

## 头戴式显示电子助视器在低视力康复中的应用

徐东野<sup>1</sup> 综述 戴锦晖<sup>2</sup> 审校

<sup>1</sup>复旦大学附属眼耳鼻喉科医院眼科,上海 200031;<sup>2</sup>复旦大学附属中山医院眼科,上海 200032  
通信作者:戴锦晖,Email:daijinhui8@126.com

**【摘要】** 随着社会老龄化的进展和低视力人群数量的增长,患者对低视力康复的需求也日益增加。头戴式显示(HMD)电子助视器是一种新型低视力助视器,可分为单眼式和双眼式、虚拟现实(VR)式和增强现实(AR)式等不同类型。HMD 电子助视器的性能在其发展和评估中十分重要,包括提高照度、对比度、分辨率和扩大视野等。VR 式助视器的分辨率更高,图像模式更丰富,可有效提高中心视力和对比敏感度,更适用于静态应用。AR 设备不遮挡患者的习惯视野,不破坏立体视觉,更适用于动态应用。随着近几年 VR 和 AR 显示技术的发展,HMD 电子助视器在功能性、轻便性和美观性上有了很大的进步。大部分 HMD 电子助视器的研究和应用对象是中心视力低下患者,HMD 电子助视器可以通过放大图像、增加照度和对比度、增强轮廓等策略提高患者视力、对比敏感度和阅读功能等。对于周边视野缺损的患者,HMD 电子助视器主要采取 VR 式设计,在不遮挡患者原有视野的同时明显扩展他们的视野。而 HMD 电子助视器对于周边视野缺损患者的日常活动,尤其是运动能力的改善效果仍需要进一步研究。本文总结了 HMD 电子助视器的类型、性能以及其在低视力患者中的应用进展。

**【关键词】** 低视力; 康复; 智能眼镜; 头戴式显示; 电子助视器

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(81970831); 上海市科委西医引导类项目(18411965000)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20211229-00724

### Application of electronic head-mounted display aids in low vision rehabilitation

Xu Dongye<sup>1</sup>, Dai Jinhui<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Ophthalmology, Eye & ENT Hospital Affiliated to Fudan University, Shanghai 200031, China;<sup>2</sup>Department of Ophthalmology, Zhongshan Hospital Affiliated to Fudan University, Shanghai 200032, China

Corresponding author: Dai Jinhui, Email: daijinhui8@126.com

**【Abstract】** As society ages and the number of people with low vision grows, the need for low vision rehabilitation for patients is increasing. The electronic head-mounted display (HMD) aids is a new type of low vision aids, which can be divided into different types such as monocular, binocular, virtual reality (VR) and augmented reality (AR). The performance of electronic HMD visual aids is important in their development and evaluation, including improved illumination, contrast ratio, resolution, and expanded vision field. VR devices have higher resolution and richer image modes, which can effectively improve central vision acuity and contrast sensitivity, and are more suitable for static applications. AR devices do not block the patients' habitual field of vision and do not destroy stereoscopic vision, which are more suitable for dynamic applications. With the development of VR and AR display technology in recent years, electronic HMD aids have made great progress in functionality, portability and aesthetics. In most of the research, the application population of electronic HMD aids are patients with low central vision. Electronic HMD aids can improve their visual acuity, contrast sensitivity and reading ability by enlarging pictures, improving illumination and contrast ratio and enhancing contour. For patients with peripheral visual field defects, electronic HMD aids, especially AR devices, can significantly expand their peripheral visual field without blocking original visual field. However, the improvement of electronic HMD aids on daily activities, especially athletic ability, needs further research. This article summarized the types, performance and application progress of electronic HMD aids in patients with low vision.

**【Key words】** Low vision; Rehabilitation; Smart glasses; Head-mounted display; Electronic aids

**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (81970831); Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (18411965000)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20211229-00724

低视力是指患者经过治疗或标准屈光矫正后仍有视功能损害,好眼最佳矫正视力 $<0.3$ 或视野半径 $<10^\circ$ ,但是仍能够或有潜力利用残留视力去安排和/或执行某项任务。据估计,至2015年,全球视力障碍患者共计约4.41亿,其中盲患者约3600万,患病率约为0.48%<sup>[1]</sup>。导致低视力的主要原因是未矫正的屈光不正、白内障、年龄相关性黄斑变性、青光眼、糖尿病视网膜病变等<sup>[2-3]</sup>。我国视力残疾患病率约为1.29%,其中 $\geq 60$ 岁的老人视力残疾患病率约为0.74%<sup>[4]</sup>。随着我国社会老龄化的发展,视力残疾人将越来越多。低视力康复的目标是通过使用低视力助视器、定向及运动训练、职业疗法以及教育干预等提高患者的视功能,并改善心理健康和健康相关生存质量。低视力康复过程中,个性化验配助视器是一个非常重要的环节。助视器能够帮助低视力患者充分利用其残存视力,提高患者的日常活动能力,改善患者的生活质量。现有的助视器包括光学助视器(如放大镜、望远镜、眼镜式助视器)、非光学助视器和电子助视器等。然而,传统的助视器大多只能应用于某一固定场景、固定距离,目前仍有15%~20%低视力患者无法通过现存的助视器获得助益<sup>[5]</sup>。助视器的进一步发展和革新对低视力康复技术的不断进步十分重要。头戴式显示(head-mounted display, HMD)是一种新型显示技术,1992年首次出现了将HMD应用于助视器的报道<sup>[6]</sup>。相比传统的固定式或手持式助视器,HMD电子助视器可以解放双手,适用于远、中、近多个距离,并且拥有多种助视模式,可以扩大视野,提高夜视力和视敏度等。近年来,随着摄像、图像处理和显示技术的飞速发展,HMD电子助视器在轻便性、美观性和功能性上也有了很大的进步。本文总结了HMD电子助视器的类型、性能以及其在低视力患者中的应用进展。

## 1 HMD 电子助视器的类型

根据视觉信息的传递方式,HMD电子助视器可以分为3类。第一类使用单目显示器,这类最易于设计和生产;第二类使用双眼画面相同的双目显示器,其相对单目显示更为复杂,但缺少立体视觉;第三类使用双眼画面不同的双目显示器,这类可以实现更好的立体感。

HMD电子助视器根据显示方式可分为虚拟现实(virtual reality, VR)以及增强现实(augmented reality, AR)设备。VR设备完全遮挡使用者的原有视野,使用者沉浸在模拟世界中,将现实环境经过处理或增强后进行呈现,更易于使用者识别。VR设备最重要的优势是视野范围很大( $>110^\circ$ );但其消除了使用者眼和真实环境的联系,需要较长时间的训练和适应,并且可能导致眩晕、视疲劳等问题<sup>[7]</sup>,不利于长时间使用。AR设备采用透明显示器,可以将增强信息插入实时画面,例如突出显示障碍物、对物体和人脸添加标签等。AR设备不遮挡患者的原始视野,患者仍可以通过眼球运动来观察周边视野,利于在活动时使用;其缺点在于显示视野范围普遍较小,因为大视野会导致镜片的体积增加和图像畸变等问题<sup>[8]</sup>。VR式助视器的分辨率更高,图像模式更丰富,可用于提高中心视力低下(central vision loss, CVL)患者的中心视力和对比敏感度,更适

用于阅读、看电视等静态应用。AR设备则更适于周边视野缺损(peripheral vision loss, PVL)患者和动态应用,因为其不遮挡患者的习惯视野,不破坏立体视觉。

## 2 HMD 电子助视器的性能

随着越来越多的头戴式助视器问世,HMD电子助视器的性能在其发展和评估中十分重要,包括提高照度、对比度、分辨率和扩大视野等。

### 2.1 提高照度和对比度

对比敏感度降低在低视力患者中很常见,患者经常有面部识别困难、运动和定向能力下降等问题<sup>[9]</sup>。人眼的对比敏感度和空间频率cut off值(视力)在一定范围内随着照度增加而提高,因此在一定范围内提高亮度有助于提高对比敏感度和视力<sup>[10]</sup>。在HMD技术中常用于提高对比度的策略包括对比度扩展、对比度反转、色彩和照度对比度替代等<sup>[11]</sup>。HMD助视器提高照度时使用自动增益控制,从而弥补不正常的明适应、暗适应、眩光恢复等。通过有选择性地扩展图像中照度梯度陡峭位置(也就是物体的边缘位置)的对比度,对物体边缘进行强化<sup>[12]</sup>,可以帮助低视力患者更好地识别物体。

### 2.2 提高分辨率

HMD电子助视器主要通过放大图像来弥补低视力患者视力的降低。合适的放大倍率和分辨率有助于提高CVL患者的视力。若HMD电子显示器的分辨率过低,会导致视物模糊和视疲劳。随着近些年来电子显示技术的不断发展,HMD电子助视器屏幕的分辨率也逐渐提高,例如eSight 3的像素达到 $1024 \times 728$ ,最大放大倍数为 $24\times$ ,可有效帮助CVL患者提高视力和对比敏感度<sup>[13]</sup>;Revosight的分辨率可达 $1920 \times 1080$ 。

### 2.3 扩大视野

目前,HMD电子助视器扩大视野的策略是将周边视野的缩小画面或轮廓实时地呈现在患者的残余视野内,从而使视野缺损的患者通过残余视野看到更大的范围。这种策略在VR和AR设备中均有实现。VR设备完全遮挡了患者的原有视野,而AR设备则将周边视野的信息与原有视野叠加,更有利于患者从事动态活动。视野缺损患者由于视野缩窄,独立活动受限,易发生危险,因此视野缺损患者的重要诉求之一是可以独立进行户外活动,这也使AR式设计成为视野扩大HMD电子助视器的更优选择。

### 2.4 不足点

HMD电子助视器在发展过程中性能不断提高,但仍有尚需完善的方面。由于实现双眼视差的设计复杂、影响因素多,目前双眼HMD电子助视器大部分双眼画面完全相同,缺少立体视。CVL、有中心暗点的患者固视能力差,目前HMD电子助视器缺乏精确的眼动追踪系统,使图像始终位于视网膜固定位置,便于注视<sup>[14-15]</sup>。此外,由于HMD电子助视器的摄像头随头部运动而运动,当图像放大模式为角性放大时,图像运动速率也成相应倍数放大,会增加晕动病和其他视觉不适的风险。相信随着立体视、眼动追踪系统、运动补偿等技术的发展,未来HMD电子助视器可以更好地提高低视力患者的独立活动能力。

### 3 HMD 电子助视器在 CVL 患者中的应用

在低视力康复的患者中,约 75% 的患者有 CVL<sup>[16]</sup>,因此大部分 HMD 电子助视器的研究对象是 CVL 患者。针对 CVL 患者的助视策略主要是通过放大图像,增加照度和对比度,增强轮廓,提高患者视力、对比敏感度和阅读能力等。HMD 电子助视器可以通过多种增强显示模式达到上述效果,并且由于其解放了双手,在阅读、工作等过程中使用更为方便<sup>[17]</sup>。

#### 3.1 VR 式 HMD 电子助视器在 CVL 患者中的应用

1992 年首次出现了应用于低视力患者的 HMD 系统 LVES<sup>[6]</sup>,其具有一系列放大和照度选项,可以提高低视力患者的远视力和对比敏感度,减少眩光,提高阅读速度<sup>[17-19]</sup>。但由于放大倍数有限,其对于视力非常差的患者(小数值视力 < 0.05)的阅读功能的提高效果不理想。这类老式的 HMD 助视器较为笨重,图像处理速度较慢,像素较差,难以进行日常应用。随着技术的发展,一些新型 VR 式 HMD 电子助视器不断涌现,例如 IrisVision<sup>[20]</sup>、eSight<sup>[12,17,21-22]</sup>、新型 Jordy 等,它们更为轻便,显示器分辨率更高、色彩更好,功能更丰富。这类助视器可以提高 CVL 患者的远视力、对比敏感度、阅读能力、人脸识别等<sup>[12,23-24]</sup>,但由于以上助视器成本较高,价格较为高昂,限制了其推广应用。

近几年出现了一类将手机和头戴式设备结合的助视器,例如 SightPlus<sup>[25]</sup>、Samsung Gear VR<sup>[26]</sup>等,它们将手机作为摄像头、处理器和显示器,嵌套入 VR 式头戴设备,并通过无线遥控器进行功能控制。这类助视器可以提高 CVL 患者的视力、对比敏感度和阅读能力<sup>[26]</sup>,可应用于阅读、看电视、看电影等场合<sup>[25]</sup>。这类助视器将手机与头戴式设备结合,相对降低了成本,对于需要提高近视力,有学习、工作等需求的低视力人群来说较为适用,有着较好的推广前景。这种手机 VR 式助视器更适用于静态应用,但由于其遮挡原有视野,易引起视疲劳、眩晕等,且缺乏深度和立体感,不适用于动态应用。

#### 3.2 AR 式 HMD 电子助视器在 CVL 患者中的应用

Luo 等<sup>[27]</sup>设计了一款单眼 AR 式 HMD 电子助视器,外形类似眼镜,更为轻便和美观,其具有放大模式和轮廓增强模式。当观察细节时可选择放大模式,此时镜片上的 LCD 光阀将使屏幕变暗,从而增加图像的对比度;当在运动中使用时可选择轮廓增强模式,此时显示器变为透明,显示器将物体的轮廓增强,从而提高视觉体验和搜寻能力<sup>[27-28]</sup>。此后,Hwang 等<sup>[29]</sup>根据这种轮廓增强模式设计了一款软件,利用 Google 眼镜实现轮廓增强的功能,提高模拟“视觉障碍者”的对比敏感度。对于有户外活动需求的 CVL 患者来说,这种将放大模式和轮廓增强模式结合的设计将会提供更多帮助。

### 4 HMD 电子助视器在视野缺损患者中的应用

研究表明,约 1/4 寻求低视力服务的患者有原发性 PVL<sup>[30]</sup>,会导致活动能力下降和跌倒风险增加。传统的视野扩大助视器包括三棱镜式助视器、倒置伽利略望远镜等。由于这些助视器存在视野跳跃、降低中心视力、眩晕等缺点,患者的接

受度不高<sup>[31]</sup>。理想的视野扩大助视器应在第一眼位获得视野扩大的效果,并且不会破坏中心视野。新型 HMD 电子助视器使患者可以看到周边画面的缩小图像,并且可以保留患者的习惯中心视野,因此可能带来 PVL 康复领域的突破。现有研究表明,HMD 电子助视器可以扩大 PVL 患者的视野和搜索能力,而对于运动能力的提高效果较差。

#### 4.1 AR 式 HMD 电子助视器在 PVL 患者中的应用

针对 PVL 患者的 HMD 电子助视器多采用将画面缩小显示的策略,从而达到扩大患者第一眼位视野的目的。由于 AR 式设计不遮挡患者原有的视野,患者仍可通过转动眼球观察四周的物体,可在一定程度上减少晕动症的产生,更便于在运动中使用。

2004 年,Bowers 等<sup>[32]</sup>首次报道了应用于 PVL 患者的 AR 式透明显示助视器(LV-3)。该助视器采用单眼镜式设计,显示器将较大视野的轮廓信息进行缩小,叠加在患者的中心视野中,不遮挡原有视野,患者可以通过轮廓信息来定向或寻找物体。研究表明,这种轮廓显示技术可以缩短大部分管状视野患者的搜寻时间<sup>[33]</sup>,提高搜索目标物品的能力<sup>[34]</sup>。我国自主研发的 HMD 电子助视器 RevoSight(杭州瑞杰珑科技有限公司)采用自由曲面 AR 显示模组,当在 CVL 患者中应用时,可通过放大图像、改变对比度、增强轮廓等模式提高视力和对比敏感度。当在 PVL 患者中应用时,可将画面缩小 1/4 或 1/16,患者通过缩小的画面看到更大的范围,从而达到扩大视野的目的。此外,该助视器可以改变缩小的图像在患者视野中的位置,以便于在不同类型的视野缺损患者(如管状视野、偏盲等)中使用。

#### 4.2 VR 式 HMD 电子助视器在 PVL 患者中的应用

Sayed 等<sup>[35]</sup>研发了一种更为个性化的 VR 式视野扩大助视器 DSpecs,其具有视野检测和图像重映射功能。每个使用者使用时,DSpecs 先对其 80° 直径内的视野进行检测,根据其残留视野的大小和位置,将缩小的图像画面放置在其残留视野最合适的位置。这种设计更适合视野缺损形状不规则的患者,可以更为个性化地改善视野,提高识别周边障碍物的能力。该助视器还在研究阶段,尚未投入临床应用。该研究者认为,将 DSpecs 改进为 AR 式的设计将更轻便、美观,更利于使用者日常应用。

#### 4.3 Google 眼镜在 PVL 患者中的应用

Trese 等<sup>[36]</sup>报道了 1 例应用 Google 眼镜扩大重度视野缺损患者视野的病例。Google 眼镜的摄像范围为 67°H×50°V,将画面实时地投射在位于右眼颞上方的棱镜上,患者通过镜片可以看到大范围视野的缩小图像,从而将 Google 眼镜作为一种单眼 AR 式助视器使用。在此病例中,该患者的视野扩大了 8.9 倍。此外,该患者在不熟悉或拥挤环境中的活动能力也有提高。

我们基于 Google 眼镜进行了开发和改进,通过软件实现缩放、调整色调和亮度、提高对比度等功能。在临床实践中对 10 例患者试用改进后的 Google 眼镜,发现其可以扩大患者视野,并且患者目标搜索、暗环境内行走能力和主观感受比未佩

戴任何助视器或佩戴原始 Google 眼镜时均有显著提高,这提示 Google 眼镜有潜力应用于 PVL 患者的低视力康复中。

## 5 AR 与 VR 结合的 HMD 电子助视器

随着显示技术的不断发展,近年来开始出现了一些可以切换 AR 模式和 VR 模式的助视器。Peláez-Coca 等<sup>[37]</sup>设计了一款单眼 AR 式助视器 SERBA,具有 2 种模式,一种模式为放大模式,具有不同的放大倍率(2×、4×和 8×)和图像模式,可以帮助 CVL 患者提高视力;另一种模式为视野扩大模式,采用缩小轮廓显示技术,可以扩大管状视野患者的视野 3~4 倍。Oxight 助视器(oxsight.co.uk)采用可拆卸式遮光罩,当周围环境光线较强时安装上遮光罩,助视器成为 VR 式,提高图像对比度;而当在行走等动态活动中使用时,则可以取下遮光罩,显示器变为透明,助视器变为 AR 式,避免遮挡使用者的原始视野。这类 AR 与 VR 显示相结合的助视器应用范围更为广泛,通过不同模式的灵活切换,CVL 和 PVL 患者均可从中受益,更有利于个性化的应用。

## 6 HMD 电子助视器在我国的应用现状

头戴式助视器目前我国已初步应用于临床。部分低视力康复中心已配备不同种类的 HMD 电子助视器,供不同类型的低视力患者进行试用和佩戴,少部分低视力患者已将 HMD 电子助视器应用于日常生活并从中受益。然而,HMD 电子助视器的推广应用仍受到一定限制。由于 HMD 电子助视器大部分较为笨重,且外观不像普通眼镜,部分患者认为不便于在日常生活中佩戴。此外,目前大多 HMD 电子助视器价格较高昂,配备有这种类型助视器的低视力中心较少,且尚未形成较为完善的训练、随访体系,也限制了其推广应用<sup>[22,38-39]</sup>。随着电子显示技术的不断发展,HMD 电子助视器的显示效果不断完善,并向更轻便、美观、可及性更高的方向发展,会更有利于其推广应用。

## 7 小结与展望

HMD 电子助视器不仅可应用于中心视力差、对比敏感度降低、夜盲等患者的康复,提高 CVL 患者的中心视力和对比敏感度,也可应用于 PVL 患者的康复,对 PVL 患者静态时的视野、搜索能力等均有所改善。目前,HMD 电子助视器在 PVL 患者中的应用多局限于静态条件下的研究,而针对患者运动能力和生活质量的研究较缺乏。将来需要更多高质量研究来验证 HMD 电子助视器对 PVL 患者运动和生活质量的改善能力。

总体来说,HMD 是一种低视力康复的新技术,填补了现有助视方法所无法满足的需求,提高了助视器的应用效果。HMD 电子助视器的优势在于可以解放双手,适用于远、中、近多个距离,并且拥有多种助视模式,可以根据患者的需求个性化调整助视模式。相信随着显示技术、软件技术、光学设计、轻便性等方面的提升,以及 HMD 电子助视器训练和康复策略的不断完善,HMD 电子助视器在低视力康复中的应用将会越来越普及。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

## 参考文献

- [1] Bourne R, Flaxman SR, Braithwaite T, et al. Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis[J/OL]. *Lancet Glob Health*, 2017, 5(9): e888-e897 [2022-10-20]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28779882/>. DOI: 10.1016/S2214-109X(17)30293-0.
- [2] Flaxman SR, Bourne R, Resnikoff S, et al. Global causes of blindness and distance vision impairment 1990-2020: a systematic review and meta-analysis[J/OL]. *Lancet Glob Health*, 2017, 5(12): e1221-e1234 [2022-10-20]. [https://www.thelancet.com/journals/langlo/article/PIIS2214-109X\(17\)30393-5/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/langlo/article/PIIS2214-109X(17)30393-5/fulltext). DOI: 10.1016/S2214-109X(17)30393-5.
- [3] 杜蓓,林娜娜,胡志城,等. 视觉障碍患者病因分析及不同类型助视器的应用评估[J]. *中华实验眼科杂志*, 2019, 37(7): 522-526. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2019.07.006.  
Du B, Lin NN, Hu ZC, et al. Causes analysis of visual impaired and application evaluation of different visual aids [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2019, 37(7): 522-526. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2019.07.006.
- [4] 马建霞,张丽,徐宁宁. 老年低视力和盲的病因及光学助视器在康复中的应用[J]. *国际眼科杂志*, 2017, 17(8): 1599-1601. DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2017.8.53.  
Ma JX, Zhang L, Xu NN. Cause of low vision and blind in elderly and the application of optical aids in their rehabilitation [J]. *Int Eye Sci*, 2017, 17(8): 1599-1601. DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2017.8.53.
- [5] Gao G, Ouyang C, Dai J, et al. Baseline traits of patients presenting at a low vision clinic in Shanghai, China [J/OL]. *BMC Ophthalmol*, 2015, 15: 16 [2022-10-20]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25884841/>. DOI: 10.1186/s12886-015-0013-3.
- [6] Massof RW, Rickman DL. Obstacles encountered in the development of the low vision enhancement system [J]. *Optom Vis Sci*, 1992, 69(1): 32-41. DOI: 10.1097/00006324-199201000-00005.
- [7] Yoon HJ, Kim J, Park SW, et al. Influence of virtual reality on visual parameters: immersive versus non-immersive mode [J/OL]. *BMC Ophthalmol*, 2020, 20(1): 200 [2022-10-10]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7245896/>. DOI: 10.1186/s12886-020-01471-4.
- [8] 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.
- [9] Marron JA, Bailey IL. Visual factors and orientation-mobility performance [J]. *Am J Optom Physiol Opt*, 1982, 59(5): 413-426. DOI: 10.1097/00006324-198205000-00009.
- [10] Chung ST, Legge GE. Comparing the shape of contrast sensitivity functions for normal and low vision [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2016, 57(1): 198-207. DOI: 10.1167/iovs.15-18084.
- [11] Moshtael H, Aslam T, Underwood I, et al. High tech aids low vision: a review of image processing for the visually impaired [J/OL]. *Transl Vis Sci Technol*, 2015, 4(4): 6 [2022-10-20]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4539202/>. DOI: 10.1167/tvst.4.4.6.
- [12] Fox DR, Ahmadzade A, Wang CT, et al. Using augmented reality to cue obstacles for people with low vision [J]. *Opt Express*, 2023, 31(4): 6827-6848. DOI: 10.1364/OE.479258.
- [13] Wittich W, Lorenzini MC, Markowitz SN, et al. The effect of a head-mounted low vision device on visual function [J]. *Optom Vis Sci*, 2018, 95(9): 774-784. DOI: 10.1097/OPX.0000000000001262.
- [14] Calabrèse A, Bernard JB, Faure G, et al. Clustering of eye fixations: a new oculomotor determinant of reading speed in maculopathy [J]. *Invest*



- Ophthalmol Vis Sci, 2016, 57(7): 3192–3202. DOI: 10.1167/iov.16-19318.
- [15] 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/OL]. Healthcare (Basel), 2021, 9(2): 180 [2022-10-20]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7914806/>. DOI: 10.3390/healthcare9020180.
- [16] Ehrlich JR, Ojeda LV, Wicker D, et al. Head-mounted display technology for low-vision rehabilitation and vision enhancement[J]. Am J Ophthalmol, 2017, 176: 26–32. DOI: 10.1016/j.ajo.2016.12.021.
- [17] Lussier-Dalpé B, Houtekier C, Duquette J, et al. The challenge of reading music notation for pianists with low vision: an exploratory qualitative study using a head-mounted display[J]. Assist Technol, 2022, 34(1): 2–10. DOI: 10.1080/10400435.2019.1661315.
- [18] Massof RW, Baker FH, Dagnelie G, et al. Low vision enhancement system: improvements in acuity and contrast sensitivity; 3:00 pm (LV-313) [J/OL]. Optometry Vision Sci, 1995, 72 (supplement): 20 [2022-10-10]. [http://www.onacademic.com/detail/journal\\_1000039369705810\\_406f.html](http://www.onacademic.com/detail/journal_1000039369705810_406f.html).
- [19] Ballinger R, Lalle P, Maino J, et al. Veterans Affairs Multicenter Low Vision Enhancement System (LVES) study: clinical results. Report 1: effects of manual-focus LVES on visual acuity and contrast sensitivity[J]. Optometry, 2000, 71(12): 764–774.
- [20] Ortiz A, Chung ST, Legge GE, et al. Reading with a head-mounted video magnifier[J]. Optom Vis Sci, 1999, 76(11): 755–763. DOI: 10.1097/00006324-199911000-00024.
- [21] Deemer AD, Bradley CK, Ross NC, et al. Low vision enhancement with head-mounted video display systems: are we there yet? [J]. Optom Vis Sci, 2018, 95(9): 694–703. DOI: 10.1097/OPX.0000000000001278.
- [22] Lorenzini MC, Wittich W. Measuring changes in device use of a head-mounted low vision aid after personalised telerehabilitation: protocol for a feasibility study[J/OL]. BMJ Open, 2019, 9(9): e030149 [2022-10-20]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6756331/>. DOI: 10.1136/bmjopen-2019-030149.
- [23] Lorenzini MC, Wittich W. Personalized telerehabilitation for a head-mounted low vision aid: a randomized feasibility study[J]. Optom Vis Sci, 2021, 98(6): 570–581. DOI: 10.1097/OPX.0000000000001704.
- [24] Lorenzini MC, Wittich W. Head-mounted visual assistive technology-related quality of life changes after telerehabilitation[J]. Optom Vis Sci, 2021, 98(6): 582–591. DOI: 10.1097/OPX.0000000000001705.
- [25] 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.
- [26] Deemer AD, Swenor BK, Fujiwara K, et al. Preliminary evaluation of two digital image processing strategies for head-mounted magnification for low vision patients[J/OL]. Transl Vis Sci Technol, 2019, 8(1): 23 [2022-10-23]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6396685/>. DOI: 10.1167/tvst.8.1.23.
- [27] Luo G, Peli E. Development and evaluation of vision rehabilitation devices[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2011, 2011: 5228–5231. DOI: 10.1109/IEMBS.2011.6091293.
- [28] 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–E1373 [2022-10-23]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3429700/>. DOI: 10.1097/OPX.0b013e318266f92f.
- [29] 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.
- [30] Owsley C, McGwin G Jr, Lee PP, et al. Characteristics of low-vision rehabilitation services in the United States[J]. Arch Ophthalmol, 2009, 127(5): 681–689. DOI: 10.1001/archophthalmol.2009.55.
- [31] Apfelbaum H, Peli E. Tunnel vision prismatic field expansion: challenges and requirements[J/OL]. Transl Vis Sci Technol, 2015, 4(6): 8 [2022-10-23]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4699714/>. DOI: 10.1167/tvst.4.6.8.
- [32] Bowers AR, Luo G, Rensing NM, et al. Evaluation of a prototype minified augmented-view device for patients with impaired night vision[J]. Ophthalmic Physiol Opt, 2004, 24(4): 296–312. DOI: 10.1111/j.1475-1313.2004.00228.x.
- [33] Luo G, Peli E. Use of an augmented-vision device for visual search by patients with tunnel vision[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2006, 47(9): 4152–4159. DOI: 10.1167/iov.05-1672.
- [34] Itan L, Yitzhaky Y. Performance of visual search tasks from various types of contour information[J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2013, 30(3): 392–402. DOI: 10.1364/JOSAA.30.000392.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Peláez-Coca MD, Vargas-Martín F, Mota S, et al. A versatile optoelectronic aid for low vision patients[J]. Ophthalmic Physiol Opt, 2009, 29(5): 565–572. DOI: 10.1111/j.1475-1313.2009.00673.x.
- [38] Stelmack JA, Tang XC, Wei Y, et al. Outcomes of the veterans affairs low vision intervention trial II (LOVIT II): a randomized clinical trial[J]. JAMA Ophthalmol, 2017, 135(2): 96–104. DOI: 10.1001/jamaophthalmol.2016.4742.
- [39] Lorenzini MC, Hämmäläinen AM, Wittich W. Factors related to the use of a head-mounted display for individuals with low vision[J]. Disabil Rehabil, 2021, 43(17): 2472–2486. DOI: 10.1080/09638288.2019.1704892.

(收稿日期: 2023-02-29 修回日期: 2023-06-27)

(本文编辑: 刘艳 施晓萌)

读者·作者·编者

## 本刊对实验研究中动物使用方面的要求

为了提高实验研究论文中实验动物这个基础环节在国际上的认可度,本刊要求作者投稿时提供以下相应信息:(1)实验动物的种属、来源、一般信息及饲养条件;(2)实验动物的等级;(3)实验所遵循的相关实验动物保护条例或法规的具体名称以及颁布的机构名称。