

基于 ROC 曲线的镜片舒适度眼动指标研究

胡义波, 武杰, 樊碧月, 项华中

(上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093)

摘要: 基于眼动仪检测到的受试者眼动数据, 提出一项新的眼动指标——眼睑间距变动百分比, 并对比传统的眼跳次数、瞳孔直径等眼动指标, 经过显著性和相关性分析后, 最后利用受试者特征曲线 (Receiver operating characteristic, ROC) 曲线评价每个眼动指标对镜片舒适度的判别性能。实验结果表明, 本文提出的眼睑间距变动百分比反映镜片舒适度的性能最好, 瞳孔直径次之, 眼跳次数和平均注视时长相仿。本实验结果证明可以通过检测患者的眼睑间距变动百分比, 来准确快速地判断镜片的舒适程度。这项研究成果能帮助相关从业者从更加客观的角度评价镜片的舒适程度, 也为中国当前日益严峻的近视防控形势提供了一定的技术理论帮助。

关键词: 眼动指标; 舒适度; 镜片; ROC 曲线

中图分类号: TP391.7; TS959.6 **文献标志码:** A

Research on Eye Movement Index of Lens Comfort Based on ROC Curve

HU Yibo, WU Jie, FAN Biyu, XIANG Huazhong

(School of Medical Instrument & Food Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the eye movement data of subjects detected by eye tracker, a new eye movement index, the percentage change of eyelid spacing, is put forward. Then it is compared with such traditional eye movement indices as saccade count and pupil diameter. After significance and correlation analysis, the receiver operating characteristic (ROC) curve is used to evaluate the discriminant performance of every eye movement on the lens comfort. Experimental results show that the proposed percentage change of eyelid spacing is the best indicator to evaluate the lens comfort, followed by the pupil diameter, and the saccade index and the average fixation duration are the similar. It validates that the lens comfort can be evaluated accurately and quickly by detecting the percentage change of eyelid spacing of subjects. This research can help relevant practitioners to evaluate the lens comfort from an objective perspective, and also provides some technical and theoretical help for increasingly severe myopia prevention and control situation of China.

Key words: eye movement index; comfort; lens; receiver operating characteristic (ROC) curve

引言

作为一种疾病状态, 近视的发生和危害不可逆转, 轻则影响正常生活, 重则引起视觉疾病^[1]。2018

年全国青少年总体近视率为53.6%，其中高中生和大学学生的近视率双双超过80%，预计2020年中国近视人数会达到7亿^[2-3]，到2050年全球近视人口将达47.58亿^[4]。眼镜作为一种医疗器械是近视矫正的首要选择，但是中国大量的视光从业人员操作步骤不完善^[5-6]，屈光检查后让患者试戴镜片，仅凭其主观感受确定最终验配方案。对于青少年来说，验光不合格的眼镜可能会让孩子的近视度数涨得更快；而对于成年人来说，验光不合格的眼镜不仅可能引起一定程度的度数增加，还有可能造成头晕、眼睛易疲劳的状况，进一步引发其他问题，如眼睛发炎、干眼症等^[7]。

对于验光配镜以及镜片加工设计来讲，患者能接受并且感到舒适是一个重要的原则，但是镜片的舒适与否具有很强的主观性，所以找到客观的能够反映镜片舒适性的指标具有重要意义。对患者来说，可以通过这些指标的引导，发现被自己忽略的感受信息，从而产生更多的反馈；对视光从业人员来讲，通过这些指标，发掘患者没有表达出来的隐藏信息，客观了解患者的真实感受，减少问询的工作量，可在显著提高工作效率的同时大幅提升服务质量。整体来讲，找到评价镜片舒适度的指标能够为中国当前保护视觉健康的行动提供切实帮助。

眼睛的状态可以通过一系列眼动指标来反映，这些眼动指标包含眼跳次数(Saccade index)、注视次数(Fixation duration)、瞳孔直径(Pupil diameter)等。李贵英^[8]使用传统的检测方法，对戴镜的参试者进行实验，发现佩戴不合适镜片会对眼睛调节能力产生影响；张莉等^[9]发现在观看3D视频过程中，眼跳幅度较大，眼跳频率较快，眼跳持续时间较短，眼跳速度较快等。同时，已经有很多利用眼动追踪技术检测眼动指标并进行相关应用的研究^[10-17]，如Khachatryan等^[18]通过注视点和兴趣区来研究消费者对不同的低成本住房景观的态度，帮助政府制定低成本住房景观政策；Naqvi等^[19]通过研究海上作业时专家和新手的眼动模式差异，来指导新手培训；崔冬等^[20]利用眼动追踪技术研究孤独症儿童和正常儿童扫视模式的差异，来辅助临床医生诊断等。本研究使用非侵入式眼动仪检测佩戴前后各项眼动指标数据变化，同时开展主观评价实验，挖掘研究能够反映镜片舒适程度的眼动指标，通过不同的评价方法，从多个角度对各项眼动指标性能进行评估。

1 材料与方法

1.1 实验设计

实验对象：本研究共招募20例屈光不正的受试者(11例男性，9例女性)，年龄在21~45岁之间，屈光度在-0.75 D~8.25 D范围内；无眼部疾病，外眼及眼底检查未见异常；在实验前没有服用任何药物，且休息良好。本实验已经获得受试者的知情同意。

实验设备：采用7invensun公司的aSeeGlasses眼镜式眼动仪及其软件包作为检测记录装置，眼动仪采样频率为120 Hz，装置如图1所示。

实验任务：(1)获取受试者在佩戴眼镜状态下的眼动指标数据，如瞳孔直径、眼睑间距、眼跳次数和注视时长等数据；(2)为更加准确地找到反映不同镜片舒适度的眼动参数，凸显差异性，为每位受试者验配两副会造成不同舒适度的镜片；(3)为了客观衡量镜片的舒适性，需要对舒适性进行量化研究，进行主观性评价实验，设计镜片舒适度评价表，提供给受试者填写。

实验材料：(1)结合实验任务，实验前先邀请视光医生以及配镜中心的配镜师使用综合验光仪包含电脑验光仪以及牛眼等光学设备，对受试者进行全面的验光以及视功能检查，为每一位受试者验配一



图1 aSeeGlasses眼镜式眼动仪

Fig.1 aSeeGlasses eye tracker

副舒适的镜片 X ,同时再为受试者配一副不合适的镜片 Y ,每幅 Y 镜片相对于 X 镜片的变化量是 $K \times 50$ 度,结合专家意见以及受试者反馈, K 的取值范围是 $(\pm 1, \dots, \pm 4)$,共计40副镜片。(2)舒适度问卷表。问卷表是在参考国际通用的舒适度问卷如眼表疾病指数(Ocular surface disease index, OSDI)调查问卷表,干眼调查问卷表等,以及一些配镜验光中心供患者填写的问卷基础上制成,具体内容包含是否晕眩、恶心、流泪、眼干等症状,阅读过程中是否看得清晰、字体是否变形,是否需要通过睁大眼睛/眯眼才能视物清晰等问题,以此来量化受试者的舒适程度。舒适度问卷表满分10分,最低1分,最终得分越高,表明受试者越舒适。

实验流程:每次邀请一名受试者进入实验室,先介绍实验基本流程以及熟悉舒适度问卷,然后将为该受试者定制的测试镜片 X 安装到眼动仪上,受试者在实验员的帮助下佩戴好眼动仪;采用三点校准法进行眼动仪校准,双眼校准评分均大于阈值即可开始正式实验;令受试者按照实验要求进行视物任务,时长为10 min;受试者完成后令其摘下眼动仪,然后填写舒适度调查问卷,实验员保存实验数据;换用为受试者验配的测试镜片 Y ,重复上述步骤,不同镜片实验期间给予受试者10 min的休息时间。该受试者完成全部步骤以后,引入下一位受试者进入实验室进行实验,直至所有受试者实验结束。

为了让实验数据更加客观,消除潜在的学习效应,实验中随机选择10个人在实验流程的第2步先测试 X 镜片,另外10个人在实验流程的第2步先测试 Y 镜片。

1.2 数据处理与方法分析

经过对眼动数据以及问卷表的汇总处理,发现有2人的眼动数据采样率低于80%,认为不足以反映受试者的眼动情况,所以舍去这2人的眼动数据,最后取剩余18位受试者的眼动数据,做进一步的分析。

分析整理采集到的原始数据,获取受试者在实验过程中的注视次数、注视时长、眼跳次数、瞳孔直径和眼跳幅度等直接的眼动数据。由于眼动指标较多,所以通过相关性检验,筛选出具有较好的独立性兼具代表性的眼动指标进行下一步分析。眼动指标相关性检验结果如表1所示。

表1 眼动指标相关性
Table 1 Correlation of eye movement index

眼动指标	注视次数	总注视时长	平均注视时长	眼跳次数	平均眼跳幅度	总眼跳幅度	瞳孔直径
注视次数	1.00	-0.85	-0.93	0.99	-0.08	0.05	-0.15
总注视时长	-0.85	1.00	0.90	-0.84	0.08	-0.49	0.31
平均注视时长	-0.93	0.90	1.00	-0.93	0.03	-0.59	0.18
眼跳次数	0.99	-0.84	-0.93	1.00	-0.08	0.6	-0.15
平均眼跳幅度	-0.08	0.08	0.03	-0.08	1.00	0.64	-0.22
总眼跳幅度	0.05	-0.49	-0.59	0.6	0.64	1.00	-0.07
瞳孔直径	-0.15	0.31	-0.15	-0.15	-0.22	-0.07	1.00

表1列出了不同眼动指标之间的相关性,对于相关性很高的眼动指标进行筛选保留如注视次数、总注视时长、平均注视时长和眼跳次数四者之间具有强相关性,同时考虑到可能存在潜在的个体视物特点影响,以及各个眼动指标的代表性选择保留平均注视时长与眼跳次数做进一步的分析;平均眼跳幅度和总眼跳幅度也有较强的相关性,选择保留平均眼跳幅度做进一步的分析。通过相关性检验筛选出来的眼动指标有眼跳次数、平均注视时长、平均眼跳幅度和瞳孔直径。

观察采集到的受试者眼部图像,发现受试者评分较低的舒适度问卷表所对应的视物眼图存在一些自有的特点,主要表现在视物过程中会出现较多的眨眼、眯眼或者张大眼睑的行为,如图2所示。根据推断,当佩戴的眼镜不舒适的时候,人会通过眯眼来调节焦距,同时通过频繁眨眼来湿润眼球,眯眼后一般还有一个张大眼睑的行为来缓解眯眼带来的不适。所以新提出的眼动评价指标相比于过往研究中经常使用的眼睑间距,克服了个人的生理不同,更具客观与合理。

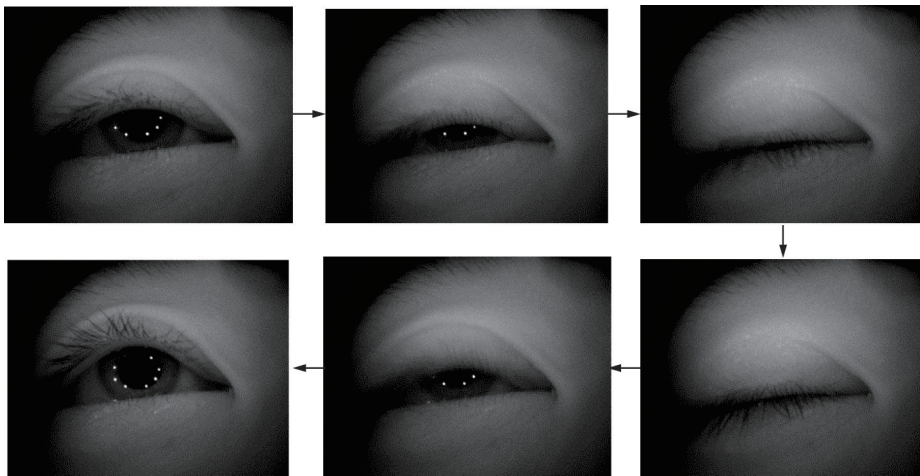


图2 眨眼过程

Fig.2 Blinking process

为了在数据上能够刻画这种行为,本文提出了一项新的眼动指标——眼睑间距变动百分比,用以衡量眨眼、眯眼或者张大眼睑的行为占比。计算过程如下:

(1) 确定受试者正常状态下的眼睑间距。通过受试者填写的舒适度问卷评分,找到每位受试者最高评分对应的眼动实验数据,截取第2~5 min的眼睑数据,利用箱线图法(Boxplot)筛选出这段数据中偏离数据中心较远的的数据,如图3,然后去除这些异常数据,再对剩下的眼睑间距数据取平均值作为正常的眼睑间距,记为 S 。

(2) 统计出每位受试者的眼睑间距数据列中小于 $0.7S$ 的以及大于 $1.1S$ 的数据个数,再计算出这些数据在整个数据列数中的占比,即为眼睑间距变动百分比。阈值可通过咨询行业医生,多次的测试以及查阅资料^[21-24]最终确定,阈值选择过高或过低时会出现0数据以及不同状态下数据区分不明显

眼睑间距变动百分比 =

$$\frac{(\text{眼睑间距} < 0.7S + \text{眼睑间距} > 1.1S) \text{的帧数}}{\text{总帧数}} \quad (1)$$

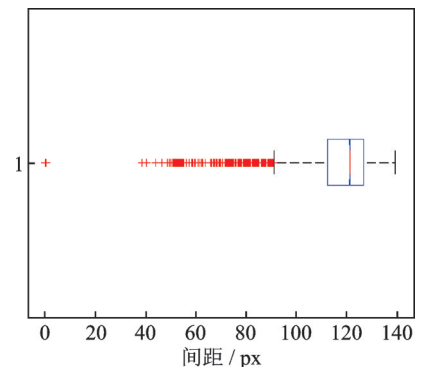


图3 眼睑间距箱线图

Fig.3 Boxplot of eyelid spacing

2 结果与分析

2.1 不同舒适度下的各项眼动指标显著性

对评分舒适和不舒适的各项眼动指标进行配对 T 检验。各项指标的数据变化如图4所示,结果表

明:眼跳次数的差异性显著, $p=0.0468 < 0.05$; 平均注视时长差异不显著, $p=0.3557 > 0.05$; 瞳孔直径的差异性显著, $p=0.0061 < 0.05$; 平均眼跳幅度的差异性不显著, $p=0.4405 > 0.05$; 眼睑间距变动百分比的差异性显著 $p=0.0009 < 0.05$ 。

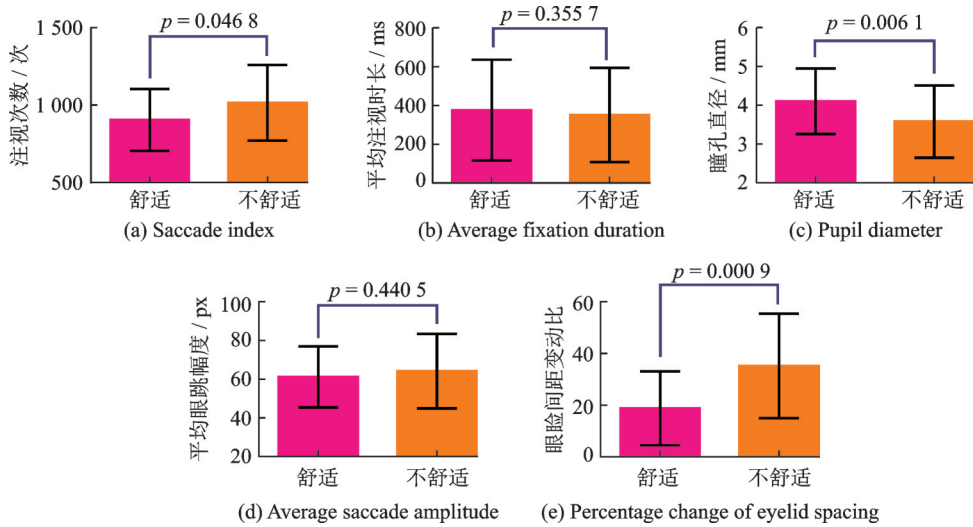


图4 眼动指标的显著性

Fig.4 Significance of eye movement index

2.2 各项眼动指标与舒适度的相关性分析

对各项眼动指标的数据和舒适度评分进行斯皮尔曼(Spearman)相关性分析,结果如表2所示。结果显示:

(1) 眼跳次数和舒适度的相关性系数 $r = -0.3537$, 显著性系数 $p = 0.0343$, 认为受试者眼跳视次数和舒适度有显著的较弱负相关, 即受试者越不舒服, 受试者的眼跳次数越多;

(2) 平均注视时长和舒适度的相关性系数 $r = 0.4257$, 显著性系数 $p = 0.0096$, 认为受试者平均注视时长和舒适度有显著的较强正相关, 即受试者越舒服, 受试者的平均注视时长将显著增加;

(3) 平均眼跳幅度和舒适度的相关性系数 $r = 0.2309$, 显著性系数 $p = 0.1754$, 认为受试者平均眼跳幅度和舒适度有不显著的弱正相关, 即受试者感受舒服时, 平均眼跳幅度不显著的增加;

(4) 瞳孔直径和舒适度的相关性系数 $r = 0.5985$, 显著性系数 $p = 0.0032$, 认为受试者瞳孔直径和舒适度有显著的强正相关, 即受试者感受舒服时, 瞳孔直径有显著的增加;

(5) 眼睑间距变动百分比和舒适度的相关性系数 $r = -0.4201$, 显著性系数 $p = 0.0107$, 认为受试者眼睑间距变动百分比和舒适度有显著的负相关, 即受试者感受舒服时, 眼睑的变动百分比比较小, 也就是发生眯眼和张大眼睑的情况减小了。

由以上分析可知, 眼睑间距变动百分比、平均注视时长、瞳孔直径和眼跳次数与镜片舒适度均有显著的相关性, 所以适合作为反映镜片舒适度的特征指标, 而平均眼跳幅度和舒适度的相关性不高, 显著性也不强, 所以不适合作为反映镜片舒适度的特征指标。接下来利用受试者特征曲线(Receiver operating characteristic, ROC)判别曲线

表2 眼动指标与舒适度的相关性

Table 2 Correlation between eye movement index and comfort

眼动指标	眼跳次数	平均注视时长	平均眼跳幅度	瞳孔直径	眼睑间距变动百分比
相关性	-0.3537	0.4257	0.2309	0.5985	-0.4201
显著性	0.0343	0.0096	0.1754	0.0032	0.0107

对保留的这4个眼动指标进一步分析,以评判各项眼动指标对受试者舒适程度的判别性能。

2.3 ROC分析

ROC曲线是描述敏感性和特异性相互关系的曲线,是反映敏感性和特异性连续变量的综合指标^[25-28]。敏感性又称真阳率(True positive rate, TPR),特异性又称真阴率(True negative rate, TNR)。在本文中敏感性表示受试者舒适并且也被识别为舒适的概率,特异性表示受试者不舒适被识别为不舒适的概率。

ROC曲线通过将变量设定出多个不同的临界值,根据每个临界值计算出对应的敏感性和特异性,最终再以敏感性为纵坐标、(1-特异性)为横坐标绘制成曲线。因为ROC判别结果一般只有“真”和“假”两种情况,所以适用于评价二元分类的判别性能。本文中有舒适和不舒适两种情况,根据受试者填写的舒适度问卷,以8分为界将受试者的结果分为舒适样本组和不舒适样本组,8分及以上为舒适样本组,8分以下为不舒适样本组。

AUC(Area under the curve)表示ROC曲线下方面积,代表的是一个概率值,表示选择一个样本之后,预测为正的的概率值比预测为负的概率值还要大的可能性。常通过计算AUC的大小来评价指标判别能力的大小,面积越大则判别准确性越高,AUC的理论取值范围在0.5~1.0之间,0.5对应几率线(对角线)下的面积,1.0对应整个ROC平面的面积。图5为眼跳次数、平均注视时长、瞳孔直径和眼睑间距变动百分比的ROC曲线。本文ROC的绘制与AUC的计算均使用MATLAB环境下的函数。

图5中各项指标的AUC值列于表3。根据各项眼动指标的AUC值排序,眼睑间距变动百分比(0.734)>瞳孔直径(0.694)>眼跳次数(0.654)>平均注视时长(0.651),可以得出本文新引入的眼动指标眼睑间距变动百分比对于镜片舒适度的判别性能最好,瞳孔直径效果次之,而眼跳次数和平均注视时长的判别效果相当。从眼睑间距变动百分比的结果来看,它能够比单独的眼睑间距或者眨眼次数表

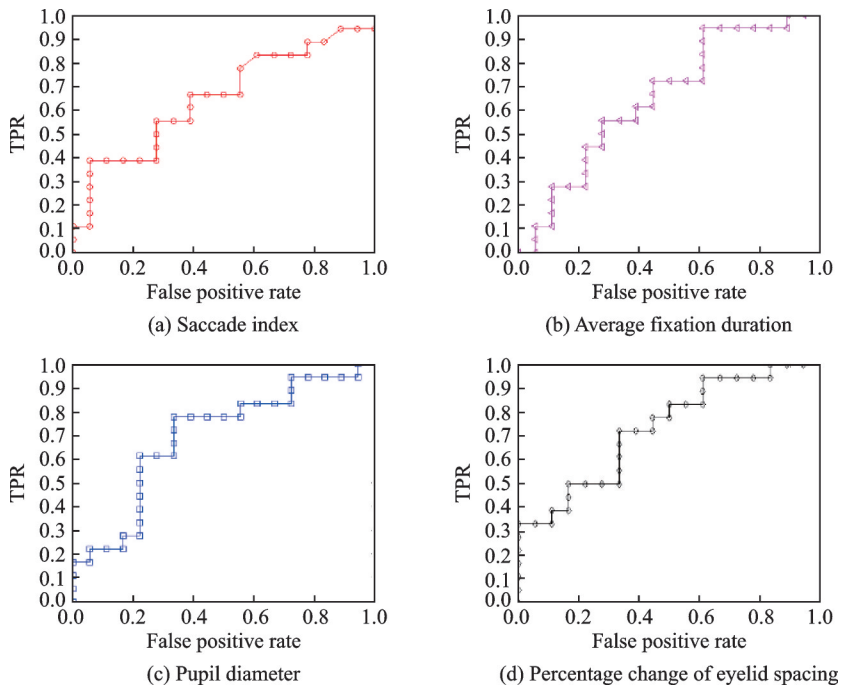


图5 眼动指标的ROC曲线

Fig.5 ROC curves for eye movement index

现得更好。因为人的眼睑间距客观上不同,所以指标自身就受到限制,同时眼动仪对眨眼的判别很严格,眯眼等眼动会被遗漏,而本文提出的眼睑间距变动百分比则克服了上述两个眼动指标存在的问题,并同时吸收了两个眼动指标的优点。

表3 眼动指标的 AUC
Table 3 AUC for eye movement index

眼动指标	眼跳次数	平均注视时长	瞳孔直径	眼睑间距变动百分比
AUC	0.654	0.651	0.694	0.734

3 结束语

本文利用眼镜式眼动仪检测记录受试者佩戴不同舒适度镜片的的眼动情况,使用到的眼动指标有平均注视时长、平均眼跳幅度、眼跳次数、瞳孔直径,同时本文没有拘泥于这些经典的眼动指标,通过对实验数据的挖掘,提出了一项新的眼动指标——眼睑间距变动百分比。新指标的产生是从实际的数据出发,符合客观存在的规律。对这5项评价指标进行显著性检验、相关性检验和ROC曲线分析,结果显示,对镜片舒适度判别性能最好的指标是眼睑间距变动百分比,其次是瞳孔直径,接下来是眼跳次数和平均注视时长。所以,若选取一项指标来判断镜片的舒适度,可优先选择眼睑间距变动百分比。

当前国内的近视问题比较严重,近视人数节节攀升,对配镜行业的需求也在剧增,但是中国的配镜行业整体上是快餐式的配镜,行业水平良莠不齐,不合适的配镜会加重近视程度。本文为视光师在配镜过程中,通过眼动仪等专业仪器来检测患者的眼睑间距,来客观评判患者佩戴眼镜的舒适程度提供了理论依据。眼睑间距在眼动追踪技术中易测量,结果准确率高,根据眼睑间距可推算出眼睑间距变动百分比,这个过程可以通过程序实现自动化,方便易用。本方法可以避免视光从业人员只靠患者的主观评价来判断镜片舒适性,可从更加客观的角度根据量化数据来判断患者镜片的舒适程度。这项研究也为中国当前日益严峻的近视防控形式,以及正在进行的保护视觉健康行动,提供了一定的技术理论支持。笔者下一步将在扩大样本数量、增大样本年龄段覆盖范围的基础上开发出商用的镜片舒适度评价系统。

参考文献:

- [1] 沈洪兵,齐秀英. 眼科学[M]. 北京:人民卫生出版社,2018.
SHEN Hongbing, QI Xiuying. Ophthalmology[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2018.
- [2] 中华人民共和国教育部. 综合防控儿童青少年近视实施方案[M]. 北京:中华人民共和国教育部,2018.
Ministry of Education of the People's Republic of China. Implementation plan for comprehensive prevention and control of myopia in children and adolescents[M]. Beijing: Ministry of Education of the People's Republic of China, 2018.
- [3] HOLDEN B A, TIMOTHY R F, WILSON D A, et al. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050[J]. Ophthalmology, 2016, 123(5): 1036-1042.
- [4] 李玲. 国民视觉健康报告[R]. 北京:北京大学,2015.
LI Ling. National vision health report of China[R]. Beijing: Peking University, 2015.
- [5] 瞿佳. 眼镜学[M]. 北京:人民卫生出版社,2011.
QU Jia. Ocular[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2011.
- [6] 杨必,贺庆军,刘陇黔. 视光学专业本科教育模式的比较与思考[J]. 中国高等医学教育,2011,25(12): 23-24.
YANG Bi, HE Qingjun, LIU Longqian. Comparison of two different optometry undergraduate education modes[J]. China Higher Medical Education, 2011, 25(12): 23-24.
- [7] 樊碧月,武杰,项华中,等. 基于眼动仪评价配镜舒适程度的实验研究[J]. 光学技术,2020,46(2): 140-145.
FAN Biyue, WU Jie, XIANG Huazhong, et al. Experimental study on evaluating the comfort degree of glasses based on eye tracker[J]. Optical Technique, 2020, 46(2): 140-145.

- [8] 李贵英. 近视眼戴镜对眼动参数影响的研究[D]. 长沙:中南大学, 2007.
LI Guiying. The investigation about influence of wearing glasses of myopia on oculomotor parameter[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [9] 张莉, 任杰, 徐亮, 等. 应用眼动仪评价观看立体显示视频诱导的视疲劳程度的实验研究[J]. 眼科, 2014, 23(1): 37-42.
ZHANG Li, REN Jie, XU Liang, et al. Visual comfort and fatigue measured by eye movement analysis when watching three dimensional displays[J]. *Ophthalmology in China*, 2014, 23(1): 37-42.
- [10] DOGAN K M, SUZUKI H, GUNPINAR G. Eye tracking for screening design parameters in adjective-based design of yacht hull[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 166(18): 262-277.
- [11] JOHN B, MASTERTSON T D, EMOND J A, et al. Measuring attentional bias to food cues in young children using a visual search task: An eye-tracking study[J]. *Appetite*, 2020, 148: 104610.
- [12] DEMAREVA V, EDELEVA Y. Eye-tracking based L2 detection: Universal and specific eye movement patterns in L1 and L2 reading[J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 169(4): 673-676.
- [13] PAUL J M, REEVE R A, FORTE J D. Enumeration strategy differences revealed by saccade-terminated eye tracking[J]. *Cognition*, 2020, 198: 104204.
- [14] 靳慧斌, 朱国蕾. 眼动指标检测管制疲劳的有效性[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(19): 136-140.
JIN Huibin, ZHU Guolei. Effectiveness of eye movement indicators on air traffic controllers' fatigue detection[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(19): 136-140.
- [15] CHO H, POWELL D, PICHON A, et al. Eye-tracking retrospective think-aloud as a novel approach for a usability evaluation [J]. *International Journal of Medical Informatics*, 2019, 129(9): 366-373.
- [16] 孟春宁, 孙盛智, 冯明奎, 等. 基于眼动记录与分析技术的测谎研究[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(4): 809-814.
MENG Chunning, SUN Shengzhi, FENG Mingkui, et al. Lie detection based on eye-movement tracking and analysis[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2016, 31(4): 809-814.
- [17] 张赛男, 王瑜, 刘恩涛, 等. 基于眼动追踪技术的数字阅读系统设计与应用[J]. 图书馆学刊, 2020, 42(4): 73-81.
ZHANG Sainan, WANG Yu, LIU Entao, et al. Design and application of digital reading system based on eye tracking technology[J]. *Journal of Library Science*, 2020, 42(4): 73-81.
- [18] KHACHATRYAN H, RIHN A, HANSEN G, et al. Landscape aesthetics and maintenance perceptions: Assessing the relationship between homeowners' visual attention and landscape care knowledge[J]. *Land Use Policy*, 2020, 95: 104645.
- [19] NAQVI S M, RAZA M, GHAZAL S, et al. Simulation-based training to enhance process safety in offshore energy operations: Process tracing through eye-tracking[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 138(6): 220-235.
- [20] 崔冬, 韩晓雅, 陈贺, 等. 基于面孔加工异常的孤独症儿童识别[J]. 科学通报, 2020(20): 2128-2135.
CUI Dong, HAN Xiaoya, CHEN He, et al. Recognition of autistic children based on abnormal face processing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020(20): 2128-2135.
- [21] PENG Yan, DONG Yan, CHENG Du. Design and implementation of a driver's eye state recognition algorithm based on PERCLOS[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2014, 23(4): 669-672.
- [22] VARNOSFADERANI P E, VERLY J G. Geometric brownian motion (GBM) random process model appears to be an excellent choice for modeling realizations of PERCLOS signals[J]. *Sleep Medicine*, 2017, 40(1): e86.
- [23] 李强. 基于PERCLOS的列车司机驾驶疲劳检测研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
LI Qiang. Research on train driver's fatigue detection based on PERCLOS[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [24] 巩晓倩, 蒲亦非, 杨智勇, 等. 基于有限状态自动机的人眼开度 PERCLOS 实现算法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(1): 307-310.
GONG Xiaoqian, PU Yifei, YANG Zhiyong, et al. PERCLOS implementation computing method of eye open degree based on finite state machine[J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(1): 307-310.
- [25] 孙长亮, 何峻, 肖怀铁. 基于 ROC 曲线的目标识别性能评估方法[J]. 雷达科学与技术, 2007, 5(1): 17-21.
SUN Changliang, HE Jun, XIAO Huaitie. A new performance evaluation method based on ROC curve[J]. *Radar Science and*

Technology, 2007, 5(1): 17-21.

- [26] 赵晓华,杜洪吉,荣建. 基于ROC曲线的疲劳驾驶判别方法研究[J]. 交通信息与安全, 2014, 32(5): 88-94.
ZHAO Xiaohua, DU Hongji, RONG Jian. An identification method of fatigue driving based on ROC curves[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2014, 32(5): 88-94.
- [27] SUSANA D, PABLO M, NORBERTO O C. Cumulative/dynamic ROC curve estimation under interval censorship[J]. Journal of Statistical Computation and Simulation, 2020, 90(9): 1570-1590.
- [28] 刘弟世闻,叶天新,王琳玲,等. Logistic回归联合ROC曲线模型预测急性肺栓塞患者院内死亡风险[J]. 武汉大学学报(医学版), 2020(3): 459-463.
LIU Dishiwen, YE Tianxin, WANG Linling, et al. Prediction of in-hospital death risk of patients with acute pulmonary embolism by logistic regression combined with ROC curve[J]. Medical Journal of Wuhan University, 2020(3): 459-463.

作者简介:



胡义波(1994-),男,硕士研究生,研究方向:医学影像技术,E-mail: 1152368982@qq.com。



武杰(1976-),通信作者,男,博士,讲师,研究方向:医学影像技术,E-mail: jie-usst@163.com。



樊碧月(1995-),女,硕士研究生,研究方向:医学影像技术。



项华中(1987-),男,博士,讲师,研究方向:生物医学光学与视光学。

(编辑:王静)