

陈鹤翔, 孟巧玲, 喻洪流. 基于虚拟现实技术的康复训练设计方法及评估方法综述[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(10): 110-116. DOI:10.20169/j. issn. 2095-2163. 251016

基于虚拟现实技术的康复训练设计方法及评估方法综述

陈鹤翔^{1,2}, 孟巧玲^{1,2}, 喻洪流^{1,2}

(1 上海理工大学 康复工程与技术研究所, 上海 200093; 2 上海康复器械工程技术研究中心, 上海 200093)

摘要: 在医疗康复领域, 虚拟现实(VR)技术的应用逐渐成为研究的焦点。本文针对近年基于虚拟现实技术的康复训练系统的研究进行了文献综述, 旨在探讨VR技术在康复训练中的设计方法和评估方式, 以期为未来的研究和系统设计提供指导。针对康复训练的设计方法, 本研究分别从任务设计、场景设计及运动捕捉设计三个方面进行深入分析。研究发现, 层次型任务设计因其贴近现实生活而受到青睐。认知型任务设计则更适用于对活动精度要求较高的肢体康复和认知康复。场景设计方面, 浸没式场景提供更好的沉浸感, 而非沉浸式场景设计则在提高康复效率方面表现出独特优势。在动作捕捉设计方面, 光学技术受到环境因素的影响, 而非光学技术如穿戴式设备则存在稳定性和易用性的挑战。在评估方法上, 本研究分析了结合量表、生物信号以及自订评分标准的评估技术。在文末部分对虚拟现实在康复训练领域的设计方法和评估方法进行了总结, 并针对目前存在的问题对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 虚拟现实技术; 运动功能康复; 认知康复; 评估方法; 综述

中图分类号: TP391; R496 文献标志码: A 文章编号: 2095-2163(2025)10-0110-07

A review of design and evaluation methods for rehabilitation training based on Virtual Reality technology

CHEN Hexiang^{1,2}, MENG Qiaoling^{1,2}, YU Hongliu^{1,2}

(1 Institute of Rehabilitation Engineering and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2 Shanghai Rehabilitation Equipment Engineering Technology Research Center, Shanghai 200093, China)

Abstract: In the field of medical rehabilitation, the application of Virtual Reality (VR) technology is increasingly becoming the focal point of research. This paper conducts a literature review of recent studies on VR-based rehabilitation training systems, aiming to explore the design methods and evaluation approaches of VR technology in rehabilitation training, in order to provide guidance for future research and system design. Regarding the design of rehabilitation training, this study delves into three aspects: task design, scene design, and motion input design. It is found that hierarchical task design is favored for its closeness to real-life activities. Cognitive task design is more suitable for limb rehabilitation and cognitive rehabilitation where precision in activities is highly demanded. In terms of scene design, immersive scenes provide a better sense of immersion, while non-immersive scene designs show unique advantages in improving rehabilitation efficiency. In motion capture design, optical technology is affected by environmental factors, whereas non-optical technologies like wearable devices face challenges in stability and ease of use. For evaluation methods, the study analyzes assessment techniques that combine scales, biosignals, and custom scoring standards. The paper concludes with a summary of the design methods and evaluation methods of virtual reality in the field of rehabilitation training and provides an outlook on future research directions based on current challenges.

Key words: Virtual Reality technology; motion functional rehabilitation; cognitive rehabilitation; assessment method; review

0 引言

在过去的几十年中, 虚拟现实(VR)技术在医疗

康复领域的应用已经成为一个热门的研究方向。随着科技的快速发展, VR技术已经从一个认知概念演变成为一种具有广泛应用前景的先进工具^[1]。

作者简介: 陈鹤翔(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 虚拟现实康复训练及评估系统; 喻洪流(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 智能康复机器人, 智能护理机器人, 人机智能交互技术, 穿戴式人体仿生系统及智能控制等。

通信作者: 孟巧玲(1978—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 神经康复机器人, 柔性外骨骼机器人, 人机无障碍智能交互等。Email: qiaoling_meng@126.com

收稿日期: 2024-01-04

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

而与此同时,在当下全球性的人口老龄化和慢性疾病日趋增多的背景条件下^[2],康复医学领域对于高效、可靠的康复治疗方法的需求也不断增长。

当前,康复领域面临着专业人士数量缺乏和患者需求增加的双重挑战。虚拟现实技术因其独特的互动性和沉浸感^[3],为解决这一难题提供了新的可能性。该技术不仅能够模拟各种康复环境和任务,还能够提供实时的反馈以增强患者的康复动力和参与度。如此一来,尤其是在长期或高重复度的康复计划中,对于确保患者积极参与康复过程,这一点就显得尤为重要。

此外,随着虚拟现实技术的不断进步,其在康复训练中的应用也变得更加精确和个性化。因此为患者提供定制化的康复训练方案是提高治疗效果和效率的关键策略之一。同时,VR 技术也为康复治疗专业人员提供了有效的工具,以更好地检测和评估康复效果。

本综述旨在探讨虚拟现实技术在康复领域的设计方法以及评估方式,以期为未来的研究和虚拟现实训练系统设计提供指导和参考。通过对这一技术的深入分析,将能够更好地了解其在康复医学领域中的潜力和遇到的挑战。

1 虚拟现实训练设计方法

虚拟现实技术已经被广泛应用于康复训练中,目前训练的设计方法由于各症状的轻重及病因、人群和适用环境不同也各有差异,但是大体上可以将虚拟现实训练的设计分为 3 个部分,即任务设计、场景设计以及硬件层交互方式的设计。

1.1 任务设计

设计训练方案的第一步是对训练任务及目标进行设计,任务设计是任何训练制定过程的基础。进行训练任务设计的目的是确定具体的康复目标需求,并总结在康复训练过程中应当涉及的所有因素。在所有设计思路中,层次型任务设计和认知型任务设计的应用最为广泛。一般来说层次型任务设计专注于任务本身,更注重描述不同小任务组成的共同目标,而认知型任务设计更侧重于在任务流程中处理意外情况。

1.1.1 层次型任务设计

虚拟现实康复训练系统的设计灵感大多来自日常生活活动,采用这种设计方式更加容易使人接受。大部分肢体康复训练更加注重重复性和稳定性,因此部分研究会采用重复任务的形式搭配不断变化的

场景创造新鲜的视听觉刺激来消除动作重复带来的枯燥感,例如 Jiao 等学者^[4]的研究中将训练任务设计为在不同风格的街区中进行简单的奔跑,不仅贴合现实活动具有康复有效性,而且对于认知的负荷较轻。减轻的认知负荷对于一些技术的应用是必需的,例如 Yan 等学者^[5]的研究结合了脑电信号并通过解读其携带的运动意识驱动手部外骨骼机器人辅助患者进行运动以完成手部抓握的任务目标,通过简单的任务引导达到有效的辅助训练功能。

分层次的任务设计还可以用于选择不同的任务目标。如文献[6]通过不同的任务设计以针对不同部位的康复训练,通过区分任务目标来训练不同的肩部肌群,使用这种层次性的任务结构设计满足了肩袖康复治疗的复杂多样性。

除此以外,层次型的任务设计可以通过还原日常生活中的复杂任务来使参与者的注意力从重复性的任务转移到一个长期目标上。文献[7]设计了中风后康复的抓握拾取放置训练和平衡行走训练,选择了生活中容易实现但高度依赖的动作进行重复训练有助于快速帮助患者进行生活功能的恢复。还有部分研究^[8]选取了烹饪这一更加普遍的日常活动作为训练引导的环境设计,游戏设计了一系列贴近真实的事件引导玩家完成制作一杯水果饮料的最终目标。但是在实验后的问卷中也体现了由于游戏的复杂度较高,使用者有时不能顺利完成流程,这对于训练引导的设计也是一个很大的挑战。

1.1.2 认知型任务设计

认知型的任务一般采用高随机性的训练目标或训练过程,为训练带入更多的变数来对患者进行多方位训练。Campo-Prieto 等学者^[9]的研究就利用了这种随机性,使用一款拳击游戏结合商用 VR 设备进行训练,证明了这是一种合适于帕金森康复的体育活动方式。文献[10]研究设计了一种用于平衡训练的任务,在不同场景下进行随机出现物体的抛接,这种方法既不易造成认知障碍,也有足够的随机性诱使不平衡事件发生以训练平衡性,该研究的受试者均表示愿意接受高于标准训练时间的训练,证明了其任务的趣味性。与此相似的研究^[11]设计了单侧和双侧的训练模式,并使用了随机出现的目标来进行上肢的移动和手部抓握训练来确保具有适度的挑战性和重复性。这类任务设计应对的训练目标一般是活动精度要求较高的肢体康复,以确保随机性、同时针对肢体灵活性有足够的锻炼。

随机性强的认知任务也常设计用于认知训练,

比如文献[12]用于脑部创伤儿童的康复训练,任务设计为施放不同类型法术击败不同位置出现的敌人,其中包含了加强视觉听觉认知以及记忆功能的设计。还有用于阿兹海默症认知康复的研究^[13]。该研究设计了一种认知任务,让使用者在 VR 环境模拟的人群中找出穿着指定颜色以及指定图案衣服的人,这种双重随机事件通常需要患者以更强的认知能力来完成训练。

1.2 训练场景设计

沉浸感、临场感、交互性被认为是虚拟显示技术的核心特征,虽然大部分研究者对于临场感和交互性的看法都基本一致,但是对于沉浸感却存在不同的看法,一个研究分支认为沉浸感是一种可以被评估的技术属性,另一个研究分支则认为沉浸感应该是一种主观个人的心理现象。由此也可以得出虚拟现实训练视觉场景设计的 2 种分支,即沉浸式设计和非沉浸式设计。

1.2.1 沉浸式场景设计

沉浸式场景的设计主要追求完全的沉浸感,沉浸感会令使用者对现实世界和时间的感知变得脱节,进而在沉浸式的环境中出现一种“存在”感^[14]。比如文献[15]选择虚拟家庭环境作为沉浸式环境,可以让参与者在训练过程中充分体会到放松,从而缓解参与者的紧张情绪和枯燥感。Fregna 等学者^[16]研究设计并实施了一个沉浸式虚拟现实场景用于上肢康复,使康复程序对患者来说既具有挑战性又令人愉快,更重要的是能够提高患者对治疗的依从性,实验表明包含接触自然和感官丰富的环境会增加患者的训练积极性。同时通过沉浸式的头戴式显示器,可以使患者更加直观地控制环境中的虚拟手。

设计合理的沉浸式场景可以通过全方位的视觉听觉感受对患者产生引导作用,以用于在无专业康复师辅导的情况下进行训练。Huang 等学者^[17]研究制作了 6 个不同的沉浸式场景(厨房、射击场、操场、篮球场、拳击场、击剑馆),并且分别设计了与场景相关的训练任务,患者被要求每天进行 30 min 的康复训练,但是大部分患者在无时长提示的情况下都进行了超出规定要求的康复训练。部分研究^[18]以家庭环境设计了一种沉浸式的前庭康复训练系统,在训练过程中通过逼真的听觉、视觉反馈对患者产生引导训练的作用,使患者按照训练要求使用眼部、头部和腰部进行协调运动以完成任务。由于设备简单和引导的全面性,也适于在没有专业陪护人

员的情况下做离院家庭练习。

但是沉浸式场景在使用中常常伴有各种不良反应。Soon 等学者^[19]设计了一款模拟行走的训练程序,但是场景未经设计而是由 GoPro 拍摄而成,在这一研究中 71% 的参与者都经历了晕动症的感受,经分析这是由于过多的动态元素以及场景拍摄时移动速度与训练行走速度不匹配造成的。

1.2.2 非沉浸式场景设计

非沉浸式场景设计则不将沉浸感局限于视觉环境的沉浸,这种设计同样可以为康复训练带来不同于传统康复训练的优势^[20]。使用非沉浸式虚拟现实训练能够显著改善康复训练效率。例如文献[21]研究中使用的 VR 治疗设备是 VRSS®, 并包括一个连接到 3D 运动跟踪系统的计算机和一个高分辨率 LCD 投影仪,在大屏幕上显示虚拟场景。研究中设计了一组实验,用于对比传统上肢康复训练、且加入了非沉浸式系统的康复训练疗效,结果显示结合 VR 的康复训练效果相比无 VR 条件下的训练效果有显著改善。非沉浸式的视觉场景一样可以为使用者带来沉浸的体验,Törnbom 等学者^[22]的研究中使用了跑步机对中风患者进行神经康复,一次在跑步机上使用了非沉浸式的虚拟现实训练系统,而另一次则没有,根据实验后的问卷调查表示,参与者重视在大自然中行走的感觉,这与其脑损伤之前在户外散步的回忆产生了关联,进而促进参与者产生了令人兴奋和愉快的体验。

一些研究^[23]使用了新的视觉技术,通过使用裸眼 3D 技术让使用者在可以不与外界环境完全隔离的情况下与 3D 的虚拟物体产生互动,有助于产生强烈的沉浸感,由于不需佩戴额外视觉设备,进一步减少了使用者产生头晕等潜在副作用。

非沉浸式场景的另一个优点是能够使用廉价的设备构建合适的简易训练环境。如 Segura-Ortí 等学者^[24]的研究将训练对象设定为需要在透析过程中进行身体运动以保持机能的慢性肾病患者,这类康复对象的要求是能够在家庭环境中进行长期训练,由此设计了一套由显示器、计算机和动作识别相机组成的康复训练系统,该套设备在表现出良好的训练效果的同时保持了低廉的造价以及较低的场地限制。

1.3 运动捕捉设计

捕捉使用者的运动输入是治疗效果监测的基础,运动输入是虚拟现实系统的重要一环,这一部分的设计决定了人机交互界面的呈现方式。目前市面

上广泛应用的是一些商用的光学传感器系统, 如 Oculus Quest 的手柄式追踪器^[25]、进行头戴式显示器(HMD)追踪^[26]、Microsoft Kinect^[27]等。还有一些对肢体追踪的光学传感器, 如文献[28]使用了分离式的单独传感器来跟踪患者各个关节的运动位置, 并在训练系统中通过 Unity 中的逆运动学还原患者的全身动作, 但在实验结果部分也指出有参与者认为部分关节跟踪器偏离了原来的穿戴部位导致位置追踪出错。

与此同时也有越来越多的研究者开始研发非光学动作捕捉方案。如文献[29]设计了一种轻便的可穿戴触觉设备, 该设备采用食指和大拇指进行操作。用仿真方式将手指的真实位置用于控制虚拟手指与 VR 系统中的虚拟物体进行交互。文献[30]在研究中设计了一套系统, 使用了 CAREN 系统用于捕捉患者的动作, 并且可以通过用户站立的可动式测力底座对用户产生物理、视觉和认知扰动。

另一些研究将生物信号作为运动的输入, 如文献[31]结合了手部外骨骼康复机器人、虚拟现实以及脑机接口技术。在虚拟现实给予患者训练动作引导时使用脑机接口获取患者的脑电信号, 从中识别患者手部的移动和抓握意图, 并以此为根据驱动手部外骨骼机器人协助患者完成康复训练。使用脑电作为动作输入的还有文献[32], 该研究设计了一款可穿戴上肢外骨骼机器人, 结合了脑电采集识别设备用于获取患者在训练过程中的运动意图, 并以此为依据控制虚拟环境中的肢体和场景的交互以及上肢外骨骼的运动。

2 虚拟现实训练评估方法

在虚拟现实康复设计上, 康复评估技术的发展和应用也同样至关重要。缜密合理的评估不仅可以确保康复训练的有效性, 也为持续改进训练方案提供了科学依据。

2.1 结合量表

在虚拟现实的康复评估中, 结合各种传统量表对患者的身体状态进行评估。通过量表评估的优点在于方法简单, 能够在训练后对多个训练指标进行评估。如文献[33]在 VR 训练后使用了蒙特利尔认知评估(MoCA)来评估认知恢复, 用 Fugl-Meyer 评估测试(FM-UE)来评估上肢的运动能力。同样地, 文献[34]也在训练过程中通过韦氏成人智力量表表格(WAIS-block)和国际体力活动问卷(IPAQ)对训练参与者的认知功能和身体活动机能的改善情况

进行了全面的评估。

除了对患者的某一具体功能进行量表评定, 还可以结合虚拟现实训练的进展情况来对患者进行综合能力的评估。文献[35]设计了不同难度阶段的训练流程, 在每次训练后通过 Catherine Bergego (CBS)量表进行评估, 用于验证经过不同难度阶段的虚拟现实训练后对日常生活活动产生的影响。

但是量表评估也有其局限性, 如单次评估时间较长, 认知类评估量表结果存在主观影响等问题, 因此另一些训练系统选择更加直观的方式进行评估。

2.2 生物信号

随着信号采集和解析技术的进步, 生物信号的监测和分析也成为了评估康复效果的关键工具。这些信号, 包括肌电信号、脑电信号等, 为康复过程提供了实时、客观和量化的数据。通过对这些生理参数的精准监测, 医疗人员能够获得关于患者身体信息和神经系统以及认知状态的深入洞察。

利用肌电信号能够提供连续的生理反馈, 文献[36]使用虚拟现实系统诱发不平衡感觉产生, 再结合肌电信号和足底压力对患者保持平衡的能力进行定量评估。同时肌电信号携带着非常多的有用信息, 如运动意图、肌肉力量和疲劳程度。文献[37]设计的训练系统对肌电信号进行了充分的利用, 该系统通过采集患者手臂部位肌电进行动作模式识别分析, 实现基于肌电信号控制和评估的虚拟现实训练系统, 在评估中主要对患者的动作模式和疲劳状态进行分析评估。充分解析肌电信号携带的信息有利于个性化训练方案的制定, 进而促进患者的参与度^[38]。

利用脑电信号的分析可以揭示患者在训练过程中的注意力集中程度和认知状态, 文献[39]结合虚拟现实和脑电采集设备对前额叶区域的脑电信号进行采集分析, 实验结果表明脑电信号适用于作为认知训练的评估指标。值得一提的是, 该系统使用的一体式脑电信号采集设备解决了脑电采集点位难以确定的问题, 因此在使用上更加便利。

除了利用脑电信号解析认知功能外, 功能性近红外光谱也被部分研究使用。文献[40]使用了 fNIRS 设备提取了受试者大脑的多部位脑功能指标, 并以此全面评估其脑功能状态, 进而分析虚拟现实康复的训练效果, 但是存在实验数据欠佳、信号采集困难的问题。

2.3 自定评分标准

自定评分系统在虚拟现实康复训练中的应用为

评估患者的训练效果提供了一个创新且直观的方法。这种评分系统的核心优势在于其同训练环境的紧密结合,提供了一种类似于游戏的分级制,使得评估过程更加生动和具有吸引力。如文献[41]通过目标完成的速度与宽松度的共同计算来作为患者训练的评分并以此为依据实时改变游戏难度。文献[16]研究中设计的系统能够自动向治疗室提供运动表现的定量评估,通过统计完成每个任务的时长来表示患者康复训练中的进展,实验表明在这一系统中与健康肢体相比受损者完成时间明显要更长,这一现象证明了这种评估方式的有效性。通过这种方法,患者的训练成果不仅可以量化,而且能够即时呈现,进而提高患者的参与度和动力。

3 结束语

虚拟现实康复训练中的任务、场景和运动捕捉三个设计密不可分,同时现有的评估方法,例如:结合量表、生物信号、自定评分等能够对虚拟现实的训练结果做出定性定量评估。但是在设计方法和评估方法两个方面仍然面临着许多困难和挑战。

首先,层次型任务设计虽然更加接近日常生活活动,提高了训练的真实性,但是难以平衡真实性同认知上带来的负荷,这要求有良好的引导设计来确保患者训练流程的流畅稳定。认知型任务设计通常应用于认知康复或活动精细度较高的肢体康复需求,其核心在于引入高随机性的训练目标或过程。然而目前的研究中很少看到这两种任务设计的有机结合,这意味着在未来的研究中将随机性融入多层次的任务以提高任务的多样性及趣味性是一种可行的尝试。

在训练场景的设计方面,沉浸式场景设计由于其高沉浸感,能够为患者提供放松体验并提高依从性,但晕动症等副作用和对设备的高要求成为了训练环境设计者的限制因素。导致晕动症的原因分为虚拟现实环境和硬件性能方面。环境中的动态元素过多、模仿式的运动引导以及不同步的运动画面都有更高概率在训练中导致不适症状^[19,42]。硬件方面是由于立体显示器会在观察者的双眼都呈现出一个单独的透视图,以体验具有深度感的3D图像,而串扰指立体显示系统中一个图像通道向另一个图像通道的泄露。而超过5%的串扰就会导致观察者恶心和头晕^[43]。通过避免这两方面因素的场景设计可以有效减少晕动症的发生。

光学技术作为动作捕捉输入的主流方法,其准

确性经常受到环境光和遮挡影响,导致被遮挡的肢体部分的追踪存在困难。非光学的动作捕捉系统、如使用惯性测量或穿戴式设备,虽然克服了光学技术的限制,但在家庭训练环境中的应用存在穿戴困难和稳定性的问题。在未来的研究中可以设计更加轻便稳定的穿戴式传感器系统来解决这一困难,如使用一体式的可穿戴传感器系统等,减少采集点位定位的困难。

在评估技术方面,传统的量表评估方法虽然简便,但是无法提供客观的生理数据。生物信号作为评估手段虽然弥补了这一缺点,采用肌电信号的评估方式可以有效解读患者的运动意图以及患者的肌肉力量和疲劳状况,脑电信号的评估方式可以对患者的认知状况以及大脑兴奋区域进行全面评估,但在应用中却面临着肌电信号的采集点位穿戴困难、噪声干扰较多,以及脑电信号的计算和解析困难等问题。

自定得分式的评估方法紧密结合了游戏化元素,适用于家庭环境的远程康复,评分的实时显示为患者提供了直观的进步反馈。然而,目前的研究中很少将游戏评分与生理指标之间建立直接联系,这在专业医生对病程分析等方面增加了一定的难度。未来的方向应以多种生理信号为评估基准,结合训练表现计算得分,以获得科学有效、快捷直观的评估结果。

总体而言,虚拟现实技术在康复领域展现出了巨大的潜力和多样化的应用前景。通过令人积极愉悦的康复环境和个性化的训练计划,VR技术不仅能够提高患者的参与度和动力,还能够通过精确的运动跟踪和反馈促进功能恢复。尽管设计和推广上存在一些挑战和局限性,但随着技术的不断进步和更多临床研究的开展,虚拟现实技术在康复领域的应用前景仍然值得期待。未来的研究需要在提高训练的参与度、优化场景设计和动作捕捉技术以及发展更加精准综合的评估方法的方向上继续努力,为患者提供更加科学有效贴心的虚拟现实康复训练方案。

参考文献

- [1] 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.
- [2] THAYABARANATHAN T, KIM J, CADILHAC D A, et al. Global stroke statistics 2022 [J]. International Journal of Stroke, 2022, 17(9): 946-956.

- [3] BURDEA G C, COIFFET P. Virtual reality technology [M]. New York: Wiley, 2003.
- [4] JIAO Y, DAJIME P F, READING S, et al. A VR - based treadmill training system for post-stroke gait rehabilitation [C]// Proceedings of 2023 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 1-4.
- [5] YAN Weidong, XU Zhaoliang, LI Yang. A multi-DOF robot system based on LightGBM-driven EEG decoding model for BCI human - machine interaction [C]//Proceedings of 2023 42nd Chinese Control Conference (CCC). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 8605-8610.
- [6] LONGO U G, CARNEVALE A, ANDREOLI F, et al. Immersive virtual reality for shoulder rehabilitation: evaluation of a physical therapy program executed with oculus quest 2 [J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2023, 24(1) : 859.
- [7] SWEE S K, YOU L Z, HANG B W W, et al. Development of rehabilitation system using virtual reality [C]//Proceedings of 2017 International Conference on Robotics, Automation and Sciences (ICORAS). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1-6.
- [8] ZHANG B, BO A P L, MCKITTRICK A, et al. Handy juice bar: A hand rehabilitation game using immersive VR and finger tracking [C]//Proceedings of 2022 IEEE 10th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 1-6.
- [9] CAMPO-PRIETO P, CANCELÀ-CARRAL J M, RODRÍGUEZ-FUENTES G. Wearable immersive virtual reality device for promoting physical activity in Parkinson's disease patients [J]. Sensors, 2022, 22(9) : 3302.
- [10] OMON K, HARA M, ISHIKAWA H. Virtual reality-guided, dual - task, body trunk balance training in the sitting position improved walking ability without improving leg strength [J]. Progress in Rehabilitation Medicine, 2019, 4: 20190011.
- [11] MEKBIB D B, DEBELI D K, ZHANG Li, et al. A novel fully immersive virtual reality environment for upper extremity rehabilitation in patients with stroke[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2021, 1493(1) : 75-89.
- [12] SHEN Jiabin, LUNDINE J P, KOTERBA C, et al. VR-based cognitive rehabilitation for children with traumatic brain injuries: Feasibility and safety [J]. Rehabilitation Psychology, 2022, 67 (4) : 474-483.
- [13] MANERA V, CHAPOULIE E, BOURGEOIS J, et al. A feasibility study with image - based rendered virtual reality in patients with mild cognitive impairment and dementia[J]. PloS One, 2016, 11(3) : e0151487.
- [14] FREINA L, OTT M. A literature review on immersive virtual reality in education: State of the art and perspectives [J]. The International Scientific Conference E - learning and Software for Education, 2015, 1(133) : 10-1007.
- [15] LIU Hao, MA Hao, CHEN Donglin. Design of limb rehabilitation training system based on virtual reality technology [C]//Proceedings of 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Piscataway, NJ: IEEE, 2020, 1: 1676-1679.
- [16] FREGNA G, SCHINCAGLIA N, BARONI A, et al. A novel immersive virtual reality environment for the motor rehabilitation of stroke patients: A feasibility study[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2022, 9: 906424.
- [17] HUANG Qianqian, WU Wei, CHEN Xiaolong, et al. Evaluating the effect and mechanism of upper limb motor function recovery induced by immersive virtual - reality - based rehabilitation for subacute stroke subjects: study protocol for a randomized controlled trial[J]. Trials, 2019, 20(1) : 104.
- [18] 焦农, 林颖, 张欣睿, 等. 沉浸式虚拟现实系统辅助前庭功能康复的应用 [J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2020, 34 (5) : 447-451.
- [19] SOON B, LEE N, LAU J, et al. Potential of the omnidirectional walking platform with virtual reality as a rehabilitation tool [J]. Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering, 2023, 10: 20556683231161574.
- [20] GUEYE T, DEDKOVA M, ROGALEWICZ V, et al. Early post- stroke rehabilitation for upper limb motor function using virtual reality and exoskeleton: equally efficient in older patients [J]. Neurologia I Neurochirurgia Polska, 2021, 55(1) : 91-96.
- [21] TUROLLA A, DAM M, VENTURA L, et al. Virtual reality for the rehabilitation of the upper limb motor function after stroke: A prospective controlled trial [J]. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 2013, 10: 85.
- [22] TÖRNBOM K, DANIELSSON A. Experiences of treadmill walking with non-immersive virtual reality after stroke or acquired brain injury-A qualitative study[J]. PloS One, 2018, 13(12) : e0209214.
- [23] XIE Haoyu, ZHANG Hantao, LIANG Haowen, 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: 100069.
- [24] SEGURA - ORTÍ E, PÉREZ - DOMÍNGUEZ B, ORTEGA - PÉREZ D V L, et al. Virtual reality exercise intradialysis to improve physical function: A feasibility randomized trial [J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2019, 29 (1) : 89-94.
- [25] GARCÍA-MUÑOZ C, CORTÉS-VEGA M D, HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ J C, et al. Immersive virtual reality and vestibular rehabilitation in multiple sclerosis: Case report[J]. JMIR Serious Games, 2022, 10(1) : e31020.
- [26] SHIN J H, KIM M, LEE J Y, et al. Feasibility of hemispatial neglect rehabilitation with virtual reality-based visual exploration therapy among patients with stroke: Randomised controlled trial [J]. Frontiers in Neuroscience, 2023, 17: 1142663.
- [27] SUGLIA V, BRUNETTI A, PASQUINI G, et al. A serious game for the assessment of visuomotor adaptation capabilities during locomotion tasks employing an embodied avatar in virtual reality [J]. Sensors, 2023, 23(11) : 5017.
- [28] MINER N, MYERS C, SHIRODKAR V, et al. Magic mirror on the wall: Reflecting the realities of lower limb rehabilitation in virtual reality [C]//Proceedings of 2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 576-581.
- [29] BORTONE I, LEONARDIS D, SOLAZZI M, et al. Integration of serious games and wearable haptic interfaces for Neuro Rehabilitation of children with movement disorders: A feasibility study [C]//Proceedings of 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1094-1099.
- [30] LUCAD R, MANULI A, DOMENICO D C, et al. Improving

- neuropsychiatric symptoms following stroke using virtual reality: A case report [J]. Medicine, 2019, 98(19):e15236.
- [31] TOPINI A, SANOSOM W, SECCIANI N, et al. Variable admittance control of a hand exoskeleton for virtual reality-based rehabilitation tasks [J]. Frontiers in Neurorobotics, 2022, 15: 789743.
- [32] TANG Zhichuan, WANG Hang, CUI Zhixuan, et al. An upper-limb rehabilitation exoskeleton system controlled by MI recognition model with deep emphasized informative features in a VR scene [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2023, 31: 4390–4401.
- [33] FARIA A L, CAMEIRÃO M S, COURAS J F, et al. Combined cognitive-motor rehabilitation in virtual reality improves motor outcomes in chronic stroke: A pilot study [J]. Frontiers in Psychology, 2018, 9: 854.
- [34] HOU Haiyan, LI Huijie. Effects of exergame and video game training on cognitive and physical function in older adults: A randomized controlled trial [J]. Applied Ergonomics, 2022, 101: 103690.
- [35] GUIATNI M, TAIR M, AMARA Y, et al. Design and preliminary evaluation of a virtual reality with haptic feedback tool for spatial neglect assessment and rehabilitation [C]//Proceedings of 2023 IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 1–6.
- [36] WEI B, FAN Y, WU Y, et al. Virtual Reality – Induced Symptoms and Effects (VRISE): A balance assessment approach for Parkinson's disease [C]//Proceedings of 2023 IEEE 13th International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 962–967.
- [37] MENG Qiang, ZHANG Jianjun, YANG Xi. Virtual rehabilitation training system based on surface EMG feature extraction and analysis [J]. Journal of Medical Systems, 2019, 43:48.
- [38] HUANG Jianli, LIN Mei'ai, FU Jianming, et al. An immersive motor imagery training system for post-stroke rehabilitation combining VR and EMG-based real-time feedback [C]//Proceedings of 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 7590–7593.
- [39] LEE B, LEE T, JEON H, et al. Synergy through integration of wearable EEG and virtual reality for mild cognitive impairment and mild dementia screening [J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2022, 26(7): 2909–2919.
- [40] QU J, ZHANG Y, BU L. Functional near-infrared spectroscopy in the assessment of rehabilitation efficacy of virtual reality products for people with cognitive disorders [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2023, 97: 103500.
- [41] ZHENG Y, HUANG M, WANG L, et al. How virtual walking task difficulty design influences on task performance and user experience [C]//Proceedings of 2022 8th International Conference on Virtual Reality (ICVR). Piscataway, NJ: IEEE, 2022: 155–162.
- [42] VELI ČKOVIĆ P, MILOVANOVIĆ M. Improvement of the interaction model aimed to reduce the negative effects of cybersickness in VR rehab applications [J]. Sensors, 2021, 21(2): 321.
- [43] WOODS A J. Crosstalk in stereoscopic displays: A review [J]. Journal of Electronic Imaging, 2012, 21(4): 040902.