

· 综述 ·

虚拟现实技术在脑卒中康复中的应用现状

黄倩倩 蒋松鹤 陈晓龙 吴龙强

温州医科大学附属第二医院康复医学科,温州 325027

通信作者:蒋松鹤,Email:863191168@qq.com

【摘要】 脑卒中是临床常见疾病,患者常遗留不同程度功能障碍,不利于患者重返日常生活及社会。虚拟现实技术是一种新兴的治疗方法,有多项研究表明虚拟现实训练不仅能改善脑卒中患者上、下肢运动功能,还能提高患者日常生活活动能力,并且有 fMRI 研究初步阐释了虚拟现实技术的作用机制,对推动虚拟现实技术应用于临床具有重要意义。本文将对虚拟现实技术在脑卒中康复中的应用现状作一简要综述。

【关键词】 脑卒中; 虚拟现实; 康复; 应用现状

基金项目:浙江省医药卫生科研项目(2017PY021);温州市科技计划项目(Y20170350, Y20160105, Y20190042)

Funding: The Medical and Health Research Project of Zhejiang Province of China (2017PY021); Project of Wenzhou Bureau of Science and Technology of China (Y20170350, Y20160105, Y20190042)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2020.04.021

脑卒中具有高发病率、高致残率特点,其发病率在我国呈逐年递增趋势;2017 年调查显示我国脑卒中发病率为 2468/10 万人,目前每年约有 240 万新发脑卒中患者,现存脑卒中患者数量达 1100 多万^[1]。脑卒中患者功能缺损主要包括运动障碍、言语障碍、认知功能障碍及日常生活能力障碍等,严重影响患者生存质量,增加经济及社会负担。传统脑卒中康复治疗手段主要包括神经发育促进技术、运动再学习、生物反馈疗法、强制性使用运动疗法、神经肌肉电刺激、针灸(经穴刺激)疗法等。近年来虚拟现实(virtual reality, VR)技术作为一种新兴治疗手段,广泛应用于各类疾病康复治疗中,关于 VR 在脑卒中康复领域的应用也日益增多,本文主要对 VR 技术在脑卒中康复中的临床应用现状进行简要综述。

VR 技术概述

VR 技术是指利用综合技术形成逼真的三维视、听、触一体化的虚拟环境,通过借助必要设备,使用户以自然的方式与虚拟世界中的物体进行交互,从而产生身临其境般的感受及体验^[2]。VR 具有“3I”特性,即沉浸性(immersion)、交互性(interaction)和构想性(imagination)。VR 主要包括沉浸式 VR 和非沉浸式 VR。沉浸式 VR 通过虚拟头显设备与真实世界隔离,将体验者作为一个完整的生物个人融入到虚拟环境中,体验者只能感知虚拟环境中的情景^[3],从而带来视觉和思维的真实体验感。沉浸式 VR 设备主要有 HTC VIVE 3DVR 智能眼镜、Oculus VR 眼镜等。非沉浸式 VR 则使用普通显示器或立体显示器作为用户观察虚拟境界的一个窗口,体验者可同时感知真实世界和虚拟世界,并非完全沉浸于虚拟环境中^[3],主要有 IDEX 系统、Nintendo Wii Fit Plus、Xbox Kinect 等训练系统。近年来 VR 技术被广泛应用于神经系统疾病的康复治疗中,如脑卒中、脊髓损伤、帕金森综合征等。相对于传统疗法,基于 VR 的康复训练既能改善患者康复环境,使枯燥单调的康复训练变得轻松有趣,还能保障患者康复训练的安全性^[4]。

VR 技术在脑卒中康复中的应用

VR 技术康复训练的环境、内容与真实生活密切相关,在运动康复中具有明显优越性。目前 VR 技术主要应用于脑卒中患者的上肢运动功能康复、平衡训练、步态训练、认知功能训练、日常生活能力训练及功能评定等方面。

一、上肢运动功能康复

脑卒中患者上肢运动功能障碍通常表现为肌力下降、肌张力增高、运动模式异常等,严重影响患者日常生活能力。Schuster-Amft 等^[5]研究表明基于 VR 的上肢运动功能强化训练可改善慢性脑卒中患者上肢运动功能,同时 fMRI 结果提示相应大脑辅助运动功能区被激活。Laver 等^[6]对基于 VR 的脑卒中上肢康复随机对照试验进行系统评价,结果显示 VR 可显著改善脑卒中患者上肢功能,但对上肢力量无明显改善作用。有研究显示在用于脑卒中患者上肢功能康复的虚拟环境中加强运动反馈,更有利于患者上肢功能康复^[7]。钟灿等^[8]采用 Meta 分析软件评价 VR 技术对脑卒中患者上肢功能康复的影响,结果显示 VR 技术可促进脑卒中患者上肢运动功能恢复。VR 康复训练可为患者提供信息反馈,激发患者参与康复训练的动机,提升训练效果。但同时也有多中心大样本随机对照临床试验显示非沉浸式 VR 康复训练(如 Nintendo Wii 游戏系统)相比于传统康复训练,患者上肢运动功能改善并未显示明显优势,而且购买昂贵的 VR 设备增加了经济负担,总体上无显著推广价值^[9]。

二、平衡训练

脑卒中后机体站立及躯干姿势控制能力受损,平衡功能减弱,步行跌倒风险增加,从而影响日常生活,因此帮助患者恢复平衡功能具有重要意义^[10]。最早应用于平衡训练的 VR 设备由一辆固定的自行车及平面显示器组成^[11];随着 VR 技术不断发展进步,IDEX 系统、Nintendo Wii Fit Plus、Xbox Kinect 等新一代 VR 设备逐渐应用于脑卒中平衡功能训练。一项随机对照试

验显示微软 Xbox 虚拟游戏结合传统康复训练可改善慢性卒中中患者平衡功能,疗效可持续 3 个月,但由于患者平衡功能改善幅度尚不足以满足其日常独立生活,因此患者日常生活能力并无显著提高^[12]。Bang 等^[13]将任天堂 Wii 游戏机应用于脑卒中患者平衡功能训练,在训练过程中给予患者视觉反馈,可帮助其及时调整错误的重心位置,显著改善患者平衡功能。有研究显示 VR 游戏可改善脑卒中患者动态平衡能力^[14-15],对静态平衡能力的改善作用不显著^[16]。Lee 等^[17]观察了 VR 训练对脑卒中患者静态平衡及动态平衡功能的影响,将 24 例病程超过 6 个月的脑卒中患者随机分成 VR 训练组及任务导向训练组,VR 训练组干预内容包括 6 项任天堂 Wii 虚拟游戏和 Wii 平衡压力垫训练,任务导向训练组干预内容包括上下楼梯、踢球、平衡垫平衡训练等 6 个项目。经 6 周干预后 2 组患者平衡功能均得到改善,并且 2 组患者静态平衡功能改善情况无明显差异,但 VR 训练组动态平衡方面改善情况明显优于任务导向训练组,表明 VR 训练更有利于脑卒中患者动态平衡功能提高,推测是由于 VR 游戏训练涉及多方向重心转移,能强化患者动态姿势控制能力,因此更有利于动态平衡功能恢复。

三、步行训练

脑卒中患者均有不同程度步行障碍,下肢肌无力、运动控制差及软组织挛缩是导致脑卒中后行走障碍的主要因素。Changho 等^[18]通过观察基于 VR 踝关节运动训练对脑卒中后偏瘫患者步行功能的影响,发现治疗后患者步速、步幅、步长、支撑相及摆动相时间均显著改善,肌张力、动态平衡及步行能力也得到提高。陈佩顺等^[19]将 VR 与活动平板相结合并对脑卒中偏瘫患者进行步行训练,即指导患者在活动平板上步行,同时通过屏幕观看前行移动时 VR 场景(如街道、村庄、河岸、运动场、森林、公园、海景、湖泊、沙漠、城堡等其中一种),场景移动速度与平板速度匹配,使患者产生身临其境的感觉;该研究结果显示患者左、右侧步长差、步速、步行功能分级(functional ambulation classification, FAC)、下肢 Fugl-Meyer 量表(Fugl-Meyer assessment, FMA)评分及改良 Barthel 指数(modified Barthel index, MBI)评分均较治疗前明显改善。In 等^[20]通过一项随机对照试验发现,基于 VR 的康复训练可提高脑卒中患者踝关节力量、控制能力及重心转移能力,从而进一步改善行走功能;有学者将 VR 结合减重步行训练应用于脑卒中患者下肢功能训练,也获得不错康复效果。Mao 等^[21]通过对比观察减重步行训练结合 VR 治疗与传统康复治疗对亚急性期脑卒中患者骨盆控制的影响,发现减重步行训练结合 VR 可显著改善骨盆矢状面倾斜,并能辅助治疗师纠正脑卒中患者异常步态,从而改善步行功能。刘翠华等^[22]将功能性电刺激与 VR 结合对脑卒中后足下垂、足内翻患者进行康复训练,采用 XFT-2001 型低频电子脉冲刺激仪对患侧腓总神经、胫前肌进行电刺激,同时让患者在平板上步行,边行走、边观看前行移动虚拟场景。该研究结果显示功能性电刺激结合 VR 能改善脑卒中患者步行速度,较传统康复疗法更有利于患者下肢功能恢复;并且基于 VR 的步行训练利用 VR 视觉呈现技术为患者提供视觉线索,有利于引导患者迈步行走。

四、认知功能训练

脑卒中后认知功能障碍主要表现为记忆、言语、视空间、执行、计算和理解判断等功能中的一项或多项受损。脑卒中后认

知功能障碍常出现生活及社会适应性障碍,严重影响患者独立功能及日常活动的参与性,降低患者参与康复治疗的积极性,对运动功能恢复及日常生活能力改善具有不利影响。单侧空间忽略(unilateral spatial neglect, USN)是脑损伤尤其是脑卒中后常见行为认知障碍之一。Yasuda 等^[23]收集 10 例病程小于 6 个月且存在 USN 的脑卒中患者并予以沉浸式 VR 训练(Oculus VR 头显),包括近空间忽略训练(患者通过虚拟手将面前桌子上的虚拟物品从右边挪到左边)及远空间忽略训练(患者观察虚拟空间内距其 15 m 处 7 个视觉刺激物,6 s 闪烁 1 次,将其从右边移至左边),通过行为注意障碍测试评估患者 USN 改善情况。该研究结果显示沉浸式 VR 可改善远空间忽略,但不能改善近空间忽略,其作用机制尚不明确。陶林花等^[24]将 40 例脑卒中伴 USN 患者随机分为 VR 训练组及单纯康复组,采用桌面式 VR 生物反馈系统呈现擦桌子、插木头和物品取放等虚拟情景,经训练 8 周后采用“纸笔试验”评定患者空间忽略情况,发现 2 组患者 USN 治疗有效率方面无差异,但 VR 训练组治愈例数明显多于对照组,推测常规康复训练结合 VR 训练能更有效改善脑卒中患者 USN。Faria 等^[25]开展的一项随机对照研究显示,基于 VR 的认知功能训练较常规康复干预更有效,尤其在改善注意力、记忆力及视空间能力方面疗效显著。Gamito 等^[26]采用 VR 系统对脑卒中患者进行认知功能训练(包括购物、找路、衣服颜色挑选等虚拟情景游戏),结果显示 VR 训练能促进脑卒中患者认知功能恢复,尤其是注意力及记忆力改善。王静等^[27]选取首发脑卒中患者 78 例,应用 Kinect 系统对其进行 4 周航行获金币、高尔夫游戏训练,训练后对患者开展行为学评价(behavioral assessment of dysexecutive syndrome, BADS)测试,结果显示虚拟游戏 Kinect 训练可改善脑卒中患者执行功能。Rand 等^[28]对 4 例脑卒中患者进行为期 3 周的虚拟超市购物训练,结果显示虚拟超市购物训练能改善患者日常任务执行能力。

五、日常生活行为训练

目前常规康复疗法强调针对分解动作的训练,以至于患者在康复中心习得的动作能力不能满足日常生活需要。VR 训练时通过模拟现实生活中相关场景,对患者日常生活能力的提高具有明显优势。基于 VR 的康复训练可让患者在虚拟环境中学习诸如进食、打扫卫生、烹饪、购物等日常行为,不仅能保证训练方式一致性,还能降低错误操作导致的危险;同时还能通过感觉刺激和运动训练促进肢体功能恢复,从而提高日常生活能力,加速回归社会。梁明等^[29]研发的虚拟厨房上肢康复系统能模拟厨房真实场景,通过外骨骼臂辅助脑卒中偏瘫(病程 1~6 个月)患者完成肩、肘关节基本运动,于训练前、训练后 3 周时采用改良 Barthel 指数(modified Barthel index, MBI)评定患者日常生活活动(activities of daily living, ADL)能力,结果显示虚拟厨房上肢康复训练结合常规作业治疗能显著改善脑卒中偏瘫患者上肢运动功能及 ADL 能力。另外该课题组还发现虚拟厨房上肢康复训练可改善不同病损性质脑卒中(如脑出血、脑梗死)患者偏瘫上肢运动功能及 ADL 能力^[30]。

六、功能评定

近年来 VR 作为一种新的人机交互技术被广泛应用于功能测试。目前临床上评定 USN 的方法主要为纸笔试验,便于使用和计分,并能直观显示 USN 特征性表现;但纸笔试验只是评定

近距离空间的视觉或视觉-运动忽略,不能反映患者日常生活中远距离空间忽略情况^[31]。近年来有学者应用 VR 技术对 USN 患者进行功能评定,如 Buxbaum 等^[32]对 70 例右侧脑卒中患者(平均病程为 29 个月)进行 VR 偏侧注意测试,嘱患者在虚拟道路上操控轮椅,要求不碰触路边物体,并命名这些虚拟物件,结果显示入选患者对右侧物件的命名数量明显多于左侧。研究者认为虚拟轮椅操控较实物轮椅操控更可行、更安全,对轻度偏侧忽略患者的诊出率而言,基于 VR 的偏侧忽略测试较“纸笔”测试更有效、更敏感,适用于临床及科研。Luque-Moreno 等^[33]采用 VR 康复训练系统评估脑卒中患者下肢运动功能,该系统由液晶显示投影仪、电脑和 3D 运动捕捉系统等组成,评定时要求患侧下肢按指定轨迹进行运动,系统通过运动捕捉及电脑分析得出下肢运动空间误差、运动速度及其运动量等参数,该研究参与者均认为 VR 康复系统是一种实用且安全的脑卒中患者下肢功能评估手段。

VR 技术作用机制研究

脑卒中后如患肢处于长期废用状态会导致相应大脑皮质区域受到抑制进而影响患肢功能及预后。有研究指出 VR 技术的作用机制可能与促神经功能重塑有关^[34]。任务导向性训练能诱导脑卒中患者中枢神经系统重塑^[35];有研究发现作为任务导向性训练技术之一的 VR 康复训练可激活受损大脑皮质运动区^[36]及双侧前额叶皮质,并建立前额叶皮质与各运动皮质间的神经连接以促进运动功能恢复^[37]。Xiao 等^[38]研究探讨了 VR 平板训练对亚急性期脑卒中患者神经功能重组的影响,该研究显示训练后患者大脑皮质相应区域激活增加,而患者步行功能提高与初级感觉运动区(sensorimotor cortex, SMC)激活增强有关,故研究者提出皮质网络可能是中枢可塑性的一个位点,脑皮质网络重组可能是 VR 训练促进脑卒中患者步行功能恢复的重要机制。Calabro 等^[39]通过脑电信号源定位研究 VR 康复训练提高脑卒中患者运动功能的神经生理学机制,该研究提出 VR 康复训练可能通过调节包括镜像神经元系统在内的运动规划与学习脑区来改善运动功能。在 VR 环境下进行购物、厨艺、起居等 ADL 训练能保障患者康复训练安全性,减少在真实环境中由于错误操作导致的危险;同时 VR 营造的 ADL 训练场景与现实环境高度一致,患者在虚拟环境中获得的运动技能可以较好地应用于现实环境中。观察、学习、模仿、想象及视觉反馈是 VR 疗法的核心机制,当个体进行动作模仿学习和想象时发现其镜像神经元系统在内的一些脑区兴奋性增高^[40],故推测镜像神经元系统在其中发挥重要作用。

结语

作为近年来发展起来的一项新兴疗法,VR 技术在康复治疗领域开展了大量临床应用研究,采用 VR 疗法治疗脑卒中患者痛苦小,兴趣及依从性高,操作简便,所需人力少且可用于远程康复治疗。VR 疗法在改善脑卒中患者上、下肢运动功能、平衡能力、步行能力等方面具有显著疗效,但相关研究还处于初级阶段,其作用机制、推荐训练频率、强度、时间以及长期疗效等均需进一步探讨。目前 VR 疗法仍存在诸多不足,包括:① VR 技术本身尚未发展成熟,需相关计算机软件及硬件技术持

续支持;②高端 VR 外围设备昂贵,难以普及;③国内对 VR 技术不熟悉,且缺乏相关技术人才等。近年来 VR 技术与各种新技术[如脑机接口(brain-computer interface, BCI)技术^[8]、康复机器人技术^[41]及远程康复(telerehabilitation, TR)技术^[42]等]相结合并相互促进,其应用前景广阔。目前应用于临床的 VR 基本为非沉浸式 VR,沉浸式 VR 在康复领域中的应用不多,随着技术完善,将上述两种 VR 技术应用到康复医学领域可有效解决传统康复训练方法的局限性,并推动康复治疗技术日趋完善。

参考文献

- [1] 孙海欣,王文志.中国脑卒中患病率、发病率和死亡率调查结果发表[J].中华神经科杂志,2017,50(5):337. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-7876.2017.05.005.
- [2] 徐丽丽,吴毅.虚拟现实技术在脑卒中患者手功能康复中的应用[J].中华物理医学与康复杂志,2007,29(2):136-138. DOI: 10.3760/j.issn.0254-1424.2007.02.020.
- [3] Perez-Marcos D, Chevalley O, Schmidlin T, et al. Increasing upper limb training intensity in chronic stroke using embodied virtual reality: a pilot study[J]. J Neuroeng Rehabil, 2017, 14(1): 119. DOI: 10.1186/s12984-017-0328-9.
- [4] 韩晔,刘敏,周盛年,等.计算机辅助认知康复训练治疗脑梗死后执行功能障碍的疗效观察[J].中华物理医学与康复杂志,2018,40(7):544-546. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2018.07.020.
- [5] Schuster-Amft C, Henneke A, Hartog-Keisker B, et al. Intensive virtual reality-based training for upper limb motor function in chronic stroke: a feasibility study using a single case experimental design and fMRI[J]. Disabil Rehabil Assist Technol, 2015, 10(5): 385-392. DOI: 10.3109/17483107.2014.908963.
- [6] Laver KE, Lange B, George S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation[J]. Cochrane Database Syst Rev, 2017, 20(11): 11. DOI: 10.1002/14651858.CD008349.pub4.
- [7] Kiper P, Agostini M, Luque-Moreno C, et al. Reinforced feedback in virtual environment for rehabilitation of upper extremity dysfunction after stroke: preliminary data from a randomized controlled trial[J]. Biomed Res Int, 2014, 2014(8): 752-128. DOI: 10.1155/2014/752128.
- [8] 张桃,杨帮华,段凯文,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. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2017.01.002.
- [9] Saposnik G, Cohen LG, Mamdani M, et al. Efficacy and safety of non-immersive virtual reality exercising in stroke rehabilitation (EVREST): a randomised, multicentre, single-blind, controlled trial[J]. Lancet Neurol, 2016, 15(10): 1019-1027. DOI: 10.1016/S1474-4422(16)30121-1.
- [10] Weerdesteyn V, Niet M, Duijnhoven HJ, et al. Falls in individuals with stroke[J]. J Rehabil Res Dev, 2008, 45(8): 1195-1213. DOI: 10.1682/JRRD.2007.09.0145.
- [11] Kim NG, Yoo CK, Im JJ. A new rehabilitation training system for postural balance control using virtual reality technology[J]. IEEE Trans Rehabil Eng, 1999, 7(4): 482-485. DOI: 10.1109/86.808952.
- [12] Lee HC, Huang CL, Ho SH, et al. The effect of a virtual reality game intervention on balance for patients with stroke: a randomized controlled trial[J]. Games Health J, 2017, 6(5): 303-311. DOI: 10.1089/g4h.2016.0109.

- [13] Bang YS, Son KH, Kim HJ. Effects of virtual reality training using Nintendo Wii and treadmill walking exercise on balance and walking for stroke patients[J]. *J Phys Ther Sci*, 2016, 28(11): 3112-3115. DOI: 10.1589/jpts.28.3112.
- [14] Cho KH, Lee KJ, Song CH. Virtual-reality balance training with a video-game system improves dynamic balance in chronic stroke patients[J]. *Tohoku J Exp Med*, 2012, 228(1): 69-74. DOI: 10.1620/tjem.228.69.
- [15] Lloréns R, Gil-Gómez JA, Alcañiz M, et al. Improvement in balance using a virtual reality-based stepping exercise: a randomized controlled trial involving individuals with chronic stroke[J]. *Clin Rehabil*, 2015, 29(3): 261-268. DOI: 10.1177/0269215514543333.
- [16] Kim JH, Jang SH, Kim CS, et al. Use of virtual reality to enhance balance and ambulation in chronic stroke: a double-blind, randomized controlled study[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2009, 88(9): 693-701. DOI: 10.1097/PHM.0b013e3181b33350.
- [17] Lee HY, Kim YL, Lee SM. Effects of virtual reality-based training and task-oriented training on balance performance in stroke patients[J]. *J Phys Ther Sci*, 2015, 27(6): 1883-1888. DOI: 10.1589/jpts.27.1883.
- [18] Yom C, Cho HY, Lee B. Effects of virtual reality-based ankle exercise on the dynamic balance, muscle tone, and gait of stroke patients[J]. *J Phys Ther Sci*, 2015, 27(3): 845-849. DOI: 10.1589/jpts.27.845.
- [19] 陈佩顺, 黄臻, 李豪, 等. 虚拟现实技术结合活动平板训练对脑卒中患者步行功能的影响[J]. *神经损伤与功能重建*, 2015, 10(4): 360-361. DOI: 10.3870/sjsscj.2015.04.031.
- [20] In T, Lee K, Song C. Virtual reality reflection therapy improves balance and gait in patients with chronic stroke: randomized controlled trials[J]. *Med Sci Monit*, 2016, 22: 4046-4053. DOI: 10.12659/msm.898157.
- [21] Mao Y, Chen P, Li L, et al. Changes of pelvis control with subacute stroke: A comparison of body-weight- support treadmill training coupled virtual reality system and over-ground training[J]. *Technol Health Care*, 2015, 23(S2): 355-364. DOI: 10.3233/THC-150972.
- [22] 刘翠华, 张盘德, 容小川, 等. 功能性电刺激同步虚拟现实技术对脑卒中患者下肢运动功能障碍的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2014, 29(8): 736-739. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2014.08.009.
- [23] Yasuda K, Muroi D, Ohira M, et al. Validation of an immersive virtual reality system for training near and far space neglect in individuals with stroke: a pilot study[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2017, 24(7): 1-6. DOI: 10.1080/10749357.2017.1351069.
- [24] 陶林花, 金敏敏, 傅建明, 等. 虚拟现实技术治疗脑卒中单侧空间忽略的疗效观察[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2015, 37(1): 61-63. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2015.01.016.
- [25] Faria AL, Andrade A, Soares L, et al. Benefits of virtual reality based cognitive rehabilitation through simulated activities of daily living: a randomized controlled trial with stroke patients[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2016, 13(1): 96. DOI: 10.1186/s12984-016-0204-z.
- [26] Gamito P, Oliveira J, Coelho C, et al. Cognitive training on stroke patients via virtual reality-based serious games[J]. *Disabil Rehabil*, 2017, 39(4): 385-388. DOI: 10.3109/09638288.2014.934925.
- [27] 王静, 马景全, 陈长香, 等. 体感游戏 Kinect 改善脑卒中患者执行功能的效果研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2014, 29(8): 748-751. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2014.08.012.
- [28] Rand D, Weiss PL, Katz N. Training multitasking in a virtual supermarket: a novel intervention after stroke[J]. *Am J Occup Ther*, 2009, 63(5): 535-542. DOI: 10.5014/ajot.63.5.535.
- [29] 梁明, 窦祖林, 王清辉, 等. 虚拟现实技术在脑卒中患者偏瘫上肢功能康复中的应用[J]. *中国康复医学杂志*, 2013, 28(2): 114-118. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2013.02.004.
- [30] 梁明, 窦祖林, 王清辉, 等. 虚拟现实技术对不同类型脑卒中患者偏瘫上肢功能的影响[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2014, 36(8): 592-595. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2014.08.005.
- [31] Ogourtsova T, Souza Silva W, Archambault PS, et al. Virtual reality treatment and assessments for post-stroke unilateral spatial neglect: A systematic literature review[J]. *Neuropsychol Rehabil*, 2017, 27(3): 409-454. DOI: 10.1080/09602011.2015.1113187.
- [32] Buxbaum LJ, Dawson AM, Linsley D. Reliability and validity of the virtual reality lateralized attention test in assessing hemispatial neglect in right-hemisphere stroke[J]. *Neuropsychology*, 2012, 26(4): 430-441. DOI: 10.1037/a0028674.
- [33] Luque-Moreno C, Oliva-Pascual-Vaca A, Kiper P, et al. Virtual reality to assess and treat lower extremity disorders in post-stroke patients[J]. *Methods Inf Med*, 2016, 55(1): 89-92. DOI: 10.3414/ME14-02-0020.
- [34] Laver KE, Lange B, George S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation[M]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2017, 20(11): 11. DOI: 10.1002/14651858.CD008349.pub4.
- [35] Johansson BB. Current trends in stroke rehabilitation: a review with focus on brain plasticity[J]. *Acta Neurol Scand*, 2011, 123(3): 147-159. DOI: 10.1111/j.1600-0404.2010.01417.x.
- [36] You SH, Jang SH, Kim YH, et al. Virtual reality-induced cortical reorganization and associated locomotor recovery in chronic stroke: an experimenter-blind randomized study[J]. *Stroke*, 2005, 36(6): 1166-1171. DOI: 10.1161/01.STR.0000162715.43417.91.
- [37] 林玲, 江利, 肖湘, 等. 虚拟现实结合减重平板训练对脑卒中患者步行功能恢复的作用和机制: 纵向功能磁共振研究[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2014, 20(4): 313-317. DOI: 10.19627/j.cnki.cn31-1700/th.2014.04.003.
- [38] Xiao X, Lin Q, Lo WL, et al. Cerebral reorganization in subacute stroke survivors after virtual reality-based training: a preliminary study[J]. *Behav Neurol*, 2017, 2017: 6261479. DOI: 10.1155/2017/6261479.
- [39] Calabrò RS, Naro A, Russo M, et al. The role of virtual reality in improving motor performance as revealed by EEG: a randomized clinical trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14(1): 53. DOI: 10.1186/s12984-017-0268-4.
- [40] 王金超, 雷毅, 喻洪流, 等. 一种新型智能交互式上肢康复机器人研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2016, 31(12): 1371-1374. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2016.12.016.
- [41] Standen PJ, Threapleton K, Connell L, et al. Patients' use of a home-based virtual reality system to provide rehabilitation of the upper limb following stroke[J]. *Phys Ther*, 2015, 95(3): 350-359. DOI: 10.2522/ptj.20130564.
- [42] Buccino G, Vogt S, Ritzl A, et al. Neural circuits underlying imitation learning of hand actions: an event-related fMRI study[J]. *Neuron*, 2004, 42(2): 323-334. DOI: 10.1016/s0896-6273(04)00181-3.

(修回日期: 2020-03-21)

(本文编辑: 易 浩)