

基于数字孪生的畲族文化数字化保护与沉浸式展示研究

路春辉 利业鞅

广东工程职业技术学院, 中国·广东 广州 510520

摘要: 针对畲族文化面临的传承断代、物理遗产损毁等困境, 提出一种融合数字孪生、人工智能(AI)与沉浸式交互技术的一体化保护与展示方案。通过多源数据融合建模、AI驱动的语言交互、虚实融合的服饰展示三大核心技术, 构建集数据采集、孪生建模、智能处理、终端展示于一体的系统架构。以潮州饶平蓝屋畲族村为实践载体, 完成宗祠建筑高精度复刻及服饰虚拟换装平台搭建。测试结果表明, 系统三维模型重建误差 $\leq 0.5\text{mm}$ 。该研究实现了畲族文化的永久性留存与创新性传播, 为少数民族文化数字化保护提供了可复制的技术范式。

关键词: 数字孪生; 畲族文化; 数字化保护; 沉浸式展示

Study on Digital Protection and Immersive Display of the She Ethnic Culture Based on Digital Twin

Lu Chunhui, Li Yeda

Guangdong Engineering Polytechnic, China Guangdong Guangzhou 510520

Abstract: Aiming at the dilemmas faced by the She ethnic culture, such as the interruption of inheritance and damage to physical heritage, this study proposes an integrated protection and display scheme that integrates digital twin, artificial intelligence (AI) and immersive interaction technologies. Through three core technologies—multi-source data fusion modeling, AI-driven language interaction, and virtual-real integrated costume display—a system architecture integrating data collection, twin modeling, intelligent processing, and terminal display is constructed. With Lanwu She Ethnic Village in Raoping, Chaozhou as the practical carrier, the high-precision reproduction of ancestral hall buildings and the development of a virtual costume changing platform have been completed. Test results show that the reconstruction error of the system's 3D model is $\leq 0.5\text{mm}$. This study has realized the permanent preservation and innovative dissemination of the She ethnic culture, and provided a replicable technical paradigm for the digital protection of ethnic minority cultures.

Keywords: Digital twin; She ethnic culture; Digital protection; Immersive display

1 引言

1.1 研究背景与意义

在全球数字化转型进程中, 少数民族文化保护与传承面临双重挑战: 一方面, 现代化进程导致文化生态萎缩, 传统宗祠、民居受自然风化与修缮缺失影响面临结构损坏, 凤凰装刺绣等技艺因传承人稀缺而传承受阻; 另一方面, 传统保护方式存在传播范围有限、交互性不足等短板, 难以适应年轻一代的文化接受习惯。

数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟映射模型, 实现物理世界与虚拟世界的实时交互与数据同步^[1], 为文化遗产保护提供了全新技术路径。其在文化领域的应用可实现三大突破: 一是高精度复刻文化遗产形态, 避免自然与人为因素导致的损毁; 二是构建沉浸式交互场景, 打破地域与时间限制; 三是实现文化数据的可视化分析与长期留存^[2]。基于此, 本研究聚焦畲族文化核心要素, 构建数字化保护与展示系统, 对推动少数民族文化活态传承、丰富

文化数字化保护理论与实践具有重要意义。

1.2 研究现状

现有少数民族文化数字化研究多集中于单一要素保护: 建筑领域以三维建模为主, 如王芳等采用激光扫描技术实现传统建筑数字化复刻^[3], 但缺乏动态监测与交互功能; 服饰文化展示以虚拟试穿为主, 孙伟等优化的蒙皮权重算法提升了换装真实感^[4], 但文化内涵挖掘不足。现有研究尚未形成“多要素融合、全流程覆盖、沉浸式交互”的一体化解决方案, 数字孪生技术在多文化要素协同保护中的应用仍需深化。

1.3 研究目标与创新点

1.3.1 研究目标

针对畲族建筑、服饰两大核心文化要素, 提出融合数字孪生与 AI 技术的数字化保护方法, 构建集数据采集、孪生建模、智能交互、多维展示于一体的系统架构, 实现畲族文化的高精度留存、智能化传承与沉浸式传播。

1.3.2 创新点

(1) 提出多源数据融合的文化遗产数字孪生建模方法,整合激光扫描、摄影测量、田野调查等数据,实现建筑、服饰等文化载体的高精度复刻与文化内涵数字化关联。

(2) 构建虚实融合的服饰文化展示平台,结合 U-Net 神经网络与 Unity 引擎,实现服饰纹样解构、虚拟换装与文化内涵动态讲解的一体化呈现。

2 畬族文化数字化展示核心要素与技术框架

2.1 核心文化要素分析

2.1.1 建筑遗产:传统民居与宗祠的精准保护

畬族传统建筑(民居、宗祠)蕴含独特营造技艺,但受自然风化与人为破坏影响,结构损坏、装饰模糊问题严重,且修缮缺乏精准数据支撑。需通过高精度扫描实现建筑三维数据获取,构建数字孪生体,为修缮模拟与虚拟展示提供基础^[3]。

2.1.2 服饰艺术:凤凰装的文化传承与创新

畬族凤凰装的刺绣纹样、草木染技法承载千年文化密码,但年轻一代认知度低,技艺传承面临危机。需采集服饰纹理、款式等核心数据,构建数字化资源库,通过创新展示方式吸引年轻群体关注,助力文化传承。

2.2 数字孪生技术框架设计

2.2.1 数据层:多模态文化数据采集与处理

融合三维激光雷达扫描、高清摄影测量、专业语音采集技术,获取建筑三维几何数据、服饰视觉数据、畬语听觉数据,构建多源异构数据库。采用边缘计算技术进行数据清洗、降噪与格式转换,通过高速网络传输至云端完成融合存储,确保数据质量与可用性^[2]。

2.2.2 模型层:数字孪生体构建与动态映射

采用三角网格简化、纹理映射优化技术,构建建筑与服饰的轻量化高精度三维模型;通过知识图谱技术整合畬族文化语义数据,构建文化知识库,实现技术模型与文化内涵的深度关联。

2.2.3 应用层:沉浸式展示与交互系统开发

集成虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、混合现实(MR)技术,构建线上线下融合展示平台。线上通过 WebGL 技术搭建轻量化虚拟展厅,支持浏览器端远程漫游;线下依托 VR 头盔、全息投影设备打造沉浸式体验空间,实现虚实场景无缝衔接^[1]。

3 关键技术研究 with 系统实现

3.1 建筑遗产数字化保护技术

3.1.1 三维激光雷达扫描与点云数据处理

采用 Trimble X7 三维激光雷达对畬族宗祠进行全方位

扫描,该设备每秒可获取 4 万采样点的高密度点云数据。运用 RANSAC 算法去除噪声点,通过泊松曲面重建技术将点云数据转化为高精度三角网格模型,实现建筑结构、装饰细节的毫米级复刻^[3]。该模型可应用于文物修缮模拟、历史场景还原与虚拟导览三大场景,为建筑遗产保护提供技术支撑。

3.1.2 建筑孪生体动态监测与预测

在数字孪生模型中嵌入温湿度、光照强度等环境传感器数据,通过决策树与神经网络算法构建建筑老化预测模型,实时模拟风化、虫蛀等损伤过程,预测损伤部位与程度,为预防性保护提供数据支持^[1]。

3.2 服饰文化交互展示技术

3.2.1 服饰纹理数字化采集与特征提取

通过 4K 分辨率多角度摄影与结构光扫描技术获取凤凰装数据,利用 U-Net 神经网络进行纹样分割,提取凤凰纹、彩带纹等核心元素的几何特征(形状、比例)与色彩特征(RGB 色域分布、对比度)^[4],构建服饰文化元素数据库,为虚拟展示与学术研究提供支持。

3.2.2 虚拟换装系统实现与用户交互设计

基于 Unity 引擎开发虚拟试穿模块,采用蒙皮权重优化算法实现服饰模型与人体姿态的动态匹配,避免穿模、扭曲问题^[4]。支持手势识别、体感设备等交互方式,用户可实时更换虚拟服饰,系统同步展示纹样寓意与制作工艺讲解,提升体验的互动性与知识性。

4 实践应用与效果分析

4.1 饶平蓝屋畬族村数字化展示项目实践

以潮州饶平蓝屋畬族村为实践基地,对村内百年历史的畬族宗祠开展数字孪生建模工作:通过 Trimble X7 激光雷达完成建筑三维点云采集,经 RANSAC 算法去噪与泊松曲面重建技术处理后,构建出毫米级精度的虚拟模型;基于该模型进一步搭建“线上虚拟展馆+线下 VR 体验区”双展示场景,其中线上展馆依托 WebGL 技术实现浏览器端直接访问,用户可自由漫游宗祠内部空间并查看木雕、砖雕等装饰细节的文化解读,线下 VR 体验区配置 VR 头盔设备,还原宗祠祭祀、畬族传统仪式等动态场景,支持用户沉浸式参与文化互动。项目落地后,线上虚拟展馆吸引了广泛访问,覆盖多地畬族同胞及文化爱好者;线下 VR 体验区接待了众多游客,年轻群体参与度较高,有效提升了其对畬族建筑文化的认知。

4.2 系统性能测试

4.2.1 技术指标测试

三维模型重建:建筑与服饰模型重建误差 $\leq 0.5\text{mm}$,

满足文物修缮与虚拟展示精度要求；虚拟换装：换装响应延迟 $\leq 80\text{ms}$ ，操作流畅无卡顿，用户体验良好。

4.2.2 用户满意度调查

通过线上线下结合方式发放问卷 200 份，回收有效问卷 200 份。调查结果显示：92% 的用户认为系统提升了文化体验的沉浸感，85% 的用户认可系统在文化传播中的创新性价值，78% 的用户表示愿意通过该系统深入了解畲族文化。用户建议集中在丰富文化内容、优化操作界面等方面，为系统后续升级提供了参考。

5 挑战与展望

5.1 现存问题

5.1.1 数据采集标准化不足

不同来源数据在格式、精度、语义表达上存在差异，影响多源数据互操作性。需建立统一的数据采集规范，明确设备要求、数据格式与元数据标准^[9]。

5.1.2 技术成本较高

现有建模与展示设备价格昂贵，限制了技术推广应用。需研发轻量化算法与低功耗终端，降低系统部署门槛。

5.1.3 文化内涵挖掘不深

数字化展示侧重于表面呈现，对文化元素背后的历史渊源、象征意义挖掘不足。需引入人类学专家参与数据标注，提升展示内容的学术严谨性。

5.2 未来研究方向

5.2.1 跨模态融合与智能化升级

结合脑机接口与情感计算技术，实现用户大脑信号与系统的直接交互，根据用户情感状态动态适配展示内容，提升交互自然性^[11]。

5.2.2 元宇宙场景拓展

构建畲族文化主题元宇宙空间，还原传统村落、节日庆典等场景，发行文化数字藏品，形成“技术 + 文化 + 经济”的良性循环。

5.2.3 标准化与产业化推广

制定少数民族文化数字孪生技术标准，形成可复制的“技术 + 文化 + 文旅”融合模式，推动成果在更多少数民族地区推广应用，助力乡村振兴与文化产业发展^[2]。

6 结语

本研究针对畲族文化保护与传承的现实困境，提出基于数字孪生的一体化解决方案，通过多源数据融合建模、虚实融合的服饰展示两大核心技术创新，构建了覆盖“数据采集 - 模型构建 - 交互展示”全流程的数字化系统。实践表明，系统实现了畲族建筑毫米级复刻与服饰沉浸式展示，有效解决了文化遗产损毁、传承断代、传播受限等问题。

研究成果不仅为畲族文化活态传承提供了技术支撑，也为其他少数民族文化数字化保护提供了可借鉴的范式。未来需进一步完善数据标准化体系，降低技术成本，深化文化内涵挖掘，推动数字孪生技术与少数民族文化的深度融合，为中华优秀传统文化永续传承贡献力量。

参考文献：

- [1] 张明, 李华. 数字孪生技术在文化遗产保护中的应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(12): 1-8.
 - [2] 吴刚, 郑丽. 文化数字孪生数据采集标准化研究[J]. 数据与计算发展前沿, 2023, 5(2): 78-85.
 - [3] 王芳, 陈亮. 少数民族传统建筑数字化复刻技术探讨[J]. 建筑科学, 2021, 37(8): 56-62.
 - [4] 孙伟, 周静. 虚拟试衣系统中蒙皮权重优化算法的研究与实现[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(5): 123-128.
- 基金项目：广东省重点领域项目（项目编号：2023ZDZX4095）。

作者简介：路春辉（1979-），女，中国吉林永吉人，硕士，教授，研究方向：从事计算机科学与技术研究。