

虚拟现实技术在神经系统疾病功能康复中的应用现状

张松¹ 袁媛¹ 徐义君² 陈宏梅³ 黄新磊⁴ 梁景岩⁵ 王英歌⁶

¹江苏省扬州大学护理学院,扬州 225000; ²扬州大学医学院临床医学系,扬州 225000; ³江苏省苏北人民医院神经内科,扬州 225000; ⁴扬州大学医学院基础医学系,扬州 225000; ⁵扬州大学转化医学研究院,扬州 225000; ⁶扬州大学附属医院神经内科,扬州 225000

通信作者:王英歌,Email: 23613774@qq.com

【摘要】 虚拟现实技术是一种通过计算机进行场景模拟的新兴技术,近年来逐步运用于神经系统功能康复领域并取得了显著疗效。本文主要介绍虚拟现实技术在帕金森病、脑卒中、多发性硬化、脑瘫和创伤性脑损伤中的研究进展,并就虚拟现实康复目前的优势、局限性及研究发展方向进行综述。

【关键词】 虚拟现实; 神经系统疾病; 功能障碍; 康复; 运动学习策略

基金项目:国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2016YFE0126000);扬州大学附属医院新技术省级项目(2019-03)

Funding: National Key Research Program of China(2016YFE0126000); New Technology Provincial Project of Affiliated Hospital of Yangzhou University (2019-03)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.03.021

虚拟现实(virtual reality)作为一种现行的新技术,因其具备多感官刺激、实时信息反馈、计划性重复训练和场景模拟等特性,目前被逐步运用于包括帕金森病、脑卒中、多发性硬化、创伤性脑损伤等神经系统疾病的康复治疗中。虚拟现实康复不仅可以播放训练视频帮助患者进行运动学习,还可以结合传统康复训练治疗(如高强度耐力训练、跨越障碍训练、双重任务训练等),协同提高疗效^[1-3];其引导患者运用多感官和认知功能,提高注意力,实时接收多感官信息反馈并及时做出计划性行为来完成训练,通过目的性重复训练来达到治疗效果^[4-5]。本文就目前虚拟现实在神经系统疾病功能康复的研究进展进行简要综述。

虚拟现实康复的临床应用现状

一、在帕金森病康复中的应用现状

相关研究发现^[4,6-7],帕金森病所导致的平衡失调与步态障碍与非多巴胺损伤有关,更多的是单纯认知作用的结果,通过认知刺激,可以绕过受损的基底神经节,达到运动康复治疗的效果。由于多巴胺药物治疗对于平衡失调效果有限且鉴于其用药预后较差,物理康复成为较为有效的非药物治疗选择^[5]。

平衡失调是帕金森病较为常见的症状之一,主要分为静态平衡、动态平衡、反应性平衡和预期性平衡四部分^[8]。目前传统康复通过让患者重复训练日常行为来提高维持平衡的能力,但局限性在于无法帮助患者训练失衡后重建平衡的能力^[9]。Jane 等^[10]团队研究发现,患者双侧步幅不对称是平衡失调的重要因素,患者患侧肢体步幅显著低于健侧肢体,该研究团队运用虚拟现实结合步态对称性训练,将患者本体感知信号与视觉信号分离,逐步缩小患者双侧肢体步幅差距,校准其步态模式,起到了较好的疗效。

冻结步态是帕金森病晚期的核心症状,尽管其病理生理机制尚不明确^[11],但已有研究^[2,12-13]表明通过虚拟现实康复能改

善患者平衡和执行能力。然而 Bekkers 等^[4]团队研究发现,冻结步态患者经过虚拟现实康复,在平衡、移动能力上的改善效果与无冻结步态患者相似,但冻结步态患者跌倒率在康复后降低更加明显,此外后期 6 个月的随访发现患者普遍病情加重。

二、在脑卒中康复中的应用现状

脑卒中中最常见的症状是肢体偏瘫,其康复难点主要见于患者大脑抑制使用偏瘫受累肢体,该现象被称为习得性不用,严重影响患者的生活质量。相关研究表明,虚拟现实康复技术的新型转化干预模式对卒中中偏瘫患者上肢功能康复(尤其是肢体精细控制方面)效果显著^[14-15]。目前,较为有效的康复方案是在虚拟现实给患者下达目标导向的手臂运动任务,并提供不与现实世界运动量对等的视觉反馈,通过“欺骗”患者的感知来消除患者在使用受累肢体时表现出对成功和失败的敏感性,并逐步提高虚拟与现实间的重合度来达到康复效果^[16-17]。

目前基于虚拟现实的脑卒中患者上肢康复的研究中,大量研究致力于慢性阶段,很少有研究纳入急性期和亚急性期患者^[18]。Brunner 等^[19]的一项对 120 例脑卒中急性期患者五中心随机对照试验发现,虚拟现实康复相较于传统康复没有体现出优越性,患者功能改善程度相似。该团队和 Perez-Marcos 团队^[16]推测,该现象可能为试验中干预方式改善功效相较于自发性生物恢复差异不明显,难以区分,并指出基于运动学和损伤程度的评估工具能有助于区分不同恢复和补偿机制产生的影响,特别是动作捕捉技术,可以更客观地量化运动恢复指标的变化。

三、在多发性硬化康复中的应用现状

多发性硬化是一种慢性自身免疫性中枢神经系统疾病,会引发广泛性的功能障碍^[20]。相关文献表明,认知和运动结合训练对多发性硬化患者康复效果明显,但目前大部分研究的干预设计主要针对运动训练^[21]。在多发性硬化患者中,认知和行走能力关联极大,患者在运动过程中所涉及的注意力、信息处理

和执行能力是康复中应当加强训练的项目。Maria 团队研究发现,接受虚拟现实康复的多发性硬化患者在空间记忆、感知、执行、信息处理、注意力及运动功能较传统康复明显增强^[22]。相关文献表明,虚拟现实康复高强度、重复性和任务导向的特性,更好地增强突触可塑性,将虚拟现实场景的视觉-运动信息嵌入镜像神经元系统,刺激回忆起存储的运动计划,以此增强患者的运动和认知功能^[23-26]。Eftekharsadat 等^[27]团队对多发性硬化患者进行一项试验,研究虚拟现实场景转换能否训练患者的平衡能力,结果发现干预组的平衡协调能力改善显著,且多发性硬化患者即使 Romberg 测试结果正常,仍会出现平衡障碍。

四、在脑瘫康复中的应用现状

脑性瘫痪常见于幼儿期神经发育障碍,患儿主要表现为平衡失调和双侧不对称性偏瘫,对其日后生活影响深远。研究表明^[26-28],虚拟现实康复较之传统康复提高了患儿患侧肢体的力量和运用度,有效减少健侧代偿,进而增强姿势控制和平衡能力。Shum 等^[29]引入错误增强这样一种反馈技术,根据恢复目标,在虚拟现实感官反馈中强调患儿康复运动过程中的错误来引出补偿性或纠正性反应,以调整双侧不对称。然而一项横断面调查显示脑瘫患儿在虚拟和自然环境间学习转移较弱,患儿在抽象任务中的表现不如真实任务的准确,这在具体操作时需要注意^[30]。因此,在今后的康复过程中应当更加关注患儿的具体表现,提高康复动作标准率,增强康复效果。

五、在创伤性脑损伤康复中的应用现状

创伤性脑损伤常引发广泛性损伤,继发的缺氧及颅内高压常累及额叶、颞叶功能障碍导致认知损伤^[31]。Grealy 等^[32]研究发现,创伤性脑损伤患者通过虚拟现实康复可在视听觉学习和数字符号测试方面获得显著改善,然而在复杂数字和逻辑记忆测试中恢复不明显,原因可能是虚拟现实康复增强了海马体功能,表现为学习能力提升,但不改善记忆或信息组织能力。Alashram 等^[33]通过系统评价回顾整合发现,对于创伤性脑损伤患者运用各种虚拟现实设备以 10~12 次干预,每周 2~4 次,每次持续 20~40 min,康复效果最好,但仍有待今后的研究来验证。

虚拟现实康复的优势、局限性及发展方向

随着技术发展,虚拟现实在康复领域的运用不断增加和多样化,其既有自身的固有优势,也因技术壁垒在发展上面临着风险和挑战。长远来看,今后的发展势必需要统一的共识标准来规范化干预策略。

一、虚拟现实康复的优势

主要表现为以下几点^[6,8,34-36]:①虚拟现实可以模拟夜晚、雨天、障碍等传统康复较难建立的干扰性场景,并降低操作危险性;②虚拟现实基于机械辅助和人为控制,可以创建个性化培训项目,并减轻人力资源需求;③虚拟现实通过沉浸式体验,创造贴近自然训练的感受,趣味性更高,缓解其跌倒恐惧;④虚拟现实康复相较于传统康复耗资更少,可以支持更多不同收入阶层的人群进行康复。

二、虚拟现实康复的局限性

1. 康复软件缺乏:近年来许多研究^[5,35]将商业视频游戏 (commercial off-the-shelf video gaming systems, COTs) 运用于虚拟现实康复,取得了一定的效果。尽管 COTs 在功能康复上有

效,但 COTs 本身是为功能健全人群而设计,在功能评估上具有一定操作空间,但用于功能康复缺少一定的适用性和针对性^[8];如许多 COTs 不支持场景调整功能,无疑会影响患者的康复效果。此外,由于游戏具有激励性机制,患者可能会出现更加关注游戏分数的情况,从而降低康复训练质量。随着研究深入,专业虚拟现实康复软件的开发,COTs 势必会逐渐减少并被专业康复软件所替代,而这又进一步突显虚拟现实在康复治疗领域的优势,随着今后普及,虚拟现实技术将成为康复领域的一大助力。

2. 模拟器综合征:目前临床试验中常用的虚拟现实设备主要分为非沉浸式、半沉浸式和完全沉浸式三类^[37],前两者通过大屏幕投影来反馈视觉,后者通过头戴式显示器进行互动训练。虚拟现实会导致患者出现晕眩、方向感丧失、步态模式异常、知觉和体感偏差等不良反应,称之为模拟器综合征,且沉浸式设备更易出现模拟器综合征^[38]。Jane 等^[39]研究显示,经过沉浸式虚拟现实康复后的受试者步幅、步频和步态多样性均出现增加趋势,且无论是患者还是健康人群,其步态参数均出现显著改变。相关临床试验^[6,38]表明,模拟器综合征与患者年龄或病情严重程度无关,而高帧率的康复视频软件能有效降低患者出现症状的概率和严重程度,一般达到 60 帧/s 可有明显改善;既往研究由于多为 20~40 帧/s,易出现患者运动和视频画面间的延迟,进而诱发模拟器综合征。

尽管目前许多研究都表明未发现不良反应^[40-43],且部分文献显示沉浸式设备康复疗效更佳^[44-45],原因可能是虚拟现实在康复领域研究历程较短,大部分研究仍然处在针对阳性结果的检测中,未专门设计检测模拟器综合征、认知负荷过重等不良反应,致使其相关研究缺失。而目前试验的周期都较短,虚拟现实康复势必将是一个长期干预的过程,因此,亟待今后更多长期试验的大样本研究来探索其疗效及不良反应。

三、发展方向

尽管虚拟现实已逐步运用于康复治疗中,但目前仍缺乏统一的共识标准,试验所使用的治疗方式、康复软件、训练标准、不同病情分期的适应模式等各有不同,这也就造成了不同研究团队的治疗结论缺乏同一性^[8,23]。

因此,有学者^[10,46]在虚拟现实康复中引进运动学习策略 (motor learning strategies, MLS) 这样一个前沿康复理念。既往有研究^[47]将 MLS 定义为可观察的治疗行动,治疗师考虑任务和患者特定的因素来选择和应用以证据为基础的实践和反馈变量的最佳运动学习。有学者建立了一份 MLS 评分工具用于校准 MLS 在虚拟现实康复中的应用,但 MLS 仍然发展缓慢。RYAN 等^[48]认为,主要受制于 2 大因素:①治疗人员在临床实际操作中免不了出现依赖自身知识经验做出不符合 MLS 评分工具的原则决策;②大部分决策仍根据已有标准和指南进行,少有突破指南针对病情进行 MLS 的决策讨论。

通过运用高质量的标准化评估,可以有效地让患者和康复提供者在纵向信息沟通上获益^[49]。随着虚拟现实康复在应用和方法上的突破,指南共识也亟待建立和完善以促进虚拟现实技术在康复领域的应用研究。

总结和展望

尽管近年来虚拟现实康复的研究步伐从未停滞,且逐渐从

帕金森病、脑卒中、多发性硬化等研究较多的疾病转向到创伤性脑损伤、脑性瘫痪、脊髓损伤等疾病,但由于仍在摸索阶段,诸多研究团队更注重将不同虚拟现实设备运用于不同神经系统疾病,探究在运动和认知障碍上的康复效果,而忽略了研究康复干预策略、不良反应以及共识标准制订等方面的重要性。此外,由于虚拟现实设备种类繁多、干预计划不同、样本量小、在康复结果上难以得出实质性的统一结论,因此仍有待于适当控制变量的大样本、多中心临床试验寻找合适的康复治疗方

参 考 文 献

- [1] Pelosin E, Barella R, Bet C, et al. Effect of group-based rehabilitation combining action observation with physiotherapy on freezing of gait in Parkinson's disease[J]. *Neural Plast*, 2018, 2018: 4897276. DOI: 10.1155/2018/4897276.
- [2] Killane I, Fearon C, Newman L, et al. Dual motor-cognitive virtual reality training impacts dual-task performance in freezing of gait[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2015, 19(6): 1855-1861. DOI: 10.1109/JBHI.2015.2479625.
- [3] Laio Y, Yang Y, Cheng S, et al. Virtual reality-based training to improve obstacle-crossing performance and dynamic balance in patients with Parkinson's disease[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2015, 29(7): 658-667. DOI: 10.1177/1545968314562111.
- [4] Bekkers EMJ, Mirelman A, Alcock L, et al. Do patients with Parkinson's disease with freezing of gait respond differently than those without to treadmill training augmented by virtual reality[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2020, 34(5): 440-449. DOI: 10.1177/1545968320912756.
- [5] Gandolfi M, Geroin C, Dimitrova E, et al. Virtual reality telerehabilitation for postural instability in Parkinson's disease: a multicenter, single-blind, randomized, controlled trial[J]. *Biomed Res Int*, 2017, 2017: 7962826. DOI: 10.1155/2017/7962826.
- [6] Kim A, Darakjian N, Finley JM. Walking in fully immersive virtual environments: an evaluation of potential adverse effects in older adults and individuals with Parkinson's disease[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14(1): 16. DOI: 10.1186/s12984-017-0225-2.
- [7] Mirelman A, Maidan I, Herman T, et al. Virtual reality for gait training: can it induce motor learning to enhance complex walking and reduce fall risk in patients with Parkinson's disease[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2011, 66(2): 234-240. DOI: 10.1093/gerona/glq201.
- [8] Dockx K, Bekkers EM, Van den Bergh V, et al. Virtual reality for rehabilitation in Parkinson's disease[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2016, 12(12): CD010760. DOI: 10.1002/14651858.CD010760.pub2.
- [9] Feng H, Li CY, Liu JY, et al. Virtual reality rehabilitation versus conventional physical therapy for improving balance and gait in Parkinson's disease patients: a randomized controlled trial[J]. *Med Sci Monit*, 2019, 25: 4186-4192. DOI: 10.12659/MSM.916455.
- [10] Janeh O, Fründt O, Schönwald B, et al. Gait training in virtual reality: short-term effects of different virtual manipulation techniques in Parkinson's disease[J]. *Cells*, 2019, 8(5): 419. DOI: 10.3390/cells8050419.
- [11] Kosutzka Z, Kusnirova A, Hajduk M, et al. Gait disorders questionnaire - promising tool for virtual reality designing in patients with Parkinson's disease[J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 1024. DOI: 10.3389/fneur.2019.01024.
- [12] Strouwen C, Molenaar EALM, Munks L, et al. Training dual tasks together or apart in Parkinson's disease: results from the DUALITY trial[J]. *Mov Disord*, 2017, 32(8): 1201-1210. DOI: 10.1002/mds.27014.
- [13] 秦灵芝, 李玮, 王晓娟, 等. 虚拟现实技术在帕金森病冻结步态康复中的应用[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2019, 41(3): 206-209. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.03.010.
- [14] Triandafilou KM, Tsoupiakova D, Barry AJ, et al. Development of a 3D, networked multi-user virtual reality environment for home therapy after stroke[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2018, 15(1): 88. DOI: 10.1186/s12984-018-0429-0.
- [15] Oh YB, Kim GW, Han KS, et al. Efficacy of virtual reality combined with real instrument training for patients with stroke: a randomized controlled trial[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2019, 100(8): 1400-1408. DOI: 10.1016/j.apmr.2019.03.013.
- [16] 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.
- [17] Ballester BR, Maier M, San-Segundo-Mozo RM, et al. Counteracting learned non-use in chronic stroke patients with reinforcement-induced movement therapy[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2016, 13(1): 74. DOI: 10.1186/s12984-016-0178-x.
- [18] Kim WS, Cho S, Park SH, et al. A low cost kinect-based virtual rehabilitation system for inpatient rehabilitation of the upper limb in patients with subacute stroke[J]. *Medicine*, 2018, 97(25): e11173. DOI: 10.1097/MD.00000000000011173.
- [19] Brunner I, Skouen JS, Hofstad H, et al. Virtual reality training for upper extremity in subacute stroke (VIRTUES): a multicenter RCT[J]. *Neurology*, 2017, 89(24): 2413-2421. DOI: 10.1212/WNL.0000000000004744.
- [20] Corporaal SHA, Gensicke H, Kuhle J, et al. Balance control in multiple sclerosis: Correlations of trunk sway during stance and gait tests with disease severity[J]. *Gait Posture*, 2013, 37(1): 55-60. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2012.05.025.
- [21] Peruzzi A, Cereatti A, Croce UD, et al. Effects of a virtual reality and treadmill training on gait of subjects with multiple sclerosis: a pilot study[J]. *Mult Scler Relat Disord*, 2016, 5: 91-96. DOI: 10.1016/j.msard.2015.11.002.
- [22] Maggio MG, de Luca R, Manuli A, et al. Do patients with multiple sclerosis benefit from semi-immersive virtual reality? A randomized clinical trial on cognitive and motor outcomes[J]. *Appl Neuropsychol Adult*, 2022, 29(1): 59-65. DOI: 10.1080/23279095.2019.1708364.
- [23] Kalron A, Fonkatz I, Frid L, et al. The effect of balance training on postural control in people with multiple sclerosis using the CAREN virtual reality system: a pilot randomized controlled trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2016, 13: 13. DOI: 10.1186/s12984-016-0124-y.
- [24] Maggio MG, De Cola MC, Latella D, et al. What about the role of virtual reality in Parkinson's disease cognitive rehabilitation? Preliminary findings from a randomized clinical trial[J]. *J Geriatr Psychiatry Neurol*, 2018, 31(6): 312-318. DOI: 10.1177/0891988718807973.
- [25] Maggio MG, Russo M, Cuzzola MF, et al. Virtual reality in multiple sclerosis rehabilitation: a review on cognitive and motor outcomes[J].

- J Clin Neurosci, 2019, 65; 106-111. DOI: 10.1016/j.jocn.2019.03.017.
- [26] Cho C, Hwang W, Hwang S, et al. Treadmill training with virtual reality improves gait, balance, and muscle strength in children with cerebral palsy[J]. Tohoku J Exp Med, 2016, 238(3): 213-218. DOI: 10.1620/tjem.238.213.
- [27] Eftekharsadat B, Babaei-Ghazani A, Mohammadzadeh M, et al. Effect of virtual reality-based balance training in multiple sclerosis[J]. Neurol Res, 2015, 37(6): 539-544. DOI: 10.1179/1743132815Y.0000000013.
- [28] Chiu HC, Ada L, Lee HM. Upper limb training using Wii Sports Resort for children with hemiplegic cerebral palsy: a randomized, single-blind trial[J]. Clin Rehabil, 2014, 28(10): 1015-1024. DOI: 10.1177/0269215514533709.
- [29] Shum LC, Valdes BA, Hodges NJ, et al. Error augmentation in immersive virtual reality for bimanual upper-limb rehabilitation in individuals with and without hemiplegic cerebral palsy[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2020, 28(2): 541-549. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2959621.
- [30] De Mello Monteiro CB, Massetti T, da Silva TD, et al. Transfer of motor learning from virtual to natural environments in individuals with cerebral palsy[J]. Res Dev Disabil, 2014, 35(10): 2430-2437. DOI: 10.1016/j.ridd.2014.06.006.
- [31] Maggio MG, de Luca R, Torrisi M, et al. Is there a correlation between family functioning and functional recovery in patients with acquired brain injury? An exploratory study[J]. Appl Nurs Res, 2018, 41: 11-14. DOI: 10.1016/j.apnr.2018.03.005.
- [32] Grealy MA, Johnson DA, Rushton SK. Improving cognitive function after brain injury: the use of exercise and virtual reality[J]. Arch Phys Med Rehabil, 1999, 80(6): 661-667. DOI: 10.1016/S0003-9993(99)90169-7.
- [33] Alashram AR, Annino G, Padua E, et al. Cognitive rehabilitation post traumatic brain injury: a systematic review for emerging use of virtual reality technology[J]. J Clin Neurosci, 2019, 66: 209-219. DOI: 10.1016/j.jocn.2019.04.026.
- [34] Barry G, Galna B, Rochester L. The role of exergaming in Parkinson's disease rehabilitation: A systematic review of the evidence[J]. J Neuroeng Rehabil, 2014, 11: 33. DOI: 10.1186/1743-0003-11-33.
- [35] Mirelman A, Maidan I, Deutsch JE. Virtual reality and motor imagery: Promising tools for assessment and therapy in Parkinson's disease[J]. Mov Disord, 2013, 28(11): 1597-1608. DOI: 10.1002/mds.25670.
- [36] Triegaardt J, Han TS, Sada C, et al. The role of virtual reality on outcomes in rehabilitation of Parkinson's disease: meta-analysis and systematic review in 1031 participants[J]. Neurol Sci, 2020, 41(3): 529-536. DOI: 10.1007/s10072-019-04144-3.
- [37] Rose T, Nam CS, Chen KB. Immersion of virtual reality for rehabilitation: review[J]. Appl Ergon, 2018, 69: 153-161. DOI: 10.1016/j.apergo.2018.01.009.
- [38] Sharples S, Cobb SVG, Moody A, et al. Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE): Comparison of head mounted display (HMD), desktop and projection display systems[J]. Displays, 2008, 29(2): 58-69. DOI: 10.1016/j.displa.2007.09.005.
- [39] Janež O, Bruder G, Steinicke F, et al. Analyses of gait parameters of younger and older adults during (non-) isometric virtual walking[J]. IEEE Trans Vis Comput Graph, 2018, 24(10): 2663-2674. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2771520.
- [40] Maidan I, Rosenberg-Katz K, Jacob Y, et al. Disparate effects of training on brain activation in Parkinson disease[J]. Neurology, 2017, 89(17): 1804-1810. DOI: 10.1212/WNL.0000000000004576.
- [41] Pazzaglia C, Imbimbo I, Tranchita E, et al. Comparison of virtual reality rehabilitation and conventional rehabilitation in Parkinson's disease: a randomised controlled trial[J]. Physiotherapy, 2020, 106: 36-42. DOI: 10.1016/j.physio.2019.12.007.
- [42] Yi Chen, Qiang Gao, Cheng-Qi He, et al. Effect of virtual reality on balance in individuals with Parkinson disease: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Phys Ther, 2020, 100(6): 933-945. DOI: 10.1093/ptj/pzaa042.
- [43] Bluett B, Bayram E, Litvan I. The virtual reality of Parkinson's disease freezing of gait: a systematic review[J]. Parkinsonism Relat Disord, 2019, 61: 26-33. DOI: 10.1016/j.parkreldis.2018.11.013.
- [44] Menin A, Torchelsen R, Nedel L. An analysis of VR technology used in immersive simulations with a serious game perspective[J]. IEEE Comput Graph Appl, 2018, 38(2): 57-73. DOI: 10.1109/MCG.2018.021951633.
- [45] Tieri G, Morone G, Paolucci S, et al. Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: facts, fiction and fallacies[J]. Expert Rev Med Devices, 2018, 15(2): 107-117. DOI: 10.1080/17434440.2018.1425613.
- [46] Porras DC, Siemonsma P, Inzelberg R, et al. Advantages of virtual reality in the rehabilitation of balance and gait: systematic review[J]. Neurology, 2018, 90(22): 1017-1025. DOI: 10.1212/WNL.0000000000005603.
- [47] Levac DE, Glegg SMN, Sveistrup H, et al. Promoting therapists' use of motor learning strategies within virtual reality-based stroke rehabilitation[J]. PLoS One, 2016, 11(12): e0168311. DOI: 10.1371/journal.pone.0168311.
- [48] Ryan JL, Wright FV, Levac DE. Exploring physiotherapists' use of motor learning strategies in gait-based interventions for children with cerebral palsy[J]. Phys Occup Ther Pediatr, 2020, 40(1): 79-92. DOI: 10.1080/01942638.2019.1622623.
- [49] Porras DC, Sharon H, Inzelberg R, et al. Advanced virtual reality-based rehabilitation of balance and gait in clinical practice[J]. Ther Adv Chronic Dis, 2019, 10: 2040622319868379. DOI: 10.1177/2040622319868379.

(修回日期:2022-01-20)

(本文编辑:汪 玲)