·临床研究·

基于虚拟现实的心理旋转系统在临床康复中的可用性研究*

朱啸宇[1] 王鹤玮[2] 朱庭安[4] 吴中凡[1] 陈 瑶[3] 项育枝[3] 刘 强[2] 贾 杰[2] 陆小锋[1,5]

摘要

目的:探究虚拟现实(VR)心理旋转系统在临床康复中的可用性和特征参数。

方法:招募15例健康受试者、10例脑损伤患者和4名治疗师进行VR心理旋转系统的可用性测试,健康受试者另外接受传统E-prime心理旋转测试。分别采用系统可用性量表(SUS)、模拟器不适感量表(SSQ)和半结构式访谈收集系统的可用性得分、晕动症程度和主观反馈。

结果:VR心理旋转与传统E-prime心理旋转相比,平均反应时(t=0.424, P=0.680)与正确率(t=1.865, P=0.6)无显著性差异,且具有相似的反应时-旋转角度变化趋势。健康组SUS为(77.0±11.4)分,患者组SUS为(60.0±12.3)分,可用性处于"Good"水平。健康组与患者组SSQ平均得分为10.22分和6.73分,VR晕动症不明显。半结构式访谈表明系统整体可用性较好,但硬件、反馈、训练等模块需继续完善。

结论:基于VR的心理旋转系统具有良好的可用性,有潜力给临床康复带来全新的运动想象评估与训练形式。

关键词 虚拟现实;运动想象;心理旋转;可用性;评定

中图分类号:R493 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2022)-09-1208-06

Usability of a virtual reality-assisted system for mental rotation in clinical rehabilitation/ZHU Xiaoyu, WANG Hewei, ZHU Ting'an, et al.//Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2022, 37(9): 1208—1213

Abstract

Objective: To explore the usability and characteristic parameters of mental rotation system based on virtual reality (VR) in clinical rehabilitation.

Method: A total of 15 healthy volunteers, 10 patients with brain injury and 4 physiotherapists were recruited to perform the usability test of VR-based hand mental rotation task (HMRT). The healthy volunteers also received the traditional HMRT based on E-prime software. The system usability scale (SUS), simulator discomfort scale (SSQ), and semi-structured interviews were used to collect the system's usability score, VR motion sickness degree and feedback on the use of the system, respectively.

Result: There was no significant difference in the average reaction time (t=0.424, P=0.680) and the correct rate (t=1.865, P=0.6) between VR and traditional E-Prime mental rotation, and they had similar 'accuracy-angle' trend. The SUS score was (77.0±11.4) in healthy subjects and (60.0±12.3) in patients with brain injury, and the overall usability range was at "Good" level. The average SSQ score were 10.22 and 6.73 in healthy subjects and patients, indicating no obvious sickness. The semi-structured interview reflected that the comfort of hardware, the form of feedback, training elements needed to be further improved.

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2022.09.009

*基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC2002301);上海市科委科研计划项目(16441905302);上海市青年科技英才扬帆计划资助(21YF1404600);上海市卫健委科研课题面上项目(202040032);上海市静安区卫健委、区科委医学科研课题面上项目(2020MS17)

1 上海大学通信与信息工程学院,上海市,200444; 2 复旦大学附属华山医院; 3 上海市第三康复医院康复医学科; 4 上海外国语大学附属外国语学校; 5 通讯作者

第一作者简介:朱啸宇,男,硕士研究生;收稿日期:2021-03-10

Conclusion: The VR-based HMRT demonstrates overall good usability and has the potential to bring a new form of evaluation and training for motor imagery in clinical rehabilitation.

Author's address School of Communication and Information Engineering, Shanghai, 200444

Key word virtual reality; motor imagery; mental rotation; usability; assessment

心理旋转实验(mental rotation test)是康复医学领域的一项重要评估技术,用于评估个体内隐性运动想象能力(motor imagery ability)的强弱。"心理旋转"最早由Shepard等在1971年提出[1],基本内容是对于空间内旋转到不同角度的三维图形,个体可以通过大脑功能识别图形属于正像还是镜像[1],并通过反应时(reaction time, RT)与正确率(accuracy, ACC)来评价运动想象能力的强弱[2]。运动想象训练可以通过想象特定动作激活感觉运动网络并在中枢层面改善运动输出[3],但疗效受想象能力影响,想象得越生动、逼真,训练效果才可能会更好[4]。周慧琳等[5]发现心理旋转的反应时与运动想象能力显著负相关,而Sharma等[6]认为心理旋转正确率低于75%时就不适合接受运动想象训练。心理旋转测试凭借其在运动想象能力筛查过程中的客观性和便捷性,在临床康复中发挥着不可替代的作用。

传统的心理旋转通常基于E-prime等软件,呈现的图案为二维图形或是三维图形的截图,沉浸感稍显不足[7—8]。而虚拟现实(virtual reality, VR)依靠突出的感知性、沉浸感和交互性,有望赋予传统心理旋转全新的活力[9]。我们前期通过文献综述[2]和临床试验[3]发现"手"的图案可以显著地诱发内隐性运动想象,因此选择"手"作为VR心理旋转系统的视觉刺激对象。本研究首先介绍系统的搭建过程;接着招募健康受试者、脑损伤患者和康复治疗师进行系统可用性、可靠性测试;最后根据测试结果和受试者的反馈讨论VR技术与心理旋转技术结合的可行性与应用前景。

1 资料与方法

1.1 一般资料

2020年9—12月,在上海大学招募健康受试者15例,在上海市第三康复医院康复医学科招募10例住院治疗的脑损伤患者和4名康复治疗师。健康受试者须无躯体、精神疾病,右利手,无明显的VR晕动症,可以耐受测试,本人亲自签署知情同意书;脑损伤患者须符合各类脑血管、炎症、肿瘤的诊断标准,并经头颅CT或MRI证实。纳入标准:①18—85岁;②首次发病;③右利手;④健侧或受累较轻侧上肢能完成按键测试;⑤由患者本人或其直系亲属签署知情同意书。

排除标准:①严重的认知功能障碍(无法理解测试内容);②失语症(无法提供测试反馈);③重要脏器功能衰竭或其他危重疾病;④视觉障碍;⑤神经精神疾病史,药物滥用或酗酒史;⑥明显的VR晕动症,无法耐受试验者;两名治疗师工作年限<2年,另两名>6年,此前均未操作过VR康复设备。入组受试者的一般资料见表1。

本研究经复旦大学附属华山医院伦理审查委员会审查批准,伦理批件号:(2019)临审第(270)号。

1.2 心理旋转系统搭建

1.2.1 基于VR的心理旋转系统:选用HTC Vive虚拟现实套件,配有32颗光电传感器与定位器,分辨率为2160×1200,刷新率为90Hz。主机配置为i7-7700处理器、GTX1060显卡、16G内存、运行Win10操作系统。使用独立数字小键盘进行判断输入。系统基于Unity3D引擎进行开发,使用C#语言编写功能脚本控制测试流程,导出反应时与正确率至Excel。本研究的系统硬件结构框图和VR测试场景如图1所示。

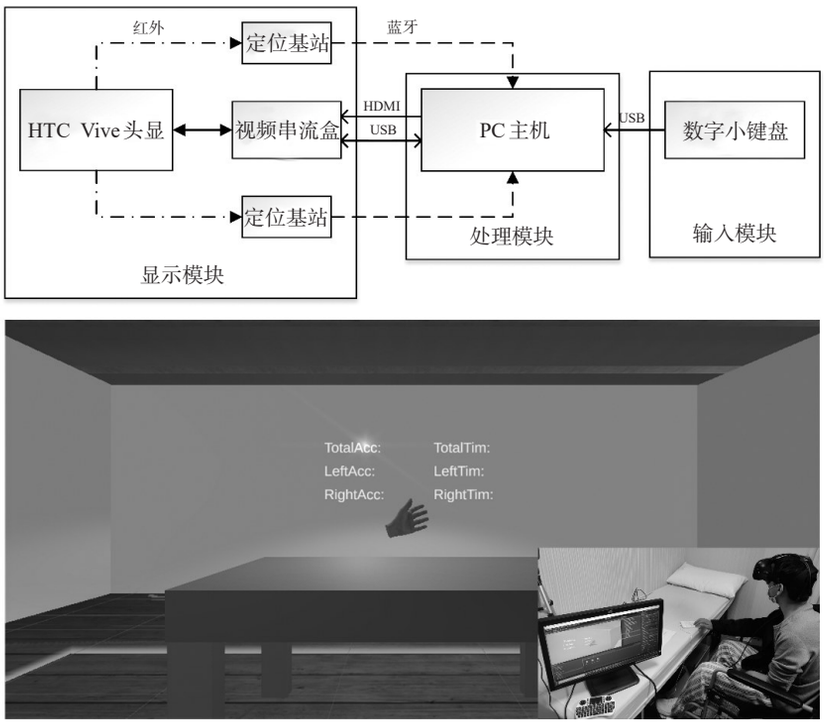
1.2.2 基于E-prime的传统心理旋转系统:参照Shepard等于1971年发表在Science期刊上的研

表1 健康组和患者组一般资料

组别	例数	性别(例)		年龄	受教育年限	MoCA评分	疾病类型					病程
		男	女	($\bar{x}\pm s$,岁)	($\bar{x}\pm s$,年)	($\bar{x}\pm s$,分)	脑梗死	脑出血	脑外伤	脑炎	脑肿瘤	(月)
健康组	15	13	2	23.00±1.85	16.07±1.75	27.73±1.62	-	-	-	-	-	
患者组	10	6	4	45.13±21.83	13.63±2.50	22.38±5.37	3	4	1	1	1	10(3.75, 60)

注:年龄、受教育年限、MoCA评分采用$\bar{x}\pm s$表示,病程采用M(P25, P75)表示。

图1 VR评估系统的硬件结构框图和测试场景示意图



究[1]，设备为笔记本电脑(N56VZ，Windows 7，AUSA)，屏幕15.6英寸，刺激程序通过E-prime 2.0(Psychology Software Tools，Inc. Pittsburgh，USA)编写。坐位评估，受试者双眼距离屏幕中央约40cm，采用有线数字小键盘输入。

1.3 测试方法

第一阶段，15例健康受试者随机分成两组，8例首先进行VR心理旋转测试，接着休息30min，随后进行传统心理旋转测试，另外7例首先接受传统心理旋转测试，休息30min，随后进行VR心理旋转测试，目的是减少学习效应。测试后进行认知功能评定和VR心理旋转的可用性调研。认知功能评估采用中文版蒙特利尔认知评估量表(Montreal cognitive assessment，MoCA)[10]，可用性调研采用系统可用性量表(system usability scale，SUS)[11—12]、模拟器不适感量表(simulator sickness questionnaire，SSQ)[13]和半结构式访谈(semi-structured interview)[14]。

第二阶段，4名康复治疗师首先进行系统的操作培训，随后对10例脑损伤患者进行VR心理旋转测试，每位治疗师测试2—3例受试者。测试后，治疗师接受半结构式访谈，患者接受MoCA评估、SUS评估、半结构式访谈和SSQ评估。

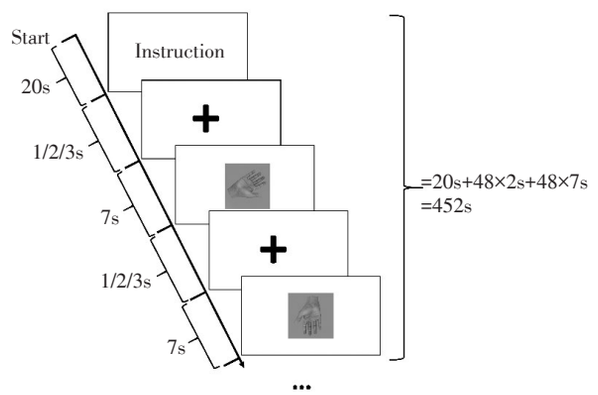
1.3.1 心理旋转测试：心理旋转测试流程与文献报道一致[7]，使用6个角度(0°、60°、120°、180°、240°、300°)的左手或右手的掌侧图案作为视觉刺激。受试者通过“1”和“2”按键做出判断，要求在保证正确率的情况下快速做出判断。测试流程见图2。

1.3.2 系统可用性量表SUS：SUS是John Brooke于1986年提出的一种可用性测试的简易问卷调查量表，包含10个问题，总分100分，分数越高代表设备可用性越好，>50分表示可用性达到合格标准，>70分则可用性良好[12]。

1.3.3 模拟器不适感量表SSQ：SSQ是Kennedy等[13]在1993年设计的模拟器不适感研究工具，可以用来评价使用VR设备导致的副作用，包括恶心(N)、动眼神经紊乱(O)、方向障碍(D)三个代表性症状[15]。

1.3.4 半结构式访谈：分为操作者和受试者问卷，收集系统使用过程中的问题。操作者问卷包括操作流程、辅助受试者佩戴和使用设备、观察受试者测试反

图2 心理旋转测试流程示意图



应、设备整体操作难度和体验感受。受试者问卷包括任务理解、不适感、清晰度、困难要素、日常训练接受度、设备整体操作难度和体验感受[14]。

1.4 统计学分析

采用EpiData 3.0双份录入原始数据,使用SPSS 25.0进行数据分析,采用GraphPad Prism 7制作图表。计量资料满足正态性用均数±标准差表示,不满足用M(P25, P75)表示。传统和VR心理旋转反应时和正确率比较采用配对t检验。心理旋转反应时随角度的变化采用重复测量方差分析,观察旋转角度(6个角度)和测试类型(传统和VR)对反应时的影响,多重比较采用Post Hoc分析。显著性水平α=0.05。

2 结果

2.1 心理旋转

健康受试者的传统心理旋转平均反应时为(1.775±0.423)s,平均正确率为(99.3±1.0)%。健康受试者的VR心理旋转平均反应时为(1.833±0.397)s,平均正确率为(98.1±1.9)%。传统心理旋转的反应时(t=0.424, P=0.680)、正确率(t=1.865, P=0.6)与VR心理旋转无显著性差异。

如表2、图3所示,传统和VR心理旋转的反应时随旋转角度都有特征性变化,在60°反应时最短,在180°—240°得到最长反应时。Post hoc分析表明传统心理旋转在180°和240°的反应时长于60°,VR心理旋转在180°、240°和300°的反应时长于60°。

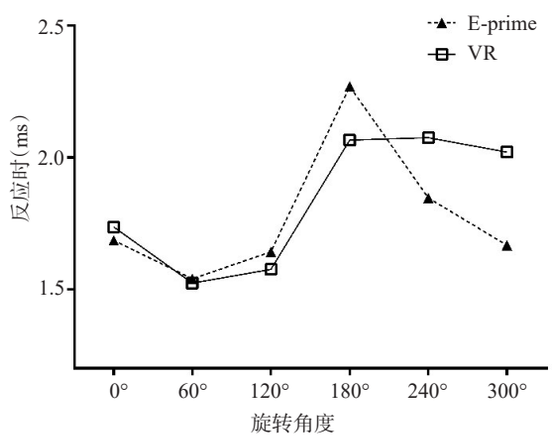
2.2 系统可用性量表SUS

表2 心理旋转反应时随旋转角度的变化 (s)

评估工具	0°	60°	120°	180°	240°	300°
传统心理旋转	1.686±0.516	1.540±0.453	1.642±0.403	2.269±0.583①	1.847±0.448①	1.667±0.508
VR心理旋转	1.736±0.438	1.523±0.465	1.575±0.425	2.066±0.444①	2.075±0.619①	2.020±0.734①

注:该角度的反应时间与60°反应时相比较,①P<0.05

图3 心理旋转反应时随旋转角度的变化



健康组的SUS得分为(77.0±11.4)分,患者组的SUS得分为(60.0±12.3)分。SUS各分数段人数如表3所示,健康组主要分布于60—90分,而患者组主要分布于40—80分。两组可用性水平见图4,健康组介于"Good-Excellent",患者组介于"OK-Good"[11]。

2.3 模拟器不适感量表SSQ

健康组有一位受试者(H10)表现出明显的晕动症(86.02分),剔除后剩余受试者的SSQ得分为(4.81±7.13)分,处于健康人做VR测试前的平均水平,即无明显晕动感[16]。患者组只有一位受试者(P8)表现出明显的晕动症(41.14分),剔除后剩余受试者的SSQ得分为(2.91±4.59)分,无明显晕动感。所有受试者的SSQ评分情况见表4。

2.4 半结构式访谈

2.4.1 治疗师反馈:4名治疗师反馈系统操作流程基本合理,但"帮助患者达到舒适姿势"和"指导患者进行键盘操作"存在一些难度。此外,治疗师观察到患者存在"佩戴不舒适"和"测试时间偏长"的问题。

2.4.2 健康受试者反馈:所有受试者都清楚VR心理旋转的测试要求,认为VR场景和画面很清晰,没有在测试中遇到明显困难。4例受试者认为"VR头盔偏重",2例受试者认为"对VR画面感到一些头晕",2例受试者认为"VR遮挡视野有些妨碍按键判断"。有(14/15)例受试者愿意接受VR心理旋转作为日常训练内容。"设备整体操作难度"为(2.13±

表3 SUS不同分数段人数

组别	例数	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90	90—100
健康组	15	0	1	3	6	4	1
患者组	10	2	4	2	2	0	0

注:该角度的反应时间与60°反应时相比较,①P<0.05

图4　健康组和患者组的SUS综合得分区间

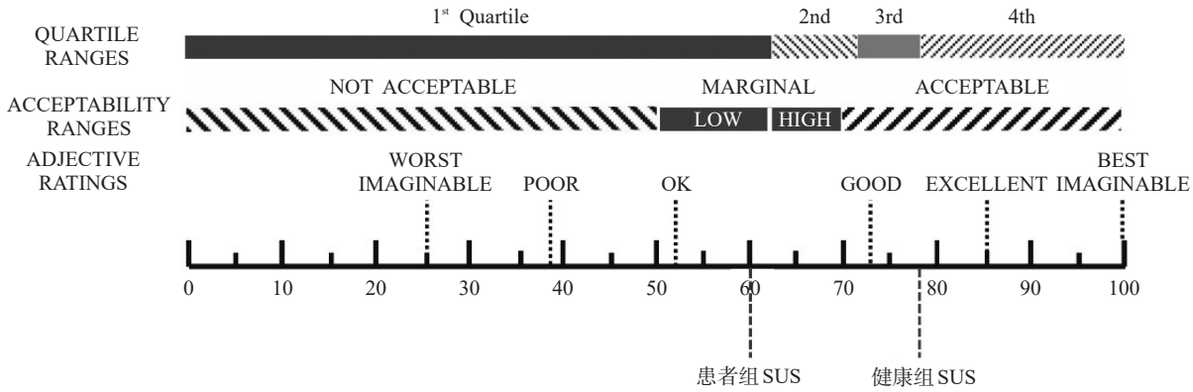


表4　两组受试者SSQ子项目得分情况

健康组编号	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15
恶心(N)	△	-	-	△	-	-	-	-	-	▲	-	-	△	-	-
动眼神经紊乱(O)	△	-	-	△	-	△	-	-	-	▲	-	-	△	-	-
方向障碍(D)	△	-	-	△	-	△	-	-	-	▲	-	-	△	-	-

患者组编号	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
恶心(N)	-	-	-	△	-	-	-	△	-	-
动眼神经紊乱(O)	△	△	-	△	-	-	-	△	-	△
方向障碍(D)	-	-	-	-	-	-	-	▲	-	-

注："-"：无症状，"△"：轻微症状，"▲"：明显症状

2.39)分，"设备整体体验感受"为(6.80±1.94)分。

2.4.3　脑损伤患者反馈：8例患者清楚测试要求，2例患者对理解测试要求存在困难。(9/10)例患者觉得VR场景和画面很清晰。各有1例患者反馈"VR头盔偏重"、"对VR画面感到一些头晕"和"VR遮挡视野有些妨碍按键判断"。(6/10)位患者愿意接受VR心理旋转作为日常训练内容。"设备整体操作难度"为(3.90±3.08)分，"设备整体体验感受"为(7.00±1.84)分。

3　讨论

本研究通过测试数据和问卷分析了VR心理旋转系统的临床可用性。结果表明VR心理旋转与传统E-prime心理旋转有着相似的反应时间与正确率，且遵循类似的反应时间-角度变化规律，康复评估可靠性良好；副作用较少，晕动症不明显；访谈表明系统的整体可用性良好，但仍有模块需要改良。

该VR心理旋转系统由上海大学与复旦大学附属华山医院联合研发，实现了在虚拟环境中呈现多视角3D手模型[17]。该系统具有良好的沉浸感，可在10min内部署，适应性强[18]。手是人类与外界环境发生交互的重要工具[19]，手心理旋转可以明显诱发与运动想象相关的大脑皮质的激活[20]，因此本系统选用手掌作为视觉刺激。

前期研究提示受试者在进行心理旋转测试时，需要在大脑中形成视觉刺激图案的视觉表象，随后将该表象旋转到物理上的直立位，然后做出判断。表象旋转到直立位置的时间越长，需要的反应时也越久[8]。本研究中，传统心理旋转的反应时随旋转角度递增而增长，并在180°处取得最大值，这与既往结果一致[1]。而VR心理旋转在240°和300°的反应时明显长于传统的测试，这与"具身认知"理论有关[21]，因为运动生理学提示向外旋转(60°、120°)难度比向内旋转(240°、300°)大[7]。"具身认知"理论认为解剖生理对人的认知反应存在影响，受试者会想象运动自己的手来比对3D模型并做出判断，这提示VR心理旋转更能诱发个体的运动想象过程。相关神经影像学研究也验证了这一推测[22]。因此，我们认为VR心理旋转相对传统心理旋转更适合运动想象的评估与训练[23]。

本研究的SUS和SSQ得分表明，该VR心理旋转系统具有良好的可用性且不易诱发受试者的晕动

症状。组间比较显示健康受试者对该系统的可用性认可度更高,这可能与两个因素有关。一是脑损伤患者的肢体运动能力、认知功能等均弱于健康受试者,故表现出部分躯体不适和任务学习困难的现象[9];二是健康受试者均为高校学术,自身教育水平和学习能力更强。根据半结构式访谈,系统后续需进行如下改良:①选用可调节新型头显,改善佩戴舒适度。②增加提示音、进度条等反馈提示[24];③在虚拟环境中添加模拟小键盘,进一步提高受试者的沉浸感;④添加异形手、手势动作等视觉刺激,并增添游戏训练模块,强化该VR心理旋转系统的康复训练价值。

综上所述,基于VR的心理旋转系统在健康人和脑损伤患者中均有着良好的可用性,未来研究需要进一步完善系统的反馈和训练模块,提升系统的训练趣味性。VR心理旋转有潜力给临床康复带来全新的运动想象评估与训练形式。

参考文献

[1] Shepard RN, Metzler J. Mental rotation of three-dimensional objects[J]. Science,1971,171(3972): 701—703.

[2] 王鹤玮,贾杰. 心理旋转实验在脑卒中患者运动想象能力评估中的应用[J]. 中国康复医学杂志,2020,35(10):1260—1263.

[3] 王鹤玮,贾杰,孙莉敏. 运动想象疗法在脑卒中患者上肢康复中的应用及其神经作用机制研究进展[J]. 中华物理医学与康复杂志,2019,41(6):473—476.

[4] Simmons L, Sharma N, Baron JC, et al. Motor imagery to enhance recovery after subcortical stroke: who might benefit, daily dose, and potential effects[J]. Neurorehabil Neural Repair,2008,22(5):458—467.

[5] 周慧琳,左国坤,万小平,等. 基于心理旋转的运动想象行为学实证探索[J]. 生物医学工程学杂志,2017,34(2):173—179.

[6] Sharma N, Simmons LH, Jones PS, et al. Motor imagery after subcortical stroke: a functional magnetic resonance imaging study[J]. Stroke,2009,40(4):1315—1324.

[7] 王鹤玮,王云龙,陆小锋,等. 心理旋转试验在脑卒中患者运动表象能力评估中的应用[J]. 中国康复理论与实践,2020,26(7):813—819.

[8] Searle JA, Hamm JP. Mental rotation: an examination of assumptions[J]. Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci, 2017, 8(6): e1443.

[9] Laver KE, Lange B, George S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation[J]. Cochrane Database Syst Rev,2017,11(11):D8349.

[10] Mai LM, Sposato LA, Rothwell PM, et al. A comparison between the MoCA and the MMSE visuoexecutive subtests in detecting abnormalities in TIA/stroke patients[J]. Int J Stroke,2016,11(4):420—424.

[11] Bangor A, Kortum PT, Miller JT. An empirical evaluation of the system usability scale[J]. Intl. Journal of Human-Computer Interaction,2008,24(6):574—594.

[12] Bangor A, Kortum P, Miller J. Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale[J]. Journal of Usability Studies,2009,4(3):114—123.

[13] Kennedy RS, Lane NE, Berbaum KS, et al. Simulator sickness questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness[J]. The International Journal of Aviation Psychology,1993,3(3):203—220.

[14] 庄金阳,贾杰. 基于左右制衡理论的镜像疗法在亚急性脑卒中患者的临床应用[J]. 中国康复理论与实践,2020,26(1):98—101.

[15] Kim HK, Park J, Choi Y, et al. Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment[J]. Appl Ergon, 2018, 69: 66—73.

[16] 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.

[17] Bourrelier J, Kubicki A, Rouaud O, et al. Mental rotation as an indicator of motor representation in patients with mild cognitive impairment[J]. Front Aging Neurosci, 2015(7):238.

[18] Aramaki AL, Sampaio RF, Reis A, et al. Virtual reality in the rehabilitation of patients with stroke: an integrative review[J]. Arq Neuropsiquiatr,2019,77(4):268—278.

[19] Wang H, Arceo R, Chen S, et al. Effectiveness of interventions to improve hand motor function in individuals with moderate to severe stroke: a systematic review protocol[J]. BMJ Open,2019,9(9):e32413.

[20] Hamada H, Matsuzawa D, Sutoh C, et al. Comparison of brain activity between motor imagery and mental rotation of the hand tasks: a functional magnetic resonance imaging study[J]. Brain Imaging Behav, 2018, 12(6): 1596—1606.

[21] 曲方炳,叶浩生. 不同身体部位心理旋转任务的具身效应:一项fMRI研究[C]. 广州:2012.

[22] 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.

[23] 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.

[24] Pedroli E, Greci L, Colombo D, et al. Characteristics, usability, and users experience of a system combining cognitive and physical therapy in a virtual environment: positive bike[J]. Sensors (Basel),2018,18(7):2343.