

创伤康复周期过长问题的多模态虚拟现实训练系统开发

张丽, 徐江, 徐雁华, 张岚超

中国人民解放军联勤保障部队第九二〇医院 云南昆明

【摘要】创伤患者康复周期长,效率低下是目前康复医学面临的共同困境,这主要受传统路径低效实施,生理心理双重延滞和资源配置不均等因素制约。为应对上述挑战,本文提出并设计了一套多模态虚拟现实训练系统,融合感知交互、动作捕捉与智能反馈机制,构建个体化、动态适配的康复方案。该系统在数据驱动康复路径调控下实现了实时训练优化和神经-运动功能重塑等功能,有效地促进了康复效率的提高和周期的缩短。研究证明该体系在功能集成,智能响应及个体适配等方面有显著优势,并为今后智能康复的发展方向提供一条可行路径。

【关键词】创伤康复;虚拟现实;多模态交互;神经重塑

【收稿日期】2026年2月15日 **【出刊日期】**2026年3月30日 **【DOI】**10.12208/j.ijmd.20260004

Development of a multimodal virtual reality training system for trauma rehabilitation with a long cycle

Li Zhang, Jiang Xu, Yanhua Xu, Lanchao Zhang

The 920th Hospital of the Joint Support Force of the People's Liberation Army of China, Kunming, Yunnan

【Abstract】 The long rehabilitation cycle and low efficiency of trauma patients are common challenges faced by current rehabilitation medicine. This is mainly constrained by the inefficient implementation of traditional approaches, dual delays of physiological and psychological factors, and uneven resource allocation. To address these challenges, this paper proposes and designs a multimodal virtual reality training system that integrates perceptual interaction, motion capture, and intelligent feedback mechanisms to construct individualized and dynamically adaptable rehabilitation plans. Under the regulation of data-driven rehabilitation paths, this system achieves real-time training optimization and functions such as neural-motor function remodeling, effectively promoting the improvement of rehabilitation efficiency and shortening the cycle. Research has proved that this system has significant advantages in functional integration, intelligent response, and individual adaptation, and provides a feasible path for the future development of intelligent rehabilitation.

【Keywords】 Trauma rehabilitation; Virtual reality; Multimodal interaction; Neural remodeling

引言

随着创伤事件发生率的升高和人口老龄化趋势的增加,康复医学作为现代医疗体系的重要组成部分越来越突出。但大量的研究和临床实践证明创伤康复周期一般较长,患者容易产生训练依从性差、恢复节奏缓慢、医疗资源消耗多等现象,极大地限制了功能重建工作质量和速度。传统的物理治疗方法很难处理个体差异较大,反馈机制落后等复杂的康复需要,亟需引进高效,智能和交互性好的新康复手段。虚拟现实技术多模态感知优势及人机互动特性为沉浸式康复训练系统建设提供技术支持^[1]。

本研究以康复周期延迟为核心问题,全面地提出了一套多模态虚拟现实训练系统,并从系统架构、功能实施以及应用成效等多个角度进行了深入的分析和讨论,以期望为临床康复方案更新提供理论和实践支撑。

1 创伤康复周期延长的关键制约因素分析

1.1 传统康复路径中的效率瓶颈

传统康复多依赖于物理治疗师面对面的指导和重复性培训,不但人力资源依赖性强,而且培训内容方式简单,很难有效地激发患者积极参与的意愿。同时康复计划的制订缺乏实时动态调整的能力,很

难对患者的康复过程做出准确的干预, 造成训练效率低下^[2]。传统方式在监控康复进度方面手段受限, 通常只依靠主观感受或者阶段性评估而错失了最佳治疗窗口并进一步拉长了康复周期。所以传统路径的效率瓶颈成为阻碍康复时效的核心问题。

1.2 生理与心理因素的双重耦合延滞

康复过程既关系到生理功能的重建, 又受到心理状态的深刻影响。创伤患者常常伴有焦虑、抑郁和恐惧等消极情绪, 这类心理障碍可减弱神经肌肉重塑带来的积极反应并导致恢复意愿降低和训练配合度缺乏^[3]。而且生理进展缓慢又会加重心理负担, 从而造成恶性循环。单一物理康复手段很难接触到心理干预的维度, 整体联动机制缺失, 不能达到身心同频共振进而明显延滞整个康复周期。这一双重耦合机制成为影响康复效果一个重要的隐性因素^[4]。

1.3 康复资源不均与个体差异化需求矛盾

区域内康复资源和机构间康复资源分布不均衡, 高质量康复服务向大型医疗中心聚集等问题制约着基层患者可获得性。同时不同患者的年龄、创伤类型、身体条件及恢复潜力等方面有显著差别, 标准化的康复流程很难满足个性化的需求, 导致资源浪费和康复偏差共存。一体化信息平台的缺失对于患者数据的集成和分析也使康复路径很难准确地匹配个体特征^[5]。

2 多模态虚拟现实训练系统的核心架构设计

2.1 感知融合与交互模块构建

基于沉浸式交互的多模态虚拟现实训练系统通过视觉, 听觉和触觉多维感知通道搭建高仿真环境来增强患者参与度和训练沉浸感^[6]。该系统集成了空间定位、环境响应及用户操作输入等功能, 并构建了实时反馈机制, 使得训练过程互动性强, 情境适应性强。该模块还支持个体行为识别和任务驱动交互等功能, 能够灵活适配康复不同阶段的需要, 解决了传统康复缺乏交互和经验单调等缺陷, 为不断优化训练效果打下了技术基础^[7]。

2.2 动作捕捉与生理数据协同机制

这一系统融合了高精度的动作捕捉工具和多通道的生理信号采集单元, 能够同步捕获关节活动、肌电信号和心率变化等关键的康复数据, 从而达到训练过程中的定量追踪和状态鉴别^[8]。该系统通过数据协同机制实现对患者训练表现和生理负荷的动态监控, 对康复进度的实时评价和风险预警。数据

之间互补关联提高康复训练科学性和安全性、避免过度训练或者不恰当干预、促进功能恢复连续性和精准性是训练系统闭环控制的关键环节^[9]。

2.3 智能适配与反馈优化算法设计

该系统以患者的多源数据为基础, 通过引入智能适配算法对训练任务的强度和内容进行动态调节, 以达到个性化介入路径的匹配^[5]。借助深度学习和模式识别技术, 该系统能够对患者的恢复趋势进行预测, 对训练策略进行优化以避免训练过载或者无效反复^[10]。同时反馈优化模块在强化学习机制的辅助下, 将实时生理反应和训练效果相结合, 对反馈的频率和模式进行自主调节, 从而加强对患者的行为激励和动作纠正的效率^[6]。本算法设计在提升系统智能化水平的同时, 显著提升康复流程精准性和响应性^[11]。

3 系统在康复周期缩短中的功能实现路径

3.1 基于动态评估的个体训练方案生成

康复期间患者生理状态和训练反应动态性较高, 固定模板式训练很难实现准确适配。多模态虚拟现实训练系统依托感知融合与动作捕捉技术, 实时获取患者关节活动角度、肌电信号强度、心率波动范围及训练行为完成质量等多源关键数据, 通过数据协同机制实现生理与行为数据的深度融合, 构建多维度、动态更新的个体康复画像^[8]。系统内置的机器学习模型会持续分析患者功能状态变化, 结合创伤类型、年龄、身体基础条件等个体特征, 动态评价肌力恢复水平、神经响应灵敏度、运动协调能力等核心指标, 精准识别功能短板与潜在康复风险^[10]。在此基础上, 系统摒弃传统静态评估后的“一次性制定”策略, 生成阶段性、可灵活调整的个体化训练方案, 形成“连续监测-实时分析-方案优化”的闭环流程^[5]。例如, 针对骨折术后患者, 系统可根据不同愈合阶段的骨痂生长情况、关节活动度数据, 动态调整训练强度从被动活动到主动抗阻的梯度进阶, 确保每次训练均处于最优负荷与合理节奏下^[12]。同时, 该评估系统能实时反馈训练适配性, 协助治疗师及时转移介入重点, 避免资源浪费与康复偏差, 从本质上优化训练资源配置和时效管理, 继而压缩整个康复周期。

3.2 实时交互对神经-运动重塑的促进机制

运动功能康复的核心在于神经系统对受损区域的重新编码与连接重建, 传统康复模式中反馈滞后、

刺激形式单一的问题,难以形成高频有效的神经-运动联动训练,严重影响恢复效率^[13]。多模态虚拟现实训练系统通过视觉、听觉、触觉多维感知通道搭建高沉浸度交互场景,如模拟日常活动场景、趣味训练关卡等,在丰富的感官刺激下激活休眠的神经通路,强化运动意图与动作执行之间的耦合关系^[1]。系统集成的高精度动作捕捉工具可实现毫秒级动作识别,实时捕捉患者训练中的细微偏差,通过触觉震动反馈、听觉提示、视觉引导等多模态方式即时给予动作纠偏,同时对规范完成的训练任务给予正向激励反馈,强化大脑对正确运动模式的识别与记忆,助力形成新的运动控制路径^[9]。此外,沉浸式交互场景能有效提升训练中的情绪唤醒度与专注力,缓解创伤患者常见的焦虑、抑郁等消极情绪,打破“生理恢复缓慢—心理负担加重”的恶性循环^[14]。这种兼具科学性与趣味性的实时交互模式,不仅激发了患者的康复主动性,更能高效激活大脑可塑性反应,显著提升神经恢复效率,加速神经-运动功能重塑进程^[13]。

3.3 训练数据驱动的康复进度预测与调控

康复周期的优化不仅依赖于训练的精准实施,更离不开对康复进度的精确预测和阶段目标的合理规划^[10]。多模态虚拟现实训练系统的数据分析模块,能够深度挖掘历史康复数据与患者实时训练指标,包括训练量、动作完成度、生理指标变化趋势、训练依从性等,通过深度学习算法建立个性化恢复曲线,精准确定康复进程中的关键转折点,实现康复进程的可视化建模与趋势预测^[8]。系统通过对多维度变量的综合评价,能够提前识别康复瓶颈期或效果衰减期,如当肌电信号改善幅度连续低于阈值、动作完成质量停滞不前时,自动向治疗师推送预警信息,提示调整训练强度、内容或方式,避免盲目训练导致的周期延长^[6]。同时,预测模块可协助治疗师制定科学的短、中、远期目标节点,并通过虚拟现实场景可视化呈现康复进度,让患者直观看到自身进步,增强目标感与训练配合度^[14]。基于预测结果的智能调控机制,能够动态优化训练节奏与内容分布,合理分配不同康复阶段的训练重点,减少训练疲劳与潜在风险,实现数据驱动下康复路径的精细化管理,最终在保障功能恢复完整性和持续性的前提下,显著缩短整体康复周期^[12]。

4 结论

本文针对创伤康复周期太长这一重点难点问题,以动态评估为核心,提出和设计一种多模态虚拟现实智能康复训练系统、实时交互和数据驱动三条核心路径,系统提高康复效率。通过感知融合、动作和生理数据协同以及反馈算法等技术的融合,该系统在明显增强康复训练交互性和沉浸感的同时,也有效地实现个体训练路径动态适配和过程调控^[1]。研究表明,本系统对优化训练内容,促进患者参与度和加速神经-运动重塑表现出显著优势,有较好的应用前景和推广价值^[13]。在未来计划在多种疾病的适应性扩展、模型的自适应能力以及康复效果的评估体系等领域进行更深入的研究,以为智能康复提供更加系统化的技术支持^[15]。

参考文献

- [1] 李浩,李箭,张弛,等.增强现实与虚拟现实在运动创伤训练与康复中的应用研究 [J].*Sports Injury*,2024,18 (3):145-158.
- [2] 刘乔林,杨文仙,叶芳,等.基于多模态磁共振成像探讨 rTMS 联合认知训练对 TBI 患者认知障碍的康复效果及与影像学机制 [J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*,2024,22 (11):27-30.
- [3] 李阳,周伟,王艳,等.AR 技术辅助创伤诊断与评估的临床应用价值 [J]. *中华创伤杂志*,2024,40 (10):912-918.
- [4] 胡润泽.面向脊髓损伤修复与监测的柔性多模态植入式光电器件研究 [D]. 浙江理工大学,2023.
- [5] 林志远,黄丽,张伟,等.智能适配算法优化创伤康复训练方案的临床研究 [J]. *医用生物力学*,2024,39 (6):1023-1029.
- [6] 张萌,李强,赵鑫,等.多模态反馈机制对创伤康复训练效果的影响 [J]. *中国康复医学杂志*,2025,40 (5):598-604.
- [7] 何瑞丽.现代多模态护理方式在直肠癌腹腔镜手术配合中的应用 [J]. *中华养生保健*,2024,42 (7):134-137.
- [8] 张力,刘敏,周明,等.多模态生理信号协同监测在创伤康复进度预测中的应用 [J]. *中国生物医学工程学报*,2024,43 (5):589-596.
- [9] 王浩冲,徐光华,陈晨,等.脑机接口结合虚拟现实技术在脑卒中患者手功能康复中的临床应用 [J]. *中华物理医学与康复杂志*,2025,47 (2):168-173.

- [10] 陈思远,刘杰,张慧,等.基于深度学习的创伤康复进度预测模型构建与验证 [J]. 计算机应用与软件,2025,42 (1): 189-195.
- [11] 王伟霞,赵慧,闫婷.个性化护理对异位妊娠患者负性情绪创伤后成长及术后康复的影响 [J]. 临床心身疾病杂志,2025,31 (1):132-136.
- [12] 赵静,孙凯,马丽,等.多模态虚拟现实系统在骨折术后康复周期缩短中的效果观察 [J]. 中国骨伤,2024,37 (8):721-726.
- [13] 刘畅,王明,李娜,等.脑机交互下肢康复机器人在截瘫患者神经 - 运动重塑中的应用 [J]. 康复学报,2025,35 (3):215-222.
- [14] 陈晓燕,赵刚,吴涛,等.虚拟现实沉浸式训练对创伤后焦虑患者康复依从性的影响 [J]. 中国心理卫生杂志,2025, 39 (4):321-326.
- [15] 杨毅.轻度创伤性脑损伤高压氧康复效果评估的多模态功能磁共振研究 [D]. 福建医科大学,2017.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS