

# 基于自然交互的建筑文化遗产传播模式研究 ——以金莲桥为例

章立, 赵文轩, 邱钰, 许文广  
(江南大学 设计学院, 无锡 214122)

**摘要:** **目的** 虚拟现实技术在建筑文化遗产保护与传播中有着广泛的应用, 在沉浸式的虚拟空间中需要解决交互模式单一及信息传播量小的问题。随着近年来感知交互技术的突破, VR 中自然交互的模式有了更多新的可能性。着重探讨了基于眼动追踪与手部动作追踪的自然交互方式在建筑文化遗产传播课题中的应用, 并以此总结其在交互设计中的设计策略。**方法** 将 HTC Vive Pro 的眼动及手部动作追踪模块应用于文物建筑金莲桥及御碑亭的虚拟交互展示中, 分析了自然交互中多种形态的信息传播特征, 优化了交互中的用户体验, 通过实例验证了自然交互的设计策略。**结论** 在沉浸式的虚拟交互情境中应用以眼动及手部动作追踪为主的自然交互方式, 对建筑遗产的空间结构信息、历史文化信息的传播起到了较好的效果, 提高了信息传播的效率, 对文化遗产的数字化传播方式进行了有益的探索。

**关键词:** 建筑文化遗产; 虚拟现实技术; 自然交互

中图分类号: TB472 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)22-0020-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.22.004

## Communication Mode of Architectural Cultural Heritage Based on Natural Interaction: Taking the Jinlian Bridge as an Example

ZHANG Li, ZHAO Wen-xuan, QIU Yu, XU Wen-guang  
(School of Design, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**ABSTRACT:** Virtual reality technology has been widely used in protection and dissemination of architectural cultural heritage, while the problems such as single interaction mode and small amount of information transmission are needed to be solved in immersive virtual space. With more possibilities of mode of natural interaction in VR and breakthroughs in perceptual interaction technology increased in recent years, this paper mainly focuses on the application of natural interaction mode based on eye and hand movement tracking on architectural cultural heritage dissemination, and summarizes the interactive designing strategy. This paper uses the eye and hand movement tracking mode of HTC Vive Pro to virtual interactive display of historical and cultural relics such as Jinlian Bridge and Yubei Pavilion, analyzes the multiple features and information transmission characteristics, optimizes user experience in interaction and verifies the designing strategy of natural interaction through examples. This paper uses natural interaction mode mainly including eye and hand movement tracking in immersive virtual interactive situations, which brings in good effects on dissemination of spatial structure information and historical and cultural information of architectural heritage, improves the effect of information spreading and makes useful exploration on the digital dissemination mode of cultural heritage.

**KEY WORDS:** architectural cultural heritage; virtual reality technology; natural interaction

建筑遗产属于人类文化遗产的一部分, 体现了一个民族在工程技术、社会发展及文化艺术等方面的成

就。建筑遗产是人类在不同历史时期通过营造活动创建的构造物, 以及营造活动的过程及技术。建筑遗产

收稿日期: 2021-06-09

基金项目: 教育部人文社科研究项目 (18YJAZH134)

作者简介: 章立 (1971—), 男, 江苏人, 硕士, 江南大学设计学院副教授, 主要研究方向为虚拟现实、交互设计。

包括了应用于人类各种不同活动的构造物,也包括建造过程中所应用的工艺、材料及工具等。从建筑的文化艺术价值考虑,建筑遗产还涵盖了建筑设计规划的理念、建筑所呈现出的造型风格、建筑装饰中所应用的纹样、雕刻及绘画。建筑遗产价值归纳为历史价值、文化价值、艺术价值、工程技术价值等方面<sup>[1]</sup>。随着时间的推移,越来越多的建筑文化遗产正面临着崩毁消失的命运。我国建筑文化遗产的分布面广量大,建筑保护的资源优先给予价值更高的项目,无法做到面面俱到。因此,将文化遗产进行数字化保存与传播已逐渐成为一种必然的趋势。

## 1 建筑文化遗产数字化传播概述

### 1.1 建筑文化遗产数字化保护与传播的理念

随着数字技术在文化遗产保护领域的广泛应用,尤其是三维可视化技术的迅猛发展,数字化技术对文化遗产保护的工作起到了重要的推动作用。国际学术界2009年推出了《基于计算机的文化遗产可视化伦敦宪章》简称《伦敦宪章》。在数字时代的今天,《伦敦宪章》对于文化遗产保护领域具有里程碑的意义,为数字化保护这个跨学科领域提供了权威的指导性纲领。为了提高数字遗产可视化在技术上的严谨性和信息上的透明性,《伦敦宪章》所提出的一系列准则中主要包含了以下几个方面,一致性、清晰性、可靠性、材料记录可持续性和易及性。

文化遗产数字化保护的一致性准则可以理解为,基于计算机的数字可视化方法应用于文化遗产保护的过程中,在数据的获取、展示和传播过程中,所诠释的历史信息必须与文化遗产本体保持一致。应用数字技术的文化遗产保护项目中,所应用的文化遗产研究来源必须经过相关专家的认可,同时经过系统的评估,确保信息的权威性和严谨性。

在文化遗产的数字化保护中其数据应当具有清晰性。在基于计算机的数字可视化虚拟对象中必须明确在过程中所应用的技术细节。在获取原始数据的过程中,应当建立完善的文件体系和数据库。对文件内容进行尽可能详细的标识,清晰准确地记录,用于生成数字化虚拟对象的信息来源,为后续的研究提供可靠的数字资产。

文化遗产的数字化保护应当遵循可持续发展的准则。文化遗产中数字可视化的研究成果是以数据的形式保存在存储介质中的,研究成果的存储介质应当有合理的备份,以防止数字资产的损坏、丢失,并且能够恢复和重建。同时所保存的文件格式也应当确保在今后长期的研究中能够被顺利地使用。针对文化遗产的数字可视化系统在设计策略上应该满足后续开发和研究的可能性。

易及性可以理解为面向文化遗产的数字可视化

系统及其相关文件,在设计和创建过程中应当考虑根据其开发目的,确保更多的使用者在访问和浏览该系统及文档时具有良好的用户体验,能够便捷地获取所需要的历史信息。在文化遗产的数字可视化研究中还应当考虑将研究成果应用于公众传媒,通过文化传播从而实现文化遗产的精神价值。

作为一种成熟的数字可视化工具,虚拟现实技术在建筑遗产保护中能够起到重要的作用。通过应用虚拟现实技术,遗产保护的研究者能够将多样化的建筑遗产的历史信息呈现在虚拟空间中。凭借先进的计算机图形技术,建筑遗产的空间结构、纹理材质以及光影色彩都能够在虚拟空间中得以真实地再现。虚拟现实技术为建筑遗产保护提供了一个完整的历史信息保存和呈现的解决方案。将虚拟现实系统应用于文化遗产保护,在设计开发的理念上应当符合《伦敦宪章》所提出的一致性、清晰性、可靠性、材料记录可持续性和易及性等原则。

### 1.2 虚拟现实技术在建筑遗产数字化传播中的应用

虚拟现实技术具有4个基本特征:多感知性、沉浸性、交互性和构想性,这4种主要特性在建筑遗产保护领域中都得到了充分的体现。将虚拟现实技术应用于建筑遗产保护领域有两个不同的应用方向,一个是面向文化遗产保护的研究者,另一个是面向公众和大众传媒。在虚拟现实面向学者和专家的应用系统的开发中,系统将不同来源的多种信息整合在虚拟的三维空间中,而这些信息与建筑遗产的数字化结构和构件进行密切的关联,为研究者提供一个强有力的可视化研究工具<sup>[2]</sup>。虚拟现实技术在建筑遗产保护领域的另一个应用方向是,通过对建筑遗产高度真实的视觉还原,在沉浸性的交互体验中为用户提供关于历史场景的、完整的感官体验。这种类型的虚拟现实系统使用场景多为博物馆等公共展示场所,或者通过互联网为用户提供简化版的虚拟交互体验<sup>[3]</sup>,其开发的主要目的是向公众传播建筑遗产的审美价值和精神价值,普及古代建筑的构造特点和传统造物智慧。

虚拟现实系统的交互性是指用户在虚拟空间中对数字化虚拟三维对象的可操程度和从虚拟环境中得到反馈的自然程度。虚拟现实系统为交互主体提供了一个友好的交互界面,这个交互界面分布在虚拟的三维空间中,通过体验者自然的行为动作与交互界面进行信息的交流和沟通<sup>[4]</sup>。建筑遗产所具有的文本信息、数字信息、图形信息、声音信息甚至视频信息都能够通过这种自然的交互方式得以呈现。当虚拟现实系统的界面交互链接与数据库后台进行通讯,虚拟空间中的信息交流将得到无限的拓展。

### 1.3 虚拟现实领域的感知交互发展趋势

近年来虚拟现实技术进入产业发展的快车道,随着虚拟现实技术在工业数字孪生、文化产业及沉

浸式教学等行业开拓出强劲的创新应用市场,行业中加大了对于虚拟现实关键技术的研发投入,从而满足市场对于用户体验的迫切需求。虚拟现实关键技术的突破主要表现在以下5个方面:近眼显示、感知交互、网络传输、渲染计算与内容制作。其中感知交互方面所取得的各项突破在沉浸式用户体验上给人带来的印象最为深刻<sup>[5]</sup>。

在2021年的《虚拟增强现实白皮书》中所列举的感知交互方面的发展趋势为:内向外追踪技术已全面成熟,手势追踪、眼动追踪、沉浸声场等技术趋向自然化、情景化与智能化的技术发展方向。手部动作的追踪技术与眼动追踪技术已经日趋成熟,并且应用在多款虚拟现实及混合现实的产品设备中。如HTC Vive Pro及微软的Hololens 2代等产品,已经将眼动追踪技术和手部动作追踪作为产品的标配,同时也向开发者提供了完善的开发接口,为新一代的感知交互技术进入消费级应用创造了完善的条件。虚拟现实领域在感知交互方面的技术突破为文化遗产传播中的沉浸式交互体验提供了更好的自然交互的可能性<sup>[6]</sup>。

## 2 建筑文化遗产传播中的自然交互

### 2.1 自然交互的理念

自然交互是一种提升交互体验和传播效率的人机交互方式。在自然交互中用户的自然行为包括肢体动作、手势动作、语音等方式,交互主体通过这些方式与计算机系统进行通讯达成信息交流的目的。人类通过自然交互运用与生俱来的技能与数字化的信息内容直接交流。在理想状况下计算机系统通过多种类型的传感器捕捉人类的自然动作行为,在自然交互过程中尽可能地弱化用户对交互系统设备的感知<sup>[7]</sup>。

自然交互系统的设计侧重于运用人类先天和本能的表达方式与计算机系统进行信息交流的互动。在交互过程中用户无需操作外部的硬件设备,同时用户也无需学习任何命令或者操作流程,即可无障碍地完成与计算机系统的信息交流目的。在自然交互过程中,用户与计算机系统交流所使用的方式包括:手部动作的触摸、指向、抓取及操纵某个物体;视线的扫描及注视;通过语言向系统发出指令或进行询问并得到明确的语言信息反馈<sup>[8]</sup>。

### 2.2 自然交互的设计开发策略

随着感知交互中一些关键技术的突破,自然交互设计的开发策略也在不断地探索和完善中。在虚拟现实系统中为了让用户能够得到更好的沉浸式互动体验,自然交互的设计开发应当注重以下两点。一是设计者在交互系统的开发中,应当避免应用交互主体所不熟悉的手势或肢体动作来丰富交互语言。复杂的体感动作也许能够让用户得到丰富的交互体验,但是如果在交互中所使用的动作缺乏与所表达的信息在语

义上的关联,或者动作本身脱离了用户日常所常用的肢体语言表达方式,这样的设计可能违背互动体验的自然性,反而使用户得到不自然的交互体验<sup>[9]</sup>。二是在交互系统中参与交互过程的信息视觉元素应当更多地与三维场景相结合,避免过多使用不必要的界面元素,如菜单图标等。文字、图形、菜单图标等视觉化的信息元素能够增加交互过程的准确性以及丰富信息的表达,但是这些元素同时也将减少交互的直接性,从而导致三维的数字内容与界面元素之间在视觉上产生冲突<sup>[10]</sup>。

### 2.3 建筑文化遗产传播的信息特征

在建筑文化遗产的传播中需要在数字化的三维空间中让受众了解到建筑遗产的时间属性、空间属性、营造技术属性以及社会文化属性。传播过程所涉及的信息类型包括:数字化三维模型、图像、视频及音频。在沉浸式的虚拟空间中建筑遗产的历史信息是依附于空间形态而存在的,用户在虚拟空间中以自主的行为对历史信息进行访问及检索。在这个虚拟交互系统中,信息分布于空间中的三维模型对象上,信息的形态是多样化的,信息架构的模式是依据建筑遗产的时间属性、空间属性、营造技术属性和社会文化属性而链接起来的。因此在虚拟现实系统中如何让用户能够以自然的行为模式与系统进行高效流畅的信息交流,是数字化传播中需要解决的重要问题。

感知交互技术的发展为虚拟现实系统中的自然交互提供了可靠的保障。在本课题中,笔者所在团队运用HTC Vive Pro的眼动追踪模块和手部动作追踪技术开发了一个针对古建筑的虚拟交互展示系统“古刹视界”,力求在这个案例中探索虚拟现实系统自然交互的设计策略。

### 2.4 眼动追踪在VR交互中的应用

视觉注意是研究人类认知方式的一个主要途径。人类在通过视觉认知周围环境的过程中,总是将视线聚焦在某个较小的区域,在这个视线聚焦的区域中视觉感知是最为清晰的,而在视线聚焦的区域之外视觉感知则较为模糊。在大多数情况下人类的注意力会同步地集中在视线聚焦的区域。在沉浸式的虚拟空间交互过程中人类通过视觉获取外部信息,此时用户的注意力必然集中在视线聚焦中心。在VR头盔中通过眼动追踪模块连续地获取到用户的视线聚焦点,在视线聚焦点周围则是用户的视觉注意中心。在这一区域实现交互指令的输入并获取系统输出的信息,从而完成整个交互行为的过程。通过眼睛注视点的移动、凝视、眨眼等动作完成最为简洁自然的交互流程。

目前的VR头盔往往采取光学传感器加计算机视觉算法相结合的技术路径。VR头盔内置的红外光传感器以超高频率的速度向眼球发射红外光,红外光在眼球角膜上经过反射,产生一个闪烁点——普尔钦斑

(Purkinje image)。红外传感器实时跟踪这些普尔钦斑,并结合摄像机传感器对反射光进行计算机视觉分析,从而得出佩戴者的注视点的移动轨迹。期间,由于人类看不到红外光,所以用户在体验的过程中并不会受到红外光影响。

### 2.5 手部动作追踪在 VR 交互中的应用

人类的双手能够完成复杂精细的各种动作,实现对物体的精确操控,同时人类也用双手传递出丰富的信息。通过双手的动作而不附加佩戴任何设备,去完成人与虚拟世界的交互行为是最自然的人机交互方式之一。在沉浸式的虚拟空间中用户通过裸露的双手进行抓取、指向、触摸、操纵等手部动作行为完成对虚拟交互系统的交互指令输入<sup>[11]</sup>。在虚拟现实头盔的前部设置有两个前置摄像头,交互系统根据这两个摄像头从不同的角度捕捉到的画面构建出双手在空间中的结构特征,并计算出手掌及 5 个手指关节的运动信息,从而实现对手部动作的连续追踪。

## 3 自然交互模式在惠山古镇数字化传播中的应用

### 3.1 金莲桥及御碑亭概况

坐落在无锡惠山古镇的金莲桥及金莲桥西侧的御碑亭是本次课题的研究对象。金莲桥坐落于金莲池上,因桥下池中曾开有重瓣“金莲”,而命名为金莲桥。其位于惠山寺御碑亭前,建于北宋靖康年间,距今约有 800 多年的历史,为三孔石梁桥。桥的两端为石砌桥台,桥台两端有横帽石梁,两面桥台和桥墩上雕有 4 个石鱼首,4 个石螭首,桥两侧各有华版石。华版石上承石栏,石栏杆由莲花状望柱和透空栏板组成,雕有荷叶净瓶和拐杖,桥栏两端还有抱鼓石。华版石外侧雕有宋代典型的“压地隐起缠枝牡丹间化生(童子)”图案,桥的南侧华版石正中刻有“懋德堂李府”<sup>[12]</sup>。经历代重修,结构未变,有旧石料残留,可以反映历代维修的痕迹。其中紫褐色的石料为武康石,是宋代建桥的原石。这座古桥结构牢固、桥饰优美、雕工华丽且保存较为完整,是古代园林桥梁中难得一见的佳作<sup>[13]</sup>。

御碑亭古称皇亭,始建年代至少在清乾隆 35 年(公元 1770 年),是一座重檐歇山建筑,四壁缀有 12 个圆形窗洞,有四通八达之意。乾隆御碑矗立在御碑亭内,御碑东西南北分别刻有乾隆公元 1751 年、公元 1757 年、公元 1762 年、公元 1780 年下江南游惠山寺时写下的诗篇。御碑上雕有精美的龙纹与祥云纹样<sup>[14]</sup>。

### 3.2 课题沉浸式交互体验设计

课题组完成了一个基于自然交互的建筑遗产虚拟现实系统,其侧重于将最新的 VR 交互技术应用于



图 1 金莲桥及御碑亭高精度三维重建  
Fig.1 High precision 3D reconstruction of Jinlian Bridge and Yubei Pavilion

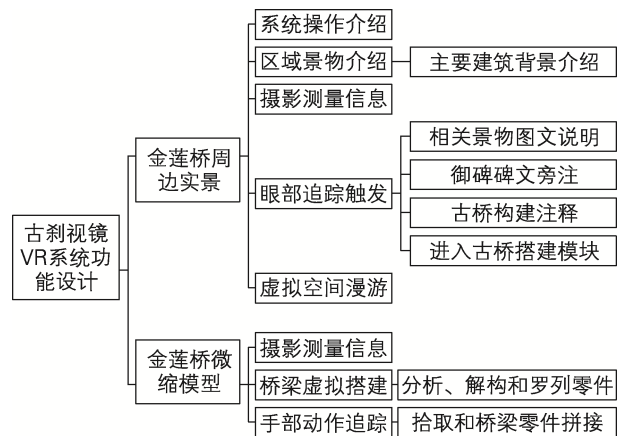


图 2 课题系统功能框架  
Fig.2 Subject system function framework

建筑遗产的沉浸式体验。在交互体验的设计开发中,课题组研究了 HTC Vive Pro 的眼动追踪技术和手部动作追踪。在沉浸式场景中,实现了眼动交互的信息互动方式,减少了交互路径,给用户提供了更好的交互体验。

在对惠山古镇建筑进行实地测绘及文献的收集整理后,应用倾斜摄影测量技术,将金莲桥、金莲池、御碑亭及御碑进行了高精度的三维数字化重建,并仿照金莲桥周边植被与地形,在 Unity 中高保真地还原了金莲桥及御碑亭附近的建筑文化遗产原貌。金莲桥及御碑亭高精度三维重建见图 1。课题组对金莲桥及御碑亭进行实地测绘并获得数据,使用倾斜摄影测量技术制作高精度三维数字资产,并在 Unity 高清渲染管线中实现了光影及材质的真实再现。课题组在制作过程中使用多边形拓扑、光影渲染烘焙、注视点渲染等技术充分进行项目优化,确保 VR 系统的流畅运行。

用户进入 VR 系统后,可以通过使用手柄实现在场景中的移动和细节观摩。屏幕中绿色的圆点是用户的视线在场景中的落点,它将引导用户完成一系列的信息交互体验。课题系统功能框架见图 2。

### 3.3 基于自然交互的功能设计

#### 3.3.1 眼动追踪交互功能设计

在系统中设置了一系列眼动交互 UI,共分为 3



图3 眼动追踪交互模式  
Fig.3 Eye tracking interaction patterns

种状态(默认、注视中、注视中断)。当用户靠近图标所在区域时 Icon 被唤醒, Icon 被用户注视(用户的视线落在图标范围内)时则进入激活状态,播放激活动画,用户保持注视一段时间后激活眼动 UI,获得相应交互信息反馈;若期间注视点离开图标范围,则进入注视中断状态,返回默认状态。眼动追踪交互模式,见图3。用户注视金莲桥的某一个部件3秒钟便可获得该股桥梁构件相关结构的信息。在金莲池莲花的上方设置了几个浮动的图标,用户注视某个图标便可获得与金莲桥历史背景相关的语音讲解。

在与御碑亭相关的虚拟交互设计中,也应用了眼动追踪的自然交互方式。当用户注视御碑亭碑文诗句时,被注视的诗句按照符合人阅读顺序的习惯,自上而下、从右至左的顺序依次高亮激活,并在一旁出现对应诗文解读,长时间不被注视的诗句注释将会被取消。眼动交互的方式更加贴近用户无意识的行为习惯,在阅读的过程中,无意识地增强交互的反馈感和趣味感。在这期间,用户在眼动交互中获得的信息反馈与现实中阅读古文的实际体验不谋而合。

### 3.3.2 手部动作追踪交互功能设计

用户在进入石桥拆解模块时,需根据出现的完整全息桥梁三维模型作为提示参考,将依次出现的石梁桥结构(石墩、石板、石梁、望柱、抱鼓石、螭首等)使用手部动作追踪的方式进行拿取、旋转、拼接等行为,直至组成完整的石梁桥结构来完成目标。期间,每个单独桥梁拼接正确后,将会给予愉快的音乐、对应的图像和文字信息作为正向的交互反馈。手部动作追踪交互模式见图4。

在手部动作追踪模块中,经过优化处理目前已达到超过1000FPS实时映射到虚拟空间中,给予用户更流畅的沉浸式交互体验。以往使用手柄的交互方式难以模拟出各类复杂的人手动态,这使得在人与物的交互过程中难免会产生脱离感。手部动作追踪技术方案,使得用户可以针对不同的交互对象结构实现更为匹配和拟真的手部动作交互,如握、拿、推、捏等。用户对于望柱(柱形结构)则可以下意识使用“握”的手部动作;对于石板(扁形长方体结构)则下意识



图4 手部动作追踪交互模式  
Fig.4 Hand tracking interaction patterns

采用“捏”的手势,此类基于人类既有经验所产生的手势动态交互,拉近了真实世界下人与虚拟世界中物的距离。

在采用眼动追踪及手部动作追踪作为自然交互模式的同时,系统还大量运用语音模式对用户进行交互过程的提示,并用自然的语音表达与建筑遗产相关的信息内容,从而避免用户在VR环境中阅读大段的文本信息。相关语音信息是随着用户在虚拟场景中位移到特定的区域而出现的,在配合眼部及手部的自然交互过程中或者在特定的交互环节出现语音信息的提示及内容表述。

## 4 结语

本课题以惠山古镇的金莲桥及御碑亭为案例,研究了虚拟现实中的最新的眼动及手部动作追踪在文化遗产信息传播中的应用模式,在对建筑遗产进行高精度三维数字化重建的基础上应用Unity引擎的高清渲染模式构建出古建筑及其周围环境的高保真虚拟场景,并建立了相关的图形、文字及语音等历史文化信息数据库,让用户能够在沉浸式的虚拟场景中对建筑遗产的空间构造信息及历史文化信息等方面得到深入的了解<sup>[15]</sup>。针对以往文化遗产的虚拟现实演示系统中存在的互动体验单一,以及可传播的信息量较少等问题,本课题通过应用自然交互的设计理念探索了在沉浸式三维虚拟空间中丰富用户交互体验以及提高信息传播效率的模式,为今后面对更为复杂的文化遗产信息传播内容提供了一种新的设计思路并积累了探索的经验<sup>[16]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 常青, JIANG Tian-yi, Chen Chenand, 等. 对建筑遗产基本问题的认知[J]. 建筑遗产, 2016(1): 44-61.  
CHANG Qing, JIANG Tian-yi, Chen Chenand, et al. Reflection on the Fundamental Category of Heritage Architecture[J]. Heritage Architecture, 2016(1): 44-61.
- [2] 黄心渊, 陈柏君. 基于沉浸式传播的虚拟现实艺术设计

- 计策略[J]. 现代传播(中国传媒大学学报), 2017(1): 85-89.
- HUANG Xin-yuan, CHEN Bai-jun. Virtual Reality Art Design Strategy Based on Immersive Communication [J]. Modern Communication(Journal of Communication University of China), 2017(1): 85-89.
- [3] Isabelle Verhulst, Andy Woods, Laryssa Whittaker, et al. Do VR and AR Versions of an Immersive Cultural Experience Engender Different User Experiences?[J]. Computers in Human Behavior, 2021(7): 10.
- [4] Kathryn Smith, Mark Roughley, Samantha Harris, et al. From Ta-Kesh to Ta-Kush: the Affordances of Digital, Haptic Visualisation for Heritage Accessibility[J]. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, 2020(8): 10.
- [5] Aso Hajirasouli, Saeed Banihashemi, Anoma Kumarasuriyar, et al. Virtual Reality-based Digitisation for Endangered Heritage Sites: Theoretical Framework and Application[J]. Journal of Cultural Heritage, 2021(3): 10.
- [6] Richard Laing. Built Heritage Modelling and Visualisation: the Potential to Engage with Issues of Heritage Value and Wider Participation[J]. Developments in the Built Environment, 2020(6): 10.
- [7] Julius Pettersson, Petter Falkman. Human Movement Direction Classification using Virtual Reality and Eye Tracking[J]. Procedia Manufacturing, 2020(10): 10.
- [8] Yukang YAN, Xin YI, Chun YU, et al. Gesture-based Target Acquisition in Virtual and Augmented Reality[J]. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 2019(3): 276-289.
- [9] LI Yang, HUANG Jin, TIAN Fang, et al. Gesture Interaction in Virtual Reality[J]. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 2019(1): 84-112.
- [10] Marie-Monique Schaper, Maria Santos, Laura Malinverni, et al. Learning about the Past through Situatedness, Embodied Exploration and Digital Augmentation of Cultural Heritage Sites[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2018(1): 10.
- [11] 黄培德, 王琳, 萧笋, 等. VR 环境下的虚拟手自然交互方法研究[J]. 机械设计与制造, 2021(7): 268-271.
- HUANG Pei-de, WANG Lin, XIAO Zheng, et al. Research on Natural Interaction Method of Virtual Hand in VR Environment[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(7): 268-271.
- [12] 朱蓉, 查娜, 李镇国. 无锡古桥梁建筑艺术特色研究[J]. 创意与设计, 2013(6): 83-87.
- ZHU Rong, ZHA Na, LI Zhen-guo. Research on the Artistic Features of Ancient Bridges in Wuxi[J]. Creation and Design, 2013(6): 83-87.
- [13] 严波, 瞿小佩, 张勇, 等. 苏南古桥建造技术和装饰艺术特征对比研究[J]. 艺术与设计(理论), 2017(2): 71-73.
- YAN Bo, QU Xiao-pei, ZHANG Yong, et al. A Comparative Study on Features of the Construction Techniques and Decorative Art of Ancient Bridges in South of Jiangsu[J]. Art and Design, 2017(2): 71-73.
- [14] 许燕. 以无锡惠山祠堂群为例谈祠堂建筑文化及保护[J]. 山西建筑, 2018(6): 19-20.
- XU Yan. Taking the Wuxi Huishan Ancient Ancestral Temple as an Example to Talk about the Architectural Culture and Protection of the Ancient Ancestral Temple[J]. Shanxi Architecture, 2018(6): 19-20.
- [15] 李姣姣, 吕健, 潘伟杰, 等. 心智模型驱动的古村落VR系统体验设计[J]. 包装工程, 2020(1): 262-268.
- LI Jiao-jiao, LYU Jian, PAN Wei-jie, et al. VR System Experience Design Driven by Mental Model in Ancient Village[J]. Packaging Engineering, 2020(1): 262-268.
- [16] 苗岭. 虚拟现实技术在博物馆叙事性设计中的应用探索[J]. 包装工程, 2018(2): 15-18.
- MIAO Ling. Exploration of Virtual Reality Technology Applied in Narrative Design of Museum[J]. Packaging Engineering, 2018(2): 15-18.