

基于三维激光扫描的摩崖石刻重建技术与精度研究

欧阳静宣<sup>1</sup> 徐升亮<sup>2</sup> 肖礼兵<sup>2</sup> 邓博焰<sup>2</sup> 郭洪民<sup>3</sup>

(1.南昌大学共青学院;2.南昌大学先进制造学院;3.南昌大学物理与材料学院)

**摘 要** 通过三维激光扫描仪获得庐山石刻的数字模型,为修复工作提供了基础。通过对石刻模型整体情况分析,将石刻缺陷分为轻微磨损、严重磨损和裂缝干扰3类。采用激光扫描技术对这3种缺陷进行扫描,并利用 Geomagic Wrap 软件对石刻的三维激光扫描点云数据进行模型重构。由于裂纹或磨损导致文字缺失较多,通过模拟石刻加工过程,采用浮雕技术将石刻的拓片转化为三维模型,并最终进行模型拟合。结合 3D 打印技术,将数字化的三维模型制造成具体的物理模型,验证石刻修复效果。

**关键词** 三维激光扫描技术;文物三维模型修复;数字化;3D 打印

中图分类号 TP311;TG485

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Reconstruction Technology and Accuracy of Cliff Stone Carvings Based on 3D Laser Scanning

Ouyang Jingxuan<sup>1</sup>, Xu Shengliang<sup>2</sup>, Xiao Libing<sup>2</sup>, Deng Boyan<sup>2</sup>, Guo Hongmin<sup>3</sup>

(1.Gongqing College, Nanchang University; 2.School of Advanced Manufacturing, Nanchang University; 3.School of Physics and Materials Science, Nanchang University)

**Abstract:** A three-dimensional laser scanner was utilized to acquire digital models of the stone carvings at Mount Lu, providing an accurate foundation for restoration. Through an analysis of the overall condition of the stone carving models, the defects were classified into three categories: slight wear, severe wear, and crack interference. Laser scanning technology was employed to scan different types of defects, and the Geomagic Wrap software was utilized to reconstruct the three-dimensional point cloud data of the stone carvings obtained from the laser scanning process. considering that significant text losses occurs due to cracks or wear, a simulation of the stone carving process was conducted. Relief techniques were employed to convert rubbings of the stone carvings into three-dimensional models, which were then fitted into the overall model. By combining 3D printing technology, digitized three-dimensional models were transformed into tangible physical models to validate the effect of the stone carving restoration.

**Key Words:** 3D Laser Scanning Technology, 3D Model Restoration of Cultural Relics, Digitization, 3D Printing

激光扫描技术可以真实地捕捉物品的实体形态,提供直观、准确的信息,便于对物品的各项指标进行测量和研究。由于其精确性高、便于操作等特点,激光扫描和 3D 打印技术在很多领域都有广泛应用。如在建筑领域,通过扫描各类建筑可以对其模型进行有限元模型模拟,从而实现桥梁类建筑进行安全评估或者对脆弱建筑进行诊断从而进行针对性修复<sup>[1-5]</sup>。在医学领域,可以扫描患者的身体部位并打印出精确的模型,用于手术规划和医疗教育<sup>[6-7]</sup>。在文物保护领域,通过扫描古建筑、文物或艺术品,可以生成数字化的三维模型,通过

3D 打印来创建精确的复制品,用于展示、研究和保护文物<sup>[8-10]</sup>。KANTAROS A 等<sup>[11]</sup>将雷埃夫斯博物馆藏品中精选的古代文物数字化,采用 3D 打印并利用回收的聚乳酸(PLA)材料生产触觉复制品,为视力障碍等残疾人士提供多感官体验。除了复制留存文物外,三维扫描和 3D 打印技术为破损文物修复提供了技术支撑<sup>[12-15]</sup>。THAMIR Z S 等<sup>[16]</sup>采用三维扫描技术分别对破损的 Lady of Hatra 人身雕像和 Lamassu 人头像进行了扫描,通过对称性及邻域信息重建了雕像缺失部位。LAWONN K 等<sup>[17]</sup>提出了一种基于图像处理中

收稿日期:2023-09-17;修改稿收到日期:2023-10-13  
基金项目:江西省教育厅科学技术资助项目(GJJ2203803);九江市经济社会发展一般研究资助项目(YB230077)  
第一作者简介:欧阳静宣,女,1986 年出生,讲师,江西九江(332020),E-mail:alineouyang@163.com  
引用格式:欧阳静宣,徐升亮,肖礼兵,等. 基于三维激光扫描的摩崖石刻重建技术与精度研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 724-1 728.  
OUYANG J X, XU S L, XIAO L B, et al. Reconstruction technology and accuracy of cliff stone carvings based on 3D laser scanning[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 724-1 728.

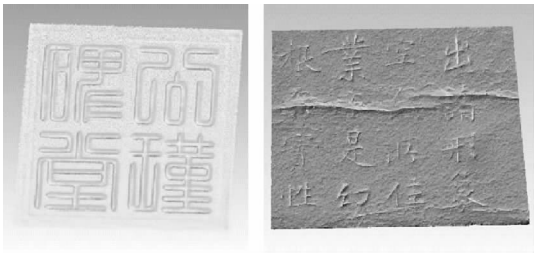
Frangi 滤波器的雕刻结构提取方法,修复了因为老化和风化而变平的马格德堡大教堂回廊的石膏中的雕刻。

摩崖石刻是中国古代文化遗产的重要组成部分。然而,由于自然或人为风险的存在,许多石刻遗址可能会因丢失、损坏或褪色而无法传承。目前针对有缺陷的石刻,修复方法主要包括人工修复、数字化保存或利用二维图像进行完全创新<sup>[18-21]</sup>。然而,人工修复耗时且困难,完全创新的方法则存在失真和精度不高的问题。本研究以带有缺陷的摩崖石刻为例,使用三维激光扫描仪获取石刻的模型数据,通过 Geomagic Wrap 软件对数据进行预处理,修复石刻表面的裂纹并进行曲面重建,以获得更加准确的石刻三维数据,对重建后的模型进行精度评估。通过 3D 打印机对精度满足要求的三维石刻模型进行加工,打印出来的模型不仅完整地再现其实体特性和美感,而且便于对石刻各项指标进行测量和研究。

1 三维激光扫描数据的获取与处理

1.1 石刻原始数据三维扫描

将石刻缺陷分为 3 类:轻微磨损、重度磨损和裂缝干扰,采用激光扫描技术对这 3 种缺陷进行扫描。根据磨损类型的划分,选择位于周瑜点将台的“公瑾碑堂”四字石刻和黄庭坚在庐山秀峰所书的《七佛偈》石刻作为研究目标,见图 1。在获取石刻的点云数据时,使用 FreeScan UE Pro 激光手持三维扫描仪对石刻进行扫描。这些石刻的壁面垂直于地面,采用手持式扫描方式在石刻表面进行多次来回扫描,以获取石刻中较完整的数据采样,其最小空间点距为 0.01 mm,能够展示物体的精致细节,并可以在软件中生成点云或网格数据。进行扫描之前,需要进行扫描仪的标定工作,以确保数据的系统标定误差小于 0.1 mm。



(a) 公瑾碑堂 (b) 七佛偈局部图

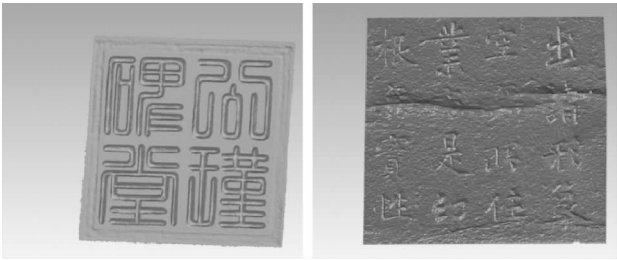
图 1 石刻点云数据获取

Fig.1 Point cloud data acquisition of stone carvings

1.2 扫描数据分析处理

由于点云模型并不直观且难以处理,因此需要将其转换为更易修复和表示的网格模型。运用 Geomagic

Wrap 软件,对扫描数据进行一系列处理步骤。首先,对扫描数据进行点云净化,去除可能存在的噪声点,以保证数据的准确性。通过统一采样率,对点云进行平滑处理,使得点云密度一致。最终进行封装操作,将点云数据转换为网格模型,此模型能更好地表示物体的几何形状和表面细节。最后成功获得了高精度的三维模型,能够满足后续裂缝检测和模型修复等应用的需求。图 2 为经过处理后的结果,不仅展示了石刻作品的精确三维模型,而且提供了更全面准确的视觉信息。公瑾碑堂磨损程度较低,而七佛偈石刻的年代久远,受到侵蚀影响,其表面呈细砂状纹理且出现明显的裂纹。这些裂纹区域的文字由于缝隙的存在破坏了石刻的内部循环,并给可溶盐、水害和生物侵蚀提供了场所,使得裂纹处文字腐蚀比其他区域严重。这部分石刻文字也是修复的重点,见图 2b。



(a) 公瑾碑堂 (b) 七佛偈局部

图 2 修复后的模型

Fig.2 Restored model

2 摩崖石刻的修复

摩崖石刻修复流程见图 3。

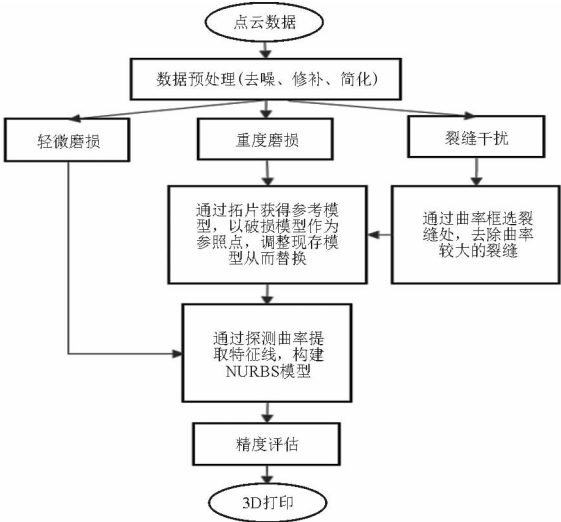


图 3 摩崖石刻修复流程图

Fig.3 Flow chart of cliffside stone carving restoration process

对于“公瑾碑堂”,由于属于轻微磨损,可以直接进行曲面重建。该方法主要有轮廓线提取、曲面片重构、

构造栅格、曲面拟合、偏差分析及控制点调整曲面。轮廓线的提取首先需要对其进行多边形处理,包括对石刻模型进行网格修补和平滑等操作。然后,采用逆向工程中常用的精确曲面命令,结合特征线提取方法,对轮廓线进行精确曲面重建。这种特征线提取与 NURBS 曲面拟合有较强的相关性,而轮廓线的划分是否合理则成为评估曲面重建精度的关键依据。为了使构建的曲面与曲率更好地适配,尽量将轮廓线划分为整齐的四边形。而对于轮廓线特征的探测和提取,有探测轮廓线和探测曲率两种方法。探测曲率获取的轮廓线虽然能较好地反应曲率,但构建的曲面交叉较多且难以修正,

图 4 为探测曲率得到的轮廓线。图 5 为石刻曲面重建方流程。从精度偏差结果可知,该方法曲面重建精度

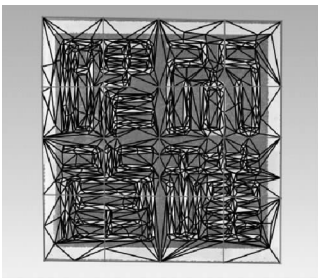


图 4 探测曲率图

Fig.4 Curvature detection map

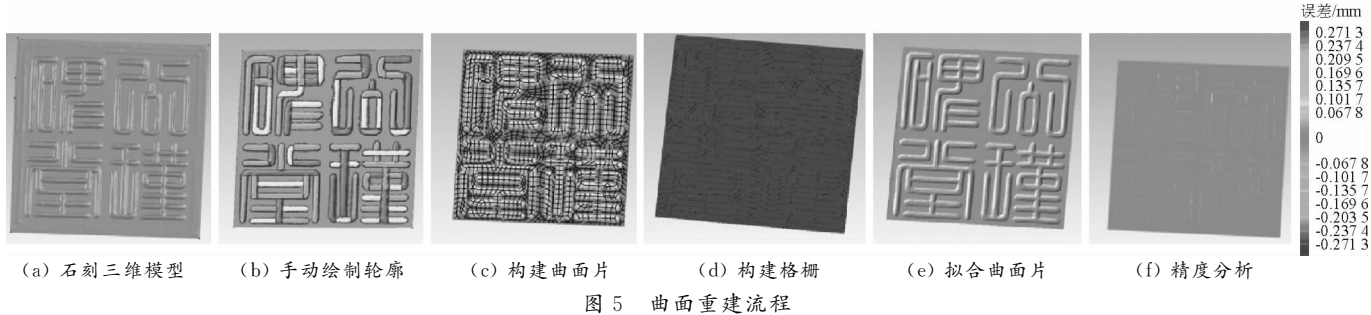


图 5 曲面重建流程

Fig.5 Surface reconstruction process

高,纹理映射特征鲜明,满足曲面重构精度误差的需求。重度磨损和裂缝干扰这两类缺陷的特征相似,两者都会遮挡石刻文字,但裂缝干扰影响范围更大,修复难度更大,需要先隔绝裂缝的干扰,才能进行文字修复。由于两者修复路线相同,只讨论裂缝干扰类别缺陷的修复,主要包括裂纹的去除和文字的修复。

是修复后的石刻模型无法保留表面纹理,因此需要额外的步骤来修复缺失的细节信息。本研究通过曲面拟合将复制的纹理和石刻模型合并,修复石刻表面缺失的

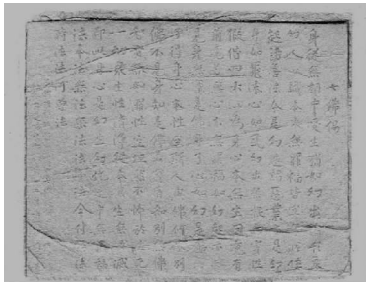


图 6 七佛偈扫描整体图

Fig.6 Overall scan image of the Seven Buddhas Verse

图 6 为七佛偈扫描整体图,由于模型较大,影响修复效率,因此采用分割模型的方法分别对其进行修复。图 7 为七佛局部石刻图,模型有大裂纹和小裂纹,且表面细砂状纹理较明显,修复这类石刻需要在保留纹理的同时去除裂纹的干扰,最后对字体进行修复。通过曲率分析对模型进行检测,可以有效地找到裂缝并去除。但

对其进行修复。使用了石刻在 20 世纪 60 年代的拓片和 2022 年拍摄的石刻图片,以此为修复依据找到缺失文字,并通过图像处理和 Adobe Photoshop 软件还原

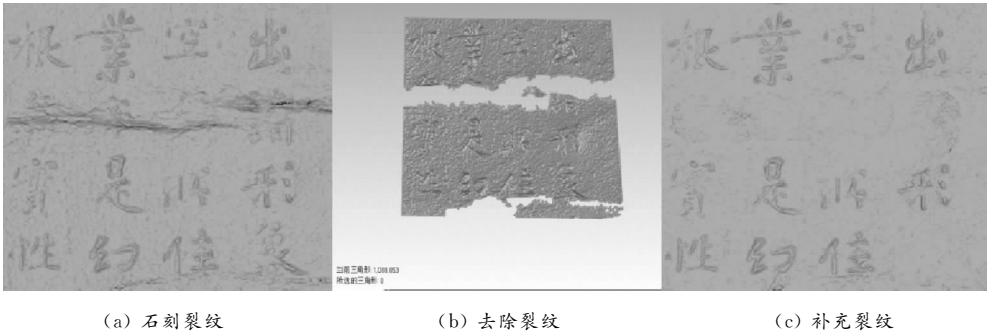


图 7 裂纹去除及纹理修复

Fig.7 Crack removal and texture restoration

细节信息。

针对受损的石刻表面上的文字,由于七佛偈没有其他真本,因此只能采用二维图像获取三维模型的方法来

了拓片文字,修复效果见图 8。

通过模拟石刻刀具和加工过程,采用雕刻方法将石刻拓片获得二维文字转为三维模型,见图 9。通过 GeomagicWrap 软件的测量距离命令来判断文字的深度和斜边角度。在石刻的扫描数据中随机选择了 10 个点进行测量,尽量选择横竖笔划减少误差。在文字中部和边缘各选一点,得出其坐标之间的距离,见表 1。由于石刻的磨损程度不同,采用其平均深度值为石刻修复的深度。通过公式  $\arctan(\Delta Z/\Delta Y)$  来获取刀具的角

度。文字三维模型的重建在 JDSoftArtForm 完成。首先采用人工绘制得到其轮廓,在区域浮雕命令区采用深度平均值 2.18 mm,刀具角度平均值 23.68°来获取三维文字模型。获得了石刻缺失文字的模型后,使用快速约束和全局约束命令将修复模型与扫描模型进行重叠,但新雕刻的文字棱角鲜明,需要对其进一步进行松弛和快速光顺,使其与周围文字适配,重建效果见图 9d。通过此过程对石刻其余部分进行修复,图 10 为最终修复效果。

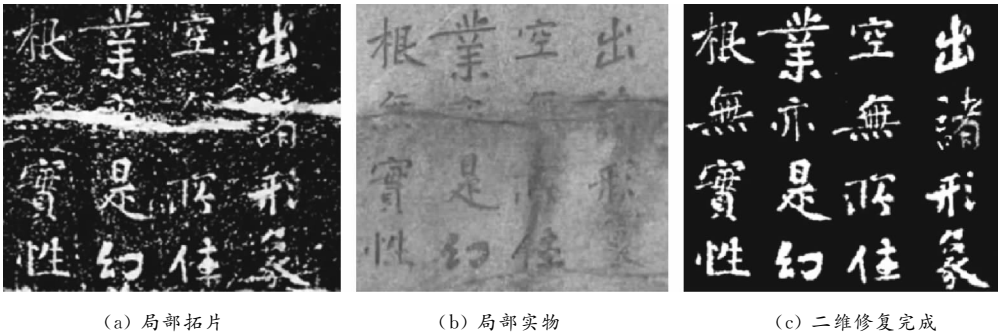


图 8 二维文字修复效果图  
Fig.8 Images of two-dimensional text restoration

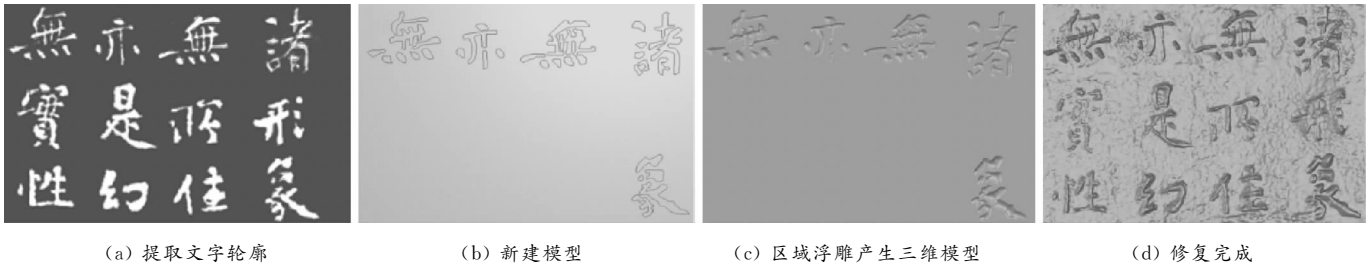


图 9 修复三维文字模型过程  
Fig.9 Process of restoring 3D text model

表 1 随机坐标距离

Tab.1 Distances of random coordinate

| 坐标 | $\Delta X/mm$ | $\Delta Y/mm$ | $\Delta Z/mm$ | $\arctan \frac{\Delta Z}{\Delta Y}/(^{\circ})$ |
|----|---------------|---------------|---------------|------------------------------------------------|
| 1  | 0.000 000     | 6.406 115     | 3.436 260     | 30.710 31                                      |
| 2  | 0.000 000     | 5.950 012     | 2.315 401     | 22.296 21                                      |
| 3  | 0.011 686     | 6.373 610     | 2.308 402     | 20.751 46                                      |
| 4  | 0.206 242     | 4.501 488     | 1.451 296     | 18.472 37                                      |
| 5  | 0.000 000     | 6.495 827     | 1.636 662     | 14.436 01                                      |
| 6  | 0.000 000     | 5.639 872     | 2.460 555     | 24.996 92                                      |
| 7  | 0.000 000     | 5.497 414     | 2.924 002     | 30.474 87                                      |
| 8  | 0.000 000     | 4.686 948     | 2.447 564     | 29.920 34                                      |
| 9  | 0.001 312     | 4.321 663     | 1.635 776     | 21.686 80                                      |
| 10 | 0.012 837     | 2.930 584     | 1.177 239     | 23.016 17                                      |

采用手动提取轮廓线方法对修复的七佛偈文字局部图进行曲面重建,见图 11。分析 3D 偏差图,可以发现手动提取轮廓线对较明显变化的曲率部分即文字轮廓部位的划分效果较好,此部分的偏差较小。但是七佛偈表面纹理凹凸明显,轮廓命令难以对这些纹理进行覆



图 10 七佛偈石刻修复完成  
Fig.10 Restoration complete of the Seven Buddhas Verse stone carving

盖,纹理部分偏差偏大。最大偏差范围为  $-0.231\ 2\sim +0.353\ 8\text{ mm}$ ,标准偏差为  $0.024\ 6\text{ mm}$ 。

在构建摩崖石刻实体模型的过程中,使用 Ender-3 V2 型 3D 打印机。在切片软件 Creality Slicer 中对打印机参数进行设置并对修复完成的模型文件进行切片处理。打印使用 PLA 材料,打印时间为 1 730 min,层数为 73 层。图 12 为七佛偈局部打印。

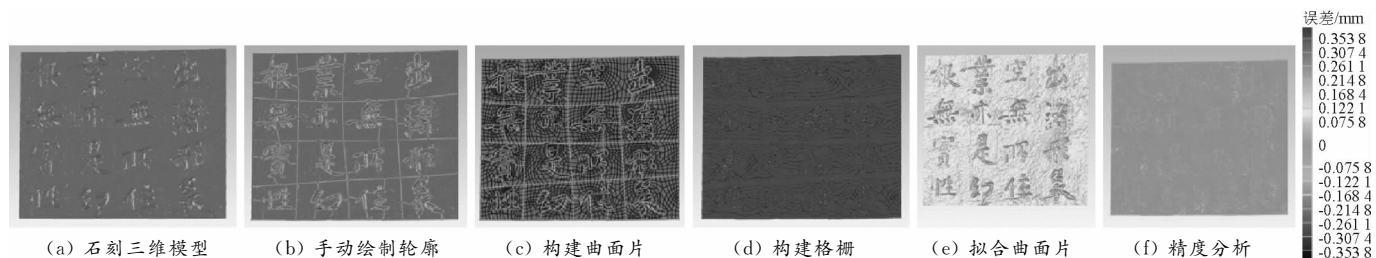


图 11 Surface reconstruction process of partial image of the Seven Buddhas Verse text

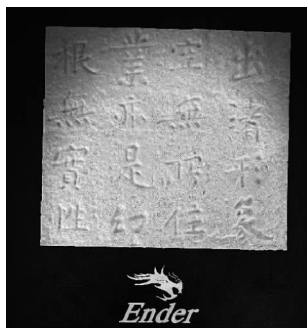


图 12 七佛偈局部打印

Fig.12 Partial printing of the Seven Buddhas Verse

### 3 结 论

(1)采用激光扫描获取庐山摩崖石刻的点云数据并转换为三维模型,实现了对石刻的几何形状、表面细节和结构特征的可视化呈现。

(2)公瑾碑堂石刻进行表面重建最大偏差范围为 $-0.074\ 7\ \text{mm}\sim+0.144\ 8\ \text{mm}$ ,标准偏差范围为 $0.001\ 9\ \text{mm}$ 。七佛偈石刻进行表面重建最大偏差范围为 $-0.231\ 2\sim+0.353\ 8\ \text{mm}$ ,标准偏差为 $0.024\ 6\ \text{mm}$ 。

#### 参 考 文 献

- [1] LI L, SU F, YANG F, et al. Reconstruction of three-dimensional (3D) indoor interiors with multiple stories via comprehensive segmentation[J]. Remote Sensing, 2018, 10(8): 1 281-1 286.
- [2] YANG H, XU X, NEUMANN I. An automatic finite element modelling for deformation analysis of composite structures[J]. Composite Structures, 2019, 212: 438-448
- [3] ALTUNTAS C, YILDIZ F, SCAIONI M. Laser scanning and data integration for three-dimensional digital recording of complex historical structures: the case of mevlana museum[J]. Isprs. International Journal of Geo-Information, 2016, 5(2): 18-23.
- [4] ANGELINI A, COZZOLINO M, GABRIELLI R, et al. Three-dimensional modeling and non-invasive diagnosis of a huge and complex heritage building: The patriarchal basilica of santa maria asunta in aquileia(Udine, Italy)[J]. Remote Sensing, 2023, 15(9): 2 386-2 390
- [5] LEE J Y, AN D W. Utilization of 3D scan data: “Representation” of korean wooden architectural heritage[J]. Sustainability, 2023, 15(8): 6 932-6 937.
- [6] DJUKIC T, MANDIC V, FILIPOVIC N. Virtual reality aided visualization of fluid flow simulations with application in medical education and diagnostics[J]. Computers in Biology and Medicine, 2013, 43(12): 2 046-2 052.
- [7] BAO G, YANG P, YI J, et al. Full-sized realistic 3D printed models of liver and tumour anatomy: A useful tool for the clinical medi-

- cine education of beginning trainees[J]. BMC. Medical Education, 2023, 23(1): 13-18.
- [8] KARASAKA L, ULUTAS N. Point cloud-based historical building information modeling (h-bim) in urban heritage documentation studies[J]. Sustainability, 2023, 15(13): 10 726-10 733.
- [9] HAALAND M M, STRAUSS A M, VELLIKY E C, et al. Hidden in plain sight: A microanalytical study of a Middle Stone Age ochre piece trapped inside a micromorphological block sample[J]. Geoarchaeology, 2021, 36(2): 283-313.
- [10] LI J, LI K, ZHAO F, et al. Three-dimensional laser scanning technology assisted investigation and extraction of human bone information in archaeological sites at shenna ruins, china[J]. Coatings, 2022, 12(10): 1 507-1 511.
- [11] KANTAROS A, GANETSOS T, PETRESCU F I T. Three-dimensional printing and 3D scanning: emerging technologies exhibiting high potential in the field of cultural heritage[J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(8): 4 777-4 785.
- [12] BATAR O S, TERCAN E, EMSEN E. Ayvalikemer(Sillyon) historical masonry arch bridge: A multidisciplinary approach for structural assessment using point cloud data obtained by terrestrial laser scanning(TLS)[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11(5): 1 239-1 252.
- [13] ADAMOPOULOS E, RINAUDO F, ARDISSONO L. A critical comparison of 3D digitization techniques for heritage objects[J]. Isprs. International Journal of Geo-Information, 2021, 10(1): 10-15.
- [14] JO Y H, HONG S, JO S Y, et al. Noncontact restoration of missing parts of stone Buddha statue based on three-dimensional virtual modeling and assembly simulation[J]. Heritage Science, 2020, 8(1): 12-18.
- [15] KANAYA I, CHEN Q, KANEMOTO Y, et al. Three-dimensional modeling for virtual relic restoration[J]. Ieee Multimedia, 2000, 7(2): 42-44.
- [16] THAMIR Z S, ABED F M. How geometric reverse engineering techniques can conserve our heritage: A case study in Iraq using 3D laser scanning[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Buildings, Construction and Environmental Engineering(BCEE) [C]. Istanbul, Turkey, 2020.
- [17] LAWONN K, TROSTMANN E, PREIM B, et al. Visualization and extraction of carvings for heritage conservation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 23(1): 801-810.
- [18] 张园林. 基于三维模型的碑刻数字拓片生成技术及应用[D].杭州: 浙江大学, 2018.
- [19] 孙保燕, 翁裕育, 周贤君. 基于Remake的三维建模技术在摩崖石刻数字化重建中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30(4): 110-114.
- [20] 刘子娟, 王聪华. 古代泰山石刻的三维真实可视化[J]. 科技信息, 2009(1): 591-593.
- [21] 张欣娜. 大足石刻铭文碑刻的数字化保护[D].重庆: 重庆师范大学, 2014.

(编辑:张正贺)