文化遗产保护中虚拟现实技术研究进展

刘鑫达[1)], 李康[1)], 耿国华[1)*], 周明全[2)]

[1)] (西北大学文化遗产数字化国家地方联合工程研究中心 西安 710127)
[2)] (北京师范大学教育部虚拟现实应用工程研究中心 北京 100875)
(ghgeng@nwu.edu.cn)

摘 要: 文化遗产是连接过去与现在的桥梁, 具有重要的历史、文化和教育价值. 面对自然灾害和人为因素等多重威胁, 传统的文化遗产保护手段存在成本高昂、效率有限和普及性不足等局限. 虚拟现实技术以其抗破坏性、沉浸性、交互性和经济性等多方面优势, 为文化遗产的保护和传承提供了创新的解决路径. 对虚拟现实技术在文化遗产保护领域中的应用现状和研究进展进行综述, 从数字化采集、三维建模、交互设计和虚拟展示等环节, 详细讨论虚拟现实技术在文化遗产保护中的研究和探索; 探讨了虚拟现实技术在教育、严肃游戏、博物馆和叙事等实际文化遗产保护项目中的应用成效, 凸显了其在提升用户体验、促进文化理解和交流方面的积极作用; 最后介绍智能化、互通性和可演变性的发展趋势, 预示着虚拟现实技术将为文化遗产保护提供更多创新的可能性. 展望未来, 应继续探索虚拟现实技术在文化遗产保护中的新方法和新途径, 实现更广泛的社会参与和文化价值传播.

关键词: 虚拟现实; 文化遗产保护; 数字化建模; 交互展示
中图法分类号: TP391.9 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2024-00509

Review on Virtual Reality Technology in Cultural Heritage Protection

Liu Xinda[1)], Li Kang[1)], Geng Guohua[1)*], and Zhou Mingquan[2)]

[1)] (*National-Local Joint Engineering Research Center of Cultural Heritage Digitization, Northwest University, Xi'an* 710127)
[2)] (*Engineering Research Center of Virtual Reality and Applications, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing* 100875)

Abstract: Cultural heritage serves as a bridge between the past and the present, holding significant historical, cultural, and educational value. In the face of multiple threats, including natural disasters and human factors, traditional methods of cultural heritage preservation face limitations such as high costs, limited efficiency, and inadequate accessibility. Virtual reality (VR) technology, with its advantages in resilience, immersion, interactivity, and cost-effectiveness, provides innovative solutions for the protection and transmission of cultural heritage. This review summarizes the current state and research progress of VR technology in the field of cultural heritage preservation, focusing on key aspects such as digital acquisition, 3D modeling, interactive design, and virtual exhibition. The paper discusses in detail the research and explorations of VR technology in these areas. Furthermore, the application outcomes of VR technology in practical cultural heritage preservation projects, such as education, serious games, museums, and storytelling, are explored, highlighting its positive impact on enhancing user experience and fostering cultural understanding and communication. Finally, the paper introduces emerging trends in intelligence, interoperability, and adapta-

收稿日期: 2024-08-26; 修回日期: 2024-12-27. **基金项目**: 国家自然科学基金面上项目(62271393); 虚拟现实技术与系统全国重点实验室(北京航空航天大学)开放课题(VRLAB2024C02). **刘鑫达**(1991—), 男, 博士, 讲师, CCF 会员, 主要研究方向为虚拟现实、人工智能、数字文化遗产保护; **李康**(1980—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为计算机图形学、文物数字化保护技术; **耿国华**(1955—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 论文通信作者, 主要研究方向为智能信息处理、文化遗产数字化保护; **周明全**(1954—), 男, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要研究方向为虚拟现实、可视化.

bility, indicating that VR technology will offer even more innovative possibilities for cultural heritage preservation. Looking ahead, further exploration of new methods and approaches using VR technology in cultural heritage protection is needed to achieve broader societal participation and the dissemination of cultural values.

Key words: virtual reality; cultural heritage preservation; digital modeling; interactive presentation

文化遗产, 包括历史建筑、考古遗址、艺术品、手工艺品等物质文化遗产, 以及语言、传统、信仰和仪式等非物质文化遗产, 是连接过去与现在的桥梁[1]. 它不仅承载着人类历史的记忆, 也是文化多样性和民族身份的象征[2]. 从古老的建筑、雕塑到传统手工艺, 每项文化遗产都是人类智慧的结晶, 它们不仅提供了了解历史、学习先人智慧的途径, 也是现代社会多元文化共存的见证. 文化遗产的保护和传承对于维护人类文明的多样性、促进文化交流和理解, 以及教育后代具有重要意义.

然而, 文化遗产在现代社会正面临着前所未有的多重威胁[3], 这些威胁既有自然因素也有人为因素. 自然灾害[4]如地震、洪水、台风等, 对文化遗产的破坏往往是不可逆的, 导致许多珍贵的历史遗迹和艺术品遭到损毁; 环境污染, 包括空气污染、水污染和土壤污染, 也会逐渐侵蚀文化遗产的材质, 导致其颜色褪色、结构脆弱; 人为因素[5]如城市化进程、战争和冲突等, 同样威胁着这些宝贵的文化资源. 在城市化进程中, 大规模的建设和开发往往导致文化遗产被忽视或破坏, 随着城市扩张, 许多历史建筑被拆除、考古遗址被覆盖、非物质文化遗产的生存空间被挤压. 战争和冲突更是文化遗产的灾难, 它们不仅造成直接的破坏, 还可能导致文化遗产的非法交易和流失. 这些威胁对文化遗产的保护提出了严峻的挑战. 传统保护方法, 如物理修复、现场保护和迁移保护, 虽然在一定程度上能够减缓文化遗产的损毁速度, 但它们往往存在局限性. 物理修复可能会对原始材料造成二次损害, 现场保护又难以应对大规模的自然灾害. 迁移保护则可能改变文化遗产的原有环境和背景, 影响其历史和文化价值的完整性. 此外, 传统保护方法的成本往往非常高昂, 需要大量的人力、物力和财力投入, 对于许多文化遗产保护项目是一个难以承受的负担. 上述困难使这些传统保护方法的普及性受限, 难以覆盖每个需要保护的文化遗产.

虚拟现实(virtual reality, VR)技术是一种集成了计算机图形学、人机交互、传感器技术、人工智能等多种技术的综合性系统技术[6], 它通过数字化环境的生成与用户交互, 提供了一种全新的认知、模拟和适应自然的方法. 从高精度的数字化采集到三维建模, 再到交互设计和虚拟展示, VR 的应用贯穿于文化遗产保护的各个环节, 这些技术相互依存, 为传统文物数字化保护方法提供补充, 并为解决上述挑战开辟了全新的途径. (1) VR 通过高精度三维扫描和建模对文化遗产进行数字化重建, 创建出精确的虚拟副本, 即使原始文化遗产遭到破坏, 其数字化副本也能够保留其历史文化价值. (2) VR 能为用户提供沉浸式的体验, 使人们即使身处千里之外, 也能近距离地感受文化遗产的魅力. (3) VR 的高度交互性为文化遗产展示和教育提供了新方式, 用户可与虚拟环境中的文化遗产进行互动, 更加深入地了解其背后的历史和文化, 这种沉浸式和互动性体验不仅能提高公众对文化遗产保护的认识和兴趣, 还能促进文化遗产的传播和教育. (4) VR 的成本随着技术的发展逐渐降低, 其普及性也在提高, 已经逐步成为文化遗产保护的重要工具, 为全球文化遗产的保护和传承作出贡献, 在不接触实体文化遗产的情况下, 对其进行保护、研究和展示, 从而克服传统保护方法的局限, 为文化遗产的保护和传承开辟新的道路[7].

随着 VR 在文化遗产保护领域的影响逐渐增加, 已有部分研究开始探讨 VR 在文化遗产保护中的应用[8-9], 但大多数现有的工作只关注于技术本身的某一方面, 缺乏对整个技术流程的系统性描述. 本文从一个新的视角——数字化采集、建模、交互、展示和应用的全过程来审视这一交叉领域, 提供一个全面的框架, 帮助读者更好地理解 VR 如何贯穿于文化遗产保护的各个环节, 并探索其在该领域中的潜力和挑战. 首先讨论包括数字化采集、三维建模、交互设计、虚拟展示等 VR, 然后评估 VR 在教育、严肃游戏、博物馆、叙事等实际文化遗产保护项目中的应用效果, 最后探讨 VR 的发展及其对未来文化遗产保护的潜在影响. 本文希望能够为文化遗产保护领域中的 VR 应用提供

一个清晰的框架，并为未来的研究和实践提供指导，更有效地保护和传承文化遗产，让它们在数字时代焕发新的生命力.

1　文化遗产保护中的 VR

VR 已成为文化遗产保护领域的重要工具，通过创建沉浸式体验，不仅增强了公众对文化遗产的认知和欣赏，而且为保护、研究和教育提供了全新的方法，文化遗产保护 VR 进展如图 1 所示.

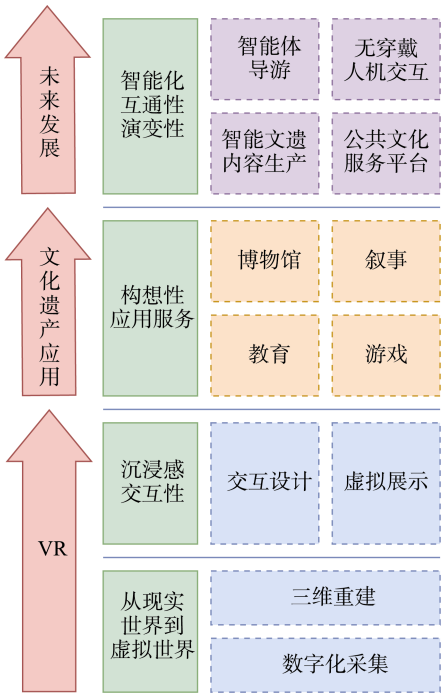


图 1　文化遗产保护 VR 进展

本节将从数字化采集、三维建模和交互设计和虚拟展示 4 个阶段，详细介绍 VR 在文化遗产保护中的研究和发展，如图 2 所示.

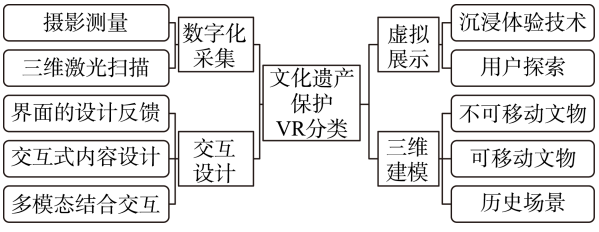


图 2　文化遗产保护中 VR 的分类

1.1　数字化采集

数字化采集是 VR 应用在文化遗产保护的第一步[10]，为文化遗产的精确记录提供强有力的支持，也为 VR 应用沉浸式体验提供了数据支撑[11]. 本文介绍摄影测量和三维激光扫描 2 种采集方式.

1.1.1　摄影测量

摄影测量是一种通过摄影技术获取空间对象的几何位置、形状和尺寸等信息的测量方法，它不接触测量对象，无须直接触摸物体，测量安全、快速，是推动文化遗产保护向数字化和虚拟化转型的重要技术. Adão 等[12]利用无人机摄影和程序建模技术，为文化遗产创建 VR 环境；Berrett 等[13]通过 UAV 和地面摄影测量技术为杨百翰大学校园创建大规模的三维模型，不仅用于历史保护，还通过 VR 提供了教育和游览的可能性.

摄影测量技术不仅可以应用于对文化遗产的表面捕捉，还能深入挖掘和记录文化遗产的复杂结构和内在纹理. Barrile 等[14]利用数字摄影测量和计算机视觉技术为雕塑创建三维模型，增强了文化遗产的互动性和传播力. 随着技术的进步，摄影测量技术在文化遗产保护中的应用更加多样化和高效. D'Annibale 等[15]提出低成本摄影测量工作流程，Prado 等[16]结合多波束声呐和光学数据进行沉船三维建模的研究，都体现了该技术在提高数据采集效率和降低成本方面的努力. Rihani[17]则通过众包图像和三维摄影测量流程，为因冲突被毁的贝尔神庙进行数字化重建，展示了在资源受限情况下利用现有技术进行文化遗产保护的可能性. 摄影测量采集技术还涉及对建筑遗产的数字化记录和建模，以及对非物质文化遗产的恢复. Sancak 等[18]通过摄影测量方法为建筑遗产创建优化模型并提供交互体验，通过摄影测量与混合现实(mixed reality, MR)技术相结合，恢复了非物质文化遗产的原始环境.

图 3a 所示为西北大学文化遗产数字化国家地方联合工程研究中心(简称西大文遗数字化国地中心)研发的基于摄影测量技术的光场扫描仪. 该仪器直径约 120 cm，深度约 20 cm；配置 15 个相机，采用 3.8 mm 固定焦距摄像头，在成像过程中提供了一致的清晰度和景深，其中，14 个相机均匀分布于仪器的外围，第 15 个相机则位于设备的中心点，对于后续图像的对齐和融合非常有利. 通过获取图 3b 所示的不同角度的摄影图像，最终可以重建出图 3c 中所示的三维模型.

1.1.2　三维激光扫描

三维激光扫描是另一种至关重要的文化遗产数字化采集技术，通过激光测距的原理把激光先投射到被测文物表面，继而反射回扫描仪内的传感器中，扫描仪据此计算其与文物的距离，确定文



a. 光场扫描仪 b. 不同角度摄影示意图 c. 重建效果图

图 3 摄影测量扫描文物

物在空间中的位置, 同时得到文物表面的海量三维点云数据, 捕捉精细的几何形状和纹理信息, 为历史建筑和文物创建了精确的三维模型. 三维激光扫描技术一直是业界的研究重点. 图 4 所示为西大文遗数字化国地中心研发的第三代三维激光文物扫描仪, 可对复杂器型、半透明文物进行高精度数字化, 采集时间降低至数分钟, 精度可达 0.05 mm, 同时可实现几何与纹理数据的同步采集与合成. Banfi 等[19]探讨了如何通过绘图和数字建筑表现来叙述古罗马遗产, 其中, 无人机和激光雷达技术被用于创建虚拟视觉故事和支撑历史建筑信息建模, 该技术不仅有助于对考古遗址进行数字化研究, 还支持保护和维护项目的规划; Bruno 等[20]提出一种从三维重建到 VR 的完整方法, 用于创建数字考古展览, 表明三维扫描技术在实现高质量可视化和互动体验方面的重要性.



a. 扫描仪及对秦陵跪射俑的建模



b. 复杂器物和半透明材质文物及其建模

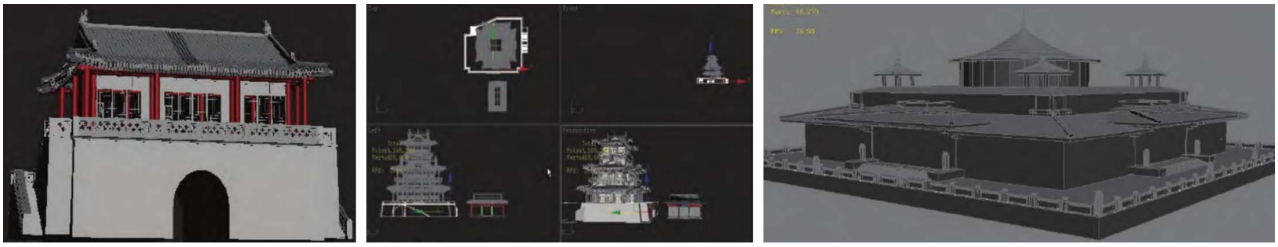
图 4 三维激光扫描文物

三维激光扫描技术在提高文化遗产可访问性方面也显示出巨大潜力. Bruno 等[21]探讨了如何通过 VR 增加对水下文化遗产的获取和建模, 使得难以接触的水下遗址能够通过虚拟方式被人们更广泛地探索和了解; Buyuksalih 等[22]则专注于洞穴景观的数字化, 通过激光扫描和 VR, 为土耳其伊斯坦布尔的因塞吉兹石窟创建交互式可视化模型, 提供了一种新颖的探索和教育工具; 欧阳宏[23]通过三维数据采集与应用, 为故宫博物院院藏文物的数字化保护和展示提供了创新方法, 将日常不方便展示的馆藏文物开放在公众视野, 增加了公众对这些文化遗产的认识和互动体验.

1.2 三维建模

三维建模实现从现实世界到虚拟世界的转换, 是 VR 文化遗产数字化保护中最重要的技术之一. 三维建模不仅衔接历史建筑和文物等文化遗产的数字化过程与 VR 内容的交互展示过程, 还为文化遗产的保护和研究提供了新的视角. 针对不同的文化遗产类型, 可以将文化遗产三维建模的研究工作分为不可移动和可移动文物的三维重建以及场景重建 2 类.

(1) 第 1 大类不可移动文物的重建是针对建筑遗产的三维重建. 西大文遗数字化国地中心很早就开展了对于文化遗址的三维真实感建模[24], 如图 5 所示, 以唐朝小雁塔的数字化保护为背景, 开展对小雁塔及其周围建筑遗产的三维真实感建模和虚拟展示. 国外也有不少相似的研究工作. Banfi[25]通过三维勘测、建筑信息模型(building information model, BIM)和扩展现实技术, 提高了人们对建筑遗产的认识; Chiabrando 等[26]回顾三维测量技术和 BIM 在文化遗产环境中的应用, 强调了三维勘测技术在历史建筑管理和估价中的重要性; Abidin 等[27]利用 VR 对麦地那的先知清真寺进行建模, 以保护其历史原貌, 使得用户能够进行实时导航体验, 增强了对遗产历史的了解; Banfi 等[28]通过数字化工作流程, 展示了米兰圣安布罗吉奥大教堂的案例, 实现高水平的信息共享.



a. 明白衣阁　　b. 中国写意阁　　c. 现代馆



d. 大石碑　　e. 烘焙前小雁塔　　f. 烘焙后小雁塔

图 5　虚拟小雁塔三维全景模型展示[24]

(2) 第 2 大类不可移动文物的重建是大型遗址的三维重建. Ahn 等[29]通过石窟庵的虚拟遗产项目，展示了三维扫描技术在制作石窟模型中的应用，并探讨了 VR 应用中的逼真度和沉浸感问题; Gabellone[30]利用 5G 网络的高速连接，通过全景图和 360°VR 视频，增强了用户对戴克里先浴场的沉浸式体验; Barreau 等[31]通过三维建模技术重建法国雷恩的莫德莱斯门，为考古学家提供了支持和建议; D'Agostino 等[32]提出一个综合框架，通过 VR 和增强现实(augmented reality, AR)技术，对奥古斯塔坎帕尼亚引水渠及其终端水库进行数字化了解和展示; Banfi 等[33]则通过科学绘图和 VR，为地震后的阿夸塔德尔特龙托要塞提供了虚拟访问体验; 在秦陵兵马俑挖掘过程中，西大文遗数字化国地中心对兵马俑一号坑和 K9901(百戏俑)坑遗址和挖掘现场进行重建[34-35]，一号坑 G9 过洞重建如图 6 所示，该研究不仅对兵马俑遗址保护意义重大，还助力了考古过程的记录与应用.

(3) 对于可移动文物的三维重建同样备受关注. Börlin 等[36]提出基于 VR 的可移动文物三维模型检索系统，使用构造实体几何技术提高了检索效率; Bucciero 等[37]提出一种可移动文物模型驱动的协作虚拟环境生成技术，简化了文化遗产的虚拟部署; Fu 等[38]针对 RGB-D 重构中出现的模糊和重影问题，提出一种三向相似性纹理合成方法优化无缝纹理，进一步提高了可移动文物三维重建的视觉逼真度; 图 7 所示为西大文遗数字化国地中心对于站立俑和陶马俑的三维重建结果[39]，通过虚拟修复技术，将现实中没有重建完成的残破碎片重建成可以进行展示的三维模型，辅助科研和



a. 兵马俑一号坑第 3 次挖掘现场全景图

b. 挖掘现场重建结果

c. 遗址重建结果

图 6　秦陵兵马俑一号坑 G9 过洞发掘现场重建

科普工作, 具有重要的意义. 这些研究表明, 三维重建技术不仅能够精确地捕捉文化遗产的细节, 还能通过 VR 提供更加生动的体验.



a. 站立俑 b. 陶马俑

图 7 虚拟复原模型[39]

(4) 三维建模技术的应用不仅限于对现存文化遗产的数字化, 还能够为历史场景的重现提供技术支持. Matthys 等[40]通过三维城市建模和四维网络构建了一个历史环境的数字空间, 使根特市的居民能够参与到历史环境的重建中; Medyńska-Gulij 等[41]评估了用户对历史地理虚拟空间的沉浸体验; Alkhatib 等[42]通过三维重建技术, 让叙利亚巴尔米拉剧院这一失落的遗产在元宇宙中重现生机; Díaz-Kommonen[43]重构了伦勃朗的《尼古拉斯-图尔普医生的解剖课》, 使参观者能够进入画作空间与人物互动; Gherardini 等[44]结合摄影测量重建和 AR, 为受损石雕提供了完整的虚拟三维重建和可视化. 这些研究说明, 即使文化遗产已经遭到破坏或丢失, 三维重建技术仍然在帮助恢复和展示文化遗产方面展现出巨大潜力.

1.3 交互设计

在文化遗产的数字化展示中, 提升用户的参与度和沉浸感可以激发公众对文化遗产的兴趣, 促进其参与到文化遗产的保护工作中[45]. 用户交互设计是提升上述体验的关键, 通过创新的交互方式, 用户可以更自然地与虚拟环境中的文化遗产内容进行互动, 不仅提高用户的参与度, 也增强了教育的效果.

文化遗产保护 VR 交互方式的研究与探索比较多样, 界面的设计和反馈是其中一个受到广泛关注的方向. Alatrash 等[46]以 1927 年兰彻斯特汽油电动汽车为案例, 提出一种叙事与游戏化相结合的交互方法以增强博物馆环境的互动性; Bachvarov 等[47]则探索用户与虚拟环境中物体的自然互动方式, 构建了保加利亚文化遗产的沉浸式展示; Bolognesi 等[48]利用立体摄影和 AR 技术设计一种交互式应用, 使用户能够比较文化遗产的过去和现在; Cardoso[49]提出扩展现实体验中基于智能手机的无障碍用户界面, 并展示了如何利用这些技术保护文化遗产; Checa 等[50]提出教育和培训沉浸式 VR 体验框架, 简化了应用程序开发, 使研究人员能够专注于文化遗产保护教育或培训体验的设计; Andolina 等[51]提出 MR 遗址探索设计框架, 其中整合了 VR, AR 和触觉音频接口, 以及个性化推荐等高级功能, 有效地解决了信息过载和体验质量问题; 西大文遗数字化国地中心也较早开展了文化遗产保护中的 VR 交互设计的研究, 图 8 所示为其研究设计的兵马俑碎片虚拟拼接交互界面[52], 在考古过程中, 根据挖掘现场的真实位置对碎片的邻接关系进行记录, 在 VR 环境中对兵马俑碎片进行拼接, 可以为现实世界中的拼接提供参考, 加快兵马俑拼接复原的速度.



a. 虚拟拼接交互界面

b. VR 环境下的拼接结果

c. 指导拼接的实际结果

图 8 VR 环境下兵马俑碎片拼接方法及结果示意图[52]

多种交互式内容的设计备受关注. Baik[53]利用 BIM, 为吉达历史区的遗产建筑提供一个交互式的三维虚拟模型, 不仅提升虚拟旅游的体验, 也促进了对建筑遗产的了解; Banfi 等[28]从演变角度出发, 探讨了在交互式文化遗产建筑中增强用户的

沉浸感和互动性的方式; 吴萌[54]探讨了应用CAVE技术在历史建筑空间展示中的应用, 以故宫博物院三希堂沉浸式VR原状陈列展示为例, 通过高沉浸感和直观的人机交互方式为博物馆访客提供一种新的参观体验, 有效地解决了文化遗产保护和公众参观服务之间的矛盾; Bischof 等[55]将传统非物质文化食谱书与数字内容结合, 提供一种新的交互内容和体验方式; Antinozzi 等[56]通过生成高分辨率 360°球形照片创建一个交互式存储库, 使得阿贝里努姆考古区的虚拟游览成为可能, 为难以进入的地区提供数字化浏览途径, 也为文化遗产的宣传与保护提供了新的视角; Barbara 等[57]在讨论文化遗产中的 VR 互动数字叙事时提出伦理层面的考量, 强调了在交互式内容的设计过程中考虑伦理问题的重要性.

多种模态结合的交互方法的研究更是 VR 文化遗产保护领域研究的重点方向. Bekele 等[58]提出将协作VR和多模态交互方法整合到MR场景中的方案, 从文化学习的角度比较不同的沉浸式现实技术与交互方法; Azofeifa 等[59]则从更宏观的角度分析多模态人机交互系统在不同领域的应用情况, 指出 VR 和触觉技术在文化遗产领域的结合是未来文化遗产保护VR交互体验的发展方向. 通过多模态信息融合达到无须穿戴设备和额外标定就可以进行自然交互, 是西大文遗数字化国地中心的重点研究方向, 其研发的无穿戴无标定自由交互系统通过实时处理视频输入, 并结合人体姿态模型, 计算人体姿态关键点位置, 将其迁移到秦腔戏曲装扮上, 达到推广非物质文化遗产的目标.

1.4　虚拟展示

虚拟展示技术是 VR 文化遗产保护领域中最终端的重要技术, 通过提供沉浸式和互动式的体验, 丰富文化遗产的传播、保护和教育方式. 从圣安布罗吉奥大教堂的数字化研究到“Re-Live History”项目, 多个研究案例展示了VR在虚拟展示方面的广泛研究, 不仅提升教学体验, 还有助于保护原始文物, 同时提供了丰富的文化遗产背景信息, 改善了学习过程. 大量研究证实了虚拟展示在文化遗产展示中的重要性, 通过立体 VR 系统和灵活的框架设计, 可让公众更深入地体验文化遗产[60-61]. 虚拟展示技术内涵非常丰富, 本文重点介绍与文化遗产保护相关的沉浸体验和用户在文化遗产虚拟环境中的探索与互动.

1.4.1　沉浸体验

沉浸体验技术是 VR 虚拟展示中的重要部分, 研究用户通过头戴式显示器或其他显示交互设备可以感知到的内容, 包括立体视觉、高分辨率、低延迟等技术特性, 专注于提供高质量的图像和视觉效果, 以增强用户的沉浸感. Han 等[62]利用沉浸式头戴显示器, 为敦煌石窟的虚拟游览提供了新的途径; COMES 等[63]探讨了头戴式显示器在文化遗产展示领域的应用.

视觉技术是沉浸体验中的重要组成部分, 例如, 全景视频技术就是一种常见的视觉沉浸体验技术. Adão 等[64]开发了快速原型工具, 通过全景视频结合多媒体元素为用户提供沉浸式体验, 不仅降低VR开发的技术门槛, 还增强了用户的参与度; Xhako 等[65]利用全景视频技术创造游戏化的教育体验, 使学习者能够在虚拟环境中探索城市与文化遗产; Cai 等[66]则比较了人工构建的虚拟环境和全景视频在文化遗产体验中协调记忆能力效果.

除了视觉之外, 多种模态的内容也对用户的沉浸体验产生较大的影响, 通过提供多感官、多维度的互动体验, 不仅增强用户对文化遗产的感知和理解, 还为文化遗产的教育和传播提供了创新的方法和工具. Bie 等[67]强调多感官融合在非物质文化遗产VR展示中的重要性, 提升了传统手工艺衍生产品的展览体验; Cassidy 等[68]的研究表明, 混合媒体展览结合 VR, 为博物馆藏品的沉浸展示提供了新的叙事方式: 这些研究共同指出, VR 在增强观众体验和传播文化价值方面的作用. Elrawi[69]则提出一种结合视听信息与三维模型的新型展示方式, 探讨了 MR 在表现伊斯兰文化遗产中的应用; Fatta 等[70]结合三维打印技术和视频映射创造沉浸式视听场景, 增强了博物馆教育中的文化遗产展示.

还有一些研究围绕用户的特点开展沉浸式体验. Gimeno 等[71]通过多用户 AR 系统, 为室内文物展览提供了一种新颖的互动方式; Gong 等[72]建立基于VR的文化遗产展览的用户体验模型, 并提出了相应的设计策略. Giovannini 等[73]则探讨了在 VR 中使用社交世界创建沉浸式展览的可能性, 为文化遗产的展示提供了新的视角; 图9所示为西大文遗数字化国地中心研制的全视野碗幕展示系统, 与传统的 CAVE 等基于三维立体投影画面包围的沉浸式VR显示系统不同, 全视野碗幕展示系统以图形学为基础, 融合高分辨率的立体投影显示技术、多通道视景同步技术、音响技术、传感器技术等多项技术, 根据人完全视野包围的投影画面, 产生供多人共用完全沉浸式的全视野虚拟环境, 这

是对 CAVE 系统折面展示的改进, 尤其展示秦兵马俑一号坑等大场景立体空间沉浸共享效果突出.

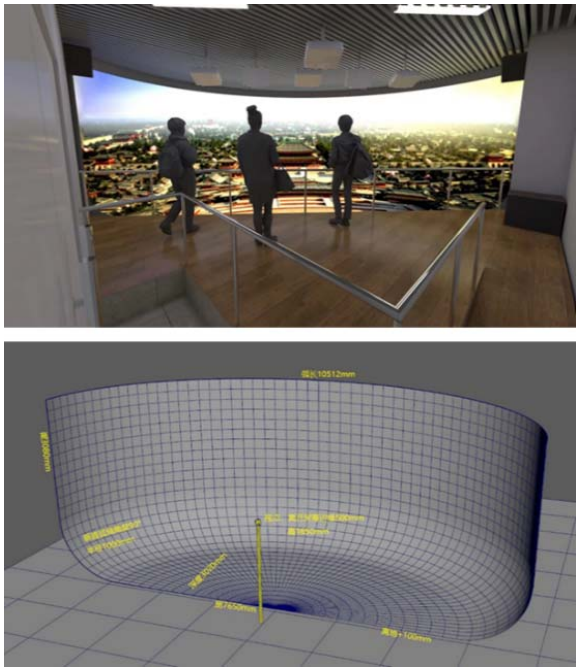


图 9 全视野碗幕展示系统

上述研究不仅展示了沉浸体验技术在文化遗产保护中的多样性, 也凸显了其在教育和旅游等领域的巨大应用潜力.

1.4.2 用户探索

用户探索指用户在虚拟环境中的自由移动和探索行为. 用户可以导航和互动, 发现新的场景、对象或信息, 强调探索性和发现性, 可用于教育、训练或娱乐等多个目的.

构建一个用户在现实生活中并不常见的场景和环境能够激发用户的兴趣, 提升用户探索的能动性. Cabral 等[74]利用 X3D 标准研究了古代历史城市建筑的精确重建和探索; 数字化圣安布罗吉奥大教堂展示[28]从三维勘测到 VR 体验的工作流程, 为公众提供了深入了解这一历史建筑的机会; Barbara 的 Re-Live History 项目[75]则专注于通过 VR 构建史前非物质文化遗产沉浸式体验, 强调了教育目标与技术应用的结合; 程秀峰等[76]强调 VR 在提升用户探索非物质文化遗产方面的作用, 通过沉浸式体验让用户深入了解非遗文化: 由于这些非遗内容在生活中并不常见, 因此有效地激发了用户的探索欲望. Barbera 等[77]展示了 VR 在支持文化遗址方面的潜力, 尤其是在 COVID-19 流行期间, 它提供了一种安全的访问方式; Castiblanco Jimenez 等[78]通过 VR 为意大利瓦莱达奥斯塔大区的 MAV 手工艺博物馆提供虚拟元素, 增强了藏品的参与性和互动性. 水下考古学的 VR 展示是一个更显著的例子, 通过提供沉浸式体验和高度互动的界面, 极大地丰富了水下考古遗址的探索和展示方式. Haydar 等[79]通过 VR 和 AR 对水下考古遗址进行可视化和互动研究, 为考古学家和公众提供了新见解; Plecher 等[80]利用 VR 模拟水下考古发现, 通过沉浸式严肃游戏的方式让用户能够体验水下文化遗产.

增加角色引导[81]是另一种有效地带领用户探索虚拟环境、认识虚拟内容的方法, 通过结合人工智能和高级推荐系统, 为用户提供了更加个性化和丰富的探索体验. 在虚拟博物馆开发中, 可以通过数字化作品和角色引导提供高度沉浸感的体验. Farella 等[82]设计了一个具有问题解答能力的三维虚拟化身, 使用 BERT 模型和 Unity 平台为文化遗产遗址的沉浸式导航提供帮助.

2 VR 文化遗产保护应用场景

VR 在文化遗产保护领域应用广泛, 不仅在教育领域发挥着重要作用, 如通过 VR 让学生们进行圣安德鲁大教堂的虚拟游览; 而且在游戏领域也有所作为, 如通过 VR 游戏重现历史场景; 还被应用于博物馆, 通过虚拟展览增强藏品的可访问性; 在叙事领域, 通过沉浸式体验丰富叙述和传达历史故事. 这些多样化的应用场景, 都凸显了 VR 在文化遗产保护过程中提升用户体验、促进文化理解和交流方面的重要作用.

2.1 教 育

利用 VR 增强文化遗产保护的教育, 是 VR 和文化遗产保护交叉研究的重点探索方向. 大量研究展示了 VR 在文化遗产保护教育方面的应用潜力, 尤其是对非物质文化遗产的接受、体验和期望有着显著影响[83-84].

在文化遗产教育中, Ciriza-Mendívil 等[85]分析幼儿教育实习教师对遗产的看法, 指出了遗产教育在大学学位课程中的缺失; Clarke-Vivier 等[86]则通过与乡村博物馆的合作, 展示了如何利用 VR 改善博物馆藏品的获取和保护, 以及如何通过教育合作带来变革性的学习机会. 还有一些研究专注于评估 VR 在教育中的效果. 例如, Clerici 等[87]开发一款再现古罗马宫殿的 VR 应用程序, 通过对比不同体验方式, 发现 VR 体验能够提高用户的参与度和学习效果; Fabola 等[88]通过让一年级学生使用 VR

进行圣安德鲁大教堂修道院的虚拟游览，如图 10 所示，探讨了 VR 作为文化遗产学习工具的有效性.



a. 1318 年 VR 重建场景　　b. 真实场景

图 10　圣安德鲁教堂修道院[88]

一些新的工具和平台的研究同样推动 VR 文化遗产教育的发展. 李旭健等[89]通过开发和应用 VR 在文化遗产领域的新工具和平台，展示了这些技术如何增强文化遗产的数字化展示和教育效果; Joo-Nagata 等[90]则通过在移动学习环境中集成 VR 和导航功能，展示了这些技术如何提高教学过程的效率; Frontoni 等[91]对定制以文化遗产为主题的 AR 应用进行潜力评估，并提出开发新工具的必要性，以便用户能够成为 AR/VR 体验内容的制作者.

2.2　严肃游戏

严肃游戏是一种以游戏的形式实现教育、训练、市场推广、健康干预等非娱乐目的的游戏. VR 严肃游戏以其沉浸式体验和互动性，正在成为文化遗产保护领域的创新工具. 这种结合了教育性与娱乐性的游戏形式，不仅提升学习者的参与度和兴趣，还加深了他们对文化遗产的理解和保护意识. Anderson 等[92]指出，严肃游戏技术的发展与娱乐游戏技术的发展同步，为历史教学和博物馆参观提供了新的视角，其中强调严肃文化遗产游戏在交流、信息视觉表达、协作机制、互动性和娱乐性方面的优势，并提出了一系列理论、方法和技术的最新进展，如图 11 所示，严肃游戏“罗马重生”对于罗马建筑的虚拟展示有利于相关知识内容的传播体验; 类似地，Aydi 等[93]通过开发 VR 严肃游戏，研究探讨 VR 如何增强城市历史遗迹和品牌的形象，并提高了玩家对文化遗产的沉浸体验和记忆深度; 一款描述 20 世纪 40 年代小马尼拉生活的 VR 严肃游戏[94]，也展示了如何利用 VR 重现历史场景; Zhang 等[95]通过 VR 兵马俑严肃游戏的案例，探讨了 VR 严肃游戏在传播秦始皇陵和兵马俑文化中的应用，为观众提供了一次深刻的时空之旅体验; 杨媛媛等[96]分析文化遗产保护在严肃游戏中应用的目的、玩法和范围，探讨了在面向未来的文化遗产教育中严肃游戏可能发挥的潜力和方向; Theodoropoulos 等[97]系统地回顾了 VR 严肃游戏在文化遗产中的应用，强调了其在文化价值传播方面的重要性.



图 11　严肃游戏罗马重生示意图[92]

图 12 所示为研究者成功地让参与者体验古代奥林匹克运动会的场景[98]，这种体验不仅增强人们对历史事件的理解，还激发了对文化遗产的兴趣，使人们更加尊重文化遗产.

严肃游戏设计原则也备受关注. Egea-Vivancos 等[99]分析了沉浸式 VR 严肃游戏在教育中的应用，并提出一个 CREAM 模型，强调公民教育、历史相关性、参与性、适用性和多模态等原则在设计 VR 严肃游戏时的重要性; Haahr[100]提出基于位置的 AR 游戏在文化遗产中的应用，探讨了如何通过定位游戏机制和叙事结构技术，营造沉浸于文化内容的体验场景; Pybus 等[101]以加拿大议会中心大楼为案例，探讨将 BIM 转化为游戏引擎场景的方法，这种创新方法被应用于 VR 环境中，旨在实现教育宣传的目标.

2.3　博物馆

VR 博物馆[102]是 VR 在文化遗产保护与展示领域最常见的应用. VR 以其独特的沉浸感和互动性，为公众提供了一种全新的体验方式，让人们即使身处异地，也能近距离感受博物馆的氛围和文化遗产的魅力[103]. Adamczyk[104]探讨谷歌文化学院如何利用 VR，结合高分辨率成像和移动出版，为图书馆、档案馆和博物馆提供服务，并创造出独特的在线体验; “永恒博物馆”项目[105]进一步强调 VR 博物馆在教育和文化传承方面的重要性，展示如何利用 VR 重建艺术品原貌，提供了丰富的教育体验，也促使用户深思历史价值及文化遗产的保护和传承; 贺溪等[106]深入探讨元宇宙视域下传统村落数字博物馆的构建策略与发展，以长沙段湘

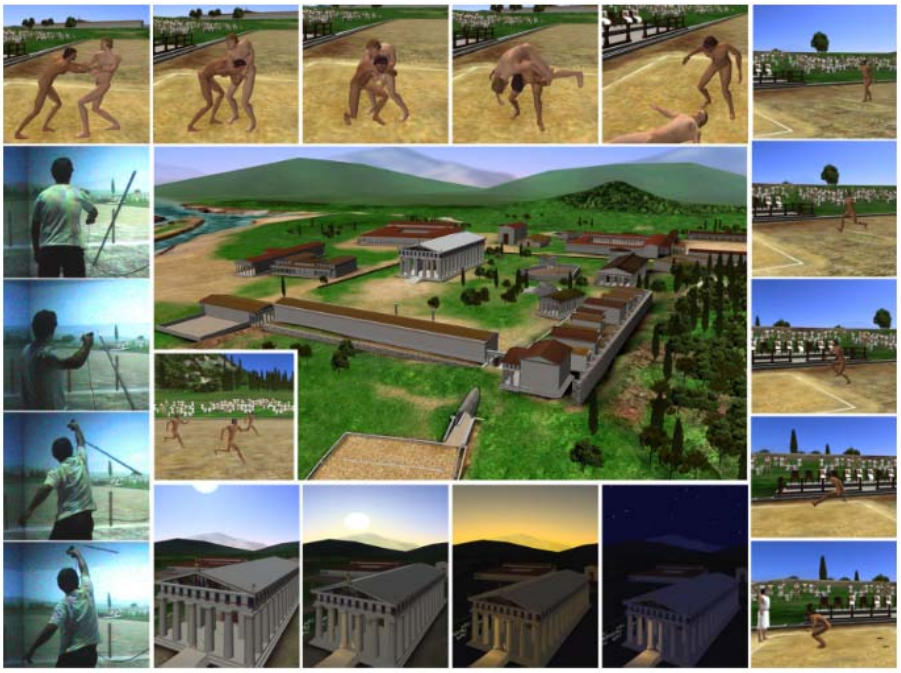


图 12 产品“漫步古奥林匹亚”截图和现场捕捉[98]

江古镇群为案例，展示如何利用数字技术将传统村落转化为虚拟博物馆，提供了一种新型的教育和文化体验方式；与之相似，HETOR 项目[107]通过自动构建沉浸式 VR 世界，将开放数据转化为个人博物馆，如图 13 所示，进一步促进公民参与文化遗产的保护；徐梦瑶等[108]深入探讨沉浸式传播理论在博物馆等文化遗产领域的应用，为文化遗产的数字化保护和传承提供了有益参考.



图 13 生成的个人博物馆的例子[107]

随着技术的发展，VR 博物馆不再局限于传统的展览方式，而是开始探索更多创新的展示形式. Barrile 等[109]讨论三维勘测与 MR 在考古博物馆中的应用，展示了如何通过新技术增加游客的沉浸感，并提供信息丰富的三维模型；Hammady 等[110]构建一个 MR 框架，评估了 MR 作为博物馆全息虚拟导游的潜力，通过 MuseumEye MR 应用程序，为游客提供了一种全新的、更具吸引力的虚实融合文化遗产博物馆体验；2024 年，Iacono 等[111]通过 VR，为巴尔齐-罗西考古博物馆的旧石器时代遗址提供一种新颖的保护与传播途径，让公众能够从全新的视角感受历史.

2.4 叙 事

近年来，学术界越来越重视在文化遗产保护领域中利用 VR 进行叙事. 从“The Thing Growing”交互式叙事项目[112]中，可以看到 VR 在艺术创作和文化阐释的潜力，以沉浸式体验的方式展示了艺术和文化遗产，让观众们亲身感受其魅力；Arendttorp 等[113]利用手势评估技术进行非物质文化遗产的数字化，不仅彰显 VR 叙事交互性方面的优势，也凸显了其在展现文化多样性中不可或缺的关键作用.

利用特别的三维模型辅助叙事也值得关注. Clini 等[114]利用 HBIM, AR 和 VR，为意大利佩萨罗的奥利维耶里-马奇雷利宫创建高精细的三维数字模型，不仅提升建筑知识和 VR 叙事的互动性，还优化了文化遗产资产的保护和管理策略；Graham 等[115]则将 BIM 技术应用于加拿大国会山庄这一国家历史地标的修复工程，并将其转化为 VR 体验，深入探讨了 BIM 在传承文化遗产价值方面的潜力与应用.

大量研究通过技术手段增强文化遗产的叙事性和互动性. Kostopoulou 等[116]利用 AR 为城市空

间中的档案材料和共享记忆提供一种新型的叙事方式, 通过在线地理标记门户网站和MR导航体验设计一种支持多平台参与的体验, 不仅丰富城市叙事, 也强化了场所体验和情景学习; Papamichail等[117]则从可持续发展的角度出发提出一种数据驱动的方法, 通过分析开源多媒体工具在文化叙事中的应用, 为文化遗产保护提供了新的视角; Rizvic等[118]在VR叙事中使用演员增强用户对虚拟环境的沉浸感, 提升了虚拟文化遗产展示的教育价值; Tong 等[119]将具有适应性的电影虚拟现实(cinematic VR, CVR)应用于土著叙事, 通过与毛利文化遗址的说书人合作, 探讨如何使用适应性强的VR系统拍摄并展示360°的故事视频, 不仅验证了该系统的有效性, 也收集了关于在毛利人讲故事中使用CVR的文化适宜性的反思和意见.

3　未来发展趋势

VR 在文化遗产保护领域的应用前景极为广阔. 通过与人工智能、大数据分析和机器学习等前沿技术的融合与创新, 该技术为文化遗产的保护和传承提供了新的可能性, 不仅能够提升VR体验的个性化和智能化水平, 而且还能通过跨学科的合作实现更深层次的文化遗产理解和保护, 也预示着文化遗产保护将进入一个全新的发展阶段. VR在文化遗产保护领域的发展将体现在智能化、互通性和演变性3个方面.

(1) 智能化方面. VR 通过智能对象及其行为的建模, 实现虚拟环境中人机交互的智能化升级, 包括智能体化身的交互能力提升, 以及内容生产的自动化和智能化, 使得用户能够更加自然地与虚拟文化遗产进行互动, 同时提高了内容生成的效率和质量. 此外, 随着自然语言处理和计算机视觉等技术的进步, VR 体验能够更加精准地理解和响应用户的需求, 实现更加个性化的服务.

(2) 互通性方面. VR 的发展促进了虚拟与现实之间的无缝连接, 通过多模态数据的互通, VR能够实现虚拟对象或环境与真实对象或环境之间的交互, 为用户提供一个更加真实和丰富的体验, 这种互通性不仅体现在视觉和听觉上, 还包括触觉、嗅觉等多种感官体验, 使得用户能够在虚拟环境中获得与现实世界相似的感受. 为了达成多感官多模态的效果, VR硬件的发展至关重要, Tanaka等[120]开发的触觉手套拥有 548 个传感器, 能够识别物体和物体的质量; Trinitatova等[121]研究可穿戴触觉界面 DeltaGlove 的有效性, 通过虚拟环境控制机械臂时提供多模式触觉反馈; Sundaram 等[122]研发特殊触觉反馈工具, 通过刺激大脑在多个身体部位呈现触觉效果.

(3) 演变性方面. VR 的进步使得虚拟对象模型能够根据物理对象的形态和状态变化进行实时或及时的更新, 生命体和时变体模型能够根据自然规律进行自我演化, 保持虚拟文化遗产与现实世界的同步性. 该特性为文化遗产的动态保护和展示提供了可能, 使得文化遗产能够在虚拟世界中持续地生长和变化, 以适应不断变化的社会环境和用户需求.

这些技术的发展, 将催生智能体导游、无须穿戴设备的自然人机交互、智能化的文化遗产内容生成, 以及公共文化服务平台的创新演变等新趋势, 为文化遗产的数字化保护和传播开辟了新的途径.

4　结　语

本文综述了 VR 在文化遗产保护中的技术发展和应用现状, 强调了其在未来文化遗产保护中的潜力和发展方向. 通过跨学科的合作和创新技术的应用, 可以更有效地保护和传承人类的文化遗产, 让它们在数字时代焕发新的生命力. 未来, 应继续探索 VR 在文化遗产保护中的新方法和新途径, 实现更广泛的社会参与和文化价值的传播.

参考文献(References):

[1] Geng Guohua, He Xuelei, Wang Meili, *et al*. Research progress on key technologies of cultural heritage activation[J]. Journal of Image and Graphics, 2022, 27(6): 1988-2007(in Chinese)
(耿国华, 何雪磊, 王美丽, 等. 文化遗产活化关键技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2022, 27(6): 1988-2007)

[2] He Yun'ao. On the studies of cultural heritage[J]. Journal of Nanjing University (Philosophy, Humanities and Social Sciences), 2007, 44(3): 127-139(in Chinese)
(贺云翱. 文化遗产学初论[J]. 南京大学学报(哲学·人文科学·社会科学), 2007, 44(3): 127-139)

[3] Shan Jixiang. Conservation of urban cultural heritage and construction of cultural city[J]. City Planning Review, 2007(5): 9-23(in Chinese)
(单霁翔. 城市文化遗产保护与文化城市建设[J]. 城市规划, 2007(5): 9-23)

[4] Li Ning, Su Jingyu, Guo Xiaodong, *et al*. Research on disaster prevention and reduction system for cultural heritage[J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2011(2): 48-51(in Chinese)
(李宁, 苏经宇, 郭小东, 等. 文化遗产防灾减灾体系研究

[J]. 中国文物科学研究, 2011(2): 48-51)

[5] Mei Lianhua. Reflections on the protection of cultural heritage in the process of urbanization[J]. Shandong Social Sciences, 2011(1): 56-60(in Chinese)
(梅联华. 对城市化进程中文化遗产保护的思考[J]. 山东社会科学, 2011(1): 56-60)

[6] Zhao Q P. A survey on virtual reality[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 52(3): 348-400

[7] Pan Zhigeng, Yuan Qingshu, Chen Shengnan, *et al*. State of the art on the digital presentation and interaction of culture heritage[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2020, 47(3): 261-273(in Chinese)
(潘志庚, 袁庆曙, 陈胜男, 等. 文化遗产数字化展示与互动技术研究与进展[J]. 浙江大学学报(理学版), 2020, 47(3): 261-273)

[8] Ming Y, Me R C, Chen J K, *et al*. A systematic review on virtual reality technology for ancient ceramic restoration[J]. Applied Sciences, 2023, 13(15): Article No.8991

[9] Zhong H, Wang L L, Zhang H Q. The application of virtual reality technology in the digital preservation of cultural heritage[J]. Computer Science and Information Systems, 2021, 18(2): 535-551

[10] Huang Yonglin, Tan Guoxin. Research on the digital protection and development of Chinese intangible cultural heritage[J]. Journal of Huazhong Normal University (Humanities and Social Sciences), 2012, 51(2): 49-55(in Chinese)
(黄永林, 谈国新. 中国非物质文化遗产数字化保护与开发研究[J]. 华中师范大学学报(人文社会科学版), 2012, 51(2): 49-55)

[11] Geng Guohua, Feng Long, Li Kang, *et al*. A literature review on the digitization and virtual restoration of cultural relics in the Mausoleum of Emperor Qinshihuang[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(5): 710-721(in Chinese)
(耿国华, 冯龙, 李康, 等. 秦陵文物数字化及虚拟复原研究综述[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(5): 710-721)

[12] Adão T, Pádua L, Hruška J, *et al*. Bringing together UAS-based land surveying and procedural modelling of buildings to set up enhanced VR environments for cultural heritage[C] //Proceedings of the 24º Encontro Português de Computação Gráfica e Interação. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 1-8

[13] Berrett B E, Vernon C A, Beckstrand H, *et al*. Large-scale reality modeling of a university campus using combined UAV and terrestrial photogrammetry for historical preservation and practical use[J]. Drones, 2021, 5(4): Article No.136

[14] Barrile V, Bernardo E, Bilotta G, *et al*. “Bronzi di Riace” geomatics techniques in augmented reality for cultural heritage dissemination[C] //Proceedings of the 24th Italian Conference on Geomatics and Geospatial Technologies. Heidelberg: Springer, 2022: 195-215

[15] D’Annibale E, Tassetti A N, Malinverni E S. From panoramic photos to a low-cost photogrammetric workflow for cultural heritage 3D documentation[C] //Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague: ISPRS, 2013: 213-218

[16] Prado E, Gómez-Ballesteros M, Cobo A, *et al*. 3D modeling of Rio Miera wreck ship merging optical and multibeam high resolution points cloud[C] //Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague: ISPRS, 2019: 159-165

[17] Rihani N. Interactive immersive experience: digital technologies for reconstruction and experiencing temple of Bel using crowdsourced images and 3D photogrammetric processes[J]. International Journal of Architectural Computing, 2023, 21(4): 730-756

[18] Sancak N, Uzun F, Turhan K, *et al*. Photogrammetric model optimization in digitalization of architectural heritage: Yedikule fortress[C] //Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague: ISPRS, 2023: 1403–1410

[19] Banfi F, Roascio S, Mandelli A, *et al*. Narrating ancient roman heritage through drawings and digital architectural representation: from historical archives, UAV and LIDAR to virtual-visual storytelling and HBIM projects[J]. Drones, 2023, 7(1): Article No.51

[20] Bruno F, Bruno S, De Sensi G, *et al*. From 3D reconstruction to virtual reality: a complete methodology for digital archaeological exhibition[J]. Journal of Cultural Heritage, 2010, 11(1): 42-49

[21] Bruno F, Ricca M, Lagudi A, *et al*. Digital technologies for the sustainable development of the accessible underwater cultural heritage sites[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(11): Article No.955

[22] Buyuksalih G, Kan T N, Özkan G E, *et al*. Preserving the knowledge of the past through virtual visits: from 3D laser scanning to virtual reality visualisation at the Istanbul Çatalca İnceğiz caves[J]. PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, 2020, 88(2): 133-146

[23] Ouyang Hong. Cultural relics 3D data acquisition and application in the palace museum[J]. Digital Library Forum, 2019(7): 48-53(in Chinese)
(欧阳宏. 故宫院藏文物的三维数据采集与应用[J]. 数字图书馆论坛, 2019(7): 48-53)

[24] Liu Jun, Geng Guohua. 3D reality-based modeling and virtual exhibition technology for culture archaeological sites[J]. Computer Engineering, 2010, 36(20): 286-290(in Chinese)
(刘军, 耿国华. 文化遗址的三维真实感建模与虚拟展示技术[J]. 计算机工程, 2010, 36(20): 286-290)

[25] Banfi F. The evolution of interactivity, immersion and interoperability in HBIM: digital model uses, VR and AR for built cultural heritage[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(10): Article No.685

[26] Chiabrando F, Sammartano G, Spanò A. Historical buildings models and their handling via 3D survey: from points clouds to user-oriented HBIM[C] //Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague: ISPRS, 2016: 633-640

[27] Abidin M I Z, Razak A A. Modelling of the prophet mosque in virtual reality[C] //Proceedings of the 8th International Conference on Software and Computer Applications. New York: ACM Press, 2019: 320-324

[28] Banfi F, Brumana R, Stanga C. A content-based immersive experience of basilica of sant’ambrogio in Milan: From 3d survey

to virtual reality[C] //Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague: ISPRS, 2019: 159-166

[29] Ahn J, Wohn K Y. Lessons learned from reconstruction of a virtual Grotto-from point cloud to immersive virtual environment[C] //Proceedings of the Digital Heritage. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2015: 651-654

[30] Gabellone F. A reconstructive proposal of Diocletian's baths for the 5G experimentation in Rome[J]. Archeologia e Calcolatori, 2020, 31(2): 189-198

[31] Barreau J B, Esnault E, Foucher J, *et al*. 3D modelling of a 15th century city gate of Rennes: Portes Mordelaises[J]. Virtual Archaeology Review, 2020, 11(22): 41-55

[32] D'Agostino P, Merone R, Pugliese F. Material modelling for immaterial fruition. The virtual and augmented reality of the Aqua Augusta Campaniae and the Piscina Mirabilis[J]. DISEGNARE CON, 2021, 14(27): Article No.18

[33] Banfi F, Stanga C, Landi A G. Virtual access to heritage through scientific drawing, semantic models and VR-experience of the Stronghold of Arquata del Tronto after the earthquake[J]. SCIentific RESearch and Information Technology, 2023, 13(1): 83-100

[34] Zhang Jing. Research and implementation 3D reconstruction techniques of site scenes based on laser scan data[D]. Xi'an: Northwest University, 2012(in Chinese)
(张婧. 基于激光扫描数据的遗址场景三维重建技术的研究与应用[D]. 西安: 西北大学, 2012)

[35] Zeng Sheng, Geng Guohua, Zou Linbo, *et al*. Real spatial terrain reconstruction of first person point-of-view sketches[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(8): 1861-1871(in Chinese)
(曾升, 耿国华, 邹林波, 等. 第一人称视角地形轮廓草图的真实空间重建[J]. 光学精密工程, 2020, 28(8): 1861-1871)

[36] Börlin S, Gasser R, Spiess F, *et al*. 3D model retrieval using constructive solid geometry in virtual reality[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2020: 373-374

[37] Bucciero A, Mainetti L. Model-driven generation of collaborative virtual environments for cultural heritage[C] //Proceedings of the New Trends in Image Analysis and Processing. Heidelberg: Springer, 2013: 268-277

[38] Fu Y P, Yan Q A, Liao J, *et al*. Seamless texture optimization for RGB-D reconstruction[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2023, 29(3): 1845-1859

[39] Liu Jun, Zhou Mingquan, Geng Guohua, *et al*. Fragments splicing method for Terra-cotta Figures of Qin dynasty based on contours and fracture surfaces matching[J]. Computer Engineering, 2014, 40(1): 181-185(in Chinese)
(刘军, 周明全, 耿国华, 等. 基于轮廓与断面匹配的秦俑碎片拼接方法[J]. 计算机工程, 2014, 40(1): 181-185)

[40] Matthys M, De Cock L, Vermaut J, *et al*. An "animated spatial time machine" in co-creation: reconstructing history using gamification integrated into 3D city modelling, 4D web and transmedia storytelling[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(7): Article No.460

[41] Medyńska-Gulij B, Zagata K. Experts and gamers on immersion into reconstructed strongholds[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(11): Article No.655

[42] Alkhatib Y J, Forte A, Bitelli G, *et al*. Bringing back lost heritage into life by 3D reconstruction in Metaverse and virtual environments: the case study of Palmyra, Syria[C] //Proceedings of the International Conference on Extended Reality. Heidelberg: Springer, 2023: 91-106

[43] Díaz-Kommonen L. Interactive diorama: a virtual reality (VR) reconstruction of the anatomy lesson of doctor Nicolaes Tulp by Rembrandt, 1632[C] //Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 258-261

[44] Gherardini F, Santachiara M, Leali F. 3D virtual reconstruction and augmented reality visualization of damaged stone sculptures[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 364: Article No.012018

[45] Li Jijunnan, Geng Guohua, Zhou Mingquan, *et al*. A computer-assisted system for virtual relic assembling based on adjacency constraint[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2016, 46(1): 55-60(in Chinese)
(李姬俊男, 耿国华, 周明全, 等. 一种基于邻接约束的交互式文物模型复原系统[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2016, 46(1): 55-60)

[46] Alatrash S, Arnab S, Antlej K. Interactive storytelling experience for museums in the era of COVID-19[C] //Proceedings of the 15th European Conference on Games Based Learning. Frankfurt: Dechema e.V, 2021: 795-802

[47] Bachvarov A, Chotrov D, Yordanov Y, *et al*. Conceptual model of the VR module for "Virtual plaza for interactive presentation of Bulgarian cultural heritage"[J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2172(1): Article No.090008

[48] Bolognesi C M, Sorrenti D, Bassorizzi D. Utilizing stereography to compare cultural heritage in the past and now: an interactive AR application[J]. Applied Sciences, 2023, 13(15): Article No.8773

[49] Cardoso J C S. Accessible tangible user interfaces in eXtended reality experiences for cultural heritage[C] //Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2021: 18-25

[50] Checa D, Gatto C, Cisternino D, *et al*. A framework for educational and training immersive virtual reality experiences[C] //Proceedings of the Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics: 7th International Conference. Heidelberg: Springer, 2020: 220-228

[51] Andolina S, Hsieh Y T, Kalkofen D, *et al*. Designing for mixed reality urban exploration[J]. Interaction Design and Architecture (s), 2021(48): 33-49

[52] Zhou Pengbo, Li Jijunnan, Shui Wuyang. Virtual restoration of broken artifacts based on fracture surface[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(9): 2176-2179(in Chinese)
(周蓬勃, 李姬俊男, 税午阳. 基于断裂面匹配的破碎文物的虚拟修复方法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(9): 2176-2179)

[53] Baik A. The use of interactive virtual BIM to boost virtual tourism in heritage sites, historic Jeddah[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(9): Article No.577

[54] Wu Meng. Preliminary exploration of the application of CAVE

technology for the display of historical building spaces: a case study of the immersive virtual reality exhibition of Sanxitang[J]. Journal of Gugong Studies, 2016(1): 194-200(in Chinese)
(吴萌. 应用 CAVE 技术进行历史建筑空间的展示应用初探——以三希堂沉浸式虚拟现实原状陈列展示为例[J]. 故宫学刊, 2016(1): 194-200)

[55] Bischof D, Sieck J, Fransman J, *et al*. Interactive recipe book-enhance your traditional recipe book: showing cultural heritage through cooking[C] //Proceedings of the 2nd African Conference for Human Computer Interaction: Thriving Communities. New York: ACM Press, 2018: Article No.62

[56] Antinozzi S, di Filippo A, Musmeci D. Immersive photographic environments as interactive repositories for preservation, data collection and dissemination of cultural assets[J]. Heritage, 2022, 5(3): 1659-1675

[57] Barbara J, Koenitz H, Bakk Á K. The ethics of virtual reality interactive digital narratives in cultural heritage[C] //Proceedings of the 14th International Conference on Interactive Digital Storytelling. Heidelberg: Springer, 2021: 288-292

[58] Bekele M K, Champion E. A comparison of immersive realities and interaction methods: cultural learning in virtual heritage[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2019, 6: Article No.91

[59] Azofeifa J D, Noguez J, Ruiz S, *et al*. Systematic review of multimodal human–computer interaction[J]. Informatics, 2022, 9(1): Article No.13

[60] Chessa M, Garibotti M, Rossi V, *et al*. A virtual holographic display case for museum installations[C] //Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2015: 69-73

[61] Chotrov D, Bachvarov A. A flexible framework for web-based virtual reality presentation of cultural heritage[J]. AIP Conference Proceedings, 2021, 2333(1): Article No.140002

[62] Han P H, Chen Y S, Liu I S, *et al*. A compelling virtual tour of the dunhuang cave with an immersive head-mounted display[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2020, 40(1): 40-55

[63] COMES R, NEAMȚU C. Head-mounted display wearable devices ergonomics and usability[J]. Acta Technica Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, 2023, 65(3S): 619-628

[64] Adão T, Pádua L, Fonseca M, *et al*. A rapid prototyping tool to produce 360° video-based immersive experiences enhanced with virtual/multimedia elements[J]. Procedia Computer Science, 2018, 138: 441-453

[65] Xhako A, Zidianakis E, Kontaki E, *et al*. Gamified experiences using 360° photography: a methodology for creating gamified learning experiences in 360° virtual environments[C] //Proceedings of the 16th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments. New York: ACM Press, 2023: 53-61

[66] Cai S D, Ch'ng E, Li Y. A comparison of the capacities of VR and 360-degree video for coordinating memory in the experience of cultural heritage[C] //Proceedings of the 3rd Digital Heritage International Congress Held Jointly with 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2018: 1-4

[67] Bie B M, Zhang Y, Fu R R. Study on display space design of off-line experience stores of traditional handicraft derivative product of ICH based on multi-sensory integration[C] //Proceedings of the 17th International Conference on Design, User Experience, and Usability: Users, Contexts and Case Studies. Heidelberg: Springer, 2018: 459-470

[68] Cassidy C A, Fabola A, Rhodes E, *et al*. The making and evaluation of Picts and pixels: mixed exhibiting in the real and the unreal[C] //Proceedings of the Immersive Learning Research Network: 4th International Conference. Heidelberg: Springer, 2018: 97-112

[69] Elrawi O M. The use of mixed-realities techniques for the representation of Islamic cultural heritage[C] //Proceedings of the International Conference on Machine Vision and Information Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 58-63

[70] Fatta F, Fischnaller F. Enhancing cultural heritage exhibits in Museum Education: 3D printing technology: video mapping and 3D printed models merged into immersive audiovisual scenography (FSJ-V3D Printing+ MM Installation)[C] //Proceedings of the 3rd Digital Heritage International Congress Held Jointly with 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2018: 1-4

[71] Gimeno J, Olanda R, Martinez B, *et al*. Multiuser augmented reality system for indoor exhibitions[C] //Proceedings of the Human-Computer Interaction: 13th International Conference. Heidelberg: Springer, 2011: 576-579

[72] Gong Q, Zou N, Yang W J, *et al*. User experience model and design strategies for virtual reality-based cultural heritage exhibition[J]. Virtual Reality, 2024, 28(2): Article No.69

[73] Giovannini E C, Bono J. Creating virtual reality using a social virtual environment: phygital exhibition at the museum passion in sordevolo[C] //Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague: ISPRS, 2023: 669-676

[74] Cabral M, Zuffo M, Ghirotti S, *et al*. An experience using X3D for virtual cultural heritage[C] //Proceedings of the 12th International Conference on 3D Web Technology. New York: ACM Press, 2007: 161-164

[75] Barbara J. Re-live history: an immersive virtual reality learning experience of prehistoric intangible cultural heritage[J]. Frontiers in Education, 2022, 7: Article No.1032108

[76] Cheng Xiufeng, Zhang Xiaolong, Zhai Shanshan. Research on the application of virtual reality in the display of intangible information resources[J]. Digital Library Forum, 2019(1): 37-42(in Chinese)
(程秀峰, 张小龙, 翟姗姗. 虚拟现实技术在非遗信息资源展示中的应用调查研究[J]. 数字图书馆论坛, 2019(1): 37-42)

[77] Barbera R, Condorelli F, Di Gregorio G, *et al*. A case study for the design and implementation of immersive experiences in support of Sicilian cultural heritage[C] //Proceedings of the International Conference on Image Analysis and Processing. Heidelberg: Springer, 2022: 174-185

[78] Castiblanco Jimenez I A, Nonis F, Olivetti E C, *et al*. Exploring

user engagement in museum scenario with EEG—a case study in MAV craftsmanship museum in Valle d'Aosta region, Italy[J]. Electronics, 2023, 12(18): Article No.3810

[79] Haydar M, Roussel D, Maïdi M, *et al*. Virtual and augmented reality for cultural computing and heritage: a case study of virtual exploration of underwater archaeological sites (preprint)[J]. Virtual Reality, 2011, 15(4): 311-327

[80] Plecher D A, Keil L, Kost G, *et al*. Exploring underwater archaeology findings with a diving simulator in virtual reality[J]. Frontiers in Virtual Reality, 2022, 3: Article No.901335

[81] Besoain F, Jego L, Gallardo I. Developing a virtual museum: Experience from the design and creation process[J]. Information, 2021, 12(6): Article No.244

[82] Farella M, Chiazzese G, Lo Bosco G. Question answering with BERT: designing a 3D virtual avatar for Cultural Heritage exploration[C] //Proceedings of the 21st Mediterranean Electrotechnical Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2022: 770-774

[83] Ch'ng E, Cai Y Y, Thwaites H. Special issue on VR for culture and heritage: the experience of cultural heritage with virtual reality (part II): guest editors' introduction[J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2017, 26(4): Article No.iii-iv

[84] Ch'ng E, Li Y, Cai S D, *et al*. The effects of VR environments on the acceptance, experience, and expectations of cultural heritage learning[J]. Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH), 2020, 13(1): Article No.7

[85] Ciriza-Mendívil C D, Mendioroz A, Hernández de la Cruz J M, *et al*. Cultural heritage in early childhood education. An analysis of the perception of future[J]. Historia Social y de la Educación, 2023, 12(3): 1-19

[86] Clarke-Vivier S, Bishop R, Markin J. Small tech, big impact: twenty-first century educational collaborations to preserve and share rural museum collections[J]. Journal of Museum Education, 2021, 46(1): 127-137

[87] Clerici M, Boffi P, Lanzi P L, *et al*. One day in a roman domus: human factors and educational properties involved in a virtual heritage application[C] //Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2022: 692-697

[88] Fabola A, Miller A. Virtual reality for early education: a study[C] //Proceedings of the Immersive Learning Research Network: 2nd International Conference. Heidelberg: Springer, 2016: 59-72

[89] Li Xujian, Li Hao, Xiong Jiupeng. Applications of virtual reality technology in the field of cultural heritage[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(22): 50-58(in Chinese)
(李旭健, 李皓, 熊玖朋. 虚拟现实技术在文化遗产领域的应用[J]. 科技导报, 2020, 38(22): 50-58)

[90] Joo-Nagata J, Abad F M, Giner J G B, *et al*. Augmented reality and pedestrian navigation through its implementation in m-learning and e-learning: evaluation of an educational program in Chile[J]. Computers & Education, 2017, 111: 1-17

[91] Frontoni E, Paolanti M, Puggioni M, *et al*. Measuring and assessing augmented reality potential for educational purposes: SmartMarca project[C] //Proceedings of the Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics: 6th International Conference. Heidelberg: Springer, 2019: 319-334

[92] Anderson E F, McLoughlin L, Liarokapis F, *et al*. Developing serious games for cultural heritage: a state-of-the-art review[J]. Virtual Reality, 2010, 14(4): 255-275

[93] Aydi Y, Elleuch M. A design of virtual reality based game for dual enhancement of city monuments and brand image[J]. International Journal of Serious Games, 2024, 11(1): 63-82

[94] Vu S, Cliburn D, Helgren J, *et al*. Recreating Little Manila through a virtual reality serious game[C] //Proceedings of the 3rd Digital Heritage International Congress Held Jointly with 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2018: 1-4

[95] Zhang L, Qi W Y, Zhao K, *et al*. VR games and the dissemination of cultural heritage[C] //Proceedings of the Distributed, Ambient and Pervasive Interactions: Understanding Humans: 6th International Conference. Heidelberg: Springer, 2018: 439-451

[96] Yang Yuanyuan, Ji Tie, Zhang Duoduo. Design and application of cultural heritage in serious games[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(4): 312-317(in Chinese)
(杨媛媛, 季铁, 张朵朵. 文化遗产在严肃游戏中的设计与应用[J]. 包装工程, 2020, 41(4): 312-317)

[97] Theodoropoulos A, Antoniou A. VR games in cultural heritage: a systematic review of the emerging fields of virtual reality and culture games[J]. Applied Sciences, 2022, 12(17): Article No.8476

[98] Gaitatzes A, Christopoulos D, Papaioannou G. The ancient olympic games: being part of the experience[C] //Proceedings of the 5th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2004: 19-28

[99] Egea-Vivancos A, Arias-Ferrer L. Principles for the design of a history and heritage game based on the evaluation of immersive virtual reality video games[J]. E-Learning and Digital Media, 2021, 18(4): 383-402

[100] Haahr M. Creating location-based augmented-reality games for cultural heritage[C] //Proceedings of the Serious Games: 3rd Joint International Conference. Heidelberg: Springer, 2017: 313-318

[101] Pybus C, Graham K, Doherty J, *et al*. New realities for Canada's parliament: a workflow for preparing heritage BIM for game engines and virtual reality[C] //Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague: ISPRS, 2019: 945-952

[102] Zhu Xiaodong, Zhou Mingquan, Geng Guohua. Research of visual museum developing model[J]. Computer Applications and Software, 2005, 22(6): 34-35+107(in Chinese)
(朱晓冬, 周明全, 耿国华. 虚拟博物馆开发模式研究[J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(6): 34-35+107)

[103] Geng Guohua, He Xiaowei, Wang Meili, *et al*. Research progress on wisdom museums in metaverse[J]. Journal of Image and Graphics, 2023, 28(6): 1567-1584(in Chinese)
(耿国华, 贺小伟, 王美丽, 等. 元宇宙下的智慧博物馆研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2023, 28(6): 1567-1584)

[104] Adamczyk P. The Google cultural institute: tools for libraries, archives, and museums[C] //Proceedings of the 15th ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries. New York: ACM Press, 2015: 1

[105] Aiello D, Fai S, Santagati C. Virtual museums as a means for promotion and enhancement of cultural heritage[C] //Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague: ISPRS, 2019: 33-40

[106] He Xi, Liao Jian, Huang Jia, *et al*. On construction strategies and development of digital museum in traditional village from the perspective of metaverse——A case study of Xiangjiang ancient town cluster in Changsha[J]. Journal of Hengyang Normal University, 2023, 44(3): 24-29(in Chinese)
(贺溪, 廖健, 黄佳, 等. 元宇宙视域下传统村落数字博物馆构建策略与发展研究——以长沙段湘江古镇群为例[J]. 衡阳师范学院学报, 2023, 44(3): 24-29)

[107] Scarano V, Andreoli R, Monaco D, *et al*. Re-using open data by automatically building immersive virtual reality worlds as personal museums[C] //Proceedings of the 20th Annual International Conference on Digital Government Research. New York: ACM Press, 2019: 297-305

[108] Xu Mengyao, Zhang Chen. Research on digital protection and design strategy of cultural heritage based on immersive communication theory[J]. Screen Printing, 2023(11): 89-91(in Chinese)
(徐梦瑶, 张琛. 基于沉浸式传播理论的文化遗产数字化保护与设计策略探究[J]. 丝网印刷, 2023(11): 89-91)

[109] Barrile V, Bernardo E, Fotia A, *et al*. A combined study of cultural heritage in archaeological museums: 3D survey and mixed reality[J]. Heritage, 2022, 5(3): 1330-1349

[110] Hammady R, Ma M H, Al-Kalha Z, *et al*. A framework for constructing and evaluating the role of MR as a holographic virtual guide in museums[J]. Virtual Reality, 2021, 25(4): 895-918

[111] Iacono S, Scaramuzzino M, Martini L, *et al*. Virtual reality in cultural heritage: a setup for Balzi Rossi museum[J]. Applied Sciences, 2024, 14(9): Article No.3562

[112] Anstey J, Pape D, Sandin D J. Building a VR narrative[C] //Proceedings of the Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VII. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000, 3957: 370-379

[113] Arendttorp E M N, Winschiers-Theophilus H, Rodil K, *et al*. Grab it, while you can: a VR gesture evaluation of a co-designed traditional narrative by indigenous people[C] //Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2023: Article No.308

[114] Clini P, Quattrini R, Mariotti C, *et al*. From point cloud data to HBIM for public performance spaces knowledge, management and storytelling: Palazzo Olivieri in Pesaro[J]. DISEGNARE CON, 2023, 16(31): Article No.3

[115] Graham K, Chow L, Fai S. From BIM to VR: defining a level of detail to guide virtual reality narratives[J]. Journal of Information Technology in Construction, 2019, 24: 553-568

[116] Kostopoulou E, Javornik A, Koutsolampros P, *et al*. Mediated spatial narratives: experiencing archival material and shared memories in urban space[C] //Proceedings of the 4th Media Architecture Biennale Conference. New York: ACM Press, 2018: 118-127

[117] Papamichail M D, Symeonidis A L. Data-driven analytics towards software sustainability: the case of open-source multimedia tools on cultural storytelling[J]. Sustainability, 2021, 13(3): Article No.1079

[118] Rizvic S, Boskovic D, Bruno F, *et al*. Actors in VR storytelling[C] //Proceedings of the 11th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2019: 1-8

[119] Tong L W, Lindeman R W, Lukosch H, *et al*. Applying cinematic virtual reality with adaptability to indigenous storytelling[J]. ACM Journal on Computing and Cultural Heritage, 2024, 17(2): Article No.28

[120] Tanaka Y, Serfaty J, Lopes P. Haptic source-effector: full-body haptics via non-invasive brain stimulation[C] //Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2024: Article No.411

[121] Trinitatova D, Tsetserukou D. Study of the effectiveness of a wearable haptic interface with cutaneous and vibrotactile feedback for VR-based teleoperation[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2023, 16(4): 463-469

[122] Sundaram S, Kellnhofer P, Li Y Z, *et al*. Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove[J]. Nature, 2019, 569(7758): 698-702