

人工智能在视光学领域中的研究进展

纪玉珂¹, 陈楠², 颜智鹏², 李柯然², 王成虎², 曹国凡², 蒋沁², 杨卫华²

引用: 纪玉珂, 陈楠, 颜智鹏, 等. 人工智能在视光学领域中的研究进展. 国际眼科杂志 2022;22(5):731-735

基金项目: 江苏省医院协会医院管理创新研究重点课题 (No. JSYGY-2-2021-467)

作者单位: ¹(211166) 中国江苏省南京市, 南京医科大学; ²(210029) 中国江苏省南京市, 南京医科大学附属眼科医院

作者简介: 纪玉珂, 在读硕士研究生, 研究方向: 眼科疾病的基础与临床、眼科人工智能与临床。

通讯作者: 杨卫华, 毕业于苏州大学, 博士, 主任医师, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向: 眼科人工智能. benben0606@139.com

收稿日期: 2021-11-29 修回日期: 2022-03-29

摘要

近年来,随着计算机科学技术的不断提高,以深度学习(DL)为基础的人工智能(AI)技术得到了飞速的发展,引起了全球的广泛关注。AI在医学领域的研究和应用已经取得了很大的进展,在眼科视光学领域,AI可对近视、斜视、弱视等疾病进行辅助诊断;在圆锥角膜的筛查和早期诊断以及近视的预防和矫正中取得了良好的结果。尽管如此,AI在眼科的应用也存在巨大的限制和挑战,包括临床和技术挑战、算法结果的可解释性、医学法律问题等。本文综述了AI在眼科视光学领域诊疗中的应用、局限性及展望。

关键词: 人工智能; 深度学习; 视光学

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2022.5.07

Research progress of artificial intelligence technology in the field of optometry

Yu - Ke Ji¹, Nan Chen², Zhi - Peng Yan², Ke - Ran Li², Cheng - Hu Wang², Guo - Fan Cao², Qin Jiang², Wei-Hua Yang²

Foundation item: The Key Subject of Hospital Management Innovation Research of Jiangsu Hospital Association (No.JSYGY-2-2021-467)

¹Nanjing Medical University, Nanjing 211166, Jiangsu Province, China; ²The Affiliated Eye Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, Jiangsu Province, China

Correspondence to: Wei-Hua Yang. The Affiliated Eye Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, Jiangsu Province, China. benben0606@139.com

Received: 2021-11-29 Accepted: 2022-03-29

Abstract

• In recent years, with the continuous improvement of computer science and technology, artificial intelligence (AI) technology based on deep learning (DL) has developed rapidly and attracted wide attention all over the world. Great progress has been made in the research and application of AI in the medical field. In the field of optometry, AI can assist the diagnosis of myopia, strabismus, amblyopia and other diseases, and has achieved good results in the screening and early diagnosis of keratoconus as well as in the prevention and correction of myopia. Nevertheless, there are some limitations and great challenges in the application of AI in optometry, including clinical and technical challenges, interpretability of algorithmic results, medical legal issues and so on. This paper reviews the application, limitation and prospect of AI in the field of optometry.

• **KEYWORDS:** artificial intelligence; deep learning; optometry

Citation: Ji YK, Chen N, Yan ZP, *et al.* Research progress of artificial intelligence technology in the field of optometry. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2022;22(5):731-735

0 引言

人工智能 (artificial Intelligence, AI) 是计算机科学的一个分支,它是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学^[1]。真正的 AI 概念是由 John McCarthy 于 1956 年提出的,当时的目标是“以推测为基础,能够精确地描述学习的各个方面或智力的其他特征,能够制造出一个机器来模拟这种智能思路”。AI 自 1956 年被提出来以后,在图像识别、数据挖掘、语言处理等方面发挥了很大的作用,同时也展现了巨大的潜力。近几年,AI 得到了飞速的发展,目前 AI 技术已经广泛应用于物联网、汽车、工业、社交媒体等多种领域,同时其在医疗行业的应用也取得了巨大进展,展现出了巨大的潜力^[2]。2018-04-11 IDx-DR 被美国食品药品监督管理局批准上市^[3],它是第一台上市的眼科 AI 设备,标志着 AI 在眼科领域的应用进入了新的阶段。目前,AI 技术对于糖尿病视网膜病变 (diabetic retinopathy, DR)、年龄相关性黄斑变性 (age-related macular degeneration, ARMD)、青光眼 (glaucoma) 以及早产儿视网膜病变 (retinopathy of prematurity, ROP) 等疾病的研究已经逐步展开,并取得了一系列研究成果^[4-7]。随着 AI 在眼科领域研究的不断深入,近年来,AI 技术在视光学领域的研究取得了诸多成果。本文主要对近年来 AI 在视光学领域取得的研究成果进行综述。

1 AI在视光学中的应用

1.1 AI在近视中的应用

1.1.1 AI在近视预测中的应用 目前,近视已成为我国第二大常见眼病,近视发病率逐年上升,并呈年轻化趋势^[8]。以往的研究表明,近视的发生主要是由不良的用眼习惯导致的,包括读写姿势等,同时也与眼轴长度、父母的遗传等因素有关。随着社会的快速发展和手持电子终端设备的日益普及,近视的发病率持续上升,呈现年轻化趋势。青少年是近视的重灾区,由于学业负担过重和眼睛的生长发育,不良的用眼习惯和过度用眼极容易导致青少年近视,近视已成为困扰我国青少年发展的首要问题。这种“近视热潮”是一个重要的国际公众关注的问题,近视已经严重影响青少年的学习成绩和日常生活^[9]。每年都有成千上万的青少年到眼科医院就诊,孩子患高度近视已经成为家长们非常关注的问题^[10]。由于中国人口基数大,近视患病率高,因此,需要高度重视近视的预防,尤其是青少年近视的预防。近几年,AI技术得到了飞速的发展,将AI应用于青少年的近视预防显得尤为重要。

Yang等^[8]基于小学生的眼部数据和行为数据以及单变量相关分析和多元相关分析的特征选择方法,较好地构建了用于模型训练的特征训练集,并提出了一种基于Gradient Boosting Regression Tree (GBRT)的数据缺失补充方法,同时基于支持向量机模型建立了青少年近视预测模型。该研究结果表明,此模型能够提供合理的近视预测精确度,同时发现父母都不戴眼镜、室内活动量、室外活动量、轴向长度、角膜曲率、吃白肉的频率等因素与近视呈正相关关系,而其他一些因素,如闭合调节能力、远距离调节能力、每分钟脉冲数、饮用碳酸饮料的频率、吃红肉的频率等对近视有负面影响。

Lin等^[11]将8个眼科中心的学龄儿童的电子病历进行汇总,基于随机森林算法预测学龄儿童未来3、5、8a屈光度的进展情况以及学龄儿童在未来特定时间点发生高度近视的时间。实验结果表明,该预测模型可以成功预测学龄儿童未来3、5、8a的球镜度数和近视进展情况,同时,该模型还可以以临床可接受的准确度预测学龄儿童18岁时高度近视的球镜度数。

由此可见,AI技术在青少年近视防控中展现了巨大的潜力,如果能够充分的将AI应用于青少年近视防控,就可以更好地预测青少年近视的发展,对重点儿童予以重点关注,从而预防青少年近视,降低青少年的近视发病率,提高青少年的身体素质。

1.1.2 AI在近视矫正中的应用 未矫正或矫正不足的近视是导致视力损害的主要原因,已造成全球数十亿美元的损失^[12]。高度近视,特别是极高度近视,极有可能矫正不足,这是很常见的情况,因为许多极高度近视的患者由于眼镜放大或不等像等问题而不能忍受配戴眼镜从而导致不能完全矫正。角膜屈光手术是矫正近视的有效方法,而矫正量受到角膜厚度的限制。隐形眼镜可以矫正-20~+20D的屈光不正,但日常清洗和保养不当可能导致角膜炎。而对于人工晶状体植入术来说,近视达到18D,散光达到6D,均可完全矫正,并且获得满意的视觉效果和生活质量^[13]。因此,人工晶状体植入术在近视患者中越来越受欢迎,已成为治疗近视,特别是极高度近视的主流手术之一。

Shen等^[14]收集汇总了3536例患者,共6297只接受过有晶状体眼后房型人工晶状体(implantable contact lens, ICL)植入术的眼的数据,利用随机森林法、梯度 Boost 法和 XGBoosting 法建立了 ICL 尺寸预测模型。最后,试验结果为随机森林法对 ICL 大小的预测准确率为 82.2%,梯度 Boosting 法和 XGBoost 法对 ICL 大小的预测准确率分别为 81.5%、81.8%。因此,将 AI 应用于临床,可以帮助眼科医生制定手术策略,提高 ICL 手术的安全性,并预测临床结果。

1.1.3 AI在角膜塑形镜验配中的应用 我国儿童青少年的近视患病率位居世界前列,并且近视患病率逐年攀升。角膜塑形镜作为儿童青少年近视防控的主要手段之一,近年来,被越来越多的患者及家属所接受。据不完全统计,我国角膜塑形镜验配量逐年递增。目前,由于角膜塑形镜验配流程复杂,专业验配人员培养周期长,若将 AI 用于辅助角膜塑形镜验配,则有利于优化验配流程,提高矫正效果,从而更容易将角膜塑形镜用于儿童青少年的近视防控。

张清桃等^[15]通过逻辑回归模型、决策树、逐步回归分析法等方法对 750 例 1467 眼角膜塑形镜配戴患者的医学验光数据及角膜地形图检查数据进行分析,选用逻辑回归和多元线性回归分析法应用于训练集并建立拟合模型,最终镜片设计拟合度高达 0.87,该拟合模型可以指导验配人员快速准确地完成角膜塑形镜的验配,实现了 AI 决策辅助角膜塑形镜的验配。

1.1.4 AI在病理性近视中的应用 病理性近视(pathological myopia, PM)是世界范围内视力受损和失明的主要原因,尤其是在东亚人群中^[10,16]。病理性近视大多起源于高度近视,可引起多种并发症,如青光眼、视网膜脱离和近视性黄斑病变。大约 1%~3%世界人口由于高度近视而发展为视力受损的黄斑病变,称为近视性黄斑病变(myopic maculopathy, MM),MM 和后部葡萄肿都被用来定义病理性近视,这种病理性近视会导致无法矫正和不可逆的视力损害^[17-18]。MM 是病理性近视最严重、最不可逆的并发症。MM 包含两部分:萎缩性病变和 Plus 病变。漆裂纹、脉络膜新生血管和 Fuchs 斑属于 Plus 病变;据估计,到 2050 年,MM 造成的视力障碍将影响 5570 万人,将导致 1850 万人失明^[19]。根据国际近视黄斑病变摄影分级系统(META-PM),MM 由轻到重可分为无黄斑病变(C0)、豹纹眼底(C1)、弥漫性脉络膜视网膜萎缩(C2)、斑片状脉络膜视网膜萎缩(C3)和黄斑萎缩(C4),MM 分级越高,眼底改变越明显,视力损害越明显^[20]。因此,早期发现和治疗 MM 对于 MM 患者来说至关重要。目前,AI 在 PM 及 MM 中的应用主要集中在眼底图像中的应用。

陈楠等^[21]收集了 4489 张高度近视患者的眼底图像(随机选取 162 张作为训练集,18 张作为验证集,余下 3589 张作为测试集),基于深度学习(DL)算法,提取高度近视眼底图像特征,建立 VGG16 全卷积神经网络及 ResNet50 深度残差网络,构建病理性近视 AI 辅助诊断模型。结果显示,AI 辅助诊断模型与眼科专家的诊断一致性均为 0.7222。Hemelings 等^[22]基于卷积神经网络(CNNs)架构,通过 UNet++、ResNet 编码器和 ImageNet 权重转移对 1200 张眼底图像进行分析并提取病变特征,然后通过修改和训练,该方法在测试集上的 AUC 值为 0.98。

该研究表明,此方法可以同时病理近视进行分类并分割相关的病变,可应用于临床辅助病理近视的诊断和分类。

Du 等^[23]利用放射组学的方法[包括:(1)眼底图像特征的“提取”;(2)通过自动提取的图像特征来构建数据库;(3)利用相关分析和机器学习的方法选择并判别特征]和机器学习对 313 例 457 眼患者(分为重度 MM 和非重度 MM)的眼底图像进行分析并提取特征,从视盘区发现了 8 个新的与 MM 相关的眼底图像特征,结果显示,在验证数据集上,新图像特征在严重 MM 中的 AUC 得分为 0.8263,临床特征的 AUC 得分为 0.7925,这些新发现的图像特征对 MM 具有更好的分类能力,可用于区分患有和不患有严重 MM 的患者,同时这些特征也可以为临床医生对 MM 的诊断提供重要帮助,从而提高医生的诊断效率。

Sogawa 等^[24]收集了 910 例正常眼或 MM 眼的 SS-OCT 图像,然后利用预处理后的图像数据构建并训练了 9 个深度神经网络(DNNs)模型:VGG-16、VGG-19、ResNet-50、InceptionV3、InceptionResNetV2、Xception、DenseNet121、DenseNet169 和 DenseNet201,训练结束后,使用测试数据对每个模型的性能进行评估,其中以 VGG-16、VGG-19、DenseNet121、InceptionV3 和 ResNet-50 的组合模型对有或无 MM 的 OCT 图像分类结果最好,其 AUC 值为 0.970,灵敏度为 90.6%,特异度为 94.2%。此外,他们还比较了 DNNs 模型和眼科医生对 92 幅有或无 MM 的 OCT 图像的分类结果,结果显示,深度神经网络的 AUC 为 0.837,眼科医生的 AUC 为 0.877,这说明神经网络的结果与眼科医生的结果没有显著差异。由此可见,AI 利用 SS-OCT 图像数据进行自动诊断可能在 MM 筛查中非常有用,同时也可大大减轻临床医生的工作量。

临床医生对于病理性近视、MM 的诊断主要依赖眼底照相、OCT 等大量影像资料,多项研究表明,AI 在该方面已经得到了飞速的发展,将 AI 与临床充分结合,将大大提高临床医生的诊断效率。

1.2 AI 在斜视中的应用 斜视是指任何一眼视轴偏离的临床现象,可因双眼单视异常或控制眼球运动的视神经肌肉异常或各类机械性限制引起。斜视是一种常见的眼科疾病,如果不能得到及时的诊断和治疗,可导致 3D 感知障碍、弱视,甚至失明^[25-26]。如果能够及早得到诊断,那么许多年轻的斜视患者可以得到很好的治疗效果,尤其是对于学龄前的斜视儿童来说,学龄前儿童的斜视比成人有更大的治愈机会。因此,对于斜视患者的及时诊断是至关重要的。将 AI 与斜视的临床诊断相结合,会大大提高斜视临床诊断的准确率。

Zheng 等^[27]汇总了 7026 张图像(3829 张非斜视图像和 3197 张斜视图像)以 DL 算法为基础,基于快速区域的卷积神经网络(FasterR-CNN)和 3 个 DCNNs(VGG16, Inception-V3, Xception)构建了 DL 模型,训练过程中经过 5 次交叉验证,结果为 DL 模型的平均 AUC 约为 0.99,在外部验证数据集上,DL 算法的 AUC 为 0.99,灵敏度为 94.0%,特异度为 99.3%,该算法诊断水平斜视的准确率为 0.95,优于住院眼科医生的诊断准确率(准确率为 0.81~0.85)。Chen 等^[28]设计了一个眼动跟踪系统来获取正常人和斜视患者的眼动数据,然后设计了一种视距偏差(GADE)图像来表示受试者的眼球跟踪数据,最后,利用

在大型真实图像库上训练的 CNN 从 GADE 图像中提取特征用于斜视的识别,准确率可达 0.952,该实验结果表明,GADE 图像是表示斜视注视数据的有效方法,有助于斜视的临床诊断。de Figueiredo 等^[29]开发了一款应用程序,该应用程序能够评估眼球运动,可作为一种易于应用的工具来缩短斜视的临床诊断时间,从而提高斜视诊断的准确率。

1.3 AI 在弱视中的应用 弱视是视觉发育期内由于异常视觉经验引起的单眼或双眼最佳矫正视力下降,眼部检查无器质性病变。弱视是一种常见的儿童视力障碍,可导致永久性视力障碍,屈光不正和斜视是重要的弱视危险因素(ARF),ARF 包括屈光不正、屈光参差、斜视、上睑下垂、晶状体混浊和形觉剥夺^[30-31]。弱视在总人口中占 1.1%~5%,因此早期筛查弱视因素非常重要^[32-33]。目前,照片筛查已被证明是客观筛查屈光不正和弱视因素的有效方法,实现有弱视危险因素幼儿的早期筛查,有助于弱视儿童的进行进一步的诊断和治疗。将 AI 应用于弱视的临床诊断会大大提高医生的临床诊断效率和准确率。

Murali 等^[34]招募了 54 名验光专业的学生进行数据采集,将深度学习算法与 Android 智能手机相结合,使用 Kanna 算法来筛查 ARF;使用 Gaussian Blur 算法对所有图像进行预处理,并将其转换为灰度以供 DL 级联模型应用,使用 DL 模型预测的面部地标对眼睛进行定位,使用 UnityEyes 数据集训练卷积神经网络来检测虹膜边界的 6 个虹膜标志,使用暗光图像测量红光反射定位、未扩张的瞳孔半径、虹膜区域和红光反射的色调以及新月宽度等参数,使用角膜光反射(CLR)位置、虹膜中心和眼球半径与虹膜直径的生物统计学比率进行斜视角度的数学计算,使用眼睑轮廓和 CLR 测量上睑下垂,使用 Microsoft Excel 和 Python 编程语言中的 NumPy 库进行统计分析;该算法的 F-Score 为 73.2%,敏感度为 88.2%,特异度为 75.6%,检测斜视($n=1/1$)和屈光不正($n=14/16$)的准确率较高,斜视预测值为 0.88,屈光不正相关系数为 0.82,屈光参差相关系数为 0.79,有助于实现临床上弱视儿童的早期筛查。

1.4 AI 在圆锥角膜中的应用 圆锥角膜是一种非炎症性角膜疾病,以基质变薄、前突出和散光不规则为特征。它典型的表现表现为青春期前后,双眼发病,视力进行性下降,严重者可导致不可逆转的视力丧失^[35]。不幸的是,虽然已经提出了几种理论和遗传因素,但是圆锥角膜的病因至今仍不明确,此外,目前还没有有效的治疗方法来预防早期圆锥角膜的进展^[36]。因此,对于圆锥角膜或亚临床圆锥角膜的早期诊断,可以干预圆锥角膜病程的进展。此外,早期诊断圆锥角膜有助于我们了解圆锥角膜的自然病程进展。

值得注意的是,晚期圆锥角膜可以根据典型的临床体征进行诊断,如 Munson 征、Vogt 线纹和裂隙灯检查下的 Fleischer 环;然而,这些体征在圆锥角膜的早期阶段并不存在。将 AI 分析模型与临床诊断相结合,有助于早期圆锥角膜的筛查和诊断。Kuo 等^[37]采用了 3 种著名的 CNN 模型即 VGG16 模型、InceptionV3 模型和 ResNet152 模型,对 206 例患者,共 354 张角膜地形图进行迁移学习和分析,从而区分正常角膜和圆锥角膜的角膜地形图,经过训练,3 个 CNN 模型均具有较好的性能,VGG16 和

InceptionV3的精确度均为0.931, ResNet152的精确度为0.958; VGG16和InceptionV3的灵敏度为0.917, ResNet152的灵敏度为0.944; VGG16和InceptionV3的特异度为0.944, ResNet152的特异度为0.972, 适用于圆锥角膜的早期筛查和诊断。

Smadja等^[38]开发了一种基于树分类自动检测圆锥角膜的方法,用双Scheimpflug分析仪对372眼进行成像,共获得了55个参数。经过训练和修改后,对正常角膜和圆锥角膜区分的灵敏度和特异度均达到100%。Ruiz Hidalgo等^[39]用Pentacam测量获得了22个参数,然后基于支持向量机算法提出了一种区分正常角膜和圆锥角膜方法,经过训练,该方法对正常角膜和圆锥角膜区分的准确率为88.8%,灵敏度为89.0%,特异度为95.2%。

上述多个研究表明, AI在圆锥角膜图像识别方面取得了良好的效果,对圆锥角膜的预测准确性高,可应用于圆锥角膜的临床辅助诊断。

2 AI应用中的局限性及展望

目前,尽管在各种论文发表中, AI系统对于相关疾病的诊断和病情评估的准确性、敏感度和特异度都达到了令人咋舌的高度,但因为试验中训练和验证数据的限定与真实世界复杂环境有着巨大的差异,所以, AI系统广泛应用于临床尚有一段距离。同时,设备型号的不同、图像的标准以及算法的黑盒问题都需要一定的时间来解决:(1)对于罕见疾病或者临床上无法常规成像的疾病,如果应用于AI的图像训练集太小或不能代表患者真实的病情情况,那么最后得到的结果可能不够准确^[40];(2)虽然在许多文章中AI研究小组报告了他们DL系统稳定的诊断性能,但是一些论文没有显示其独立数据集的计算是如何执行的;(3)不同的国家和环境在医学方面和监管批准方面存在许多差异,这就需要将来在这些领域开展更多工作^[41]。此外,临床采用AI技术的一个重要挑战是如何将患者的临床护理委托给机器, Keel等^[42]评估了内分泌门诊中糖尿病视网膜病变患者对于通过AI筛查疾病的接受性,报告称96%参与者对自动筛查模型感到满意或非常满意。然而,在不同的人群和环境中,患者对于通过AI筛查诊断的接受性可能会有所不同,并可能阻碍其实施。

以深度学习为基础的AI模型在视光学领域中的应用结果显示这些模型具有较高的灵敏度、特异度,能够为临床医生的诊断提供很大的帮助,从而提高临床医生的诊断效率和准确率,同时还可缓解临床医生的工作压力。虽然未来有很多挑战,但目前, AI的研究已经逐渐渗透到眼科的各个领域,包括视网膜疾病、白内障、青光眼、角膜病等,并与大数据结合,相信不久就会有一大批方便医生及患者的新型AI设备上市。

目前眼科AI还有一些局限性:(1)AI在眼科领域的应用方向主要是疾病的初步诊断和分类,但关于疾病的预后和转归预测的研究相对较少;(2)在研究数据采集过程中,受到眼科检查设备、操作医师水平以及不同患者配合的差异等诸多因素的影响,会在很大程度上影响AI模型的灵敏度等性能。因此,在未来的研究中,需要投入更多的精力,逐步完善眼视光AI模型需要的研究样本收集流程、算法验证过程以及AI模型设计方式等相应的指南或规范。

参考文献

- 1 赵乾, 沈琳琳, 赖铭莹. 基于机器学习的AI技术在眼科中的应用进展. 国际眼科杂志 2018;18(9):1630-1634
- 2 Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nat Med* 2019;25(1):44-56
- 3 Grzybowski A, Brona P. Analysis and comparison of two artificial intelligence diabetic retinopathy screening algorithms in a pilot study: IDx-DR and retinaLyzee. *J Clin Med* 2021;10(11):2352
- 4 Ting DSW, Cheung CYL, Lim G, et al. Development and validation of a deep learning system for diabetic retinopathy and related eye diseases using retinal images from multiethnic populations with diabetes. *JAMA* 2017;318(22):2211-2223
- 5 Grassmann F, Mengelkamp J, Brandl C, et al. A deep learning algorithm for prediction of age-related eye disease study severity scale for age-related macular degeneration from color fundus photography. *Ophthalmology* 2018;125(9):1410-1420
- 6 Christopher M, Belghith A, Weinreb RN, et al. Retinal nerve fiber layer features identified by unsupervised machine learning on optical coherence tomography scans predict glaucoma progression. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2018;59(7):2748-2756
- 7 Brown JM, Campbell JP, Beers A, et al. Automated diagnosis of plus disease in retinopathy of prematurity using deep convolutional neural networks. *JAMA Ophthalmol* 2018;136(7):803-810
- 8 Yang X, Chen G, Qian YC, et al. Prediction of myopia in adolescents through machine learning methods. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17(2):E463
- 9 Dolgin E. The myopia boom. *Nature* 2015;519(7543):276-278
- 10 Morgan I, Ohno-Matsui K, Saw S. Myopia. *Lancet* 2012;379(9827):1739-1748
- 11 Lin HT, Long EP, Ding XH, et al. Prediction of myopia development among Chinese school-aged children using refraction data from electronic medical records: a retrospective, multicentre machine learning study. *PLoS Med* 2018;15(11):e1002674
- 12 Naidoo KS, Fricke TR, Frick KD, et al. Potential lost productivity resulting from the global burden of myopia: systematic review, meta-analysis, and modeling. *Ophthalmology* 2019;126(3):338-346
- 13 Freeman CE, Evans BJW. Investigation of the causes of non-tolerance to optometric prescriptions for spectacles. *Ophthalmic Physiol Opt* 2010;30(1):1-11
- 14 Shen Y, Wang L, Jian WJ, et al. Big-data and artificial-intelligence-assisted vault prediction and EVO-ICL size selection for myopia correction. *Br J Ophthalmol* 2021[Online ahead of print]
- 15 张清桃, 谢培英, 杨丽娜, 等. 基于视光检查数据的角膜塑形镜验配机器学习模型研究. 中华眼科杂志 2019;19(2):105-110
- 16 Ohno-Matsui K, Akiba M, Moriyama M, et al. Acquired optic nerve and peripapillary pits in pathologic myopia. *Ophthalmology* 2012;119(8):1685-1692
- 17 Liu HH, Xu L, Wang YX, et al. Prevalence and progression of myopic retinopathy in Chinese adults: the Beijing eye study. *Ophthalmology* 2010;117(9):1763-1768
- 18 Ohno-Matsui K. What is the fundamental nature of pathologic myopia? *Retina* 2017;37(6):1043-1048
- 19 Fricke TR, Jong M, Naidoo KS, et al. Global prevalence of visual impairment associated with myopic macular degeneration and temporal trends from 2000 through 2050: systematic review, meta-analysis and modelling. *Br J Ophthalmol* 2018;102(7):855-862
- 20 Ohno-Matsui K, Kawasaki R, Jonas JB, et al. International photographic classification and grading system for myopic maculopathy. *Am J Ophthalmol* 2015;159(5):877-883
- 21 陈楠, 金玲, 郑博, 等. 基于眼底彩照的AI技术在高度近视筛查中的创新应用与探索. 人工智能 2021;8(3):105-112

- 22 Hemelings R, Elen B, Blaschko MB, *et al.* Pathological myopia classification with simultaneous lesion segmentation using deep learning. *Comput Methods Programs Biomed* 2021;199:105920
- 23 Du YC, Chen QY, Fan Y, *et al.* Automatic identification of myopic maculopathy related imaging features in optic disc region via machine learning methods. *J Transl Med* 2021;19(1):167
- 24 Sogawa T, Tabuchi H, Nagasato D, *et al.* Accuracy of a deep convolutional neural network in the detection of myopic macular diseases using swept-source optical coherence tomography. *PLoS One* 2020;15(4):e0227240
- 25 Castanes MS. Major review: the underutilization of vision screening (for amblyopia, optical anomalies and strabismus) among preschool age children. *Binocul Vis Strabismus Q* 2003;18(4):217-232
- 26 Mojon-Azzi S, Kunz A, Mojon D. The perception of strabismus by children and adults. *Graefes Arch Clin Exper Ophthalmol* 2011;249(5):753-757
- 27 Zheng C, Yao Q, Lu JW, *et al.* Detection of referable horizontal strabismus in children's primary gaze photographs using deep learning. *Trans Vis Sci Tech* 2021;10(1):33
- 28 Chen ZH, Fu H, Lo WL, *et al.* Strabismus recognition using eye-tracking data and convolutional neural networks. *J Healthc Eng* 2018;2018:7692198
- 29 de Figueiredo LA, Dias JVP, Polati M, *et al.* Strabismus and artificial intelligence app: optimizing diagnostic and accuracy. *Transl Vis Sci Technol* 2021;10(7):22
- 30 Rajavi Z, Parsafar H, Ramezani A, *et al.* Is noncycloplegic photorefractive applicable for screening refractive amblyopia risk factors? *J Ophthalmic Vis Res* 2012;7(1):3-9
- 31 Paff T, Oudsluys-Murphy AM, Wolterbeek R, *et al.* Screening for refractive errors in children: the plusoptiX S08 and the Retinomax K-plus2 performed by a lay screener compared to cycloplegic retinoscopy. *J Am Assoc Pediatr Ophthalmol Strabismus* 2010;14(6):478-483
- 32 Newman DK, East MM. Prevalence of amblyopia among defaulters of preschool vision screening. *Ophthalmic Epidemiol* 2000;7(1):67-71
- 33 Eibschitz-Tsimhoni M, Friedman T, Naor J, *et al.* Early screening for amblyogenic risk factors lowers the prevalence and severity of amblyopia. *J Am Assoc Pediatr Ophthalmol Strabismus* 2000;4(4):194-199
- 34 Murali K, Krishna V, Krishna V, *et al.* Application of deep learning and image processing analysis of photographs for amblyopia screening. *Indian J Ophthalmol* 2020;68(7):1407-1410
- 35 Chatzis N, Hafezi F. Progression of keratoconus and efficacy of pediatric [corrected] corneal collagen cross-linking in children and adolescents. *J Refract Surg* 2012;28(11):753-758
- 36 Ferdi AC, Nguyen V, Gore DM, *et al.* Keratoconus natural progression: a systematic review and meta-analysis of 11 529 eyes. *Ophthalmology* 2019;126(7):935-945
- 37 Kuo BI, Chang WY, Liao TS, *et al.* Keratoconus screening based on deep learning approach of corneal topography. *Transl Vis Sci Technol* 2020;9(2):53
- 38 Smadja D, Touboul D, Cohen A, *et al.* Detection of subclinical keratoconus using an automated decision tree classification. *Am J Ophthalmol* 2013;156(2):237-246
- 39 Ruiz Hidalgo I, Rodriguez P, Rozema JJ, *et al.* Evaluation of a machine-learning classifier for keratoconus detection based on scheimpflug tomography. *Cornea* 2016;35(6):827-832
- 40 黑环环, 吴惠琴. AI 在眼科领域的应用进展. *国际眼科杂志* 2020;20(6):1003-1006
- 41 Ting DSW, Pasquale LR, Peng L, *et al.* Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *Br J Ophthalmol* 2019;103(2):167-175
- 42 Keel S, Lee PY, Scheetz J, *et al.* Feasibility and patient acceptability of a novel artificial intelligence-based screening model for diabetic retinopathy at endocrinology outpatient services: a pilot study. *Sci Rep* 2018;8(1):4330