

面向肌少症患者的虚拟现实康复系统设计

王凯, 潘翔*

(武汉理工大学艺术与设计学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: [目的] 针对肌少症康复训练中缺乏精准反馈和个性化指导, 以及训练依从性低等问题, 进行康复系统设计, 以提升训练效果并优化用户体验。[方法] 设计并实现了一种基于 VR 与 MoCap 技术的沉浸式康复系统。用户通过 VR 头戴式显示设备在虚拟环境中学习易筋经, 并利用穿戴式动作捕捉设备实时获取动作数据, 以驱动虚拟化身同步训练。系统提供标准化化身对比、实时指示器反馈等功能, 辅助用户校正姿势, 并采用姿势匹配评分(PTS)算法量化训练效果, 提供个性化反馈。[结果] 通过实验对比本系统与真人训练、视频训练的效果, 实验数据显示, 使用 VR 康复系统的用户在训练过程中动作准确性提高, 用户体验增强。[结论] 本研究提出的 VR 康复系统弥补了传统肌少症康复训练方式的不足, 提高康复训练的精准度, 增强训练趣味性与依从性, 为虚拟现实在康复领域的应用提供理论与实践参考, 并为后续同类康复系统的优化与推广奠定基础。

关键词: 肌少症; 虚拟现实; 动作捕捉; 易筋经; 康复训练

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)06-0983-09

The design of virtual reality rehabilitation system for patients with sarcopenia

WANG Kai, PAN Xiang*

(School of Art and Design, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] This study aims to address issues in sarcopenia rehabilitation training, such as lack of accurate feedback, personalized guidance, and low training adherence, through a systematic design approach. Consequently, training outcomes can be improved and user experiences can be optimized. [Methods] A VR and MoCap-based immersive rehabilitation system was designed and implemented. Users learn Yi Jin Jing in a virtual environment using a VR headset, and motion data is captured in real time through wearable motion capture devices to drive the synchronized training of a virtual avatar. The system provides functions such as standardized avatar comparison and real-time feedback indicators to assist users in posture correction, and uses a posture matching score (PTS) algorithm to quantify training outcomes and provide personalized feedback. [Results] Experimental comparisons between the system and traditional training methods (real-person training, video-based training) showed that users using the VR rehabilitation system secured improved movement accuracy and enhanced user experience during the training. [Conclusions] The VR rehabilitation system proposed in this study addresses the limitations of traditional sarcopenia rehabilitation methods, thus improving the precision of rehabilitation training, increasing training engagement and adherence. This treatment provides theoretical and practical insights for the application of virtual reality in rehabilitation and lays a foundation for the optimization and promotion of similar rehabilitation systems in the future.

Keywords: sarcopenia; virtual reality; motion capture; Yi Jin Jing; rehabilitation

收稿日期: 2024-10-29 录用日期: 2025-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(61902287)

*通信作者: 17762396142@163.com

引文格式: 王凯, 潘翔. 面向肌少症患者的虚拟现实康复系统设计[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(6): 983-991.

Citation: WANG K, PAN X, et al. The design of virtual reality rehabilitation system for patients with sarcopenia[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(6): 983-991. (in Chinese)



肌肉减少症(肌肉功能不全)是一种老年综合征,其特征是骨骼肌质量和功能进行性和全身性丧失,增加不良后果的风险,包括身体残疾、跌倒和死亡^[1]. 肌少症可分为两类:原发性肌肉减少症和继发性肌少症,前者与年龄相关,后者可确定其他原因,如活动减少、疾病和营养不良^[2]. 40 岁以后,健康成年人每 8 年就会失去大约 10% 的肌肉质量. 因此,在 40~70 岁之间,健康成年人平均失去 24% 的肌肉,在 75 岁以后每十年加速到 70%^[3]. 一项针对意大利 70 岁及以上老年人群的观察性研究显示,肌肉减少症在疗养院居民中非常普遍,且与全因死亡风险显著增加相关^[4].

老年肌少症患者展现出显著的生理与心理特征变化. 身体形态方面,随年龄增长,体力活动能力减弱,基础代谢率下降,体脂率上升. 生理机能方面,易出现高血压、高静息心率、臂踝脉搏波传导速度加快及肺活量降低,增加心血管疾病风险. 身体素质方面,力量、速度、耐力、平衡、协调及柔韧性均下降,具体表现为握力减弱、步速减慢、运氧能力降低及关节活动障碍. 此外,握力与步速与执行和总体认知功能相关联,提示肌少症与认知障碍间可能存在双向联系^[5-6]. 心理层面,韩国研究显示,肌少症与抑郁症独立相关,男性患者疼痛与不适感更显著,女性患者焦虑与抑郁症状更明显^[7].

目前治疗肌少症的方法主要为营养疗法和运动疗法^[8]. 对于营养疗法,充足的能量和蛋白质摄入是肌肉减少症营养治疗的重要因素^[9]. 日本肌肉减少症和虚弱学会制定的临床实践指南报道,对肌肉减少症患者进行干预,给予 3 g 必需氨基酸,一日 3 次,可改善膝伸肌力量^[10]. 在 PROVIDE 研究中^[11],除正常饮食外,在早餐和午餐后,对部分肌肉减少症患者给予营养补充剂,结果显示,营养补充剂不会增加骨骼肌质量^[9]. 单纯营养干预对肌肉质量、肌力或步行速度的影响尚无统计学意义^[12]. 因此,关于肌肉减少症营养治疗的建议很少,证据质量低.

运动疗法中,抗阻训练占据主流地位. Zhao 等^[13]指出,松紧带中等强度阻力训练或为老年肌少症患者的优选训练方案. Hassan 等^[14]研究表明,渐进式阻力训练有助于降低收容机构中高龄老人残疾及肌少症风险. Chen 等^[15]发现,壶铃训练能显著提升老年女性肌少症患者的肌肉指标、握力、背部力量及呼气峰值流量. Maruya 等^[16]报道,简单日常锻炼 6 个月即可显著改善肌肉力量和身体机能. 李国庆等^[17]结合八段锦与弹力带对老年肌少症患者进行康复训练,成效显著,患者肌肉功能与日常活动质量均获提升. 然而,器

械性抗阻训练成本高昂,应用受限. 龚利等^[18]及王宾等^[19]分别发现,易筋经能有效提高老年肌少症患者下肢伸肌群肌力、膝关节稳定性及躯干、肩关节柔韧性、下肢力量. 殷萱等^[20]进一步指出,易筋经锻炼能增强机体运动感知能力,提升核心区肌群力量及稳定性. 综上所述,易筋经可作为肌少症康复的有效运动疗法之一.

易筋经是中国的一项传统健身功法,其历史源远流长,是一种融合动态与静态的健身气功方法^[21]. 文献^[22-23]表明,易筋经通过对肢体的扭曲与旋转,使肌体得到充分的牵拉,从而改善肌肉、筋骨、关节的灵活性和柔韧性,是多种运动系统疾病有效的改善方法. 然而个人在进行易筋经运动时的标准性难以保证,会影响到肌肉收缩与舒张的时间与程度,从而影响康复的效果. 因此训练过程中的指导是必要的.

目前主流指导运动康复的方式是真人训练和视频训练. 真人训练可以帮助学生纠正动作,学习效率. 其局限在于受到时间与地点的限制,学习过程不够自由,集体训练时学习质量也会下降. 视频训练虽然不受时间与地点的限制,但没有互动与反馈,学习效率低,趣味性低,学习动力不足.

因此,为了使肌少症患者实现低成本居家康复训练,本研究设计了一款虚拟现实易筋经训练系统,用户借助头戴式显示器虚拟现实场景,跟随场景中的已绑定标准易筋经动画的虚拟教练运动,用户的动作会通过穿戴在身上的动作捕捉设备传输至用户在虚拟场景中的化身,让用户感到虚拟化身就是自己. 用户可通过穿越人形轮廓墙壁、姿势规范监测等交互方式,规范运动姿势,并且通过最后的得分来判断训练的效果,从而激励用户自发的想要获得更高的分数而继续练习.

1 相关研究

目前有很多研究将虚拟现实技术应用于肢体康复训练活动. Yen 等^[24]则设计了一个虚拟现实增强平衡训练系统,利用平衡板驱动 VR 环境中的物体,有效改善了患者的姿势稳定性. Kang 等^[25]在跑步机步态背景下,研究了沉浸式 VR 光流跑步机对中风患者的影响,发现其能显著提高患者的步行能力. Park 等^[26]开发了一个 3D 虚拟现实皮划艇程序,用于改善社区老人的认知、肌肉力量和姿势平衡,结果显示该系统具有显著效果. 然而,大多数 VR 康复系统仅仅将用户置于虚拟环境中,但是用户无法直观地感受到自身的

运动效果,导致沉浸感与交互体验下降.

动作捕捉技术与虚拟现实技术的结合为运动康复的方式提供了新的可能. 动作捕捉技术可以识别人体动作,获取动作数据,并且根据数据对人体运动状态进行分析^[27]. Chen 等^[28]构建了 VR-REH 系统,集成 Leap Motion 深度摄像头追踪 60 岁以上肌少症患者上肢数据,证明 VR 结合动作捕捉技术可实现安全经济的康复治疗,显著提升上肢肌肉质量. Baldominos 等^[29]则利用 Intel RealSense 深度相机设计 VR 运动游戏,指导患者执行特定手臂运动,促进肩袖康复. Chua 等^[30]研制的无线 VR 系统与太极拳训练应用,结合无线头戴显示器及光学动作捕捉设备,使学生在 3D 环境中跟随虚拟教练训练,动作实时同步至虚拟化身. 然而,深度摄像头面临精度与稳定性挑战,尤其在身体遮挡时表现不佳;光学动作捕捉设备虽精确稳定,但高昂成本与场地限制阻碍其普及. 相比之下,惯性运动捕捉设备因成本低、便携且精度提升,正成为光学动作捕捉的可行替代^[31]. Liu 等^[32]开发了基于 VR 与动作捕捉的太极学习系统,采用 HTC Vive 设备与 Noitom 惯性动作捕捉,通过动作相似度匹配算法评估训练质量,但成本高且交互趣味性不足. 鉴于此,本研究采用最新的 Rebecap+Meta Quest 2 方案,显著降低训练康复成本,并融入趣味性交互内容,提升患者使用意愿.

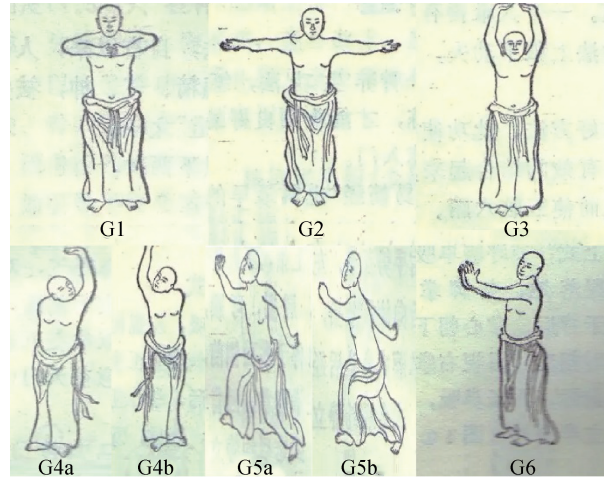
2 康复系统设计

本系统综合利用虚拟现实(VR)头显与惯性动作捕捉设备,构建一个沉浸式的易筋经训练环境;通过实时采集用户的全身动作数据,驱动虚拟化身,并基于关节空间位置的欧氏距离算法,将用户动作与标准易筋经姿势进行精准比对、量化评分;最终通过虚拟教练指导、多模态实时反馈(视觉、听觉)及游戏化训练关卡,为用户提供个性化的姿势纠正与沉浸式康复体验,从而提升训练的标准性、趣味性与依从性.

2.1 易筋经康复姿势模型

在训练方式的选择上,易筋经作为以自身形体活动、呼吸吐纳、心理调节相结合的中国传统养生功法,具有功理科学、内容充实、安全易学、效果显著等特点,其以强筋健骨为主,主要运动特点为变易筋骨、伸筋拔骨,可以有效提高老年人骨骼肌肌力,起到延缓老年增龄性骨骼肌衰弱的作用^[33]. 因此,考虑到患者在身体机能下降的条件下,使用易筋经健身功法这种

中医传统健身方式,更能满足老年人的生理与心理需求. 易筋经功法共有 12 式,本系统选取了前 6 式作为本系统的姿势模型(图 1),分别为“韦驮献杵第一势(G1)”、“韦驮献杵第二势(G2)”、“韦驮献杵第三势(G3)”、“摘星换斗势(G4a、G4b)”、“倒拽九牛尾势(G5a、G5b)”、“出爪亮翅势(G6)”.



(图片来源: https://blog.csdn.net/She_lock/article/details/79998634)

图 1 易筋经功法前六式图解

Fig. 1 Diagram of the first six exercises of the Yi Jin Jing

2.2 系统架构

系统架构如图 2 所示.

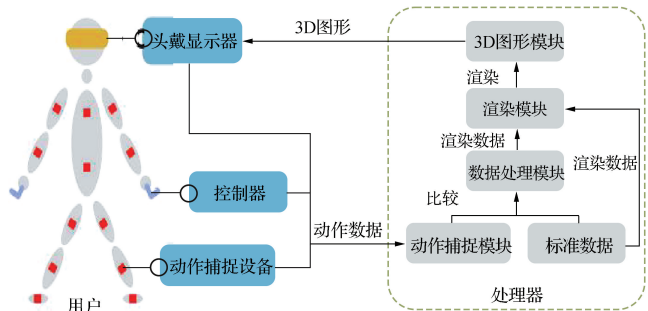


图 2 系统架构

Fig. 2 System architecture

2.2.1 硬件设备

头戴式显示器采用的是 MetaQuest2 头显,配备 1 832×1 920 LCD 屏幕、骁龙 XR2 处理器、6 GB RAM,并内置传感器实现 6DoF 内向外追踪和手部追踪. 其自带 Oculus Touch 控制器,续航约 2~3 h,支持 Oculus Link 和 Air Link 连接 PC,实现独立 VR 和 PC VR 双模式体验.

动作捕捉设备采用的是 ReboCap 全身惯性动作捕捉设备, 选用 ReboCap 作为动作捕捉设备, 其 15 点全身惯性捕捉技术具备 ±0.5° 静态精度和 60 fps 更新率, 确保高精度、低延迟的实时交互。设备轻便耐用, 续航达 30 h, 支持 2.4 GHz 无线通信和多种数据格式, 具有适配 Unity 的 SDK, 易于开发。

2.2.2 工作原理

ReboCap 惯性动作捕捉设备与 MetaQuest2 协同工作, 前者通过 9 轴 IMU 和 UDP 协议传输身体关节数据, 后者的头显与控制器分别负责传输头部与手部数据, 最终全部汇总至 PC 端。动作模块结合 Kalman 滤波算法进行姿态融合, 并通过逆运动学 (IK) 优化骨骼动画, 以确保精准自然的运动映射。数据处理模块依据姿势评判算法 (2.3.2 节公式) 对动作捕捉数据与标准数据进行处理, 输出对比数据, 渲染模块依据对比数据以及模型数据渲染相应内容 (如虚拟环境、人物角色、UI 等)。具体渲染原理主要依靠 Unity 引擎 (URP 渲染管线) 负责 VR 场景的实时渲染, 结合 PhysX 物理引擎处理碰撞检测和刚体交互, 并使用 TAA 抗锯齿、MSAA (4x) 和运动模糊优化视觉体验。3D 图形模块的作用是接收渲染模块生成的图形, 并将其实时渲染和显示在头显中, 让用户能够观察到这些虚拟元素。头显画面通过 Oculus Link (USB-C) 串流至 Meta Quest 2, 其屏幕以 90 Hz 刷新率显示, 提供流畅稳定的沉浸式体验。

2.3 系统展示

2.3.1 系统场景

本系统的核心功能区为 10 m × 10 m 的区域, 其中包含两个虚拟教练, 均距离用户 5 m, 分别正面及背面展示易筋经标准动作 (图 3)。用户佩戴头显设备跟随虚拟教练练习, 同时通过 ReboCap 设备使自身化身

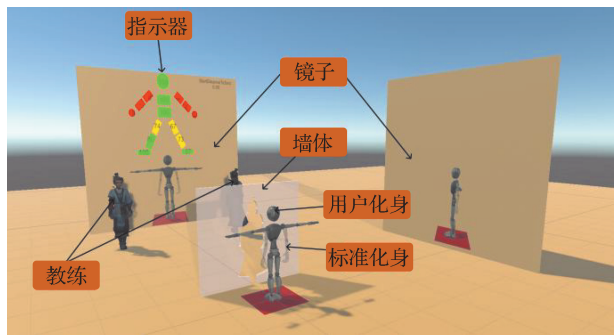


图 3 系统场景演示图 (第三人称视角)

Fig. 3 System scene demonstration diagram (third person perspective)

同步运动。系统中还有半透明标准化身同步展示标准动作, 并设有带不同人型轮廓的墙壁周期性穿过用户以辅助练习。用户可通过指示器监测关节位置准确性, 并且根据标准化身以及镜面调整姿势, 系统最终根据表现评分, 以及在训练后统计得分。图 4 为真人演示场景。



图 4 真人演示

Fig. 4 Real person demonstration

2.3.2 系统核心设计

系统中存在两位虚拟教练, 为了与易筋经背景相匹配, 并且考虑到老年群体对幼年形象的喜爱, 选择中国古代少年卡通形象, 分别以正面和背面朝向用户, 虚拟教练在训练开始后会对易筋经健身运动, 用户可观察并挑选自己能够更易于接受的运动参考对象进行模仿, 从而学习易筋经的动作 (图 5)。虚拟教练绑定的标准易筋经健身运动动画是由一名熟练的易筋经健身运动人员通过 Opti-Track 光学动作捕捉设备录制并修正而得, 保证虚拟教练运动的标准性。



图 5 虚拟教练

Fig. 5 Virtual coach

为直观反馈用户身体各部位相对于标准动作的准确度 (包括头、躯干、臀、四肢及手脚), 系统设计了指示器 (图 6)。基于文献 [34-35], 关节位置的测量对于动作准确性的判定具有最好的效果, 因此本系统采用用户化身与标准化身关节位置欧氏距离 D_i 评估动作准确性。通过式 (1) 计算此距离, 并利用式 (2) 将准确度分为优秀、良好、不合格三级, 式 (3) 则根据等级

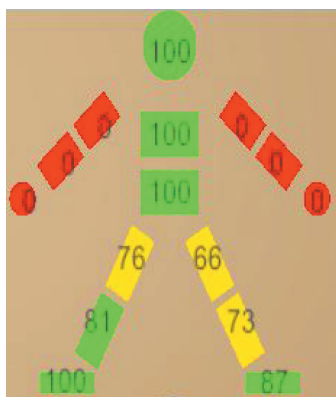


图 6 指示器
Fig. 6 Indicator

转换为相应百分制得分,指示器会依据分数将对应部位分别显示为绿(大于 80 分)、黄(60 至 80 分)、红色(小于 60 分),同时具体分数也会显示对应位置,提醒用户是否需要调整姿势。

$$D_i = \sqrt{(P_x^i - p_x^i)^2 + (P_y^i - p_y^i)^2 + (P_z^i - p_z^i)^2}, \quad (1)$$

$$\text{Level} = \begin{cases} \text{excellent}, D_i < 0.1 \text{ m} \\ \text{good}, 0.1 \text{ m} \leq D_i < 0.2 \text{ m} \\ \text{bad}, D_i \geq 0.2 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

其中: D_i 为用户化身关节*i*到标准化身关节*i*的欧氏距离, P 是标准化身关节*i*的空间坐标, p 是用户化身关节*i*的空间坐标,Level 是用户肢体的准确程度。

训练过程中,30 个带有易筋经标准姿势轮廓的墙壁以 2 m/s 速度向用户移动(距用户 10 m 起),用户需匹配姿势穿过。墙壁至用户 0.5 m 时,系统检测肢体准确度,任意肢体不合格则游戏暂停,用户通过镜子或虚拟化身调整所有肢体至良好及以上继续。此设计增强用户对姿势差异的认识,减轻焦虑,提升兴趣。每次穿过墙壁,系统根据肢体准确度评分,训练结束时统计各肢体及整体得分(式(3)~(5)),帮助用户评估训练效果及单个肢体准确度。

$$\text{Score}_t^q = \begin{cases} 100, \text{Level} = \text{excellent} \\ 1\,000 \times (0.2 - D_i), \text{Level} = \text{good}, \\ 0, \text{Level} = \text{bad} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Score}_t^T = \sum_{g=1}^{30} \text{Score}_t^q / 30, \quad (4)$$

$$\text{Score} = \sum_i^{15} \text{Score}_t^T / 15, \quad (5)$$

其中: Score_t^q 代表用户某一肢体*t*在某一姿势*q*的得分, g 代表姿势。 Score_t^T 代表用户某一肢体*t*在所有姿

势*T*中的总得分,Score 代表用户全身在所有姿势的总得分。

3 实验

本系统实验分两部分:姿势标准性检验与心理评估,旨在比较真人训练、视频训练及本系统对用户姿势标准性及心理感受的影响。由于本系统仍处于试验阶段,考虑到患者的安全性和试验数据采集方便性,实验随机招募 12 名 20~30 岁未受易筋经健身训练、无 VR 经验的男女大学生各 6 名,四肢绑沙袋增加运动阻力以模拟肌少症患者,并采用日常步速检测法评估下肢肌肉功能^[36-37],每位参与者测量两次 6 m 内步速,取最快步速为参考(表 1)。结果显示,绑沙袋后步速均低于 0.8 m/s^[38],证明有效模拟肌少症状态。

表 1 步速检测实验数据表

Tab. 1 Step speed detection experimental data

参与者	(m · s ⁻¹)		
	第一次	第二次	最终值
1	0.75	0.73	0.75
2	0.68	0.69	0.69
3	0.72	0.78	0.78
4	0.66	0.67	0.67
5	0.79	0.76	0.76
6	0.68	0.68	0.68
7	0.63	0.66	0.66
8	0.75	0.74	0.75
9	0.78	0.74	0.78
10	0.59	0.62	0.62
11	0.67	0.68	0.68
12	0.63	0.65	0.65

3.1 姿势标准性实验

本实验旨在评估真人训练、视频训练及本系统训练在保证肌少症患者姿势准确性上的效果。12 位实验对象在 3 种训练模式下进行易筋经运动,记录 G1 至 G6 标准姿势下骨骼位置与标准值的差值。由于大部分人的动作抖动频率小于 10 Hz^[39],根据香农采样定律,数据的采样频率需要大于 20 Hz,因此本实验采用 60 Hz 采样频率确保数据完整性。实验前,对象需了解易筋经动作。随后,通过抽取包含 3 种训练模式 6 种排列组合的纸条,确定每位对象的实验顺序,以此评估各训练模式下的姿势准确性。

3.2 心理评估实验

肌少症患者的心理状态也会影响到系统的使用效果,心理统计是至关重要的^[40].因此,我们采用问卷调查的方式,对实验对象在3种训练模式下的体验进行深入的调查,通过对Q1~Q9根据李克特量表进行评分,从-3(非常不同意)到3(非常同意).

Q1:自己可以跟上教练运动的节奏. Q2:自己得到了标准的指导. Q3:自己的动作是标准的. Q4:康复训练是舒适的. Q5:康复训练是有趣的. Q6:康复训练是让人满意的. Q7:康复训练完成后想要重复训练. Q8:所有感(SO):在VR模式下自己与虚拟化身是重合的. Q9:代理感(SA):在VR模式下自己的动作与虚拟化身的动作是同步的.

3.3 实验过程

参与者首先被告知实验内容并签署知情同意书,同时排除3D眩晕、运动功能障碍等风险项以确保安全.通过抽签确定实验顺序后,参与者四肢绑沙袋,佩戴动作捕捉设备,并确认无不适感.随后,按抽签顺序进行3种训练模式下的姿势标准性实验(图7).每完成一种模式,参与者需填写心理评估问卷(真人/视频训练含Q1~Q7,VR训练含Q1~Q9).实验结束后,检查数据有效性,并根据情况决定是否重做实验.



图7 三种训练场景
Fig. 7 Three training scenarios

4 结果

对于姿势标准性实验,我们得到了12位参与者分别在真人训练、视频训练、VR系统训练下的共36份动作数据.

4.1 不同系统对关节准确性的影响

使用方差分析(ANOVA)比较不同系统对于参与者在所有动作中各关节相较于标准数据的距离偏差,结果如表2.

表2 总体关节位置偏差 ANOVA

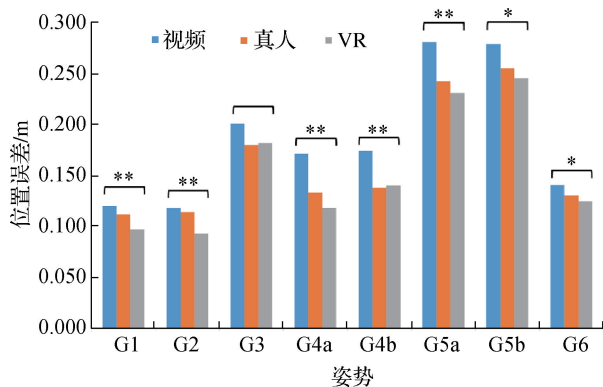
Tab. 2 ANOVA of overall joint position deviation

条件	样本	均值	标准差	F 值	p 值
视频	1 440	0.185	0.151		
真人	1 440	0.163	0.118	43.650	<0.001
VR	1 440	0.154	0.111		

从表2中可以看出,统变量在0.001水平上表现出显著差异($F=43.65, p<0.001$). p 值小于典型的alpha水平0.001,结果表明由于不同系统导致的位置偏差在统计学上具有显著差异.均值的直接比较显示,VR模式下的距离偏差小于真人条件下的偏差,同时真人条件下的距离偏差小于视频条件下的距离偏差.说明VR系统具有更优的动作指导性.

4.2 不同系统对姿势准确性的影响

使用ANOVA比较不同系统对于参与者在每个不同姿势中各关节相较于标准数据的距离偏差.结果如图8所示,除G3外,G1到G6姿势在不同系统下关节的位置偏差有显著差异($p<0.05$),表明可归因于系统引起的差异.均值的直接比较显示,8种姿势下,VR模式下的距离偏差普遍小于真人条件下的偏差(除G46外),同时真人条件下的距离偏差小于视频条件下的距离偏差.



* 表示 $p>0.05$, ** 表示 $p<0.01$.

图8 不同系统下各姿势位置误差
Fig. 8 Position errors for different postures under different systems

4.3 不同系统下心理体验评价

对于心理评估实验,我们得到了12位参与者各系统条件下Q1~Q9的满意度评分(图9).

如图9所示,从Q1~Q7,不同系统条件下的满意

度评分存在显著差异($p < 0.05$),表明系统差异对用户体验有显著统计效应.具体而言,在 Q1~Q3 中,VR 条件下的满意度高于视频与真人条件,反映用户认为 VR 能提供更优指导和更标准姿势.然而,Q4 结果显示,VR 条件下的满意度低于视频与真人,归因于佩戴头盔与传感器后舒适度的下降.相反,在 Q5~Q7 中,VR 条件的满意度再次超越视频与真人,显示用户认为 VR 训练更有趣、满意,并倾向于重复训练.

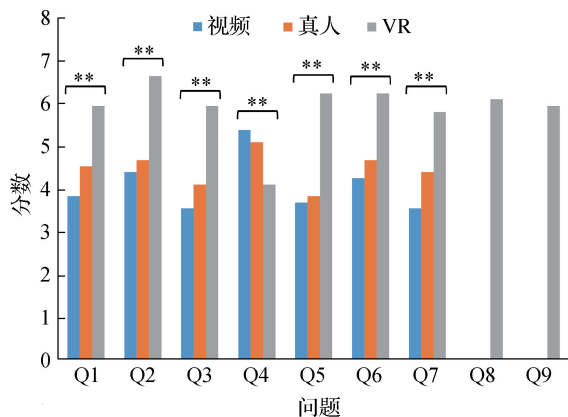


图 9 不同系统条件下 Q1~Q9 的满意度评分

Fig. 9 Satisfaction ratings of Q1-Q9 under different system conditions

此外,本研究还从 SO 和 SA 两个维度评估了所提方法.作为身体自我意识的关键方面,SO 代表直接的知觉体验,而 SA 则体现通过意志控制身体行为的能力,这两者均为人机交互操作逻辑的重要特征.对 Q8(SO)和 Q9(SA)的问卷数据分析显示,平均得分分别为 6.17 和 6.00,标准差为 0.72 和 0.74,表明参与者能轻松感知虚拟物体的接触,互动控制自然,且 VR 环境中未出现显著的不和谐感.

5 讨论

康复训练对减轻肌少症具有重要意义,其中,易筋经作为中国传统健身功法,已被证实为有效的低成本家庭康复方案.然而,现有的视频教学或真人指导方式存在局限,且缺乏跟踪反馈.为优化家庭康复体验,开发了一种低成本的 VR 系统,该系统通过模拟虚拟教练展示易筋经,并允许用户控制虚拟化身同步运动.结合“墙来了”趣味交互机制和检测反馈系统,该系统能有效矫正与评估用户姿势,提供沉浸式康复体验.

在系统实验中,本系统从姿势准确性和用户心理评价两方面与视频和真人条件进行了对比评估.姿势

准确性直接影响康复效果,实验结果显示,VR 条件下的用户姿势准确性高于视频或真人条件,接近标准姿势,表明 VR 系统能有效提升用户运动姿势准确度.心理评价方面,用户认为 VR 条件下指导更佳,动作更标准,整体满意度高,愿意重复训练.然而,在 Q3 评估中,VR 设备及穿戴设备带来的负重感使用户感到不适.此外,分析显示 VR 系统能为参与者提供自然的康复体验,不引发不满,增强了 SO 和 SA.

本系统目前处于试验阶段,出于患者安全及数据采集便捷性的考量,采用了模拟方法,该方法能有效模拟并反映患者运动特征.然而,需注意的是,模拟手段无法全面替代临床试验,因为真实患者的运动能力与模拟对象存在差异,且难以完全模拟肌少症患者的长期心理状态,包括虚拟现实设备的接受度及系统使用时的心理感受.因此,若以真实患者为实验对象,姿势标准性与心理评估的结果可能与模拟实验存在偏差.此外,本系统高度依赖设备,不仅需要头戴显示器,还需惯性动作捕捉设备,导致成本较高并可能影响用户体验.

6 结论

本研究开发了一款虚拟现实易筋经训练系统,该系统利用头戴式显示器将用户置于虚拟环境中,跟随预设的标准易筋经动画虚拟教练进行练习.通过动作捕捉设备,用户的动作被实时传输至虚拟化身,实现动作同步反馈.系统集成穿越墙壁、姿势监测等互动功能,旨在规范用户运动姿态,并通过评分机制激励用户提升训练效果,增强练习的积极性.为验证该系统在肌少症康复中的有效性,我们进行了模拟实验,并传统视频教学及真人教学方法进行了对比分析.研究结果显示,该系统能显著提升实验对象的运动质量,提供更具趣味性和引导性的康复体验.然而,鉴于模拟实验的性质及高昂的设备成本,真实患者对该系统的接纳程度尚需进一步评估.

参考文献:

- [1] CRUZ-JENTOFT A J, SAYER A A. Sarcopenia[J]. The Lancet, 2019, 393(10191): 2636-2646.
- [2] CRUZ-JENTOFT A J, BAEYENS J P, BAUER J M, et al. Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis; report of the European working group on sarcopenia in older people[J]. Age and Ageing, 2010, 39(4): 412-423.

- [3] GRIMBY G, SALTIN B. The ageing muscle[J]. *Clinical Physiology*, 1983, 3(3): 209-218.
- [4] LANDI F, LIPEROTI R, FUSCO D, et al. Sarcopenia and mortality among older nursing home residents[J]. *Journal of the American Medical Directors Association*, 2012, 13(2): 121-126.
- [5] LEE Y H, KIM J S, JUNG S W, et al. Gait speed and handgrip strength as predictors of all-cause mortality and cardiovascular events in hemodialysis patients[J]. *BMC Nephrology*, 2020, 21(1): 166.
- [6] HAN E S, LEE Y H, KIM J H. P-069: grip strength and walking speed as indicators of cognitive impairment among older people[J]. *European Geriatric Medicine*, 2015, 6: S50.
- [7] 杨玉琳. 肌少症老年人脑电信号及运动能力特征分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2023.
- [8] LO J H, U K P, YIU T, et al. Sarcopenia: current treatments and new regenerative therapeutic approaches[J]. *Journal of Orthopaedic Translation*, 2020, 23: 38-52.
- [9] KAKEHI S, WAKABAYASHI H, INUMA H, et al. Rehabilitation nutrition and exercise therapy for sarcopenia[J]. *The World Journal of Men's Health*, 2022, 40(1): 1-10.
- [10] ARAI H, NOZOE M, KAMIYA K, et al. Association between skeletal muscle mass index and falls in patients with functional impairment[J]. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 2023, 102(10): 913-918.
- [11] VERLAAN S, MAIER A B, BAUER J M, et al. Sufficient levels of 25-hydroxyvitamin D and protein intake required to increase muscle mass in sarcopenic older adults: the PROVIDE study[J]. *Clinical Nutrition*, 2018, 37(2): 551-557.
- [12] YOSHIMURA Y, WAKABAYASHI H, YAMADA M, et al. Interventions for treating sarcopenia: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled studies[J]. *Journal of the American Medical Directors Association*, 2017, 18(6): 553. e1-553. e16.
- [13] ZHAO H T, CHENG R H, SONG G, et al. The effect of resistance training on the rehabilitation of elderly patients with sarcopenia: a meta-analysis[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(23): 15491.
- [14] HASSAN B H, HEWITT J, KEOGH J W L, et al. Impact of resistance training on sarcopenia in nursing care facilities: a pilot study[J]. *Geriatric Nursing*, 2016, 37(2): 116-121.
- [15] CHEN H T, WU H J, CHEN Y J, et al. Effects of 8-week kettlebell training on body composition, muscle strength, pulmonary function, and chronic low-grade inflammation in elderly women with sarcopenia[J]. *Experimental Gerontology*, 2018, 112: 112-118.
- [16] MARUYA K, ASAKAWA Y, ISHIBASHI H, et al. Effect of a simple and adherent home exercise program on the physical function of community dwelling adults sixty years of age and older with pre-sarcopenia or sarcopenia[J]. *Journal of Physical Therapy Science*, 2016, 28(11): 3183-3188.
- [17] 李国庆, 白晋锋, 刘芳芳, 等. 八段锦联合弹力带训练对老年肌少症康复效果研究[J]. *国际中医中药杂志*, 2022, 44(2): 164-168.
- [18] 龚利, 严隽陶, 刘玉超, 等. 推拿功法易筋经对老年骨骼肌减少症患者等速肌力的影响[J]. *上海中医药大学学报*, 2011, 25(3): 55-58.
- [19] 王宾, 马士荣, 胡莺. 健身气功易筋经锻炼对骨骼肌减少症患者康复效果的影响[J]. *中国老年学杂志*, 2016, 36(4): 898-899.
- [20] 殷萱, 姚斐, 孙萍萍, 等. 易筋经与核心稳定性训练的比较分析[J]. *上海中医药大学学报*, 2015, 29(4): 12-15.
- [21] 程其练, 杜少武, 章文春, 等. 健身气功·易筋经锻炼对中老年人体质的影响[J]. *北京体育大学学报*, 2006(11): 1516-1528.
- [22] 孔亚敏, 严隽陶, 史智君. 健身气功易筋经临床研究进展[J]. *中国中医药信息杂志*, 2019, 26(2): 133-136.
- [23] 刘玉超, 严隽陶, 王振裕, 等. 易筋经对老年骨骼肌减少症骨骼肌收缩功能的影响[J]. *上海中医药大学学报*, 2016, 30(5): 42-45.
- [24] YEN C Y, LIN K H, HU M H, et al. Effects of virtual reality-augmented balance training on sensory organization and attentional demand for postural control in people with Parkinson disease: a randomized controlled trial[J]. *Physical Therapy*, 2011, 91(6): 862-874.
- [25] 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.
- [26] PARK J, YIM J. A new approach to improve cognition, muscle strength, and postural balance in community-dwelling elderly with a 3-D virtual reality kayak program[J]. *Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 2016, 238(1): 1-8.
- [27] NOGUEIRA P. Motion capture fundamentals[EB/OL]. [2024-10-01]. https://paginas.fe.up.pt/~prodei/dsie12/papers/paper_7.pdf.
- [28] CHEN G B, LIN C W, HUANG H Y, et al. Using virtual reality-based rehabilitation in sarcopenic older

- adults in rural health care facilities: a quasi-experimental study[J]. *Journal of Aging and Physical Activity*, 2021, 29(5): 866-877.
- [29] BALDOMINOS A, SAEZ Y, DEL POZO C G. An approach to physical rehabilitation using state-of-the-art virtual reality and motion tracking technologies [J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 64: 10-16.
- [30] CHUA P T, CRIVELLA R, DALY B, et al. Training for physical tasks in virtual environments: Tai Chi [C] // *IEEE Virtual Reality*. Los Angeles: IEEE, 2003: 87-94.
- [31] FANTOZZI S, GIOVANARDI A, MAGALHÃES F A, et al. Assessment of three-dimensional joint kinematics of the upper limb during simulated swimming using wearable inertial-magnetic measurement units [J]. *Journal of Sports Sciences*, 2016, 34(11): 1073-1080.
- [32] LIU J, ZHENG Y W, WANG K, et al. A real-time interactive Tai Chi learning system based on VR and motion capture technology [J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 174: 712-719.
- [33] 彭天忠, 朱满华, 林星镇, 等. 新编易筋经锻炼对老年肌少症患者下肢运动功能和平衡功能的影响 [J]. *按摩与康复医学*, 2022, 13(17): 21-26.
- [34] CESARI M, KRITCHEVSKY S B, NEWMAN A B, et al. Added value of physical performance measures in predicting adverse health-related events: results from the health, aging and body composition study [J]. *Journal of the American Geriatrics Society*, 2009, 57(2): 251-259.
- [35] EVANS W J, BHASIN S, CRESS E, et al. Functional outcomes for clinical trials in frail older persons: time to be moving [J]. *The Journals of Gerontology Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 2008, 63(2): 160-164.
- [36] FINANGER E L, RUSSMAN B, FORBES S C, et al. Use of skeletal muscle MRI in diagnosis and monitoring disease progression in Duchenne muscular dystrophy [J]. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 2012, 23(1): 1-10.
- [37] CHAN J C P, LEUNG H, TANG J K T, et al. A virtual reality dance training system using motion capture technology [J]. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 2011, 4(2): 187-195.
- [38] PARK W, KIM J, LEE J. A study on the design and effect of feedback for virtual reality exercise posture training [J]. *Journal of the Korea Computer Graphics Society*, 2020, 26(3): 79-86.
- [39] WANG K, TAN D, LI Z, et al. Supporting tremor rehabilitation using optical see-through augmented reality technology [J]. *Sensors*, 2023, 23(8): 3924.
- [40] YAN M, LOU X R, CHAN C A, et al. A semantic and emotion-based dual latent variable generation model for a dialogue system [J]. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 2023, 8(2): 319-330.

(责任编辑:汪 军)