

眼球运动及眼动追踪技术的临床应用进展

尤佳璐¹, 惠延年², 张乐³

引用: 尤佳璐, 惠延年, 张乐. 眼球运动及眼动追踪技术的临床应用进展. 国际眼科杂志 2023;23(1):90-95

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (No. 2021JM-547); 陕西省卫生健康科研基金项目 (No. 2022D036)

作者单位: ¹(710021) 中国陕西省西安市, 陕西省人民医院眼科; ²(710032) 中国陕西省西安市, 空军军医大学西京医院眼科全军眼科研究所; ³(710061) 中国陕西省西安市, 西北妇女儿童医院眼科

作者简介: 尤佳璐, 在读硕士研究生, 住院医师, 研究方向: 小儿眼病。

通讯作者: 惠延年, 毕业于第四军医大学, 主任医师, 教授, 博士研究生导师, 国家人事部“有突出贡献中青年专家”, 全国高等医药院校统编教材《眼科学》第五、六版主编, 《国际眼科杂志》(IES) 和 *International Journal of Ophthalmology (IJO)* 主编, 研究方向: 眼底病基础与临床研究. ynlhui@163.com; 张乐, 毕业于第四军医大学, 副主任医师, 副教授, 研究方向: 小儿眼病. fmmulele@126.com

收稿日期: 2022-08-31 修回日期: 2022-12-08

摘要

眼球运动是指眼球一系列的自发性、控制性及目的性运动。基于科学研究及临床工作中对眼球运动的大量观察发现, 眼球运动不仅对维持人类清晰视觉至关重要, 还是大脑活动的客观体现, 对多学科疾病的诊断和定位具有重要意义。眼动追踪技术是获取眼球运动信息的检测技术。利用眼动追踪技术可以获得精准客观的眼动数据, 探究眼动的发生机制、发育过程及不同眼动类型代表的临床意义。此外, 眼动追踪技术在眼科客观检查、诊断评估及治疗方面也具有积极意义。本文综述眼球运动及眼动追踪技术在眼科临床上应用的研究进展, 如在幼儿客观视力检查、斜视诊疗、角膜屈光手术以及青光眼诊断等方面的应用。

关键词: 眼球运动; 眼动追踪技术; 脑高级控制中枢; 视力检查; 斜视; 近视手术; 青光眼

DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2023.1.18

Eye movements and progression of clinical applications of eye tracking technology

Jia-Lu You¹, Yan-Nian Hui², Le Zhang³

Foundation items: Shaanxi Natural Science Basis Research Plan (No. 2021JM-547); Shaanxi Provincial Health Science Research Fund Project (No. 2022D036)

¹Department of Ophthalmology, Shaanxi Provincial People's Hospital, Xi'an 710021, Shaanxi Province, China; ²Eye Institute of

PLA; Department of Ophthalmology, Xijing Hospital, Air Force Medical University, Xi'an 710032, Shaanxi Province, China;

³Department of Ophthalmology, Northwest Women's and Children's Hospital, Xi'an 710061, Shaanxi Province, China

Correspondence to: Yan - Nian Hui. Eye Institute of PLA; Department of Ophthalmology, Xijing Hospital, Air Force Medical University, Xi'an 710032, Shaanxi Province, China. ynlhui@163.com;

Le Zhang. Department of Ophthalmology, Northwest Women's and Children's Hospital, Xi'an 710061, Shaanxi Province, China. fmmulele@126.com

Received: 2022-08-31 Accepted: 2022-12-08

Abstract

• Eye movements refer to a series of spontaneous, controlled and purposeful movements of the eye. Based on a large number of observations on eye movement in scientific research and clinical work, eye movements are not only essential for maintaining clear vision in humans, but also an objective embodiment of brain activity, which is of great significance for the diagnosis and localization of multidisciplinary diseases. Eye tracking technology is a measurement technique that obtains information about eye movements. The use of eye tracking technology can obtain accurate and objective eye movement data, and explore the mechanism of eye movement, the development process and clinical significance of different eye movement types. In addition, eye tracking technology also has positive significance in the objective visual examination, diagnostic and treatment of ophthalmology. In this paper, we review the research progress of eye movements and eye tracking technology in the clinical application of ophthalmology, such as in the application of objective vision examination in infants, strabismus diagnosis and treatment, corneal refractive surgery and glaucoma diagnosis.

• KEYWORDS: eye movements; eye tracking technology; brain advanced control center; sight test; strabismus; myopia surgery; glaucoma

Citation: You JL, Hui YN, Zhang L. Eye movements and progression of clinical applications of eye tracking technology. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2023;23(1):90-95

0 引言

眼球运动是指眼球一系列的自发性、控制性及目的性运动。眼动追踪技术是获取眼球运动信息的重要检测手段, 因其在研究视觉系统信息处理和多学科疾病诊治中的重要意义成为近年来学者的研究热点。为了最大程度发

挥眼动追踪技术对医学发展的促进作用,熟练掌握眼动追踪技术的原理、类型及设备选择,并细致了解其观察对象眼球运动的特征十分关键。

以往虽有一些文章报道眼球运动方面的研究进展,但对眼动追踪技术及其临床应用鲜有提及。随着相关研究的快速进展,发表的临床应用新内容日益增多。而且,一般眼科工作者缺乏对眼动追踪技术在眼科临床应用进展的了解。基于此,本篇综述重点介绍眼动追踪技术及其辅助下眼球运动的研究进展,并阐述眼球追踪技术的设备选择及眼科临床应用。希望今后的研究可以利用眼动追踪技术获取精准眼动数据进而深入探讨眼球运动机制,并改进现有眼动追踪技术的不足,使其更多运用并促进眼科临床工作的发展。

1 利用眼动追踪技术了解眼球运动

现代对眼球运动的深入了解依赖于眼动追踪技术的发展和运用。眼球运动作为研究的对象,眼动追踪技术作为观察研究的重要手段,两者相辅相成。对两者建立系统的概念和知识基础是重要的。

1.1 眼球运动及其意义 人类对外界的信息主要依靠感官系统获取。视觉系统将外界信息通过视觉神经传递到大脑被我们所认知,这是人类与外界环境联系的最重要的过程。虽然对视觉至关重要的中心凹区域直径仅0.5mm,但其捕捉到的外界信息却占有有效信息的一半之多^[1]。Yarbus^[2]第一次将眼球运动与高级认知联系起来解释了这个现象,他通过分析受试者观察图片时的眼动资料,发现聚焦于中心凹的光学成像总是当前注意中心的事物。这说明眼球运动具有从所有目标中过滤出感兴趣信息并聚焦于中心凹上的作用。

除了根据大脑意愿有选择的与外界信息交互之外,眼球运动还是保证清晰视觉成像的基础。眼球运动的良好发育可以极大促进视敏度:良好的眼球平滑追随运动(smooth pursuit movement)能增加运动物体空间细节的分辨能力^[3],良好的注视(fixation)行为可将视力提高0.15LogMAR以上^[4],这说明高视敏度不是单纯的视觉成就,而是主动控制(active controlled)的视觉运动过程。眼球运动具有目的性(purposeful movements),目标刺激出现时眼球做出自发反应达到获取清晰视觉成像的目的,进而完成大脑与外界的交互作用。对上述眼球运动及其功能的深入了解,可以解释为什么人眼能看清迅速移动的目标,而且人在迅速运动中也能看清关注的目标。这种能力是普通的照相机无法比拟的。把人眼比作照相机,是对人眼极其不当的简单化说法。

1.2 眼球运动类型及高级控制中枢 为了保证有效的视觉捕捉及处理,眼球运动拥有特定的运动策略。眼球运动主要有三种形式:注视(fixation)、平滑追踪(smooth tracking)及扫视(saccade)^[5]。观察静止物体时将目标刺激物的视觉映像固定在中心凹的过程称为注视。此过程是处理视觉信息相对稳定的阶段,可以产生最稳定的视觉映像,为其在大脑的加工提供保障。实际上在注视过程中眼球并不是完全静止的,而是以注视点为中心做微小的运动以此不断清除视网膜上成像,进而抵消目标刺激适应性消退^[6]。这些注视性眼动包括微漂移(drift)、微扫视

(microsaccadic)和微颤动(microfibrillation)^[7]。漂移是注视过程中缓慢的位置变化。微颤动是不规则的,波浪样叠加是漂移中的一种眼球运动。而微扫视则是注视过程中快速的位置变化。一般将振幅小于1度视角的扫视称为微扫视运动。微扫视运动发生时,中心凹对比敏感度普遍开始衰减,并呈现越靠近中心的区域衰减越强、越快的特点。微扫视结束后越靠近中心的区域对比敏感度恢复并趋于稳定的速度越快。说明中心凹的对比敏感度不均匀,并受到微扫视运动的调节,以此增强目标位置的精细空间视觉,达到维持注视期间视觉稳定的目的^[8-9]。此外,微扫视可能与阅读速度及注意过程有关^[10]。另一种静止状态下的眼球运动是扫视。它是指当我们将中心凹区域的目标重新定位到新的空间位置时,进行的非常快速的共轭的眼球运动。而当观察者本身或被观察物体处于运动状态时,平滑追随运动则发挥作用使中心凹始终位于感兴趣的目标上。

除以上三种临床评估中通常涉及的眼球运动之外,还存在一系列其他的眼球运动。眼球震颤(nystagmus)是眼球的反射性运动。可分为生理性及病理性眼球震颤。生理性眼球震颤可出现在健康群体中,还可分为终点性(end-point,极度向侧方注视时发生)、前庭性(vestibular,由改变半规管中的内淋巴液平衡诱发)及视动性等。当很大一部分视野沿同一方向连续移动时就可以观察到眼球震颤现象,称之为视动性眼震(optokinetic nystagmus, OKN)。通常OKN存在缓慢和快速两个阶段。缓慢的追随运动保证视野跟随移动的物体,快速共轭运动使中心凹快速移动专注于感兴趣的目标上^[11]。此外,当头部移动的同时维持对感兴趣目标刺激的注视时,眼球则通过前庭眼动反射(vestibulo-ocular reflex)确保眼球适当的位置调整。例如当注视前方时头向右旋转则眼球向左旋转以保持目标注视。人类的眼球运动大多是共轭的,但当眼球聚焦在十分近的目标刺激上时双眼则发生会聚(convergence),聚焦在较远目标上双眼就会分散,这种眼球运动称为辐辏运动(vergence movement)。以上这些眼球运动共同协作形成清晰稳定的视知觉。

虽然眼球运动的发生不依赖于自主意识,具有自发性,但通过对猴子的眼动研究及对患者的眼动观察,发现眼球运动又是控制性的。小脑是主要控制眼球运动的高级中枢,小脑不仅参与眼球运动的控制也在认知中发挥作用^[12]。不同小脑区域控制对应的眼动方式。小脑皮层绒球/副绒球主要保证注视稳定不发生向心偏倚,并与移动物体形成清晰视觉映像相关^[13]。小脑小结叶和腹侧舌叶与持续、低速的前庭反应相关。而扫视的准确性则是由小脑背蚓部和后顶核保证^[14-15]。任何累及小脑的疾病都可能影响眼球运动,如在患有自闭症及精神分裂症的患者中都可观察到异常眼动^[16-17]。虽然小脑对于眼球运动的功能分区彼此并不能完全独立,但功能分区依旧可以为临床诊断定位做出提示。

1.3 人类眼球运动的发育及衰老 人类眼球运动并不是一成不变的。Shaikh等^[18]选取14名年龄在24~36岁的健康成年人及10名年龄在5~13岁的健康儿童,使用高分辨率视频眼动设备追踪受试者的眼球运动,分别记录两

组被试注视保持及视觉引导扫视时的眼动特点。结果发现与成年人相比,儿童眼动注视保持不稳定,在与成人固定扫视频率相似的情况下扫视幅度大于成人,且扫视缺乏不对称性。年龄较小儿童很难形成准确扫视,并且不存在注视偏好优先的特定部位。此研究严格控制了性别、精神系统及眼部结构病变等可能影响眼动特征的混杂因素,并使用不受被试配合程度影响的眼动记录装置,其眼动结果的准确性得到保证。

对于成年人和儿童平滑追随差异的研究,表明8周龄以下的婴儿观察不到平滑眼动追踪,8周龄以上的儿童较成年人眼球平滑追踪运动速度更快、潜伏期更长,且不能准确预料目标刺激的方向改变^[19]。Nakagawa等^[20]观察婴幼儿眼球运动后发现头部运动和眼球运动在发育过程中高度相关,但眼球运动的优先级随发育逐步升高并在18月龄后发生明显逆转。以上所得到的眼动特点说明儿童时期眼动不稳定、视功能受限并处于系统性完善和学习的过程。

眼动功能不断发育到成年逐步稳定。Takahashi等^[21]为探究年龄对眼球运动的影响做了一项多中心、大样本研究:受试者为3个独立的健康人群,分别为235、242、205名健康受试者,使用Eyelink 1000及以上配置眼动设备记录眼动数据,收集包括3种注视眼动、3种平滑追踪眼动及56张图像自由观看时眼动在内的7种眼动类型。最终得出的结果是,成年以后随着年龄增加,眼球平滑追踪相对于刺激目标运动的速度逐渐变慢;为了补偿这种因速度降低导致的较大眼动追踪误差,年老者出现更大扫视幅度、更长扫视时间及更大峰值扫视速度。观察发现注视性眼动则受年龄的影响较小。除此之外,随着年龄增长步入老年,不同方向的眼球运动随之发生衰老,以向上注视的范围受损最严重^[22]。

依赖于眼动追踪技术对眼球运动的精准测量,我们更清楚地了解到不同类型的眼球运动及其发育过程和高级中枢。这提示临床医师在诊疗过程中对不同生长发育阶段的人群应根据其不同眼动特征做出判断,抓住眼球运动发育时期及时发现异常并最大限度保证视功能。

2 眼动追踪技术的实现及发展

2.1 眼动追踪技术对眼动数据的精准获取

早在19世纪就有学者通过显微镜观察视网膜上小血管的移动来了解眼动情况^[23]。但先前的眼动测量方法准确性低、量化困难,随着科技进步,更精准的眼动测量方法应运而生。眼动追踪技术是记录眼球运动及注视位置随时间及任务变化的方法。目前最新的眼动追踪技术是基于红外光角膜反射原理。眼动追踪设备由红外发光器和摄像机组成,红外发光器将人类不可见的红外光射入人眼,随后通过角膜反射回相机形成角膜反射点(corneal reflexes, CR)。因为CR在眼球运动过程中空间位置一直维持不变,因此以CR作为参照物计算其与瞳孔的相对距离变化^[24]就可以实现对眼球聚焦位置的连续追踪(图1)。

这种眼动追踪装置,因其诸多优点被学者广泛应用于各领域研究中。包括:(1)眼动追踪技术在人的整个生命全程都可获取眼动数据,对于无法配合的患者也同样适用。例如:移动式眼动装置可以获取长期意识障碍患者的

眼动数据并未观察到不良反应,依靠所得数据可以分辨出不同类型眼球运动并支持临床评估的结果^[25]。(2)眼动追踪技术相对客观,较少受到主观偏见影响,且准确度高。刘慧等^[26]比较眼动仪与眼电图测量眼球运动效果时发现,红外眼动仪精确度更高、变异程度更低、可重复性更高。(3)眼动追踪是一项可以对人类行为及眼动神经进行探究的无侵入性技术,对被试者无伤害。

眼动追踪技术因其大样本定量分析操作流程多、成本高且定性分析难等诸多因素限制,还未普遍应用于临床,目前大多仅应用于研究。期待未来更多便捷、易操作的标准诊断范式出现,使眼动追踪技术造福于临床患者。

2.2 眼动追踪装置的分类及选择

使用眼动追踪技术的首要步骤是选择合适的眼动追踪设备。体现眼动追踪设备性能的指标主要有3个:采样率、重新捕获率及测量精度。采样率是指眼动仪每秒报告的数据点,高采样率的设备对真实眼动开始和偏倚的测量更精准。为了保证科学研究严谨性及临床工作有效性,所选眼动追踪设备性能必须与目标获取数据的类型和准确度相匹配。

市面上眼动追踪装置主要分为固定式和移动式。固定式眼动装置采样率高,采样率最高可达2000Hz。对于观察扫视或者注视目标持续变化等复杂眼动类型,一般首选采样率较高的固定式装置。但固定式眼动装置也同时存在受试人员活动范围小、测试环境受限及造价昂贵等不足。相较于固定式眼动装置而言,移动式眼动装置对受试人群及环境要求低,可以保证采集最自然、高质量的视觉行为数据^[27]。Bulf等^[28]在一项婴儿视觉注意的研究中使用移动式眼动仪实现了对无法配合的婴儿眼动数据的精确获取。虽然对于注视等简单眼动的获取移动式眼动装置完全可以胜任,但毕竟其采样率低,大多数研究要通过增大样本量来弥补采样误差^[29]。由此可见,使用何种眼动仪取决于研究范式的设计、受试人群特点及目标数据的类型。研究者及临床医师应熟练掌握各类眼动装置的特性并明确所需眼球运动类型特征,只有这样才能选择合适设备进而提高获取数据的可靠性。

3 眼动追踪技术在眼科的前沿应用

眼动追踪技术较多应用于心理、认知和神经系统的研究及临床工作中。眼科范畴内,眼动追踪技术更多作为一种客观衡量眼球运动的工具,辅助神经眼科医生诊断疾病。眼动追踪设备精确识别异常注视、扫视等,进而定位病变位置。除此之外,眼动追踪技术还能为眼科医生提供哪些新帮助?下文将介绍眼动追踪技术在眼科的前沿应用,希望对现有研究作以总结,并为眼科临床工作提供新手段、新思路。

3.1 眼动追踪技术支持客观视力检查

视力检查是一切眼科诊疗过程的基础,也是最直接反映眼部情况的参数。但现有视力检查的手段多为主观检查,客观图形视觉诱发电位(visual evoked potential, VEP)检查又操作困难、不易实现。寻求客观、准确且简便的视力检查方法是眼科同道共同的期盼。

如前所述,人眼面对快速移动的目标刺激会做出与刺激相反的眼球运动,随即被快速重置反应打断,这种眼球运动称为视动性眼震(OKN)。宋钰等^[30]利用眼动追踪技

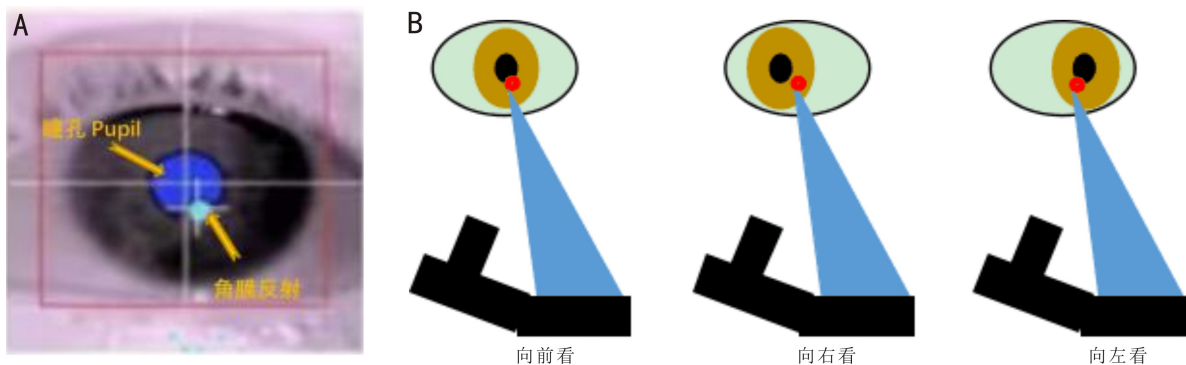


图1 眼动追踪技术检测 A:红外光形成的角膜反射点;B:随眼球向前、右和左看时角膜反射点的变化。

术记录 OKN,提出一种客观的视力检查方法。即将滚动的黑色条栅作为移动视标,记录受试者观察视标时发生的眼球震颤并将其传入计算机形成眼震波形。检查以引出3个眼震波形为终点,视作被试者看清视标。为验证此方法是否有效,宋钰等^[30]分别使用 OKN 及国际标准视力表检查 82 名受试者视力。OKN 可检测率达 93.9%,与国际视力表检测结果相比无统计学差异,且重复检测结果之间无显著差异。OKN 的引出为低级神经反射,不受主观意志影响,更加客观。眼动追踪技术的加入使视力检查更客观、准确、便捷。

眼动追踪技术在婴幼儿视力检查中也具有巨大潜力。Jones 等^[31]表示眼动追踪技术可应用于婴幼儿视敏度检查,并证实可测试性、可靠性及准确性与金标准视敏度卡相当。这种方法原理上与黑白条栅视敏卡相同,优势之处在于空间频率、测试条件及儿童与刺激物之间标准距离的控制更易确保。因此,既使没有经验丰富的医生或严格检查环境也可以完成婴幼儿视敏度检查工作。Vrabić 等^[32]同样对眼动追踪技术在婴幼儿视敏度筛查工作的贡献做出肯定。

3.2 眼动追踪技术在斜视诊疗中的应用 斜视度测定是开展斜视患者一切诊疗工作的关键。三棱镜交替遮盖试验(prism alternating cover test, PACT)是国际上测量斜视度的金标准,但其测量结果受到患者主观判断及配合程度的影响,且当斜视角较大时棱镜递增量较大影响测量结果的准确性^[33]。Valente 等^[34]利用 eyeswift TM 系统基于眼动追踪技术自动检测眼球偏斜并评估斜视程度及方向。准确的斜视度数是通过计算眼球运动完全中和之后屏幕呈现的目标之间距离与测试距离的比值得出的。Valente 使用眼动追踪系统测量 69 名 3~15 岁儿童并与传统 PACT 结果进行对比,发现其准确性与 PACT 测量结果高度相关。多次测量结果间变异性为 $0.2^{\Delta} \pm 4.5^{\Delta}$,比先前研究中高年资专业医生测量结果 ($-3.9^{\Delta} \pm 4.7^{\Delta}$) 变异性小^[33]。此外,该方法在测量过程中对眼球偏倚的检测也具有优势(研究中自动检测装置发现 7 名受试者眼球偏倚,但只有其中 4 例眼球偏倚被高年资医生观察到)。由于此方法测试时间短、测试具有趣味性、不受头部位置影响可以应用于年龄较小儿童。Miao 等^[35]也使用红外眼动追踪技术测量斜视患者斜视度,同样表示眼动追踪系统应用于斜视度测量具有头部运动高容忍、准确度高及差异性小等优势。

地方基层医院缺乏高年资专业医生且医疗需求大,斜视度的确定及手术量的决策是一大难题,不准确的手术量可能会造成欠矫或过矫增加后续治疗难度。若将眼动追踪技术应用于基层医疗环境将会提高斜视诊治效率。

3.3 眼动追踪技术可提高 LASIK 手术准确性 诸多学者发现,眼动追踪技术可以改善准分子激光原位角膜磨镶术(laser-assisted *in situ* keratomileusis, LASIK)、飞秒激光(small incision lenticule extraction, SMILE)等近视矫正手术中由于身体位置变化导致的眼球旋转以及术中眼球的回旋运动造成的消融偏中心的问题^[36]。消融偏中心会加大术后再治疗的风险,且其程度又随度数的增高而增高^[37]。Lee 等^[38]对 50 例患者进行近视或近视散光矫正手术,其中 25 例患者使用眼动追踪技术,25 例未使用眼动追踪技术。为保证研究严谨性,所有受试者术前检查及术后点眼治疗、术后复查均一致。经比较两组术后效果发现:眼动追踪技术组 80% 的患者术后裸眼视力 ≥ 1.0 ,消融偏中心化为 0.37 ± 0.18 。未使用眼动追踪技术组 64% 的患者术后裸眼视力 ≥ 1.0 ,消融偏中心化为 0.58 ± 0.31 且存在较高残余柱镜散光。由此可见,眼动追踪系统辅助 LASIK 消融偏中心程度小、术后残余散光小。准确的消融是 LASIK 手术成功的关键,为了达到较高的消融准确性,眼动仪采样率至少应达到激光重复率的 2 倍^[39]。眼动追踪系统的辅助使 LASIK 实现了从仅治疗屈光问题到治疗角膜或整个眼球的高阶像差的转变。总之高频眼动设备的加入可以大大提高近视矫正手术消融位置的准确性。消融位置准确性得到保证有利于降低术后角膜散光改变^[40],并获得更好视觉质量。

3.4 眼动追踪技术应用于青光眼诊断 青光眼早期诊断是一个挑战性难题。临床上视野检查普遍使用的标准自动视野测量(standard automated perimetry, SAP)需要被试者稳定的注视和手动响应,因此对于儿童及存在认知障碍的人群,传统方法判断效能低。眼动追踪系统则可以免除这种有意识手动响应的需求。Soans 等^[41]量化一组患有青光眼或神经眼病患者的眼球运动并分析其时空特性,比如被试的视觉灵敏度因为视野缺损而降低,那么可以预期他们在追逐目标刺激时会出现时间延迟。又如视野缺损影响被试视线而无法追随刺激时,就会导致更长时间延迟和更多空间误差。青光眼患者出现视野缺损会扰乱扫视产生和固视维持之间的平衡。计算机大数据学习这些特

征后,形成依赖于眼动特征进行青光眼诊断的方法。这种方法对患者和健康人群的分类准确性可达到94.5%。另一项研究同样使用眼动追踪系统参与青光眼的诊断^[42],通过判断眼球位置相对目标刺激和固定点的变化方向及幅度来确定被试是否看清刺激。这种方法可以根据眼球自动调整刺激的大小及位置并允许患者测试期间头部移动。此外,眼动追踪技术对青光眼患者日常行为受限程度的判断也具有积极意义^[43],由此可见眼动追踪技术在青光眼早期筛查方面具有很大潜力。

眼动追踪技术因其对被检对象配合程度高包容、精确度高且不受主观意志影响等特点表现出比传统检查及诊断治疗的优势。除了以上应用之外,眼动追踪技术还被应用于色觉检查及眼底照片检查等医疗活动中^[44]。这些新临床手段可以应用在基层医院和大样本人群筛查中弥补地方诊疗水平不足、医师间诊疗差异大等限制,也可以应用在年龄小、认知功能或精神状态不佳导致不能配合传统诊疗患者的就医过程中。但以上基于眼动追踪技术的诊疗手段多需要采样率高的设备,以保证复杂患者的准确率,这就加大了医疗成本。而且一些文献报道,病例对照研究往往会高估其性能。虽然通过前期研究证实眼动技术具有巨大的潜力,但要想使其更广泛地造福于眼科患者,还需更大样本、更严谨的研究证实其可行性。

4 问题与展望

国内外关于眼球运动及眼动追踪技术的应用研究取得了一定进展,但仍存在局限性。眼动追踪技术在心理、大脑认知及神经生理上的临床应用已比较成熟,但在眼科的应用还在探索阶段,仍存在不少待解决的问题。例如:“病例对照研究得出的结果是否高估了眼动追踪技术的性能”“小样本研究得出的结论是否适用于全部人群”“是否可以制造更经济的设备降低医疗成本”“对于眼科疾病的诊断和治疗范式需进一步完善以解决眼球震颤等异常眼动对结果带来的不稳定影响”。以往临床医生对于眼球运动的关注较少,眼球运动不仅与视功能好坏相关还是大脑功能的外在表现。在未来临床工作中,医师应将眼球运动的概念贯穿整个诊疗过程中,熟练掌握眼球运动的发展过程及特性,并将眼球追踪技术应用于眼科检查及疾病诊治,造福于广大患者。

参考文献

- 1 Van Essen DC, Anderson CH, Felleman DJ. Information processing in the primate visual system; an integrated systems perspective. *Science* 1992;255(5043):419-423
- 2 Yarbus AL. *Eye Movements and Vision*. New York: Springer 1967
- 3 Palidis DJ, Wyder-Hodge PA, Fookien J, et al. Distinct eye movement patterns enhance dynamic visual acuity. *PLoS One* 2017; 12(2):e0172061
- 4 Intoy J, Rucci M. Finely tuned eye movements enhance visual acuity. *Nat Commun* 2020;11(1):795
- 5 顾欣祖,林祺,练莘,等. 54例正常人眼球运动的特点. *中华眼底病杂志* 2005;21(1):46-47
- 6 Pritchard RM. Stabilized images on the retina. *Sci Am* 1961; 204: 72-78
- 7 邸悦,周行涛,褚仁远,等. 注视性眼球运动研究进展. *中华眼科杂志* 2012;48(3):286-288

- 8 Intoy J, Mostofi N, Rucci M. Fast and nonuniform dynamics of perisaccadic vision in the central fovea. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2021; 118(37):e2101259118
- 9 Shelchkova N, Poletti M. Modulations of foveal vision associated with microsaccade preparation. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2020; 117(20): 11178-11183
- 10 Rima S, Schmid MC. Reading specific small saccades predict individual phonemic awareness and reading speed. *Front Neurosci* 2021; 15:663242
- 11 Knapp CM, Proudlock FA, Gottlob I. OKN asymmetry in human subjects: a literature review. *Strabismus* 2013;21(1):37-49
- 12 孙宗鹏. 小脑控制不同类型眼动的神经编码机制:从小脑皮层到小脑核团. *生物化学与生物物理进展* 2022;49(7):1251-1263
- 13 Shemesh AA, Zee DS. Eye movement disorders and the cerebellum. *J Clin Neurophysiol* 2019;36(6):405-414
- 14 Herzfeld DJ, Kojima Y, Soetedjo R, et al. Encoding of error and learning to correct that error by the Purkinje cells of the cerebellum. *Nat Neurosci* 2018;21(5):736-743
- 15 Sedaghat-Nejad E, Herzfeld DJ, Hage P, et al. Behavioral training of marmosets and electrophysiological recording from the cerebellum. *J Neurophysiol* 2019;122(4):1502-1517
- 16 Kovarski K, Siwiaszczyk M, Malvy J, et al. Faster eye movements in children with autism spectrum disorder. *Autism Res* 2019; 12(2): 212-224
- 17 Shiino T, Miura K, Fujimoto M, et al. Comparison of eye movements in schizophrenia and autism spectrum disorder. *Neuropsychopharmacol Rep* 2020;40(1):92-95
- 18 Shaikh AG, Ghasia FF. Fixational saccades are more disconjugate in adults than in children. *PLoS One* 2017;12(4):e0175295
- 19 Kowler E, Martins AJ. Eye movements of preschool children. *Science* 1982;215(4535):997-999
- 20 Nakagawa A, Sukigawa M. Variable coordination of eye and head movements during the early development of attention: a longitudinal study of infants aged 12-36 months. *Infant Behav Dev* 2013;36(4):517-525
- 21 Takahashi J, Miura K, Morita K, et al. Effects of age and sex on eye movement characteristics. *Neuropsychopharmacol Rep* 2021; 41(2): 152-158
- 22 Lee WJ, Kim JH, Shin YU, et al. Differences in eye movement range based on age and gaze direction. *Eye (Lond)* 2019;33(7):1145-1151
- 23 闫国利,白学军. *眼动研究心理学导论:揭开心灵之窗奥秘的神奇科学*. 北京:科学出版社 2012
- 24 Carter BT, Luke SG. Best practices in eye tracking research. *Int J Psychophysiol* 2020;155:49-62
- 25 Johansson J, Franzon K, Godbolt AK, et al. Methodological aspects of using a wearable eye-tracker to support diagnostic clinical evaluation of prolonged disorders of consciousness. *J Rehabil Med* 2021; 53(7):jrm00213
- 26 刘慧,阴正勤,姚军平,等. 眼动仪与眼电图检查正常人扫视运动的比较研究. *第三军医大学学报* 2009;31(15):1508-1510
- 27 Dowiasch S, Wolf P, Bremmer F. Quantitative comparison of a mobile and a stationary video-based eye-tracker. *Behav Res* 2020; 52(2): 667-680
- 28 Bulf H, Valenza E. Object-based visual attention in 8-month-old infants: evidence from an eye-tracking study. *Dev Psychol* 2013; 49(10):1909-1918
- 29 Andersson R, Nyström M, Holmqvist K. Sampling frequency and eye-tracking measures: how speed affects durations, latencies, and more. *J Eye Mov Res* 2010;3(3):1-12

- 30 宋钰, 马玉娜, 刘桂香, 等. 运用视动性眼球震颤法检测视力的可行性研究. 中国斜视与小儿眼科杂志 2020;28(1):25,28-29,23
- 31 Jones PR, Kalwarowsky S, Atkinson J, et al. Automated measurement of resolution acuity in infants using remote eye - tracking. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014;55(12):8102-8110
- 32 Vrabčič N, Juroš B, Tekavčič PM. Automated visual acuity evaluation based on preferential looking technique and controlled with remote eye tracking. *Ophthalmic Res* 2021;64(3):389-397
- 33 Holmes JM, Leske DA, Hohberger GG. Defining real change in prism-cover test measurements. *Am J Ophthalmol* 2008;145(2):381-385
- 34 Valente TLA, de Almeida JDS, Silva AC, et al. Automatic diagnosis of strabismus in digital videos through cover test. *Comput Methods Programs Biomed* 2017;140:295-305
- 35 Miao YN, Jeon JY, Park G, et al. Virtual reality-based measurement of ocular deviation in strabismus. *Comput Methods Programs Biomed* 2020;185:105132
- 36 Pajic B, Cvejic Z, Mijatovic Z, et al. Excimer laser surgery: biometrical Iris eye recognition with cyclorotational control eye tracker system. *Sensors (Basel)* 2017;17(6):1211
- 37 张薇玮, 顾刘伟, 刘庆淮, 等. 不同屈光状态微小切口基质透镜切除术的切削误差. 国际眼科杂志 2022;22(5):757-763
- 38 LeeYC. Active eye-tracking improves LASIK results. *J Refract Surg* 2007;23(6):581-585
- 39 Waring GO 3rd. One-kilohertz eye tracker and active intraoperative torsion detection in the NIDEK CXIII and Quest excimer lasers. *J Refract Surg* 2009;25(10 Suppl):S931-S933
- 40 张鹏程, 江文珊, 刘银. SMILE 术中眼球移位对角膜切削精度和屈光状态的影响. 国际眼科杂志 2022;22(7):1178-1182
- 41 Soans RS, Grillini A, Saxena R, et al. Eye - movement - based assessment of the perceptual consequences of glaucomatous and neuro-ophthalmological visual field defects. *Transl Vis Sci Technol* 2021;10(2):1
- 42 Tatham AJ, Murray IC, McTrusty AD, et al. A case control study examining the feasibility of using eye tracking perimetry to differentiate patients with glaucoma from healthy controls. *Sci Rep* 2021;11(1):839
- 43 Martínez-Almeida Nistal I, Lampreave Acebes P, Martínez-de-la-Casa JM, et al. Validation of virtual reality system based on eye-tracking technologies to support clinical assessment of glaucoma. *Eur J Ophthalmol* 2021;31(6):3080-3086
- 44 Mohamad Shahimin M, Razali A. An eye tracking analysis on diagnostic performance of digital fundus photography images between ophthalmologists and optometrists. *Int J Environ Res Public Health* 2019;17(1):30