



基于 FPGA 的疲劳驾驶检测系统设计

杨超^{1,3}, 杜正聪^{2*}, 印茂伟³, 董加强², 芮志聪^{1,3}, 须永朋³, 赫培峰³

(1. 泸州职业技术学院 电气与电子工程学院, 泸州 646000; 2. 西昌学院 信息技术学院, 西昌 615000;
3. 西南科技大学 国防科技学院, 绵阳 621010)

摘要: 基于 FPGA 的疲劳驾驶检测系统设计是信息对抗技术专业方向设计的特色实验教学案例, 该系统的设计要求学生使用 Verilog 语言, 在 Quartus II 环境下通过调用内部 IP 核实现有效图像数据提取、图像解码、灰度提取、PERCLOS 检测算法、SD 存储、VGA 显示、报警等功能。通过对 AC620 平台的研究和开发, 集成了图像采集、数据存储、算法处理、显示和报警等 FPGA 功能。本实验旨在设计和实现大型数字化系统, 以提高学生的创新思维和综合能力为目标。通过实验, 学生能够得到并行编程思想和串行编程思想的交互性工程训练, 提升自顶向下的系统顶层设计能力, 掌握行业最新的 FPGA 技术与人工智能相关应用案例, 在跨学科知识融合和跨平台设计中得到创新实践能力的培养。

关键词: FPGA; 疲劳驾驶; 检测系统; 数字系统

中图分类号: TN971

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20210312

Design of Fatigue Driving Detection System Based on FPGA

YANG Chao^{1,3}, DU Zhengcong^{2*}, YIN Maowei³, DONG Jiaqiang²,
RUI Zhicong^{1,3}, XU Yongpeng³, HE Peizheng³

(1. School of Electrical and Engineering, Luzhou Vocational and Technical College, Luzhou 646000, China;

2. School of Information Technology, Xichang University, Xichang 615000, China;

3. School of National Defense Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: The design of the fatigue driving detection system based on FPGA is a characteristic experimental teaching case of information countermeasure technology major. The design of this system requires students to use Verilog language to realize effective image data extraction, image decoding, grayscale extraction, PERCLOS detection algorithm, SD storage, VGA display, alarm and other functions by calling internal IP core in Quartus II environment. Through the research and development of AC620 platform, FPGA functions such as image acquisition, data storage, algorithm processing, display and alarm are integrated. The purpose of this experiment is to design and implement a large-scale digital system to cultivate students' sense of innovation and comprehensive quality. through experiments, students can get the interactive engineering training of parallel programming idea and serial programming idea, improve the top-down system top-level design ability, master the latest FPGA technology and artificial intelligence related application cases in the industry, and get the cultivation of innovation and practice ability in interdisciplinary knowledge fusion and cross platform design.

Key words: FPGA; fatigue driving; detection system; digital system

本实验是一个利用数模电技术以及数字系统设计技术解决现实生活和工程生产中的实际问题的典型教学案例。通过实验, 学生掌握了传感器与检测技术、信号放大、数据显示、模数转换、参数设置、软硬件抗干扰和反馈工程等相关知识

和技术方法。本实验的主要目的是根据疲劳驾驶实时检测的特点^[1-2], 设计一种基于 FPGA 的疲劳驾驶检测系统。

同时本实验设计还加强了对学生的跨学科教育, 需要学生有跨学科知识的储备, 包括信号与

收稿日期: 2021-06-22; 修回日期: 2021-09-05

基金项目: 全国高等院校计算机基础教育研究会计算机基础教育教学研究项目(2021-AFCEC-477); 四川省 2021—2023 年高等教育人才培养质量和教学改革项目(JG2021-891); 全国高等院校计算机基础教育研究会计算机基础教育教学研究项目(2022-AFCEC-573)。

作者简介: 杨超(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事信息技术与创新创业教育研究。

* 通信作者: 杜正聪(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事信号与信息处理方面的研究。E-mail: duzc@163.com

系统、EDA 技术、数字设计与 FPGA 等课程知识。FPGA 包括以下几个知识点:

- 1) 图像采集;
- 2) 串行通信协议数据传输;
- 3) 数据存储。

在疲劳驾驶检测系统设计与实现过程中, 不仅交叉锻炼学生编程思维、提升自顶向下的系统设计能力, 也有助于学生在跨学科知识融合和跨平台设计中提高创新实践和实际问题解决能力。

1 系统设计概述

1.1 设计任务和目标

设计一种基于 FPGA 的疲劳驾驶检测系统, 可实现 24 小时实时检测, 对驾驶员的疲劳状态进行预警。设计目标如图 1 所示。

具体要求:

- 1) 在 Ptotel DXP2004 环境下, 设计图像采集卡、主控电路和环形辅助电路, 实现整个检测系统的控制和逻辑功能, 并在硬件电路上完成系统电路的物理测试;
- 2) 针对 FPGA 内部硬件电路的特殊性^[3-4], 以 PERCLOS 检测算法等为主要图像处理技术, 通过对驾驶员眨眼频率的获取和分析, 判断疲劳程度;
- 3) 在 Quartus II 环境下, 借助 Verilog 语言实现图像解码、图像有效数据提取、灰度提取、SD 存储、VGA 显示及报警。

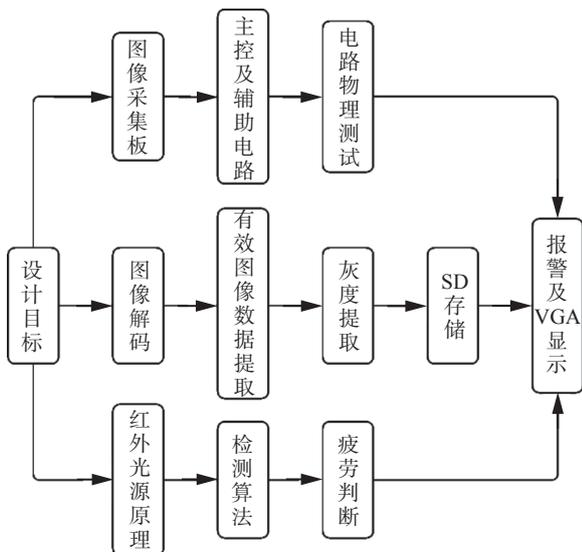


图 1 设计目标

1.2 总体原理设计

由于 FPGA 具有强大的并行计算能力和灵活性^[5-6], 本实验根据硬件和软件的协同设计, 合理

地利用 FPGA 和 ARM 的功能设计了交互平台, 即在 FPGA 中加入低阶像素和超级像素, 并根据 EP4E10F17C8N 芯片的内部结构、AC620 开发板的外部接口和集成接口硬件电路, 通过 ARM 实现进程控制, 利用图 2 所示的 VGA 输入接口和 VGA 输出接口对原始图像的输入和输出进行处理, 算法加速模块的 FPGA 设计体现在色彩空间转换的 IP 核设计与与超像素块顶点相对应的点积的 IP 核设计中。PERCLOS(percentage of eyelid closure over the pupil over time)算法的主要部分在 ARM 实现, 包括图形模型的建立、单元分割、优化求解等。DMA 控制器使用相应的 API 函数命令控制 ARM 和 FPGA 之间的数据流, 最终完成系统设计。

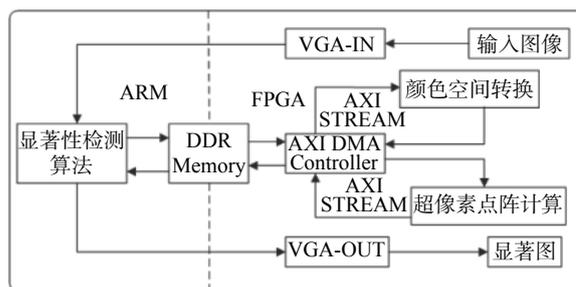


图 2 系统总体方案设计图

针对 AC620 平台的 ARM 与 FPGA 的异构结构, 对疲劳检测算法各部分对资源的计算和消耗量进行具体分析, 为其底层图像预处理部分设计了 FPGA 加速。

在系统的 FPGA 部分集成了 Video Pipeline 通路, 本实验中图像输出和 VGA 显示功能建立在 Video Pipeline 通路及其硬件结构设计的基础上, 以算法的性能和速度为指标对整个系统进行了分析和测试。

1.3 系统设计流程与要求

了解主要集成部分, 并进行图像采集、存储、算法处理、报警和显示等模块的系统硬件设计方案分析。如图 3 所示具体设计流程有以下 5 个方面。

- 1) 图像采集电路: CMOS 图像传感器电路保证管脚连接正确, 引脚高低电平的设置和特殊引脚的处理要符合其工作特性和设计要求。
- 2) 主控板原理图设计: 选用 Cyclone IV E 型号为 EP4E10F17C8N 芯片, 主控芯片 I/O 引脚电压为 3.3 V, 内核电压和锁相环电压为 1.2 V, 其他器件电压是 3.3 V。
- 3) 系统内部逻辑设计: 在 Quartus II 环境下, 编写 Verilog HDL 语言和调用 IP 核并依托 EP4E10F17C8N 芯片的内部资源。
- 4) 图像算法处理: 通过对驾驶员眼睛的检测

使用 PERCLOS 算法得到其 PERCLOS 值^[7], 以此来判断驾驶员的是否疲劳。

5) 联合调试模块: 将系统分成不同模块对各部分进行在线分析调试, 根据系统的调试结果, 对整体功能进行改善。

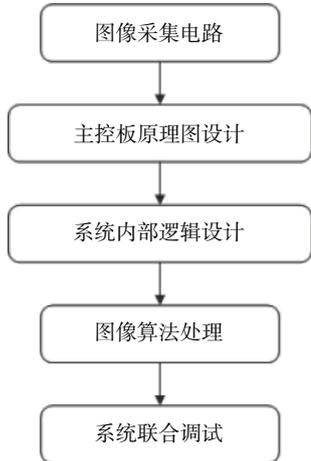


图 3 系统设计流程

2 实验原理及方案

2.1 系统结构及工作流程

系统整体结构如图 4 所示, ADC128S022 接收图像传感器采集的 PAL 视频数据, 经过 I²C 配置模块后产生 ITU656 格式的数据流并输出, 因为该数据流中同时存在着有效数据与消隐数据, 所以通过数据提取模块对实际数据和部分参考信号进行筛选, 从 YUV=4:2:2 的数据中提取图像, 每个像素包含亮度和颜色信息。灰度提取模块提取像素的灰度成分, 作为数据源, 便于后续的图像数据处理。获得的图像的灰度数据存储在 SDRAM 中。除了基本的读写操作之外, SDRAM 控制器的控制比较复杂, 同时采用 FIFO 核解决了手臂时钟与图像采集显示模块之间的异步时钟通信问题, 4 个 FIFO 读写 2 帧图像数据。

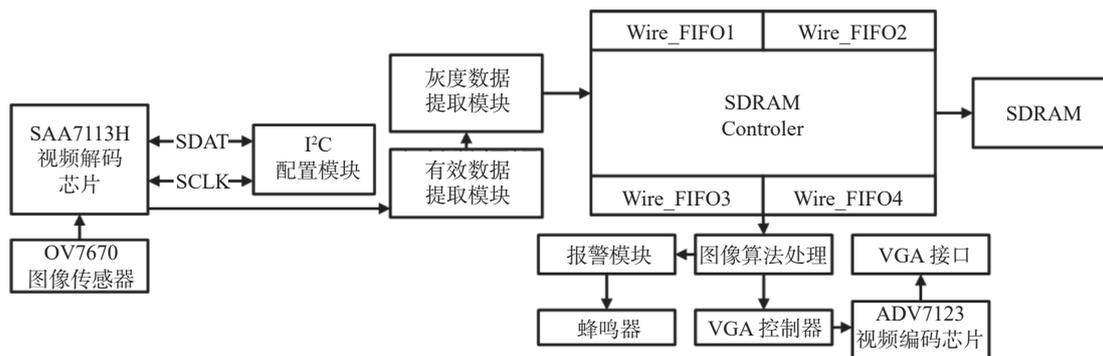


图 4 系统总体结构

从存储芯片里提取的数据通过图像算法模块进行处理, 实现疲劳状态的识别功能。通过这个模块后, 系统有两种状态。首先, 如果检测到疲劳, 蜂鸣器会发出警报; 其次是 VGA 控制器的设计, 将处理后的图像在计算机上实时显示, 以便直接看到系统的功能实现。

2.2 实现方案

设计基于 FPGA 平台。图 5 是整个系统的硬件框图: 主控芯片 EP4E10F17C8N 周围的外围芯片通过引脚与主芯片对应, FPGA 通过控制引脚控制芯片, 从而控制整个系统。图像传感器型号为 OV7670, 是通过视频输入连接到电路的彩色光敏摄像头。采用 ADC128S022 解码芯片将模拟信号转换为数字信号, 芯片时钟为 24.576 MHz, 使用

相应的晶体提供的频率。系统的 SDRAM 芯片是 W9812G6KH-6, 用于存储图像数据。通过变流技术电路得到系统电压, 5 V 输入电压分别转换为 3.2 V 输入输出和核心电压。只有图像传感器和 TLV5618 芯片需要 5 V 的输入电压, 其余仅需要 3 V, 主芯片左侧为下载配置电路, 主要解决 FPGA 芯片断电信息丢失的问题。时钟由 50 MHz 晶体振荡器电路组成。复位电路实现系统恢复操作。蜂鸣器实现报警功能。

系统总体硬件电路划分为 3 部分, 分别是实现图像获取功能的图像采集板、实现集成控制、数据存储及 PERCLOS 算法的图像处理模块和其余功能模块的主控板、实现图像数据数模转换的辅助电路。

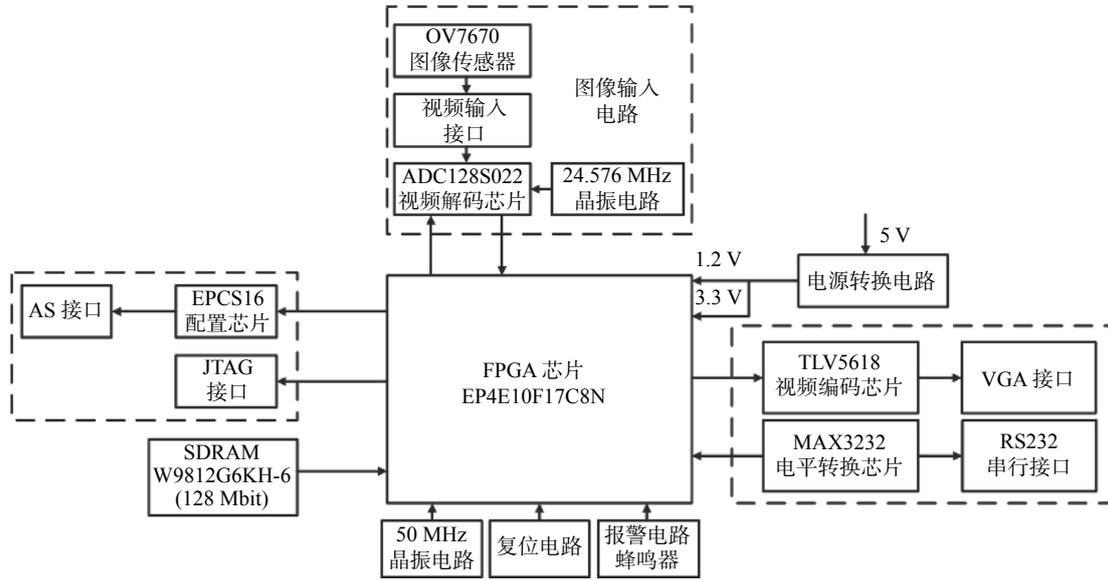


图 5 系统硬件框图

2.3 PERCLOS 检测算法

PERCLOS 值为人眼闭合时间占总时间的百分比，通过图 6 可说明其测量原理^[8]。

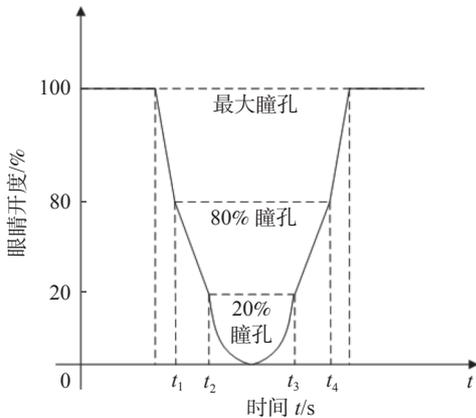


图 6 PERCLOS 值的测量原理

PERCLOS 值的计算方法为：

$$f = \frac{t_3 - t_2}{t_4 - t_1} \times 100\% \quad (1)$$

将眼睛检测的 PERCLOS 值与预先设定的阈值进行比较以达到判断疲劳驾驶的目的，若驾驶员的眼睛闭合时间在 3 s 以上且 PERCLOS 值在 40% 以上，即被系统认定为疲劳驾驶状态，随即发出警报。

2.4 眼部特征提取

基于 Kazemi V 和 Sullivan J 的回归算法，在 Dlib 数据库中采用 68 点人脸标记方法提取人眼特征^[9-10]。Dlib 数据库的 68 点辨识模型如图 7 所示。利用 Python 对整个人脸进行扫描，得到 68 个

点的 x 、 y 坐标，然后提取 6 个左眼属性坐标和 6 个右眼属性坐标，用于后续 EAR(eye aspect ratio) 参数的计算。

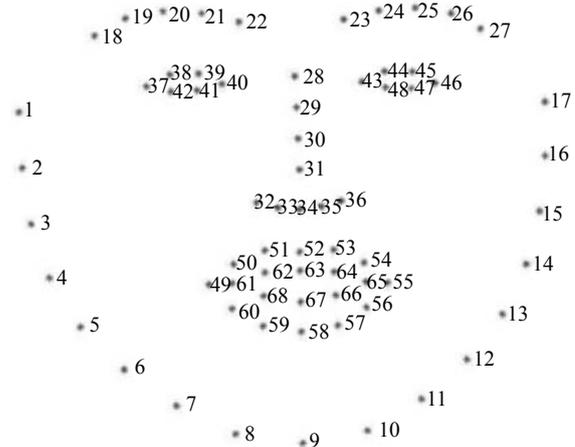


图 7 Dlib 库的人脸 68 点标记模型

2.5 眼部张合度检测

利用脸部参数测量眼睛的睁闭程度^[11]，通过计算眼睛的大小可以确定眼睛的睁闭状态。使用 Dlib 库可以提取眼睛的 6 个特征点。6 个特征点的坐标分别是 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 、 p_6 ，如图 8 所示。

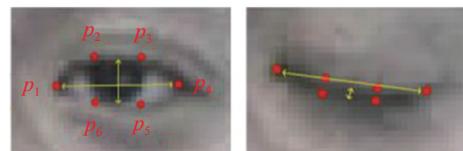


图 8 眼部特征点标记示意图

EAR 的计算公式为：

$$EAR = \frac{\|p_2 - p_6\| + \|p_3 - p_5\|}{2\|p_1 - p_4\|} \quad (2)$$

分母和分子分别代表眼睛特征点的水平和垂直距离。基于垂直点对的数量相比水平点对超出了一倍, 将分母值乘2, 以确保两组特征点的权重相同。当人眼处于非闭合状态时, EAR值只会在一个小范围内上下浮动, 当人眼处于闭合状态时, EAR值会迅速降低。

3 实验条件以及教学过程

3.1 实验平台及资源介绍

1) Protel DXP2004: 由Altium公司开发的电路设计软件, Protel DXP2004使该系列软件的设计领域变得多样化, 功能进一步完善、风格进一步成熟, 并且界面变得更加简洁。

2) Quartus II: 由Altera公司设计的多门类CPLD/FPGA开发软件^[5,12], 支持多种设计输入方式, 内部嵌入自带的综合器以及仿真器, 可以完成完整的PLD设计流程。

3) AC620开发板: AC620开发板拥有非常丰富的功能, 从简单的逻辑到各种各样的多媒体项目, 允许使用者在一个较为宽广的领域内进行数字逻辑设计。

4) OV7670摄像头: 它是一个彩色光敏摄像头, 其连接电路的端口为视频输入端口, 模拟信号和数字信号转换使用SAA7113H芯片完成。

3.2 教学实施过程

教学实施过程如图9所示。通过重构教学环境, 结合网络、课堂、实验3种教学方式, 实现多空间的深度融合。

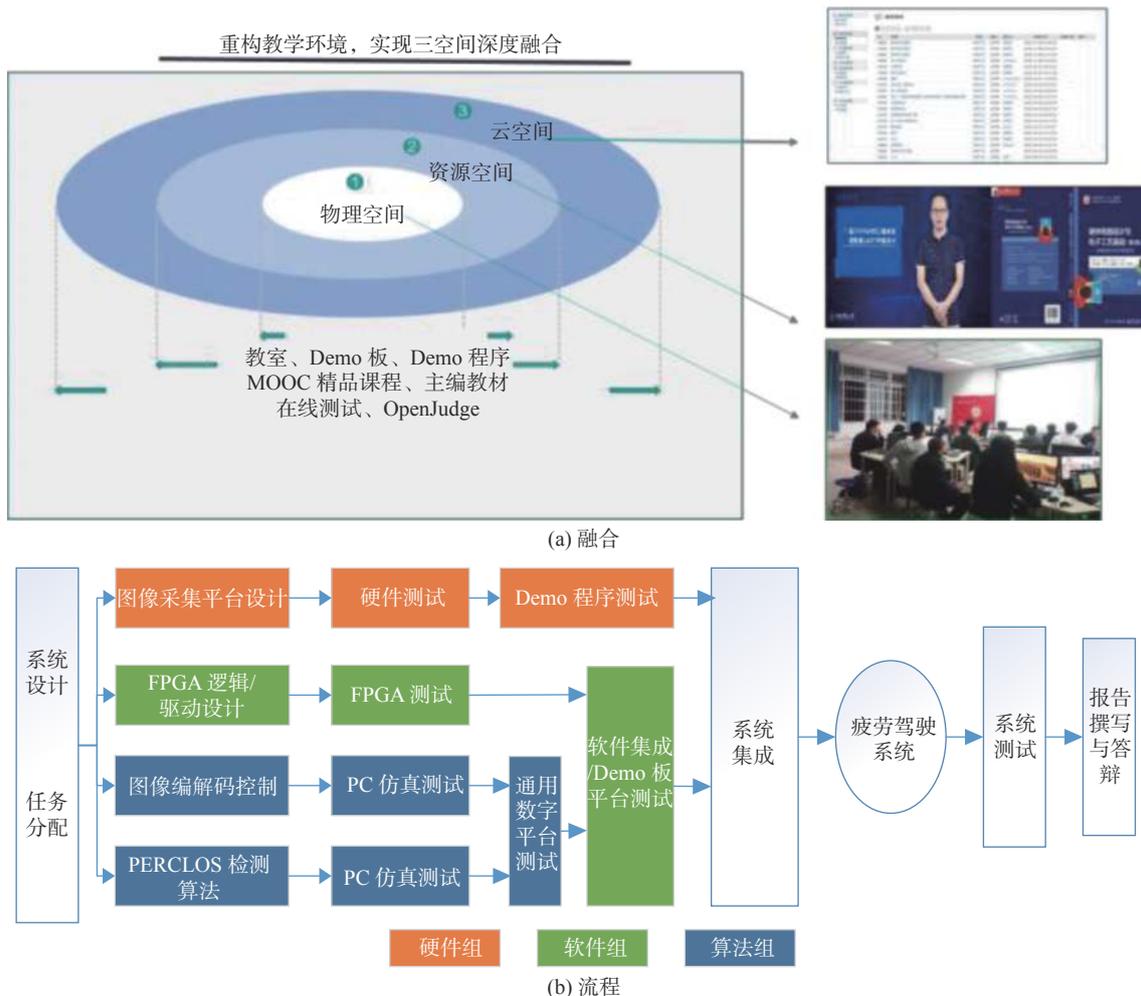


图9 教学实施过程

具体的教学实施过程如下:

1) 课程组教师对设计方案进行筛选、试做(软

件仿真+硬件调试)、可行性论证、修改、定稿;

2) 进行实验方法、规范化操作流程、功能模

块的简要介绍、安排针对设计任务的资料搜寻与参考资料、课堂阐述考核方法；

3) 对学生分组安排组内讨论, 抛砖引玉, 通过提出初步解决方案引导学生自主思考并通过在组内进行思路的交流, 不断得出更优的解决方案。各组学生完成实验要求模块的仿真与设计实现, 教师定期与学生进行指导交流；

4) 利用 Demo 板与 Demo 程序, 阶段性检查各组学生工作, 并训练学生自查自检与解决问题的能力；

5) 系统各个模块功能整合, 并测试设计效果；

6) 完成实验报告, 详细阐述完整的系统设计过程；

7) 成果验收, 答辩, 提交实验报告。

4 测试及结果

将实验设计的系统完全搭建好, 模拟驾驶状态, 通过真实的测试, 采集人在正常和疲劳状态下的面部数据, 对系统的实时性和准确性进行验证。疲劳检测效果如图 10 所示。



图 10 疲劳检测效果图

通过实验测试结果可知, 在正常光环境下, 当人员的驾驶状态保持向前平视时, 系统检测到的 EAR 值将保持在 0.33~0.38 之间。疲劳驾驶条件下, EAR 参数均低于 0.15, 而被测者眼睛完全闭上时, EAR 参数将保持在 0.08 左右。这说明系统将 EAR 的检测阈值设置为 0.25 是有效合理的。当驾驶员眼睛闭上超过 2 s 时, 系统能够检测其为疲劳状态并发出警告, 同时对于驾驶员正常眨眼的情况不会存在误判。此外, 在光线增强的情况下, 系统的鲁棒性仍然较高, 可以准确区分驾驶员的正常状态和疲劳状态, 但在光线微弱的条件下, 比如夜晚, 由于摄像头提取的眼部特征不清晰, EAR 值偶尔会较高。

实验结果表明, 当驾驶员处于疲劳状态时,

该系统能够准确检测并进行有效预警, 通过实验设计和现场测量(对系统的构成进行优化, 基于 Dlib 库对脸部进行准确检测以及核心点获取, 分析人眼疲劳程度时使用 EAR 参数)使系统的实时性和精准度得到提升。

5 结束语

通过疲劳驾驶检测系统设计的实验, 加强了学生的跨学科教育, 增加了学生的跨学科知识储备, 包括高级图像处理、EDA 技术、数字系统设计与电子综合设计等课程知识。同时通过跨平台设计交叉锻炼学生编程思维、提升自顶向下的系统设计能力, 也在整个系统设计和调试过程中锻炼了实践动手和创新的能力。

参考文献

- [1] 姚奕星. 疲劳驾驶对驾驶行为的影响研究[J]. 汽车世界, 2019(19): 150.
- [2] 曾刚. 疲劳驾驶预警系统应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [3] 董迎春. 基于FPGA的疲劳检测系统设计与实现[D]. 南充: 西华师范大学, 2020.
- [4] 陈卓然, 张宇. 基于ARM+FPGA的心电信号疲劳驾驶检测方法的研究[J]. 科技创新导报, 2019(31): 52.
- [5] 曹国震, 彭寒, 谭伟. 基于FPGA的疲劳驾驶检测算法研究与设计[J]. 电子设计工程, 2016(12): 165-167.
- [6] 周波. 基于FPGA的驾驶员疲劳检测系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [7] 黄永平. 基于计算机视觉的司机驾驶疲劳检测系统[J]. 数字技术与应用, 2019, 37(3): 101-102.
- [8] 徐莲, 任小洪, 陈闰雪. 基于眼睛状态识别的疲劳驾驶检测[J]. 科学技术与工程, 2020(20): 8293-8299.
- [9] KAZEMI V, SULLIVAN J. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees[C]// IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2014.
- [10] 张枝令. Python实现基于深度学习的人脸识别[J]. 电子商务, 2018(5): 47.
- [11] 张琳娜, 岑翼刚, 黄洁媛. 基于深度学习的眼睛睁闭状态检测方法: CN108614999A[P]. 2018.
- [12] 刘三帅. 基于Zynq的疲劳驾驶检测系统软硬件协同设计[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.

编辑 张俊