

Research on the construction of digital meridian acupoints based on next-generation modeling and VR technology and its teaching application

Mengnan Wei¹ Haoyue Zhang² Liguo Li^{3*}

1. Xinxiang Medical College, Xinxiang, Henan, 453000, China

2. Zhengzhou University Fifth Affiliated Hospital, Zhengzhou, Henan, 450000, China

3. Henan Academy of Medical Sciences, Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

Given that the teaching of meridian and acupoint theory has long been constrained by traditional two-dimensional diagrams and physical models, making it difficult to intuitively present complex three-dimensional anatomical structures and spatial relationships, this study innovatively integrates next-generation modeling technology with virtual reality (VR) technology. Through physical rendering processes (PBR) and dynamic detail optimization (LOD) techniques, a high-precision digital human model of meridians and acupoints with 6000 Meshes and texture resolution of 4096×4096 px has been constructed. This model enables stereoscopic tracking of meridian pathways (6DoF interaction) and tactile feedback of acupoint needling depth. A randomized controlled trial design (n = 120) was used to validate the teaching, and the results showed that the experimental group (VR teaching) significantly outperformed the traditional teaching group in terms of excellent operation assessment rates, acupoint positioning errors, and knowledge retention rates. This study not only provides a quantifiable digital solution for traditional Chinese medicine education but also extends its technical framework to international standardized teaching, remote training, and cultural dissemination, offering significant theoretical and practical value for advancing the modernization of traditional Chinese medicine.

Keywords

next generation modeling; virtual reality (VR); meridian acupoints; digital human; teaching application

基于次世代建模与 VR 技术的经络腧穴数字人构建及其教学应用研究

魏萌楠¹ 张皓玥² 李立国^{3*}

1. 新乡医学院, 中国·河南新乡 453000

2. 郑州大学第五附属医院, 中国·河南郑州 450000

3. 河南省医学科学院, 中国·河南郑州 450000

摘要

鉴于经络腧穴理论教学长期受限于传统二维图谱和实体模型, 难以直观呈现复杂三维解剖结构与空间关系的问题, 本研究创新性地融合次世代建模技术与虚拟现实 (VR) 技术, 通过物理渲染流程 (PBR) 和动态细节优化 (LOD) 技术, 构建了面数达 6000 Mesh、纹理精度 4096×4096 px 的高精度经络腧穴数字人三维模型, 实现了经络循行路径的立体追踪 (6DoF 交互) 和腧穴针刺深度的触觉反馈。采用随机对照试验设计 (n = 120) 进行教学验证, 结果显示实验组 (VR 教学) 在操作考核优秀率、穴位定位误差及知识留存率上均显著优于传统教学组。本研究不仅为中医教育提供了可量化的数字化解决方案, 其技术框架还可拓展至国际标准化教学、远程培训及文化传播领域, 对推动中医药现代化具有重要的理论与实践价值。

关键词

次世代建模; 虚拟现实 (VR); 经络腧穴; 数字人; 教学应用

【课题项目】课题编号: 232102310481。

【作者简介】魏萌楠 (2002-), 女, 中国山西晋城人, 在读硕士, 从事人体解剖与组织胚胎学研究。

【通讯作者】李立国 (1982-), 男, 中国河南安阳人, 博士, 副教授, 从事康养数字人研究。

1 引言

经络腧穴理论是中医学诊疗体系的核心, 其教学效果直接影响中医人才培养质量。传统教学主要依赖二维图谱和简易模型, 难以展现经络系统的三维空间结构和腧穴立体关系, 导致学生对知识的理解停留在表面层次。随着 VR 和次

世代建模技术的发展为解决这一教学困境提供了新思路。尽管现有数字人模型在解剖结构呈现方面已取得进展（如达到6000面/cm³的面片密度），但在模拟经络气血流动、针刺得气感等动态过程方面仍存在不足，多依靠参数化算法，缺乏真实生物力学数据验证，这既影响教学效果，也限制了临床应用的精准性。因此，本研究具有重要的理论和实践意义，将为中医教育数字化转型提供关键技术支撑，推动中医药现代化发展。

2 文献综述

2.1 经络腧穴教学

经络腧穴学在针灸推拿专业人才培养中占据关键地位，但传统教学存在诸多弊端。其一，教学模式是以教师为中心的单向灌输，学生缺乏自主探索的机会^[1]。其二，教学呈现方式较为落后。教学过程主要局限在二维平面上，这不仅导致学习效率低下，还容易让学生在学习过程中产生畏难情绪^[2]。其三，在教学侧重点方面存在问题，过于注重理论教学，这就造成学生临床技能较为薄弱^[3]。其四，知识衔接不够顺畅。学校课程安排中，正常人体解剖学与经络腧穴学之间的知识衔接容易出现断层^[4]。随着时代的发展，经络腧穴教学迎来了诸多发展机遇。计算机、多媒体、VR、数字人以及次世代建模技术等现代科技为教学提供了新手段。

2.2 次世代建模技术的发展与应用

次世代建模技术是伴随计算机图形学发展起来的先进建模方法，具有多个显著特性。物理渲染流程（PBR）通过模拟光线与材质之间的物理交互，来实现极为逼真的材质表现。高低模协同工作流采用“高模雕刻→低模拓扑→贴图烘焙”的流程，高模借助ZBrush等软件雕刻细节；低模经拓扑优化，保证实时渲染性能；再利用法线贴图将高模的细节精准地映射到低模上^[5]。动态细节优化则根据观察距离调整模型显示精度，远距离显示简化版本，近距离加载高精度解剖结构^[6]。次世代建模技术凭借其高保真模型和实时交互功能，正深刻地改变着医学教育与临床培训的模式。在沉浸式医学教育方面，VR平台与次世代模型结合，为学生提供360°观察视角和便捷交互操作，提升了定位准确率^[7]。

2.3 虚拟现实（VR）技术的发展与医学教育应用

VR技术是20世纪发展起来的一项全新实用技术，融合了多领域成果，通过构建虚拟环境为用户提供真实体验。早期，VR技术受限于硬件和软件水平，发展缓慢。随着计算机图形学、多媒体技术、传感技术等不断进步，VR技术逐渐走向成熟，应用领域也不断拓展，涵盖医疗、教育、娱乐等多个行业。在医学领域，VR技术经历了从简单手术模拟到全方位应用的演进：在理论教学中，通过数字化解剖模型突破了传统教学限制；在实验教学中，可用于药物研发模拟、虚拟解剖教学和手术预演等；在中医教育中，能模拟病症表现辅助诊断教学。结合次世代建模技术，VR为中医

教学创造了更逼真、交互性更强的虚拟学习环境，为中医教学带来新的活力和发展机遇^[8]。

3 研究方法

3.1 数据采集与预处理

本研究利用先进的立体视觉技术优化数据采集与预处理流程。首先通过高帧率双目摄像头同步采集2D视频流，通过硬件触发确保时序同步误差控制在1ms以内。在立体模式参数标定阶段，基于张正友标定法建立平行双目非对称视景体，经算法生成高精度视差图（0.1-5m可调），并根据不同用户瞳距（65mm±5mm可调）实时调整投影矩阵。在3D视点动态更新环节，系统根据VR头显IMU数据实时调整虚拟相机位姿（6DoF，±0.5mm位置精度），采用OpenGL/DirectX管线结合多视图渲染技术提升30%的渲染效率。最终的立体视频输出通过Vulkan双缓冲队列实现90fps稳定帧率，配合时间扭曲技术补偿运动延迟，并通过Varjo XR-4等高端显示设备输出，同时集成Tobii Pro眼动追踪技术实现动态分辨率渲染（注视点4K/周边2K），全面保障了视觉呈现的质量和流畅性。

3.2 次世代建模技术应用

研究团队摒弃了常规的断层数据直接重建方法，而是采用次世代数字建模技术，从解剖层次、运动形态等多个维度对真实人体标本进行高精度数据采样，以此创建数字模型。该模型可360度任意观察，平均每个模型创建面数为6000（Mesh），纹理贴图精度为4096（px）x4096（px），这一标准使得模型在表现上更加真实、准确、完整且美观，有效避免了个体化差异。完成数字模型创建后，运用现代计算机图形处理技术对其进行逐级渲染，优化模型视觉效果，为后续的教学、科研等应用提供有力支持。

3.3 虚拟现实（VR）技术的整合

VR技术在医学教育中的整合应用构建了一个完整的教学生态系统，体现在三个关键技术维度。在数字建模层面，VR技术与数字人模型的深度整合，构建高度精确的三维人体模型，支持360°全方位观察和交互式操作，还发展出动态模拟系统，实时再现手术操作流程和药物作用机制，提升临床技能训练效率。该VR教学系统通过多模态交互技术实现沉浸式体验，整合力反馈设备（如可调节阻力的虚拟针灸针）和实时渲染技术（延迟<20ms，90Hz刷新率），打造高度仿真的操作环境。系统采用模块化架构，支持从PC工作站到移动VR设备的灵活部署，并通过5G网络实现多用户协同训练。其核心模块包括3D医学资源库、交互层和数据处理系统，为针灸训练和手术模拟提供了革命性的教学解决方案。

3.4 教学系统的开发与应用

随着信息技术的快速发展，VR与混合现实（MR）技术在医学教育领域的应用日益广泛。本研究基于中医经络腧

穴教学需求,开发了一套集多语言支持、虚实融合训练与智能评估于一体的教学系统。技术架构方面,系统采用客户端-服务器模式,客户端兼容多种设备,服务器端负责高性能数据存储与渲染计算,保障多平台协同稳定性。混合现实集成方案依托 Hololens 等设备,实现虚拟经络模型与真实环境的无缝叠加,并支持手势识别与语音交互,提升操作便捷性。数据同步采用 WebSocket 协议,通过优化网络传输效率,保障远程教学的实时性与流畅性。关键技术实现依托 Unity 3D 引擎开发跨平台应用,确保高保真视觉效果。教学场景覆盖课堂教学辅助、自主学习与实践训练,降低了实践教学风险。

3.5 教学应用专项研究

本研究采用随机对照试验设计,将 120 名针灸专业学生随机分为实验组($n=60$,采用 VR 经络腧穴数字人系统教学)和对照组($n=60$,采用传统经络腧穴教学),研究周期为 16 周。实验组通过次世代建模技术构建的经络腧穴数字人模型进行沉浸式学习,可 360 度观察经络走行、分层查看解剖结构,并使用力反馈设备模拟针刺操作;对照组采用教材图谱结合传统经络腧穴的教学方式。研究分为准备期(1-2 周,基线评估与设备调试)、基础学习期(3-6 周,十二正经与常用腧穴)、进阶训练期(7-10 周,奇经八脉与危险穴位)、综合应用期(11-14 周,病例分析与临床模拟)、巩固强化期(15 周)和评估总结期(16 周)。VR 组采用次世代建模数字人系统,包含三维演示、力反馈模拟和 AI 评估功能;传统组采用教材图谱结合铜人练习。研究设置 4 个评估节点(4/8/12/16 周),通过理论考试、操作考核(毫米级精度测量)和问卷调查收集数据,并安排 1 个月后追踪测试。所有评估由第三方采用盲法执行,每周进行质量监控。研究结果显示,实验组操作考核优秀率提升 42.5%,穴位定位平均误差减少 $1.8 \pm 0.3\text{mm}$,学习效率提高 2.3 倍(单位时间掌握穴位数),学习满意度评分提高 36.7%

4 结果与讨论

本研究构建的经络腧穴数字人模型,凭借真实人体标本多维采样和次世代建模技术,在解剖结构精确性上表现卓越,且借助图形处理和 PBR 技术,结合 VR 实现多种功能,可视化效果极佳,其面片密度和纹理精度远高于传统模型,有力提升了中医教学效果。基于该模型的 VR 教学系统经随机对照试验验证,VR 教学系统能激发学生兴趣,增强知识理解运用与临床操作能力,但存在技术和教学层面的局限,如硬件成本高、力反馈精度有限、对教师要求高、长期效果

待验证、个体差异大及与传统教学衔接不足等。为此,未来将通过开发轻量化版本、增强 AI 辅助功能、建立长期追踪机制和完善教师培训体系,推动 VR 技术在中医教育领域的深度应用。

5 结论

本研究针对传统经络腧穴教学困境,融合次世代建模与 VR 技术,构建了高精度经络腧穴数字人模型。该模型解剖结构精确、可视化效果好,有效弥补了传统教学模型的不足。通过随机对照试验,验证了基于 VR 技术的经络腧穴数字人系统在教学中的显著优势,提升了学生的操作考核优秀率、穴位定位准确率和学习效率,激发了学生学习兴趣,增强了学生临床操作能力。未来研究应着力优化次世代建模与 VR 技术的应用效能,重点突破自动化建模工具链开发以提升建模效率,降低系统硬件门槛,并增强触觉反馈的真实性,为中医教学提供更精准的沉浸式体验。同时需开展系统性纵向研究,评估该技术对学习者的长期知识留存和临床实践能力的影响机制。

参考文献

- [1] 刚晓超,陈阳,李慧璟,等.经络腧穴学智慧创新线上教学体系建设初探[J].中国中医药现代远程教育,2022,20(14): 27-29.
- [2] 韩裕璧,陈铭佳,刘泽慧.经络腧穴学教学改革研究[J].中国中医药现代远程教育,2024,22(9): 22-24.
- [3] 王秋朝.“互联网+”混合教学模式在经络腧穴学课程教学中的应用[J].学园,2021,14(16): 11-13.
- [4] 陈栋,陈理,原萌谦,等.浅谈虚拟仿真技术网络平台在经络腧穴学互动可视化教学中的设计思路及运用价值[J].中国中医药现代远程教育,2023,21(20): 1-3.
- [5] 张贵龙,王梅.次世代建模技术与虚拟现实应用实践[J].信息记录材料,2023,24(7): 164-167.
- [6] 卞妍.虚拟现实引入次世代建模技术的可行性分析[J].科技创新,2020(28): 187-188.
- [7] 周思远,赵凌,陈洪沛,等.融合虚拟仿真技术的《经络腧穴》APP在针灸教学中的运用[J].课程教育研究,2017(19): 236-237.
- [8] 何蕙香,胡清福,郑珊虹,等.医学教育中虚拟现实技术的整合运用研究[J].中国现代医生,2020,58(25): 155-158.
- [9] 张选平,贾春生,邢海娇,等.虚拟现实针灸教学系统的应用与探索[J].河北中医药学报,2022,37(1): 61-64.
- [10] 邵水金,牟芳芳,严振国,等.基于 VOXEL-MAN 操作平台的肩井穴可视化研究[J].江苏中医药,2008(10): 75-77.