺陷的最大偏差为 10.17 mm ,而现场实测凸起、凹陷缺陷的最大偏差分别为 4.69 mm 和 10.00 mm ,与评估结果一致。

为定量评估表面缺陷的影响,根据试件的点云数据集与标准点云模型配准后坐标系一致的关系,可将缺陷点云从三维空间投影至二维平面计算其影响面积。投影时应确保缺陷点云沿其厚度方向投影,以保持缺陷的合理形态。如图 12 所示,投影面积计算方法如下:①先搜索缺陷点云中的最大偏差点 P ,并搜索标准点云模型中与点 P 距离最近的一点 D ;②以点 D 为中心,将标准点云模型在半径 r_s 范围内的点云拟合成局部平面,并将点 P 投影到该平面获得点 V ;③采用贪婪投影算法^[25]构建缺陷点云间的三角拓扑关系^[26]得到三角形区域,将所有三角形区域面积相加得到表面缺陷的影响面积,如图 12(b)所示。

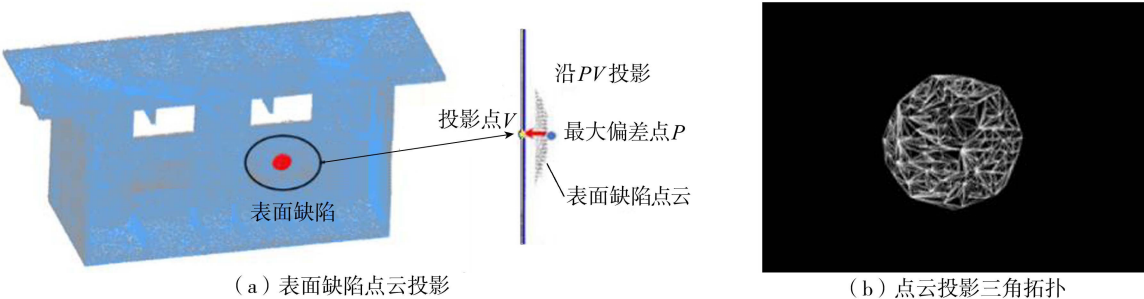


图 12 表面缺陷影响面积计算
Fig. 12 Calculation of area affected by surface defects

3 结 语

针对传统人工检测无法全面、快速完成复杂钢结构几何形态评估的问题,提出了基于激光点云的钢结构几何形态自动评估方法。通过引入标准点云模型,集成半径滤波算法、RANSAC 算法、DBSCAN 聚类算法及迭代最近点算法,建立初始点云数据的自动降噪与分割流程,实现了目标点云数据与初始点云数据的自动分割;针对具有复杂配置的装配式钢结构,提出了利用点云数据局部空间关系计算制造偏差的方法,该方法适用于不同结构形式,可有效判断缺陷形态、偏差程度等关键参数;基于点云数据的空间关系识别表面缺陷,结合三角拓扑进行网格曲面重构,进而计算影响面积,形成了完整的缺陷评估方法体系,可用于复杂结构配置的钢结构几何形态评估。

参考文献:

[1] DONG Junyan,ZHANG Tiantian,FU Yupi,et al. Study on connection and properties of green assembled building steel structures [J]. Results in Physics,2019,12:1126-1132.

[2] 刘泾堂,王迎超,邱成虎,等. 公路隧道装配式仰拱结构形式优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):55-64. (LIU Jingtang,WANG Yingchao,QIU Chenghu,et al. Optimal design of prefabricated inverted arch structure for highway tunnels[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4):55-64. (in Chinese))

[3] 樊禹江,葛俊,艾斌平,等. 新型装配式剪力墙恢复力模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):130-137. (FAN Yujiang,GE Jun,AI Binping,et al. Restoring force model of new prefabricated shear walls[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(2):130-137. (in Chinese))

[4] 齐宏拓,刘界鹏,程国忠,等. 基于点云数据的大型复杂钢结构智能化施工方法[J]. 土木工程学报,2024,57(1):65-75. (QI Hongtuo,LIU Jiepeng,CHENG Guozhong,et al. Intelligent construction of large and complex steel structure based on point cloud data[J]. China Civil Engineering Journal,2024,57(1):65-75. (in Chinese))

[5] LI Huijun,TANIGUCHI Y. Load-carrying capacity of semi-rigid double-layer grid structures with initial crookedness of member [J]. Engineering Structures,2019,184:421-433.

[6] 邢松,蒋树勤,陈鹏. 检修车轨道位置对钢箱梁涡振特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):56-60. (XING Song,JIANG Shuqin,CHEN Peng. Influence of maintenance track position on vortex vibration characteristics of steel box girder[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(4):56-60. (in Chinese))

[7] TIAN Rushuai,JIA Minping. DCC-CenterNet:a rapid detection method for steel surface defects[J]. Measurement,2022,187:110211.

[8] 诸宏博,谢忠,傅林峰. 三维激光扫描技术在钢结构检测技术中的应用研究[J]. 建筑结构,2023,53(增刊2):1739-1743. (ZHU Hongbo,XIE Zhong,FU Linfeng. Research on the application of three-dimensional laser scanning technology in steel structure inspection technology[J]. Building Structure,2023,53(Sup2):1739-1743. (in Chinese))

[9] 邓宇彤,李峰,周思齐,等. 基于车载点云数据的城市道路特征目标提取与三维重构[J]. 北京工业大学学报,2024,50(4):498-507. (DENG Yutong,LI Feng,ZHOU Siqi,et al. Characteristic object extraction and 3D reconstruction of urban road based on vehicle point cloud data[J]. Journal of Beijing University of Technology,2024,50(4):498-507. (in Chinese))

[10] 刘界鹏,崔娜,周绪红,等. 基于三维激光扫描的房屋尺寸质量智能化检测方法[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(4):71-80. (LIU Jiepeng,CUI Na,ZHOU Xuhong,et al. Intelligent inspection method for dimensional quality of houses based on 3D laser scanning[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2022,39(4):71-80. (in Chinese))

[11] KIM M K,CHENG J C P,SOHN H,et al. A framework for dimensional and surface quality assessment of precast concrete elements using BIM and 3D laser scanning[J]. Automation in Construction,2015,49:225-238.

[12] 周绪红,刘界鹏,程国忠,等. 基于点云数据的大型复杂钢拱桥智能虚拟预拼装方法[J]. 中国公路学报,2021,34(11):1-9. (ZHOU Xuhong,LIU Jiepeng,CHENG Guozhong,et al. Intelligent virtual trial assembly of large and complex steel arch bridges based on point cloud data [J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(11):1-9. (in Chinese))

[13] ZHAO Weijian,JIANG Yu,LIU Yunyi,et al. Automated recognition and measurement based on three-dimensional point clouds to connect precast concrete components[J]. Automation in Construction,2022,133:104000.

[14] LIU Jiepeng,LI Dongsheng,FENG Liang,et al. Towards automatic segmentation and recognition of multiple precast concrete elements in outdoor laser scan data[J]. Remote Sensing,2019,11(11):1383.

[15] GAO Tian,YUANZHOU Zhiyuan,JI Bohai,et al. Vision-based fatigue crack automatic perception and geometric updating of finite element model for welded joint in steel structures[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,2024,39(11):1659-1675.

[16] 杨必胜,梁福逊,黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. 测绘学报,2017,46(10):1509-1516. (YANG Bisheng,LIANG Fuxun,HUANG Ronggang. Progress,challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2017,46(10):1509-1516. (in Chinese))

[17] 龙玺,钟约先,李仁举,等. 结构光三维扫描测量的三维拼接技术[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002,42(4):477-480. (LOMG Xi,ZHONG Yuexian,LI Renju,et al. 3-D surface integration in structured light 3-D scanning [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology),2002,42(4):477-480. (in Chinese))

[18] 盛业华,张卡,张凯,等. 地面三维激光扫描点云的多站数据无缝拼接[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(2):233-237. (SHENG Yehua,ZHANG Ka,ZHANG Kai,et al. Seamless multi station merging of terrestrial laser scanned 3D point clouds[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2010,39(2):233-237. (in Chinese))

[19] 焦晨,王宝锋,易耀华. 点云数据滤波算法研究[J]. 国外电子测量技术,2019,38(11):18-22. (JIAO Chen,WANG Baofeng,YI Yaohua. Research on point cloud data filtering algorithms[J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2019,38(11):18-22. (in Chinese))

[20] YANG Lina,LI Yuchen,LI Xichun,et al. Efficient plane extraction using normal estimation and RANSAC from 3D point cloud [J]. Computer Standards & Interfaces,2022,82:103608.

[21] 曲金博,王岩,赵琪. DBSCAN 聚类和改进的双边滤波算法在点云去噪中的应用[J]. 测绘通报,2019(11):89-92. (QU Jinbo,WANG Yan,ZHAO Qi. Application of DBSCAN clustering and improved bilateral filtering algorithm in point cloud denoising[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2019(11):89-92. (in Chinese))

[22] 付永健,李宗春,何华. 应用马氏距离加权的点云法向处理算法[J]. 测绘科学技术学报,2018,35(4):349-354. (FU Yongjian,LI Zongchun,HE Hua. A new Mahalanobis distance weighted point clouds normal vectors processing algorithm[J]. Journal of Geomatics Science and Technology,2018,35(4):349-354. (in Chinese))

[23] LI Dongsheng,LIU Jiepeng,FENG Liang,et al. Automatic modeling of prefabricated components with laser-scanned data for virtual trial assembly[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,2021,36(4):453-471.

[24] 廖岳,李汉涛,刘界鹏,等. 基于点云数据和启发式算法的复杂龙骨-面板结构智能数字化施工方法[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文). 2024:1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20240125.1826.002.html>. (LIAO Yue,LI Hantao,LIU Jiepeng,et al. Intelligent digital construction for complex frame-panel structures based on point cloud data and heuristic algorithms[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering. 2024:1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20240125.1826.002.html>. (in Chinese))

[25] LIU Qiang,LIN Ling. Engineering surveying and mapping system based on 3D point cloud and registration communication algorithm[J]. Wireless Communications and Mobile Computing,2022,2022:4579565. (DOI:10.1155/2022/4579565)

[26] 孔德武. 点云数据的三角剖分及计算机三维重建[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2019,44(7):87-92. (KONG Dewu. Triangulation and computer three-dimensional reconstruction of point cloud data[J]. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition),2019,44(7):87-92. (in Chinese))