

虚拟现实技术与视觉健康

黄梓庭 袁进

中山大学中山眼科中心 眼病防治全国重点实验室 广东省眼科视觉科学重点实验室 广东省眼部疾病临床研究中心, 广州 510060

通信作者: 袁进, Email: yuanjincornea@126.com

【摘要】 虚拟现实(VR)技术是一种可以创建并让使用者体验虚拟三维场景的计算机仿真系统,能够为用户提供多种感官信息。近些年来,作为“元宇宙”这一融合虚拟世界、增强现实以及互联网的共享型虚拟空间概念所依赖的最基础的技术支撑,VR技术在各个领域的应用迎来了新的机遇与挑战。VR技术对视觉健康一直存在着许多方面的影响,一方面,VR技术结合其环境沉浸性及三维成像等技术优势,给人们提供了通向“元宇宙”的关键钥匙,也能为低视力人群提供行为辅助抑或是在斜视患者康复训练中发挥重要作用。另一方面,长时间使用VR设备可能会让使用者发生调节辐辏冲突,进而引发主观视疲劳,并且可能会使用户出现相关的干眼症状等不良反应。本文就VR技术对视觉健康的影响及其研究现状进行总结,旨在增强学界对VR技术及其在眼科领域应用的关注,并为VR技术在眼科及视觉健康领域的应用提供指导。

【关键词】 虚拟现实; 视疲劳; 干眼; 视觉健康; 调节辐辏冲突

基金项目: 广东省重点研发计划(2019B010152001)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20230425-00148

Virtual reality technology and visual health

Huang Zitong, Yuan Jin

State Key Laboratory of Ophthalmology, Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Science, Guangdong Provincial Clinical Research Center for Ocular Diseases, Guangzhou 510060, China

Corresponding author: Yuan Jin, Email: yuanjincornea@126.com

[Abstract] Virtual reality (VR) technology is a kind of computer simulation system that can create and let users experience virtual three-dimensional scenes, and can provide users with a variety of sensory information. In recent years, as the most basic technical support for the concept of "metaverse", which integrates virtual world, augmented reality and shared virtual space of the Internet, the application of VR technology in various fields has ushered in new opportunities and challenges. VR technology has always had many influences on visual health. On the one hand, VR technology, combined with its technical advantages such as environmental immersion and three-dimensional imaging, provides people with the key to the "metaverse" and can also provide behavioral assistance for low-vision people or play an important role in rehabilitation training for patients with oblique amblyopia. On the other hand, long-time use of VR devices may cause users to experience adjustment-convergence conflicts, which may lead to subjective visual fatigue, and may cause users to have related adverse effects such as dry eye symptoms. This article provides a comprehensive summary of the impact of virtual reality technology on visual health and the current state of related research. It aims to enhance academic attention to the application of virtual reality in ophthalmology and provide guidance for its implementation in ophthalmology and visual health.

[Key words] Virtual reality; Asthenopia; Dry eye; Visual health; Vergence-accommodation conflict

Fund program: Guangdong Province Key Research & Development Program (2019B010152001)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20230425-00148

虚拟现实(virtual reality, VR)技术是指利用计算机生成的一种可对参与者直接施加视觉、听觉和触觉

感受,并允许用户交互地观察和操作虚拟世界的技术,普遍具有沉浸性、交互性和构想性3个特点。近年来,



关注度较高的“元宇宙”概念,即完全沉浸式的三维数字环境以及人类以数字身份参与其中的虚拟生活,正是建立在 VR 技术基础上发展而来的。因此,VR 技术也被人们称之为“通向未来世界的钥匙”。VR 技术种类繁多,狭义的 VR 指封闭式 VR(即头戴式显示器)、眼镜式 VR 及裸眼 VR,广义的 VR 还包括增强现实(augmented reality, AR)和混合现实。VR 技术的快速发展使其在眼科领域得到了广泛应用,在斜弱视患者的恢复训练、辅助低视力患者的日常生活、眼科疾病的诊断、眼科手术的教学训练以及近视的防治领域中都展现出了不可比拟的优势^[1-2]。作为能够给参与者带来丰富而复杂视觉感受的技术,VR 对使用者视觉健康的影响也越来越引起眼科领域的关注。由于 VR 本身的技术不足或者是使用不当,均有可能对人们的视觉健康造成不同影响。VR 设备的长时间使用可能会导致用户出现干眼症状或主观视疲劳,也有研究显示 VR 设备的使用可能会导致使用者的眼压以及其他视觉参数发生变化^[3]。

1 VR 在眼科的应用现状和广阔前景

VR 设备凭借其在成像复杂度、双目追踪、模拟仿真以及人机交互等方面的技术优势在斜弱视训练、低视力患者辅助及近视防控等方面具有广泛的应用与发展潜能,其广泛运用能够有效推进眼科自动化诊疗的发展,大幅降低诊治与康复训练过程中的人力与时间成本^[4]。其次,VR 设备在眼科领域的应用还包括仿真眼科手术练习^[5]。相关研究表明,在实习医生对患者施行手术前对其进行 VR 环境下的手术操作模拟训练有助于提高操作者的熟练程度,减少手术意外的发生^[6]。更进一步的研究指出,VR 环境下的手术训练相较于传统的操作模拟练习用时更短、效率更高且更受学员们的欢迎^[7]。此外,眼科大部分疾病可造成患者视觉体验的改变。VR 技术作为能够模拟人类双眼视觉场景的手段,在眼科疾病的认知学习中也起到了关键作用。例如 VR 模拟不同疾病体征,允许学生反复观察病变形态,更好地理解疾病病理状态;并让其身临其境感受眼病患者的症状,对各种抽象的视觉障碍有更加直观的感受^[8]。VR 技术未来在眼科领域仍有很大的发展潜能。

2 VR 相关的调节辐辏冲突

2.1 VR 对调节辐辏功能的影响

人眼之所以能看清近距离的物体,依靠的是辐辏反应,在调节焦点的同时,双眼视轴随之向内转动,

使两眼视轴固定在被注视的物体上。调节作用则是指人眼为了看清楚近距离物体而改变屈光能力的现象,这一反应是通过收缩睫状肌进而改变晶状体形状完成的。人的双眼在观察现实世界的物体时,辐辏与调节功能是相互协调的,辐辏功能可使双眼的视线汇聚到同一物体上,同时调节功能也会在相同距离上对这一物体进行对焦。因此,人类大脑一直遵循着视线与焦点总会处于同一位置这一观测规律来处理信息。在观察真实世界的场景时,晶状体的改变与双眼的辐辏运动是动态耦合的。调节性刺激不仅可以引起双眼调节的改变,还会引起辐辏改变,反之亦然。这种动态耦合的运动使人的双眼能够快速适应自然场景中景深的变化^[9]。

当我们在使用 VR 设备观察三维图像信息时,屏幕或投影平面与使用者之间的距离固定不变,焦距因此也无法改变。这就导致调节功能无法像观测真实世界物体时随着辐辏功能在相同距离上进行对焦,即辐辏与调焦的位置发生了变化,这与我们平时用眼的生理习惯产生了矛盾,辐辏调节冲突(vergence-accommodation conflict, VAC)由此产生。

多项研究表明,短时间使用 VR 设备后,双眼的辐辏与调节灵敏度均有明显改善^[10-11]。使用者双眼的调节近点在使用 VR 设备后显著下降,调节幅度显著上升。而远距离正负融像性聚散力上升,近距离集合能力下降^[12]。Long 等^[13]研究表明,每次 10 min、每日 2 次、持续 2 周的头戴式 VR 设备的使用让使用者的调节幅度得到显著提升。Guo 等^[14]研究显示,短期(15 min)暴露于 VR 设备后,受试者的视力、调节范围以及调节灵敏度均显著升高。上述研究表明,无论是长期还是短期使用 VR 眼镜,使用者双眼的调节幅度与调节灵敏度均有所上升,而裸眼视力也随着瞳孔的缩小而升高(与屈光度变化无关)。而 Paulus 等^[15]在 Karpicka 等^[16]关于 3D 显示刺激下隐斜视适应试验的基础上的进一步补充研究表明,VAC 会诱导隐斜视适应的发生;且当 VAC 处于一个较小的量化水平时,会导致外隐斜与内隐斜适应的同时发生,这可能解释了为何在较小的 VAC 水平下并无视疲劳的发生。

Turnbull 等^[17]研究表明,在 VR 设备环境下暴露 40 min 对双眼视力的影响最小。长时间使用 VR 设备则可能引起辐辏调节功能的障碍。其中,调节功能障碍主要表现为调节不足^[18];而辐辏功能障碍的症状变异非常大,典型的症状包括但不限于头痛、视疲劳、阅读困难或复视。此外,VAC 还会导致自然散焦模糊的缺失,使得周边非主要注视目标的视觉图像过于清晰,

以至于刺激双眼进行融像,而这一对周边视觉的融像尝试将会造成视疲劳的发生^[19]。

因此,无论短时间还是长时间使用 VR 设备对双眼调节和辐辏功能均有一定程度的影响,但长时间使用可能引起调节辐辏功能的障碍。然而,上述研究对视觉参数的测量均是在试验对象使用 VR 设备后即刻进行的。因此,得到的都是关于 VR 设备对使用者的短期影响效应。至于使用 VR 设备对使用者长期影响的相关试验与数据依旧留有空白,有待进一步研究。

2.2 如何解决 VR 设备的 VAC

VAC 的存在是影响 VR 头戴式设备佩戴舒适性和显示效果的主要因素。为了解决这一难题,研究者提出了诸多改进方案^[20]:针对焦平面与显示屏不同步的问题,将步进电机驱动的光学透镜与视点追踪设备引入 VR,形成可变单焦平面,以达到显示平面与使用者焦平面处于相同深度的效果^[21];运用多焦平面融合,通过将场景中的虚拟物象投射到多个位于不同深度的同轴显示平面中,与焦平面最相近的平面上实现调节辐辏协调^[22];光纤扫描阵列则属于视网膜扫描式的显示设备,通过将大量光纤以斜面样式排列的方式来构建多焦平面,以达到解决 VAC 的目的^[23],但该方案亦由于光纤组合后体积过大的缺点并未被业界所广泛采纳;激光全息成像技术,即利用激光本身的衍射性质对光场进行还原,以达到调节辐辏协调^[24];基于麦克斯韦观察法,将光线汇聚于瞳孔中心后直接投影于视网膜上,这种独立于双眼调节的视网膜成像方式也为解决 VAC 提供了新的思路^[25]。但通过麦克斯韦观察法在眼底形成的是圆形的像,在复杂图像的呈现上可能存在片段重叠造成细节的丢失,当人眼焦距发生变化时,也更容易造成眼底成像内容的撕裂。

近年来,针对 VAC 的改进方案大多基于多目显示技术,该技术一般基于光场还原技术以提供视觉深度线索。为了实现光场还原,常用的方法是在显示屏前增加一组微透镜阵列,或将多层透光的显示屏叠加在一起。但是这一方案普遍存在分辨率损失大、计算数据量庞大等不足。上述各种方案各有优缺点,按照成像原理进行归纳主要可以分为以下 2 大类别,即眼底成像和眼外成像。眼底成像相比于眼外成像(可变单焦平面、多焦平面融合技术)具有更高的锐度,成像更加清晰。但是,除基于麦克斯韦观察法的成像技术外,大多数解决方案无法同时实现低设备复杂度及低算法复杂度。VAC 的最终解决方案还有待进一步探索。

3 VR 引起主观视疲劳的发生机制

视疲劳是以眼部症状为基础的眼或全身器质性病

变及精神心理因素相互作用所形成的结果,属于心身医学范畴。通常以眼部自觉症状为突出表现,这一系列症状包括但不限于眼部干涩、复视、眼部酸痛等^[26]。视疲劳患者不仅表现为眼部不适,心理、精神和中枢状态也参与了视疲劳的发生。当前立体显示技术大多基于立体视差原理,视差所引起的 VAC 在观看立体影像时不可避免地降低观看体验^[27]。

3.1 视觉因素参与 VR 引起主观视疲劳的发生机制

VAC 是长期使用 VR 设备造成视疲劳的主要原因,由于 VAC 的存在,大脑必须被迫接受与平时不同的视线和焦点不在同一位置的信息,而长久接收存在 VAC 的视觉信息引起了视疲劳的发生^[28]。

除了 VAC,屈光不正状态也是视疲劳的主要因素,在观看立体影像时,由于辐辏与焦点调节的不一致,只有加剧焦点调节才可以看清电视融像,这严重增加了睫状肌的负荷。远视眼与正视眼相比,需要更多的调节,增加了睫状肌的负荷引起视疲劳;高度近视则是因为调节与结合比例失调而产生视疲劳。而老视与调节不足,表现为调节幅度降低,调节近点远移,需要动用融合储备补偿,如果融合储备能力不足则会产生视疲劳症状。过度调节则可引起调节痉挛,表现为眼的近视化,伴有眼痛、头痛等视疲劳症状。因此佩戴 VR 眼镜时,使双眼处于正矫的屈光状态也是减少视疲劳发生的方法之一。

3.2 视觉中枢参与 VR 引起主观视疲劳的发生机制

视觉因素和心理因素对主观视疲劳的发生起到了重要作用,而神经调节与中枢神经的一系列反应在视疲劳的发生中起到了重要作用。

在早期的研究中,Nakamura^[29]使用有瞳孔面积测量功能的红外线验光仪对视疲劳患者 20 例 20 眼瞳孔紧张程度进行研究,发现视疲劳患者的瞳孔平均面积小于正常人,且在视疲劳患者中记录到瞳孔紧张波形而在正常人中未见记录,这表明视疲劳患者有明显的瞳孔紧张。此外,视疲劳患者调节性暗焦点较对照组明显增大,这表明虹膜或睫状肌存在异常的副交感神经兴奋。Kinoshita^[30]的研究同样认为视疲劳患者的瞳孔紧张与较高的张力性调节是副交感神经兴奋的结果。Evans^[31]的研究则认为视皮质的高度兴奋同样会引起视疲劳症状。

随着神经科学与技术的发展,新近研究将脑电图与脑电评估纳入了视疲劳的分析中,可以进一步分析视疲劳发生的中枢机制。早前的研究表明在立体深度运动引发立体视觉疲劳状态下,脑电图中 α 频带明显上升, β 频带明显下降,且在后颞区、顶区和枕区最为



明显^[32]。而在基于脑电的 VAC 研究中,通过调节单一视差并观察脑电数据,建立脑功能网络,发现视差变化幅值上升,网络中边的数目明显上升,节点平均路径长度、平均聚类系数和网络越大,小世界属性越小。这说明各脑区间信息交流程度明显上升,且活跃区域主要集中于前额区、颞区、顶区——这些脑区与注意力集中及各个脑区之间的通讯调控功能密切相关。但是,由于错误链接的增加使得信息传递效率降低^[32]。随着对脑电信号与诱发电位更深入的研究与解读,研究者发现,人顶叶区深度相关视觉诱发电位中 P1、N1 和 P2 成分均对立体视疲劳敏感,但只有 P2 对疲劳水平的变化敏感。P1、N1 代表视网膜信息加工的早期阶段,P2 则代表高意识深度知觉^[33]。更进一步的研究发现,人顶叶区与左侧额叶区的 P2 分量的振幅随着疲劳程度的加重而下降,这代表着深度知觉或自我意识有关的神经活动的抑制。从上述试验结果来看,视疲劳不仅是一种视觉信息处理能力缺陷,更是一种意识认知疲劳的眼部表现^[34]。此外,相较于普通的三维视觉,VR 所呈现的立体视觉所提供的额外深度线索刺激能够引起更强烈的神经反应与功能连接,且在视觉通路相关的皮质区域, δ 和 θ 波段的功能连接增加^[35]。这也许为人们分析立体视觉引发视疲劳的机制提供了新的思路。

对于 VR 主观视疲劳中枢机制方面的研究目前并不充分,根据上述理论,我们推测,也许是由于现有 VR 设备投影平面距离使用者过近导致过度的瞳孔近反射,使得副交感神经发生异常兴奋,虹膜与睫状肌的过度紧张导致了视物模糊、眼痛等视疲劳症状的发生;而过度地使用 VR 设备以及 VR 设备使用时不可避免的 VAC 使得使用者的大脑不得不对大量“有悖于观看现实世界真实物体”的体验,这一系列信息导致的大脑皮层的意识认知疲劳是引发主观视疲劳的可能机制。但其真实的作用机制还有待脑电记录设备与神经科学的研究取得更深入的进展后进行进一步的研究与解读。

3.3 心理因素参与 VR 引起主观视疲劳的发生机制

除视觉因素的影响外,精神、心理状态也与视疲劳的发生密切相关,精神压力大、神经衰弱或患有神经官能症的人更容易出现视疲劳。在某些特殊的神经高度紧张时期,如月经期、妊娠期、哺乳期、更年期都可能出现视疲劳^[26]。社会、家庭和工作等压力过大的体质衰弱患者极易出现视疲劳^[36]。Mocci 等^[37]对精神心理因素与视疲劳的相关性进行了研究,认为社会与同事的承认支持、人际关系、个人性格与精神压力都是影响

视疲劳的相关因素,一部分视疲劳可能是与工作条件相关的心理不适的间接表达。患者生理上的疲劳与疼痛往往会引起焦虑等负面情绪的产生,而慢性病患者心理障碍患病率明显升高^[38-39]。国内一项调查研究探讨了视疲劳患者的焦虑情绪,发现其焦虑自评量表评分与视疲劳评分呈高度正相关。由于视疲劳严重干扰了患者的视觉与生活质量,而患者自己无法对该情况的发生原因、持续时间和预后好坏做出判断,因此容易产生焦虑情绪^[40]。

关于心理状态、精神心理因素与 VR 设备引起视疲劳的发生频率和发展程度等目前在国内外尚未见文献报道。但上述研究表明,精神压力和视疲劳之间形成了一个相互促进的恶性循环,这为心理因素参与 VR 视疲劳的发生提供了理论依据。由此,我们推测心理因素参与 VR 引起主观视疲劳的机制亦是通过上述的理论途径,VR 设备的沉浸感让使用者过分沉浸于观看虚拟影像,而过度或不当地使用 VR 设备造成了使用者出现生理上的不适。对新式设备的好奇与生理上不适带来的不安和恐惧感加重了用户的焦虑情绪,进而加剧了视疲劳的严重程度。但心理因素是否还有其他的其他方式影响着主观视疲劳的发生,还有待进一步研究。

4 VR 与干眼

VR 设备作为一种近眼显示设备,其对干眼这一眼表疾病发生与进展的影响一直是研究者关注的热点。部分研究者认为,头戴式 VR 设备形成了一个类似湿房镜的封闭环境,能够缓解干眼的症状;也有研究者认为,VR 设备作为近眼光源与发热源,会对泪膜稳定造成不利影响。

研究者们就 VR 设备对使用者泪膜及眼表状态的影响从多个角度进行了相关试验与分析。一方面,VR 头戴式设备可能通过屏蔽外界较高速度气流^[41-42],以及改变眼表温度与改善泪膜的质和量进而改善干眼症状^[43];另一方面,VR 头戴式设备由于其本身的沉浸式体验等特点造成瞬目频率下降,促进干眼症状的发生与发展^[44-45];且相关研究在相对湿度剖面曲线中检测到了显著的设备效应,这表明佩戴 VR 眼镜时眼周形成的封闭环境中相对湿度较低。这之前报道的加热加湿护目镜形成对比^[46],且表明 VR 眼镜内部水蒸发梯度更高,加重了泪膜的不稳定性。

此外,Marshev 等^[47]的类似试验表明,VR 头戴式设备使用者在使用后泪膜脂质层厚度显著高于传统电子屏幕的使用者;Turnbull 等^[48]的研究通过对比人们

使用相同时长的普通计算机显示器与 VR 头戴设备之后各项干眼相关指标发现,VR 头戴设备使用者的外眼睑和角膜温度上升,这可能与泪膜脂质层厚度和无创泪膜破裂时间的显著改善相关。他们还对比了自然状态、使用传统电子屏幕、使用 VR 头戴式设备以及 AR 眼镜 4 种情况下受试者瞬目频率的变化,发现相较于自然环境下,受试者的瞬目频率在观看传统电子屏幕、使用 VR 头戴式设备以及使用 AR 眼镜的环境下均有显著下降。其中,使用 VR 头戴式设备最低,其次是在使用 AR 眼镜环境下,而观看传统电子显示器的环境下瞬目频率最高,这可能与 VR 技术给人带来的沉浸式体验相关。

VR 设备的使用与干眼症状的发生和发展密切相关,VR 眼镜显现出了作为替代传统显示屏幕成为现代工作环境中缓解人们干眼的显示设备的前景。但是,干眼各项指标与 VR 设备的物理参数间的具体关系还需要更加详尽的试验来揭示,干眼症状的发生与发展是上述各种因素综合作用的结果。未来我们需要设计更多因素、更长暴露时间的实验来证实 VR 眼镜替代传统显示器的可行性。针对 VR 眼镜在使用时会让用户瞬目次数减少以及 VR 眼镜内过高的水蒸发梯度,未来的产品可以通过改进软件层面设置相应的定时提醒来告诉使用者不要过度沉浸于注视图像,或是通过加装加热加湿模块模拟湿润护眼镜的作用来改善用户的使用体验。

5 VR 对眼压的影响

眼压是指眼球内容物作用于眼球壁及内容物之间相互作用的压力。对眼压影响最大的内容物成分是房水。房水由睫状体睫状突产生,主要通过集合管-睫状前静脉途径和葡萄膜-巩膜途径引流。在生理情况下,房水的产生与排出间保持着动态平衡,使得眼压也在一个稳定的范围内变化。

Lin 等^[3]的研究结果显示,短时间使用 VR 设备后,使用者双眼眼压较使用前均明显降低,右眼和左眼分别降低了 (2.04 ± 0.03) 和 (2.06 ± 0.12) mmHg ($1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$)。这一发现揭示了 VR 设备在青光眼和高眼压治疗方面的相关前景。短时间使用 VR 设备后眼压改变相关的生理机制还有待进一步研究阐明,我们推测可能的原因是双眼在使用 VR 眼镜时,通过焦点模糊感知的深度信息与通过双眼视差感知的深度信息不一致时,大脑中会发生严重的调节-会聚冲突。当这种散焦现象发生时,视神经信号被传递到大脑,从而触发中脑 E-W 核向睫状神经发送信

号,这一过程导致睫状神经控制睫状肌的收缩和松弛。因为睫状肌的收缩和松弛分别导致瞳孔的扩张和收缩,所以前房中的房水被挤压到后房中,从而导致眼压下降。此外,睫状肌的收缩导致前房角的收缩,使房水快速流入 Schlemm 管以降低眼压。这可能解释了为什么看 3D 电影会导致眼压下降。但上述推断只是出于眼科学知识进行的假设,目前并无相应的研究或实验证实使用 VR 设备导致眼压降低的真正机制,其原理还有待进一步研究。

6 VR 设备参数与视觉健康风险及解决方案

VR 设备的物理参数与可能造成的视觉健康风险密切相关。影响人眼视觉健康的参数主要为光电参数,包括对比度、屏幕亮度、分辨率、延迟、视差等。而对比度、屏幕亮度等参数与显示系统的光辐射安全性能相关,所引起的视觉健康风险并非立体显示所引发。分辨率、延迟、视差以及串扰则在三维显示引发视觉健康风险中起到了十分重要的作用^[49]。分辨率过低导致的图像质量差及闪烁和高像素峰值亮度对比度等会引发视觉疲劳,甚至是眩晕;而越高的清晰度(尤其是接近人眼解析能力上限,建议在 60° 视角内至少 2K 分辨率要求)以及高水准的响应时间及刷新率($90 \sim 120 \text{ Hz}$)则有助于缓解视疲劳^[50]。此外,通过主客观试验分析得出的结果显示,空间、时间以及场景运动特征可对立体视频的观看舒适度造成明显影响^[51],当立体显示的设计视差小于 1° 时,使用者可得到更舒适的视觉体验^[52]。

设备的光辐射安全性能也是影响视觉健康的重要因素,光谱成分的不同会对人体产生不同的生理影响。市面上的 VR 产品大多采用 LED 光照明,其潜在蓝光危害不可忽视。蓝光危害主要来自于视网膜色素上皮和脉络膜对 $380 \sim 520 \text{ nm}$ 波段蓝光的吸收,导致视网膜光化学反应继而引发后续病变。因此,合理设置 VR 设备光源也是视觉健康风险所考量的范畴^[53]。

7 VR 技术存在的不足及发展方向

VR 设备凭借其在成像复杂度、双目追踪、模拟仿真以及人机交互等方面的技术优势在眼部参数记录、视功能评价、斜弱视训练、低视力患者辅助及近视防控等方面有着广泛的应用与发展潜能,其广泛应用能够有效推进眼科自动化诊疗的发展,大幅降低诊治与康复训练过程中的人力与时间成本,未来在眼科领域还有很大的发展潜力。然而,其目前还存在一些不足需要进一步完善:(1) 面对临床使用的多方面需求,VR

的软硬件匹配还未达到预期效果;(2)VR 设备的人机交互界面过于复杂,不利于友好操作;(3)部分 VR 设备的分辨率过低,容易造成形觉剥夺;(4)视野太小,容易造成周边视网膜形觉剥夺,导致治疗效果不够理想;(5)部分 VR 设备的便携性还有待提升。

此外,VR 设备在使用过程中带来的一些负面影响和安全隐患还未得到彻底解决。当前技术条件下,头戴式 VR 设备在使用时,用户不可避免出现 VAC;头戴式 VR 设备在使用过程中的过度发热可能会对眼部健康造成不良影响;干眼症状与主观视疲劳的症状也会随着 VR 设备的使用而浮现;特定情况下,长时间使用 VR 设备会让使用者出现头晕、头疼、恶心等症状,甚至出现一过性平衡感下降,研究者将这种类似于“晕动症”的一系列症状称之为“网络眩晕症”^[54]。这可能与 VR 设备呈现出的视觉信息与真实环境中运动状态不一致所导致的视觉-前庭冲突有关。在使用 VR 设备时对双眼进行光学矫正或提高视觉与现实运动的一致性也许可以减少这种晕动症状的发生。

尽管这项技术未来会对眼科临床流程和实践模式产生深远影响,但将其转化为真实世界中的临床应用仍具有一定挑战性。例如,与传统显示设备所呈现出的二维图像不同,VR 设备所呈现出的复杂三维图像极大改变了使用者的用眼习惯,对视觉健康的影响复杂且多样。因此,关于 VR 设备的使用对于视觉健康以及其他系统的影响还需要进一步进行更加详细的评估,以及更长时间、更大规模人群样本、多中心的随机对照试验进行研究^[55]。在面对不同年龄段、眼病类型、疾病程度和状况复杂的患者时,VR 设备在参与诊断与治疗时的一系列相关参数,如时长、频率、分辨率等仍需更加科学、规范化的定义^[4]。其他一些潜在问题,如诊断偏差、医学伦理、相关法律法规以及注册规范性等仍有待解决^[56]。

8 总结与展望

VR 设备的长期使用可能会加重干眼、视疲劳、近视等疾病的发生和发展。但是,通过形成良好、健康的 VR 设备使用习惯和通过将改进的成像技术以及将其其他视觉健康技术与之相结合,建立统一的 VR 设备评价标准,能够使 VR 设备发挥出更大的潜力。未来,将 VR 技术与 5G、云平台、人工智能等技术相结合,将我们带入“元宇宙”时代,不仅能进一步提升人机交互系统的智能化水平,更有望建立起高度自动化的眼科诊疗系统,为建立标准化、高质量、特征信息通用性高的眼科数据库作出重大贡献。更广泛地应用 VR 技术,

并与多个交叉学科技术相结合,加强 VR 技术与产业应用的融合,将为临床技术的发展带来新的突破性变革。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 刘旭辉,边靖芳,崔浩然,等. 虚拟现实/增强现实设备在眼科的应用及其对眼健康影响的研究进展[J]. 中华医学杂志, 2022, 102(2): 158-162. DOI: 10. 3760/cma. j. cn112137-20210723-01647.
- [2] 吴敏,胡竹林,和丹. 虚拟现实手术模拟仪在白内障手术培训中的运用[J]. 中华实验眼科杂志, 2009, 27(3): 165. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2009. 03. 027.
- [3] Lin CH, Lin HC, Chen CY, et al. Variations in intraocular pressure and visual parameters before and after using mobile virtual reality glasses and their effects on the eyes[J/OL]. Sci Rep, 2022, 12(1): 3176 [2024-05-11]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35210496/>. DOI: 10. 1038/s41598-022-07090-x.
- [4] 李妮静,袁进. 基于虚拟现实技术的视功能评估与重建[J]. 中华实验眼科杂志, 2022, 40(6): 576-581. DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20210924-00534. Li JJ, Yuan J. Evaluation and reconstruction of visual function based on virtual reality technology[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2022, 40(6): 576-581. DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20210924-00534.
- [5] Ferris JD, Donachie PH, Johnston RL, et al. Royal College of Ophthalmologists' National Ophthalmology Database study of cataract surgery: report 6. The impact of EyeSi virtual reality training on complications rates of cataract surgery performed by first and second year trainees[J]. Br J Ophthalmol, 2020, 104(3): 324-329. DOI: 10. 1136/bjophthalmol-2018-313817.
- [6] Alwadani F, Morsi MS. PixEye virtual reality training has the potential of enhancing proficiency of laser trabeculoplasty performed by medical students: a pilot study[J]. Middle East Afr J Ophthalmol, 2012, 19(1): 120-122. DOI: 10. 4103/0974-9233. 92127.
- [7] 邹绚,睢瑞芳. 虚拟现实与增强现实技术在眼科教学中的应用现状[J]. 基础医学与临床, 2020, 40(12): 1744-1748. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-6325. 2020. 12. 029. Zou X, Sui RF. Current status of virtual reality and augmented reality-based training tools in ophthalmology teaching[J]. Basic Clin Med, 2020, 40(12): 1744-1748. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-6325. 2020. 12. 029.
- [8] Jin B, Ai Z, Rasmussen M. Simulation of eye disease in virtual reality[J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2005, 2005: 5128-5131. DOI: 10. 1109/IEMBS. 2005. 1615631.
- [9] 邹博超,刘越,郭政. 立体图像及显示舒适度评价方法研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(9): 1589-1597. DOI: 10. 3724/SP. J. 1089. 2018. 16884. Zou BC, Liu Y, Guo M. Stereoscopic visual comfort and its measurement: a review[J]. J Comput-Aided Des & Comput Graph, 2018, 30(9): 1589-1597. DOI: 10. 3724/SP. J. 1089. 2018. 16884.
- [10] Munsamy AJ, Paruk H, Gopichunder B, et al. The effect of gaming on accommodative and vergence facilities after exposure to virtual reality head-mounted display[J]. J Optom, 2020, 13(3): 163-170. DOI: 10. 1016/j. optom. 2020. 02. 004.
- [11] Munsamy A, Paruk H. A study to assess the feasibility of utilising virtual reality for the treatment of accommodative and vergence infacility[J]. Br Ir Orthopt J, 2021, 17(1): 127-133. DOI: 10. 22599/bioj. 175.
- [12] 张羽双,唐大均,李聪英,等. VR 游戏对短期视功能的影响[J]. 世界最新医学信息文摘, 2021, 21(80): 45-46, 48. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-3141. 2021. 80. 021.
- [13] Long Y, Shen Y, Guo D, et al. The effects of consumer-grade virtual

- reality headsets on adult visual function[J]. *Semin Ophthalmol*, 2020, 35(3): 170-173. DOI: 10.1080/08820538.2020.1776342.
- [14] Guo DY, Shen YY, Zhu MM, et al. Virtual reality training improves accommodative facility and accommodative range[J]. *Int J Ophthalmol*, 2022, 15(7): 1116-1121. DOI: 10.18240/ijo.2022.07.11.
- [15] Paulus MM, Straube A, Eggert T. Vergence-accommodation conflict in virtual reality displays induces phoria adaptation[J]. *J Neurol*, 2017, 264(Suppl 1): 16-17. DOI: 10.1007/s00415-017-8425-z.
- [16] Karpicka E, Howarth PA. Heterophoria adaptation during the viewing of 3D stereoscopic stimuli[J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2013, 33(5): 604-610. DOI: 10.1111/opo.12081.
- [17] Turnbull P, Phillips JR. Ocular effects of virtual reality headset wear in young adults[J/OL]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 16172 [2024-05-11]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29170432/>. DOI: 10.1038/s41598-017-16320-6.
- [18] Fukushima T, Torii M, Ukai K, et al. The relationship between CA/C ratio and individual differences in dynamic accommodative responses while viewing stereoscopic images[J]. *J Vis*, 2009, 9(13): 21. 1-13. DOI: 10.1167/9.13.21.
- [19] Suryakumar R, Bobier WR. Gain and movement time of convergence-accommodation in preschool children[J]. *Optom Vis Sci*, 2004, 81(11): 835-843. DOI: 10.1097/OI.opx.0000145026.42124.fc.
- [20] 邓念晨, 杨旭波. 光学透视增强现实眼镜研究热点[J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(10): 1255-1266. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.10.014.
- Deng NC, Yang XB. Research hot spots of optical see-through augmented reality glasses[J]. *J Shanghai Jiaotong Univ*, 2018, 52(10): 1255-1266. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.10.014.
- [21] Shiwa S, Omura K, Kishino F. Proposal for a 3-D display with accommodative compensation: 3DDAC[J]. *J Soc Inf Disp*, 2012, 4(4): 255-261. DOI: 10.1889/1.1987395.
- [22] Rolland JP, Krueger MW, Goon A. Multifocal planes head-mounted displays[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(19): 3209-3215. DOI: 10.1364/ao.39.003209.
- [23] Schowengerdt BT, Johnston RS, Melville CD, et al. 3D displays using scanning laser projection[J]. *SID Int Symp*, 2012, 43(2): 640-643.
- [24] Maimone A, Georgiou A, Kollin JS. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality[J]. *Acm T Graphic*, 2017, 36(4CD): 1-16. DOI: 10.1145/3072959.3073624.
- [25] 杨震, 郭忠达, 阳志强. 视网膜投影显示系统设计[J]. *应用光学*, 2011, 32(2): 222-225. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2082.2011.02.007.
- Yang Z, Guo ZD, Yang ZQ. Design of retinal projection display system[J]. *J Appl Opt*, 2011, 32(2): 222-225. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2082.2011.02.007.
- [26] 中华医学会眼科学分会眼视光学组. 视疲劳诊疗专家共识(2014年)[J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2014, 16(7): 385-387. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2014.07.001.
- Chinese Ophthalmological Society of the Chinese Medical Association. Expert consensus for the diagnosis and treatment of asthenopia[J]. *Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci*, 2014, 16(7): 385-387. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2014.07.001.
- [27] 穆良柱, 张海君. 立体影像显示原理及其技术发展[J]. *物理实验*, 2008, 28(1): 9-13. DOI: 10.3969/j.issn.1005-4642.2008.01.003.
- Mu LZ, Zhang HJ. Principles and applications of three dimensional video display[J]. *Physics Exp*, 2008, 28(1): 9-13. DOI: 10.3969/j.issn.1005-4642.2008.01.003.
- [28] 沈丽丽, 邢阳. 基于脑电的水平运动立体影像视疲劳评估[J]. *天津大学学报*, 2020, 53(3): 259-264. DOI: 10.11784/tdxbz201901070.
- Shen LL, Xing Y. Visual fatigue assessment of stereoscopic images in lateral motion based on EEG[J]. *J Tianjin Univ*, 2020, 53(3): 259-264. DOI: 10.11784/tdxbz201901070.
- [29] Nakamura Y. Measurement of pupillary unrest in eyestrain[J]. *Jpn J Ophthalmol*, 1996, 40(4): 533-539.
- [30] Kinoshita S. Pathogenesis and treatment of accommodative disturbance[J]. *Nippon Ganka Gakkai Zasshi*, 1994, 98(12): 1256-1268.
- [31] Evans BJ. The need for optometric investigation in suspected Meares-Irlen syndrome or visual stress[J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2005, 25(4): 363-370. DOI: 10.1111/j.1475-1313.2005.00289.x.
- [32] 沈丽丽, 孙伟鹏. 立体深度运动引发的立体视觉疲劳的脑电评估[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(9): 1421-1427. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2017.09.016.
- Shen LL, Sun WP. Using EEG for assessment of stereoscopic visual fatigue caused by motion-in-depth[J]. *Chin J Eng*, 2017, 39(9): 1421-1427. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2017.09.016.
- [33] Yue K, Guo M, Liu Y, et al. Investigate the neuro mechanisms of stereoscopic visual fatigue[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2022, 26(7): 2963-2973. DOI: 10.1109/JBHI.2022.3161083.
- [34] Yue K, Wang D, Chiu SC, et al. Investigate the 3D visual fatigue using modified depth-related visual evoked potential paradigm[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28(12): 2794-2804. DOI: 10.1109/TNSRE.2021.3049566.
- [35] Tang Z, Liu X, Huo H, et al. The role of low-frequency oscillations in three-dimensional perception with depth cues in virtual reality[J/OL]. *Neuroimage*, 2022, 257: 119328 [2024-05-11]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35605766/>. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2022.119328.
- [36] 陈丽萍, 赵堪兴. 视疲劳病因研究及防治[J]. *国外医学(眼科学分册)*, 2005, 29(6): 367-370. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-5803.2005.06.003.
- [37] Mocchi F, Serra A, Corrias GA. Psychological factors and visual fatigue in working with video display terminals[J]. *Occup Environ Med*, 2001, 58(4): 267-271. DOI: 10.1136/oem.58.4.267.
- [38] Vural M, Acer M, Akbaş B. The scores of Hamilton depression, anxiety, and panic agoraphobia rating scales in patients with acute coronary syndrome[J]. *Anadolu Kardiyol Derg*, 2008, 8(1): 43-47.
- [39] 梁浩材. 行为医学与行为革命[J]. *中国社会医学杂志*, 2008, 25(4): 193-195. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5625.2008.04.001.
- [40] 胡晓兵, 陈瑜. 视疲劳患者焦虑心理调查[J]. *中国社会医学杂志*, 2014, 31(3): 199-200, 201. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5625.2014.03.019.
- Hu XB, Chen Y. Survey on anxiety among patients with asthenopia[J]. *Chin J Soc Med*, 2014, 31(3): 199-200, 201. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5625.2014.03.019.
- [41] Gokul A, Wang M, Craig JP. Tear lipid supplement prophylaxis against dry eye in adverse environments[J]. *Cont Lens Anterior Eye*, 2018, 41(1): 97-100. DOI: 10.1016/j.clae.2017.09.013.
- [42] Waduthantri S, Tan CH, Fong YW, et al. Specialized moisture retention eyewear for evaporative dry eye[J]. *Curr Eye Res*, 2015, 40(5): 490-495. DOI: 10.3109/02713683.2014.932389.
- [43] Kim J, Hwang L, Kwon S, et al. Change in blink rate in the metaverse VR HMD and AR glasses environment[J/OL]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(14): 8551 [2024-05-10]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35886402/>. DOI: 10.3390/ijerph19148551.
- [44] Wang M, Chan E, Ea L, et al. Randomized trial of desktop humidifier for dry eye relief in computer users[J]. *Optom Vis Sci*, 2017, 94(11): 1052-1057. DOI: 10.1097/OPX.0000000000001136.
- [45] Wolkoff P, Nøjgaard JK, Troiano P, et al. Eye complaints in the office environment: precorneal tear film integrity influenced by eye blinking efficiency[J]. *Occup Environ Med*, 2005, 62(1): 4-12. DOI: 10.1136/oem.2004.016030.
- [46] Ren Y, Chen J, Zheng Q, et al. Short-term effect of a developed warming moist chamber goggle for video display terminal-associated dry eye[J/OL]. *BMC Ophthalmol*, 2018, 18(1): 33 [2024-05-10]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29415667/>. DOI: 10.1186/s12886-018-0700-y.
- [47] Marshev V, Bolloch J, Pallamin N, et al. Impact of virtual reality headset use on eye blinking and lipid layer thickness[J]. *J Fr Ophthalmol*, 2021, 44(7): 1029-1037. DOI: 10.1016/j.jfo.2020.09.032.



- [48] Turnbull P, Wong J, Feng J, et al. Effect of virtual reality headset wear on the tear film: a randomised crossover study [J]. *Cont Lens Anterior Eye*, 2019, 42(6): 640-645. DOI: 10. 1016/j. clae. 2019. 08. 003.
- [49] Choi J, Kim D, Choi S, et al. Visual fatigue modeling and analysis for stereoscopic video [J/OL]. *Opt Eng*, 2012; 51(1): 017206 [2024-05-11]. <https://moscow.sci-hub.xin/10.1117/1.oe.51.1.017206>. DOI: 10. 1117/1. oe. 51. 1. 017206.
- [50] 中国医学装备协会眼科专业委员会眼科检验检测学组联合中国医学装备协会眼科专业委员会眼科创新诊疗技术及装备学组. 虚拟现实与增强现实设备基于视觉健康使用的专家共识(2022) [J]. *中华眼科医学杂志(电子版)*, 2022, 12(2): 125-128. DOI: 10. 3877/cma. j. issn. 2095-2007. 2022. 02. 012. Ophthalmic Assessment Group within the Ophthalmological Committee of China Association of Medical Equipment and Ophthalmic Innovative Diagnosis & Treatment Technology and Equipment Group of Ophthalmology Committee of China Association of Medical Equipment. Expert consensus for the application of virtual reality and augmented reality devices based on visual health (2022) [J]. *Chin J Ophthalmol Med (Electronic Edition)*, 2022, 12(2): 125-128. DOI: 10. 3877/cma. j. issn. 2095-2007. 2022. 02. 012.
- [51] Wang FJ, Sang XZ, Liu Y, et al. Visual fatigue evaluation based on depth in 3D videos [C]//International Symposium on Photoelectronic Detection & Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2013. DOI: 10. 1117/12. 2033046.
- [52] Liu Y, Guo X, Fan Y, et al. Subjective assessment on visual fatigue versus stereoscopic disparities [J]. *J Soc Inf Disp*, 2021, 29(6): 497-504. DOI: 10. 1002/jsid. 991.
- [53] 孟祥峰, 张超, 王浩, 等. 虚拟现实产品在医疗领域应用中的检测分析 [J]. *中国医疗设备*, 2023, 38(1): 10-13, 19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-1633. 2023. 01. 003. Meng XF, Zhang C, Wang H, et al. Detection and analysis of virtual reality products in medical field [J]. *Chin Med Dev*, 2023, 38(1): 10-13, 19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-1633. 2023. 01. 003.
- [54] Gallagher M, Ferrè ER. Cybersickness: a multisensory integration perspective [J]. *Multisens Res*, 2018, 31(7): 645-674. DOI: 10. 1163/22134808-20181293.
- [55] Zhao F, Chen L, Ma H, et al. Virtual reality: a possible approach to myopia prevention and control? [J]. *Med Hypotheses*, 2018, 121: 1-3. DOI: 10. 1016/j. mehy. 2018. 09. 021.
- [56] 袁进, 李萌. 重视我国眼科人工智能发展面临的机遇和挑战 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2019, 37(8): 599-602. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2019. 08. 002. Yuan J, Li M. Attach importance to the opportunities and challenges facing the development of ophthalmic artificial intelligence in China [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2019, 37(8): 599-602. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2019. 08. 002.

(收稿日期: 2024-05-25 修回日期: 2024-11-04)

(本文编辑: 刘艳 施晓萌)

读者 · 作者 · 编者

眼科常用英文缩略语名词解释

- AMD: 年龄相关性黄斑变性 (age-related macular degeneration)
- ANOVA: 方差分析 (analysis of variance)
- BUT: 泪膜破裂时间 (breakup time of tear film)
- DR: 糖尿病视网膜病变 (diabetic retinopathy)
- EAU: 实验性自身免疫性葡萄膜炎 (experimental autoimmune uveitis)
- EGF: 表皮生长因子 (epidermal growth factor)
- ELISA: 酶联免疫吸附测定 (enzyme-linked immunosorbent assay)
- ERG: 视网膜电图 (electroretinogram)
- FFA: 荧光素眼底血管造影 (fundus fluorescein angiography)
- FGF: 成纤维细胞生长因子 (fibroblast growth factor)
- GFP: 绿色荧光蛋白 (green fluorescent protein)
- IFN- γ : γ 干扰素 (interferon- γ)
- IL: 白细胞介素 (interleukin)
- IOL: 人工晶状体 (intraocular lens)
- IRBP: 光间受体视黄类物质结合蛋白 (interphotoreceptor retinoid binding protein)
- LASIK: 准分子激光角膜原位磨镶术 (laser in situ keratomileusis)
- ICGA: 吲哚菁绿血管造影 (indocyanine green angiography)
- LECs: 晶状体上皮细胞 (lens epithelial cells)
- miRNA: 微小 RNA (microRNA)
- MMP: 基质金属蛋白酶 (matrix metalloproteinase)
- mTOR: 哺乳动物类雷帕霉素靶蛋白 (mammalian target of rapamycin)
- MTT: 四甲基偶氮唑盐 (methyl thiazolyl tetrazolium)
- NF: 核转录因子 (nuclear factor)
- OCT: 光相干断层扫描 (optical coherence tomography)
- OR: 比值比 (odds ratio)
- PACG: 原发性闭角型青光眼 (primary angle-closure glaucoma)
- PCR: 聚合酶链式反应 (polymerase chain reaction)
- RGCs: 视网膜节细胞 (retinal ganglion cells)
- POAG: 原发性开角型青光眼 (primary open angle glaucoma)
- RB: 视网膜母细胞瘤 (retinoblastoma)
- RPE: 视网膜色素上皮 (retinal pigment epithelium)
- RNV: 视网膜新生血管 (retinal neovascularization)
- RP: 视网膜色素变性 (retinitis pigmentosa)
- S I t: 基础泪液分泌试验 (Schirmer I test)
- shRNA: 短发夹 RNA (short hairpin RNA)
- siRNA: 小干扰 RNA (small interfering RNA)
- α -SMA: α -平滑肌肌动蛋白 (α -smooth muscle actin)
- TAO: 甲状腺相关眼病 (thyroid-associated ophthalmopathy)
- TGF: 转化生长因子 (transforming growth factor)
- TNF: 肿瘤坏死因子 (tumor necrosis factor)
- UBM: 超声生物显微镜 (ultrasound biomicroscope)
- VEGF: 血管内皮生长因子 (vascular endothelial growth factor)
- VEP: 视觉诱发电位 (visual evoked potential)

(本刊编辑部)