

VR 技术支持下宗教建筑沉浸式展示与用户体验研究

秦世骏¹ 刁 涵¹

(1. 黑龙江大学艺术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 在国家文化数字化战略与文物保护技术创新不断推进的背景下, 虚拟现实 (VR) 技术为历史建筑遗产的展示与传播提供了新的路径与方法。本文以哈尔滨呼兰天主教堂为研究对象, 围绕其数字化保护与沉浸式展示需求, 构建基于无人机倾斜摄影与多源数据融合的三维重建方法, 并在此基础上设计 VR 沉浸式展示系统, 整合建筑历史信息、空间结构特征与文化叙事内容, 形成“数字化建模—场景还原—交互体验”一体化展示框架。同时, 结合临场感理论与场所叙事方法, 从沉浸感、认知理解与情感体验三个维度构建用户体验评价体系, 并通过实验与行为观察对系统效果进行分析。研究结果表明, 基于 VR 的沉浸式展示能够显著提升用户对宗教建筑文化价值的认知深度与情感共鸣, 增强文化传播的交互性与体验性, 为宗教建筑及同类文化遗产的数字化保护与传播提供了可参考的技术路径与理论支持。

关键词: 虚拟现实 (VR); 文化遗产数字化; 沉浸式展示; 用户体验; 三维重建

DOI: doi.org/10.70693/202606290838

本文基于虚拟现实 (VR) 技术构建呼兰天主教堂沉浸式展示系统, 从数字化重建、空间交互设计与用户体验三个层面展开研究, 探索宗教建筑遗产在虚拟环境中的表达方式与体验机制, 并对其沉浸效果进行分析与验证。

一、VR 系统整体架构设计

1.1 系统总体框架与技术组成

本研究构建的 VR 沉浸式展示系统以呼兰天主教堂为核心对象, 整体架构由数据采集层、模型构建层、渲染交互层与体验反馈层四个模块构成。数据采集层通过无人机倾斜摄影与近景摄影测量技术获取建筑外部形态与内部空间结构信息, 并结合历史影像资料与文献数据进行补充修复。模型构建层基于多源数据融合方法, 对点云数据与影像数据进行配准与优化处理, 形成高精度三维模型。

在渲染交互层中, 系统采用实时渲染引擎实现虚拟场景构建, 并通过光照模拟与材质映射增强空间真实感。交互设计方面引入基于视角控制与行为触发机制的操作方式, 使用户能够以自由漫游与定点交互的方式进入虚拟空间。体验反馈层则通过记录用户行为轨迹与交互数据, 为后续体验分析提供数据支持。

整体系统强调“数据驱动—空间重建—交互体验”的一体化逻辑, 使数字模型不仅作为视觉还原工具, 同时成为文化传播与体验生成的媒介。

1.2 多源数据驱动的三维建模方法

在三维建模过程中, 采用多源异构数据融合方法提升建筑还原精度。无人机倾斜摄影数据用于获取建筑整体外立面结构, 地面激光扫描数据用于捕捉细部构件信息, 近景摄影数据则用于补充纹理细节与材料表现。

数据处理流程包括点云预处理、特征点匹配与空间坐标统一三个阶段。在统一坐标系下, 通过特征约束算法实现不同数据源的精确融合, 从而减少模型误差并提升结构完整性。在此基础上采用分层建模策略, 对建筑主体结构 with 装饰构件进行差异化处理, 以保证整体模型的精度与运行效率之间的平衡。该方法不仅提高了宗教建筑复杂结构的数字还原能力, 也为后续 VR 实时渲染提供了稳定的数据基础。

二、沉浸式空间重构方法

2.1 建筑空间数字化表达逻辑

作者简介: 秦世骏 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境艺术设计;

刁 涵 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为数字化创意设计。

在虚拟现实技术支持下,建筑空间的数字化表达已经从单纯的几何复现,逐渐转向空间体验逻辑与感知结构的综合重建。对于宗教建筑而言,这种转变尤为重要,因为其空间价值不仅体现在物理结构上,更体现在由空间秩序所构建的精神体验体系之中。呼兰天主教堂作为典型的哥特式宗教建筑,其空间结构具有明显的轴线性垂直性与仪式性,这种结构特征决定了其数字化表达不能停留在“形似”,而必须进入“体验一致性”的层面。

本研究在空间表达策略上强调“结构真实”与“感知真实”的统一。在结构层面,通过对建筑尺度比例、结构关系与空间构成的精确建模,实现对实体建筑的数字化还原;在感知层面,则通过空间路径组织与视觉引导机制的设计,使虚拟空间能够模拟真实参观过程中的认知顺序。换言之,空间表达不仅是几何复现,更是行为路径的设计过程。

在具体实施中,研究将教堂空间划分为入口过渡区、主体礼拜空间与辅助空间三个基本层级,并通过空间轴线与视觉焦点的方式建立空间之间的逻辑关系,使用户在虚拟环境中的移动不再是随机行为,而是沿着空间意义逐步展开的体验过程。这种结构化表达方式,使建筑空间从“静态对象”转变为“可阅读的空间文本”。

2.2 虚拟空间结构重建方法

虚拟空间结构重建的核心在于建立物理空间与数字模型之间的拓扑映射关系,使建筑不仅在形态上被还原,更在结构逻辑上得到重构。本研究采用多源数据融合与分层建模相结合的方法,对呼兰天主教堂进行系统性数字重建。

在数据层面,通过无人机倾斜摄影获取建筑整体外形信息,通过地面激光扫描获取精细结构信息,并结合近景摄影对材质与纹理进行补充,从而形成多尺度、多精度的数据体系。在数据处理过程中,通过点云配准、特征匹配与空间坐标统一方法,将不同来源的数据融合为统一空间模型。

在建模策略上采用分级细节控制(LOD)机制,根据用户观察距离动态调整模型精度,从而在保证视觉质量的同时提升系统运行效率。此外,在空间结构组织上引入语义建模方法,将教堂内部空间按照功能属性与行为逻辑重新划分,使空间具备可解释性与叙事性。

这种结构重建方法的意义在于,它突破了传统三维建模仅关注“形态一致性”的局限,将空间建模转化为“结构—语义—体验”三位一体的综合表达过程,使虚拟空间不仅是复制对象,而是一个可理解的文化空间系统。

2.3 光影与环境模拟策略

光影系统在沉浸式空间构建中具有关键作用,尤其是在宗教建筑语境中,光不仅是一种物理现象,同时也是象征意义的重要载体。呼兰天主教堂作为典型宗教空间,其空间体验高度依赖光线组织方式,因此在虚拟重建过程中对光影系统进行了重点设计。

本研究采用实时全局光照与局部光源相结合的方式,模拟自然光在不同时间条件下进入建筑空间后的变化过程。通过对彩色玻璃窗的光学特性进行模拟,使光线在空间中形成具有层次变化的色彩投射,从而增强空间的时间感与仪式感。在虚拟影像表达技术体系中,投影映射作为增强现实表现的重要手段之一,为建筑表面的数字化呈现提供了重要支持。投影映射技术将建筑表面转化为动态的数字显示媒介,激光投影设备对墙面、穹顶、立柱等复杂几何结构进行精确的光学投射,三维扫描系统获取建筑表面的详细几何信息,包括曲率变化、深度分布、材质反射特性等参数,投影融合软件根据空间几何数据计算出图像变形矩阵和色彩校正算法,确保数字内容能够精确贴合建筑表面的每一处转折和起伏,消除透视畸变和光照不均造成的视觉偏差,实现虚拟图像与真实建筑的无缝融合效果^[1]。

在环境模拟方面,引入空间声场系统,对教堂内部的回声、环境噪声与空间混响进行分层设计,使用户在视觉体验之外同时获得听觉层面的空间反馈。视觉与听觉的协同作用,使虚拟空间从单一视觉模型转向多感官体验系统,从而显著提升沉浸感与存在感。

三、沉浸式叙事与交互设计

3.1 空间叙事组织方式

沉浸式叙事在VR文化遗产展示中并非简单的信息排列,而是一种通过空间结构实现意义生成的过程。在VR语境下,叙事方式本身发生了媒介层级的转移,不再局限于语言结构,而是嵌入空间体验之中。VR叙事就是把“讲故事”放置在虚拟环境中进行应用、转化和超越,观众的情感体验是通过“讲故事”的叙事来实现的^[2]。在本研究中,呼兰天主教堂的叙事方式被重新组织为“空间路径驱动型叙事结构”,即通过用户在虚拟空间中的移动行为来触发信息呈现,使叙事不再依赖线性文本,而依赖空间体验本身。

具体而言,系统将教堂空间划分为外部认知入口、内部过渡体验区与核心宗教仪式空间三个叙事单元,并在每一空间节点嵌入对应的历史信息与文化解释。用户在进入虚拟环境时,首先通过外部空间形成初步认知,其后在移动过程中逐步进入教堂内部,并在主礼拜空间中接触核心文化信息。这种叙事路径具有明显的递进性,使信息呈现与空间探索保持一致节奏。

此外,为增强叙事的连贯性,本研究在空间节点之间加入“语义过渡机制”,即通过光影变化、环境音变化以及视角引导,使不同叙事单元之间形成自然过渡,而非突兀切换。这种处理方式使用户在体验过程中始终保持叙事沉浸状态,从而强化整体文化理解的连续性。

3.2 用户交互行为设计机制

在VR沉浸式系统中,交互设计不仅决定操作方式,更直接影响用户的体验深度与文化参与程度。本研究围绕呼兰天主教堂的空间特征,构建了分层交互行为体系,包括基础移动交互、认知触发交互与仪式参与交互三个层级。

基础移动交互主要解决用户在虚拟空间中的自由探索问题,通过头部视角控制与手柄移动机制,使用户能够自主选择路径,从而形成个性化参观体验。认知触发交互则基于空间热点机制设计,当用户进入特定区域时,系统自动触发建筑历史信息、结构说明或文化背景内容,实现空间与信息的动态绑定。

仪式参与交互是本研究的重点创新部分,通过引入具有象征意义的行为操作,如点亮蜡烛、触发祷告音效或激活彩色光影变化,使用户参与到具有宗教文化语义的交互行为中。这种设计不仅增强用户的参与感,同时也强化宗教空间的仪式属性,使虚拟体验具备一定的文化情境再现能力。

通过三层交互结构的组合,系统实现了从“操作体验”到“文化参与体验”的转变,使用户行为本身成为叙事结构的一部分。

3.3 多感官沉浸增强策略

多感官沉浸是提升VR文化遗产体验质量的重要路径。本研究认为,沉浸感的形成并不仅依赖视觉真实度,而是视觉、听觉与交互反馈协同作用的结果,因此在系统设计中构建了多通道感知增强机制。从展示机制来看,虚拟现实展陈通过影像重构强化用户的空间代入感,“VR展”通过模拟真实环境中的影像,制造强烈的临场感与共情场域^[3]。

在视觉层面,通过高精度材质贴图与动态光影模拟,使建筑表面细节与空间层次得到强化呈现,尤其在彩色玻璃光影效果上进行了重点优化,以增强空间的宗教氛围表达。在听觉层面,系统引入空间声场模拟技术,对教堂内部的回声、脚步声与环境背景音进行分层处理,使声音具有空间定位感,从而增强方向感与空间真实感。

在交互反馈层面,系统设计了即时响应机制,当用户进行操作时,环境会产生对应变化,例如光源变化、声音变化或信息触发,从而形成行为与环境之间的动态反馈关系。这种机制能够有效增强用户的控制感与参与感,使其更深度融入虚拟空间。

整体来看,多感官协同机制使虚拟空间从单一视觉模拟系统转变为综合感知系统,从而显著提升沉浸体验质量。

四、用户体验设计与评估

4.1 用户体验评价维度构建

在VR文化遗产展示研究中,用户体验的评价体系直接关系到系统有效性判断。本研究基于临场感理论与沉浸式体验研究成果,三大核心属性——沉浸性、交互性、想象性。沉浸式展陈立足虚拟现实技术的三大核心属性——沉浸性、交互性、想象性,观众在头显设备和空间音画包围下形成较强“在场感”,感知方式不再局限于视觉层面,而是转向身体参与和情绪投入^[4]。

空间临场感主要用于衡量用户在虚拟环境中的“存在感”,包括空间包围感、环境真实感与自我定位感;认知理解度则用于衡量用户对呼兰天主教堂历史背景、建筑结构及文化信息的理解程度;情感共鸣度则反映用户在体验过程中产生的情绪变化以及文化认同程度。

与传统单一满意度评价不同,本研究的评价体系强调多维度综合分析,并将认知与情感因素纳入评价框架,使评价结果能够更全面反映文化传播效果。这种结构化评价方式也为后续VR文化遗产系统提供了可复用的评估模型。

4.2 临场感与交互行为分析方法

用户体验分析采用“行为数据+主观评价”双路径方法。从感知结构角度来看,视觉在多模态交互中仍然处于主导地位。视觉是人类最主要的感官,占外界信息获取比重的80%以上,是人机交互中最重要的模态。视觉交互具有时间性和空间性,能够对环境进行全方位的感知和掌控^[5]。在行为数据层面,通过系统记录用户在虚拟空间中的移动轨迹、停留时间、视角变化频率以及交互行为次数,对用户的探索模式进行量化分析。这些数据能够反映用户在不同空间区域的兴趣分布与注意力集中程度。

在主观评价层面,通过结构化问卷对用户的沉浸感、理解程度与情感体验进行评分,从而获取用户对系统的直接反馈。通过将行为数据与主观评价进行交叉分析,可以更准确地判断系统在不同体验维度上的表现。

此外,本研究还引入行为路径分析方法,通过对用户移动轨迹的可视化处理,分析其在空间中的停留热点与路径选择偏好,从而进一步优化空间叙事结构与交互设计逻辑。

4.3 沉浸体验数据与效果分析

实验结果表明,基于VR技术构建的沉浸式展示系统在多个体验维度上均表现出积极效果。在空间临场感方面,用户普遍反馈虚拟环境具有较强的空间包围感与真实感,尤其在光影变化与空间尺度还原方面表现突出。

在认知理解度方面,用户对呼兰天主教堂的历史背景与建筑结构理解程度显著提升,说明沉浸式叙事方式在信息传递过程中具有较高效率。在情感体验方面,仪式性交互设计与环境氛围营造对用户情绪产生明显影响,使其更容易产生文化代入感与情感认同。

综合来看,该系统不仅提升了文化传播效率,也在一定程度上改变了用户对宗教建筑的认知方式,使其从“观看对象”转变为“体验空间”,体现出VR技术在文化遗产数字化展示中的实际应用价值。

五、 结语

本文构建了基于VR技术的呼兰天主教堂沉浸式展示系统,并围绕空间重建、叙事设计与用户体验评价进行了系统性分析。研究表明,该系统能够有效提升用户的空间临场感与文化理解能力,同时增强宗教建筑遗产的沉浸式传播效果。该方法可为同类文化遗产的数字化展示提供可复制的技术路径与设计参考。

参考文献:

- [1] 周俞彤.数字媒体技术赋能建筑空间交互体验研究[J].陶瓷,2026,(3):154-156.
- [2] 崔小英,张小帆.博物馆VR大空间沉浸式展览的跨界挑战与策展逻辑——以南京博物院“观天下·坤舆万国全图”展为例[J].东南文化,2025,(4):149-155.
- [3] 叶之声.博物馆VR大空间沉浸式探索展的文化记忆激活机制研究——基于建构主义、具身认知与空间叙事的思考[J].中国博物馆,2026,(2):101-109.
- [4] 朱宇婷.基于VR技术的文化遗产沉浸式展陈设计研究——以繁昌窑为例[J].鞋类工艺与设计,2026,6(12):74-76.
- [5] 王晓杰.多模态交互理论下红色文化场馆沉浸式体验装置设计[D].大连交通大学,2025.

Research on Immersive Display and User Experience of Religious Architecture Supported by VR Technology

Shijun Qin¹, Han Diao¹

¹*School of Arts, Heilongjiang University, Harbin, China*

Abstract: Against the backdrop of the national strategy for cultural digitalization and continuous innovation in cultural heritage conservation technology, virtual reality (VR) offers new avenues and methods for the presentation and dissemination of historic architectural heritage. Taking the Hulan Catholic Church in Harbin as a case study, this paper addresses the requirements for its digital preservation and immersive presentation by developing a 3D reconstruction method based on UAV oblique photography and multi-source data fusion. Building on this, an immersive VR presentation system was designed to integrate historical architectural information, spatial structural characteristics, and cultural narratives, thereby establishing an integrated presentation framework comprising "digital modeling, scene reconstruction, and interactive experience." Furthermore, drawing on presence theory and place-based narrative methods, a user experience evaluation system was constructed across three dimensions—immersion, cognitive understanding, and emotional experience—and the system's effectiveness was analyzed through experiments and behavioral observation. The results demonstrate that the VR-based immersive presentation significantly deepens users' understanding of the cultural value of religious architecture and fosters emotional resonance, while enhancing the interactivity and experiential quality of cultural dissemination; this provides a valuable technical pathway and theoretical basis for the digital preservation and dissemination of religious architecture and similar cultural heritage.

Keywords: Virtual Reality ; Digitization of Cultural Heritage; Immersive Display; User Experience; 3D Reconstruction