

扩展现实在神经学中的应用：技术解析与临床价值

杨佳乐^{1,2}, 秦义明³, 王诗语^{4,5,6,7}, 吴倩^{4,5,6,7,8}, 王锦园³, 李华婷^{5,6,7,8}, 吴恩华^{9,10},
黄天荫^{3,11,12,13}, 曾典^{3,*}, 盛斌^{1,2,*}

1. 上海交通大学计算机学院, 上海 200240
2. 上海交通大学人工智能教育部重点实验室, 上海 200240
3. 清华大学临床医学院, 北京 100084
4. 上海交通大学医学院, 上海 200025
5. 上海交通大学医学院附属第六人民医院, 内分泌代谢科, 上海 200233
6. 上海市糖尿病研究所, 上海 200233
7. 上海市糖尿病临床医学中心, 上海 200233
8. 上海交通大学主动健康战略与发展研究院, 上海 200030
9. 澳门大学科技学院, 澳门 999078
10. 中国科学院软件研究所计算机科学国家重点实验室, 北京 100190
11. 新加坡眼科中心, 新加坡国家眼科研究所, 新加坡 168751
12. 清华大学临床医学院, 清华大学附属北京清华长庚医院, 北京市视觉科学与转化医学研究中心, 北京 100084
13. 重大致盲性眼病智能诊断技术与设备研发北京市重点实验室, 北京 100084

* E-mail: zengdian@mail.tsinghua.edu.cn shengbin@sjtu.edu.cn

国家自然科学基金(批准号: 62272298)资助项目

摘要 扩展现实(Extended Reality, XR)涵盖虚拟现实(Virtual Reality, VR)、增强现实(Augmented Reality, AR)与混合现实(Mixed Reality, MR), 正逐步成为神经学领域的变革性工具。神经系统疾病传统诊疗和康复手段面临动态病理监测困难、依从性低等局限。在此背景下, 扩展现实通过构建可量化、可调节的虚拟-现实融合环境, 为这些难题提供了突破路径。本文综述了扩展现实在神经学的应用, 通过解析扩展现实的核心技术, 重点探讨了扩展现实在临床评估、神经外科手术和神经系统疾病康复和治疗中展现的临床价值, 总结了扩展现实在神经学领域面临的挑战, 展望了扩展现实的未来发展方向。

关键词 扩展现实, 虚拟现实, 增强现实, 混合现实, 神经学, 神经系统疾病

1. 引言

神经系统疾病是指影响大脑、脊髓、外周神经及其相关结构和功能的各种病症，包括脑膜炎、卒中、癌症、创伤性脑损伤和脊髓损伤、阿尔茨海默病（Alzheimer's Disease, AD）、帕金森病（Parkinson's disease, PD）、多发性硬化症（Multiple Sclerosis, MS）、自闭症（Autism Spectrum Disorder, ASD）、创伤后应激障碍（Post-Traumatic Stress Disorder, PTSD）、注意力缺陷多动障碍（Attention Deficit Hyperactivity Disorder, ADHD）、癫痫等^[1]。根据 2019 年全球疾病负担研究（Global Burden of Disease Study 2019, GBD 2019），神经系统疾病目前仍然是世界残疾调整生命年（Disability-Adjusted Life Years, DALYs）的主要原因，也是第二大死亡原因，带来了沉重的疾病负担^[2]。此外，随着人口老龄化的不断加重以及环境、代谢和生活方式等危险因素的增加，帕金森病、阿尔茨海默病等神经退行性疾病的发病率呈现显著上升趋势，这对医疗系统、家庭照护和社会资源构成了巨大的压力^[1,3]。对神经系统疾病的早期识别、治疗和康复是减轻神经系统疾病带来的长期健康负担的关键^[1,2]。

在神经科学的临床实践和研究中，目前面临着三个主要挑战：首先，神经系统疾病的症状和临床表现具有高度复杂性，传统诊断方法在动态病理监测和客观评估方面存在显著局限^[4]；其次，神经外科手术的精确性和安全性要求不断提高，而现有的手术培训和实时导航技术仍存在不足^[5,6]；最后，针对神经系统疾病导致的功能障碍和结构损伤，亟需开发个性化的治疗和康复方案^[7]。这些挑战凸显了神经科学领域对创新性技术解决方案的迫切需求。

扩展现实（Extended Reality, XR）是涵盖虚拟现实（Virtual Reality, VR）、增强现实（Augmented Reality, AR）和混合现实（Mixed Reality, MR）的技术集群。自 20 世纪 50 年代 Morton Heilig 开发首台多感官模拟设备 Sensorama 以来，该技术经历了从单模态刺激到多通道交互的系统性演进^[4]，如今的扩展现实技术和设备已经能够构建出高度复杂且逼真的环境。越来越多的证据表明，扩展现实技术有潜力成为评估、干预和治疗神经系统疾病的重要工具，这种潜力主要源于其独特的技术优势：扩展现实能够根据患者或医生需求创建高度可定制化的虚拟环境，并实现实时交互和调整；能同时追踪、记录、整合和分析大量数据，为临床评估、术中评估和康复治疗提供客观量化指标；能提供实时反馈，实现个性化重复练习，刺激使用者的运动和认知过程^[8]。

许多研究已经将扩展现实创新性地整合到了临床评估、外科手术和疾病康复治疗中，人们通过相关技术可以将患者的影像学数据叠加到手术视野中，为医生提供直观的解剖结构信息，从而提高手术的精确性和安全性^[9,10]。在卒中患者的康复训练中，扩展现实系统可以实时监测患者的运动轨迹并提供即时反馈，帮助患者调整动作，从而提高康复效果^[11~13]。然而，将扩展现实推广到神经学临床实践仍面临诸多难题。首先，现有关于扩展现实治疗效果的高质量随机对照试验数量有限，证据基础有待加强^[14]；其次，扩展现实设备的舒适性和长期使用的安全性需要进一步验证^[15]；此外，患者数据隐私保护和网络安全问题也亟待解决^[16]。这些挑战为未来研究方向提供了重要指引。

考虑到扩展现实的潜在优势，本文综述了扩展现实当前在神经学的应用，解析扩展现实核心技术，并重

点探讨了扩展现实在临床评估、神经外科手术和神经系统疾病康复和治疗中展现的临床价值，总结了扩展现实在神经学领域面临的挑战，并展望了扩展现实的未来发展方向。

2. 扩展现实核心技术解析

2.1. 扩展现实技术分类与核心组成

扩展现实是一个综合性的术语，根据虚实融合的程度，扩展现实可以被包含 VR、AR 与 MR 等不同类型。**表 1** 展示了 VR、AR、和 MR 的定义、核心细节、优势、缺陷的概览。VR 一般被认为通过计算机技术创建一个沉浸的数字化环境，用户通过头戴显示器和控制器与虚拟场景进行交互。这种交互通常使用空间定位系统如双目立体渲染和惯性测量单元来追踪用户的动作，从而保持视觉的实时同步。例如，Valve Lighthouse 系统采用光学定位和惯性测量单元融合的混合追踪方法，采用激光定位基站与光敏传感器阵列，使用飞行时间法解算控制器三维坐标，从而精确地定位用户的动作和位置，实现高精度空间交互。

AR 则是在现实环境中叠加虚拟信息，当前技术实现的核心包括环境感知传感器及图形引擎，例如 ARKit 和 ARCore 的平面检测与 Unity MARS。混合现实(MR)一般被认为是结合了虚拟现实(VR)和增强现实(AR)的特性，允许虚拟对象与真实环境之间的实时交互。微软 HoloLens 所使用的波导显示技术和手部追踪系统正是 MR 的典型代表，能通过多模态传感器进行环境的语义分割与虚拟对象的空间锚定^[17]。从硬件架构来看，扩展现实设备需要集成高分辨率微显示屏、低延迟通信模块（如 5G 毫米波）和分布式计算单元（如边缘云渲染）。软件层面则依赖于实时操作系统、3D 图形接口（如 OpenXR）和人工智能（AI）驱动的交互算法来实现复杂的虚实交互。

表 1 沉浸式交互系统的对比分析

Table 1 Comparative Analysis of Immersive Interactive Systems

技术	定义	核心细节	优势	缺陷
虚拟现实	完全数字化沉浸环境	头部追踪、眼动追踪	全沉浸体验、精准空间定位	晕动症、社交隔离风险
增强现实	虚实叠加的交互系统	光学透视、SLAM 算法、保持现实感知、实时数据叠加	平面识别	视场受限、环境光干扰
混合现实	虚实对象动态交互	深度传感器、空间锚点、虚实遮挡渲染	物理-数字对象互动、动态环境适配	算力需求高、设备昂贵

*SLAM: Simultaneous Localization and Mapping 同时定位与建图。

2.2. 扩展现实关键技术架构与算法

扩展现实技术架构整体可分为五个层级（如图 1），包括硬件层、核心层、中间层、功能层和应用层，

各层级协同支撑扩展现实系统的整体功能。最底层的硬件层为系统提供了基础支撑，主要包括扩展现实头显、显示设备及处理器等关键组件。核心层作为系统的技术基础，进一步细分为：感知与建模层、渲染与交互层、网络与协同层^[18]。在感知与建模层，VR 系统依赖内外向追踪技术，如 Oculus Insight 通过 4 颗鱼眼摄像头实现 3DoF/6DoF (Dimention of Freedom) 定位，其环境建模主要用于安全边界设定而非场景重建。AR 和 MR 系统则以 SLAM 算法为基座（ORB-SLAM3 等^[19]），通过深度相机（如 Azure kinect）构建环境点云，结合 Mask R-CNN^[20] 语义分割实现虚实空间注册。在渲染与交互层，VR 采用光线追踪生成全虚拟环境，通过注视点渲染降低 GPU 负载。增强现实或混合现实一般可采用基于环境理解的光场透视，如 Meta Quest Pro 的 pancake 光学透视，采用深度感知遮挡实现虚实物体自然叠压。在网络与协同层，该技术则通过 5G 网络支持多用户之间的协同扩展现实体验，并利用时间敏感网络确保数据的实时同步，从而提升用户的沉浸感和互动性。

在此基础上，中间层为扩展现实应用提供了开发平台与引擎、数据同步与传输协议、设备驱动与管理等支撑服务，保障了系统的可扩展性与互操作性。功能层则实现了虚拟环境的建模与交互、多感官交互、用户行为与生理数据分析等，以及用户行为和生理数据的采集与分析等核心功能。最上层的应用层面向实际应用需求，涵盖神经康复训练、神经科学实验仿真、数据可视化、患者教育及远程医疗等多个领域。

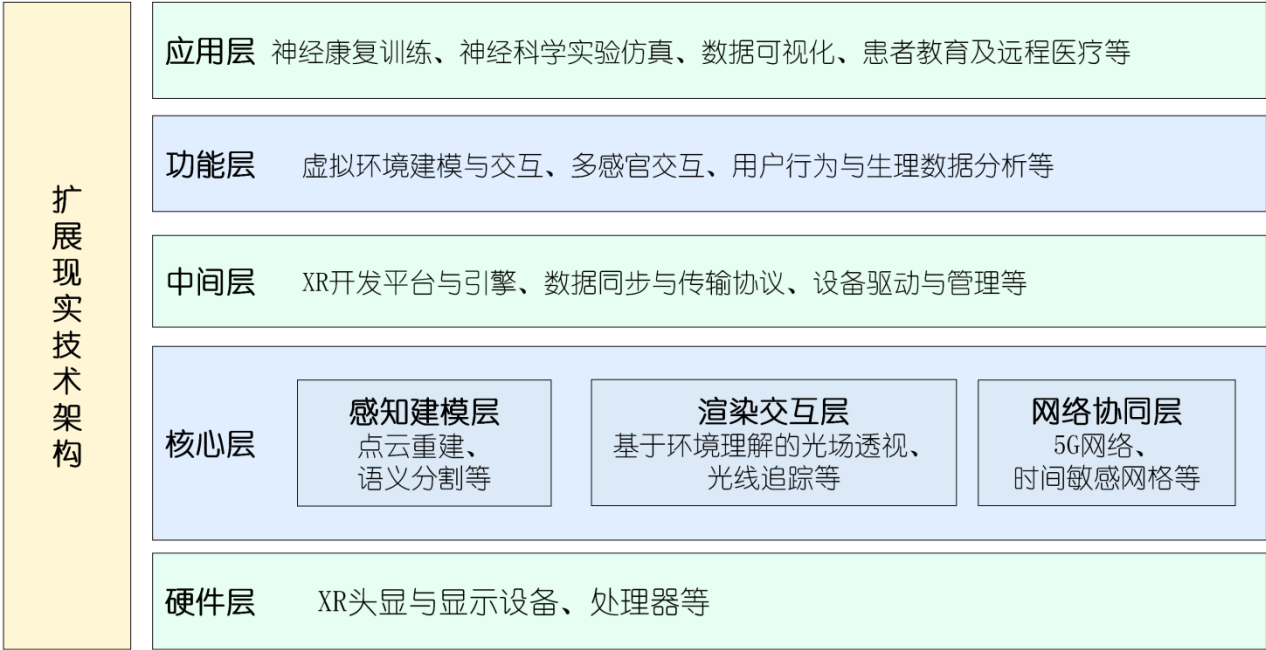


图 1 扩展现实技术架构图

Figure 1 Extended Reality Architecture Diagram

三种扩展现实技术的内涵通常并不具有明确的辨识边界，然而在环境感知、虚实融合和交互方式等环节上却各有侧重，其工作原理亦各具独特性（如图 2 所示）。虚拟现实以完全沉浸为目标，通过头戴式显示设备集成的各类传感器采集用户动作，配合计算机生成并实时渲染三维虚拟场景，实现对用户视角的同步更新，

并通过触觉等多种反馈方式增强沉浸感，关键技术包括六自由度追踪、宽视场角和低延迟显示。相比之下，增强现实侧重于在真实环境中叠加虚拟信息，其流程包括基于摄像头和传感器的环境捕捉，通过 SLAM 等图像识别算法定位和识别现实场景中的物体或平面，将虚拟内容实时渲染并叠加至现实画面，并支持手势、语音或触控等交互方式，核心技术涉及同步定位、地图构建和光学透视显示。而混合现实则在增强现实的基础上进一步实现虚拟与现实的深度融合，其流程依赖深度摄像头或激光雷达对环境进行空间扫描，构建高精度网格地图，并通过物理引擎对虚拟对象与现实环境的光照、遮挡和物理规则进行动态计算，实现虚实之间的自然交互和多模态控制。

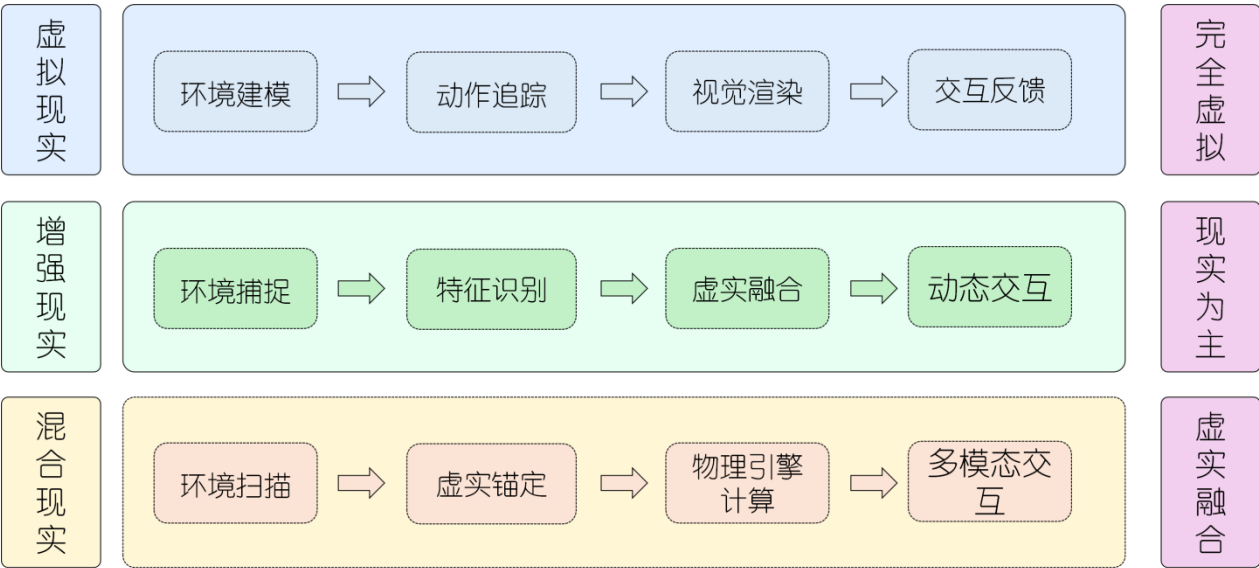


图 2 扩展现实技术工作原理
Figure 2 Working Principles of Extended Reality

2.3. 扩展现实在神经学应用的技术优势

扩展现实技术在神经学应用中的技术优势主要体现在精准性、安全性、可重复性及沉浸感四大维度。在准确性方面，虚拟现实和增强现实等技术在创建神经解剖结构的详细三维重建方面发挥着关键作用。通过整合 MRI 和 CT 等医学成像方式，扩展现实增强了空间感知能力，使临床医生能够更精确地可视化复杂的脑区和神经通路。有研究表明，扩展现实系统提高了手术计划的准确性和效率，显著缩短了近 39% 的手术导航和计划时间^[21, 22]。此外，相关研究指出，扩展现实应用不仅可以改善手术靶点的定位，还可以通过整合个体患者数据来辅助设计个性化治疗方案^[23]。这些技术进步最终有助于在术前和术中做出更明智的决策，正如扩展现实对手术结果影响的研究中所强调的那样^[24]。

安全性是扩展现实系统在神经外科应用中的另一项关键优势。传统的外科手术培训通常要求学员直接与患者接触，存在一定的操作风险。而扩展现实平台能够为医生提供一个无风险的虚拟环境，使其不需与患者接触即可进行大量外科手术的演练和练习^[25]。这种虚拟化的培训方式显著提升了学习效率，并有助于减少潜

在的医疗失误。此外，扩展现实技术还能在安全可控的环境中推进康复训练，从而最大程度降低神经系统疾病康复患者发生继发性损伤的风险^[26]。

可重复性也是神经病学教育和研究中的一个重要方面。虚拟现实平台能够支持复杂操作的持续重复，无论是外科手术还是康复训练，每一步都可以在受控环境下进行，并为技能提升和理论学习提供持续反馈。此外，所有操作过程都可被完整记录，便于后续的全面分析和评估，这对于教育及相关研究具有重要意义^[27]。

最后，扩展现实技术带来的沉浸式体验为患者护理和教育提供了一种变革性的方法。沉浸式体验能够显著提升患者在康复过程中的参与度，同时增强医学生的学习效果。用户普遍认为，这种高度的临场感和互动性大大提高了学习积极性和信息保留率^[26]。同时，研究表明，沉浸式体验有助于加深对复杂神经系统疾病的理解，并提升治疗干预的整体疗效^[28]。

3. 扩展现实在临床评估中的应用

扩展现实在临床评估中发挥着越来越重要的作用，在检测认知功能和精神健康方面都表现出了优秀的检测性能^[29, 30]。相较于传统诊断手段，扩展现实能够更精准地模拟真实情境，实现动态交互与实时数据监测，从而有效提升神经系统疾病评估的准确性和全面性（如图 3）。目前扩展现实已在认知功能相关疾病、神经发育疾病、神经精神疾病的评估中得到了广泛探索和测试^[31~33]。

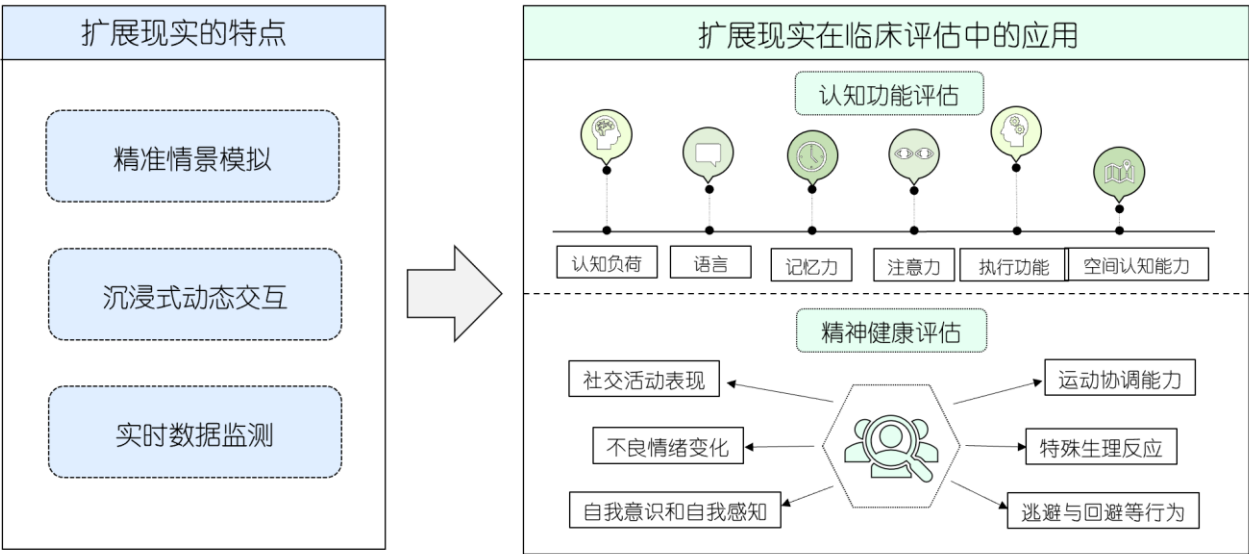


图 3 扩展现实在临床评估中的应用
Figure 3 Applications of Extended Reality in Clinical Evaluation

3.1. 认知功能评估

认知功能评估对于临床诊断和治疗至关重要，尤其是在神经学领域。它帮助医生识别患者的认知障碍，

及时进行干预，并为疾病的进展和效果评估提供依据。传统的认知评估方法通常依赖于标准化测试，如蒙特利尔认知评估（Montreal Cognitive Assessment, MoCA）^[34]、简易智力状态检查（Mini-Mental State Examination, MMSE）^[35]等，这些方法虽然广泛使用，但存在一定的局限性，如评估结果受到医师主观判断和测试环境的双重影响^[36]。扩展现实在认知功能评估中展现出了巨大的潜力，提供更为沉浸式和互动性的测试环境，提高患者的动机和参与度，使得评估更加多维和精准，这对轻度认知障碍（Mild Cognitive Impairment, MCI）、阿尔茨海默病、注意力缺陷多动障碍的诊断和筛查尤为重要^[37]。

与传统的评估方法相比，扩展现实能够模拟复杂的环境和情境，使参与者能够在高度可控和模拟的环境中互动^[38]。通过监测参与者的反应速度、注意力分配以及生理反馈（如眼动、心率、皮肤电反应），扩展现实能够对参与者的认知负荷、语言、记忆力、注意力、执行功能和空间认知能力进行多方位评估^[26]。Cabinio 等人^[39]开发了一个虚拟 3D 环境的触摸屏智能 VR 游戏 SASG，研究对象被要求在虚拟房屋内按照简单的指令完成五项认知相关任务，而软件则评估表现的准确性和反应时间。研究表明，与非特异性神经心理测试相比，SASG 鉴别遗忘性轻度认知障碍（Amnesic Mild Cognitive Impairment, aMCI）受试者的记忆衰退和海马神经损伤的能力更强。Porffy 等人^[40]设计了一种 VR 认知评估工具 Vstore，模拟了一个迷你市场的环境，评估涉及日常生活和实际情境中的认知表现。Wiebe 等人^[41]研究表明利用生态有效的虚拟现实环境，并整合多种数据模式，有助于增强 ADHD 诊断的稳健性。随着技术的不断进步和设备的普及，预计扩展现实将在认知功能相关疾病的诊断和筛查中发挥越来越重要的作用。

3.2. 精神健康评估

扩展现实技术能够提供受控且标准化的沉浸式环境，有助于以安全且可重复的方式观察参与者的症状和行为，从而评估其精神健康状况。这可以帮助诊断创伤后应激障碍、精神分裂症、焦虑症等多种神经系统疾病^[42, 43]。创伤后应激障碍通常发生在暴露于战争等创伤性事件的个体中，其症状包括逃避、回避与麻木、过度警觉、负性情绪变化等^[44]。这些症状表现复杂、存在异质性，且往往出现在临床环境外，不利于客观地诊断创伤后应激障碍^[45]。Hinrichs、Balban 等人^[46]研究了对威胁 VR 场景的行为和生理反应，报道了传递交感神经系统活动相关信息的皮肤电反应，是视觉威胁反应的最敏感指标。研究发现，创伤后应激障碍患者暴露于虚拟现实负性刺激时，其注意力维持时间显著延长，瞳孔扩张程度增强，心率变异性更大，这些生理反应特征为开发创伤后应激障碍的非侵入性诊断工具提供了重要依据^[47, 48]。此外，Kim 等人^[49]发现，与健康人群相比，精神分裂症患者在与虚拟形象进行消极的社交互动时，眼神注视的次数减少，在解释语言和非语言社交线索以及虚拟人物的面部情绪方面存在更多困难。这些研究结果都表明借助神经精神疾病在虚拟场景中的特殊表现，扩展现实能给医疗工作者评估患者精神健康提供客观数据支持，辅助神经学领域精神健康疾病的临床评估和疾病筛查。

4. 扩展现实在神经外科手术中的应用

4.1. 医学教育

在过去的 20 年间,已经有许多医学院校和部门在课堂上引入了扩展现实的设备或软件,用来辅助人体解剖学、生理学等课程教学^[50]。这种新兴技术能够超越非交互式图像带来的限制,帮助学生更好地可视化和理解复杂结构和概念^[51]。研究表明扩展现实应用于医学课程能促进学生的学习,提升学生的兴趣和注意力^[52~54]。除了课堂场景,扩展现实也被逐步应用到外科手术培训中。传统上,外科手术培训依赖于经验丰富的外科医生对低年资医生或实习生的监督和指导,然而这种培训方法并不能保证经过培训的临床医生在培训结束时已经获得了作为独立从业者有效和轻松执行的能力^[55]。新兴的扩展现实可以模拟各种复杂的手术情境,帮助医务人员在无风险的环境中进行反复练习,提高对手术程序的理解与掌握,提升手术技能和增强信心^[56,57]。研究者们已经开发了许多基于扩展现实的手术操作培训平台,为临床医生提供多种神经外科手术培训,例如机械血栓切除、肿瘤切除、脑室引流等^[58]。

VR 训练还可以增强医疗提供者之间的团队协作和促进医疗效果。Edwards 等人^[59]的研究表明,扩展现实环境中的协作训练显著改善了手术室工作人员的团队合作,这可能通过减少死亡率和发病率,保障患者的安全。Nassar 等学者^[60]还指出在扩展现实培训中加入虚拟的教师或同伴,特别是专家,可以显著提高技能习得。值得一提的是,软件开发和远程学习能够取代传统使用的昂贵的模拟环境(例如不可重复使用的 3D 打印模型、实验动物、人体标本),降低教学成本,改善不同地区的医学教育可及性,减少医学教育间的差距^[61]。

4.2. 术前规划

近 10 年来,扩展现实系统的开发和测试在神经外科如神经肿瘤学、脊柱神经外科、神经血管外科和颅底外科等手术领域越来越普遍^[62,63]。传统的神经学影像学检查,如 CT 和 MRI,虽然能够提供重要的人体结构信息,但仍然受到医生经验和设备分辨率的限制。扩展现实能够通过术前成像、计算机建模,创建患者特异性的三维图像,增强影像的可视化效果,帮助医生更直观地分析脑部结构的变化,从而提升手术精度与安全性^[64,65]。Wang 等人^[66]研究了扩展现实模型对于术前规划的有效性,在 60 例鞍区肿瘤患者中,研究人员将收集到的 CT 和 MRI 扫描图像导入开发的扩展现实系统 Dextroscope,对各个患者的手术路径和手术步骤(皮瓣开窗、视野暴露和肿瘤切除等)进行模拟,确定术中注意事项和难点,供 11 名神经外科医生使用。结果显示,三维 VR 模型有助于制定个性化的手术预案。

4.3. 术中支持

扩展现实用于术中支持的研究尚处于初步阶段,其中增强现实和虚拟现实技术最为普遍。但是我们仍需要在广泛地临床应用之前,需要对其进行深入研究和临床验证^[67]。具体而言,扩展现实设备能将必要的信息(如 CT、MRI 和功能信息)叠加到手术视野或手术显微镜上,并动态标注与关键神经血管束、功能脑区等高危解剖结构的毗邻距离^[68,69]。近年来许多研究旨在为各种外科手术开发新颖、更有效的 VR 系统,同时也改进和完善了现有的系统^[70]。例如,Spiegler 等人^[71]设计了一个交互式 VR 系统 PreVISE,为癫痫立体脑电图(SEEG)

手术提供实时反馈指标，包括与血管的距离、插入角度和手术质量评分等。这个系统能帮助外科医生优化手术规划，并通过视觉提示促进了手动 SEEG 轨迹设计的交互性。Ivan 等人^[72]设计了一种头戴式显示器，可以在手术室外科医生佩戴的 AR 眼镜上识别和显示肿瘤的圆周边界。扩展现实也同样被设计用于辅助颅外-颅内搭桥血运重建术，通过结合术前图像显示大脑结构^[73]。这些结果最终证明了扩展现实能够提高外科医生的准确性和患者的安全性。

5. 扩展现实在疾病康复和治疗中的应用

5.1. 神经康复

扩展现实已被视为一种个性化且较为廉价的神经康复策略，其中借助 VR 设备的康复训练最为普遍，适用的神经系统疾病包括卒中后遗症、脑外伤、PD、MS 以及 AD 等神经退行性疾病等。借助特定的 VR 系统，患者能够在虚拟或增强现实的环境中进行个性化的康复训练，模拟真实的情境和动作，从而更有效地恢复运动功能、改善认知能力，并提高生活质量。在治疗卒中后遗症时，VR 能帮助激活他们的脑运动区，运动意象有助于通过招募患者未受损的神经元并增强其他神经网络的脑活动，促进受损脑区的重组^[74]。对于帕金森病和多发性硬化症患者，VR 不仅能帮助改善运动控制，还能通过虚拟环境的刺激提高患者的参与感和积极性。Cano 等人^[75]的研究表明 VR 锻炼对帕金森患者的步长和步幅有积极影响。需要注意的是，一些荟萃分析指出将扩展现实用于康复治疗的文献在最近五年迅速增加，但研究质量较低、研究人数较少，需要更多高质量、大规模的研究来证实这些发现^[76, 77]。

5.2. 行为干预

扩展现实不仅能应用于脑损伤或神经退行性疾病引起的运动或认知功能障碍的生理性康复，还在多种神经发育疾病和精神神经疾病的干预研究中展现出了优秀的潜力。研究人员需要将扩展现实、VR、AR 和 MR 与传统的暴露疗法、行为训练结合使用，通过行为干预给患者提供认知行为治疗、认知训练和康复、行为矫正、社会动机、注意力增强和生物反馈^[78-80]。对于 PTSD 患者，基于 VR 的暴露疗法能够通过定制化的虚拟场景，逐步、安全地引导患者接触恐惧源，从而有效降低回避行为和情绪过度反应^[81]。一项多中心随机对照实验证实，自动化 VR 认知疗法联合常规护理较单纯常规护理显著改善精神病患者（精神分裂谱系障碍和伴精神病性症状情感障碍）的场所恐惧性回避与情境痛苦^[82]。在一项 ASD 患儿的干预中，研究人员通过沉浸式 VR 互动视频游戏技术能与应用行为分析和感觉整合训练，提高儿童对信息的处理和反应能力，以帮助他们改善社交、理解、感知和情绪调控等方面的能力^[83]。

5.3. 脑机接口

扩展现实与脑机接口（Brain-Computer Interface, BCI）的结合正推动医疗、神经学和人机交互领域的革新^[84]。BCI 是近年来发展迅速的一种技术，它建立了人脑与计算机之间的通信，以取代传统的大脑信号输出

途径（外周神经和肌肉组织）^[85]。而扩展现实能利用沉浸式环境（视觉、听觉、触觉）实时响应用户的脑信号，为 BCI 训练提供高仿真场景，如利用 BCI 设备将虚拟对象的感官信息转化为电信号直接刺激大脑皮层，提升交互真实性和神经反馈效率^[86, 87]。BCI-XR 新技术可辅助中风或瘫痪患者通过想象动作控制虚拟肢体以激活神经可塑性，显著改善运动功能。此外，多模态传感器（如眼动追踪、肌电信号、运动捕捉）的融合进一步提升了 BCI-VR 系统指令丰富性和交互精度。这一技术融合不仅扩展了 BCI 的应用场景，克服了传统 BCI 指令有限、训练周期长等局限，还通过闭环反馈机制和沉浸式体验重新定义了人机交互模式，为神经康复和智能交互提供了创新解决方案^[88]。

6. 挑战与未来方向

6.1. 技术瓶颈和数据安全

6.1.1. 硬件限制

分辨率在确保高质量的沉浸式体验中扮演着关键角色。更高分辨率的显示系统使用户能够感知更清晰、更详细的视觉刺激，从而显著增强沉浸感和交互体验。研究表明，低分辨率不仅会引发视觉疲劳和不适，还可能降低康复治疗的效果，特别是在需要精细视觉细节以保障任务准确性的场景中^[89-91]。当前，高端扩展现实设备已实现视网膜级显示突破，例如，Apple Vision Pro 采用 Micro-OLED 屏幕，单眼分辨率达 11.7 MP（Megapixels）（3660×3200），Meta Quest 3 的单眼分辨率达 4.5 MP（2064×2208）。然而，受限于功耗和散热，移动设备在保持轻量化紧凑性的前提下提升光学效率仍是现存的亟需解决的瓶颈。

延迟是影响扩展现实应用程序性能的另一关键因素，高延迟会导致用户体验的脱节，使用户在虚拟环境中感到自己的动作与实际反馈之间存在明显的不协调。这种延迟不仅破坏了沉浸感，还会严重影响依赖实时反馈的治疗效果。例如，在康复训练中，反馈延迟过长会阻碍患者及时调整动作，从而延缓康复进展^[92, 93]。即使是轻微的延迟也可能破坏用户的控制感，削弱沉浸式体验的有效性^[94, 95]。通过专用芯片架构，延迟问题目前得到了显著改善。例如，Apple Vision Pro 的 R1 芯片实现了 12 ms 的端到端延迟，Meta Quest 3 采用骁龙 XR2 Gen2 的并行流水线架构，将运动到光子延迟相较初代 XR2 芯片显著降低。此外，在算法层面，通过异步时间扭曲算法（Asynchronous Timewarp）动态补帧也可将有效延迟降低。因此，通过进一步软硬件协同优化，这一难点将得到解决。

舒适性也是扩展现实硬件设计中的一个基本考虑因素。长时间使用扩展现实设备可能导致疲劳、不适甚至晕动症，这些负面影响会显著降低用户体验，特别是对于正在接受康复治疗的患者而言^[96]。影响舒适度的关键因素包括设备的重量、贴合度、可穿戴性以及制造材料的选择。通过优先考虑人体工程学设计，例如优化设备重量分布、改进贴合度和使用更轻便的材料，可以有效缓解这些不适^[97]。设备的透气性和散热性能也是提升舒适性的重要因素。长时间佩戴扩展现实设备可能会导致皮肤出汗或过热，尤其是在治疗环境中，患者可能需要连续使用设备数小时。因此，采用透气性良好的材料以及设计合理的散热结构，能够显著减少佩

戴者的不适感。例如，在头戴式设备的接触部位使用柔软、透气的记忆海绵，或在设备内部集成微型风扇以促进空气流通，都是提升舒适性的有效手段。

6.1.2. 数据隐私保护与伦理争议

扩展现实在神经学里的应用同时也带来了数据安全 and 道德问题的深刻挑战。通过扩展现实应用程序收集的数据，包括生理信号、行为模式和其他个人信息，具有高度敏感性，因此社会和相关平台迫切需要建立与现有法规（如欧盟的《通用数据保护条例》）兼容的强大隐私保护机制^[98]。这些法规对个人数据的处理方式提出了严格的要求，包括数据的收集、存储、传输和使用，因此，在使用这项技术时我们需对其进行仔细监督以确保合规性。但由于扩展现实系统自身存在潜在安全漏洞^[99]，在医疗保健领域的集成应用中，个人数据保护面临复杂挑战，这凸显了实施有效数据安全协议的必要性。具体而言，可以通过采取数据加密、访问控制、定期安全审计等技术措施，有效降低数据泄露风险。此外，确保用户对其数据使用的知情同意，不仅是保护用户权利的基本要求，也是维持技术信任的关键所在^[100]。

扩展现实的道德层面是多维度的，其中一个核心问题是如何以透明和负责任的方式收集和处理用户数据。研究人员强调，必须采用透明的实践，确保用户充分了解正在收集哪些数据、收集的目的以及这些数据将如何被使用^[101]。这种透明度不仅是尊重用户知情权的基础，也是建立信任的关键。此外，在推动技术创新的同时，需要与道德责任保持平衡；技术进步不应以牺牲用户的隐私或自主权为代价。

6.2. 融合创新方向

6.2.1. 智能增强型扩展现实

人工智能技术的飞速发展推动了其与扩展现实的深度融合，为神经学领域开辟了变革性的机遇。通过深度学习算法，人工智能能够高效地分析和处理大量用户数据，从而显著优化扩展现实环境的适应性和交互体验。例如，针对癫痫患者，人工智能可以通过实时分析患者的生理信号，识别潜在的癫痫发作模式，并及时发出预警，帮助患者能够在癫痫发作前采取预防措施^[102]。这种技术融合不仅增强了患者的主动管理能力，还减少了癫痫发作对日常生活的影响。在神经康复领域，智能增强型扩展现实通过提供实时反馈和量身定制的训练计划，显著提升了患者的康复体验。研究表明，个性化干预不仅能够提高患者的参与度和积极性，还能增强他们的参与感，从而最终改善治疗效果^[103]。例如，人工智能算法可以根据患者的实时表现动态调整训练难度和内容，确保训练方案始终与患者的康复进展相匹配。

未来的研究应优先探索人工智能与扩展现实的交叉领域，以突破神经学治疗和康复的现有界限。随着更复杂的人工智能工具不断涌现，它们能够帮助医疗保健提供者创建患者反应的预测模型，从而根据每位患者的独特情况制定更精准、更有效的干预措施。例如，通过分析多模态数据（如生理信号、行为模式和认知表现），人工智能可以预测患者的治疗反应并优化康复计划，显著提高治疗效果。认识到 AI 在个性化护理和提

升康复计划疗效方面的关键作用，神经学领域可以更好地服务于致力于改善健康结果的患者^[104,105]。

6.2.2. 元宇宙医疗生态

扩展现实技术驱动的分布式医疗协作平台为神经科学提供了创新框架，通过构建基于扩展现实技术的可交互生态系统，能够显著提升神经机制研究和数据协同分析的深度与效率。作为构建元宇宙医疗场景的核心技术，扩展现实通过沉浸式人机交互界面和分布式网络架构，为跨机构神经数据共享提供了技术实现路径。基于扩展现实的虚拟协作空间可有效打破数据孤岛，使研究人员能够在保护隐私的前提下，对分布式数据池进行协同分析，从而加速神经系统疾病的发现^[106]。在元宇宙医疗生态系统中，安全的数据共享平台至关重要。这种平台的开发需依托强大的监管框架，以确保合规性并促进利益相关者之间的信任^[107]。例如，联合学习作为一种创新的数据共享方法，使机器学习算法能够从分散的数据中学习，而无需直接访问数据本身，从而在保护隐私的同时增强跨机构协作研究能力^[108,109]。特别需要指出的是，元宇宙概念在医疗场景中的具体实现，本质上是扩展现实技术与云计算、区块链等支撑技术的系统集成。

元宇宙还为虚拟临床试验提供了新机遇。研究人员可以在受控环境中模拟临床场景，评估药物疗法和治疗方案的疗效。这种方法不仅可以降低传统临床试验的成本，还能提高灵活性，并支持实时监测患者反应^[110,111]。虚拟管理试验的能力使研究人员能够微调方法、实时应对挑战，并收集全面数据，避免了物理试验的后勤障碍和高额成本。

为充分发挥元宇宙在医学研究中的潜力，未来研究应优先建立一个安全高效的生态系统，推动持续创新。制定数据共享、患者同意和道德合规标准是确保这些举措成功和可持续的关键。此外，研究应聚焦于开发可互操作的系统，实现多源数据的无缝集成，同时维护高标准的隐私与安全。

7. 结论

扩展现实在神经学领域研究中正逐步展现出良好的临床价值。在临床评估中，扩展现实能提升认知功能与精神健康评估的精准性，为多种神经系统疾病的早期诊断和筛查提供了客观化工具。在神经外科手术中，扩展现实不仅能够创新医学教育与手术培训模式，还能通过三维可视化优化术前规划和提供术中支持，降低复杂解剖结构带来的操作风险。在疾病康复与治疗中，扩展现实能够帮助患者在虚拟环境中进行个性化的训练，促进功能恢复和认知治疗，BCI-XR 新技术为瘫痪和中风患者克服身体限制和神经恢复带来了可能。

尽管扩展现实展现了巨大的应用前景，但在临床实践中的广泛应用仍面临一些挑战，如硬件性能限制、数据隐私保护以及临床验证的不足。未来，随着技术的不断进步，人工智能与扩展现实的结合，以及元宇宙等创新模式的引入，扩展现实将在神经学研究和治疗中发挥更为重要的作用。通过技术迭代与临床验证的双重驱动，扩展现实有望重塑神经学研究的边界，实现技术创新和临床转化，为患者提供更高效、精准的诊疗和康复方案，减轻全球神经系统疾病负担。

参考文献

1. Feigin V L, Vos T, Nichols E, et al. The global burden of neurological disorders: Translating evidence into policy. *Lancet Neurol*, 2020, 19: 255-265
2. Carroll W M. The global burden of neurological disorders. *Lancet Neurol*, 2019, 18: 418-419
3. Toni E, Toni E, Fereidooni M, et al. Acceptance and use of extended reality in surgical training: An umbrella review. *Syst Rev*, 2024, 13: 299
4. Espay A J, Aybek S, Carson A, et al. Current concepts in diagnosis and treatment of functional neurological disorders. *JAMA Neurol*, 2018, 75: 1132-1141
5. Cardoso S A, Suyambu J, Iqbal J, et al. Exploring the role of simulation training in improving surgical skills among residents: A narrative review. *Cureus*, 2023, 15: e44654
6. Lohkamp L N, Nguyen R, Greenfield J P. Challenges and opportunities in neurosurgical care transition. *Neurosurg Focus*, 2024, 57: E17
7. Kang E, Kim M Y, Lipsey K L, et al. Person-centered goal setting: A systematic review of intervention components and level of active engagement in rehabilitation goal-setting interventions. *Arch Phys Med Rehabil*, 2022, 103: 121-130.e3
8. Nobles K, Cunningham K, Fecondo B, et al. Mobilization in neurocritical care: Challenges and opportunities. *Curr Neurol Neurosci Rep*, 2024, 25: 13
9. Fabiana D, Prisco P, Alessandro M, et al. Revolutionizing medical education: The impact of virtual and mixed reality on training and skill acquisition. *Int J Med Net*, 2024, 2: 1-6
10. Parsons T D, Gaggioli A, Riva G. Extended reality for the clinical, affective, and social neurosciences. *Brain Sciences*, 2020, 10: 922
11. Rajendran S, Obeid J S, Binol H, et al. Cloud-based federated learning implementation across medical centers. *JCO Clinical Cancer Informatics*, 2021, 5: 1-11
12. Park S W, Ko J S, Huh J H, et al. Review on generative adversarial networks: Focusing on computer vision and its applications. *Electronics*, 2021, 10: 1216
13. Bailenson, J, DeVaux C, Han E. et al. Five canonical findings from 30 years of psychological experimentation in virtual reality. *Nat Hum Behav*, 2025, 9: 1328-1338
14. Bos E, Preller K H, Kaur G, et al. Challenges with the use of digital sham: Systematic review and recommendations. *J Med Internet Res*, 2023, 25: e44764
15. Chen J, Or C K, Chen T. Effectiveness of using virtual reality - supported exercise therapy for upper extremity motor rehabilitation in patients with stroke: Systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Medical Internet Research*, 2022, 24: e24111
16. Yuan J, Hassan SS, Wu J, et al. Extended reality for biomedicine. *Nat Rev Methods Primers*, 2023,

17. Kim K, Yang H, Lee J, et al. Metaverse wearables for immersive digital healthcare: A review. *Adv Sci (Weinh)*, 2023, 10(31): e2303234
18. Garcia Rivera F, Lamb M, Högberg D, et al. The schematization of XR technologies in the context of collaborative design. In: Ng AHC, Syberfeldt A, Högberg D, Holm M, editors. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. Amsterdam: IOS Press, 2022
19. Campos C, Elvira R, Rodríguez J J G, et al. ORB-SLAM3: An accurate open-source library for visual, visual-inertial and multi-map SLAM. *IEEE Trans Robot*, 2021, 37: 1874–1890
20. He K, Gkioxari G, Dollár P, et al. Mask R-CNN. In: 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2017, 2980–2988
21. Ghaednia H, Fourman M S, Lans A, et al. Augmented and virtual reality in spine surgery, current applications and future potentials. *Spine J*, 2021, 21: 1617–1625
22. Prasad K, Miller A, Sharif K, et al. Augmented-reality surgery to guide head and neck cancer re-resection: A feasibility and accuracy study. *Ann Surg Oncol*, 2023, 30:4994–5000
23. Gupta N, Barrington N M, Panico N, et al. Assessing views and attitudes toward the use of extended reality and its implications in neurosurgical education: a survey of neurosurgical trainees. *Neurosurg Focus*, 2024, 56: E18
24. Van Gestel F, Frantz T, Buyck F, et al. Neuro-oncological augmented reality planning for intracranial tumor resection. *Front Neurol*, 2023, 14: 1104571
25. Kaplan A D, Cruit J, Endsley M, et al. The effects of virtual reality, augmented reality, and mixed reality as training enhancement methods: A meta-analysis. *Hum Factors*, 2021, 63: 706–726
26. Hariharan V K, PK M P K, Rajanandh M. Extended reality in revolutionizing neurological disease: A new era for chronic condition treatment. *Cureus*, 2024, 16: e67633
27. Iop A, El-Hajj V G, Gharios M, et al. Extended reality in neurosurgical education: a systematic review. *Sensors*, 2022, 22: 6067
28. Recker M J, Barber J C, Xia J J, et al. Accuracy of surgical outcome using computer-aided surgical simulation in fronto-orbital advancement for craniosynostosis: A pilot study. *Oper Neurosurg*, 2024, 26: 46–53
29. Liu Q, Song H, Yan M, et al. Virtual reality technology in the detection of mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis. *Ageing Res Rev*, 2023, 87: 101889
30. Wiebe A, Kannen K, Selaskowski B, et al. Virtual reality in the diagnostic and therapy for mental disorders: A systematic review. *Clin Psychol Rev*, 2022, 98: 102213
31. Carlson C G. Virtual and augmented simulations in mental health. *Curr Psychiatry Rep*, 2023, 25(9): 365–371

32. Yan M, Zhao Y, Meng Q, et al. Effects of virtual reality combined cognitive and physical interventions on cognitive function in older adults with mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis. *Ageing Res Rev*, 2022, 81: 101708
33. Muurling M, de Boer C, Vairavan S, et al. Augmented reality versus standard tests to assess cognition and function in early Alzheimer's disease. *NPJ Digit Med*, 2023, 6(1): 234
34. Danquah M O, Yan E, Lee J W, et al. The utility of the montreal cognitive assessment (MoCA) in detecting cognitive impairment in surgical populations – a systematic review and meta-analysis. *J Clin Anesth*, 2024, 97: 111551
35. Lin Y T, Wang P N, Chen J J, et al. Performance of the brain health test-7, mini-mental state examination, and montreal cognitive assessment for detecting subjects with mild cognitive impairment. *Int Psychogeriatr*, 2025: 100077
36. Li F, Harmer P, Eckstrom E, et al. Clinical effectiveness of cognitively enhanced Tai Ji Quan training on global cognition and dual-task performance during walking in older adults with mild cognitive impairment or self-reported memory concerns : A randomized controlled trial. *Ann Intern Med*, 2023, 176(11): 1498-1507
37. Xu Y, Zhang C, Pan B, et al. A portable and efficient dementia screening tool using eye tracking machine learning and virtual reality. *NPJ Digital Medicine*, 2024, 7: 219
38. Alberts J L, McGrath M, Koop M M, et al. The immersive cleveland clinic virtual reality shopping platform for the assessment of instrumental activities of daily living. *Journal of Visualized Experiments*, 2022, 185: e63978
39. Cabinio M, Rossetto F, Isernia S, et al. The use of a virtual reality platform for the assessment of the memory decline and the hippocampal neural injury in subjects with mild cognitive impairment: The validity of smart aging serious game (SASG). *Journal of Clinical Medicine*, 2020, 9(5): 1355
40. Porffy L A, Mehta M A, Patchitt J, et al. A novel virtual reality assessment of functional cognition: Validation study. *J Med Internet Res*, 2022, 24: e27641
41. Wiebe A, Selaskowski B, Paskin M, et al. Virtual reality-assisted prediction of adult ADHD based on eye tracking, EEG, actigraphy and behavioral indices: A machine learning analysis of independent training and test samples. *Transl Psychiatry*, 2024, 14: 1-10
42. Rothbaum B O, Rothbaum J O. Virtual reality exposure therapy advances and potential for clinical and experimental use. *Neuropsychopharmacology*, 2024, 50(1): 343-344
43. McLachlan J, Mehdikhani M, Larham B, et al. Borderline personality traits and emotion regulation strategies in adolescents: The role of implicit theories. *Child Psychiatry Hum Dev*, 2022, 53: 899-907
44. Wiebe A, Kannen K, Selaskowski B, et al. Virtual reality in the diagnostic and therapy for mental disorders: A systematic review. *Clin Psychol Rev*, 2022, 98: 102213
45. Maercker A, Cloitre M, Bachem R, et al. Complex post-traumatic stress disorder. *Lancet*, 2022,

46. Yilmaz Balban M, Cafaro E, Saue-Fletcher L, et al. Human responses to visually evoked threat. *Curr Biol*, 2021, 31: 601–612.e3
47. Pyne J M, Constans J I, Wiederhold B K, et al. Predicting post-traumatic stress disorder treatment response using heart rate variability to virtual reality environment and modified stroop task: An exploratory study. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, 2023, 26(12): 896–903
48. Lucifora C, Grasso G M, Nitsche M A, et al. Enhanced fear acquisition in individuals with evening chronotype. A virtual reality fear conditioning/extinction study. *J Affect Disord*, 2022, 311: 344–352
49. Kim K, Kim J J, Kim J, et al. Characteristics of social perception assessed in schizophrenia using virtual reality. *Cyberpsychol Behav*, 2007, 10: 215–219
50. Sotgiu M A, Mazzarello V, Bandiera P, et al. Neuroanatomy, the achille’ s heel of medical students. A systematic analysis of educational strategies for the teaching of neuroanatomy. *Anat Sci Educ*, 2020, 13: 107–116
51. Venkatesan M, Mohan H, Ryan J R, et al. Virtual and augmented reality for biomedical applications. *Cell Rep Med*, 2021, 2: 100348
52. Liubogoshchev M, Ragimova K, Lyakhov A, et al. Adaptive cloud-based extended reality: Modeling and optimization. *IEEE Access*, 2021, 9: 35287–35299
53. Walls R, Nageswaran P, Cowell A, et al. Virtual reality as an engaging and enjoyable method for delivering emergency clinical simulation training: a prospective, interventional study of medical undergraduates. *BMC Med*, 2024, 22(1): 222
54. Salimi S, Asgari Z, Mohammadnejad A, et al. Efficacy of virtual reality and augmented reality in anatomy education: A systematic review and meta-analysis. *Anat Sci Educ*, 2024, 17(9): 1668–1685
55. Mergen M, Meyerheim M, Graf N. Reviewing the current state of virtual reality integration in medical education – a scoping review protocol. *Syst Rev*, 2023, 12(1): 97
56. Liu S, Xie M, Gao F, et al. New augmented reality remote for virtual guidance and education of fracture surgery: a retrospective, non-inferiority, multi-center cohort study. *Int J Surg*, 2024, 110(9): 5334–5341
57. Vitale S G, Caruso S, Vitagliano A, et al. The value of virtual reality simulators in hysteroscopy and training capacity: A systematic review. *Minim Invasive Ther Allied Technol*, 2020, 29: 185–193
58. Chen G, Jin S, Xia Q, et al. Insight into the history and trends of surgical simulation training in education: a bibliometric analysis. *Int J Surg*, 2023, 109(8): 2204–2213
59. Edwards T C, Soussi D, Gupta S, et al. Collaborative team training in virtual reality is superior to individual learning for performing complex open surgery: A randomised controlled trial. *Annals of Surgery*, 2023, 278(6): 850–857

60. Nassar A K, Al-Manaseer F, Knowlton L M, et al. Virtual reality (VR) as a simulation modality for technical skills acquisition. *Ann Med Surg (Lond)*, 2021, 71: 102945
61. Dhillon J, Tanguilig G, Kraeutler M J. Virtual and augmented reality simulators show intraoperative, surgical training, and athletic training applications: A scoping review. *Arthroscopy*, 2025, 41(2): 505–515
62. Durrani S, Onyedimma C, Jarrah R, et al. The virtual vision of neurosurgery: How augmented reality and virtual reality are transforming the neurosurgical operating room. *World Neurosurgery*, 2022, 168: 190–201
63. Zhang X, Otoo E M, Fan Y, et al. Autostereoscopic 3D augmented reality navigation for laparoscopic surgery: A preliminary assessment. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2023, 70: 1413–1421
64. Sandrone S, Carlson C E. Future of neurology & technology: Virtual and augmented reality in neurology and neuroscience education. *Neurology*, 2021, 97: 740–744
65. Al-Abcha A, Alkhouli M, Prasad A, et al. Augmented reality and ultrasound-guided vascular access. *Circ Cardiovasc Interv*, 2023, 16: e013360
66. Baker C R, Pease M, Sexton D P, et al. Artificial intelligence innovations in neurosurgical oncology: a narrative review. *J Neurooncol*, 2024, 169(3): 489–496
67. Nazzal E M, Zsidai B, Hiemstra L A, et al. Applications of extended reality in orthopaedic surgery. *J Bone Joint Surg Am*, 2023, 105(21): 1721–1729
68. Gudi N, Kamath P, Chakraborty T, et al. Regulatory frameworks for clinical trial data sharing: Scoping review. *J Med Internet Res*, 2022, 24(5): e33591
69. Wendler T, van Leeuwen F W B, Navab N, et al. How molecular imaging will enable robotic precision surgery: The role of artificial intelligence, augmented reality, and navigation. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48: 4201–4224
70. Hey G, Guyot M, Carter A, et al. Augmented reality in neurosurgery: A new paradigm for training. *Medicina*, 2023, 59: 1721
71. Spiegler P, Abdelsalam H, Hellum O, et al. PreVISE: An efficient virtual reality system for SEEG surgical planning. *Virtual Reality*, 2024, 29: 13
72. Ivan M E, Eichberg D G, Di L, et al. Augmented reality head-mounted display-based incision planning in cranial neurosurgery: A prospective pilot study. *Neurosurg Focus*, 2021, 51: E3
73. Rychen J, Goldberg J, Raabe A, et al. Augmented reality in superficial temporal artery to middle cerebral artery bypass surgery: Technical note. *Oper Neurosurg*, 2020, 18: 444–450
74. Choy C S, Cloherty S L, Pirogova E, et al. Virtual reality assisted motor imagery for early post-stroke recovery: A review. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2023, 16: 487–498
75. Cano Porras D, Siemonsma P, Inzelberg R, et al. Advantages of virtual reality in the

rehabilitation of balance and gait: Systematic review. *Neurology*, 2018, 90: 1017-1025

76. Leong S C, Tang Y M, Toh F M, et al. Examining the effectiveness of virtual, augmented, and mixed reality (VAMR) therapy for upper limb recovery and activities of daily living in stroke patients: a systematic review and meta-analysis. *J Neuroeng Rehabil*, 2022, 19(1): 93
77. Barger S, Scalea S, Agosta F, et al. Effectiveness and safety of virtual reality rehabilitation after stroke: An overview of systematic reviews. *E Clinical Medicine*, 2023, 64: 102220
78. Vajawat B, Varshney P, Banerjee D. Digital gaming interventions in psychiatry: Evidence, applications and challenges. *Psychiatry Res*, 2021, 295: 113585
79. Zhao W, Xu S, Zhang Y, et al. The application of extended reality in treating children with autism spectrum disorder. *Neurosci Bull*, 2024, 40: 1189-1204
80. Ryan G V, Callaghan S, Rafferty A, et al. Learning outcomes of immersive technologies in health care student education: Systematic review of the literature. *J Med Internet Res*, 2022, 24: e30082
81. van 't Wout-Frank M, Arulpragasam A R, Faucher C, et al. Virtual reality and transcranial direct current stimulation for posttraumatic stress disorder: A randomized clinical trial. *JAMA Psychiatry*, 2024, 81: 437-446
82. Freeman D, Lambe S, Kabir T, et al. Automated virtual reality therapy to treat agoraphobic avoidance and distress in patients with psychosis (gameChange): a multicentre, parallel-group, single-blind, randomised, controlled trial in England with mediation and moderation analyses. *Lancet Psychiatry*, 2022, 9(5): 375-388
83. Chu L, Shen L, Ma C, et al. Effects of a nonwearable digital therapeutic intervention on preschoolers with autism spectrum disorder in China: Open-label randomized controlled trial. *J Med Internet Res*, 2023, 25: e45836
84. Gao X, Wang Y, Chen X, et al. Interface, interaction, and intelligence in generalized brain-computer interfaces. *Trends Cogn Sci*, 2021, 25: 671-684
85. Wen D, Liang B, Zhou Y, et al. The current research of combining multi-modal brain-computer interfaces with virtual reality. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2021, 25: 3278-3287
86. Mahmood M, Kim N, Mahmood M, et al. VR-enabled portable brain-computer interfaces via wireless soft bioelectronics. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, 210: 114333
87. Vourvopoulos A, Bermúdez I. Motor priming in virtual reality can augment motor-imagery training efficacy in restorative brain-computer interaction: A within-subject analysis. *J Neuroeng Rehabil*, 2016, 13: 69
88. Chen Y, Zhang G, Guan L, et al. Progress in the development of a fully implantable brain - computer interface: The potential of sensing-enabled neurostimulators. *Natl Sci Rev*, 2022, 9: nwac099
89. De Souza J, Tartz R. Visual perception and user satisfaction in video see-through head-mounted

displays: A mixed-methods evaluation. *Front Virtual Real*, 2024, 5: 1368721

90. Liu Y J, Wen X R, Hu X S, et al. High-resolution integral imaging display using targeted optimized compound lens array for voxel aliasing elimination. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18: 2400182
91. Ozlem Batur Dinler, Canan Batur Şahin, Hanane Aznaoui. Hybrid model used for reducing latency in smart healthcare systems. *JAC*, 2024, 2: 10-20
92. Trinh B, Muntean G M. A deep reinforcement learning-based offloading scheme for multi-access edge computing-supported extended reality systems. *IEEE Trans Veh Technol*, 2023, 72: 1254-1264
93. Alraih S, Shayea I, Behjati M, et al. Revolution or evolution? Technical requirements and considerations towards 6G mobile communications. *Sensors*, 2022, 22: 762
94. Luo X, Liu D, Kong H, et al. SurgeNAS: A comprehensive surgery on hardware-aware differentiable neural architecture search. *IEEE Trans Comput*, 2023, 72: 1081-1094
95. Oh S, Shon T. Digital forensics for analyzing cyber threats in the XR Technology ecosystem within digital twins. *Electronics*, 2024, 13: 2653
96. Kudry P, Cohen M. Development of a wearable force-feedback mechanism for free-range haptic immersive experience. *Front Virtual Real*, 2022, 3: 824886
97. Lee E S, Shin B S. Enhancing the performance of XR environments using fog and cloud computing. *Applied Sciences*, 2023, 13: 12477
98. Khan Z, Adil T, Oduoye M O, Khan B S, et al. Assessing the knowledge, attitude and perception of extended reality (XR) technology in pakistan' s healthcare community in an era of artificial intelligence. *Front Med*, 2024, 11: 1456017
99. Chengoden R, Victor N, Huynh-The T, et al. Metaverse for healthcare: A survey on potential applications, challenges and future directions. *IEEE Access*, 2023, 11: 12765-12795
100. Jones D, Ghasemi S, Gračanin D, et al. *HCI for Cybersecurity, Privacy and Trust*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. 511-528
101. Khowaja S A, Dahri K, Jarwar M A, et al. Spike learning based privacy preservation of internet of medical things in metaverse. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2023
102. Koo T H, Zakaria A D, Ng J K, et al. Systematic review of the application of artificial intelligence in healthcare and nursing care. *MJMS*, 2024, 31: 135-142
103. Russell R G, Lovett Novak L, Patel M, et al. Competencies for the use of artificial intelligence - based tools by health care professionals. *Academic Medicine*, 2023, 98: 348-356
104. Waheed M A, Liu L. Perceptions of family physicians about applying AI in primary health care: Case study from a premier health care organization. *JMIR AI*, 2024, 3: e40781
105. Esmaeilzadeh P, Mirzaei T, Dharanikota S. Patients' perceptions toward human - artificial

intelligence interaction in health care: Experimental study. *J Med Internet Res*, 2021, 23: e25856

106. Draschkow D, Anderson N C, David E, et al. Using XR (extended reality) for behavioral, clinical, and learning sciences requires updates in infrastructure and funding. *Policy Insights Behav Brain Sci*, 2023, 10: 317–323
107. Peterson S M, Rao R P N, Brunton B W. Learning neural decoders without labels using multiple data streams. *J Neural Eng*, 2022, 19(4): 046032
108. Hadan H, Wang D, Nacke L, et al. Privacy in immersive extended reality: exploring user perceptions, concerns, and coping strategies. *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2024: 1–24
109. Buragohain D, Khichar S, Deng C, et al. Analyzing metaverse-based digital therapies, their effectiveness, and potential risks in mental healthcare. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 17066
110. Gudi N, Kamath P, Chakraborty T, et al. Regulatory frameworks for clinical trial data sharing: Scoping review. *J Med Internet Res*, 2022, 24: e33591
111. Patel M, Dayan I, Fishman E K, et al. Accelerating artificial intelligence: How federated learning can protect privacy, facilitate collaboration, and improve outcomes. *Health Informatics J*, 2023, 29(4): 14604582231207744

Extended Reality in Neurology: Technological Analysis and Clinical Value

Yang Jiale^{1,2}, Qin Yiming³, Wang Shiyu^{4,5,6,7}, Wu Qian^{4,5,6,7,8}, Wang Jinyuan³, Li Huating^{5,6,7,8}, Wu Enhua^{9,10}, Wong Tien Yin^{3,11,12,13}, Zeng Dian^{3,*}, Sheng Bin^{1,2,*}

1. School of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240
2. Key Laboratory of Artificial Intelligence, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240
3. School of Clinical Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084
4. Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025
5. Department of Endocrinology and Metabolism, Shanghai Sixth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200233
6. Shanghai Diabetes Institute, Shanghai 200233
7. Shanghai Clinical Center for Diabetes, Shanghai 200233
8. Institute for Proactive Healthcare, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030
9. Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macao 999078
10. State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190
11. Singapore Eye Research Institute, Singapore National Eye Centre, Singapore 168751
12. Beijing Visual Science and Translational Eye Research Institute (BERI), Beijing Tsinghua Changgung Hospital, Tsinghua Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084
13. Beijing Key Laboratory of Intelligent Diagnostic Technology and Devices for Major Blinding Eye Diseases, Tsinghua University, Beijing 100084

* E-mail: zengdian@mail.tsinghua.edu.cn shengbin@sjtu.edu.cn

Traditional diagnostic, therapeutic, and rehabilitation methods for neurological disorders demonstrate difficulties in dynamic pathological monitoring and exhibit low patient compliance. In this context, extended reality (XR) technology offers a breakthrough by constructing quantifiable and adjustable virtual-reality-integrated environments to address these challenges. Therefore, the XR technology, which encompasses virtual reality, augmented reality, and mixed reality, has become a transformative tool in neurology. Hence, the applications of XR in neurology have been reviewed in this study. This paper outlines the core technologies of XR and summarizes the clinical value of XR in clinical assessment, neurosurgery, and the treatment and rehabilitation of

neurological disorders. Furthermore, this review discusses the challenges faced by XR in neurology and presents the scope for future development of XR for applications in neurology.

Extended Reality; Virtual Reality; Augmented Reality; Mixed Reality; Neurology; Neurological Disorders