

基于人眼状态信息的非接触式疲劳驾驶监测与预警系统

李建平 牛燕雄 杨露 张颖 吕建明

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 疲劳驾驶预警系统对保障驾驶员的安全驾驶具有十分重要的作用。以驾驶员人眼图像信息处理为基础,建立了离散单位时间内非正常状态时间所占百分比疲劳判断模型,实现了对驾驶员疲劳状态的监控与预警。通过近红外光源对人眼主动照明,采用互补金属氧化物半导体摄像头实现对人眼图像信息的采集,基于Adaboost算法实现人眼准确定位,利用Harris强角点检测人眼中心区域,得到眼睛的视线状态信息,根据疲劳判断模型,设计可调的预警阈值,实现驾驶员疲劳状态的分级预警。实验结果表明:在一定条件下,系统判断响应时间为1.5 s,虚警率为4%,具有抗干扰性强和实时性好等特点。

关键词 成像系统;人眼检测;角点检测;疲劳判断模型

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.041101

Contactless Driver Fatigue Detection and Warning System Based on Eye State Information

Li Jianping Niu Yanxiong Yang Lu Zhang Ying Lü Jianming

Department of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The fatigue warning system is very important to guarantee driver's safe driving. The discrete fatigue estimate model of percentage of eyelid closure over the pupil time bases on image process of eyes is established, and the driver fatigue status monitoring and warning are realized. Eye images acquisition is realized by complementary metal-oxide-semiconductor camera with near-infrared lamps shine. Adaboost algorithm is applied to locate the eyes, and Harris corner detection is used to obtain the information about sight of eyes. Grade warning level is designed by the adjustable warning threshold based on the fatigue estimate model. The experimental results show that the system can provide under 1.5 s reaction time, 4% false alarm rate, and possess good real-time and anti-jamming characteristic under certain conditions.

Key words imaging systems; eye detection; corner detection; fatigue estimate model

OCIS codes 100.3008; 110.2970; 120.1880

1 引言

随着我国汽车数量的持续增加,交通安全形势变得日益严峻。驾驶员疲劳驾驶已成为引发交通事故的主要原因之一,有统计数据表明^[1],驾驶员疲劳造成的事故约占交通事故总数的7%,占特大交通事故总数的40%,因此疲劳监测预警相关技术方法的研究对保障司机安全驾驶有着重大意义。

目前,驾驶员疲劳状态监测方法主要分为基于驾驶员生理信息^[2-3]、基于驾驶员行为特征^[4-5]以及基于车辆状态的检测方法^[6]。其中,基于驾驶员行为特征的方法是通过检测眨眼频率与凝视方向、头部运动等特征,利用机器视觉等技术实现疲劳状态判定^[7-8],对此国内外有诸多研究。Wu等^[9]利用模板匹配方法对人眼状态进行分类检测,由此得到驾驶员疲劳信息。Dong等^[10]利用主动表观模型(AAM)算法对人眼轮廓进行定位,用单位

收稿日期: 2014-09-04; 收到修改稿日期: 2014-11-09; 网络出版日期: 2015-03-25

作者简介: 李建平(1989—),男,硕士研究生,主要从事光电信息检测及处理方面的研究。

E-mail: ljpljp12345@gmail.com

导师简介: 牛燕雄(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事光电信息处理及仪器设计方面的研究。

E-mail: niuyx@buaa.edu.cn(通信联系人)

时间内非正常状态时间所占百分比(PERCLOS)准则^[11]进行疲劳判断。程如中等^[1]通过 Adaboost 分类器检测人脸和人眼,并采用二次曲线拟合眼睑判断人眼睁开程度,测算 PERCLOS 值判断驾驶员疲劳状态。

本文通过近红外光源对人眼主动照明,采用互补金属氧化物半导体(CMOS)摄像头采集人眼图像信息,接着进行人眼定位,提出了 Harris 强角点检测人眼瞳孔反射点方法,可快速准确的对人眼视线状态进行判别。依据离散的 PERCLOS 疲劳判断模型,对疲劳状态进行监控与告警。并基于 LabVIEW 软件对系统参数进行调试,并对系统的抗干扰性和实时性进行测试。

2 系统结构与原理

驾驶员疲劳监测预警系统可分为三个模块:图像采集模块,图像处理模块,疲劳预警模块。总体框架如图 1 所示。

图像采集模块采由近红外光源和摄像头组成,以获取驾驶员脸部的实时图像。为保证人眼图像具有足够分辨率,系统初步只针对近距离范围的探测,距离设定在 40 cm 以内,满足一般汽车驾驶环境空间限制。由于近红外光属于人眼不可见光波段,对驾驶员的正常驾驶不会产生干扰,采用近红外发光二极管(LED)光源阵列对人眼进行主动照明,使系统不依赖自然环境光照实现全天候工作。人眼的反射光通过 900 nm 单光滤光片,消除了其他波段的杂散光的影响,提高了近红外光图像质量。采集图像用的摄像头分辨率为 30 万像素,帧率为 30 frame/s,可满足系统的实时性需求,再通过视频解码传输技术,将获取的近红外人眼图像传输至图像处理模块。

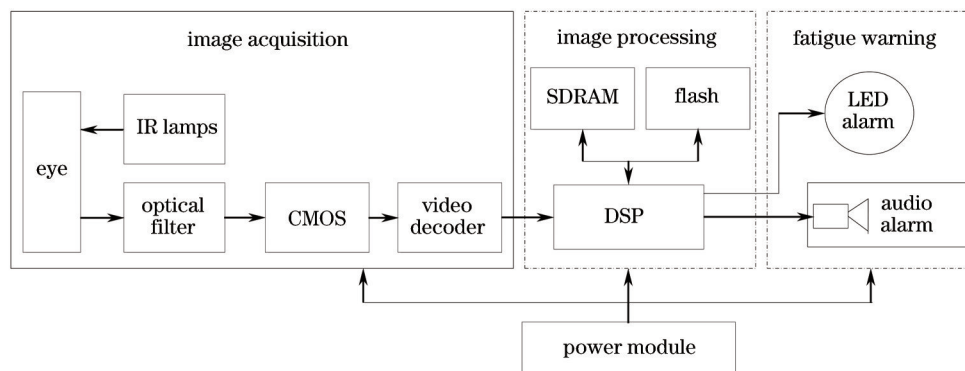


图1 系统总体框架

Fig.1 General framework of the system

图像处理模块采用数字信号处理器(DSP)与同步动态随机存储器(SDRAM)、Flash 存储单元的典型架构,进行图像预处理、人眼定位及人眼状态判定。若检测到人眼视线朝向正前方,则表明当前帧的驾驶状态正常;反之,当前帧视为非正常状态处理。根据单位时间内的检测结果进行离散 PERCLOS 计算,超过设定阈值则报警。预警信息通过音频口和通用输入输出(GPIO)接口,传输到疲劳预警模块。

疲劳报警模块采用 LED 灯闪烁报警及音频报警,可根据驾驶员的疲劳程度实现分级预警。设计了三级预警,当达到一级预警时,LED 指示灯变黄色并闪烁,警报声持续时间 1 s;当达到二级预警时,LED 指示灯变橙色并闪烁,警报声持续时间 1.5 s;当达到三级预警时,LED 指示灯变红色并闪烁,警报声持续时间 2 s。不断重复上述流程,从而实现系统的疲劳监测与实时预警。

3 图像处理算法设计

3.1 人眼检测定位

基于 Viola 等^[12]提出的 Adaboost 算法,使用人眼分类器对图像进行检测定位。训练分类器需要大量正负样本,因此本文自建了一个近红外人眼样本库,一部分来自 15 个人的 3500 张各姿态的近红外人眼图片。一部分通过 3Dmax 软件构建近红外人眼模型,利用三维观察球的方式从各姿态方位拍照,获得 1300 张近红外人眼图片,正样本共计 4800 张,基本满足分类器的样本要求。负样本通过网络爬虫对各大网站进行图片搜索,经人工筛选得到不含人眼的图片 5000 张,得到正负样本库。训练得到的人眼分类器的层数为 10 层,

每级最小检测率是 0.99, 每级最大的误检率是 0.3, 理论最小检测率为 0.9, 理论最大误检率为 5.9×10^{-6} 。

传统的 Adaboost 分类器进行目标检测^[13], 采用与训练用的正样本尺寸同样大小的窗口遍历整幅图像, 以后逐步放大窗口, 再做遍历搜索目标。只有当匹配相似度超过阈值, 该位置被记录下来作为目标候选区域。最后当检测窗口超过图像尺寸, 则停止检测, 将检测结果进行合并融合后, 得到最终检测结果。但是, 当人眼闭合的时候, 眉毛的形态与闭眼形态相似, 分类器容易判别出错。本文提出对检测算法进行优化, 流程图如图 2 所示。

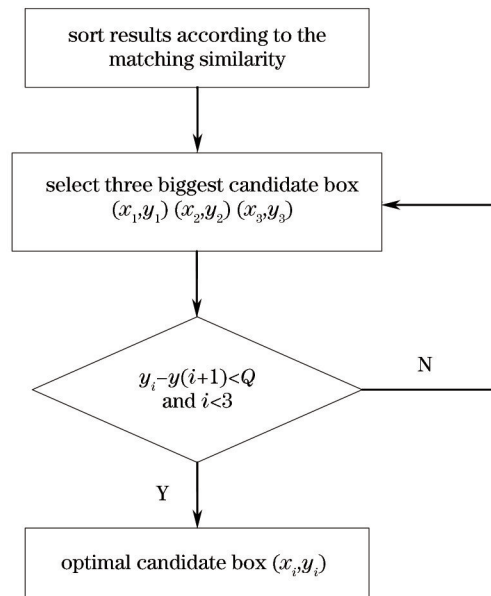


图2 优化后的算法流程图

Fig.2 Flow chart of optimized algorithm

由于眉毛在眼睛上方, 根据该几何特征设计图 2 的优化过程。将人眼相似度按大小进行排列, 选取前三个相似度最大的结果, 然后将相似度最大的候选框中心点的纵轴值与次大候选框的作差, 如果结果小于阈值 Q (Q 由三个候选框的纵轴值两两做差的最小值决定), 则表示该候选框为最优候选框; 反之, 则重复上述过程, 得到相似度尽可能大, 几何位置偏下的候选框作为最优检测候选框, 即人眼候选框。算法检测效果如图 3 所示, 有效排除了眉毛的干扰。

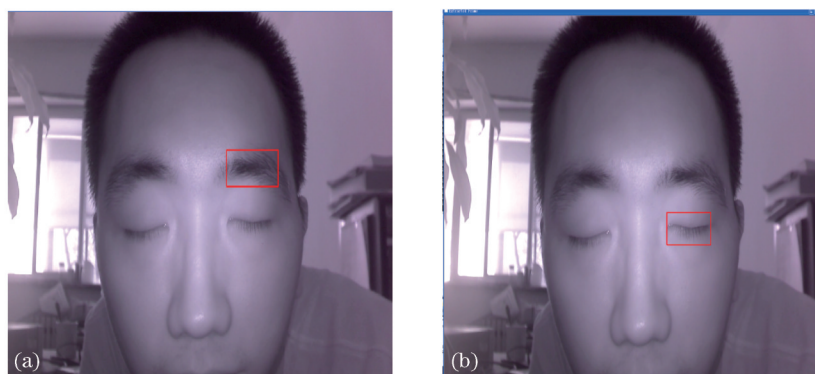


图3 检测效果图。(a) 算法优化前的误检; (b) 算法优化后的正确检测

Fig.3 Picture of detection effect. (a) False detection before optimizing; (b) right detection after optimizing

3.2 人眼状态分析

由于瞳孔和虹膜对近红外光的反射率不同, 造成人眼的瞳孔和虹膜有很清晰的边缘, 且采用近红外光主动照射, 瞳孔中心附近处都会有强反射点, 加上瞳孔的黑色背景, 该强反射点为强度值很大的角点。当闭眼时, 或者睁眼程度很小时, 瞳孔没有露出, 角点强度较弱, 可通过角点强度大小判断人眼是否睁开。由于该反射点存在的位置一般在瞳孔中心附近, 通过强角点的几何位置即可判断人眼视线方向, 并有效排除其他因素的干扰。

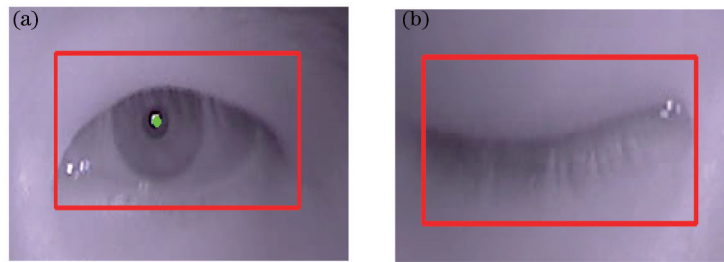


图4 (a) 检测到强角点,判断为正常状态;(b) 检测不到强角点,判断为非正常状态

Fig.4 (a) If strong corner is detected, normal state is judged; (b) if strong corner isn't detected, abnormal state is judged

在由分类器定位得到的人眼区域内进行Harris角点检测,在人眼区域中心附近范围 $\frac{1}{3}W$ 、 $\frac{1}{3}H$ (W 为人眼区域的宽度, H 为人眼区域的宽度)处若检测到角点,且角点强度值大于设定阈值,即可判断当前人眼处于睁眼前视状态,即为正常状态,如图4(a)所示,其中绿色亮点即为强角点。反之,其他状态判别为非正常状态,如图4(b)所示。

3.3 疲劳判断模型

PERCLOS是指单位时间内眼睛闭合时间所占的比例,经研究对比,PERCLOS的P80准则与驾驶疲劳程度的相关性最好,测量原理如图5所示。

$$f = \frac{t_3 - t_2}{t_4 - t_1} \quad (1)$$

当 $f > 0.8$ 时,即认为驾驶员处于疲劳状态。但由于在实际系统中,人眼睁开程度很难得到连续量,图6为系统的离散化PERCLOS疲劳判断模型,离散化的PERCLOS准则计算公式为

$$f = \frac{\sum P_i}{N}, \quad P_i = \begin{cases} 0, & \text{normal_eye} \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中 N 为单位时间内的总帧数, P_i 为第 i 帧时刻的人眼状态,当人眼处于睁开前视状态, $P_i = 0$;反之, $P_i = 1$ 。如果 f 设定的阈值,则判断驾驶员为非正常状态,并予以报警。

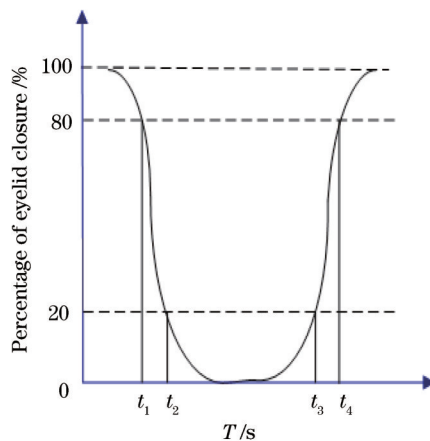


图5 PERCLOS准则原理图

Fig.5 Schematic diagram of PERCLOS criterion

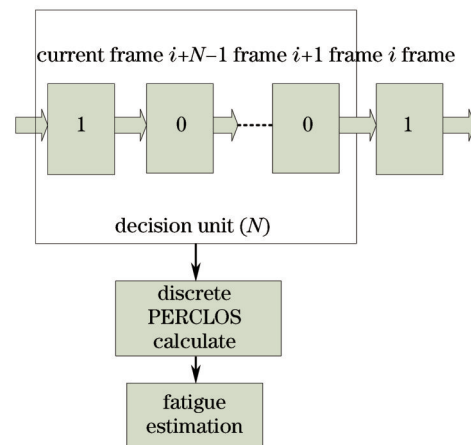


图6 离散化PERCLOS疲劳判断模型

Fig.6 Discrete PERCLOS model of fatigue estimation

4 实验结果与分析

4.1 仿真系统的检测性能实验分析

采用LabVIEW进行系统参数调试和性能检测,模拟驾驶环境下,共拍摄疲劳状态视频315帧,对人脸姿态无要求,并设置PERCLOS判断单元帧数 $N=25$,摄像头帧率为30 frame/s,像素采用30万像素,效果如图7所示。将疲劳状态下的人眼状态监控数据从LabVIEW直接导出,实验结果如下图8所示,与实际值进行对比,315帧视频中有9帧是判断错误的。其中,有5帧误判是因为在人眼区域没有识别出强角点;另有4帧错

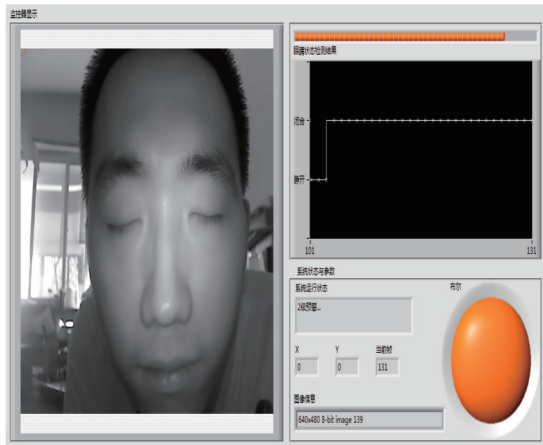


图7 LabVIEW效果示意图

Fig.7 Picture of LabVIEW effect

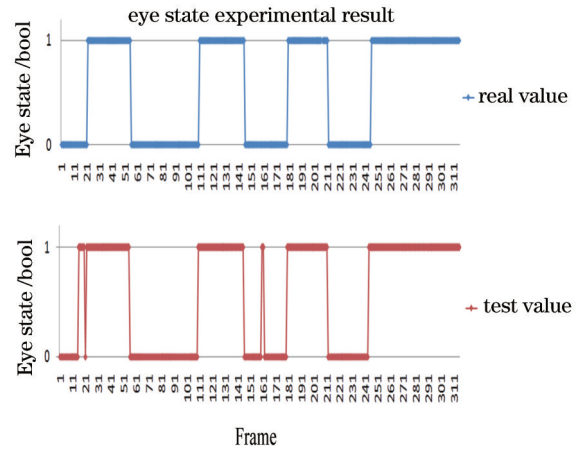


图8 人眼状态监测结果

Fig.8 Experimental result of eye state

检来自人眼检测错误,误识别为眉毛。但总体来讲,人眼状态检测准确率达97.1%。

传统的人眼疲劳检测算法采用Adaboost算法结合投影法^[14]进行人眼非正常状态判定,将本文算法与传统算法从算法实时性和检测性能两方面进行比较,实验仍采用上述315帧视频,结果如表1所示,其中实时性检测结果是在Visual Studio 2010平台下执行得到。从表1中可以看出,本文算法准确率高于传统方法,实时性可以满足一般实时需求,但仍有进一步提升空间,实现更精准实时的目标。

表1 传统算法与本文算法对比实验结果

Table 1 Result contrast of traditional algorithm and the proposed algorithm

	Realtime performance /(frame/s)	Accuracy rate /%
Traditional algorithm	24	78
Proposed algorithm	18	97.1

4.2 仿真系统的抗干扰性与实时性实验分析

另外对15位不同测试者拍摄了10段300帧的测试视频段,模拟正常状态和非正常状态驾车,疲劳阈值设为0.8,通过改变疲劳判断单元容量 N ,测试系统虚警率与报警响应速度。实验结果如表2所示。

表2 系统抗干扰性与实时性实验测试结果

Table 2 Experimental testing result of false alarm rate and reaction time

Decision unit N	False alarm rate /%	Reaction time /s
25	6	1.2
30	4	1.5
35	4	1.8
40	3	2.0

若系统判断单元为 N 帧,达到疲劳阈值报警需要一定帧数的累积,例如P80准则平均每帧的比重占 $\frac{1}{0.8 \times N}$, N 越大,每帧的比重越小,误判对结果的影响越小,系统抗干扰能力越强。但随着 N 增大,判断非正常状态需要累积的帧数也越多,积累的时间越长从而影响了系统实时性。综合抗干扰性与驾驶警戒安全时间(不超过2s),判断单元容量 N 可在25~40帧之间选取。

5 结论

提出了驾驶员疲劳状态检测原理框架及方法,并优化了Adaboost算法的检测过程,提出了Harris强角点检测人眼视线状态的方法。在采用30万像素摄像头的条件下,人眼状态检测的准确率达97.1%,系统报警响应时间可调,当疲劳判断单元为30帧的时候,报警相应时间为1.5s,小于驾驶安全警戒时间,且系统虚警率为4%,抗干扰性较强。

参考文献

1 Cheng Ruzhong, Zhao Yong, Dai Yong, *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.
- 程如中, 赵勇, 戴勇, 等. 基于Adaboost方法的车载嵌入式疲劳驾驶预警系统[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(5): 719–726.
- 2 Yang Q, Siemionow V, Yao W, *et al.*. Single-trial EEG-EMG coherence analysis reveals muscle fatigue-related progressive alterations in corticomuscular coupling[J]. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 2010, 18(2): 97–106.
- 3 Zhang Y, Lu B, Su L, *et al.*. Multi-recognition algorithms of human's mental fatigue state based on EEG[C]. *IEEE Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence*, 2012: 1180–1184.
- 4 Luo X, Hu R, Fan T. The driver fatigue monitoring system based on face recognition technology[C]. *Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, 2013: 384–388.
- 5 Xie J F, Xie M, Zhu W, *et al.*. Driver fatigue detection based on head gesture and PERCLOS[C]. *2012 International Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing*. 2012: 128–131.
- 6 Zhang Xibo, Cheng Bo, Feng Ruijia. Real-time detection of driver drowsiness based on steering performance[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, 50(7): 1072–1076.
- 张希波, 成波, 冯睿嘉. 基于方向盘操作的驾驶人疲劳状态实时检测方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(7): 1072–1076.
- 7 Zhao C, Zhang X, Zhang B, *et al.*. Driver's fatigue expressions recognition by combined features from pyramid histogram of oriented gradient and contourlet transform with random subspace ensembles[J]. *Intelligent Transport Systems*, 2013, 7(1): 36–45.
- 8 Lee B G, Chung W Y. Driver alertness monitoring using fusion of facial features and bio-signals[J]. *Sensors Journal*, 2012, 12(7): 2416–2422.
- 9 Wu Q, Sun B, Xie B, *et al.*. A PERCLOS-based driver fatigue recognition application for smart vehicle space[C]. *Third International Symposium on Information Processing*, 2010: 437–441.
- 10 Dong H Z, Xie M. Real-time driver fatigue detection based on simplified landmarks of AAM [C]. *International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis*, 2010: 363–366.
- 11 Dings D, Grace R. PERCLOS: A valid psycho-physiological measure of alertness as assessed by psychomotor vigilance [J]. *US Department of Transportation*, 1998.
- 12 Viola P, Jones M J. Robust real-time face detection[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 57(2): 137–154.
- 13 Wei Zhe. Face Detection Based on Adaboost[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012: 31–33.
- 魏喆. 基于AdaBoost的人脸检测[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012: 31–33.
- 14 Wang Wanjun, Liu Qingbao. Quick face detection in video based driver fatigue surveillant[J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, 19(8): 179–181.
- 王万军, 刘青宝. 疲劳驾驶视频监测中的快速人脸定位方法[J]. *电子设计工程*, 2011, 19(8): 179–181.

栏目编辑: 苏 岑