

文章编号 1004-924X(2019)07-1661-12

基于 N-Range 的新型可穿戴疲劳监测眼镜

姚 康^{1,2}, 管凯捷^{1,2}, 张 熙^{3*}, 付威威^{1,2*}

- (1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230000;
2. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215000;
3. 中国人民解放军总医院 第二医学中心神经内科, 北京 100000)

摘要: 现行的疲劳监测设备造价昂贵, 便携性差且有效性不高, 正面疲劳监测方案极大地影响了使用者的工作效率, 因此进行实用且准确的疲劳监测方案研究十分有意义。提出了新型的侧眼眼动疲劳监测眼镜并结合 N-Range 图像处理算法提高眼部定位的鲁棒性与疲劳监测的准确率。在侧眼图像处理过程中, 用 $N \times N$ 的卷积核及 Sigmoid 函数计算激活图, 采用 OTSU 阈值分割法对激活图进行阈值分割, 将小于阈值的像素点激活值置于 0。据此计算水平方向与垂直方向的标准差投影, 从投影图中通过平均阈值法定位出人眼区域, 随后通过计算人眼高宽比表征眼部闭合度, 采用基于 PERCLOS 的 P80 疲劳评测方法为设备的使用者进行实时的疲劳分析。实验结果表明现行设备所存在的问题, 通过我们的方案得到了很好的解决, 即使在复杂的环境中, 本文的方法仍然表现出色, 疲劳判决准确度达到了 94%。疲劳监测眼镜与 N-Range 算法可以实现不影响使用者作业效率的前提下, 仍然保持着较高的疲劳监测精度, 具有较高的实用价值。

关键词: 疲劳监测; PERCLOS; N-Range; 眼部分割; 便携穿戴设备

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192707.1661

Wearable fatigue monitoring glasses based on N-Range

YAO Kang^{1,2}, GUAN Kai-jie^{1,2}, ZHANG Xi^{3*}, FU Wei-wei^{1,2*}

- (1. *University of Science and Technology of China, Hefei 230000, China;*
2. *Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,
Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215000, China;*
3. *Department of Neurology, Second Medical Center, General Hospital of the Chinese
People's Liberation Army, Beijing 100000, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zxi8866@yeah.net; fuww@sibet.ac.cn*

Abstract: Current fatigue monitoring equipment is expensive, non-portable, and its algorithm has a low robustness in eye movement image processing. Existing front-end camera fatigue monitoring schemes have many limitations and greatly affect their users efficiency; as such, the development of portable and accurate fatigue monitoring systems is very challenging. In this paper, a new type of fatigue monitoring glasses and N-Range image processing algorithm is proposed to improve the robustness of eye location analysis and accuracy of fatigue detection. Real-time fatigue analysis is performed

收稿日期: 2019-03-19; 修订日期: 2019-04-29.

基金项目: 国家军事脑科学计划资助项目 (No. AWS16J028); 江苏省重点研发计划 (社会发展) 资助项目 (No. BE2016684)

for users of the proposed mechanism according to the theory of percentage eye closure (PERCLOS) P80 fatigue assessment; it is considered that the P80 criterion is the most suitable for this study. In the process of side-eye image processing, an N-Range eye region extraction algorithm is proposed. The activation map is computed by an $N * N$ convolution kernel, and it is segmented by the OTSU threshold segmentation method. The activation value of pixels smaller than the threshold is set at zero. Based on this, the standard deviation projection in the horizontal and vertical directions is calculated; the human eye region is located by the average threshold method from the projection map. The eye closure degree is measured by calculating the ratio of eye height to eye width and then counting the closure time. Experiments show that the aforementioned problems can be adequately solved by our method. Even in complex environments, the method in this paper still performs well, with fatigue judgment accuracy reaching 94%. The fatigue-monitoring scheme proposed in this paper, can be positively adapted under many uncertainties. As such, our fatigue monitoring glasses and N-Range algorithm can achieve high accuracy without affecting the efficiency of workers.

Key words: fatigue monitoring; PERCLOS; N-range; eye partial excision; portable wearing equipment

1 引 言

疲劳是由于过度的体力或脑力劳动引起的一种生理现象^[1]。在医学上,疲劳被定义为人体困顿、倦怠的感觉,是需要休息和放松的信号。其主要表现为精力不集中,正常反应减慢和副交感神经增强等^[2]。疲劳表现出来的某些生理、心理和行为科学指标可以通过实验来测定。

为提高作业的安全性,疲劳监测方法主要有基于生理信号的方法^[3],如分析驾驶员脑电图的变化;基于行为表征的方法^[4],如基于驾驶员头部行为的疲劳监测方法^[5]以及基于眼动的疲劳监测方法^[6]。其中,基于眼动的方法不仅监测效率最高,而且成本最低,广泛应用于日常生活中。近年来,研究人员尝试利用较昂贵的双波长红外摄像头或近红外 CCD 摄像头放在人眼正面朝向处,并且设备需要固定合适的距离,从而定位出人眼位置^[7-8]并进行疲劳分析,一旦人体位置发生变化,设备也需要相应地移动以便保持人眼定位的准确性和监测的有效性。这一类设备虽然能够监测疲劳,但是使用极其不方便,移动性低且设备沉重,非但不能提高使用者的工作效率,反而会干扰其工作状态。

眼动疲劳监测方案主要分为眼动数据采集和疲劳评价两部分。目前,疲劳评价主要采用

PERCLOS 方法,该方法具有最好的可靠性、实用性与舒适性。最早研究 PERCLOS 的是美国弗吉尼亚大学的教授 Walt Wierwille^[9]。他通过大量的实验研究发现,眼睛闭合时间在事故发生之前比事故之后要长很多,眼睛闭合时间长短与疲劳程度有着紧密的关联,通常眼睛闭合时间越长,疲劳越严重。20 世纪 70 年代,Walt Wierwille 教授正式提出将 PERCLOS 方法作为疲劳评价的标准方法。之后关于 PERCLOS 的研究不断涌现,1999 年 4 月美国联邦公路管理局(Federal Highway Administration, FHWA)召集各个大学疲劳监测领域的专家,讨论了 PERCLOS 方法和其他疲劳测量方法的有效性,会议成员一致推崇把 PERCLOS 作为实时的、非接式的疲劳评价方法^[10]。中国民航大学的孙瑞山^[11]、汪磊^[12]等人也选取了 PERCLOS 方法评价管制员的疲劳状态,证明了该方法在管制员疲劳评价中的可行性。

在眼动数据采集环节中,现行的眼动疲劳监测设备均是从正面采集人脸,提取人眼特征^[13-17]从而获得眼动数据,并利用 PERCLOS 方法进行疲劳评价。李杏清等^[18]对全部人脸区域利用 Hough 变换圆检测来定位瞳孔区域,通过瞳孔露出的面积变化实现眼动数据的采集,并通过 PERCLOS 方法进行疲劳评价。这种方法较为简便,但是直接从人脸中定位出瞳孔,误差较大容易

受到鼻孔等结构的干扰,且眼部存在睫毛过长,眼睑遮盖及眨眼图像模糊等问题,导致 Hough 变换圆检测无法获得准确结果,从而采集到的眼动数据误差较大,会产生错误的疲劳判决。随后,黎明华等^[19]利用 Adaboost 算法和 Camshift 算法对人脸进行特征点定位,首先确定人眼区域,其次,在人眼区域中利用积分投影和 Hough 变换圆检测进行瞳孔定位,同样以瞳孔的面积变化作为眼动数据,通过 PERCLOS 法进行疲劳判决。这种方案能够在一定程度上减小误差,先定位出人眼区域,在人眼区域内部再进行瞳孔定位,能够缩小瞳孔的检测范围,提高定位准确度,但是 Adaboost 和 Camshift 方法速度较慢,无法满足疲劳检测的实时性要求,且仍然存在 Hough 变换圆检测的缺陷。杨秋芬等^[20]没有采用 Hough 变换圆检测而是从色彩空间的角度提出了一种新颖的瞳孔定位方法。该方法通过肤色聚类分割算法将人脸区域分割,对分割结果进行几何过滤,得到的人脸区域中的孔洞,计算质心点找到的瞳孔对;再根据瞳孔面积变化进行疲劳分析。肤色聚类方法相对于黎明华的方法而言,速度有一定提升且避免了 Hough 变换圆检测的缺陷,但是其鲁棒性较低,容易受到光照的影响,且皮肤斑和痔容易被误认为是瞳孔。近年来,一些学者在人眼状态判别中尝试开辟新的思路。Jian Fengxie 等^[21]采用主动外观模型(Active Appearance Model, AAM)来监测驾驶员的眼部开闭状态,通过对人脸形状特征和纹理特征进行统计分析,建立人脸混合模型,能够既快速又准确地进行人脸特征标定。这种通过样本训练人脸模型方法的最大局限性在于样本数量不够,当遇到图像模糊或与训练集样本偏差过大的个例时,无法准确监测人眼的开闭状态。Tapan Pradhan 等^[22]另辟蹊径,没有通过传统的图像处理方案对眼部特征进行分析,而是提出了一种基于主成分分析的监测方法。该方法将眼睛图像分为三个类别:完全睁开、部分睁开和完全闭眼。通过对图像提取主成分与奇异值分解,分别计算三个类别的概率,从而判别人眼状态。这种方法在眼部状态判别上有较高的准确度,这是因为它只简单地将人眼状态只分为三个类别,在提

升分类精度的同时丢失了人眼微动作信息;而根据 PERCLOS 的理论,人眼的微动作尤其能够反映出人体的疲劳状态,因此 Tapan Pradhan 等所提出的方案在疲劳判决方面的准确率较低。综上所述,目前的研究成果无论是在正面监测方式上还是在眼部定位算法上,均存在一定的不足,并且没有一种实用准确可靠的疲劳监测方案。

本文通过调研疲劳监测的研究进展,在软硬件层面上进行改进,提出了一种基于侧眼眼动的疲劳监测方案,结合 N-Range 眼部定位算法与 PERCLOS 方法,能够对疲劳进行有效监测,并且具有不干扰使用者工作效率,鲁棒性高、适用面广、处理速度快以及准确度高等优势。

2 疲劳监测眼镜设计

2.1 整体功能目标

市售的相关设备主要集中在正面疲劳监测方案上,如图 1(a)所示的固定式正面疲劳监测仪,图 1(b)所示的可穿戴正面疲劳监测仪。这种装置对于使用者的工作效率干扰较大,目前仍没有一项提升作业效率的疲劳监测方案。



(a) 固定式人体正面疲劳监测仪

(a) Fixed frontal fatigue monitor

(b) 可穿戴正面人体疲劳监测仪

(b) Wearable frontal human fatigue monitor

图 1 市场上现有的疲劳监测设备

Fig. 1 Existing fatigue monitoring equipment on the market

本项目设计了一种基于侧眼眼动的疲劳监测与干预眼镜,其功能如图 2 所示。对使用者进行连续监测,达到实时判定其疲劳状态的功能预期,并在设定条件下对清醒状态不足的人员,进行状态预警和物理刺激,达到提高使用者清醒程度的目的。

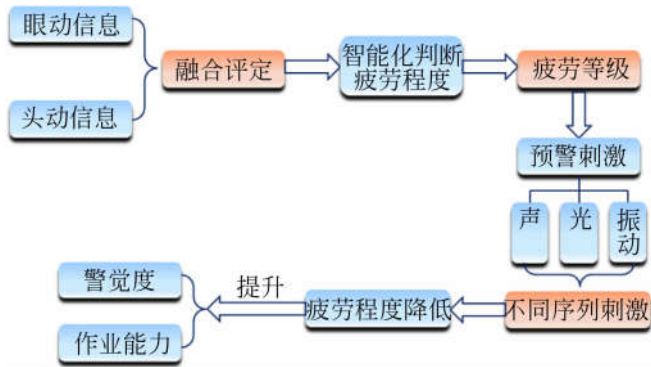


图 2 疲劳监测眼镜功能图

Fig. 2 Function diagram of fatigue monitoring glass

2.2 结构方案

眼镜整体结构方案如图 3 所示,图 3(a)展示了各模块所处的位置,图 3(b)是疲劳监测眼镜成品样机,采用常用的眼镜镜框,镜腿前段改造加装相应的图像采集模块与刺激模块。该方案与现有的眼镜模型相结合,达到了美观、佩戴舒适、功能齐全的整体效果。



(a) 模块图

(a) Module introduction



(b) 产品实物图

(b) Finished product

图 3 疲劳监测眼镜整体结构

Fig. 3 Structure of fatigue monitoring glass

2.3 图像采集模块

本方案中,用于侧眼图像采集的摄像头使用 HV-UR7E 微小型摄像头,帧率为 30 frame/s,分

辨率为 640×480 ,如图 4 所示。



图 4 摄像头外观

Fig. 4 Camera appearance

3 基于相机采集图像的眼部定位

3.1 相机采集图像

本系统中,用侧眼摄像头实时抓取设备使用者的侧面眼部图像,通过图像处理得到侧眼眼部区域的分割图像,并对所得的图像进行分析,确定设备使用者眼睛当前的闭合度,即眼部高宽比,进而通过 PERCLOS 法判别驾驶员的疲劳状态。

眼动疲劳监测的步骤主要包括采集图像、图像预处理、眼部区域定位、眼睛高宽比计算、PERCOLS 计算和疲劳程度识别。其中,图像预处理主要包括图像灰度化处理、抗噪处理等。它们主要是为了降低环境对图像的影响,提升图像的质量以便定位眼部。

本文提出的新型穿戴式设备采集到的侧眼图像如图 5 所示,在不同环境下,眼部检测难度也不同。可以看到,在明亮条件下图像质量高,边缘清晰易于处理,如图 5(a)所示;在暗光情况下,如图 5(b)所示,噪声过多,不易于人眼的完全分割;由于人在眨眼的过程中,速度较快,导致摄像头捕捉到的图像模糊,如图 5(c)所示,而眨眼中的微动作又是疲劳监测过程中非常重要的指标之一,衡量眨眼频率与幅度能够有效反映疲劳程度,因此充分捕捉眨眼动作是实现准确疲劳监测的重点。本文提出的 N-Range 算法着重解决复杂环境下的眼部定位,具有较好的抗噪声、抗旋转以及抗尺度变换能力,且针对眨眼模糊的图像仍能够准确定位出眼部区域,在上述 3 种复杂环境下,均取得了较好的眼部定位效果。

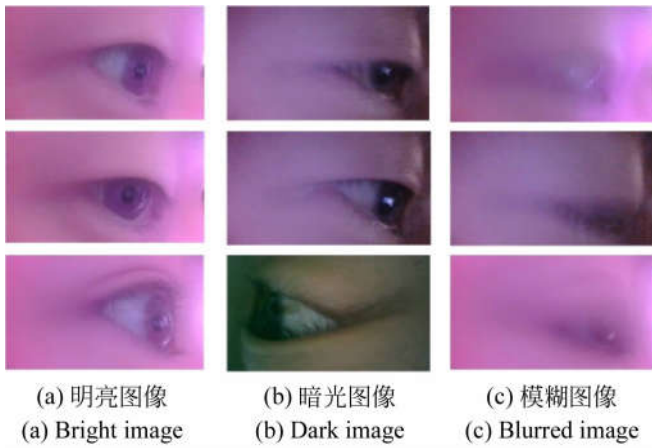


图 5 相机采集侧眼图展示

Fig. 5 Camera acquisition images of side eye

3.2 N-Range 算法设计

由于穿戴设备从侧面采集人眼,因此可以完全避免从人脸图像中再去提取人眼区域的步骤,避免了二段式累积误差,并且不再采用 Hough 变换检测瞳孔面积的思路,降低了错误率。

本研究借鉴深度学习中卷积神经网络的思想,对输入图像进行卷积,并使用 Sigmoid 函数进行激活将其值映射到 $[0,1]$ 中,根据产生的激活图的激活值特性,通过 OTSU^[23]分割法进行过滤并通过投影平均标准差进行眼部区域定位。通过分析相机采集到的图像,本文提出了 N-Range 算法,其详细步骤如下:

第一步:眼部区域在行列方向上均能产生较强的梯度变换,提出了一种新型的卷积核 K,计算行列方向上的绝对梯度和,从而提高眼部区域的捕捉能力。卷积核大小为 $N \times N (N = 2 \times i + 1, i = 1, 2, 3 \dots)$,卷积核为十字交叉型,中心权重为 0。上下两侧各为 +1 与 -1,左右两侧同理。通过大量实验得出, $N = 15$ 时,眼部定位效果最好,这是由眼睑特性决定的, N 值过小时,卷积操作就类似于边缘提取,抗噪声能力下降,容易提取过多的边缘导致定位不准确; N 值过大时,容易扩大定位区域,导致区域冗余。

对卷积后的图像进行 Sigmoid 激活,可以发现在眼部区域出现了高度激活的状态,尤其在眼睑处出现了更强的激活效应,这是由于眼睑处的梯度在行列两个方向都发生了巨大的变化。

第二步:对激活图进行阈值分割,采用 OTSU 法,按照激活特性将图像分成前景和背景两部分,背景和前景之间的类间方差越大,说明构成

0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0

图 6 卷积核结构示例

Fig. 6 Convolution Kernel structure example

图像两部分的差别就越大。通过类间方差最大的分割,来充分凸显出高度激活区域,而衰减非激活区域或遮蔽,即将非激活区域激活值置为 0。OTSU 激活阈值分割后,可视化效果如图 8 所示。

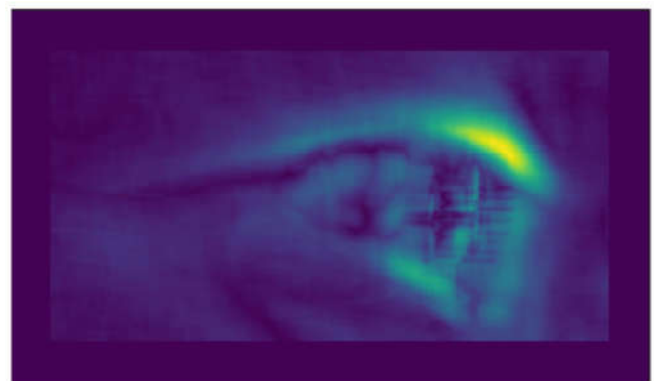


图 7 卷积激活图

Fig. 7 Convolutional activation image

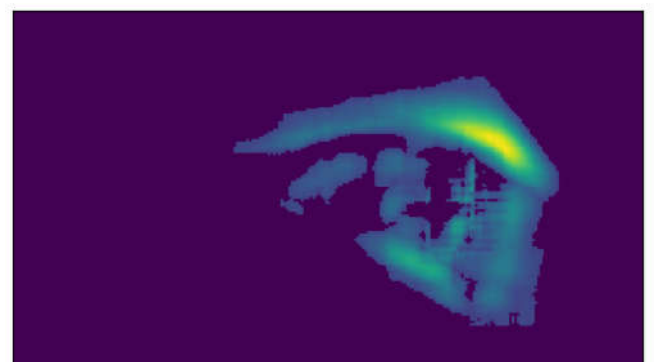


图 8 激活图 OTSU 分割效果

Fig. 8 OTSU segmentation effect of activation image

第三步:对激活图计算列方向标准差投影图,对标准差投影图计算平均值 CMSTD,并保留大于 CMSTD 的列的位置,具体计算公式如式(1)和式(2)所示,列方向投影图如图 9 所示。一共 N 列, n 表示每列的像素数, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 表示这组像素的具体激活值:

则每列的平均激活度为:

$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}. \quad (1)$$

每列的标准差公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}. \quad (2)$$

第四步:同理,对激活图计算行方向标准差投

影图,对标准差投影图计算平均值 RMSTD,并保留大于 RMSTD 的行的位置,如图 10 所示。

由上述步骤得到的行列坐标位置组成了眼部区域,对该区域用外接矩形框表示,如图 11 所示。从眼部区域提取结果来看,本算法具有平移旋转不变性以及尺度不变性,且鲁棒性高,抗噪声能力与抗光照不均衡能力均较强。在多种复杂环境下,如眼镜倒挂、暗光高噪、红蓝光照射、眼部微开与眼镜佩戴不规范等情况下均能实现准确的眼部区域定位。

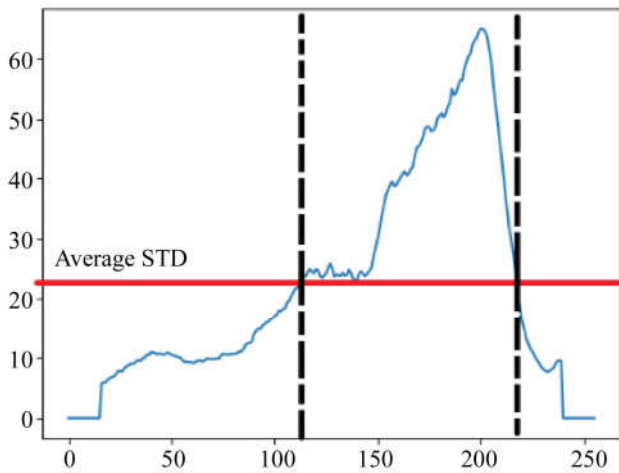


图 9 激活图列方向标准差积分投影

Fig. 9 Activation of standard deviation integral projection in column direction

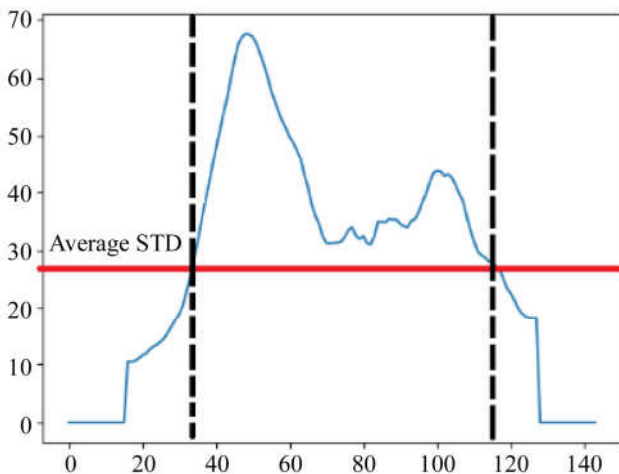


图 10 激活图行方向标准差积分投影

Fig. 10 Activation of standard deviation integral projection in row direction

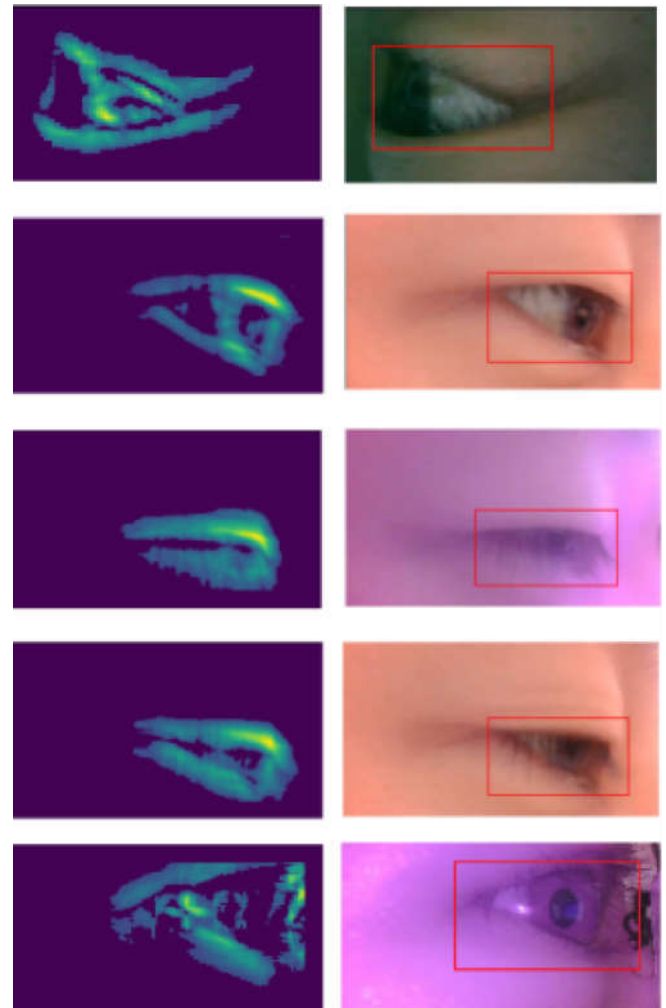


图 11 各种图像采集质量下眼部分割效果

Fig. 11 Eye segmentation with various image qualities

4 眼部闭合度计算

设备使用者在工作过程中头部时常会发生运动,传统的正面疲劳监测设备会因此无法准确捕捉人眼,需要移动设备位置使人眼入镜,使用及其不方便且精度低。而本穿戴设备则较好地克服了这一点,眼镜的形式让侧眼摄像头与眼睛相对静

止。采用眼睛的高宽比来表示眼睛的闭合度,即使在实时监测过程中,因为剧烈的头部运动会使得眼镜位移和眼睛的相对位置发生变化,但是眼部的高宽比例依然能够保持较稳定的数值,这是由人眼构造特征所决定的。定义上下眼睑的最大距离为眼高 H ,侧眼的眼宽为 W ,眼高与眼宽的比值为眼部高宽比 β ,即 $\beta = \frac{H}{W}$ 。当人眼闭合时,上下眼睑重合,眼部高宽比 β 为 0;反之,人眼完全睁开时眼部高宽比 β 最大,通常情况下 β 的取值位于 $[0, 1]$ 之间。综上所述,对使用者侧眼图像通过 N-Range 算法定位出眼部区域,根据包围眼部区域的外接矩形 4 个顶点的位置,计算出眼部的眼高 H 和眼宽 W ,得出侧眼高宽比 β ,作为眼睛的闭合度。

5 基于 PERCLOS 的疲劳评测

5.1 PERCLOS 疲劳监测原理

本文提出的侧眼眼动疲劳监测方案中,选择 PERCLOS 方法作为疲劳评价方法,PERCLOS 方法中有 P80 标准,即计算单位时间内眼睛闭合度超过 80% 以上的时间占总时间的百分比,也有 P70 标准和 EM 标准,EM 标准是根据眼睛闭合速度百分比的均方值来衡量疲劳状态的。常规摄像头帧率为 30 frame/s,因此使用 EM 标准难以捕捉到高速运动图像,计算闭合速度会产生较大误差;而 P70 是一种精度较低的评价方法,它降低了闭合度阈值的要求即闭合度超过 70% 以上

就认为是闭眼,这种方法由于误差较大现已经逐渐停用。P80 是 PERCLOS 方法中被广泛推行的一种高精度疲劳评价方案,在实验验证的基础上,本文选择 PERCLOS 中的 P80 评测体系,如图 12 所示。

根据式(3)计算疲劳程度(Fatigue Value, FV)值:

$$FV = \frac{t_3 - t_2}{t_4 - t_1} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:FV 为疲劳程度; t_1 为眼睛最大开度到 80% 所用的时间; t_2 为眼睛最大开度首次到 20% 所用的时间; t_3 为眼睛最大开度到下一次 20% 所用的时间; t_4 为眼睛最大开度到下一次睁开 80% 瞳孔所用的时间。当人从清醒状态逐渐进入疲劳状态时,由于困倦使得眼睛闭合的持续时间逐渐变长^[24]。因此,从清醒到疲劳的过程中,FV 值会不断变大。当人员发生瞌睡时,眼睛完全处于闭合状态,FV 值为 1。查阅大量文献后发现,关于疲劳状态判定的 FV 值并没有固定数值,其值应该根据采集方法与评估方法来设定。本文通过大量实验和论文调研,发现绝大多数的疲劳阈值 FV 都在 0.35~0.40 之间。据此,本文选择 0.37 作为判定疲劳状态的 FV 阈值。当 FV 值处于 $[0.37, 0.48]$ 时,判定人员为轻度疲劳状态;当 FV 值处于 $(0.48, 0.60]$ 时,判定人员为中度疲劳状态;当 FV 值处于 $(0.60, 1]$ 时,判定人员为重度疲劳状态。

6 实 验

6.1 实验平台

实验搭建基于 Android 平台的疲劳分析软件平台和疲劳监测眼镜的硬件平台。软件安装在 1 台 Android 8.0 的华为 P10 手机上。眼镜摄像头的采样帧率为 30 frame/s。实验平台搭建如图 13(a)所示,实验过程中 APP 界面呈现如图 13(b)所示。

6.2 受试人员

参与设备实验的人员共 115 名,包含 100 名高博软件职业技术学院的学生和老师与 15 名中国科学院苏州医工所的科研人员,年龄为 18~60

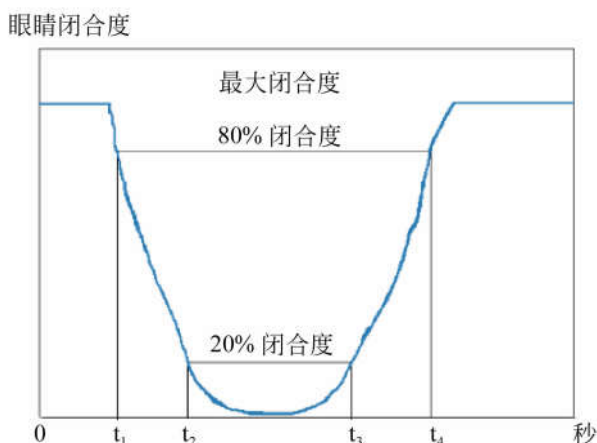


图 12 PERCLOS P80 示意图

Fig. 12 PERCLOS P80 schematic

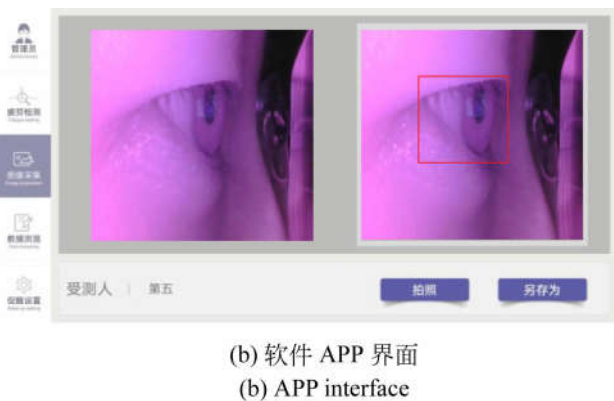
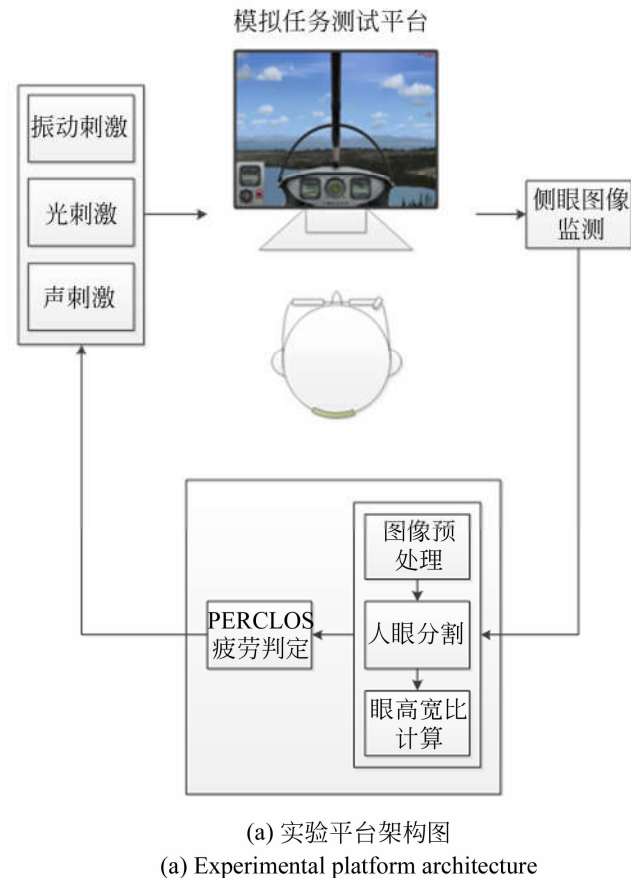


图 13 产品实验平台搭建

Fig. 13 Establishment of product experiment platform

岁,平均年龄 35 岁,视力正常,状况良好。全体受试人员均具有疲劳监测的知识基础,能够熟练使用疲劳监测软件与眼镜,实验前 24 h 内睡眠充足且无剧烈运动,没有食用功能型饮品。

6.3 实验程序

实验前先向受试者讲解实验程序,眼镜、软件的使用以及卡罗林斯卡嗜睡量表(Karolinska Sleepiness Scale, KSS)^[25]填写方法。该量表是评估工作期间疲劳程度的有效工具,采用 9 分制评估,1 分表示非常警觉,5 分表示觉醒和睡眠状态均衡,9 分表示非常疲劳,7 分为界值点。待被试者熟知后开始实验。

在实验中,被试者使用设备进行疲劳监测并保持正常工作状态。实验结束后,被试者根据主观感受对设备的干扰工作效率进行打分,分值为 1~10,分值越高,表示设备对工作效率的干扰越严重。具体实验程序如下:

(1) 受试者填写卡罗林斯卡嗜睡量表,主动报告自己的主观疲劳程度。

(2) 受试者佩戴眼镜,进行正常工作或自由活动。

(3) 受试者打开 Android 端疲劳监测软件,摄像头开始同步采集受试者侧眼图像进行分析处理。

(4) 实验结束后,受试者主动向工作人员反馈本疲劳监测方案对工作效率的干扰程度。

6.4 实验结果分析

由于篇幅有限,这里仅展示 10 名中科院医工所受试者与 5 名高博软件职业技术学院受试者的实验结果,因为它们年龄在分布广泛,能够表示本方案的有效性。总共测量 4 个阶段,每个阶段持续 10 min,在当前阶段随机选取 5 个采样点,每个采样点为 60 s 的眼动数据,频率为 30 frame/s,即统计每个采样点的 1 800 帧图像计算出的 FV 值,并计算 5 个随机采样点的平均 FV 值作为受试者的本阶段最终 FV 值。

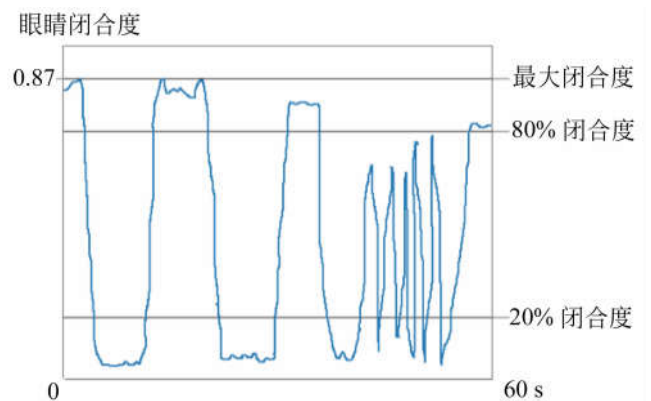


图 14 眼部高宽比变化曲线

Fig. 14 Eye aspect ratio curve

本文随机选取了受试者疲劳监测过程中的一个采样点的 60 s 数据进行 FV 计算,如图 14 所示。这个采样点下共有 1 353 帧图像的高宽比低于 80% 最大高宽比,有 447 帧图像的高宽比低于 20% 最大高宽比,故:

$$FV = \frac{447}{1353} = 0.33.$$

为了检验本文方法的有效性,在疲劳监测前,首先让 15 名受试者进行主观疲劳状态判断并记录下其实验过程中要发生的工作内容,结

果如表 1 所示。受试者的疲劳状态分布均匀且工作内容覆盖广泛,更有利于验证本方案的有效性。

表 1 受试者的主观疲劳程度
Tab.1 Subjective fatigue of subjects

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
年龄	19	18	18	19	20	30	33	35	43	24	25	26	22	36	46
主观疲劳度	清醒	清醒	轻度疲劳	清醒	中度疲劳	清醒	中度疲劳	轻度疲劳	轻度疲劳	清醒	清醒	重度疲劳	清醒	轻度疲劳	清醒
工作内容	阅读	游戏	阅读	观影	编程	写作	阅读	阅读	阅读	编程	交谈	观影	走动	驾驶	餐饮

表 2 新型疲劳监测眼镜监测结果
Tab.2 Results of fatigue monitoring glasses

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.33	0.17	0.25	0.22	0.48	0.16	0.42	0.33	0.44	0.22	0.17	0.52	0.33	0.44	0.27
2	0.38	0.14	0.42	0.22	0.44	0.24	0.55	0.42	0.36	0.19	0.28	0.68	0.30	0.36	0.19
3	0.36	0.22	0.46	0.21	0.57	0.18	0.67	0.37	0.39	0.24	0.27	0.57	0.35	0.42	0.22
4	0.44	0.21	0.39	0.14	0.61	0.19	0.55	0.38	0.42	0.30	0.11	0.66	0.27	0.50	0.19
平均 FV	0.38	0.18	0.38	0.20	0.53	0.20	0.55	0.38	0.40	0.24	0.21	0.61	0.31	0.43	0.22
判别结果	轻度疲劳	清醒	轻度疲劳	清醒	中度疲劳	清醒	中度疲劳	轻度疲劳	轻度疲劳	清醒	清醒	重度疲劳	清醒	轻度疲劳	清醒
干扰程度	1	1	3	2	1	2	3	1	3	2	4	2	1	2	1

实验期间受试者正常活动,包括运动、交谈、实验与阅读,从表 2 中可以看出 2~15 号人员的疲劳监测结果与主观疲劳程度相符。但由于实验时间较长,且 1 号受试者身患感冒,服用了复方制剂的感冒药,内含有扑尔敏导致他在实验过程中出现困顿现象,故疲劳检测的判别结果为轻度疲劳,与其主观疲劳程度不相符。据所有受试者反馈,本疲劳监测方案不影响工作效率,眼镜佩戴舒适,实现全程无感监测。实验结果表明,在 15 名受试者中仅有 1 名受试者(1 号)判断错误,在本次实验统计中,疲劳判定准确率达到了 94%,且在使用过程中本研究所提出的新型疲劳监测方案对工作效率的平均干扰程度仅为 1.93,这表明本方案在软硬件设计上均有一定的优势,充分考量了使用者的需求,不影响使用者的正常工作效率。实验验证了本文提出的疲劳监测方案具有较高的

可行性与准确性。

表 3 与现行算法对比
Tab.3 Comparisons with popular algorithms

算法	时间	准确率	实时性	监测方案
Maya Arlini Puspasari ^[26]	2018	80%	非实时	正面监测眼动+PERCLOS
Tang Jie ^[27]	2018	84%	实时	
Anthony D. McDonald ^[28]	2018	89%	实时	
Anirban Dasgupta ^[29]	2015	91%	非实时	
R. Cheng ^[30]	2012	91%	非实时	
Our Method	2019	94%	实时	侧面监测眼动+PERCLOS

表 3 为近年来眼动疲劳监测领域中的优秀研究成果。与本文方案对比,可以看出,近 10 年疲劳监测方案还停留在正面监测,这种方案对应用场景有着较大的限制,因此市场上现行的疲劳监测设备主要用于汽车驾驶场景中。因为驾驶员座位固定且与摄像头保持相对静止,车内环境固定且简单,符合正面监测方案的条件,算法设计难度相对低,但是这些方案的有效性仍然较低,这是因为它难以同时保证高准确率与高实时性。2018 年前,疲劳监测算法的准确率可以达到 90%,但难以实现实时性。2018 年后,Anthony D. McDonald 提出了一种基于上下文的疲劳监测算法,其准确率达到 89%且能够实时监测,具有一定的实用价值。本研究立足于眼动疲劳监测的根本理论,通过软硬件创新,首次提出了侧眼眼动疲劳监测眼镜方案,在准确率与实时性上均达到了当前最优水平,对疲劳监测的应用环境也进行了扩充,

可以适用于常规作业中,并且不会干扰工作效率,填补了侧眼眼动疲劳监测领域的空白,具有较高的实用价值。

7 结 论

本文提出了一种新型的基于侧眼眼动的疲劳监测方案,将疲劳监测摄像头放在人眼侧面,在不影响使用者作业效能的前提下,准确实时监测其疲劳状态,准确率达到 94%。大量实验表明,新型疲劳监测眼镜基于 N-Range 侧眼图像处理算法及 PERCLOS 方法,可准确监测使用者工作中的疲劳状态,大大减少工作中由于疲劳所导致的安全隐患以及工作效率低下等问题,并且本设备的移动性高,适用于各种日常活动中。下一步研究的重点是增加疲劳监测指标的多样性与渐进式疲劳干预算法的设计。

参考文献:

- [1] TANAKA M, TAJIMA S, MIZUNO K, *et al.*. Frontier studies on fatigue, autonomic nerve dysfunction, and sleep-rhythm disorder[J]. *The Journal of Physiological Sciences*, 2015, 65(6): 483-498.
- [2] DOGHARAMJI K. *The Pharmacological Management of Fatigue and Sleepiness in Affective Disorders* [M]//Sleep and Sleep Disorders. Boston, MA: Springer US, 2006: 183-187.
- [3] REINGOLD E M. Eye tracking research and technology: Towards objective measurement of data quality[J]. *Visual Cognition*, 2014, 22(3/4): 635-652.
- [4] 屈肖蕾. 基于转向操作和车辆状态的疲劳驾驶检测方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
QU X L. *Detection of Driver Drowsiness Based on Steering Operation and Vehicle State* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [5] 邓正宏, 黄一杰, 李翔, 等. 基于视频的驾驶疲劳检测技术的研究[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(6): 1001-1006.
DENG ZH H, HUANG Y J, LI X, *et al.*. Researching driver fatigue detection using video technology[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2015, 33(6): 1001-1006. (in Chinese)
- [6] 徐欢, 高雁凤, 郑恩辉, 等. 一种用于驾驶员疲劳检测的人眼检测方法[J]. 计算机工程, 2013, 39(9): 254-257, 276.
XU H, GAO Y F, ZHENG E H, *et al.*. An eye detection method for driver fatigue detection[J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(9): 254-257, 276. (in Chinese)
- [7] 王福旺, 王宏. 长途客车驾驶员疲劳状态脑电特征分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1146-1152.
WANG F W, WANG H. EEG characteristic analysis of coach bus drivers in fatigue state[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(5): 1146-1152. (in Chinese)
- [8] 吴文娴. 基于被动视觉的机车驾驶疲劳实时检测系统的研究[J]. 铁路计算机应用, 2011, 20(2): 5-9.
WU W X. Research on real-time detection system of locomotive drivers' fatigue based on passive vision [J]. *Railway Computer Application*, 2011, 20(2): 5-9. (in Chinese)
- [9] WIERWILLE W W, ELLSWORTH L A. Evaluation of driver drowsiness by trained raters[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 1994, 26(5): 571-581.
- [10] 孙瑞山, 陈农田. 眼动分析技术及其在航空领域的应用进展[J]. 中国民航大学学报, 2009, 27(4): 1-4, 10.
SUN R SH, CHEN N T. Progress of eye analysis

- techniques and its application in aviation[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2009, 27(4): 1-4, 10. (in Chinese)
- [11] 汪磊, 孙瑞山. 空中交通管制员疲劳状态实时监测方法的实现[J]. *安全与环境工程*, 2013, 20(4): 87-91.
WANG L, SUN R SH. Implementation of real-time monitoring method for the fatigue of air traffic controllers[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2013, 20(4): 87-91. (in Chinese)
- [12] BOWMAN D S, SCHAUDT W A, HANOWSKI R J. *Advances in Drowsy Driver Assistance Systems Through Data Fusion*[M]//Handbook of Intelligent Vehicles. London: Springer London, 2012: 895-912.
- [13] NGUYEN H T, ISAACOWITZ D M, RUBIN P A D. Age- and fatigue-related markers of human faces: an eye-tracking study[J]. *Ophthalmology*, 2009, 116(2): 355-360.
- [14] KURYLYAK Y, LAMONACA F, MIRABELLI G. Detection of the eye blinks for human's fatigue monitoring[C]//2012 *IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications Proceedings*, May 18-19, 2012. Budapest, Hungary. New York, USA: IEEE, 2012.
- [15] ZENG S H, LI J L, JIANG L, et al.. A driving assistant safety method based on human eye fatigue detection[C]//2017 *29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, May 28-30, 2017. Chongqing, China. New York, USA: IEEE, 2017.
- [16] WANG J, LIU Q, ZHAO H. Based on the human eye fatigue detection system of recognition and FPGAs technology[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 672/673/674: 1995-1998.
- [17] 千承辉, 王政, 左濂锐, 等. 基于人眼识别的防疲劳驾驶系统设计与研究[J]. *吉林大学学报: 信息科学版*, 2016, 34(4): 522-527.
QIAN CH H, WANG ZH, ZUO L R, et al... Design and research of anti-fatigue driving system based on human eye recognition[J]. *Journal of Jilin University: Information Science Edition*, 2016, 34(4): 522-527. (in Chinese)
- [18] 李杏清, 王志兵. 一种基于人眼状态的疲劳驾驶检测系统研究[J]. *信息与电脑(理论版)*, 2017(23): 73-75.
LI X Q, WANG ZH B. Study of fatigue driving detection system based on human eye[J]. *China Computer & Communication*, 2017(23): 73-75. (in Chinese)
- [19] 黎明华, 罗李焱, 陈雅琳. 驾驶员疲劳状态的检测[J]. *技术与市场*, 2010, 17(8): 17-19.
LI M H, LUO L Y, CHEN Y L. Detection of driver fatigue [J]. *Technology and Market*, 2010, 17(8): 17-19. (in Chinese)
- [20] 杨秋芬, 桂卫华, 周书仁. 疲劳驾驶面部表情识别算法[J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(10): 3039-3041.
YANG Q F, GUI W H, ZHOU SH R. Facial expression recognition algorithm for fatigue driving [J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(10): 3039-3041. (in Chinese)
- [21] XIE J F, XIE M, ZHU W. Driver fatigue detection based on head gesture and PERCLOS[C]//2012 *International Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICWAMTIP)*, December 17-19, 2012. Chengdu, China. New York, USA: IEEE, 2012.
- [22] DHAR S, PRADHAN T, GUPTA S, et al.. Implementation of real time visual attention monitoring algorithm of human drivers on an embedded platform[C]//2010 *IEEE Students Technology Symposium (TechSym)*, April 3-4, 2010. Kharagpur, India. New York, USA: IEEE, 2010.
- [23] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [24] MATHEWS E. Language proficiency requirements of the international civil aviation organization[C]//*International Professional Communication Conference, IPCC 2004. Proceedings.*, Minneapolis, MN, USA. New York, USA: IEEE, 2004.
- [25] 万玉丽, 谢金法. 一种基于 PERCLOS 驾驶员疲劳检测方法的实现算法[J]. *农业装备技术*, 2009, 35(2): 25-28.
WAN Y L, XIE J F. One algorithm of driver fatigue detecting based on PERCLOS[J]. *Agricultural Equipment & Technology*, 2009, 35(2): 25-28. (in Chinese)
- [26] PUSPASARI M A, IRIDIASTADI H, SUTALAKSANA I Z, et al.. Fatigue classification of ocular indicators using support vector machine

- [C]//2018 *International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICI-IBMS)*, October 21-24, 2018. Bangkok, New York, USA: IEEE, 2018.
- [27] 唐杰, 陈仁文, 余小庆. 基于卷积神经网络的车载疲劳驾驶检测系统的实现[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(1): 116-121.
TANG J, CHEN R W, YU X Q. Implement of vehicle fatigue driving detection system based on convolutional neural network[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2018, 37(1): 116-121. (in Chinese)
- [28] MCDONALD A D, LEE J D, SCHWARZ C, *et al.*. A contextual and temporal algorithm for driver drowsiness detection[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 113: 25-37.
- [29] DASGUPTA A, ROUSTRAY A. Fast computation of PERCLOS and saccadic ratio[J]. *Computer Science*, 2015.
- [30] CHENG R, ZHAO Y, DAI Y, *et al.*. An on-board embedded driver fatigue warning system based on adaboost method[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(5):719-726.

作者简介:



姚康(1994—),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,2017年于中国药科大学获得学士学位,主要从事机器视觉和深度学习方面的研究。E-mail: xkk9866@yeah.net

导师简介:



付威威(1985—),男,吉林长春人,研究员,硕士生导师,医学影像室副主任、青促会会员、苏州高新区领军人才,主要从事医学图像处理方面的研发。E-mail: fuww@sibet.ac.cn

通讯作者:



张熙(1931—),男,北京人,博士,教授,博士生导师,主任医师,中国睡眠研究会副理事长,睡眠障碍专业委员会副主任委员,主要从事神经系统疾病的诊疗,睡眠障碍及睡眠相关病患的临床诊疗。E-mail: zxi8866@yeah.net

(本栏目编辑:秦 思)