

# 基于眼动数据的视觉疲劳检测方法研究\*

胡炜<sup>1,2</sup>, 赵小燕<sup>1,2</sup>, 陈泉<sup>1,2</sup>, 冯桂焕<sup>1,2</sup>, 骆斌<sup>1,2</sup>



<sup>1</sup>(南京大学 软件学院, 江苏 南京 210093)

<sup>2</sup>(计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学), 江苏 南京 210023)

通讯作者: 冯桂焕, E-mail: fenggh@nju.edu.cn

**摘要:** 视觉疲劳的产生不仅会导致工作效率低下、视力降低,甚至可能导致很多意外伤害.如何简便、快速地检测视觉疲劳是亟需解决的课题.提出一种利用特殊字搜索并结合阅读任务来对视觉疲劳进行快速检测的方法.测试者需在所提供的阅读材料中通过扫视行为寻找出文内的特殊字符,同时完成相应的阅读理解任务.实验在 Tobii X230 眼动仪监测下完成.系统记录任务完成过程中的瞳孔直径比、兴趣域个数等眼动数据信息,并采用 BP 神经网络对用户的视觉疲劳状态进行判定.基于 10 位测试者的实验结果表明,分类精度达到了 95.2%,证实了该方法的有效性.

**关键词:** 眼动交互;视觉疲劳;特殊字;阅读理解;神经网络

中文引用格式: 胡炜,赵小燕,陈泉,冯桂焕,骆斌.基于眼动数据的视觉疲劳检测方法研究.软件学报,2016,27(Suppl.(2)): 148-155. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16030.htm>

英文引用格式: Hu W, Zhao XY, Chen Q, Feng GH, Luo B. Visual fatigue detection based on eye tracking data. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(Suppl. (2)): 148-155 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16030.htm>

## Visual Fatigue Detection Based on Eye Tracking Data

HU Wei<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiao-Yan<sup>1,2</sup>, CHEN Quan<sup>1,2</sup>, FENG Gui-Huan<sup>1,2</sup>, LUO Bin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(Software Institute, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

<sup>2</sup>(State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Visual fatigue cannot only lead to decreased productivity and vision, it might also bring various accidental injuries. How to detect visual fatigue in a simple and fast way is an urgent topic. This paper proposes a visual fatigue detection approach with the aid of special characters searching and reading tasks. Participants are required to locate these special characters from the reading materials through scanning, and at the same time complete the corresponding reading comprehension tasks. The experiment is conducted under the monitoring of Tobii X230 eye tracker. Eye tracking data, such as pupil diameter ratio, number of AOIs etc. are recorded. BP neural network is employed to determine the state of visual fatigue. The experimental results on 10 users show a classification accuracy of 95.2%, which confirms the effectiveness of the approach.

**Key words:** eye tracking interaction; visual fatigue; special character; reading comprehension; neural network

## 1 引言

随着信息技术的发展以及电子设备的快速普及,利用计算机进行转换、存储、处理以及检索信息成为一种快速、高效的手段.其中视觉显示单位(visual display units,简称 VDUs)是人类与计算机进行通信最方便的工具之一,比如利用电子显示器进行信息浏览以及阅读已经成为主流的交互方式之一<sup>[1]</sup>.

一系列研究表明,与传统的信息浏览及阅读方式不同,使用电子屏幕更容易让用户产生疲劳感,疲劳度的增

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61100109)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61100109)

收稿时间: 2016-05-01; 采用时间: 2016-11-21

加会导致工作效率低下、视力降低甚至更为严重的身体损害,然而很多用户在生活、工作中却并未意识到这一点.因此如何以一种快捷、简便的方式,准确、有效地判断用户的疲劳状态,是目前亟待解决的一个问题.

在用户与设备交互的过程中,利用眼动数据进行分析是判断用户状态的一种有效方法,例如心理学研究中通过追踪眼球运动来分析用户想法<sup>[2]</sup>,以及结合笔交互和眼动的数据来判断用户的操作意图等<sup>[3]</sup>.因此,对于视觉疲劳的检测,使用眼动数据进行分析成为一种直接而又有效的手段.

此前已有多项研究提及到了视觉疲劳检测,但是如何得到一个准确而又客观的结果,多数方法设计并未完美地解决这一问题.卡内基·梅隆研究所经过反复实验和论证,提出了度量疲劳/瞌睡的物理量 PERCLOS (percentage of eyelid closure over the pupil).他们认为,在单位时间内,当眼睛闭合所占的时间达到一定比例时,即判定产生了视觉疲劳.在 Singh 的工作中,认为当眼睛闭合时间大于 0.5S 时,则很可能产生了疲劳状态<sup>[4]</sup>.由于此处用于检测的特征过于单一,因而容易造成误判断. Benedetto 等人在测定视觉疲劳时,结合闪光刺激与眨眼频率进行了分析<sup>[5]</sup>,但是一方面闪光刺激可能会影响到眼动数据,另一方面影响眨眼频率的因素很多,疲劳感仅仅是众多因素之一. Di 和 Mccamy 采用数据分析和问卷调查结合的方法,以 3 个小时为一阶段,测算出用户在多个阶段的阅读和扫视速率,并认为当眼睛处于疲劳状态时,速率结果会大幅降低<sup>[6]</sup>.然而该方法耗时过长,用户体验极不友好.

目前的视觉疲劳(visual fatigue)检测难点在于如何正确、客观地判断疲劳状态.在多数研究工作中,视觉疲劳和视觉不适(visual discomfort)是完全不同的两种概念.视觉疲劳,一般是指人类的视觉系统受到影响,视力性能下降,可以通过客观的方法测量;而视觉不适是一种主观的身体状态,两者之间的差异经常会造成用户反馈和测试结果的分歧. Lambooi 认为,视觉不适的产生通常伴随着情绪紧张、眼睛干燥和头痛<sup>[7]</sup>; Portello 的工作发现,当眼睛处于疲劳状态时,其辨识度会大幅降低,并且容易产生畏光和视力波动等情况<sup>[8]</sup>,其中畏光导致的结果就是瞳孔直径的缩小.对于用户来说,视觉疲劳不一定会导致视觉不适,但却极易造成工作效率的降低以及身体负担,两者之间的矛盾导致此前多数的研究方法并不一定能够客观、有效地检测疲劳状态.

本文在眼动数据分析的基础上,以用户最为熟悉的“阅读”方式对此前的疲劳检测法进行了改进.如 Lee 等人通过对搜索任务的效率来判断光线、字符大小和字符间隔对视觉疲劳的影响程度<sup>[9]</sup>,从而分析哪些因素容易造成疲劳. Hoffman 对视觉焦点与目标区域之间的匹配程度以及对焦所耗时间进行了分析,并以此作为检测视觉疲劳的手段<sup>[10]</sup>,但其并没有考虑到视觉不适与视觉疲劳之间的差异.

本文定义了一种基于眼动数据的特殊字搜索视觉疲劳检测方法,并辅以阅读任务来保证实验方法的实用性和客观性,其优点在于,避免了因视觉疲劳和视觉不适而导致的状态判断分歧,同时以阅读效率和理解程度作为检测手段之一,以有力地断定用户到底是否应该继续工作.本文的工作主要集中在 3 个方面:第一,利用 Tobii 眼动仪获取眼动数据,并基于此来划分特征以及提出相关算法;第二,设计疲劳检测相关流程,区分正常与疲劳两种状态并分别进行实验,同时获取眼动数据;第三,采用基于神经网络的分类器,对实验得到的数据结果进行分类,判断测试样本中的用户处于哪种视觉状态.

## 2 基于眼动数据的特殊字疲劳检测法

当视觉疲劳状态产生时,用户容易出现视觉模糊、辨识度降低、视力波动等症状,尤其是对颜色以及细小的形状差异,其敏感度会大幅下降<sup>[11]</sup>.本文采取了特殊字作为检测视觉疲劳的手段,并认为,当疲劳度增加时,用户对特殊字的辨识度会大幅下降,两者呈负相关.

在阅读的过程中,特殊字表示了一些外表样式区别于大多数字体的文本.本文实验中包含了 4 种类型的特殊字<sup>[12]</sup>:分别是 Thickness(字符粗细)、Gradient(字符倾斜度)、Color(字符颜色)、Size(字号大小),每种特殊字都有着固定的样式.图 1 表示了本文采用的两种特殊字样式,其中“initially”的倾斜度和其他文本不一样,“than”的字号也较大一些.

but *initially* they  
man rather than me who

Fig.1 Example of special character (gradient/size)

图 1 特殊字示例(倾斜度/字号)

本文设计了如图 2 所示的疲劳检测流程.首先,在检测前我们会获取用户在正常状态,即非疲劳状态下的眼动数据,包括瞳孔直径、正常阅读速率以及眨眼频率等.随后进入检测流程,首先是 Searching Pattern,即特殊字搜索模式,用户通过扫视来判断出阅读材料内有哪些是特殊字符,正常字符大小处于 16~22 弧分(minute of arc)之间<sup>[12]</sup>.Searching Pattern 结束后是 Reading Pattern,用户需要阅读一段英文材料,在充分理解材料内容后,进行最后一个阶段,即阅读理解的测试.在整个检测流程中,后台会获取到用户的眼动数据以及特殊字符的搜索结果,最后通过基于神经网络的分类器对数据进行分析,判断用户处于哪种视觉状态中.

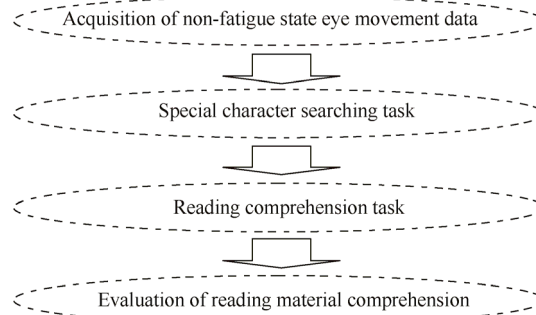


Fig.2 Flowchart of fatigue detection method

图 2 疲劳检测方法流程图

### 3 特征提取

本文基于眼动仪所获取到的眼动数据以及用户在执行检测流程中所产生的数据结果,划分出五大类特征,同时根据模式的不同以及左右眼数据的差异,定义了 13 个特征,见表 1.

Table 1 List of fatigue detection feature

表 1 疲劳检测方法特征列表

瞳孔直径比	Searching 模式左眼瞳孔直径比(SLD)
	Reading 模式左眼瞳孔直径比(RLD)
	Searching 模式右眼瞳孔直径比(SRD)
	Reading 模式右眼瞳孔直径比(RRD)
兴趣域个数	Searching 模式 AOI 获取个数(S_AOI)
	Reading 模式 AOI 获取个数(R_AOI)
搜索结果	特殊字搜寻成功比率(Res_suc)
	特殊字搜寻错误比率(Res_err)
阅读效率	阅读速率比(R_speed)
	Reading 模式回读行数比(R_sac)
	Reading 模式凝视总时间占比(Stare_t)
眨眼次数	Searching 模式眨眼频率比(S_blink)
	Reading 模式眨眼频率比(R_blink)

由于不同用户之间可能存在较大的个体差异,比如瞳孔数据、阅读速率,因此在对以上五大类特征的获取过程中,我们定义了一系列算法,对于个体差异影响较大的特征,取当前任务状态数值与正常状态数值之间的比值,从而有效地避免了因用户自身特性而导致的误差.具体算法如下所示.

#### 1) Pupil Diameter(瞳孔直径比)

在 Tobii 眼动仪的 SDK 中,提供了获取当前用户双眼瞳孔直径的接口,由此我们得出以下公式:

$$D = D_r / D_p,$$

其中, $D$ 代表瞳孔直径比, $D_r$ 代表在当前任务模式中的瞳孔直径, $D_p$ 代表在正常状态下的瞳孔直径.

## 2) Numbers of AOIs(兴趣域个数)

AOI(area of interest)定义了在某一段时间内用户的视觉焦点所集中的一块屏幕区域.在此前的研究工作中,AOI通常基于热点图来进行获取,然而这种方法在大多数情况下需要通过人工筛选,且其阈值难以确定,因此,本文采用了一种基于扫视速率的AOI计算方法:在兴趣域产生的同时,扫视速率会大幅度降低,通过对扫视速率进行高频监测,可以分析判断出AOI区域的产生.具体公式如下:

$$V_s = D_s / \Delta t.$$

$V_s$ 表示当前时刻的扫视速率,而 $D_s$ 表示在 $\Delta t$ 时间段内眼球所扫视过的屏幕距离.其中,我们设置了 $\Delta t$ 的值为250ms,1s内对扫视速率进行4次测算,在连续2s内,当 $V_s$ 的取值低于 $\sigma V$ 的次数占比超过一半时,则判定此时产生了一块兴趣域,其中, $\sigma V$ 代表实验中所设定的扫视速率阈值,公式如下:

$$\begin{aligned} \forall t \in \{t_j, t_{j+1}, t_{j+2}, \dots, t_{j+7}\}, \\ V_{all} = \{V_t\}, \\ \exists V_t \leq \sigma V, \\ |V_{all}| \geq 5. \end{aligned}$$

此外,为了避免兴趣域的判定重复,当监测到产生了一块兴趣域之后,需满足以下条件才判定此为有效兴趣域:

$$P: D > \Delta D (D \in D_n).$$

$D_n$ 表示了当前兴趣域与有效性区域集合之间的中心点距, $\Delta D$ 代表实验中所采用的点距阈值.

## 3) Searching Result(搜索结果)

在搜索模式中,用户需要对阅读材料中的特殊字进行搜索,对于搜索结果,本文定义了以下两点特征:

$$\begin{aligned} R_c &= N_c / N_s, \\ R_w &= N_w / N_s. \end{aligned}$$

$N_c$ 和 $N_w$ 分别表示用户搜索到的正确与错误结果个数, $N_s$ 表示阅读材料内特殊字出现的总个数, $R_c$ 和 $R_w$ 是我们所获取的特征值,代表搜索准确率和错误率.

## 4) Reading Speed(阅读效率)

在阅读任务中,视觉疲劳程度直接影响到用户阅读效率,Siegenthaler在对比电子显示屏和E-ink对阅读效率的影响时,认为每分钟阅读的单词量,即阅读速率是阅读效率的有效指标之一,此外还包括回读行数以及视觉焦点稳定时间所占比<sup>[13]</sup>.回读指的是用户在阅读过程中,对已阅读的文本进行重复浏览的行为.其中,阅读速率的公式如下:

$$V_r = W / T.$$

$V_r$ 代表了阅读速率, $W$ 和 $T$ 则表示了阅读材料的总词量和阅读完毕所用时间.

对于回读行数的判定,当产生回读状态时,在 $\Delta t$ 的时间段内,扫视速率以及视线起始点与终点的点距会大幅提升,并且视线终点的横坐标会小于起始点.即需要满足以下3点条件,便可判断产生了一条有效回读行.

$$\begin{aligned} P_1: V_s > \Delta v, \\ P_2: D(P_s, P_e) > \Delta d, \\ P_3: X_s > X_e. \end{aligned}$$

## 5) Numbers of Eye Blink(眨眼次数)

随着视觉疲劳度的增加,视觉不适的产生概率逐渐提升,其中干眼、视线模糊等症状都可能会导致眨眼频率的变化.考虑到视觉疲劳与视觉不适的相关性,本文采用了眨眼频率,即单位时间内的眨眼次数作为特征之一.

对于双眼闭合的判定,需要用到合法值<sup>[14]</sup>,合法值代表了眼动仪当前是否能够获取到眼球数据,即当某只眼睛闭上时和眼睛睁开时,其合法值是不同的,合法值的组合见表2.

**Table 2** Combination of validity data

左眼可获取	右眼可获取	双眼可获取	双眼未获取
(0,0)	(0,0)		
(2,2)	(2,2)	(0,0)	(4,4)
(1,3)	(3,1)		
(0,4)	(4,0)		

根据眨眼的行为特性,本文认为,当满足了(双眼睁开→闭合→睁开),即合法值组合切换顺序为(0,0)→(4,4)→(0,0)时,可判定为一次有效眨眼。

## 4 实验流程

### 4.1 实验配置&参与人员

在本次实验中,本文采用了 Tobii X230 眼动仪来记录眼动数据,使用的电脑配置为 Dell Precision M6800,屏幕分辨率为 1920×1080.本次实验共有 10 名测试者,其中 6 名男性,4 名女性,参与人员均为校内学生或研究人员,熟悉英文阅读,年龄区间为 20 岁~35 岁,其中 7 人佩戴近视眼镜,满足可用性专家所建议的 5~12 名测试用户的建议。

### 4.2 实验任务

#### 1) 实验准备阶段

参与测试的用户首先会有 10 分钟的时间熟悉实验环境,同时,实验人员向用户介绍眼动仪的原理以及实验的具体内容.考虑到一些测试用户短期内没有接触过英文阅读,在实验任务开始前,我们采取纸质阅读的方式,为其提供大约 5 分钟的英文阅读时间,帮助其熟悉阅读过程.完成以上工作后,测试者进行眼动仪校准,此次实验采用的是 5-Point 校准模式。

#### 2) 非疲劳状态眼动数据获取

每位用户需在非疲劳状态下于电子屏幕上阅读一段英文材料,同时系统记录下用户的眼动数据.这一阶段的数据将作为用户个人的标准非疲劳样本记录,每位用户仅需完成 1 次.此后的实验中,对于用户疲劳状态的判定,本文定义了如下约束:

(A) 非疲劳状态:测试者实验前 1 小时未使用过电子产品,眼睛未过度使用并且身体得到充分休息。

(B) 疲劳状态:测试者实验前已连续使用电子产品达到 3 小时,中途未休息.若眼睛出现酸胀、干涩、视力模糊等视觉不适症状则更佳。

#### 3) Searching Pattern

测试者坐于眼动仪前方约 60cm 处,同时展示第 1 份阅读材料.在此份材料中,用户需通过扫视来找出文章内的特殊字,在找到的同时按下空格键.其中,在预实验阶段,用户在进行特殊字搜索任务时,会通过多次回读来提升搜索的准确率,对实验结果造成了较大的影响.因此在正式实验过程中不允许用户进行重读、回读等操作,每行文本仅允许阅读 1 遍,时间限制为 3 分钟之内.在此模式下,测试者不需要理解阅读材料的内容,完成后即进入 Reading Pattern.

#### 4) Reading Pattern

系统向测试者展示第 2 份阅读材料,用户需充分理解材料内容,为保证这一点,实验过程中允许用户进行多次阅读材料,无时间限制,并且在完成此阶段任务后,随机抽取测试者进行阅读理解测试。

## 5 结果与分析

在本次实验中,对于每位测试者我们进行了多次非疲劳和疲劳状态的测试,获取到 72 份样本,其中,32 份为疲劳状态样本,40 份为非疲劳状态样本.样本基于以上数据,本文以 5:2 的比例,以随机方式划分出了训练样本集

与测试样本集,如图 3 所示.

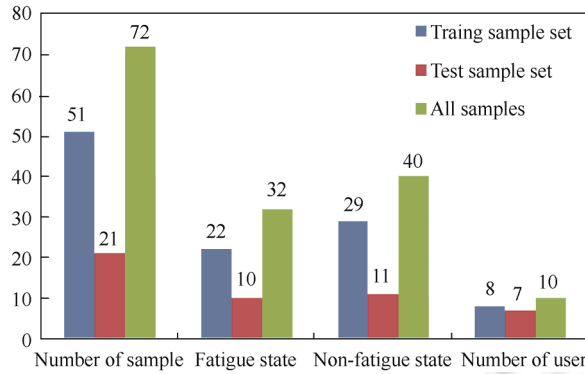


Fig.3 Distribution of sample

图 3 样本分布图

对于分类器的选择,本文采用的是 Weka 工具内的 BP 神经网络算法.BP 神经网络是 1986 年由 Rumelhart 和 McClelland 为首的科学家小组提出,是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络,也是目前应用最广泛的神经网络模型之一.一个神经网络的结构示意图如图 4 所示.

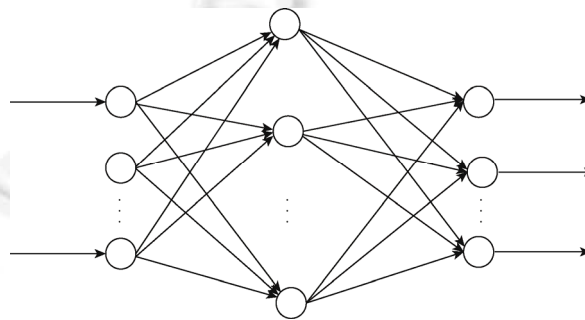


Fig.4 Schematic diagram of neural network

图 4 神经网络示意图

表 3 显示了本文的训练结果.其中,TP(true positive)表明了正样本被识别为正样本,FP(false positive)表示负样本被识别为正样本,Precision 表示对疲劳状态的分类精度.可以看出,用户疲劳状态判定的准确率达到 95.2%,在 21 个测试样本中,仅有 1 个疲劳样本被判断为非疲劳状态.经调查后发现,该样本的测试者此前曾阅读过实验中的阅读材料,因此阅读速率以及 AOI 个数、搜索准确率均出现较大的变化,最终导致结果被误判.

Table 3 Statistical classification of neural network

表 3 神经网络分类结果统计

	Relaxed	Fatigued	Average
TP rate	1	0.9	0.952
FP rate	0.1	0	0.052
Precision	0.917	1	0.956

在上述五大类特征中,瞳孔直径比、AOI 个数以及搜索结果准确率权重较高,而阅读效率以及眨眼频率相对低一些,造成这一情况的原因很可能与测试者的英语阅读能力以及行为习惯有关,不擅长进行英语阅读的测试者会通过多次重读、回读来增进对文章的理解,大幅度地增加了回读行数以及阅读总时间,最终导致与阅读能力较强的测试者之间的结果差异.另外,部分测试者在处于极度疲劳的状态下,会通过频繁眨眼来保持眼睛湿

润和辨识度,亦有一部分测试采用长时间注视某块文本区域来缓和视觉的疲劳感,两者之间的行为差异引起了眨眼频率结果的分歧。

图5显示了此次阅读理解测试结果,其中,非疲劳状态下答题的准确率为96%,疲劳状态为86.91%。由于实验中以阅读理解程度以及答题准确率作为工作效率的评判标准,因而避开了视觉疲劳与视觉不适差异而可能导致的结果误差。通过图5所显示的结果可以认为,在疲劳状态下,测试者的阅读理解能力及思考能力将有一定幅度的降低,本文的检测方法可同时用来对用户的疲劳状态和工作效率进行评估,从而为用户提出实时、有效的建议。

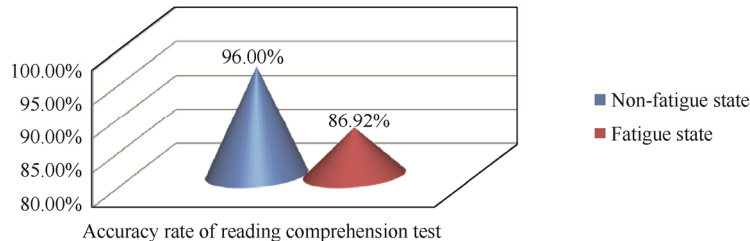


Fig.5 Result of reading comprehension test

图5 阅读理解测试结果

## 6 总结与展望

随着计算机研究领域的发展,多通道智能人机交互是目前最为热门的技术之一。眼动交互作为最自然、方便、直接的交互方式,利用眼动数据进行用户状态分析是一种简捷、有效的研究方式。本文以特殊字搜索,辅以阅读任务作为检测手段,基于用户的眼动数据对其疲劳状态进行判断。实验结果表明,用户在疲劳状态下,瞳孔直径会缩小,捕捉到的AOI个数也会降低。同时,对特殊字的敏感度也会下降,工作效率与视觉疲劳度呈负相关。在使用神经网络对实验结果进行分类后,其准确率达到了95.2%,表明本文的检测方法得到了良好的实验效果,并且由于方法的简便性、时效性以及对用户友好,可以将其应用于未来视觉疲劳的检测流程中。

但是,本文的方法依然存在不足,目前对于疲劳程度的判定仅仅局限于两种状态之间,没有考虑到其中的疲劳等级划分。同时,对于阅读效率和眨眼频率在视觉疲劳状态下的体现,本文并未得出较为有力的结论。后期工作中,我们可以尝试对不同程度的疲劳状态进行检测,而且对于视觉疲劳和眼动数据,仍需探索两者之间的定量关系。

## References:

- [1] Drewes H. Eye gaze tracking for human computer interaction. Ludwig-Maximilians-Universität München, 2010,13-16.
- [2] Tao Y. Developments in the study of eye movements in scene perception. Psychological Science, 2001,24(2):194-196 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1671-6981.2001.02.021]
- [3] Çağla Çiğ, Sezgin TM. Gaze-Based prediction of pen-based virtual interaction tasks. Int'l Journal of Human-Computer Studies, 2015,73:91-106. [doi: 10.1016/j.ijhcs.2014.09.005]
- [4] Singh H, Bhatia JS, Kaur J. Eye tracking based driver fatigue monitoring and warning system. 2011. 1-6. [doi: 10.1109/IICPE.2011.5728062]
- [5] Benedetto S, Draï-Zerbib V, Pedrotti M, Tissier G. E-Readers and visual fatigue. Plos One, 2013,8(12). [doi: 10.1371/journal.pone.0083676]
- [6] Di SL, Mccamy MB, Macknik SL, et al. Saccadic eye movement metrics reflect surgical residents' fatigue. Annals of Surgery, 2014,259(4):824-829. [doi: 10.1097/SLA.0000000000000260]
- [7] Lambooi M, Fortuin M, Heynderickx I, et al. Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: A review. Journal of Imaging Science & Technology, 2009,53(3):30201-1-30201-14(14). [doi: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2009.53.3.030201]

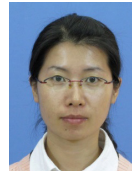
- [8] Portello JK, Rosenfield M, Bababekova Y, *et al.* Computer-Related visual symptoms in office workers. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 2012,32(5):375–82. [doi: 10.1111/j.1475-1313.2012.00925.x]
- [9] Lee DS, Ko YH, Shen IH, *et al.* Effect of light source, ambient illumination, character size and interline spacing on visual performance and visual fatigue with electronic paper displays. *Displays*, 2011,32(1):1–7. [doi: 10.1016/j.displa.2010.09.001]
- [10] Hoffman DM, Girshick AR, Akeley K, Banks MS. Vergence–Accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 2008,8(3):1–30.
- [11] Lu ZL, Bai XJ, Yan GL. Eye movement study on the interaction between word frequency and predictability in the recognition of chinese words. *Psychological Research*, 2008,1(4):29–33 (in Chinese with English abstract).
- [12] Lee DS, Shieh KK, Jeng SC, *et al.* Effect of character size and lighting on legibility of electronic papers. *Displays*, 2008,29(1): 10–17. [doi: 10.1016/j.displa.2007.06.007]
- [13] Siegenthaler E, Schmid L, Wyss M, *et al.* LCD vs. E-ink: An analysis of the reading behavior. *Journal of Eye Movement Research*, 2012,5(3). [doi: 10.7892/boris.82679]
- [14] TobiiTechnology. Tobii Analytics SDK Developer’s Guide 18. 2013.

#### 附中文参考文献:

- [2] 陶云.图画知觉过程的眼动研究进展.心理科学,2001,24(2):194–196. [doi: 10.3969/j.issn.1671-6981.2001.02.021]
- [11] 卢张龙,白学军,闫国利.汉语词汇识别中词频和可预测性交互作用的眼动研究.心理研究,2008,1(4):29–33



胡炜(1993—),男,安徽滁州人,学士,主要研究领域为人机交互,眼动交互.



冯桂焕(1980—),女,博士,讲师,CCF 专业会员,主要研究领域为人机交互,模式识别,笔交互.



赵小燕(1992—),女,学士,主要研究领域为人机交互眼动交互,草图识别.



骆斌(1967—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 杰出会员,主要研究领域为人工智能,多 agent 系统.



陈泉(1990—),男,助理工程师,主要研究领域为人机交互,草图识别.