

Application of Modern 3D Animation Technology in the Digital Recreation and Revitalization of Classic Characters in Dazu Rock Carvings

Xinyu Yang

Chongqing Industry and Information Technology Vocational College, Chongqing, 404100, China

Abstract

As the pinnacle of China's grotto art and a UNESCO World Heritage Site, the classic characters in Dazu Rock Carvings carry immense ancient artistic, religious, and socio-cultural value, yet face threats such as morphological damage and blurred details caused by natural weathering and human destruction. While traditional physical and chemical reinforcement methods can delay damage, they struggle to achieve dynamic dissemination and in-depth interpretation of cultural value. Based on this, this study focuses on classic characters in Dazu Rock Carvings such as the "Flute Player," "Chicken Raiser," and "Ox Herder," exploring a complete path for modern 3D animation technology to achieve highly realistic digital recreation and revitalization. Through high-definition data acquisition, digital restoration, material rendering, skeletal binding, and multi-platform output, the research not only accurately restores the artistic form and historical texture of the carvings but also endows static statues with dynamic vitality, successfully breaking the spatiotemporal limitations of cultural heritage dissemination. This provides a reusable technical model for the digital protection and innovative dissemination of cultural heritage, which holds significant practical implications for enhancing public awareness and recognition of traditional culture, especially among younger generations.

Keywords

Dazu Rock Carvings; 3D animation technology; digital recreation; cultural heritage revitalization

现代三维动画技术在大足石刻经典角色数字再现与活化中的应用

杨忻宇

重庆工信职业学院, 中国·重庆 404100

摘要

大足石刻作为中国石窟艺术的巅峰之作与世界文化遗产,其经典角色承载着极高的古代艺术、宗教及社会文化价值,却面临自然风化与人为破坏导致的形态受损、细节模糊等威胁。传统的物理与化学石刻加固修复手段虽能延缓损坏,却难以实现文化价值的动态传播与深度阐释。基于此,本研究聚焦大足石刻“吹笛女”“养鸡女”“牧牛图”等经典角色,探索现代三维动画技术实现其高写实感数字再现与活化的完整路径。研究通过高清数据采集、数字修复、材质渲染、骨骼绑定及多平台输出的全流程技术实践,不仅精准复原石刻的艺术形态与历史质感,更赋予静态造像的动态生命力,成功打破文化遗产传播的时空局限,为文化遗产的数字化保护与创新性传播提供了可复用的技术范本,对增强公众尤其是年轻一代对传统文化的认知与认同具有重要的实践意义。

关键词

大足石刻; 三维动画技术; 数字再现; 文化遗产活化

1 引言

大足石刻坐落于重庆大足区,始建于唐初、最兴盛于北宋,现存5万余尊造像,遍布大足区75处石刻摩崖造像点,以规模宏大、雕刻精美、题材丰富且贴近生活著称,是中国晚期石窟艺术的集大成者,1999年被联合国教科文组织列入

《世界文化遗产名录》。受重庆地区气候湿润多雾的影响,加之长期自然风化、游客呼吸产生的二氧化碳侵蚀,以及历史上的人为破坏,大足石刻正面临严峻的保护挑战:部分造像出现表面剥落、衣纹不清、肢体残损等问题。

随着数字化技术在文化遗产领域的深度应用,从“数字敦煌”到“云游故宫”,技术创新已成为推动文化遗产活态传承的核心动力。本研究以大足石刻“吹笛女”“养鸡女”“牧牛图”等经典角色为案例研究对象,旨在突破静态文物数字存档局限,借助现代三维动画技术实现高写实数字

【作者简介】杨忻宇(1998-),女,中国重庆人,硕士,从事数字媒体研究。

文物的再现与活化。

2 高保真数据采集与三维重建：摄影测量技术的应用实践

高写实数字再现的基础是获取精准、高分辨率的石刻几何与纹理数据，摄影测量技术因成本效益高、还原效果好，成为本研究数据采集的核心手段^[1]。

2.1 数据采集前期准备：光照、相机与拍摄策略优化

数据采集质量直接决定后续三维重建效果，需从光照控制、相机设置、拍摄策略三方面严格把控。

在光照控制方面，石刻表面的纹理细节（如衣纹褶皱、石材颗粒）对光线变化极为敏感，强光直射易产生硬阴影与高光反射，导致细节丢失；光线不均则会造成图像色彩偏差，影响后续纹理贴图的一致性。参考王海燕、黄永文在数字图像修复技术研究中提出的“清晰原始图像是后续处理基础”的观点^[2]，本研究优先选择多云或阴天进行户外采集，此时自然光均匀柔和，可最大程度保留石刻细节。

2.2 数据处理流程：从照片到基础三维模型的转化

图片拍摄后，采用专业摄影测量软件 RealityCapture 对采集数据进行处理，该软件能够高效处理大规模照片，自动生成精度较高的模型，具体过程如下：

图像对齐（Align Photos）：程序自动寻找海量照片间的特征点，运用算法匹配计算每张照片的相对位置及相机信息，重建拍摄场景的空间坐标系统。

生成密集点云（Build Dense Cloud）：基于图像对齐结果，软件生成包含数百万甚至数十亿个带颜色信息的三维空间点，形成高密度点云，初步还原石刻的立体形态。

生成网格（Build Mesh）：构建多边形网格，将大量点云连接起来，获得石刻模型的大概几何信息。此时模型虽能满足石刻的形体要求，但是可能存在噪声点及多余的面片，需后续优化。

生成纹理（Build Texture）：将原始高清晰照片精确映射到3D模型的网格上，构建高分辨率纹理贴图，从而使模型上的原始色彩与纹理特征符合石刻的原始外观。

3 数字修复与艺术再创作：ZBrush 软件的精细雕刻实践

3.1 基础形态重塑与拓扑结构优化

基础模型的形态准确性与拓扑结构的合理性直接影响到后续人工雕刻、材质制作与骨骼绑定的效率。由于照片重建生成的模型拓扑结构不规则（多边形分布杂乱），且存在局部形态畸变（如“吹笛女”肩部因风化导致的形态变形），需通过 ZBrush 的 Dynamesh 与 ZRemesher 工具进行优化。

将基础模型导入 ZBrush 后，使用 Dynamesh 功能对模型进行重新布线，将由于风化、侵蚀而出现的孔洞和缺失的部分进行填补以及对模型的基本形体轮廓做平滑处理。例如修复“养鸡女”手臂残损部位、填补“吹笛女”衣纹缝隙处

的缺失细节，但其生成的拓扑结构无法满足后续精细雕刻与动画绑定需求。因此运用 ZRemesher 工具，生成平滑、规律的四边形拓扑。该命令可依据模型外形特征自动设置布线数量，在兼顾石刻生硬棱角（如衣纹转折、面部轮廓）和柔和过渡部位平衡性的同时，为后续 UV 展平、贴图绘制和骨骼绑定提供良好的网格基础。

3.2 细节修复与表面纹理增强

拓扑优化完成后，进入精细雕刻阶段——该阶段需结合考古资料与艺术风格分析，分“修复残损细节”“增强表面纹理”“重建缺失部件”三个步骤进行，确保修复结果的学术性与艺术性统一。

4 PBR 材质与纹理制作：Substance Painter 软件的应用

4.1 烘焙贴图：高模细节向低模的传递

将 ZBrush 中完成的高模和拓扑优化的低模导入到 Substance Painter 中进行贴图的烘焙，实现高模细节向低模的传递。烘焙的贴图包括：法线贴图（Normal Map）：它记录高模表面凹凸的细节，可以让低模在渲染中表现出高模的立体感，例如石刻衣纹的起伏、面部的细微轮廓。环境光遮蔽（AO）：模拟出光线对模型缝隙、凹陷等处的遮挡效果，可以增强模型的立体感和真实性，如“养鸡女”手中鸡笼缝隙的阴影。曲率（Curvature）：记录模型表面曲率的变化，用来指导后续对模型的程序化磨损、风化的加入，如石刻边缘的磨损痕迹。高度贴图（Height Map）：记录模型表面的高度差，可用于实时渲染中真实的凹凸效果（如 AR 应用中的近距离观察）。

4.2 分层材质制作：还原石刻真实质感与历史痕迹

PBR 材质制作采用“分层叠加”的思路，即从“基础材质”到“历史痕迹”逐步添加细节，每一层材质均参考大足石刻的实际特征，确保还原的真实性。具体分为基础材质层、风化效果层、生物侵蚀层与残存色彩层四层制作，各层之间通过遮罩控制显示范围，避免相互干扰。

基础材质层：为模型赋予砂岩基础材质，调节基础色（Base Color）、金属度（Metallic）、粗糙度（Roughness）参数，模拟出石刻的原始石材质感。

风化效果层：利用 Substance Painter 内置生成器与遮罩，基于曲率与 AO 贴图，在模型边缘、缝隙处程序化添加积尘、水渍、磨损效果。

生物侵蚀层：在模型朝上或潮湿区域，添加苔藓、地衣材质层，通过调整透明度与色彩，模拟生物侵蚀效果，增强石刻的历史沧桑感。

残存色彩层：依据考古发现，大足石刻部分造像在建造时曾有彩绘（如“吹笛女”“养鸡女”的蓝绿色衣袍），但因长期风化仅残留少量痕迹^[3]。为避免过度还原，本研究参考《大足石刻雕塑全集》宝顶石窟卷，仅在明确有彩绘痕迹的区域添加色彩。

5 骨骼绑定与动画制作：Maya 赋予角色动态生命力

5.1 角色骨骼绑定 (Rigging)：构建动画控制骨架

根据不同角色的形态特征与动作需求，设计针对性的骨骼绑定方案：

“吹笛女”骨骼绑定：主要为身体制作重心控制器，保证人物站姿和轻微摆动的稳定；细化手臂、手腕、手指控制器，用于手持乐器、吹奏时手指位置变化的笛孔变化；增加脸部控制器，控制口型、眼神的运动，模拟吹奏过程中的呼吸变化和神态。

骨骼绑定过程中，需反复调试骨骼权重，避免动画时模型出现穿帮、形变异常等问题，确保角色动作自然流畅。

5.2 动画制作：基于角色内涵的艺术化创作

动画制作以“还原文化场景、诠释角色内涵”为核心，而非单纯的“动作设计”，结合大足石刻文化内涵，进行关键帧动画创作：

“吹笛女”动画：动画起始为石刻静态姿态，随着镜头推进，“吹笛女”缓缓“苏醒”。手臂轻抬将笛子送至唇边，手指在笛孔上轻盈跳动，身体随节奏微微起伏，眼神灵动，配合轻柔的民间音乐，展现沉浸在音乐中的活泼与喜悦，还原古代乐舞文化场景。

“养鸡女”动画：设计生活化动作，“养鸡女”从远处缓步走来，停下后低头查看笼中鸡群，手部轻轻抚摸鸡笼，动作节奏舒缓，突出农村生活的质朴与生动，诠释宋代市井生活细节。

“牧牛图”叙事动画：依据“牧牛图”连环画式构图，采用镜头语言串联不同场景。动画从牧童悠闲放牛开始，通过镜头推拉摇移，依次展现牛低头饮水、牧童枕在牛背小憩的场景，场景间采用平滑过渡效果，将静态石刻转化为充满田园诗意的动态叙事，以田园生活诠释佛教“禅农合一”思想，实现“动画观赏”与“文化科普”的结合。

6 多平台输出策略与技术实现：满足不同场景传播需求

6.1 线上视频平台输出：高质量静态影像传播

输出要求：追求最高画质，无需实时交互，适合用于宣传片、教育短片制作，向公众展示项目成果。

技术实现：在 Maya 中使用 Arnold 渲染器进行离线渲染输出 2K 高分辨率序列帧；通过 Adobe Premiere、After Effects 等后期软件进行剪辑、配乐、调色，添加字幕解说，最终输出 MP4、MOV 等通用视频格式，上传至抖音、B 站等线上平台，扩大传播范围。

6.2 交互式展览展示输出：沉浸式互动体验

输出要求：支持实时渲染与用户交互，需保证高画质，适用于博物馆触摸屏、大型投影等展览场景。

技术实现：将优化后的模型、材质、动画导入 Unreal

Engine 游戏引擎，利用引擎实时渲染功能，实现模型高画质实时展示；开发交互功能，用户通过触摸屏可自由旋转、缩放模型，点击特定部位（如“吹笛女”的笛子）触发动画播放，同时显示石刻文化背景、艺术价值等文字图片信息，增强展览互动性与教育性^[4]。

6.3 AR 移动应用输出：虚实融合的创新传播

AR 移动应用是本研究最具创新性的传播形式，可实现用户与石刻的实时互动：

交互触发机制：采用两种触发方式，一是在石刻旁或宣传材料上设置二维码，用户扫描后，APP 在手机摄像头捕捉的真实环境中叠加 3D 动画角色；二是利用 ARKit 与 ARCore 的图像识别技术，APP 可直接识别石刻本身，用户将手机对准石刻，活化后的动画角色便精准叠加在石刻之上，实现虚实融合。

7 结论与展望

本研究通过系统实践，构建了从高保真数据采集、数字修复、材质制作、骨骼绑定到多平台输出的完整技术流程，AR 应用的实地互动体验，让公众从“被动观赏”转变为“主动参与”^[5]，进一步深化了对传统文化的认知与认同，验证了现代三维动画技术在大足石刻经典角色的高写实数字再现与活化中的可行性。

随着数字技术的持续革新，大足石刻数字化保护与活化仍有无限的创新研发潜力：未来可依托 5G 技术与移动智能终端算力增长，实现更大规模、更高精度的 AR 体验^[6]，例如实时渲染整个全洞窟场景，给予使用者更沉浸的虚拟游览体验；依托 AI 技术，开发风化纹理智能修复与生成算法，提高数字修复效率与准确性。

还可将研究成果推广至更多文化遗产领域，并深化教育与产业融合等。另外通过多语言版本的 AR 应用、线上视频与国际合作共同开发“数字石窟艺术展”，向全球展示大足石刻的文化魅力，推动中国文化遗产走向世界，为全球文化遗产数字化保护与传承贡献中国智慧与方案。

参考文献

- [1] 田俊.大足石刻造像的数字化保护[D].重庆师范大学,2014.
- [2] 王海燕,黄永文.数字图像修复技术——大足石刻数字化保护与传播的基础[J].天津美术学院学报,2016,(08):64-70.
- [3] 郭相颖.《大足石刻雕塑全集》[M].重庆:重庆出版社,1999:52-63.
- [4] 薛如冰,陆黛灵.数字媒体视域下非遗文化保护与传承——以寿县抬阁肘阁为例[J].盐城工学院学报(社会科学版),2021,34(01):88-91.
- [5] KRUSE P, DRUŽETIĆ-VOGEL I, VORMANN A, et al. AR Poensgenpark: Multiperspective Storytelling with Augmented Reality as an Attempt of Dialogue Facilitation in a Multifaceted Dispute[C]// ISEA 2024 Symposium. 2024.
- [6] 韦义超.虚拟现实与数字媒体技术融合分析[J].通讯世界,2024,31(08):196-198.