

Research Progress of Virtual Reality Technology in Upper Limb Function Rehabilitation of Stroke Patients from the Perspective of "Metaverse"

Min Liu, Shuang Deng, Dongfeng Wan, Yaping Zhu*

School of Health, Shanghai Normal University Tianhua College, Shanghai, China

Email address:

liumin5713039@163.com (Min Liu), 1004414381@qq.com (Shuang Deng), derfulwon@126.com (Dongfeng Wan), 675231326@qq.com (Yaping Zhu)

*Corresponding author

To cite this article:

Min Liu, Shuang Deng, Dongfeng Wan, Yaping Zhu. Research Progress of Virtual Reality Technology in Upper Limb Function Rehabilitation of Stroke Patients from the Perspective of "Metaverse". *Science Discovery*. Vol. 10, No. 3, 2022, pp. 99-104.

doi: 10.11648/j.sd.20221003.11

Received: April 10, 2022; Accepted: May 13, 2022; Published: May 19, 2022

Abstract: As a new scientific and social phenomenon, "Metaverse" is an objective existence that cannot be ignored and must be faced. "Metaverse" is favored by many fields, such as the scientific and technological circles, industry and media circles. The development of "Metaverse" has brought new vitality to the scientific and technological progress of the medical industry. As one of the basic components of the meta universe, virtual reality (VR) technology has played a great role in the field of Virtual reality(VR) is one of the basic components of the "Metaverse", VR technology has played a great role in the medical field, especially in the field of rehabilitation medicine. The recovery of upper limb function of patients with hemiplegia after stroke has always been the focus of attention in the field of rehabilitation and scientific research. VR technology, as a new treatment technology, is more and more widely used in stroke rehabilitation. This paper mainly summarizes the research progress of VR technology in the rehabilitation of upper limb function of stroke patients from the perspective of meta universe. It is found that the application of VR technology can improve the upper limb function of stroke patients. At the same time, it is found that VR technology combined with other technologies can effectively improve the upper limb motor function of post-stroke patients, improve their activities of daily living, and promote the patients return to society.

Keywords: Metaverse, Virtual Reality Technology, Stroke, Upper Motor Function

“元宇宙”视域下虚拟现实技术在脑卒中患者 上肢功能康复中的研究进展

刘敏, 邓爽, 万栋峰, 祝亚平*

上海师范大学天华学院健康学院, 上海

邮箱

liumin5713039@163.com (刘敏), 1004414381@qq.com (邓爽), derfulwon@126.com (万栋峰), 675231326@qq.com (祝亚平)

摘要: 作为一种新的科学现象和社会现象,“元宇宙”已经是一种无法忽视必须面对的客观存在。“元宇宙”受到多个领域的青睐,更是科技界、产业界和媒体界的“宠儿”。元宇宙的发展为医疗行业的科技进步带来了新的生机。虚拟现实技术(virtual reality, VR)作为元宇宙的基本组件之一,在康复医学领域发挥了巨大的作用。脑卒中后偏瘫患者的上肢功能恢复一直是康复和科研领域关注的重点,虚拟现实(virtual reality, VR)技术作为新兴的治疗技术在卒中康复中

的应用越来越广泛。本文主要综述在元宇宙视域下, VR技术对脑卒中患者上肢功能康复的研究进展, 发现应用VR技术可以改善脑卒中后患者的上肢功能, 同时, VR技术联合其他技术可有效提高脑卒中后患者的上肢运动功能, 提高其日常生活活动能力, 促进患者回归社会。

关键词: 元宇宙, 虚拟现实技术, 脑卒中, 上肢功能康复

1. 引言

如果说近来受到科技界、投资界和传媒界追捧的热点是什么? 那么一定是“元宇宙”(Metaverse)了。元宇宙究竟是什么? 目前, 还没有明确统一的界定, 简单地可以理解为元宇宙就是互联网全要素的未来融合形态, 包括互联网、虚拟现实、沉浸式体验、区块链、产业互联网、云计算及数字孪生等, 又被称为“共享虚拟现实互联网”和“全真互联网”[1]。

相关资料[9]显示, 脑卒中是威胁我国国民生命的首要疾病, 平均每12秒就有1人发生脑卒中, 每21秒就有1人死于脑卒中。科学技术的发展促进了医疗技术的进步。医疗领域正在使用一些元宇宙的基本组件, 如虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、混合现实(MR)和人工智能(AI)等支持一些应用程序。

21世纪以来, 虚拟现实(virtual reality, VR)技术在康复领域的应用得到不断发展, 已广泛用于卒中后肢体运动功能障碍、平衡与协调障碍以及认知障碍等方面。其中, 虚拟现实技术(VR)对脑梗后患者上肢运动功能的恢复作用是日前康复学研究的新领域, 国内外很多研究机构已经利用虚拟现实技术在该领域进行实验, 结果显示在改善运动功能方面取得了一定成果[2-4,21]。

2. 概念介绍

2.1. 元宇宙

“元宇宙”的思想源头目前认为是美国数学家和计算机专家弗诺·文奇教授在1981年出版的小说《真名实姓》, 小说中创造性地构思了一个通过脑机接口进入并获得感官体验的虚拟世界[5]。时间来到2021年-元宇宙元年, 关于元宇宙, 大家比较统一的观点是元宇宙是科技创新, 信息技术的综合集成, 是未来的信息技术革命的愿景。不少学者对元宇宙的内涵做出阐述, 比如黄欣荣和曹贤平认为“元宇宙是指人在自然宇宙之外, 通过数字技术建构的一个与自然宇宙相映射但又能为人提供自由创造空间的数字虚拟宇宙, 并通过数字宇宙的探索更加充分地认知和利用自然宇宙”[6]。张夏恒和李想认为“元宇宙是指依托互联网、信息技术、虚拟仿真技术、数字技术等构成的一种沉浸式体验的互联网要素融合形态”[7]。北京师范大学喻国明教授等则认为, “元宇宙是集成与融合现在与未来全部数字技术于一体的终极数字媒介, 它将实现现实世界和虚拟世界的连接, 进而成为超越现实世界的、更高维度的新型世界”[1]。在元宇宙的组件中, 虚拟现实(Virtual Reality, VR)决定了元宇宙的表现形态, 而与VR密切相关的虚拟人(化身)和人机交互(实际上也包括人-人交互)是元宇宙有生命的象征[5]。

2.2. VR技术

20世纪80年代, Jaron提出“虚拟现实”(virtual reality, VR)的观点, VR是指通过计算机系统、感觉反馈装置以及建模技术创建的类似真实世界的虚拟环境, 人体对虚拟的环境或物体进行交互观察与控制的技术。VR有3个基本特征, 即三“I”: 沉浸(immersion)、交互(interaction)和想象(imagination)。使用者在虚拟环境中, 可以与事物或环境本身互动, 与此同时, 计算机可以精确地记录相关数据, 并据此进行调整, 从而实现人机交互, VR技术可以让使用者产生身临其境的感受, 从生理和心理上达到类似于真实世界的体验。

虚拟现实技术在康复领域的应用不断得到发展和完善, 广泛用于卒中后患者认知障碍、上肢运动功能障碍、平衡与协调障碍和步行能力等康复中。2008年卒中康复执行概要循证回顾建议使用VR促进脑卒中后患者运动功能障碍的恢复, 推荐强度为A[8]。

3. VR在脑卒中后患者上肢康复的临床应用

脑卒中后, 常引起各种功能障碍, 尤其是运动功能障碍。上肢的运动功能直接影响患者的日常生活能力和生活质量。85%的脑卒中患者发病后出现上肢运动障碍, 30%~36%的脑卒中患者在发病6月后仍遗留有上肢功能障碍[10]。运动功能障碍的恢复依赖于早期干预, 尤其是具有高强度、针对性、重复性和能够及时提供反馈信息的治疗模式更加有效。脑卒中后上肢功能康复技术有很多, 较为传统的有物理治疗、作业治疗、传统康复治疗等。新兴治疗理念和技术也越来越多应用在脑卒中后上肢功能障碍, 如无创性脑刺激技术、镜像疗法、干细胞技术等。VR技术自21世纪以来得到不断发展和完善, 也被广泛用于卒中后患者认知障碍、肢体运动功能障碍、平衡与协调障碍等康复中。元宇宙大背景下, 虚拟现实(virtual reality, VR)技术显然是最优的选择, 因为, VR技术特点符合康复干预的四项指导原则: 强度、特定任务训练、生物反馈和动机[36]。VR提供了以目标为导向的重复性任务, 这被证明在神经康复中非常重要, 已经有越来越多的证据支持VR技术能有效改善脑卒中后上肢运动功能[11]。

3.1. VR单独应用在脑卒中后上肢功能的研究

上肢关节活动度(ROM)提高可增加患者上肢的灵活性, 增强患者手部精细动作功能, 提高患者功能性活动的的能力。Park[12]等的研究发现, VR可以有效改善肌张力, 同时可以提高肌力、ADL、ROM, 患者的上肢主动关节活动度常在一段时间的VR训练后得到有效提升, 尤其是肩、

肘关节的活动度；而其对腕关节水平以下的促进和诱发作用不明显。Subramanian等[4]将32例脑卒中患者随机分为试验组和对照组，分别给与3D虚拟环境治疗和普通物理环境治疗，4周后试验组肩关节外展和肘关节屈伸的活动度改善更明显。Mouawad等[13]让脑卒中患者通过VR进行网球、高尔夫、拳击、保龄球和棒球的游戏，10天训练后受试者的上肢功能明显提升，上肢主、被动关节活动度均有增加，并且这些改变都可以转换成日常生活能力的提升。

上肢粗大运动的发生需要上肢具有一定的力量和协调性。Schuster-Amft等[14]应用VR集中训练手指、手和手臂的主动运动，结果显示上述部分通过脑卒中影响量表主观测得的力量得到改善。Choi等[15]在移动游戏的基础上结合VR康复系统对脑梗塞后患者进行康复治疗，结果显示Brunnstrom分期评分、FMA-UE以及MMT与对照组相比都有显著的改善。同样，韩晓晓等[16]使用Wii VR游戏对脑中风偏瘫患者进行康复治疗，治疗2周后发现治疗组FMA-UE评分、Brunnstrom分期评分、屈肘时肱二头肌共同收缩率（CR）及伸肘时肱三头肌CR均有显著改善，显示VR可以促进脑卒中患者偏瘫上肢运动功能恢复以及改善肘部屈伸运动协调性方面有疗效。其他相关研究显示，VR能有效地改善上肢运动控制能力并促进上肢的运动协调性[17-19]。

上肢精细运动功能障碍会影响患者自主生活能力，从而影响生活质量。如何恢复上肢精细运动功能也是上肢康复领域的难点之一。Broeren等[20]将运动速度、手部路径当作患者VR训练成效的反映，结果显示，所有患者的平均运动速度和手部路径比都有提高，完成时间缩短，提示VR可改善上肢运动的准确性。Wang等[21]利用VR技术，通过对比帕金森病患者对VR及现实中可视球类抓取的准确性及错漏率，结果表明VR技术对比传统康复手段对帕金森病患者康复有明显优势。Yeh等[22]建立了一个机器人辅助触觉VR系统，来模拟捏抓的动作。通过引入机器人辅助的VR系统来获得运动学和动力学信息。这个研究成功地将VR和机器人辅助触觉整合在一起，模拟精细运动。

“沉浸式参与”是VR的优势所在，也是康复过程中患者能够遵从医嘱，积极配合的主要因素。VR提供的了更加生动、更加有趣、更能提高适应性的环境。使患者能够改善患肢功能提高日常生活活动能力。刘远文等[23]通过对32例脑卒中后手部运动功能障碍患者进行分组，分为虚拟现实机器手训练实验组和手部基础康复训练对照组，研究结果显示实验组治疗后FMA、MBI总分及各亚项评分明显提高。与对照组相比，实验组治疗后FMA总分、手指、腕，MBI进食、穿衣、修饰共6项评分均增高。VR机器手训练可以改善偏瘫患者的手功能以及日常生活活动能力。容小川等[24]应用BioMaster2012虚拟现实康复训练系统对脑卒中偏瘫患者进行治疗，结果显示，治疗组与对照组比较，上肢FAM评分、MBI均高于对照组，虚拟现实康复训练系统能够有助于脑卒中偏瘫患者上肢运动功能的恢复，进而改善其日常生活活动能力。

综上，随着VR技术的不断发展和进步，其在康复领域的作用越来越得到认可，使用范围越来越广泛。2016年美国心脏协会和美国卒中协会共同发布的《成人脑卒中康复指南》中建议VR技术在卒中后上肢功能康复中的应用，推荐强度为II a类、B级证据[25]。

3.2. VR与其他技术联合对脑卒中后上肢功能的应用

脑卒中后上肢功能康复的手段很多，如前所述，使用VR可以改善脑卒中后上肢功能。部分学者已尝试将VR与其他康复治疗技术相结合使用，以期获得更满意的疗效。Merians[2]将VR与机器人融合，通过4个不同的虚拟现实训练模块，将上臂、腕关节和手指运动及机器人技术有机的结合，结果表明，患者提高了近端肢体的稳定性，患者的运动效率及路线平滑度较前改善，偏瘫手功能提高显著。Godfrey等[26]使用手外骨骼康复机器人(HEXORR Robotic)结合VR训练对患者手功能活动度的研究，发现通过2种游戏对手指屈伸动作的练习，掌指、指间关节的ROM均有所增加，ROM的增加对于患者手部精细功能的恢复有较好的作用。Choi[27]等研究发现VR结合镜像治疗可使患者上肢运动功能、运动执行的准确性和速度方面显著优于单纯镜像治疗组和对照组，这可能是因为VR联合镜像治疗给予患者更多的视觉反馈，可以增加对患者的参与性和兴趣，同时还能减少传统镜像训练动作导致的颈部不适[28]。方云[29]将虚拟现实（VR）技术与作业治疗联合应用于脑出血患者上肢功能康复，结果显示两者联合运用可更好地改善患者的手功能和生活能力。rTMS刺激运动皮质（M1）上肢代表区可以诱发或促进上肢功能。Zheng等[30]研究发现患者接受低频rTMS和VR训练联合治疗，能有效提高亚急性脑卒中偏瘫患者的上肢功能、运动能力、生活质量。崔海超等[31]将皮质刺激与VR诱导的重复性运动训练结合应用于脑卒中后患者，结果显示患者上肢的运动功能得到恢复。FARIA等[32]以及胡艳群等[33]研究发现，VR技术联合认知训练干预具有可行性，可提高老年脑卒中患者运动功能及生存质量。基于脑机接口(brain computer interfaces, BCI)与VR技术的康复训练方法似乎更有利于上肢运动功能障碍的患者[34]。计算机中的BCI模块可以依据患者每次训练效果自动调整分类器，训练结束后，BCI模块的分类器进行自适应调整用于下次训练，这样可有效刺激强化运动脑区，加强神经可塑性。Vourvopoulos等[35]运用VR仿真环境与运动想象联合应用在上肢运动训练中，结果表明能够诱发患者潜在的运动学习能力。张桃等[36]开发出了基于BCI和VR技术的上肢和手功能训练系统。但是，目前脑机接口的应用仍处于研究阶段，投入临床应用仍需时日。经颅直流电刺激一种非侵入性、低强度的可以调节大脑皮质神经元活动的技术，研究发现，通过持续低直流电刺激相应大脑皮层，可以调节大脑相应区域的兴奋性和可塑性，促进脑功能重构和调控，改善患者偏瘫肢体运动功能[37-39]。赵飞等[40]对39名患者进行经颅直流电刺激治疗和虚拟现实技术训练，研究发现，4周治疗期后，实验组UL-FMA、MAS、MBI评分以及感觉运动诱发电位均比对照组有所提高，显示经颅直流电刺激联合虚拟现实技术可以有效改善脑梗死后上肢运动功能，提高患者日常生活活动能力。局部振动（focal muscle vibration, FMV）是采用机械振动刺激肌肉和中枢神经系统的技术，早期主要用于体育训练及恢复，改善肌肉痉挛和运动功能。近年来有研究者将其应用于偏瘫康复中，发现可缓解患者的痉挛症状，促进运动功能恢复[41]。刘勇等[42]研究发现FMV联合VR技术能够有效改善脑卒偏瘫患者上肢肌张力和上肢运动功能，提高患者ADL能力。

3.3. VR技术改善脑卒中后上肢运动功能的可能机制

VR技术创建的虚拟环境更多地让使用者在视觉上得到满足和体验,视觉中枢枕叶和与运动中枢的额叶皮质之间存在着丰富的半球内皮质-皮质投射,两者之间可发生协同作用,互相加强,VR技术下的视运动训练可以激活参与动作执行的下游皮质区域,因而,VR技术能够提供视觉反馈辅助神经康复训练。镜像训练也是VR视觉反馈应用。研究发现,镜像训练与运动上肢同侧半球的激活显著增强相关,当镜像视觉反馈与目标定向运动相结合时,该侧半球上顶叶、顶内沟及楔前叶的激活进一步增强,镜像训练与运动上肢同侧半球的激活显著增强相关[43,44]。

另一个可能机制被认为是,VR技术有助于皮质重组对运动功能恢复。脑卒中后,患侧半球对健侧半球的抑制作用减弱,健侧半球对患侧半球的抑制作用加强,两者之间的平衡被破坏。患侧半球除了因为血管因素带来的功能障碍,也受到来自对侧半球的过度抑制。VR技术可以让患者实现更高层次的皮质重组,减少健侧半球激活增加患侧半球的激活显著,这可以改善上肢运动功能的恢复[45]。但蔡丹娴等[46]的研究发现,半球抑制理论存在一定的争议,缺乏更有力的基础、临床研究支持。例如,WANG等[47]研究发现VR训练前后,大脑辅助运动区及小脑均有激活,但训练前后,激活模式没有明显改变。

4. 小结

元宇宙,是数字世界的下一个大事件,它不是单一的一项技术,而是对互联网未来发展趋势的一种设想。在元宇宙世界,真实自我的数字化身将能够进行各种虚拟互动,VR密切相关的虚拟人(化身)和人机交互(实际上也包括人-人交互)是元宇宙有生命的象征。

VR技术通过运用计算机和专业软件生成模拟现实环境,构建视、听、触一体化的虚拟环境,可以让使用者通过虚拟互动和反馈,完成可控的功能性运动和操作,还可以增加任务的趣味性,激发使用者重复和坚持练习的动机。从神经生理学来看,VR康复技术可以促进神经功能重塑,表现为初级感觉和运动皮质的偏侧化指数明显增加,同侧次级感觉和运动皮质与双侧感觉和运动区域之间的功能连接明显增强,同时,使运动前区和辅助运动区的异常活动消失。目前,VR技术在脑卒中患者上肢功能康复中的应用还存在一些不足,如临床案例样本不大,研究证据力度不强;没有标准化VR康复方案,部分医院不具备使用VR技术物理环境;某些患者使用头戴式VR设备出现短暂的头晕、头痛等不良反应

在元宇宙大背景下,VR技术将不断发展,科技和测量工具不断进步,VR技术将来可成为改善脑卒中患者运动功能的一种新型有效的康复手段。未来VR技术应适当增加训练趣味性,结合日常生活功能的训练,甚至可以依据患者功能障碍严重程度、病程时期、患者皮质兴奋程度等做进行详细的分层,更全面地评估VR技术的最佳适应人群。另外,使用VR技术训练的平均强度、频率以及持续时间等有待进一步的探讨和确立。同时,VR技术在四肢运动功能康复中的机制也需要进一步研究探讨。如何在

临床上将虚拟现实技术与其他康复治疗技术相结合,更有效地促进脑卒中患者功能障碍的恢复也值得深入研究。如何简化操作系统、降低VR的使用成本、开发多用户的上肢康复虚拟系统、VR结合远程康复等都需要康复工作者长足的努力。

致谢

本课题基金资助:上海市高校青年骨干教师国内访问学者计划(Z20005.20.006)2021上海市高校教师产学研项目。

参考文献

- [1] 喻国明、耿晓梦:《何以“元宇宙”:媒介化社会的未来生态图景》,《新疆师范大学学报(哲学社会科学版)》2021,43(3):38-45. DOI: 10.14100/j.cnki.65-1039/g4.20211119.002。
- [2] Merians AS, Fluet GG, Qiu Q, et al. Robotically facilitated virtual rehabilitation of arm transport integrated with finger movement in persons with hemiparesis [J]. J Neuroeng Rehabil, 2011, 8 (12): 27-34.
- [3] Laver KE, George S, Thomas S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation [J]. Cochrane Database Syst Rev, 2015, 11 (2): CD008349-54.
- [4] Subramanian SK, Lourenço CB, Chilingaryan G, et al. Arm motor recovery using a virtual reality intervention in chronic stroke: randomized control trial [J]. Neurorehabil Neural Repair, 2013, 27 (1): 13-23.
- [5] 潘志庚.没有虚拟现实就没有元宇宙[J].语言战略研究, 2022, 2 (38): 6-7。
- [6] 黄欣荣, 曹贤平. 元宇宙的技术本质与哲学意义[J]. 新疆师范大学学报:哲学社会科学版, 2022 (3): 1-8。
- [7] 张夏恒, 李想. 国外元宇宙领域研究现状、热点及启示[J]. 产业经济评论, 2022 (1): 1-15。
- [8] Teasell R, Foley N, Salter K, et al. Evidence-Based review of stroke rehabilitation executive summary [M]. 11th ed. London: Ministry of Health and Long-term Care and the Heart and Stroke Foundation of Ontario, 2008: 10-3.
- [9] 陇德, 刘建民, 杨弋等.《中国脑卒中防治报告2018》概要. 中国循环杂志, 2019, 34: 105-119。
- [10] Saposnik G, Teasell R, Marmarash M, et al. Effectiveness of virtual reality using Wii gaming technology in stroke rehabilitation: a pilot randomized clinical trial and proof of principle [J] Stroke, 2010, 41 (7): 1477-1484.
- [11] Veerbeek JM, van Wegen E, van Peppen R, et al. What is the evidence for physical therapy poststroke? A systematic review and meta-analysis. PLoS One, 2014, 9 (2): e87987.
- [12] Park DS, Lee DG, Lee K, et al. Effects of virtual reality training using Xbox kinect on motor function in stroke survivors: a preliminary study. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2017, 26 (10): 2313-2319.

- [13] Mouawad M R, D oust CG, M ax M D, et al. W ii-based movement therapy to promote im proved upper extremity function post-stroke: a pilot study [J]. *J Rehabil Med*, 2011, 43 (6): 527-533.
- [14] Schuster-Amft C, Eng K, Suica Z, et al. Effect of a four-week virtual reality-based training versus conventional therapy on upper limb motor function after stroke: a multicenter parallel group randomized trial. *PLoS One*, 2018, 13 (10): e0204455.
- [15] Choi YH, Ku J, Lim H, et al. Mobile game-based virtual reality rehabilitation program for upper limb dysfunction after ischemic stroke [J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2016, 34 (3): 455-463.
- [16] 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.
- [17] Iosa M, Morone G, Fusco A, et al. Leap motion controlled videogame-based therapy for rehabilitation of elderly patients with subacute stroke: a feasibility pilot study. *Top Stroke Rehabil*, 2015, 22 (4): 306-316.
- [18] Charles D, Holmes D, Charles T, et al. Virtual reality design for stroke rehabilitation. *Adv Exp Med Biol*, 2020, 1235: 53-87.
- [19] Rohrbach N, Chicklis E, Levac D. What is the impact of user affect on motor learning in virtual environments after stroke? A scoping review. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16 (1): 79-92.
- [20] Broeren J, R ydm ark M, Bjorkdahl A, et al. Assessment and training in a 3-dimensional virtual environment with haptics: a report on 5 cases of motor rehabilitation in the chronic stage after stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2007, 21 (2): 180-189.
- [21] Wang C, Hwang W, Fang J, et al. Comparison of virtual reality versus physical reality on movement characteristics of person with parkinson's disease: effect of mowing targets [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2011, 92 (8): 1238-1245.
- [22] Yeh SC, Lee SH, Chan RC, et al. A virtual reality system integrated with robot-assisted haptics to simulate pinch-grip task: Motor ingredients for the assessment in chronic stroke [J]. *NeuroRehabilitation*, 2014, 35 (3): 435-449.
- [23] 刘远文, 潘翠环, 叶正茂, 胡楠, 等. 虚拟现实机器人手对脑卒中患者手运动功能及日常生活活动的效果[J].*中国康复理论与实践*, 2017, 23 (1): 19-22.
- [24] 容小川, 张盘德, 刘翠华等.虚拟现实技术治疗对脑卒中患者上肢功能障碍的疗效[J].*实用医学杂志*, 2015, 31 (11): 1807-1809.
- [25] Winstein CJ, Stein J, Arena R, et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*, 2016, 47 (6): e98-e169.
- [26] Godfrey SB, Schabow sky CN, Holley RJ, et al. Hand function recovery in chronic stroke with HEXORR robotic training: A case series [C]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2010, 4485-4488.
- [27] Choi HS, Shin WS, Bang DH. Mirror therapy using gesture recognition for upper limb function, neck discomfort, and quality of life after chronic stroke: a single-blind randomized controlled trial. *Med Sci Monit*, 2019, 25 (10): 3271-3278.
- [28] Weber LM, Nilsen DM, Gillen G, et al. Immersive virtual reality mirror therapy for upper limb recovery after stroke: a pilot study. *Am J Phys Med Rehabil*, 2019, 98 (9): 783-788.
- [29] 方云, 郭欣.虚拟现实技术与作业治疗对脑出血患者上肢功能康复的影响[J].*护理与康复*, 2020, 12: 180-181.
- [30] Zheng CJ, Liao WJ, Xia WG. 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 trail [J]. *J Huazhong Univ Sci Technolog Med Sci*, 2015, 35 (2): 248-254.
- [31] 崔海超, 翟宏伟, 张明等.虚拟现实技术联合重复经颅磁刺激对脑卒中偏瘫患者上肢运动功能的影响.临床与病理杂志, 2017, 37 (11): 2439-2444.
- [32] FARIA AL, CAMEIRAO MS, COURAS JF, et al. Combined Cognitive-Motor Rehabilitation in Virtual Reality Improves Motor Outcomes in Chronic Stroke - A Pilot Study. *Front Psychol*. 2018; 9: 854.
- [33] 胡艳群, 李斌, 王蛟颜等.短期虚拟现实康复训练联合认知干预对老年脑卒中偏瘫患者运动功能、Lovett肌力分级及生存质量的影响分析[J].*中国医学前沿杂志(电子版)*, 2018, 10 (8): 97-101.
- [34] VOVRVOPOULOS A, JORGE C, ABREU R, et al. Efficacy and Brain Imaging Correlates of an Immersive Motor Imagery BCI-Driven VR System for Upper Limb Motor Rehabilitation: A Clinical Case Report. *Front Hum Neurosci*. 2019; 13: 244.
- [35] Vourvopoulos A, Pardo OM, Lefebvre S, et al. Effects of a brain-computer interface with virtual reality (VR) neurofeedback: a pilot study in chronic stroke patients. *Front Hum Neurosci*, 2019, 13: 210.
- [36] 张桃, 杨帮华, 凯文等.基于运动想象脑机接口的手功能康复系统设计[J].*中国康复理论与实践*, 2017, 23 (1): 4-9.
- [37] Bartur G, Joubran K, Peleg-Shani, et al. SA pilot study on the electrophysiological monitoring of patient' s engagement in post stroke physical rehabilitation [J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2019, 5: 1-9.
- [38] Dickie DA, Kimberley TJ, Pierce D, et al. An exploratory study of predictors of response to vagus nerve stimulation paired with upper-limb rehabilitation after ischemic stroke [J]. *Sci Rep*, 2019, 9 (1): 15902.
- [39] 孙伟铭, 董香丽, 于国华, 等. 经颅直流电刺激改善基底节内囊区梗死患者注意力的疗效观察[J]. *中国脑血管病杂志*, 2016, 13 (10): 505-510.
- [40] 赵飞, 谭杰文, 鲍晓, 等.经颅直流电刺激联合虚拟现实技术对脑梗死后上肢运动功能的影响[J].*海军医学杂志* 2021, 42 (4): 466-470.
- [41] 陈钊德, 龙耀斌, 梁天佳, 等.局部振动对脑卒中后偏瘫患者上肢痉挛和功能障碍的影响[J].*中华物理医学与康复杂志*, 2015, 37 (8): 600-601.

- [42] 刘勇, 谭同才, 沈一吉等. 局部振动联合虚拟现实技术对脑卒中上肢运动功能的疗效观察[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36 (8): 1000-1003。
- [43] GONCALVES MG, PIVA M, MARQUES C, et al. Effects of virtual reality therapy on upper limb function after stroke and the role of neuroimaging as a predictor of a better response. *Arq Neuropsiquiatr*. 2018; 76 (10): 654-662.
- [44] MANUWEERA T, YAROSSE M, ADAMOVICH S, et al. Parietal Activation Associated With Target-Directed Right Hand Movement Is Lateralized by Mirror Feedback to the Ipsilateral Hemisphere. *Front Hum Neurosci*. 2018; 12: 531.
- [45] SALEH S, FLUET G, QIU Q, et al. Neural Patterns of Reorganization after Intensive Robot-Assisted Virtual Reality Therapy and Repetitive Task Practice in Patients with Chronic Stroke. *Front Neurol*. 2017; 8: 452.
- [46] 蔡丹妮, 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]. 中国组织与工程研究, 2020, 24 (32): 5228-5235. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2872。
- [47] WANG ZR, WANG P, XING L, et al. Leap Motion-based virtual reality training for improving motor functional recovery of upper limbs and neural reorganization in subacute stroke patients. *Neural Regen Res*. 2017; 12 (11): 1823-1831.