

红外图像的疲劳状态识别方法

黄斌¹, 罗秋凤¹, 王海涛¹, 颜伟¹, 宿海燕²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211016; 2. 山东烟台通用照明有限公司, 山东烟台 264006)

摘要: 为了解决光照变化对疲劳检测系统造成的识别准确性不高的问题, 提出了一种近红外环境下判断人眼状态的方法, 即针对红外光补图像的人眼状态判断; 首先, 利用 Adaboost 算法进行人眼区域定位, 在网格法标记人眼瞳孔部分的基础上, 采用 Retinex 算法对红外图像进行增强; 接着, 结合“亮瞳效应”特性, 对二值化以及边缘检测后的红外图像分别进行网格法闭合度计算, 得到人眼闭合度大小; 最后, 根据闭合度计算结果设定双阈值并结合 PERCLOS 准则来判断人眼特征状态; 另外, 在 DM642 硬件平台上进行疲劳检测试验, 实验结果表明, 该方法的人眼状态识别率达到了 90% 以上, 且平均每秒能处理 21 帧图片; 证明了该方法不仅能有效解决光照变化带来的问题, 而且满足疲劳状态检测系统的快速性、准确性和有效性等要求。

关键词: 疲劳检测; 红外图像; 网格法; 双阈值; 人眼状态识别

Detection Method for Fatigue State Recognition of Infrared Images

Huang Bin¹, Luo Qiufeng¹, Wang Haitao¹, Yan Wei¹, Su Haiyan²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211016, China;

2. Yantai General Lighting Co., Ltd., Yantai 264006, China)

Abstract: In order to solve the problems of low accuracy caused by light changes in fatigue detection system, a method is proposed to judge the state of eyes in near infrared environment. i. e., it is a detection method for eyes state recognition of infrared images. First of all, it uses the grid method to mark eye's pupil and uses Retinex algorithm to enhance the infrared image based on the human eyes region located by Adaboost algorithm. Then, a grid method is adopted to calculate the closure of eyes after binaryzation and edge detection respective, which is related to bright pupil effect. Finally, the state of eyes is determined by setting the dual-threshold based on the results of the closure of eyes, which is combined with PERCLOS. Besides, The tests on the hardware platform of DM642 shows that the human eyes recognition rate is more than 90%, and the average processing speed is 21 images per second. It has proved that the method can not only solve the problems caused by light changes, but also meet the requirement of rapidity, accuracy and validity of the fatigue detection system.

Keywords: fatigue detection; infrared image; grid method; dual-threshold; eyes state recognition

0 引言

疲劳驾驶的危害巨大, 据国外相关研究显示, 如果司机在交通事故将要发生前能够提高 0.5 秒的反应速度, 就能遏制 60% 以上的交通事故^[1]。基于图像处理技术的疲劳检测算法, 重点是眼睛区域特征图像分析技术, 是防疲劳驾驶监测的主要手段之一。目前, 主要采用基于 Haar 特征的 Adaboost 算法定位人眼, 通过分析人眼状态结合 PERCLOS 标准来判断疲劳驾驶行为是否发生^[2-4]。

在实际运用环境中, 困扰眼部状态疲劳识别准确率提高的两大问题, 一个是监测时间段内光照变化导致的计算精度不够高的问题, 如垂直积分投影法、Hough 变换法和眼睛宽高比等, 但这些方法都易受光照影响。另一个是监测对象瞳孔周围干扰较多或者头部转动导致状态误判的问题, 如眼镜边框会干

扰特征判断。针对以上问题, 提出了一种基于红外图像的快速眼睛状态识别方法, 利用近红外图像的 3 个特点: 红外图像具有光照不变特性, 弥补常规系统光照不足、光照变化的缺陷^[5]; 产生明亮的瞳孔效应, 突出瞳孔特征; 红外线对于驾驶员是不可视的, 不会造成干扰。

1 方法设计

本文采用基于 Haar 特征的 Adaboost 算法进行人眼区域的定位, 对眼部瞳孔进行网格标记的基础上进行 Retinex 图像增强, 接着进行人眼闭合度计算以及疲劳状态的判断, 算法流程图如图 1 所示。

1.1 Adaboost 算法

Adaboost 算法是一种分类器, 从众多的弱特征中训练出最能代表人眼特征的一部分弱特征, 集成为强分类器, 进而形成级联分类器。Adaboost 算法进行人眼检测主要利用的是人眼图像的灰度分布与非人眼图像不一样这一特性, 采用积分图计算的 Haar 特征, Haar 特征计算简单, 检测速度快^[6-7]。前期利用大小为 35 × 16 的红外人眼图像作为正样本, 进行训练, 得到 19 层分类器, 加载到 DSP 中, Adaboost 算法检测到人眼, 返回包含人眼的矩形框, 检测结果如图 2 所示。

Adaboost 算法得到矩形框的 4 个顶点 A、B、C、D 的位置坐标 (x_{LU}, y_{LU}) 、 (x_{RU}, y_{RU}) 、 (x_{LD}, y_{LD}) 、 (x_{RD}, y_{RD}) 、宽 W 和高 H, 标记网格利用的是人眼在矩形框中的几何位置,

收稿日期: 2016-08-17; 修回日期: 2016-09-22。

基金项目: 烟台开发区科技发展计划项目(201416); 江苏省重点研发(社会发展)项目(BE2015725); 国家质量监督检验检疫局公益性行业科研专项(2015424068)。

作者简介(通讯作者): 黄斌(1992-), 男, 硕士, 主要从事图像处理与模式识别方向的研究。

王海涛(1968-), 男, 江苏溧阳人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电磁、超声、激光超声检测技术、无损检测技术方向的研究。

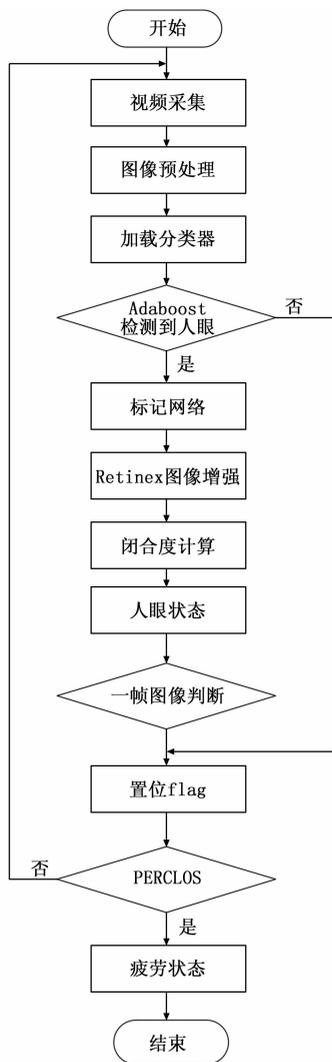


图 1 整体算法流程图

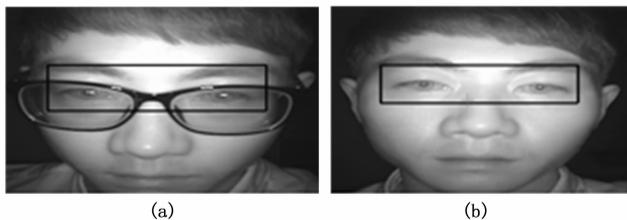


图 2 Adaboost 算法检测人眼示意图

人眼瞳孔在该矩形框中的分布如图 3 (a) 所示。

对矩形眼部区域用网格三分法, 分成 I、II、III 区, 以左眼为例, 标记瞳孔的 II 号网格的几何中心点大致位于瞳孔的圆心, 圆心坐标为 $(x_{lv} + \frac{1}{4}W, y_{lv} + \frac{1}{2}H)$, 网格的尺寸视矩形框的大小而定, I、III 号网格宽为 $\frac{1}{16}W$, 高为 $\frac{1}{2}H$, II 号网格宽为 $\frac{1}{8}W$, 高为 $\frac{1}{2}H$, 标记示意图如图 3 (b) 所示。

对自然光下戴眼镜、不带眼镜, 近红外光下戴眼镜、不戴眼镜 4 种情况, 分别用网格法在灰度图像中进行标记, 实际标

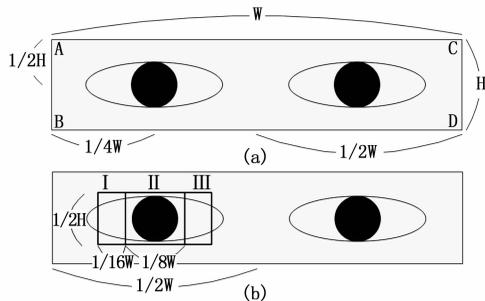


图 3 人眼瞳孔分布及网格标记示意图

记结果如图 4 所示, 其中 (a)、(c) 是自然光下的标记结果, (b)、(d) 是近红外光下的标记结果。选取三网格标记的意义在闭合度计算时将进一步说明。

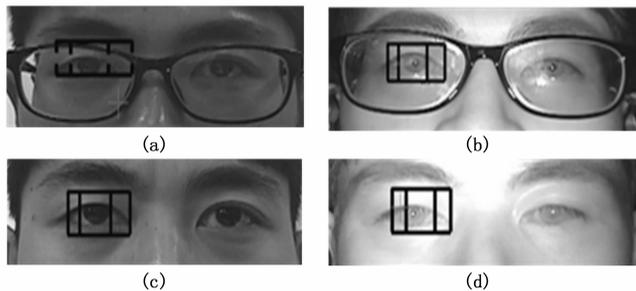


图 4 网格定位示意图

1.2 图像增强

红外图像与自然光下的图像有所区别, 图像处理的方式也有所区别。直接进行对红外图像二值化等操作会使感兴趣部分细节丢失, 如图 5 所示, 在 Matlab 中分别对两幅红外图像进行二值化操作, 二值化后的图像无法体现原图的眼部特征。

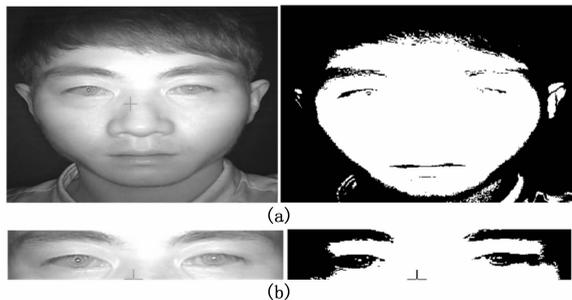


图 5 直接二值化图

为有效提高红外图像质量, 方便后续进一步处理, 本文采用基于 Retinex 理论的图像增强算法^[8]。Retinex 算法常用来对红外图像进行增强, 主要用于受照射光变化影响严重的图像。Retinex 理论模型如式 5 所示。

$$S(x,y) = R(x,y) \cdot L(x,y) \quad (5)$$

对于图像中任一像素点 (x, y) , 输入图像的灰度值 $S(x, y)$ 由物体自身的反射系数 $R(x, y)$ 与入射光照亮度 $L(x, y)$ 相乘得到。 $L(x, y)$ 是物体所处环境光照强度, 它表征了图像中的灰度值的动态范围且对应着图像的低频信息, 而 $R(x, y)$ 代表成像物体的细节及对光照的反射性质, 它包含图像的高频信息。先估计得到入射光 L , 而 S 是已知的, 再通过式 5 求解得到反射部分 R , 也就得到了增强后的图像。将

Retinex 模型转换为对数形式可以将乘法变换为简单的加减运算, 求解 R 如式 (6) 所示。

$$r = \ln R = \ln S - \ln L = s - l \quad (6)$$

对于入射光 L 的估计, Jobson^[9] 论证了高斯卷积函数可以从已知图像中更好的估计出 L , 其可以表示为:

$$\begin{cases} r = s - s * G \\ G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) \end{cases} \quad (7)$$

其中: $*$ 表示卷积操作, σ 是尺度常数, σ 越小, 灰度动态范围压缩的越多, 但反射图像的数据越少; 反之, σ 越大, 图像锐化的程度越高, 对应的反射图像数据越多^[10]。

本文在 Matlab 中验证了该方法的可行性, 如图 6 所示, 其中图 (a) 为原图与增强后图像的比较, 图 (b) 为原图二值化与增强后二值化图像的比较, 图 (c) 为原图直方图与增强后图像直方图的对比。

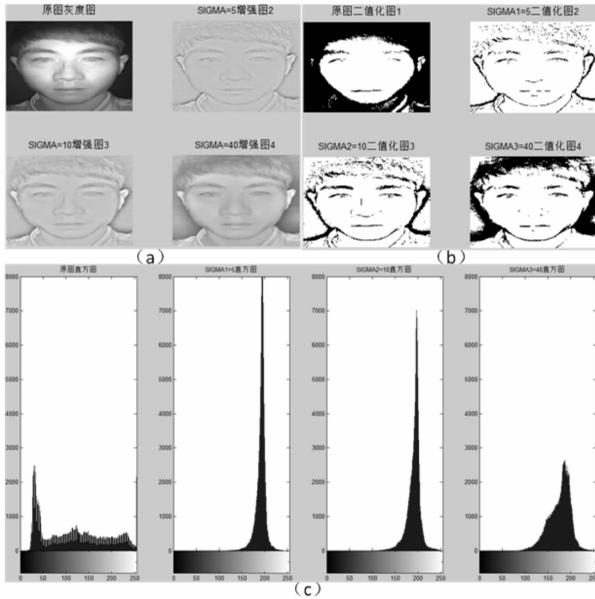


图 6 Retinex 算法增强示意图

同时, 在 DM642 硬件平台上进行了验证, 选取不同对眼部红外图像进行增强的结果如图 7 所示。

从图 6、7 可以发现, 合适对应的高斯滤波器的 SSR (Single Scale Retinex) 算法能有效地增强红外图像, 不仅使对比度得到了显著增强, 且增强了目标图像的细节, 为人眼闭合度计算带来方便。

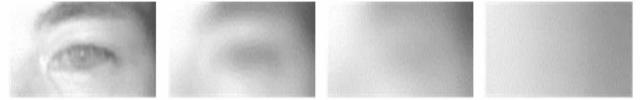
此外, 在光照环境差别较大时, 该方法也能得到较好的效果, 如图 8 所示。

1.3 闭合度计算

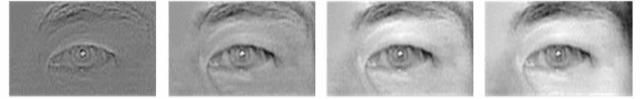
人眼对不同波长的红外光反射量程度不同, 在 850nm 波长时, 视网膜能够反射 90% 的入射光, 在 950nm 时, 视网膜只能反射 40% 的入射光, 而在 880±80 nm 范围内, 人脸的其他部分对于红外的反射程度却基本一致。因此对于 850nm 的近红外光, 经视网膜成像并反射, 会被 CCD 摄像头接收到, 会形成带有“亮瞳效应”^[10-11] 的视频帧。利用“亮瞳效应”, 在增强后的图像中进行人眼闭合程度的计算, 其流程如图 9 所示。



(a) 原图



(b) σ 分别取 1, 5, 10, 40 的照度图像



(c) σ 分别取 1, 5, 10, 40 的反射图像

图 7 DSP 中不同增强示意图

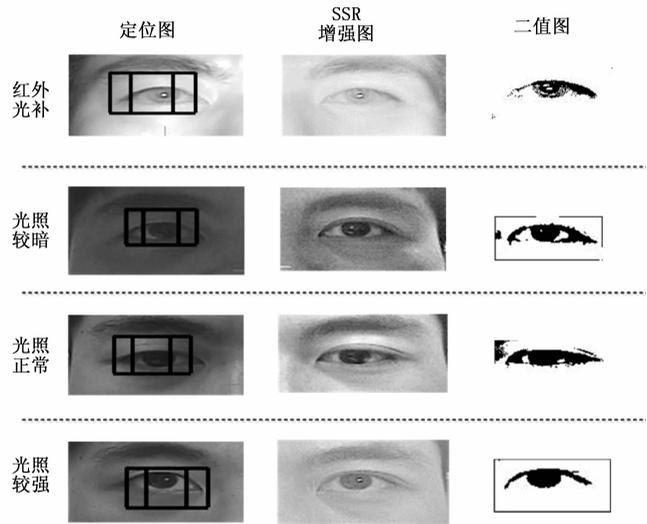


图 8 不同光照处理结果

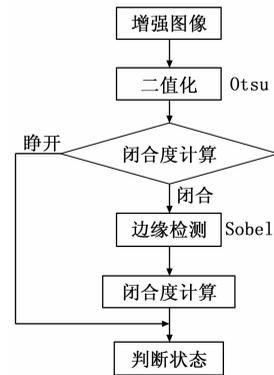


图 9 闭合度计算流程图

1.3.1 二值化

为了明显区分瞳孔区域和非瞳孔区域, 充分利用亮瞳效应, 对网格中各像素点进行二值化, 如式 (8) 所示。

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & g_0(x, y) \leq T_{split} \\ 255 & g_0(x, y) > T_{split} \end{cases} \quad (8)$$

阈值 T_{split} 的选取是利用 OTSU 大津法, 使用的是聚类的思想, 把图像的灰度数按灰度级分成两部分, 使得两个部分之间的

灰度值差异最大, 每个部分之间的灰度差异最小, 通过方差的计算来寻找一个合适的灰度级别来划分, 并自动选取最佳阈值^[33]。

眼部区域经过 OTSU 二值化的图像如图 10 所示, (a)、(b)、(c) 依次为睁眼、半睁、闭眼状态。为了提高检测系统的实时性, 仅仅对网格内的像素点进行二值化, 减少运算量。

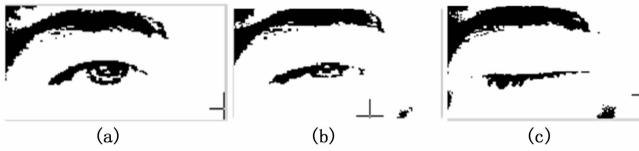


图 10 OTSU 二值化图

1.3.2 Sobel 边缘检测

实际情况中, 当眼睛闭合时, 由于睫毛与眼睑的影响, 二值化后的眼部区域存在干扰像素点, 如图 9 (b) (c) 所示, 两者二值化后黑色像素点个数接近。由于 Sobel 边缘检测在红外光产生亮瞳效应的情况下, 边缘特征提取效果较好, 同时凸显了瞳孔部分, 能够弥补二值化的不足, 如图 10 所示。

Sobel 算子采用了两个 3×3 卷积核卷积形成边缘检测算子, 取中心点周围的八邻域的像素^[33]。用 Sobel 算子和图像的灰度矩阵做卷积, 可以得到横向和纵向边缘检测的图像灰度值, 如式 (9)、(10) 所示。

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * I \quad (9)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * I \quad (10)$$

其中: G_x 为横向边缘检测的图像灰度值矩阵, G_y 为纵向边缘检测的图像灰度值矩阵。

接着, 可以得到该中心像素点的灰度梯度 G , 如式 (11) 所示。为了提高实际在 DSP 中的运算速度, 可以将式 (13) 简化为式 (12)。

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (11)$$

$$G = |G_x| + |G_y| \quad (12)$$

通过基本全局门限判定的方法可以判断该点是否为边缘点, 即当图像中 (i, j) 像素点 $G_{(i,j)}$ 大于或等于设定门限 T 时, 规定该点的像素值为 0, 反之则为 255, 如式 (13) 所示。其中, 本文设定的门限值 $T=130$ 。

$$G_{(i,j)} = \begin{cases} 0 & G_{(i,j)} \geq T \\ 255 & G_{(i,j)} < T \end{cases} \quad (13)$$

利用 Sobel 算子对红外图像进行边缘检测后的边缘图像如图 11 (a) (b) (c) 所示, 其中 (a) 为睁眼状态, (b) 为半睁眼状态, (c) 为闭眼状态。

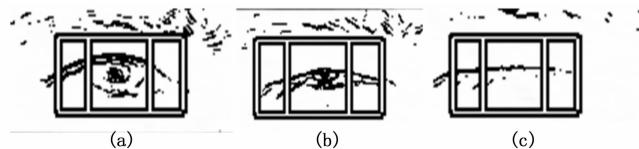


图 11 Sobel 边缘二值化示意图

1.3.3 人眼闭合度计算

分别对二值化、边缘检测后的图像进行闭合度计算, 得出

I、II、III 三个区域像素值与眼睛闭合程度 Δ 的数学关系式。由于驾驶过程中由于头部的晃动以及眼神的漂移等因素, 会引起瞳孔相对网格位置的变化, 瞳孔并不完全在 II 区域内, 如图 12 所示。

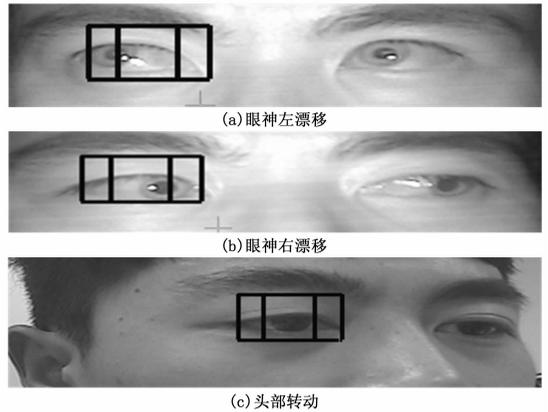


图 12 头部转动检测示意图

分析眼神左右漂移产生瞳孔位置的左右偏向对偏向邻域的灰度影响, 用 I、II 区灰度面积与 III 区域面积差、III、II 区灰度面积与 I 区域面积差的最大值来表征瞳孔闭合度 Δ 。如式 (14) 所示:

$$\Delta = \max(|3 \sum f_I - \sum f_{II,III}|, |3 \sum f_{III} - \sum f_{I,II}|) \quad (14)$$

其中: $\sum f$ 表示该区域内像素点灰度之和, $|3 \sum f_I - \sum f_{II,III}|$ 对应眼神向右漂移的 Δ , 而 $|3 \sum f_{III} - \sum f_{I,II}|$ 则对应眼神向左漂移的 Δ 。从式 (14) 可以发现, 计算表达式依然适用于眼神不存在漂移的情况。

从式 (14) 可以得出: Δ 与眼睛睁开程度满足非线性递增关系, 睁开时的 Δ 比较大; 闭合时的 Δ 几乎为 0。因此可以根据 Δ 可以判断眼睛的闭合程度, 分别设定阈值 T_1 、 T_2 , 其中 T_1 对应二值化后人眼闭合时 Δ 的门限值, T_2 对应边缘检测后人眼闭合时 Δ 的门限值, 采用双阈值判定人眼的状态。

选取三网格的目的在于: 在实际应用过程中, 由于头部晃动、眼神漂移、配戴眼镜, 引起网格标记位置的偏差, 导致网格内包含眼镜边框、眉毛等“外部”黑色像素点, 而三网格的选取能有效地削弱这些像素点影响, 提高了检测系统的鲁棒性。如图 4 (a) 所示, 网格内包含了眼镜的边框, 如式 14 所示, 网格之间的计算, 抵消了外部像素点的影响。

1.4 疲劳判断

利用上述算法能够快速准确的判断人眼的状态, 并通过 PERCLOS 原理中的 P80 准则^[3,14]进行疲劳判断, 即眼睑遮住瞳孔的面积超过 80% 就计为眼睛闭合, 统计在一定时间内眼睛闭合时所占的时间比例, 就能进一步判断人眼是否处于疲劳状态。

2 实验及结果分析

实验采用 DM642 芯片, 主频为 720 MHz, 选用的定时器频率为主频的 1/8。实验对视频帧图像进行疲劳状态的识别, 对系统输出的 4: 2: 2YCbCr 格式的 Y 分量进行处理, 选取的人眼分类器大小为 35×16 , 共 19 层级联分类器, 实验系统硬

件框图如图 13 所示，红外 CCD 摄像头采集的图像大小为 576 * 720。

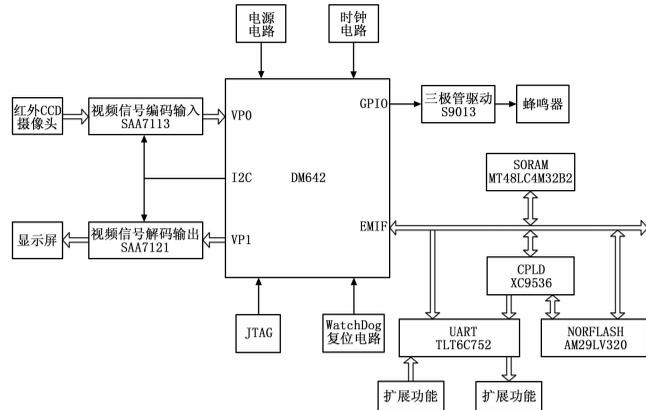


图 13 实验系统硬件框图

首先，验证了整体算法的流程的识别率和效率，对 6 个不同对象进行了“网格法”定位，验证了其有效性，定位结果如图 14 所示。

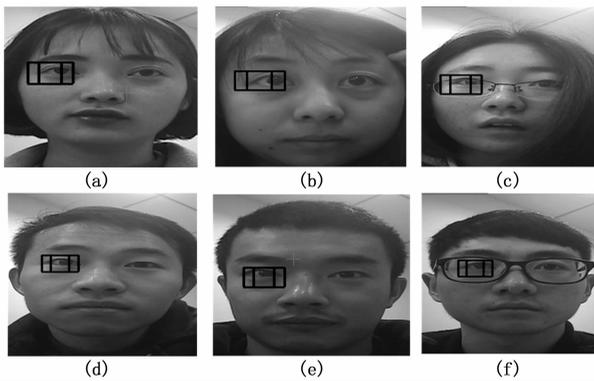


图 14 不同对象网格法定位结果

可以发现，被测对象的瞳孔均在网格内，并且满足闭合度计算的条件，可以成功进行人眼状态的判断。

同时计算算法消耗的时间，具体时间花费如表 1 所示；接着，选取了六个被测者的视频帧，即共包括 800 帧闭眼状态和 800 帧睁眼状态视频，比较了其他疲劳检测算法的识别率，分别采用不同的方法，对视频图像进行识别，结果如表 2 所示。

表 1 各部分算法时间花费

操作	时钟数	时间(ms)
Loop(采集、显示)	230674-240506	3.1-3.2
Adaboost	1550438-2392665	20.7-31.9
Adaboost+Otsu+Sobel	2076275-2868960	27.7-38.3
Adaboost+Retinex+Otsu+Sobel	3036937-4077011	40.5-54.4

从表 1 可以发现，各个部分的运行速度相对较快，除了 Retinex 算法中包含对数运算以及高斯滤波等，时间花费相对较多，总的检测速度依然能达到 21 帧/s，满足实时性要求。从表 2 可以发现，相对于积分投影法，本文的方法具有明显的优势；相对于计算量较大的模板匹配法，本文方法的睁眼检测效果存在不足，但总的误判率低于模板匹配法，更具可行性。

表 2 其他检测算法识别率比较

方法	状态	误判数/数量	漏判率
本文方法	睁眼	61/800	2.79%
	闭眼	22/800	
积分投影	睁眼	476/800	5.95%
	闭眼	33/800	
模板匹配	睁眼	23/800	2.88%
	闭眼	93/800	

3 总结

本文讨论了基于红外图像的人眼疲劳状态快速识别方法，针对传统的基于 Adaboost 检测算法的不足进行了改进，利用 Retinex 算法对红外图像进行增强，提出了网格算法来表征人眼闭合度，通过双判据结合 PERCLOS 判断人眼状态，提高了整个系统的鲁棒性和准确性。实验表明，该方法在 DM642 开发板上具有可行性，对大小 576 * 720 的视频帧，以 21 帧/秒的速度完成人眼的实时检测，同时正确率在 90% 以上，在疲劳检测领域具有较高的实用性和商业价值。未来可以进一步优化 Retinex 算法，实现尺度自适应的同时，减少时间消耗；可以进一步优化检测系统，解决眼镜反光带来的检测问题。

参考文献：

- [1] S. A. Nobe, F. Y. Wang. An overview of recent developments in automated lateral and longitudinal vehicle controls [A]. IEEE International Conference on SMC [C]. 2001; 3447-3452.
- [2] 朱振华, 吴晓娟, 王 磊等. 基于眨眼持续时间的司机疲劳监测方法 [J]. 计算机工程, 2008, 34 (5): 201-206.
- [3] 陈守明. 驾驶员疲劳检测中人眼定位方法的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [4] 苏起扬, 姜 震. 一种疲劳驾驶检测系统中快速人眼检测方法 [J]. 现代电子技术, 2015 (4): 87-90.
- [5] 王 力. 基于红外图象的驾驶员疲劳检测研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [6] 龙传敏. 基于 Adaboost 的人脸检测方法 & 眼睛定位算法 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [7] 陈秋玲. 基于 Adaboost 算法的人脸检测研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [8] 陈 亮. 一种快速的基于自适应尺度 Retinex 的图像增强算法 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39 (S): 522-525.
- [9] Jobson D J. Rahman Z. Woodell G. A. Properties and performance of a center/surround Retinex [J]. IEEE Trans on Image Processing. 1997. 6 (7): 451-462.
- [10] 赵 文, 张 意, 张卫华, 等. 基于红外图像的眼睛开闭检测方法 [J]. 计算机工程与设计, 2015 (2): 436-440.
- [11] 郭克友, 张广渊. 一种红外图像条件下的人眼定位算法 [J]. 计算机工程与应用, 2008 (15): 170-172.
- [12] Stan Z Li. Illumination invariant face recognition using near-infrared Images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007; 627-639.
- [13] 赵小强, 李大湘, 白本督. DSP 原理及图像处理应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [14] Lai S K L, Craig A, Boord P, et al. Development of an Algorithm for an EEG-based Driver Fatigue Countermeasure [J]. Journal of Safety Research, 2002, 34: 321-328.