

虚拟现实技术在ICU患者早期活动中的应用进展与发展方向

孙肖肖, 黄源, 方宗平*, 胡文静*

同济大学附属上海市第四人民医院重症医学科, 上海 200434

[专家简介]

方宗平, 上海市第四人民医院重症医学科主任, 医学博士, 副主任医师, 副教授, 博士研究生导师。上海市重点学科带头人, 上海市东方英才, 陕西省科技新星。担任中国医师协会重症医学委员会青年委员, 上海市医学会危重病专科分会青年委员会副主委, 中国研究型医院学会重症神经保护研究学组副组长, 中国医疗器械行业协会麻醉与围术期医学分会常务副秘书长, 中国研究型医院学会危重症医学分会委员。国家自然科学基金函审专家, 《Intensive Care Research》《解放军医学杂志》青年编委。擅长脓毒症、重症急性胰腺炎、热射病、病理产科、严重创伤、急性药物中毒和外科术后并发症处理等危重病体的整体化救治。发表学术论文40余篇, 主持国家自然科学基金项目3项, 省部级自然科学基金项目2项, 以第一完成人获得发明专利2项。获教育部“高等学校科学研究优秀成果奖”一等奖1项。

[中图分类号] R493 [文献标志码] A [DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.2025.0926

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 孙肖肖, 黄源, 方宗平, 等. 虚拟现实技术在ICU患者早期活动中的应用进展与发展方向[J]. 解放军医学杂志, 2025, 50(11): 1353-1358.

[收稿日期] 2025-06-30 [录用日期] 2025-08-06 [上线日期] 2025-09-26

[摘要] 随着重症监护病房(ICU)患者早期活动逐渐被认知为改善患者预后、降低并发症的重要措施, 相关研究日益增多。然而, 传统的早期活动方法往往受到患者病情、护理资源和环境等因素的影响, 难以达到理想效果。近年来, 虚拟现实(VR)技术因其独特的沉浸感和互动性, 逐渐成为ICU患者康复领域的研究热点。本文阐述了VR技术在ICU患者早期活动中的应用进展, 重点分析了其相较于传统方法的优势、具体实施方式、临床效果, 以及在应用过程中面临的挑战。本文通过系统梳理现有研究成果, 为临床实践提供有价值的参考, 同时探讨VR技术在ICU康复领域的发展方向, 以期推动其在重症患者早期活动中的广泛应用。

[关键词] 虚拟现实技术; 重症监护室; 早期活动; 康复; 重症患者

Advances in the application and future directions of virtual reality technology in early mobilization of ICU patients

Sun Xiao-Xiao, Huang Yuan, Fang Zong-Ping*, Hu Wen-Jing*

Department of Critical Care Medicine, Shanghai Fourth People's Hospital Affiliated to Tongji University, Shanghai 200434, China

*Corresponding author. Hu Wen-Jing, E-mail: hcy0812@163.com; Fang Zong-Ping, E-mail: zongping03@163.com

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (82371328)

[Abstract] As early mobilization of patients in the intensive care unit (ICU) is increasingly recognized as a key measure for improving patient prognosis and reducing complications, related research is increasing. However, conventional early mobilization methods are often limited by factors such as patient condition, nursing resources, and environmental factors, making it difficult to achieve optimal results. In recent years, virtual reality (VR) technology, owing to its unique immersion and interactive features, has emerged as a focus of research in the field of ICU patient rehabilitation. This review summarizes the advances in the application of VR technology in the early mobilization of ICU patients, focusing on its advantages over traditional methods, specific implementation approaches, clinical outcomes, and challenges encountered during application. By synthesizing existing evidence, this review aims to provide valuable references for clinical practice and to explore future directions for VR technology in ICU rehabilitation, with the goal of promoting its widespread application in the early mobilization of critically ill patients.

[基金项目] 国家自然科学基金(82371328)

[作者简介] 孙肖肖, 博士研究生, 主治医师, 主要从事危重症患者救治与管理方面的研究

[通信作者] 胡文静, E-mail: hcy0812@163.com; 方宗平, E-mail: zongping03@163.com

[Key words] virtual reality technology; intensive care unit; early mobilization; rehabilitation; critically ill patients

在重症监护病房(intensive care unit, ICU)中,患者常因长期卧床导致肌肉萎缩和功能下降,而早期活动是预防这些并发症的关键,但传统方法存在设备限制和患者依从性差等问题。虚拟现实(virtual reality, VR)技术凭借其沉浸性和互动性,为ICU患者早期活动提供了新思路;它不仅能通过模拟活动场景提高患者参与锻炼的积极性和持续时间,还可改善焦虑抑郁情绪并可能降低ICU获得性衰弱(ICU-acquired weakness, ICU-AW)的发生率^[1-4]。但VR技术在ICU中的应用仍面临技术适配、患者安全和医护人员接受度等挑战,其效果仍需更多高质量研究验证^[5-7]。本文旨在系统阐述VR技术在ICU患者早期活动中的应用进展,重点分析其相较于传统方法的优势、具体实施方式、临床效果及应用挑战,为临床实践提供参考,并探讨其发展方向。

1 ICU患者早期活动的临床意义与挑战

1.1 ICU-AW的流行病学特征 ICU-AW即危重病患者在ICU期间新出现的、病因不明的神经肌肉功能障碍,其发生率高达50%~80%,是影响患者预后的重要因素^[8],且其发生率与患者在ICU内接受机械通气的时间及住院时间密切相关。研究发现,机械通气时间越长,患者发生ICU-AW的风险越大,这不仅延长了住院时间,还可能导致更高的医疗费用和更差的长期健康结局^[9]。ICU-AW的负面影响不限于住院期间,许多患者在出院后仍会面临长期的功能障碍,包括运动能力下降、日常生活活动能力受限等,进而影响其生活质量和社会参与度^[10]。因此,及时有效的早期活动对于减少ICU-AW的发生、促进功能恢复具有重要意义。

1.2 传统早期活动方法的局限性 尽管早期活动在ICU患者管理中被广泛提倡,但传统的早期活动方法仍存在诸多局限性。首先,传统活动设备通常较笨重,患者在移动时多有不便,增加了活动的复杂性和风险^[11];其次,患者在ICU中往往面临疼痛及焦虑、恐惧等心理障碍,这些因素会明显影响其参与早期活动的积极性和能力^[12]。此外,实施早期活动需要医护人员投入大量人力,不仅增加了医护人员的工作负担,还可能引发其职业疲劳,进而影响工作效率^[9]。因此,探索更为高效、安全且便捷的早期活动辅助方法已成为当前ICU实践中亟待解决的问题。VR技术的应用为改善传统早期活动方法的局限性提供了新的可能,可通过技术手段减轻患者的心理负担,提高活动的安全性和有效性,是未来研究的重要方向。

2 VR技术的基本原理与医疗应用

2.1 VR技术的分类及特点 VR技术可分为沉浸式与非沉浸式两大类。沉浸式VR通过头戴式显示器(head-mounted display, HMD)或其他设备为用户提供身临其境的体验,使他们感觉自己置身于一个虚拟环境中。这种类型的VR能够深度影响用户的感知和体验,适用于需要高水平参与感的医疗应用,如外科手术模拟和心理治疗。相对而言,非沉浸式VR则依赖于计算机屏幕或投影设备,用户的参与感较低,适用于教育培训和轻度的临床干预,如疼痛管理和康复训练。在医疗应用中,沉浸式VR能够提供更为真实的环境和情境,帮助患者更好地应对疼痛和焦虑等情绪反应^[13]。

HMD和投影式系统是实现VR体验的两种主要方式。HMD将屏幕直接放置在用户眼前,可灵活调整视角和互动内容,提供个性化的视觉体验,适合需要高度沉浸的医疗应用。而投影式系统通常用于更大规模的环境,能够将虚拟图像投影到实际环境中,适合团队培训和多用户协作的场景。尽管投影式系统在视觉效果上可能不如HMD那样细腻,但其适用性和共享性使其在某些医疗培训和教育中具有优势^[14]。

2.2 VR在医疗领域的应用概况 VR技术在疼痛管理方面的应用越来越受到重视。研究表明,VR可有效缓解急性和慢性疼痛^[15]。通过提供分散注意力的虚拟环境,可显著降低患者在接受治疗或进行手术时对疼痛的感知。在一项针对慢性疼痛患者的研究中,使用VR技术进行干预的结果显示,患者的疼痛评分明显降低,且治疗满意度提高,表明VR作为一种非药物治疗方法能够有效减轻患者的痛苦^[16]。

在心理治疗领域,VR技术的应用也展现出了良好的效果。通过创建安全的虚拟环境,可对患者进行暴露疗法,帮助他们逐步面对和克服恐惧。如在治疗创伤后应激障碍(post-traumatic stress disorder, PTSD)和焦虑症时,VR可模拟特定的情境,使患者在可控制的环境中处理负面情绪。研究发现,使用VR进行心理治疗后患者在情绪调节和应对策略方面得到明显改善,尤其是在儿童和青少年群体中,VR提供的沉浸式体验有助于增强治疗效果^[17]。

VR在康复训练中的应用也逐渐增多,尤其是在运动功能和认知功能的恢复上。VR技术可通过提供互动性和趣味性的训练环境,提高患者的参与度和训练效果。如针对卒中后康复的患者,VR训练不仅可促进其

运动技能的恢复,还可增强其自信心和参与的积极性。研究发现,使用VR技术进行康复训练的患者在运动能力和日常生活自理能力上均有显著提高,提示VR在康复医学中具有潜在的应用价值^[18]。

3 VR在ICU早期活动中的具体应用模式

3.1 床上活动训练系统 在ICU患者的早期活动中,床上活动训练系统的设计特别关注上肢功能的恢复。根据现有研究,使用VR技术进行上肢功能训练可提高患者的参与度和锻炼效果。一项研究发现,患者在虚拟环境中通过完成拼图游戏等任务来训练上肢功能,不仅提高了手部的灵活性,还增加了患者在训练中的满意度和依从性^[3]。这种训练方式通过游戏化的设计,能够有效激发患者的主动性,使得原本枯燥的康复过程变得更加有趣和富有成效。

下肢被动活动的模拟同样是ICU早期活动训练的重要组成部分。VR技术可为患者提供一个安全的环境,患者在该环境中即使不能主动参与,也能通过被动的方式接受下肢锻炼。例如,VR模拟器可模拟步态运动,让患者体验行走的感觉,从而在心理上减轻对活动的恐惧,同时促进血液循环和肌肉的微弱活动^[19]。这种被动活动的设计不仅能减轻患者的焦虑,还可有效降低长期卧床导致的肌肉萎缩风险。

3.2 转移与站立训练方案 在转移与站立训练方案中,虚拟环境可为患者提供一个安全的练习平台,帮助他们提高平衡能力。研究显示,利用VR技术进行的平衡训练能够有效改善患者的稳定性,降低跌倒风险^[18]。通过在虚拟环境中进行不同难度的平衡练习,患者可在没有外部压力的情况下逐步提高自己的平衡能力^[20]。这种方法不仅可用于恢复身体的平衡能力,还可在心理上增强患者的信心,使他们更敢于尝试站立和行走。

渐进性负重训练是另一种有效的训练方法,尤其适合在虚拟环境中实施。通过模拟不同的负重情况,患者可逐步适应从坐位到站立的转换过程。这种训练方法的关键在于能够根据患者的能力动态调整负重,从而避免因负担过重而导致的伤害。研究表明,渐进性负重训练结合VR技术可显著提升患者在实际生活中对重物的处理能力和自信心^[21]。这种虚拟环境中的训练方式为ICU患者提供了安全、可控的康复体验,有助于他们更快适应日常生活的挑战。

4 VR技术在ICU患者早期活动中的应用效果

4.1 改善生理功能 VR技术在ICU中的应用已被证实可显著改善患者的生理功能,尤其是在肌肉力量恢复方面。研究发现,使用VR技术的患者在早期活动中表现出更好的肌肉力量恢复。一项针对心脏手术患者的研究发现,应用VR刺激的患者在接受早期活动训练后,其肌肉力量显著提高^[22]。此外,VR技术可通过提供沉浸式的环境,帮助患者在早期活动中克服心理障碍,从而促进身体的运动能力和活动水平。

除了肌肉力量的改善,VR技术对ICU患者的心肺功能也具有积极影响。有研究发现,在VR刺激下,患者的呼吸频率明显下降,而心率和血压可保持稳定,这表明VR技术具有帮助患者放松的效果^[22]。这类心肺功能的改善不仅有助于患者的整体康复,也可为早期活动的实施提供生理基础,降低ICU患者因长期卧床导致的并发症发生风险^[19]。

4.2 对心理状态的影响 VR技术在改善ICU患者心理状态方面也具有明显的效果。研究发现,接受VR干预的患者焦虑和抑郁评分明显降低^[23]。这种变化可能与VR技术提供的沉浸式体验有关,使患者在ICU环境中感受到更多的放松和愉悦感。如针对新型冠状病毒肺炎患者的研究表明,应用VR干预后,患者的焦虑和抑郁水平在干预后的1周内明显降低,并在出院后长期维持在正常水平^[24]。这种心理状态的改善对于促进患者的整体康复至关重要。

此外,VR技术还可提高患者的治疗依从性。通过将早期活动与VR结合,可显著增强患者在治疗过程中的积极性和主动性,进而提高其治疗依从性^[25]。研究表明,患者在使用VR进行活动训练时,其对治疗方案的接受度和配合度提高,进而加速康复过程^[25]。综上所述,VR技术不仅可在生理功能上改善ICU患者的早期活动效果,而且在心理状态和治疗依从性方面也可发挥重要作用,提示其在ICU患者管理中具有广泛的应用潜力。

5 实施VR早期活动的技术考量

5.1 设备选择与适配 在ICU环境中实施VR技术的早期活动时,设备的选择与适配至关重要。ICU通常存在噪声水平高、空间有限以及对患者的监测要求严格等特点,因此选择的VR设备必须具备良好的适应性和灵活性。使用的VR头戴设备应具备轻便的设计,以减少患者在使用过程中的不适,同时还需考虑设备的防

护性,以便在高风险的医疗环境中有效防止交叉感染。此外,设备的操作简便性也是一个关键因素,医护人员需要在紧张的工作环境中快速上手,确保能够及时为患者提供VR活动体验。研究发现,定制化的VR应用程序能有效针对ICU患者的具体需求(如缓解焦虑、痛苦等情绪)并增强其对早期活动的参与感和配合度^[26]。

在选择与适配VR设备时,还需充分考虑患者的个性化需求。不同患者在年龄、身体状况、认知能力等方面存在明显差异,这些因素均可影响其对VR活动的接受程度及治疗效果。因此,VR系统应具备高度的个性化和可调节性。如对于重症患者,可设计具有较低互动强度的VR场景,以减少其身体负担,同时提供更为直观和轻松的体验。此外,患者的病情变化也要求VR应用能够灵活调整,以适应患者的实时需求。研究表明,个性化的VR干预能够显著提高患者的满意度,并在一定程度上促进其身心康复^[27]。

5.2 安全性评估与管理 在实施VR早期活动时,晕动症的预防是一个不可忽视的安全性考量。由于VR环境可能会导致患者出现视觉与前庭系统之间的冲突,进而引发晕动症,因此在设计VR应用时需采取相应的防范措施。选择合适的场景速度和旋转频率、提供适时的休息时间以及设计简洁易懂的用户界面均有助于降低晕动症的发生率。此外,医护人员应在VR活动前向患者说明可能发生的不良反应,并通过渐进式的暴露策略帮助患者适应VR环境,以减少不适的产生^[19]。

在ICU环境中,感染控制是实施VR技术的另一项重要考量。由于ICU患者的免疫力普遍较低,任何外部设备的使用都可能增加感染的风险。因此,VR设备的清洁与消毒极其重要。使用前应对设备进行严格的消毒处理,并在使用过程中制定明确的操作规程,以保障患者的安全。此外,医护人员在操作VR设备时需佩戴适当的个人防护装备(PPE),如手套和口罩,以进一步降低交叉感染的风险。通过建立科学的感染控制措施,可有效确保VR技术在ICU中的顺利应用,进而提升患者的康复体验^[28]。

6 当前应用中的挑战与限制

6.1 技术层面的障碍 在VR技术应用于ICU患者早期活动的过程中,设备成本和维护问题是一个严峻的挑战。根据研究,医疗设备的维护费用与医院的床位数、手术数量及医护人员的数量密切相关^[29]。对于ICU而言,VR设备通常需要高昂的采购和维护费用,这可能导致医院在资源有限的情况难以广泛推广此类技术。此外,设备的持续维护也需要专业的技术支持和培训,进一步增加医院的运营成本。特别是在资源匮乏的低收入国家,设备的故障率较高,导致许多医疗设备无法正常运转,进而影响技术的应用普及^[30]。这一系列问题使VR技术在临床中的应用受到限制,也使医院的资金压力加大。

在技术层面,软件的适配性问题也对VR技术的应用构成了障碍。不同医院的设备和软件平台可能存在兼容性问题,这使得在多个医院间推广统一的VR应用变得复杂^[31]。如针对特定设备开发的软件可能无法在其他品牌或型号的设备上正常运行,导致医院不得不为每种设备购买不同的软件解决方案,进一步增加了成本。此外,由于缺乏标准化的评估流程和疗效评价标准,医院在选择和使用这些软件时面临不确定性,从而导致资源浪费和时间延误^[32]。

6.2 临床实践中的困难 在将VR技术应用于ICU患者早期活动时,医护人员的培训需求是一个关键的临床实践挑战。研究表明,医护人员在使用新技术方面普遍缺乏足够的培训和知识,尤其是在复杂的医疗环境中,操作不当可能会对患者的安全和治疗效果产生负面影响^[31]。因此,医院需要投入时间和资源来对医护人员进行系统的培训,以确保他们能够熟练使用VR技术并理解其在患者康复中的作用。此外,培训的内容和方式也应及时更新,以适应快速发展的技术和不断变化的临床需求。

疗效评估标准的不统一也是影响VR技术在ICU中应用的一个重要因素。不同研究和临床实践中对疗效的定义及测量方法存在差异,导致难以进行有效的疗效比较和综合评估^[33]。如某些研究可能侧重于患者的心理反应,而另一些则可能关注生理指标的变化。这种评估标准的多样性不仅增加了研究的复杂性,还可能导致临床决策的不一致,从而影响技术的推广和应用。因此,制定统一的评估标准对于提高VR技术在ICU患者早期活动中的应用效果至关重要。

7 研究与发展方向

7.1 技术创新趋势 混合现实技术(mixed reality, MR)作为一种新兴的三维展示技术,通过将虚拟数字世界与现实世界相结合,展现出了独特的优势,尤其在医疗领域的应用潜力逐渐显现。在儿科肿瘤手术中,CarnaLife Holo系统可将医学影像数据转化为交互式3D全息图,用于术前规划和术中导航,初步评估显示其对缩短手术时间和住院周期具有潜在影响^[34]。此外,在前外侧大腿穿支皮瓣手术中,MR结合人工智能算法

在血管定位方面展现出与彩色多普勒超声相当的效果,为复杂手术提供了新的可视化解决方案^[35]。MR技术正在医疗领域形成包括手术导航、医学教育、康复治疗 and 术前规划等在内的多元化应用格局,其“虚实融合”的特性为解决传统医疗难题提供了创新思路,但技术成熟度和临床验证仍需进一步加强^[36-37]。

生物反馈技术在增强患者康复效果方面展现出了良好的前景。通过实时监测和反馈患者的生理信号(如心率、肌电信号),生物反馈系统能够帮助患者更有效地进行康复训练,尤其是在运动功能恢复和疼痛管理方面。研究表明,通过整合生物反馈与VR技术,可显著提高患者的运动意识和训练效果,从而促进肌肉力量的恢复^[38-39]。未来,随着技术的进步,生物反馈系统的集成将更加普遍,尤其是在智能可穿戴设备的支持下,可为患者提供个性化的康复方案。这种整合将不仅仅局限于物理治疗,还可能扩展到心理健康领域,如用于焦虑和压力管理的干预措施^[40]。

7.2 临床研究重点 在VR技术和生物反馈系统的临床应用研究中,大样本随机对照试验(randomized controlled trial, RCT)设计是确保研究结果可靠性的关键。通过对大量患者进行随机分组,研究者能够更有效地评估新技术的真实效果。如针对ICU患者早期活动的临床研究,采用大样本RCT设计有助于验证VR技术在改善患者康复进度和生活质量方面的有效性^[41]。此外,RCT设计还可有效控制潜在的混杂因素,提高结果的准确性和可重复性,从而为未来的临床应用提供更坚实的证据基础^[42]。

除了大样本RCT的设计外,长期随访数据的收集也是评估VR技术和生物反馈系统长期效果的重要环节。通过对患者在治疗后的长期随访,可评估新技术对患者康复的持续影响及其安全性。如针对参与VR康复的患者,研究者可定期收集其生理和心理状态的变化数据,以评估VR技术的实际应用效果和患者的生活质量。这种长期的跟踪研究不仅有助于了解治疗效果的持续性,还可为未来的技术改进和应用提供重要的反馈信息,从而推动相关领域的进一步研究和发展。

8 总结与展望

VR技术在ICU患者早期活动中展现出了显著的潜力,可有效改善患者的生理功能(如肌力、心肺指标),缓解焦虑、抑郁情绪,并可提升患者的参与度及依从性。然而,其广泛应用仍面临技术成本高、ICU环境适配性(如设备消毒、晕动症预防)较差、医护人员培训不足及疗效评估标准不统一等挑战。未来的研究应聚焦于开发智能化、个性化的VR康复方案,并积极开展多中心大样本RCT与长期随访,以建立循证基础。同时,还应加强跨学科合作,推动设备兼容性与操作规范的标准化,以促进VR技术在ICU康复领域的有效转化和广泛应用。

【参考文献】

- [1] Hunter A, Johnson L, Coustasse A. Reduction of intensive care unit length of stay: the case of early mobilization[J]. *Health Care Manag (Frederick)*, 2020, 39(3): 109-116.
- [2] Gatty A, Samuel SR, Alaparhi GK, et al. Effectiveness of structured early mobilization protocol on mobility status of patients in medical intensive care unit[J]. *Physiother Theory Pract*, 2022, 38(10): 1345-1357.
- [3] de Vries M, Beumeler LFE, van der Meulen J, et al. The feasibility of virtual reality therapy for upper extremity mobilization during and after intensive care unit admission[J]. *PeerJ*, 2025, 13: e18461.
- [4] Frith A, Mall A, Streisfeld G, et al. Human-centered design of a virtual reality intervention to promote early mobility in a cardiothoracic ICU[J]. *Nurs Adm Q*, 2025, 43(10): e01309.
- [5] Zou J, Chen Q, Wang J, et al. Effects of virtual reality for psychological health of ICU patients: a study protocol for systematic review and meta-analysis[J]. *BMJ Open*, 2023, 13(7): e073660.
- [6] Liang S, Liu Y, Wen T, et al. Effectiveness of a virtual reality-based sensory stimulation intervention in preventing delirium in intensive care units: a randomised-controlled trial protocol[J]. *BMJ Open*, 2025, 15(1): e083966.
- [7] Bruno RR, Wolff G, Wernly B, et al. Virtual and augmented reality in critical care medicine: the patient's, clinician's, and researcher's perspective[J]. *Crit Care*, 2022, 26(1): 326.
- [8] Mirza FT, Saadi N, Noor N. Early mobilization of critically ill ICU patients: a survey of knowledge, perceptions, and practices of Malaysian physiotherapists[J]. *Med J Malaysia*, 2024, 79(Suppl 1): 40-46.
- [9] Singam A. Mobilizing progress: a comprehensive review of the efficacy of early mobilization therapy in the intensive care unit[J]. *Cureus*, 2024, 16(4): e57595.
- [10] Wshah A, Obaidat S, Shallah AI, et al. Exploring early mobilization practices in adult intensive care units in Jordan: a cross-sectional survey[J]. *J Multidiscip Healthc*, 2025, 18: 3749-3761.
- [11] Wang J, Xiao Q, Zhang C, et al. Intensive care unit nurses' knowledge, attitudes, and perceived barriers regarding early mobilization of patients[J]. *Nurs*

- Crit Care, 2020, 25(6): 339-345.
- [12] Tadyanemhandu C, van Aswegen H, Ntsiea V. Organizational structures and early mobilization practices in South African public sector intensive care units-a cross-sectional study[J]. *J Eval Clin Pract*, 2021, 27(1): 42-52.
- [13] Buletsa S, Zaborovskyy V, Mendzhul M, *et al*. Legal protection and features of the application of virtual reality technologies in medicine[J]. *Georgian Med News*, 2021(313): 180-185.
- [14] Hameed BMZ, Somani S, Keller EX, *et al*. Application of virtual reality, augmented reality, and mixed reality in endourology and urolithiasis: an update by YAU endourology and urolithiasis working group[J]. *Front Surg*, 2022, 9: 866946.
- [15] Colloca L, Han A, Massalee R, *et al*. Telehealth virtual reality intervention reduces chronic pain in a randomized crossover study[J]. *NPJ Digit Med*, 2025, 8(1): 192.
- [16] Dy M, Olazo K, Lyles CR, *et al*. Usability and acceptability of virtual reality for chronic pain management among diverse patients in a safety-net setting: a qualitative analysis[J]. *JAMIA Open*, 2023, 6(3): ooad050.
- [17] Li M, Race M, Huang F, *et al*. Role of virtual reality to promote mobilization in the critical care setting: a narrative review[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2025, 104(5): 487-494.
- [18] Wu J, Zeng A, Chen Z, *et al*. Effects of virtual reality training on upper limb function and balance in stroke patients: systematic review and meta-analysis[J]. *J Med Internet Res*, 2021, 23(10): e31051.
- [19] Fraga IB, Caballero LG, Lago PD, *et al*. Perceived dyspnea and experience of hospitalized patients with acute decompensated heart failure undergoing an early MOBilization protocol with immersive Virtual rEality: MOVE study protocol for a parallel superiority randomized clinical trial[J]. *Trials*, 2023, 24(1): 751.
- [20] Wilson O, Borris F, Thorpe B, *et al*. Exploring virtual reality-based training's effects on balance ability and balance confidence in older adults[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2024, 2024: 1-4.
- [21] Pouplin S, Bonnyaud C, Bouchigny S, *et al*. Feasibility of a serious game system including a tangible object for post stroke upper limb rehabilitation: a pilot randomized clinical study[J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1176071.
- [22] Gerber SM, Jeitziner MM, Knobel SEJ, *et al*. Perception and performance on a virtual reality cognitive stimulation for use in the intensive care unit: a non-randomized trial in critically ill patients[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2019, 6: 287.
- [23] Zeka F, Clemmensen L, Valmaggia L, *et al*. The effectiveness of immersive virtual reality-based treatment for mental disorders: a systematic review with meta-analysis[J]. *Acta Psychiatr Scand*, 2025, 151(3): 210-230.
- [24] Vlakte JH, van Bommel J, Hellemons ME, *et al*. Intensive care unit-specific virtual reality for psychological recovery after ICU treatment for COVID-19; A brief case report[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2021, 7: 629086.
- [25] Glancova A, Do QT, Sanghavi DK, *et al*. Are we ready for video recognition and computer vision in the intensive care unit? A survey[J]. *Appl Clin Inform*, 2021, 12(1): 120-132.
- [26] Perry H, Alight A, Wilcox ME. Light, sleep and circadian rhythm in critical illness[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2024, 30(4): 283-289.
- [27] Nobles K, Cunningham K, Fecondo B, *et al*. Mobilization in neurocritical care: challenges and opportunities[J]. *Curr Neurol Neurosci Rep*, 2024, 25(1): 13.
- [28] Albin CSW, Cunha CB, Glaser TP, *et al*. The approach to altered mental status in the intensive care unit[J]. *Semin Neurol*, 2024, 44(6): 634-651.
- [29] Auni3n-Villa J, G3mez-Chaparro M, Garc3a Sanz-Calcedo J. Assessment of the maintenance costs of electro-medical equipment in Spanish hospitals[J]. *Expert Rev Med Devices*, 2020, 17(8): 855-865.
- [30] Hillebrecht M, Schmidt C, Saptoka BP, *et al*. Maintenance versus replacement of medical equipment: a cost-minimization analysis among district hospitals in Nepal[J]. *BMC Health Serv Res*, 2022, 22(1): 1023.
- [31] Almotairi KH. Towards partial autonomy of operation and maintenance of unreliable equipment[J]. *Heliyon*, 2023, 9(9): e20055.
- [32] 鲍莉, 沈云明, 郑焜. 数据分析和数据可视化在医疗设备上的应用——以输注泵为案例[J]. *中国医疗器械杂志*, 2023, 47(2): 229-232.
- [33] Li K, Su L, Cheng J, *et al*. Improving maintenance efficiency and controlling costs in healthcare institutions through advanced analytical method[J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 18377.
- [34] Bronowicki K, Antoniuk-Majchrzak J, Malesza I, *et al*. An attempt to evaluate the use of mixed reality in surgically treated pediatric oncology patients[J]. *NPJ Digit Med*, 2025, 8(1): 262.
- [35] Liu Y, Fan W, Yu M, *et al*. Comparison between mixed reality with artificial algorithms and ultrasound in localization of anterior thigh flap perforators: a prospective randomized controlled study[J]. *BMC Med*, 2025, 23(1): 374.
- [36] Magalhães R, Oliveira A, Terroso D, *et al*. Mixed reality in the operating room: a systematic review[J]. *J Med Syst*, 2024, 48(1): 76.
- [37] Magalhães R, Lima AC, Marques A, *et al*. Usefulness of mixed reality in surgical treatment: delphi study[J]. *J Med Internet Res*, 2025, 27: e69964.
- [38] Han J, Park J, Kang H, *et al*. The effect of a biofeedback-based integrated program on improving orthostatic hypotension in community-dwelling older adults: a pilot study[J]. *J Cardiovasc Nurs*, 2025, 40(1): E24-E36.
- [39] Sherif O, Bassuoni MM, Mehrez O. A survey on the state of the art of force myography technique (FMG): analysis and assessment[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2024, 62(5): 1313-1332.
- [40] 唐祖南, 胡末豪, 刘硕, 等. 混合现实结合手术导航技术在咽旁间隙肿瘤手术中的应用初探[J]. *中华口腔医学杂志*, 2024, 59(11): 1107-1113.
- [41] Sullivan J, Skladman R, Varagur K, *et al*. From augmented to virtual reality in plastic surgery: blazing the trail to a new frontier[J]. *J Reconstr Microsurg*, 2024, 40(5): 398-406.
- [42] Zhang J, Wang C, Li X, *et al*. Application of mixed reality technology in talocalcaneal coalition resection[J]. *Front Surg*, 2023, 9: 1084365.