

doi: 10.3969/j.issn.1672-4933.2025.05.012

虚拟现实技术在临床听力评估中的 前沿研究

Advanced Research of Virtual Reality Technology in Clinical Audiology Assessment

张雯靓^{1,2} 蒋裕仔^{1,2} 刘禹浩³ 赵雨庭^{1,2} 张丽萍^{1,2,4}

ZHANG Wen-liang, JIANG Yu-zi-xin, LIU Yu-hao, ZHAO Yu-ting, ZHANG Li-ping

【摘要】虚拟现实技术作为一种创新工具,在听力学领域中的应用逐渐成为研究热点。目前,虚拟现实技术在听力康复方面的可行性已在实验阶段被证实。本文检索近年国内外相关文献,基于虚拟现实技术在国内外听力评估与听力康复中的研究现状,分析虚拟现实技术在临床听力评估中应用的挑战,以探究其在临床听力评估中的发展潜力,为相关临床实践和研究提供思路。

【关键词】虚拟现实技术;听力损失;临床听力评估;听力康复

【中图分类号】 R764.04 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1672-4933(2025)05-0500-06

【Abstract】 As an innovative tool, virtual reality (VR) technology is progressively emerging as a research focus in audiology. At present, the feasibility of VR technology in hearing rehabilitation has been verified during the experimental phase. This article reviews the latest papers, which are mainly on the current research of VR technology in audiology and hearing rehabilitation. This paper analyzes the challenges associated with the of VR technology in clinical audiology assessment. The aim is to explore its developmental potential in clinical audiology and to provide insights for future clinical practice and research.

【Key words】 Virtual reality technology; Hearing loss; Clinical audiology assessment; Hearing rehabilitation

听力损失的早期发现与诊断对预防和治疗至关重要,世界卫生组织(world health organization)2021年指出,听力评估是实现这一目标的关键步骤^[1]。目前,传统听力评估无法提供视觉信息,受试者的听力表现与现实表现差距颇大,造成临床和实际应用的脱节。随着信息科学的迅速发展,虚拟现实(virtual reality, VR)技术应运而生。在计算机构建的三维虚拟环境中,虚拟现实技术利用视觉、听觉等多感官刺激,促使用户与虚拟角色产生真实的社交互动。通过对现实生活场景的还原,VR技术可以更准确地评估用户在现实生活中的听力表现,在传统实验室环境难以实现^[2]。目前,VR技术在听力康复训练方面的可行性已在实验阶段被证实^[3]。然而,在临床听力评估方面,VR技术的实际应用效果、面临的挑战及未来发展方向仍需深入探讨。

1 VR技术在临床听力评估中的应用基础

VR技术依托于先进的计算机图形学、人机交互、传

感器技术等,已应用于多个领域,为虚拟现实技术应用用于临床听力评估奠定了良好基础。

1.1 技术基础

在硬件方面,苹果公司于2024年推出的Apple Vision Pro具有明显的视听优势^[4]。与Oculus Rift相比,Apple Vision Pro采用2300万像素的高分辨率3D显示系统和micro-OLED技术^[5],视觉效果更优;与Oculus Quest 2相比,Apple Vision Pro搭载M2芯片(8核CPU,4个性能核心+4个能效核心),其3D空间音频系统可根据用户的头、颈、耳部结构,对音频输出进行个性化调整^[6],听觉效果更优;与Meta Quest Pro和HoloLens 2相比,Apple Vision Pro支持90、96和100 Hz的刷新率,动态调整范围更广,场景适应性更高。然而,Apple Vision Pro内容生态尚不成熟,兼容性问题可能限制实际使用。在软件方面,Unity^[7]和Unreal Engine^[8]为VR头显开发提供跨平台支持,可将应用部署至Oculus Rift、HTC Vive、Meta Quest^[9]等设备。

基金项目:上海交通大学医学院医学技术学院云骥计划-启航项目“虚拟现实技术在临床听力评估中的前沿研究”(YJQH202402);

山东省自然科学基金“老年性聋言语感知机制及康复策略的研究”(ZR2021QH350)

作者单位:1 上海交通大学医学院附属第九人民医院耳鼻咽喉头颈外科 上海 200023

2 上海交通大学医学院医学技术学院听力与言语康复系 上海 200025

3 上海交通大学 上海 200030

4 山东大学山东省耳鼻喉医院 济南 250023

作者简介:张雯靓 本科在读;研究方向:助听设备效果评估及开发,噪声环境下言语感知及助听后康复方法研究

通讯作者:张丽萍, E-mail: liping_zhang0814@163.com

1.2 视听领域可行性基础

虚拟现实技术在恐惧症干预中具有独特价值。早期研究表明,虚拟现实暴露(virtual reality exposure, VRE)疗法通过可控的沉浸式环境可有效降低特定恐惧症状。Rothbaum等^[10]将45名飞行恐惧症患者随机分为3组,其中,对照组不接受任何治疗,其余两组分别接受长达6周的虚拟现实暴露疗法(VRE)、现场暴露疗法(standard exposure, SE),结果显示,两种疗法均显著有效。尽管VRE组的脱落率相对更高(20% vs 6.7%),但其在场景调控优势与多感官刺激方面可能更具优势,可通过控制环境(如办公室实施)或调节安全阈值进行优化。相较而言,Maskey等^[11]采用环境沉浸策略(非头显设备),通过Third Eye NeuroTech所开发的Blue Room(360°全息投影系统),为孤独症儿童和青少年提供更自然的沉浸式体验,技术适用性更高。经6个月的治疗后,治疗组改善显著优于对照组(目标行为均分:治疗组3.92 vs 对照组5.40, $P < 0.01$)。总体来看,现有证据存在显著局限性:其一,多数研究在英国、荷兰、新西兰等高收入国家进行,且主要以青少年为测试对象,存在文化与样本年龄偏倚;其二,多数研究仅依赖于自我报告或家长报告的结果,缺乏标准化的临床评估工具,且样本量差异大,临床普适性欠佳;其三,少数研究随访超过6个月^[12],长期疗效证据匮乏。因此,未来研究需构建跨年层的标准化虚拟场景库,并通过混合现实技术(如生物反馈整合)提升干预精准度。

在用户交互方面,不同技术具有不同的优势与挑战。刘敏洋等^[13]借助AR眼镜开发了高档数控机床运维平台,通过试验展现出良好的易用性和可学习性,其平均出错率仅比对照组高9.37%,平均用时仅比对照组多25.74%。李立红^[14]利用VR头显设计了虚拟现实交互技术的船舶数字化服务平台,通过界面视觉注意力划分模型和功能监督分析,优化交互界面布局,并通过改进萤火虫算法求解。然而,该平台缺乏测试验证,处理大规模数据时可能影响实时交互能力。王红军等^[15]利用手柄交互,设计了一套基于数字孪生的果园虚拟交互系统,测试者可通过手柄按键操控虚拟果园中的场景和物体。然而,手柄交互精度有限,尤其在识别复杂手势和动作时表现不佳,且操作要求较高,对老年人等特殊群体的临床应用效果有限。许明玉等^[16]利用采样频率为120 Hz的眼动传感器实时捕捉眼动数据并生成控制指令。实验中,机器人能快速跟踪指定目标,且运动方向与眼动指令基本一致。眼动追踪技术虽可捕获用户的自然反应(如注视时长和顺序等),但校准耗时,尚未广泛应用。

2 VR技术在国内外听力评估中的研究进展

现实世界由视觉和音频信息共同构成,但在临床听力评估中,传统的评估方法无法提供视觉信息,临床和实际应用的长期脱节尚待解决,VR技术展现出解决该问题的潜力,因此,探究VR技术在听力评估中的研究进展具有重要的临床价值。目前,文献主要集中于助听效果评估和声源定位评估,其中,根据助听设备不同,将助听效果评估分为助听器效果评估和人工耳蜗效果评估。

2.1 助听效果评估

2.1.1 助听器效果评估 在虚拟场景设计方面,Pausch等^[17]通过3D建模软件(SketchUp)和房间声学模拟软件(room acoustics for virtual environments, RAVEN)构建动态虚拟环境,支持声源位置和数量、运动路径及房间吸声系数的灵活调整;Grimm等^[18]的声学场景创建与渲染工具箱(toolbox for acoustic scene creation and rendering, TASCAR)则基于现实场景录音数据生成5类典型声学环境(咖啡馆、超市、厨房、自然声景及爵士乐俱乐部),通过嵌入真实声场数据增强场景真实感。在声学参数分析上,Pausch等^[17]的研究侧重系统性能指标(端到端延迟、空间传递函数),但缺乏场景特异性参数,Grimm等^[18]提出四维定量分析框架:总体声压级(sound pressure level, SPL)51~81.7 dB、扩散度(diffuseness degree, DD)0.41~0.73、信号能量分布(厨房低频主导 vs 自然环境高频主导)及动态范围(dynamic range, DR)10~20 dB,揭示了不同场景的频谱特性差异。硬件集成方面,两者均支持研究用助听器(research hearing aids, RHAs)直接输入,但Grimm等^[18]凭借与游戏控制器、头部追踪器等外部设备的高兼容性更胜一筹。信号处理层面,Pausch等^[17]通过主助听器(master hearing aid, MHA)平台结合实时头部运动追踪和声学交叉抵消(acoustic crosstalk cancellation, CTC)技术实现动态声场更新,Grimm等^[18]的TASCAR工具箱则可支持基于矢量的幅度平移(vector base amplitude panning, VBAP)、自然声像平移(natural sound panning, NSP)等多种渲染算法。尽管两者均具备实时性与灵活性,但受限于计算资源消耗、吸声特性简化假设及实时性导致的精度妥协,凸显未来需平衡仿真细节与计算效率的优化需求。

Hohmann等^[19]通过调查问卷对比了21名受试者在虚拟现实听觉场景(街道和餐厅)和现实世界中对声音响度的适应程度及声音定位能力。结果发现,在响度感知方面,使听者和有经验助听器用户对卡车和汽车等声源的响度感知更高,在实验室中,两组均为4.0(较响亮),而在实地中使听者为3.0(中等响亮),有经验助听器用户为2.0(较不响亮)。在烦恼程度方面,使听者与首次使用助

听器者对所有测试声源的烦恼程度较高且相似,在实验室和实地分别为3.0(中等烦恼)和1.0(不烦恼)。在声源定位方面,使听者表现最佳,有经验助听器用户的表现接近使听者,首次使用助听器者在未使用助听器时表现最差,使用后虽有所改善,但仍不如其他组。在行为表现方面,使听者表现最自然,有经验助听器用户和首次使用助听器者次之。表明VR方法可补充纯音频评估,使评估更全面。Hohmann等^[19]在仿真精度方面取得突破,采用3D高阶 Ambisonics 等渲染技术结合视觉元素(如动画人物、场景背景等),集成传感器(如头部追踪、眼动追踪等)和实时反馈机制,提高了实验的生态效度(ecological validity),但操作复杂,对实验设备和实验人员要求较高,收集数据困难,且虚拟环境与现实世界存在仍显著差异。Hendrikse等^[20]通过自然头部运动数据模拟复杂的听觉场景(咖啡馆、教室、客厅、街道、火车站等),发现头部运动导致的方向不一致(misalignment)是影响助听器性能的关键因素,提示头部运动可能是Hohmann实验^[19]中导致虚拟现实环境与现实环境间存在显著差异的关键因素。

国内研究尚处于理论探索阶段,唐菲等^[21]系统综述了真耳分析(real-ear measurement, REM)、皮层听觉诱发电位(cortical evoked potential, CAEP)、声场多频稳态诱发电位(ASSR)等现有评估范式在特殊需要人群中的应用局限。尽管该研究未直接涉及VR技术,但其提出的个性化评估框架(基于年龄、认知能力的多模态策略)为VR技术的临床适配提供了理论切入点。

2.1.2 人工耳蜗效果评估 虚拟现实技术在人工耳蜗(CI)用户听觉评估中的应用研究呈现多维度探索态势,但其临床有效性与技术普适性仍待系统验证。Kepp等^[22]开创性地将VR技术引入儿童CI用户听觉认知评估,采用跨模态交互范式(HTC Vive系统),通过直升机驾驶场景(视觉)与音高辨别任务(听觉)的耦合设计,评估9名CI儿童、5名助听器(HA)儿童及11名健听(NH)儿童的听觉-运动协调能力。实验采用双音调辨别任务(半音差异梯度递减,低频区 $F_0=110\sim 220$ Hz,高频区 $F_0=739.99\sim 1480$ Hz),结果显示CI组在低频区的音高辨别能力整体显著低于NH组($P<0.05$),但在具体分布上,两组的差异接近显著,说明CI组和NH组尽管在音高辨别能力上存在差异,但在个体间存在一定差异。此外,研究者注意到,视觉注意偏好现象可能干扰评估结果(1名CI儿童由于过度依赖视觉线索而无法完成所有任务),提示多模态评估需引入注意力分离算法,以降低视觉干扰。

在成人CI用户空间听觉研究领域,Sladen等^[23]设计八扬声器阵列的声场重构系统,结合VR头显模拟餐厅场

景,探究单侧耳聋(single-sided deafness, SSD)患者的语音识别(speech in noise, SIN)与定位能力。实验发现,患者空间定位精度提升,但存在显著个体差异,如参与者P1的均方根误差(root mean square, RMS)从CI-OFF的 75.6° 降低到CI-ON的 38.8° ,而参与者P3的RMS误差从CI-OFF的 44.9° 增加到CI-ON的 50.6° 。该研究未控制VR头显物理遮挡对头相关传输函数(head-related transfer function, HRTF)的影响,可能导致声源定位线索失真。相较而言,Valzolgher等^[24]采用虚实融合策略,通过实际声源(白噪声脉冲,3s, AM 2/3 Hz)与虚拟房间(FOV 110° , 分辨率 1080×1200 px,刷新率90 Hz)的协同设计,验证空间训练对17名单侧人工耳蜗植入(unilateral cochlear implantation, UCI)用户的干预效果。结果显示,空间训练后定位误差显著减少(空间训练前后: 52.6° vs 39.3° ,非空间训练前后: 43.8° vs 42.0° , $P<0.001$),且2周洗脱期后改善效果仍然显著维持($P<0.001$)。

国外已有VR技术在人工耳蜗用户评估中的应用,如对比听力水平和评估训练效果,但与传统方法相比其优越性尚未被证实。此外,由于设备成本高,VR技术实际难以推广。相较而言,国内仍处于发展阶段,相关文献较少。总体上,国内外此类实验数量少,研究空间大。

2.2 声源定位评估

Gulli等^[25]使用头戴式显示器(head-mounted display, HMD)研究头部运动在水平面内听觉定位中的作用,结果发现头部运动距离与定位误差明显负相关($r^2\approx 0.7$)。Ramírez等^[26]补充了该项研究,通过控制头部运动,试验开始时参与者必须头部对准 0° 方位角,并用双耳渲染技术补偿,发现在虚拟环境中受试者的定位误差虽有下降但仍高于传统扬声器测试中参与者的表现(RMS误差: 11.94° vs 7.99°),表明动态渲染技术在一定程度上能够改善定位精度。两项研究在测试条件、评分标准等方面存在差异,Gulli等^[25]仅提供2种测试条件(现实与虚拟),但评分标准更全面,包括有符号误差(signed error)、无符号误差(unsigned error)、头部发散(head divergence)、头部距离(head distance)及反应时间(latency),考虑了由虚拟化过程造成的声音定位模糊度;Ramírez等^[26]通过过渡式使用3种测试条件(从传统到虚拟)提高实验的可控性,但评分标准相对简单(均方根定位误差及其截止值)。然而,二者刺激声均过于单一(200 ms白噪声或粉红噪声),缺乏现实中声音的复杂性,且研究对象均非听力损失患者,其临床应用的可行性尚未得到验证。

周文培等^[27]对4~14岁健听儿童的水平方位测试发现,信号强度与声源定位能力呈显著正相关($P<0.05$),不同信号类型(纯音信号、言语信号、音乐信号)对声源定位

能力也有显著影响,纯音信号下定位能力最差,音乐信号下定位能力最好,但与言语信号无显著差异,可能受信号的频率成分和波形特征影响。相比音乐信号和言语信号,纯音信号的频率成分单一,缺乏复杂的频率信息和波形特征,受试者难以利用空间定位线索,定位准确率较低。目前,国内研究主要集中在提高声场的逼真度和饱满感,以及耳机重放的声场逼真度,交互技术,如手势追踪、眼动追踪等成为研究重点^[28]。

3 VR技术在国内听力康复中的研究现状

在听力学领域中,听力评估与听力康复是相辅相成的。听力评估是确定个体听力损失程度和类型的基础,而听力康复则是基于评估结果提供的干预措施。探究VR技术在听力康复方面的研究现状,不仅能够展示VR技术在听力评估中的发展潜力,还能够为未来的研究和临床实践提供更全面的视野。研究主要集中于前庭康复训练和声源定位训练。

3.1 前庭康复训练

国外VR技术应用广泛。Kelly^[29]为30名前庭功能障碍患者创建了可逐渐增加难度的沉浸式虚拟环境,使其进行平衡训练(静态平衡任务、动态平衡任务和反应性平衡任务),并根据患者反馈,个性化调整训练方案。结果显示,VR训练方法与传统训练方法均显著改善患者的症状。Heffernan等^[30]研究中,237名物理治疗师采用5点李克特量表(1=非常不同意,5=非常同意),根据研究者玩游戏视频及游戏本身屏幕录制视频对4款VR赛车游戏视频(VR tunnel race、VR real world bike racing、derby VR和VR x-racer)在前庭康复中的潜力进行评估,最终,VR Tunnel Race、VR Real World Bike Racing这两款游戏的综合评分最高(均为18/25)。虽未经过验证测试,但为VR游戏作为辅助工具提供了初步支持。

国内已有多项研究显示,VR技术辅助的前庭康复治疗(vestibular rehabilitation therapy, VRT)训练方法有积极的康复效果,但其长期疗效和持久性尚未得到验证。焦粤农等^[31]对98名慢性前庭功能障碍患者采用沉浸式VR系统辅助VRT方法,结果表明,在无视力障碍的前提下,VR训练方法显著优于传统VRT训练方法($P < 0.05$)。冯莹等^[32]和严森等^[33]分别对47名老年性前庭病患者和124名耳石复位术后患者进行实验,结果同样证明VR技术引入的VRT训练方法在改善平衡功能及术后残余症状上优于传统VRT训练方法。

3.2 声源定位训练

Coudert等^[34]对12名双侧人工耳蜗植入成人(视听反馈组6人,仅视觉反馈组6人)进行空间听觉训练,通过

VR技术提供视觉或视听结合反馈。训练前后,参与者接受3D声音定位测试、法语矩阵测试和生活质量问卷(speech, spatial and qualities of hearing scale, SSQ)评估,结果显示空间听觉能力显著提高($P < 0.05$),证明VR训练在改善声音定位能力上的有效性。Shim等^[35]通过VR技术创建的听觉场景和个性化双耳录音刺激,对16名SSD患者进行研究,发现SSD患者的听觉定位能力显著改善且疗效可持续3周($P < 0.01$)。

虚拟现实技术在声源定位训练中的应用研究已取得重要进展,国内学者通过对比基于矢量的幅度平移(VBAP)系统与传统物理声场的性能验证了其有效性。孟瑞杰等^[36]针对19名22~29岁健听者的实验表明,在0°方位($\pm 30^\circ$ 对称布局)和90°方位($\pm 15^\circ$ 对称布局)的声源定位测试中,VBAP系统测得的最小可听角(minimum audible angle, MAA)分别为 1.1° ($SD=0.3^\circ$)和 3.1° ($SD=1.3^\circ$),与传统方法(1.2° 和 3.3°)无统计学差异($P > 0.05$)。该技术通过简化设备配置(双扬声器替代阵列系统)和自适应测试程序,实现了与真实声场等效的空间分辨率测量,为听能康复训练提供了经济、便携的解决方案,其临床潜力体现在动态声源合成与个性化训练环境的构建,未来结合个性化头相关传输函数建模可进一步提升应用效能。

4 VR技术在临床听力评估中的挑战

VR技术在听力学领域中的实际发展受诸多问题限制。目前,VR技术在临床听力评估中的运用主要面临技术限制、不良反应管理和数据集成与分析等问题。解决这些问题不仅有助于提高听力评估的准确性、治疗的安全性与可靠性,也有助于推动医疗现代化发展。

4.1 技术限制

4.1.1 年龄适用性 为儿童和老人设计简化、趣味化的虚拟评估场景操作系统是智能听力评估普及的关键。Vickers等^[37]为8~16岁双侧人工耳蜗植入患者开发了一套虚拟现实听觉训练游戏系统(both ears, BEARS),主要用于空间听觉能力训练,但该系统尚不支持在线互动,且年龄覆盖群体单一,适用范围有限。由于高度特化、简化的交互设备在复杂应用中的灵活性,VR设备较广泛选用触觉反馈和手柄交互作为主要交互方式。然而,老年人可能面临认知下降和运动障碍等难题,难以掌握手柄交互。相比之下,眼动追踪技术提供了更自然的交互手段,可捕获用户的自然反应,如注视时长和顺序、眨眼频次等,及时调整参数,以符合临床需要。

4.1.2 数据精确度 传统测听利用双耳时间差和双耳声级差控制声音定位,人耳能识别水平面上约 1° 的微小

静态声源变化^[38]。在虚拟环境中,声源位置的精确性受限,Ramírez^[26]建议通过个性化的头部相关传递函数改善。从不同角度的声源位置设定来看,Apple Vision Pro的3D空间音频系统可提供个性化听力辅助,但无法精确同步眼球反馈,意味着受试者在评估过程中作出的反应无法被全部读取,可能导致听力评估不全面。Saxena等^[39]运用少样本自适应视线估计(few-shot adaptive gaze estimation,FAZE)深度学习模型预测凝视角度、注视点和眨眼频率,凝视准确度达2.4°,精确度达0.47°,表明深度学习技术有望改进设备算法,提升数据精确度。

4.2 不良反应管理

VR头显设备易因视觉和前庭感觉不匹配导致眩晕、恶心。Arshad等^[40]利用copernic360软件的AI深度估计技术重建场景,通过获取平均年龄22.16岁的25名健康受试者的六自由度(six degrees of freedom, 6-DoF)——三维平移(X轴、Y轴、Z轴)与三维旋转(俯仰pitch、偏航yaw、滚转roll)——运动数据,增强前庭感觉与视觉的一致性,减轻头晕症状。当今眼动追踪、手势识别、面部追踪等技术提高了多感官通道的一致性^[41],如Apple Vision Pro允许通过眼神交互降低不良反应。此外,头戴式设备可能会带来颈部疼痛^[42],缩短单次设备使用时间可减少不良反应的发生。Lee等^[43]分3阶段进行VR认知训练:第一阶段25分钟训练,第二阶段训练20分钟,最后阶段10分钟,每个阶段间均休息5分钟。

4.3 数据集成与分析

手势交互等技术在数据采集与分析方面的要求很高。硬件上,Meta Quest 2采用内向外追踪,但对快速移动追踪不稳定;而HTC Vive需额外的红外传感器并从外部设置系统参数,但在3D复杂空间中追踪表现更好。软件上,虚幻引擎渲染真实、视觉保真度高,适合高度互动任务。相比之下,Unity引擎牺牲部分精度,但优化与兼容性更佳^[44]。然而,不同设备的可比性与可靠性不足。AI模型,如深度学习和自然语言处理可应用于临床听力评估,但决策过程不透明^[45],影响临床医生判断结果的可信度。

在临床听力评估中,由于评估环境与现实环境相差甚大,听障者在现实世界的听力表现难以准确评估,导致临床和实际应用的长期脱节。随着技术的发展与进步,VR技术有望提供解决方案。目前,VR技术通过视听结合与用户交互两方面实现对现实生活场景的还原,但却面临技术限制、不良反应管理、数据集成与分析等诸多挑战,且由于人群接受度不同和评估场景单一,VR技术在听力评估中的应用效果有限,提示VR技术可设计个性化虚拟场景,为患者制订个性化评估方案,提升临床听力评

估应用潜力。未来研究应聚焦于VR技术的发展和患者需求,尽管存在挑战,但仍有望创新听力学评估。

参考文献

- [1] World Health Organization. World report on hearing[M]. Geneva: World Health Organization,2021.83-84.
- [2] Pan X, Hamilton A. Understanding dual realities and more in VR[J]. Br J Psychol, 2018, 109(3): 437-441.
- [3] Hatziannakoglou PD, Okalidou A. Development of an Auditory Rehabilitation Reinforcement Tool for children with Cochlear Implants through a Mobile-Based VR and AR serious game[R]. Greece: University of Macedonia, Department of Educational and Social Policy, 2017.
- [4] Waisberg E, Ong J, Masalkhi M, et al. The future of ophthalmology and vision science with the Apple Vision Pro[J]. Eye, 2024, 38(2): 242-243.
- [5] Yang Z, Luo Z, Ding Y, et al. Advances and challenges in microdisplays and imaging optics for virtual reality and mixed reality [J]. Device, 2024, 2(6): 2-2.
- [6] Apple. Introducing Apple Vision Pro: Apple's first spatial computer[EB/OL]. <https://www.apple.com/newsroom/2023/06/introducing-apple-vision-pro/>, 2023-06-05.
- [7] Linowes J. Unity 2020 Virtual Reality Projects: Learn VR Development by Building Immersive Applications and Games with Unity 2019.4 and Later Versions[M]. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd, 2020. 183-183.
- [8] Šmid A. Comparison of Unity and Unreal Engine[D]. Czech Technical University in Prague, 2017.
- [9] Pedersen BKMK, Lyk PB, Auerbach DA. Augmented Virtuality—A Simplified, Scalable, and Modular Open-Source Unity Development System for Tangible VR with the Meta Quest 2[C]. International Conference on Human-Computer Interaction. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. 241-262.
- [10] Rothbaum BO, Hodges L, Smith S, et al. A controlled study of virtual reality exposure therapy for the fear of flying[J]. Journal of Consulting and Clinical Psychology, 2000, 68(6): 1020-1026.
- [11] Maskey M, Rodgers J, Grahame V, et al. A Randomised Controlled Feasibility Trial of Immersive Virtual Reality Treatment with Cognitive Behaviour Therapy for Specific Phobias in Young People with Autism Spectrum Disorder[J]. Journal of Autism and Developmental Disorders, 2019, 49(5): 1912-1927.
- [12] Halldorsson B, Hill C, Waite P, et al. Annual Research Review: Immersive virtual reality and digital applied gaming interventions for the treatment of mental health problems in children and young people: the need for rigorous treatment development and clinical evaluation[J]. Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines, 2021, 62(5): 584-605.
- [13] 刘敏洋,肖佳佳,李莉,等. 基于AR技术的高档数控机床运维平台设计研究[J]. 制造技术与机床,2024, (10): 42-47.
- [14] 李立红. 基于虚拟现实交互技术的船舶数字化服务平台设计[J]. 舰船科学技术,2024, 46(11): 182-185.
- [15] 王红军,林俊强,邹湘军,等. 基于数字孪生的果园虚拟交互系统构建

- [J]. 系统仿真学报, 2024, 36(6): 1493-1508.
- [16] 许明玉, 雷小康, 段中兴, 等. 基于虚拟现实和眼动追踪的人-集群机器人交互方法[J]. 信息与控制, 2024, 53(2): 199-210.
- [17] Pausch F, Aspöck L, Vorländer M, et al. An extended binaural real-time auralization system with an interface to research hearing aids for experiments on subjects with hearing loss[J]. Trends in Hearing, 2018, 22: 1-32.
- [18] Grimm G, Luberadzka J, Hohmann V. Virtual acoustic environments for comprehensive evaluation of model-based hearing devices[J]. International Journal of Audiology, 2018, 57(sup3): S112-S117.
- [19] Hohmann V, Paluch R, Krueger M, et al. The virtual reality lab: Realization and application of virtual sound environments[J]. Ear and Hearing, 2020, 41(suppl 1): 31S-38S.
- [20] Hendrikse MME, Grimm G, Hohmann V. Evaluation of the influence of head movement on hearing aid algorithm performance using acoustic simulations[J]. Trends in Hearing, 2020, 24: 1-20.
- [21] 唐菲, 杨崇灵, 曹伟, 等. 助听器效果评估方法的研究进展[J]. 中国听力语言康复科学杂志, 2023, 21(5): 503-507
- [22] Kepp NE, Arrieta I, Schiöth C, et al. Virtual reality pitch ranking in children with cochlear implants, hearing aids or normal hearing[J]. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 2022, 161: 111241.
- [23] Sladen DP, Diedesch AC, Zeitler DM. Localization and Speech-in-Noise Performance in a Virtual Reality Test Environment: A Pilot Study of Adults With Single-Sided Deafness Using a Cochlear Implant [J]. American Journal of Audiology, 2024, 33(3): 981-990.
- [24] Valzoghger C, Bouzaid S, Grenouillet S, et al. Training spatial hearing in unilateral cochlear implant users through reaching to sounds in virtual reality[J]. European Archives of Oto-Rhino-Laryngology, 2023, 280(8): 3661-3672.
- [25] Gulli A, Fontana F, Orzan E, et al. Spontaneous head movements support accurate horizontal auditory localization in a virtual visual environment[J]. PLoS One, 2022, 17(12): e0278705.
- [26] Ramírez M, Arend JM, Von Gablenz P, et al. Toward sound localization testing in virtual reality to aid in the screening of auditory processing disorders[J]. Trends in Hearing, 2024, 28: 1-17.
- [27] 周文培, 彭美俊, 曾湾, 等. 健听儿童在不同测试环境下声源定位能力初步研究[J]. 中国听力语言康复科学杂志, 2020, 18(3): 203-207.
- [28] 36氪. 2024年中国虚拟现实(VR)行业研究报告[EB/OL]. <https://www.36kr.com/p/2699997341497480>, 2024-03-22.
- [29] Kelly J, Harel D, Krishnamoorthy S, et al. Contextual sensory integration training vs. traditional vestibular rehabilitation: a pilot randomized controlled trial[J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2023, 20(1): 104-104.
- [30] Heffernan A, Booth L, Fletcher R, et al. Vestibular rehabilitation potential of commercially available virtual reality video games[J]. Journal of Otolaryngology - Head & Neck Surgery, 2023, 52(1): 54-54.
- [31] 焦粤农, 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.
- [32] 冯莹, 于新军, 徐秀峰, 等. 常规前庭康复训练联合虚拟现实技术治疗老年性前庭病的疗效[J]. 北京医学, 2020, 42(9): 847-850.
- [33] Yan S, Gao P, Wu W. Role of Comprehensive Vestibular Rehabilitation Based on Virtual Reality Technology in Residual Symptoms After Canalith Repositioning Procedure[J]. The Journal of International Advanced Otolaryngology, 2024, 20(3): 272-278.
- [34] Coudert A, Verdelet G, Reilly KT, et al. Intensive Training of Spatial Hearing Promotes Auditory Abilities of Bilateral Cochlear Implant Adults: A Pilot Study[J]. Ear and Hearing, 2023, 44(1): 61-76.
- [35] Shim L, Lee J, Han JH, et al. Feasibility of Virtual Reality-Based Auditory Localization Training With Binaurally Recorded Auditory Stimuli for Patients With Single-Sided Deafness[J]. Clinical and Experimental Otorhinolaryngology, 2023, 16(3): 217-224.
- [36] Meng R, Xiang J, Sang J, et al. Investigation of an MAA Test With Virtual Sound Synthesis[J]. Frontiers in Psychology, 2021, 12: 656052.
- [37] Vickers D, Salorio-Corbetto M, Driver S, et al. Involving Children and Teenagers with Bilateral Cochlear Implants in the Design of the BEARS (Both EARS) Virtual Reality Training Suite Improves Personalization[J]. Frontiers in Digital Health, 2021, 3: 759723.
- [38] Mills AW. On the minimum audible angle[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1958, 30(4): 237-246.
- [39] Saxena S, Fink LK, Lange EB. Deep learning models for webcam eye tracking in online experiments[J]. Behavior Research Methods, 2024, 56(4): 3487-3503.
- [40] Arshad I, De Mello P, Ender M, et al. Reducing Cybersickness in 360-Degree Virtual Reality[J]. Multisensory Research, 2021, 35(2): 1-17.
- [41] Pan X, Hamilton A. Understanding dual realities and more in VR[J]. British Journal of Psychology, 2018, 109(3): 437-441.
- [42] King AL, Roche KN, Leeper HE, et al. Feasibility of a virtual reality intervention targeting distress and anxiety symptoms in patients with primary brain tumors: Interim analysis of a phase 2 clinical trial[J]. Journal of Neuro-Oncology, 2023, 162(1): 137-145.
- [43] Lee SJ, Lee S. Efficacy of Immersive Virtual Reality-Based Cognitive Training in Older Adults with Hearing Impairment: Three Case Reports [J]. Audiology and Speech Research, 2022, 18: 60-72.
- [44] Bensch L, Casini A, Cowley A, et al. Applied User Research in Virtual Reality: Tools, Methods, and Challenges[J]. ArXiv preprint, 2024, 2402: 15695.
- [45] Artsi Y, Sorin V, Glicksberg BS, et al. Advancing Clinical Practice: The Potential of Multimodal Technology in Modern Medicine[J]. Journal of Clinical Medicine, 2024, 13(20): 6246.

收稿日期 2025-02-08
责任编辑 蒋 春

(上接490页)

- [18] Lin FC, Chien HY, Kao YC, et al. Multi-dimensional investigation of the clinical effectiveness and prognostic factors of voice therapy for benign voice disorders[J]. Journal of the Formosan Medical Association, 2021, 29(12): 96-101.
- [19] Ongkasuwan J, Devore D, Hollas S, et al. Laryngeal ultrasound and pediatric vocal fold nodules[J]. Laryngoscope, 2017, 127(3): 676-678.

收稿日期 2023-09-05
责任编辑 薛 静