



· 文化遗产数字化保护 ·

面向文化遗产知识传播的百戏俑 VR 体验系统

徐锦宁¹, 温超¹, 耿国华², 唐勇博², 刘丹¹, 赵炜祎¹

(1. 西北大学 智能交互与信息艺术研究中心, 陕西 西安 710127; 2. 西北大学 信息科学与技术学院, 陕西 西安 710127)

摘要 秦始皇陵及兵马俑坑作为世界文化遗产, 承载着深厚的中华民族精神与血脉。在秦陵 K9901 陪葬坑出土的百戏俑, 生动反映了秦代百戏艺术等宫廷娱乐活动及百戏艺人形象, 为后人了解秦代社会提供了一个新的视角, 具有重要历史、艺术和科学价值。当前已有秦俑数字化工作主要围绕兵马俑陪葬坑及文物展开, 鲜有以百戏俑为对象的数字化研究与实践。该文旨在针对百戏俑这一重要文化遗产, 利用虚拟现实(VR)技术对秦百戏俑的知识传播与体验问题展开研究。首先, 对百戏俑三维模型数据进行处理和加工, 通过基于人工势场的重定向行走和基于球体相交的碰撞检测算法, 引导用户在 VR 环境中的运动, 实现了复杂交互动作的实时与精确反馈; 其次, 采用基于学习的渐进式设计方法, 搭建了秦百戏俑 VR 体验系统; 最后, 结合技术接受与使用统一理论(UTAUT)模型和用户行为倾向, 从知识传播效果(KDR)、有用性(PE)、易用性(EE) 3 个方面对百戏俑 VR 与传统传播方式(纪录片和网页)进行比较研究, 并对用户体验数据及其差异性做分析评估。实验结果表明, 与传统方式相比, 百戏俑 VR 体验系统显著提高了用户的学习动机和探索意愿, 增强了受众对百戏俑文化遗产的知识体验, 为面向年轻群体的文化遗产知识传播提供了有效的解决方案。

关键词 虚拟现实; 百戏俑; 文化遗产知识传播; 人工势场; 用户体验

中图分类号: TP311 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2025-01-007

The VR experience system of acrobat figure for cultural heritage knowledge dissemination

XU Jinning¹, WEN Chao¹, GENG Guohua², TANG Yongbo²,
LIU Dan¹, ZHAO Weiyi¹

(1. Intelligent Interaction & Information Art Research Center, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract As the world cultural heritage, the Mausoleum of Qinshihuang with the Terracotta Warriors pits, carries the deep spirit and bloodline of the Chinese nation. The acrobat figure unearthed in the Qin Mausoleum's K9901 burial pit, vividly reflects the acrobat arts and other court entertainment activities of Qin Dynasty and shows the image of acrobat artists at that time. It provides a new perspective for future generations to understand the society of the Qin Dynasty, with important historical, artistic, and scientific value. Currently the

收稿日期: 2024-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1523301)

第一作者: 徐锦宁, 女, 从事交互设计、文化遗产数字化和虚拟现实研究, 2529359572@qq.com。

通信作者: 温超, 男, 教授, 博士生导师, 从事文化遗产数字化保护、虚拟现实与可视化设计研究, wenchao@nwu.edu.cn。

digitalization of the Terracotta Warriors mainly focuses on Warriors burial pits and cultural relics, there are few digitalized researches and practices targeting the acrobat figure. For the acrobat figure, the important cultural heritage, this paper aims to conduct research on the knowledge dissemination and experience of the acrobat figure using virtual reality (VR) technology. Firstly, the 3D data of the acrobat figure is processed, the user's movement in the VR environment is guided by the redirected walking algorithm based on artificial potential fields, and the real-time and accurate feedback of the complex interactive actions is achieved by spherical intersection based collision detection algorithm; secondly, a Qin Dynasty Baixi VR experience system is constructed by adopting the progressive design method based on learning; finally, combining with the unified theory of acceptance and use (UTAUT) model and the user's behavioral tendency, Baixi VR is compared with the traditional ways (documentary and webpage) of cultural heritage knowledge dissemination in aspects of knowledge dissemination results (KDR), performance expectancy (PE), and effort expectancy (EE), then the users' experience data and their differences are analyzed and evaluated. The experimental results show that compared with the traditional approach, the Baixi VR experience system significantly improves the users' motivation and willingness of exploration, and enhances the audiences' knowledge experience of the cultural heritage of the acrobat figure, which provides an effective solution for the dissemination of cultural heritage knowledge in the audience, especially in the young group of the audience.

Keywords virtual reality; acrobat figure (Baixi); cultural heritage knowledge dissemination; artificial potential fields; user experience

数字技术的不断发展为文化遗产带来了多姿多彩的展示与阐释方式,有效扩大了文化遗产的传播范围和文化价值^[1]。秦始皇帝陵及兵马俑坑作为世界文化遗产,不仅是因为其壮观的规模、丰富的埋藏品称著于世,更因其蕴含着巨大综合价值而备受社会各界的关注^[2]。1999 年,位于秦始皇帝陵园东南部,内外城间的 K9901 陪葬坑中出土了 11 件破碎的陶俑,这些陶俑形态健硕、瘦削不等、姿态各异,造型风格与秦兵马俑截然不同,试掘简报中详细介绍了所修复的 6 件陶俑^[3],认为这些陶俑是宫廷娱乐百戏活动的象征。百戏,又名杂技,是古代杂乐散技的总称,秦和西汉时称之为角抵,到东汉时称之为百戏,并为后来历代沿用^[4]。秦始皇将六国技艺文化集于咸阳宫中,统称为“角抵俳优之戏”^[5]。百戏俑坑是中国墓葬历史上首次出现以整个陪葬坑为单位来表现百戏艺术等宫廷娱乐活动及百戏艺人形象^[6]。秦百戏俑内涵丰富多姿,呈现出秦代社会的不同侧面,具有极高的历史、艺术和科学价值。自 20 世纪 90 年代起,以西北大学为代表的科研单位已开始采用数字化手段对秦陵文物展开虚拟复原与展示等研究,并取得了一系列成果^[7-9],为秦俑的数字化保护做出了贡献。然而,已有秦俑数字化工作主要围绕兵马俑陪葬坑及文物展开,鲜有以百戏俑为对象的数字化研究与实践。百戏俑当前

的展示与传播仍采用较传统方式,如线下书籍、展览、网页图像和数字影像等,这些方式受时空限制,很难满足参观者近距离、沉浸式观赏需求。

目前虚拟现实(virtual reality, VR)技术被广泛用于文化遗产数字化领域^[10-11],相较于传统的文化遗产展示方式,大众对 VR 技术的接受程度较高^[12]。国内外学者在 VR 文化遗产展示与体验方面进行了很多研究^[13-18]。Mortara 等认为 VR 技术的空间特性能够强化用户对历史场景和物体对象的空间感知^[15];Cannavò 等结合使用有形界面和语音界面设计了一种沉浸式 VR 系统^[16],从沉浸感、临场感、用户体验、可用性和参观意愿评估其对用户的影响,表明基于该 VR 系统有效增加了文化遗产对普通用户的吸引力;Wen 等设计了秦陵 VR 系统^[17],构建了基于虚拟现实与艺术体验的评价体系,并对该 VR 系统进行体验评估,显示出 VR 在文化遗产复原与展示方面的优势;Fu 等搭建了一个交互式虚拟现实系统 RestoreVR^[18],让体验者在虚拟洞窟中修复敦煌壁画,与传统展示方式相比,RestoreVR 不仅改善了用户体验,还增强了观者对古代壁画保护方法的认知。这些研究反映出 VR 文化遗产的优势以及用户对 VR 带来的沉浸式互动体验表现出很高的兴趣。但随着 VR 应用的普及和人们(尤其是年轻群体)对数字文化遗产内容的期望提升,单纯优化 VR

系统交互体验已经不能满足受众日益增长的文化知识和知识体验需求,如何利用VR技术有效地提升文化遗产知识传播质量,成为VR文化遗产研究的关键问题^[19]。

当前,研究者开始关注VR文化遗产的知识传播与学习体验问题^[20-24]。如Petrelli等通过对比研究罗马文化遗产数字化案例^[22],发现VR系统能够有效地展示与传播文物的原貌和文化背景,促进游客感受到“文化的存在”,强化游客对文化遗产信息的认知;Jin等以汉代画作《汉宫春晓图》为案例^[23],设计了一个虚拟现实交互系统,通过评估发现用户对《汉宫春晓图》相关知识学习的有效性和积极性明显提高,反映出VR在文化遗产知识传播与学习方面的价值;Gao等设计了一个学习圣诞文化的沉浸式VR系统^[24],通过评估发现VR提供的临场感改善了学习者跨文化互动的表现,验证了VR在文化学习方面的实际价值。基于此,针对百戏俑这一重要的文化遗产,不但亟需运用VR来增强大众对它的感知和体验,更需要通过VR系统向年轻受众有效传播百戏俑蕴含的历史文化知识,这也成为了百戏俑VR系统研究的核心。

综上所述,本文旨在利用VR技术面向秦百戏俑的文化知识传播与体验问题展开研究。主要研究工作分为2个阶段:第一个阶段,基于用户调研和需求分析确定百戏俑VR系统的设计目标,在百戏俑三维模型处理和加工基础上,通过新的基于人工势场的重定向行走和基于球体相交的碰撞检测算法,并采用以学习者为中心的渐进式设计方法^[25],对秦陵百戏俑进行数字化重构,搭建秦陵百戏俑的VR体验系统,让用户在虚拟环境中沉浸式感知秦百戏俑历史文化;第二个阶段,对51名用户进行百戏俑VR用户体验研究,结合技术接受与使用统一理论(unified theory of acceptance and use of technology, UTAUT)^[26]与用户行为倾向^[27],从知识传播效果(knowledge dissemination result, KDR)、有用性(performance expectancy, PE)、易用性(effort expectancy, EE)3个方面对百戏俑VR与传统文化遗产知识传播方式(纪录片和网页)进行比较研究。本文的主要贡献有:①首次构建了一个基于知识传播的秦百戏俑VR体验系统,搭建了一个具有高度沉浸感和趣味性的文化遗产知识体验环境;②提出以知识传播效果、有用性和易用性为核心,通过对比百戏知

识不同传播方式,进行百戏俑VR系统的知识体验评估;③结合相关性分析获取影响VR文化遗产知识体验的关键因素,验证了VR系统在提升百戏文化遗产知识传播效果方面的有效性。

1 系统构建

VR提供的沉浸式环境让文化遗产知识的展示传播更加多元化、个性化、自由化^[28-30]。为了明确目标用户对百戏俑VR文化遗产体验的具体需求,我们主要针对18~45岁为主的年轻人群体进行了线上调研,以掌握他们对百戏俑的基本了解程度、对VR系统使用态度及对文化遗产VR体验的主要期望等。受访者251人主要为大学生(70%),其中18~25岁占比最多(73.2%),36~45岁及45岁以上占比较少(主要为领域专家)。通过用户的核心需求分析,确立了百戏俑VR系统的设计目标为通过高质量的虚拟现实体验促进百戏俑文化遗产知识的传播与学习,即建立高质量的沉浸式体验和提高用户对秦陵百戏俑的知识认知度。

1.1 数据处理与方法描述

1.1.1 百戏俑三维模型处理

百戏俑VR系统使用的三维模型原始数据来自于我们前期的数据采集和整理^[9]。由于考古发掘的百戏俑多为碎片(块),几乎没有整俑,我们先运用三维激光扫描完成碎片信息采集,并对三维碎片数据进行预处理,接着采用碎裂面提取及断裂面匹配算法^[31],实现百戏俑碎片的计算机辅助拼接和百戏俑个体虚拟修复,最后,结合模型处理方法得到百戏俑高精度三维数字模型(见图1)。在此基础上,使用三维建模工具对百戏俑在逼真度上进行艺术化加工,拆分重构百戏俑模型,为俑体黏结部分重建缺失的模型面片,并在处理后的模型上添加骨骼并设置权重、制作角色动作(见图2)。

1.1.2 基于人工势场的重定向行走

百戏俑VR系统中需要用户通过物理移动完成一定任务,由于VR环境中用户自由移动常会遇到碰触物理边界和障碍物的情况,因此VR系统一般通过重定向行走(redirected walking, RDW)^[32]来引导用户避开物体,然而传统的RDW方法普遍存在路径规划不准确,移动体验不流畅等问题。针对该问题,本系统采用了一种基于人

工势场 (artificial potential fields, APF) 的 APF-RDW 方法。该方法为中动“机器人”, 研究表明, APF-RDW 明显优于传统的 RDW 方法^[33-34]。在 APF-RDW 中, 势场由 2 部分组成: 障碍物产生的排斥势场和目标点产生的吸引势场, 机器人的运动方向由势场的梯度决定, 即沿着势场梯度最小

阻力的方向移动。APF-RDW 方法通过计算每个障碍物和每个其他用户产生的力向量来确定用户的转向方向, 这些力向量指向远离障碍物和用户的方向, 其大小与用户到障碍物或用户的距离成反比, 算法具体过程如下。

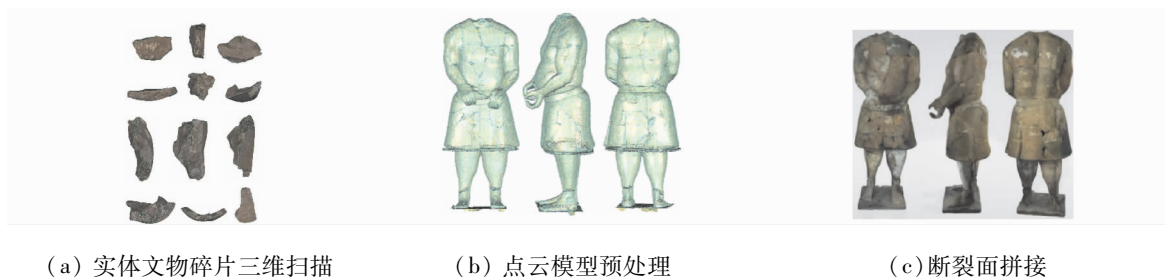


图 1 5 号百戏俑三维模型处理过程

Fig. 1 Processing of the 3D model of acrobat figure No. 5

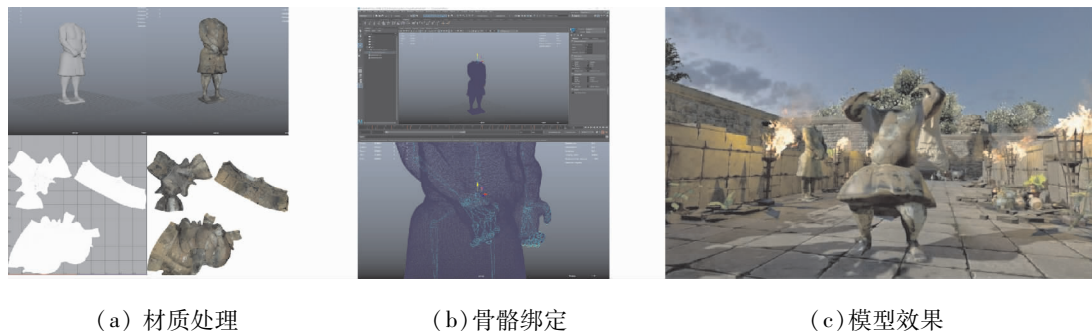


图 2 5 号百戏俑的艺术化加工过程

Fig. 2 Artistic processing of acrobat figure No. 5

首先, 吸引势能 U_{att} 通常定义为目标位置对用户的影响作用, 可以用公式(1)表示,

$$U_{att} = \frac{1}{2} k_{att} \|q - q_{goal}\|^2 \quad (1)$$

式中: k_{att} 是吸引力系数; q 是用户当前位置; q_{goal} 是目标位置。对应的引力 F_{att} 是吸引势能的负梯度, 如公式(2)所示,

$$F_{att} = -\nabla U_{att} = -k_{att}(q - q_{goal}) \quad (2)$$

其次, 斥力势能 U_{rep} 定义为障碍物对用户的影响作用, 用公式(3)表示,

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{\|q - q_{obs}\|} - \frac{1}{d_0} \right)^2 & \text{if } \|q - q_{obs}\| \leq d_0 \\ 0 & \text{if } \|q - q_{obs}\| > d_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_{rep} 是斥力系数; q 是用户当前位置; q_{obs} 是障碍物位置; d_0 是斥力作用的影响范围。对应的斥力 F_{rep} 是斥力势能的负梯度, 用公式(4)表示,

$$F_{rep} =$$

$$\begin{cases} k_{rep} \left(\frac{1}{\|q - q_{obs}\|} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{\|q - q_{obs}\|^3} (q - q_{obs}) & \text{if } \|q - q_{obs}\| \leq d_0 \\ 0 & \text{if } \|q - q_{obs}\| > d_0 \end{cases} \quad (4)$$

最后, 合成力 F 是引力 F_{att} 和斥力 F_{rep} 的合成, 如公式(5)所示,

$$F = F_{att} + \sum_i F_{rep,i} \quad (5)$$

式中: $F_{rep,i}$ 表示来自第 i 个障碍物的斥力。

算法根据合成力向量 F 的大小和方向, 以及用户的当前运动状态 (静止、行走、头部转动), 计算出在下一帧中需要应用到虚拟视点的增量旋转量, 即转向速率。这个虚拟转向速率是用户头部在物理空间旋转时其对应虚拟空间需要以多快的速度转动。转向速率的计算考虑了以下几个因素。

1) 基础旋转速率 (baseRate)。是一个常量, 表示用户在不转动头部的情况下可以应用的少量重定向。

2) 移动转向速率。与用户的行走速度相关,

它指导用户在物理空间中走曲线,而在虚拟空间中沿着直线行走。这个速率是根据用户的速度和合成力向量的大小来调整的。合成力向量越大,表示用户越接近障碍物,因此需要更大的转向速率来避免碰撞,其计算如公式(6)所示,

$$\text{walkingRate} = \begin{cases} 360\left(\frac{v}{2\pi r}\right), & \text{if } v > V \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中: r 是用户行走路径的曲率半径; v 是用户的行走速度; V 是一个预设的最小速度阈值。当用户的行走速度超过这个阈值时,移动转向速率会根据合成力向量的大小进行调整。

3) 头部转向速率。是基于用户头部转动的速度来计算的,当用户在行走时转动头部,算法可以通过调整用户的虚拟视点来保持用户的平衡。这个速率受到合成力向量 F 的影响,因为合成力向量指示了用户应该转向的方向,其计算如公式(7)所示,

$$\text{headRate} = \begin{cases} \theta(\text{angRateScale}), & \text{if } v > V \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式中: θ 是用户头部的转动速度,angRateScale 是一个比例因子,它根据用户头部转动是放大还是压缩虚拟世界中的旋转而变化。

合成力向量 F 的大小被用来调整用户的转向速率。如果合成力向量较大,意味着用户需要更积极地转向以避免障碍物或其他用户。这种调整是通过一个缩放因子 s 来实现的,该因子根据合成力向量的平均长度 $\|F_a\|$ 来计算,如公式(8)所示,

$$s = \frac{\|F\|}{\|F_a\|}(\text{scaleMultiplier}) \quad (8)$$

式中:scaleMultiplier 是一个预先设定的缩放因子。

转向速率(包括移动转向速率和头部转向速率)会根据合成力向量的大小进行调整。调整后的转向速率计算如公式(9)和(10)所示,

$$\text{walkingRate}' = \text{clamp}[s(\text{walkingRate}), 0, \text{maxWalkingRate}] \quad (9)$$

$$\text{headingRate}' = \text{clamp}[s(\text{headingRate}), 0, \text{maxheadingRate}] \quad (10)$$

最终,算法会计算出在下一帧中需要应用到虚拟视点的增量旋转量 incrementalRotation。这个旋转量是基础转向速率、调整后的移动转向速率和头部转向速率中的最大值,并乘以时间间隔

$$\Delta t, \text{如公式(11)所示,} \\ \text{incrementalRotation} = \max(\text{baseRate}, \text{walkingRate}', \text{headRate}') \Delta t \quad (11)$$

这个增量旋转量将根据合成力向量的方向进行标记,以确保用户的运动方向与合成力向量的方向一致。

用户在百戏俑 VR 系统移动时,算法会根据房间的布局和障碍物实时生成 incrementalRotation,即用户在 VR 世界的转向速率,并将其应用到虚拟世界用户的移动和旋转上。APF-RDW 方法利用这种物理空间和虚拟空间之间的转向速率差可以引导用户自然地避开障碍物,从而使用户在使用百戏俑 VR 系统时能够更自由地走向被交互的鼎或俑等对象,减少了因空间限制带来的不适感和对用户交互动作的限制(见图 3),增强了 VR 体验沉浸感,也使得用户可以更自然地进行扛鼎、寻撞等独特交互动作。

上述计算所用的常数值如表 1 所示。

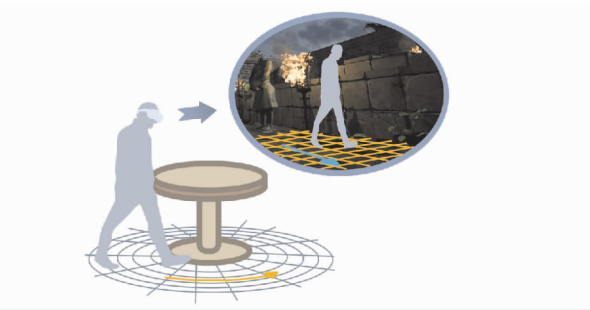


图 3 基于 APF-RDW 的百戏俑 VR 移动示例
Fig. 3 Example of user movement in Baixi VR with APF-RDW

表 1 常量参数值

Tab. 1 Constant parameter values	
常量名	值
baseRate/ (°)/s	1.5
v/(m/s)	0.1
r/m	7.5
angRateScale(compress)	0.85
angRateScale(dilate)	1.3
scaleMultiplier	2.5
maxWalkingRate/ (°)/s	1.5
maxheadingRate/ (°)/s	30

1.1.3 基于球体相交的碰撞检测

在百戏俑 VR 系统中,由于用户会与鼎、撞等物体完成特别的交互,这些交互动作均需要系统支持用户在虚拟环境中手柄与所互动物体精确的碰撞检测。传统 VR 系统通常依赖矩形或多边形

碰撞体来进行碰撞检测,这在处理复杂交互时存在性能瓶颈和精度不足的问题。针对以上问题,百戏俑 VR 系统使用了一种新的基于球形碰撞体相交的碰撞检测算法,该算法不仅计算量小,且能更精确地适应复杂交互动作,其具体步骤如下。

1) 计算对应模型中的交互部位的球心位置。针对模型每个边缘位置点 $V = [V_x, V_y, V_z]$,用取平均值之后的坐标作为它的球心,如公式(12) 所示,

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_j \tag{12}$$

式中: Q 是模型的球心位置; V_j 是模型上的第 j 个坐标点,由 X, Y, Z 3 个值组成; N 是模型上点的个数。

2) 计算碰撞球半径 R ,如公式(13) 所示,
 $\text{dist}(Q, V) = Q - V$
 $R = \text{dist}$ (13)

式中: Q 是模型的球心位置; V 是模型上的坐标点; $\text{dist}(Q, V)$ 是球心位置到 V 的距离,为球半径 R 。

以 Q 为球心, R 为半径,构建碰撞球体;同理按照这种方式,对操控手柄模型构建一个 S 为球心, r 为半径的碰撞体。

3) 检测模型碰撞球体是否与操控手柄模型的碰撞球体相交。如公式(14) 所示,

$$\text{distance} = \sqrt{(Q_x - S_x)^2 + (Q_y - S_y)^2 + (Q_z - S_z)^2} \tag{14}$$

式中: distance 为 2 个碰撞体球心间的距离; Q_x, Q_y, Q_z 是模型的碰撞球体坐标、 S_x, S_y, S_z 是操控手柄模型的碰撞球体坐标。当 $\text{distance} \leq R + r$ 时,发生相交; $\text{distance} > R + r$ 时,则不相交。

基于该检测算法,百戏俑 VR 系统可以精确地判断用户手柄与互动物体之间进行复杂动作时的碰撞情况,并能以更快的速度和更低的延迟响应,确保了 VR 交互动作的实时反馈,从而得到更加流畅的用户体验。

1.2 基于渐进式方法的 VR 场景设计

依据百戏俑重点知识,百戏俑 VR 场景(scene)设计策略基于用户的活动与环境做出^[35],采用以学习(体验)者为中心的渐进式设计进行虚拟场景构建^[21]。本次设计以学习体验为中心,结合百戏俑的文化背景,渐进式创建了多层次的体验场景,引导用户发挥主动性,以促进他们对百戏俑的理解与认识。如图 4 所示,本系统共设计了 3 个体验场景,分别是导览场景、探索场景、互动场景。用户进入系统后,将依次体验 3 个场景,首先通过导览场景认识相关秦陵背景知识和 VR 基本操作,其次通过探索场景了解百戏俑的历史、文化及艺术等知识^[36],最后通过互动场景引导用户通过亲身交互,主动形成对秦百戏俑文化遗产信息的行为认知,从而实现基于 VR 的知识传播。

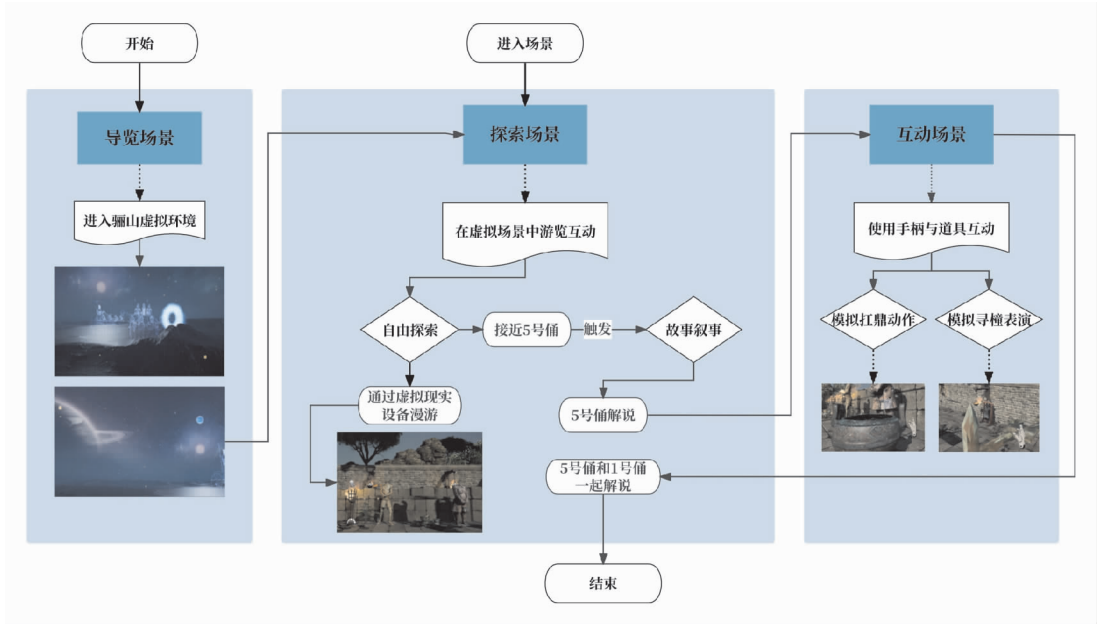


图 4 百戏俑 VR 体验流程图

Fig. 4 Flowchart of Baixi VR system experience

如图 5 所示,导览场景主要以骊山虚拟场景为主,旨在让体验者在平静的氛围中逐渐沉浸,进而提升他们在骊山等虚拟环境中的专注度,用户置身于该场景中时,可四处转动视角并跟随摄像机在虚拟场景中运动,结合旁白解说,使其在感受新奇、神秘、梦幻的虚拟场景同时,对秦始皇帝陵园及 K9901 陪葬坑等历史建立初步了解。探索场景通过自由探索和故事叙事 2 种方式,促进用户对百戏俑知识的自主学习,用户进入场景后即进入自由探索模式,在场景中进行漫游探索,并当用户接近百戏俑时会触发故事叙事部分,为了优

化用户在该场景中的体验并减少其他元素的干扰,系统有意限制了用户位置,将用户置于特定位置与百戏俑对话,使其更好了解百戏知识。互动场景则将百戏表演艺术与表演道具结合,构建了基于游戏学习的具身交互^[37],让用户体验到扛鼎、寻橦(爬竿)等百戏技艺的主要特点,用户可通过 VR 手柄举起青铜鼎,也可对青铜鼎的纹饰、形制等细节进行观赏,或模拟百戏表演中“扛鼎”的动作(如将青铜鼎高高举起后抛出),还可以靠近寻橦表演道具,通过控制手柄左右手交替逐级而上,从而体验寻橦百戏表演时的惊险与刺激。

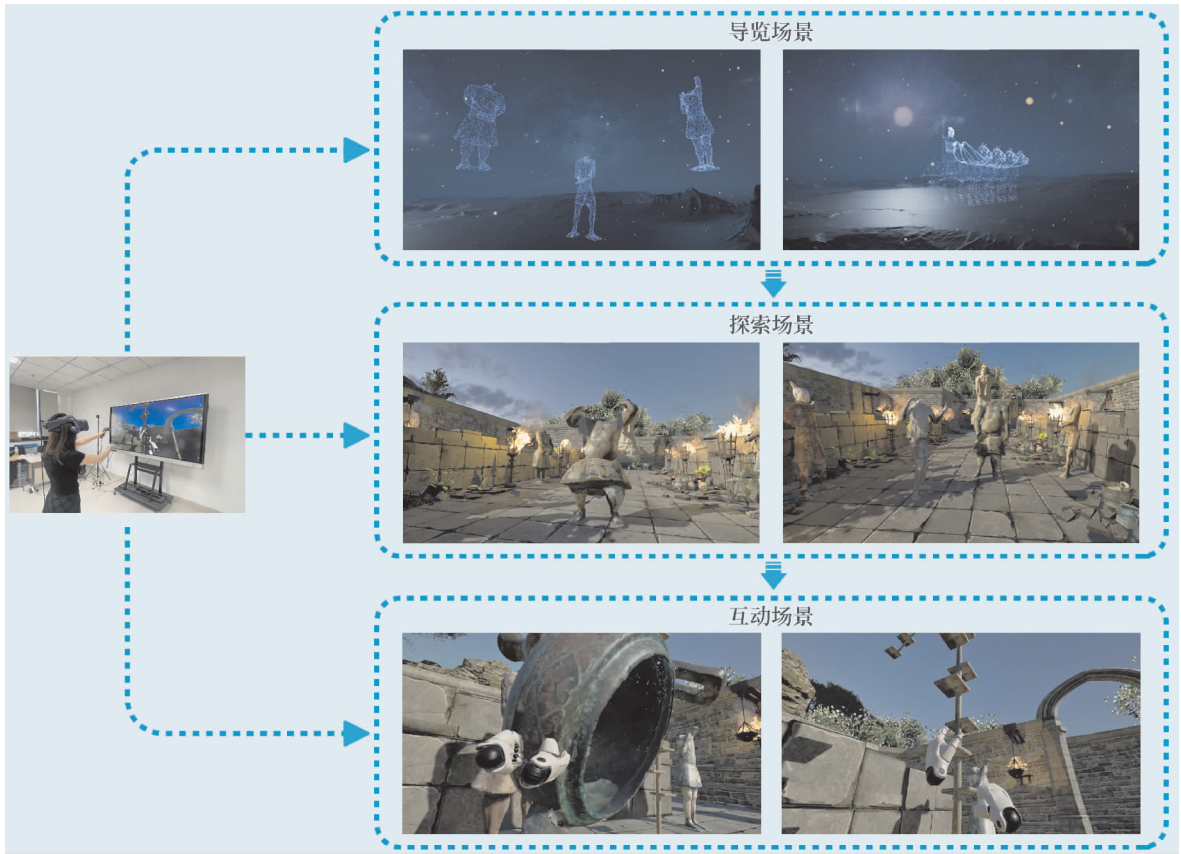


图 5 百戏俑 VR 系统中的 3 个体验场景

Fig.5 Three experience scenes in the Baixi VR system

2 系统体验评估

2.1 评估实验设计

本次针对百戏俑 VR 系统的体验评估,以纪录片(新鲜博物馆之进击的大秦第三集:大秦达人秀)和网页(秦陵博物院官网 K9901 陪葬坑相关页面)为对照组,将 VR 方式与以上 2 种传统传播方式进行比较研究,共招募了 51 名测试者参与系统评估研究,以此来验证百戏俑 VR 系统在知

识传播方面的有效性。根据 UTAUT 模型,用户技术接受的过程主要通过 PE 和 EE 感知完成,而最终的用户行为倾向和使用态度,要结合其他影响因素一起决定^[27]。因此针对百戏俑 VR 系统,本次评估主要从 3 个方面来收集和分析体验数据。①KDR,从体验后参与者对百戏俑的了解程度,以及去秦陵博物院实地参观意愿,评价(VR、纪录片、网页)3 种方式是否有效传播了百戏俑知识,并提升了用户对百戏俑的兴趣;②PE,从趣味性、沉浸感、真实性等综合指标来评价 3 种方式的有

用性;③EE,以交互、视觉效果等方面的流畅度评估 3 种方式的易用性。基于此,提出了以下 3 个假设:

H1 相比于传统的展示传播方式,百戏俑 VR 对知识传播效果有更为积极的影响;

H2 相比于传统的展示传播方式,百戏俑 VR 对有用性有更为积极的影响;

H3 相比于传统的展示传播方式,百戏俑 VR 没有对易用性产生消极影响。

根据以上假设,结合 Zotos 等的研究^[38],针对百戏俑 VR 设计了 3 份调查问卷,采用 Likert 7 分量表法进行测测量(1 分代表非常不同意,7 分代表非常同意),验证所提出的假设(见表 2)。

表 2 检验 H1、H2、H3 的问卷调查
Tab. 2 Questionnaire for testing H1、H2、H3

序号	问题内容
H1. 1	此次体验的趣味性有助于你了解百戏俑。
H1. 2	此次体验的真实性有助于你了解百戏俑。
H1. 3	本次体验提高了你对百戏俑文化的兴趣。
H1. 4	你认为这种体验可以向公众深入地展示百戏俑文化知识。
H1. 5	此次体验结束后,你有去秦陵博物院实地参观百戏俑的意愿。
H2. 1	你认为此次体验是否具有较高的趣味性?
H2. 2	你认为此次体验是否具有沉浸感?
H2. 3	你认为百戏俑服饰、姿态等细节的真实性是否有较好的表现?
H2. 4	本次体验是否让你更好地了解了百戏俑?
H2. 5	从教育工具的角度来说,你认为本次体验有助于百戏俑的传播与教育?
H3. 1	你喜欢本次体验中百戏俑的呈现方式吗?
H3. 2	在体验过程中你是否需要任何指导或帮助?
H3. 3	你认为本次体验易于操作吗?

2.2 实验过程

此次评估一共招募了年龄为 18 ~ 45 岁的 51 名参与者,包括 34 名大学生,10 名教师,7 名非教育行业工作人员。参与者们被随机分配入 VR 组、纪录片组和网页组,每组 17 人。VR 组的参与者在被告知如何使用 VR 设备之后,进入百戏俑 VR 系统。对照组分别通过观看纪录片和网页信息了解百戏俑。所有参与者在学习体验结束后,完成 3 份问卷。百戏俑 VR 体验系统在 Intel Xeon E52630 2.40 GHz CPU, NVIDIA GeForce GTX 1080 GPU 和 6 GB 内存的计算机上运行,VR 组使用 HTC VIVE 进行沉浸式交互,包括 1 个头戴式显示器、2 个无线手持控制器(手柄)、2 个

3D 空间激光跟踪站。

2.3 分析与结果

我们首先对 3 份问卷的信度进行检验,其中 Cronbach alpha 系数分别为 0.902、0.743、0.641,说明量表信度水平较高。根据数据呈现非正态分布的特征,使用 Kruskal-Wallis (K-W) 检验分析 3 组之间是否存在差异,最后用中位数对比总体结果(见图 6)。

假设 H1 的分析结果如表 3 所示,3 组用户在知识传播效果上存在显著差异,*p* 值均小于 0.01,网页组的中位数最小,纪录片组有 3 项(H1. 1、H1. 3、H1. 5)小于 VR 组,2 项(H1. 2、H1. 4)与 VR 组持平。这说明不同文化遗产传播方式在知

识传播效果存在明显差异,并且百戏俑 VR 体验系统的表现明显优于传统的传播方式。用户能在 VR 系统中自由地观察文物细节,将抽象的文化遗产知识可视化,拉近了与文物的距离,增强了学习者的好奇心,有效提高了用户的学习兴趣,并最

终影响了他们的行为倾向,加强了他们去实地参观的意愿。上述结果表明,VR 形式有效地激发了用户的学习动机,对文化遗产知识传播的效果产生了积极影响,为假设 H1 的有效性提供了充分的证据。

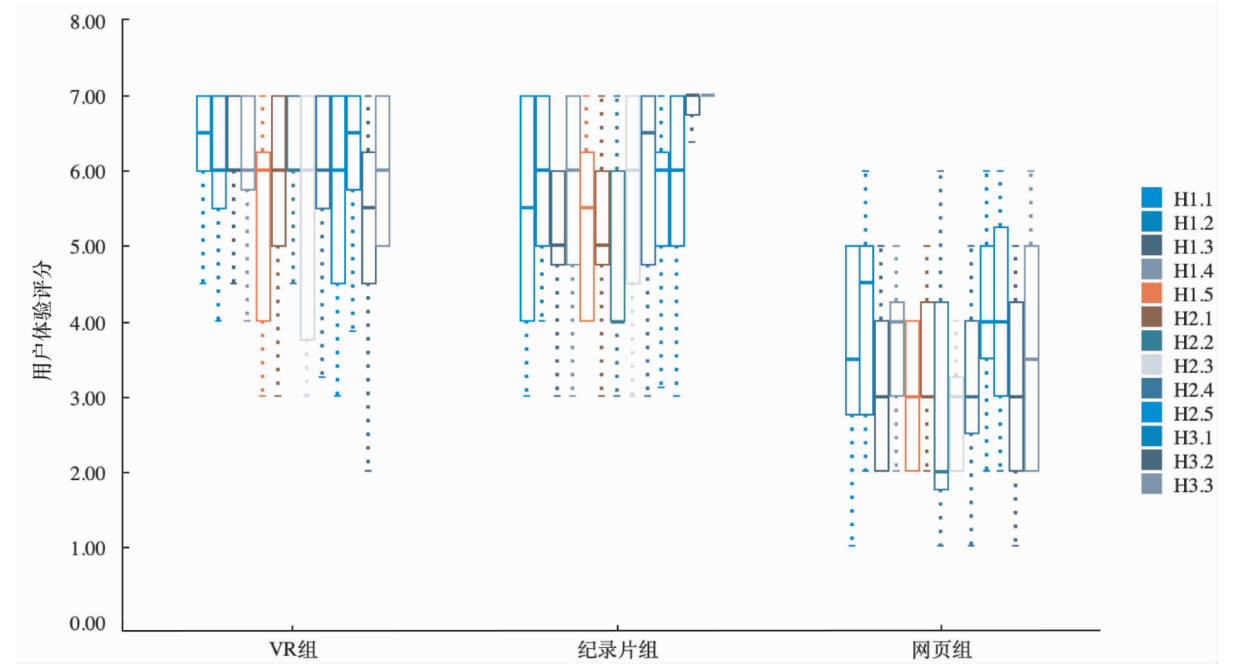


图 6 基于假设的 K-W 检验分析结果图
Fig. 6 Results of the hypothesis-based K-W test analysis

表 3 H1 问卷 K-W 检验分析结果
Tab. 3 K-W tests results for H1 questionnaire

	组别中位数 $M(P_{25}, P_{75})$			K-W 统计量 H 值	p
	纪录片组 ($n = 17$)	VR 组 ($n = 17$)	网页组 ($n = 17$)		
H1. 1	5. 500(4. 0,7. 0)	6. 500(6. 0,7. 0)	3. 500(2. 8,5. 0)	12. 377	0. 002 **
H1. 2	6. 000(5. 0,7. 0)	6. 000(5. 5,7. 0)	4. 500(2. 8,5. 0)	10. 008	0. 007 **
H1. 3	5. 000(4. 8,6. 0)	6. 000(6. 0,7. 0)	3. 000(2. 0,4. 0)	18. 594	0. 000 **
H1. 4	6. 000(4. 8,7. 0)	6. 000(5. 8,7. 0)	4. 000(3. 0,4. 3)	13. 564	0. 001 **
H1. 5	5. 500(4. 0,6. 3)	6. 000(4. 0,6. 3)	3. 000(2. 0,4. 0)	14. 817	0. 001 **

注: ** 表示 $p < 0. 01$, (P_{25}, P_{75}) 表示 25% 和 75% 分位数。

假设 H2 的分析结果如表 4 所示。3 组在系统有用性上存在显著性差异, p 值均小于 0. 01,网页组的中位数最小,纪录片组有 2 项(H2. 1、H2. 2)低于 VR 组,2 项(H2. 3、H2. 5)与 VR 组相同,1 项(H2. 4)高于 VR 组。这说明不同的传播方式在有用性上同样存在明显差异,VR 系统以其趣味性和沉浸感显著提升了用户体验,并且在重现百戏俑文物场景的真实性方面,VR 系统展现出与纪录片相媲美的效果,提供了高度的真实感和沉浸体验。基于假设 H1 的验证结果,假设 H2 进一步确认了真实性、趣味性和沉浸感对于增强 VR 系统中知识传播有效性的积极作用。但是

丰富的交互体验在一定程度上会影响系统的信息传递,对 VR 系统的学习成果带来消极影响^[39]。

总体上,该组分析结果为假设 H2 的成立提供了有效的证据。

表 4 H2 问卷 K-W 检验分析结果
Tab.4 K-W tests results for H2 questionnaire

	组别中位数 $M(P_{25},P_{75})$			K-W 统计量 H 值	p
	纪录片组($n=17$)	VR 组($n=17$)	网页组($n=17$)		
H2.1	5.000(4.8,6.0)	6.000(5.0,7.0)	3.000(3.0,4.3)	13.917	0.001**
H2.2	4.000(4.0,6.0)	6.000(6.0,7.0)	2.000(1.8,4.3)	14.133	0.001**
H2.3	6.000(4.5,7.0)	6.000(3.8,7.0)	3.000(2.0,3.3)	13.369	0.001**
H2.4	6.500(4.8,7.0)	6.000(5.5,7.0)	3.000(2.5,4.0)	13.621	0.001**
H2.5	6.000(5.0,6.3)	6.000(4.5,7.0)	4.000(3.5,5.0)	7.999	0.018*

注: **表示 $p<0.01$, (P_{25},P_{75})表示 25% 和 75% 分位数。

假设 H3 的分析结果如表 5 所示。3 组在易用性上存在显著性差异, p 值均小于 0.01,网页组的中位数仍最小,VR 组有 1 项高于(H3.1)高于纪录片组,2 项(H3.2、H3.3)低于纪录片组。这表明百戏俑 VR 体验系统并未对用户体验的易用

性产生不利影响,而且用户对于这种新颖的呈现方式表现出了极高的偏好。然而,研究同时发现系统的操作性存在进一步优化的潜力,例如可以通过引入具有信息提示功能的交互界面,以辅助用户更有效地触发与文物的互动情节。

表 5 H3 问卷 K-W 检验分析结果
Tab.5 K-W tests results for H3 questionnaire

	组别中位数 $M(P_{25},P_{75})$			K-W 统计量 H 值	p
	纪录片组($n=17$)	VR 组($n=17$)	网页组($n=17$)		
H3.1	6.000(5.0,7.0)	6.500(5.8,7.0)	4.000(3.0,5.3)	10.238	0.006**
H3.2	7.000(6.0,7.0)	5.500(4.5,6.3)	3.000(2.0,4.3)	21.023	0.000**
H3.3	7.000(6.0,7.0)	6.000(5.0,7.0)	3.500(2.0,5.0)	21.891	0.000**

注: **表示 $p<0.01$, (P_{25},P_{75})表示 25% 和 75% 分位数。

我们还对影响百戏俑知识传播效果(K1 帮助用户理解知识评分、K2 用户对百戏俑的兴趣评分、K3 知识展示的有效性评分)的体验数据和系统沉浸感做了进一步相关性分析,结果如表 6 所示。其中,沉浸感评分与 K1、K2、K3 均表现出显著的正相关性(见图 7),3 组的相关系数分别为

0.843>0、0.989>0、0.919>0。这反映出百戏俑 VR 的高沉浸性为用户带来了更高质量且更具趣味的体验,使得用户更专注于探索和获取系统展示的相关历史文化信息,从而提升了百戏俑文化遗产知识的传播质量。

表 6 知识传播效果体验数据的 Pearson 相关分析结果

Tab.6 Pearson correlation analysis results of knowledge dissemination results and experience data

变量	沉浸感
K1:本次体验让你更好地了解了百戏俑	0.843**
K2:本次体验提高了你对于百戏俑文化的兴趣	0.989***
K3:本次体验能够向公众深入地展示百戏俑文化知识	0.919***

注: **表示 $p<0.01$, *** 表示 $p<0.001$

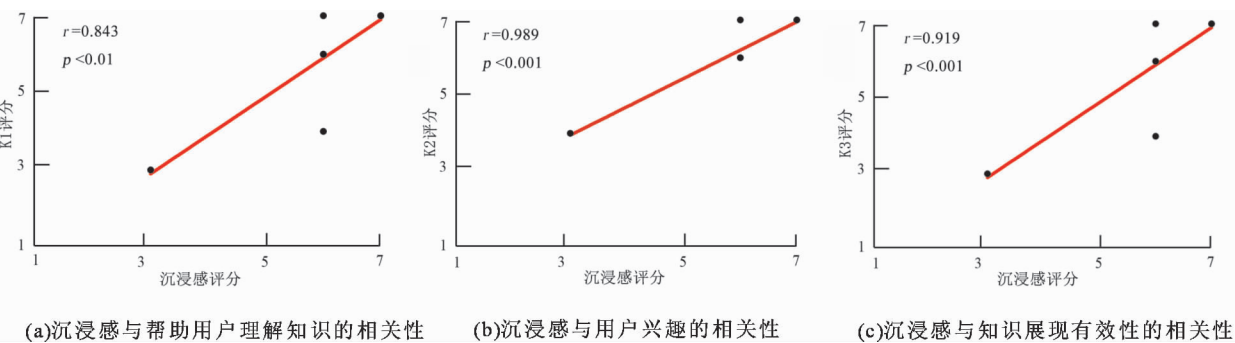


图 7 沉浸感与知识传播效果的相关性

Fig. 7 Correlation between immersion and knowledge dissemination results

3 结语

本文搭建了一个面向文化遗产知识传播的沉浸式虚拟现实系统(VR 百戏俑),使用基于人工势场的重定向行走和基于球体相交的碰撞检测算法,优化用户在虚拟场景中的交互体验,并且采用学习(体验)者为中心的渐进式设计方法,设计了 3 个体验场景构建起用户自主学习的文化遗产知识体验环境。运用 UTAUT 模型对百戏俑 VR 系统与传统文化遗产传播方式在知识传播、有用性和易用性方面的差异进行了评估。实验结果表明,与传统方式相比,百戏俑 VR 系统不仅实现了对秦陵百戏俑的数字化展示与诠释,为用户提供了高度沉浸感和趣味性的文化遗产体验,更提升了他们对百戏俑历史知识的了解程度,增强了受众对秦百戏俑的进一步探索意愿。下一步我们将搭建并分析不同人机交互模式下的百戏俑知识传播与学习系统差异,增加目标用户和测评人员样本的多样性,设计更深入的测试实验和评估策略,实现更高效的百戏俑文化遗产知识学习。

参考文献

[1] 张少博,赵万青,彭进业,等. 基于物体 6D 姿态估计算法的增强现实博物馆展示系统[J]. 西北大学学报(自然科学版),2021,51(5):816-823.
ZHANG S B, ZHAO W Q, PENG J Y, et al. Augmented reality museum display system based on object 6D pose estimation[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(5): 816-823.

[2] 段清波. 秦始皇帝陵园相关问题研究[D]. 西安:西北大学,2007.

[3] 袁仲一. 关于秦陵百戏俑几个问题的探讨[J]. 文博,2000(4):54-60.

[4] 段清波,郭宝发,张颖岚,等. 秦始皇陵园 K9901 试

掘简报[J]. 考古,2001(1):59-73.

[5] 贺西林. 百戏与百戏俑[J]. 文物天地,2002(10):42-44.

[6] 陈四海. 秦始皇陵园出土的乐器、百戏俑考[J]. 音乐研究,2005(3):35-41.

[7] 刘军. 基于三维模型内蕴结构的文物虚拟重建方法及应用研究[D]. 西安:西北大学,2019.

[8] 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.
GENG G H, HE X L, WANG M L, et al. Research progress on key technologies of cultural heritage activation[J]. Journal of Image and Graphics, 2022, 27(6): 1988-2007.

[9] 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.
GENG G H, FENG L, LI K, 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.

[10] SHOBARUDDIN M, HENDRAWAN M R, BAFADHAL A S. Multi-disaster risk mitigation through augmented reality conservation map for enhancing cultural heritage attitude[J]. Environment-Behaviour Proceedings Journal. 2024, 9(SI18):205-213.

[11] BEKELE M K, PIERDICCA R, FRONTONI E et al. A survey of augmented, virtual, and mixed reality for cultural heritage[J]. Journal on Computing and Cultural Heritage, 2018, 11(2): 1-36.

[12] CH'NG E, CAI S, LEOW F T, et al. Adoption and use of emerging cultural technologies in China's museums[J]. Journal of Cultural Heritage, 2019, 37: 170-180.

[13] CH'NG E, LI Y, CAI S D, et al. The effects of VR environments on the acceptance, experience, and ex-

- pectations of cultural heritage learning[J]. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 2020, 13(1): 1-21.
- [14] SYLAIU S, DAFIOTIS P, KOUKOPOULOS D, et al. From physical to virtual art exhibitions and beyond: Survey and some issues for consideration for the metaverse[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2024, 66:86-98.
- [15] MORTARA M, CATALANO C E. 3D Virtual environments as effective learning contexts for cultural heritage[J]. *Italian Journal of Educational Technology*, 2018, 26(2): 5-21.
- [16] CANNAVÒ A, PACCHIOTTI S, RETTA N, et al. Passive haptics and conversational avatars for interacting with ancient Egypt remains in high-fidelity virtual reality experiences[J]. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 2024, 17(2): 1-28.
- [17] WEN C, LUO X. Virtual art experience on cultural heritage information with construction of evaluation criteria[C]//2018 4th International Conference on Humanities and Social Science Research. Wuxi, China: Atlantis Press, 2018: 447-452.
- [18] FU X Y, ZHU Y X, XIAO Z J, et al. Restore VR: Generating embodied knowledge and situated experience of dunhuang mural conservation via interactive virtual reality[C]//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Honolulu, USA: ACM, 2020: 1-13.
- [19] SCAVARELLI A, ARYA A, TEATHER R J. Virtual reality and augmented reality in social learning spaces: A literature review[J]. *Virtual Reality*, 2021, 25(1): 257-277.
- [20] HORST R, NARAGHI-TAGHI-OFF R, RAU L, et al. Back to reality: Transition techniques from short HMD-based virtual experiences to the physical world[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2024, 83(15): 46683-46706.
- [21] MELENDRELLAS RUIZ R, SÁNCHEZALLEGUE P, MARÍNTORRES M T, et al. Analysis of the user experience (On site vs. Virtual Reality) through biological markers and cognitive tests in museums: The case of Museo Cristo de la Sangre (Murcia, Spain)[J]. *Virtual Reality*, 2024, 28(1): 48.
- [22] PETRELLI D, ROBERTS A J. Exploring digital means to engage visitors with Roman culture: Virtual reality vs. Tangible interaction[J]. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 2023, 16(4): 1-18.
- [23] JIN S, FAN M, KADIR A. Immersive spring morning in the Han Palace: Learning traditional Chinese art via virtual reality and multi-touch tabletop[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2022, 38(3): 213-226.
- [24] GAO L, WAN B, LIU G, et al. Investigating the effectiveness of virtual reality for culture learning[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2021, 37(18): 1771-1781.
- [25] FEINBERG R R, LAKSHMI U, GOLINO M J, et al. ZenVR: Design evaluation of a virtual reality learning system for meditation[C]//Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New Orleans, USA: ACM, 2022: 1-15.
- [26] VENKATESH V, MORRIS M G, DAVIS G B, et al. User acceptance of information technology: Toward a unified view[J]. *MIS Quarterly*, 2003: 425.
- [27] 高芙蓉, 高雪莲. 国外信息技术接受模型研究述评[J]. *研究与发展管理*, 2011, 23(2): 95-105.
- GAO F R, GAO X L. A review on foreign information technology acceptance models[J]. *R & D Management*, 2011, 23(2): 95-105.
- [28] PAULSEN L, DAU S, DAVIDSEN J. Designing for collaborative learning in immersive virtual reality: A systematic literature review[J]. *Virtual Reality*, 2024, 28(1): 63.
- [29] 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): 69.
- [30] LI J J, ZHENG Z X, CHAI Y Q, et al. DianTea: Designing and evaluating an immersive virtual reality game to enhance youth tea culture learning[C]//Proceedings of the 25th International Conference on Mobile Human Computer Interaction. Athens, Greece: ACM, 2023, 26: 1-8.
- [31] 汤慧, 周明全, 耿国华. 基于区域分割的低覆盖点云配准算法[J]. *计算机应用*, 2019, 39(11): 3355-3360.
- TAGN H, ZHOU M Q, GENG G H. Low coverage point cloud registration algorithm based on region segmentation[J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(11): 3355-3360.
- [32] LI Y J, STEINICKE F, WANG M. A comprehensive review of redirected walking techniques: Taxonomy, methods, and future directions[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2022, 37(3): 561-583.
- [33] CHEN J J, HUNG H C, SUN Y R, et al. APF-S2T: Steering to target redirection walking based on artificial

potential fields[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2024, 30(5): 2464-2473.

[34] BACHMANN E R, HODGSON E, HOFFBAUER C, et al. Multi-user redirected walking and resetting using artificial potential fields[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019, 25(5): 2022-2031.

[35] JIN S, FAN M, WANG Y C, et al. Reconstructing traditional Chinese paintings with immersive virtual reality[C]//2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Honolulu, USA: ACM, 2020: 1-8.

[36] NEAMU C, COMES R, POPOVICI D M, et al. Evaluating user experience in the context of cultural heritage dissemination using extended reality: A case study of the Dacian bronze matrix with hollow design[J]. Journal on Computing and Cultural Heritage, 2024, 17(2): 1-21.

[37] HU H, LI Q H, CAO X X. METH research on design paradigm of cultural heritage based on embodied cognition[J]. International Journal of Human Computer Interaction, 2022(7):1-12.

[38] ZOTOS S, LEMONARI M, KONSTANTINOOU M, et al. Digitizing wildlife: The case of a reptile 3-D virtual museum[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2022, 42(5): 51-65.

[39] MAKRANSKY G, TERKILDSEN T S, MAYER R E. Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning[J]. Learning and Instruction, 2019, 60: 225-236.

(编辑 李 波)