

·综 述·

脑卒中上肢康复智能化评估和虚拟现实训练研究进展

谢秋蓉^{1,2}, 林婉琪³, 张琪^{1,2}, 盛博⁴, 张彦新⁵, 黄佳^{1,2*}

1 福建中医药大学康复医学院, 福建 福州 350122;

2 福建中医药大学中医骨伤与运动康复重点实验室, 福建 福州 350122;

3 福建中医药大学中西医结合学院, 福建 福州 350122;

4 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444;

5 奥克兰大学运动科学系, 新西兰 奥克兰 1142

* 通信作者: 黄佳, E-mail: jasmine1874@163.com

收稿日期: 2022-08-19; 接受日期: 2022-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(62103252); 福建省自然科学基金项目(2020J01752); 上海浦江人才计划(21PJ1404000)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2023.03011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



摘要 脑卒中是全球致残的主要原因, 约85%脑卒中患者初次发病就出现上肢功能障碍, 只有5%~20%的患者在脑卒中后6个月能够完全康复。因此, 患者在日常生活中通常会遇到困难, 改善脑卒中患者上肢的功能性使用至关重要。脑卒中患者运动功能的精准评估与训练非常重要。为了全面反映上肢功能的各个方面, 将运动评估与临床评估量表相结合是非常重要的。无标记感应技术用于评估脑卒中患者的上肢具有代表性的运动能力, 如运动范围、协调性、抓握力或精细的手指灵活性。基于机器学习算法的无标记感应技术上肢运动功能自动评估集中在Fugl-Meyer上肢功能(FMA-UE)、Brunnstrom及Wolf运动功能(WMFT)等量表的研究上, 并且具有较高的评分准确性和时间效率。此外, 为神经康复设计的虚拟现实技术(VR)训练能够有效促进脑卒中上肢功能的恢复, 与之相关的神经康复原则包括任务导向实践、明确反馈、增加难度、隐性反馈、变量练习和促进使用患侧肢体的机制。VR训练的效果是利用技术的优势结合神经康复原理促进运动学习和功能恢复的结果。VR康复系统可分为现成的商用视频游戏系统和定制虚拟环境系统; 触控式和无触控式的界面; 近端运动(肩部和肘部)、远端运动(腕和手)和混合运动系统。目前国内外已经研发出各种脑卒中上肢功能的VR康复系统, 但是存在不足之处: ①缺乏以患者为中心的任务导向的个性化训练计划; ②较少将手跟手臂作为一个整体研究对象; ③功能障碍和临床疗效的评估较为主观; ④康复评估与治疗没有紧密结合。而且, 脑卒中上肢运动功能智能化评估集中在FMA-UE、Brunnstrom及WMFT等量表的研究上, 临床上应用广泛的偏瘫上肢功能七级评估(FTHUE)量表还未进行研究。FTHUE评估量表和基于FTHUE量表制定的一整套康复方案在临床上应用广泛。将FTHUE康复方案和VR训练结合可以更有效地促进患者运动功能恢复。未来的研究可以根据FTHUE量表的客观评估结果选择对应的FTHUE康复方案, 可以实现个性化训练方案的制定, 有效实施康复训练的原则。此外, 使用精度高的无标记感应技术(Microsoft Azure Kinect和Leap Motion Controller设备)研发的系统价格低廉、方便携带, 适合社区或家庭场景使用。本文综述了目前脑卒中上肢VR训练设备和智能化评估系统的研究进展, 目前设备存在的局限性, 并提出根据FTHUE量表实现脑卒中患者上肢运动功能智能化评估和治疗紧密联系, 同时融合上肢和手的评估和治疗的设计理念, 旨在为智能化上肢康复的设备研发提供借鉴思路。

关键词 脑卒中; 上肢功能; 虚拟现实训练; 智能化评估; 运动学定量评估

引用格式: 谢秋蓉, 林婉琪, 张琪, 等. 脑卒中上肢康复智能化评估和虚拟现实训练研究进展[J]. 康复学报, 2023, 33(3): 271-279.

XIE Q R, LIN W Q, ZHANG Q, et al. Research progress of intelligent evaluation and virtual reality based training in upper limb rehabilitation after stroke [J]. Rehabil Med, 2023, 33(3): 271-279.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2023.03011

脑卒中是全球致残的主要原因,80%患者遗留不同程度的运动功能障碍,上肢功能障碍是主要功能障碍之一,主要表现为上肢屈伸活动不利、手精细动作控制能力减退^[1]。研究显示,约85%脑卒中患者初次发病就出现上肢功能障碍^[2],15%患者的手功能可以恢复到原来的50%左右,仅3%患者可以恢复70%以上,只有5%~20%患者在脑卒中后6个月能够完全康复^[3]。上肢功能对于个人和社会具有重要意义,因为上肢运动能力与患者对护理人员的依赖和生活质量有关^[4]。

脑卒中的康复目标是重新训练受损的中枢神经系统以恢复之前执行的功能。应用手法和器械治疗等方法,通过任务导向训练促进动作技巧的优化,并在有激励和挑战的环境中主动参与学习,可以有效促进运动功能恢复^[5]。相对于传统疗法,基于虚拟现实技术(virtual reality, VR)的康复方法有其优势:①提供特定任务的重复训练;②设定的环境能锻炼患者解决问题和执行任务的能力;③VR训练模拟患者需求的真实情景活动;④提高患者参与治疗的积极性,并提供愉悦的体验。2019年MAIER等^[5]提出康复实践中运动技巧学习的15个原则,包括大量练习、间隔练习、强度、特定任务练习、目标导向练习、变量练习、难度增加、多感官刺激、节奏提示、明确反馈/结果知识、内隐反馈/表现知识、调节效应器选择、行为观察/具体实践、运动意象和社会互动。MAIER等^[6]的综述证明为神经康复设计的VR训练能够有效促进脑卒中上肢功能的恢复,并指出与之相关的神经康复原则:任务导向实践、明确反馈、增加难度、隐性反馈、变量练习和促进使用患侧肢体的机制。由此可见,特定VR训练的效果是利用技术的优势结合神经康复原理促进运动学习和功能恢复的结果。近年来关于脑卒中上肢虚拟现实训练的功能核磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)研究证明在训练过程中出现了大脑神经功能重组^[5]。

与此同时,脑卒中患者运动功能的精准评估同样非常重要。虽然VR设备能够计算上肢训练中的运动学参数,如关节角度、关节速度、运动精度、运动轨迹平滑程度、运动协调性等,但是这些参数通常作为康复疗效的评估指标,并不能直接用于康复项目的选择和指导。此外,尽管有诸多研究研发出基于Fugl-Meyer上肢功能(Fugl-Meyer assessment of upper extremity, FMA-UE)、Wolf运动功能(Wolf motor function test, WMFT)等量表的自动化评估系

统,但是并没有与VR训练设备相结合,直接应用评估结果指导训练方案的选择。

本文对目前脑卒中上肢VR训练设备和智能化评估系统的研究进展,以及目前设备存在的局限性进行综述,并提出根据偏瘫上肢功能七级评估(functional test for hemiparetic upper extremity, FTH-UE)量表实现脑卒中患者上肢运动功能智能化评估和治疗紧密联系,同时融合上肢和手的评估和治疗的设计理念。

1 脑卒中上肢功能的智能化评估研究

上肢运动功能的评定方法主要包括量表法、三维运动分析系统、上肢康复机器人评定等^[7]。目前的临床评估常用量表有FMA-UE、WMFT、MEKBIB等^[8]的系统评价表明,FMA-UE、积木箱子测试(box and block test, BBT)和运动活动日志(motor activity log, MAL)是跨3个国际功能、残疾和健康分类(International Classification of Functioning, Disability, and Health, ICF)领域测量VR训练治疗效果的金标准临床工具。但是上述量表均依赖康复治疗师的主观评价,难以全面客观地评价疗效^[9]。因此,为了提高对运动恢复机制的认识,脑卒中第二次康复圆桌会议建议对脑卒中上肢功能进行运动学分析^[10]。

1.1 无标记感应技术在脑卒中上肢运动功能评估中的应用

无标记感应技术(markerless sensing technology, MST)如微软Kinect,可用于评估脑卒中患者的上肢运动障碍^[11]。目前脑卒中的无标志点上肢功能运动分析研究主要包括前伸够物和抓握等动作的评估^[12],更详细地说,评估程序包括跟踪各种关节以评估具有代表性的运动能力,如运动范围、协调性、抓握力或精细的手指灵活性^[13-14]。CAI等^[15]报道了Kinect V2在肩关节和肘关节屈/伸角度波形测量中具有较高的准确性:设备间多重相关系数(coefficient of multiple correlation, CMC) >0.87 (满分为1,金标准为运动分析系统),上肢角度波形的重测信度较高(CMC:0.75~0.99)。SCANO等^[16]提出用Kinect评估脑卒中患者和健康人在日常生活中够物运动的表现,涵盖肩部运动范围、肘部运动范围、躯干代偿策略和运动平稳性,结果表明,健康人的利手和非利手具有可比性($P>0.05$);相反,在所有评估参数方面,脑卒中患者健侧手和健康人利手/非利手之间差异具有统计学意义($P<0.001$);在某些病例中,患肢较轻的患者与健康人相比差异也有统计

学意义($P<0.05$)。更重要的是,HUSSAIN等^[17]探讨脑卒中患者从目标指向任务获得的运动变量与临床量表评定的活动能力受限之间的关系,结果表明,平均速度和速度峰值数量与上肢损伤有关,它们共同解释了16%的FMA-UE评分;运动时间和速度峰值数量与活动能力相关,分别解释了13%和10%的手臂动作调查测试(action research arm test, ARAT)评分。然而,这些变量只能解释使用临床量表记录的部分变化。这一发现强化了运动分析和临床量表在脑卒中后上肢评估中多层次评估的重要性。由此可见,为了全面反映上肢功能的各个方面,将运动评估与临床评估量表相结合是非常重要的。

1.2 基于机器学习算法的无标记感应技术在脑卒中上肢运动功能评估中的应用

无标记感应技术如Kinect是一种经济高效的便携式无标记运动学分析工具,机器学习模型可以增强无标记感应技术的性能,使定量评估自动化^[18]。机器学习是计算机科学的扩展,它运用人工智能技术基于从训练数据集中“学习”的模式,开发用于分类或预测结果变量的模型。多项研究从Kinect传感器数据开发了机器学习模型,根据从收集的数据中“学习”到的模式进行推理,以评估与运动有关的临床状况。这些研究包括使用自动评估临床参数,如病理步态^[19]、脑卒中功能障碍^[19]、帕金森病^[20]和跌倒风险检测^[21]。

DANIEL等^[22]总结目前脑卒中上肢运动功能智能化评估系统在临床量表方面的选择,FMA-UE测试是最常用的测试(46%),ARAT、BBT和WMFT测试排名第2,使用频率为12.5%。各系统的准确性84%~96%,可以将评估时间减少82%~85%。

有多项研究开发了基于FMA-UE量表的自动评估系统。如KIM等^[23]使用主成分分析(principal component analysis, PCA)和人工神经网络(artificial neural network, ANN)进行基于Kinect位置数据和FMA-UE的脑卒中患者运动功能自动评估,结果表明,每个任务的预测准确率65%~87%,其中9个任务超过70%(总共13个任务),评估时间减少了82%。OTTEN等^[24]建立基于反向传播神经网络(back propagation neural network, BNN)的系统,通过使用Kinect和惯性测量单元的数据自动评估脑卒中患者的运动功能,结果表明,该系统根据FMA评估不同参与者(健康受试者和脑卒中患者),准确率范围为55%~96%,评估时间减少82%。LEE等^[25]提出新的基于规则的二值逻辑分类算法的自动FMA-UE

系统,该系统使79%FMA测试自动化具有较高的评分准确率(92%)和时间效率(临床医生所需时间减少85%)。多项研究研发基于Brunnstrom分期的自动评估系统。CAO等^[26]应用新的混合式深度网络,结合长期短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)和卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)在Brunnstrom阶段(Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ)的自动识别任务中,模型的平均准确率高达80%。ZHANG等^[27]使用可穿戴惯性测量装置采集运动信息,结果表明,提出的评价指标不仅能清楚地区分肢体功能障碍程度,而且与Brunnstrom恢复分期密切相关($r=0.86, P<0.001$)。该评价指标在使用K近邻分类器的情况下以82.1%的分类准确率,在Brunnstrom阶段自动分类中具有很大的应用潜力^[27]。ZHANG等^[28]采用PCA作为特征提取方法,对自适应神经模糊推理系统(adaptive neuro-fuzzy inference systems, ANFIS)进行系统建模。该系统能够根据Brunnstrom方法产生反映患者运动表现的量化结果,Brunnstrom分期的交叉验证正确率为87.5%。有3项研究应用WMFT对上肢功能进行自动评估。SHENG等^[29]提出了一种基于人工智能的方法来选择敏感的运动学指标,该指标可以区分脑卒中患者和健康受试者,所提出的方法已经过测试,并且在通过Kinect V2对26名参与者(10名健康受试者和16名脑卒中患者)进行上肢伸展运动时是有效的。此外,其他研究开发了基于BBT^[30]、上肢粗大运动功能量表(gross motor function measure, GMFM)^[31]、够物表现量表(reaching performance scale, RPS)^[32]的上肢测试系统。这些系统的自动化评分与视觉评分之间具有很高的统计相关性。

如上所述,上肢运动功能自动评估集中在FMA-UE、Brunnstrom和WMFT等量表的研究上,并且具有较高的评分准确性和时间效率。但是目前临床上应用广泛的FTHUE量表^[33]还未研究,可以考虑作为下一步的研究工作方向。

2 虚拟现实训练在脑卒中上肢康复中的研究

VR广泛应用于康复治疗各领域,包括脑卒中、帕金森病、多发性硬化等疾病的治疗^[34],并且越来越多地用于改善脑卒中患者上肢功能、认知功能、平衡功能和行走能力^[35]。2016年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》^[36],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。LAVER等^[37]的系统

评价显示,VR技术显著改善脑卒中患者的上肢功能和日常生活活动能力。MEKBIB等^[8]也指出VR训练能够改善脑卒中上肢运动障碍,并可能促进患者的活动能力和社会参与水平。与较短治疗时间相比,参与VR训练较长时间(超过15 h)更能改善脑卒中患者的上肢运动障碍和活动受限。大多数研究使用持续40~60 min的训练课程,训练频率为每周2~5次,总训练时间为2~8周。典型的训练剂量包括40~60 min,每周3~5次,持续3~6周^[38]。此外,亚急性期患者比慢性期患者更可能受益于虚拟现实疗法。这是因为脑可塑性和皮质重组通常在脑卒中发作后的几天或几周内达到较高水平。

自1990年以来,脑卒中康复虚拟环境中开始考虑与神经可塑性相关的促进因素^[39]。MAIER等^[6]指出与传统治疗相比,专门为神经康复研发的VR系统能够更有效地促进脑卒中上肢功能的恢复,其积极作用是结合神经康复原理促进运动学习的结果。此外,MAIER提出与VR训练相关的神经康复原则,包括任务导向实践、明确反馈、增加难度、隐性反馈、变量练习和促进使用患侧肢体的机制。VR训练的良好效果可能有如下原因^[8]:VR提供多种训练选项;治疗师可以根据患者的需要和实际运动能力选择不同类型的上肢治疗模式;自动调整训练强度和难度水平。此外,VR与多种类型的感觉反馈有关。由于脑卒中后内在反馈(触觉和本体感觉)可能受损,通常认为脑卒中患者受益于外在反馈,可以通过表现反馈(knowledge of performance, KP)或结果反馈(knowledge of result, KR)提供。

2.1 VR康复系统分为现成的商用视频游戏系统(commercial video gaming console, CVGC)和定制虚拟环境系统(custom-built virtual environment, CBVE)

CVGC系统包括任天堂Wii(Nintendo Wii)或Xbox Kinect,是运动控制的虚拟现实游戏机。如任天堂Wii的“切西瓜”等游戏。尽管CVGC系统易于使用、廉价且容易获得,但是游戏通常是健康人设计的,任务难度的水平较难根据脑卒中患者的需求和能力进行调整,对于患者极具挑战性。与之相反,定制CBVE系统内置的游戏通常是临床医生和其他技术人员合作设计,提供以患者为中心的训练和患者运动相关的自动数据记录系统。CBVE治疗系统通常包括重复性、强度、难度、动机和多种运动选项等特征,有助于促进脑卒中上肢运动功能的恢复^[8]。目前广州一康和深圳华鹊景医疗的康复机器人在临床上应用较为广泛。AŞKIN等^[40]使用基

于Kinect的虚拟现实游戏训练Xbox Kinect(Xbox 360, Microsoft, Redwood, WA, USA)进行脑卒中患者上肢训练。研究中这些游戏是名为“KineLabs”的自由软件平台的一部分,是由香港理工大学的研究小组专门开发用于帮助脑卒中患者进行康复训练,而不是商业化游戏。游戏尤其强调主动的肩部、肘部和手腕的运动。研究发现,与仅接受物理治疗的对照组(B组)相比,接受物理治疗和VR训练的治疗组(A组)在游戏评分方面有显著改善($P<0.05$),在组内分析中,A组在FMA-UE、BBT、运动力指数(motricity index, MI)的临床疗效指标均有统计学意义的改善。A组FMA-UE、MI、主动关节活动度(肩内收、肘伸展除外)与基线比较差异有统计学意义($P<0.05$)。研究结果提示,在慢性脑卒中患者中,辅助使用基于Kinect的VR训练有助于改善脑卒中上肢运动功能和主动关节活动度。此外,BRUNNER等^[41]比较脑卒中亚急性期上肢VR训练与时间匹配常规训练(conventional training, CT)的效果,将120例脑卒中后上肢运动功能障碍患者随机分配到VR或CT作为标准康复的辅助手段,训练包括4周内至少16次60 min的课程。VR训练使用YouGrabber系统(YouRehab有限公司,施利伦,瑞士),该系统由带传感器的数据手套、红外摄像机与个人计算机和屏幕结合的软件组成。它是为康复目的而开发的,治疗师可以根据患者的实际运动能力进行调整。不同的治疗模式包括伸展和抓握练习、选择性手指运动、旋后/旋前、全臂运动、单手或双手训练,以及视觉增强的运动,即可以在屏幕上进行视觉增强的运动。可以调整的游戏参数包括物体的速度、物体之间的间隔以及物体位置的分布。研究发现,2组ARAT的改善在干预后和随访评估中相似^[41]。结果表明,在脑卒中后亚急性期,额外的上肢VR与额外的CT训练同样有效^[41]。VR可以成为一种激励性训练,作为标准康复的补充。总而言之,运动学习和神经可塑性的原则为VR系统提供了概念基础,以神经康复原则为基础设计的VR系统可以最大限度地提高脑卒中后早期康复的潜力。

2.2 VR康复系统分为触控式和无触控式界面

触控式系统的接口必须与用户接触以激活交互过程,典型的例子是触觉手套。1项研究调查脑卒中患者使用触觉设备和3D视频游戏进行VR康复训练的疗效,患者玩屏幕上显示的台球游戏和砖块游戏,患者使用触觉设备用上肢控制球的运动,接受训练的患者在患侧上肢的手部灵活性、握力和运动控制方面显著改善^[42]。尽管该系统具有很高

的空间精度,不会被遮挡或误解姿势,但是可穿戴接口很难定制,成本很高。此外,触控式的界面会限制动作的自发性,这是有效康复的关键因素。另一方面,无触控式的界面即基于视觉的系统,在康复领域更为重要^[43]。在这些设备中,Microsoft Kinect 和 Leap Motion Controller 因其在准确性和适应性之间的折中而备受欢迎。Microsoft Kinect 可直接用全身动作来控制界面,常用于康复训练场景中。1 项研究调查亚急性期脑卒中患者使用 Microsoft Xbox 360 Kinect 视频游戏系统进行 VR 训练的情况,该训练注重上肢的双肩外展、内收和肘部屈伸的运动,结果发现,与仅接受常规疗法的患者相比,同时接受 VR 训练和常规疗法的患者 FMA-UE 分数显著改善^[44]。由此可见,无触控式界面的 VR 设备使用较为安全、可行性高且易掌握,有利于促进脑卒中患者上肢功能改善。

2.3 VR 康复系统分为近端运动(肩部和肘部)、远端运动(腕和手)和混合运动系统

多项研究提出针对上肢粗大功能的 VR 系统。SIN 和 LEE^[45]利用非沉浸式 VR 游戏的激励特性,提高脑卒中患者肩部、肘部、腕部各方向的主动关节活动度和手部灵巧度,且 fMRI 研究显示患者的功能性神经可塑性有所提高。多项研究提出针对上肢精细功能的 VR 系统。SCHUSTER 等^[46]采用虚拟手臂对脑卒中患者进行双手够取、抓握、打开动作训练,结果显示,患手功能明显改善,可能原因是训练能够激活相应脑区。AVOLA 等^[43]开发出三维沉浸式全身康复系统,该系统结合了 2 个自然用户界面,分别用于手部和身体建模,以及 1 个头戴式显示器,结果发现该系统可以显著改善脑卒中患者的技能和参与度。由此可见,近端、远端和混合运动系统均能有效改善脑卒中患者的上肢功能^[45]。

综上所述,尽管市面上已经有很多类型的脑卒中 VR 康复设备,但是很多研究只是单纯的设计游戏,没有按照患者的恢复进程促进功能康复。如 HUANG 等^[47]根据运动功能恢复的阶段(Brunnstrom 分期)设计 3 个难度等级的康复训练,但是治疗分级较为粗略,评估与治疗分离。此外,虽然有的 VR 设备系统康复评估和训练一体化,但是没有实现康复评估与康复训练紧密结合。如 BAI 等^[48]提出 FMA-UE 量表与上肢可达工作空间包络面相对表面积(relative surface area, RSA)相结合的评定方法,并设计了多种虚拟场景,但是只是将 FMA-UE 量表作为评估手段,并没有与训练密切结合。因此,需要进一步研发融合上肢与手功能训练、评估与治疗紧密

结合的 VR 设备。

3 讨论

脑卒中是导致功能障碍的主要原因之一。大多数患者无法实现上肢功能的最佳恢复。因此,患者在日常生活中通常会遇到困难,改善脑卒中上肢的功能性使用至关重要^[8]。在脑卒中康复过程中,许多治疗方法被用来促进康复。研究显示,强制性诱导运动疗法、镜像疗法、高强度重复性任务训练、作业治疗和物理治疗等传统疗法均有助于改善脑卒中患者的上肢运动障碍。然而,这些方法治疗周期长,患者依从性差。此外,由于医疗费用增加,或无法获得康复专家的帮助,脑卒中患者尤其需要低成本的激励性康复技术^[8]。

神经康复策略旨在通过促进运动学习和增强神经可塑性来促进功能恢复^[40]。运动学习取决于练习的动作类型、强度、环境以及反馈,这些关键要素需要整合到康复模式中,以最大限度地发挥神经机制的作用。因此,训练应具有挑战性、重复性、激励性、显著性和强化性,以促进参与运动控制和学习的神经重组过程^[40]。除了上述原则外,VR 以及增强反馈还可以通过整合感觉、认知和感知-运动通路来丰富训练环境。因此,与传统的康复干预相比,VR 更能提供上述神经可塑性的关键组成部分,以促进功能恢复结果。

VR 训练的虚拟环境可以促进身体的运动错觉,增强沉浸感,促进感觉运动及认知相关脑区的激活,促进大脑神经重塑^[49]。HAO 等^[50]指出,VR 干预后的主要神经生理学改变包括:① 改善半球间平衡。在脑卒中早期阶段,对侧健侧感觉运动区(primary sensorimotor cortex, SM1)的过度激活通常是由患侧肢体运动引起的。来自受损半球的抑制信号减少导致健侧半球的过度激活。经过一段时间的 VR 康复后,患侧肢体运动期间从对侧 SM1 到同侧 SM1 的激活转移反映了半球间平衡的改善。② 增强不同功能区之间的功能连接。脑卒中患者的同侧初级运动区(primary motor cortex, M1)与其他区域之间的半球内和半球间连接受损。使用 VR 干预后发现同侧 M1 和双侧 SM1、辅助运动区(supplementary motor area, SMA)、对侧 M1、双侧初级躯体感觉区(primary somatosensory cortex, S1)、同侧顶上回和小脑之间的功能连接增加。有效连接的改善表明 S1 促进了 M1,并且与行为结果呈正相关。③ 增加患侧肢体肌肉的皮质映射。在 VR 干预后,经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)映射区域

的增加影响了手部肌肉功能区,并改善了皮质运动兴奋性的对称性。TMS映射区域与功能结果之间存在显著相关性。④ 增加额叶皮层区域的激活。VR干预后额叶区域的激活增加可能反映了代偿性皮层重组,其中非运动区域自适应地参与运动功能恢复。前额叶皮质(pre-frontal cortex, PFC)的过度激活表明注意力资源在运动任务执行过程中的参与。⑤ 可能涉及镜像神经元系统。核心镜像神经元系统包括顶下小叶、腹侧运动前皮质和额下回;它更像是一个功能分布的网络,涉及初级和次级运动区域。运动观察、模仿和想象可以激活与执行类似的环路,为运动恢复方法提供有效的替代方法。在VR训练中,虚拟环境中的化身作为用户的外部代表,患者不仅在执行运动任务,而且还通过真实环境中的增强反馈信息观察和模仿运动。此外,通过镜像神经元促进到M1的直接输入,可以在虚拟环境中增强“模仿学习”。

与其他常规干预方法相比,VR训练存在诸多优势。例如,VR设备成本低,仅需一个屏幕硬件和VR软件系统即可实现。VR训练容易实现重复性任务,并且有利于减少治疗师的工作量。VR训练的游戏设定增加患者的兴趣和参与度。多项研究指出,VR康复应该遵循3个主要原则^[43,51-52]:① 训练能保持患者的积极性。练习应该有刺激性、动态、变化和有趣的互动环境。② 每项练习都应提供竞争性刺激,如具体的目标或评分机制。③ 治疗师根据患者的需要定制康复训练。每个患者都需要独特的交互、参数和目标,应客观评估患者的表现。

同样在VR训练中,上肢功能的精准评估至关重要。根据上肢功能的评估结果选择合适的训练方案尤其重要。尽管目前已经有公司研发基于FMA-UE、WMFT等量表的自动评估系统,精细运动的康复训练系统仍较少获得关注,可能是由于Microsoft Azure Kinect感应器对远端手腕和手指运动的识别率较低,缺乏精细运动相关训练游戏的开发,所以难以在精细运动的康复训练中取得明显效果。因此,在今后的研究中结合手势感应器(Leap Motion Controller)可以解决这个局限性。此外,目前VR训练中不会提示或阻止患者使用代偿性身体机制,如果在训练时能够自动识别患者的异常运动代偿模式,并且给予一定的视觉反馈和语音提示,更有助于患者避免代偿运动的出现。

目前国内外已经研发出各种脑卒中上肢功能的VR康复系统^[8,53],但是存在不足之处:① 缺乏以患者为中心的任务导向的个性化训练计划;② 较少

将手跟手臂作为一个整体研究对象;③ 功能障碍和临床疗效的评估较为主观;④ 评估与治疗没有紧密结合。而且,脑卒中上肢运动功能智能化评估集中在FMA-UE、Brunnstrom和WMFT等量表的研究上,临床上应用广泛的FTHUE量表还未研究。

FTHUE评估量表和基于FTHUE量表制定的一整套康复方案在临床上应用广泛。FTHUE量表评价脑卒中患者日常生活任务中使用上肢的功能,同时评估上肢、手及日常生活活动的功能。FTHUE康复方案是基于神经发育技巧和运动再学习理论创立的康复方法,该方法遵循神经发育顺序,如从近端到远端促进运动;也遵循运动再学习的理论,以作业与功能为导向,按照科学的运动学习方法对患者进行再教育以恢复其运动功能。以患者为中心的任务导向训练已被证明对脑卒中的上肢功能表现有效。将FTHUE康复方案和VR训练结合可以更有效地促进患者运动功能恢复。

未来的研究中可以根据FTHUE评估量表的客观评估结果选择对应的FTHUE康复方案,可以实现个性化训练方案的制定,有效实施康复训练的原则。此外,使用精度高的无标记感应技术(Microsoft Azure Kinect和Leap Motion Controller设备)研发的系统价格低廉、方便携带,适合社区或家庭场景使用。

综上所述,研发基于FTHUE量表的脑卒中患者上肢运动功能智能化评估和虚拟现实康复训练系统具有创新性。从社会方面来说,它可以有效缓解医疗资源不足的现状;从个人方面来说,将患者置身于虚拟系统之中,能够增加功能锻炼的趣味性和依从性,使得长期锻炼顺利坚持;该系统可以逐步发展成为为医护人员提供医疗支持、为患者提供康复服务的平台,因此具有重要的社会与经济价值。

参考文献

- [1] TEH W L, ABDIN E, VAINGANKAR J A, et al. Prevalence of stroke, risk factors, disability and care needs in older adults in Singapore: results from the WiSE study [J]. *BMJ Open*, 2018, 8(3):e020285.
- [2] SAPOSNIK G, TEASELL R, MAMDANI 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.
- [3] LANGHORNE P, BERNHARDT J, KWAKKEL G. Stroke rehabilitation [J]. *Lancet*, 2011, 377(9778):1693-1702.
- [4] MORRIS J H, VAN WIJCK F, JOICE S, et al. Predicting health related quality of life 6 months after stroke: the role of anxiety and upper limb dysfunction [J]. *Disabil Rehabil*, 2013, 35(4):291-299.

- [5] MAIER M, BALLESTER B R, VERSCHURE P F M J. Principles of neurorhabilitation after stroke based on motor learning and brain plasticity mechanisms [J]. *Front Syst Neurosci*, 2019, 13:74.
- [6] MAIER M, RUBIO BALLESTER B, DUFF A, et al. Effect of specific over nonspecific VR-based rehabilitation on poststroke motor recovery: a systematic meta-analysis [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2019, 33(2): 112-129.
- [7] 黄馨云, 吴梦蝶, 俞艳, 等. 客观评定方法在中风后上肢痉挛性瘫痪的应用进展[J]. *世界科学技术-中医药现代化*, 2017, 19(10): 1758-1763.
HUANG X Y, WU M D, YU Y, et al. Progresses in objective assessment tools to assess the subjects' function and spasticity of upper extremity after stroke [J]. *Mod Tradit Chin Med Mater Med World Sci Technol*, 2017, 19(10): 1758-1763.
- [8] MEKBIB D B, HAN J W, ZHANG L, et al. Virtual reality therapy for upper limb rehabilitation in patients with stroke: a meta-analysis of randomized clinical trials [J]. *Brain Inj*, 2020, 34(4): 456-465.
- [9] FELIPE F A, DE CARVALHO F O, SILVA É R, et al. Evaluation instruments for physical therapy using virtual reality in stroke patients: a systematic review [J]. *Physiotherapy*, 2020, 106: 194-210.
- [10] KWAKKEL G, VAN WEGEN E, BURRIDGE J H, et al. Standardized measurement of quality of upper limb movement after stroke: consensus-based core recommendations from the Second Stroke Recovery and Rehabilitation Roundtable [J]. *Int J Stroke*, 2019, 14(8): 783-791.
- [11] OLESH E V, YAKOVENKO S, GRITSENKO V. Automated assessment of upper extremity movement impairment due to stroke [J]. *PLoS One*, 2014, 9(8): e104487.
- [12] XIE Q R, SHENG B, HUANG J, et al. A pilot study of compensatory strategies for reach-to-grasp-pen in patients with stroke [J]. *Appl Bionics Biomech*, 2022, 2022: 6933043.
- [13] CLARK R A, PUA, FORTIN K, et al. Validity of the Microsoft Kinect for assessment of postural control [J]. *Gait Posture*, 2012, 36(3): 372-377.
- [14] GALNA B, BARRY G, JACKSON D, et al. Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease [J]. *Gait Posture*, 2014, 39(4): 1062-1068.
- [15] CAI L S, MA Y, XIONG S P, et al. Validity and reliability of upper limb functional assessment using the microsoft Kinect V2 sensor [J]. *Appl Bionics Biomech*, 2019, 2019: 7175240.
- [16] SCANO A, MOLteni F, MOLINARI TOSATTI L. Low-cost tracking systems allow fine biomechanical evaluation of upper-limb daily-life gestures in healthy people and post-stroke patients [J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(5): 1224.
- [17] HUSSAIN N, SUNNERHAGEN K S, ALT MURPHY M. End-point kinematics using virtual reality explaining upper limb impairment and activity capacity in stroke [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16(1): 82.
- [18] OZTURK A, TARTAR A, HUSEYINSINOGLU B E, et al. A clinically feasible kinematic assessment method of upper extremity motor function impairment after stroke [J]. *Measurement*, 2016, 80: 207-216.
- [19] KASTANIOTIS D, ECONOMOU G, FOTOPOULOS S, et al. Using Kinect for assessing the state of multiple sclerosis patients [C]//2014 4th International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare-Transforming Healthcare Through Innovations in Mobile and Wireless Technologies (MOBIHEALTH). Athens, Greece. IEEE, 2015: 164-167.
- [20] DAVID ARANGO PAREDES J, MUÑOZ B, AGREDO W, et al. A reliability assessment software using Kinect to complement the clinical evaluation of Parkinson's disease [C]//2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Milan, Italy. IEEE, 2015: 6860-6863.
- [21] RANTZ M, SKUBIC M, ABBOTT C, et al. Automated in-home fall risk assessment and detection sensor system for elders [J]. *Gerontologist*, 2015, 55(Suppl 1): S78-S87.
- [22] DANIEL OÑA SIMBAÑA E, SÁNCHEZ-HERRERA BAEZA P, JARDÓN HUETE A, et al. Review of automated systems for upper limbs functional assessment in neurorhabilitation [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 32352-32367.
- [23] KIM W S, CHO S, BAEK D, et al. Upper extremity functional evaluation by Fugl-Meyer assessment scoring using depth-sensing camera in hemiplegic stroke patients [J]. *PLoS One*, 2016, 11(7): e0158640.
- [24] OTTEN P, KIM J, SON S H. A framework to automate assessment of upper-limb motor function impairment: a feasibility study [J]. *Sensors (Basel)*, 2015, 15(8): 20097-20114.
- [25] LEE S, LEE Y S, KIM J. Automated evaluation of upper-limb motor function impairment using Fugl-Meyer assessment [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2018, 26(1): 125-134.
- [26] CAO L, FAN C J, WANG H R, et al. A novel combination model of convolutional neural network and long short-term memory network for upper limb evaluation using Kinect-based system [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 145227-145234.
- [27] ZHANG Z, FANG Q, GU X D. Objective assessment of upper-limb mobility for poststroke rehabilitation [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2016, 63(4): 859-868.
- [28] ZHANG Z, FANG Q, GU X D. Fuzzy inference system based automatic Brunnstrom stage classification for upper-extremity rehabilitation [J]. *Expert Syst Appl*, 2014, 41(4): 1973-1980.
- [29] SHENG B, WANG X B, XIONG S P, et al. Kinematic metrics for upper-limb functional assessment of stroke patients [C]//2019 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS). Shanghai, China. IEEE, 2020: 45-51.
- [30] CHO S, KIM W S, PAK N J, et al. Upper-limb function assessment using VBBTs for stroke patients [J]. *IEEE Comput Graph Appl*, 2016, 36(1): 70-78.
- [31] SEO N J, CROCHER V, SPAHO E, et al. Capturing upper limb gross motor categories using the Kinect® sensor [J]. *Am J Occup Ther*, 2019, 73(4): 7304205090p1-7304205090p10.
- [32] SCANO A, CHIAVENNA A, MALOSIO M, et al. Kinect V2 implementation and testing of the reaching performance scale for motor evaluation of patients with neurological impairment [J]. *Med Eng Phys*, 2018, 56: 54-58.
- [33] ROWE V T. Functional Test for the Hemiparetic Upper Extremity normative database [J]. *Am J Occup Ther*, 2013, 67(6): 717-721.

- [34] ROSE T, NAM C S, CHEN K B. Immersion of virtual reality for rehabilitation: review [J]. *Appl Ergon*, 2018, 69: 153–161.
- [35] ARAMAKI A L, SAMPAIO R F, REIS A C S, et al. Virtual reality in the rehabilitation of patients with stroke: an integrative review [J]. *Arq Neuropsiquiatr*, 2019, 77(4): 268–278.
- [36] WINSTEIN C J, 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 [J]. *Stroke*, 2016, 47(6): e98–e169.
- [37] LAVER K E, GEORGE S, THOMAS S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2011(9): CD008349.
- [38] KIPER P, SZCZUDLIK A, AGOSTINI M, et al. Virtual reality for upper limb rehabilitation in subacute and chronic stroke: a randomized controlled trial [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2018, 99(5): 834–842. e4.
- [39] FU M J, KNUTSON J S, CHAE J. Stroke rehabilitation using virtual environments [J]. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 2015, 26(4): 747–757.
- [40] AŞKIN A, ATAR E, KOÇYİĞİT H, et al. Effects of Kinect-based virtual reality game training on upper extremity motor recovery in chronic stroke [J]. *Somatosens Mot Res*, 2018, 35(1): 25–32.
- [41] BRUNNER I, SKOUEN J S, HOFSTAD H, et al. Virtual reality training for upper extremity in subacute stroke (VIRTUES): a multicenter RCT [J]. *Neurology*, 2017, 89(24): 2413–2421.
- [42] CHOI M J, KIM H, NAH H W, et al. Digital therapeutics: emerging new therapy for neurologic deficits after stroke [J]. *J Stroke*, 2019, 21(3): 242–258.
- [43] AVOLA D, CINQUE L, FORESTI G L, et al. An interactive and low-cost full body rehabilitation framework based on 3D immersive serious games [J]. *J Biomed Inform*, 2019, 89: 81–100.
- [44] IKBALI AFSAR S, MIRZAYEV I, UMIT YEMISCI O, et al. Virtual reality in upper extremity rehabilitation of stroke patients: a randomized controlled trial [J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2018, 27(12): 3473–3478.
- [45] SIN H, LEE G. Additional virtual reality training using Xbox Kinect in stroke survivors with hemiplegia [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2013, 92(10): 871–880.
- [46] 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.
- [47] HUANG L L, CHEN M H, WANG C H, et al. Developing a digital game for domestic stroke patients' upper extremity rehabilitation—design and usability assessment [M]//*Universal Access in Human-Computer Interaction. Access to Learning, Health and Well-Being*. Cham: Springer International Publishing, 2015: 454–461.
- [48] BAI J, SONG A G. Development of a novel home based multi-scene upper limb rehabilitation training and evaluation system for post-stroke patients [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 9667–9677.
- [49] WU J L, ZENG A H, CHEN Z Y, et al. Effects of virtual reality training on upper limb function and balance in stroke patients: systematic review and meta-meta-analysis [J]. *J Med Internet Res*, 2021, 23(10): e31051.
- [50] HAO J, XIE H Y, HARP K, et al. Effects of virtual reality intervention on neural plasticity in stroke rehabilitation: a systematic review [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2022, 103(3): 523–541.
- [51] LEWIS G N, ROSIE J A. Virtual reality games for movement rehabilitation in neurological conditions: how do we meet the needs and expectations of the users? [J]. *Disabil Rehabil*, 2012, 34(22): 1880–1886.
- [52] SHIN J H, RYU H, JANG S H. A task-specific interactive game-based virtual reality rehabilitation system for patients with stroke: a usability test and two clinical experiments [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2014, 11: 32.
- [53] 黄静, 魏智真, 李国翠, 等. 结合 Kinect 的上肢运动康复系统的研究进展 [J]. *中国康复医学杂志*, 2017, 32(9): 1082–1086.
HUANG J, WEI Z Z, LI G C, et al. Research progress of upper limb exercise rehabilitation system combined with Kinect [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2017, 32(9): 1082–1086.

Research Progress of Intelligent Evaluation and Virtual Reality Based Training in Upper Limb Rehabilitation after Stroke

XIE Qirong^{1,2}, LIN Wanqi³, ZHANG Qi^{1,2}, SHENG Bo⁴, ZHANG Yanxin⁵, HUANG Jia^{1,2*}

¹ College of Rehabilitation Medicine, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou, Fujian 350122, China;

² Key Laboratory of Orthopedics & Traumatology of Traditional Chinese Medicine, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou, Fujian 350122, China;

³ College of Integrated Chinese and Western Medicine, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou, Fujian 350122, China;

⁴ School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

⁵ Department of Exercise Science, The University of Auckland, Auckland 1142, New Zealand

*Correspondence: HUANG Jia, E-mail: jasmine1874@163.com

ABSTRACT Stroke is the leading cause of disability worldwide, with approximately 85% of poststroke patients experiencing upper extremity dysfunction at first presentation and only 5% to 20% fully recovered at six months post-stroke. As a result, patients often experience difficulties in daily life, and improving the functional use of the upper extremities in poststroke patients is critical. Accurate assessment and training of motor function in stroke patients is essential. Integrating motor assessment with clinical assessment scales is vital to the comprehensive evaluation of upper limb function aspects fully. Markerless sensing techniques are used to assess typical motor abilities of the upper extremity in poststroke patients, such as range of motion, coordination, grip strength, or fine manual dexterity. Automated assessment of upper extremity motor function based on machine learning algorithms with markerless sensing techniques has focused on the Fugl-Meyer assessment of upper extremity (FMA-UE), Brunnstrom stages, and Wolf motor function test (WMFT) scales and has been proved with high-scoring accuracy and time efficiency. In addition, virtual reality (VR) training designed for neurorehabilitation can effectively promote recovery of upper limb function after stroke. The principles of neurorehabilitation associated with it include task-oriented practice, explicit feedback, increased difficulty, implicit feedback, variable practice, and mechanisms to promote the use of the affected limb. The effectiveness of VR training is the result of the advantage of the technology combined with neurorehabilitation principles to promote motor learning and functional recovery. VR rehabilitation systems can be divided into off-the-shelf commercial video game systems and custom virtual environment systems; touch and touchless interfaces; proximal movement (shoulder and elbow), distal movement (wrist and hand), and hybrid movement systems. Various VR rehabilitation systems for upper limb function in stroke have been developed at home and abroad, but there are shortcomings: 1) lack of patient-centered task-oriented personalized training plans; 2) less frequent use of the hand and arm as a whole in the research; 3) more subjective assessment of functional impairment and clinical outcome; 4) no close integration between rehabilitation assessment and treatment. Moreover, the intelligent assessment of upper limb motor function in stroke has focused on the FMA-UE, Brunnstrom, and WMFT scales, and the functional test for the hemiplegic upper extremity (FTHUE) scale, which is widely used in clinical practice, has not been studied. The FTHUE assessment scale and a set of rehabilitation programs based on the FTHUE scale are commonly used in clinical practice. Combining the FTHUE rehabilitation program with VR training can more effectively promote patients' motor function recovery. Future research can select the corresponding FTHUE rehabilitation program based on the objective assessment results of the FTHUE scale, which can enable the development of individualized training programs and effectively integrate the principles of rehabilitation training. In addition, systems developed using markerless sensing technology with high accuracy (Microsoft Azure Kinect and Leap Motion Controller devices) are inexpensive, portable, and suitable for community or home scenarios. This paper reviews the current research progress of VR training devices and intelligent assessment systems for upper limbs in stroke and the limitations of existing devices. It proposes a design concept to achieve a close connection between intellectual assessment and treatment of upper limb motor function in poststroke patients based on the FTHUE scale while integrating assessment and treatment of upper limbs and hands. It aims to provide reference ideas for developing intelligent devices for upper limb rehabilitation.

KEY WORDS stroke; upper limb function; virtual reality training; intelligent evaluation; kinematics evaluation

DOI:10.3724/SP.J.1329.2023.03011