

## 虚拟现实技术在青光眼管理中的应用

李琴华<sup>1</sup> 薛玉坤<sup>2</sup> 张姗姗<sup>1</sup> 杨建刚<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西北大学生命科学学院,西安 710069;<sup>2</sup>西安市第一医院 西北大学附属第一医院 陕西省眼科研究所,西安 710002

通信作者:杨建刚,Email:dryjg@126.com

**【摘要】** 青光眼是全球范围内首位不可逆性致盲眼病,因其起病隐匿、进展渐进,患者确诊时往往已出现不可逆性视力损害,因此青光眼早期筛查非常重要。随着虚拟现实(VR)技术的不断更新与发展,给用户提供了更清晰的视觉和听觉体验,可通过 VR 设备将用户置于特定场景的理想视觉感官环境之中,拓展了其在青光眼领域中的应用潜力。目前,VR 技术在青光眼领域中的研究仍处于探索阶段,本文将分别从 VR 技术在青光眼筛查、青光眼患者生活质量评估、青光眼患者视觉质量改善中的应用及其面临的困难与挑战进行综述,并展望 VR 技术在青光眼领域应用的优势及未来发展趋势。

**【关键词】** 虚拟现实; 青光眼; 视野; 筛查

**基金项目:** 陕西省重点产业创新链(群)项目(2022ZDLSF03-11); 西安市创新能力强基计划人工智能技术攻关项目(21RGZN00)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20240603-00145

### Application of virtual reality technology in glaucoma management

Li Qinhua<sup>1</sup>, Xue Yukun<sup>2</sup>, Zhang Shanshan<sup>1</sup>, Yang Jiangang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Northwestern University, Xi'an 710069, China; <sup>2</sup>Shaanxi Institute of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital of Northwest University, Xi'an No. 1 Hospital, Xi'an 710002, China

Corresponding author: Yang Jiangang, Email:dryjg@126.com

**【Abstract】** Glaucoma is the leading cause of irreversible blindness worldwide, characterized by its concealed and progressive nature. Often, irreversible vision damage has occurred by the time it is detected, underscoring the critical importance of early screening. With the continuous advancement of virtual reality (VR) technology, users can experience enhanced visual and auditory environments, placing them in ideal sensory settings through VR devices. This expands the potential applications of VR technology in the field of glaucoma. Currently, research on using VR technology in glaucoma is still in its exploratory stages. This review will discuss the applications of VR technology in glaucoma screening, assessment of patients' quality of life, and improvement of visual quality for glaucoma patients, address the challenges and difficulties faced in its applications and provide insights into the advantages and future trends of VR technology in managing glaucoma.

**【Key words】** Virtual reality; Glaucoma; Visual field; Screening

**Fund program:** Shaanxi Provincial Key Industrial Innovation Chain (Cluster) Project (2022ZDLSF03-11); Artificial Intelligence Technology Research Project of Xi'an Innovation Capacity Enhancement Program (21RGZN00)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20240603-00145

青光眼是全球首位不可逆性致盲眼病,目前 40~80 岁人群的青青光眼患病率约为 3.5%。随着全球人口老龄化进程加快,老年人口数量和占比持续攀升,预计到 2040 年,全球将有 1.12 亿青光眼患者<sup>[1]</sup>。青光眼起病隐匿,部分患者早期无明显症状,就医时已出现严重的视神经损害。特征性视野缺损是青光眼的重要临床表现之一,因此视野检查在青光眼早期筛查中十分重要。目前,临床上用于青光眼视野检查的设备主要为自动视野计,包括 Humphrey 视野计(Humphrey field analyzer, HFA)、Octopus 视野计和 Oculus 视野计等,这类检测仪器体积较大,主要在医院内使用,不利于青光眼的早期筛查和远程筛查。

虚拟现实(virtual reality, VR)技术基于双目视差原理,其核

心是用户可与计算机生成的三维虚拟环境进行交互,通常通过具备 3D 投射能力的计算机实现访问,所使用的显示器既可以是独立屏幕,也可以是头戴式显示器。VR 主要可分为非沉浸式和沉浸式两类,其中非沉浸式 VR 利用用户周围的屏幕组合来呈现虚拟信息<sup>[2]</sup>,例如驾驶模拟、飞行模拟;沉浸式 VR 是指使用头戴式显示器跟踪用户的运动,并根据用户的位置呈现 VR 信息<sup>[3]</sup>,为用户提供多维度信息、三维动态呈现、交互式操作的仿真体验<sup>[4]</sup>。目前,VR 技术已被广泛应用于眼科领域,如斜弱视治疗、眼科培训及眼部解剖教学等<sup>[5-8]</sup>。VR 技术在青光眼筛查和管理中的优势主要体现在其沉浸式体验、动态和交互性测试、便携性和远程筛查功能等方面。相比计算机端和手



机端等其他移动端的自动视野检测程序,VR 提供了更全面和真实的评估体验,有助于更准确地评估患者的视觉功能和生活质量。本文就 VR 技术在青光眼管理中的应用进行综述。

## 1 VR 在青光眼筛查中的应用

### 1.1 VR 在早期青光眼筛查中的应用

有研究显示,VR 技术可成功筛查出健康人群与早期青光眼患者,Koylu 等<sup>[9]</sup>对 93 例受试者开展研究,其中青光眼患者 55 例,健康对照 38 例,均采用 II 型 HFA 和基于 VR 技术的视野设备(Oculera)进行检测,分析 2 种设备检测的平均偏差(mean deviation, MD)值。结果显示,II 型 HFA 和 Oculera 检测结果之间具有良好的相关性。Shetty 等<sup>[10]</sup>采用 HFA 和 VR 视野分析仪检查 97 例青光眼/非青光眼受试者 166 眼,采用敏感性、特异性、阳性预测值(positive predictive value, PPV)和阴性预测值(negative predictive value, NPV)评估 2 种仪器的诊断试验性能。结果显示,VR 视野分析仪对青光眼/非青光眼个体分类的敏感性、特异性、PPV 和 NPV 均达 100%,因此,VR 视野测量设备可用于青光眼早期筛查。但在青光眼严重程度判断中仍存在一定误差,不能完全取代 HFA。Stapelfeldt 等<sup>[11]</sup>使用定制设计的 VR 视野测量系统,纳入 70 例受试者,其中健康受试者 36 例,早、中期视野损害青光眼患者 34 例,采用 Octopus 900MDs 全自动视野计和 VR 视野测量仪对受试者进行视野测试,然后对 2 种设备收集的视野数据进行分析 and 比较。结果显示,全自动视野计和 VR 视野测量仪的测量值之间具有良好的一致性,青光眼患者的 Spearman 相关系数均大于 0.7,因此,VR 视野测量系统可用于早中期青光眼的诊断。在青光眼和视野缺损患者的连续眼球运动筛查中,有研究发现患者更倾向基于 VR 的检测方法,而非传统的屏幕检测方法<sup>[12]</sup>。但 VR 技术对青光眼患者视野缺损具体空间位置的识别存在较大误差,通常无法反映真实的视野缺损范围及形状,因此,VR 设备在应用于青光眼早期筛查中具有一定局限性。

### 1.2 VR 在中、重度青光眼筛查中的应用

Mees 等<sup>[13]</sup>发现一种 VR 视野测试设备(C3 fields analyzer, CFA),其采用近似 54 dB 缺损的超阈值刺激算法,可在与 HFA 24-2SITA 标准测试相同的 18 个位置呈现刺激。采用 CFA 与 HFA 24-2SITA 视野计对 157 例青光眼/非青光眼患者进行测试,结果显示,中、晚期青光眼患者(HFA MD<-6 dB)受试者工作特征曲线下面积为 0.86±0.04,虽然 CFA 在识别视野缺损方面的可靠性不及 HFA,但在识别中、重度青光眼患者方面表现突出。Plummer 等<sup>[14]</sup>招募 23 例受试者,其中青光眼患者 16 例 29 眼(其中 3 眼受损严重),正常受试者 7 例 12 眼,采用 VR 扫描激光全光视距法与 HFA 对 41 眼视野缺损相关参数进行检测,结果显示,VR 对中、重度青光眼患者的灵敏度为 71%~90%,特异度为 100%,而正常或早期青光眼受试者的灵敏度为 27%~67%,特异度为 78%~100%。因此,VR 技术在中、重度青光眼筛查中更具敏感性。

### 1.3 VR 在青光眼远程筛查中的应用

Wroblewski 等<sup>[15]</sup>对一种头戴式 VR 视野测量仪的实用性、

可靠性和有效性进行研究,该仪器有 2 种模式:(1)手动操作,由操作者通过鼠标点击记录患者的应答情况;(2)视觉追踪,通过眼动仪捕捉患者凝视方向的变化,以此作为患者成功识别目标的判定依据。59 例患者在手动模式下成功完成测试,40 例患者在视觉追踪模式下成功完成测试。结果显示,该头戴式 VR 视野测量仪可有效检测出大面积视野缺损,2 种 VR 测量模式所获得的检测结果具有一致性,但 VR 视野测量仪测得的视网膜灵敏度与 HFA 检测结果相比有系统性偏移(约 -5 dB)。与 HFA 检测结果相比,2 种 VR 测量模式的患者接受度更高。Deiner 等<sup>[16]</sup>在新型冠状病毒感染期间,通过安装于低成本 VR 眼镜的 VR 眼动力学视野测量系统,对 1 例 72 岁的青光眼患者进行远程家庭视野监测。结果显示,该系统与 HFA 24-2 检测结果具有良好的相关性,表明 VR 技术可通过低成本方式实现远程青光眼筛查。刘雨辰等<sup>[17]</sup>基于静态视野检查原理,研发了一套使用手机和 VR 眼镜的快速视野筛查系统,可以检查双眼视觉功能、绘制视野灵敏度图、确定视野损伤。通过对健康受试者和视力障碍受试者的对比测试,并将测试结果与标准医学检查结果相比,显示该系统检测效能良好。因此,VR 技术有望用于远程青光眼筛查,其核心目标是实现青光眼的早期筛查与诊断。鉴于 VR 设备在视野检测领域仍处于发展阶段,其检测结果可能存在一定误差。建议在完成远程 VR 视野筛查后,患者及时前往医院进行详细的眼科检查,以确保及时有效地管理病情,预防病情进展和视功能损害的发生。

## 2 VR 在评估青光眼患者生活质量中的应用

目前青光眼患者视神经功能评估主要依赖于视野敏感性检测<sup>[18]</sup>,但视野检测并不能充分反映患者在实际生活中面临的视觉相关生活不便,为此研究人员设计使用 VR 设备来模拟青光眼患者的视觉功能并评估其生活质量。Lam 等<sup>[19]</sup>对 98 例青光眼患者、50 例健康受试者进行试验,设计了超市购物、白天的楼梯和城市导航、夜间的楼梯和城市导航 5 种交互式 VR 环境,以模拟常见的日常活动,通过检测视力、对比敏感度、视野,同时应用美国国家眼科研究所 25 项视觉功能问卷 Rasch 评分和 VR 残疾评分,统计完成模拟任务所需时间、物品错误识别数量和碰撞次数,计算特定任务和总体 VR 残疾分数。结果显示,总体 VR 残疾评分与美国国家眼科研究所 25 项视觉功能问卷 Rasch 评分相关( $R^2=0.207$ )。Latif 等<sup>[20]</sup>设计了一个 VR 平台,模拟日常生活中的视觉任务,如阅读、行走和驾驶等,并通过问卷调查评估患者在上述任务中的表现和感受。结果显示,VR 评估能够更全面地反映青光眼对患者生活质量的影响。Idris 等<sup>[21]</sup>通过构建超市购物、过马路等 VR 场景,评估青光眼对患者日常生活的影响,发现 VR 评估结果与患者的自我报告和临床测试结果具有高度相关性。因此,VR 技术可通过模拟生活场景,更全面地评估青光眼患者的生活质量,使临床医生了解患者的主观视觉体验,以便制定个性化治疗方案,进而在患者疾病管理与康复过程中发挥重要作用。

## 3 VR 在改善青光眼患者视觉质量中的应用

青光眼长期管理的目标是维持患者的视觉质量及生活质

量稳定,避免恶化<sup>[22]</sup>。有研究表明,VR 技术可辅助改善青光眼患者的视觉质量<sup>[23]</sup>。Sayed 等<sup>[24]</sup>使用新型 VR 数字眼镜(DSpecs)对 23 例青光眼患者进行自动视野检查和图像重映射干预,结果显示,78%的患者可通过 DSpecs 识别此前无法察觉的安全隐患,周边物体的识别能力得到提高。DSpecs 可通过扩大青光眼患者的功能视野,增强患者对周围物体的感知能力,进而改善青光眼患者的视觉质量,该技术目前仍处于探索和开发阶段。Fan 等<sup>[25]</sup>将招募的 54 例青光眼患者分为对照组和训练组,对训练组患者进行为期 3 个月的双眼 VR 训练,结果显示,VR 训练可改善青光眼患者的视野缺损,但该结论仍需大样本量研究进行验证。VR 技术在改善青光眼患者的视觉质量、提高其生活质量方面展现出巨大潜力,随着 VR 技术的不断进步和应用的深入,VR 技术有望成为青光眼管理的重要工具。

#### 4 VR 在青光眼应用中的困难与挑战

##### 4.1 VR 硬件的不足

VR 技术在弱视治疗、视力训练、近视防控、斜视诊断、眼科手术辅助和眼科教学领域已取得一定成果,具备良好发展潜力,但在临床应用中仍存在不足,如 VR 设备的硬件性能尚未完全满足临床应用需求,主要包括:(1)VR 设备缺乏专用的操作系统<sup>[26]</sup>。目前,多数 VR 设备搭载的均是安卓或视窗操作系统,其主要应用于手机、计算机和平板电脑等设备,并非专为 VR 设备开发,因此并不完全适用于 VR 设备,这导致目前的 VR 设备仅能在虚拟场景中为用户提供简单的菜单选项,来指引用户进入相关应用模块。(2)设备分辨率不足以满足所有场景的应用需求。目前 VR 设备的最小分辨角对数视力分辨率尚未达到视力检测要求,但可用于部分类型的视野测试<sup>[27]</sup>。(3)VR 设备在使用过程中仍存在安全隐患。VR 设备长时间使用会出现过度发热问题,对眼部安全构成威胁。因此,在 VR 设备使用期间,需重点关注患者眼部安全及设备运行安全。

##### 4.2 VR 可能存在的眼部佩戴风险

部分患者长时间使用 VR 设备可能会出现头晕、恶心、平衡感下降等不适症状,即“VR 晕屏症”,这可能与使用 VR 设备过程中的视觉呈现与真实运动状态不一致导致视觉-前庭冲突有关<sup>[28]</sup>。Roettl 等<sup>[29]</sup>对 237 例受试者进行测试,结果发现,受试者在 VR 游戏中更容易头晕。Park 等<sup>[30]</sup>研究了全沉浸式 VR 游戏对健康成人静态平衡能力的改变及其伴随的不良影响,结果发现,静态平衡的显著差异取决于游戏背景是否固定。因此,在 VR 医疗设备的开发和设计中,在满足医疗目的的前提下,VR 场景背景要尽量固定,尽量降低患者“VR 晕屏症”的发生率,降低患者使用 VR 设备的风险。

##### 4.3 VR 在青光眼临床应用中的接受度问题

尽管 VR 技术具有诸多优势,但青光眼患者对 VR 技术的接受度仍是临床实践中需重点关注的因素,可能会面临以下问题:(1)舒适度和适应性不佳 对于部分患者,长时间佩戴 VR 设备可能会感到肌肉疲劳、视疲劳<sup>[31]</sup>。(2)恐惧或焦虑情绪 VR 环境可能会引发低龄患者的恐惧或焦虑;对新技术持怀疑态度的患者,其焦虑情绪主要源于对虚拟环境中的检查体验和

检查效果的担忧。(3)操作流程人性化程度不足 VR 技术目前仍处于发展阶段,需设计专用的操作系统及更具人性化的操作流程,满足个性化需求和偏好,才能提高患者的接受度<sup>[32]</sup>。(4)经济因素制约 VR 设备的投入和使用 无论是医院采购还是个人使用,均需承担较高成本,这会影响到患者对 VR 设备的接受程度<sup>[33]</sup>。

解决这些问题的关键在于医疗机构和 VR 技术开发者积极采取措施,以提升患者对 VR 技术的接受度,具体措施包括:(1)优化 VR 设备的结构设计,使其更符合人体工程学原理,从而提高患者佩戴舒适度和使用体验;(2)提供个性化技术支持和使用指导,帮助患者缓解对新技术的恐惧或焦虑情绪;(3)加强与患者的沟通合作,系统收集其使用反馈与意见建议,持续改进和优化 VR 设备的操作流程;(4)加快 VR 设备的研发与设计,降低 VR 设备的购置及使用成本。

##### 4.4 VR 在青光眼临床试验应用中的不足

VR 技术在医疗领域的应用日益广泛,但在青光眼临床试验方面存在一些不足,包括:(1)缺乏充分验证的证据 虽然有研究表明 VR 可在青光眼早期筛查中发挥作用,但由于研究结果不可重复,因此缺乏严谨性,需要更多的临床试验来验证其有效性和可靠性<sup>[34]</sup>。(2)标准化和规范化问题 在已有的研究中,由于缺乏统一的标准和规范,且 VR 设备规格不一致,这导致不同研究和临床试验间的可比性和可重复性受到限制,缺乏标准化也可能导致结果的不一致性。(3)数据安全和隐私问题 VR 临床试验通常涉及大量临床数据的收集和处理,且可能涉及患者个人隐私信息<sup>[35]</sup>。因此,必须采取适宜的数据安全措施和隐私保护措施以确保患者数据安全和隐私不受侵犯。(4)检测准确性问题 目前多数研究均采用阈上视野检测法,但该检测策略具有局限性,可能导致视野缺损注释丢失,影响检测准确性;且现有研究尚未提供减少注释丢失的方法,进一步影响 VR 视野检测的准确性。

#### 5 VR 在青光眼应用中的总结与展望

由于青光眼在早期阶段通常无症状,大多数患者确诊时已出现严重视野损伤,青光眼患者需尽早接受筛查和治疗,早期干预治疗者预后更佳<sup>[36]</sup>,因此,设计高效、快捷的基层早期筛查手段至关重要。研究显示,青光眼早期筛查在中国城市和农村地区均可能具有成本效益<sup>[37]</sup>。VR 技术在青光眼早期筛查中的应用价值已得到证实,其临床研究相对成熟。随着 VR 技术的持续创新与技术进步、相关医疗产品开发与升级的逐步完善、专用操作系统的优化设计、更人性化操作流程的构建,VR 技术在青光眼筛查中的应用将具备高准确性、高效率、高效益、低成本等多种优点。且随着临床应用的增加和医护人员经验的积累,VR 技术在青光眼筛查中的应用将会更加标准与合理,从而加快 VR 技术在青光眼筛查领域应用的落地进程。此外,VR 技术还可用于创建虚拟的日常生活场景,帮助医生评估青光眼对患者生活质量的具体影响,为制定更加个性化的治疗和管理方案提供依据。此外,VR 技术在改善青光眼患者视觉质量、提升其生活质量方面也展现出应用潜力。

综上所述,VR 技术在青光眼筛查、青光眼患者生活质量评估和视觉质量改善方面展现出良好的应用价值,随着科学技术发展和社会经济水平的提升,青光眼领域将迎来更为便捷的筛查阶段,VR 技术在青光眼领域将更加普及,可助力降低全球青光眼患病率,提高青光眼患者生活质量,为青光眼患者带来福音,创造更大的社会效益。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参考文献

- [1] Kang JM, Tanna AP. Glaucoma[J]. *Med Clin North Am*, 2021, 105(3):493-510. DOI: 10.1016/j.mcna.2021.01.004.
- [2] Rahouti A, Lovreglio R, Datoussad S, et al. Prototyping and validating a non-immersive virtual reality serious game for healthcare fire safety training[J]. *Fire Technology*, 2021, 57(6):3041-3078. DOI: 10.1007/s10694-021-01098-x.
- [3] Slater M, Sanchez-Vives MV. Transcending the self in immersive virtual reality[J]. *Computer*, 2014, 47(7):24-30. DOI: 10.1109/MC.2014.198.
- [4] 吴明胜, 余小琴, 禄志成, 等. 基于 5G VR 技术应用场景发展综述[J]. *机械研究与应用*, 2021, 34(4):203-206. DOI: 10.16576/j.cnki.1007-4414.2021.04.062.
- [5] Wu MS, Yu XQ, Lu ZC, et al. Development of VR technology based on 5G[J]. *Mechanical Research & Application*, 2021, 34(4):203-206. DOI: 10.16576/j.cnki.1007-4414.2021.04.062.
- [5] Žiak P, Holm A, Halička J, et al. Amblyopia treatment of adults with dichoptic training using the virtual reality oculus rift head mounted display: preliminary results[J]. *BMC Ophthalmol*, 2017, 17(1):105. DOI: 10.1186/s12886-017-0501-8.
- [6] Yang X, Fan Y, Chu H, et al. Preliminary study of short-term visual perceptual training based on virtual reality and augmented reality in postoperative strabismic patients[J]. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, 2022, 25(7):465-470. DOI: 10.1089/cyber.2022.0113.
- [7] 沈萍. 基于 VR/AR 技术的白内障超声乳化手术全流程护理培训系统的临床应用[J]. *中国现代医生*, 2021, 59(27):4-8.
- [7] Shen P. Clinical application of the whole-process nursing training system for cataract phacoemulsification surgery based on VR/AR technology[J]. *China Modern Doctor*, 2021, 59(27):4-8.
- [8] 邹颖, 吴世靖, 睢瑞芳. 虚拟现实技术辅助眼部解剖教学的效果分析[J]. *中华医学教育杂志*, 2021, 41(6):537-540. DOI: 10.3760/cma.j.cn115259-20210112-00061.
- [8] Zou X, Wu SJ, Sui RF. Application of virtual reality-based training tools in ocular anatomy teaching for medical undergraduates[J]. *Chin J Med Edu*, 2021, 41(6):537-540. DOI: 10.3760/cma.j.cn115259-20210112-00061.
- [9] Koylu MT, Yilmaz AC, Yilmaz H, et al. Comparison of a new virtual reality-based visual field device (oculera) with humphrey field analyzer: a single-center study[J]. *Eur J Ophthalmol*, 2026, 36(2):271-281. DOI: 10.1177/11206721251383750.
- [10] Shetty V, Sankhe P, Haldipurkar SS, et al. Diagnostic performance of the PalmScan VF2000 virtual reality visual field analyzer for identification and classification of glaucoma[J]. *J Ophthalmic Vis Res*, 2022, 17(1):33-41. DOI: 10.18502/jovr.v17i1.10168.
- [11] Stapelfeldt J, Kucur SS, Huber N, et al. Virtual reality-based and conventional visual field examination comparison in healthy and glaucoma patients[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2021, 10(12):10. DOI: 10.1167/tvst.10.12.10.
- [12] Soans RS, Renken RJ, John J, et al. Patients prefer a virtual reality approach over a similarly performing screen-based approach for continuous oculomotor-based screening of glaucomatous and neuro-ophthalmological visual field defects[J]. *Front Neurosci*, 2021, 15:745355. DOI: 10.3389/fnins.2021.745355.
- [13] Mees L, Upadhyaya S, Kumar P, et al. Validation of a head-mounted virtual reality visual field screening device[J]. *J Glaucoma*, 2020, 29(2):86-91. DOI: 10.1097/IJG.0000000000001415.
- [14] Plummer DJ, Lopez A, Azen SP, et al. Correlation between static automated and scanning laser entoptic perimetry in normal subjects and glaucoma patients[J]. *Ophthalmology*, 2000, 107(9):1693-1701. DOI: 10.1016/s0161-6420(00)00248-7.
- [15] Wroblewski D, Francis BA, Sadun A, et al. Testing of visual field with virtual reality goggles in manual and visual grasp modes[J]. *Biomed Res Int*, 2014, 2014:206082. DOI: 10.1155/2014/206082.
- [16] Deiner MS, Damato BE, Ou Y. Implementing and monitoring at-home virtual reality oculo-kinetic perimetry during COVID-19 [J]. *Ophthalmology*, 2020, 127(9):1258. DOI: 10.1016/j.ophtha.2020.06.017.
- [17] 刘雨辰, 秦海旻. 预防失明:用手机早期发现青光眼[J]. *中国高新技术*, 2019, 24:108-111. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2019.24.38.
- [18] Sipatchin A, Wahl S, Rifai K. Eye-tracking for clinical ophthalmology with virtual reality (VR): a case study of the HTC Vive Pro Eye's usability[J]. *Healthcare (Basel)*, 2021, 9(2):180. DOI: 10.3390/healthcare9020180.
- [19] Lam A, To E, Weinreb RN, et al. Use of virtual reality simulation to identify vision-related disability in patients with glaucoma[J]. *JAMA Ophthalmol*, 2020, 138(5):490-498. DOI: 10.1001/jamaophthalmol.2020.0392.
- [20] Latif K, Nishida T, Moghimi S, et al. Quality of life in glaucoma[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2023, 261(10):3023-3030. DOI: 10.1007/s00417-023-06050-z.
- [21] Idris S, Modupe B, Adekoya B, et al. Comparative evaluation of activities of daily living using virtual reality simulation in glaucoma and non-glaucoma patients[J]. *J West Afr Coll Surg*, 2023, 13(4):18-25. DOI: 10.4103/jwas.jwas\_312\_22.
- [22] Quaranta L, Riva I, Gerardi C, et al. Quality of life in glaucoma: a review of the literature[J]. *Adv Ther*, 2016, 33(6):959-981. DOI: 10.1007/s12325-016-0333-6.
- [23] Pur DR, Lee-Wing N, Bona MD. The use of augmented reality and virtual reality for visual field expansion and visual acuity improvement in low vision rehabilitation: a systematic review[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2023, 261(6):1743-1755. DOI: 10.1007/s00417-022-05972-4.
- [24] Sayed AM, Abdel-Mottaleb M, Kashem R, et al. Expansion of peripheral visual field with novel virtual reality digital spectacles[J]. *Am J Ophthalmol*, 2020, 210:125-135. DOI: 10.1016/j.ajo.2019.10.006.
- [25] Fan J, Lu Y, Wiederhold M, et al. The effectiveness of binocular virtual reality training on repairing visual field defect of glaucoma[J]. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, 2021, 24(10):683-689. DOI: 10.1089/cyber.2021.0215.
- [26] 郭占涛. 浅谈虚拟现实技术的发展现状[J]. *科研信息化技术与应用*, 2017, 8(5):74-79. DOI: 10.11871/j.issn.1674-9480.2017.05.010.
- [26] Guo ZT. A brief discussion on the development of virtual reality technology[J]. *E-science Technology & Application*, 2017, 8(5):74-79. DOI: 10.11871/j.issn.1674-9480.2017.05.010.
- [27] Lynn MH, Luo G, Tomasi M, et al. Measuring virtual reality headset resolution and field of view: implications for vision care applications[J]. *Optom Vis Sci*, 2020, 97(8):573-582. DOI: 10.1097/OPX.0000000000001541.
- [28] 张为忠, 许艳凤. 晕屏和晕车一样吗? VR 晕屏症诱发机制与影响因素[J]. *人类工效学*, 2021, 27(2):70-75. DOI: 10.13837/j.issn.1006-8309.2021.02.0012.
- [29] Roettl J, Terlutter R. The same video game in 2D, 3D or virtual reality - how does technology impact game evaluation and brand placements? [J/OL]. *PLoS One*, 2018, 13(7):e0200724 [2025-08-20]. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30028839/. DOI: 10.1371/journal.pone.0200724.
- [30] Park S, Lee G. Full-immersion virtual reality: adverse effects related to static balance[J]. *Neurosci Lett*, 2020, 733:134974. DOI: 10.1016/j.neulet.2020.134974.
- [31] Chen Y, Wu Z. A review on ergonomics evaluations of virtual reality [J]. *Work*, 2023, 74(3):831-841. DOI: 10.3233/WOR-205232.
- [32] Flores A, Linehan MM, Todd SR, et al. The use of virtual reality to facilitate mindfulness skills training in dialectical behavioral therapy for spinal cord injury: a case study[J]. *Front Psychol*, 2018, 9:531. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00531.
- [33] Kassutto SM, Baston C, Clancy C. Virtual, augmented, and alternate reality in medical education: socially distanced but fully immersed[J]. *ATS Sch*, 2021, 2(4):651-664. DOI: 10.34197/ats-scholar.2021-0002RE.
- [34] Iskander M, Ogunsola T, Ramachandran R, et al. Virtual reality and augmented reality in ophthalmology: a contemporary prospective[J]. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*, 2021, 10(3):244-252. DOI: 10.1097/APO.0000000000000409.
- [35] Ford TJ, Buchanan DM, Azeez A, et al. Taking modern psychiatry into the metaverse: integrating augmented, virtual, and mixed reality technologies into psychiatric care[J]. *Front Digit Health*, 2023, 5:1146806. DOI: 10.3389/fdgh.2023.1146806.
- [36] Grøndum K, Heijl A, Bengtsson B. A comparison of glaucoma patients identified through mass screening and in routine clinical practice[J]. *Acta Ophthalmol Scand*, 2002, 80(6):627-631. DOI: 10.1034/j.1600-0420.2002.800613.x.
- [37] Tang J, Liang Y, O'Neill C, et al. Cost-effectiveness and cost-utility of population-based glaucoma screening in China: a decision-analytic Markov model[J/OL]. *Lancet Glob Health*, 2019, 7(7):e968-e978 [2025-08-20]. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31122906/. DOI: 10.1016/S2214-109X(19)30201-3.

(收稿日期:2025-08-25 修回日期:2026-02-02)

(本文编辑:施晓萌)