

基于智能手机的眼科诊断技术应用研究综述

倪佳^{1,2}, 张培茗^{1,2}, 胡桐¹, 沈佳琳¹, 王迎¹, 郭世俊²

(1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海200093; 2. 上海健康医学院医疗器械学院, 上海201318)

摘要: 对基于智能手机的眼科诊断技术进行综述, 分析将智能手机光学成像技术用于眼结构检查的裂隙灯显微镜、眼底成像设备和角膜地形图仪等技术特点。研究可知, 智能手机应用于眼科具有较好的便携性、易用性和低成本等优势, 能够增加患者尤其是医疗资源紧缺地区的患者获得眼科疾病诊断的机会, 从而节约专业医疗资源。未来基于智能手机的眼科诊断设备在医院、诊所和社区卫生中心眼科疾病筛查中将有广泛的应用前景, 也可在医学院校用于临床教学。

关键词: 眼科诊断; 智能手机; 裂隙灯显微镜; 角膜地形图仪; 检眼镜

DOI: 10.11907/rjtk.231126

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TP181; R770.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2024)002-0201-07



Review of Research on the Application of Smartphone-Based Ophthalmic Diagnostic Technology

NI Jia^{1,2}, ZHANG Peiming^{1,2}, HU Tong¹, SHEN Jialin¹, WANG Ying¹, GUO Shijun²

(1. School of Health Sciences and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Medical Instruments, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China)

Abstract: This paper reviews smartphone-based ophthalmic diagnostic technologies and analyzes the technical features of slit lamp microscopes, fundus imaging devices and corneal topographers that use smartphone optical imaging technology for ocular structural examination. From the research, the application of smartphones in ophthalmology has the advantages of good portability, ease of use and low cost, which can increase the opportunities of patients, especially patients in areas with scarce medical resources, to have access to ophthalmic disease diagnosis, and can save professional medical resources. In the future, smartphone-based ophthalmic diagnostic devices will have a wide range of applications in hospitals, clinics and community health centers for ophthalmic disease screening, and can also be used in medical schools for clinical teaching.

Key Words: ophthalmic diagnosis; smartphone; slit lamp microscope; corneal topographer; ophthalmoscope

0 引言

随着生活节奏的加快, 人们用眼强度大幅增加, 导致眼部疾病高发, 且糖尿病、高血压等慢性病也会引发视网膜病变、黄斑病变、青光眼和白内障等眼部疾病。人眼是一个复杂的光学系统, 人眼内的病灶可通过光学成像技术进行观察和诊断, 基于光学成像技术开发了裂隙灯显微

镜、角膜地形图仪、角膜曲率计和眼底照相机等精密的光学成像仪器, 实现对疾病的准确诊断。这些诊断设备体积大、不易携带, 对于长期卧床的患者而言, 通过这些设备进行眼部检查非常困难, 一般须经过专业培训才能掌握操作方法, 设备价格较高。智能手机具备拍摄以及数据存储、处理和传输的功能, 研究基于智能手机的眼科诊断设备, 可以实现眼科诊断设备的小型化和便携化, 同时发挥智能手机平台的高度集成和光学成像功能等特点, 便于对眼部

收稿日期: 2023-03-15

作者简介: 倪佳(1997-), 女, 上海理工大学健康科学与工程学院硕士研究生, 研究方向为眼科智能诊断设备; 张培茗(1981-), 男, 博士, 上海理工大学健康科学与工程学院副教授、硕士生导师, 研究方向为医疗器械监管科学; 胡桐(1998-), 男, 上海理工大学健康科学与工程学院硕士研究生, 研究方向为眼科智能诊断系统; 沈佳琳(1998-), 女, 上海理工大学健康科学与工程学院硕士研究生, 研究方向为眼科智能诊断设备; 王迎(1997-), 女, 上海理工大学健康科学与工程学院硕士研究生, 研究方向为眼科智能诊断设备; 郭世俊(1981-), 男, 硕士, 上海健康医学院医疗器械学院讲师, 研究方向为生物医学光学。本文通讯作者: 郭世俊。

疾病进行诊断。目前,基于智能手机的眼科设备相关研究主要集中于裂隙灯显微镜、角膜地形图测量和眼底成像等领域,本文重点对智能手机在眼科诊断中的应用进行综述,为后续该领域研究提供理论参考。

1 基于智能手机的裂隙灯显微镜

裂隙灯显微镜(简称裂隙灯)是眼科检查中的重要设备之一,它可以提供有关眼前节结构和相关病理的重要信息^[1],已广泛应用于眼睑、角膜、结膜、虹膜、晶状体等的健康检查。临床常用的裂隙灯显微镜主要由照明系统和观察系统两部分构成,即裂隙灯与双目立体显微镜^[2]。鉴于常规裂隙灯无法存储和传送检查信息,隋成华等^[3]设计并实现了一款将智能手机与裂隙灯相结合的眼前节成像系统,其光学系统结构如图1所示。

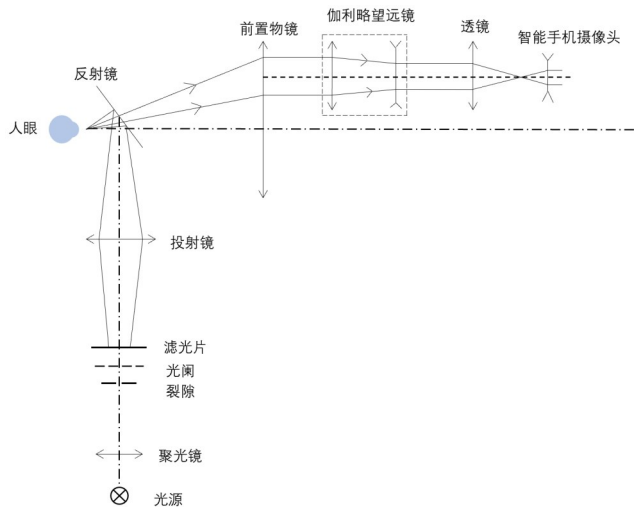


Fig. 1 Optical system structure of the smartphone-based slit lamp microscope

图1 基于智能手机的裂隙灯显微镜光学系统结构

该系统采用柯勒照明方式,由灯泡产生光线,经聚光镜后通过可转动隔板产生不同长宽的裂隙光^[2],经光阑限制通光量,然后根据检查情况调节滤光片以发出不同颜色的裂隙光,裂隙光经投射镜和反射镜成像于被检眼。入射光被视网膜反射、经人眼光学系统后,依次经过反射镜、前置物镜和伽利略望远镜等成像于智能手机摄像头,实现眼前节的图像信息采集^[4]。其设计难点在于,必须确保智能手机的摄像头轴线与裂隙灯的光学轴线重合。该研究始于Gurram等^[5],他手持索尼Xperia S并将其摄像头放于裂隙灯目镜一侧前,获取了一系列眼睑、角膜、结膜等图像,但是手机不够稳固;随之,各种连接器或连接环被研发出来,用以将手机与裂隙灯目镜紧密接驳,有的应用于临床教学并取得了不错的效果,有的直接应用于临床,清晰的图像为医护人员提供了客观的诊断依据^[6-9],由此可见连接技术的重要性。Toslak等^[10]通过定制的一款适配器将iPhone 6连接于裂隙灯目镜一侧,由iPhone 6摄像头1.5μm

的像素大小、裂隙灯40倍的放大率以及iPhone 6的6倍数字放大率的配合,证明了以0.37 μm亚细胞分辨率对角膜内皮进行基于智能手机显微镜成像的可行性。自此,智能手机与裂隙灯的连接技术愈发成熟,所获眼前节图像的质量也愈发可靠。在新冠肺炎疫情期间,前部成像模块(Anterior Imaging Module, AIM)被提出,结合iPhone 6S安装于裂隙灯上(见图2)。其中,分束器的设计使其与裂隙灯的放大鼓光学系统相匹配,整个光学设计使裂隙灯的固定焦点驱动智能手机的焦点,无需进行额外的手动调整,为医生提供了极大便利。此外,该设备使医生通过手机而不是目镜查看,保证了医患之间更安全的距离。

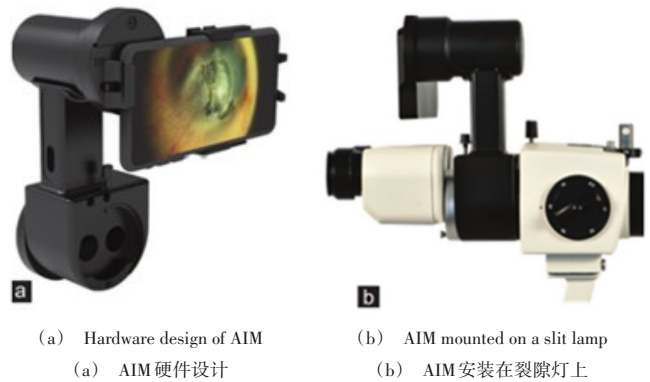


Fig. 2 Exterior of AIM

图2 AIM的外观

由于在紧急情况下或发展中国家的农村地区根本没有可用的裂隙灯,研究者开始探索只用一部智能手机或者用一片透镜或光学附件配合智能手机获取眼前节图像。虽然其整体的光学系统结构更简单,可省去图1中的多个透镜,但在设计时除需仔细考虑所选智能手机的摄像头与闪光灯是否能满足照明和成像要求外,也要保证透镜或光学附件的轴线和智能手机的摄像头轴线重合,以清楚地观察到眼前节结构并且使得从眼部反射出的光成像于摄像头。Mohammadpour等^[11]尝试只用一部iPhone 6或用一片透镜与之配合拍摄眼前节图像,发现是否使用透镜以及透镜的屈光度大小决定了图像质量的高低;Ludwig等^[12]证明了未经眼科培训的个体使用iPhone 5S和适配器EyeGo也能快速获取高质量的眼前节图像。EyeGo由一个LED光源和一个微距透镜组成,该外置光源相比手机自带的闪光灯照明更充足,但是引起了反射;Chiong等^[13]研制了一个包含微距透镜、三反射镜系统和滤光片的光学附件,其中三反射镜的设计有效地消除了杂散光。将其与iPhone 6 Plus结合(见图3),在临床环境中对患者进行了检查,发现图像能够清晰地显示白内障和角膜上皮缺损。

从通过连接器或适配器将智能手机与裂隙灯相结合,到单独使用一部智能手机、使用一片透镜或光学附件配合智能手机完成眼前节图像的拍摄,设备体积由大到小、操作由难到易、成本由高到低,可见智能手机的优势体现在便携性、易用性和低成本上。但由于不同品牌甚至不同型



Fig. 3 Anterior segment microscope on the iPhone 6 Plus

图 3 iPhone 6 Plus 上的眼前节显微镜

号的智能手机有着不同的镜头、闪光灯和传感器等部件,对于设计与其匹配的光学附件存在一定难度。比如, iPhone 7 只有一个后置摄像头,而 iPhone 7 Plus 有两个,因此在设计附件时不仅需考虑尺寸、位置问题,还需考虑闪光灯与主摄像头之间的距离问题,即是否能够满足照明和成像需求。图 4 为使用裂隙灯与使用 iPhone 5S 和 EyeGo 采集到的眼前节图像比较情况,由于照明时前者比后者多了一个裂隙光切面,因此裂隙灯获取的图像信息更清晰、更丰富。但是,简单的技术对在没有裂隙灯的情况或对长期卧床的患者而言非常有用,只是需进一步评估其临床可行性。



(a) Slit lamp (a) 裂隙灯
 (b) iPhone 5S and EyeGo (b) iPhone 5S 和 EyeGo

Fig. 4 Comparison of anterior segment images

图 4 眼前节图像比较

2 基于智能手机的角膜地形图仪

角膜地形图仪用于检测角膜表面形貌以诊断圆锥角膜、角膜散光等疾病。常用的测量方法有 Placido 盘法、立体三角光栅网格投影法、光学层析相干成像法等,其中 Placido 盘法的使用最为广泛^[14],主要由 Placido 投射系统、实时图像监测系统和计算机图像处理系统组成。角膜地形图仪具有系统性、准确性、精确性和直观性等特点,是详细了解角膜表面形态的最佳设备,但它价格较高、操作繁杂且不可携带,导致中低收入国家的大量人口无法及早发现圆锥角膜等疾病,使其成为这些人口部分或完全失明的主要原因。将智能手机应用于角膜地形图测量,智能手机直接代替了实时图像监测系统和计算机图像处理系统,便于携带和使用。以基于智能手机的 Placido 盘法角膜地形图仪结构(见图 5)为例,一般使用外置 LED 作为光源,将 Placido 圆环从中心到周边均匀地投射于角膜表面,使整个角膜处于投射分析范围之内,最终生成反应角膜表面各处

曲率变化的角膜地形伪彩图。其中,主要涉及对附件和内部双色相间圆环的结构设计,需要充分考虑 LED 与附件的连接位置、圆环的数量、附件大小和长度以及整个设备的工作距离,以实现对接膜的清晰成像。

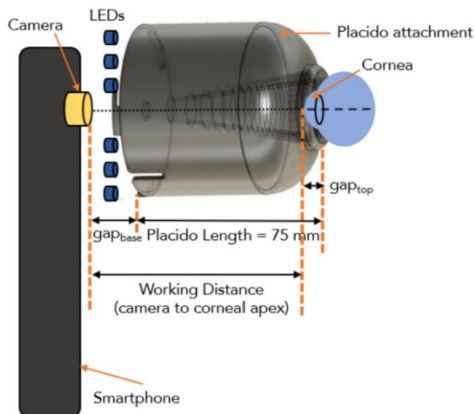
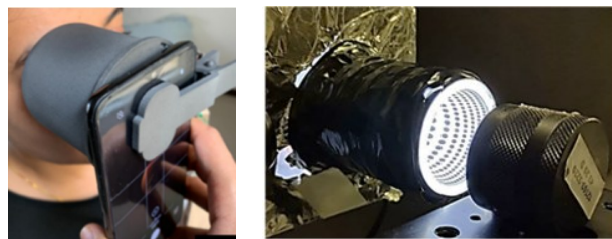


Fig. 5 Structure of the smartphone-based Placido disc corneal topographer

图 5 基于智能手机的 Placido 盘法角膜地形图仪结构

Pinheiro 等^[15]开发了一款新型的超便携式智能手机角膜地形图仪,与 iPhone 4 连接,由支撑盖、用于放大的光学系统、带透明和黑色同心环的圆锥体(Placido 原理)以及带 LED(位于圆锥体中央)的印刷电路板组成。该发明是公认的技术创新,极大促进了圆锥角膜诊断设备的发展。Gairola 等^[16]提出的 SmartKC(见图 6a)由 Placido 盘附件、LED 灯组和安卓手机应用程序组成,镂空状的附件设计减轻了设备重量,用于对准智能手机摄像头中心与角膜中心的两个支撑条和应用程序中的虚拟十字准线,可以最大限度地减少偏差,辅助准确成像;Huerta-carranza 等^[17]提出“null-screen”智能手机角膜地形图仪(见图 6b),圆锥体内部孔洞式的设计通过光源照射在角膜表面形成无数个圆形斑点,与 Placido 圆环相比提高了成像精度。经验证,其图像质量与一款商业角膜地形图仪相当。



(a) SmartKC (a) SmartKC
 (b) "Null-screen" (b) “空屏”

Fig. 6 Smartphone-based corneal topographers

图 6 基于智能手机的角膜地形图仪

由于考虑到将智能手机 LED 作为光源,亮度不足、发光角度不够大,无法满足系统的照明要求,上述系统都采用了外置光源的方式,因此增加了电路控制部分,使整体系统变得复杂,设计难度相应增大。由上述系统采集到的图像都存在睫毛遮挡角膜上部的问题,虽然可以通过拟合

还原该部分的数据,但不能完全保证其准确性导致影响后续分析。此外,由于这些系统是手持式的,可能会导致图像模糊和基于偏移/倾斜的未对准误差,因此部分图像的质量偏低,会将它们作废弃处理。但质量高的图像与商业角膜地形图仪一样可以呈现清晰的角膜投射(见图7),相比较而言,基于智能手机的角膜地形图仪具有便携性、易用性和低成本的优势,但是在设计与已有镜头、闪光灯和传感器的智能手机相匹配的光学适配器时存在一定难度,有时为了达到应用场景要求,难度更大。后续还需对这些设备作进一步评估和临床验证,以确保更好地符合人体工程学,确保结果的重现性和更高的耐用性,以便大规模使用。

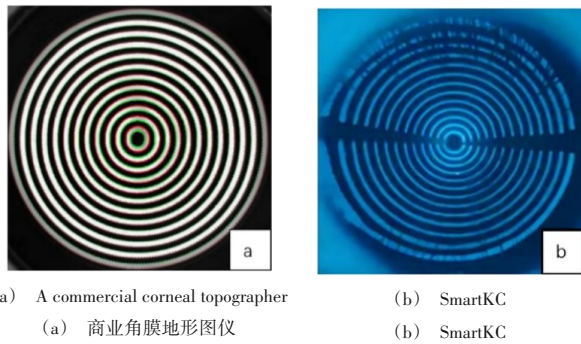


Fig. 7 Comparison of corneal images based on the Placido principle
图7 基于Placido原理的角膜图像比较

3 基于智能手机的眼底成像设备

临床上通常使用眼底照相机、直接检眼镜、双目间接检眼镜筛查和诊断各种眼底疾病。通过眼底照相机获取的图像质量高,但体积庞大、价格较高、操作要求高、卧床患者无法完成检查。直接检眼镜方便携带但放大倍数小、立体感弱,只对紧急会诊患者使用。双目间接检眼镜应用广泛,放大倍数大、立体感强,但需要散瞳才能看到清晰的眼底。2010年开始,使用智能手机拍摄眼底图像的想法被提出且不同的系统得以实现^[18]。这些系统按照原理可分为直接检眼镜和间接检眼镜两大类,但基本光学设计相同(见图8)。将智能手机的闪光灯(或外置光源)和摄像头分别作为照明系统的光源和成像系统的成像设备,在智能手机和被检眼之间加入光学透镜(和偏振片、光阑、反射镜、分束器等光学元件),将入射光投射至眼底,被视网膜反射后经过人眼光学系统和部分光学元件成像于智能手机摄像头。不同的光学设计会形成不同的视网膜视角(AoV),最终导致不同的视场角。其难点在于设计时必须考虑所选用智能手机的摄像头与闪光灯之间的距离、设备到眼睛的距离 x 、设备的长度 y 、透镜的数量和类型等因素,使闪光灯照亮的眼底区域和摄像头能观察到的眼底区域有交集,从而由摄像头采集眼底图像。

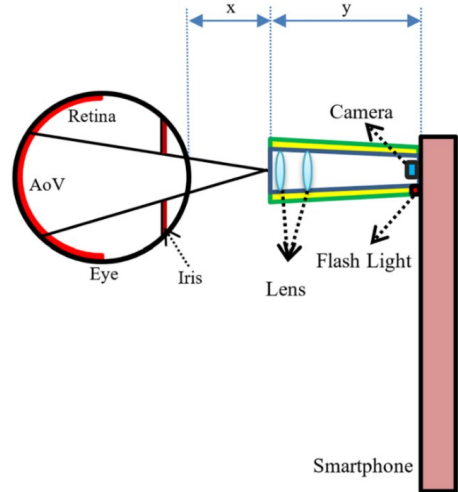


Fig. 8 Basic optical design of the smartphone-based fundus imaging device

图8 基于智能手机的眼底成像设备的基本光学设计

3.1 基于智能手机的直接检眼镜

利用智能手机作为直接检眼镜,各种夹式和非夹式附件被开发出来,内含整个光学系统。Russo等^[19]开发了D-Eye(见图9a),与iPhone 5结合使用,散瞳时视场角能够达到 20° 。其光学系统(由偏振滤光片、光圈、分束器、反射镜、光吸收墙和负透镜组成)^[20]中的交叉偏振技术有效减少了伪影和反射,改善了图像细节和对比度。研究者^[21-23]将其与传统设备进行比较,验证了对糖尿病视网膜病变分级及检测有临床意义的黄斑水肿(CSME)等能力。还有一夹式附件Peek Retina(见图9b),闪光灯上的棱镜使照明路径与摄像头的视野对齐,金属屏蔽物的设计使摄像头不受棱镜表面缺陷反向散射光的影响,散瞳时视场角能够达到 $20-30^\circ$ ^[24]。经验证,Peek Retina和三星SIII GT-I9300结合所拍图像与视网膜相机CentreVue+所拍图像测量所得垂直杯盘比一致性极好^[25]。

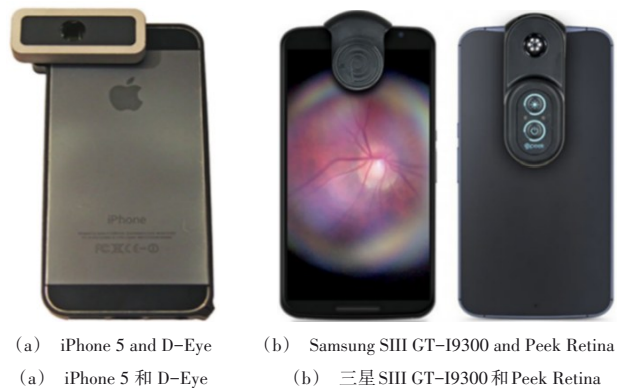


Fig. 9 Smartphone-based direct ophthalmoscopes

图9 基于智能手机的直接检眼镜

Kim等^[26]在非夹式附件系统Ocular CellScope^[27]的基础上开发了CellScope Retina(见图10),将外置白色LED光源改进为红白结合的环形光源使照明更均匀、新增的用磁

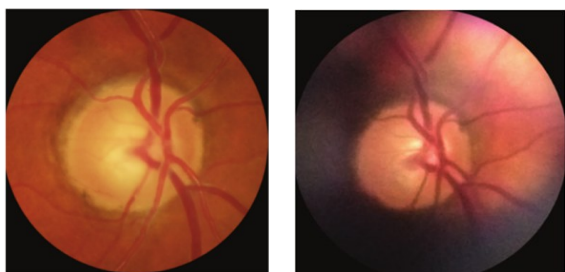
铁连接于塑料外壳的LED显示器为对侧眼睛提供视线固定,从而提高了图像质量,通过它从散瞳患者拍摄到的各种视网膜疾病图像的质量足以让专家作出快速诊断。同时,由他们开发的应用程序能快速以全分辨率自动拼接中央、上、下、鼻和颞侧的视网膜图像,生成一张视场角大约为 100° 的蒙太奇图像,充分地利用了智能手机的易开发性。



Fig. 10 CellScope Retina
图 10 CellScope Retina

除上述设备外,当摄像头和闪光灯的距离非常接近,单独的一部智能手机也可以作为直接检眼镜使用。Gunasekera 等^[28]使用 iPhone X 以视频的方式记录了患者散瞳后的眼底状况,从视频中截取到的视盘图像显示了视盘周围出血和视神经萎缩等疾病。Pujari 等^[29]通过同样的方法获得了显示视盘周围区域和黄斑细节的清晰图像。由此可见,不同使用者拍摄技术的差异会影响最终图像质量。之后,Pujari 等^[30]使用 iPhone XS Max 对一名两岁的视网膜母细胞瘤患者在全身麻醉的情况下以视频的方式记录下了多处视网膜病变。但是,单独将智能手机用作直接检眼镜还需深入研究以验证其临床可行性。

基于智能手机的直接检眼镜拍摄的眼底图像质量最高可与专业视网膜相机相当(见图 11),相比较而言,智能手机系统存在便携性、易用性和低成本的优势。



(a) Canon CR-2 retina camera (b) iPhone 5 and D-Eye
(a) 佳能 CR-2 视网膜相机 (b) iPhone 5 和 D-Eye

Fig. 11 Comparison of fundus images
图 11 眼底图像比较

3.2 基于智能手机的间接检眼镜

与传统间接检眼镜不同,智能手机作为间接检眼镜只需一片透镜的配合,保证该透镜与智能手机的照明光路同

轴即可获得眼底图像^[31]。早期,美国研究者使用 iPhone 4、20D 透镜和应用程序 Filmic Pro 获得了高质量的眼底图像^[32],印度、美国的研究者分别开发出固定透镜与智能手机距离的适配器 MII RetCam(第一台获取中央和周边视网膜高质量图像的智能检眼镜,见图 12)^[33]和 EyeGo(目前已在 FDA 注册为 II 类 510(K)豁免眼科相机 Paxos Scope 的设备原型)^[34]辅助 iPhone 和透镜对眼底成像,新西兰的研究者开发了一款能够调节两者距离的适配器 oDocs visoScoPe^[35](见图 13),提高了其适用性。但是,这些简易的系统容易出现反射现象。



Fig. 12 MII Retcam
图 12 MII Retcam



Fig. 13 oDocs visoScoPe
图 13 oDocs visoScoPe

随后,由镜筒连接透镜与智能手机的间接检眼镜被研发出来^[36],其结构更复杂、技术更精密,且图像质量有所提高。如美国 Welch Allyn 公司的 iExaminer 系统,包括适配器、与之匹配的 PanOptic 检眼镜和应用程序,其适配器外侧的眼罩有效稳定了视野并阻挡了外界光线的干扰,多年来一直被眼科医生使用;美国 Volk Optical 公司的 Volk iN-view 系统(见图 14),包括 iPhone 适配器、25D 透镜和应用程序,选择 25D 透镜作为主要成像透镜有效扩大了眼底可视范围;印度的 Remidio 非散瞳眼底相机(Non-Mydriatic Fundus On Phone, NMFOP)是世界上第一款支持智能手机的、经过蔡司 FF450 系统验证的高质量视网膜成像系统,其获得专利的环形照明光源、红外光以及智能手机摄像头音圈电机的设计有助于消除色差,从而提高了图像质量(见图 14)。后两者在非散瞳情况下可以达到与眼底照相机相近的视场角,极大提高了检查效率。在使用这些设备时,可以通过手机应用程序独立控制光强度、焦距和曝光,从而获得与眼底相机相当的高质量眼底图像(见图 15)。

由此可见,将智能手机应用于间接检眼镜的优势同样体现在便携性、易用性和低成本上,但是存在整体图像质量之间差异大的问题,因此有必要进行更多的比较研究并为其图像质量分级制定参考标准^[37]。并且,无论是基于智能手机的直接检眼镜还是间接检眼镜,由于智能手机有着固定的镜头、闪光灯和传感器,设计与之匹配的附件都存在一定难度,同时这些固定的元件参数也限制了整个系统的性能。此外,上述除 D-Eye 和 oDocs visoScoPe 外的



Fig. 14 Smartphone-based indirect ophthalmoscopes
图 14 基于智能手机的间接检眼镜

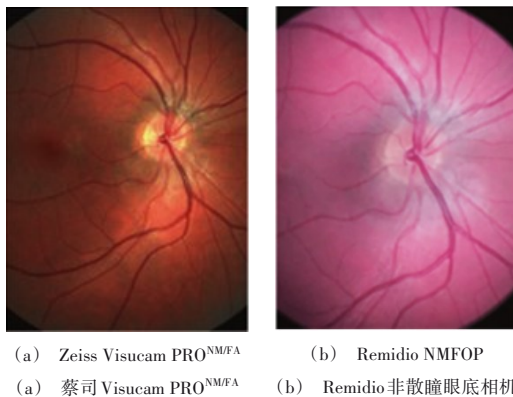


Fig. 15 Comparison of fundus images

图 15 眼底图像比较

适配器或系统都是为一款或几款智能手机所定制,因此应用范围受到限制。

4 结语

综合上述基于智能手机的裂隙灯显微镜、角膜地形仪及眼底成像设备应用现状可知,智能手机的优势集中体现在便携性、易用性和低成本上。但是,人眼本身是一个复杂的光学系统,通过智能手机实现对人眼的成像存在很大难度,在图像采集过程中,由于反射、睫毛遮挡等原因,图像质量会受到不同程度的影响,进而会影响医生诊断。

智能手机系统应用于眼科诊断的主要问题在于:①除商业设备外,系统虽然在初步筛查或学习中具有实际作用,但是并没有在常规的眼科实践中得到验证,需要进一步的研究以确保设备的临床安全性和有效性;②连接智能手机和光学系统的适配器都是针对一款或几款智能手机而设计,而智能手机更新换代的速度尤其快,导致适配器的设计开发跟不上节奏,甚至商业设备也没有对适配器进行更新,因此限制了应用范围。这需要研究者和制造商为不同操作系统和更多型号的智能机提供适配器,或者以模块化的方式构建大批的适配器,就目前而言这是一个巨大挑战;③目前,除“D-Eye”和“Peek Acuity”外,大多数智能手机的应用程序都没有证据表明其应用于临床实践的

科学有效性,因此需要解决其治理和监管方面的问题,以提高安全性,更便于消费者使用^[38];④由于智能手机所具有的镜头、LED灯和传感器已决定整体光学系统的部分性能,无法通过优化设计适配器将其提升,从而限制了整个系统的性能,因此基于智能手机的简易眼科设备的整体性能与具有精密系统的传统眼科设备相比而言较差,这是无法改变的一点^[37]。

目前,国内将智能手机应用于眼科诊断设备的研究相对较少,本文主要综述了近些年国外将智能手机与裂隙灯显微镜、角膜地形仪以及眼底成像设备相结合的一些研究状况,能够为国内提供一定的学习和参考价值。如今,智能手机的摄像头技术越来越成熟,拍摄性能也在不断提升,如超广角摄像头用于拍摄更宽广的画面、长焦摄像头在保证画质的前提下拍摄到更远的画面等。随着研究的深入,这些技术一定会被研究者发掘并应用于基于智能手机的眼科设备。未来,基于智能手机的眼科诊断设备在医院、诊所和社区卫生服务中心眼科疾病筛查方面将有广泛的应用前景,也有望在医学院校用于临床教学。

参考文献:

- [1] DUTT S, VADIVEL S S, NAGARAJAN S, et al. A novel approach to anterior segment imaging with smartphones in the COVID-19 era[J]. Indian Journal of Ophthalmology, 2021, 69(5): 1257-1262.
- [2] LUO X L. The principle, daily maintenance and common faults of ophthalmic slit lamp[J]. Medical Equipment, 2019, 32(14): 127-128.
罗小柳. 眼科裂隙灯的原理、日常维护及常见故障[J]. 医疗装备, 2019, 32(14): 127-128.
- [3] SUI C H, WO S J, GAO N, et al. Design and implementation of optical system for digital slit lamp microscope[J]. Journal of Photonics, 2017, 46(7): 173-181.
隋成华, 沃圣杰, 高楠, 等. 数码裂隙灯显微镜光学系统的设计与实现[J]. 光子学报, 2017, 46(7): 173-181.
- [4] CONG J, ZU M M, LI H T, et al. A smartphone-based fundus imaging system[J]. Chinese Optics, 2019, 12(1): 97-103.
丛婧, 郑明明, 李洪涛, 等. 基于智能手机的眼底成像系统[J]. 中国光学, 2019, 12(1): 97-103.
- [5] GURRAM M M. Ophthalmic cell-phone imaging system: a costless imaging system[J]. Canadian Journal of Ophthalmology-Journal Canadien D Ophtalmologie, 2013, 48(5): E135-E139.
- [6] MA Y Y. Application of smartphones in slit-lamp microscopy examination[J]. China Glasses Science-Technology Magazine, 2018(5): 127-129.
马玉莹. 智能手机在裂隙灯显微镜检查中的使用[J]. 中国眼镜科技杂志, 2018(5): 127-129.
- [7] GAO M, XIAO Y, WANG Y H, et al. Application of smartphone photographic function in slit lamp microscope photography[J]. Chinese Journal of Ophthalmology, 2013, 49(9): 841-843.
高敏, 肖扬, 王育红, 等. 智能手机照相功能在裂隙灯显微镜摄影中的应用[J]. 中华眼科杂志, 2013, 49(9): 841-843.
- [8] GAO M, XIAO Y. Application of smartphone slit-lamp photographic function in the clinical teaching practice of ophthalmology[J]. Ophthalmology in China, 2015, 24(3): 210-211.
高敏, 肖扬. 智能手机裂隙灯照相功能在眼科临床教学实践中的应用[J]. 眼科, 2015, 24(3): 210-211.

- [9] JIANG W, ZHU L J, MA H W, et al. Application of smartphone photographic function in slit lamp image acquisition [J]. *China Journal of Chinese Ophthalmology*, 2014, 24(2): 129-131.
姜维, 朱伶俐, 麻华伟, 等. 智能手机照相功能在裂隙灯图像采集中的应用 [J]. *中国中医眼科杂志*, 2014, 24(2): 129-131.
- [10] TOSLAK D, THAPA D, EROL M K, et al. Smartphone-based imaging of the corneal endothelium at sub-cellular resolution [J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(12): 1229-1232.
- [11] MOHAMMADPOUR M, MOHAMMADPOUR L, HASSANZAD M. Smartphone assisted slit lamp free anterior segment imaging: a novel technique in teleophthalmology [J]. *Contact Lens & Anterior Eye*, 2016, 39(1): 80-81.
- [12] LUDWIG C A, NEWSOM M R, JAIS A, et al. Training time and quality of smartphone-based anterior segment screening in rural India [J]. *Clinical Ophthalmology*, 2017, 11: 1301-1307.
- [13] CHIONG H S, FANG J L L, WILSON G. Tele-manufactured affordable smartphone anterior segment microscope [J]. *Clinical and Experimental Optometry*, 2016, 99(6): 580-582.
- [14] SUI C H, WO S J, GAO N, et al. Design and implementation of a Placido disk-based corneal topographer imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 231-237.
隋成华, 沃圣杰, 高楠, 等. 基于Placido盘的角膜地形图仪成像系统设计及实现 [J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 231-237.
- [15] PINHEIRO F I, DINIZ A A R, SOUZA E P D, et al. Design and development of an ultraportable corneal topographer for smartphones as a low cost new tool for preventing blindness caused by keratoconus [J]. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 2015, 4(3): 72-76.
- [16] GAIROLA S, BOHRA M, SHAHEER N, et al. SmartKC: smartphone-based corneal topographer for keratoconus detection [J]. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2021, 5(4): 155.
- [17] HUERTA-CARRANZA O, CAMPOS-GARCIA M, IVAN MORENO-OLIVA V, et al. Smartphone-based corneal topography with null-screens [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(6): 1381-1388.
- [18] IQBAL U. Smartphone fundus photography: a narrative review [J]. *International Journal of Retina and Vitreous*, 2021, 77(1): 44.
- [19] RUSSO A, MORESCALCHI F, COSTAGLIOLA C, et al. A novel device to exploit the smartphone camera for fundus photography [J]. *Journal of Ophthalmology*, 2015, 2015: 823139.
- [20] BALLAND O, RUSSO A, ISARD P F, et al. Assessment of a smartphone-based camera for fundus imaging in animals [J]. *Veterinary Ophthalmology*, 2017, 20(1): 89-94.
- [21] RUSSO A, MORESCALCHI F, COSTAGLIOLA C, et al. Comparison of smartphone ophthalmoscopy with slit-lamp biomicroscopy for grading diabetic retinopathy [J]. *American Journal of Ophthalmology*, 2015, 159(2): 360-364.
- [22] WINTERGERST M W M, BRINKMANN C K, HOLZ F G, et al. Undilated versus dilated monoscopic smartphone-based fundus photography for optic nerve head evaluation [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 10228.
- [23] KIM Y, CHAO D L. Comparison of smartphone ophthalmoscopy vs conventional direct ophthalmoscopy as a teaching tool for medical students: the COSMOS study [J]. *Clinical Ophthalmology*, 2019, 13: 391-401.
- [24] KARAKAYA M, HACISOFTAOGLU R E. Comparison of smartphone-based retinal imaging systems for diabetic retinopathy detection using deep learning [J]. *BMC Bioinformatics*, 2020, 21(4): 259.
- [25] BASTAWROUS A, GIARDINI M E, BOLSTER N M, et al. Clinical validation of a smartphone-based adapter for optic disc imaging in Kenya [J]. *Jama Ophthalmology*, 2016, 134(2): 151-158.
- [26] KIM T N, MYERS F, REBER C, et al. A smartphone-based tool for rapid, portable, and automated wide-field retinal imaging [J]. *Translational Vision Science & Technology*, 2018, 7(5): 21.
- [27] MAAMARI R N, KEENAN J D, FLETCHER D A, et al. A mobile phone-based retinal camera for portable wide field imaging [J]. *British Journal of Ophthalmology*, 2014, 98(4): 438-441.
- [28] GUNASEKERA C D, THOMAS P. High-resolution direct ophthalmoscopy with an unmodified iPhone X [J]. *Jama Ophthalmology*, 2019, 137(2): 212-213.
- [29] PUJARI A, MARKAN A, CHAWLA R, et al. The additional role of unmodified iPhone X as a direct ophthalmoscope [J]. *Indian Journal of Ophthalmology*, 2019, 67(7): 1253-1254.
- [30] PUJARI A, LOMI N, GOEL S, et al. Unmodified iPhone XS Max for fundus montage imaging in cases of retinoblastoma [J]. *Indian Journal of Ophthalmology*, 2019, 67(6): 948-949.
- [31] PUJARI A. Smartphone ophthalmoscopy: is there a place for it? [J]. *Clinical Ophthalmology*, 2021, 15: 4333-4337.
- [32] HADDOCK L J, KIM D Y, MUKAI S. Simple, inexpensive technique for high-quality smartphone fundus photography in human and animal eyes [J]. *Journal of Ophthalmology*, 2013, 2013: 518479.
- [33] LEKHA T, RAMESH S, SHARMA A, et al. MII RetCam assisted smartphone based fundus imaging for retinopathy of prematurity [J]. *Indian Journal of Ophthalmology*, 2019, 67(6): 834-839.
- [34] LUDWIG C A, MURTHY S I, PAPPURU R R, et al. A novel smartphone ophthalmic imaging adapter: user feasibility studies in Hyderabad, India [J]. *Indian Journal of Ophthalmology*, 2016, 64(3): 191-200.
- [35] DAS S, KUHT H J, DE SILVA I, et al. Feasibility and clinical utility of handheld fundus cameras for retinal imaging [J]. *Eye*, 2023, 37: 274-279.
- [36] TOSLAK D, AYATA A, LIU C, et al. Wide-field smartphone fundus video camera based on miniaturized indirect ophthalmoscopy [J]. *Retina-the Journal of Retinal and Vitreous Diseases*, 2018, 38(2): 438-441.
- [37] WINTERGERST M W M, JANSEN L G, HOLZ F G, et al. Smartphone-based fundus imaging—where are we now? [J]. *Asia-Pacific Journal of Ophthalmology*, 2020, 9(4): 308-314.
- [38] HOGARTY D T, HOGARTY J P, HEWITT A W. Smartphone use in ophthalmology: what is their place in clinical practice? [J]. *Survey of Ophthalmology*, 2020, 65(2): 250-262.