

# 用于视功能自测的远程医疗工具发展现状与前景

潘倩怡, 韩晓彤, 张佳晴, 罗莉霞

引用: 潘倩怡, 韩晓彤, 张佳晴, 等. 用于视功能自测的远程医疗工具发展现状与前景. 国际眼科杂志, 2025, 25(5): 765-769.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.82070940); 广州市科学技术局市校(院)企联合资助项目 (No.2024A03J0245)

作者单位: (510060) 中国广东省广州市, 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

作者简介: 潘倩怡, 在读硕士研究生, 研究方向: 白内障。

通讯作者: 罗莉霞, 博士, 主任医师, 教授, 博士研究生导师, 研究方向: 白内障. [luolixia@mail.sysu.edu.cn](mailto:luolixia@mail.sysu.edu.cn)

收稿日期: 2024-09-07 修回日期: 2025-03-21

## 摘要

远程医疗面临的核心挑战之一在于辅助检查的有效实施。这在眼科领域尤为显著, 因为眼科依赖于各类检查设备, 而这些设备往往要求操作人员具备一定的专业技能。视功能检测作为眼科不可或缺的检查项目, 是眼病筛查、诊断、疗效评估及随访观察的重要依据。随着移动技术的飞速发展, 视功能检查这一传统上需要在临床环境中进行的项目, 有了向以患者为中心的家庭环境拓展的可能。这不仅为患者提供了便利, 也极大地推动了眼科远程医疗的发展。文章重点探讨了视功能自测工具的开发与准确性、可重复性等验证相关研究, 总结了视力、验光、视野、对比敏感度及色觉检查等各项视功能相关数字工具的特点及可靠性, 旨在为眼科医生及患者在选择和使用这类工具时提供科学、实用的参考, 从而进一步提升眼科远程医疗的效率和效果。

关键词: 远程医疗; 远程眼科; 视功能; 视力

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2025.5.13

## Current status and prospect of self-administered visual function testing tools for telemedicine

Pan Qianyi, Han Xiaotong, Zhang Jiaqing, Luo Lixia

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 82070940); Municipal Schools (Colleges) and Enterprises Jointly Funded Project of Guangzhou Municipal Science and Technology Bureau (No.2024A03J0245)

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

Correspondence to: Luo Lixia. State Key Laboratory of Ophthalmology, Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University; Guangdong Provincial Key Laboratory of Ophthalmology

and Visual Science, Guangzhou 510060, Guangdong Province, China. [luolixia@mail.sysu.edu.cn](mailto:luolixia@mail.sysu.edu.cn)

Received:2024-09-07 Accepted:2025-03-21

## Abstract

• One of the significant hurdles in telemedicine, particularly in ophthalmology, is the absence of direct physical examination. This specialty depends extensively on specialized instruments that typically require proficient operators. Visual function tests are crucial for both outpatient and inpatient ophthalmic services, playing a vital role in screening, diagnosing, monitoring treatment effectiveness, and managing follow-ups for various eye conditions. The progress in mobile technology has paved the way for expanding these tests beyond traditional clinic settings, promoting the creation of patient-focused, straightforward, cost-effective, and efficient measurement tools. In light of the swift advancement of digital technologies, this article reviews the characteristics, and reliability of self-administered visual function tests tools, including visual acuity, refractive error assessment, visual field, contrast sensitivity, and color vision, along with other pertinent diagnostic tools that have been developed and validated for accuracy and repeatability through research, with a view to providing ophthalmologists and patients with scientific and practical references when selecting and using these tools, further promoting efficiency and efficacy of teleophthalmology.

• KEYWORDS: telemedicine; teleophthalmology; visual function; visual acuity

Citation: Pan QY, Han XT, Zhang JQ, et al. Current status and prospect of self-administered visual function testing tools for telemedicine. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)*, 2025, 25(5): 765-769.

## 0 引言

远程医疗最早出现在 19 世纪中叶, 指利用通讯工具与信息传递医疗服务<sup>[1]</sup>。而直到 21 世纪, 随着科技的发展以及智能设备等的普及, 远程医疗的应用才逐渐广泛<sup>[2]</sup>。眼科领域亦积极开发与验证规范化的自测型远程医疗工具<sup>[3]</sup>。视功能检查是眼科常规的检查项目, 包括视力、验光、对比敏感度、视野及色觉等。因此, 针对视功能检查项目的远程医疗工具有着广泛的应用前景。本文依据视功能自测远程医疗工具的研究, 对相关工具的特点、操作流程、准确性、可重复性和可及性等作一综述, 以期对远程视功能检测工具选择提供参考。

## 1 视力与验光

视力主要反映黄斑区的功能, 是视功能中最常见和最

基础的指标。视力测试的结果有助于评估视力损伤程度、确定诊疗方案及判断疗效。尽早发现视力变化有助于疾病的适时干预,提高视觉质量<sup>[4]</sup>。目前已有的自测型视力评估工具主要包括网站以及移动应用程序(application, APP)。

**1.1 视力与验光测试网站** 早先开发的视力测试网站与家庭纸质打印的视力表测试方式类似,如 Farsight.care, 主要由一个数字表和一条参考线构成。测试前需先调整视力表的正确比例,然后于 14 英寸处记录所见数字进行视力评估。其测量结果与 Snellen 视力表的平均差异为  $-0.13$  (LogMAR)<sup>[5]</sup>, 准确性尚可,但仍存在检测繁琐、被测者可记忆等与纸质视力表相似的缺点。因此, Piech 等<sup>[6]</sup>开发了一种基于改良视力模型和智能推理的在线视力测试——Stanford Acuity Test (StAT)。用户可以通过电脑和智能手机登陆 StAT 进行测试,测试前先根据提示校准屏幕大小、输入与电脑屏幕的测量距离,然后在手机屏幕上划向“E”字开口方向进行测试,算法会根据用户的回答调整下一个字母的大小,从而生成更可靠的测试结果。StAT 与传统视力测试有较好的一致性<sup>[6]</sup>,且准确度不易受屏幕亮度和设备的影响<sup>[7]</sup>。

在 StAT 测量原理的基础上, Wisse 等<sup>[8]</sup>开发的 Easee 网站做了进一步更新,它除了可测量远距离视力外,还可以进行验光测试,同时输出球镜、柱镜、未矫正视力及矫正视力的结果。其准确性和可重复性与临床标准视力测试及主观验光结果相比无显著差异,并在健康受试者、葡萄膜炎患者以及白内障术后患者中均得到了充分验证<sup>[8-12]</sup>。然而,该团队发现其在圆锥角膜患者中的验光结果,与标准主观验光之间的差距达  $-0.58$  D,超过了设定的非劣效界值,并缺乏对异常数值的提示<sup>[13]</sup>。因此,该类工具需提升对特殊患者的测量准确性,并进一步甄别异常结果,才可增大在临床的普及性。

**1.2 视力与验光测试 APP** 随着智能手机等移动设备的普及和技术的提高<sup>[14]</sup>,利用 APP 进行视力自测成为最有潜力的远程视力测试方式。目前市面上有许多视力测试 APP,但只有一部分经过了研究验证并可公开获取。Peek Acuity 是其中一款较有代表性、应用较广、基于 ETDRS tumbling E 视力表的 APP,可评估从光感至 0.0 (LogMAR) 的视力。其操作简便,仅需一人辅助,两人相隔 2 或 3 m,辅助者根据被测者的指示方向滑动屏幕即可,测试完成显示结果。既往针对老年人、学龄期儿童等不同人群的研究显示,该 APP 的准确性不亚于 Snellen 视力表或 ETDRS 标准视力表,差异在 0.1 (LogMAR) 上下浮动<sup>[15-22]</sup>。然而该 APP 只有英语模式,仅支持安卓系统手机,并无法对近视力进行测试。然而,远、近视力都是视力检查的基础,且随着人口老龄化,近视力的检测也日益重要。为进一步推广视力自测,有研究同样基于 ETDRS tumbling E 视力表研发了 WHOeyes(曾用名 vision@home),测试过程与 Peek Acuity 类似<sup>[23]</sup>。该 APP 不仅支持 16 种语言模式和 IOS、Android 双系统使用,还加入自动测距功能,可测量远、近视力,大大提高了便捷性、客观性与可普及性,是首个被世界卫生组织认可全球公开发布的视力测试 APP<sup>[24]</sup>。WHOeyes 可准确测试远、近距离视力,与 ETDRS 视力表的差异小于 0.1 (LogMAR)<sup>[24-25]</sup>,其在不同年龄人群 ( $\leq 20$ 、20-40、 $>40$ 岁)及不同测试环境(临床、工作与家庭)下的可靠性和可接受性也得到了验证<sup>[25]</sup>,上述视力测试 APP 在临床

使用的可信度较高。其余视力测试 APP,如 Kay ISight Test Professional<sup>[26]</sup>、Snellen chart<sup>[27]</sup>等验证较少,其准确性仍需进一步探索。

除视力检测的 APP,少数 APP 还可验光,以更好了解使用者的屈光状态。如麻省理工学院和美国 Eyenetra 公司研发的基于智能手机 APP 的验光工具 Near-Eye Tool for Refractive Assessment (NETRA)。被测者双眼直视装有智能手机的手持式 NETRA 双目设备,使用可调节的表盘用于对齐两个雨伞的柄即可。许多研究验证了其与传统主观验光比较的准确性,并认为这种便携且成本相对较低的验光工具,在医疗资源不足的地区具有明显优势<sup>[28-31]</sup>。但有研究称,NETRA 未散瞳状态下的结果较主观验光差  $1.25$  D<sup>[30]</sup>,其使用的主观感受也欠佳<sup>[28]</sup>。因此,该类验光 APP 在推广前的测量准确性及使用体验还需改善。

## 2 对比敏感度

对比敏感度 (contrast sensitivity, CS) 指在不同明暗背景下分辨视标的的能力。相比于视力,CS 下降更能发现某些疾病的早期视力损害<sup>[32]</sup>。常规的 CS 测量往往耗时长、仪器不便携及对操作专业要求较高,临床上应用较少,而现代移动设备给 CS 测量提供了一种新思路。目前可用于 CS 测试的工具主要包括字母视标与正弦波条纹栅栏两大类。

**2.1 基于字母视标** 基于字母视标的图表,如临床应用广泛的 Pelli-Robson Contrast Sensitivity (PRCS),是许多 CS 数字工具的开发基础。基于网络的软件 Spaeth/Richman contrast sensitivity test,就是在标准 PRCS 基础上研发,其准确性已有验证<sup>[33-34]</sup>,但它需要有 15 英寸或更大的显示器,普及性受限。为此,Peek 公司基于 tumbling E 视标开发了一款可在安卓系统手机上使用的 CS 测试程序 PeekCS。在另一人辅助下,被测者站至 1 m 远处指出“E”字开口方向进行检测,其测量结果与 tumbling E 版本的 PRCS 高度相关<sup>[35]</sup>。另一基于 ETDRS 视标及 Weber 对比度原理开发的 K-CS APP,与 PRCS 的结果也非常吻合<sup>[36]</sup>。现有基于字母视标的 CS 测量工具与 PRCS 测量的一致性较高,但需更多严谨设计的前瞻性研究探索其真实使用的情况,更好评估用户自测的可靠性,以便推广应用。

**2.2 基于正弦波条纹栅栏** 基于正弦波条纹栅栏的 CS 测试工具,可测试不同空间频率和对比度条件下的视觉敏感度,如功能性对比敏感度测试 (functional acuity contrast test, FACT)。基于此原理设计的 ClinicCSF APP 可显示不同空间频率、不同方向的正弦波光栅,并调整其对比度,以测量用户的对比敏感度。目前,仅有一项研究对 ClinicCSF 与 FACT 的一致性进行了比较,结果显示 ClinicCSF APP 测量准确性尚可<sup>[37]</sup>,但其重复性及真实世界使用的可靠性仍需进一步研究。

## 3 视野

视野缺损是青光眼、视神经病变和视网膜色素变性等眼病的常见症状<sup>[38]</sup>,为监测其发生发展的重要指标。目前临床常用的工具是标准自动视野计 (standard automated perimetry, SAP),如 Humphrey Field Analyzer (HFA)。SAP 检查方法包括三大类:(1) 阈上值检查,视野定性检查,可靠性低;(2) 阈值检查:精准定量检查,耗时长;(3) 快速阈值检查:通过智能程序快速筛查。SAP 是目前视野检查的金标准<sup>[39]</sup>,但存在体积庞大和成本高昂等缺点。远程视

野测量工具弥补了这些不足,目前主要分为两类:视野测试 APP 以及视野测试头戴式设备。

**3.1 视野测试 APP** 大多视野测试 APP 与 SAP 原理一致。如 VisualFields Easy(VFE),一款可在 iPad 上使用、基于阈值检查的视野 APP,但后续发现其准确性欠佳<sup>[40]</sup>。因此,该开发团队对其优化后推出了 Melbourne Rapid Field(MRF)APP 端及其网页端,可在电脑及平板上使用,通过固视屏幕中的红点,在视野范围内出现亮点时点击屏幕进行测量。MRF 包含两种模式:全阈值检查(4-5 min)和快速筛查(90 s)。全阈值检查测量结果与 HFA 的准确性相当,且具有良好的测试重复性<sup>[41-44]</sup>。MRF 的筛查模式在一项农村地区多中心研究中也得到验证,发现其有识别轻、中度视野缺损的潜力,且提供了良好的用户体验<sup>[45]</sup>。此外,MRF 在无监督的家庭测试中的短期、长期依从性和可重复性都较高<sup>[43,46-47]</sup>。然而也有一些研究指出,MRF 可能对早期视野缺损检测产生遗漏<sup>[42-44,48-49]</sup>,其对轻度视野缺损的检出仍需进一步改进和验证。与 MRF 测试原理不同,Visual Field Fast(VFF)采用一种高频闪烁的精细噪声场刺激,可快速检查视野。使用者需固视屏幕中的红色方块,观察视野范围内的闪烁点并画出未闪烁区域。Ding 等<sup>[50]</sup>研究发现 VFF 检测中、重度青光眼的灵敏度和特异性分别为 91.2%和 97%,且重复性较好,但会错误估计视野盲区大小和范围,需在设计上进行改进。

**3.2 视野测试头戴式设备** 固视及头部位置对视野测试影响较大,上述工具无法控制头部与屏幕的距离及监测固视,难以实现无监督环境下测试过程的标准化。而头戴式设备,如基于虚拟现实模拟(virtual reality,VR)的设备,就很好地解决了这些不足。C3 Fields Analyzer 是一个头戴式 VR 视野计,需搭配手机或平板及点击器使用,使用者被指示将注意力集中在一个中央黄色注视点上,并在出现刺激时使用手持点击器做出反应。Mees 等<sup>[51]</sup>发现其受试者工作特性曲线下面积在重度青光眼中为 0.87,对轻、中度青光眼为 0.78,需进一步改进。Gear vision(GV)是针对市面上的三星 GearVR 和兼容的智能手机开发的另一款头戴式 VR 视野计。在 Pradhan 等<sup>[52]</sup>研究中其与 HFA 视野测量结果一致性较好,用户体验佳。但与 HFA 相比,GV 测试时间更长和假阳性率更高。环境亮度也是影响视野测试的另一关键因素。为此,有学者开发的软件 TVFST,采用网络摄像头作为虚拟光度计检测环境光,并通过电脑显示屏或 VR 设备搭配智能手机使用。但研究显示 TVFST 的测试灵敏度 64%-94%,特异度在 50%-74%<sup>[53]</sup>,准确度需提高。其余 VR 视野测试设备如 VisuALL、imo 等的准确性与临床标准视野测试相比均无显著差异<sup>[54-55]</sup>。然而,VR 设备准确性受内部精确率、分辨率等硬件设备影响,且仍需要用户主动点击,存在主观偏差。

视野头戴式 VR 设备的下一步便是去除人为点击的主观性。Nakanishi 等<sup>[56]</sup>提出了一种可能,其开发的 nGoggle 是一种便携式客观脑机接口设备,集成了无线脑电图、脑电图系统以及头戴式显示器,通过直接记录视觉皮层的电反应来检测视野。在一项有 33 例青光眼患者和 17 名健康对照者的研究中,nGoggle 与 SAP 显示出良好的一致性,能区分青光眼和健康眼<sup>[56]</sup>。

然而,除测量准确性,VR 以及更高级的头戴式视野测试设备仍面临着操作复杂和成本高昂两大挑战<sup>[56]</sup>,未

来的开发需致力于简化设备操作流程、降低成本。同时,也可通过政策支持和市场策略,如医保覆盖和分期付款选项,以便更多患者能负担并轻松用其进行日常视野监测。

#### 4 色觉

色觉是对不同波长光线成分的感知检查功能。色觉评估是视功能检测中的重要部分,尤其在糖尿病视网膜病变和年龄相关性黄斑变性等眼部疾病中,色觉损害往往会出现在视力下降前<sup>[57]</sup>。

目前的色觉检查工具主要包括筛查与阈值检查两大类。筛查仅判断是否有色觉缺陷,常见方法有假同色图(如 Ishihara 色板)。而色觉阈值测试可以量化个人的辨色能力,判断色觉缺陷的严重程度,主要工具包括色临床金标准色觉镜和商业化工具(如 Cambridge Colour Test, CCT)<sup>[58]</sup>。Ishihara 色板是目前筛查最常用的工具,传统纸质版本存在成本高、携带不便和易磨损的问题,老化还可能导致测试结果不准。色觉测试 APP 的出现提供了一种更经济、便携且耐用的替代方案。现有的色觉筛查 APP,如 Eye Handbook<sup>[59-61]</sup>和 Eye2Phone<sup>[62]</sup>,多以 Ishihara 色板为原理,均有较好的测量准确性。ColourSpot 在检测 4-7 岁儿童的色觉缺陷上,甚至可以达到 100%的灵敏度和 97%的特异性<sup>[63]</sup>。此外,有研究团队着力研发测试色觉缺陷程度的 APP,如 Bodduluri 设计了一款含有三种游戏的色觉测试 APP,结果表明使用游戏 1,2 测得的色度阈值与 CCT 测试相当,而游戏 3 准确度较差<sup>[64]</sup>。将色觉检查游戏化的设计有利于提高儿童群体的参与度,值得临床推广,但准确性需较大改进。

#### 5 多功能工具

既往视功能检测工具大多聚焦于单一的视功能指标,不能满足全面评估或个性化选择的需求,集成多种视功能检测的多功能工具是未来重要的发展方向。Lord 等<sup>[65]</sup>研发的 Eye Handbook(EHB)于 2009 年在美国眼科学会的年会上发布,包含了测试工具、教育视频、计算器、提高工作效率的工具、期刊门户、及治疗参考手册等多种功能。作为集视功能测试、患者管理、行业信息为一体的免费 APP,它在眼科医生中备受欢迎,有超过 50 万的下载量和超过 2.5 万的活跃用户<sup>[66]</sup>,然而其测试功能尚未经过较为严谨的验证。Smart Optometry 公司集合色觉、近视力、弱视、沃斯四点测试、赫希伯格测试和阿姆斯勒网格测试等多个检测项目,研发了一款多功能工具。但在有关研究中,其近视力测试结果与 Snellen 近视力表的结果有显著性差异<sup>[67]</sup>,识别视力异常儿童的灵敏度为 89.3%,特异度为 69.4%<sup>[68]</sup>,均有待进一步提高。另一款多功能工具 OdySight 则整合视力、对比敏感度、视物变形和暗点测试等检测项目,其在近、远视力测试方面分别与 ETDRS 近、远视力表相比均无显著差异(分别相差 0.53 及 -1.53 个字母),对比敏感度测试结果与 PRCS 相比低估了 0.16 logCS<sup>[69]</sup>。上述多功能工具虽提供了视功能测试的“一站式”服务,但目前对于此类多功能工具测试功能的准确性验证是不足的。此外,这些多功能工具大多面向眼科专业人员,其用于患者自测的可及性仍有待进一步的提高。

#### 6 小结和展望

在远程医疗领域日新月异的今天,用于视功能检测的远程医疗工具有望改变传统眼科医疗服务格局,尤其是在医疗资源相对匮乏的地区,远程视功能自测工具是眼病筛

查、辅助诊断、监测进展的重要替代途径。然而,诸多远程视功能检测工具仍欠缺设计严谨的研究,且存在获取途径匮乏的缺点。在无专业人员监督的情况下,也难确保测量结果的真实性和准确性。未来,视功能自测的远程医疗工具还需不断提高使用的可及性、测量的准确性、重视数据安全和隐私保护,并检测在长期随访和卫生经济学效益方面的表现,以全面评估其实际价值,从而为患者提供更加便捷、高效、优质、公平的医疗服务。

**利益冲突声明:** 本文不存在利益冲突。

**作者贡献声明:** 潘倩怡论文选题与修改,文献检索,初稿撰写;韩晓彤、张佳晴选题指导,论文修改;罗莉霞选题指导,论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的文本。

#### 参考文献

[1] Li X, Huang L, Zhang H, et al. Enabling Telemedicine From the System-Level Perspective: Scoping Review. *J Med Internet Res*, 2025, 27:e65932.

[2] Bonica GM, Johns RW, Jadvar H. Telehealth and Telemedicine: Regulatory and Medicolegal Landscape. *Clin Nucl Med*, 2024, 49(7): 644-647.

[3] Jo JJ, Pasquale LR. Recent developments of telemedicine in glaucoma. *Curr Opin Ophthalmol*, 2024, 35(2): 116-123.

[4] Guymer RH, Campbell TG. Age-related macular degeneration. *Lancet*, 2023, 401(10386): 1459-1472.

[5] Bellsmith KN, Gale MJ, Yang S, et al. Validation of home visual acuity tests for telehealth in the COVID-19 era. *JAMA Ophthalmol*, 2022, 140(5): 465-471.

[6] Piech C, Malik A, Scott LM, et al. The stanford acuity test: a precise vision test using Bayesian techniques and a discovery in human visual response. *Proc AAAI Conf Artif Intell*, 2020, 34(1): 471-479.

[7] Cheng L, Peng S, Hao H, et al. Effect of different screen brightness and devices on online visual acuity test. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2024, 262(2): 641-649.

[8] Wisse RPL, Muijzer MB, Cassano F, et al. Validation of an independent web-based tool for measuring visual acuity and refractive error (the manifest versus online refractive evaluation trial): prospective open-label noninferiority clinical trial. *J Med Internet Res*, 2019, 21(11): e14808.

[9] Claessens JIJ, van Egmond J, de Boer JH, et al. The evaluation of a novel tool to remotely assess visual acuity in chronic uveitis patients during the COVID-19 pandemic. *medRxiv*, Published online 2021.

[10] Claessens J, van Egmond J, Wanten J, et al. The accuracy of a web-based visual acuity self-assessment tool performed independently by eye care patients at home: method comparison study. *JMIR Form Res*, 2023, 7:e41045.

[11] Wanten JC, Bauer NJC, Claessens JIJ, et al. Evaluation of a visual acuity eHealth tool in patients with cataract. *J Cataract Refract Surg*, 2023, 49(3): 278-284.

[12] Claessens JIJ, Wanten JC, Bauer NJC, et al. Web-based telemonitoring of visual function and self-reported postoperative outcomes in cataract care: international multicenter randomized controlled trial. *J Cataract Refract Surg*, 2024, 50(9): 947-955.

[13] Muijzer MB, Claessens JIJ, Cassano F, et al. The evaluation of a web-based tool for measuring the uncorrected visual acuity and refractive error in keratoconus eyes: a method comparison study. *PLoS One*, 2021, 16(8): e0256087.

[14] Labiris G, Delibasis K, Panagiotopoulou EK, et al. Development and validation of the first smart TV-based visual acuity test: a prospective study. *Healthcare (Basel)*, 2022, 10(11): 2117.

[15] Brady CJ, Eghrari AO, Labrique AB. Smartphone-based visual

acuity measurement for screening and clinical assessment. *JAMA*, 2015, 314(24): 2682-2683.

[16] Bastawrous A, Rono HK, Livingstone IA, et al. Development and validation of a smartphone-based visual acuity test (peek acuity) for clinical practice and community-based fieldwork. *JAMA Ophthalmol*, 2015, 133(8): 930-937.

[17] Rono HK, Bastawrous A, MacLeod D, et al. Smartphone-based screening for visual impairment in Kenyan school children: a cluster randomised controlled trial. *Lancet Glob Health*, 2018, 6(8): e924-e932.

[18] Zhao L, Stinnett SS, Prakalapakorn SG. Visual acuity assessment and vision screening using a novel smartphone application. *J Pediatr*, 2019, 213: 203-210.e1.

[19] Abhilash B, Adyanthaya S. Comparison of visual acuity measured by ETDRS based smart phone applications I sight pro and Peek acuity versus traditional Snellen's chart visual acuity in children 6-14 years in a tertiary care institute in India. *Indian J Clin Exp Ophthalmol*, 2022, 7(4): 634-637.

[20] Painter S, Ramm L, Wadlow L, et al. Parental home vision testing of children during covid-19 pandemic. *Br Ir Orthopt J*, 2021, 17(1): 13-19.

[21] Bhaskaran A, Babu M, Abhilash B, et al. Comparison of smartphone application-based visual acuity with traditional visual acuity chart for use in tele-ophthalmology. *Taiwan J Ophthalmol*, 2022, 12(2): 155-163.

[22] Davara ND, Chintoju R, Manchikanti N, et al. Feasibility study for measuring patients' visual acuity at home by their caregivers. *Indian J Ophthalmol*, 2022, 70(6): 2125-2130.

[23] Han XT, Scheetz J, Keel S, et al. Development and validation of a smartphone-based visual acuity test (vision at home). *Transl Vis Sci Technol*, 2019, 8(4): 27.

[24] Ramesh Masthi NR, Srivatsav RP, Aryan R, et al. A cross-sectional study on the burden of visual and hearing impairment using WHO eyes and hear WHOpro applications among professional degree college students, Bengaluru Urban. *J Family Med Prim Care*, 2025, 14(2): 785-789.

[25] Wu Y, Keel S, Carneiro VLA, et al. Real-world application of a smartphone-based visual acuity test (WHOeyes) with automatic distance calibration. *Br J Ophthalmol*, 2024, 108(11): 1613-1620.

[26] Osborne D, Steele A, Evans M, et al. Children's visual acuity tests without professional supervision: a prospective repeated measures study. *Eye (Lond)*, 2023, 37(18): 3762-3767.

[27] Abdelshafy Tabl A, Bendary M, Abdelshafy Tabl M. Accuracy of mobile-based vision chart in clinical practice during the COVID-19 pandemic. *Ophthalmic Epidemiol*, 2024, 31(2): 107-111.

[28] Tousignant B, Garceau MC, Bouffard-Saint-Pierre N, et al. Comparing the Netra smartphone refractor to subjective refraction. *Clin Exp Optom*, 2020, 103(4): 501-506.

[29] Jeganathan VSE, Valikodath N, Niziol LM, et al. Accuracy of a smartphone-based autorefractor compared with criterion-standard refraction. *Optom Vis Sci*, 2018, 95(12): 1135-1141.

[30] Hasrod N, Rubin A. Comparison of the Near Eye Tool for Refractive Assessment (NETRA) and non-cycloplegic subjective refraction. *BMJ Open Ophthalmol*, 2022, 7(1): e000851.

[31] Hasrod N, Rubin A. Multivariate analysis of repeatability for the near eye tool for refractive assessment (NETRA). *BMJ Open Ophthalmol*, 2023, 8(1): e001458.

[32] Vingopoulos F, Garg I, Kim EL, et al. Quantitative contrast sensitivity test to assess visual function in central serous chorioretinopathy. *Br J Ophthalmol*, 2023, 107(8): 1139-1143.

[33] Gupta L, Cvintal V, Delvadia R, et al. SPARCS and Pelli-Robson

contrast sensitivity testing in normal controls and patients with cataract. *Eye (Lond)*, 2017,31(5):753–761.

[34] Thakur S, Ichhpujani P, Kumar S, et al. Assessment of contrast sensitivity by Spaeth Richman Contrast Sensitivity Test and Pelli Robson Chart Test in patients with varying severity of glaucoma. *Eye (Lond)*, 2018,32(8):1392–1400.

[35] Habtamu E, Bastawrous A, Bolster NM, et al. Development and validation of a smartphone-based contrast sensitivity test. *Transl Vis Sci Technol*, 2019,8(5):13.

[36] Karampatakis V, P Papadopoulou E, Almpandou S, et al. Evaluation of contrast sensitivity in visually impaired individuals using K–CS test. A novel smartphone-based contrast sensitivity test–Design and validation. *PLoS One*, 2024,19(2):e0288512.

[37] Rodríguez-Vallejo M, Remón L, Monsoriu JA, et al. Designing a new test for contrast sensitivity function measurement with iPad. *J Optom*, 2015,8(2):101–108.

[38] 罗文静, 胡金维, 胡淑琼. 静息态功能磁共振成像在青光眼疾病中的应用研究进展. *国际眼科杂志*, 2023,23(1):67–70.

[39] Phu J, Khuu SK, Nivison-Smith L, Kalloniatis M. Standard automated perimetry for glaucoma and diseases of the retina and visual pathways: Current and future perspectives. *Prog Retin Eye Res*, 2025, 104:101307.

[40] Richardson QR, Kumar RS, Ramgopal B, et al. Diagnostic accuracy of an iPad application for detection of visual field defects. *Eye*, 2022,37(8):1690–1695.

[41] Vingrys AJ, Healey JK, Liew S, et al. Validation of a tablet as a tangent perimeter. *Transl Vis Sci Technol*, 2016,5(4):3.

[42] Kong YX, He MG, Crowston JG, et al. A comparison of perimetric results from a tablet perimeter and Humphrey field analyzer in glaucoma patients. *Transl Vis Sci Technol*, 2016,5(6):2.

[43] Prea SM, Kong YXG, Mehta A, et al. Six-month longitudinal comparison of a portable tablet perimeter with the Humphrey field analyzer. *Am J Ophthalmol*, 2018,190:9–16.

[44] Schulz AM, Graham EC, You YY, et al. Performance of iPad-based threshold perimetry in glaucoma and controls. *Clin Exp Ophthalmol*, 2018,46(4):346–355.

[45] Chia MA, Trang E, Agar A, et al. Screening for glaucomatous visual field defects in rural Australia with an iPad. *J Curr Glaucoma Pract*, 2021,15(3):125–131.

[46] Prea SM, Kong GYX, Guymner RH, et al. Uptake, persistence, and performance of weekly home monitoring of visual field in a large cohort of patients with glaucoma. *Am J Ophthalmol*, 2021,223:286–295.

[47] Prea SM, Vingrys AJ, Kong GYX. Test reliability and compliance to a twelve-month visual field telemedicine study in glaucoma patients. *J Clin Med*, 2022,11(15):4317.

[48] Kumar H, Thulasidas M. Comparison of perimetric outcomes from Melbourne rapid fieldstaple perimeter software and Humphrey field analyzer in glaucoma patients. *J Ophthalmol*, 2020,2020:8384509.

[49] Prince J, Thompson A, Mwanza JC, et al. Glaucoma screening using an iPad-based visual field test in a west African population. *Ophthalmol Glaucoma*, 2022,5(3):275–283.

[50] Ding JB, Tecson IC, Ang BCH, et al. The performance of iPad-based noise-field perimeter versus Humphrey Field Analyser in detecting glaucomatous visual field loss. *Eye (Lond)*, 2022,36(4):800–811.

[51] Mees L, Upadhyaya S, Kumar P, et al. Validation of a head-mounted virtual reality visual field screening device. *J Glaucoma*, 2020,

29(2):86–91.

[52] Pradhan ZS, Sircar T, Agrawal H, et al. Comparison of the performance of a novel, smartphone-based, head-mounted perimeter (GearVision) with the Humphrey field analyzer. *J Glaucoma*, 2021,30(4):e146–e152.

[53] Tsapakis S, Papaconstantinou D, Diagourtas A, et al. Home-based visual field test for glaucoma screening comparison with Humphrey perimeter. *Clin Ophthalmol*, 2018,12:2597–2606.

[54] Montelongo M, Gonzalez A, Morgenstern F, et al. A virtual reality-based automated perimeter, device, and pilot study. *Transl Vis Sci Technol*, 2021,10(3):20.

[55] Kimura T, Matsumoto C, Nomoto H. Comparison of head-mounted perimeter (imo<sup>®</sup>) and Humphrey field analyzer. *Clin Ophthalmol*, 2019,13:501–513.

[56] Nakanishi M, Wang YT, Jung TP, et al. Detecting glaucoma with a portable brain-computer interface for objective assessment of visual function loss. *JAMA Ophthalmol*, 2017,135(6):550–557.

[57] Greenstein VC, Hood DC, Ritch R, et al. S (blue) cone pathway vulnerability in retinitis pigmentosa, diabetes and glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1989,30(8):1732–1737.

[58] Jolly JK, Pratt L, More AK, et al. The Effect of Cataract on Color Vision Measurement with the Low-Vision Cambridge Colour Test: Providing an Adjustment Factor for Clinical Trials. *Ophthalmol Sci*, 2022; 2(2):100153.

[59] Khizer MA, Ijaz U, Khan TA, et al. Smartphone color vision testing as an alternative to the conventional ishihara booklet. *Cureus*, 2022,14(10):e30747.

[60] Ozgur OK, Emborgo TS, Vieyra MB, et al. Validity and acceptance of color vision testing on smartphones. *J Neuroophthalmol*, 2018,38(1):13–16.

[61] Fliotsos MJ, Zhao JW, Pradeep T, et al. Testing a popular smartphone application for colour vision assessment in healthy volunteer subjects. *Neuroophthalmology*, 2021,45(2):99–104.

[62] Sorkin N, Rosenblatt A, Cohen E, et al. Comparison of ishihara booklet with color vision smartphone applications. *Optom Vis Sci*, 2016, 93(7):667–672.

[63] Tang T, Álvaro L, Alvarez J, et al. ColourSpot, a novel gamified tablet-based test for accurate diagnosis of color vision deficiency in young children. *Behav Res Methods*, 2022,54(3):1148–1160.

[64] Bodduluri L, Boon MY, Ryan M, et al. Normative values for a tablet computer-based application to assess chromatic contrast sensitivity. *Behav Res Methods*, 2018,50(2):673–683.

[65] Lord K, Shah VA, Krishna R. *The Eye Handbook: A Mobile App in Ophthalmic Medicine*. *Mo Med*, 2013,110(1):49–51.

[66] Chhablani J, Kaja S, Shah VA. Smartphones in ophthalmology. *Indian J Ophthalmol*, 2012,60(2):127–131.

[67] Satgunam P, Thakur M, Sachdeva V, et al. Validation of visual acuity applications for teleophthalmology during COVID-19. *Indian J Ophthalmol*, 2021,69(2):385–390.

[68] Raffa LH, Balbaid NT, Ageel MM. “Smart Optometry” phone-based application as a visual acuity testing tool among pediatric population. *Saudi Med J*, 2022,43(8):946–953.

[69] Brucker J, Bhatia V, Sahel JA, et al. Odysight: a mobile medical application designed for remote monitoring – a prospective study comparison with standard clinical eye tests. *Ophthalmol Ther*, 2019, 8(3):461–476.