

· 综 述 ·

基于虚拟现实技术的视功能评估与重建

李姬静 综述 袁进 审校

中山大学中山眼科中心 眼科学国家重点实验室 广东省眼科视觉科学重点实验室, 广州 510060

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

【摘要】 虚拟现实(VR)是一种可以创建和体验虚拟三维场景的计算机仿真系统,能够为用户提供多感官信息。近年来,随着5G、人工智能、大数据、云计算等技术的快速发展,VR技术在眼科领域的应用迎来了新的机遇和挑战。在视力、调节功能、立体视等视功能评估方面,VR结合红外眼动跟踪、双眼分视、人机交互等技术能够完全控制呈现给用户的画面,为实现个性化、自动化诊断提供了可能,并能够有效降低人力成本。在斜视、弱视诊疗方面,VR再结合其环境沉浸性、三维成像等技术,能够为用户提供丰富的画面,减少了斜视眼位测量、弱视眼抑制量化上的检测技术难度;并可以通过模仿斜视聚散训练、弱视知觉训练等范式,提高斜视正位训练、弱视知觉训练和立体视训练的趣味性和依从性。增强现实技术与计算机生成的视觉增强、全息成像、三维音频提示和自适应光学相结合,可有效弥补低视力人群的视觉缺损,提高其生活质量。在近视防控领域,VR技术的利弊目前尚有争议,但仍具备潜在的应用价值。本文就虚拟(增强)现实技术在视功能评估与重建中的应用现状进行综述,并对其可能面临的挑战进行分析,以期推动医工融合在眼科诊疗领域的发展。

【关键词】 虚拟现实; 视觉; 斜视; 弱视; 近视; 低视力; 立体视; 视功能评估; 视功能训练

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2019B010152001); 广州市科技创新发展专项项目(202103000043)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20210924-00534

Evaluation and reconstruction of visual function based on virtual reality technology

Li Jijing, Yuan Jin

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

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

【Abstract】 Virtual reality (VR) is a computer simulation system that can create and let users experience three-dimensional virtual scenes, and can provide users with multi-sensory information. In recent years, with the rapid development of 5G, artificial intelligence, big data and cloud computing, the application of VR technology in the field of ophthalmology has ushered in new opportunities and challenges. In terms of visual function assessment such as visual acuity, accommodative function, stereoscopic vision, VR combined with infrared eye tracking, binocular dichoptic vision and human-computer interaction can fully control the content presented to user, and provide the possibility to achieve personalized and automated diagnosis, which can effectively reduce labor costs. In the diagnosis and treatment of strabismus and amblyopia, VR combined with the above technologies and environmental immersion, three-dimensional imaging can provide users with rich images, reducing the difficulty of eye position measurement in strabismus and inhibition quantification in amblyopia. VR improves the fun and compliance of strabismus training, amblyopia training and stereoscopic training by imitating training paradigms such as convergence insufficiency training and visual perception training. The combination of augmented reality technology and computer-generated visual enhancement, holographic imaging, three-dimensional audio prompts and adaptive optics can effectively compensate for the visual defects of people with low vision and improve their quality of life. In the field of myopia prevention and control, the pros and cons of VR are still controversial, but it still has potential application value. In this article, the application status of virtual (augmented) reality technology in the assessment and reconstruction of visual function were reviewed, and the challenges it may face were analyzed, with a view to promoting the combination of medicine and engineering in ophthalmology diagnosis and treatment.

[Key words] Virtual reality; Vision, ocular; Strabismus; Amblyopia; Myopia; Vision, low; Stereoscopic vision; Visual function evaluation; Visual function training

Fund program: Guangdong Province Key Research & Development Programme (2019B010152001); Guangzhou Science and Technology Innovation Development Special Project (202103000043)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20210924-00534

虚拟现实技术(virtual reality, VR)又称虚拟环境或人工环境,是指利用计算机生成一种可对参与者直接施加视觉、听觉和触觉感受,并允许其交互地观察和操作虚拟世界的技术,具有沉浸性、交互性和构想性 3 个特点^[1]。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 通过生成虚拟的三维场景,使用户全方位获取该虚拟场景中的相关信息^[2],近年来在视功能评估与重建研究领域显示了重要的应用前景。本文就虚拟(增强)现实技术在视功能评估与重建中的应用现状进行综述,并对其可能面临的挑战进行分析。

1 VR 技术辅助的视功能检查

视功能是人类视觉系统完成一定视觉任务的能力,视功能检查主要包括视觉心理物理学检查(如视力、视野、色觉、调节-集合、立体视觉)和视觉电生理检查两类。视功能评估是建立眼健康的前提和基础,目前视功能筛查场景中,对视力的分析常采用国际标准视力表或对数视力表进行远视力检查,对于高级视功能的检查常采用 Worth 四点灯、马氏杆、立体视本、同视机等设备,需要检查者与患者之间的配合,耗时耗力、效率较低,且部分检查对操作者的技术要求较高,在大范围筛查中应用受限。

VR 技术采用红外眼动跟踪技术,利用红外光源对人眼瞳孔和虹膜进行精确区分并实时检测瞳孔中心位置来识别使用者的视线方向及注视点^[3]。在使用者自然移动的情况下,也能完全控制不同眼别呈现的画面^[4],再结合人机交互的特性,应用至视力及视功能筛查中,可以对不同眼别进行相应的眼部客观体征检查,具有实现自动化筛查评估的潜力。

在验光检查方面,Pujol 等^[5]搭建了基于 VR 技术的主观验光设备,利用红外眼动跟踪技术向被测眼投射不同大小的视标,对侧眼仅呈现背景画面,根据被检者在输入端反馈看清与否来自动切换视标,最终得出用户的主观验光结果。在调节功能检查方面,Goyal 等^[6]在头戴式 VR 显示设备中添加平面反射镜,通过编程将标准视力表投射到距离被检眼不同距离处,根据被检者在输入端反馈的视标开口方向准确与否,确定单眼的调节近点和调节远点,最终得出被检者的调节幅度。Li 等^[7]研发的裸眼 3D 多级视功能筛查设备则是基于时空复用方式的指向背光显示技术,将投射至左眼或右眼图像的背光源交替开启,与显示屏的刷新速率同步,利用人眼视觉暂留效应使双眼舒适地观看到不同图像,以此在大脑中形成立体效果,不仅可用于评估视力、色觉、双眼平衡,还可以定量评估被检者的立体视功能。这些基于 VR 技术的视功能检查系统都已被证实与临床技术人员的检查结果一致性高、重复性好,并且其人机交互

性能减少了检查者与被检者配合中的误差,减少了人力成本和场地的使用,有望应用于大范围的视功能筛查中。

2 VR 技术辅助的斜视眼位测量与矫正

斜视指两眼不能同时注视目标,属眼外肌疾病,我国斜视患病率约为 3%^[8],斜视患者不仅视功能受到损害,其外观问题也会对患者造成社会心理影响,斜视眼位的定量评估在治疗方案的制定中扮演着重要角色。目前临床上斜视患者的眼位偏斜度数多采用三棱镜加交替遮盖试验进行测量,三棱镜的使用和眼位判定存在一定的主观性,对检查者的技能要求高,需要被检者的高度配合,婴幼儿患者测量难度较大。头戴式 VR 显示设备能够在斜视眼和健康眼交替开关画面,提供暗环境下的远、近距离注视目标,吸引患者的视线,模拟遮盖试验,联合瞳孔跟踪技术,追踪眼球的运动轨迹,通过直接测量眼球运动角度及添加三棱镜反馈校准眼位的方式客观、准确地自动量化眼位偏斜程度^[9-10]。

对于非共同性斜视患者,临床上还会采用 Hess 屏或 Lees 屏等对功能不足或过强的肌肉进行定量检查,但结果的准确性往往会受到操作误差或患者检查过程中头部不固定的影响。VR 头戴式显示设备能够完全控制照明和患者交互时呈现的目标,消除头部不固定的干扰。Nesaratnam 等^[11]采用 VR 显示技术对有正常视网膜对应的非共同性斜视患者进行斜视定性和定量检查,检测得出的患者水平及垂直方向的偏斜角度与 Lees 屏一致。基于 VR 的斜视眼位测量减小了测量难度,有望更高效地为斜视治疗提供指导建议。

关于斜视患者的治疗,临床上一般采用手术调整眼外肌的方式进行眼位矫正,而对于未达到手术指征、眼位偏斜度数较小的患者可采用斜视矫正训练。目前的训练方法,如笔尖训练等,较为单调,患者依从性差。VR 的高度仿真性和三维场景的构建能够大大提高训练的沉浸感,如 Cepeda-Zapata 等^[12]利用 VR 的高度仿真性,将传统的斜视训练,如 Brock 索、视远视近训练和分开集合功能训练等搭载在 VR 设备中,使训练更具有吸引力和娱乐性。另外,Godinez 等^[13]和 Li 等^[14]则通过构建的交互式三维虚拟环境,诱导斜视患者进行双眼视物,提高神经系统对双目视觉的适应水平。正常人在视物时,双眼产生的视差可以诱导辐辏,但斜视患者的视差太大而超出了融合范围。基于双眼分视系统的 VR 技术通过放大斜视眼的视觉信号,使患者识别复视并反向抑制,增强中枢控制,从而刺激眼位矫正^[14]。基于 VR 的眼正位训练与传统训练相比提供了更丰富的训练元素,能够更好地提高患者的依从性。

3 VR 技术辅助的弱视眼间抑制评估与视功能重建

3.1 VR 与弱视眼间抑制量化评估

弱视是在视觉发育期由于异常视觉经验引起的单眼或双眼最佳矫正视力 (best corrected visual acuity, BCVA) 低于相应年龄视力;或双眼视力相差 2 行及以上,视力较低眼为弱视,我国弱视检出率可高达 11.8%^[15-16]。弱视眼与非弱视眼的间抑制作用是弱视发生和发展的重要机制^[17],而目前临床上对于间抑制的评估通常采用 Worth 四点灯、线状镜等进行定性测量,无法量化间抑制程度。VR 的双眼分视系统能够向双眼定向投射不同的画面,在间抑制的测量上占据优势。Black 等^[18-19]通过双眼分视系统向弱视患者的弱视眼给予高对比度刺激,而非弱视眼给予变化的对比度刺激,患者在执行简单的信号/噪声任务时,测量兴奋性双眼相互作用的强度。当双眼没有对比度差异时,就达到了双眼平衡状态,此时双眼视觉刺激强度之差就是间抑制程度。这种基于 VR 的间抑制量化技术方便、快速,能够为临床医师制定弱视双眼治疗方案提供更好的指导。

3.2 VR 与弱视知觉学习

对于弱视治疗,传统采用遮盖非弱视眼的方法来提高弱视眼视力,但这种方法往往依从性不高,长期遮盖也可能使弱视儿童产生社会心理问题,且对于超过视觉敏感期的弱视人群效果不佳。知觉学习是治疗弱视的有效手段,不仅对于视觉发育敏感期的弱视儿童作用突出,对于成人同样具有可塑性,其通过特定的视知觉任务训练,例如光栅察觉、方向位置辨认、图形轮廓辨认等,使视觉系统对外界信息感知能力显著提高^[20]。除了可以引起初级视皮层的改变外,还能够引起额叶、顶叶、颞叶等高级脑区的变化,使得双眼视功能的重建稳定而持久^[21-22]。

VR 如今也成为一种安全、有效的神经重塑治疗的搭载工具^[23],以 VR 为基础的神经营养治疗可以有效地诱导大脑皮层重组^[24],促进不同年龄层不同神经元连接的激活^[25-28]。Keller 等^[29]研究发现,10 例获得性脑损伤患者在经过 10 周的 VR 交互性治疗后,基于体素对 T1 加权的脑 MRI 图像进行分析发现,海马尾部、左侧尾状核、侧扣带区、中央沟深部和视皮层灰质体积增加,说明在 VR 治疗下,受损的大脑区域可以发生新皮层的重组。因此,推测将 VR 技术与知觉学习相结合,为弱视患者提供沉浸式的交互式知觉训练,有可能更好地提高弱视人群视皮层功能及视功能水平。

在 VR 知觉学习提高大龄弱视患者视力和视功能方面,Ziak 等^[30]在对 17 例平均年龄 31.2 岁 (17~69 岁) 的屈光参差性弱视患者利用 Oculus Rift OC DK2 VR 头戴式显示器进行 8 次 40 min 的双眼知觉训练后,发现视力和立体视均有显著改善,弱视眼的平均 BCVA 由 (0.58 ± 0.35) LogMAR 提高到 (0.43 ± 0.38) LogMAR,立体视锐度由 (263.3 ± 135.1) 降至 (176.7 ± 152.4) ,证实了 VR 知觉学习在治疗成人弱视中的作用。虽然目前还没有直接证据证明基于 VR 的知觉学习优于传统 2D 平台的学习,但 VR 通过提高场景真实性和沉浸感,利用云端大数据适时调整任务参数,可实现个性化的针对训练,提高患者的依从性,有望更有效地提高弱视人群的视皮层功能。

3.3 VR 与立体视训练

立体视受损是指由于双眼视功能的破坏导致不能正确分辨所观察景物远近距离,无法具有三维空间感,是弱视常见的双眼视功能障碍之一。以往采用的同视机立体画片训练操作复杂,精准度不高,缺乏交互性,较为单调和枯燥。VR 技术通过双眼分视系统对用户双眼投射不同视差的图像,以此形成不同的景深,这种三维成像的特性为立体视训练提供了技术支持。Vedamurthy 等^[31]设计的“压虫游戏”是针对立体视的 VR 训练软件,利用 3D 快门眼镜达到双眼分视,使用者双眼分别看到“小虫”视标的不同部分,通过改变单眼所视的背景画面纹理扭曲度或双眼接收图像的视差来让使用者识别立体的“小虫”视标,并用圆柱体击打。根据击打正确与否,不断调整单眼和双眼视觉线索的相对权重,逐步增强患者的立体视觉,结果显示大多数患者训练中双眼视差造成的立体深度感知能力逐渐增强,立体视锐度降低。VR 三维场景的搭建对立体视的训练具备独特的优势,操作简单而有趣味性,并且能更好地控制训练精度,提高弱视患者的立体视训练效果。

4 虚拟(增强)现实技术在低视力人群中的视觉辅助增强

目前青光眼、老视等低视力人群采用的视力辅助设备一般分为光学助视器和电子助视器,能在一定程度上帮助患者提高视觉质量,但存在成像质量不足、缩放倍率有限、手持设备不稳定且使用场景较为固定等问题。AR 技术利用图像增强、全息成像、添加音频提示以及自适应光学等技术,辅助不同程度视觉损伤的低视力人群充分利用残余视力,弥补视觉缺陷,提高低视力人群的生活质量。

AR 技术能够将计算机生成的虚拟元素叠加在真实世界中,通过对图像的处理,例如放大或缩小、增加对比度和图像边缘强度、改变颜色等方式,优化中心视力或夜视力^[32-39],利用视觉提示突出物体或引导患者视线,缩短患者视物的搜索时间,提高搜索精度。Coughlan 等^[40]研发的 Augmented Reality for Visual Impairment (AR4VI) 系统将增强的视觉信息与空间位置紧密耦合,形成多种图像增强应用,如 Brighter、Bigger、Super Vision 等。eSight 和 OxSight 一类的头戴式设备可以直接将增强的图像直接送到视野范围内,并且还拥有图层渲染场景、突出重要前景特征等更高层次功能^[41]。

AR 技术还可以通过添加全息图像来增强现实世界中的人和自然环境,呈现给患者视野中缺失的线索。例如,一些近眼显示器和视网膜投影等头戴式设备能够让患者在保持习惯的中央视力的同时看到外围的微缩图像^[42],使周围视野缺损的患者行动更加方便,减少跌倒发生的风险。

同时,AR 技术可以结合视觉反馈,通过三维空间或听觉的呈现来提供真实世界体验^[40]。一些头戴式显示设备能够以音频或其他非视觉形式向患者做出提示,例如 OrCam 设备在患者将手指指向感兴趣文本区域时,系统可读出文本内容^[42],以此辅助低视力人群进行工作或学习。

此外,对于屈光不正或正视人群视远视近时产生的焦点变化,Padmanaban 等^[43]通过计算机光学适应能够自动校正使用

者配戴 VR 近眼显示设备时的焦距,跟随使用者的视线产生自然的焦点变化,提高了用户的视觉质量,也为低视力人群对比敏感度和深度觉等视功能的提高提供了潜在的可能性。将 AR 技术与计算机生成的图像增强、全息成像、音频提示和自适应光学相结合,有望提供非侵入性的视觉模拟效果,极大地改善低视力人群的生活质量。

5 VR 技术在近视防控中的应用潜力

近视是指眼在调节放松状态下,平行光线进入眼内后聚焦在视网膜之前的状态,是患病率较高的慢性眼病之一,东亚和东南亚的近视患病率高达 80%~90%^[44]。目前临床上常通过使用低浓度阿托品滴眼液、配戴角膜塑形镜等方式来防控近视的发生和发展,但近视的发生和发展尚未得到完全控制,防控近视相关的治疗手段还有待进一步发掘。VR 基于其高度仿真、眼球追踪、多焦点显示等特点使其在近视防控中具备一定的应用潜力,但同时由于观看时调节-辐辏冲突的存在可能会诱导视疲劳等症状。

Munsamy 等^[45]研究发现,42 名 18~30 岁正常成年人在观看 25 min Samsung Gear VR 设备后,调节-辐辏的灵活度提高,人眼的调节-辐辏功能有所改善。Turnbull 等^[46]研究发现,19 名 18~35 岁低度近视人群在观看 40 min Oculus Rift DK2 设备后,双眼屈光度、远近隐斜、注视稳定性、调节幅度和立体视等虽无明显差异,但脉络膜显著增厚,这可能是由于观看时的调节-辐辏冲突产生近视性离焦,或者是由于头戴式设备的产热使脉络膜血流加快使其暂时增厚。此外,Turnbull 等^[47]研究发现,20 名 20~40 岁的 IT 人员进行 40 min 的 VR 观看后,泪膜脂质层厚度增加,稳定性得到显著改善。这些研究结果提示,VR 可能可以改善人眼调节功能,控制近视的发生和发展,改善干眼等视疲劳症状。

另一方面,也有研究发现观看 VR 视频会导致近视、视疲劳、一过性调节性斜视、视频终端综合征等功能性眼病^[48]。Ha 等^[49]研究发现,60 名 13~18 岁屈光度为(-3.1±2.6)D 的青少年在观看 VR 设备 30 min 后,部分人会发生短暂的近视性改变,但经过 40 min 休息后可以完全恢复。并且,Yoon 等^[50]研究发现,在 58 名 20~39 岁的轻中度近视人群中,使用 2 h Samsung Gear VR 头戴式设备后,屈光度和脉络膜厚度均无明显变化,但调节近点、集合近点、立体视锐度、外斜度数等增加,且主观视疲劳症状加重。推测其发生机制是由于 VR 显示设备本身处于同一个平面,观看时通过相同的调节使物体落在视网膜上,通过不同的辐辏角来形成不同的深度感知,辐辏角相比自然条件下观看具有更高的变异性,辐辏负荷增加^[51],以此形成的调节-辐辏冲突会导致视觉疲劳,进而导致近视的发生和发展。

关于 VR 对近视及视疲劳的影响,不同研究得出了不同结论,这可能与观看的设备、时长以及观看人群的年龄、屈光状态有关。如果观看设备存在分辨率较低、视野小等问题可能会增加主观视疲劳症状,也可能造成形觉剥夺的效果,加重近视的发生。长时间(2 h)的 VR 视频观看可能更容易造成视疲劳等

不利影响,短时间(25~45 min)的观看则可能会改善调节-辐辏灵活度,有利于延缓近视,在轻度近视成年人中可能会带来更多有利的影响。

目前,关于 VR 对近视的影响尚存在争议,但 VR 独有的技术优势使其在近视防控中也具备一定的发展潜力。未来,VR 利用眼球追踪技术使观看者中心视野清晰,而周边视网膜产生近视离焦,再结合 VR 的高度仿真性控制光照和光谱成分,模拟户外光照条件,可能可以用于控制眼轴的增长^[52]。此外,VR 也可以通过采用不同的焦面显示技术来模拟视远视近的活动,使睫状肌得到拉伸训练,改善调节功能,从而延缓近视的发生和发展。

6 VR 技术存在的不足

VR 已经在视功能评估、训练、助视等方面取得了一定的研究成果,未来具有很大的发展潜力,但目前还存在一定的不足,如 VR 技术的软硬件性能还未完全满足临床应用的需求;VR 设备的操作界面不够友好,人机交互性能较弱,三维结构信息的呈现分辨率较低,效果不够理想;低视力人群在使用 AR 设备时的移动便捷性上仍需改进,使用过程中的安全性还需进一步探讨,设备的电量续航问题也有待解决等。

另外,VR 设备在使用过程中还存在一些安全隐患未得到完全解决。头戴式 VR 显示设备若在运行过程中过度发热,可能会对眼部健康带来不利影响。长时间使用 VR 设备可能会使部分使用者产生头晕、恶心等不适症状,甚至会出现短时间内的平衡感下降,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。在使用时进行双目的光学矫正或提高视觉与真实运动状态的一致性可能可以减少这种晕动症状^[53-54]。

VR 设备应用于临床的规范性还需要进一步加强。与以往的 2D 设备视觉呈现不同,VR 的三维成像效果改变了使用者的用眼习惯,对视觉的影响可能是双面的。因此,关于 VR 对健康的影响还需更为详细的评估,需要大样本、多中心的随机对照试验来进行临床验证。在诊治不同类型、年龄和程度的眼病患者时,对 VR 设备的刺激参数、治疗时长、治疗频率等方面需要更加详细、科学的定义,规范筛查手段和治疗方案,并且相关的法律法规及伦理规范也需要进一步完善。

7 总结与展望

VR 利用其双眼分视、瞳孔追踪、模拟仿真、人机交互等技术优势在视功能评估、斜弱视训练、低视力康复、近视防控等领域有着广泛应用和发展潜力,能够极大地降低眼科诊疗中的人力成本,推动自动化诊疗的发展。未来,将 VR 技术与 5G、云端及人工智能等技术相结合^[55],进一步提升人机交互的智能化水平,有望形成大规模的自动化诊疗数据库。再将 VR 技术拓宽应用于模拟手术^[56]等多个医学领域,建立全景式的虚拟交互医学体系,为眼科学的发展带来突破性的改革。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Mitrousa V, Giotakos O. Virtual reality therapy in anxiety disorders [J]. *Psychiatriki*, 2016, 27 (4) : 276–286. DOI: 10. 22365/jpsych. 2016. 274. 276.
- [2] 赵峰, 任彦新. 虚拟现实及增强现实技术在眼视光学的研究进展 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2018, 20 (7) : 445–448. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1674-845X. 2018. 07. 011.
Zhao F, Ren YX. Progress of virtual reality and augmented reality and its effect on the optometric field [J]. *Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci*, 2018, 20 (7) : 445–448. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1674-845X. 2018. 07. 011.
- [3] Carter BT, Luke SG. Best practices in eye tracking research [J]. *Int J Psychophysiol*, 2020, 155 : 49–62. DOI: 10. 1016/j. ijpsycho. 2020. 05. 010.
- [4] Clay V, König P, König S. Eye tracking in virtual reality [J/OL]. *J Eye Mov Res*, 2019, 12 (1) : 10. 16910/jemr. 12. 1. 3 [2021–09–20]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33828721/>. DOI: 10. 16910/jemr. 12. 1. 3.
- [5] Pujol J, Ondategui-Parra JC, Badiella L, et al. Spherical subjective refraction with a novel 3D virtual reality based system [J]. *J Optom*, 2017, 10 (1) : 43–51. DOI: 10. 1016/j. optom. 2015. 12. 005.
- [6] Goyal A, Bopadikar A, Tiwari VN. Estimation of spherical refractive errors using virtual reality headset [J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2018, 2018 : 4973–4976. DOI: 10. 1109/EMBC. 2018. 8513209.
- [7] Li X, Zhong J, Wang Y, et al. Rapid, accurate, multifunctional and self-assisted vision assessment and screening with interactive desktop autostereoscopy [J/OL]. *Ann Transl Med*, 2021, 9 (1) : 23 [2021–09–20]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33553316/>. DOI: 10. 21037/atm-20-3555.
- [8] 中华医学会眼科学分会斜视与小儿眼科学组. 我国斜视分类专家共识 (2015 年) [J]. *中华眼科杂志*, 2015, 51 (6) : 408–410. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 0412-4081. 2015. 06. 003.
- [9] Yeh PH, Liu CH, Sun MH, et al. To measure the amount of ocular deviation in strabismus patients with an eye-tracking virtual reality headset [J/OL]. *BMC Ophthalmol*, 2021, 21 (1) : 246 [2021–09–01]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8178882/>. DOI: 10. 1186/s12886-021-02016-z.
- [10] Miao Y, Jeon JY, Park G, et al. Virtual reality-based measurement of ocular deviation in strabismus [J/OL]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2020, 185 : 105132 [2021–09–01]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169260719309733?via%3Dihub>. DOI: 10. 1016/j. compb. 2019. 105132.
- [11] Nesaratnam N, Thomas P, Vivian A. Stepping into the virtual unknown: feasibility study of a virtual reality-based test of ocular misalignment [J]. *Eye (Lond)*, 2017, 31 (10) : 1503–1506. DOI: 10. 1038/eye. 2017. 97.
- [12] Cepeda-Zapata LK, Romero-Soto FO, Diaz de Leon VA, et al. Implementation of a virtual reality rendered in portable devices for strabismus treatment based on conventional visual therapy [J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2019, 2019 : 7189–7192. DOI: 10. 1109/EMBC. 2019. 8857222.
- [13] Godínez A, Martín-González S, Ibarrondo O, et al. Scaffolding depth cues and perceptual learning in VR to train stereovision: a proof of concept pilot study [J/OL]. *Sci Rep*, 2021, 11 (1) : 10129 [2021–09–20]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33980895/>. DOI: 10. 1038/s41598-021-89064-z.
- [14] Li X, Yang C, Zhang G, et al. Intermittent exotropia treatment with dichoptic visual training using a unique virtual reality platform [J]. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, 2019, 22 (1) : 22–30. DOI: 10. 1089/cyber. 2018. 0259.
- [15] 中华医学会眼科学分会斜视与小儿眼科学组, 中国医师协会眼科医师分会斜视与小儿眼科学组. 中国儿童弱视防治专家共识 (2021 年) [J]. *中华眼科杂志*, 2021, 57 (5) : 336–340. DOI: 10. 3760/cma. j. cn112142-20210109-00014.
- Chinese Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus, Pediatric Ophthalmology and Strabismus Group of Chinese Ophthalmologist Association. Expert consensus on prevention and treatment of amblyopia in children [J]. *Chin J Ophthalmol*, 2021, 57 (5) : 336–340. DOI: 10. 3760/cma. j. cn112142-20210109-00014.
- [16] 中华医学会眼科学分会斜视与小儿眼科学组. 弱视诊断专家共识 (2011 年) [J]. *中华眼科杂志*, 2011, 47 (8) : 768. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 0412-4081. 2011. 08. 027.
- [17] Birch EE. Amblyopia and binocular vision [J]. *Prog Retin Eye Res*, 2013, 33 : 67–84. DOI: 10. 1016/j. pretyeres. 2012. 11. 001.
- [18] Black JM, Thompson B, Maehara G, et al. A compact clinical instrument for quantifying suppression [J/OL]. *Optom Vis Sci*, 2011, 88 (2) : E334–343 [2021–09–21]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21169875/>. DOI: 10. 1097/OPX. 0b013e318205a162.
- [19] Black JM, Hess RF, Cooperstock JR, et al. The measurement and treatment of suppression in amblyopia [J/OL]. *J Vis Exp*, 2012, (70) : e3927 [2021–09–21]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23271400/>. DOI: 10. 3791/3927.
- [20] 谢龙堂, 毕宏生. 视知觉学习的发展与运用 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2021, 23 (2) : 156–160. DOI: 10. 3760/cma. j. cn115909-20191111-00300.
- Xie LT, Bi HS. The development and application of visual perceptual learning [J]. *Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci*, 2021, 23 (2) : 156–160. DOI: 10. 3760/cma. j. cn115909-20191111-00300.
- [21] van Kerkoerle T, Marik SA, Meyer Zum Alten Borgloh S, et al. Axonal plasticity associated with perceptual learning in adult macaque primary visual cortex [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2018, 115 (41) : 10464–10469. DOI: 10. 1073/pnas. 1812932115.
- [22] Seitz AR. Perceptual learning [J/OL]. *Curr Biol*, 2017, 27 (13) : R631–R636 [2021–09–21]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28697356/>. DOI: 10. 1016/j. cub. 2017. 05. 053.
- [23] Coco-Martin MB, Piñero DP, Leal-Vega L, et al. The potential of virtual reality for inducing neuroplasticity in children with amblyopia [J/OL]. *J Ophthalmol*, 2020, 2020 : 7067846 [2021–09–04]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7341422/>. DOI: 10. 1155/2020/7067846.
- [24] Cano Porras D, Siemonsma P, Inzelberg R, et al. Advantages of virtual reality in the rehabilitation of balance and gait: systematic review [J]. *Neurology*, 2018, 90 (22) : 1017–1025. DOI: 10. 1212/WNL. 0000000000005603.
- [25] Prochnow D, Bermúdez i Badia S, Schmidt J, et al. A functional magnetic resonance imaging study of visuomotor processing in a virtual reality-based paradigm: rehabilitation gaming system [J]. *Eur J Neurosci*, 2013, 37 (9) : 1441–1447. DOI: 10. 1111/ejn. 12157.
- [26] You SH, Jang SH, Kim YH, et al. Cortical reorganization induced by virtual reality therapy in a child with hemiparetic cerebral palsy [J]. *Dev Med Child Neurol*, 2005, 47 (9) : 628–635.
- [27] Gatica-Rojas V, Méndez-Rebolledo G. Virtual reality interface devices in the reorganization of neural networks in the brain of patients with neurological diseases [J]. *Neural Regen Res*, 2014, 9 (8) : 888–896. DOI: 10. 4103/1673-5374. 131612.
- [28] You SH, Jang SH, Kim YH, et al. Virtual reality-induced cortical reorganization and associated locomotor recovery in chronic stroke: an experimenter-blind randomized study [J]. *Stroke*, 2005, 36 (6) : 1166–1171. DOI: 10. 1161/01. STR. 0000162715. 43417. 91.
- [29] Keller J, Štětkařová I, Macri V, et al. Virtual reality-based treatment for regaining upper extremity function induces cortex grey matter changes in persons with acquired brain injury [J/OL]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020, 17 (1) : 127 [2021–09–06]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7488738/>. DOI: 10. 1186/s12984-020-00754-7.
- [30] 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/OL]. *BMC Ophthalmol*, 2017, 17 (1) : 105 [2021–09–06]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5490155/>. DOI: 10. 1186/s12886-017-0501-8.



- [31] Vedamurthy I, Knill DC, Huang SJ, et al. Recovering stereo vision by squashing virtual bugs in a virtual reality environment [J/OL]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2016, 371 (1697) : 20150264 [2021-09-06]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4901458/>. DOI: 10.1098/rstb.2015.0264.
- [32] Htike HM, Margrain TH, Lai YK, et al. Ability of head-mounted display technology to improve mobility in people with low vision: a systematic review [J/OL]. *Transl Vis Sci Technol*, 2020, 9 (10) : 26 [2021-09-10]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7521174/>. DOI: 10.1167/tvst.9.10.26.
- [33] Peli E, Woods RL. Image enhancement for impaired vision: the challenge of evaluation [J]. *Int J Artif Intell Tools*, 2009, 18 (3) : 415-438. DOI: 10.1142/S0218213009000214.
- [34] Vargas-Martín F, Peli E. Augmented-view for restricted visual field: multiple device implementations [J]. *Optom Vis Sci*, 2002, 79 (11) : 715-723. DOI: 10.1097/00006324-200211000-00009.
- [35] Satgunam P, Woods RL, Luo G, et al. Effects of contour enhancement on low-vision preference and visual search [J/OL]. *Optom Vis Sci*, 2012, 89 (9) : E1364-1373 [2021-09-10]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3429700/>. DOI: 10.1097/OPX.0b013e318266f92f.
- [36] Angelopoulos AN, Ameri H, Mitra D, et al. Enhanced depth navigation through augmented reality depth mapping in patients with low vision [J/OL]. *Sci Rep*, 2019, 9 (1) : 11230 [2021-09-21]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31375713/>. DOI: 10.1038/s41598-019-47397-w.
- [37] Hwang AD, Peli E. An augmented-reality edge enhancement application for google glass [J]. *Optom Vis Sci*, 2014, 91 (8) : 1021-1030. DOI: 10.1097/OPX.0000000000000326.
- [38] Trese MG, Khan NW, Branham K, et al. Expansion of severely constricted visual field using google glass [J]. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*, 2016, 47 (5) : 486-489. DOI: 10.3928/23258160-20160419-15.
- [39] van Rheede JJ, Wilson IR, Qian RI, et al. Improving mobility performance in low vision with a distance-based representation of the visual scene [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2015, 56 (8) : 4802-4809. DOI: 10.1167/iovs.14-16311.
- [40] Coughlan JM, Miele J. AR4VI: AR as an accessibility tool for people with visual impairments [J]. *Int Symp Mix Augment Real*, 2017, 2017 : 288-292. DOI: 10.1109/ISMAR-Adjunct.2017.89.
- [41] Crossland MD, Starke SD, Imielski P, et al. Benefit of an electronic head-mounted low vision aid [J]. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2019, 39 (6) : 422-431. DOI: 10.1111/opo.12646.
- [42] Vargas-Martín F, Peli E. Augmented-view for restricted visual field: multiple device implementations [J]. *Optom Vis Sci*, 2002, 79 (11) : 715-723. DOI: 10.1097/00006324-200211000-00009.
- [43] Padmanaban N, Konrad R, Stramer T, et al. Optimizing virtual reality for all users through gaze-contingent and adaptive focus displays [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2017, 114 (9) : 2183-2188. DOI: 10.1073/pnas.1617251114.
- [44] Morgan IG, French AN, Ashby RS, et al. The epidemics of myopia: aetiology and prevention [J]. *Prog Retin Eye Res*, 2018, 62 : 134-149. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2017.09.004.
- [45] 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.
- [46] Turnbull P, Phillips JR. Ocular effects of virtual reality headset wear in young adults [J/OL]. *Sci Rep*, 2017, 7 (1) : 16172 [2021-09-16]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5701049/>. DOI: 10.1038/s41598-017-16320-6.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] Ha SG, Na KH, Kweon JJ, et al. Effects of head-mounted display on the oculomotor system and refractive error in normal adolescents [J]. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*, 2016, 53 (4) : 238-245. DOI: 10.3928/01913913-20160511-01.
- [50] Yoon HJ, Moon HS, Sung MS, et al. Effects of prolonged use of virtual reality smartphone-based head-mounted display on visual parameters: a randomised controlled trial [J/OL]. *Sci Rep*, 2021, 11 (1) : 15382 [2021-09-16]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8319184/>. DOI: 10.1038/s41598-021-94680-w.
- [51] Iskander J, Hossny M, Nahavandi S. Using biomechanics to investigate the effect of VR on eye vergence system [J/OL]. *Appl Ergon*, 2019, 81 : 102883 [2021-09-16]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31422246/>. DOI: 10.1016/j.apergo.2019.102883.
- [52] 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.
- [53] Bridgeman B, Blaesi S, Campusano R. Optical correction reduces simulator sickness in a driving environment [J]. *Hum Factors*, 2014, 56 (8) : 1472-1481. DOI: 10.1177/0018720814533992.
- [54] 蔡力, 翁冬冬, 张振亮, 等. 虚实运动一致性对虚拟现实晕动症的影响 [J]. *系统仿真学报*, 2016, 28 (9) : 1950-1956. Cai L, Weng DD, Zhang ZL, et al. Impact of consistency between visually perceived movement and real movement on cybersickness [J]. *J System Simulation*, 2016, 28 (9) : 1950-1956.
- [55] 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.
- [56] 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.

(收稿日期:2021-10-26 修回日期:2022-04-13)

(本文编辑:刘艳 施晓萌)

广告目录

瑞秀复(眼科用生物羊膜) 广州瑞泰生物科技有限公司……封二

同息通(曲安奈德注射液) 广东省医药进出口公司珠海公司……前插页

沃丽汀(卵磷脂络合碘片) 广东泰恩康医药股份有限公司……前插页

递法明片 惠州市百吉瑞医药有限公司……封三

迈达科技 天津迈达科技股份有限公司……封底



中华医学会杂志社
Chinese Medical Association Publishing House

版权所有 违者必究