



华南理工大学  
South China University of Technology

## 本科毕业设计（论文）

### 题目：复杂驾驶条件下司机驾驶疲劳度检测的研究

学 院 电子与信息学院

专 业 信息工程

学生姓名 郑伟龙

学生学号 200830260371

指导教师 秦华标

提交日期 2012 年 6 月 4 日

## 摘要

开车对于很多人来说已经是成为日常生活中不可或缺的一部分，而疲劳驾驶已经成为引发公共道路交通事故重要原因之一。因此，如何在事故发生前有效地检测并进一步防止驾驶疲劳有着十分重要的现实意义。本文首先介绍阐述了疲劳驾驶研究的背景、意义和研究现状，对现有的各种疲劳检测方法做了简单介绍，并对比各种疲劳检测方法的优劣。之后阐述了利用红外图像进行人脸检测、人眼检测、人眼状态识别等各种方法，利用 PERCLOS 和眨眼频率信息融合的方法进行疲劳识别，最终完成复杂驾驶环境下司机驾驶疲劳度检测系统设计。主要内容如下：

(1) 光照预处理。首先我们阐述在复杂驾驶条件下人脸检测存在的关键问题，重点研究复杂光照对于人脸检测的影响以及如何有效地减小光照对人脸检测算法影响。在本文中我们采用红外摄像头采集司机人脸视频图像，利用主动红外图像传感器以及基于光照估计的图像增强算法，获取光照鲁棒的红外图像，为后面的检测和识别打下良好的基础，提高系统的鲁棒性。

(2) 人脸检测。复杂驾驶环境下司机驾驶疲劳度检测系统由于安全考虑对实时性要求比较高，因此要求系统人脸检测处理速度要快。本文采用 Adaboost 学习算法对输入红外视频图像进行人脸检测定位，阐述 Adaboost 算法的基本原理和方法。

(3) 人眼检测。本文采用了基于 Adaboost 的眼睛检测定位方法以及基于人脸三庭五眼比例特征的眼睛检测定位方法。实验结果证明，基于 Adaboost 学习算法的人眼检测检测速度快，但是容易受到眉毛、眼镜等影响。而基于人脸比例特征的眼睛检测定位方法，原理简单，处理速度快，但是对于头部倾斜的情况，分割效果较差。

(4) 眼睛状态识别。眼睛的状态是反映驾驶员疲劳的重要的参考指标，本文详细介绍了几种眼睛状态识别方法，提取人眼特征，判断人眼状态，并对它们中重要参数对识别率影响进行研究，从处理时间以及识别率对比研究各种眼睛状态识别的方法。

(5) 疲劳检测。通过统计一段时间内眼睛状态信息判断驾驶员疲劳程度。疲劳状态识别采用了与实际疲劳相关性最好的 PERCLOS 算法。但是驾驶员在走神、注意力不集中时，目光呆滞，这时眼睛通常处于睁开状态，这样计算得到的 PERCLOS 值很低，这种情况也应该判断为疲劳状态。因此，本论文使用 PERCLOS 准则与眨眼频率相结合的方法作为疲劳检测的判断指标，提高系统识别的准确性。最后我们集成各模块算法，最终完成复杂驾驶环境下驾驶员疲劳度检测系统设计。

**关键词：** 驾驶疲劳； 红外图像； 人脸检测； 人眼定位； 疲劳检测

## Abstract

With the development of social economic, traffic accidents caused by driver fatigue have become one of the main factors. Therefore, how to monitor and prevent fatigue driving effectively is an important practical significance to reduce traffic accidents and mortality. This paper first introduces the background and status of the driver fatigue detection, compares various methods of driver fatigue detection. Then we describe vision-based various methods about face detection, eye location, eye tracking and eye state recognition and use PERCLOS and blink frequency combination method as the fatigue judgment core algorithm. At last, we complete driver fatigue detection system design under complex driving environment. The main content is as follows:

(1) Illumination Preprocessing. First, we describe key issues of face detection in complex driving conditions, focus on the complexity of the illumination for the face detection and how to effectively reduce the impact of illumination on the face detection algorithm. In this paper we use the infrared camera to capture the driver's face image using active infrared light source and illumination estimation method of image processing to obtain illumination robust infrared images, and lay a good foundation for the subsequent detection and identification, to improve the driver fatigue detection system.

(2) Face Detection. Driver fatigue detection system requires real-time performance; therefore, need to quickly locate the face. In this paper, we use the Adaboost learning algorithm for face detection and location, and give details of the basic principles, the training process and testing process of the Adaboost algorithm.

(3) Eye Detection. In this paper, we use eye detection based on Adaboost algorithm and the characteristics based on the proportion of face. The experimental results show that the human eye detection based on Adaboost learning algorithm has the ability to adapt to driver gesture, but vulnerable to the eyebrows, glasses, etc. whereas, Eye detection and location method based on the proportion of face features, the principle is simple, fast processing speed, but for the head tilt, it can cause poor segmentation results.

(4) Eye state recognition. This paper describes several eye state recognition methods. We discuss the relationship between their important parameters and how the parameters impact on recognition rates. We also discuss eye state recognition methods from the comparative study of the processing time and recognition rate.

(5) Fatigue detection. We detect period of time eye state information to determine the degree

of driver fatigue. We use PERCLOS algorithm for fatigue detection which has been identified the best correlation with actual fatigue. But for the driver lack of concentration, the calculated PERCLOS value is very low, this situation should also be judged as a state of fatigue. We use a combination of methods to judge drive fatigue based on PERCLOS and blink frequency, and improve the reliability of the drive fatigue system. We finally build a vision-based driver fatigue detection system platform, the system can deal with a real-time, non-contact detection of driver fatigue detection.

**Keyword:** Driver fatigue, Infrared image, Face detection, Eye detection, Fatigue detection

# 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
<b>第一章 绪 论.....</b>	<b>1</b>
1.1 课题研究背景与意义.....	1
1.2 疲劳驾驶的研究.....	3
1.3 驾驶疲劳检测的国内外研究现状.....	3
1.3.1 国外疲劳检测研究现状.....	3
1.3.2 国内疲劳检测研究现状.....	8
1.3 课题的提出及主要研究内容.....	9
1.4 论文的内容及组织.....	9
<b>第二章 复杂驾驶条件下人脸检测方法 .....</b>	<b>11</b>
2.1 引言.....	11
2.2 复杂光照下人脸检测研究.....	13
2.2.1 光照与人脸.....	14
2.2.2 人脸检测中光照问题研究概述.....	16
2.2.3 人脸检测中光照问题方法初探.....	17
2.2.4 光照处理方法总结.....	23
2.3 基于 ADABOOST 的人脸检测 .....	25
2.3.1 Adaboost 算法概述.....	25
2.3.2 Adaboost 算法的训练过程及检测过程.....	25
2.3.3 实验结果与分析.....	28
2.4 本章小结.....	29
<b>第三章 复杂驾驶条件下人眼检测和状态识别 .....</b>	<b>30</b>
3.1 引言.....	30
3.2 复杂驾驶条件下人眼检测定位方法研究.....	30
3.2.1 眼睛检测定位方法综述.....	30

3.2.2 基于 Adaboost 的眼睛检测定位方法 .....	30
3.2.3 基于人脸三庭五眼比例特征人眼检测定位方法 .....	31
3.3 复杂驾驶条件下人眼状态识别方法研究 .....	33
3.3.1 眼睛状态识别综述 .....	33
3.3.2 基于眼睑曲率的眼睛状态识别 .....	34
3.3.3 基于分段眼睑曲率的眼睛状态识别 .....	36
3.3.4 基于椭圆拟合的人眼状态识别 .....	38
3.3.5 基于水平投影及比例特征的人眼状态识别 .....	39
3.3.6 判断黑色像素比例进行人眼状态识别 .....	41
3.3.7 人眼状态识别方法结果分析 .....	41
3.4 本章小结 .....	42
<b>第四章 基于眼部特征的驾驶员疲劳状态检测 .....</b>	<b>43</b>
4.1 引言 .....	43
4.2 基于 PERCLOS 与眨眼频率的驾驶员疲劳检测 .....	44
4.2.1 PERCLOS 测量原理 .....	44
4.2.2 眨眼频率 .....	46
4.3 复杂驾驶条件下驾驶员疲劳检测系统 .....	46
4.4 本章小结 .....	49
<b>结 论 .....</b>	<b>50</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>52</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>56</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 课题研究背景与意义

近些年来，随着汽车工业和交通运输业的高速发展，居民生活水平的提高，开车对于很多人来说已经是成为日常生活中不可或缺的一部分。由此也带来了公路交通安全问题，各类交通事故已经严重危害着人类生命安全和财产安全，给社会造成巨大伤害。这些交通事故多数是由于驾驶员违规驾驶，比如酒后驾驶，疲劳驾驶、危险驾驶等引起的。在各种重大的交通事故当中，由于驾驶员疲劳驾驶引起的事故比例已经达到了 40%。而且随着社会汽车数量的增加，这种危害还可能会扩大对社会的伤害。

由于驾驶员睡眠不足或者说长时间进行驾驶，驾驶员可能自己没有意识到自己已经处于一种疲劳状态，疲劳困倦就是这样不经意地以一种意想不到的方式出现，疲劳会严重削弱驾驶员的警觉性，使其不能很好地对当前环境和情况进行判断和处理，这样容易导致危险情况发生，增加交通事故发生概率。



图 1-1 疲劳驾驶

虽然酒后驾驶和危险驾驶被广泛地宣传，但是在许多交通事故中，另一个重要的原因就是疲劳驾驶。根据美国公路交通局<sup>[1]</sup>，疲劳驾驶和醉酒驾驶一样致命。“有超过 20% 的严重交通事故跟疲劳驾驶有关，最新的研究表明，疲劳驾驶可能是导致爱尔兰五分之一司机死亡的一个重要原因。这意味着这个隐形杀手可能在 5 年内导致超多 200 多名司机死亡。”在欧洲，一些交通事故统计数据表明，在重型汽车交通事故当中一个重要的原因就是疲劳驾驶。在所有的交通事故当中有大约 10%-20% 驾驶员死亡和受伤时由于疲劳驾驶引起的，大约 57% 的严重卡车交通事故与疲劳驾驶有关。在美国，疲劳驾驶每年造成大约 10 万起交通事故，其中造成了约 4 万的非致命性伤害和 1550 人死亡，直接经济损失达到 12 亿美元。

德国有大约 25% 比例的交通事故由疲劳驾驶引起，而在英国则有 20% 比例的交通事故与疲劳驾驶有关<sup>[2]</sup>。

在我们国家，下表显示的是中国 2003-2010 年上半年道路交通事故统计表<sup>[3][4]</sup>，从表中数据可以看出，我国交通事故频繁，每年已经给我国带来了巨大的人员伤亡和财产损失。其中，由于疲劳驾驶导致的重大交通安全事故占到很大的比例，在 2007 年到 2009 年间，我国由于疲劳驾驶导致的死亡人员数字已经占到了交通事故总死亡人数的 11.35%、10.91% 和 12.5%，平均每年约有 9000 人死于由于疲劳驾驶引起的交通事故<sup>[5]</sup>。因此，疲劳驾驶已经严重影响交通安全，采取必要的预防措施是非常有必要的。

表 1-1 2003-2010 年上半年中国道路交通事故统计表

年份	事故次数	死亡人数	受伤人数	损失（亿元）
2003	667507	104372	494174	33.7
2004	517889	107077	480864	23.9
2005	450254	98738	469911	18.8
2006	378781	89455	558270	14.9
2007	327209	81649	380442	12
2008	265204	73484	304919	10.1
2009	238351	67759	275125	9.1
2010 上半年	99282	27270	116982	4.1

相关的研究表明，在笔直平坦的道路上，单调的路面会让驾驶员感到放松，使得驾驶员放松警惕，从而增加疲劳驾驶者打盹的概率。相关的数据统计表明，疲劳驾驶是车祸发生的主要原因之一，堪称“马路杀手”，疲劳驾驶引起的道路安全问题也越来越引起社会的广泛关注，是个不可忽视的社会问题。疲劳驾驶的危害之大，迫切地需要解决的方法。

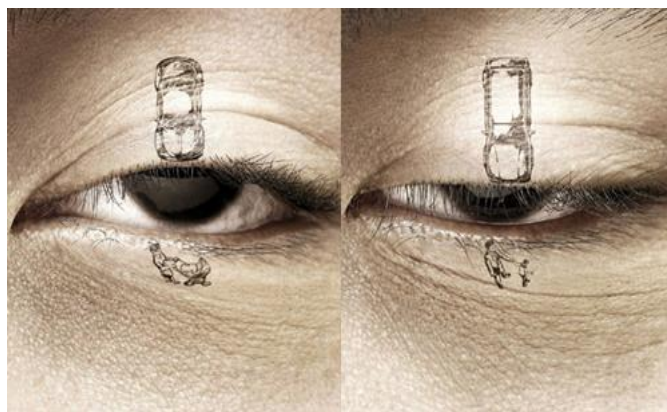


图 1-2 关于疲劳驾驶的创意广告

因此，研究和开发车载式的、非接触的、实用性好的疲劳检测系统，适合未来汽车安全技术的发展要求，有着很重要的工程意义和学术意义，同时也具有很强的现实意义和应用前景。



## 1.2 疲劳驾驶的研究

疲劳驾驶，是指驾驶员在长时间连续驾驶后，驾驶员生理上或心理上发生某种变化，出现其驾驶机能低落的现象。疲劳驾驶主要表现为无力感、功能失调、知觉功能减退、操作技能下降、记忆、思维能力差、困倦瞌睡。“疲劳驾驶”必须具备三个要素：一是对象必须是驾驶人员。二是必须在规定道路上行驶时。三是每天驾车超过8小时，或者由于其他原因导致睡眠不足，行车过程中注意力分散、精神困倦、四肢无力，不能及时判断和准确处理当前路面交通情况，仍然继续驾驶车辆的行为。同时具备以上三个要素，就构成“疲劳驾驶”。现在国家已经规定，司机连续开车不能超过6小时，也就是开6小时必须要休息半小时以上，否则疲劳驾驶很容易出危险。

引起疲劳驾驶的原因可能是多方面的。下表显示的是关于疲劳驾驶形成的主要原因<sup>[6]</sup>，包括睡眠质量、车内环境、车外环境、身体条件、药物作用等原因，这些要素也可能综合起来，从而影响驾驶员的精神状态。

表 1-2 疲劳驾驶形成原因

要素	形成驾驶疲劳的主要原因
生活环境	家务事或工作事物繁多，精神压力大；参加文娱活动时间长，精力有限。
睡眠质量	就寝过晚，睡眠时间太少；睡眠效果差；嘈杂环境不能保证睡眠质量。
车内环境	车内通风不良导致空气质量差；温度过高或过低；噪声和振动严重；座椅调整不当；与同车人关系紧张。
车外环境	在午后、傍晚、凌晨、深夜时段行车；路面状况差；道路条件好，情况单一；大雨、大雾、大雪等恶劣天气行车；交通环境差或交通条件拥挤。
运行条件	长时间、长距离行车；车速过快或过慢；过于限制到达目的地的时间。
身体条件	体力、耐久力差；视、听能力下降；体力弱或患有某种慢性疾病；服用驾驶车辆忌用的药物；女性生理特殊时期（经期、孕期）。
驾驶经历	驾驶员技术水平低、操作生疏；驾驶时间短、经验少；安全意识差。

## 1.3 驾驶员疲劳度检测的国内外研究现状

关于驾驶员疲劳度检测方面的研究，大概可以分为主观和客观两大类方法。主观的研究方法大部分都是以调查问卷的方式为主，比如说主观调查表、驾驶员自我历史记录、睡眠习惯调查表、斯坦福睡眠尺度表等，这类方法主要通过平时调研，起到监督、警告作用，因此无法做到实时疲劳报警，对于降低疲劳驾驶引发的交通事故发生率十分有限。另一类就是客观的方法，这类方法主要是利用各种传感器测量驾驶员各种生理信息来判断当前驾驶员的精神状态，比如通过测量驾驶员的脑电信号、眼电信号、呼吸信号等来判断驾驶员当前的精神状态。

### 1.3.1 国外疲劳检测研究现状

最早的关于驾驶疲劳检测方面的研究主要从医学角度出发，利用各种医疗设备采集驾驶生理信号进行分析判断。早在 1935 年，美国交通部下属的洲际商业协会 ICC(the Interstate Commerce Commission)就已经要求美国公共卫生服务署 USPHS(the United States Public Health Service)负责调查各种商业车辆驾驶的服务时间 HOS(the hours of service)，并颁布了关于限制车辆驾驶服务时间 HOS 来保障公共道路安全的管理条例<sup>[7]</sup>。在 20 世纪 80 年代，美国国会正式批准交通部实施关于商业车辆驾驶服务时间改革方案，并且开始着手研究车辆驾驶时间与公共交通安全的关系，完善车辆安全驾驶管理条例，在此基础上疲劳驾驶的相关研究性工作出现了实质性的进展。到了 90 年代，驾驶疲劳在工业和公共安全领域已经成为一个关注的热点<sup>[8]</sup>。

除了交通政策，可靠、使用的驾驶员疲劳检测技术也是必要的。随着社会发展以及科学技术的进步，关于驾驶疲劳识别方法取得了很大的发展，形成了一系列的识别方法。表 1-3 分别对这些疲劳检测识别方法进行比较和研究<sup>[9]</sup>。

表 1-3 疲劳检测识别技术分类与比较

疲劳检测识别技术		描述	准确性	实用性	可扩展性
基于生理现象的疲劳识别方法	生理信号	通过检测脑电波、眨眼频率、心跳速率、脉搏呼吸等生理信号的变化	很好	很差	一般
	身体反应	主要检测驾驶员头部姿态、身体姿势、控制方向盘力度等身体反应的变化	很好	好	很好
基于操控行为的疲劳识别方法		检测车上各种操纵器比如方向盘、刹车踏板、加速器等的变化判断驾驶员操控行为	好	很好	很差
基于汽车行为的疲劳识别方法		主要检测车辆本身的行为参数（如速度、侧向位移、偏行速率等）是否异常	好	很好	很差
基于驾驶员反应的疲劳识别方法		定期检查驾驶员的反应能力	好	很差	很好

基于行驶时间的疲劳识别方法	根据车辆行驶时间以及行驶条件进行检测	很差	好	很好
---------------	--------------------	----	---	----

通过对上表中各项进行比较，我们可以看到不同的驾驶员疲劳度检测方法各有各优缺点，其中综合各个因素，基于驾驶员生理信息的疲劳检测方法相对于其他检测识别方法来说较好。目前在世界各国范围内，已经有不少的科研机构、专家学者利用不同的检测方法展开关于车载式、便携式、实时高效疲劳检测的研究工作，并且取得了很好进展，也出现了不少典型的实验性产品：

转向操作注意监视器 S.A.M(steering attention monitor)<sup>[10]</sup>是一种基于操控行为的检测方法。这种装置通过测量方向盘的转动是否正常来判断当前驾驶员的驾驶状态，适用于各种车辆。S.A.M 可以固定在仪表盘下方，在装上这套装置设备后，假如方向盘在 4 秒钟内仍然不运动的话，这时说明驾驶员可能走神、注意力不集中或者打瞌睡，装置应该进行报警提示。



图 1-3 S.A.M 疲劳报警装置

日本东京大学研制一种可以戴在驾驶员手腕上的疲劳测试器<sup>[11]</sup>。该疲劳测试器外观类似手表，如图1-4所示，该测试器内部装有一个小型氧气电池电极，能测量驾驶员汗液中酒精、氨和乳酸含量等成分，然后利用无线电发射装置将数据上传至研究中心，研究中心利用这些数据信息分析当前驾驶员的疲劳程度。当检测出疲劳时，及时地向驾驶员发出警告信号，避免交通事故的发生。



图 1-4 手腕式疲劳测试器

反应时间测试仪 PVT(The Psychomotor Vigilance Test)，这种测试仪主要是通过测量驾驶员当前的反应能力来判断他当前的精神状态。该测试仪会在计算机屏幕上随机的出现闪动的黄色光点，测试者需要按相应的按钮来测试他的反应时间，测试的反应时间在一定程度上可以反映测试者的疲劳程度。但是这个测试仪也存在一个致命的缺点，它容易分散驾驶员的注意力，因此不可能用于实际驾驶环境下。

奔驰汽车公司研究的“疲劳识别”辅助系统使用的是多模态的检测方法，融合了红外

和 EEG 等技术，能识别驾驶员的疲劳状态，并及时予以警告。该系统的红外摄像头实时检测和记录驾驶员的眨眼频率以及闭眼时间，如果发现闭眼时间过长，系统就会响起警告信号，同时该系统也使用其它生理监测方法如脑电图(EEG)等。而且系统还融合了汽车在行驶过程中的动态数据，比如说转向和制动等，如果驾驶员长时间没有操纵方向盘，系统会发出警告信号。如下图所示，为奔驰公司“疲劳识别”辅助系统。

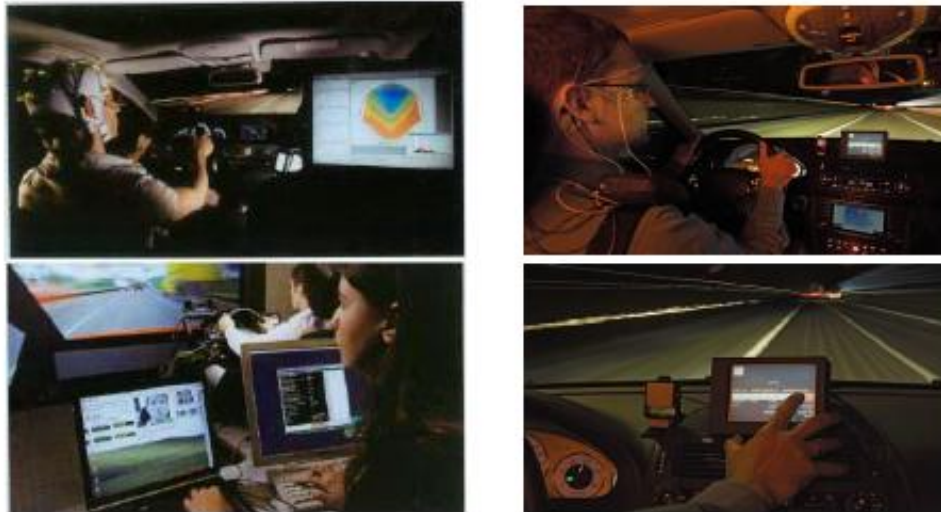


图 1-5 奔驰汽车公司“疲劳识别”辅助系统

上面的疲劳测量装置大部分是接触式，但是在实际应用环境下，我们更加倾向于是用便携式、非接触式、实时性好的疲劳检测装置，这样的装置才能在不影响驾驶员正常驾驶情况下发挥其作用。为了解决便携性、实时性、非接触式等问题，世界各国的研究机构、专家学者纷纷对此做研究，提出了不少很好的思想和方法，并取得了不错的疲劳检测效果。下面简单介绍其中几种最具有代表性的：

早在 1996 年，美国的 Anlug, Wing 和 Kalliedth 等人已经开始利用眼睛的某些生理特征信息比如眼睛开闭、闭合时间等来研究疲劳驾驶检测问题，通过他们的研究发现，利用眼睛状态相关信息来判断驾驶员是否疲劳是一种行之有效的方法。1999 年 4 月，美国联邦公路管理局(Federal Highway Administration) 邀请了来自华盛顿大学的 John Stern, 弗吉尼亚大学的 Walt Wierwille, NHTSA 的 Duane Perrin, 宾厄法尼亚大学的 Melissa Mallis 等在内知名专家学者，举行技术论坛，讨论关于预测驾驶员疲劳驾驶检测方法的可行性，经过讨论研究，认为联邦公路管理局在“Ocular Measures of Driver Alertness”论文里面提到的 PERCLOS (单位时间内眼睛闭合时间所占的百分率)进行疲劳检测是一种行之有效的方法，并推荐将 PERCLOS 作为未来驾驶疲劳测定最好方法<sup>[12][13]</sup>。目前，基于 PERCLOS 原理的驾驶员疲劳检测方法已经被公认是最有效的检测方法。

基于 PERCLOS 原理与图像处理技术的驾驶疲劳检测方法，可以解决驾驶疲劳检测中便携性、非接触、实时性等问题。因此该方法提出以后，许多的研究所和科研机构进行了这方面的研究，并开发出许多基于 PERCLOS 和图像处理结合的测量装置。

日本 Nissan 汽车研究实验室研究开发出一种基于 PERCLOS 和人脸识别的驾驶疲劳检测装置。该装置首先利用摄像头采集驾驶员图像数据，将图像数据传入计算机进行识别处理，通过图像处理方法检测出人眼位置，进一步判断人眼的睁闭状态，最后利用 PERCLOS 准则进行疲劳判断，当 PERCLOS 值超过阈值的时候进行报警提醒，避免意外发生。

美国 Attention Technologies 公司开发出一款驾驶员疲劳监测预警产品 Driver Fatigue Monitor (DD850)，这款产品是基于驾驶员生理反应特征进行疲劳监测。这款产品可以直接安装在车内的仪表盘上，通过红外 CCD 摄像头实时检测和跟踪驾驶员眼部状态，最后采用 PERCLOS 准则进行疲劳判断。



图 1-6 DD850 疲劳检测系统

日本丰田公司开发的系统是利用内置在驾驶员前方的摄像头采集图像数据，分析和监测驾驶员眼部状态，进而判断驾驶员当前疲劳状态，如下图所示，如果判断为疲劳，车内立即发出警报来提醒驾驶员，注意驾驶安全。

澳大利亚 Seeing Machines 公司的 DSS（驾驶员状态监测系统）是通过安装在仪表盘上的传感器，DSS 系统能够获得驾驶员的面部表情，并进一步测量眼睑闭合的次数和观测驾驶员头部的偏转方向。如下图所示，DSS 通过眼睛状态以及驾驶员头部运动信息来确定驾驶员注意力以及疲劳状态，从而提高驾驶行车安全。



图 1-7 丰田公司开发的驾驶员眼睑检测系统



图 1-8 DSS 驾驶员状态检测系统

澳大利亚国立大学与沃尔沃公司进行合作，研发出疲劳检测 FaceLAB 系统<sup>[14]</sup>，如图 1-9 所示，该系统通过实时监测和追踪驾驶员脸部与眼部位置，获取到眨眼频率、头部位置与转动数据、眼睑孔径数据、嘴角与眉毛运动数据、瞳孔大小的数据进行多特征融合，实现实时检测驾驶员精神状态。



图 1-9 FaceLAB 疲劳报警装置

美国内达华州大学计算机系研究了基于红外视频的疲劳检测系统，该系统图像采集硬件部分采用的是红外主动光源和红外摄像头，由于人眼瞳孔对于红外反射相对于其他部分不同，红外人脸图像上眼睛部位的瞳孔位置出现明亮状态，利用“明亮瞳孔”效应可以很简单地检测定位人眼，进而进行人眼状态识别，再利用 PERCLOS 方法来判断疲劳状态。该方法通过实验证明，可以大大减小光照影响和算法运算量，达到实时检测目标。

### 1.3.2 国内疲劳检测研究现状

相对于国外来说，国内在驾驶员疲劳检测识别方面的研究起步比较晚。近些年来，国内对于驾驶员疲劳检测的研究越来越多，并且取得了不错的进展，开发出来很多实际的测试装置，取得不错的检测效果，目前国内在驾驶员疲劳检测方面的研究有：

浙江大学开发的驾驶防瞌睡装置利用的是灰度直方图投影方法对人眼进行快速定位，在准确定位人眼位置后，利用阈值分割和边缘检测相结合的方法进行人眼状态识别，在一段时间内实时统计眼睛闭合时间、眨眼频率等眼睛参数，来判断当前驾驶员是否处于疲劳状态，进行报警提示和采取必要措施。

中国农业大学车辆与交通工程学院也在疲劳驾驶检测方面做过相关研究，他们利用普通摄像头采集驾驶员人脸图像数据，利用高斯肤色模型进行肤色提取，定位人脸，然后利用灰度积分投影的方法检测眼睛具体位置，利用模板匹配进行人眼状态识别，计算出人眼的闭合时间以及 PERCLOS 值，利用人眼的闭合时间以及 PERCLOS 值来进行疲劳识别。

江苏大学的刘志强等人利用波长为 850/950mm 的红外图像进行疲劳检测，人脸各部位对于不同波长的红外反射率不同，成像也不同，进行图像差分可以快速定位人眼。红外图像一方面可以排除外界环境光照的干扰，减小光照对系统影响，提高系统鲁棒性，另一方面可以利用红外图像在人脸不同部位反射率不同，可以得到关于关键部位(眼部)的差分图像，减少算法运算量，从而提高了系统的实时处理能力，有一定的实用价值<sup>[15]</sup>。

上海交通大学的石坚、吴远鹏等人<sup>[16]</sup>利用车载式传感器通过测量驾驶员在驾驶过程中汽车方向盘、踏板等运动信息来判断驾驶员的驾驶状态，研究发现，驾驶方向盘的转动规律与驾驶员的实际疲劳程度之间具有一定的相关性，方向盘如果较长时间内不动的话，说

明驾驶员可能已经处于疲劳状态，需要进行报警提醒。

综观国内外的发展现状，我们可以发现，利用 PERCLOS 准则和图像处理技术相结合、模式识别和信息融合相结合的方法已经成为当前进行驾驶疲劳检测实用方法，这种方法满足便携式、非接触式、实时的要求，符合实际市场需求。

### 1.3 课题的提出及主要研究内容

相关资料研究表明，如果在潜在交通事故发生前提前 1 秒钟给驾驶员发出警报，则可避免 90% 的类似交通事故发生。驾驶行为中包含了人、车、环境三个因素，根据国内一些专家学者对于人、车、环境引起的交通事故中，人的因素约占 92%，人的因素已经成为汽车安全及道路交通事故发生的第一要素，因此未来的汽车主动安全系统设计必须考虑人的因素，且需作为一个重要的因素来考虑。本课题的提取是基于以下几点问题：1、我们能否在交通事故发生之前检测到司机疲劳状态；2、对于疲劳检测技术，什么技术和方法是最可靠有效的；3、如何在不分散驾驶员注意力的情况下有效地检测驾驶员精神状态并进行判断。疲劳驾驶的预防单靠教育的手段效果是有限的，而且交通事故往往不是在刚开始产生驾驶疲劳时就发生，如果利用科学的手段能找到有效检测方法，实时监测驾驶员的精神状态，当出现疲劳或精神分散的迹象时就发出警报，采取必要的措施，那么就能提高驾驶安全和公共交通安全。因此，研究和开发基于机器视觉的驾驶员疲劳度检测的方法不仅在理论方面，而且在应用方面都具有重要意义。本课题主要研究复杂驾驶环境下驾驶员疲劳度的检测方法，利用近红外主动光源获取驾驶员人脸图像，进一步进行人脸定位、人眼定位、人眼状态跟踪，通过实时跟踪人眼状态，通过统计眼睛闭合时间、眨眼频率等眼睛状态参数进行疲劳识别。由于驾驶环境的多变性，存在光照不均、夜间光线过暗等情况，本课题重点研究如何减少光照对检测算法带来的影响，提高检测系统识别率和准确度，另一方面研究和比较人眼状态的识别方法，对各种人眼状态识别方法进行比较研究。

### 1.4 论文的内容及组织

本论文对复杂驾驶环境下驾驶员疲劳度检测进行研究，针对驾驶环境下光照复杂问题，利用主动近红外图像传感器采集图像数据，采用光照成像模型和光照估计方法对红外图像进行预处理，通过实时跟踪检测人眼位置，利用人眼状态识别方法判断人眼睁开，最后利用 PERCLOS 准则和眨眼频率相结合的方法对驾驶员疲劳状态做出判断。本论文重点研究复杂驾驶环境下基于近红外图像的光照预处理方法以及人眼状态识别方法，并对这些方法进行对比研究，提高疲劳检测系统的鲁棒性和识别度。

本论文的组织结构如下：

第一章为绪论，主要介绍疲劳驾驶的研究背景与意义，概述疲劳驾驶国内外研究现状，讨论现有的疲劳检测方法以及优缺点，最后介绍本课题的研究内容和论文组织安排。

第二章为复杂驾驶条件下人脸检测方法研究，人脸的检测在疲劳评判中占有重要的地位，直接关系到后面疲劳检测算法精度，本章首先阐述在复杂驾驶条件下人脸检测存在的关键问题，重点研究复杂光照对于人脸检测的影响以及如何有效地减小光照对人脸检测算法影响。本章对基于光照估计的近红外图像增强算法研究与比较，介绍利用 Adaboost 算法进行人脸检测基本原理和方法，从而实现复杂光照下人脸检测算法。

第三章为复杂驾驶条件下人眼检测和状态识别，眼睛的状态是反映驾驶员疲劳的重要的参考指标，本章介绍现有的人眼检测和状态识别的方法，利用 Adaboost 学习算法实现人眼检测，根据检测跟踪的人眼位置，提取人眼特征，判断人眼状态，并对多种人眼状态识别方法进行对比研究。

第四章为疲劳状态检测，通过统计一段时间内眼睛状态信息判断驾驶员疲劳程度。疲劳状态识别采用了与实际疲劳相关性最好的 PERCLOS 算法。但是驾驶员在走神、注意力不集中时，目光呆滞，这时眼睛通常处于睁开状态，这样计算得到的 PERCLOS 值很低，这种情况也应该判断为疲劳状态。因此，本论文使用 PERCLOS 准则与眨眼频率相结合的方法作为疲劳检测的判断指标，提高系统识别的准确性。最后完成复杂驾驶条件下司机疲劳检测系统，并对系统进行测试和分析。

第五章为总结和展望，总结本论文课题所做的工作，提出系统需要进一步完善的地方和改进的方法，对疲劳检测研究进行展望。



## 第二章 复杂驾驶条件下人脸检测方法

### 2.1 引言

所谓人脸检测 (Face Detection) 是指从输入的图像或视频中检测出人脸的位置和大小。人脸检测系统输入的是包含人脸的图像或视频, 输出的则是关于是否存在人脸以及如果存在, 人脸的位置、大小、数量等参数描述。

人脸检测是个赋有挑战性的课题, 人脸图像是一个包含毛发和脸上各种器官待确定的复杂图像, 不同的人脸在颜色, 大小, 形状上都会有一定的差异性, 而且在复杂的背景下和不同的光照下, 尤其是针对驾驶环境, 从不同角度又可能展现不同的图像信息, 加上如果人脸上可能还会有胡须或者眼镜等其他的装饰品, 使得开发实用高效的人脸检测技术具有一定的复杂性和难度。而人脸检测是人脸识别等人脸智能信息处理中必不可少的关键技术, 已经成为机器视觉领域十分活跃、热门的研究课题。

从一幅图像中检测出人脸, 大体上有以下三种方法:

- 1) 基于人脸知识的方法, 它利用的主要是人脸各部位的几何规则、面部特征之间的关系等进行人脸检测和定位。根据所用的先验知识的不同, 有轮廓规则<sup>[17][18]</sup>、器官分布规则<sup>[19]</sup>、对称性规则、运动规则等。
- 2) 基于模板匹配的方法, 根据人脸的“三庭五眼”的关系, 人们可以使用一个统一的模型来描画出人脸的结构图, 把它作为人脸的模板, 将人脸进行参数化, 然后计算输入图像和人脸模式各部分特征的相关性。最后根据这些相关值可确定输入图像中是否存在人脸及其位置、大小。常用的方法有 snake、ASM、可变形模板等。
- 3) 基于统计学习的方法, 此类方法首先提取人脸样本和非人脸样本各自的统计特征, 利用模式识别或者机器学习的方法构建人脸检测分类器, 最后采用分类器进行人脸检测。基于统计学习的人脸检测方法主要有: 支持向量机 (SVM)、神经网络法 (ANN)、隐性马尔可夫模型 (HMM) 等方法。

下表给出这几种方法的分析与比较<sup>[20]</sup>。

表 2-1 人脸检测方法分析和比较

算法分析		运算量	准确率	图像质量要求	姿势表情光照等影响
先验知识	镶嵌图	大	较低	高	大
	几何投影	小	较低	高	大
	二值化定位	小	较低	高	大
	广义对称	大	较高	高	大

几何信息	snake	大	高	高	大
	可变形模板	大	高	高	大
	ASM	较大	高	较高	大
色彩信息		小	低	较高	小
外观信息	神经网络	大	高	低	较小
	PCA	大	高	低	较小
	SVM	大	高	低	较小
关联信息	概率网络	较大	高	较低	小
	DLA	较大	高	较低	较小
	GWN	较大	高	较低	较小

从目前人脸检测技术的发展情况来看，基于人脸知识的这种方法存在的主要问题是很难将人脸知识转换为明确定义的规则。此外，不同光照条件、人物表情、姿态等都会严重影响人脸检测效果。而基于模板匹配的方法对人脸的大小、形状、姿态的包容性较差。总的来说，基于统计学习的方法具有较好的鲁棒性和适应能力，也是最近几年研究的热点。但是这类方法计算复杂，检测速度有待进一步提高。另外，基于统计学习的方法需要大量的负样本进行训练，对于非人脸样本的选取是一个较为困难的问题。人脸检测的研究趋势是将这些方法进行结合，已取得更好的效果，这也是一直以来人们提出的融合思想<sup>[21]</sup>。

人脸检测技术经过多年来的研究，已经取得了很大的进步和发展，但是仍然不能够很好地适应各种变化因素，仍然面临着各种挑战，因此还有需要解决的问题：

1. 现有的人脸检测方法性能对于光照变化、年龄、表情、姿态、距离、遮挡等条件因素变化比较敏感，当某些条件因素发生变化时，检测出来的效果不是很理想，其性能和准确率有待进一步提高。

2. 人脸图像的子空间分布是非常复杂的，有限的人脸样本并不能很好地描述全部的人脸图像子空间，在高维空间进行建模又比较复杂、困难。因此，需要探索人脸子空间的描述方式，也需要研究新的人脸描述方法来区别人脸和非人脸。将人脸的整体信息识别和局部特征分析相结合的方法是近些年来一个趋势。

3. 实时性要求，现有的人脸检测应用大都是面向实时性应用以及便携式应用。复杂的算法运算并不适用于嵌入式移动设备中，这个也大大限制了人脸检测的应用范围。因此在提高人脸检测算法识别率的同时也要兼顾检测速度和实时性要求。

4. 活体检测，当前人脸检测算法容易检测出图像的非真实人脸，比如说照片上的人脸图像等，将这些人脸图像误判为人脸。



图 2-1 人脸的遮挡、不同表情、图像的质量、旋转等等都会影响人脸检测

人脸检测系统的相关的测试结果表明<sup>[22]</sup>：表情、姿态和光照是影响人脸识别准确度的三个最重要因素，其中姿态和表情是内在因素，可通过某些约束条件来降低它们对系统的影响；而光照变化是外在因素，特别是对于我们的驾驶环境存在多光照问题，自然环境光的变化无常很难控制，因此为提高系统检测精度，必须对人脸检测系统进行光照预处理。

本章主要研究复杂光照下人脸检测方法，采用光照模型和光照估计的方法对人脸图像进行图像预处理，提高检测器的识别准确度；之后介绍 Adaboost 学习算法基本原理、训练过程以及检测过程，并利用 Adaboost 分类器实现人脸检测，取得较好的效果。

## 2.2 复杂光照条件下人脸检测研究

光照问题一直以来都是人脸检测和识别中的一个非常重要而又难于解决的问题，是制约人脸识别系统性能的瓶颈，同时这也是计算机视觉领域普遍存在的问题。现有的各种识别算法都在一定程度上依赖光照情况，光线过亮、过暗或者照射不均匀等都会严重影响系统性能和识别率。世界各国的学者专家也纷纷针对光照处理进行研究，虽然提出了不少优秀的解决方案，但是实际效果还是不尽人意，还缺乏高效实用的光照处理算法。

### 2.2.1 光照与人脸

在成像过程中，物体的材质和光照的变化这两个重要因素会影响到最终成像结果。内在因素物体材质和外在因素光照条件的不同会使物体外观呈现出巨大的差异。同理，光照条件变化也会使得人脸图像呈现出巨大的差异。在对光照变化对人脸识别影响的深入研究下，Adini, Moses and Ullman<sup>[23]</sup>等研究了几种局部图像运算子，包括Gabor滤波器，局部描述滤波器和边缘图像，这些都被认为对人脸识别中的光照变化不敏感。总结有如下几条结论：1) 光照条件，特别是光照角度会严重改变面部外貌。2) 当比较未处理的图像时，不同光照下同一个人的不同图像之间的差异性会比不同人在相同光照下的图像差异性要大。3) 所有正在研究的局部滤波器对于克服光照角度变化差异性还不够。

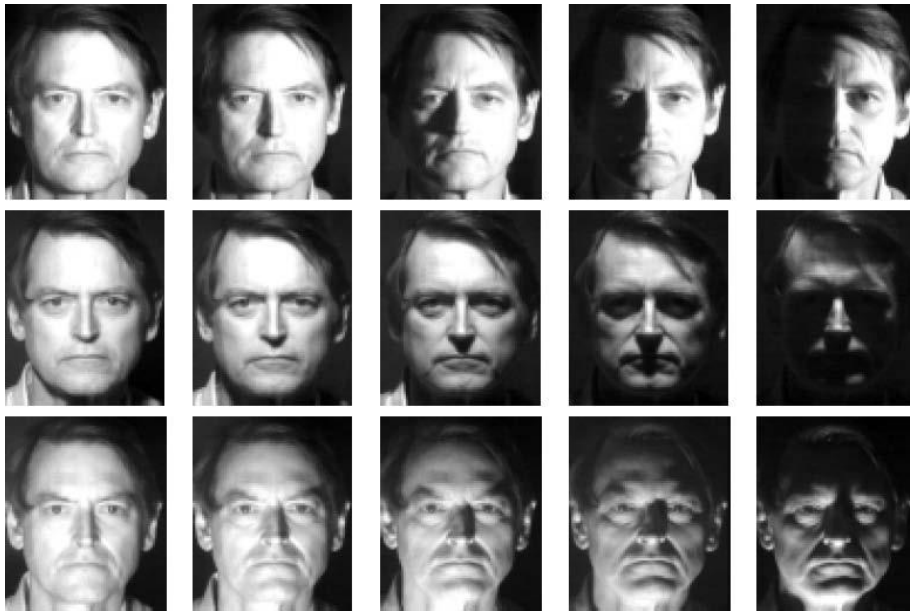


图 2-2 人脸图像受光照影响

由美国国防部资助发起的FERET( Face Recognition Technology )和FRVT( Face Recognition Vendor Test )人脸识别检测活动，推动了人脸识别相关技术的应用和研究。下图为FRVT2002对光照变化部分的测试结果，通过FERET测试评估表明，主流的人脸识别技术对于光照、姿态等非理想采集条件下的人脸识别的鲁棒性较差。FRVT2002的测试结果表明：目前的人脸识别商业系统的性能仍然无法很好地适应光照变化（特别是室外光照变化），光照的变化可以使人脸识别的正确率从90%下降到50%。如何解决光照变化对于人脸检测的影响问题仍然是人脸检测研究的重点之一。

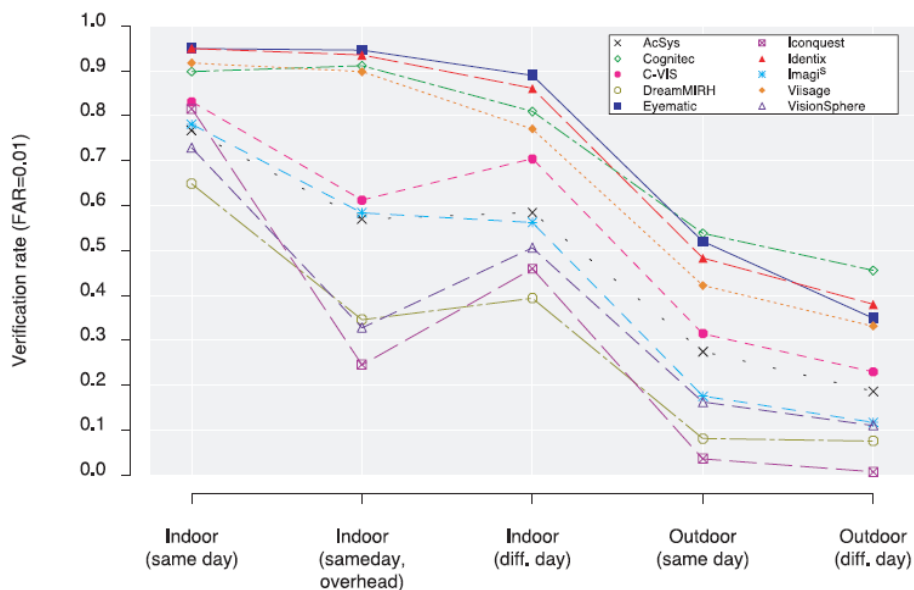


图 2-3 FRVT2002 中光照变化对人脸检测性能影响测试结果

上面我们从宏观上了解了光照对人脸识别的影响，下面我们接着从成像模型上，微观地探究光照对人脸图像的影响，以便对光照进行估计，进行光照补偿。为了研究模拟光照现象，去除光照变化影响，专家和学者对实际的光照条件进行数学建模，形成光照模型。目前在人脸检测识别领域中，应用最多最普遍的两种光照模型分别是基于局部光照模型的朗伯光照模型以及基于全局光照模型的辐照度模型。

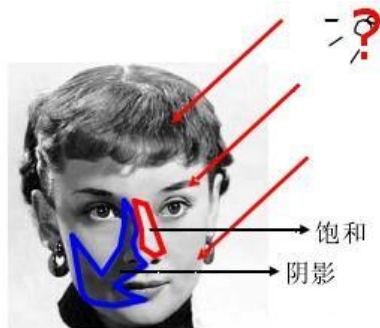


图 2-4 光照和人脸图像

### 1、基于局部光照模型的朗伯光照模型

在人脸检测识别算法当中，往往将光照条件假设为符合朗伯光照模型进行处理，大量的实验测试也表明朗伯光照模型确实能够较好地描述人脸图像成像模型<sup>[24]</sup>。

根据朗伯模型，在点光源下，一幅图像  $I(x, y)$  是如下形成的：

$$I(x, y) = \rho(x, y)n(x, y)s, \quad (2-1)$$

$\rho(x, y)$  是面部表面在点  $(x, y)$  的反射率， $n = (n_x, n_y, n_z)$  是3D空间表面法向量（单位行向量）， $s = (s_x, s_y, s_z)$  是光线方向（包含幅度的列向量）。这里反射率  $\rho(x, y)$  反映面部肤色和头发的光度特性； $n(x, y)$  是人脸的几何形状。影响人脸识别性能最重要的因素是与人脸表面法向量相关的入射光方向。 $\rho(x, y)n(x, y)$  的乘积是固定姿态下人脸内在属性，也是对

于人脸检测和识别唯一需要的东西。所以， $s$ 是外在属性，需要消除。

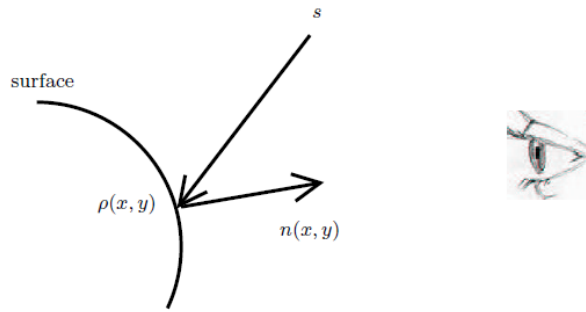


图 2-5 光照朗伯模型示意图

## 2、基于全局光照模型的辐照度模型

辐照度模型建立在朗伯光照模型基础上，定义  $R(x, y) = \rho(x, y)n(x, y)$ ， $L(x, y) = s(x, y)$ ，就可以得到基于全局光照模型的辐照度模型，如下式：

$$I(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y) \quad (2-2)$$

其中， $0 \leq R(x, y) \leq 1$  为物体表面  $(x, y)$  点的反射系数，主要是由物理内在属性比如说材质、形状等决定的，与外界光照条件无关； $L(x, y)$  表示  $(x, y)$  点的光照情况，包括周围环境光照以及直射物体的光线条件； $I(x, y)$  为图像像素点  $(x, y)$  的亮度或者灰度。

分析完光照模型后，我们发现光照问题可分解成两个问题：光照估计和光照补偿。光照估计是解决光照问题的第一步。光照处理算法主要分为三大类：基于图像处理技术的方法、基于光照子空间的方法以及基于成像模型的方法。当然这个分类也不是非常严格，三者有时也会有交叉。

## 2.2.2 人脸检测中光照问题研究概述

### 2.2.2.1 基于图像处理技术的方法

基于图像处理技术的方法利用图像处理相关方法提取光照鲁棒或者对光照变化不敏感的特征，从而减小光照影响。这类方法包括基本的图像处理技术，比如说边缘图、log变换、梯度、Gabor变换等。另外比如说直方图均衡化(Histogram Equalization, HE)、直方图规定化(Histogram Specify, HS)和Gamma灰度校正(Gamma Intensity Correction, GIC)<sup>[25]</sup>等灰度变换处理也被很多人脸识别算法作为光照预处理方法。最近还有一些更复杂的操作，比方说比率图(Ratio Image)<sup>[26]</sup>、自商图像(Self Quotient Image)<sup>[27][28]</sup>、图像梯度方向的概率分布<sup>[29]</sup>、相对梯度方法(Relative Gradient Edge)<sup>[30]</sup>和相位图(Phase Spectrum)<sup>[31]</sup>在一些测试数据上也表现了很好的效果。

### 2.2.2.2 基于子空间的方法

基于子空间的方法认为不同光照下的人脸图像分布映射在一个低维线性子空间，反之，利用这些线性子空间可以合成任意光照条件下的人脸图像，这种低维线性子空间可以通过统计学习等方法获得，人脸识别的过程就是要寻找与输入图像最相近的线性子空间过程。

Shashua等人<sup>[32]</sup>证明，在假设人脸成像模型满足朗伯光照模型并且图像不存在阴影区域

情况下，相同角度拍摄的不同光照条件下的三幅图像可以构成一个三维的线性子空间，利用三维的线性子空间可以合成任意光照条件下的图像。但是这种三维线性子空间模型过于简单，后面又出现了光照锥法、球面谐波函数等不同的子空间方法，发展到六维、九维等高维线性子空间。缺点是对样本要求很高、计算复杂。

### 2.2.2.3 基于成像模型的方法

基于成像模型的方法对引起图像变化的各个因素（内在因素和外在因素），比如人脸的本质特征和外在的成像条件分别建模，试图从图像中恢复人脸的本质特征。虽然从一幅图像恢复物体的形状和纹理是一个病态问题<sup>[33]</sup>，但如果我们有多幅输入图像，或将研究限制在人脸对象，结合人脸的先验知识<sup>[34]</sup>，就可以在在一定程度上实现该功能。人脸类的先验知识大多是人脸的几何形状和反射率在不同人脸之间变化较小。这些先验知识可以通过训练或增加限制得到。不同基于成像模型的方法表现在先验知识的表示和获取的不同，以及先验知识与后验知识（输入图像）的融合策略不同。

## 2.2.3 人脸检测中光照问题方法初探

汽车驾驶环境非常复杂，在白天可能由于太阳光直射，人脸图像会出现光照不均，部分区域曝光过度；在夜间，由于光线过暗，人脸图像对比度下降，这些都会严重影响人脸分割的准确度，从而影响疲劳检测系统的鲁棒性。要开发出一套实际有效的疲劳检测系统，必须解决光照变化带来的影响。在本节，我们探索解决或者减小光照问题对人脸检测准确度的影响。在实际测试中，主动近红外图像确实在一定程度上可以降低光照变化带来的影响，提高人脸检测准确度，有助于不可控光照条件下的人脸检测。因此我们采用了主动近红外图像传感器获取红外图像，再研究红外图像的光照估计方法，实现红外图像增强，从而降低光照变化对于整个系统的影响，提高系统的鲁棒性。

### 2.2.3.1 基于主动近红外图像的光照鲁棒处理

红外线最先由英国科学家 W.Herschel 在 1800 年发现，又称为红外热辐射。红外线的波长为  $0.75\sim 1000\ \mu\text{m}$ ，大于可见光波长。红外线按波长可分为三部分，即近红外光谱，波长为  $0.75\sim 1.50\ \mu\text{m}$  之间；中红外光谱，波长为  $1.50\sim 6.0\ \mu\text{m}$  之间；远红外光谱，波长为  $6.0\sim 1000\ \mu\text{m}$  之间<sup>[35]</sup>。人的眼睛只能看到很狭窄的一段辐射光谱，也就是可见光谱。而对于波长在  $0.4\ \mu\text{m}$  以下或  $0.7\ \mu\text{m}$  以上的电磁辐射，人眼是看不到的。物理学知识告诉我们，可见光和红外两个波段都适合成像，都可以用来做人脸检测。

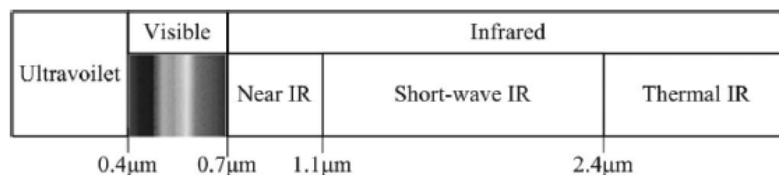


图 2-6 电磁波波谱

相关研究表明，近红外光谱成像对于光照变化条件要比可见光光谱成像鲁棒性要好，

由于利用了可控的光源，使光线尽可能均匀地照射到人脸上，另一方面，可以通过滤镜将不可控的可见光部分滤除，从而减小外界光照对系统的影响。主动近红外成像技术采用主动近红外光源，利用滤镜滤除红外意外光谱，通过红外感应 CCD 实现暗环境条件下的图像采集。下图是中科院 Li 等<sup>[36]</sup>拍摄的近红外人脸图像及对应的普通可见光人脸图像。

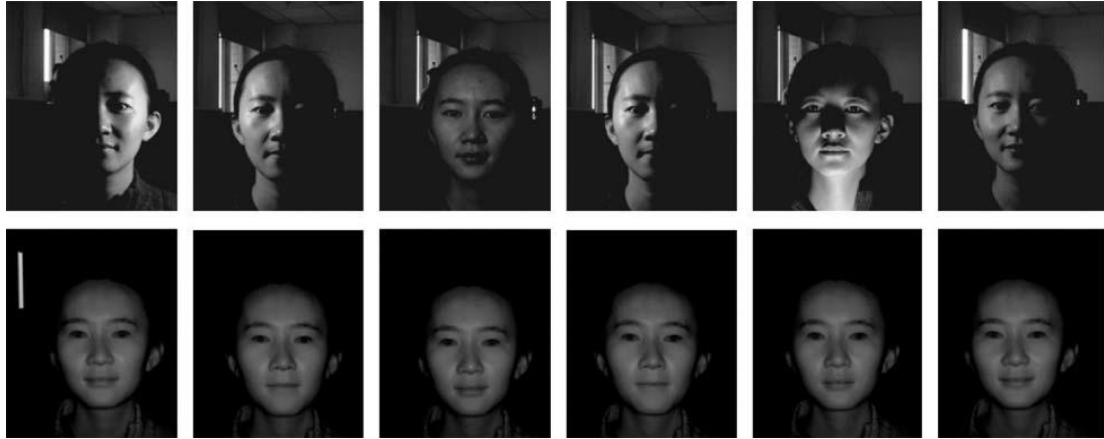


图 2-7 上面为可见光图像，下面为近红外图像

近红外图像的使用给人脸检测与识别带来了新的方向。Dowdall 等人<sup>[37]</sup>提出了一种基于近红外图像的人脸检测方法，通过分析脸部区域水平投影以及眼睛和眉毛在近红外上下频谱有不同的响应来检测人脸。Li 和 Liao<sup>[38]</sup>提出一种同态滤波预处理方法来减少不均匀近红外光以及通过分析人脸区域水平和垂直投影的人脸特征检测方法。Pan 等人<sup>[39]</sup>提出基于近红外图像人脸识别方法，其中高频谱图像时通过波长为  $0.7 \mu\text{m}$ - $1.0 \mu\text{m}$  中 31 个频带获取的；一些人脸采样点中肤色对于多频带光谱测量值被用于人脸识别；这些被证实在人与人之间差异明显。

在本论文中，我们采用主动近红外摄像头，工作波段为  $0.7 \mu\text{m}$ - $1.1 \mu\text{m}$ ，采集人脸红外图像，利用红外成像技术可以较好地克服光照变化影响，甚至可以在黑夜中正常成像，有助于开发夜间使用的疲劳检测系统。下图是我们实际采集的红外图像效果图。



图 2-8 实际采集红外图像效果

在本论文研究过程中，我们进行了多次红外图像采集与拍摄工作，拍摄上百张红外图像。通过对所采集红外图像的分析，发现主要表现为以下特点：



1. 图像整体显示灰度范围较小，图像整体偏暗；
2. 亮度分布不均匀，中间偏亮、呈扩散状渐暗、有图像亮度差较大的光晕出现；
3. 目标与部分背景亮度接近、对比度差、分割困难；
4. 边缘模糊、被监测目标细节难以辨认和识别、背景干扰噪声较大、图像特征信息不明确。

因为红外图像存在上述问题，另外由于太阳光中还存在较强的红外光成分，因此在强光照射下，红外图像仍然会出现光照不均等情况。因此还需要进一步对红外图像进行预处理，从而获取到光照鲁棒的高质量的人脸图像，为后面的算法打下良好的基础。

### 2.2.3.2 基于光照估计的近红外图像增强算法研究与比较

基于光照估计的近红外图像增强算法是实现目标分割很重要的预处理步骤，直接会影响到后面算法检测识别的鲁棒性。在这部分，我们将重点研究近红外图像增强算法，并且对这些方法进行简单的介绍和比较。

#### (1) 单尺度 Retinex 算法 (SSR)

人类视觉系统具有与光照条件几乎无关的感知彩色的能力，人们试图研究这种颜色恒常性现象。第一个描述人类视觉系统的颜色恒常性的理论是由 Land 和 McCann 提出来的<sup>[40]</sup>。称之为 Retinex 理论。

Retinex 是由 Retina (视网膜) 和 Cortex (大脑皮层) 两个单词组合的合成词。Retinex 理论解释了相同的物体在不同的光线底下颜色恒定性(Color Constancy)机理<sup>[41][42]</sup>。在 Retinex 模型当中，图像  $I(x, y)$  是由两部分组成的，一部分是物体的光亮亮度，对应于图像的低频部分，称之为亮度图像，用  $L(x, y)$  表示；另外一部分是物体的反射亮度，对应于图像的高频部分，称之为反射图像，用  $R(x, y)$  表示<sup>[43]</sup>。其中， $L(x, y)$  表示入射光， $R(x, y)$  表示物体的反射性质。如果我们从给定的原始图像中能够分离出来亮度图像和反射图像，就能通过改变亮度图像与反射图像之间的比例来达到图像增强的目的<sup>[44]</sup>。成像过程可以用下式表示：

$$S(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y) \quad (2-3)$$

入射光  $L(x, y)$  反映的是图像中像素能达到的动态范围，反射图像  $R(x, y)$  能够决定一幅图像的内在性质，反映的是物体内在属性，也就是抛开了入射光的性质获得物体的本来面貌，这个就是我们所要的增强图像<sup>[45]</sup>。

单尺度 Retinex 算法最初是由 Jobson 提出的<sup>[46]</sup>，Jobson 证明了高斯函数可以从已知图像  $S$  中很好地估计出亮度图像，由高斯函数与输入图像进行卷积得到近似的亮度图像，其表示为：

$$G(x, y) = k \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{c^2}} \quad (2-4)$$

其中  $k$  为归一化因子， $c$  是高斯函数的尺度参数。利用下式的简化运算可以得到输入图

像的反射图像，从而降低光照变化的影响。

$$r(x, y) = \log[R(x, y)] = \log \frac{S(x, y)}{L(x, y)} = \log[S(x, y)] - \log[S(x, y) \cdot G(x, y)] \quad (2-5)$$

下图所示是单尺度 Retinex (SSR) 的实验效果图。



图 2-9 单尺度 Retinex (SSR) 的实验效果图

### (2) 多尺度 Retinex 算法 (MSR)

多尺度 Retinex 算法 (MSR) 是在单尺度 Retinex 算法 (SSR) 基础上发展和延伸的，最初是由 Jobson 提出的<sup>[47]</sup>。单尺度 Retinex 和多尺度 Retinex 本质都是将高斯卷积函数与原始输入图像做平滑卷积来获得平滑图像，然后利用平滑图像估计亮度图像。它们都是在空域上进行运算。多尺度 Retinex 实质是将多个单尺度 Retinex 的结果进行加权求和，进行多尺度效果融合。

下图是多尺度 Retinex 算法 (MSR) 效果图，可以看到 MSR 比 SSR 运算复杂，但是效果相差并不大。也告诉我们，并不是越复杂的算法效果越好，还是需要看实际情况需要。



图 2-10 多尺度 Retinex (MSR) 的实验效果图

### (3) 单尺度自商图像 (SSQ)

自商图像最初是由 Wang .Li 和 Wang 提出的<sup>[48]</sup>。这种方法是商图像的扩展，与 Retinex 算法相似，它也是利用平滑核函数对输入图像进行卷积来估计亮度图像，利用输入图像与亮度图像的比值得到光照鲁棒的自商图像。计算公式如下：

$$Q(x, y) = \frac{I(x, y)}{F * I(x, y)} \quad (2-6)$$

其中， $I(x, y)$ 是输入图像， $F$  是平滑卷积核函数。在本论文中我们采用了低通高斯函数作为平滑核函数。

下图是单尺度自商图像（The single scale self quotient image）效果图。



图 2-11 单尺度自商图像（SSQ）效果图

#### （4）多尺度自商图像（MSQ）

多尺度自商图像（The multi scale self quotient image）同样也是 Wang .Li 和 Wang 提出的，与多尺度 Retinex 相似，多尺度自商图像实质是将多个单尺度自商图像的结果进行加权求和。

下图是多尺度自商图像（The single scale self quotient image）效果图。



图 2-12 多尺度自商图像（MSQ）效果图

#### （5）离散余弦变换（DCT）

基于离散余弦变换的光照归一化方法是由 Chen 等人提出的<sup>[49]</sup>。该算法的思路是，将图像进行离散余弦变换后，低频部分对应图像的亮度分量，反应的是光线变化部分。因此将 DCT 低频分量置零就可以得到光照鲁棒的反射图像，达到减小光照的影响。

下图是离散余弦变换（DCT）效果图。



图 2-13 离散余弦变换 (DCT) 效果图

### (6) 小波变换 (WA)

基于小波变换的光照归一化算法 (The wavelet based normalization technique) 首先是由 Du 和 Ward 提出的<sup>[50]</sup>。这个方法首先对输入图像进行离散小波变换, 然后处理得到的子带图像。它对小波系数矩阵进行加权, 对变换的相似系数进行直方图均衡化, 再利用反小波变换将独立的子带图像重建后得到归一化的图像。

下图是小波变换 (WA) 效果图。



图 2-14 小波变换 (WA) 效果图

### (7) 非局部均值法 (NLM)

非局部均值法 (The non-local means based normalization technique) 最先是 V. Struc 和 N. Pavešić 提出来的<sup>[51]</sup>, 算法最先用于图像的去噪处理, 一般的去噪方法都是基于局部均值估计来消除噪声干扰。而这种方法基于一种想法, 就是每个小的图像窗口都能找到与之相似的其他图像窗口, 利用这些窗口就可以进行去噪处理。

后面这种方法被应用于减小光照影响, 它的基本原理是计算原始图像  $I_n(x)$  的加权平均值作为去除光照影响新图像  $I_d(x)$  的像素值。如下式所示

$$I_d(x) = \sum_{x \in I_n(x)} \omega(z, x) I_n(x), \quad (2-7)$$

其中  $\omega(z, x)$  表示加权函数, 计算原始图像的空间位置  $z, x$  像素局部相似性, 在本文中, 我们使用的高斯模型来计算这种相似性。

下图是非局部均值法 (NLM) 效果图。



图 2-15 非局部均值法 (NLM) 效果图

#### (8) 直方图均衡 (HE)

直方图均衡 (histogram equalization) 又称灰度均衡化, 是常用的经典的图像增强方法, 通过某种灰度映射使输入图像转化为灰度直方图均匀分布的输出图像。在经过直方图均衡化处理后的图像中, 像素将占有尽可能多的灰度级并且分布均匀。因此, 这样的图像将具有较高的对比度和较大的动态范围。这种方法对于灰度分布集中, 对比度不高的图像处理非常有效。优点是原理简单, 容易操作实现, 缺点是容易放大背景噪声造成图像质量下降。

下图是直方图均衡化 (HE) 效果。



图 2-16 直方图均衡化 (HE) 效果

### 2.2.4 光照预处理方法总结

本节介绍了利用主动近红外图像相对于可见光图像在光照鲁棒性的优势, 以及基于光照估计的近红外图像增强算法, 分别采用单尺度 Retinex 算法 (SSR)、多尺度 Retinex 算法 (MSR)、单尺度自商图像 (SSR)、多尺度自商图像 (MSR)、离散余弦变换 (DCT)、小波变换 (WA)、非局部均值法 (NLM)、直方图均衡 (HE) 等图像处理方法对红外人脸图像进行光照估计, 从而获得对光照鲁棒的红外人脸图像, 为后面的检测识别算法打下良好的基础。

下图是实际测试红外图像的增强算法效果图。



图 2-17 测试 1 (原图、SSR、MSR、SSQ、MSQ、DCT、WA、NLM、HE)



图 2-18 测试 2 (原图、SSR、MSR、SSQ、MSQ、DCT、WA、NLM、HE)

从测试数据中，我们可以看到各种图像增强方法各有优势，也有其缺点和适用的范围。另外还需要结合后面人脸检测识别算法提取特征特点，选择合适的图像光照预处理的方法。后面的检测算法是基于脸部灰度特征的，因此光照预处理的一个基本原则是尽可能地在不同光照变化下对光照进行估计，保持脸部内在灰度特征，从而提高检测的准确度。另外，系统在嵌入式平台上实现，对于算法复杂性和运算速度都有一定的要求。从测试图像可以看出，红外图像的灰度分布相对可见光来说比较均匀，因此直方图均衡化虽然简单，但是处理效果有限。而基于 Retinex 颜色恒常性理论能够较好的减小光照影响，但是图像对比度不高，容易产生光晕等现象。从实际测试上看，基于商图像的方法可以较好的去除光照影响，保持脸部内在的灰度特征，但是缺点的利用到浮点运算，运算量比较大，对运算处理能力要求比较高。

## 2.3 基于 Adaboost 的人脸检测

利用主动红外摄像头采集红外人脸图像后，对红外图像进行光照预处理，得到光照鲁棒的红外人脸图像后，我们进一步需要检测人脸，从红外图像中分割出人脸，以便进一步对人脸特征进行提取。人脸的检测与定位是驾驶员疲劳检测中的第一步，为下一步定位人眼位置和识别驾驶员疲劳状态打下基础。本节主要介绍基于类 Haar 矩形特征的 Adaboost 学习算法进行人脸检测定位。

### 2.3.1 Adaboost 算法概述

1995年，Freund和Schapire提出了AdaBoost 算法<sup>[52]</sup>。AdaBoost全称Adaptive Boosting，自适应Boosting算法，它可以根据弱学习的反馈适应性地（adaptively）调整假设的错误率，高效实用，被应用在各种不同的应用范围。

Adaboost是一种比较有特点算法，利用的是一种迭代思想，对同一数据集训练不同的弱分类器，再将这些弱分类器进行加权求和，构造高识别度的强分类器。它有如下几点特点：1) 每次迭代改变的是样本的分布，而不是重复采样；2) 每次进行迭代训练样本分布情况都会改变，已经正确分类的样本分布权值变低，未正确分类样本分布权值加大；3) 最终的结果是弱分类器的加权组合，权值表示该弱分类器的性能。

总的来说Adaboost算法具有如下优点：1) Adaboost是一种有很高精度的分类器；2) 可以利用各种特征提取方法构建简单子分类器，利用Adaboost算法将这些分类器进行级联，构造强分类器；3) 当使用简单分类器时，计算出的结果是可以理解的，而且弱分类器构造极其简单；4) Adaboost算法即使训练次数很多，也不会出现过拟合的问题；5) 随着训练迭代次数增加，分类器识别错误率会逐渐下降。因此，AdaBoost 算法在提出后被广泛应用，已经成为机器学习领域经典算法。

### 2.3.2 Adaboost 算法的训练过程及检测过程

本论文人脸检测分类器采用的是 Viola-Jones 分类器<sup>[53]</sup>，它首先是由 Paul Viola 和 Michael Jones 设计的。Viola-Jones 分类器在级联的每个节点中使用 Adaboost 来学习一个高检测率低拒绝率的多层树分类器。它使用类 Haar 矩形特征作为输入，利用积分图像技术加速矩形图像值的计算，训练各个弱分类器，最后将弱分类器节点组成筛选式级联方式。

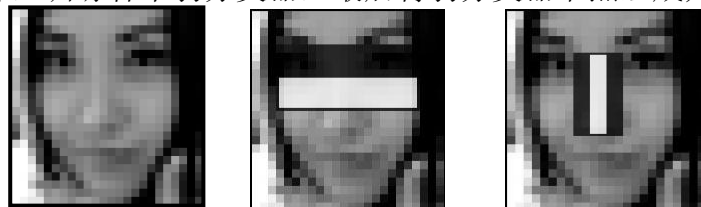


图 2-19 矩形特征在人脸上的特征匹配

在实际训练的时候，我们采用的是计算机视觉库 OpenCV 里面自带的基于类 Haar 特征的 Adaboost 训练器进行训练。在 OpenCV 里面进行 Adaboost 训练，总体上包括 3 步：1)

准备正负样本；2)用 CreateSamples 程序建正样本集；3)用 HaarTraining 程序训练，得到最终的分类器模型（xml 文件）。训练过程中可以人为地设置一些参数使得整个分类器达到我们需要的准确率，参数包括分类器的层数，每一层的误检率，选择的特征以及正负样本数等等。训练过程流程图如下图所示：

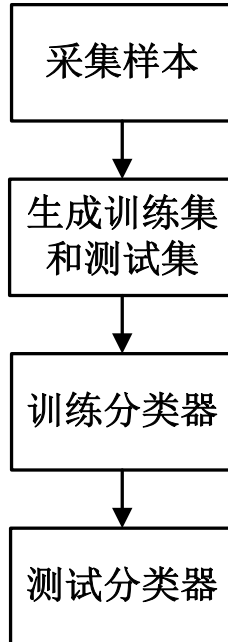


图 2-20 训练程序流程图

下图是 Adaboost 训练过程的部分截屏：

```
管理员: C:\Windows\system32\cmd.exe
e:\OpenCU\bin\eye>haartraining.exe -data data -vec e:/OpenCU/bin/eye/positive.v
ec -bg e:/OpenCU/bin/eye/neg/bg.txt -npos 124 -nneg 150 -nstages 5 -nsplits 2 -m
em 512 -nonsym -w 50 -h 35
Data dir name: data
Vec file name: e:/OpenCU/bin/eye/positive.vec
BG file name: e:/OpenCU/bin/eye/neg/bg.txt
Num pos: 124
Num neg: 150
Num stages: 5
Num splits: 2 (tree as weak classifier)
Mem: 512 MB
Symmetric: FALSE
Min hit rate: 0.995000
Max false alarm rate: 0.500000
Weight trimming: 0.950000
Equal weights: FALSE
Mode: BASIC
Width: 50
Height: 35
Max num of precalculated features: 326563
Applied boosting algorithm: GAB
Error (valid only for Discrete and Real AdaBoost): misclass
Max number of splits in tree cascade: 0
Min number of positive samples per cluster: 500
Required leaf false alarm rate: 0.03125
```

下图是 OpenCV 自带的基于 Haar 特征训练方法流程图。



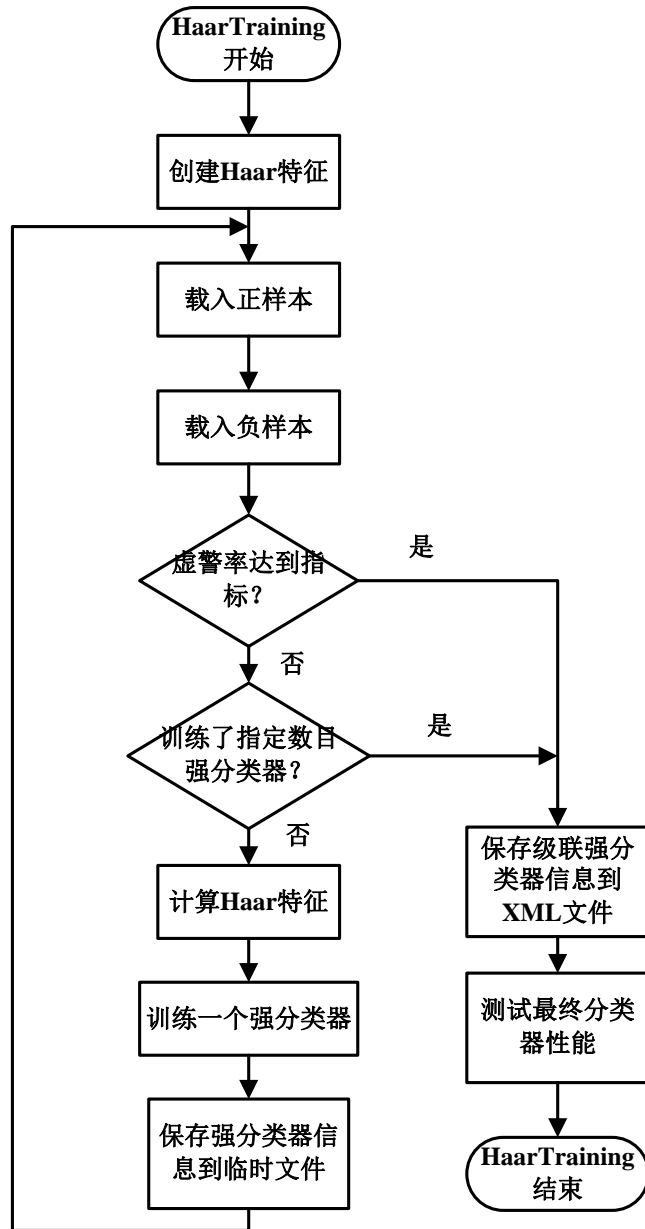


图 2- 21 HaarTraining 训练流程

### 2.3.2.3 Adaboost 检测过程

Adaboost 检测过程就是通过加载分类器，根据训练所得到的分类器特征对输入图像进行检测。检测时根据训练得到的 AdaBoost CARTHaarclassifier 中的级联分类器进行检测，使各个备选区域依次通过级联分类器，只有到达最后一个分类器可能目标窗口进入最后的疲劳检测阶段，否则就淘汰。检测过程流程图如图所示：

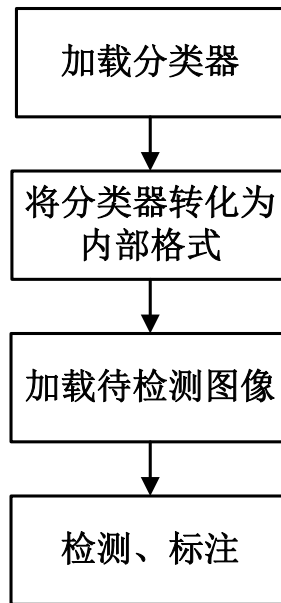


图 2-22 检测过程流程图

### 2.3.3 实验结果与分析

通过实验测试发现，Adaboost 算法对于光照变化下检测准确度还是比较高的，在 50 组测试图像中，只有一组检测错误，识别正确率超过 95%，平均识别运算时间大概在 30 多 ms 内，满足实时性要求。

下图是实验测试效果图：





图 2- 23 Adaboost 人脸检测实验测试图

## 2.4 本章小结

本章主要介绍复杂条件下特别是复杂光照条件下人脸检测方法，首先阐述了人脸检测中的光照问题，提出人脸检测中光照问题硬件和软件算法的解决方法，首先在硬件上使用主动近红外摄像头，利用红外主动光源，减小在驾驶环境下可见光变化的影响，提高系统的光照鲁棒性。另一方面在软件算法上，对比和利用各种光照估计方法，对红外图像进行光照预处理，增强红外图像，为后面的检测识别算法提供良好的光照鲁棒的红红外人脸图像。最后，我们介绍了基于 Adaboost 学习算法的人脸检测方法，包括基本原理、训练过程和检测过程，并对实际采集的红外图像进行人脸检测，识别率超过 95%，处理时间大约为 30 多 ms，满足系统识别率高和实时性好的要求。

## 第三章 复杂驾驶条件下人眼检测和状态识别

### 3.1 引言

本章主要研究在检测识别出复杂背景下驾驶员脸部区域后，如何定位人眼和识别人眼状态。由于人眼的状态是疲劳判断的显著标志，在处于疲劳状态时，驾驶员能表现出各种疲劳现象，其中包括人眼眨眼频率变低或长时间处于闭眼状态，这些可以通过检测眼睛的睁闭状态进行统计分析，来判断是否疲劳。眼睛定位十分重要，因为眼睛定位是眼部状态识别的第一步，只有找到眼睛位置后，才有可能通过其闭合程度和频率判断驾驶员疲劳状态。本章主要研究了基于 Adaboost 的眼睛检测定位方法以及基于人脸三庭五眼比例特征人眼检测方法，并对实验测试结果进行分析。最后我们介绍了眼睛特征提取以及眼睛状态识别的方法，对现有的几种人眼状态识别方法进行比较，统计识别正确率，并讨论了算法中重要参数对人眼状态识别率的影响。

### 3.2 复杂驾驶条件下人眼检测定位方法研究

#### 3.2.1 眼睛检测定位方法综述

眼睛定位是较难的研究课题，在整个脸部区域检测人的眼睛是困难的，因为人的眼睛的面积比例比较小，另外由于人脸区域眉毛、眼镜等干扰也会造成眼睛定位算法的错误识别。因此目前还没有可以适应所有情况的人眼检测定位方法，一般根据实际情况进行选择。目前眼睛区域检测定位方法大致可以分为以下几类：

基于特征的定位方法<sup>[54][55]</sup>：该类方法主要是根据眼睛的几何位置、边缘信息、灰度情况、颜色信息等特征来定位眼睛。该类方法原理简单易行。

基于模板匹配的定位方法<sup>[56]</sup>：利用数据库里面眼睛标准模板与输入图像进行匹配，计算两者之间的相关性，利用高相关性定位人眼。

基于变换的定位方法：如小波变换的方法<sup>[57]</sup>、基于对称变换的方法<sup>[58]</sup>等。通过某些变换函数，利用变换下眼睛特征增强眼睛区域，从而更容易检测出人眼。

驾驶员疲劳度检测系统对实时性要求很高，但是其中的基于模板和变换的方法速度较慢，不太适合应用在实时系统中。因此本文主要研究基于特征的人眼定位方法。

#### 3.2.2 基于 Adaboost 的眼睛检测定位方法

由于人脸图像中眼睛区域灰度特征有别于其他区域，因此从人脸图像中可以提取 Haar 特征模板，将人眼样本作为正样本，非人眼样本作为负样本，训练人眼检测分类器。检测

时，加载人眼分类器，对输入图像进行特征搜索，找到人眼位置<sup>[59]</sup>。



图 3-1 人眼 Haar 特征

在上一章已经介绍了 Adaboost 学习算法的基本原理、训练过程和检测过程，这里就不重复介绍了。

下面是基于 Adaboost 学习算法的眼睛检测定位方法部分效果图。

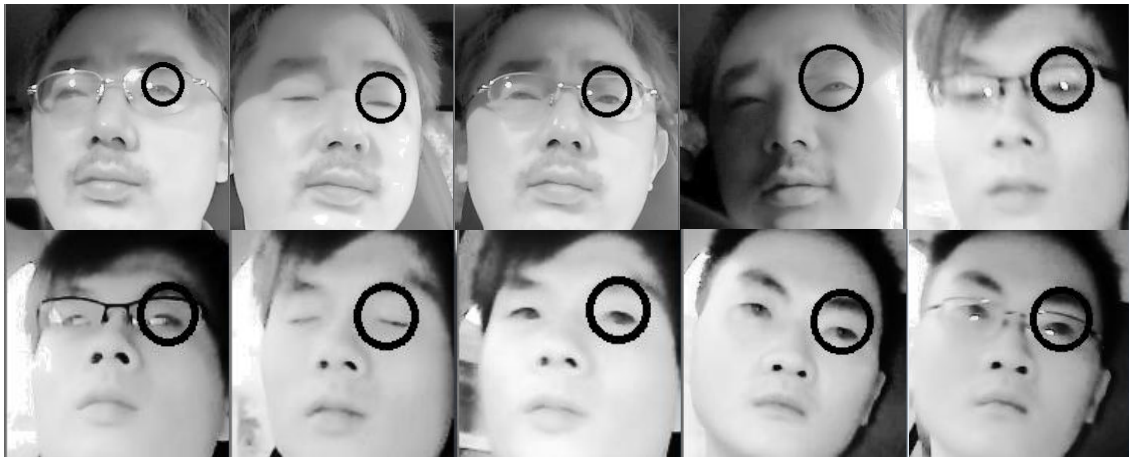


图 3-2 基于 Adaboost 的眼睛检测定位方法效果图

从测试结果上看，基于 Adaboost 的人眼检测方法检测准确度还是比较好的，对于人脸倾斜较小角度情况下还能较好地识别人眼。在我们实际测试中利用的是 OpenCV 里面现有的训练好的人眼分类器，现有的分类器在检测过程中，还存在一些问题，比如说对于眼睛闭合情况容易遗漏，而且容易将嘴部区域判断为人眼区域，眼镜反射也会影响到检测准确度。

### 3.2.3 基于人脸三庭五眼比例特征人眼检测定位方法

在日常生活中我们知道有个衡量脸型是否美观的传统标准“三庭五眼”比例，正常人脸的各个部位具有一定的比例关系，这种比例关系在人与人之间具有些许差异，但是在我们的算法不需要太精确的情况下，可以假设这一比例变化不大。因此可以在人脸区域利用这种比例关系分割出人眼区域。在本文中，我们在人脸区域的竖直方向和水平方向各设置一定比例定位人眼区域。

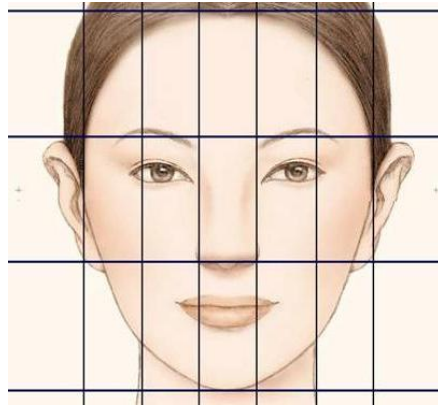


图 3-3 人脸三庭五眼比例特征

下面是基于人脸三庭五眼比例特征人眼检测定位方法效果图。





图 3-4 基于人脸三庭五眼比例特征人眼检测定位方法效果图

从实际测试效果上来看，基于三庭五眼特征的人眼检测方法算法简单，运算量比较少，能较好地分割出人眼区域，对于人眼闭合情况也能较好地检测出来，由于是利用人脸各部分的比例特征进行分割，因此对于光照不均以及眼镜反射等问题，这种方法检测准确度较好。但是在人脸倾斜角度比较大情况下，人眼检测定位分割的效果较差。

### 3.3 复杂驾驶条件下人眼状态识别方法研究

#### 3.3.1 眼睛状态识别方法概述

在检测和定位人眼后，需要进一步提取人眼特征，识别人眼状态，判断人眼的睁开与闭合，目前已经提出了不少关于眼睛状态识别方法，这些方法可以分为两大类：基于图像特征的人眼状态识别以及基于统计学习的人眼状态识别。

##### (1) 基于图像特征的人眼状态识别

**模板匹配法：**利用开眼模板和闭眼模板与未知状态的眼睛图像进行相关性计算，通过相似性来判断未知眼睛状态。

**眼睑曲率法：**我们知道，在睁眼情况下，上眼睑边缘会向上弯曲，呈现凸形抛物线形状；而在闭眼情况下，上眼睑边缘会向下弯曲，呈现凹形抛物线形状。因此可以利用上眼睑曲率来进行眼睛状态判断。

**眼睛面积法：**睁眼情况下的眼睛面积会大于闭眼情况下的眼睛面积。定义  $S(t)$  为眼睛面积，它随时间的变化而变化； $m_{左}$ 、 $m_{右}$ 、 $M_{左}$ 、 $M_{右}$  分别是算法初始化时左、右眼眼睛面积的最小值和最大值。

$$P_{左}(t) = \frac{S_{左}(t) - m_{左}}{M_{左} - m_{左}} \quad (3-1)$$

$$P_{右}(t) = \frac{S_{右}(t) - m_{右}}{M_{右} - m_{右}} \quad (3-2)$$

$$P(t) = \frac{1}{2} [P_{左}(t) + P_{右}(t)] \quad (3-3)$$

计算  $P(t)$  值，如果  $P(t)$  大于 0.5 就判断为睁眼状态，反之则判断为闭眼状态。

**Hough 变换方法：**Hough 变换可以用来检测图像中的类圆物体，我们知道眼睛睁开的时候，可见部分的眼珠近似为圆形，因此可以利用 Hough 变换对人眼图像进行检测，如果检测到有圆形存在，则判断眼睛为睁开状态。

## (2) 基于统计学习的人眼状态识别

此类方法利用模式识别和机器视觉领域里的统计学习算法，对人眼样本和非人眼样本提取特征，再使用各自的特征构建人眼状态分类器，最后采用特定的分类器完成人眼状态识别。基于统计学习的人眼状态识别方法主要有：Fisher 法、特征眼、神经网络、SVM 和 HMM 等方法<sup>[60]</sup>。

综上所述，两大类方法都各有优势和缺点。基于图像特征的人眼状态识别利用的是图像的底层特征，提取方便，运算简单、处理速度快，但是识别正确率并不高。基于统计学习的人眼状态识别方法提取特征，利用分类器进行大量特征学习，识别准确率高，速度快，但是需要采集大量样本数据进行训练，训练过程相对复杂，计算量大。

下面我们将对现有的多种眼睛状态识别方法进行研究和比较，分析各种方法识别准确率和特点。

### 3.3.2 基于上眼睑曲率的眼睛状态识别

我们知道人眼睁开时，上眼睑向上弯曲，曲率为正；而在闭合时，上眼睑基本呈扁平状，曲率基本为零。因此可以通过提取人眼的上眼睑，通过计算上眼睑的曲率来判断当前人眼状态。

上眼睑曲率提取过程：

#### (1) 边缘检测

边缘对应于图像中灰度剧烈变化的地方，是图像的重要特征之一，边缘检测是图像处理中常用的方法之一，边缘特征包括灰度变化率以及变化方向。常用的边缘提取算子主要是利用边缘灰度的一阶导数最大、二阶导数过零点等来提取边缘点，常见的有 Sobel 算子、Prewitt 算子、Canny 算子、Laplace 算子等。

在大部分的文献里面用到的是 Sobel 算子，但是在实际测试过程中发现，由于红外图像的对比度不是很强，对导致上眼睑边缘中间会出现较多的断点，不连续，这个对于后面的曲率计算会产生影响。因此我们选用了能较好保持边缘连续性的 Canny 算子，提取的效果较好，缺点就是相对于 Sobel 算子运算复杂性提高了。

#### (2) 上眼睑轮廓提取<sup>[61]</sup>

由于上眼睑基本上位于眼睛边缘图像的最上部，我们分别按列扫描图像取出图像中每列的最上面的边缘点，即为上眼睑，从而实现上眼睑轮廓的提取。

下图是上眼睑边缘轮廓的提取效果图：



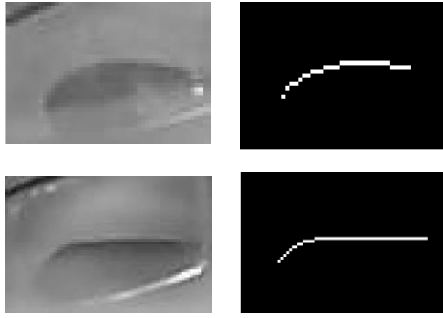


图 3-5 上眼睑边缘轮廓

### (3) 中点和边界点提取

提取上眼睑的边界点以及中点。



图 3-6 提取上眼睑中点

### (4) 计算曲率

平均曲率的计算公式为：

$$\bar{k} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta s}$$

其中  $\Delta\varphi$  表示曲线段切线变化的角度， $\Delta s$  为弧长。

该公式计算量很大，容易受到噪声干扰，影响整个系统的速度和识别准确率，因此我们需要将这个公式进行近似。如下图所示，我们将眼睛睁开和闭合近似为图中的圆弧，当圆弧中的点 A、B、C 等间隔选取时，使用如下公式来计算近似圆弧曲率：

$$\bar{K} = \frac{BD}{AC}$$

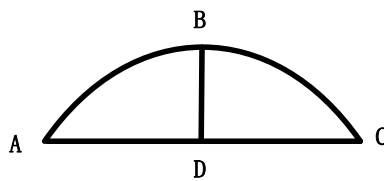


图 3-7 近似圆弧

### (5) 阈值判断

我们知道眼睛睁开和闭合时上眼睑曲率和弯曲的方向都会不一样，利用这样的特征我们就可以进行眼睛状态识别。当计算得到眼睑曲率后，就可以利用曲率跟阈值比较后做出判断。在实际眼睛状态识别过程中，如果上眼睑曲率大于某个阈值则判断当前输入的人眼状态为开眼，反之则判断为闭眼状态。

下面是基于上眼睑曲率的眼睛状态识别方法识别正确率的统计数据。

表 3-1 基于眼睑曲率的眼睛状态识别方法识别正确率

曲率阈值	睁眼样本 (124)			闭眼样本 (130)		
	正确数	错误数	正确率 (%)	正确数	错误数	正确率 (%)
0.114	113	11	91.1	105	25	80.7
0.115	112	12	90.3	107	23	82.3
0.116	112	12	90.3	109	21	83.8
0.117	101	13	81.5	110	20	84.6
0.118	109	15	87.9	112	18	86.1

这个方法最重要的参数就是曲率的阈值选择。下面是我们对曲率阈值选择对人眼状态识别正确率的统计。

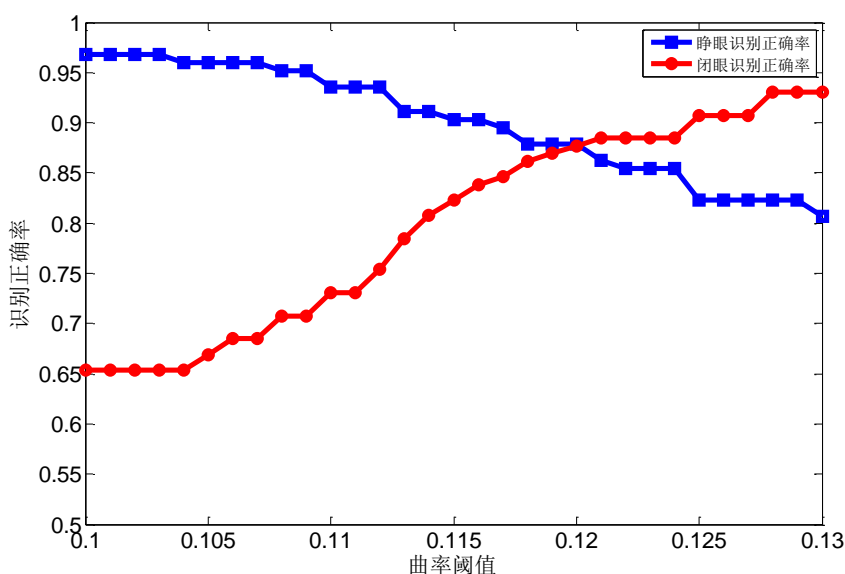


图 3-8 基于上眼睑曲率的眼睛状态识别方法识别正确率

从测试数据上看，基于眼睑曲率的眼睛状态识别方法简单，正确率也比较高，当曲率阈值选择为 0.12 时，睁眼识别正确率为 87.9%，闭眼识别正确率为 87.7%。在 Matlab 上面进行测试，平均识别时间为 11ms。

### 3.3.3 基于分段上眼睑曲率的眼睛状态识别

这种方法与上面基于眼睑曲率的眼睛状态识别方法类似，基本的步骤相同，分别是提取上眼睑轮廓，计算轮廓曲率，比较判断。主要区别有两点，(1) 眼睑曲线的拟合，眼睑曲线原先利用提取的边缘曲线，而这里利用的是三阶多项式对眼睑曲线进行拟合。(2) 曲率的计算，前面的方法考虑的是上眼睑的整体特性，只计算一次曲率，而本方法是将眼睑曲线分成若干段，再分别计算这几段的曲率，将这些曲率进行求和后，作为判断眼睛状态参数。

下面是上眼睑轮廓曲线拟合效果图。

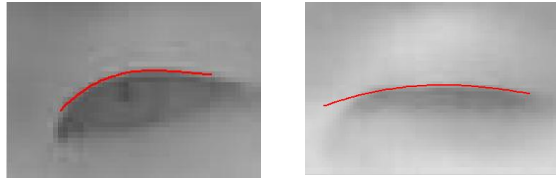


图 3-9 上眼睑轮廓曲线拟合

从测试图上看，这种方法还是能比较好的提取上眼睑并且进行曲线拟合。  
下图是上眼睑边界点提取的效果图。

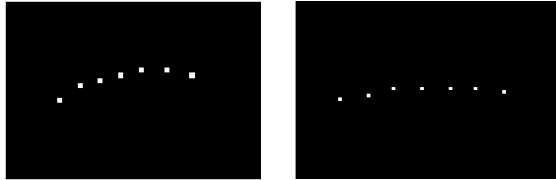


图 3-10 上眼睑边界点提取

分段曲率求和阈值是这种方法的一个重要参数，下面是该参数对于人眼状态判断正确率的测试数据统计以及曲线图：

表 3-2 基于分段上眼睑曲率的眼睛状态识别方法识别率

曲率阈值	睁眼样本（124）			闭眼样本（130）		
	正确数	错误数	正确率（%）	正确数	错误数	正确率（%）
0.12	108	16	87.1	64	66	49.2
0.13	107	17	86.3	75	55	57.7
0.14	107	17	86.3	81	49	62.3
0.15	105	19	84.7	94	36	72.3
0.16	99	25	79.8	106	24	81.5

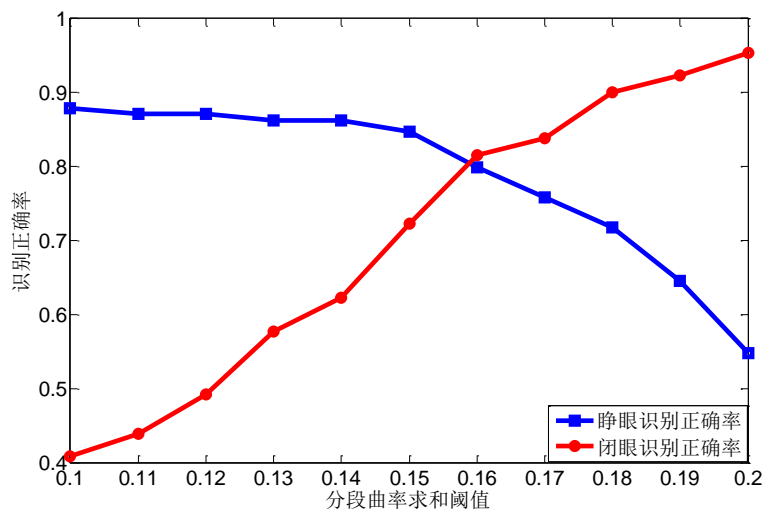


图 3-11 基于分段上眼睑曲率的眼睛状态识别方法识别率

从测试数据上我们可以看到，基于分段眼睑曲率的眼睛状态识别方法简单，正确率也比较高，当曲率阈值选择为 0.16 时，睁眼识别正确率为 79.8%，闭眼识别正确率为 81.5%。在 Matlab 上面进行测试，该方法识别时间为 12ms。实际测试结果并没有比前面基于整段

眼睑曲率的方法要好，尤其是对于闭眼样本容易产生误判，可能是因为利用三阶曲线进行拟合，导致眼睑曲线产生误差，而且曲率是分段计算求和的，容易累加误差。

### 3.3.4 基于椭圆拟合的人眼状态识别

由于，人眼轮廓与椭圆非常近似，椭圆具有长短轴、朝向角、中心坐标等参数，因此在描述平面图形形位信息方面具有很好的优势，我们可以借助椭圆的这些参数人眼轮廓的形位信息进行定量描述。我们知道人眼在睁开状态下的圆形度要高于闭眼状态下的，如下图所示，通过对人眼进行椭圆拟合，然后判断椭圆长半轴以及短半轴的比例关系可以作为人眼状态判断的参数。



图 3-12 人眼轮廓与椭圆非常近似

下面是眼睛椭圆拟合实验效果图：

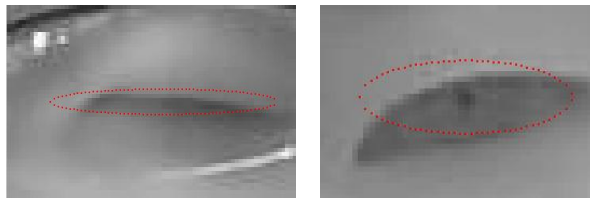


图 3-13 上眼睑轮廓曲线拟合

在这个方法中长半轴与短半轴比值是一重要参数，下面是该参数对于识别正确率的数据统计及其曲线图：

表 3-3 基于椭圆拟合的人眼状态识别方法识别率

b/a	睁眼样本（124）			闭眼样本（130）		
	正确数	错误数	正确率（%）	正确数	错误数	正确率（%）
0.21	117	7	94.3	75	55	57.7
0.22	112	12	90.3	87	43	66.9
0.23	105	19	84.7	92	38	70.8
0.24	102	22	82.3	100	30	76.9
0.25	99	25	79.8	104	26	80.0

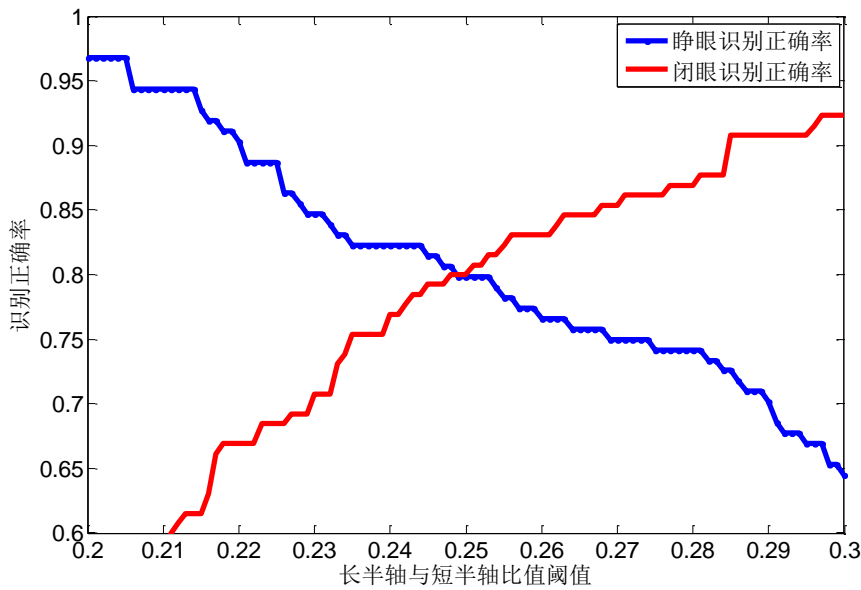


图 3-14 基于椭圆拟合的人眼状态识别方法识别率

从测试数据上我们可以看到，当长半轴与短半轴比值阈值选择 0.25，睁眼和闭眼识别率为大概在 80%。在 Matlab 上面进行测试，该方法识别时间大约为 10ms。

### 3.3.5 基于水平投影及比例特征的人眼状态识别

我们知道，人眼在睁开状态下，进行水平直方图投影，投影高度比较大，当闭眼时水平投影高度比较小。传统的基于水平投影方法的人眼状态识别正是根据这个特点，方法简单，但是算法准确度并不高。因此我们需要进一步改进，我们发现，当人眼睁开时，水平投影直方图高度比较宽外，而水平宽度比较短；相反，当人眼闭合时，水平投影直方图高度比较窄外，而水平宽度比较长。因此，根据睁眼水平投影直方图宽而短，闭眼水平投影直方图窄而长的特点，本文对水平投影算法进行改进，加入了投影的比例特征，进行人眼识别。

下面我们对基于水平投影及比例特征的人眼状态识别方法过程进行具体介绍。

#### (1) 人眼图像二值化

将人眼灰度图像进行阈值分割。在实际测试这个方法的过程中，发现二值化的阈值选择非常重要，由于人眼眼镜、反光等影响会造成人眼二值化效果比较差，导致睁闭眼投影以及比例特征并不明显。人眼的灰度相对于人眼周围其他区域灰度要低许多，因此使用固定阈值在大部分环境下可以比较好的分割出人眼。下面是人眼图像二值化效果图。



图 3-15 人眼图像二值化效果

### (2) 直方图投影

在得到人眼二值化图像后，进一步进行水平直方图投影，水平投影效果图如下图所示，根据水平直方图投影特点，计算投影图中的垂直高度  $d$ （即水平投影中，直方图中纵坐标最大值）和水平宽度  $k$ （即水平投影中，直方图值不为零的横坐标最大值和最小值之差）。在实际实验发现，有可能在人眼图像中会出现眉毛或眼镜的干扰，这时候我们假设人眼是在图像中间部分，将图像边界的黑色色块干扰去除。

下图是睁眼和闭眼图像直方图投影。

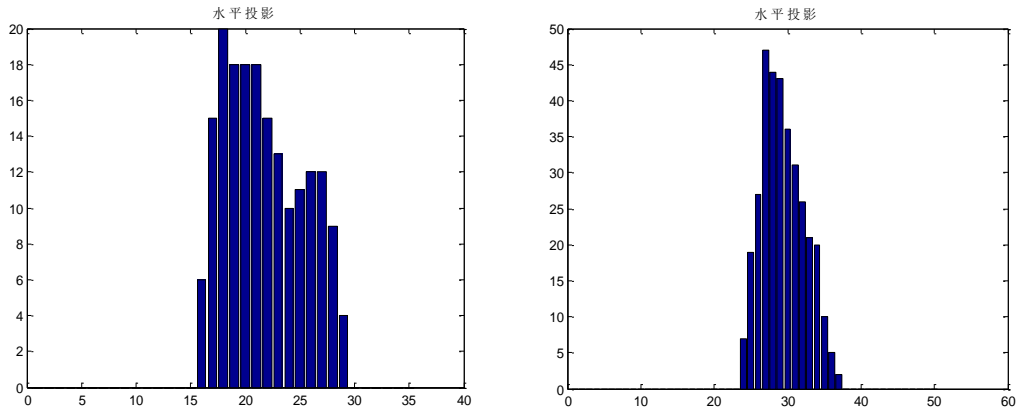


图 3-16 左图是睁眼图像直方图投影，右图是闭眼图像直方图投影

### (3) 状态识别

根据人眼投影的垂直高度  $d$  和水平宽度  $k$  判断人眼状态。判断方法是：当水平投影的高度  $d > 6$  时，将此幅图像判断为睁开状态，如果不是，将进一步判断垂直高度  $d$  和水平宽度  $k$  的比值，如果比值大于某个阈值，只判断为睁眼，否则为闭眼。

通过上述方法，我们得到比较理想的人眼状态识别效果。下面是阈值选择和及其影响人眼状态识别正确率的统计及其曲线图：

表 3-4 基于水平投影及比例特征的人眼状态识别方法识别率

高度/宽度	睁眼样本 (124)			闭眼样本 (130)		
	正确数	错误数	正确率 (%)	正确数	错误数	正确率 (%)
4	98	26	79.0	119	11	91.5
5	103	21	83.4	109	11	91.5
6	106	18	85.5	116	14	89.2
7	108	16	87.1	104	26	80.0

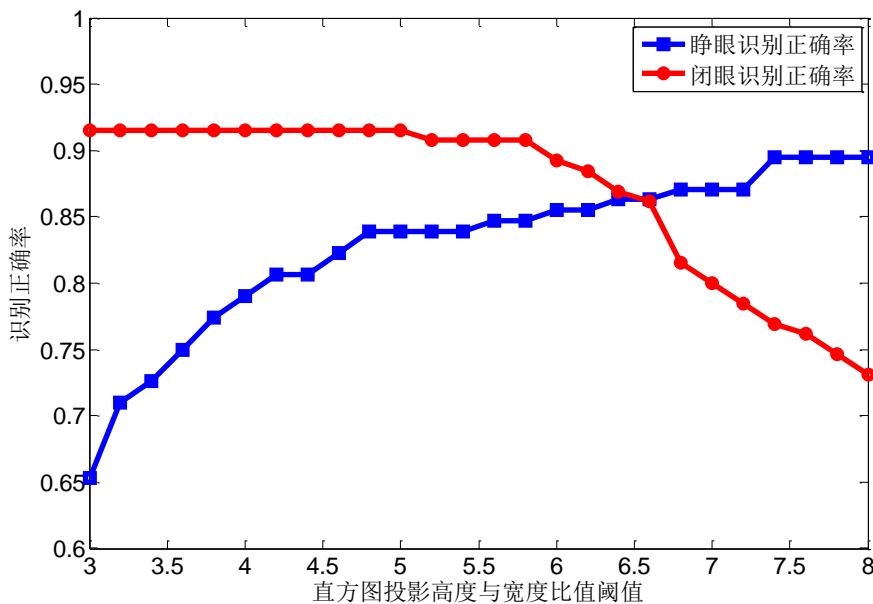


图 3-17 基于水平投影及比例特征的人眼状态识别方法识别率

从测试数据上我们可以看到，这种方法对于闭眼的识别率是比较高的，该方法对于睁眼和闭眼识别率比较理想。当直方图投影高度与宽度比值阈值选择为 5.6 时，睁眼和闭眼样本识别正确率分别达到了 85%和 91%。

### 3.3.6 判断黑色像素比例进行人眼状态识别

该方法判断的依据是当睁眼时，人眼区域的黑色像素比例会大于闭眼的情况。该方法关键的问题在于人眼图像的二值化，能否正确地分割人眼直接影响到识别准确度。在测试过程中发现使用固定阈值会比较好。

下面是人眼图像二值化效果图：



图 3-18 人眼图像二值化效果

实际测试发现这种方法虽然简单，处理时间较快，但是识别准确度并不高，容易受到光照影响。黑色像素比例阈值为 0.148 时，睁眼识别正确率为 76.6%，闭眼识别正确率为 65.4%。

### 3.3.7 人眼状态识别方法结果分析

本节主要是对各种复杂驾驶条件下人眼状态识别方法进行详细介绍，通过实际测试数据统计和比较，以识别正确率和处理时间为衡量指标，各种人眼状态识别方法再处理时间上相差并不大，但是在识别正确率上各有优势，基于眼睑曲率的人眼状态识别方法对于睁眼闭眼样本识别正确率比较高，睁眼识别正确率为 87.9%，闭眼识别正确率为 87.7%；基于

椭圆拟合的人眼状态识别方法识别正确率较高，睁眼和闭眼识别率为大概在 80%；而基于水平投影及比例特征的人眼状态识别方法识别正确率很高，特别是对于闭眼样本，睁眼和闭眼样本识别正确率分别达到了 85%和 91%；判断黑色像素比例进行人眼状态识别方法原理简单，运算处理简单，但是识别准确度较差，睁眼和闭眼识别正确率分别为 76.6%和 65.4%。

下表是对以上各种人眼状态识别方法在正负样本识别率、处理时间的对比。

表 3-5 人眼状态识别方法对比

人眼状态识别方法	睁眼样本识别率	闭眼样本识别率	处理时间	评价
基于眼睑曲率的方法	87.9%	87.7%	11ms	好
基于分段眼睑曲率的方法	79.8%	81.5%	12ms	较好
基于椭圆拟合的方法	80%	80%	10ms	较好
基于水平投影及比例特征方法	85%	91%	14ms	好
判断黑色像素比例的方法	76.6%	65.4%	8ms	较差

综合所有因素来看，基于水平投影及比例特征的人眼状态识别方法以及基于眼睑曲率的人眼状态识别方法较好。

### 3.4 本章小结

本章首先介绍了复杂驾驶条件下人眼检测定位方法，提出了基于 Adaboost 的眼睛检测定位方法以及基于人脸三庭五眼比例特征的人眼检测定位方法，并对它们的基本原理方法以及检测定位效果进行介绍。在检测定位人眼位置后，为了进一步通过判断人眼状态来判断驾驶员当前的精神状态，需要进一步识别眼睛状态。在本章中我们详细介绍了各种人眼状态识别的方法，并对其中关键参数对识别正确率影响进行深入分析。从运算处理时间以及识别正确率对比各种人眼状态识别方法，从而确定合适的人眼状态识别算法。



## 第四章 基于眼部特征的驾驶员疲劳状态检测

### 4.1 引言

前面章节我们已经详细介绍人脸检测、眼睛检测、眼睛状态识别方法，在本章我们实时跟踪驾驶员眼睛状态，通过统计一段时间内驾驶员的眼睛状态信息，计算相关的疲劳参数，判断驾驶员当前的疲劳状态，如果疲劳的话就输出疲劳报警信号。

下面是几种基于眼部特征的驾驶员疲劳状态检测方法：

#### (1) 基于眨眼频率的疲劳状态检测方法

根据相关测试表明，人的眼睛在正常情况下平均眨眼频率为 10-15 次/分，平均每次眨眼间隔时间为 4-5 秒，每次眨眼持续时间约为 0.2 秒。如果驾驶员疲劳、注意力不集中，目光呆滞，这时眨眼频率会偏低，如果眨眼频率偏高，可能有异物进入眼睛，这时候都应该进行报警。

#### (2) 基于平均眨眼持续时间的疲劳状态检测方法<sup>[62]</sup>

人在有明显疲劳症状时，双眼紧闭，眨眼持续时间也有明显提高，人在疲劳状态的时候也是有可能出现快眨眼现象，比如说有异物进入眼睛或者人在处于疲劳状态中，有意识调整自身的状态时，有意识地抵抗疲劳，就会快速进行眨眼。因此利用平均眨眼持续时间来判断驾驶员的疲劳状态。

#### (3) 基于 PERCLOS 原理的疲劳状态检测方法<sup>[63]</sup>

PERCLOS(Percentage of Eyelid Closure Over the Pupil Time)是指单位时间内眼睛闭合的时间的百分比。通过大量实验数据表明，基于 PERCLOS 原理的疲劳状态检测方法是行之有效的，PERCLOS 与疲劳程度具有良好的相关性，美国公路管理局推荐将 PERCLOS 准则作为基于视觉的驾驶疲劳判断的最好方法。目前，PERCLOS 准则已经成为最有效的、便携式、非接触式的、实时的驾驶疲劳检测方法，已经被广泛地应用。

经过相关研究和实践表明，通过测量 PERCLOS 值所反映出来的驾驶疲劳程度与实际疲劳程度具有非常好的相关性。因此，本文选择利用 PERCLOS 值进行疲劳状态检测。但是单纯利用 PERCLOS 原理存在一个问题，如果驾驶员注意力不集中，走神，这个时候驾驶员的眼睛往往处于睁开状态，这是计算得到的 PERCLOS 会很低，此时驾驶员当前的精神状态已经不再适合进行驾驶，也应该判断为疲劳进行报警。因此为了提高整个疲劳检测系统的鲁棒性和准确性，本文采用将 PERCLOS 原理与眨眼频率相结合的方法来判断驾驶员当前的疲劳状态。

基于 PERCLOS 原理与眨眼频率相结合的疲劳状态检测识别流程图如下图所示。

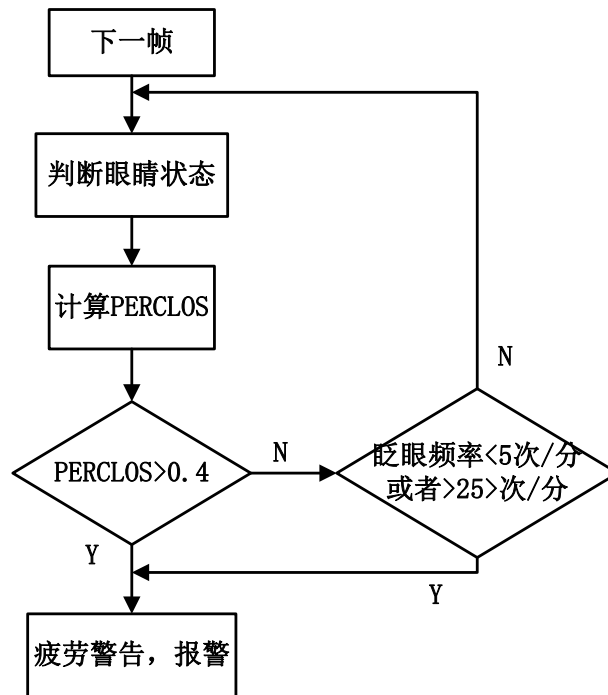


图 4-1 基于 PERCLOS 原理与眨眼频率相结合的疲劳状态检测识别流程图

## 4.2 基于 PERCLOS 原理与眨眼频率相结合疲劳状态检测

### 4.2.1 PERCLOS 测量原理

PERCLOS(Percentage of Eyelid Closure Over the Pupil Time)是指单位时间内眼睛闭合的时间。在 20 世纪 70 年代,美国弗吉尼亚大学的 Wal Wiexwille 和他的同事在进行疲劳驾驶检测实验,实验证明了 PERCLOS 能够用于评价驾驶疲劳状态<sup>[64]</sup>。

1999 年 4 月,美国联邦公路管理局 FHWA(Federal Highway Administration)召集研究疲劳驾驶方法的知名专家和学者,讨论了 PERCLOS 方法和其他基于眼部特征测量方法对于检测判断驾驶员疲劳状态的有效性。经研究认为,认为 PERCLOS 是一种非常有研究价值的技术,推荐把测量机动车辆驾驶员的 PERCLOS 方法作为非接触式的、车载的、实时的疲劳检测识别方法<sup>[65]</sup>。

PERCLOS 计算方法如下:

如下图表示,  $t_1$  表示眼睛睁开最大闭合到最大的 80% 所用时间,  $t_2$  表示眼睛睁开最大 80% 闭合到最大的 20% 所用时间,  $t_3$  表示眼睛睁开最大 20% 闭合到睁开 20% 所用时间,  $t_4$  表示眼睛 20% 睁开到最大的 80% 所用时间, 通过测量出这些时间就能计算出 PERCLOS:

$$PERCLOS = \frac{t_3 - t_2}{t_4 - t_1} \times 100\%$$

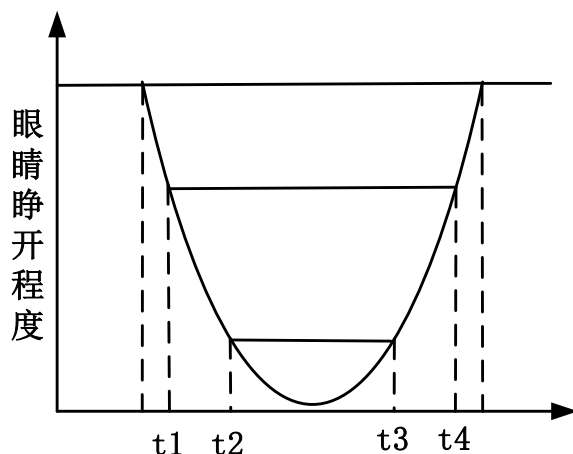


图 4-2 测量 PERCLOS 原理

PERCLOS 方法包括以下三种标准：

**P70:** 指眼睛闭合程度超过眼睛睁开最大时的 70% 就计为眼睛闭合，再计算眼睛闭合时间占统计时间的百分比。

**P80:** 指眼睛闭合程度超过眼睛睁开最大时的 80% 就计为眼睛闭合，再计算眼睛闭合时间占统计时间的百分比。

**EM:** 指眼睛闭合程度超过眼睛睁开最大时的 50% 就计为眼睛闭合，再计算眼睛闭合时间占统计时间的百分比。

美国国家公路交通安全局(NHTSA)专门对 PERCLOS 方法中的三种标准作了实验，实验结果如下图所示，表明 PERCLOS 中的 P80 准则反应的疲劳程度与实际真实的疲劳状况相关性较好。其他研究人员也得出了类似的结论。

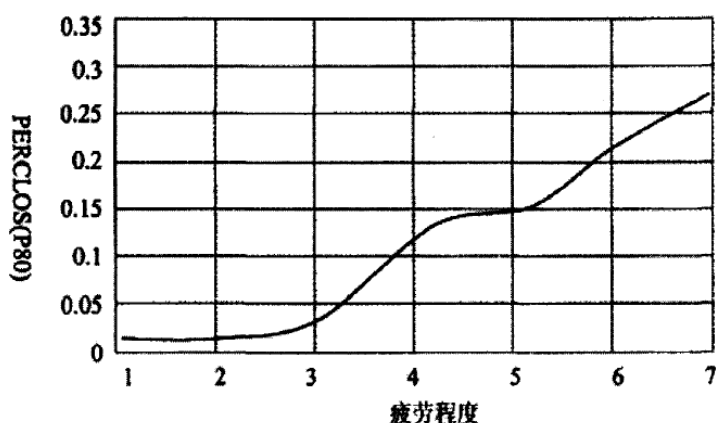


图 4-3 PERCLOS(P80)值与疲劳关系曲线图

因此本文使用的是 PERCLOS 方法中的 P80 准则：首先用红外摄像头获取驾驶员的人脸图像，进行光照预处理、人脸检测、人眼检测后得到人眼图像，进行人眼识别，判断眼睛的睁开还是闭合；如果指眼睛闭合程度超过眼睛睁开最大时的 80% 就判断为眼睛闭合，进一步统计一段时间内 PERCLOS 值。如果 PERCLOS 值超过 0.4<sup>[66]</sup>，我们就认为驾驶员处于一种疲劳状态，不适合继续行车，应该提出报警警告，注意驾车安全。

## 4.2.2 眨眼频率

我们在前面已经提到，人的眼睛在正常情况下眨眼频率平均为 10-15 次/分，平均每次眨眼间隔时间为 4-5 秒，每次眨眼持续时间约为 0.2 秒。如果眨眼频率过低，一方面可能是因为驾驶员疲劳，双眼闭合，这种情况可以通过前面的 PERCLOS 原理进行检测；另一方面可能是驾驶员注意力不集中，走神，这个时候驾驶员的眼睛往往处于睁开状态，这时计算得到的 PERCLOS 会很低，此时驾驶员当前的精神状态已经不再适合进行驾驶，这种情况可以通过计算眨眼频率进行检测。如果眨眼频率过高，说明驾驶员当前眼睛状态异常，可能有异物进入眼睛，此时也不适合继续行车。由此可见，眨眼频率过低或者过高都具有一定的危险性，需要进行报警。在我们的疲劳检测系统中，我们设置眨眼频率下限不低于 5 次/分，上限不高于 25 次/分。

## 4.3 复杂驾驶条件下驾驶员疲劳检测系统

在调试好各模块算法之后，我们将各个模块进行集成，完成我们复杂驾驶条件下驾驶员疲劳检测系统。下面是疲劳检测系统的系统框图，包括读取红外视频，光照预处理、人脸检测、人眼定位、眼睛状态识别、疲劳检测等步骤。

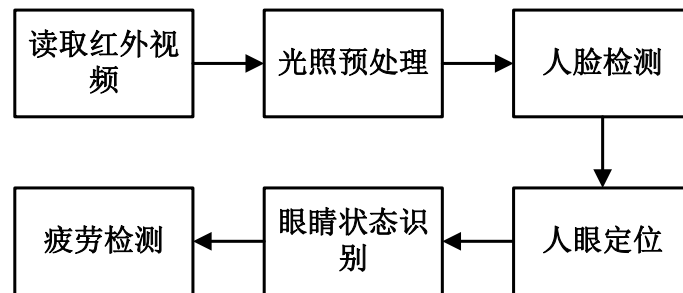


图 4-4 复杂驾驶环境下司机疲劳度检测系统框图

本文通过实验分别对人脸检测算法、人眼检测与状态判定算法和疲劳检测识别算法三个算法模块进行了各种实验，实验的结果表明，本文采用的人脸检测算法、人眼检测与状态识别算法、疲劳检测识别算法具有较好的实时性和正确率，能够在一定条件下取得不错的识别效果，可以将这些算法模块集成到我们基于眼部特征的疲劳驾驶实时检测系统中。我们最后利用 Visual Studio 2008 环境，将我们各模块算法进行 C++实现，利用开源的计算机视觉库函数 OpenCV，完成我们整套复杂驾驶环境下驾驶员疲劳检测系统的开发，并且利用微软 MFC 库设计良好的用户界面。在实际测试过程中，我们采集了多段红外视频 AVI 文件，方便测试和调试，采集的模拟数据包括实验室模拟环境以及实际生活驾车环境等情况。

下图是我们整个疲劳检测系统的算法流程图。

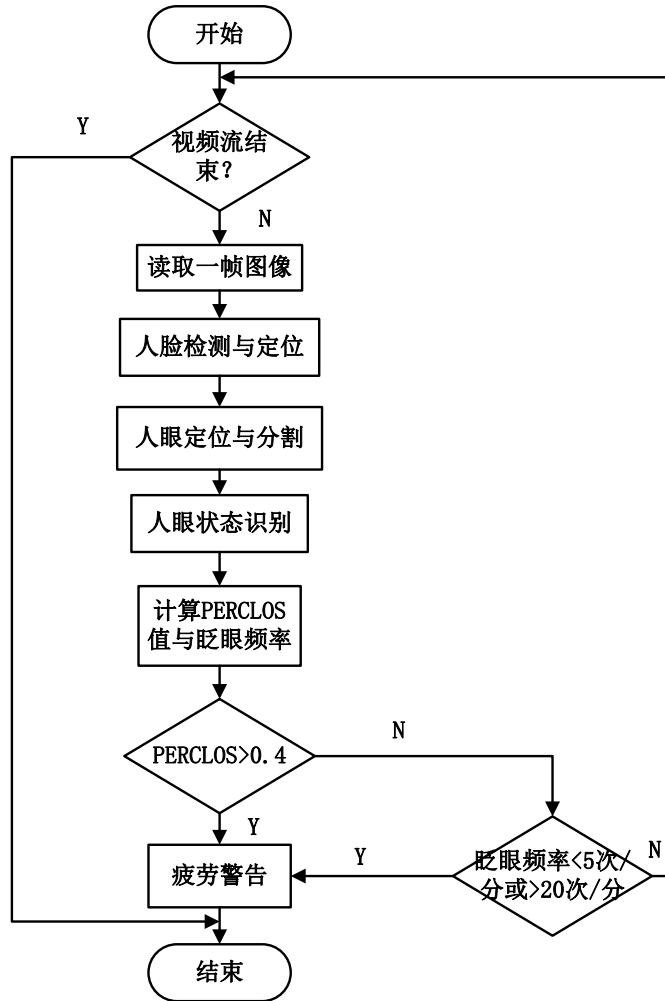


图 4-5 疲劳检测系统算法流程图

下图是疲劳检测系统实际测试效果图。



图 4-6 疲劳检测系统实际测试效果图 1

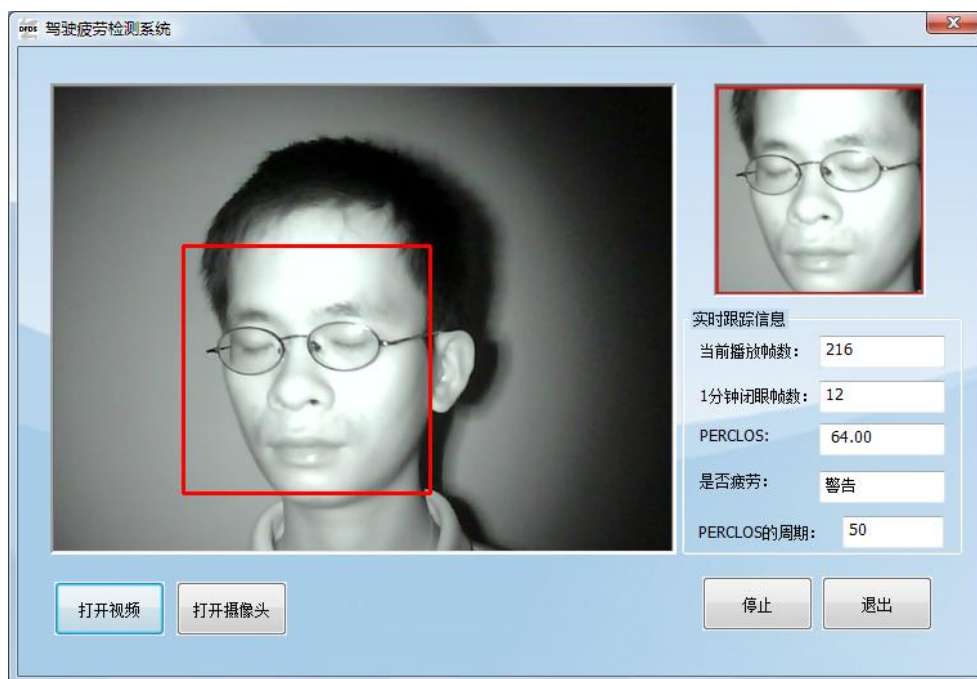


图 4-7 疲劳检测系统实际测试效果图 2

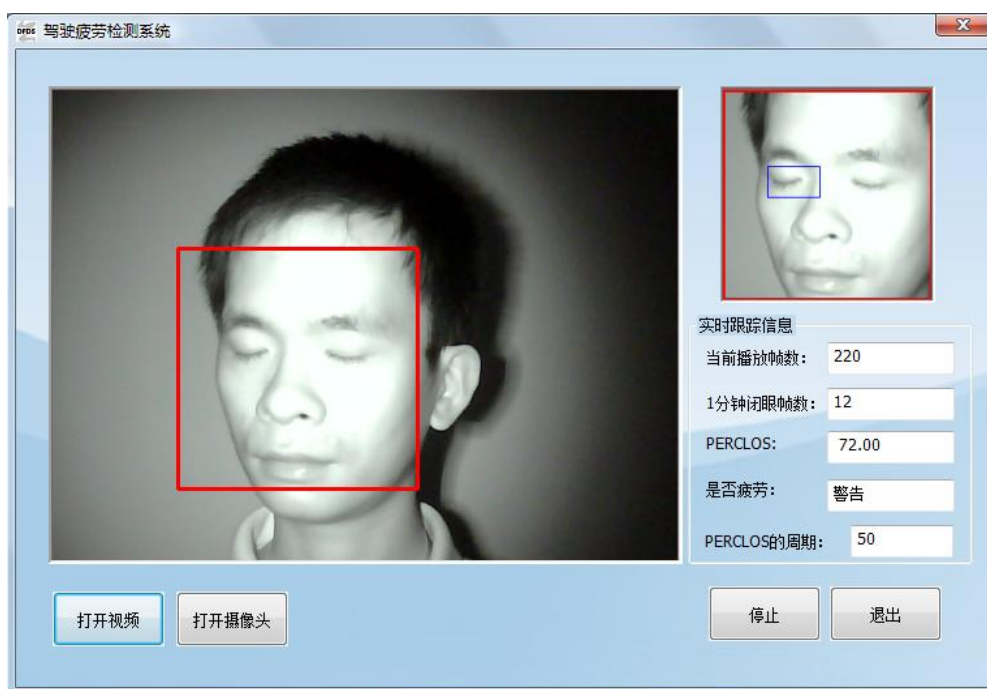


图 4-8 疲劳检测系统实际测试效果图 3

在实际测试中，我们分别选取了光照变化、头部姿态变化等情况进行测试。从实际测试结果上看，本论文中提出的基于红外视频的疲劳检测方法能够较好地处理光照问题，实时性较好，能够较好地识别出测试者的疲劳状态。但是对于测试者如果头部倾斜较大以及光照变化剧烈等情况，该系统算法还有待提高。

## 4.4 本章小结

本章详细介绍了基于眼部特征的驾驶员疲劳状态检测方法，本文采用的疲劳检测算法是基于 PERCLOS 与眨眼频率结合的驾驶员疲劳状态检测方法。PERCLOS 被认为是基于视觉、非接触式的判断疲劳状态最有效的方法之一，但是当驾驶员目光呆滞，注意力不集中、走神的时候，PERCLOS 值较低，这时候 PERCLOS 算法会误判。因此本文结合眨眼频率进行疲劳判断，驾驶员在正常驾驶过程中，闭眼时间比较短、眨眼频率时钟，而处于疲劳驾驶状态时，眼睛闭眼时间变长、眨眼频率变慢。这样可以提高疲劳检测系统的识别率，降低系统误警率。最后介绍了在 Visual Studio 环境下集成各个模块，完成整个疲劳检测系统，详细介绍了系统算法流程图和软件模块，并给出实际测试效果图。

# 结 论

随着经济社会发展，社会车辆保有量的不断增加，开车对于很多人来说已经是成为日常生活中不可或缺的一部分，频繁发生交通事故给社会和家庭带来严重伤害，而驾驶疲劳已成为引发交通事故的主要因素之一。如何在事故发生前有效地检测并进一步防止驾驶疲劳有着十分重要的现实意义。现有的疲劳检测方法很多，但是如何解决驾驶疲劳检测中的非接触式、车载式、实时性好、价格适中的问题是当今研究的主要方向。经过几十年的时间，相关的研究虽然都有了一定的进展，但由于受到各种变化因素的影响，高效实用的疲劳检测方法还需要进一步研究实现。室外光照变化以及驾驶员姿态等都会严重影响疲劳检测系统性能，这两个问题也是计算机视觉领域现在所面临的两大问题。本文利用红外摄像头拍摄驾驶员的人脸视频图像，对红外视频图像进行光照预处理和光照估计，进行人脸检测、人眼检测定位，进一步识别人眼状态，根据 PERCLOS 准则和眨眼频率相结合的方法进行疲劳判断。

## 1. 主要工作总结

本文首先介绍了疲劳驾驶检测的背景和意义、研究现状，对疲劳检测中涉及到的人脸检测方法、人眼定位方法和眼睛状态识别方法等进行描述和讨论，着重比较了各种光照预处理方法以及眼睛状态识别方法，再利用 PERCLOS 原理和眨眼频率相结合进行驾驶疲劳判断，最后在 Visual C++环境下将各模块算法进行实现，集成各模块算法，最终完成复杂驾驶环境下驾驶员疲劳度检测系统设计。

论文的主要工作总结如下：

(1) 光照预处理。由于我们的疲劳检测系统是应用于室外环境。而室外光照变化会直接影响到系统的性能，也是必须要克服的主要问题之一。在本文中，我们采用红外摄像头采集驾驶员人脸图像，利用主动红外光源以及光照估计图像处理的方法，获取光照鲁棒的红外图像，为后面的检测和识别打下良好的基础，提高系统的鲁棒性。

(2) 人脸检测。疲劳检测系统要求实时性好，因此要求系统人脸检测处理速度要快。本文采用 Adaboost 学习算法对人脸进行检测定位，并详细介绍了 Adaboost 算法的基本原理、训练过程以及检测过程。实验结果表明，该方法检测速度快，实时性好，并且能够降低对光照的敏感度。

(3) 人眼检测。本文采用了基于 Adaboost 的眼睛检测定位方法以及基于人脸三庭五眼比例特征的眼睛检测定位方法。实验结果证明，基于 Adaboost 学习算法的人眼检测检测速度快，对于驾驶员姿态具有一定的适应能力，但是容易受到眉毛、眼镜等影响。而基于人脸比例特征的眼睛检测定位方法，原理简单，处理速度快，但是对于头部倾斜的情况，分割效果较差。



(4) 眼睛状态识别。本文详细介绍了几种眼睛状态识别方法，分别研究了基于眼睑曲率的方法、基于分段眼睑曲率的方法、基于椭圆拟合的方法、基于水平投影及比例特征的方法以及基于判断黑色像素比例的方法，并对它们中重要参数对识别率影响进行研究，从处理时间以及识别率对比研究各种眼睛状态识别的方法。

(5) 疲劳检测。本文采用了 PERCLOS 准则和眨眼频率相结合的方法来进行驾驶疲劳判断，提高了整个系统的鲁棒性和可靠性；最后我们在 Visual C++ 环境下集成各模块算法，最终完成复杂驾驶环境下驾驶员疲劳度检测系统设计。

本文还存在一些不足之处，需要进一步改进：

(1) 分别从硬件设备和软件算法上研究了克服光照变化影响的方法，但是对于光线强烈变化干扰的情况，本文算法可能会发生错判、误判等现象。

(2) 本文研究了驾驶员姿态变化并不太大情况下的疲劳检测，本文算法对于驾驶员头部姿态变化比较大的情况处理的并不是很好。

## 2. 展望

实际的基于图像视频的驾驶员疲劳度检测系统对于实时性和可靠性都要很高的要求；可靠性主要取决于人脸检测、眼睛检测和眼睛状态识别算法，实时性则要求系统各部分算法不能太复杂，还对硬件平台有一定的要求。如果要将驾驶员疲劳检测系统真正用于实际中，还需要从以下两个方面进行改进：

### (1) 软件算法

- 1) 人脸精确定位，眼睛精确定位和实时状态识别，对于疲劳检测系统非常重要；
- 2) 眼睛状态识别需要进一步从处理时间以及识别正确率方面进行改善；
- 3) 对于光线变化剧烈，驾驶员头部姿态变化较大、存在眼镜、眼睛部分被遮挡等情况，需要进一步完善检测识别算法，提高系统的鲁棒性。
- 4) 可以尝试采用多信息融合的方法进行疲劳检测，开发出多模态的疲劳检测系统。单一的信息可能会造成系统误判，通过检测识别两种或以上的特征信息，进行综合分析，进行信息融合，可以提高系统的准确性和可靠性。

### (2) 硬件平台

- 1) 使用嵌入式设备平台实现疲劳检测算法，实现车载式、非接触、使用方便的疲劳检测系统，方便移植和模块化设计。可以将部分软件算法固化到硬件平台上，提高算法处理速度以及实时性。
- 2) 开发网络监测系统。可以通过开发疲劳检测监控网络，利用车载式设备进行疲劳检测，通过无线通信方法将数据上传至指挥中心，指挥中心对数据进行处理。当监控软件分析驾驶员处于疲劳状态时，进行报警。还可以联动交警部门，防止交通事故的发生。

因此，复杂驾驶环境下驾驶员疲劳度检测系统具有很好的应用前景。

## 参考文献

- (1) “Driver Fatigue” Road Safety Authority (EB/OL) .  
[http://www.rsa.ie/NEWS/News/Driver\\_Fatigue.html](http://www.rsa.ie/NEWS/News/Driver_Fatigue.html)
- (2) Transport Research Laboratory. Driver fatigue-a killer on the roads (EB/OL) .  
<http://www.nts.gov/investigations/reports.html>
- (3) 2008 年全国道路交通事故情况 (EB/OL) .  
<http://www.mps.gov.cn/n16/n1282/n3553/1770249.html>
- (4) 2009 年全国道路交通事故情况 (EB/OL) .  
<http://www.mps.gov.cn/n16/n1252/n1837/n2557/2276407.html>
- (5) 2010 年上半年全国交通事故情况 (EB/OL) .  
<http://www.mps.gov.cn/n16/n85753/n85870/2475028.html>
- (6) 王军. 疲劳驾驶检测系统的研究与实现 (D) . 东北大学硕士学位论文, 2009.
- (7) Ji Hyun Yang. Analysis and Detection of Driver Fatigue Caused by Sleep Deprivation (D) . MIT PHD Thesis, 2009.
- (8) Carnegie Mellon Research Institute. Alert at the wheel: Sensor system for trucks will help reduce highway fatalities [EB/OL]. [http://www.cmu.edu/cmri/adm\\_alert.html](http://www.cmu.edu/cmri/adm_alert.html), 2000
- (9) 黄瀚敏. 基于汽车驾驶员疲劳状态监测技术的汽车主动安全系统研究 (D) . 重庆: 重庆大学. 2007.
- (10) 毛喆, 初秀民, 严新平, 吴超仲. 汽车驾驶员驾驶疲劳监测技术研究进展 (J) . 中国安全科学学报, 2005, 15(3): 108-112.
- (11) 未来汽车的智能安全技术 (EB/OL) .  
<http://www.anquan.com.cn/Wencui/guanli/traffic/201002/141995.html>, 2010-02-21.
- (12) Wierwille WW, Ellsworth LA, Wreggit SS, Fairbanks RJ, Kirn CL. Research on Vehicle based driver status/performance monitoring: development, validation, and refinement of algorithms for detection of driver drowsiness. National Highway Traffic Safety Administration Final Report (R) . DOT HS 808 247, 1994.
- (13) Federal Highway Administration. PERCLOS:A Valid physiological Measure of Alertness As Assessed by Psychomotor Vigilance (J) . Office of Motor Carriers, 1998.
- (14) Grace R., Byrne V.E., Legrand J.M., Gricourt D.J. et al. A Machine Vision Based Drowsy Driver Detection System for Heavy Vehicles (C) . Proceeding of The Ocular Measures of Driver Alertness Conference, 1999, 75-86.
- (15) 刘志强, 汪旻. 基于机器视觉的驾驶疲劳检测方法 (J) . 中国制造业信息化, 2006, 35(3):63-66.
- (16) 石坚, 吴远鹏, 卓斌, 马勇, 许晓鸣. 汽车驾驶员主动安全性因素的辨识与分析 (J) . 上海交通

- 大学学报, 2000, 34(4):441-444.
- (17) R Chellappa, Wilson C L, Sirohey S. Human and machine recognition of faces: a survey (C) . Proceedings of the IEEE, 1995, 705-740.
- (18) V Govindaraju. Locating human faces in photographs. International Journal of Computer Vision (J) , 1996, 19 (2):129-146.
- (19) Yow K C, Cipolla R. Feature-based Human Face Detection (J) . Image and Vision Computing, 1997, 15(9):713-735.
- (20) 王文宁. 人脸的检测定位方法 (D) . 山东: 山东大学, 2005.
- (21) 苑玮琦, 柯丽, 白云. 生物特征识别技术 (M) . 北京: 科学出版社, 2009.
- (22) 周激流, 张晔, 人脸识别理论研究进展 (J) . 中国计算机辅助设计与图形学学报, 1999, 12(2):180-181.
- (23) Y. Adini, Y. Moses, S. Ullman. Face Recognition: The Problem of Compensating for Changes in Illumination Direction (J) . IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, volume 19, Issue 7.
- (24) A. Sashua, T. Riklin-Raviv, The quotient Image: class-based rendering and recognition with varying illuminations (J) . IEEE Trans. Pattern And Mach. Intell. , 2001, 23(2):129-139.
- (25) S.G. Shan, W. Gao, B. Cao, D.B. Zhao. Illumination Normalization for Robust Face Recognition against Varying Lighting Conditions (C) . Proc. IEEE Int. Workshop on Analysis and Modeling of Faces and Gestures (AMFG03), 2003, 157-164.
- (26) P. N. Belhumeur, D. W. Jacobs. Comparing images under variable illumination (C) . Proc. 1998 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR98), 1998, pp. 610-617.
- (27) H. T. Wang, S. Z. Li, Y. S. Wang. Face Recognition under Varying Lighting Conditions Using Self Quotient Image (C) . Proc. 6th IEEE Int. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition (FGR04), 2004, pp.819-824.
- (28) H. T. Wang, S. Z. Li, Y. S. Wang. Generalized Quotient Image (C) . Proc. 2004 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR04), 2004, Vol. 2, pp.498-505.
- (29) H. F. Chen, P. N. Belhumeur, D. W. Jacobs. In Search of Illumination Invariants (C) . Proc. 2000 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR00), 2000, Vol.1, pp.1254-1261.
- (30) S. D. Wei, S. H. Lai. Robust Face Recognition under Lighting Variations (C) . Proc. 17th Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR04), 2004, Vol.1, pp.354-357.
- (31) M. Savvides, B. V. Kumar, P.K. Khosla. Eigenphases vs. Eigenfaces (C) . Proc. 17th Int. Conf. Pattern Recognition (ICPR04), 2004, pp.810-813.
- (32) A. Sashua. On Photometric Issues in 3D Visual Recognition from a Single 2D Image (J) . Int. Journal of Computer Vision (IJCV), 1997, 21(1-2): pp.99-122.

- (33) R. Zhang, P.S. Tai, J. E. Cryer, M. Sha. Shape From Shading: A Survey (J) . IEEE Trans. on PAMI, 1999, 21(8):690-706.
- (34) W. Y. Zhao, R. Chellappa. Illumination-insensitive Face Recognition using Symmetric Shape-from-Shading (C) . Proc. 2000 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR00), 2000, Vol.1, pp.286-293.
- (35) L.B.Wolff, D.A.Socolinsky, C.K.Evel. Faces recognition in the thermal infrared (J) . Equinox Corporation, 2004.
- (36) Stan Z. Li. RuFeng Chu. ShengCai Liao, Lun Zhang. Illumination Invariant Face Recognition Using Near-Infrared Images (J) . IEEE Trans. Pattern And Mach. Intell., 2007, Vol. 29, No. 4.
- (37) J.Dowdall, I.Pavlidis, and G. Bebis. Face detection in the near-IR spectrum (J) . Image and Vision Computing, 2003,21:565-578.
- (38) D.Y.Li, W.H.Liao. Facial feature detection in near-infrared images (J) .In Proc. of 5<sup>th</sup> International Conference on Computer Vision, Pattern Recognition and Image Processing, 2003, pp.26-30.
- (39) Z.H.Pan, G.Healey, M.Prasad, B.Tromberg. Face recognition in hyper spectral images (J) . IEEE Transaction on Patten Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(12):1552-1560.
- (40) Land E.H., J.J.McCann, Lightness and retinex theory (J) . Journal of the Optical society of America, 1971, 61(1):1-11.
- (41) Moore,A., J.Allman, R.M.Goodman, A real-time neural system for color constancy (J) . IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 2(2):237-247.
- (42) Funt,B., V.Cardei, K.Barnard. Learning color constancy (C) . Citeseer, 1996.
- (43) Orsini G, et al. A modified Retinex for image contrast enhancement and dynamics control (C) . IEEE, 2003.
- (44) Meylan,L., S.S '1sstrunk. Color image enhancement using a Retinex-based adaptive filter(C) . Citeseer, 2004.
- (45) Young, R.A., Color vision and the retinex theory (J) . Science, 1987, 238(4834): 1731.
- (46) D.J. Jobson, Z. Rahman, G.A. Woodell. Properties and performance of a center/surround retinex (J) . IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.
- (47) D.J. Jobson, Z. Rahman, G.A. Woodell. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observations of scenes(J) . IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976.
- (48) H.Wang, S.Z.Li, Y. Wang, J.Zhang. Self quotient image for face recognition (C) . Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, 2004.
- (49) W.Chen, M.J.Er, S.Wu. Illumination compensation and normalization for robust face recognition using discrete cosine transform in logarithmic domain (J) . IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-part B, Vol.36, No.2, str.458-466.

- (50) S.Du, R.Ward. Wavelet-based illumination normalization for face recognition (C) . Proc.of the IEEE International Conference on Image Processing, 2005.
- (51) Vitomir Struc, Nikola Pavešić. Illumination Invariant Face Recognition by Non-Local Smoothing (C). International Conference on Biometric ID management and multimodal communication, 2009.
- (52) Freund Y., Schapire R. E. A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting (J) . Journal of Computer and System Sciences, 1997, 55(1):119-139.
- (53) Viola P., Jones M.J. Robust Real-Time Face Detection (J) . International Journal of Computer Vision , 2004, 57(2):137-154.
- (54) 李峰, 曾超, 徐向东. 驾驶防瞌睡装置中人眼快速定位方法研究 (J) . 光学仪器, 2002 年 8 月, 24(4-5):70-72.
- (55) 李璇, 罗敏, 施荣华, 李丽. 复杂背景下基于肤色和几何特征的人眼定位 (J) . 计算机测量与控制, 2002 年 8 月, 13(3): 281-283.
- (56) 艾海舟, 梁路宏等. 基于肤色和模板的人脸检测 (J) . 软件学报, 2001 年 12 月, 12(12): 1784-1792.
- (57) 陈艳琴. 关于司机疲劳检测的人眼检测与跟踪研究 (D) . 长沙: 中南大学硕士学位论文, 2004.
- (58) 于威威, 滕晓龙, 刘重庆. 一种快速准确的人眼定位方法 (J) . 光电子激光, 2005 年 4 月, 16(4): 479-483.
- (59) Mahdi Rezaei. Reinhard Klette. 3D Cascade of Classifiers for Open and Closed Eye Detection in Driver Distraction Monitoring (C) . 14<sup>th</sup> Intl. Conference on Computer Analysis of Image and Patterns, LNCS, Springer 2011, Volume 6855, Pages 171-179, Sevilla, Spain.
- (60) 边肇祺, 张学工等编著. 模式识别 (M) . 北京: 清华大学出版社, 2001.
- (61) 江水郎. 基于视觉的驾驶疲劳检测研究 (D) . 上海: 上海交通大学, 2008.
- (62) 王磊. 基于计算机视觉的驾驶员疲劳瞌睡检测方法的研究 (D) . 山东: 山东大学硕士学位论文, 2005.
- (63) Binges.D.F, Mallis.M, Maislin.G, Powell.J.W. Evaluation of techniques for ocular measurement as an index of fatigue and the basis for alertness management (M) . Department of Transportation Highway Safety Publication, 1998, 4.
- (64) Federal Highway Administration. Eye-activity measures of fatigue and napping as a fatigue countermeasure. Federal Highway Administration Tech Brief (EB/OL) . <http://fhwa.dot.gov>, 1994, 4.
- (65) FHWA. Eye-activity measures of fatigue and napping as a fatigue countermeasure (R) . Technical Report No.MC-99-028, 1999.
- (66) 郑培. 机动车驾驶员驾驶疲劳测评方法的研究 (D) . 中国农业大学, 博士学位论文, 2001 年 10 月.

## 致谢

在本课题的研究和论文的写作过程中，得到了很多人的帮助和支持，在此对他们表示衷心的感谢。

感谢我的导师秦华标教授，本课题研究和本论文是在导师秦华标教授悉心指导下完成的。秦华标教授渊博的专业知识，严谨的治学态度，平易近人的人格魅力给我留下深刻的印象。本课题研究从开题到最终完成，每一步都是在导师秦老师的指导下完成的，在这期间给予我很大的帮助。在此，谨向导师表示崇高的敬意和衷心的感谢！

感谢我未来的研究生导师上海交通大学吕宝粮教授给了我一个走进人工智能领域的机会，感谢他在生活和学习中给我的帮助，他对学术的严谨性给我留下深刻的印象；感谢实验室的师兄、师姐在本课题研究过程给我的指导和解惑。

感谢大学四年里的同班同学们，08级电联班的所有同学，我们风雨同舟，共同走过了这段难忘的岁月，谢谢你们的关心和帮助。感谢我的好朋友翁俊武同学，他是最好的朋友，谢谢他的鼓励和支持，同学间的友谊天长地久。

最后，我要向深爱我的家人表示衷心的感谢，是他们的理解、支持、关心和鼓励使我战胜自己，完成大学学业，并进一步读研深造。

将此文献给所有关心、支持和帮助过我的人，并向他们表示最衷心的感谢。