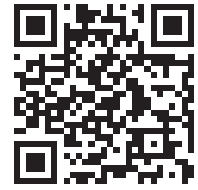


DOI: 10.61189/262431bqczqz

· 医学教育 ·

神经科教学中的元宇宙革命: 技术基础设施、临床应用与教育效能

林继先¹, 薛珉², 黄露艳², 汤罗嘉^{3,4*}

1. 上海市闵行区中心医院神经内科, 上海 201199
2. 上海市闵行区中心医院医务科, 上海 201199
3. 复旦大学附属中山医院急诊科, 上海 200032
4. 上海市闵行区中心医院院长办公室, 上海 201199

[摘要] 在21世纪医学教育转型背景下, 神经病学与神经外科学教学面临解剖结构复杂、教学标本匮乏及安全性要求严苛等多重挑战。本研究通过系统性文献检索与理论建模, 探讨了元宇宙技术在该领域的应用现状、技术框架及教育效能。研究构建了“基础设施层—认知层—临床决策层—伦理治理层”四层分析框架, 系统分析了头戴式显示器、触觉反馈及数字孪生等关键技术特征。实证研究表明, 元宇宙技术能有效重构空间认知, 在提升神经解剖空间推理能力、虚拟标准化患者临床思维训练以及卒中团队协作演练方面展现出显著优势。然而, 晕动症、触觉保真度不足以及数据隐私伦理等问题仍是制约其大规模普及的瓶颈。元宇宙更适合作为传统神经科教学的“渐进式增强工具”, 而非完全替代路径。未来应基于多中心前瞻性研究, 重点验证其对真实临床表现的长远影响。

[关键词] 元宇宙; 神经科教学; 虚拟现实; 数字孪生; 教育效能; 理论框架

[中图分类号] R 742 **[文献标志码]** A

The metaverse revolution in neurological education: technical infrastructure, clinical applications, and educational efficacy

Lin Jixian¹, Xue Min², Huang Luyan², Tang Luojia^{3,4*}

1. Department of Neurology, Minhang District Central Hospital, Shanghai 201199, China
2. Department of Medical Administration, Minhang District Central Hospital, Shanghai 201199, China
3. Department of Emergency Medicine, Zhongshan Hospital affiliated to Fudan University, Shanghai 200032, China
4. President's Office, Minhang District Central Hospital, Shanghai 201199, China

[Abstract] In the context of medical education transformation in the 21st century, neurology and neurosurgery education face multiple structural challenges, including complex neuroanatomy, scarcity of cadaveric specimens, and stringent safety requirements. Through systematic literature review and theoretical modeling, this study explores the current application status, technical infrastructure, and educational efficacy of Metaverse technology in this field. A four-layer analytical framework comprising the "Infrastructure Layer, Cognitive Layer, Clinical Decision-making Layer, and Ethical Governance Layer" was constructed to systematically analyze key technologies such as Head-Mounted Displays (HMD), haptic feedback, and digital twins. Empirical evidence demonstrates that Metaverse technology effectively reconstructs spatial cognition, showing significant advantages in enhancing spatial reasoning in neuroanatomy, clinical thinking training via Virtual Standardized Patients (VSP), and stroke team collaboration simulations. However, challenges such as cybersickness, insufficient haptic fidelity, and data privacy ethics remain bottlenecks for large-scale adoption. The Metaverse is best characterized as a "progressive enhancement tool" for traditional neurological education rather than a complete replacement. Future research should focus on multi-center prospective studies to verify its long-term impact on real-world clinical performance.

[Key Words] Metaverse; neurological education; virtual reality; digital twin; educational efficacy; theoretical framework

在21世纪的医学教育版图中, 神经病学与神经外科学的教学面临多重结构性挑战。传统的“霍尔

[收稿日期] 2026-02-19

[接受日期] 2026-03-10

[基金项目] 上海市闵行区医防协同医防融合项目, 2026年“复旦—闵行”健康联合体科研项目. Supported by Minhang District Medical Prevention Coordination and Integration Project, 2026 "Fudan - Minhang" Health Consortium Research Project.

[作者简介] 林继先, 博士, 副主任医师. E-mail: linjixian@fudan.edu.cn

*通信作者 (Corresponding author). 汤罗嘉, 博士, 副主任医师. E-mail: tang.luojia@zs-hospital.sh.cn

斯特德式”(Halstedian)学徒模式(即“看1次,做1次,教1次”)正逐渐难以满足现代医学对安全性、精准度以及伦理规范的严苛要求。神经解剖结构的复杂性、病理表现的微观性以及临床病例的随机性,使得医学生和住院医师在掌握核心技能时面临巨大的认知负荷。此外,尸体标本供给不足、临床教学时长受限及教学资源分布不均,进一步增加了高质量神经科教学的实施难度。

元宇宙(Metaverse)在此背景下应运而生。元宇宙(Metaverse),作为一个融合了虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、混合现实(MR)以及数字孪生(Digital Twin)技术的沉浸式数字生态系统,正推动神经科教学由“被动观察”向“交互实践”转变^[1-2]。在神经科教学中,元宇宙是一种“虚实融合的教学空间生态系统”,而非单一的虚拟现实(VR)工具集合。这一定义契合了Matthew Ball理论,强调元宇宙的核心特征在于持续性(Persistence)与互操作性(Interoperability):前者确保了教学环境与学习进度在数字世界中不间断地存在,不因个体退出而消失;后者则支持不同教学系统、临床数据库与硬件终端之间数据的无缝流动^[3]。同时,结合IEEE关于沉浸式系统(Immersive Systems)的技术框架,元宇宙被视为一个集成了感知接口、网络传输与算力支撑的层级化结构,能够提供从视觉渲染到触觉反馈的全方位支持^[4]。

在实现方式上,包括虚拟现实辅助教学(VR-assisted Teaching)和元宇宙式教学平台(Metaverse-based Platform)2种形式。虚拟现实辅助教学主要侧重于针对特定知识点的“单点工具”应用(如单纯观看一段3D解剖视频)。元宇宙式教学平台侧重于跨场景(从基础教室到虚拟手术室)、跨主体(师生化身与人工智能助教的协作)以及跨数据(临床影像、病理参数与数字孪生的实时同步)的持续交互。

本文作为理论模型构建型叙事综述,旨在深入剖析元宇宙技术在神经内科与神经外科教学中的应用现状、技术基础设施、临床效能及经济可行性,并在证据分级与四层理论框架下讨论其潜在价值、实施路径与现实挑战。

1 研究方法学:叙事性综述标准、证据分级与理论建模

1.1 文献检索策略与信息来源 本研究采用了结构化的文献检索策略,系统性地覆盖了PubMed、Scopus、Embase以及Web of Science等核心医学与跨学科数据库。考虑到扩展现实与数字孪生技术在

医疗领域的演进周期,文献检索的时间跨度设定为2010年1月至2025年1月。核心检索词通过布尔逻辑词进行矩阵组合,包括:(metaverse OR "virtual reality" OR "augmented reality" OR "mixed reality" OR "digital twin" OR "extended reality") AND (neurology OR neurosurgery OR neuroanatomy OR "medical education" OR "surgical training")。

1.2 证据层级评估框架 在文献筛选阶段,纳入标准聚焦于:探讨元宇宙技术及其核心组件(VR/AR/MR、数字孪生、虚拟标准化患者)在神经内外科教学、解剖学空间认知训练或团队资源管理中应用的系统评价、随机对照试验、观察性研究及前瞻性队列研究。排除标准则严格剔除了:与医学临床教学无直接关联的纯工程学算法研究、样本量极小且缺乏量化评价指标的个案报告,以及缺乏同行评议的个人观点性文章。

本研究创新性地结合了临床医学领域的GRADE(Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation)分级框架以及专门针对医学教育研究质量的MERSQI(Medical Education Research Study Quality Instrument)量表。

在GRADE框架的指导下,本研究将检索到的证据划分为不同的确定性层级。随机对照试验(RCT)通常作为高确定性证据的起点,而观察性研究或无对照的干预前后对比研究则作为低确定性证据的起点。随后,根据研究的偏倚风险、不一致性、间接性与不精确性进行降级评估。同时,利用MERSQI量表的维度(如抽样质量、评估工具的效度证据、数据分析的复杂性以及教育成果的客观性等)对纳入的医学教育实证文章进行二次校验。

本文根据证据确定性采用分级表述。对于高确定性证据(如大样本RCT),使用“证实(demonstrates)”“显著提升(significantly improves)”；对于中低确定性证据(如早期队列研究或技术验证),采用“提示(suggests)”“可能(may)”等审慎措辞,以降低过度外推风险。

1.3 理论模型与变量的操作性定义 本文作为“理论模型构建型叙事综述”,方法学目标是通过结构化检索与证据分级,提炼可检验的教育机制假设,为后续实证研究提供变量定义与路径模型。

本文对引入理论作操作化解释:建构主义强调学习者通过主动操作重建知识结构,对应神经解剖的三维探索任务;情境学习强调知识在真实工作情境中的形成,对应卒中流程与团队协作训练;体验式学习强调“体验—反思—概念化—再实践”循环,

对应 VSP 与手术预演中的迭代练习;技术接受模型 (TAM)用于解释教师与学生平台的采纳意愿(感知有用性与易用性);TPACK用于解释技术、教学法与神经科专业内容的协同设计能力。

变量定义方面,本文将“技术沉浸度”界定为临场感、交互实时性与感官一致性的综合;“认知负荷调节”界定为降低无关负荷并维持有益负荷;“临床情境理解”界定为对病例时间轴、风险节点与干预后果的结构化把握;“决策能力提升”界定为在标准化场景中的诊断准确性、流程完整性与团队沟通质量改进。

2 神经医学元宇宙教育的四层理论框架重构

本文构建“基础设施层—认知层—临床决策层—伦理治理层”的四层分析框架,并引入建构主义学习理论、情境学习理论、体验式学习理论、技术接受模型(TAM)与教育信息化整合模型(TPACK)作为教育学支撑。该框架强调从技术载体到学习机

制、再到临床应用与治理规范的递进关系:设备与平台对应基础设施层,解剖与临床教学对应认知层,手术规划与卒中协作对应临床决策层,经济与伦理问题对应治理层。

基础设施层主要解释“技术是否可被有效采纳”(TAM/TPACK);认知层主要解释“学习者如何形成稳定知识结构”(建构主义与体验式学习);临床决策层主要解释“知识如何在团队情境中迁移为行为表现”(情境学习与机制路径);伦理治理层用于约束“技术可做什么”与“教育应当做什么”之间的边界(图1)。该框架以“研究定位—方法学—四层结构—学习成效”为主线,系统呈现基础设施层、认知层、临床决策层与伦理治理层的递进关系。图中同时标示调节变量(学习动机、数字素养、先验经验、组织支持)的跨层作用,用于解释同类技术在不同教学情境中的差异化效果。该框架强调“结论强度与证据层级对应”,避免将早期技术验证外推为普适结论。

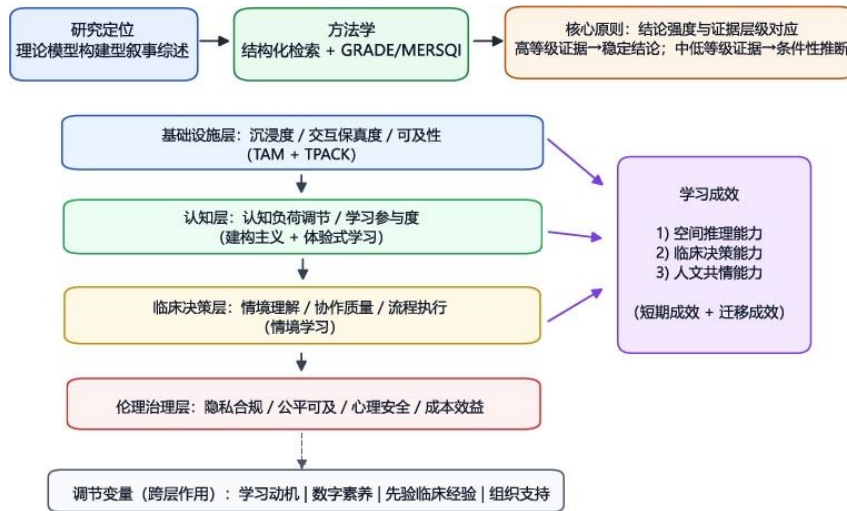


图1 神经医学元宇宙教学研究框架图

2.1 基础设施层:技术基础设施与硬件生态分析
元宇宙在神经科学教育中的转化效能,主要取决于硬件感知保真度与软件交互能力。为客观评估技术成熟度,本节采用技术成熟度等级(technology readiness levels, TRL)框架,对关键设备与系统进行分层讨论。不仅通过讨论“可实现性”,避免过度技术乐观,还通过TAM/TPACK来讨论“可教学化”与“可持续部署”。另外,通过比较“设备性能”和“可采纳性”,进一步用于区分“单点工具增强”与“平台基础设施建设”。前者回答某一训练任务是否改进,后者回答改进能否跨课程连续发生并被稳定复用。

2.1.1 头戴式显示器(head-mounted display, HMD):
光学透视与视频透视的博弈 目前,主导神经科教学的沉浸式设备主要分为两类:以 Microsoft HoloLens 2 为代表的光学透视(optical see-through, OST)设备,和以 Apple Vision Pro 为代表的视频透视(video see-through, VST)设备。这两类设备在分辨率、佩戴舒适度以及对精细运动操作的支持上表现出截然不同的特性^[5]。

一项针对 20 名医疗专业人员进行的对照研究^[5]揭示了视觉保真度与任务绩效这 2 种技术路线在精密任务(如显微缝合)中的差异。

表1 光学透视与视频透视在神经科教学应用中的技术指标对比

技术指标	Microsoft HoloLens 2 (MHL2)	Apple Vision Pro (AVP)	神经科教学应用影响分析
显示技术	MEMS 光学透视	Micro-OLED 视频透视	AVP的2300万像素提供了阅读CT/MRI扫描所需的极高清晰度,适合影像诊断教学;MHL2则允许用户直接通过光学镜片看到真实的手术器械和手部,无延迟 ^[6]
重量负荷	566 g	650 g	神经外科模拟通常持续数小时。AVP较重的机身导致前庭与颈部肌肉疲劳更快,限制了长时间的虚拟手术演练 ^[6]
晕动症评分	41.1(较低)	66.9(较高)	视频透视技术中的微弱延迟(Photon-to-Motion Latency)会导致前庭系统与视觉系统的冲突,AVP用户报告了更严重的恶心与定向障碍,这是教学推广的重大障碍 ^[5]
精细任务耗时	456.0 s (SD 120.0)	570.0 s (SD 192.0)	在执行缝合等精细动作时,VST技术的深度感知失真导致操作时间显著延长($P<0.001$)。这表明目前的VST设备尚不完全适合显微神经外科的动作技能训练 ^[5]
临场感评分	115.0 (SD 11.4)	93.7 (SD 12.7)	OST设备提供了更好的“混合现实”临场感,使学习者能更好地感知周围的物理环境(如手术室团队、器械台) ^[5]

现有研究^[7]显示,Apple Vision Pro在三维解剖展示、术前讨论与影像阅读方面具有较高沉浸感;而在依赖手眼协调的精细操作训练中,HoloLens 2等光学透视设备因保留真实视觉反馈,仍具有现实优势。总体而言,VST与OST并非替代关系,而是适用于不同教学任务。

因此,头显设备在当前阶段更适合承担分层教学功能:VST用于空间理解与方案讨论,OST用于操作技能训练与术中认知支持。后续研究应进一步比较两类系统在学习迁移与长期技能保持方面的差异。

2.1.2 触觉反馈系统:从视觉模拟到真实触感 神经外科被誉为“毫米级的艺术”,其核心在于对人体组织质地的感知,如区分正常的脑实质与胶质瘤,感知动脉瘤夹闭时的血管壁张力等。然而,当前的元宇宙模拟器面临的瓶颈即触觉反馈(Haptic Feedback)的缺失或低保真度^[8]。

尽管已有多项研究^[8]评估触觉技术在颅脑手术模拟中的应用,但尚缺乏能够完整复现从切开到缝合全过程的高保真系统。现有的低成本模拟器通

常凭借图像的形变来提示阻力,仅提供了视觉上的“伪触觉(Pseudo-haptics)”;Geomagic Touch等设备虽然能提供一点式/多点式的力反馈,但缺乏表面纹理(Texture)和温度感知。虽然外科领域的经典操作在不久的将来,可能完全可以依托智能手术机器人精准定位后自主全程运作,但医生作为患者手术安全的最基本保障人员,不能仅学会如何使用并控制手术机器人,同时也仍需要具备经典的基本手术操作技能,如腰穿时的“落空感”的感知力等。目前现有的教学设备系统在模拟细微的力学改变方面仍有很大的提升空间^[9]。为了克服传统医疗机器人在环境适应性、操作灵活性等方面的局限性,生物医学工程领域正在积极转向软体机器人(Soft Robotics)技术,以期在微创手术、康复治疗 and 药物合成等应用中实现更高的精确度和安全性。

未来的模拟器将不再是刚性的机械臂,而是能够模拟生物组织粘弹性(Viscoelasticity)的智能材料。这种技术旨在实现“飞行员式”的全面训练,即在接触真正患者之前,外科医生已在物理-数字混合的模拟器上积累了足够的肌肉记忆^[8,10]。通过高

保真的力反馈,可以将资深医生在腰穿时的“落空感”或动脉瘤夹闭时的“张力感”转化为可量化的数字信号。这种数字化不仅是给学生练手,更是为了让AI学习人类医生的细微体感,最终实现手术模式从“人操作机器人”向“数字分身自主/辅助操作”的彻底改变。

2.1.3 数字孪生与脑科学计算平台 元宇宙的高级形态不仅仅是静态模型的展示,而是动态生理过程的仿真。数字孪生(Digital Twin)技术正在将“静态解剖”转化为“动态生理”。

依托EBRAINS等欧洲数字神经科学基础设施,研究人员正在构建能够模拟神经元活动、血流动力学甚至病理演变的数学模型。通过构建这样的“虚拟大脑孪生”(Virtual Brain Twin),医学生不再是查阅泛泛的教材,而是在一个动态的生理仿真平台上工作^[11]。斯坦福大学的研究团队利用AI构建了小鼠视觉皮层的数字孪生,能够预测神经元对新视觉刺激的反应。在教育中,这意味着未来的医学生可以在虚拟大脑上测试药物反应或电刺激效果,观察癫痫波的传播路径,从而深入理解神经电生理机制,而非仅仅记忆神经通路^[12]。

在教学应用层面,这意味着高年资医学生或住院医师的关注点,可以从死记硬背静态的神经通路,升华为对动态机制的探索。他们可以在数字孪生模型上模拟施加电刺激或虚拟投药,实时观察癫痫异常放电波在特定皮层网络中的传播路径,或是预测肿瘤切除对周围语言功能区的潜在影响。虽然目前的动态生理数字孪生技术尚处于概念验证与早期原型阶段(TRL 3-4),但它指明了未来神经科教学的重要演进方向:培养医学生理解并利用基于计算模型的预测系统,而非仅仅依赖经验性的解剖推测。

综合本层证据可见,当前硬件与软件更适合“任务匹配式”应用而非“单一路径替代”:VST与OST各有优势,触觉与动态孪生仍处持续迭代阶段。这意味着基础设施层可支持局部教学改进,但“平台级教学成效”仍需在后续认知层与决策层中通过学习过程与行为结果共同验证。

2.2 认知层:空间认知重构与基础技能习得 认知层建立在基础设施层之上,重点解释“技术如何转化为学习”。按照建构主义与体验式学习逻辑,学习者并非被动接收三维图像,而是通过“操作—反馈—反思—再操作”循环形成稳定的神经空间表征。通过区分“工具效应”与“平台效应”有不同的意义。工具可提升某一节课的理解效率,平台则要

求跨课程持续跟踪认知负荷、参与度与技能保持。本层将认知负荷调节视作连接技术输入与后续临床决策表现的关键中介。

2.2.1 神经解剖学教学——空间认知的重构 神经解剖学因结构复杂、毗邻关系抽象,向来是医学生眼中的“畏途”。大脑内部的脑室系统、基底节核团以及脑干内部的神经核团,在传统的二维图谱或切片中极难建立立体的空间概念。元宇宙技术通过提供可交互的3D环境,从根本上改变了这一学科的教学方法。

(1)空间推理能力的提升。多项Meta分析和对照研究证实,AR和VR工具在提升医学生的空间推理能力方面显著优于传统方法^[13]。从认知负荷理论(Cognitive Load Theory)视角看,学习神经解剖需极高的内在认知负荷(Intrinsic Load)。传统的2D教学要求医学生于脑海中开展“心理旋转”与“切片重组”,此过程消耗了大量工作记忆。VR技术通过外化这些内在认知负荷过程,允许医学生直接旋转、缩放、透明化3D大脑模型,释放了认知资源,使其能专注于理解结构之间的功能联系^[14]。以GreyMap-AR为例,研究显示AR组虽承担了学习新工具带来的外在认知负荷,但在三维解剖关系理解方面优于传统图谱组^[14]。这提示沉浸式技术带来的空间直观性能够抵消技术操作带来的额外负担,并可能支持学习者形成更稳定的手术入路判断。

(2)虚拟解剖台与全息博物馆。在实际教学场景中,元宇宙技术已被用于创建“全息解剖博物馆”。医学生能够如同修理工拆解发动机一般,将大脑逐层剥离,全方位反复地研究解剖结构的拆解与重组。从大脑皮层到白质纤维束,再到深部的丘脑和脑室,这种“可逆的解剖”是尸体标本无法实现的^[15]。值得注意的是,虽然VR在空间结构教学上具有优势,但在单纯的知识记忆(如背诵核团名称)方面,并不总是优于传统的平板电脑或课本学习^[13],教学效能方面存在局限性。这提示,最理想的医学教学模式是混合式教学(blended learning),元宇宙应被看作传统解剖教学的“增强剂”,而非简单的“替代品”。通过元宇宙平台,医学生不仅能看到静态结构,更能加载虚拟大脑孪生(virtual brain twin)模型,观察神经元活动与血流动力学的实时映射。这种对“动态生理”的深层掌握,是制定个性化、全面医疗措施的前提,而非单纯的手部操作技能训练。另外,未来的医生通过元宇宙模型,不仅是为了自己看懂病灶,更是为了能向患者及家属直观地展示病灶与神经功能区的关系,将复杂的病理

生理转化为患者可理解的视觉语言。这种基于精准空间认知的医患共情能力,是未来医生不可被自动化系统替代的核心竞争力。

2.2.2 临床神经病学培训——虚拟标准化患者与具身共情 除了静态的解剖结构外,神经病学的核心在于培养临床思维,通过完整的病史采集、体格检查等来定位病灶。“虚拟标准化患者”(virtual standardized patients, VSPs)可以陪伴医学生反复训练,提升医学技能,是宝贵的学习资源。

(1)VSP系统的实证研究。中国衢州市人民医院在2022年至2024年间进行的一项随机对照试验(RCT),为VSP系统的教学有效性提供了强有力的证据^[16]。该研究将60名医学实习生随机分为VSP训练组(实验组)和传统教学组(对照组)。实验组使用了基于AI驱动的交互式诊疗系统,该系统涵盖了从新生儿到老年人的全生命周期疾病谱。实验组在理论成绩和临床思维上的显著提升,得益于VSP系统所采用的闭环反馈机制。通过多维度评估和实时反馈,促进了医学生临床思维等综合素质和能力水平。在传统教学中,医学生往往在诊疗结束后才能获得教师的反馈,而在VSP系统中,AI算法能提供“毫秒级”的操作节点反馈,即时指出逻辑漏洞或检查遗漏^[16]。这种高频次、低风险的试错契机,有助于促进临床直觉形成,但其长期迁移效果仍需前瞻性研究进一步验证。

(2)神经查体模拟(VRNET):再现不可复制的体征。神经查体中包含了许多难以由健康演员模拟的体征,如眼球震颤、瞳孔对光反射异常、面瘫或特定的病理反射。VRNET 2.0系统的突破之处在于:它是专为解决这一痛点而研发的。它允许学生佩戴VR头显,观察虚拟患者表现出的特定颅神经麻痹或前庭功能障碍。研究^[17]显示,使用VRNET辅助教学的医学生在神经体格检查(NPE)评分上显著高于仅接受传统标准化患者(SP)教学的医学生(3.81 ± 0.92 vs 3.40 ± 1.01 , $P=0.043$)。这证明了VR在展示稀有或难以模拟的病理体征方面具有独特的优势。两组在学生满意度和场景真实感主观评分上并无显著统计学差异,但在最为核心的神经体格检查(NPE)客观评分中,借助VRNET系统观察虚拟体征的学生表现出了显著的优势^[17]。这一实证数据支持虚拟VR在三维模型中重现稀有和不可控病理体征方面具有不可替代的教学价值。通过头戴式设备,学生能够近距离、高频次地观察虚拟患者眼外肌麻痹的动态变化,这种反复的视觉印刻有助于加速临床直觉的固化。

(3)具身实验室(Embodied Labs):从“治病”到“医人”。在神经退行性疾病,如阿尔茨海默病、路易体痴呆等疾病的教学过程中,理解患者的主观体验和掌握病理生理同等重要。元宇宙提供了“视角转换”(Perspective Taking)的可能性。Embodied Labs平台中,医学生可化身为患有阿尔茨海默病的老人。通过头显,体验到患者视野缺损、黄斑变性、听力模糊以及幻觉的干扰,切身体验成为患者(Becoming the Patient)的各项医疗需求^[18]。同时也无缝融入了换位思考与人文关怀的教育。一项俄亥俄州与明尼苏达大学的案例研究^[19-20]表明,这种体验极大地改变了学生对痴呆患者“激越行为”的认知。医学生们不再将患者的喊叫视为单纯的精神症状,而是理解为感官剥夺后的挫败感表达,让聚焦“治病”更好地转变为温情地“医人”。这种深层次的同理心与人文温度,是任何AI分身都无法替代的,也是未来个性化全面医疗措施中最具“人性”的部分。

空间推理与体征识别方面已有相对稳定证据,而共情、长期迁移与复杂行为改变仍以中低确定性证据为主。由此可见,“单点工具增强”已具可行性,但“元宇宙式平台”是否成立,取决于这些局部收益能否在决策层转化为可重复的临床行为改进。

2.3 临床决策层:特异性规划与协作网络 本文提出“技术沉浸度→认知负荷调节→临床情境理解→决策能力提升”的路径模型来强化机制论证。沉浸度并非“画面更逼真”本身,而是学习者能否稳定进入任务状态并持续获得可执行反馈。机制上,技术沉浸度可通过2条路径影响决策表现:一是直接路径,即更高交互一致性可降低操作迟疑并提升流程完成度;二是间接路径,即通过认知负荷调节提升对关键线索的捕捉,再经临床情境理解转化为更准确的决策。学习动机、先验临床经验与数字素养作为调节变量,决定上述路径效应强弱(图2)。模型描述“技术沉浸度→认知负荷调节→临床情境理解→决策能力提升”的中介路径,并保留技术沉浸度对决策能力的直接效应。学习动机、数字素养与先验临床经验作为调节变量影响路径强度。模型外部设置治理边界(隐私、公平、心理安全、成本可承受),用于界定技术应用的教育可行性与推广条件。

临床决策层代表医学教育从“知识掌握”向“行为执行”的跃迁。依照情境学习理论,决策能力不是单个知识点相加,而是在团队沟通、时间压力和风险权衡中生成。因此本层将术前预演、VSP推演与卒中协作置于同一分析框架。

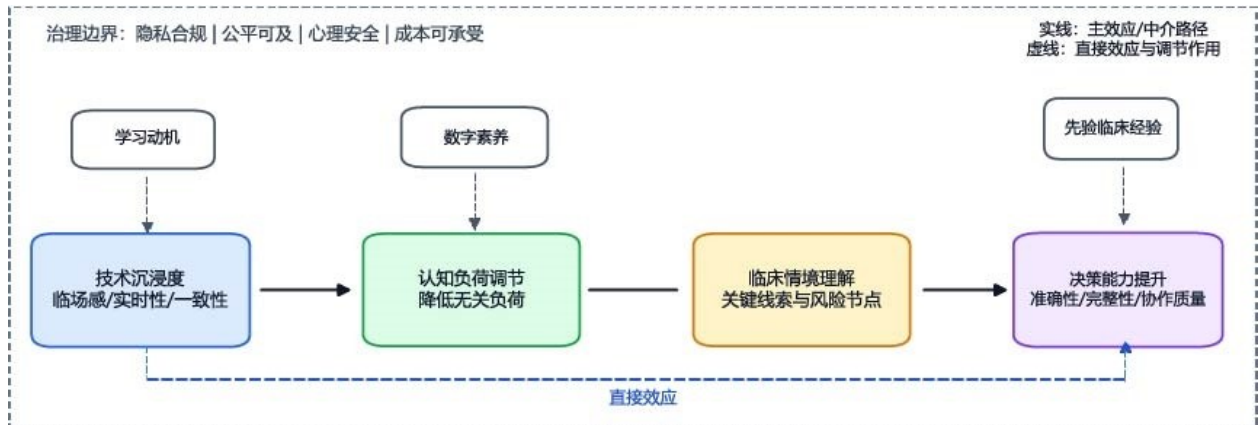


图2 元宇宙教学作用机制路径模型

2.3.1 神经外科模拟与手术规划 神经外科手术具有高风险性,这使得“从实践中学习”的成本居高不下。元宇宙技术推动手术训练从通用的解剖教学迈向患者特异性(Patient-Specific)的手术复现(Rehearsal)。

(1) 手术模拟平台的多元化生态。目前,市场上的神经外科模拟平台呈现出高度专业化的态势,具有代表性的主要分为以下三大类: Surgical Science (原 Simbionix): 旗下的 NeuroVR 和 ANGIO Mentor 专注于血管内介入手术。模拟器能提供导丝在血管内行进的力反馈,并记录手术时间、透视剂量和器械选择的准确性,是血管内治疗培训的金标准^[21]。ImmersiveTouch 专注于利用患者真实的 CT/MRI 数据,结合触觉反馈技术,生成高保真的 VR 模型,以训练外科医生并为患者制定特定的手术计划。外科医生可以在术前佩戴 VR 头显,对特定患者的肿瘤进行模拟切除,从而确定最佳的手术入路和骨窗大小^[21-22]。UpSurgeOn 采用“混合现实”路径,将物理实体模型(如 3D 打印的头骨盒子)与 AR 应用相结合。医学生在操作物理模型时,可借用手机或平板的 AR 镜头,看到叠加于其上的解剖标注与病理结构。这种低成本、高触感的方案极大地降低了显微神经外科训练的门槛^[23]。上述平台共同推动神经外科教学由“通用技能训练”向“数据驱动的患者特异性决策支持”过渡。其核心价值不仅在于重复练习操作动作,更在于沉淀可复盘的路径数据与决策依据。

(2) 增强现实手术导航:透视“隐形”的解剖。在实际的手术室环境中,AR 技术正对术中导航进行革新。传统的神外导航需要医生不断抬头看屏幕,通过心理转换将二维图像投射到手术视野中。借助 HoloLens 2 或显微镜 AR 模块,医生可在术野对应位置叠加显示深部肿瘤轮廓、血管走行及功能区

边界,实现更直观的空间定位^[24]。在教学意义上,对于观摩手术的低年资医生而言,AR 导航犹如一位实时导师,能在术野中“勾勒”出解剖结构,助力他们理解主刀医生的每一项操作意图,而非仅仅看到血肉模糊的术野。

(3) 手术模式的阶段性重构(审慎研判)。现有证据提示,元宇宙在神经外科中的核心价值更可能体现为患者特异性术前预演、风险识别与决策支持,而非完全替代主刀医师。医生角色正在由“单纯操作者”向“决策与监督者”扩展。在这一过渡过程中,数字孪生与 AI 可用于形成可解释、可复核的手术方案推演,帮助平衡病灶切除范围与功能区保护目标。其前提是模型有效性、数据质量与临床监管机制同步完善。手术规划正由“通用预演”走向“患者特异性决策支持”,其临床收益仍需通过多中心、前瞻性研究进一步验证。

2.3.2 脑卒中急救与团队协作训练 脑卒中的救治犹如一场与时间的激烈赛跑,高度依赖神经内科、急诊科、放射科以及介入科的高效协作。元宇宙所具备的多人联机功能,使其成为团队资源管理(CRM)训练的理想之选。

(1) 虚拟卒中流程演练(Stroke Code Simulation)。TACTICS VR 和 LumetoXR 等平台可支持跨地域团队在虚拟急诊场景中进行卒中流程演练^[25-26]。全流程模拟环节中,团队成员以化身的形式现身,携手共同处理一名疑似卒中患者。他们需实时展开沟通,依次完成从分诊、查体、阅读 CT 到决策溶栓的整个流程。Meta 分析提示,基于 VR 的流程训练能显著缩短现实世界中的 DNT(进门到溶栓时间),并提高临床决策的准确^[26]。这种训练不仅强化了医疗流程,更锻炼了在压力环境下的沟通技巧和领导力。

(2) 卒中康复的数字化延伸。在康复教学中,

VR可用于展示运动轨迹、代偿模式及功能恢复过程,帮助学习者理解神经可塑性与干预响应之间的关系。通过VR康复系统,治疗师可以直观地看到神经可塑性可视化展示,如肢体运动轨迹和代偿模式如何改善脑卒中患者运动功能、平衡能力和日常生活活动能力^[27-28]。在远程教学场景下,虚拟交互数据可为个性化康复方案设计提供辅助证据。通过在虚拟环境中的患者交互数据,浓缩再现现实中的临床旁长时间的观察,医学生制定个性化的康复处方,同时接受现场的疗效反馈。

这一长期随访导向的教学模式有助于学习者从急性期处置延伸至全病程管理,并强化对功能结局与生活质量的关注。

2.3.3 全球案例研究与实施 元宇宙在神经科学中的应用已呈全球化趋势,不同地区根据自身的医疗痛点发展出了各具特色的应用模式。

(1)亚洲:技术驱动与资源下沉。中国:以前述衢州市人民医院VSP项目为例,中国在AI与元宇宙结合教学方面已形成初步实践路径,可在一定程度上缓解区域间教学资源不均衡问题。利用AI和元宇宙技术改善临床教学的同质化,同时通过云端部署将高质量的虚拟病例辐射到更广泛的医学院校^[16]。复旦大学附属华山医院在脑机接口(BCI)与VR融合方向的探索,为神经外科教学提供了重要转化场景^[29]。同时也为未来“数字分身”直接干预神经系统提供最前沿的实验阵地。日本:面对老龄化社会的严峻挑战,日本高度重视痴呆症护理和远程教育。Nippon Medical School与Jolly Good公司合作,开发了基于云的VR临床教育平台,利用360度全景视频记录真实手术,使医学生在疫情期间仍能身临其境地观摩手术^[30],捕捉专家的实时动作与决策路径,为后续加载专家经验的“数字分身”积累底层数据。

(2)欧洲:课程整合与性别差异关注。德国:图宾根大学医学院将VR引入急诊医学课程。研究显示,91%的医学生认为VR可快速传达复杂概念。然而,数据也揭示了一个需要关注的现象:女性学生在“直观易用性”上的评分显著低于男性,这提示在课程设计时需要考虑技术接受度的性别差异,提供更友好的引导机制^[31]。英国:切斯特大学(University of Chester)采取了“脚手架”式的教学策略。护理学生先在VR中进行神经科场景演练(使用Oxford Medical Simulation平台),获得即时反馈后,再进入实体实验室操作模型人。这种混合模式显著提升了学生在实体操作中的自信心和表现^[32]。

(3)北美:高端模拟与精准医疗。美国:以斯坦福大学和西奈山医院为代表,重点在于高端手术模拟和患者特异性规划。斯坦福神经外科模拟中心利用VR技术让住院医师在术前“预演”复杂病例,这不仅是教学工具,更已成为保障患者安全的临床标准流程^[33-34]。该模式体现了患者特异性数据在训练与决策支持中的应用潜力。

这些全球案例表明,元宇宙在神经科教学中的价值不仅体现在技能训练,还体现在跨机构知识共享与标准化流程建设。现有证据提示其具有促进教学同质化与流程可复用性的潜力,但具体效果仍受课程设计、资源配置和评估方法差异影响。

从本层证据看,术前预演与流程协作训练具有明确应用潜力,但研究终点、评估窗口与场景条件差异较大,尚不足以直接外推为普适临床收益。要完成从“工具有效”到“平台有效”的论证,必须把行为改进与治理成本放在同一评价框架中。因此,不同变量在不同层有不同的作用。技术变量(沉浸度、交互保真度、可及性)在第3.1节用于解释平台差异;过程变量(认知负荷、参与度、协作质量)在第3.2—3.3节用于解释学习机制;结果变量(空间推理、临床决策、人文共情)在案例与结论段用于归纳教育成效。学习动机、数字素养与教学组织支持被设为调节变量,用于解释为何同一技术在不同学校或不同年资学生中产生不同效果。

本文将元宇宙教学实施划分为“课前准备—课中实施—课后转化”3个连续阶段。该流程的核心不在于单次沉浸体验,而在于将任务设计、过程反馈与迁移评估纳入同一闭环,从而实现“教—学—评—改”的一体化运行。通过知识、技能与行为的分层输出评价,教学效果可从短期课堂表现进一步延伸到临床情境中的可迁移能力。该流程也为后续多中心研究提供了可复制的实施模板与评价接口(图3)。该流程以“课前准备—课中实施—课后转化”三阶段为主线:课前完成需求评估、课程设计与平台配置;课中通过任务导入、沉浸训练和形成性反馈实现“教—学—评”同步;课后通过迁移训练、综合评估与复盘迭代形成质量改进闭环。流程输出按“知识—技能—行为”分层评价,强调评估结果反向驱动课程再设计,用于支撑元宇宙教学从单次工具应用走向可持续的平台化实施。

2.4 伦理治理层:安全、隐私与经济效能 伦理治理层不是附加讨论,而是对前三层的边界约束:当技术变量提升沉浸度时,必须同步评估隐私暴露、心理负担与公平可及性。

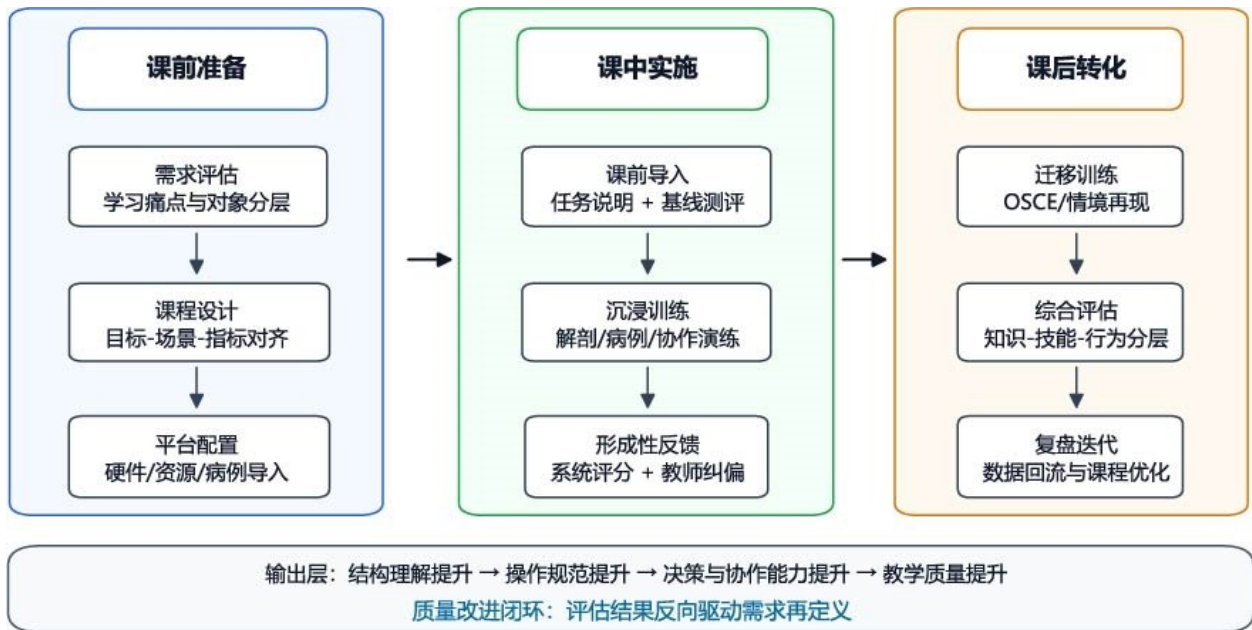


图3 元宇宙赋能神经科教学流程图(课前-课中-课后闭环)

当流程变量提升效率时,必须确认其未牺牲患者权益与职业伦理。换言之,只有在治理约束可满足时,前文观察到的工具效应才可能沉淀为可推广的平台方案。这一层直接回应了以下的问题:未来实证研究不仅要报告“是否有效”,还要报告“在何种治理代价下有效”。

伦理治理层作为覆盖上述三层的顶层规范,涵盖了虚拟环境中的患者数据隐私边界、算法生成内容的合规性、受训者的心理安全机制,以及技术投入的卫生经济学(成本-效益)评价。

2.4.1 经济学分析——成本效益与投资回报 尽管元宇宙技术初期投入高昂,但从长期运营与规模化应用视角审视,其具备显著的经济优势。

(1)成本对比分析:VR与传统尸体/动物实验。传统神经外科训练高度依赖尸体头颅标本,涉及采购、运输、防腐处理及废弃物处置等高昂成本。初始资本支出(CAPEX):建立一个VR实验室虽然需要初期投资购买头显(如HoloLens 2约\$3500/台)、高性能工作站及软件授权,但其优势在于能够提供多次重复使用的实验模拟,从而降低长期成本并提高资源利用效率。相比之下,单次尸体解剖工作坊虽然组织成本较低,但其一次性使用限制了资源的复用性。运营成本(OPEX)与长期效益:一项关于灾难医学培训的成本分析显示,VR方案虽具有较高初始开发成本(327.78/人),但在三年周期内可随培训规模扩大而将人均成本降至115.43;相比之下,实体演练人均成本约为229.79,且随人数增加呈线性上升^[35]。隐形节约:VR训练可减少对高仿真模

型人(high-fidelity manikins,单价可达数万美元)、场地与差旅的依赖^[36]。对资源受限地区而言,基于云端平台的课程分发可显著降低边际教学成本。通过云端元宇宙平台,原本仅限于顶尖中心的专家决策经验,可以实现“零边际成本”的跨国界、跨层级分发。

(2)市场趋势与虚拟融合经济。全球医疗元宇宙市场预计在2030年前将以37%~42%的年复合增长率(CAGR)爆发式增长^[37-38]。随着硬件成本下降与软件生态成熟,相关教学工具的可达性有望持续提升,原本仅限于顶尖医院的技术逐渐向医学院校和基层医院普及。该趋势可能减少部分教学环节的边际成本,但其真实经济收益仍需结合长期效果与机会成本进行系统评估。

2.4.2 挑战和伦理 尽管前景广阔,但元宇宙在神经科学的全面普及仍面临多重挑战,必须跨越生理极限与伦理红线。

(1)生理与技术挑战:晕动症。如前所述,视频透视设备(AVP)带来的晕动症(VR Sickness)是一个不容忽视的生理障碍。眼球运动疲劳、恶心和定向障碍限制了单次训练的时长(通常不超过20—30分钟)^[5]。未来的硬件迭代必须致力于降低光子到运动延迟(photon-to-motion latency)并优化视觉辐辏调节冲突。

(2)数据隐私与伦理风险。元宇宙教学涉及眼动、手势等生物特征数据及患者影像数据,数据治理与隐私保护是实施中的核心前提^[39-40]。另外,虽然VR可以培养共情,但过度依赖虚拟化身也可能

导致医疗行为的“游戏化”。教育者必须警惕,虚拟互动的最终目的是更好地服务于真实的、有血有肉的患者,而非仅仅追求高分的模拟成绩^[41]。课程设计需避免“过度游戏化”对职业价值观的潜在影响,确保技术应用服务于真实临床能力提升。

课程实施应在高沉浸训练后配置结构化复盘与伦理讨论,强化学习者对医疗风险、患者权益和专业责任的持续认知。引导学生将虚拟场景中的无痛操作与现实世界中不可逆的伦理责任重新锚定,是防止技术反噬教育内核的关键保障。据此,前三层形成“技术—学习—行为”链条,第四层提供实施边界。四者合并考虑后才有可能真正地理解神经科教学中的元宇宙革命。

3 文献综述的批判性综合

现有研究在研究设计、评价指标与随访周期方面存在较高同质性:部分研究重主观满意度,部分研究重短期技能评分,导致跨研究横向比较难度较大。国内研究更强调场景落地与资源均衡,国外研究更强调机制验证与可重复评估;两者在样本代表性、技术迭代速度和伦理治理边界方面仍存在结论分歧。

4 创新性与不足

本文创新点:(1)提出“定义—变量—层级”一体化框架,避免概念泛化;(2)提出“技术沉浸度—认知负荷—情境理解—决策能力”机制链,明确直接与间接效应;(3)提出与TRL对应的分阶段实施建议,使技术演进、教学评估与伦理治理可以同频推进。

本文局限性:(1)本文未纳入统一原始个体数据进行量化合并,且不同研究在结局定义、随访长度、学习者层级和对照条件上存在不一致;(2)本文提出的机制模型尚需通过前瞻性研究进行参数估计与路径检验。因此,本文更适合作为研究设计蓝图,而非终局性证据。

5 未来展望(基于TRL的阶段研判)

近端(1-3年,TRL 5-6):重点落在VR/AR解剖教学、虚拟标准化患者与卒中流程协作训练,目标是获得可量化、可复核的教学改进。中期(3-5年,TRL 6-7):患者特异性三维建模、术前预演与部分触觉反馈系统将逐步成熟,适用于高风险训练场景。远期(5-10年,TRL 7-8):可能出现更高层次的人机协同决策与跨地域虚拟协作平台,但仍应坚持

医生主导与伦理合规前提。总体上,元宇宙更适宜被界定为神经医学教育的渐进式增强路径,而非对传统临床带教的完全替代。

6 结论与未来演进研判

本叙事性综述通过创新性地构建“基础设施层—认知层—临床决策层—伦理治理层”四层理论框架,结合GRADE证据分级与MERSQI质量评估工具,系统而客观地梳理了元宇宙技术在神经病学与神经外科学教育中的应用轨迹与实证效能。XR技术与虚拟标准化系统可在空间认知训练、罕见体征识别及卒中团队协作教学中提供可观增益。然而,触觉反馈精度、设备耐受性与基础设施成本仍是限制其大规模落地的关键因素。

综上所述,元宇宙更适合作为传统神经科教学的增强工具,而非替代路径。后续研究应基于多中心、前瞻性、标准化评价体系,重点检验虚拟训练对真实临床表现与患者结局的长期影响。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 林继先:研究概念与设计,方法论构建,论文撰写;薛珉:论文初稿撰写与修订;黄露艳:图表制作;汤罗嘉:研究监督与项目管理,论文最终审阅与定稿。

参考文献

- [1] López-Ojeda W, Hurley R A. The medical metaverse, part 1: introduction, definitions, and new horizons for neuropsychiatry [J]. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci*, 2023, 35(1): A4-A3.
- [2] Yu T, Yang Z C, Zhang M, et al. The application of the metaverse in surgical clinical teaching: transforming medical education through immersive approaches [J]. *Front Oncol*, 2025, 15: 1626680.
- [3] Matthew Ball. *The Metaverse and how it will revolutionize everything* [M]. New York: Liveright Publishing Corporation, 2022.
- [4] IEEE. Standard for metaverse: terminology, definitions, and taxonomy [EB/OL]. [2023-02-15] (2026-01-23). <https://standards.ieee.org/ieee/2048/11169/>.
- [5] Javaheri H, Fortes Rey V, Lukowicz P, et al. Assessing the feasibility of using apple vision pro while performing medical precision tasks: controlled user study [J]. *JMIR XR Spat Comput*, 2025, 2: e73574.
- [6] Ortiz García C, Aguilera Jiménez E, Antonio Calvo Haro J, et al. Comparative analysis of HoloLens 2 and apple vision pro in orthopedic surgery [J]. *J Surg Res*, 2025: 87-91.
- [7] Olexa J, Trang A, Cohen J, et al. The apple vision pro as a neurosurgical planning tool: a case report [J]. *Cureus*, 2024, 16(2): e54205.

- [8] Luglietto D, de Benedictis A, Marasi A, et al. Simulators with haptic feedback in neurosurgery: are we reaching the “aviator” type of training? narrative review and future perspectives [J]. *Life (Basel)*, 2025, 15(5): 777.
- [9] Lin W, Zhu Z J, He B W, et al. A novel virtual reality simulation training system with haptic feedback for improving lateral ventricle puncture skill [J]. *Virtual Real*, 2022, 26(1): 399–411.
- [10] Silber D. Virtual reality: expanding haptic applications in medical simulation beyond specialized surgical training [J]. *VR for Health*, 2025.
- [11] Wu G Q, Wang H, Ma X J, et al. SWI and CTP fusion model based on sparse representation method to predict cerebral infarction trend [J]. *Front Neurosci*, 2024, 18: 1360459.
- [12] Popov V, Mateju N, Jeske C, et al. Metaverse-based simulation: a scoping review of charting medical education over the last two decades in the lens of the ‘marvelous medical education machine’ [J]. *Ann Med*, 2024, 56(1): 2424450.
- [13] Alim E, Coşkun Ö, Peker T V. Comparison and evaluation of the effectiveness of traditional neuroanatomy teaching in medical education with virtual-reality application based on 3D virtual [J]. *Gazi Med J*, 2024, 35(4): 407–415.
- [14] Henssen D J H A, van den Heuvel L, de Jong G, et al. Neuroanatomy learning: augmented reality vs. cross-sections [J]. *Anat Sci Educ*, 2020, 13(3): 353–365.
- [15] Gonzalez-Romo N I, Mignucci-Jiménez G, Hanalioglu S, et al. Virtual neurosurgery anatomy laboratory: a collaborative and remote education experience in the metaverse [J]. *Surg Neurol Int*, 2023, 14: 90.
- [16] Xu L Y, Xu Q R, Liu C Y, et al. Virtual standardized patients for improving clinical thinking ability training in residents: randomized controlled trial [J]. *JMIR Med Educ*, 2025, 11: e73196.
- [17] Han S G, Kim Y D, Kong T Y, et al. Virtual reality-based neurological examination teaching tool (VRNET) versus standardized patient in teaching neurological examinations for the medical students: a randomized, single-blind study [J]. *BMC Med Educ*, 2021, 21(1): 493.
- [18] Hamilton A, Molzahn A, McLemore K. The evolution from standardized to virtual patients in medical education [J]. *Cureus*, 2024, 16(10): e71224.
- [19] Morone G, Ciancarelli I, Calabrò R S, et al. MetaRehabVerse: the great opportunity to put the person’s functioning and participation at the center of healthcare [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2025, 39(3): 241–255.
- [20] Veras M, Labbé D R, Furlano J, et al. A framework for equitable virtual rehabilitation in the metaverse era: challenges and opportunities [J]. *Front Rehabil Sci*, 2023, 4: 1241020.
- [21] Halman J, Tencer S, Siemiński M. Artificial intelligence and extended reality in the training of vascular surgeons: a narrative review [J]. *Med Sci (Basel)*, 2025, 13(3): 126.
- [22] Lemole G M Jr, Banerjee P P, Luciano C, et al. Virtual reality in neurosurgical education: part-task ventriculostomy simulation with dynamic visual and haptic feedback [J]. *Neurosurgery*, 2007, 61(1): 142–148.
- [23] Petrone S, Cofano F, Nicolosi F, et al. Virtual-augmented reality and life-like neurosurgical simulator for training: first evaluation of a hands-on experience for residents [J]. *Front Surg*, 2022, 9: 862948.
- [24] Sharma N, Mallela A N, Khan T, et al. Evolution of the meta-neurosurgeon: a systematic review of the current technical capabilities, limitations, and applications of augmented reality in neurosurgery [J]. *Surg Neurol Int*, 2024, 15: 146.
- [25] Hood R J, Maltby S, Keynes A, et al. Development and pilot implementation of TACTICS VR: a virtual reality-based stroke management workflow training application and training framework [J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 665808.
- [26] Maltby S, Garcia-Esperon C, Jackson K, et al. TACTICS VR stroke telehealth virtual reality training for health care professionals involved in stroke management at telestroke spoke hospitals: module design and implementation study [J]. *JMIR Serious Games*, 2023, 11: e43416.
- [27] Wu J L, Zeng A H, Chen Z Y, et al. Effects of virtual reality training on upper limb function and balance in stroke patients: systematic review and meta-meta-analysis [J]. *J Med Internet Res*, 2021, 23(10): e31051.
- [28] Landim S F, López R, Caris A, et al. Effectiveness of virtual reality in occupational therapy for post-stroke adults: a systematic review [J]. *J Clin Med*, 2024, 13(16): 4615.
- [29] Wang Y, Zhu M Y, Chen X, et al. The application of metaverse in healthcare [J]. *Front Public Health*, 2024, 12: 1420367.
- [30] Lewis K O, Popov V, Fatima S S. From static web to metaverse: reinventing medical education in the post-pandemic era [J]. *Ann Med*, 2024, 56(1): 2305694.
- [31] Mahling M, Wunderlich R, Steiner D, et al. Virtual reality for emergency medicine training in medical school: prospective, large-cohort implementation study [J]. *J Med Internet Res*, 2023, 25: e43649.
- [32] Li Q, Duan H, Zhou X X, et al. The use of metaverse in medical education: a systematic review [J]. *Clin Med*, 2025, 25(3): 100315.
- [33] Saher L, Asif A, Mehmood Z, et al. Virtual reality in neurosurgery: advancing training, education, and surgical planning [J]. *Asian J Neurosurg*, 2026, 21(1): 26–37.
- [34] Lim H L, Chen M W. The challenges and future of neurosurgical training—is extended reality the way moving forward? [J]. *AME Surg J*, 2025, 5: 41.
- [35] Farra S L, Gneuchs M, Hodgson E, et al. Comparative cost of virtual reality training and live exercises for training hospital workers for evacuation [J]. *Comput Inform Nurs*, 2019, 37(9): 446–454.
- [36] Deng Z H, Xiang N, Pan J J. State of the art in immersive interactive technologies for surgery simulation: a review and prospective [J]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(12): 1346.
- [37] Boztas C, Ghadafi E, Ibrahim R. Metaverse architectures: a

- comprehensive systematic review of definitions and frameworks [J]. *Future Internet*, 2025, 17(7): 283.
- [38] Li T, Yan J X, Gao X, et al. Using virtual reality to enhance surgical skills and engagement in orthopedic education: systematic review and meta-analysis [J]. *J Med Internet Res*, 2025, 27: e70266.
- [39] Kostick-Quenet K, Rahimzadeh V. Ethical hazards of health data governance in the metaverse [J]. *Nat Mach Intell*, 2023, 5 (5): 480-482.
- [40] Lake K, Mc Kittrick A, Desselle M, et al. Cybersecurity and privacy issues in extended reality health care applications: scoping review [J]. *JMIR XR Spatial Comput*, 2024, 1: e59409.
- [41] Letafati M, Otoum S. Digital healthcare in the metaverse: insights into privacy and security [J]. *IEEE Consum Electron Mag*, 2024, 13(3): 80-89.

引用本文

林继先, 薛珉, 黄露艳, 等. 神经科教学中的元宇宙革命: 技术基础设施、临床应用与教育效能 [J]. *元宇宙医学*, 2026, 3 (1): 52-63.

Lin J X, Xue M, Huang L Y, et al. The metaverse revolution in neurological education: technical infrastructure, clinical applications, and educational efficacy [J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(1): 52-63.