

非遗清代虎头帽数字动态还原技术研究

王富伟¹

WANG Fuwei

摘要

清代虎头帽作为承载中国民俗文化的重要非物质文化遗产，其传统数字化展示多局限于静态模型，难以传递服饰在运动中的工艺美感与文化语境。文章提出一种能还原真实动态的数字角色动态穿戴技术方案，通过 RealityCapture、Maya、Marvelous Designer 与 Unreal Engine 的协同工作流，实现虎头帽从静态展示到物理模拟的自然动态展示的突破。实践表明，该方案能使虎头帽在数字角色的各类动作中呈现自然褶皱、流苏摆动等物理效果，较传统静态展示提升文化信息传达效率，为服饰类非遗的活态数字化保护提供可复用的技术范式。

关键词

清代虎头帽；数字角色；动态穿戴；物理模拟；活态数字化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.03.017

0 引言

清代虎头帽融合了刺绣工艺、民俗信仰，更融入了中国儿童服饰的实用功能，其帽体结构与装饰细节，均承载着民间驱邪纳福的深层文化内涵^[1]。在非遗数字化调研实践中，虎头帽的呈现形式多为静态三维模型，更多则以平面图像为主，结合调研实践，这两种展示媒介存在两处明显局限：一是无法呈现布料运动时的自然垂坠状态，更难以还原帽子的褶皱变化，例如帽帘随头部转动产生的摆动效果；二是难以传递其作为儿童服饰的文化语境，以及背后蕴含的使用场景意义。

数字角色物理模拟技术，为破解上述展示局限提供了全新路径。将虎头帽模型绑定于数字角色，同步模拟真实运动状态，可有效复现其在节庆、儿童游戏等场景中的动态特征。故宫博物院在灵沼轩数字化项目中已证实，高精度三维建模与动态展示相结合，能显著提升文化遗产的传播效果^[2]，但服饰类文物的动态穿戴模拟，仍面临材质物理特性精准模拟、服饰与角色运动协同适配等技术难题。

在非遗服饰数字化领域，国内现有研究已实现传统服饰的静态三维重建，通过扫描建模技术可精准还原服饰纹样细

节^[3]，但动态穿戴模拟多依赖基础骨骼驱动方式，虽能实现服饰与角色的基础动作跟随，却存在核心缺陷：无法模拟布料的惯性、张力及垂坠等物理特性，难以呈现多层布料叠加后的堆叠褶皱效果。国际范围内，布料物理仿真技术已取得一定进展，通过优化动力学算法可实现织物的实时变形，部分技术方案能将变形误差控制在较低水平，但此类研究的对象多聚焦于现代服装，对传统民俗服饰的动作文化内涵缺乏足够考量。

本文以“还原动态真实性”为核心，结合清代虎头帽非遗数字化展示需求，明确研究内容如下：

- (1) 虎头帽高精度三维模型的毫米级重建技术研究；
- (2) 数字角色与虎头帽的运动协同机制设计；
- (3) 非遗布艺物品物理模拟参数体系的构建；
- (4) 基于 UE5 的交互式动态展示实现方法。

技术路线采用“四阶协同”框架：

(1) 数据采集阶段：采用 RealityCapture 软件对虎头帽实物进行摄影测量操作，拍摄多张多角度照片，全面覆盖帽体整体形制及各细节部位，为后续动态穿戴模拟工作提供精准的几何支撑依据。

(2) 在 Maya 软件环境中，针对数字角色头部构建完整的骨骼链结构，进而实现虎头帽与数字角色头部运动的自然联动，保障后续动态模拟的协调性。

(3) 物理模拟阶段：在 Marvelous Designer 软件中，针对性设定物理模拟相关属性，通过多轮预模拟进行反复调试优化，确保帽体摆动、布料褶皱等动态效果，均符合真实场景下的物理运动规律。

(4) 展馆集成阶段：将经过优化的物理动画及数字角色模型，导入基于 UE5 搭建的数字展馆场景中，同步添加展

1. 江阴职业技术学院计算机科学系 江苏江阴 214405

[基金项目] 长江国家文化公园（江阴段）非遗美育数字展馆创新设计研究（2024SJYB0740）；江苏省社科普及示范基地“‘薇采传创’非物质文化遗产传承与再创基地”（SKXKJJD2023001）；江阴职业技术学院“基于文化创意产业的非遗传承与创新应用团队”（XJKYCX2022001）；非遗文化传承视域下高职影视类专业政行企校协同育人机制研究（2025SJYB0753）

示动画、调试调节材质参数,最终实现虎头帽的实时动态展示效果。具体实践技术路线如图1所示。

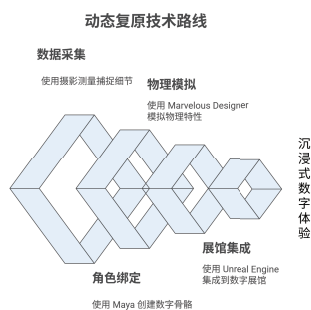


图1 实践技术路线图

1 虎头帽三维模型构建与优化

高精度三维模型是虎头帽动态模拟的基础前提,既要完整保留其工艺细节与形态特征,又需兼顾后续物理模拟及交互展示的计算效率,本研究环节通过RealityCapture软件,完成虎头帽三维模型的重建与优化工作。

1.1 基于RealityCapture的模型重建

数据采集流程:本研究采用iPhone 13Pro作为图像采集设备(其主摄为1200万像素,支持60帧/s的4K视频录制),对虎头帽实物进行多角度拍摄。拍摄过程采用环形移动路径,通过录制视频的方式获取图像素材,最终从视频中筛选提取出452张有效图像。为保障图像纹理清晰,拍摄全程使用柔光箱提供均匀照明,为后续模型重建提供高质量素材。

模型生成流程:将采集筛选后的有效图像导入RealityCapture软件^[4],首先点击“Align Images”指令完成图像特征点的自动匹配与对齐,在生成稠密点云并确认点云质量后,继续点击“Create Mesh”指令生成带纹理的初始三维模型。为完整还原虎头帽工艺细节,将纹理分辨率设置为8192px×8192px,最终得到面数约3612658的三维模型。

1.2 模型面数优化

面数优化是平衡3D模型细节呈现与实际应用需求的核心手段。结合研究实践来看,高面数模型虽能精准还原虎头帽的精细工艺特征,但庞大的面数会引发实时渲染卡顿、存储冗余及传输效率低下等问题,无法适配AR/VR等轻量化应用场景。将模型面数简化至合理范围,可有效降低硬件运行负载,保障虚拟交互过程的流畅性,同时便于模型跨平台复用^[5]。对于虎头帽这类非物质文化遗产模型,面数简化的核心价值在于,既能完整保留其核心形态与工艺特征,又能满足数字展馆展示、虚拟穿戴交互等实际应用需求。

数字模型面数简化直接在RealityCapture中执行即可,通过Tools>Simplify启动智能简化工具,设置Type为Absolute,Target triangle Count为10000。点击Simplify按钮执行简化。

与传统建模对比,传统手工建模需人工绘制刺绣纹样,

精度不足;本方法通过摄影测量实现毫米级还原,且面数优化百分比可控,能满足各种应用项目需求。

2 比实践

2.1 Maya骨骼绑定方法

通用的数字穿戴技术,骨骼绑定作为传统动态化技术,主要原理是通过关节权重控制模型变形,其实施流程如下:

(1) 模型导入与角色匹配

在Maya中,按照项目要求设置好单位后,导入面数优化后的青岛虎头帽复原模型与“薇采传创”非遗宣传项目数字角色小虎萌萌,此数字角色已完成骨骼绑定,基础动作已制作完成。

(2) 比例校准

非遗虎头帽模型和数字角色模型导入后,使用缩放工具按比例对模型进行缩放。通过网格辅助将帽顶中心点与角色头顶骨骼(HeadTop)对齐,误差≤0.5cm,这样既保证了穿戴的服帖度,也同时保障项目效果得到良好呈现。

(3) 把非遗虎头帽复原模型绑定到数字角色骨骼

①在Maya的“Outliner”面板中框选头部骨骼链(Neck、Skull、HeadTop、Ear_L、Ear_R等16个关节),按住Shift键加选复原的清代虎头帽模型,对绑定对象的选择,绑定工作的基础操作,不要遗漏头部的必要骨骼。

②选择好复原模型和骨骼后,需要让骨骼驱动模型变形。执行“Skin→Bind Skin→Smooth Bind”即可。在执行时,需要对一些参数进行必要的设置。

Max Influences:4(允许每个顶点受4个骨骼影响),此参数可以使虎头帽模型变形更自然。

Skinning Method:Dual Quaternion(双四元数),此参数可以减少骨骼旋转时模型关节处的扭曲、收缩或拉伸等不自然变形,对虎头帽这样需要保持体积感的角色来说,设置此参数特别重要。

Normalize Weights:Interactive(实时归一化权重),此参数系手动调节蒙皮权重的重要设置,如果虎头帽复原模型在运动中,发生不自然的变形,可以通过调节节点权重进行修正。

③权重手动调整:使用“Paint Skin Weights Tool”优化权重分布:

由于帽顶紧贴头皮,变形比较小,所以帽顶区域HeadTop关节权重设置为:0.8~1.0;

帽檐距离额头有1~2cm距离,在运动的过程中,需要有一定的变形,所以帽檐区域Neck关节权重设置为0.6~0.8;

虎耳在运动的过程中,摆动最大,所以虎耳区域的Ear_L/R关节权重设置为0.7~1;数字角色骨骼绑定效果如图2所示。

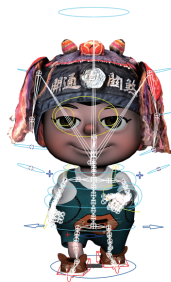


图2 数字角色骨骼绑定效果

(4) 骨骼绑定方法动态穿戴技术动态效果缺陷分析

清代虎头帽复原模型绑定完成后,通过三组典型动作测试(转头 $\pm 45^\circ$ 、低头 -60° 、抬头 $+30^\circ$),发现以下问题:

①虎头帽流苏运动失真:转头动作中,流苏与头部同步运动,无自然滞后。实体测试显示,真实虎头帽流苏,会滞后头部 $0.1\sim 0.2\text{ s}$ (3~6帧),而绑定法中流苏受骨骼控制,无法模拟惯性特性。

②帽檐垂坠异常:低头 45° 时,帽檐出现直角弯折,距离边缘 3 cm 处顶点突然偏移 2 cm 。真实棉布帽檐应呈抛物线垂坠,绑定法因权重突变导致形态失真。

③刺绣纹样变形:抬头动作中,刺绣纹样变形严重。

基于此方法模拟的动态穿戴效果,完全依附于骨骼运动,不受任何重量和力学的影响,整体比较僵硬,不能真实还原非遗布艺物品的真实运动状态。团队经过实践,在 Maya 骨骼绑定方法基础上探索出了下面的新方法。

2.2 基于力学特性的物理模拟动态穿戴方法

Marvelous Designer 作为专业布料模拟软件,可通过参数调节还原虎头帽的材质特性与运动规律,此方法系本研究突破传统方法的核心环节。

(1)把数字角色模型从 Maya 中导出,导出的格式为 Alembic 动画缓存格式,此格式能把骨骼动画数据完整传输到模型上,命名“Character_Anim.abc”;在 Marvelous Designer 中执行“Import Alembic”,勾选“Align to Ground”,角色自动处于“Animation”图层,时间轴同步为 $1\sim 120$ 帧,数字角色动画模型是运动载体,为虎头帽的物理模拟做准备。

(2)把复原的清代虎头帽模型导出,导出的格式为 OBJ 格式,之所以选择 OBJ 格式,是因为模型几何信息简洁,便于转换为物理布料。命名“TigerHat_Mesh.obj”;执行“Import OBJ”。

(3)物理模拟属性参数设置:根据虎头帽材质(外层棉布+刺绣,虎耳填充棉絮),设置差异化参数:执行“Settings—Simulation Properties”,设置“Gravity”为 $-9\ 800$, (此设置保证力垂直向下,并和地球的引力一致)。“Air Resistance”为 1 (此设置控制运动阻尼)，“Friction” 0.6 (此设置系静摩擦系数,防止滑动)。

(4)虎头帽自身物理属性设置:Shrinkage Weft(%)为 90 (依据虎头帽材质棉布属性设定);Shrinkage Warp(%)为 90 (依据虎头帽材质棉布属性设定);Add Thickness Collision(mm)为 5.6 (此设置依据实际测量虎头帽的厚度设定);Friction为 1 (此设置系棉布的摩擦系数);Weight(g)为 86.4 (依据实际称量得到的虎头帽重量设定)。

(5)模拟解算实施:①设置模拟帧率与时长,在动画面板中,设置角色动画的帧率为 24 帧/秒,此设置务必和

maya 中的帧速率保持一致;设置解算时长为 120 帧,和导出的 ABC 文件时长保持一致;②优化物理交互参数,根据角色动作幅度调整参数,若角色动作剧烈(如跑步、摇头),可提高“碰撞迭代次数”(Collision Iterations),避免布料交叉;③开启“Animation (Stable)”:动画稳定模式,此模式使虎头帽的物理效果实时响应角色骨骼运动(如角色低头时,帽檐因重力自然下垂;抬头时,帽檐随惯性后摆);④执行物理动画解算并迭代优化,点击 Animation 面板中的“录制”(Record)按钮,软件自动解算 $1\sim 120$ 帧,MD 会基于角色动画和物理参数计算虎头帽的每一帧运动状态。解算后通过时间线逐帧查看,并修正问题,若出现穿模:适当加大虎头帽厚度和碰撞迭代次数解决;若布料运动僵硬:降低“刚度”参数,使布料更轻盈。若运动过于杂乱:增加“阻尼”或“约束迭代次数”,增强布料稳定性。

(6) 物理模拟动态穿戴方法效果总结:

①转头时,虎耳及流苏因惯性滞后 2 帧,符合物理规律(传统骨骼绑定无此效果);

②低头时,帽檐呈抛物线垂坠,弧度随头部角度增大而自然延伸(传统方法呈折线变形);

③角色走动时,虎头帽的各个结构受力的影响,均在跟随走路颤动,效果真实。

解算完成后,此方法相比骨骼绑定法有三点提升:一是虎耳随动作产生自然惯性摆动;二是帽檐垂坠弧度符合重力规律;三是帽子很多部位会随着角色动作产生实时运动和褶皱(传统方法无此效果)。骨骼绑定法和物理模拟法动态效果对比图如图 3 所示。

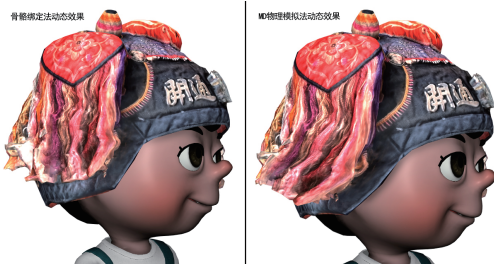


图3 骨骼绑定法和物理模拟法动态效果对比图

2.3 效果实验

通过两种方法的实施效果实验,对两种动态还原方法优缺点系统总结如下:

(1) 骨骼绑定法

①制作效率低:该方法需人工手动创建帽顶、帽檐、垂饰等部位的细分骨骼,同时需细致绘制权重以防止帽体运动时出现变形问题,且关键帧需手动 K 制,整体操作流程繁琐复杂。骨骼绑定与关键帧制作环节,其周期就可能长达数天。

②缺乏自然动态细节:该方法难以模拟布料在真实场景

中的自然垂坠、褶皱扩散及惯性延迟等物理效果,以角色突然转头动作为例,帽檐产生的“滞后摆动”效果需人工手动计算帧差来实现,动态效果显得僵硬。

③修改成本较高:若数字角色的动画发生调整(如动作幅度增大、运动轨迹改变),需重新对骨骼权重进行调整,或修改关键帧相关参数,不利于项目高效推进。

(2) 力学特性的物理模拟动态穿戴方法

①自然真实感强:依托布料物理引擎的解算能力,该方法可自动生成符合物理规律的帽体运动状态,例如重力作用下帽檐的自然下垂、角色低头时虎耳随惯性产生的前摆动作等。

②制作效率较高:相较于骨骼绑定法的手动操作,该方法无需人工手动K制关键帧,仅需根据虎头帽的材质特性与展示需求,合理设置物理参数及碰撞体相关配置,帽体便可自动跟随数字角色动画完成运动效果解算。

③具备自适应调整能力:在实际应用过程中,若数字角色的动画出现修改,例如动作幅度调整、运动速度变化等情况,仅需对帽体物理运动效果重新解算,大幅降低后续调整成本。

④可精准保留布料特性:针对虎头帽不同材质的特性差异,通过针对性调整物理模拟参数,能够清晰地区分各类材质的质感区别,精准还原非遗布艺的独特工艺特点,保障虎头帽动态展示的文化真实性。

3 动态效果导入数字展厅中实践应用

(1)当虎头帽在(marvelous designer, MD)软件中完成物理模拟后,导出“Alembic”格式文件,该格式可完整留存物理模拟过程中的全部顶点动画数据,为后续在数字展馆中顺利呈现自然、真实的物理动态效果,奠定坚实的基础。

(2)在Maya中导出角色模型:选择File>Export>FBX,勾选Animation选项,保存为character.fbx。勾选该选项可保留角色骨骼动画信息,使角色在展馆中能呈现预设动作。FBX格式兼容性强,能顺畅导入数字展馆项目,且能与虎头帽的动画数据形成联动基础。

(3)把两个模型导入数字展馆项目中,放置在设计好的展示位置。导入时需注意检查模型比例是否协调,确保两者在空间中的相对位置合理,避免出现穿插或比例失衡。可通过调整坐标参数,让虎头帽精准匹配角色头部,为后续动态展示做好空间准备。

(4)在关卡蓝图中,创建关卡序列播放器。通过设置时间线同步,将角色动画与虎头帽的物理模拟动画关联,确保项目运行时,数字角色的动作与虎头帽的动态效果完美契合。可调整播放速率与触发时机,让非遗虎头帽的物理动态随角色动作自然呈现,提升展示的沉浸感与观赏性。数字角色及动态虎头帽导入非遗展馆效果如图4所示。



图4 数字角色及动态虎头帽导入非遗展馆效果

4 结论

本方法研究融合了RealityCapture、Maya、Marvelous Designer与UE平台,发挥各个软件平台优势,很好地实现了清代虎头帽从单纯的静态模型展示到动态穿戴展示的技术途径突破。相比传统骨骼绑定动态穿戴方法,实践研究创新点在于:通过布料物理参数调节,包括了重量、刚度、摩擦等物理参数,真实还原了非遗虎头帽的材质特性与力学运动规律,使虎耳及流苏惯性摆动、帽檐垂坠等动态效果更自然逼真。该技术流程不仅解决了非遗服饰动态展示的不真实不自然的问题,还通过交互式数字展馆增强了观众体验,为其他非遗服饰(如肚兜、云肩)的数字化活态展示提供了可复制的技术方案。

未来研究可结合AI辅助,进行参数优化,同时结合VR设备实现第一视角穿戴体验,进一步拓展非遗数字化的应用场景。

参考文献:

- [1]唐莉莉.民间虎头帽的生命礼俗内涵与现代设计应用[J].丝网印刷,2025(10):61-63.
- [2]谭志云,李惠芬.数字技术赋能非遗保护传承的逻辑机理与创新路径[J].南京社会科学,2024(1):142-150.
- [3]黄墨樵,张雨辰,王晓楠.基于SLAM技术的遗产地博物馆AR导览系统研究:以故宫博物院为例[J].中国博物馆,2025(2):76-85.
- [4]张瑞卿.针对少数民族服装图像的三维重建方法研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
- [5]杨晓琳.三维重建技术与RealityCapture软件应用研究:以校园雕塑三维重建模型为例[J].明日风尚,2024(20):176-178.

【作者简介】

王富伟(1981—),男,山东菏泽人,本科,讲师,研究方向:计算机仿真与动画。

(收稿日期:2025-08-20 修回日期:2026-03-16)