

DOI: 10.7672/sjgs2025150142

基于三维激光扫描的馆藏文物减振加固技术研究*

王清朋¹, 张安东¹, 桑文刚², 侯宏涛³, 徐 阳⁴, 韩志国³, 范润祥¹

(1. 山东建大工程鉴定加固设计有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东建筑大学测绘地理信息学院, 山东 济南 250101; 3. 山东建筑大学工程鉴定加固研究院有限公司, 山东 济南 250014; 4. 山东建固特种专业工程有限公司, 山东 济南 250014)

[摘要] 某博物馆馆藏佛像受邻近工程建设产生的施工振动影响,可能造成不可逆的损伤,需实现文物信息数字化采集,以采取有效的减振加固措施。设计合理的减振设计方案与施工流程,采用三维激光扫描技术对佛像进行测绘,通过构建 Delaunay 三角网格模型及纹理映射,实现真实丰富的佛像三维可视化。采用 Canny 算法边缘检测与人工判读相结合的方法绘制佛像立面图,为防倾覆骨架网设计与施工提供基础信息。基于点云数据,运用点云切片法计算佛像质量,并与 PLC 系统称重值进行对比;运用数值积分法计算佛像重心坐标,并与 Geomagic 软件计算结果进行对比。研究表明,基于三维激光扫描技术得到的佛像质量和重心坐标计算误差在允许范围内,为馆藏文物减振设计与施工提供了较准确可靠的基础数据。

[关键词] 文物;三维激光扫描;减振;加固;质量;重心

[中图分类号] TU198

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)15-0142-06

Research on Vibration Reduction and Reinforcement Technology for Cultural Relic Based on 3D Laser Scanning

WANG Qingpeng¹, ZHANG Andong¹, SANG Wengang², HOU Hongtao³, XU Yang⁴,
HAN Zhiguo³, FAN Runxiang¹(1. Shandong Jianzhu University Engineering Appraisal and Strengthening Design Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China;
2. School of Surveying and Geo-informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China;
3. Engineering Research Institute of Appraisal and Strengthening of Shandong Jianzhu University Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China; 4. Shandong Jiangu Special Engineering Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: The Buddha statues in a museum may cause irreversible damage due to the construction vibration caused by the adjacent project. It is necessary to realize the digital collection of cultural relics information to take effective vibration reduction and reinforcement measures. A reasonable vibration reduction design scheme and construction process are designed. The 3D laser scanning technology is used to map the Buddha statues. By constructing Delaunay triangular mesh models and texture mapping, the real and rich 3D visualization of the Buddha statues is realized. The combination of Canny algorithm edge detection and manual interpretation is used to draw the facade of the Buddha statues, which provides basic information for the design and construction of the anti-overturning framework. Based on the point cloud data, the weight of the Buddha statues is calculated by the point cloud slicing method and compared with the weighing value of the PLC system. The numerical integration method is used to calculate the barycenter coordinates of the Buddha statues and compared with the calculation results of Geomagic software. The research results show that the calculation errors of the weight and barycenter coordinates of the Buddha statues obtained based on the 3D laser scanning technology are within the allowable range, which provides more accurate and reliable basic data for the vibration reduction design

* 国家自然科学基金面上项目(42374049);山东省自然科学基金面上项目(ZR2022MD103);山东省重点研发计划(2019GSF111052)

[作者简介] 王清朋,高级工程师,E-mail:wangqp2007@163.com

[通信作者] 张安东,硕士研究生,E-mail:1066809384@qq.com

[收稿日期] 2025-05-05

and construction of the cultural relics.

Keywords: cultural relics; 3D laser scanning; vibration reduction; reinforcement; weight; barycenter

0 引言

石质文物承载着古代人类思想、科学、文化与艺术等重要信息,是认识古代社会物质文明和精神文明的珍贵物质,具有艺术、历史和科学研究价值。由于石质文物材质的多样性和所处环境的复杂性,其保存受多种自然和人为因素的威胁,因具有不可再生的特性,一旦损坏或丢失,如果没有完整的数字化信息,修复或还原较困难。因此,实现石质文物几何形态、纹理与材质、虚拟修复等信息的数字化已成为目前文化遗产保护领域研究热点之一。

与以往人工拍照、文字描述及接触式测量等传统采集模式不同,三维激光扫描、数字摄影测量、CT扫描等数字化技术可快速、高效、无损采集文物海量信息,通过构建真实三维模型,实现文物高保真数字化存档。目前,三维激光扫描技术在文物保护领域的研究主要集中在文物三维建模精度、表面纹理等方面。在文物保护项目中,不仅需要建立高保真的三维模型,还需要准确分析文物体积、质量、重心坐标等几何与物理信息。近年来,随着城市更新改造进程的加快,施工振动对文物造成的影响不容忽视。目前针对三维激光扫描技术在文物减振加固领域的应用研究相对较少。

为充分利用三维激光扫描技术获取的高精度点云数据,发挥该技术在文物保护领域中的优势,本文以博物馆馆藏石质文物减振加固工程为例,对馆内石质佛像进行三维激光扫描测绘,并构建真实三维模型,计算分析佛像体积、重心等重要几何与物理信息,为减振加固设计与施工提供基础数据参考,并通过实际施工参数验证了计算结果精度及可靠性。

1 工程概况

某博物馆内2座石质佛像均高约6.0m,建造于北魏时期,佛身及莲花座均采用天然石材雕刻而成,经过千年历史的洗礼和数次搬运,已出现大量破损。近年来,文保人员对佛像损伤部位采用修补及注浆的方法进行修复。计划在博物馆旁新建场馆,新馆距离佛像约35.0m,在新馆基坑土方开挖及基础施工期间会产生大量的振动,直接延伸至佛像底部。此类振动来源复杂、持续时间较长、频段覆盖较宽、幅域跨度较大,会对既有博物馆内的重要文物造成不可逆的危害,尤其会对有残损且无减振措施的大型石质佛像造成较大的危害。为减轻施

工振动的影响,通过设置减振装置对佛像予以保护。

2 减振设计原理

减振设计主要分为主动减振与被动减振,其中,主动减振是利用控制系统产生反向振动信号,以抵消或减小原始振动;被动减振是通过设置减振器将机械等振源进行隔离,不使振动外传给周围环境,从而保护减振对象。本项目采用被动减振,即将场馆外爆破施工、机械运转等引起的振动通过布置在佛像底座下的减振器消减,使保护对象免受周边环境的影响,如图1所示。

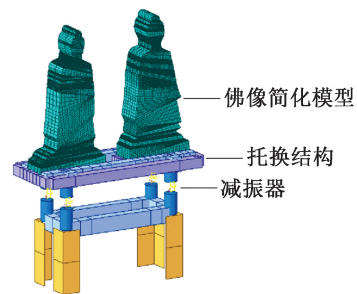


图1 减振器布置

Fig.1 Antivibrator arrangement

减振系统减振效果通过传递率 V 表示,传递率越小减振效果越好,其计算公式为:

$$V = \sqrt{\frac{1 + 4D^2\eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} \quad (1)$$

式中: η 为调谐比; D 为阻尼比。

由式(1)可知,传递率与调谐比的关系较大,当 $\eta > \sqrt{2}$ 时,调谐比越大,减振效果越好。进行减振设计时,调整减振对象及阻尼器刚度、质量,平衡频率比和阻尼比,均需明确减振对象体积、质量、重心坐标等信息。

3 减振系统施工

将佛像置于博物馆地下室顶板,底部由 $\phi 500$ 钢筋混凝土柱及 $400\text{mm} \times 600\text{mm}$ 混凝土梁支撑。减振系统施工时,首先安装卸载支撑系统,采用PLC多点同步液压控制系统控制顶撑托换,将原支撑混凝土柱进行完全卸载,然后静力切断佛像底座周边楼板及减振支座安装位置的支撑柱,并加固支座下部结构;最后将减振支座安装到支撑柱内,并进行柱加大截面施工、封边梁施工、楼板恢复与卸载系统拆除。

4 三维激光扫描测绘

对于质量大且呈非规则形态的石质文物,采用

传统测量手段进行轮廓尺寸、重心坐标等信息采集不仅工作效率和测量精度低,且难以满足减振设计需求。为提供准确的减振设计和施工所需基础数据,采用 FARO Laser Scanner Focus 3D X330 型三维激光扫描仪对佛像进行扫描测绘,作业流程如图 2 所示。仪器测距误差为 $\pm 2\text{mm}$,角度分辨率为 0.009° ,图像采集分辨率为 7 000 万像素。点云数据处理及数据分析采用的软件包括 SCENE, Geomagic, 3D MAX 等。

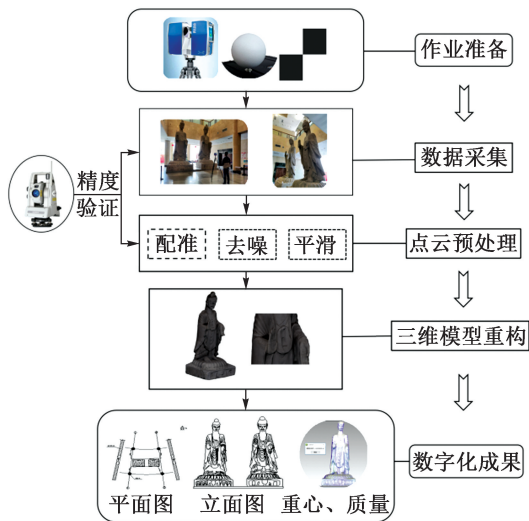


图 2 三维激光扫描作业流程

Fig. 2 Workflow of 3D laser scanning

4.1 点云数据采集

扫描工作开展前对被测物体及其周边环境进行调查,在利用 1 个测站无法获取完整物体信息的情况下,可架设多个测站进行扫描。相邻站点扫描重合区域面积 $\geq 40\%$,便于后期点云数据的配准。

本次扫描在佛像四周地面及博物馆 2 层楼面分别架设测站 1~6, 7~10 进行彩色扫描,扫描分辨率设置为 1/4,扫描质量参数为 3X,每个测站扫描时间约 22min。在测站间不同高度位置处均匀摆放 3, 4 个标靶球,并保证标靶球在空间上不在 1 条直线上,扫描测站平面分布如图 3 所示。

4.2 点云精度验证

将扫描点云数据导入 SCENE 软件,删除各测站数据中与扫描对象无关的点云,初步得到轻量化的点云数据。为得到佛像完整三维模型,需将不同测站扫描数据统一到相同坐标系下。本工程在相邻扫描区域设置同名控制标靶球,通过对标靶球三维空间坐标进行转换,实现测站点云拼接。SCENE 软件可自动识别标靶球,并对识别的标靶球进行重命名编号,采用基于目标的方式进行点云拼接。

为验证点云精度,采用全站仪无棱镜模式精准

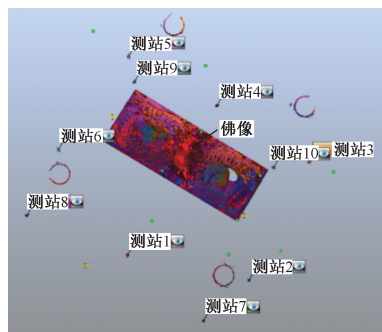


图 3 扫描测站平面分布

Fig. 3 Scanning stations plane distribution

测量多组墙角点、地板角点等特征点间距,并与相应地物扫描点云间距进行对比,结果如表 1 所示。由表 1 可知,2 种测量方式特征点间距相差 0.4~2.5mm,扫描点云间距中误差 1.59mm,根据 CH/Z 3017—2015《地面三维激光扫描作业技术规程》的规定,本工程扫描点云精度达到一等点云精度要求,证明了激光扫描测量数据的精确性,展现了三维激光扫描技术在文物测绘方面的高精度特点。

表 1 点云精度验证

Table 1 Verification of point cloud accuracy

检验部位	仪器测量间距/m	扫描点云间距/m	差值/mm	
墙角点	1	3.207 8	3.208 4	0.6
	2	6.413 4	6.412 2	-1.2
	3	8.010 3	8.012 7	2.4
地板角点	1	4.217 7	4.218 1	0.4
	2	8.659 8	8.658 5	-1.3
	3	11.056 2	11.053 7	-2.5

5 工程应用

5.1 高保真模型构建

三维模型立体直观,描述精准,尤其对于外表呈非规则几何形状的文物保护对象,在特征描述、表面积与体积计算等方面具有平面图无法比拟的优势。三维建模需基于扫描对象三维表面构造不规则三角网格,实现逼近物体真实表面的目的。将预处理后的点云数据导入 Geomagic 软件中,通过降低噪声、删除体外孤点等去噪处理,形成表面更平滑的点云数据。进一步地,对点云封装处理形成三角网格模型及纹理映射,由于点云误差、点云孔洞及部分噪声点的影响,自动生成的三角网格模型存在不同程度孔洞、钉状物等错误网格,可通过删除钉状物、孔填充、边修补、光滑处理等方法对三角网格模型进行优化处理,经“网格医生”检查无误后保存为.obj 格式的三维模型文件。将.obj 文件导入 3D MAX 三维软件进行纹理贴图,最终得到佛像完

整的三维数字化模型,如图 4 所示。



图 4 佛像三维模型

Fig. 4 3D model of Buddha statues

5.2 二维图形绘制

5.2.1 平面图绘制

由于博物馆内场地狭窄、施工空间有限,进行佛像减振方案设计时需明确佛像底座与周边框架柱、隔墙、防火门等结构准确的相对位置关系,以便施工时防护钢梁、抬升钢梁及减振器安放具有合理的操作空间。根据点云数据绘制佛像在博物馆内的坐落位置,如图 5 所示。

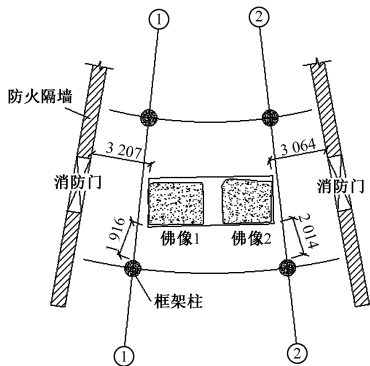


图 5 佛像坐落位置

Fig. 5 Location of Buddha statues

5.2.2 立面图绘制

边缘检测是基于灰度突变分割图像的计算机视觉技术,可用于提取图像中不连续的特征信息,Canny 算法是目前理论上相对完善的边缘检测算法之一,该算法的 5 个重要步骤依次为高斯滤波、像素梯度计算、非极大值抑制、滞后阈值处理和孤立边缘抑制。依据 Canny 算法采用编程语言对佛像正射影像进行处理,通过调试高斯滤波标准差和滞后阈值,得到图像最佳边缘特征检测效果,进一步地,采用人机交互的绘图方式绘制佛像立面图,如图 6,7 所示。

5.3 防倾覆骨架网设计与施工

为避免减振施工造成佛像破损或倾覆,本工程

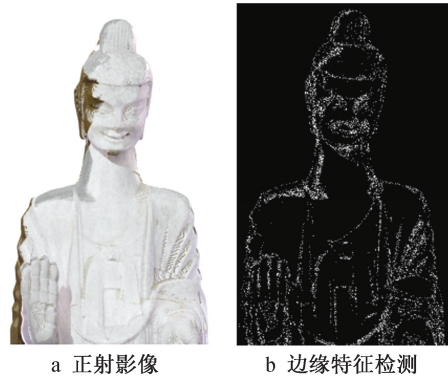


图 6 Canny 算法边缘检测

Fig. 6 Canny algorithm edge detection

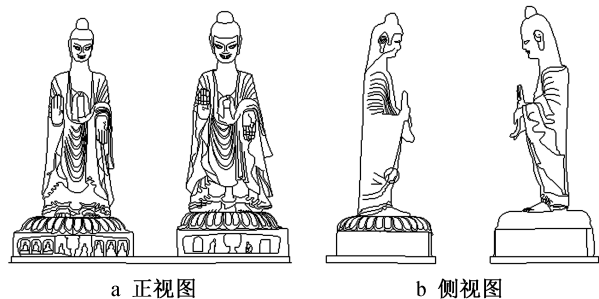


图 7 佛像立面

Fig. 7 Elevation of Buddha statues

采用包裹柔性隔离层+周边搭设防倾覆骨架网的方法。通过分析佛像三维模型形态特点,防倾覆骨架网采用双层防护,第 1 层防护为采用型钢沿着佛像外围搭接网格型骨架,型钢至少排布 3 道,佛像肩膀处 1 道,佛像腰部 1 道、佛像脚跟处 1 道。水平方向受力时,佛像颈部、脚部等截面变小部位为薄弱点,此时佛像相当于悬臂构件,因此需对薄弱点的远端加强防护处理。在佛像眉眼上端和背部、胸部位置加设 1 层钢骨架或加大该部位钢构件与佛像的接触面积,并在佛头和脚部小范围内填充柔性材料,将佛身单独包裹。第 2 层防护为在型钢网架外侧采用不锈钢方管沿佛像外围搭设轮廓为梯形的脚手架,钢管排布间距与第 1 层防护钢网架相同,钢管和型钢网架有效连接成整体防护体系,可有效防止佛像在加固过程中发生倾覆现象,如图 8 所示。

5.4 佛像质量计算与验证

台座结构设计、减振器选型和承载力验算均需明确减振对象质量,因此,佛像质量的精准测量对于减振设计来说尤为重要。常采用点云切片法计算不规则物体的体积(见图 9),首先,将物体表面的三维点云数据沿 z 轴坐标按照固定间隔取横截面得到若干切片点云,并将切片点云投影至 xOy 平面内;然后,对切片点云轮廓进行曲线拟合,并计算轮廓

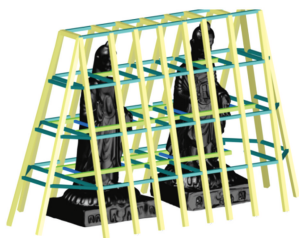


图8 防倾覆骨架网布设

Fig. 8 Layout of anti-overturning framework

曲线所围面积,利用上下层切片轮廓面积及切片间隔求得该层切片体积;最后,对每层切片体积进行累加,得到不规则物体总体积:

$$V = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} (S_i + S_{i+1}) d_i \right] \quad (2)$$

式中: S_i, S_{i+1} 分别为下切片和上切片轮廓面积; d_i 为切片间隔。

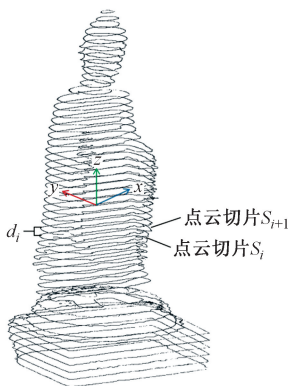


图9 点云切片法计算佛像体积

Fig. 9 Volume of Buddha statues calculated by point cloud slicing method

同时,运用 Geomagic 软件计算佛像三维网格模型体积,作为参考值用来验证点云切片法计算精度,对比结果如图 10 所示。由图 10 可知,2 种方法计算结果相对误差约为 1.0%,点云切片法计算结果略小于软件计算法,因点云切片间隔取值及点云轮廓面积计算可能会对佛像实际体积计算产生影响,但由于相对误差较小,可认为该方法得到的佛像体积较准确,本文取 2 种方法计算结果均值作为后续佛像质量计算基础数据。

采用 PLC 多点同步液压控制系统控制顶撑托换,将原支撑混凝土柱进行完全卸载,该系统可保持同步上升或下降,在卸载托换过程中可实时对系统上的结构进行称重,如图 11 所示。

经实验室检验分析佛像所用石材密度约为 $2\ 680\text{kg}/\text{m}^3$,根据上述体积计算结果估算佛像 1 质量为 $23\ 042.6\text{kg}$,佛像 2 质量为 $24\ 680.1\text{kg}$ 。PLC

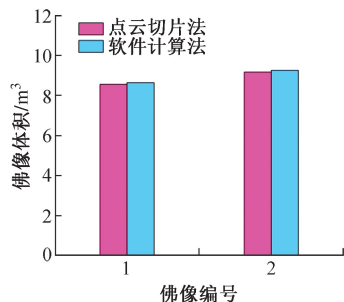


图10 佛像体积计算结果对比

Fig. 10 Comparison of Buddha statues volume calculation results

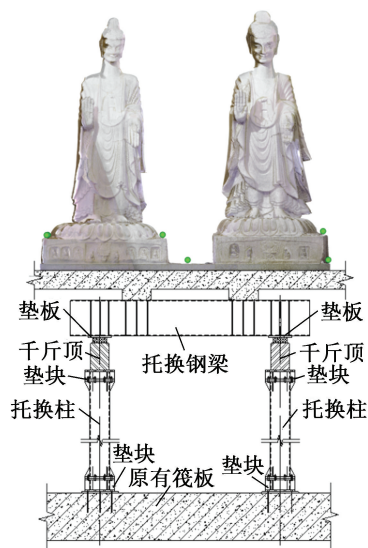


图11 PLC系统卸载支撑示意

Fig. 11 PLC system unloading support

系统卸载时显示 2 座佛像质量总和约为 $60\ 000\text{kg}$ (含防护钢架、托换钢梁及部分混凝土结构),防护结构及托换结构质量约为 $11\ 500\text{kg}$,与计算结果相差 777kg ,相对偏差为 1.6%。考虑到石材密度分析样品少,佛像原材质风化程度不一,且后期修复所用材质不均等,本文给出的密度可能存在偏差,导致计算得到的两尊佛像总质量与 PLC 系统称重值存在偏差,由于相对偏差在减振设计取值允许范围内,因此验证了基于激光点云切片法体积计算结果的准确性。

5.5 佛像重心坐标计算与验证

由于佛像高径比相对较大,托换柱高度较高,为避免托换过程中发生倾覆,在减振支座、防倾覆加固设计与施工时,佛像重心坐标为重要参考数据。

对于不规则物体的重心计算,通常采用数值积分法,根据点云数据,将不规则物体分割成若干层切片,通过计算每层切片的重心坐标及质量矩,将所有切片的质量矩相加除以总质量得到整个物体

表 2 佛像重心坐标计算结果对比

Table 2 Comparison of the barycenter coordinates calculation results of Buddha statues

佛像编号	数值积分法计算的重心坐标/m			软件计算法计算的重心坐标/m			矢量差/mm
	x 向	y 向	z 向	x 向	y 向	z 向	
1	0.035	0.057	1.456	0.039	0.052	1.450	8.8
2	-0.089	0.055	1.580	-0.083	0.053	1.585	8.1

的重心坐标。考虑佛像所用石材为均质材料,其重心坐标计算如下:

$$\begin{cases} \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ \bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \bar{x}_i \\ \bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \bar{y}_i \end{cases} \quad (4)$$

式中:\$(x_i, y_i)\$表示切片\$j\$上点的坐标;\$(\bar{x}_j, \bar{y}_j)\$表示切片\$j\$的重心坐标;\$(\bar{x}, \bar{y})\$表示不规则物体重心坐标;\$n\$表示切片\$j\$点云个数;\$M\$表示佛像总质量;\$m_i\$表示每层切片的质量。

Geomagic 软件可根据佛像三维网格模型计算重心坐标,将该结果作为参考,用来验证基于点云的数值积分法计算精度(见表 2)。由表 2 可知,数值积分法计算的佛像 1,2 重心坐标相比于软件计算法计算的重心坐标在三维空间中的矢量差分别为 8.8,8.1mm,该偏差相对于佛像轮廓尺寸(0.4m×1.8m×5.8m)来说可忽略不计,不会影响防倾覆加固设计参数取值和现场减振器安装,这说明基于点云的数值积分法计算不规则物体重心坐标较准确可靠。

6 结语

本文结合馆藏佛像减振加固设计与施工,采用地面三维激光扫描技术对佛像进行扫描测绘,实现了佛像真实丰富的二、三维信息可视化表达。在计算减振设计参数中,基于点云切片法计算的佛像质量与称重值相对偏差为 1.6%,基于点云的数值积分法得出的佛像重心坐标与软件计算结果三维矢量差<1cm,其误差均在工程应用允许范围内,验证了基于点云的不规则物体体积及重心坐标求解数值准确性,展现了三维激光扫描技术在馆藏文物减振加固应用中的优势。

由于文物表面具有复杂的凹凸形态,三维激光扫描可能面临遮挡和阴影等问题,这影响了扫描结果的完整性和准确性,从而降低了三维点云数据质量。为此,可进一步研究地面三维激光扫描技术与

数字近景摄影测量技术的融合,以有效弥补该局局限性。

参考文献:

- [1] 陈晓瑜,张婷,王金华.我国石质文物分类研究[J].石窟与土遗址保护研究,2022(1):39-46.
CHEN X Y, ZHANG T, WANG J H. Study on the classification of stone cultural relics in China[J]. Research on the conservation of cave temples and earthen sites, 2022(1):39-46.
- [2] 刁常宇,李志荣.石质文物高保真数字化技术与应用[J].中国文化遗产,2018(4):61-67.
DIAO C Y, LI Z R. High fidelity digital technology and application of stone cultural relics[J]. China cultural heritage, 2018(4):61-67.
- [3] 孙晓阳,张润东,严光芒,等.基于多源数据的古建筑数字化建模技术研究与应用[J].施工技术(中英文),2023,52(16):138-143.
SUN X Y, ZHANG R D, YAN G M, et al. Application and research on digital modeling technology of ancient architecture based on multi-source data[J]. Construction technology, 2023, 52(16):138-143.
- [4] 郑国强,王光生,王万忠.石窟寺文物的三维精细化建模研究[J].山东建筑大学学报,2023,38(4):75-83.
ZHENG G Q, WANG G S, WANG W Z. Research on 3D refinement modeling of cultural relics in grotto temples[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2023, 38(4):75-83.
- [5] 孙晓阳,倪树新,李越宇,等.古建筑预防性保护数字化和智慧监测平台研究[J].施工技术(中英文),2024,53(13):141-146.
SUN X Y, NI S X, LI Y Y, et al. Research on digital and smart monitoring platforms for preventive conservation of ancient architecture[J]. Construction technology, 2024, 53(13):141-146.
- [6] 祝志恒,傅鹤林,蒲浩,等.构建 Delaunay 三角网的一种新型生长法——壳外插入法[J].铁道科学与工程学报,2007,4(6):67-72.
ZHU Z H, FU H L, PU H, et al. A new growth algorithm for creating Delaunay triangulation: Outside insertion algorithm[J]. Journal of railway science and engineering, 2007, 4(6):67-72.
- [7] 徐武,张强,王欣达,等.基于改进 Canny 算子的图像边缘检测方法[J].激光杂志,2022,43(4):103-108.
XU W, ZHANG Q, WANG X D, et al. Image edge detection method based on improved Canny operator[J]. Laser journal, 2022, 43(4):103-108.
- [8] KIM J, LEE S. Extracting major lines by recruiting zero-threshold canny edge links along sobel highlights[J]. IEEE signal processing letters, 2015, 22(10):1689-1692.