

虚拟现实具身康复发展现状与展望

蒲放¹, 张元坤¹, 杨力凝², 童诗怡¹, 任韦燕³, 白定群^{2†}

1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100191

2. 重庆医科大学附属第一医院, 重庆 400016

3. 北京航空航天大学医学科学与工程学院, 北京 100191

摘要 虚拟现实技术已广泛应用于康复领域, 但临床效果仍存在巨大争议。虚拟现实具身康复基于身体表征和具身感重塑来理解和分析虚拟现实多感觉通道刺激对功能恢复的影响, 为提升虚拟现实康复系统临床应用效果提供了新的视角和思路。文章阐述了虚拟现实具身康复的发展现状、核心理念和定义, 梳理了其关键技术、临床应用和机制研究等方面的研究进展, 并展望发展趋势和挑战, 最后提出对策建议。

关键词 虚拟现实; 康复; 具身; 身体表征; 多感觉整合

虚拟现实技术 (Virtual Reality, VR) 被视作康复领域最具发展前景的技术之一, 目前已应用于脑卒中、脊髓损伤、精神类疾病、疼痛管理、骨科康复、心脏康复、肺功能康复和帕金森症康复等多个领域^[1-2]。

虚拟现实康复系统的最重要特征是通过虚拟现实技术 3I 特性, 即沉浸性 (Immersion)、交互性 (Interaction) 和构想性 (Imagination), 为康复患者提供丰富多样的多感觉通道刺激和交互反馈。然而, 虚拟现实多感觉刺激和交互反馈对人体生理、心理的影响效果和机制尚未完全明确, 导致当前虚拟现实康复系统的临床应用效果异质性高, 这已经成为虚拟现实康复亟待解决的瓶颈问题^[3-4]。

多项研究表明, 通过虚拟现实多感觉刺激和交互反馈的特定设计, 可以诱发人体的躯体和肢体错觉, 比较典型的包括虚拟手错觉^[5]、离体错觉^[6]、多肢体错觉^[7]等, 本质上是通过虚拟现实刺激和交互来改变人体的身体表征和具身感。因此, 从具身视角出发, 可为虚拟现实康复临床应用效果的提升提供新的思路。据此发展而来的虚拟现实具身康复即通过构建沉浸式虚拟环境, 实现视觉、本体感觉、触觉等多感觉通道协同刺激, 使患者在与虚拟环境的交互中重塑身体表征、强化具身感体验, 最终促进神经可塑性与功能恢复。

文章首先梳理现有虚拟现实康复系统典型组成、典型产品和典型临床应用, 然后系统阐述虚拟

收稿日期: 2025-12-23; 修回日期: 2026-02-03

资助项目: 重庆技术创新与应用发展重点专项 (CSTB2024TIAD-KPX0035)

[†]通信作者

现实具身康复的核心理念与定义、具身感诱导与评价方法,以及具身康复临床应用与机制研究进展,展望发展趋势和挑战,最后提出对策建议。

1 虚拟现实康复系统发展现状

虚拟现实康复系统基于虚拟现实技术实现多感觉通道刺激与交互反馈,是虚拟现实康复评定与训练的载体和基础。近年来,随着虚拟现实技术的快速发展,适用于不同康复场景、特征各异的虚拟现实康复系统不断涌现,并在不同临床领域中应用,从典型组成、典型产品和临床应用3个维度总结其发展(图1)。

1.1 典型组成

虚拟现实康复系统由多个关键组件构成,这些组件共同工作实现虚拟现实技术的沉浸性、交互性、构想性特征,以满足康复评估和训练的需要。一般来说,这些组件分为环境、交互、任务3部分。

环境组件中最主要的是显示系统,它对沉浸感、交互体验和内容呈现起着至关重要的作用,目前包括头戴式显示器(Head Mounted Display,

HMD)、洞穴式自动虚拟环境(Cave Automatic Virtual Environment, CAVE)、环形屏幕和一般显示器等类型,不同类型适用场景存在较大差异,通常可以按照与现实环境的隔离程度分为全沉浸、半沉浸、非沉浸3类。除了显示系统外,复杂的环境因素控制还包括对温度、湿度、氧含量、气压等环境因素进行调整,以及对人体听觉、触觉、本体觉、前庭觉等多感觉通道进行刺激的多种部件。

交互性是虚拟现实技术三大核心特性之一,对沉浸感和构想性有重要影响,交互组件涵盖运动捕获、眼动追踪、力反馈、脑电、肌电等技术,在康复场景中各有独特作用。运动捕获技术通过传感器跟踪用户运动,实时监测患者动作规范性并给予反馈;眼动追踪技术检测用户眼睛位置、注视方向及眼球运动,实现视线交互、注意力分布和认知状态的分析;力反馈技术提供触觉反馈,模拟真实物理特性,提高反馈真实性并保障交互安全;脑电技术检测脑电信号,分析大脑、认知和情绪状态,用于评估与神经反馈训练;肌电技术捕获肌电信号,可用于肌肉状态分析、手势识别、力量反馈模拟、动作分析与角色控制。

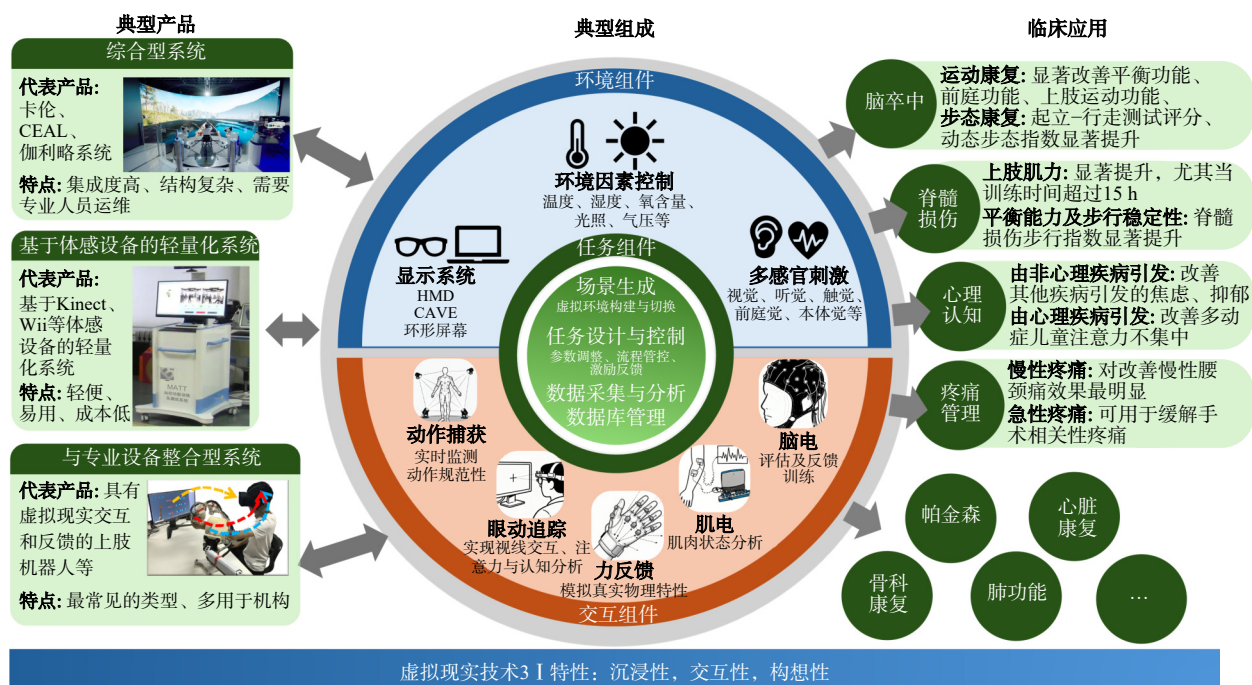


图1 虚拟现实康复系统的现状

Fig. 1 Current status of VR-enabled rehabilitation systems

任务组件是虚拟现实技术在康复系统的核心，涵盖场景生成、任务设计与控制、数据采集与分析、数据库管理等模块。场景生成模块可以构建虚拟康复场景并灵活切换提供沉浸体验；任务设计与控制模块依患者状况部署康复任务，管控流程、调整参数，实时反馈并设置激励，提升训练积极性；数据采集与分析模块收集分析用户数据，支撑康复评估与方案调整；数据库管理模块存储患者及任务数据，为训练计划调整提供支持。

1.2 典型产品

随着虚拟现实技术在康复领域的普及，虚拟现实康复系统按使用场景可大致分为综合型、与专业设备整合型、基于体感设备的轻量化系统 3 类。

综合型系统是集成多种先进技术的大型系统，硬件结构复杂，需专业人员运维，多部署于大型康复机构，代表产品有卡伦系统、CEAL（Challenging Environment Assessment Laboratory）系统、伽利略系统。卡伦系统源自荷兰，由多类设备构建沉浸式环境，搭配自研软件实现步态分析等功能，可定制康复方案，是行业标杆；CEAL 系统由加拿大多伦多康复研究所研发，以 4 个模拟现实场景的实验室为核心，能提供更真实复杂的康复环境，提升患者的环境适应能力；伽利略系统为国产系统，融合多类技术，可模拟生活场景，实现监测、评估、训练的康复闭环，是国产综合型系统的标志性产品。

与专业设备整合型系统是目前最常见的虚拟现实康复系统，可根据患者情况定制训练方案，不但可以提升训练效率和针对性，还能实时监测患者状态。如北京航空航天大学开发的力反馈上肢机器人，通过与虚拟现实技术相结合，可以评估脑卒中患者的精细运动功能。这类系统多用于专业的康复机构，适用于脑卒中、脊髓损伤等各类患者，治疗师可按需选择。

基于体感设备的轻量化系统以基于微软公司的 Kinect 体感摄像机和基于任天堂公司的 Wii 体感手柄最为典型。基于 Kinect 的系统成本低、操作简单、精度稳定，可通过自然动作实现上肢、平

衡等训练；基于 Wii 的系统拥有丰富游戏内容，能提升训练趣味性，还可与他人共同训练以提升患者社交能力和康复信心。基于体感设备的轻量化系统更适于在家庭和社区应用。

1.3 临床典型应用与效果

虚拟现实康复系统的临床康复应用研究已包括运动与神经功能恢复、认知与情绪改善、疼痛管理等多个方向，众多研究对它们的临床应用效果进行了综合评价，但相关结论仍存在较大争议。

在脑卒中康复中，虚拟现实康复系统对上肢运动功能、特定时期的平衡和前庭功能的提升有明显效果^[2]，可有效提升患者手臂运动平滑度、Fugl-Meyer 上肢评分、肩肘腕关节活动度等多项指标，定制化任务、沉浸式环境的干预效果更优。步态康复中，计时起立-行走测试评分、动态步态指数等指标均表现积极。但在手部握力、部分平衡功能（Berg 平衡量表、功能独立性评估结果）和步速方面，虚拟现实康复系统与传统康复的训练效果无显著差异。

针对脊髓损伤患者，虚拟现实康复训练在步行功能（步行指数等）、平衡能力（静态稳定极限等）、上肢肌力提升方面效果显著^[8]，训练时长超过 15 h 后，效果提升会更明显，这与虚拟现实的沉浸式环境、实时反馈对神经可塑性的促进作用相关。但在下肢运动功能（下肢运动功能评分、10 m 步行测试等）、功能性移动能力上，虚拟现实康复训练未呈现一致的改善效果，且患者脱落率高于传统康复组，多与设备适应不良有关。

在心理与认知障碍康复中，虚拟现实康复系统可改善由脑卒中、心血管疾病、肺功能障碍等非心理疾病引发的焦虑^[9]，对于多动症儿童的认知、注意力也有所改善，但针对社会认知功能障碍的干预效果尚无定论。

在疼痛缓解中，虚拟现实康复系统对慢性腰颈痛的改善效果最明显，沉浸式设备效果优于非沉浸式设备；同时，虚拟现实康复系统可用于缓解手术相关急性疼痛；但虚拟现实康复系统用于改善慢性疼痛的长期疗效仍不明确^[10]。

虚拟现实康复系统在骨科^[11]、心脏^[12]、肺功能^[13]、帕金森病^[14]康复中也有应用。在骨科康复中,虚拟现实康复系统可用于改善术后关节功能,提升关节角度测量精度与患者依从性,但个体差异与晕动症可能影响效果;在心脏康复中,虚拟现实康复系统可提升训练参与度,改善部分指标,但心脏功能改善效果不显著;在肺功能康复中,虚拟现实康复系统可提升呼气容积等指标,但对呼吸困难的改善效果不明显;在帕金森康复中,虚拟现实康复系统可以改善平衡功能与步态表现,但易引发眩晕等不适、运动波动和跌倒问题。

总体来说,经过近 10 年的快速发展,虚拟现实康复系统在组成、分类等方面已经有一定的共识,但在临床应用效果方面还存在较大的争议,这已经成为虚拟现实康复系统应用推广的瓶颈问题。虚拟现实康复系统最重要的特征是可以为康复患者提供丰富多样的多感觉通道刺激和交互反馈,这些刺激和交互反馈可以诱发虚拟手错觉、离体错觉、多肢体错觉等特殊响应,这些响应本质上是人体身体表征和具身感的改变。因此,基于这一视角发展而来的虚拟现实具身康复,可为提升虚拟现实康复系统的临床效果提供新的思路。

2 虚拟现实具身康复的核心理念

虚拟现实具身康复的核心理念源于具身认知理论 (Embodied Cognition), 该理论强调认知过程与身体体验、环境交互密不可分, 个体的认知发展、技能学习和神经重塑均依赖于身体与环境的动态交互^[15]。具身康复过程, 就是修复受损的身体表征和具身感体验, 进而实现功能障碍的改善。要理解这一理念, 需先明确身体表征、具身感的核心概念、相互关系和影响因素。图 2 展现了虚拟现实具身康复的框架。

2.1 身体表征与具身感的关系

身体表征 (Body Representation) 是个体对自身身体结构、形态、位置和功能内在认知表征, 主要包括身体图式 (Body Schema) 和身体意象 (Body Image) 两个核心维度^[16]。身体图式是无意识的、动作导向的身体表征, 负责整合视觉、本体感觉、触觉等多感觉信息, 指导日常运动控制与空间定位, 其形成和发展依赖长期的经验积累。身体意象则是有意识的、认知评价性的身体表征, 包含对身体外观、功能状态的主观感知和情感态度, 受社会文化、个体经验等因素影响显著。

具身感 (Sense of Embodiment) 核心表现为身

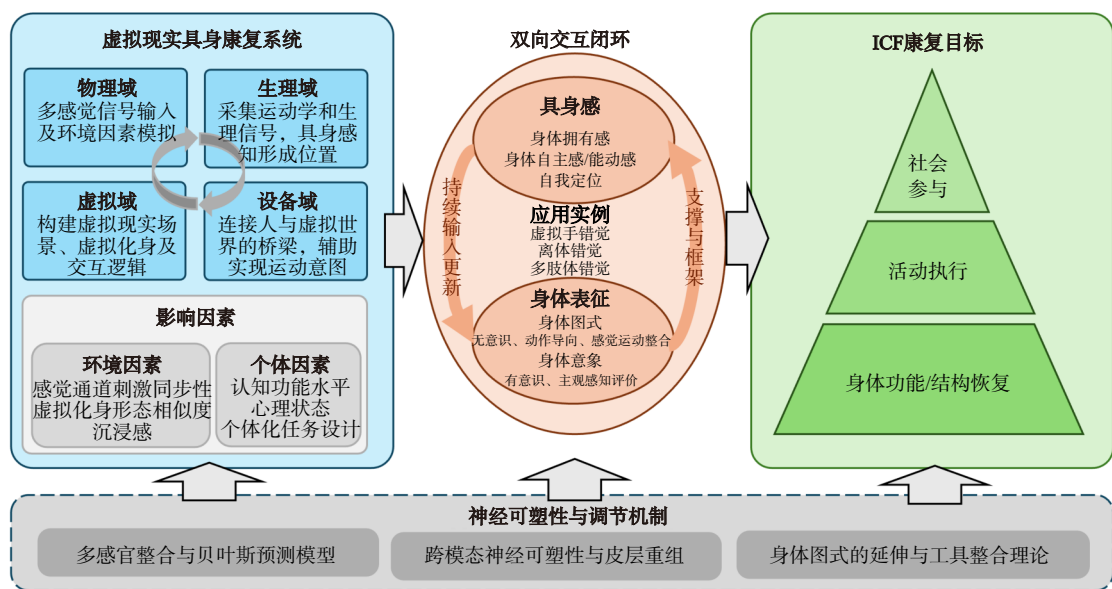


图 2 虚拟现实具身康复的框架

Fig. 2 Framework of VR-enabled embodied rehabilitation

体拥有感（Body Ownership，将某一身体部位或实体感知为自身一部分的主观体验）、身体自主感/能动感（Body Agency，自己是身体动作的发起者和控制者的主观体验）和自我定位（Self Location，对自身空间位置的判断，为身体与环境的交互提供参考框架）^[15]。

身体表征与具身感存在密切的双向互动关系。一方面，身体图式提供的无意识动作控制模板和身体意象提供的主观认知框架，共同为具身感体验提供支撑；另一方面，具身感体验会持续为身体表征提供有效输入，推动其动态更新。这种互动关系的神经基础在于大脑的多感觉整合机制和神经可塑性。当虚拟环境中的感觉输入与个体身体表征一致时，大脑会强化相关神经通路的连接，形成稳定的具身感体验；而持续的具身感体验又会通过神经可塑性机制，调整大脑对身体的认知表征，实现身体表征的动态更新。

身体表征和具身感的形成与维持受环境因素和个体因素的影响。在环境因素方面，感觉通道刺激的同步性是关键，视觉-触觉、视觉-本体感觉的延迟超过 200 ms 会显著削弱具身感体验；虚拟化身形态相似度影响身体拥有感；虚拟环境的沉浸感可通过影响注意力分配间接调控具身感强度。在个体因素方面，符合个体运动能力的任务设计能促进具身感体验的稳定维持；认知功能水平和心理状态会影响患者对虚拟环境信息的加工效率，从而影响具身感的调控。

2.2 虚拟现实下身体具身感改变及相关机制

虚拟现实技术通过人为调控多通道感觉刺激，可诱导出多种特异性身体错觉，这些错觉本质上是身体表征在虚拟环境中的适应性重塑，也是具身感改变的直观体现。

虚拟手错觉（Virtual Hand Illusion, VHI）是最常见的具身错觉，源自经典的“橡胶手错觉”^[17]范式，通过在被试者视野中呈现虚拟手与自身真实手的同步运动或者提供同步触觉刺激，可让被试者把虚拟手认知为自己的手。离体错觉（Out-of-Body Experience, OBE）^[6]通过调控视觉视角（如从第三

人称视角观察虚拟化身）与本体感觉信息的匹配度，可使被试者产生从外部观察自己的体验。多肢体错觉（Supernumerary Limb Illusion, SLI）^[7]则通过同步运动反馈或触觉刺激，可使被试者接受在虚拟环境中为其添加的额外虚拟肢体。身体大小或形态错觉可以通过缩放虚拟化身的大小或改变身体形态，诱导被试者产生自身身体大小或形态改变的感知。

虚拟现实下身体表征重塑与具身感改变的核心机制是神经可塑性，其背后涉及多脑区协同作用和多模态信息整合的动态调控。虚拟现实通过精确控制视觉、本体感觉、触觉等多感觉信息的时空同步性，调控大脑的多感觉整合过程。大脑会根据感官信息的一致性程度调整权重分配，虚拟现实技术改变虚拟感官信息的一致性，提高虚拟信息的权重，使大脑将虚拟信息纳入身体表征的构建中，关于这一过程的内在机制，主要包括神经振荡协同、皮层功能重组、前庭-皮层调控等。

2.3 虚拟现实具身康复的定义

WHO（World Health Organization）发布的《国际功能、残疾和健康分类》（International Classification of Functioning, Disability and Health, ICF），将功能障碍定义为“个体健康状况与个人因素、环境因素动态交互后，在身体功能/结构、活动执行、社会参与层面出现的功能减弱、丧失或受限状态”^[18]，该定义明确了 ICF 康复目标包括身体功能/结构恢复、活动执行和社会参与。具身认知理论强调认知过程与身体体验、环境交互密不可分，个体的认知发展、技能学习和神经重塑均依赖身体与环境的动态交互。从具身的视角看，康复过程可以看作通过身体与环境的动态交互来修复受损的身体表征和具身感，进而实现功能障碍的改善，故虚拟现实具身康复的逻辑与 ICF 对功能障碍及康复的定义高度契合。

由此，可以给出虚拟现实具身康复的定义：以具身认知理论为基础，融合虚拟现实技术、多模态传感技术、神经科学和康复医学原理，通过构建虚拟环境，实现视觉、本体感觉、触觉等多感觉通道

协同刺激,诱导患者改善具身体验,重塑异常身体表征,促进神经可塑性与功能恢复,最终帮助患者在身体功能、活动能力、参与程度3个维度实现提高,回归正常生活。

在该定义中,技术基础是虚拟现实技术与多模态传感器技术;理论核心是具身感体验的诱导与身体表征的重塑;康复目标是多层次的,既包括身体功能的恢复,也涵盖活动能力的提升、社会参与的促进;实施模式强调根据个体差异制定任务导向的康复方案,将训练与真实生活场景紧密结合。

3 虚拟现实具身康复研究进展

虚拟现实具身康复作为一个新理念,对其研究多围绕虚拟现实下如何进行具身感诱导和评价开展,在临床应用和机制研究方面也有一些探索。

3.1 虚拟现实下的具身感诱导方法

具身感诱导是虚拟现实具身康复的核心环节,其目标是使患者在虚拟现实环境中形成稳定、强烈的具身感体验。

多感觉通道输入调控是具身感诱导的基础,通过精确控制视觉、触觉、本体感觉、前庭觉等感觉通道的输入^[19],可诱导具身感体验。视觉是具身感诱导的核心感觉通道,其关键参数包括虚拟化身的视觉真实性、动作同步性、视角选择等。触觉反馈通过模拟真实触觉刺激,可以增强虚拟肢体的真实感,是提升具身感的重要补充;当前主流的触觉反馈设备包括力反馈手套、振动反馈手柄、触觉衣等;触觉反馈的强度、频率、空间分布等参数需根据实际情况进行设置。在虚拟现实场景中通过视觉-触觉同步刺激诱发具身感是目前比较常见的范式(图3)。本体感觉调控通过改变肢体的运动阻力、位置反馈等影响个体对自身肢体位置和运动状态的感知,进而强化具身感;此外,通过调整虚拟环境中的重力、摩擦力等物理参数,也可间接调控本体感觉体验。

虚拟化身是具身感诱导的重要载体,其设计质量直接影响具身感诱导效果。基于被试者的真实身



图3 在虚拟现实诱导具身感的视觉-触觉同步刺激
Fig. 3 Synchronous visuo-tactile stimulation to induce sense of embodiment in VR

体特征进行虚拟化身定制,是提升具身感的重要方法之一;3D扫描技术常用于构建个性化虚拟化身模型,确保虚拟肢体与真实肢体的形态一致性;真实的皮肤纹理、毛发等细节可以提升视觉真实性。个性化虚拟化身设计,可以使脑卒中被试者的具身感评分提升38%,外观适配度高的虚拟化身,能够使被试者的具身感体验持续时间延长60%以上^[20]。真实肢体运动到虚拟化身动作的精准映射,也是维持具身感的重要因素;光学动作捕捉、惯性测量单元、肌电传感器均被用来提升动作映射的精度和实时性;对于运动功能严重障碍的被试者,则可以采用意图驱动的动作映射方法,通过脑电、眼动等信号预测运动意图,实现虚拟化身的动作控制,从而诱导具身感。

3.2 虚拟现实下的具身感评价方法

具身感评价是虚拟现实具身康复的重要依据,其目标是评估被试者在虚拟现实环境中的具身感体验强度和稳定性,从而为康复训练系统的优化提供参考。

主观评价法目前仍是最主要的评价方法,包括问卷调查、主观评分和半结构化访谈。常用的问卷包括身体拥有权问卷(Body Ownership Questionnaire, BOQ)^[21]、虚拟具身问卷(Virtual Embodiment Questionnaire, VEQ)^[22]、具身感体验量表(Embodiment Experience Scale, EES)^[23]等。主观评分通常采用1~100分的视觉模拟量表,让被试者直接对身体拥有权、自主感等核心维度进行评分,操作简便,适用于认知功能较低或无法完成复杂问卷的被试者^[24]。半结构化访谈通过开放性问题,如“你是否感觉虚拟手是你自己的手?”“这

种感觉持续了多久?”，获取被试者的具身感体验细节，能够补充量化评价的不足，深入了解具身感的形成过程和影响因素^[25]。被试者在不同训练阶段、不同任务中的具身感体验一致性，则常采用一致性系数进行量化评估。

客观评价法通过测量行为、生理等客观指标反映具身感体验，是未来的重要发展方向，但目前尚未成熟。行为指标评价通过测量被试者的肢体动作、空间判断等行为表现来评估具身感；常用的行为指标包括肢体偏移效应、距离判断误差、动作协调性等^[17]。生理指标评价通过测量生理信号的变化来反映具身感体验；常用的生理指标包括表面肌电信号、脑电信号、心率变异性等。被试者在执行训练任务中，具身感的增强可显著提升患侧肌肉的激活强度及其与健侧的协同性。具身感诱导过程中，脑电信号表明运动想象显著增强^[26]。皮肤电导率和心率变异性用于评估具身感相关的情绪和唤醒水平，具身感强烈时，个体的沉浸感和愉悦感提升，皮电值会轻微升高，心率变异性的高频成分会增强^[5]。功能性磁共振成像、近红外光谱等神经成像技术则通过测量大脑相关脑区的活动变化，直接反映具身感的神经机制；研究表明，具身感形成时，颞顶联合区、前运动皮层、小脑等脑区的血氧水平依赖信号显著增强，这些脑区的活动强度与具身感体验强度正相关^[27]。

3.3 虚拟现实具身康复的临床应用和机制研究

目前，虚拟现实具身康复已应用于脑卒中、脊髓损伤、精神与认知功能障碍、疼痛管理、肥胖症、截肢手术等多种障碍的临床康复。

诱发单侧偏瘫脑卒中患者对于虚拟环境中虚拟肢体的具身感可以被用于增强运动想象（Motor Imagery, MI）或者镜像疗法（Mirror Therapy, MT），从而提高运动康复训练中大脑皮层的激活程度^[26,28]。诱发脊髓损伤患者的虚拟腿错觉（Virtual Leg Illusion, VLI）可以轻度镇痛^[29]。抑郁症患者在虚拟现实场景中对虚拟化身产生具身感，并通过对虚拟化身进行同情练习，可以显著改善抑郁严重度和自我批评程度^[30]。在虚拟现实康复训练中，当具身感

强度达到一定水平时，被试者的慢性腰痛显著缓解^[31]。增强厌食症患者的全身错觉可以改善其对于体重的恐惧和焦虑情绪^[32-33]。虚拟社交场景下的具身互动，可用于改善自闭症儿童的社交能力^[34]。增强下肢截肢患者对假肢的具身感整合，可以提高运动功能，也可以减轻幻肢疼痛（Phantom Limb Pain, PLP）^[35]。

为了从神经康复机制等角度揭示具身感在虚拟现实康复中的作用，对虚拟现实具身康复的机制研究也不断深入。Song 等^[26]、张茜婷^[36]探讨了虚拟手具身感强度对健康人和脑卒中患者运动想象的影响。健康人的研究结果表明，具身感是影响运动想象的中间环节，其强度与运动想象时脑区激活程度中等正相关。诱发脑卒中患者对虚拟手产生更强的身体拥有感，可被用于增强运动想象，并促进相关大脑皮层激活。视-触同步刺激可以弥补二维显示屏沉浸性不足带来的具身感减弱（图4）。

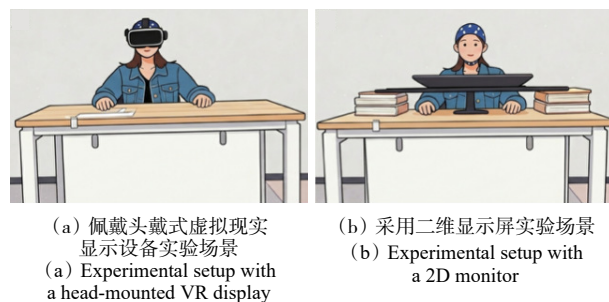


图4 不同沉浸性虚拟现实场景诱发具身感示意图

Fig. 4 Scene of embodiment induced by VR scenarios with different levels of immersion

Xu 等^[37-38]研究了健康人、脑卒中患者在第三人称视角与不同刺激范式下的具身感强度及其影响（图5）。基于健康人的研究发现，离体错觉可显著增强运动想象，并提升训练注意力；同步视-触背部刺激能更好诱发离体错觉，且脑卒中患者的错觉更强；提高具身感强度可提升脑卒中患者脑部病灶侧运动皮层激活程度。

Wang 等^[39]提出了一种第六指运动想象（Sixth-Finger Motor Imagery, SF-MI）新范式。该研究证实第六指的运动想象不仅激活了受损半球的运动区，还显著增强了双侧感觉运动皮层与前额叶皮层

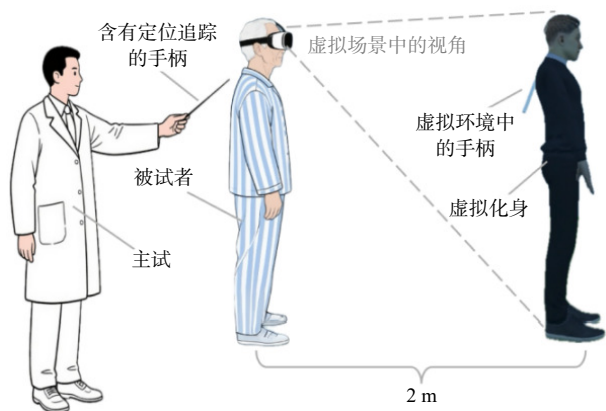


图5 第三人称视角诱发离体错觉示意图

Fig. 5 Out-of-body experience induced in third-person perspective

之间的功能耦合。

在虚拟现实具身康复系统的构建与优化方面，Fregna 等^[40]提出了一种沉浸式虚拟现实康复系统，脑卒中患者在该系统中完成的具身感问卷结果显示，脑卒中患者自主感评分极高，并且在虚拟现实任务中脑卒中患者的行为表现与其临床评分具有相关性；Jung 等^[41]研究发现，动作的同步性对于具身感的诱发强度有显著影响；蒲放等^[42]提出了一种基于具身感重塑调节皮质肌肉相干性来提升康复训练效果的方法和装置；樊瑜波等^[43]提出了一种虚拟现实康复服，可以将环境因素模拟、多感觉通道刺激和生理信号实时监测等功能集成，从而实现具身康复效果。

4 展望与建议

虚拟现实具身康复为理解多感觉通道刺激和交互反馈在康复中的作用机制、提升虚拟现实康复系统的临床应用效果提供了新的视角和思路。随着虚拟现实技术、具身认知理论和具身智能的快速发展，虚拟现实具身康复已呈现出若干显著发展趋势，同时也面临诸多挑战。

4.1 发展趋势

“共具身”是虚拟现实具身康复发展的重要趋势之一。共具身是指两个或更多个体通过虚拟环境中的互动，形成共享的具身感体验，核心表现为

个体对他人虚拟化身的身體表征整合与动作协同感知^[44-45]。

在康复训练中，有大量的“共具身场景”。例如，治疗师与患者在虚拟环境中形成共具身体验，治疗师可通过虚拟化身直接示范正确的运动模式，实时观察患者的动作表现，并通过共享触觉反馈感知患者的肌肉张力、动作力度等信息，及时调整训练方案；在居家康复的同伴共具身中，患者可与家人、其他患者组成共具身康复小组，通过虚拟环境中的互动训练提升康复依从性。

虚拟现实共具身康复的核心技术包括虚拟化身协同控制技术、共享具身感诱导技术、多用户同步交互技术等。虚拟化身协同控制技术根据康复目标设计虚拟化身的协同交互模式，包括镜像协同、互补协同等。共享具身感诱导技术通过多感觉协同刺激，使多个用户形成共享的具身感体验；在视觉方面采用第一人称与第三人称视角切换，让用户既能感知自身虚拟化身，又能观察其他用户的虚拟化身；在触觉方面，通过联网的力反馈设备将1名用户的动作力反馈传递给其他用户，实现触觉共享，使共具身感体验强度显著提升^[28]。多用户同步交互技术则可通过网络通信技术、动作捕捉技术的协同，实现多个用户在同一虚拟环境中的实时同步交互。

与脑机接口技术深度结合是虚拟现实具身康复另一个重要发展趋势。一方面，神经信号采集与解码可有效弥补重度功能障碍患者无法提供完整肢体反馈的不足，并可以将脑电信号直接转化为虚拟化身控制指令，从而显著提升具身感；另一方面，通过对相关脑区的刺激，有可能加快具身感重塑的过程。此外，通过脑机接口，可以在虚拟现实环境下实现对具身感的实时客观评价，将有助于优化多感觉通道的协同整合，从而进一步提升具身感。

4.2 面临挑战

虚拟现实具身康复作为一种新的理念和方法，尽管近年来发展迅速，但仍面临以下4方面的挑战。

(1) 年龄、损伤类型、认知水平等个性化特

征对具身感体验强度、形成速度、稳定性的影响，以及该影响的神经机制、生理基础，缺乏深入研究，导致难以针对性地优化具身感诱导方案。

（2）目前大部分研究聚焦于具身感的临时效应，长期训练后神经通路的重组模式、大脑功能的代偿机制、神经可塑性的持续时间等关键问题尚缺乏系统性的纵向研究。

（3）具身感的形成依赖视觉、触觉、本体感觉等多感觉信息的整合。然而，大脑对多感觉信息的编码方式、整合阈值和动态调整机制，尤其是在病理状态下的整合机制变化尚未完全阐明，导致临床进行具身感诱导和优化尚缺乏相应依据。

（4）目前虽已有探索性研究证实具身感体验与康复效果正相关，但两者之间的因果关系、中介变量、调节变量等仍需深入研究。通过调控具身感体验精准优化康复效果还需要更深入的研究和更系统的验证。

4.3 对策建议

虚拟现实具身康复已经展现出非常良好的前景，为了促进其有序发展，真正惠及国民健康，提出如下4个建议。

（1）随着老龄化加剧和生活质量提升，我国康复需求巨大，作为康复领域的前沿，虚拟现实具身康复高度契合科技事业发展的“四个面向”，且具有典型的多学科交叉特征，与虚拟现实、具身智能、脑机接口等多个高科技领域可以伴生发展，因此，建议将虚拟现实具身康复纳入各级、各部门的相关科技发展规划重点扶持的方向，以科技引领促进其快速发展。

（2）作为新兴理念和研究方向，虚拟现实具身康复在理论框架、核心定义等方面仍有待完善，亟需加强医工融合、凝练共识，协同制定相关标准，避免行业发展良莠不齐、无序竞争。

（3）临床效果是虚拟现实具身康复的核心价值体现。目前，具身感作用下的长期效果、具身感与康复效果的因果关系亟待系统性验证。因此，建议积极支持开展多中心的纵向临床研究，以充分证实虚拟现实具身康复的临床价值。

（4）虚拟现实具身康复技术和系统的创新性突出，为加快其临床的应用推广，建议在医疗器械注册方面通过创新医疗器械特别审查程序等方式予以支持，并在临床收费政策上给予保障，使其能尽早广泛惠及患者。

5 结束语

虚拟现实技术已经在康复领域广泛应用，但其临床效果仍存在巨大争议，虚拟现实具身康复为解决这一瓶颈问题提供了新的思路，其逻辑与ICF对功能障碍及康复的定义高度契合。具身感的诱导是虚拟现实具身康复的核心环节，视-触同步、视-运动同步是常见范式。具身感的评价是虚拟现实具身康复系统优化的重要参考依据，目前以主观评价为主，但基于行为学、脑电的客观定量评价正在快速发展。虚拟共具身、与脑机接口结合是虚拟现实具身康复的重要发展趋势；个性化具身感诱导、长期临床效应验证等是其面临的挑战。

未来，虚拟现实具身康复有望成为康复医学和康复工程交叉领域的重点发展方向之一。通过推动医工交叉融合不断提升虚拟现实具身康复的技术成熟度和规范化水平，依托多中心大样本纵向临床研究系统验证其临床疗效和应用价值，并在医疗器械注册审批和临床收费政策层面给予强力支持，不断推动虚拟现实具身康复技术高质量临床转化与规模化落地应用，从而广泛惠及患者，促进产业发展。

参考文献

- [1] Tang P Y, Cao Y B, Vithran D T A V, et al. The efficacy of virtual reality on the rehabilitation of musculoskeletal diseases: Umbrella review[J]. Journal of Medical Internet Research, 2025, 27: e64576.
- [2] Hao J, Crum G, Siu K C. Effects of virtual reality on stroke rehabilitation: An umbrella review of systematic reviews[J]. Health Science Reports, 2024, 7(9): e70082.
- [3] Howard M C. A meta-analysis and systematic literature review of virtual reality rehabilitation programs[J]. Computers in Human Behavior, 2017, 70: 317-327.

- [4] Prajapati M, Kumar S. Virtual reality revolution in healthcare: A systematic review[J]. *Health and Technology*, 2025, 15(2): 231-242.
- [5] Slater M. Towards a digital body: The virtual arm illusion[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2008, 2: 2008.
- [6] Ehrsson H H. The experimental induction of out-of-body experiences[J]. *Science*, 2007, 317(5841): 1048.
- [7] Guterstam A, Petkova V I, Ehrsson H H. The illusion of owning a third arm[J]. *PLoS One*, 2011, 6(2): e17208.
- [8] Scalise M, Bora T S, Zancanella C, et al. Virtual reality as a therapeutic tool in spinal cord injury rehabilitation: A comprehensive evaluation and systematic review[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2024, 13(18): 5429.
- [9] Jeppesen U N, Vernal D L, Due A S, et al. Virtual reality-based versus standard cognitive behavioral therapy for paranoia in schizophrenia spectrum disorders: A randomized controlled trial[J]. *Nature Medicine*, 2025, 31(10): 3425-3439.
- [10] Moreau S, Théron A, Cerda I H, et al. Virtual reality in acute and chronic pain medicine: an updated review[J]. *Current Pain and Headache Reports*, 2024, 28(9): 893-928.
- [11] Song S Y, Liu Z X, Zhang Q Y. Application of virtual reality technology in postoperative rehabilitation following total knee arthroplasty: A scoping review[J]. *International Journal of Orthopaedic and Trauma Nursing*, 2024, 54: 101124.
- [12] Zhang M J, Liu S, Xiong X Y, et al. Effectiveness of virtual reality in cardiac rehabilitation patients for exercise capacity and negative emotions: A systematic review and meta-analysis[J]. *Medicine*, 2024, 103(49): e40812.
- [13] Huang H Q, Huang M, Chen Q, et al. Effects of serious games for patients with chronic obstructive pulmonary disease: systematic literature review[J]. *JMIR Serious Games*, 2023, 11: e46358.
- [14] Rodríguez-Mansilla J, Bedmar-Vargas C, Garrido-ardila E M, et al. Effects of virtual reality in the rehabilitation of Parkinson's disease: A systematic review[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2023, 12(15): 4896.
- [15] Robinson M D, Thomas L E. Handbook of embodied psychology: Thinking, feeling, and acting[M]. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [16] Ataria Y, Tanaka S, Gallagher S. Body schema and body image: New directions [M]. Oxford: Oxford University Press, 2022.
- [17] Botvinick M, Cohen J. Rubber hands 'feel' touch that eyes see[J]. *Nature*, 1998, 391(6669): 756.
- [18] 燕铁斌, 章马兰, 于佳妮, 等. 国际功能、残疾和健康分类 (ICF) 专家共识[J]. *中国康复医学杂志*, 2021, 36(1): 4-9.
- Yan T B, Zhang M L, Yu J N, et al. Expert consensus of international classification of functioning, disability and health (ICF)[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2021, 36(1): 4-9. (in Chinese)
- [19] 宋哲. 虚拟现实重塑身体表征对脑卒中患者上肢感知及运动功能康复的影响研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2024.
- Song Z. The effects of rebuilding body representation in virtual reality on upper limb perception and motor functions in post-stroke patients [D]. Beijing: Beihang University, 2024. (in Chinese)
- [20] Waltemate T, Gall D, Roth D, et al. The impact of avatar personalization and immersion on virtual body ownership, presence, and emotional response[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 24(4): 1643-1652.
- [21] Day B, Ebrahimi E, Hartman L S, et al. Examining the effects of altered avatars on perception-action in virtual reality[J]. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2019, 25(1): 1-24.
- [22] Roth D, Latoschik M E. Construction of the virtual embodiment questionnaire (VEQ)[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2020, 26(12): 3546-3556.
- [23] Piran N, Teall T L, Counsell A. The experience of embodiment scale: Development and psychometric evaluation[J]. *Body Image*, 2020, 34: 117-134.
- [24] Beccherle M, Fusaro M, Aglioti S M. Virtual social touch on embodied avatars in patients with Fibromyalgia [C]// 9th MindBrainBody Symposium. Padova: IRIS, 2022: B10.
- [25] Salehi P, Zohaib H S, Astrid B G, et al. A theoretical and empirical analysis of 2D and 3D virtual environments in

- training for child interview skills[J]. IEEE Access, 2024, 12: 131842-131864.
- [26] Song Z, Zhang X T, Xu X T, et al. The effects of immersion and visuo-tactile stimulation on motor imagery in stroke patients are related to the sense of ownership[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2024, 32: 895-904.
- [27] Ehrsson H H, Spence C, Passingham R E. That's my hand! activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb[J]. Science, 2004, 305(5685): 875-877.
- [28] Curiel R C, Nakamura T, Kuzuoka H, et al. Virtual reality self co-embodiment: an alternative to mirror therapy for post-stroke upper limb rehabilitation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2024, 30(5): 2390-2399.
- [29] Pozeg P, Palluel E, Ronchi R, et al. Virtual reality improves embodiment and neuropathic pain caused by spinal cord injury[J]. Neurology, 2017, 89(18): 1894-1903.
- [30] Falconer C J, Rovira A, King J A, et al. Embodying self-compassion within virtual reality and its effects on patients with depression[J]. BJPsych Open, 2016, 2(1): 74-80.
- [31] Saby A, Alvarez A, Smolins D, et al. Effects of embodiment in virtual reality for treatment of chronic pain: pilot open-label study[J]. JMIR Formative Research, 2024, 8: e34162.
- [32] Keizer A, Van Elburg A, Helms R, et al. A virtual reality full body illusion improves body image disturbance in anorexia nervosa[J]. PLoS One, 2016, 11(10): e0163921.
- [33] Ascione M, Serrano-Troncoso E, carulla-roig M, et al. Improving anorexia nervosa treatment with virtual reality body exposure and attentional bias modification: a single case study[J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4340.
- [34] Moon J. Reviews of social embodiment for design of non-player characters in virtual reality-based social skill training for autistic children[J]. Multimodal Technologies and Interaction, 2018, 2(3): 53.
- [35] Nguyen T T, Wang B J, Alas H, et al. Prosthesis embodiment in lower extremity limb loss: A narrative review[J]. Applied Sciences, 2025, 15(9): 4952.
- [36] 张茜婷. 脑卒中患者虚拟手错觉对运动想象的影响研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2023.
- Zhang X T. The effect of virtual hand illusion on motor imagery in stroke patients[D]. Beijing: Beihang University, 2023. (in Chinese)
- [37] Xu X T, Fan X Y, Dong J Y, et al. Enhancing motor imagery in the third-person perspective by manipulating sense of body ownership with virtual reality[J]. European Journal of Neuroscience, 2024, 60(7): 5750-5763.
- [38] Xu X T, Fan X Y, Dong J Y, et al. Event-related EEG desynchronization reveals enhanced motor imagery from the third person perspective by manipulating sense of body ownership with virtual reality for stroke patients[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2024, 32: 1055-1067.
- [39] Wang Z, Liu Y, Huang S F, et al. Enhancing ERD activation and functional connectivity *via* the sixth-finger motor imagery in stroke patients[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2024, 32: 3902-3912.
- [40] 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.
- [41] Jung M, Sim S, Kim J, et al. Impact of personalized avatars and motion synchrony on embodiment and users' subjective experience: Empirical study[J]. JMIR Serious Games, 2022, 10(4): e40119.
- [42] 蒲放, 张元坤, 任韦燕, 等. 基于重塑具身感调节皮质肌肉相干性的康复训练方法及装置: CN119580944B[P]. 2025-05-06.
- Pu F, Zhang Y K, Ren W Y, et al. Rehabilitation training method and apparatus based on modulating cortico-muscular coherence via reshaping sense of embodiment: CN119580944B[P]. 2025-05-06. (in Chinese)
- [43] 樊瑜波, 蒲放, 张元坤, 等. 一种虚拟现实康复服: CN120436934A[P]. 2025-08-08.
- Fan Y B, Pu F, Zhang Y K, et al. A virtual reality rehabilitation suit: CN120436934A[P]. 2025-08-08. (in Chinese)
- [44] Zhang C J, Yu S R. Analysis of the sense of embodiment in virtual co-embodiment rehabilitation: A structural

equation modeling approach[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2025, 31(12): 10215-10226.

[45] Fribourg R, Ogawa N, Hoyet L, et al. Virtual co-

embodiment: Evaluation of the sense of agency while sharing the control of a virtual body among two individuals[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021, 27(10): 4023-4038.

Current Development and Prospects of VR-Enabled Embodied Rehabilitation

PU Fang¹, ZHANG Yuankun¹, YANG Lining², TONG Shiyi¹, REN Weiyan³, BAI Dingqun^{2†}

1. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China

3. School of Engineering Medicine, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract Virtual reality (VR) technology has been extensively applied to rehabilitation, but its clinical efficacy remains highly controversial. VR-enabled embodied rehabilitation interprets and analyzes how multi-sensory VR stimulation modulates functional recovery based on the reshaping of body representation and sense of embodiment, providing novel perspectives and approaches for improving the clinical efficacy of VR rehabilitation systems. This paper elaborates on the origin, core concepts and definition of VR-enabled embodied rehabilitation, combs the research progress in key technologies, clinical applications and mechanism research, prospects its future development trends and challenges, and proposes countermeasures.

Keywords virtual reality; rehabilitation; embodiment; body representation; multisensory integration



蒲放，教授，博士研究生导师。中国康复辅助器具协会副会长，中国生物医学工程学会康复工程分会候任主任委员及科普工作委员会主任委员。主要从事康复工程、生物力学、航空航天医学工程和高端医疗器械等的教学和研究。主持国家重点研发计划、国家自然科学基金、国家科技支撑计划等国家级课题 10 余项。获教育部自然科学奖、北京市教学成果奖等奖励。发表学术论文 100 余篇，授权发明专利 20 余件，软件著作权 40 余项。

电子信箱：pufangbme@buaa.edu.cn。



白定群，教授，主任医师，博士研究生导师。重庆医科大学附属第一医院副院长。中华医学会物理医学与康复学分会副主任委员，重庆市康复医学会会长。主要从事重症康复、脑卒中康复等的临床和新技术研究。主持国家自然科学基金、国家重点研发课题等国家和省部级以上课题 20 余项。获重庆市科技进步二等奖等多项奖励。以通信作者发表 SCI 期刊论文 50 余篇（近 3 年 IF>10 的论文 19 篇），牵头发布标准 4 项，参与制定指南 2 部、专家共识 2 部，参编著作 16 部。

电子信箱：baidingqun@163.com。

[†]Corresponding author