

虚拟现实技术在神经运动康复中的应用综述

萧演清^{1,2)}, 白洪铭¹⁾, 郑佳³⁾, 李中原⁴⁾, 李晓光²⁾, 郝爱民¹⁾, 高阳^{1)*}

¹⁾(北京航空航天大学虚拟现实技术与系统全国重点实验室 北京 100191)

²⁾(北京航空航天大学生物与医学工程学院生物材料与神经再生北京市重点实验室 北京 100191)

³⁾(首都医科大学北京儿童医院心脏中心 北京 100045)

⁴⁾(解放军总医院第七医学中心儿科医学部 北京 100007)

(gaoyangvr@buaa.edu.cn)

摘要: 作为典型的医工交叉应用, 基于虚拟现实(VR)的运动康复技术研究近年来获得了越来越多学者的关注. 通过对近年来相关研究工作的梳理总结, 首先分析了 VR 技术改善运动神经功能的 3 个出发点: 一是利用 VR 优化运动想象效果, 二是虚拟环境可提供重复性任务训练, 三是虚拟学习任务向现实世界中的迁移. 随后, 总结了设计虚拟康复环境时所需考虑的 3 个核心要素: 运动的可视化呈现、即时的行为反馈机制和丰富的上下文信息. 接着, 回顾了虚拟现实在脑卒中及脊髓损伤等神经损伤康复中的最新应用进展, 展示了 VR 康复技术的临床潜力和初步成效. 最后, 归纳总结了虚拟现实在神经康复应用中面临的核心问题: 深入理解 VR 中各种感官信息在产生神经过程中的关键影响机制, 是充分发掘 VR 技术应用潜力的关键所在. 综述旨在为虚拟现实在神经运动康复领域的临床应用与实验研究提供理论支撑与技术参考.

关键词: 虚拟现实; 神经康复; 运动想象; 运动可视化

中图分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2024.2024-00278

Review of the Application of Virtual Reality in Neuromotor Rehabilitation

Xiao Yanqing^{1,2)}, Bai Hongming¹⁾, Zheng Jia³⁾, Li Zhongyuan⁴⁾, Li Xiaoguang²⁾, Hao Aimin¹⁾, and Gao Yang^{1)*}

¹⁾(State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191)

²⁾(School of Biological Science and Medical Engineering and Beijing Key Laboratory for Biomaterials and Neural Regeneration, Beihang University, Beijing 100191)

³⁾(Cardiac Center, Beijing Children's Hospital, Capital Medical University, Beijing 100045)

⁴⁾(Department of Pediatric Medicine, Seventh Medical Center, PLA General Hospital, Beijing 100007)

Abstract: As a typical cross-application between medicine and industry, the study of motion rehabilitation technology based on virtual reality (VR) has attracted more and more scholars' attention recently. Based on the review of relevant research work, this paper firstly analyzes three starting points for VR technology to improve motor nerve function: first, VR is used to optimize the motor imagination effect; second, virtual environment can provide repetitive task training; third, virtual learning tasks are transferred to the real environment. Then, it summarizes three core elements that should be considered when designing virtual rehabilitation environment: visual presentation of movement, immediate behavioral feedback mechanism, and rich contextual information. The latest applications of VR in the rehabilitation of neurological injuries such

收稿日期: 2024-06-05; 修回日期: 2024-08-30. 基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3604500); 国家自然科学基金(L2324214). 萧演清(1981—), 女, 博士, 康复主治医师, 主要研究方向为运动神经康复; 白洪铭(2000—), 男, 在校学生, 主要研究方向为基于 VR 的智能运动康复; 郑佳(1981—), 男, 博士, 副主任医师, 主要研究方向为心脑血管康复; 李中原(1990—), 男, 硕士, 主治医师, 主要研究方向为儿童认知康复; 李晓光(1959—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为神经康复; 郝爱民(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为虚拟医疗康复应用技术; 高阳(1989—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, CCF 会员, 论文通信作者, 主要研究方向为计算机图形学与虚拟医疗康复应用技术.

as stroke and spinal cord injury are then reviewed, and the clinical potential and initial results of VR rehabilitation technology were demonstrated. Finally, the core problems faced by VR of neurological rehabilitation are summarized: In-depth understanding of the key influence mechanism of various sensory information in VR in the neural process is the key to fully explore the potential of VR technology. The purpose of this review is to provide theoretical support and technical reference for the clinical application and research of VR in the field of neurorehabilitation.

Key words: virtual reality; neurorehabilitation; motor imagery; motor visualization

虚拟现实(virtual reality, VR)通过信息技术生成虚拟 3D 环境, 为用户提供逼真的临场感和视觉、听觉、本体觉等多感官体验. 人们对 VR 潜力的认识最初源于军事工业中使用模拟设备进行感觉运动训练和远程控制程序的实践^[1]. 随着 VR 应用技术的快速发展, 其在各种临床应用场景中的适应性吸引了众多医疗专业人员的关注^[2]. VR 通过提供交互式、沉浸式和多感官的模拟环境, 在一定程度上与具体的现实生活体验相匹配^[3-5], 且可忽略用户的位置和健康状况的影响. 不同类型的 VR 方案常用于诱导或促进神经再生和可塑性的过程^[6], 这种基于互动的技术增加了用户的参与动机和沉浸度^[7-10], 提高了对治疗的依从性, 特别是在康复计划需要重复运动或进行多个训练项时^[11-12]. VR 作为一种新型信息化工具可用于各种神经系统疾病的临床康复, 以改善创伤性脑损伤后的身体和认知功能^[13], 其在脑卒中、脑瘫和脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)后的平衡和步态恢复中也发挥着改善作用^[14,14-16]. 本文针对 VR 在神经康复中的机制、虚拟康复环境要素以及 VR 在临床神经康复中的应用进行综述.

1 VR 训练对神经功能恢复的临床机制

目前, 诸多研究揭示了基于 VR 的干预措施在运动神经功能障碍患者中的潜在临床价值, 图 1 中概括了 VR 训练对恢复神经功能的相关机制. 如镜像神经元疗法中的神经生理学和行为学特征也能够便捷地融入 VR 技术中, 如运动观察^[17-19]、运动想象(motor imagery, MI)^[20]、重复集体练习和模仿疗法^[21], 从而优化训练体验. 这一技术使得临床医生能够利用 VR 中的感觉刺激, 并将其作为促进关键大脑网络激活(如运动区域)的工具, 这些大脑网络对神经功能恢复至关重要.

功能恢复的潜力可以利用脑损伤后发生的多

种神经生理学过程得到优化. 具体表现在恢复阶段的早期阶段, 感觉运动区域在缺乏使用时可能遭受废用性退化, VR 技术可引发代偿性神经可塑性变化, 促进患者的康复进程.

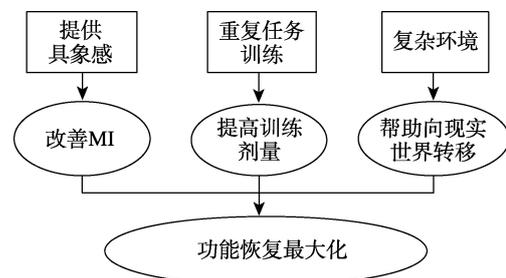


图 1 VR 训练对神经功能恢复的机制示意图

1.1 VR 改善 MI

MI 指个体在身体静止状态下, 通过心理活动模拟运动行为的能力. 在康复过程中, MI 通过激活未受损神经元并增强其他神经元网络的大脑活动, 促进损伤脑区的功能重组^[22-24], 使其成为早期积极康复训练的潜在有效手段. 然而, 尽管 MI 在脑卒中康复中具有潜在益处, 但在脑卒中的早期阶段, 由于 MI 能力受损, 其可能并不适用于所有急性脑卒中患者的康复^[25-26].

VR 技术能够通过视觉诱导产生真实运动的错觉, 同时减少外部环境干扰, 提升脑卒中患者的 MI 能力^[27-29], 使得脑卒中患者更容易执行 MI 任务. 因此, VR 技术在帮助脑卒中患者执行 MI 任务方面逐渐受到重视^[30-31].

通常, MI 分为视觉 MI (visual MI, VMI) 和动觉 MI (kinesthetic MI, KMI) 这 2 种类型^[32]. KMI 要求参与者以第一人称视角在心理上模拟或排练自身肢体或身体其他部分的运动过程, 而不是实际进行身体运动^[32-33], 其涉及对肌肉收缩运动和感觉的心理表征, 同时抑制实际动作的执行^[34]. 这种矛盾的过程涉及非自然的心理活动, 对动作的执行和控制提出了挑战^[35]. VMI 要求参与者从第三人称视角

在心理上想象特定肢体或其他身体部分的行为,从而在大脑中构建清晰的心理图像^[36]。与 VMI 相比, KMI 能够增强大脑运动皮层的兴奋性^[37-38],且其能力与脑运动皮层的兴奋性密切相关^[39];另外, KMI 更难以想象且准确性较低^[40-41],对其改善的方法也较为有限^[42-44]。因此,探索并优化提升 KMI 能力的方法对于患者康复具有重要意义。

增强 MI 的一种有效方法是动作观察,即观察与 MI 任务相关的身体部位的运动^[45-46]。已有研究表明,基于 VR 的动作观察能够通过提供丰富的视觉信息和具身感(sense of embodiment, SOE)以增强 MI 的效果^[28,47]。特别地, Lakshminarayanan 等^[47]发现,与无视觉表现相比,参与者在 VR 环境下表现出更强烈的 KMI 诱导事件相关去同步现象(event-related desynchronization, ERD)。当参与者在沉浸式 VR 环境中观察运动任务时,所产生的强烈的身体所有权感能够潜在地增强参与执行运动任务身体部位的 KMI^[48-49],这一发现为利用 VR 技术改善脑卒中患者的 MI 能力提供了重要依据。

在 VR 技术中, SOE 作为错觉增强 MI 能力的关键因素已被广泛研究^[28]。SOE 指拥有和控制身体相关的感觉集合,它包含自我定位感、控制权感和身体所有权感^[50]这 3 个子部分。自我定位感指个体感知到自我位于本体或虚拟化身内部的状态,这种感知高度依赖于视觉空间视角,因为视觉信息通常是以自我为中心的。研究表明,与第三人称视角相比,第一人称视角更能引发对人体威胁的生理反应^[51-52]。此外,同步的视触觉相关性,即眼睛从第一人称视角看到触觉事件,能够进一步加强这种自我定位感。控制权感涉及整体运动控制的主观体验,包括控制、意图、运动选择和意志的意识体验^[53],这种感知来源于预测感觉结果与实际感觉结果之间的比较^[54]。当行动的预测结果与实际结果相匹配时,如在主动运动下与同步视觉运动相关性的匹配中,人们会感觉自己成为这些行动的控制人。在 VR 环境中,当参与者的运动被实时或接近实时地映射到虚拟身体上时,控制权感容易被激发^[55]。身体所有权感指个体将某个身体视为自己一部分的心理状态^[56],它涉及身体的占有性,即身体是感觉经验的来源^[57]。从自下而上的角度看,增加生物身体与虚拟化身之间的感觉相关性,如视触觉和视觉本体感受的同步,可以增强身体所有权感;自上而下的影响则通过最大化生物身体与虚拟身体之间的形态相似性,促进对虚拟身体的所有权感知。此外,身体部位的运动与

控制权感更直接相关,并且已被证明它能够进一步增强具身感,其错觉影响可能超过视觉触觉刺激,因为前者同时涉及控制权感和身体所有权感^[56-58]。

在虚拟世界中,个体的自我表征不仅为视觉运动任务提供参考点,而且其形态本身可能具有行为意义。已有的动作观察和 MI 研究指出,修改运动参数,如作用力、肌肉收缩特征、肢体运动轨迹和物体质量的视觉刺激,可以调节皮质脊髓兴奋性或主要运动皮层区域的活性^[59-61]。

之前的研究表明^[62],严重下肢瘫痪的患者在沉浸式 VR 环境中经历了强烈的身体所有权感和生动的运动错觉,可显著地改善脑卒中患者的 MI 表现。更重要的是,在 7 天的随访中,大多数患者报告了经常回忆 VR 场景并自发练习动作的行为,表明短期的 VR 训练能够帮助患者建立稳定和持久的运动记忆,这种记忆效应在训练后持续存在,对患者的 MI 能力产生积极影响。即使在训练结束后,患者仍然能够保留对训练内容的记忆,并在日常生活中积极参与相关的 MI 练习^[62]。

1.2 VR 提供重复任务训练环境

重复任务训练在康复医学领域已被证实能有效地改善步行距离、速度以及上肢运动功能^[63-64]。对于动物的研究亦表明,在复杂环境中训练比在基础环境中训练更能促进执行功能任务的能力^[65]。作为一种新兴技术,VR 利用计算机硬件和软件创建的交互式模拟,为用户提供现实世界物体和事件的虚拟镜像,具备为脑卒中患者提供丰富训练环境的潜力。VR 能够模拟实践功能任务,且可提供的训练剂量远超传统疗法^[66-70]。

多项研究强调了 VR 训练展现出的激励性与愉悦性特征。部分前沿研究更进一步指出,与传统的治疗练习模式相比,VR 干预方式在吸引力和患者参与度方面展现出了更为显著的优势^[71-73]。尽管一些患者担心参与的康复计划可能因技术新颖性而对其操作难度产生畏惧,但后续的多项深入研究报告明确表明,VR 技术在实际应用中不仅被广泛接受,而且其操作界面友好,易于患者上手使用^[74]。

作为一种创新的治疗手段,VR 的潜力是通过提供沉浸式体验增加治疗效果。Laver 等^[75]针对上肢功能恢复效果进行了详尽的分析,涵盖 12 项研究,以及总计 397 名参与者的数据,该综述文献揭示了 VR 干预相较于传统治疗模式在促进上肢功能恢复方面展现出的更为显著的疗效。然而,随着研究的深入与数据的累积,Laver 等^[76]在 3 年后的综述文献中纳入了更广泛的研究样本,包括 22 项

研究共计 1 033 名参与者;且该文献中未能重复先前关于上肢功能效果显著性的结论,显示出在结果方向上的重大转变,这一发现对临床医生具有重要的实际意义,提示人们在评估 VR 疗法效果时须持谨慎态度,并考虑不同研究间的差异性和潜在影响因素.文献[76]指出,提供超过 15 h 干预的实验似乎为患者带来了更大的益处,提示了治疗时间与效果之间可能存在的复杂关系.虽然更长时间的 VR 干预似乎能带来更显著的改善效果,但这种相关性在统计学上并未达到显著性水平,表明其效应大小可能受到多种因素的调节.此外,当前的综述并未明确揭示在康复过程中使用 VR 干预的最佳时机,即是在脑卒中后的早期阶段还是慢性阶段实施更为有效,强调未来需进一步探索 VR 疗法的最佳应用时机,以优化其治疗效果.

1.3 VR 辅助学习任务向现实世界迁移

在脑卒中后上肢康复中,实现康复后功能向日常活动转移的训练尤为重要.约束诱导运动疗法(constraint-induced movement therapy, CIMT)通过约束偏瘫上肢,结合重复任务和塑形练习,着重强调在现实世界中提升偏瘫上肢的顺应性和使用能力的转移,构成了采用 CIMT 后改善功能恢复的关键环节^[77].因此,如何将基于重复运动的新型康复治疗方法有效地转移到现实世界中,如机器人辅助上肢复和基于 VR 的康复疗法,成为当前研究的重要方向^[78-79].

在其他不同领域的应用中,VR 中的学习或训练向现实世界的迁移效果已有大量实证研究^[80-84].例如,体育专业人士越来越多地使用 VR 训练和评估基于技能的运动.Oagaz 等^[81]开发一种 VR 乒乓球系统,将定制的物理特性与逼真的视听刺激、触觉和动作捕捉相结合,增强 VR 沉浸感并收集有关球员姿势和技术的信息,通过比较未接受培训的对照组和在 VR 中进行 5 次训练的实验组之间的真实乒乓球表现,评估技能获取和训练转移.VR 被用于智力障碍患者在虚拟环境中进行废物管理培训干预^[84],其中包括 18 名患有不同严重程度智力障碍的参与者,要求将 90 件物品分类到 3 个箱子中,通过测量参与者在现实世界中的表现发现,随着培训的进行,测试前后参与者的表现在有显著提高.这些研究结果支持了这样一种观点:复杂的技能可以在 VR 中学习,并且获得的技能可以转移到现实世界中.

目前,关于 VR 中的学习成果向现实世界的迁移效果仍存在不确定性.Rose 等^[85]的研究表明,

VR 与现实世界下进行简单感觉运动任务训练的效果相当;然而,近期多项研究^[86-89]指出,VR 中的训练效果并不能显著地转化为现实世界中的更优表现.利用 2D 平板显示器结合深度传感相机模拟的虚拟组块测试(box and block test, BBT)研究,旨在分析 VR 条件下操作性能与真实物理环境之间的对应关系^[90],结果显示,与传统的 2D 平板显示器相比,尽管头戴式显示器(head mounted display, HMD)技术在增强用户深度感知体验方面已经展现出一定的优势,但当前 VR 技术在模拟现实世界深度信息方面仍需进一步优化,这种优化不仅有助于提升 VR 环境的真实感,也有利于增强用户的沉浸体验^[91].

为了提升 VR 中的深度感知,可能的策略包括对象遮挡、光影效果、着色处理,以及根据深度、透视投影和运动视差对对象进行相对缩放^[92].此外,通过增强 VR 中的交互体验,如触摸对象时的视觉反馈(如颜色变化)或听觉反馈,可以进一步提高 VR 训练的逼真度和用户参与度.Ebrahimi 等^[93]的研究证明,在带有 HMD 的沉浸式 VR 环境中进行触达和定点任务时,与无反馈情况相比,添加视觉反馈能够显著地减少错误并缩短完成任务的时间.Ranganathan 等^[94]提出,将 VR 交互维度与现实世界中任务的控制维度相匹配,有助于提升 VR 康复效果的传递效率.

VR 在提升患者环境互动和移动能力方面具有显著作用.对于完全 SCI 的患者而言,轮椅的使用是不可避免的,熟练地使用轮椅是完成康复路径的重要一环,而实现这一目标却颇具挑战.通过将标准康复与基于 VR 的空间导航方案及虚拟物体交互相结合,可以有效地促进轮椅的使用^[95].进一步,为了克服社会孤立并增强患者的自我效能,提高患者独立驾驶车辆的能力也可以帮助他们重新融入社会.在此情境下,VR 亦被证实为一种有效工具,允许在安全的环境中模拟危险情境,并为患者提供驾驶车辆的训练机会^[8].步态和平衡障碍在包括脑卒中在内的神经系统疾病中很常见,会对患者的生活质量产生负面影响.改善平衡步态是康复的主要目标之一,而在患者的家庭环境中进行训练是一个有效的方法.在过去 10 年中,VR 和增强现实(augmented reality, AR)等信息技术的发展,使医院外步态和平衡训练成为可能.Held 等^[96]将移动 AR 技术与基于传感器的动作捕捉系统相结合,实时地提供对步态表现的细粒度反馈.

本文对 VR 训练对神经功能恢复作用的代表性文献进行总结,如表 1 所示.

表 1 VR 训练对神经功能恢复作用总结

文献	方法	作用
Ziadeh 等 ^[28]	健康参与者分别控制虚拟化身和虚拟方块弹气球	增强沉浸感, 提高身体所有权感
Choi 等 ^[29]	参与者分别通过 VR 和 2D 平板显示器观察动作, 分析其脑电信号	有效地改善运动观察训练
Škola 等 ^[30]	采用一种在沉浸式 VR 中进行游戏化 MI 的训练方法	产生显著的积极影响, 有较高的身体所有权感
Lin 等 ^[31]	开发一款基于 VR 的上肢投篮康复系统, 收集患者的肌电数据	结合肌电反馈, 基于 VR 的训练可能会显著提高康复疗效
Lakshminarayanan 等 ^[47]	15 名参与者在 VR 和非 VR 条件下, 对 3 项手部运动进行观察	基于 VR 的动作观察, 可以增强 KMI 诱导的 ERD 反应
Škola 等 ^[49]	30 名参与者在 VR 和非 VR 条件下进行动作观察训练	基于 VR 的训练可以产生更强的身体所有权感
Xiao 等 ^[62]	开发了一款结合 VR 和肌电控制的康复系统	产生强烈的身体所有权感和生动的运动错觉, 形成运动记忆
Merians 等 ^[69]	3 名脑卒中患者进行 14 天的实物训练和 VR 训练	VR 训练通过提升训练量, 可能有助于加强上肢康复
Rose 等 ^[85]	比较虚拟训练、现实训练和未训练后的表现	虚拟训练后的任务表现与实际训练效果相当

2 虚拟康复环境设计要素

如前所述, VR 提供的 SOE 已被证实对虚拟运动康复具有重要影响, 而虚拟康复系统的设计则直接决定了这一沉浸式体验的质量. 如图 2 所示, 针对空间存在感、参与度和真实性, 虚拟康复系统为患者提供 3 种核心类型的要素: 运动可视化(movement visualization, MV), 行为反馈和上下文信息^[97].

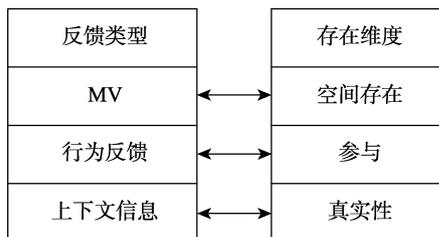


图 2 反馈类型及其相应的存在维度

在运动任务执行过程中, 通过实时捕获和追踪虚拟环境中患者的运动即可实现实时的 MV, 这种可视化不仅有助于患者直观地理解自己的运动模式, 还能提升患者的参与度和积极性. 根据任务完成情况, 通过一种或多种感觉模式(如视觉、听觉、触觉等)向患者传递关于已实现目标或所需运动调整的信息, 进一步实现行为反馈. 基于运动学习理论进行设计和实施^[98]的行为反馈, 对于患者了解自身表现、调整运动策略至关重要. MV 与行为反馈这 2 种 VR 特性嵌入到一个虚拟世界中, 即实现了上下文信息关联. 上下文信息的选择和设计需要考虑患者的需求、康复目标和兴趣偏好.

在 VR 下肢康复的研究中, 行为反馈通常是研究最深入的类型, 因为它直接关联运动学习的效率和效果. 然而, MV 虽然不直接用于治疗目的, 但是在某些特定疗法(如镜像治疗或心理训练)中,

可视化信息对于中枢感觉刺激和治疗具有显著的作用. 身体运动的观察或想象已被证实能够促进运动恢复^[99-101], 这为皮层重组和功能活动的增强提供了新的可能. 因此, 作为 VR 康复系统的一个重要组成部分, MV 在运动康复中的潜在作用不容忽视^[102-104], 但目前尚未对该问题进行深入和系统的研究^[105].

2.1 要素 1: MV

在虚拟康复系统中, MV 扮演着至关重要的角色, 通过捕获患者的运动动作并将其转化为同步可视化虚拟对象, 可以在 VR 环境中实现对患者运动的直观表示. 这种表示形式通常采取拟人化身形式, 患者可以从第一人称或第三人称视角进行观察, 依赖 MV 定位自身并操纵虚拟物体. 由于环境的动作感知是通过视觉表征体验的, 因此当患者能够利用 MV 表达自己的运动意图时, 可深入地感受到空间的存在.

观察虚拟康复场景中的 MV 对运动学习具有直接影响, 能够激发皮层运动区的中枢刺激. 神经生理学研究表明, 观察虚拟肢体运动能够刺激皮质活动, 其效果与在镜子中观察真实肢体相似^[106]. 据此推测, 观察虚拟肢体运动可能促进因脑卒中直接或间接影响的神经元系统功能的重组^[102]. 因此, 在训练过程中进行运动的同时观察其可视化表示, 可能会得到额外的运动学习效果. Ferreira dos Santo 等^[97]认为在观察 MV 的过程中, 空间存在的体验会调节运动区域的中枢刺激, 并预测空间存在与中枢刺激之间有正相关关系, 强调了空间存在感在虚拟康复中对于运动学习的重要性. 本文对可视化中的沉浸方式、光流和化身 3 个方面进行讨论.

2.1.1 非沉浸式与沉浸式 VR 的比较研究

非沉浸式 VR 允许用户以观察者的身份体验虚

拟环境, 并通过传感器与虚拟环境进行交互, 在一定程度上降低了用户在虚拟世界中的沉浸感^[107]; 其主要体现在用户能够控制并感知虚拟环境中的声音、视觉和触觉刺激. 非沉浸式 VR 系统依赖计算机、平板电脑、显示器, 以及如键盘、鼠标和控制器等传统输入设备, 并可进一步借助手柄、踏板等物理输入设备增强用户体验. 为了提升沉浸感, 部分非沉浸式 VR 应用提供第一人称视角, 使用户能够与虚拟化身建立关联. 此外, 立体视觉技术的应用使得用户能够通过特殊观察设备在 2D 平板显示器上感受到 3D 的立体效果^[108-109].

相对而言, 沉浸式 VR 则显著地提升了用户的存在感, 使用户仿佛置身于虚拟环境之中, 更易于与虚拟环境中的视觉、听觉和触觉刺激进行交互. 沉浸式 VR 的目标是让用户在虚拟环境中获得与现实世界相媲美的多模态感官体验, 通过 HMD、跟踪设备、触觉反馈和数据手套等设备, 用户能够完全融入虚拟环境, 并与其中的元素进行自然交互. 然而, 现实世界中的感官体验丰富多样, 包括嗅觉、味觉等, 而这些在虚拟环境中难以完全模拟, 因此可能加剧虚拟与现实之间的差距^[110-112]. 尽管完全沉浸式 VR 能够进一步缩小这一差距, 但实现复杂感官体验需要借助复杂的人工刺激器, 不仅需要更多的空间, 而且成本高昂. 基于 HMD 的沉

浸式 VR 系统通过结合物理空间中的物体或设备, 利用精确跟踪技术使用户在触摸虚拟对象时能够感知其纹理或温度, 丰富了用户的体验^[113].

沉浸式与非沉浸式 VR 的主要区别在于沉浸程度的不同. 沉浸式 VR 通过覆盖更多感官感知, 减少用户在虚拟环境中所需的认知负荷, 显著地增强了沉浸感; 相比之下, 非沉浸式 VR 则需要用户付出更多的认知资源来构建和维持虚拟世界的感知. 因此, 非沉浸式 VR 可能在一定程度上降低了用户对于空间存在的感知^[114-115].

在实证研究方面, Sollfrank 等^[116]通过比较 2D 和 3D 中的运动呈现发现, 3D 可视化显著地增强了 ERD 模式; Nagai 等^[117]则进一步揭示了观察自己手部运动时 ERD 比值的增强, 表明观察与自身相关的运动能够引发更强的神经响应; Choi 等^[29]聚焦于沉浸式 VR 与传统监视器在动作观察与 MI 练习中的差异, 发现沉浸式 VR HMD 能够诱导更优节律模式, 有助于大脑更好地识别空间特征, 如图 3 所示, 在运动想象期间, 左、右手图像的 ERD 显示出显著差异, 与基于显示器显示的 MI 相比, 基于沉浸式 VR 的 MI 的 ERD 振幅更大; Xiao 等^[62]研究也支持这一观点, 通过比较 VR HMD 与 2D 显示器在虚拟踝关节动作观察中的应用发现, VR HMD 能够提供更真实的体验, 并显著地增强 MI 的性能.

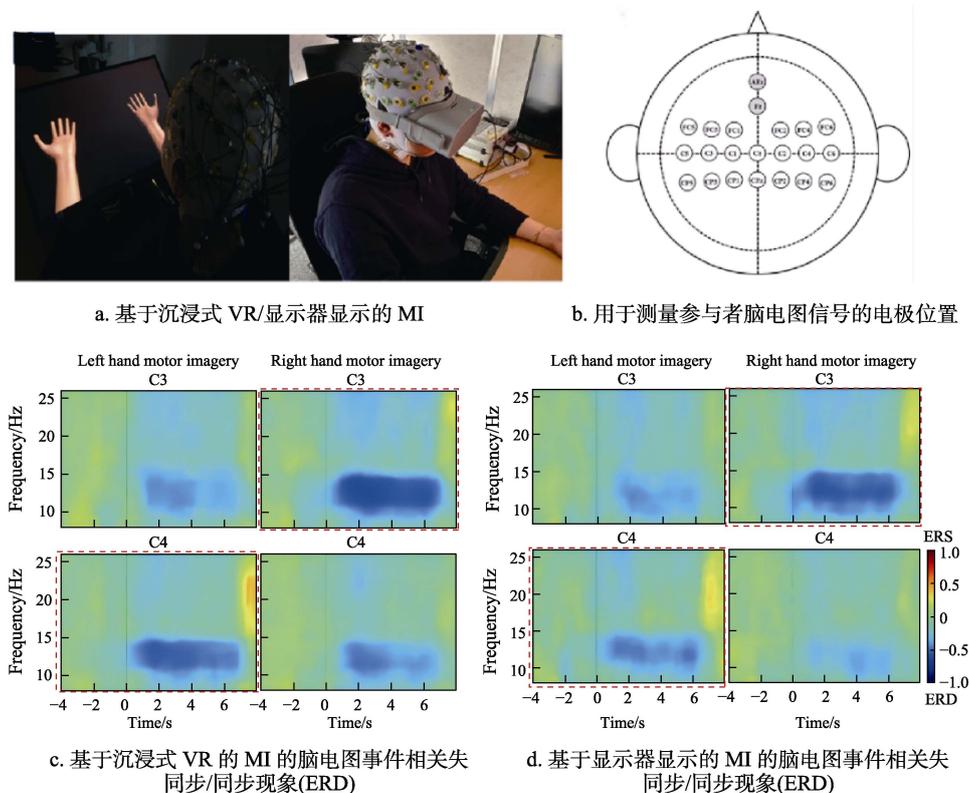


图 3 沉浸式 VR 与传统显示器条件下的 MI 表现^[29]

因此,结合沉浸式 VR HMD 与运动错觉塑造,在临床治疗、康复和脑机接口领域的 MI 实践中具有广阔的应用前景。

2.1.2 VR 系统中光流对运动康复的影响

光流可视化是步态和平衡康复中备受关注的 MV 因素。控制运动是一个涉及视觉、前庭和本体感觉信息整合的复杂多感官过程^[118]。其中,光流作为引导运动的重要视觉信息来源,指物体移动过程中在视网膜上产生的视觉运动模式,其提供了关于运动方向和速度的直接信息^[118-119]。正常步行过程中,光流与本体感觉信息相互协调。但在 VR 系统中,通过人为地控制光流速度,可以制造光流与下肢本体感觉信息之间的不匹配^[120],促使个体调整步态模式以减少不协调^[121]。

光流速度及其对运动的影响已在健康人群和特定人群中得到了广泛研究。在健康人群中,步行速度似乎随着光流速度的降低而增加,随着光流速度的加快而降低^[122-126];而在神经系统疾病患者,如帕金森病和脑瘫儿童中,这种反应模式会发生变化,这可能与大脑中光流感知相关区域受损有关^[127]。脑卒中后的患者虽然仍能在步行过程中利用光流信息,但神经反应可能因脑损伤位置而异,表现出个体间的异质性^[128]。

VR 技术的引入为选择性操纵光流提供了可能,进而诱导所需的运动变化,如步行速度的增加,为推进脑卒中后步态康复领域提供了新的思路。然而,目前关于脑卒中后光流速度对运动影响的深入研究仍显不足^[121,129]。

在光流速度对运动的影响上,已有的研究得出了不同的结论。Winter 等^[130]的研究发现,在健康个体、脑卒中后个体和多发性硬化症患者中,与无 VR 条件下的步行相比,使用完全沉浸式 VR 进行步行训练的速度均有所增加,其中,虚拟环境设计包含引人入胜的故事情节和游戏化元素,旨在通过小路步行重建虚拟世界;与此相反,de Keersmaecker 等^[131]的研究发现,与无 VR 条件下的步行相比,脑卒中后患者在佩戴 HMD 步行时的步速较慢,步幅摆动时间较长,未受影响的腿站立时间更长,摆动时间更短,这种差异可能与虚拟环境的类型和步行步道的差异有关。在 Winter 等^[130]的研究中,参与者通过手柄上的按钮手动改变速度,这种自上而下的控制方式可能与 de Keersmaecker 等^[131]研究中使用自下而上的控制方式不同,导致出现不同的反应。此外,患者对完全沉浸式 VR 步行的熟悉程度也可能影响步态模式,随着他们对 HMD 的熟悉度增

加,谨慎的步态模式可能会减少。

上述研究结果表明,在 VR 环境中融入行为反馈、游戏元素或竞争机制对于影响人的步态模式至关重要。未来需要进一步探索这些原则在虚拟环境中的应用,以期对脑卒中后的步态模式产生积极影响,并用于步态康复训练中。

2.1.3 虚拟化身对运动学习的影响

对虚拟身体表征(化身)的操控,能够显著地促进或阻碍运动学习。当虚拟身体表示与参与者的身体偏侧性、大小或运动方式保持一致时,运动学习将得到促进;反之,可能阻碍学习进程^[132-134]。Ossmy 等^[133]的研究表明,在 VR 环境中进行手指敲击序列任务训练时,若视觉反馈(即手形化身)的大小与真实手的大小相近,则参与者的行为提升最显著,如图 4 所示;他们的另一项研究亦发现,与手部动作相一致的视觉反馈对运动成绩具有积极影响,且与无视觉反馈相比,不一致的视觉反馈对运动成绩的干扰更显著^[134]。这些发现强调虚拟身体表示在运动技能学习中的双重作用,即其促进或干扰作用取决于视觉反馈与身体及实际运动的匹配程度。

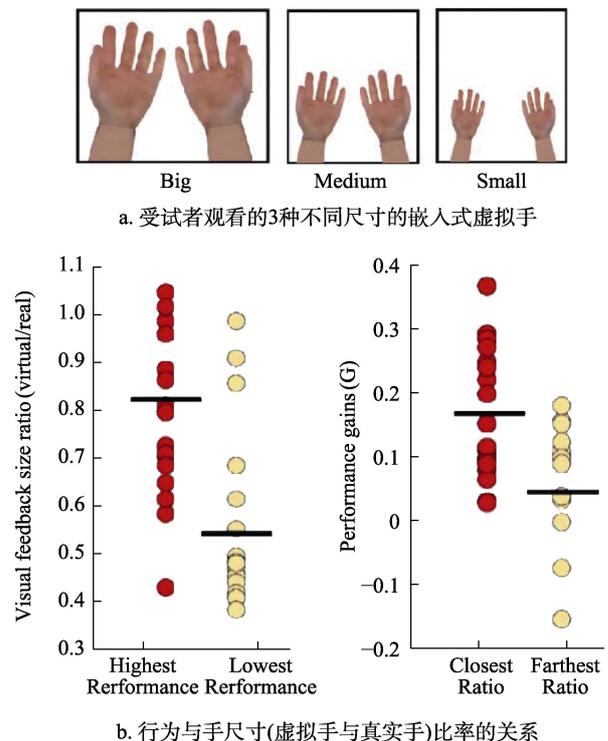


图 4 行为能力提升和虚拟手部尺寸关联性研究^[133]

作为运动学习的重要组成部分,身体自我意识包括身体所有权(即个体将身体某部位视为自身一部分的感知)和能动感(即个体感到能够启动并

控制自己行为的感觉)^[135-136]。在 VR 环境中,当个体感知到身体信号与动作的一致性时,其身体所有权和控制权感将得到增强。当虚拟化身以手形呈现时,参与者感受到的身体所有权会增强;当身体以非自然形态(如球体、矩形)呈现时,身体所有权则不明显^[137-139];此外,当预测的感觉反馈与实际感觉反馈(如本体感觉)相匹配时,控制权感将达到最佳状态^[140]。因此可以推测,在 VR 环境下的运动学习中,身体自我意识受到个体对身体视觉感知差异的影响。

已有的研究探讨了 VR 环境中身体自我意识与运动表现和功能之间的关系。Seinfeld 等^[141]的研究发现,使用 Leap Motion 传感器执行运动任务的参与者,在看到自己的虚拟手时会感受到更强的身体所有权和控制权感,并在任务表现上优于那些仅使用键盘且无法看到自己化身的参与者;在临床医学领域,Tambone 等^[142]的研究证实,从第一人称视角观察虚拟身体的运动能够增强身体所有权,促进脑卒中患者的运动功能恢复:这些研究均支持虚拟化身在提高运动能力和表现方面的积极作用,并暗示通过反复练习身体自我意识,可能对运动表现产生积极影响。

2022 年,Shin 等^[143]探讨了 VR 环境中虚拟化身的视觉外观对运动记忆的影响,将实验分为非化身、非手形化身和手形化身 3 个条件,实验结果表明,尽管不同条件下的身体所有权和控制权感没有显著差异,但在学习率方面,手形化身条件显著优于其他条件,说明视觉识别个体的身体形态对运动学习具有积极作用。

在基于 VR 的上肢神经运动康复的研究中,最常使用的 MV 方式是虚拟化身,即人的手臂和手部运动在虚拟环境中成比例地呈现^[105,144]。这种选择并非偶然,上肢和下肢在 MV 选择上的差异可能源于两者在运动学习中的不同需求。尽管目前没有直接证据表明直接和间接显示用户运动对结局的影响,但确实存在上肢和下肢 MV 之间的有效性差异,这种差异可能与正常运动执行中接收的视觉信息有关。上肢能够独立用于单次或双侧活动,而下肢则更多地涉及连续运动。研究表明,下肢运动似乎更依赖于“中枢模式发生器”,该机制将节律性感运动信息与身体定位信息整合,而非下肢在空间位置的视觉信息^[145];相反,大多数使用手臂和手部完成的任务需要与环境相关的身体视觉信息,如正确地抓握物体^[146]。因此在步行过程中,使用间接 MV 根据身体位移显示环境运动而不直接呈现肢体,可能会更有效地训练下

肢;相反,手和手臂的运动学习可能需要更多的关于肢体运动的外观信息。

2.2 要素 2: 行为反馈

行为反馈是虚拟环境中提升参与度的关键要素之一。在治疗流程中,患者需完成既定任务,完成时则获得相应分数或晋级至更高难度级别,这些任务以及获得的分数或晋级状态均通过特定的可视化手段呈现,旨在为患者的练习增添实际意义并实时反馈其进展。

从运动学习的角度看,行为反馈可被细分为性能知识和结果知识^[147]。在传统疗法中,反馈往往侧重于行为知识,即关注任务执行过程中肢体位置与运动的正确性,导致患者将注意力集中在自身动作的执行上。Wulf^[148]的研究表明,将注意力集中于外部环境中训练动作应产生的效果,即关注结果知识,对于运动学习具有更高的效益。

鉴于这一点,行为反馈在设计时应更多地强调结果知识的提供。虚拟环境凭借其独特的交互性和沉浸性,为在游戏化体验中传递性能和结果信息提供了得天独厚的条件。VR 行为反馈可以激励患者持续参与的动力,还可以显著地提升患者对治疗计划的依从性。当患者的注意力被行为反馈所吸引并渴望在虚拟环境中取得成功时,他们的参与度和投入度将自然提升。因此,参与度的存在维度与行为反馈的有效性之间存在着密切联系,两者相互作用,共同推动患者参与度的提高。下面针对 VR 中涉及的反馈技术进行讨论。

作为一种结合游戏化、软件内容同步以及运动指南的康复策略,虚拟康复已经在上肢康复中得到了广泛研究。其中,运动跟踪技术发挥着核心作用,它通过各类传感器捕捉患者的身体动作,并实时地映射至虚拟环境中的对象。运动跟踪传感器的选择对于 MV 至关重要,常见的包括鼠标、操纵杆、深度传感相机、电磁传感器、惯性传感器以及数据手套等。尽管传感器性能对运动跟踪的精确性至关重要,但也需要考量成本、主观感知及用户偏好^[149]。

运动跟踪技术主要分为可穿戴与不可穿戴设备 2 类。不可穿戴设备中,视觉传感器和控制器占据主导地位,后者又包括 3 自由度控制器、机械臂等;可穿戴设备涵盖了数据手套、惯性传感器和外骨骼系统等。在不可穿戴设备中,摄像头传感技术正经历着由传统网络摄像头跟踪向深度传感方法的转变,这一变革使得在有限且无障碍的空间内,用户的运动得以更精确地感知。

在反馈技术方面, 多数研究侧重于视觉和听觉反馈, 同时, 触觉和力反馈亦逐渐受到重视. 根据反馈类型的不同, 可大致分为视觉运动反馈与视触觉反馈 2 类. 视觉运动反馈通过传感器将实时运动数据映射至虚拟模型, 为用户提供直观的视觉信息; 视触觉反馈则结合视觉与触觉信息, 为用户提供更丰富的感知体验. 根据是否存在阻力, 触觉反馈可进一步细分为触觉反馈和力反馈(动觉力

反馈). 力反馈通过模拟现实世界的物理触感, 为用户带来更真实的体验^[150-151].

在虚拟康复的研究中, 可以根据是否使用精细运动跟踪, 进一步分为可穿戴与不可穿戴设备的应用. 在不可穿戴设备中, 通过 VR 头戴设备进行的手部跟踪技术已经商业化, 如 Facebook Technologies 旗下的 Oculus Quest 等. 图 5 所示为对已有研究中使用的传感器类型^[152]的总结.

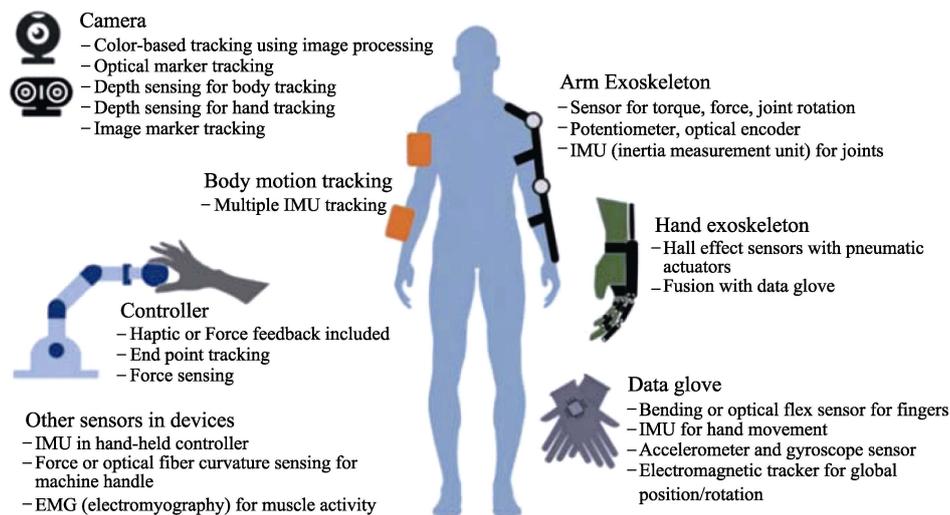


图 5 用于上肢康复虚拟康复的传感器类型分类^[152]

综上所述, 运动跟踪和反馈技术在虚拟康复中扮演着不可或缺的角色, 不仅提升康复过程的精确性, 也为患者提供了更丰富和真实的康复体验. 随着技术的不断进步, 未来该领域的研究和应用将展现出更广阔的前景.

2.3 要素 3: 上下文信息

在虚拟康复的实践中, 最终将展示的是描绘虚拟世界的详尽上下文信息, 这些信息不局限于真实自然场景或虚拟环境, 为患者提供了一个可感知、可想象的空间, 使患者的角色与任务得以具身化.

背景对象和动画的精细设计旨在给予 VR 系统以现实世界的质感, 而非仅作为治疗工具的技术展现; 同时, 声音元素所营造的沉浸式氛围能够显著地提升患者的体验生动性. 治疗的最终目标之一, 是使患者能够将在虚拟环境中习得的行为技能有效地迁移到日常生活中, 树立足够的信心去面对各种日常活动. 为此, 虚拟环境应能够真实地展现现实世界的关联背景与日常任务中涉及的对象, 使患者能够将学习过程与日常生活中的实际情况紧密相连, 这种现实存在维度的呈现与 VR

环境所展现的生动程度密切相关.

在虚拟康复系统中可以展现多种类型的上下文环境, 包括自然主义风格(类似于现实世界中的自然环境)或虚构风格(如抽象的、虚拟的环). 这种灵活性使得虚拟康复系统能够根据不同的需求和目的提供不同类型的环境, 支持康复训练和治疗. 当需要学习日常任务时, 现实维度的构建在一定程度上预示了将训练情境转化为现实生活实践的可能性^[90].

3 VR 在临床神经运动康复中的应用

3.1 VR 在脑卒中运动康复中的应用

VR 在脑卒中康复中的应用已受到广泛关注. 研究显示, 无论是在沉浸式还是非沉浸式、视觉上简单或复杂的虚拟环境中, 患者均能通过反复练习提高运动技能, 改善脑卒中后上肢的功能, 给日常生活和活动带来积极影响^[153-156]. 例如, 基于镜像治疗的 NeuroR 系统和虚拟九孔桩测试等技术, 通过模拟手臂运动和提供实时反馈有效地促进了患者上肢的运动恢复. 这些疗法通过激活镜像神

经元、提供密集的治疗练习和激发患者积极性,促进受伤大脑区域的神经可塑性^[157-159]。

虽然 VR 在脑卒中康复中显示出潜力,但其对上肢功能的临床效果仍存在一定不确定性。研究显示,VR 支持的运动疗法在改善上肢粗大运动功能方面有效^[153,160-167],但对精细运动功能的改善作用有限,这可能与大多数疗法使用手持控制器进行交互,限制了精细动作的训练有关^[168-169]。因此,使用更先进的输入设备,如 Leap Motion 或传感器手套,有望促进精细运动的训练^[170-171]。

研究发现,将 VR 支持的运动疗法与常规疗法结合使用,并延长 VR 支持的运动疗法干预时间(即超过 15 h)和试验时间(即超过 30 d 且不超过 60 d),能够显著地改善手部灵活性。该结论与治疗持续时间与运动恢复结果之间的相关性一致^[172]。然而,为了确定 VR 支持运动疗法的最佳实践细节,仍需进一步地研究和分析。

VR 技术的重要进展是将触觉和交互力融入原本以视觉为主的体验中^[120]。通过结合复杂的机器人技术与传统 VR 实现触觉反馈,不仅可以丰富用户感官体验,增加物理任务设置,还能模拟现实世界的生物力学和神经肌肉交互。Lam 等^[173]开发一种集成视觉和触觉反馈的 VR 系统,用于偏瘫上肢的感觉运动训练。实验结果表明,在包含触觉障碍的虚拟环境中,脑卒中受试者的任务完成时间和手部运动轨迹流畅度均显著提高。最新分析指出,配备触觉手套的虚拟康复系统,短期内对脑卒中患者上肢功能恢复有积极的作用,但长期改善需与常规康复方法结合^[174]。因此,仍需进一步研究以确定最佳的康复方法和参数。

通常,脑卒中后患者的步态会受到影响,VR 技术为评估和改善步态提供了有效的方法^[175]。VR 的优势在于能够精确地控制治疗过程中的持续时间、强度和反馈,并通过沉浸式体验增强临场感和真实感。城市和农村环境的模拟可增强视觉提示,增加避障训练,从而改善步态^[176]。VR 中的光流速度调整影响步行速度,而 HMD 提供了良好的耐受性和享受性体验^[131,177]。Wellner 等^[178]的实验结果表明,视觉、触觉和听觉反馈的结合可优化步态表现。Zakharov 等^[179]的研究显示,基于 VR 的沉浸式环境结合视觉和触觉生物反馈(如图 6 所示)对脑卒中患者的康复效果显著。

3.2 VR 在 SCI 运动康复中的应用

SCI 常导致步行和平衡障碍以及姿势异常,影响日常活动能力。VR 技术为 SCI 患者提供了个性



图 6 Revivr 康复步行模拟器^[179]

化、高强度的康复方法,通过多感官反馈改善患者的运动和平衡控制,让患者体验类似真实运动的虚拟环境。例如,Toyra® VR 系统可有效地恢复颈部损伤患者的上肢功能,而结合虚拟腿和肌肉训练的方案则改善了步行和下肢功能^[10,181]。VR 康复训练通过灵活、有趣的游戏化活动界面激励患者积极参与,为 SCI 患者提供了一种替代性、高效且吸引人的康复方式^[182]。

在 SCI 病例中,患者与虚拟环境互动时,自身感觉运动功能与虚拟化身能力的差异影响沉浸体验。沉浸式 VR 康复对 SCI 患者的运动功能有显著的改善,特别是对于慢性 SCI 患者^[183]。通过虚拟身体与实时触觉反馈结合,可以实现病变下方肌肉功能恢复,表明了神经可塑性变化^[182]。VR 方案是传统疗法的辅助工具,尤其在感觉运动信号转移和多感觉整合方面,传感器可以绕过受损部位信号损失提供多感官反馈,激活相关的大脑区域。

此外,交互式虚拟反馈能够鼓励其他健康身体部位更积极地参与,促进更高质量的 MI 生成^[12],进而激活 SCI 患者的皮层运动网络^[184-185]。例如,当 SCI 患者想象或尝试移动其瘫痪的脚部时,结合视觉、本体感觉和听觉反馈可以改善运动控制^[185-186],并激活与健康人执行脚部运动时相同的神经网络^[180,187]。尝试、想象和观察到的足部运动均激活了 SCI 患者的皮层运动网络,这些网络仍通过脊髓未受损部分投射到肌肉效应器上。

最新综述显示,VR 技术在 SCI 康复中展现出显著的积极效果,包括提高患者的活动能力、平衡和移动能力。通过功能前伸试验(functional reach test,

FRT), BBS 评分等指标证实了 VR 对功能性的积极改善, 并指出 VR 游戏能增强患者平衡能力, 促进运动模式融入日常生活^[4,7,188-189]. Villiger 等^[10,180]的研究成果也支持 VR 在改善下肢的力量、稳定性和功

能移动性方面的作用的结论. VR 治疗还激发患者的参与热情, 成为 SCI 康复的积极参与方式^[10,180,190-193]. 本文对 VR 在临床神经康复中应用的代表性文献进行总结, 如表 2 所示.

表 2 VR 在临床神经康复中的应用总结

文献	病因	方法	效果
Kiper 等 ^[154]	脑卒中	44 名患者分别进行虚拟环境中强化反馈和传统康复治疗	虚拟环境中强化反馈治疗后的上肢运动功能显著优于传统治疗
Kiper 等 ^[156]	脑卒中	136 名患者分别进行 VR 训练康复和传统康复治疗, 持续 28 天	VR 与传统康复相结合, 比只用传统康复更优
Mihelj 等 ^[158]	脑卒中	提出一种多模态 VR 康复环境, 包含视觉、听觉和触觉 3 种模态	在 16 名脑卒中患者的使用评估中, 该康复环境更能激发患者的训练动机
Shin 等 ^[194]	脑卒中	开发了一个基于任务的交互式游戏 VR 康复系统	在 16 名患者的对比实验中, 系统提升了注意力, 有助于增强运动功能恢复
Villiger 等 ^[10]	SCI	患者使用具有虚拟下肢第一人称视角的 VR 系统	VR 训练可以促进患者的运动功能和神经性疼痛改善
Dimbwadyo-Terrer 等 ^[181]	SCI	采用 Toyra@ VR 系统对患者进行 35 天的康复治疗, 并与常规治疗进行对比	虽然与传统治疗相比产生了类似的功能改善结果, 但满意度更高, 并产生了高动机
An 等 ^[188]	SCI	10 名患者进行 42 天 VR 治疗, 采用多种量表评估运动功能	VR 治疗对患者的站立平衡和活动功能都有积极作用
Khurana 等 ^[189]	SCI	30 名患者分为 2 组, 分别采用基于 VR 游戏和传统的平衡进行训练, 持续 28 天	基于 VR 游戏的训练在改善患者平衡等功能表现方面更好

4 总结和展望

VR 技术作为针对神经可塑机制的信息化康复手段具有显著优势, 不仅允许在大规模范围内进行实践, 更能在自然世界中难以或无法创造的复杂环境中提供训练; 能够根据个体不断变化的表现自动调整任务难度, 展现出极高的精确性和灵活性. 当 VR 模拟与运动跟踪或多模态传感系统相结合时, 它们共同营造了一个沉浸式、可量化监测的康复训练环境, 该环境中, 虚拟世界中显示的肢体运动精准地复制受试者在现实世界中产生的运动, 为他们提供了直观且真实的体验. 此外, 虚拟环境能够灵活地操纵视觉和听觉反馈的特异性和频率, 同时提供自适应学习算法和分级康复活动, 可以通过客观、系统的方法进行操纵, 以创建个性化的运动学习范式满足不同受试者的需求. 因此, VR 技术作为一种康复工具, 能够充分利用神经系统的感觉运动适应能力, 为神经系统损伤的康复提供了新的可能性和有效途径.

与其他医疗保健领域中 VR 技术的应用相比, 虚拟康复的发展较为滞后, 在这一现象的背后涉及几个关键因素和挑战. (1) 系统开发的复杂性是一大挑战. 虚拟康复系统的构建涉及硬件和软件之间的精密协同, 不仅需要高额的投资, 系统开发者还需具备相当深厚的开发专业知识, 这种复杂性增加了系统的成本, 同时也限制了其广泛应用

的可行性. (2) 康复研究的跨学科性质为该领域带来了额外的挑战. 为行动障碍者设计虚拟康复接口时, 需要融合骨科、神经科学、生物医学工程、计算机科学以及多种康复学科的知识和技能, 这种跨学科整合的需求使得研究过程更加复杂, 进展速度也相对较慢. 尽管当前已有越来越多的研究致力于测试 VR 技术在康复中的疗效, 但其有效性尚未达到大规模随机对照研究中发现的高水平证据标准, 这意味着未来仍需要更多的研究来验证 VR 技术在康复领域的实际效果. (3) 关于重复训练在神经和功能恢复中提供的益处, 以及将虚拟康复整合到临床环境中的能力, 目前尚存在许多不确定性, 需要进行更深入的研究和探讨. (4) 至关重要一点是, 只有当 VR 研究者与临床医生全面理解 VR 中的各种感觉和触觉操作如何影响神经过程时, VR 的全部潜力才能得到真正的发挥, 需要医学和工程技术交叉领域的持续投入, 以揭示 VR 技术背后的神经响应机制.

综上所述, 未来的研究应重点关注上述各个方面, 以推动面向运动神经障碍的虚拟康复领域发展, 使其能够更好地服务于广大患者.

参考文献(References):

- [1] Li Z, Han X G, Sheng J, *et al.* Virtual reality for improving balance in patients after stroke: a systematic review and

- meta-analysis[J]. *Clinical Rehabilitation*, 2016, 30(5): 432-440
- [2] Rose T, Nam C S, Chen K B. Immersion of virtual reality for rehabilitation-Review[J]. *Applied Ergonomics*, 2018, 69: 153-161
- [3] Trincado-Alonso F, Dimbwadyo-Terrer I, de los Reyes-Guzmán A, *et al.* Kinematic metrics based on the virtual reality system Toyra as an assessment of the upper limb rehabilitation in people with spinal cord injury[J]. *BioMed Research International*, 2014, 2014: Article No.904985
- [4] Kizony R, Raz L, Katz N, *et al.* Video-capture virtual reality system for patients with paraplegic spinal cord injury[J]. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 2005, 42(5): 595-608
- [5] Riva G, Wiederhold B K, Mantovani F. Neuroscience of virtual reality: from virtual exposure to embodied medicine[J]. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 2019, 22(1): 82-96
- [6] Field-Fote E C. Spinal cord control of movement: implications for locomotor rehabilitation following spinal cord injury[J]. *Physical Therapy*, 2000, 80(5): 477-484
- [7] Wall T, Feinn R, Chui K, *et al.* The effects of the Nintendo™ Wii Fit on gait, balance, and quality of life in individuals with incomplete spinal cord injury[J]. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 2015, 38(6): 777-783
- [8] Carlozzi N E, Gade V, Rizzo A S, *et al.* Using virtual reality driving simulators in persons with spinal cord injury: three screen display versus head mounted display[J]. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 2013, 8(2): 176-180
- [9] Dimbwadyo-Terrer I, Trincado-Alonso F, de los Reyes-Guzmán A, *et al.* Clinical, functional and kinematic correlations using the virtual reality system Toyra® as upper limb rehabilitation tool in people with spinal cord injury[C] //Proceedings of the International Congress on Neurotechnology, Electronics and Informatics. SciTePress, 2013: 81-88
- [10] Villiger M, Bohli D, Kiper D, *et al.* Virtual reality-augmented neurorehabilitation improves motor function and reduces neuropathic pain in patients with incomplete spinal cord injury[J]. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 2013, 27(8): 675-683
- [11] Jordan M, Richardson E J. Effects of virtual walking treatment on spinal cord injury-related neuropathic pain: pilot results and trends related to location of pain and at-level neuronal hypersensitivity[J]. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 2016, 95(5): 390-396
- [12] Roosink M, Robitaille N, Jackson P L, *et al.* Interactive virtual feedback improves gait motor imagery after spinal cord injury: an exploratory study[J]. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 2016, 34(2): 227-235
- [13] Pietrzak E, Pullman S, McGuire A. Using virtual reality and videogames for traumatic brain injury rehabilitation: a structured literature review[J]. *Games for Health: Research, Development, and Clinical Applications*, 2014, 3(4): 202-214
- [14] Chen C H, Jeng M C, Fung C P, *et al.* Psychological benefits of virtual reality for patients in rehabilitation therapy[J]. *Journal of Sport Rehabilitation*, 2009, 18(2): 258-268
- [15] Ravi D K, Kumar N, Singhi P. Effectiveness of virtual reality rehabilitation for children and adolescents with cerebral palsy: an updated evidence-based systematic review[J]. *Physiotherapy*, 2017, 103(3): 245-258
- [16] Dimbwadyo-Terrer I, Trincado-Alonso F, De Los Reyes-Guzmán A, *et al.* Upper limb rehabilitation after spinal cord injury: a treatment based on a data glove and an immersive virtual reality environment[J]. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 2016, 11(6): 462-467
- [17] Altschuler E L. Interaction of vision and movement via a mirror[J]. *Perception*, 2005, 34(9): 1153-1155
- [18] Buccino G, Solodkin A, Small S L. Functions of the mirror neuron system: implications for neurorehabilitation[J]. *Cognitive and Behavioral Neurology*, 2006, 19(1): 55-63
- [19] Celnik P, Stefan K, Hummel F, *et al.* Encoding a motor memory in the older adult by action observation[J]. *NeuroImage*, 2006, 29(2): 677-684
- [20] Butler A J, Page S J. Mental practice with motor imagery: evidence for motor recovery and cortical reorganization after stroke[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2006, 87(12): 2-11
- [21] Gaggioli A, Meneghini A, Morganti F, *et al.* A strategy for computer-assisted mental practice in stroke rehabilitation[J]. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 2006, 20(4): 503-507
- [22] Munzert J, Lorey B, Zentgraf K. Cognitive motor processes: the role of motor imagery in the study of motor representations[J]. *Brain Research Reviews*, 2009, 60(2): 306-326
- [23] Wilkins K B, Dewald J P A, Yao J. Intervention-induced changes in neural connectivity during motor preparation may affect cortical activity at motor execution[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): Article No.7326
- [24] Page S J, Peters H. Mental practice: applying motor PRACTICE and neuroplasticity principles to increase upper extremity function[J]. *Stroke*, 2014, 45(11): 3454-3460
- [25] Kemlin C, Moulton E, Samson Y, *et al.* Do motor imagery performances depend on the side of the lesion at the acute stage of stroke? [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2016, 10: Article No.321
- [26] de Vries S, Tepper M, Otten B, *et al.* Recovery of motor imagery ability in stroke patients[J]. *Rehabilitation Research and Practice*, 2011, 2011: Article No.283840
- [27] Saposnik G. Virtual reality in stroke rehabilitation[M] //Ovbiagele B. *Ischemic Stroke Therapeutics: A Comprehensive Guide*. Cham: Springer, 2016: 225-233
- [28] Ziadeh H, Gulyas D, Nielsen L D, *et al.* "Mine works better": examining the influence of embodiment in virtual reality on the sense of agency during a binary motor imagery task with a brain-computer interface[J]. *Frontiers in Psychology*, 2021, 12: Article No.806424
- [29] Choi J W, Kim B H, Huh S, *et al.* Observing actions through immersive virtual reality enhances motor imagery training[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2020, 28(7): 1614-1622
- [30] Škola F, Tinková S, Liarokapis F. Progressive training for motor imagery brain-computer interfaces using gamification and virtual reality embodiment[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019, 13: Article No.329
- [31] Lin M A, Huang J L, Fu J M, *et al.* A VR-based motor imagery training system with EMG-based real-time feedback for post-stroke rehabilitation[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2023, 31: 1-10
- [32] Guillot A, Collet C, Nguyen V A, *et al.* Brain activity during visual versus kinesthetic imagery: an fMRI study[J]. *Human Brain Mapping*, 2009, 30(7): 2157-2172
- [33] Fuchs C T, Becker K, Austin E, *et al.* Accuracy and vividness in motor imagery ability: differences between children and young adults[J]. *Developmental Neuropsychology*, 2020, 45(5): 297-308
- [34] Tariq M, Trivailo P M, Simic M. EEG-based BCI control schemes for lower-limb assistive-robots[J]. *Frontiers in Human*

- Neuroscience, 2018, 12: Article No.312
- [35] Igasaki T, Takemoto J, Sakamoto K. Relationship between kinesthetic/visual motor imagery difficulty and event-related desynchronization/synchronization[C] //Proceedings of the 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2018: 1911-1914
- [36] Dijkstra N, Bosch S E, van Gerven M A J. Vividness of visual imagery depends on the neural overlap with perception in visual areas[J]. Journal of Neuroscience, 2017, 37(5): 1367-1373
- [37] Stinear C M, Byblow W D, Steyvers M, *et al.* Kinesthetic, but not visual, motor imagery modulates corticomotor excitability[J]. Experimental Brain Research, 2006, 168(1-2): 157-164
- [38] Takemi M, Masakado Y, Liu M G, *et al.* Event-related desynchronization reflects downregulation of intracortical inhibition in human primary motor cortex[J]. Journal of Neurophysiology, 2013, 110(5): 1158-1166
- [39] Toriyama H, Ushiba J, Ushiyama J. Subjective vividness of kinesthetic motor imagery is associated with the similarity in magnitude of sensorimotor event-related desynchronization between motor execution and motor imagery[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2018, 12: Article No.295
- [40] Guillot A, Collet C, Dittmar A. Relationship between visual and kinesthetic imagery, field dependence-independence, and complex motor skills[J]. Journal of Psychophysiology, 2004, 18(4): 190-198
- [41] Malouin F, Richards C L, Desrosiers J, *et al.* Bilateral slowing of mentally simulated actions after stroke[J]. NeuroReport, 2004, 15(8): 1349-1353
- [42] Mihara M, Miyai I, Hattori N, *et al.* Neurofeedback using real-time near-infrared spectroscopy enhances motor imagery related cortical activation[J]. PLoS One, 2012, 7(3): Article No.e32234
- [43] Mihara M, Hattori N, Hatakenaka M, *et al.* Near-infrared spectroscopy-mediated neurofeedback enhances efficacy of motor imagery-based training in poststroke victims: a pilot study[J]. Stroke, 2013, 44(4): 1091-1098
- [44] Kober S E, Wood G, Kurzman J, *et al.* Near-infrared spectroscopy based neurofeedback training increases specific motor imagery related cortical activation compared to sham feedback[J]. Biological Psychology, 2014, 95: 21-30
- [45] Mulder T. Motor imagery and action observation: cognitive tools for rehabilitation[J]. Journal of Neural Transmission, 2007, 114(10): 1265-1278
- [46] Ono T, Kimura A, Ushiba J. Daily training with realistic visual feedback improves reproducibility of event-related desynchronization following hand motor imagery[J]. Clinical Neurophysiology, 2013, 124(9): 1779-1786
- [47] Lakshminarayanan K, Shah R, Daulat S R, *et al.* The effect of combining action observation in virtual reality with kinesthetic motor imagery on cortical activity[J]. Frontiers in Neuroscience, 2023, 17: Article No.1201865
- [48] Juliano J M, Spicer R P, Vourvopoulos A, *et al.* Embodiment is related to better performance on a brain-computer interface in immersive virtual reality: a pilot study[J]. Sensors, 2020, 20(4): Article No.1204
- [49] Škola F, Liarokapis F. Embodied VR environment facilitates motor imagery brain-computer interface training[J]. Computers & Graphics, 2018, 75: 59-71
- [50] Kilteni K, Groten R, Slater M. The sense of embodiment in virtual reality[J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2012, 21(4): 373-387
- [51] Petkova V I, Khoshnevis M, Ehrsson H H. The perspective matters! Multisensory integration in ego-centric reference frames determines full-body ownership[J]. Frontiers in Psychology, 2011, 2: Article No.35
- [52] Borrego A, Latorre J, Alcañiz M, *et al.* Embodiment and presence in virtual reality after stroke. A comparative study with healthy subjects[J]. Frontiers in Neurology, 2019, 10: Article No.1061
- [53] Blanke O, Metzinger T. Full-body illusions and minimal phenomenal selfhood[J]. Trends in Cognitive Sciences, 2009, 13(1): 7-13
- [54] David N, Newen A, Vogeley K. The “sense of agency” and its underlying cognitive and neural mechanisms[J]. Consciousness and Cognition, 2008, 17(2): 523-534
- [55] Sastry L, Boyd D R S. Virtual environments for engineering applications[J]. Virtual Reality, 1998, 3(4): 235-244
- [56] Tsakiris M, Prabhu G, Haggard P. Having a body *versus* moving your body: how agency structures body-ownership[J]. Consciousness and Cognition, 2006, 15(2): 423-432
- [57] Tsakiris M, Haggard P. The rubber hand illusion revisited: visuotactile integration and self-attribution[J]. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2005, 31(1): 80-91
- [58] Kokkinara E, Slater M. Measuring the effects through time of the influence of visuomotor and visuotactile synchronous stimulation on a virtual body ownership illusion[J]. Perception, 2014, 43(1): 43-58
- [59] Alaerts K, Swinnen S P, Wenderoth N. Observing how others lift light or heavy objects: which visual cues mediate the encoding of muscular force in the primary motor cortex?[J]. Neuropsychologia, 2010, 48(7): 2082-2090
- [60] Helm F, Marinovic W, Krüger B, *et al.* Corticospinal excitability during imagined and observed dynamic force production tasks: effortfulness matters[J]. Neuroscience, 2015, 290: 398-405
- [61] Alaerts K, Senot P, Swinnen S P, *et al.* Force requirements of observed object lifting are encoded by the observer’s motor system: a TMS study[J]. European Journal of Neuroscience, 2010, 31(6): 1144-1153
- [62] Xiao Y Q, Bai H M, Gao Y, *et al.* Interactive virtual ankle movement controlled by wrist sEMG improves motor imagery: an exploratory study[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2024, 30(8): 5507-5524
- [63] French B, Thomas L H, Coupe J, *et al.* Repetitive task training for improving functional ability after stroke[J]. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2016, 11(11): Article No.CD006073
- [64] Veerbeek J M, van Wegen E, van Peppen R, *et al.* What is the evidence for physical therapy poststroke? A systematic review and meta-analysis[J]. PLoS One, 2014, 9(2): Article No.e87987
- [65] Risedal A, Mattsson B, Dahlqvist P, *et al.* Environmental influences on functional outcome after a cortical infarct in the rat[J]. Brain Research Bulletin, 2002, 58(3): 315-321
- [66] Demain S, Burrige J, Ellis-Hill C, *et al.* Assistive technologies after stroke: self-management or fending for yourself? A focus group study[J]. BMC Health Services Research, 2013, 13: Article No.334
- [67] Fung V, Ho A, Shaffer J, *et al.* Use of Nintendo Wii Fit™ in the rehabilitation of outpatients following total knee replacement: a preliminary randomised controlled trial[J]. Physiotherapy, 2012, 98(3): 183-188
- [68] Kwakkel G, van Peppen R, Wagenaar R C, *et al.* Effects of

- augmented exercise therapy time after stroke: a meta-analysis[J]. *Stroke*, 2004, 35(11): 2529-2539
- [69] Merians A S, Jack D, Boian R, *et al.* Virtual reality-augmented rehabilitation for patients following stroke[J]. *Physical Therapy*, 2002, 82(9): 898-915
- [70] Weiss P L, Kizony R, Feintuch U, *et al.* Virtual reality in neurorehabilitation[M] //Selzer M, Clarke S, Cohen L, *et al.* Textbook of Neural Repair and Rehabilitation. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 182-197
- [71] McNulty P A, Thompson-Butel A G, Faux S G, *et al.* The efficacy of Wii-based movement therapy for upper limb rehabilitation in the chronic poststroke period: a randomized controlled trial[J]. *International Journal of Stroke*, 2015, 10(8): 1253-1260
- [72] Webster D, Celik O. Systematic review of Kinect applications in elderly care and stroke rehabilitation[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2014, 11: Article No.108
- [73] Wingham J, Adie K, Turner D, *et al.* Participant and caregiver experience of the Nintendo Wii Sports™ after stroke: qualitative study of the trial of Wii™ in stroke (TWIST)[J]. *Clinical Rehabilitation*, 2015, 29(3): 295-305
- [74] Nawaz A, Skjæret N, Helbostad J L, *et al.* Usability and acceptability of balance exergames in older adults: a scoping review[J]. *Health Informatics Journal*, 2016, 22(4): 911-931
- [75] Laver K E, Lange B, George S, *et al.* Virtual reality for stroke rehabilitation[J]. *Cochrane database of Systematic Reviews*, 2017, 11(11): Article No.CD008349
- [76] Laver K. Virtual reality for stroke rehabilitation[M] //Hayre C M, Muller D J, Scherer M J. *Virtual Reality in Health and Rehabilitation*. Boca Raton: CRC Press, 2020: 19-28
- [77] Taub E, Uswatte G, Mark V W, *et al.* Method for enhancing real-world use of a more affected arm in chronic stroke: transfer package of constraint-induced movement therapy[J]. *Stroke*, 2013, 44(5): 1383-1388
- [78] Basteris A, Nijenhuis S M, Stienen A H, *et al.* Training modalities in robot-mediated upper limb rehabilitation in stroke: a framework for classification based on a systematic review[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2014, 11: Article No.111
- [79] Levac D E, Huber M E, Sternad D. Learning and transfer of complex motor skills in virtual reality: a perspective review[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2019, 16(1): Article No.121
- [80] Quadrado V H, Silva T D D, Favero F M, *et al.* Motor learning from virtual reality to natural environments in individuals with Duchenne muscular dystrophy[J]. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 2019, 14(1): 12-20
- [81] Oagaz H, Schoun B, Choi M H. Performance improvement and skill transfer in table tennis through training in virtual reality[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2022, 28(12): 4332-4343
- [82] Kim A, Schweighofer N, Finley J M. Locomotor skill acquisition in virtual reality shows sustained transfer to the real world[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2019, 16(1): Article No.113
- [83] Michalski S C, Gallomarin N C, Szapak A, *et al.* Improving real-world skills in people with intellectual disabilities: an immersive virtual reality intervention[J]. *Virtual Reality*, 2023, 27(4): 3521-3532
- [84] Chen A Q, Li M, Gao Y. Mem-Box: VR sandbox for adaptive working memory evaluation and training using physiological signals[J]. *The Visual Computer*, 2024: 1-15
- [85] Rose F D, Attree E A, Brooks B M, *et al.* Training in virtual environments: transfer to real world tasks and equivalence to real task training[J]. *Ergonomics*, 2000, 43(4): 494-511
- [86] de Mello Monteiro C B, Massetti T, da Silva T D, *et al.* Transfer of motor learning from virtual to natural environments in individuals with cerebral palsy[J]. *Research in Developmental Disabilities*, 2014, 35(10): 2430-2437
- [87] Massetti T, Fávero F M, Del Ciello de Menezes L, *et al.* Achievement of virtual and real objects using a short-term motor learning protocol in people with duchenne muscular dystrophy: a crossover randomized controlled trial[J]. *Games for Health Journal*, 2018, 7(2): 107-115
- [88] Anglin J, Saldana D, Schmiesing A, *et al.* Transfer of a skilled motor learning task between virtual and conventional environments[C] //Proceedings of the IEEE Virtual Reality. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 401-402
- [89] Levac D E, Jovanovic B B. Is children's motor learning of a postural reaching task enhanced by practice in a virtual environment?[C] //Proceedings of the International Conference on Virtual Rehabilitation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 1-7
- [90] Cho S, Kim W S, Paik N J, *et al.* Upper-limb function assessment using VBBTs for stroke patients[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2016, 36(1): 70-78
- [91] Sakata S, Grove P M, Hill A, *et al.* Impact of simulated three-dimensional perception on precision of depth judgements, technical performance and perceived workload in laparoscopy[J]. *British Journal of Surgery*, 2017, 104(8): 1097-1106
- [92] Charles D, Holmes D, Charles T, *et al.* Virtual reality design for stroke rehabilitation[M] //Rea P M. *Biomedical Visualisation: Volume 6*. Cham: Springer, 2020: 53-87
- [93] Ebrahimi E, Babu S V, Pagano C C, *et al.* An empirical evaluation of visuo-haptic feedback on physical reaching behaviors during 3D interaction in real and immersive virtual environments[J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2016, 13(4): Article No.19
- [94] Ranganathan R, Wieser J, Mosier K M, *et al.* Learning redundant motor tasks with and without overlapping dimensions: facilitation and interference effects[J]. *Journal of Neuroscience*, 2014, 34(24): 8289-8299
- [95] Arlati S, Colombo V, Ferrigno G, *et al.* Virtual reality-based wheelchair simulators: a scoping review[J]. *Assistive Technology*, 2020, 32(6): 294-305
- [96] Held J P O, Yu K, Pyles C, *et al.* Augmented reality-based rehabilitation of gait impairments: case report[J]. *JMIR mHealth and uHealth*, 2020, 8(5): Article No.e17804
- [97] Ferreira dos Santos L, Christ O, Mate K, *et al.* Movement visualisation in virtual reality rehabilitation of the lower limb: a systematic review[J]. *BioMedical Engineering Online*, 2016, 15(S3): Article No.144
- [98] Svetlana L, Dizon J M R. A systematic review on the effectiveness of mental practice with motor imagery in the neurologic rehabilitation of stroke patients[J]. *The Internet Journal of Allied Health Sciences and Practice*, 2009, 7(2): Article No.10
- [99] Thieme H, Mehrholz J, Pohl M, *et al.* Mirror therapy for improving motor function after stroke[J]. *Stroke*, 2013, 44(1): e1-e2
- [100] Zimmermann-Schlatter A, Schuster C, Puhán M A, *et al.* Efficacy of motor imagery in post-stroke rehabilitation: a systematic review[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2008, 5: Article No.8
- [101] da Silva Cameirão M, Bermúdez i Badia S, Duarte E, *et al.*

- Virtual reality based rehabilitation speeds up functional recovery of the upper extremities after stroke: a randomized controlled pilot study in the acute phase of stroke using the rehabilitation gaming system[J]. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 2011, 29(5): 287-298
- [102] Schüller T, Drehlmann S, Kane F, *et al.* Abstract virtual environment for motor rehabilitation of stroke patients with upper limb dysfunction. A pilot study[C] //Proceedings of the International Conference on Virtual Rehabilitation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013: 184-185
- [103] Hoermann S, Franz E A, Regenbrecht H. Referred sensations elicited by video-mediated mirroring of hands[J]. *PLoS One*, 2012, 7(12): Article No.e50942
- [104] Ferreira dos Santos L, Schmidt H, Dohle C, *et al.* Avatare in der virtuellen Neurorehabilitation der unteren und oberen Extremitäten[C] //Proceedings of the 10th Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2013: 282-287
- [105] Dohle C, Stephan K M, Valvoda J T, *et al.* Representation of virtual arm movements in precuneus[J]. *Experimental Brain Research*, 2011, 208(4): 543-555
- [106] Ventura S, Brivio E, Riva G, *et al.* Immersive versus non-immersive experience: exploring the feasibility of memory assessment through 360° technology[J]. *Frontiers in Psychology*, 2019, 10: Article No.2509
- [107] Czernuszenko M, Pape D, Sandin D, *et al.* The ImmersaDesk and Infinity Wall projection-based virtual reality displays[J]. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1997, 31(2): 46-49
- [108] Zaidman L, Lusky G, Shmueli A, *et al.* Distraction with virtual reality goggles in paediatric dental treatment: a randomised controlled trial[J]. *International Dental Journal*, 2023, 73(1): 108-113
- [109] Maani C V, Hoffman H G, Morrow M, *et al.* Virtual reality pain control during burn wound debridement of combat-related burn injuries using robot-like arm mounted VR goggles[J]. *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*, 2011, 71(1): S125-S130
- [110] Kerruish E. Arranging sensations: smell and taste in augmented and virtual reality[J]. *The Senses and Society*, 2019, 14(1): 31-45
- [111] Archer N S, Bluff A, Eddy A, *et al.* Odour enhances the sense of presence in a virtual reality environment[J]. *PLoS One*, 2022, 17(3): Article No.e0265039
- [112] Ramic-Brkic B, Chalmers A. Virtual smell: authentic smell diffusion in virtual environments[C] //Proceedings of the 7th International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa. New York: ACM Press, 2010: 45-52
- [113] Cruz-Neira C, Sandin D J, Defanti T A, *et al.* The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment[J]. *Communications of the ACM*, 1992, 35(6): 64-72
- [114] Kober S E, Kurzmann J, Neuper C. Cortical correlate of spatial presence in 2D and 3D interactive virtual reality: an EEG study[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2012, 83(3): 365-374
- [115] Wirth W, Hartmann T, Böcking S, *et al.* A process model of the formation of spatial presence experiences[J]. *Media Psychology*, 2007, 9(3): 493-525
- [116] Sollfrank T, Hart D, Goodsell R, *et al.* 3D visualization of movements can amplify motor cortex activation during subsequent motor imagery[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2015, 9: Article No.463
- [117] Nagai H, Tanaka T. Action observation of own hand movement enhances event-related desynchronization[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2019, 27(7): 1407-1415
- [118] Keshner E A, Lamontagne A. The untapped potential of virtual reality in rehabilitation of balance and gait in neurological disorders[J]. *Frontiers in Virtual Reality*, 2021, 2: Article No.641650
- [119] Prokop T, Schubert M, Berger W. Visual influence on human locomotion Modulation to changes in optic flow: modulation to changes in optic flow[J]. *Experimental Brain Research*, 1997, 114(1): 63-70
- [120] Adamovich S V, Fluet G G, Tunik E, *et al.* Sensorimotor training in virtual reality: a review[J]. *NeuroRehabilitation*, 2009, 25(1): 29-44
- [121] Lamontagne A, Fung J, McFadyen B J, *et al.* Modulation of walking speed by changing optic flow in persons with stroke[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2007, 4: Article No.22
- [122] Katsavelis D, Mukherjee M, Decker L M, *et al.* The effect of virtual reality on gait variability[J]. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 2010, 14(3): 239-256
- [123] Mohler B J, Thompson W B, Creem-Regehr S H, *et al.* Visual flow influences gait transition speed and preferred walking speed[J]. *Experimental Brain Research*, 2007, 181(2): 221-228
- [124] O'Connor S M, Donelan J M. Fast visual prediction and slow optimization of preferred walking speed[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2012, 107(9): 2549-2559
- [125] Powell W A, Hand S, Stevens B, *et al.* Optic flow in a virtual environment: sustained influence on speed of locomotion[J]. *CyberPsychology & Behavior*, 2006, 9(6): Article No.710
- [126] Salinas M M, Wilken J M, Dingwell J B. How humans use visual optic flow to regulate stepping during walking[J]. *Gait & Posture*, 2017, 57: 15-20
- [127] Schubert M, Prokop T, Brocke F, *et al.* Visual kinesthesia and locomotion in Parkinson's disease[J]. *Movement Disorders*, 2005, 20(2): 141-150
- [128] Lim H. Effect of the modulation of optic flow speed on gait parameters in children with hemiplegic cerebral palsy[J]. *Journal of Physical Therapy Science*, 2014, 26(1): 145-148
- [129] Kang H K, Kim Y, Chung Y, *et al.* Effects of treadmill training with optic flow on balance and gait in individuals following stroke: randomized controlled trials[J]. *Clinical Rehabilitation*, 2012, 26(3): 246-255
- [130] Winter C, Kern F, Gall D, *et al.* Immersive virtual reality during gait rehabilitation increases walking speed and motivation: a usability evaluation with healthy participants and patients with multiple sclerosis and stroke[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2021, 18(1): Article No.68
- [131] de Keersmaecker E, Van Bladel A, Zaccardi S, *et al.* Virtual reality—enhanced walking in people post-stroke: effect of optic flow speed and level of immersion on the gait biomechanics[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2023, 20(1): Article No.124
- [132] Ossmy O, Mukamel R. Neural network underlying intermanual skill transfer in humans[J]. *Cell Reports*, 2016, 17(11): 2891-2900
- [133] Ossmy O, Mukamel R. Short term motor-skill acquisition improves with size of self-controlled virtual hands[J]. *PLoS One*, 2017, 12(1): Article No.e0168520
- [134] Ossmy O, Mukamel R. Behavioral and neural effects of congruency of visual feedback during short-term motor learning[J].

- NeuroImage, 2018, 172: 864-873
- [135] Braun N, Debener S, Spychala N, *et al.* The senses of agency and ownership: a review[J]. *Frontiers in Psychology*, 2018, 9: Article No.535
- [136] Ishikawa R, Ayabe-Kanamura S, Izawa J. The role of motor memory dynamics in structuring bodily self-consciousness[J]. *iScience*, 2021, 24(12): Article No.103511
- [137] Kim C S, Jung M, Kim S Y, *et al.* Controlling the sense of embodiment for virtual avatar applications: methods and empirical study[J]. *JMIR Serious Games*, 2020, 8(3): Article No.e21879
- [138] Zopf R, Polito V, Moore J. Revisiting the link between body and agency: visual movement congruency enhances intentional binding but is not body-specific[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): Article No.196
- [139] Ma K, Hommel B. The role of agency for perceived ownership in the virtual hand illusion[J]. *Consciousness and Cognition*, 2015, 36: 277-288
- [140] Synofzik M, Vosgerau G, Newen A. I move, therefore I am: a new theoretical framework to investigate agency and ownership[J]. *Consciousness and Cognition*, 2008, 17(2): 411-424
- [141] Seinfeld S, Feuchtnr T, Pinzek J, *et al.* Impact of information placement and user representations in VR on performance and embodiment[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2022, 28(3): 1545-1556
- [142] Tambone R, Giachero A, Calati M, *et al.* Using body ownership to modulate the motor system in stroke patients[J]. *Psychological Science*, 2021, 32(5): 655-667
- [143] Shin Y, Lim J, Kim Y, *et al.* Effects of virtual body-representation on motor skill learning[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): Article No.15283
- [144] Ferreira dos Santos L, Schmidt H, Krüger J, *et al.* Visualization of virtual reality neurological motor rehabilitation of the upper limb—a systematic review[C] //Proceedings of the International Conference on Virtual Rehabilitation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013: 176-177
- [145] Lacquaniti F, Ivanenko Y P, Zago M. Development of human locomotion[J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2012, 22(5): 822-828
- [146] Jeannerod M. The neural and behavioural organization of goal-directed movements[M]. Oxford: Clarendon Press, 1988
- [147] Carr J H, Shepherd R B. Neurological rehabilitation: optimizing motor performance[M]. New York: Churchill Livingstone, 2010
- [148] Wulf G. Attentional focus and motor learning: a review of 15 years[J]. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 2013, 6(1): 77-104
- [149] Lloréns R, Noé E, Naranjo V, *et al.* Tracking systems for virtual rehabilitation: objective performance vs. subjective experience. A practical scenario[J]. *Sensors*, 2015, 15(3): 6586-6606
- [150] Juo Y Y, Abiri A, Pensa J, *et al.* Center for advanced surgical and interventional technology multimodal haptic feedback for robotic surgery[M] //Abedin-Nasab M H. *Handbook of Robotic and Image-Guided Surgery*. Amsterdam: Elsevier, 2020: 285-301
- [151] Gao Y, Zhai Y N, Hao M Y, *et al.* Research on the usability of hand motor function training based on VR system[C] //Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2021: 354-358
- [152] Kim W S, Cho S, Ku J, *et al.* Clinical application of virtual reality for upper limb motor rehabilitation in stroke: review of technologies and clinical evidence[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2020, 9(10): Article No.3369
- [153] Chen J Y, Or C K, Chen T R. Effectiveness of using virtual reality-supported exercise therapy for upper extremity motor rehabilitation in patients with stroke: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Journal of Medical Internet Research*, 2022, 24(6): Article No.e24111
- [154] 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 Research International*, 2014, 2014: Article No.752128
- [155] Kiper P, Szczudlik A, Mirek E, *et al.* The application of virtual reality in neuro-rehabilitation: motor re-learning supported by innovative technologies[J]. *Medical Rehabilitation*, 2013, 17(4): 29-36
- [156] Kiper P, Szczudlik A, Agostini M, *et al.* Virtual reality for upper limb rehabilitation in subacute and chronic stroke: a randomized controlled trial[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2018, 99(5): 834-842.e4
- [157] Gorman C, Gustafsson L. The use of augmented reality for rehabilitation after stroke: a narrative review[J]. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 2022, 17(4): 409-417
- [158] Mihelj M, Novak D, Milavec M, *et al.* Virtual rehabilitation environment using principles of intrinsic motivation and game design[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2012, 21(1): 1-15
- [159] Hocine N, Gouaïch A, Cerri S A, *et al.* Adaptation in serious games for upper-limb rehabilitation: an approach to improve training outcomes[J]. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 2015, 25(1): 65-98
- [160] Levac D E, Sveistrup H. Motor learning and virtual reality[M] //Weiss P L, Keshner E A, Levin M F. *Virtual Reality for Physical and Motor Rehabilitation*. New York: Springer, 2014: 25-46
- [161] Holden M K. Virtual environments for motor rehabilitation: review[J]. *CyberPsychology & Behavior*, 2005, 8(3): 187-211
- [162] Carr J H, Shepherd R B. Brain reorganization, the rehabilitation environment, measuring outcomes[M] //Carr J H, Shepherd R B. *Stroke Rehabilitation: Guidelines for Exercise and Training to Optimize Motor Skill*. Edinburgh: Butterworth-Heinemann, 2003: 3-31
- [163] Lohse K, Shirzad N, Verster A, *et al.* Video games and rehabilitation: using design principles to enhance engagement in physical therapy[J]. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 2013, 37(4): 166-175
- [164] Lewis G N, Woods C, Rosie J A, *et al.* Virtual reality games for rehabilitation of people with stroke: perspectives from the users[J]. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 2011, 6(5): 453-463
- [165] Cheung K L, Tunik E, Adamovich S V, *et al.* Neuroplasticity and virtual reality[M] //Weiss P L, Keshner E A, Levin M F. *Virtual Reality for Physical and Motor Rehabilitation*. New York: Springer, 2014: 5-24
- [166] Wong R S M, Yu E Y T, Wong T W L, *et al.* Development and pilot evaluation of a mobile app on parent-child exercises to improve physical activity and psychosocial outcomes of Hong Kong Chinese children[J]. *BMC Public Health*, 2020, 20(1): Article No.1544
- [167] Rohrbach N, Chicklis E, Levac D E. What is the impact of user affect on motor learning in virtual environments after stroke? A scoping review[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2019, 16(1): Article No.79

- [168] Adie K, Schofield C, Berrow M, *et al.* Does the use of Nintendo Wii Sports™ improve arm function? Trial of Wii™ in Stroke: a randomized controlled trial and economics analysis[J]. *Clinical Rehabilitation*, 2017, 31(2): 173-185
- [169] Kong K H, Loh Y J, Thia E, *et al.* Efficacy of a virtual reality commercial gaming device in upper limb recovery after stroke: a randomized, controlled study[J]. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 2016, 23(5): 333-340
- [170] Kang M G, Yun S J, Lee S Y, *et al.* Effects of upper-extremity rehabilitation using smart glove in patients with subacute stroke: results of a prematurely terminated multicenter randomized controlled trial[J]. *Frontiers in Neurology*, 2020, 11: Article No.580393
- [171] Xie H Y, Zhang H T, Liang H W, *et al.* A novel glasses-free virtual reality rehabilitation system on improving upper limb motor function among patients with stroke: a feasibility pilot study[J]. *Medicine in Novel Technology and Devices*, 2021, 11: Article No.100069
- [172] Levin M F, Demers M. Motor learning in neurological rehabilitation[J]. *Disability and Rehabilitation*, 2021, 43(24): 3445-3453
- [173] Lam P, Hebert D, Boger J, *et al.* A haptic-robotic platform for upper-limb reaching stroke therapy: preliminary design and evaluation results[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2008, 5: Article No.15
- [174] Fernández-Vázquez D, Cano-de-la-Cuerda R, Navarro-López V. Haptic glove systems in combination with semi-immersive virtual reality for upper extremity motor rehabilitation after stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(16): Article No.10378
- [175] Deutsch J E, Lewis J A, Burdea G. Technical and patient performance using a virtual reality-integrated telerehabilitation system: preliminary finding[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2007, 15(1): 30-35
- [176] Chen S W, Hu B, Gao Y, *et al.* Lower limb balance rehabilitation of post-stroke patients using an evaluating and training combined augmented reality system[C] //Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2020: 217-218
- [177] Fung J, Malouin F, McFadyen B J, *et al.* Locomotor rehabilitation in a complex virtual environment[C] //Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2004: 4859-4861
- [178] Wellner M, Thüring T, Smajic E, *et al.* Obstacle crossing in a virtual environment with the rehabilitation gait robot LOKOMAT[J]. *Studies in Health Technology and Informatics*, 2007, 125: 497-499
- [179] Zakharov A V, Bulanov V A, Khivintseva E V, *et al.* Stroke affected lower limbs rehabilitation combining virtual reality with tactile feedback[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2020, 7: Article No.81
- [180] Villiger M, Liviero J, Awai L, *et al.* Home-based virtual reality-augmented training improves lower limb muscle strength, balance, and functional mobility following chronic incomplete spinal cord injury[J]. *Frontiers in Neurology*, 2017, 8: Article No.635
- [181] Dimbwadyo-Terrer I, Gil-Agudo A, Segura-Fragoso A, *et al.* Effectiveness of the virtual reality system Toyra on upper limb function in people with tetraplegia: a pilot randomized clinical trial[J]. *BioMed Research International*, 2016, 2016: Article No.6397828
- [182] Leemhuis E, Esposito R M, De Gennaro L, *et al.* Go virtual to get real: virtual reality as a resource for spinal cord treatment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(4): Article No.1819
- [183] de Araújo A V L, de Oliveira Neiva J F, de Mello Monteiro C B, *et al.* Efficacy of virtual reality rehabilitation after spinal cord injury: a systematic review[J]. *BioMed Research International*, 2019, 2019: Article No.7106951
- [184] Sayenko D G, Alekhina M I, Masani K, *et al.* Positive effect of balance training with visual feedback on standing balance abilities in people with incomplete spinal cord injury[J]. *Spinal cord*, 2010, 48(12): 886-893
- [185] Betker A L, Desai A, Nett C, *et al.* Game-based exercises for dynamic short-sitting balance rehabilitation of people with chronic spinal cord and traumatic brain injuries[J]. *Physical Therapy*, 2007, 87(10): 1389-1398
- [186] Chi B, Chau B, Yeo E, *et al.* Virtual reality for spinal cord injury-associated neuropathic pain: systematic review[J]. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2019, 62(1): 49-57
- [187] Hotz-Boendermaker S, Funk M, Summers P, *et al.* Preservation of motor programs in paraplegics as demonstrated by attempted and imagined foot movements[J]. *NeuroImage*, 2008, 39(1): 383-394
- [188] An C M, Park Y H. The effects of semi-immersive virtual reality therapy on standing balance and upright mobility function in individuals with chronic incomplete spinal cord injury: a preliminary study[J]. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 2018, 41(2): 223-229
- [189] Khurana M, Walia S, Noohu M M. Study on the effectiveness of virtual reality game-based training on balance and functional performance in individuals with paraplegia[J]. *Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation*, 2017, 23(3): 263-270
- [190] Maclean N, Pound P. A critical review of the concept of patient motivation in the literature on physical rehabilitation[J]. *Social Science & Medicine*, 2000, 50(4): 495-506
- [191] Kubie L S. Motivation and rehabilitation[J]. *Psychiatry*, 1945, 8(1): 69-78
- [192] Siegert R J, Taylor W J. Theoretical aspects of goal-setting and motivation in rehabilitation[J]. *Disability and Rehabilitation*, 2004, 26(1): 1-8
- [193] Maclean N, Pound P, Wolfe C, *et al.* Qualitative analysis of stroke patients' motivation for rehabilitation[J]. *BMJ*, 2000, 321(7268): 1051-1054
- [194] 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]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2014, 11: Article No.32