

虚拟现实技术在脑卒中后上肢功能训练中的应用现状与展望

孙嘉良, 孙晨鸣*, 张俊泽, 毛争程

济宁医学院康复医学院, 山东 济宁

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年4月18日; 发布日期: 2026年4月23日

摘要

脑卒中后上肢功能障碍严重降低了患者的生存质量, 而借助虚拟现实技术将动作捕捉、触觉反馈及时空一致性等技术相结合构建沉浸式的训练环境可以促进神经可塑性的重塑及功能重组; 本文综述了目前VR技术应用于脑卒中上肢康复的作用机制及进展, 并为其未来更广泛地应用于临床治疗提供参考建议。

关键词

脑卒中, 虚拟现实技术, 上肢功能障碍, 康复训练

Current Status and Prospects of Virtual Reality Technology in Upper Limb Functional Training after Stroke

Jialiing Sun, Chenming Sun*, Junze Zhang, Zhengcheng Mao

College of Rehabilitation Medicine, Jining Medical University, Jining Shandong

Received: March 23, 2026; accepted: April 18, 2026; published: April 23, 2026

Abstract

Upper limb dysfunction after stroke severely impairs patients' quality of life. However, constructing an immersive training environment by integrating motion capture, haptic feedback, and spatiotemporal consistency technologies with virtual reality (VR) can promote the remodeling of neuroplasticity and functional reorganization. This review summarizes the current mechanisms of action and research progress regarding the application of VR technology in upper limb rehabilitation after stroke, and provides reference suggestions for its wider clinical application in the future.

*通讯作者。

文章引用: 孙嘉良, 孙晨鸣, 张俊泽, 毛争程. 虚拟现实技术在脑卒中后上肢功能训练中的应用现状与展望[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 4555-4563. DOI: [10.12677/acm.2026.1641726](https://doi.org/10.12677/acm.2026.1641726)

Keywords

Stroke, Virtual Reality, Upper Limb Dysfunction, Rehabilitation Training

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

神经系统疾病中的脑卒中经常会引发患侧上肢的功能性损伤(例如:肌张力障碍和灵巧性下降)以及认知障碍,严重时还会影响患者的双手眼协调能力,约占致残的重要原因的四分之一到二分之一[1]。据资料显示大约 35%~69%的脑卒中患者出现上肢障碍且只有少于一半的患者能在发病后的 6 个月时间内恢复上肢运动能力[2]。因此针对这类上肢功能障碍不但影响患者日常的生活活动能力还降低了患者的生活质量,而且不能很好地完成康复训练从而影响患者最终的康复效果。临床上目前采用较多的上肢康复训练方法包括约束诱导运动疗法(CIMT)、镜像疗法(MT),但存在训练与评估分离、患者参与度低、缺乏个性化等局限性[3]-[6]。因此,脑卒中后上肢功能障碍已成为亟待突破的临床难题,需要创新技术打破现存困境。近年来,虚拟现实(Virtual Reality, VR)以强烈的沉浸感和良好的交互性特点,逐渐应用于脑卒中患者的上肢康复训练,不仅可以根据患者具体情况进行适当的运动功能、认知功能等方面的干预,而且可以提高患者训练的依从性、实现训练和评价的同时,还可以促进受损神经通路的修复、激活神经的可塑性等。

2. 虚拟现实技术的定义

虚拟现实(Virtual Reality, VR)是以计算机为核心,通过向人在视、听、触觉等感官维度上的某一方面或几个方面构建类似真实的虚拟环境的方式,使人机产生某种沉浸式体验并建立二者之间的交互的技术体系[7]。虚拟现实技术主要包括了完全沉浸式、半沉浸式以及非沉浸式三种类型,由于患者个体差异的不同以及治疗需求的不同,可以采用不同的 VR 穿戴设备或者 VR 交互操作工具来构建出符合不同患者沉浸度以及交互层次的需求的 VR 体验环境[8] [9]。同时利用 VR 的多感官结合以及及时回馈的效果,来增强卒中患者的上肢康复训练积极性及依从性,对于脑卒中后的上肢康复治疗及认知康复有着很重要的意义,相应的对于相关领域内人员开展了针对此的研究[10]-[12]。

3. 虚拟现实技术的应用设备

在脑卒中上肢康复训练中,视觉、触觉和听觉等多种感觉整合显得尤为重要,视觉刺激能够激活初级运动皮层(M1 区)、辅助运动区(SMA),改善运动执行功能[13]。本体感觉与触觉刺激可以改善运动皮质的兴奋性,激活外周-中枢感觉神经反馈通路,进而提高动作的精确性与协调性[14]。此外,听觉刺激能够显著激活听觉皮层,并与其他脑区产生协同效应,促进广泛的神经功能恢复[15] [16]。以上述方式将视觉、听觉、触觉等多种感觉刺激有机地组合在一起,并与肢体动作等结合,不仅可以很好地达到多感觉统合的目的,还可以有效激活中枢神经系统和外周运动系统,从而实现快速、有效地促进肢体运动功能的恢复和提高康复训练的效果。这些动作捕捉设备、触觉反馈设备等正是实现多感觉刺激的关键载体,很可能成为康复训练必不可少的一种器材。

3.1. 动作捕捉设备

传统虚拟现实设备多数依赖手柄操作,限制了上肢多关节协同运动的生物力学特征,难以满足脑卒

中患者运动模式重建的临床需求[17] [18]。因此,联合动作捕捉设备的 VR 技术在康复过程中尤为重要。以虚拟现实系统的主动式标记点(NOKOV)为例,此类系统可采用被动式光学动作捕捉等方式同时获得完整的时间序列数据信息(如关节角度、关节角速度等),可利用此数据信息进行“执行-反馈-评估”闭环的信息流的建立,进而将 ADL 导向的功能性训练以及客观量化评价融为一体,能够为精准监测康复进程以及动态调整训练方案提供理论基础与依据[19] [20]。

借助于基于被动反光点的高精度定位技术,NOKOV 系统适用于较大关节部位如躯干等肢体的捕捉;利用 VR 等技术将训练变成目标导向的任务(如虚拟抓握),提高参与度,并实时纠正动作,相较于其他动作捕捉设备可以准确量化脑卒中患者的肩、肘关节运动学参数[20]-[23]。精准数据和沉浸式任务引导结合的训练模式相比于传统康复训练缺少灵活性特点,对脑卒中患者的上肢关节功能障碍的功能评定和个性化治疗方案具有指导意义,并且可以将运动学指标的量化情况实时采集,依据量化结果不断调节功能评定的过程和训练的过程形成一个闭环。

3.2. 触觉反馈设备

研究表明[1] [24]-[26],在发生脑卒中后的感觉障碍患者的全身多处部位仍然具有保留余量的触觉感受能力。因此可以通过触觉反馈的输入方式增加感觉运动的整合,在虚拟康复中将触觉力反馈添加进来,相对于传统视觉听觉反馈输入方式,可以给用户提供更多的多模态的感觉输入,也就是利用多种感官信息来共同完成运动感知,进一步提高用户身临其境的感觉和神经康复效果。

触觉手套是当前主流技术之一。José C. V. S. Junior 等研究者[27]设计并开发了用于虚拟环境中的触觉手套,能够使人抓握/滑动物体时所处的虚拟环境中得到近似真实的触觉感受,由手套上的压力传感器以及振动反馈单元完成,且实现沉浸式触觉交互能加强患者对虚拟物体形状、硬度等属性的感知,并能通过多感觉整合促进运动皮层和体感皮层神经的耦合,有助于对肢体精细动作(如捏取小物体、控制抓握力)训练的真实感知反馈。

针对设备供能限制,福建中医药大学康复医学院[28] [29]研制了一种基于摩擦纳米发电机的可穿戴自供电触觉传感装置,通过对摩擦层进行结构优化来提高能量转化效率,用于检测手部抓取状态(抓握力度及手指屈曲角度),并将其转为电信号,控制振动模块产生物理触觉反馈;因此,在便携化的基础上实现装置的小型化、轻量化、低功耗,适合在患者的康复训练过程中长时间佩戴使用,完成一定时间的手掌抓握或手指伸屈的虚拟抓握任务,在手掌或手指得到触觉刺激后,可以加强对于物体的抓握力的记忆和物体质地的感觉记忆,进一步达到运动感觉的恢复。

3.3. 时空一致性系统

为了避免患者使用 VR 设备时造成画面不同步的问题,导致在 VR 环境内训练获得的技能无法迁移到现实世界表现上,并且还会影响到手眼协调的能力[30]。国防科技大学彭宇行等人[31]提出了“时空状态一致性”的概念以及统一事件处理机制,保证每个节点认为同一个对象在什么时候发生的变化是一致的,对于解决了网络存在延时问题时的时空一致性问题也能很好地防止状态出现矛盾。而该方法存在的不足就是还处于实时性,只是提供了一种理论支持和技术上的参考。

4. 虚拟现实技术的作用机制

4.1. 镜像神经元理论与视觉反馈理论

传统镜像疗法利用视觉反馈刺激对侧运动皮层活动[32] [33]。因此传统的镜像治疗要求病人至少有一个有效的体部可以进行运动,以镜像反射产生视错觉,但 VR 技术能很好地解决这一问题,病人可以通

过虚拟现实的画面看到双臂的躯体。VR 技术通过沉浸式虚拟环境,为脑卒中患者提供更为丰富的视觉与交互体验,有效刺激镜像神经元活动,该机制贯穿康复各阶段,通过促进上肢运动模式重建,引导亚急性期患者将注意力集中于特定任务,激活神经可塑性,为功能恢复奠基;在亚急性期的康复初期可以选择虚拟现实镜像疗法,虚拟现实技术的介入减少了对患者体位的限制,从而提早了康复介入的时期;慢性期患者结合个性化训练,精准改善上肢功能[34] [35]。

4.2. 皮质重组与半球间平衡

脑卒中后患者常出现半球间抑制失衡,表现为健侧半球过度兴奋而患侧半球抑制。脑卒中发生后,两大脑半球间兴奋性平衡被打破,非损伤侧皮质可经胼胝体抑制损伤侧皮质兴奋性,阻碍运动功能的恢复[36]。VR 技术结合神经调控手段(如经颅磁刺激 Trans cranial Magnetic Stimulation, TMS)可以有效调节这种失衡。VR 技术与 TMS 的联合使用对于脑卒中后上肢的康复具有积极的意义,优于单独使用 VR 或 TMS [37] [38],例如,高频 TMS 结合 VR 训练可以增强患侧半球的兴奋性,而低频 TMS 结合 VR 可以抑制健侧半球的过度兴奋,从而恢复半球间的平衡。

VR 结合康复训练可提高患侧大脑半球的皮质激活水平,促进运动功能的恢复[39],并通过重复性和趣味性的任务导向型游戏设计,来增强患者的主动参与度,从而进一步推动皮质重组[40]。

4.3. 运动训练与生理调节

IGF-1 (胰岛素样生长因子-1)是中枢神经系统内源性生长因子之一[41],在脑内合成和释放具有负向凋亡作用、清除氧化应激及消减神经炎症的作用。可在一定程度上减少神经元死亡、调节神经网络修复、重塑神经网络结构,为中枢神经系统疾病寻找新的分子靶点。因此,IGF-1 也被应用于相关疾病的治疗研究中[42]。

研究表明,虚拟现实技术能提升创伤性脑损伤(Traumatic Brain Injury, TBI)患者的血清 IGF-1 水平,显著改善其上肢功能及日常生活活动能力[43]。且除能通过任务训练直接激活运动神经通路外,还可通过上调 IGF-1 而使 OPN/IGF-1/mTOR 等信号通路介导,达到促进受损神经元轴突再生、抗神经元凋亡、促突触可塑性增加的效果,并且此项修复属于长效修复;将 VR 技术应用于提高血清 IGF-1 的水平,在 TBI 患者上肢功能的恢复中有着较好的临床应用价值;并且 IGF-1 的神经保护作用是中枢神经系统损伤的共同特点,虽然目前研究多集中在 TBI 损伤,但是对于脑卒中上肢康复具有重要参考价值。

5. 虚拟现实技术在脑卒中上肢功能训练中的应用

美国心脏协会和美国卒中协会共同发布《成人脑卒中康复指南(2016)》[44],建议使用 VR 技术改善脑卒中患者上肢功能障碍(推荐强度为 IIa 类 B 级),并得到临床研究验证[45]-[47]。然而 2018 年第 18 版《EBRSR 指南》指出,“有 1a 级证据表明,在脑卒中慢性期,虚拟现实技术对上肢运动功能的改善效果有限”[48]。因此当前共识倾向于将 VR 技术与传统康复训练结合,针对不同时期的患者制定特定的康复方案,提高治疗效果[45]。

5.1. 急性期与亚急性期应用

在脑卒中的急性期与亚急性期开展上肢功能早期康复的介入对于促进上肢功能的恢复具有重要意义,此时是神经可塑性的“黄金窗口”,也是功能恢复的关键时机,需要利用各种康复手段充分刺激和挖掘大脑潜在的功能可塑性来最大限度地促进上肢功能的重建[49]。在此阶段应用 VR 技术时,其疗效表现出一定的个体差异性,主要影响因素包括患者的基础功能状态、训练强度、疗程以及认知功能水平等[50]。此外,部分患者可能因视觉疲劳、设备操作复杂等不良反应,对 VR 训练的接受度和依从性产生负面影

响[51]。有研究指出使用低强度,时间较短的VR训练既安全,患者的依从性又较好,如果是基于简单任务设计,则更有利于急性期的上肢功能康复[52]。

进入亚急性期后,VR技术通过沉浸式环境与任务导向训练,可进一步促进大脑功能重组并提高治疗参与度[53][54]。有临床证据显示:通过运用沉浸式虚拟现实游戏、Kinect动作捕捉任务以及多模态生物反馈等方式对患者的上肢运动功能以及日常生活的活动能力进行训练时,会有明显改善;当其接受较多次数(>15次)和长周期(≥4周)VR干预时,其康复效果会得到一定改善[55]。

目前并没有大样本的随机对照试验(randomized controlled trial, RCT)证明脑卒中早期患者是否需要更加重度的VR训练,也没有研究证明沉浸式和非沉浸式的优劣性[56]。但是已经有一些研究表明通过VR模拟某一部位(肩前屈)的运动的康复训练可以在短时间内达到良好的康复效果,可以用于指导临床治疗[57]。

5.2. 慢性期应用

对于慢性期(卒中发病后 >6个月)患者,重点在利用VR促进功能向迁徙、提高日常生活的独立能力和上肢功能等,但由于此阶段的中枢重塑率较低,所以VR的优势还体现在基于任务重复性和认知负荷进行重复和动态变化的训练中[58],既可以通过皮质持续激活并维持其神经可塑性(包括S Saleh等[59]对4名慢性期脑卒中患者利用机器人辅助VR开展的治疗获得了诱发感觉运动皮质的有益变化,进而促进神经可塑性的维持以及避免功能退化),也可以通过使用VR来实现功能迁徙的场景训练来促使功能迁徙至ADL任务中以提高日常生活能力。姜财等[60]还原真实的日常生活场景,采用上肢运动和认知能力同步训练的方式,以此来提升患者的日常生活独立能力,同时辅助其运动康复。结合本文的实验研究分析可知,沉浸式虚拟现实康复系统可起到辅助作用,为脑卒中后偏瘫患者的上肢运动功能、日常生活活动能力提供帮助。

值得注意的是,慢性期VR训练的长期疗效依赖“家庭-医院”的持续性干预,患者可以在家使用虚拟现实技术进行康复锻炼,无需往返医院,方便快捷,经济实惠,利用家庭资源达到和临床治疗差不多的效果。而且虚拟现实系统在家中是安全的、易用的,患者能乐于接受,从而提高患者康复训练的依从性[61]。

虚拟现实技术有助于神经康复与改善老年人生活,而最新研究显示,用VR来进行训练可极大地改善脑卒中偏瘫患者的上肢功能及日常生活能力,并能显著提升患者的康复积极性以及康复治疗的依从性,辅以强制性运动疗法等传统的治疗方法更有利于起到良好的临床效果。而在老人康复过程中使用VR训练也能极大程度上提高老人的精神状态以及日常活动的的能力,建议每天训练一次,一周三次,一共训练6周,总体训练时间要达到1100分钟以上才会有较为有效的训练成果[62][63]。

5.3. VR技术的应用优势

基于VR技术的“3I”特性,即沉浸性(immersion)、交互性(interaction)和构想性(imagination),VR技术在脑卒中后临床康复阶段的应用逐渐扩展,具体表现如下:1)VR系统整合多感官反馈,增强运动感知与任务反馈[53][63];2)VR可依患者康复情况定制个性化训练[49][64];3)VR技术模拟真实场景,助力康复技能迁移[29][65];4)VR沉浸式体验将康复训练游戏化,提升患者训练积极性;5)5G技术设施的完善提供了高带宽、低延迟的网络支持,助力远程康复训练[66][67]有助于构建“家庭-医院”一体化工作模式,改善医疗资源的可及性;6)VR技术在认知功能尚存的老年脑卒中患者中表现出更显著的疗效[31][62][63]。

6. 挑战与未来方向

6.1. 现存不足

当前VR技术用于脑卒中上肢康复仍存在一定困难,包括多技术融合不够成熟、临床研究有待深入

开展和临床推广应用难度较大:

第一, 设备昂贵且难以下沉到基层。沉浸式 VR 系统的采购价格十分昂贵, 大大超出了基层医疗机构的承担范围; 而由于设备的使用、维护都需要相关技术人才的支持, 故无法深入社区、家庭开展使用, 更别提将体验、培训的成本进行转移了[68]。

第二, 技术的多模态同向发展尚不够充分。数据同步、硬件集成方面仍有着一定局限性, 目前, VR 技术并没有完全实现与动作捕捉技术、肌力检测技术以及触觉反馈技术的深度融合, 以 LeapMotion 为代表的动捕设备或以 NOKOV 光学三维动捕系统为代表的产品能够采集到人体运动过程中的细节, 但是在采集的数据存在较大传输延迟且多设备之间存在无法协同工作的缺陷, 尚有数据同步问题[19] [20]。

第三, 临床证据等级与适用范围存在局限。目前关于虚拟现实技术在脑卒中后上肢功能康复中的研究缺乏大样本、多中心的临床研究[34], Cochrane 协作网的系统评价显示, 仅有少数的研究随访时长超过 6 个月, 且因纳入标准不统一, 导致 VR 训练在“精细动作恢复、重度障碍患者干预”等关键场景的证据等级不足, 无法为临床指南制定提供强大的证据支撑[69]。

第四, 还没有标准的疗效评价体系, 目前临床上主要用 Fugl-Meyer 及 Barthel 指数等主观量表来评判功能恢复情况; 尽管可以使用动作捕捉设备得到精确的运动学参数, 但由于缺乏将客观指标转化为标准化的临床量表的系统方法, 故造成了数据的价值较低且难于解释其结果对临床的意义[64]。

6.2. 未来展望

针对以上难题, 今后还要继续在技术创新、研究设计、临床转化等多方面继续努力来促进 VR 康复的发展: 在技术创新上, 可以研制轻量级、低成本的 VR 硬件; 研制基于 3D 打印技术的定制化 VR 设备, 提高其应用于社区、家庭的可能性和可用性; 在研究设计上, 可以开展大样本、多中心、长程随访的高质量 RCT 研究, 明确 VR 对于各期不同类型脑卒中患者均具有较高的适应性和有效机制, 并引入人工智能实现根据患者当前的功能状态生成适宜的个性化康复方案, 并随患者的功能恢复情况进行逐步调整; 在临床转化上, 需要突破多技术融合瓶颈, 搭建包括运动捕捉技术、力反馈技术和生理信号采集与监测等关键技术在内的 VR 康复云平台, 为重度脑卒中患者的临床训练提供更好的沉浸度和依从性, 并且建立统一规范化的疗效评估标准体系, 把 VR 康复从实验性研究推向常规临床实践。

7. 总结

虚拟现实是“3I”的总和, 集成了动作捕捉、触觉反馈等多模态的外设, 基于镜像神经元激活、皮质重组等机制, 在脑卒中的不同病程阶段应用前景十分广阔: 急性期使用低强度的任务提升其神经可塑性; 亚急性期利用高负载强度的任务提高运动功能、增强依从性; 慢性期能够使学习得到的技能迁移到日常生活中来, 实现其对上肢功能康复的影响。缺点就是设备间的协同性差, 跨领域协同整合程度不够高、成本昂贵, 结构复杂, 上述问题可能成为制约 VR 技术进一步推广应用于脑卒中后上肢康复训练的方式之一。而从长远角度来看, 随着技术的发展以及康复医学各学科彼此协作融合得更加紧密, VR 技术将在康复领域发挥更大的作用。

基金项目

国家级大学生创新训练项目(202410443007); 济宁医学院 2024 年度高等教育(本科)成果培育项目(cgy202409); 济宁医学院实验教学和教学实验室建设研究项目(SY2024010)。

参考文献

[1] Li, X., Kong, X., Yang, C., Cheng, Z., Lv, J., Guo, H., *et al.* (2024) Global, Regional, and National Burden of Ischemic

- Stroke, 1990-2021: An Analysis of Data from the Global Burden of Disease Study 2021. *eClinicalMedicine*, **75**, Article ID: 102758. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2024.102758>
- [2] Gagné-Pelletier, L., Poitras, I., Roig, M. and Mercier, C. (2025) Factors Associated with Upper Extremity Use after Stroke: A Scoping Review of Accelerometry Studies. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **22**, Article No. 33. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01568-1>
- [3] 贾杰. “手脑感知-手脑运动”理论在脑卒中后上肢康复中的应用[J]. 康复学报, 2024, 34(4): 311-315, 322.
- [4] Chen, L., Meng, F., Huo, C., Shao, G., Pan, G., Zhang, X., *et al.* (2025) Effects of Tactile Feedback in Post-Stroke Hand Rehabilitation on Functional Connectivity and Cortical Activation: An fNIRS Study. *Biomedical Optics Express*, **16**, 643-656. <https://doi.org/10.1364/boe.541820>
- [5] 程洪, 黄瑞, 邱静, 王艺霖, 邹朝彬, 施柯丞. 康复机器人及其临床应用综述[J]. 机器人, 2021, 43(5): 606-619.
- [6] Ren, H., Liu, T. and Wang, J. (2023) Design and Analysis of an Upper Limb Rehabilitation Robot Based on Multimodal Control. *Sensors*, **23**, Article 8801. <https://doi.org/10.3390/s23218801>
- [7] 赵沁平, 周彬, 李甲, 等. 虚拟现实技术研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 71-75.
- [8] Gigante, M.A. (1993) Virtual Reality: Definitions, History and Applications. In: Earnshaw, R.A., Gigante, M.A. and Jones, H., Eds., *Virtual Reality Systems*, Elsevier, 3-14. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-227748-1.50009-3>
- [9] Stadler, S. (2022) Potential Usages of Virtual Reality in Design Research and Practice—A Review. *Proceedings of 4th International Conference Business Meets Technology 2022*, Ansbach, 7-9 July 2022, 193-207. <https://doi.org/10.4995/bmt2022.2022.15961>
- [10] 喻安琦, 杨力凝, 陈青, 等. 虚拟现实技术在脑卒中领域的研究与发展[J]. 中国卫生标准管理, 2024, 15(7): 130-135.
- [11] 闫旺旺, 孙晨阳, 马宗浩, 等. 融合视听触反馈的任务导向性康复机器人技术展望与临床应用[J]. 中国康复医学杂志, 2025, 40(4): 481-486.
- [12] Shao, X., Zhang, Y., Zhang, D., Men, Y., Wang, Z., Chen, X. and Xie, P. (2024) [Virtual Reality-Brain Computer Interface Hand Function Enhancement Rehabilitation System Incorporating Multi-Sensory Stimulation]. *Journal of Biomedical Engineering*, **41**, 656-663. (In Chinese)
- [13] 夏清玲, 姜彬, 刘代洪, 等. 功能磁共振成像与经颅磁刺激结合调控脑功能网络的应用及展望[J]. 磁共振成像, 2022, 13(8): 117-120, 129.
- [14] 刘莹, 廖彦剑. 机械扰动在脑卒中康复的研究进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2022, 39(6): 1240-1246.
- [15] 管蕾, 罗文佩, 韩佳慧. 多感觉整合范式中潜在的跨通道转换效应[J]. 心理科学进展, 2022, 30(5): 1018-1027.
- [16] 李经纬, 杨皓宇, 胡理等. 节律性听觉刺激下的神经振荡同步化及其应用[J]. 生物化学与生物物理进展, 2023, 50(6): 1371-1380.
- [17] 刘蓓蓓, 丁勤能, 朱武生. 虚拟现实技术在神经系统疾病康复中的应用进展[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2018, 18(3): 222-225.
- [18] 王壮, 王轶钊, 丘世因, 刘源, 石巍, 巫嘉陵, 明东. 脑卒中上肢康复机器人研究进展[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2023, 23(1): 15-21.
- [19] Carballo, M., Barrero, M. and Villazón, A. (2016) FiMAN: Sistema Computarizado Para Análisis de Movimientos Digitales. *Investigacion & Desarrollo*, **16**, 86-101. <https://doi.org/10.23881/idupbo.016.1-7i>
- [20] 李亚杰, 邢政, 褚晓蕾, 等. 重复经颅磁刺激在脑卒中后下肢康复中的应用[J]. 医学新知, 2024, 34(11): 1293-1301.
- [21] 黄沿江, 汪子钦, 张宪民, 等. 人与机器人共存中的位姿估计与碰撞检测[J]. 机器人, 2022, 44(3): 281-290.
- [22] Zheng, Y., Zhang, H., Zheng, G., Hong, Y., Wei, Z. and Sun, P. (2025) Research on Motion Transfer Method from Human Arm to Bionic Robot Arm Based on PSO-RF Algorithm. *Biomimetics*, **10**, Article 392. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10060392>
- [23] 张柏荣, 刘涛, 张明涛, 等. 光学运动捕捉技术在肩关节生物力学中的研究进展[J]. 中国骨伤, 2023, 36(6): 591-596.
- [24] Zhu, G.C., Böttger, K., Slater, H., Cook, C., Farrell, S.F., Hailey, L., *et al.* (2019) Concurrent Validity of a Low-Cost and Time-Efficient Clinical Sensory Test Battery to Evaluate Somatosensory Dysfunction. *European Journal of Pain*, **23**, 1826-1838. <https://doi.org/10.1002/ejp.1456>
- [25] Hoh, J.E. and Semrau, J.A. (2025) The Role of Sensory Impairments on Recovery and Rehabilitation after Stroke. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, **25**, Article No. 22. <https://doi.org/10.1007/s11910-025-01407-9>
- [26] 邹鸿雁, 白定群, 杨力凝, 等. 虚拟现实技术在卒中后上肢康复中的应用现状及可能机制[J]. 中国康复, 2024,

- 39(2): 111-115.
- [27] Reynolds, R.F., Smith, C.P. and Assländer, L. (2025) Effects of Altered Haptic Feedback Gain Upon Balance Are Explained by Sensory Conflict Estimation. *European Journal of Neuroscience*, **61**, e16670. <https://doi.org/10.1111/ejn.16670>
- [28] 黄振明, 邓海茵, 何友泽, 等. 上肢康复机器人在脑卒中后不同时期上肢运动功能康复中的应用研究进展[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2024, 46(8): 751-755.
- [29] Lu, D., Liu, T., Meng, X., Luo, B., Yuan, J., Liu, Y., et al. (2023) Wearable Triboelectric Visual Sensors for Tactile Perception. *Advanced Materials*, **35**, Article ID: 2209117. <https://doi.org/10.1002/adma.202209117>
- [30] Anglin, J.M., Sugiyama, T. and Liew, S.L. (2017) Visuomotor Adaptation in Head-Mounted Virtual Reality versus Conventional Training. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 45469. <https://doi.org/10.1038/srep45469>
- [31] 彭宇行, 张拥军, 李思昆. 分布式虚拟环境的时空一致性研究[J]. 电子学报, 2005(2): 313-316.
- [32] 崔玉荣, 景蓉, 杨莉, 等. 镜像疗法在脑卒中后功能障碍治疗中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2024, 14(1): 15-19.
- [33] Zhang, K., Ding, L., Wang, X., Zhuang, J., Tong, S., Jia, J., et al. (2024) Evidence of Mirror Therapy for Recruitment of Ipsilateral Motor Pathways in Stroke Recovery: A Resting fMRI Study. *Neurotherapeutics*, **21**, e00320. <https://doi.org/10.1016/j.neurot.2024.e00320>
- [34] 张舒扬, 杜心愉, 赵冬临, 等. 虚拟现实技术在周围神经损伤功能恢复中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(21): 4593-4601.
- [35] 边文杰. 虚拟现实技术在脑卒中康复领域的研究进展[J]. 中西医结合护理, 2024, 10(10): 156-162.
- [36] 肖长林, 胡楠, 潘翠环, 等. 重复经颅磁刺激对脑卒中患者上肢运动功能恢复的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2017, 32(12): 1433-1437.
- [37] Zheng, C., Liao, W. and Xia, W. (2015) Effect of Combined Low-Frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation and Virtual Reality Training on Upper Limb Function in Subacute Stroke: A Double-Blind Randomized Controlled Trial. *Journal of Huazhong University of Science and Technology [Medical Sciences]*, **35**, 248-254. <https://doi.org/10.1007/s11596-015-1419-0>
- [38] Yao, X., Cui, L., Wang, J., Feng, W., Bao, Y. and Xie, Q. (2020) Effects of Transcranial Direct Current Stimulation with Virtual Reality on Upper Limb Function in Patients with Ischemic Stroke: A Randomized Controlled Trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **17**, Article No. 73. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00699-x>
- [39] Hao, J., Xie, H., Harp, K., Chen, Z. and Siu, K. (2022) Effects of Virtual Reality Intervention on Neural Plasticity in Stroke Rehabilitation: A Systematic Review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **103**, 523-541. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2021.06.024>
- [40] Cho, S., Kim, W., Paik, N. and Bang, H. (2016) Upper-Limb Function Assessment Using VBBTs for Stroke Patients. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **36**, 70-78. <https://doi.org/10.1109/mcg.2015.2>
- [41] Winstein, C.J., Stein, J., Arena, R., Bates, B., Chorney, L.R., Cramer, S.C., et al. (2016) Guidelines for Adult Stroke Rehabilitation and Recovery: A Guideline for Healthcare Professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*, **47**, e98-e169. <https://doi.org/10.1161/str.0000000000000098>
- [42] 于有, 许芝林. 胰岛素样生长因子-1 对中枢神经系统调控作用的研究进展[J]. 中华围产医学杂志, 2013, 16(11): 701-704.
- [43] Alashram, A.R., Padua, E. and Annino, G. (2022) Virtual Reality for Balance and Mobility Rehabilitation Following Traumatic Brain Injury: A Systematic Review of Randomized Controlled Trials. *Journal of Clinical Neuroscience*, **105**, 115-121. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2022.09.012>
- [44] Teasell, R., Cotoi, A., Chow, J., et al. (2016) Evidence-Based Review of Stroke Rehabilitation (18th Edition). Collaboration of Rehabilitation Research Institute, Parkwood Institute Research, Lawson Health Research Institute, St. Joseph's Health Care.
- [45] 王梦婷, 殷稚飞, 张瑞妮, 等. 虚拟现实技术在脑卒中后平衡功能康复中的作用机制和应用进展[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2024, 46(12): 1127-1130.
- [46] Soleimani, M., Ghazisaeeidi, M. and Heydari, S. (2024) The Efficacy of Virtual Reality for Upper Limb Rehabilitation in Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, **24**, Article No. 135. <https://doi.org/10.1186/s12911-024-02534-y>
- [47] Patel, J., Qiu, Q., Fluet, G.G., Gorin, H., Gutterman, J., Karunakaran, K., et al. (2025) A Randomized Controlled Trial of Timing and Dosage of Upper Extremity Rehabilitation in Virtual Environments in Persons with Subacute Stroke. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 13834. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98618-4>
- [48] Teasell, R., Cotoi, A., Chow, J., et al. (2018) The Stroke Rehabilitation Evidence-Based Review: 18th Edition. Canadian Stroke Network. <https://www.ebrsr.com>

- [49] 刘晓玉, 张超, 谢文广, 等. 脑卒中患者参与虚拟现实技术康复训练体验的 Meta 整合[J]. 中国护理管理, 2024, 24(9): 1399-1405.
- [50] 昌思琴, 黄辰, 戴元富, 蒋长好. VR 训练对轻度认知障碍老年人认知功能的影响及神经机制[J]. 心理科学进展, 2025, 33(2): 322-335.
- [51] 冯洋, 武昊. “人工智能 + 智慧医疗”背景下脑机接口技术对脑卒中康复的应用研究[J]. 中国新通信, 2024, 26(12): 110-112.
- [52] 聂瑶, 张家瑜. 虚拟现实技术对亚急性脑卒中患者上肢功能及活动能力影响的 Meta 分析[J]. 临床医学进展, 2024, 14(11): 1044-1055.
- [53] 蔡丹娴, 曾庆, 何龙龙, 等. 虚拟现实技术在卒中后偏瘫上肢康复中的应用及机制研究[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(32): 5228-5235.
- [54] Donati, D., Pinotti, E., Mantovani, M., Casarotti, S., Fini, A., Tedeschi, R., *et al.* (2025) The Role of Immersive Virtual Reality in Upper Limb Rehabilitation for Subacute Stroke: A Review. *Journal of Clinical Medicine*, **14**, Article 1903. <https://doi.org/10.3390/jcm14061903>
- [55] Fu, W. and Ji, C. (2023) Application and Effect of Virtual Reality Technology in Motor Skill Intervention for Individuals with Developmental Disabilities: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **20**, Article 4619. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054619>
- [56] 梁明, 魏珍, 谢荣, 等. 虚拟现实技术改善脑卒中患者平衡与步行功能的系统评价[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2020, 42(7): 632-639.
- [57] 李辉, 劳方金, 顾旭东, 等. 基于虚拟现实的肩前屈特定角度训练对脑卒中偏瘫患者上肢功能恢复的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2023, 45(2): 134-136.
- [58] Ase, H., Honaga, K., Tani, M., Takakura, T., Wada, F., Murakami, Y., *et al.* (2025) Effects of Home-Based Virtual Reality Upper Extremity Rehabilitation in Persons with Chronic Stroke: A Randomized Controlled Trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **22**, Article No. 20. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01564-5>
- [59] Saleh, S., Bagece, H., Qiu, Q., Fluet, G., Merians, A., Adamovich, S., *et al.* (2011) Mechanisms of Neural Reorganization in Chronic Stroke Subjects after Virtual Reality Training. 2011 *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Boston, 30 August-3 September 2011, 8118-8121. <https://doi.org/10.1109/iembs.2011.6092002>
- [60] 姜财, 黄墩兵, 郭进华, 等. 互动式头针结合沉浸式虚拟现实康复系统对脑卒中偏瘫患者上肢功能的影响[J]. 按摩与康复医学, 2022, 13(9): 1-4.
- [61] Aderinto, N., Olatunji, G., Abdulbasit, M.O., Edun, M., Aboderin, G. and Egbunu, E. (2023) Exploring the Efficacy of Virtual Reality-Based Rehabilitation in Stroke: A Narrative Review of Current Evidence. *Annals of Medicine*, **55**, Article ID: 2285907. <https://doi.org/10.1080/07853890.2023.2285907>
- [62] 许荣梅, 王永胜, 张雁儒. 虚拟现实技术康复训练对老年人肢体运动功能及生活满意度的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2021, 43(10): 921-923.
- [63] 韩晓晓, 柯将琼, 蒋松鹤, 等. 虚拟现实游戏训练对脑卒中患者偏瘫上肢功能恢复的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2016, 38(6): 401-405.
- [64] 萧演清, 白洪铭, 郑佳, 等. 虚拟现实技术在神经运动康复中的应用综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2024, 36(9): 1311-1327.
- [65] 李鑫. 基于 VR 技术的 ADL 康复训练对认知衰弱合并 ADL 障碍老年人的干预效果研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [66] 相强宇, 王华本. “5G + VR”在医疗、教育、电子竞技行业的发展研究[J]. 科技与创新, 2023(6): 54-56.
- [67] 段苏玲, 白江迪, 唐玉峨, 等. 数字经济背景下基于“5G + VR”的高校国际贸易专业教学改革研究[J]. 中国多媒体与网络教学学报(上旬刊), 2024(12): 5-8.
- [68] 江山, 杨光, 王一鸣, 等. 虚拟现实治疗技术对创伤性脑损伤患者上肢功能和血清胰岛素样生长因子-1 的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2019, 41(7): 517-519.
- [69] Saposnik, G. and Levin, M. (2011) Virtual Reality in Stroke Rehabilitation: A Meta-Analysis and Implications for Clinicians. *Stroke*, **42**, 1380-1386. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.110.605451>