

基于多特征融合的眼睛状态检测算法研究

梁元辉^{1,2}, 吴清乐^{1,2}, 曹立佳^{1,2}

(1. 四川轻化工大学 自动化与信息工程学院, 四川 宜宾 644005;

2. 四川轻化工大学 人工智能四川省重点实验室, 四川 宜宾 644005)

摘要: 疲劳驾驶检测算法研究对提升交通安全有着重要的意义。目前,已有大量关于疲劳驾驶的文献和成果。在疲劳驾驶检测算法中,眼睛开闭状态的判断起着至关重要的作用。深度级联卷积神经网络用来检测人脸和人脸特征,利用 Dlib 工具快速提取驾驶员人脸特征。基于眼睛特征计算眼睛宽高比,并将眼睛宽高比、传统人眼特征的人眼虹膜等用于判断眼睛开闭的参数。该文提出一种实时地融合了 EAR、虹膜等多个特征的眼睛状态检测算法,可补偿传统人眼特征的像素值比较敏感的不足,也补偿了 EAR 在人脸倾斜、戴眼镜、光照变换、眼睛周围有光斑等情况下非常不可靠的不足。在 640*480 分辨率,帧率 30 fps 的视频上获得平均 92% 的检测正确率。实验结果表明融合后的算法可在光照变换、人脸倾斜、佩戴眼镜等条件下提升检测性能,鲁棒性较高。

关键词: 眼睛状态监测; 疲劳驾驶; 多特征融合; PERCLOS; EAR

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2021)02-0097-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2021.02.018

Research on Eye State Detection Algorithm Based on Multi-feature Fusion

LIANG Yuan-hui^{1,2}, WU Qing-le^{1,2}, CAO Li-jia^{1,2}

(1. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644005, China;

2. Key Laboratory of Artificial Intelligence of Sichuan, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644005, China)

Abstract: The research about driving drowsiness detection algorithm is of great significance to improve traffic safety. Presently, there are many literatures and achievements about driving drowsiness. In driving drowsiness detection algorithm, the judgment of eye state plays an important role. A deep cascaded convolutional neural network to detect faces and face features, and Dlib tool to quickly extract drivers' face features. Eye aspect ratio (EAR) and pupil are used to detect eye stature. We propose a real-time eye state detection algorithm that integrates EAR, pupil and other features, which can compensate for the lack of relatively sensitive pixel value of traditional human eye features and compensate for the unreliability of EAR in face tilt, glasses wearing, light transformation, light spots around the eyes and other situations. The average detection accuracy is 92% in 640*480 resolution and 30 fps video. The experiment shows that the proposed algorithm can improve the detection accuracy especially in light transformation, face tilt, glasses wearing, etc., with high robustness.

Key words: eye state detection; drowsing driving; multi-feature fusion; PERCLOS; EAR

0 引言

随着车辆急剧增多,交通事故严重威胁着人们的生命和财产安全。根据世界健康组织的报告,交通事故是损害人生命的十大原因之一^[1]。为了减少疲劳驾驶所导致的交通安全问题,对疲劳驾驶自动检测的研究具有重要意义。基于人脸显著特征检测的算法可直

观地定位眼睛所在的位置,然后利用积分投影、眼睛角点、眼帘曲率、上下眼帘高度等方法判断眼睛的状态^[2-6],但这些方法在光照不均、人脸倾斜、佩戴眼镜、驾驶员改变等环境中效果较差。You 等人^[7]提出的眼睛宽高比 (eye aspect ratio, EAR)^[8]结合 PERCLOS^[9]方法来判断驾驶员是否疲劳,该方法在降低检测时间

收稿日期: 2020-03-05

修回日期: 2020-07-08

基金项目: 四川省重大科技专项项目 (2018GZDZX0046); 自贡市科技计划重点项目 (2019YYJC03)

作者简介: 梁元辉 (1987-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为深度学习的应用、模糊数学的应用等。

的同时取得了较高的准确率。该算法考虑了个体差异,但只有 EAR 作为判断依据,在光照变换、人脸倾斜、佩戴眼镜等条件下检测效果较差,具有很大的局限性。周云鹏等人^[10-12]利用面部的多个特征融合检测驾驶员是否疲劳驾驶。周涛等人^[13-15]利用人眼状态检测驾驶员是否疲劳驾驶。

在上述研究的基础上,该文对驾驶员的眼睛状态检测方法进行改进,算法融合了人眼张开角度、EAR 以及人眼虹膜等多个特征进行人眼开闭的判断。

1 人眼特征提取

1.1 人脸检测及眼睛定位

Dlib 是一个开源的工具箱,包括了机器学习模块、深度学习模块、图像处理模块等^[9]。它常被用来解决工业和学术界实际难题,用它开发的复杂算法在机器人开发、嵌入设备、手机和大型高性能计算环境频繁使用。级联姿势回归(cascaded pose regression, CPR)算法常被用于估计检测物体的姿态,该工具箱通过 CPR^[16]算法以及标记的人脸 68 个特征点的回归器获取驾驶员的人脸特征,通过眼睛的状态检测判断驾驶员是否疲劳。如图 1 所示,该文采用了 Dlib 中人脸检测和人脸 68 个特征点模型检测视频中的人脸,并返回人脸特征点坐标、人脸框及人脸角度等。



图 1 人脸检测及特征点

1.2 EAR

在 1.1 节中获取了人脸的特征点,对于每个眼睛都有 6 个对应的特征点,两个眼角特征点,以及分布在上下眼帘上的 4 个特征点。这些特征点确定了眼睛在图像中的具体位置。EAR^[8]在文献[8]中被用来检测眼睛眨眼的频率。EAR 值可通过图 2 中的 6 个点来计算,计算公式如下:

$$EAR = \frac{\|P_{37} - P_{41}\| + \|P_{38} - P_{40}\|}{2 \|P_{36} - P_{39}\|} \quad (1)$$

如图 2 给出了眼睛的 EAR 值,其中(a)眼睛张开的 6 个特征点;(b)眼睛关闭的 6 个特征点;(c)不同眼睛大小的驾驶员眼睛开闭的 EAR 曲线。由图 2 可以看出,眼睛的张开和关闭所对应的 EAR 的值差别比较大。因而 EAR 值是一个可靠的评价眼睛开闭的参数。

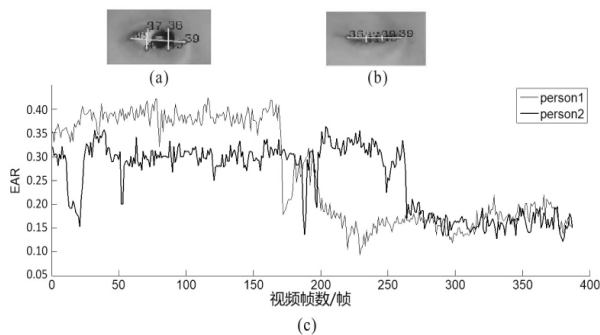


图 2 EAR

根据驾驶员驾驶中的情形设定四种场景,分别是正常状态、人脸倾斜状态、戴眼镜状态、光照不均状态。根据经验设定 EAR 的阈值为 0.3。每种场景判断眼睛开闭的结果和实际眼睛开闭的结果比较,结果一致则设定标签为 0,结果不一致则设定标签为 1,图 3 给出了四种场景下的 EAR 数据和实际眼睛状态的比较结果。横坐标为每个场景视频的帧数,纵坐标为比较的结果。除了正常状态下 EAR 可以用来检测眼睛开闭状态外,其他三种情况如果只用 EAR 对眼睛开闭状态

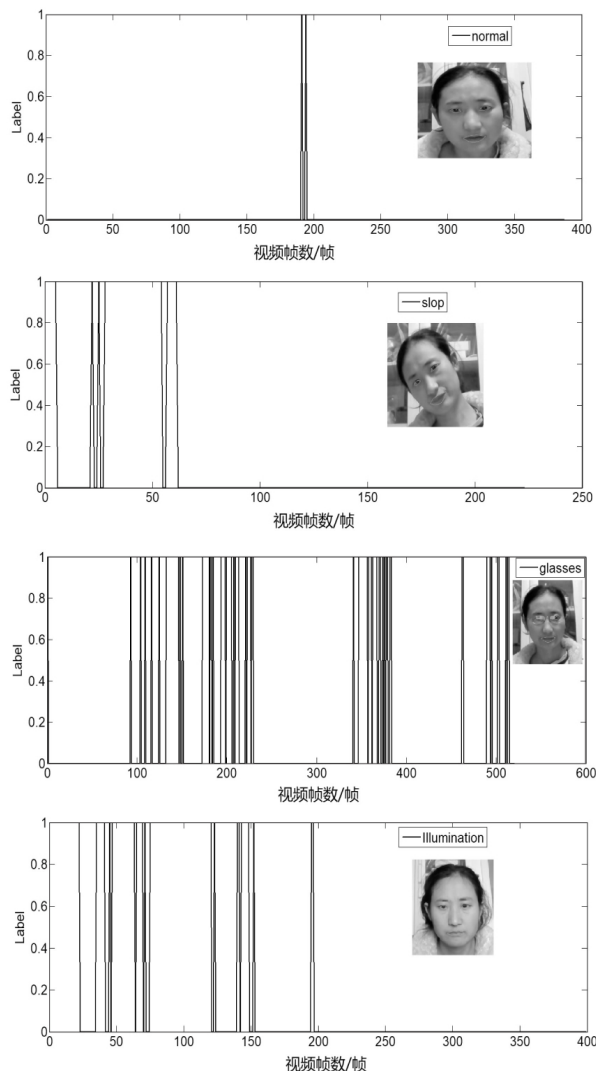


图 3 各种场景的 EAR 和实际眼睛状态比较

进行判断,判断结果错误较多,因而在这些场景中 EAR 是不可靠的,需要借助其他方法进行辅助才能更好地判断。经过反复的测试发现 EAR 在人脸倾斜、戴眼镜、光照变换、眼睛周围有光斑等情况下非常不可靠。

1.3 眼角张开角度

参考 1.2 节 CPR 获取的特征点,取出眼睛的 6 个特征点,然后选取其中 3 个角点(P_{36} 、 P_{37} 、 P_{41})计算眼角的张开角度,两只眼睛的张开角度取其平均,该平均值作为眼睛状态检测算法的特征参数。眼睛张开角度计算公式如下:

$$\text{ANGLE} = 2\arcsin\left(\frac{\|P_{37} - P_{41}\|}{2\|P_{36} - P_{37}\|}\right) \quad (2)$$

1.4 人眼虹膜

通过 1.2 节 CPR 获取的特征点,取出眼睛的 6 个特征点,计算这些点的外接矩并将外接矩的坐标映射到原始图像中即可得到包括眼睛的感兴趣图像,如图 4 所示。人脸虹膜检测算法详细步骤描述如下:首先对原始眼睛图像做图像增强处理平滑噪声,然后通过自适应二值化操作获取虹膜的二值图像,再次对二值图像进行开闭操作以及孔洞填充,最后对二值图像的白色虹膜区块做椭圆拟合处理。椭圆的长轴和短轴范围不应超过眼睛左右角点之间的距离以及上下眼帘的距离。Tolba 等人在文献[11]中也提出了关于虹膜检测作为眼睛状态判断的算法。人眼虹膜也可作为人脸倾斜、戴眼镜、光照变换、眼睛周围有光斑等情况下 EAR 不足的补充。

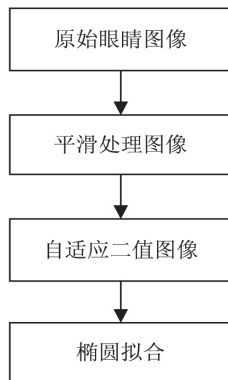
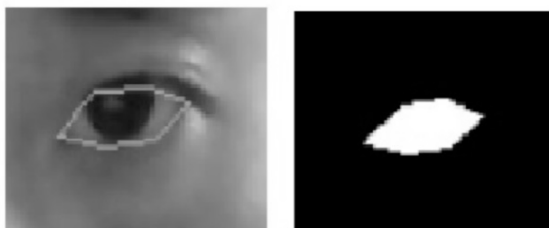


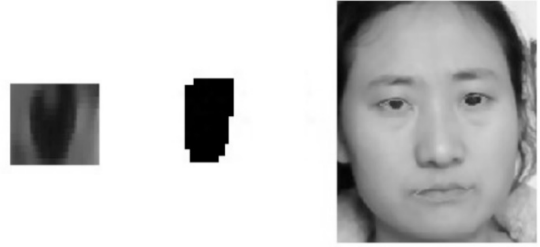
图4 人脸虹膜检测流程

图5给出了虹膜的检测图像。



(a) 裁剪的眼睛图像

(b) dlib 眼睛黑白图



(c) 虹膜灰度图 (d) 虹膜二值图像 (e) 椭圆拟合的眼睛图像

图5 人脸虹膜检测

2 基于多特征融合的人眼状态判断

参考 1.2 节数据分析,使用 EAR 算法进行眼睛状态判断时,在倾斜、戴眼镜、晚上欠光照射样本中效果较差。而在复杂的环境中像素值比较敏感,鲁棒性差,导致人眼虹膜椭圆拟合算法性能较差。该文提出基于 EAR、人眼虹膜相融合的人眼状态判断算法,图6给出了融合算法方案流程。首先通过视频流分别计算人眼 EAR 和虹膜椭圆拟合;其次,设定 EAR 的阈值和椭圆长短轴的阈值,EAR 超过阈值设定标签 Eflag 为 1,否则设定标签 Eflag 为 0;椭圆长短轴同时小于阈值,设定标签 Pflag 为 0,否则设定标签 Pflag 为 1;再次,判断 Eflag 和 Pflag 的值是否一致,如果是,则输出结果为 EAR 或者人眼虹膜的结果,否则进行下一次判断。最后判断 EAR 和其阈值之差的绝对值是否大于 ε , ε 的值根据样本和 EAR 阈值来确定。如果大于则输出 EAR 的判断结果,否则输出虹膜的检测结果。将提出的多特征融合算法简称为 EP 算法,该算法结合了 EAR 算法、眼睛虹膜算法在检测眼睛状态时的优势,并且在检测到的 EAR 值与阈值比较接近时,利用眼睛虹膜的检测结果来进行辅助判断。

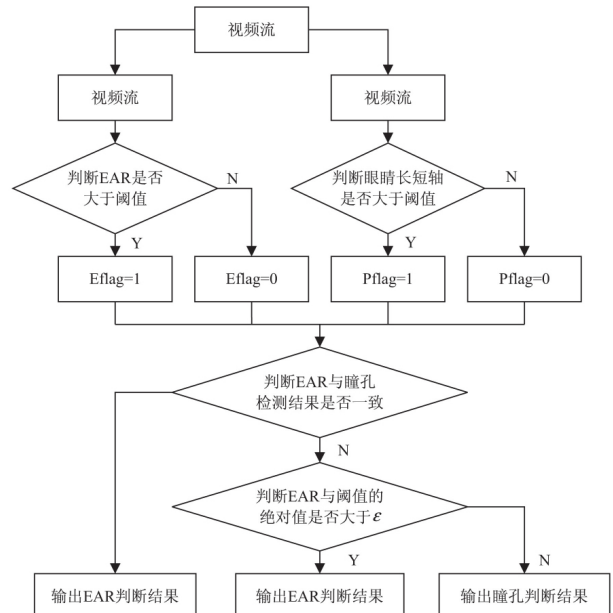


图6 EAR 和人眼虹膜融合

3 实验结果分析

为了验证文中算法的有效性,对 EP 算法(提出的融合方案)、EAR 算法、眼睛张开角度算法、虹膜算法进行了比较。测试视频为正常、夜晚、倾斜、戴眼镜睁闭眼视频,视频流分辨率为 640×480 、帧率为 30 fps。实验设定 EAR 的硬阈值为 0.3, $\varepsilon = 0.05$ 。从表 1 可以看出,该文所提的方法在正常视频、倾斜视频、戴眼镜

视频中比单纯 EAR 的方法眼睛开闭状态检测效果较好;在正常视频中和人眼虹膜检测算法相当,但倾斜视频、戴眼镜视频、晚上视频中比单纯人眼虹膜的方法眼睛开闭状态检测效果较好。综上比较,该方法获得检测视频的平均正确率为 92%,和 EAR、人眼虹膜、眼角相比明显提高了检测正确率,可以为疲劳驾驶检测提供更可靠的参考。

表 1 实验结果

方法	正常视频			倾斜视频			戴眼镜视频			晚上视频			平均
	正确率	错误率	误判数 数量	正确率	错误率	误判数 数量	正确率	错误率	误判数 数量	正确率	错误率	误判数 数量	
文中方法	0.92	0.08	30 399	0.91	0.09	19 223	0.85	0.15	79 520	0.98	0.02	4 387	0.92
EAR ^[8]	0.88	0.12	48 399	0.85	0.15	34 223	0.81	0.19	91 520	0.99	0.01	2 387	0.88
人眼虹膜 ^[11]	0.92	0.08	30 399	0.89	0.11	23 223	0.75	0.25	129 520	0.93	0.07	21 387	0.87
眼角	0.91	0.09	32 399	0.87	0.13	30 223	0.66	0.34	72 520	0.99	0.01	2 387	0.86

4 结束语

针对疲劳驾驶中的眼睛状态判断,提出了一种融合了 EAR、人脸虹膜等多个特征的算法(EP 算法)进行眼睛开闭状态判断,EP 算法综合了 EAR、眼睛虹膜在眼睛状态检测时的优势。结果表明,该方法可以有效提高眼睛开闭检测的准确率并且能满足实时检测的要求,但算法在晚上弱光照条件下的性能需要进一步提高以增强算法在夜晚的适应能力。

参考文献:

- [1] AMODIO A, ERMIDORO M, MAGGI D, et al. Automatic detection of driver impairment based on pupillary light reflex [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(8): 3038–3048.
- [2] 冀翀晓, 吕青, 李何. 基于实时检测眼睛状态的一种安全驾驶方法[J]. 现代电子技术, 2019, 42(20): 133–138.
- [3] 崔庆华, 程科, 李肇基. 积分投影与连通域法结合的人眼定位[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(4): 949–953.
- [4] 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, 36(2): 436–440.
- [5] TOLBA A. Trust-based distributed authentication method for collision attack avoidance in VANETs [J]. IEEE Access, 2018, 6: 62747–62755.
- [6] 李强. 基于 PERCLOS 的列车司机驾驶疲劳研究[D]. 北

京: 北京交通大学, 2014.

- [7] YOU F, LI X, GONG Y, et al. A real-time driving drowsiness detection algorithm with individual differences consideration [J]. IEEE Access, 2019, 7: 179396–179408.
- [8] KONG X, XIA F, LI J, et al. A shared bus polling scheme for smart cities based on heterogeneous mobile crowdsourced data [J]. IEEE Transactions on Industrial Information, 2020, 16(2): 1436–1444.
- [9] KING D E. Dlib-ml: a machine learning toolkit [J]. Journal of Machine Learning Research, 2019, 10: 1755–1758.
- [10] 周云鹏. 基于面部视觉多特征融合的驾驶员疲劳检测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [11] 李阳. 基于多特征融合的面部表情识别方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- [12] ZHAO Li, LI Nianqiang. Fatigue driving detection system based on face feature [C] // International conference on electronics technology. [s.l.]: [s.n.], 2019: 525–529.
- [13] 周涛. 基于人眼状态的驾驶员疲劳检测系统研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.
- [14] 曹永. 驾驶员眼睛开闭状态计算机图像识别技术开发[D]. 青岛: 青岛大学, 2011.
- [15] 刘军. 复杂环境下驾驶员眼睛定位及眼睛状态识别算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [16] DOLLAR P, WELINDER P, PERONA P. Cascaded pose regression [J]. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2010, 10: 1078–1085.