

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **2**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012 年 2 月 第 17 卷 第 2 期(总第 190 期)

目 次

综述

内容感知图像缩放技术综述 施美玲,徐丹(157)

图像处理和编码

引入纹理相似性的纺织品图像增强 杨学志,田晓梅,方静,卢洁(169)

保持边缘特征和增强对比度的图像缩放算法 计忠平,方美娥,王毅刚,吴向阳(178)

以图像认证为目的的分形编码数字水印算法 黄晓晴,于盛林(183)

结合运动矢量和像素递归的全局运动估计方法 赵亚湘,刘少强,樊晓平(191)

无缝栅格数据小波金字塔构建 马伯宁,冷志光,汤晓安,匡纲要(197)

图像分析和识别

伪彩色空间完全非结构化道路检测方法 胡晓辉,孙苗强,苏晓许(203)

未知环境下机器人障碍物检测技术 王文格,武凯宾,朱江,段文彬,许重阳(209)

局部 GAC 模型在医学图像分割中的应用 张建伟,方林,陈允杰,詹天明,罗春燕(215)

判别割(Dcut)的图像分割及其快速分割算法 邹小林,陈伟福,冯国灿(222)

改进的遮挡条件下瞳孔检测方法 潘林,魏丽芳,郑炳锟,余轮(229)

木材显微图像的局部水平集分割方法 汪杭军,祁亨年(236)

关键点检测的线要素综合算法 黄志坚,张金芳,徐帆江(241)

GPU 加速的高分辨率 DEM 图像地形特征线提取算法 刘洲俊,胡包钢(249)

改进 GVF 的自动 Snakes 模型 周亚男,程熙,骆剑承,沈占锋,胡晓东(256)

曲波变换用于磨粒图像不变矩的提取 张云强,张培林,任国全,王国德,徐超,李兵(263)

图像理解和计算机视觉

深度图像中基于轮廓曲线和局部区域特征的 3 维物体识别 吴莉婷,张宇,杨一平,田原(269)

机载 LiDAR 数据的 LZD 航带平差 王丽英,宋伟东(279)

计算机图形学

基于 Z 曲线的瓦片地图服务空间索引 聂云峰,周文生,舒坚,许虎(286)

虚拟现实和增强现实

GPU 加速的台风可视化方法 秦绪佳,张勤锋,陈坚,郑红波,徐晓刚(293)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊) 第 17 卷 第 2 期 2012 年 2 月 16 日出版

主管单位	中国科学院	Superintended by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院遥感应用研究所 中国图象图形学学会 北京应用物理与计算数学研究所	Sponsored by	Institute of Remote Sensing Application, CAS China Society of Image and Graphics Institute of Applied Physics and Computational Mathematics
主 编	李小文	Chief editor	LI Xiaowen
编辑出版	《中国图象图形学报》编辑出版委员会 北京 9718 信箱 邮编 100101 电子信箱:jig@irsa.ac.cn 电话:010-68407995 010-82614429 网 址:www.cjig.cn	Editor ,Publisher	Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics (P. O. Box 9718 ,Beijing 100101 ,China) E-mail:jig@irsa.ac.cn
印刷装订	北京北林印刷厂	Distributed by	Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
广告经营许可证	京朝工商广字第 0346 号	Domestic	All Local Post Offices in China
总 发 行	北京报刊发行局	Foreign	China International Book Trading Corporation (P. O. Box 399 ,Beijing 100044 ,China)
订 购	全国各地邮局	Printed by	Beijing Beilin Printing House
国外发行	中国国际图书贸易总公司 (中国国际书店) (北京 399 信箱 邮编 100044)		

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 2 February 2012

Contents

Review

Survey on content-aware image resizing techniques Shi Meiling, Xu Dan (157)

Image Processing and Coding

Enhancement of textile image with texture similarity Yang Xuezhi, Tian Xiaomei, Fang Jing, Lu Jie (169)

Edge-preserving and contrast-enhancement image scaling Ji Zhongping, Fang Mei'e, Wang Yigang, Wu Xiangyang (178)

Watermarking method on fractal coding for image authentication Huang Xiaoqing, Yu Shenglin (183)

Global motion estimation method with motion vectors and pixel recursion Zhao Yaxiang, Liu Shaoqiang, Fan Xiaoping (191)

Seamless wavelet pyramid construction for raster data Ma Boning, Leng Zhiguang, Tang Xiao'an, Kuang Gangyao (197)

Image Analysis and Recognition

Completely unstructured road detection for pseudo-color space Hu Xiaohui, Sun Miaoqiang, Su Xiaoxu (203)

Obstacle detection for robot in unknown environment
..... Wang Wenge, Wu Kaibin, Zhu Jiang, Duan Wenbin, Xu Chongyang (209)

Application of local GAC model for medical image segmentation
..... Zhang Jianwei, Fang Lin, Chen Yunjie, Zhan Tianming, Luo Chunyan (215)

Fast image segmentations of Deut Zou Xiaolin, Chen Weifu, Feng Guocan (222)

Improved method for the pupil measurement under occlusion Pan Lin, Wei Lifang, Zheng Bingkun, Yu Lun (229)

Segmentation method of wood microscopic image based on local level set Wang Hangjun, Qi Hengnian (236)

Algorithm of line generalization with key point detection Huang Zhijian, Zhang Jinfang, Xu Fanjiang (241)

High resolution DEM topographic feature line extraction algorithm using GPU Liu Zhoujun, Hu Baogang (249)

Automatic snakes model based on modified GVF Zhou Yanan, Cheng Xi, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, Hu Xiaodong (256)

Invariant moment extraction by curvelet transform for wear particle images
..... Zhang Yunqiang, Zhang Peilin, Ren Guoquan, Wang Guode, Xu Chao, Li Bing (263)

Image Understanding and Computer Vision

Three-dimensional free-form object recognition based on contour curve and local surface patches in range images
..... Wu Liting, Zhang Yu, Yang Yiping, Tian Yuan (269)

Least Z-difference strip adjustment of airborne LiDAR data Wang Liying, Song Weidong (279)

Computer Graphics

Spatial index for tile map service based on Z curve Nie Yunfeng, Zhou Wensheng, Shu Jian, Xu Hu (286)

Virtual Reality and Augmented Reality

GPU accelerated typhoon visualization method Qin Xujia, Zhang Qinfeng, Chen Jian, Zheng Hongbo, Xu Xiaogang (293)

中图法分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)02-0229-07

论文引用格式: 潘林, 魏丽芳, 郑炳锬, 余轮. 改进的遮挡条件下瞳孔检测方法 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(2): 229-235

改进的遮挡条件下瞳孔检测方法

潘林, 魏丽芳, 郑炳锬, 余轮

福州大学计算机图象图形研究所, 福州 350002

摘要: 受到眼睑、睫毛、反光等干扰, 提取的瞳孔往往无法近似成标准的椭圆, 给瞳孔精确检测带来了难度。针对遮挡问题, 提出了一种改进的遮挡瞳孔精确检测方法, 该方法首先获取瞳孔图像的感兴趣区域, 在该区域进行阈值分割的基础上, 通过滤波去噪和扫描线法去除光源反光的影响; 根据沿遮挡瞳孔的分界线进行水平旋转, 应用内接平行四边形法确定瞳孔的中心; 根据圆形检测理论, 提出一种中心修正算法, 将求得的两圆的交点作为眼睑与瞳孔的交点, 计算出旋转角度, 从而精化瞳孔中心的定位; 最后利用五点法计算得到的瞳孔椭圆参数作为初始值, 通过最小化拟合椭圆与边缘点之间的欧氏距离, 使得该椭圆在非线性最小二乘意义下是最优的。实验结果表明, 该方法具有良好的鲁棒性和准确性, 在遮挡不超过瞳孔面积一半的情况下, 能得到较为精确的瞳孔位置和边界。

关键词: 瞳孔检测; 遮挡; 平行四边形法; 椭圆检测

Improved method for the pupil measurement under occlusion

Pan Lin, Wei Lifang, Zheng Bingkun, Yu Lun

Institute of Image and Graphics, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China

Abstract: Pupil can not be extracted as a similar standard ellipse because of some interferences caused by reflections, eyelashes and eyelids, which have some difficulties to measuring pupil accurately. In order to solve the problem of eyelid occlusion, an improved method of pupil measurement under eyelid occlusion is presented. It acquires the region of interesting on pupil image and removes reflections by filtering and Sweep line based on threshold segmentation. Then, the center of the pupil is determined using inscribed parallelogram after rotating according to the dividing line for the eyelid. A proposed algorithm of center correction based on circle detection can detect the intersections of two circles, which can be used as the intersections between the pupil and eyelid in order to compute the angle of the pupil and refine the center. Furthermore, the initial parameters of the pupil ellipse obtain from the five-point method and the ellipse is optimal in the sense of non-linear least squares by minimizing the Euclidean distance between fitting ellipse and edge points. Experimental results demonstrate, this method achieves good performance in terms of robustness and accuracy and obtains accurate locations and boundaries in the case of occlusion no more than half of the pupil area.

Key words: pupil measurement; occlusion; parallelogram method; ellipse detection

0 引言

瞳孔检测技术是计算机视觉领域一个重要的研

究课题, 其在自动控制、交通安全、人机交互、刑侦、医学工程等领域的需求越来越迫切^[1-3]。瞳孔的中心定位和大小计算是瞳孔检测中最重要的两个部分。瞳孔可以近似成椭圆, 其精确检测即是对该椭

收稿日期: 2011-01-27; 修回日期: 2011-08-30

基金项目: 国家自然科学基金专项基金项目(60827002)

第一作者简介: 潘林(1978—), 男, 讲师, 现为福州大学通信与信息系统专业博士研究生, 主要研究方向为图像处理、医学信息学等。

E-mail: pandarling@163.com

圆的参数求解。瞳孔检测往往受到眼睑、睫毛、反光等干扰,提取的瞳孔不能近似成标准的椭圆,给精确检测带来了难度^[4]。而在实际应用中,瞳孔被遮挡的情况并不少见。比如:眼底照相机通过对不同的瞳孔位置下的眼底进行拍摄,以获得大角度视网膜图像,照明光束须定位到瞳孔中心,并且与瞳孔大小匹配。瞳孔移动过程中,眼睑部分遮挡瞳孔的情况十分常见。为了实现良好的人机交互,需恢复出被遮挡前的瞳孔。此外,在疲劳驾驶检测等领域中,遮挡条件下的瞳孔精确检测也具有广泛的应用前景。

在瞳孔精确检测方面,基于 Hough 变换的椭圆检测算法^[5]较早用于瞳孔检测,但其运算复杂度,实时性差;Takayuki Shinoda 等将瞳孔边缘内接平行四边形的中心作为瞳孔中心^[4],并选取边缘上的 5 个点计算瞳孔的特征参数,该方法并未考虑瞳孔被眼睑遮挡的情况;Long 等通过椭圆几何性质的质心对称算法和眼球模型 3 维空间与 2 维平面的映射关系^[6-7],测量瞳孔被眼睑遮挡时中心位置和大小,该方法只针对正椭圆,并未对各种旋转角度下的斜椭圆作处理;文献[8]提出一种基于最优化的非线性最小二乘的椭圆拟合方法,能够在边界不完整的情况下拟合出精确的椭圆边界,该方法涉及到目标函数的优化,在参数简化和运算速度上还有待改进。

本文提出一种瞳孔在部分遮挡下的精确检测方法。方法的流程如图 1 所示。首先获取瞳孔图像的兴趣区域(ROI),对 ROI 图像进行阈值分割、滤波去噪和扫描线法,去除光源的影响并得到瞳孔边缘;

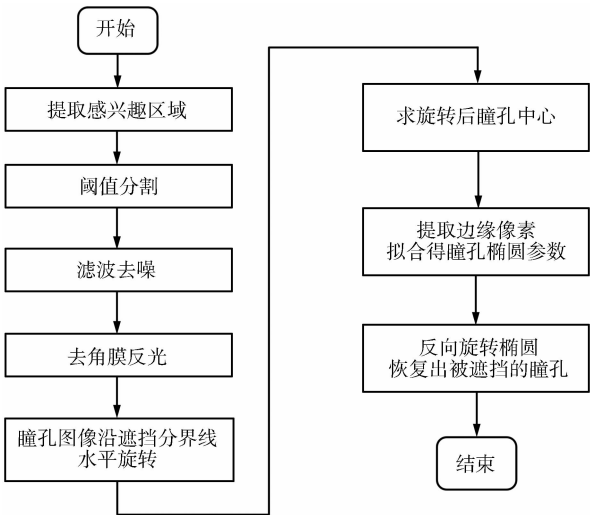


图 1 本文方法流程框图
Fig. 1 Flow diagram of the algorithm

然后沿遮挡瞳孔的分界线进行水平旋转,应用内接平行四边形法确定瞳孔的中心,再利用基于圆形检测的中心修正算法,精化瞳孔中心的定位;最后将 5 点法计算得到的遮挡瞳孔椭圆参数作为初始值,通过最小化拟合椭圆与边缘点之间的欧氏距离,使得该椭圆在非线性最小二乘意义下是最优的。实验结果表明,该方法能消除光源反光干扰,在瞳孔边界不完整的情况下拟合出精确的瞳孔边界,有良好的准确性和鲁棒性。

1 瞳孔提取

1.1 感兴趣区域的获取

采用红外照明下暗瞳孔检测^[9],由于光源不在眼轴上,瞳孔比周边灰度值低。利用形态学开运算和闭运算可以将睫毛带来的噪声影响滤除。为了提高运算速度,ROI 的提取在经过 $1/4 \times 1/4$ 的下采样图像上进行;利用改进的阈值法^[10]在图像上选择一个包括全部瞳孔的区域作为 ROI,用于后续的处理。如图 2(a)显示了 ROI 在图像中的位置;图 2(b)为下采样的图像,图 2(c)为下采样的阈值图像,图 2(d)为 ROI 阈值图像,图 2(e)为 ROI 图像。

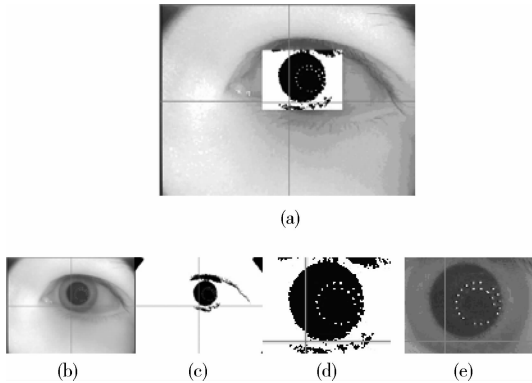


图 2 瞳孔图像感兴趣区域
Fig. 2 Region of interest of the pupil image

1.2 瞳孔图像修复

利用 ROI 图像提取良好二值化瞳孔图像是瞳孔检测的重要前提。本文利用基于直方图的阈值分割方法提取瞳孔。ROI 图像直方图呈现了多个峰谷值,然而根据 ROI 图像的性质知第 1 个谷值即为所要的阈值。通过对直方图进行平滑处理准确得到第 1 个谷值,利用该谷值得到二值化瞳孔图像。

瞳孔图像中,不可避免包含红外发射管作为照

明光源时在角膜上产生的光斑,使得分割出的瞳孔产生缺角。为了保证椭圆参数的精度,采用扫描线法去除光斑和缺角的影响,分别从水平和垂直方向对光斑和缺角进行填充,图 3 是光斑和缺角去除的整个过程。先沿水平方向,从左向右,从上到下扫描,将最左边的点和最右边的点之间的区域填充,然后从右到左重复该过程。同理,可在垂直方向上做同样的操作,进一步减小缺角区域。在应用扫描线法之前,应先进行去除噪声处理,否则会出现填充区域由边界点朝噪声点方向扩大,如图 4 右下角所示。

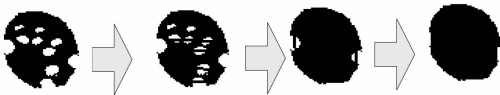


图 3 水平方向和垂直方向去除光斑的过程
Fig. 3 Spot removal from horizontal and vertical

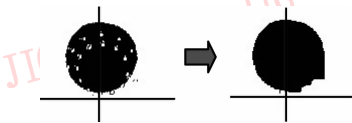


图 4 扫描线法填充未去噪的图像
Fig. 4 Image after Sweepline without filtering

2 瞳孔中心定位

根据椭圆的几何性质可知,其内接平行四边形中心固定,如图 5 所示,故可将椭圆内接平行四边形中心作为椭圆的中心。由上述阈值法得到的瞳孔是近似的椭圆,其内接平行四边形的中心不在同一个点上,需要重复求出所有内接平行四边形的中点,以重合次数最多的点作为中心点。由于多次求中心点并会比较会增加计算量,实际应用中,通过设置一个误差范围来判断两点是否重合,在保证一定精度条件下提高实时性。

有些光斑产生的缺角,扫描线法无法填充,当内接平行四边形顶点在该缺角上时,其中心跟其他平行四边形的中心存在较大偏差。为了使计算结果不受缺角的影响,可以将较大偏差的中心点直接剔除,如图 6 所示。图 7 将平行四边形法和重心法相比较,可以看出当瞳孔被遮挡时,由重心法求得的中点是不准确的,而用平行四边形法求得的中点较为准确,且不受遮挡的影响。因此,平行四边形法能有效地解决反射光斑形成的缺角问题,并可用于解决遮挡

问题,鲁棒性较高。

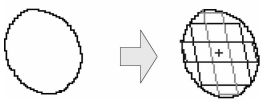


图 5 内接平行四边形法
Fig. 5 Inscribed parallelogram method



图 6 椭圆缺角情况下内接平行四边形法
Fig. 6 Inscribed parallelogram method with losing areas

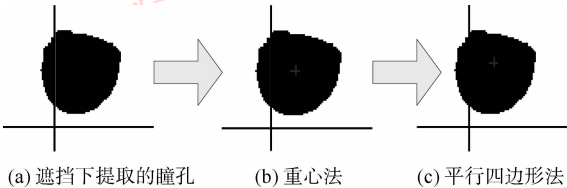


图 7 遮挡下重心法和平行四边形法得到的中心
Fig. 7 Center extracted by gravity method and parallelogram method under occlusion

然而,当眼睑遮挡瞳孔的部分超过其近似椭圆的中心线时,内接平行四边形法得到的椭圆中心会出错,该类情况在瞳孔转动成斜椭圆时常发生。此时,需要根据眼睑和瞳孔的分界线与水平线的夹角 ϕ ,将分界线旋转至水平方向,再根据平行四边形法求出旋转后的椭圆中心,如图 8 所示。

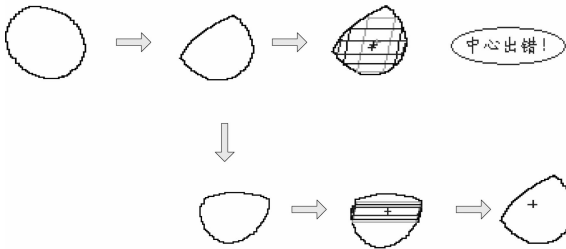


图 8 遮挡超过椭圆中心线的平行四边形法及改进
Fig. 8 Inscribed parallelogram method with block over ellipse center line and the improvement

遮挡下的瞳孔轮廓可以看做两个圆相交,将两个圆的交点作为眼睑与瞳孔的交点,计算出旋转角度。一个近似的旋转角度求法如下:提取轮廓前,先用重心法计算 ROI 中瞳孔的中心 (x_{00}, y_{00}) ,以此中

心的 x 坐标为界,分别向左向右 T 个单位选取轮廓上的点,即选取距离中心 x 坐标左右 T 个单位的第一个轮廓点。从上到下,从左向右扫描,记录离中心 x 坐标左边 T 个单位的轮廓点;从上到下,从右向左扫描,记录离中心 x 坐标右边 T 个单位的轮廓点;以此两点的连线和水平线的夹角 ϕ' 作为旋转角度,此处的 ϕ' 近似于 ϕ 。根据该旋转角度将轮廓图像顺时针旋转至水平位置(当斜率大于 90° 时逆时针旋转),再根据平行四边形法求出旋转后的椭圆中心 (x_{01}, y_{01}) ,同时求出该中心点与所有边缘点的最大距离 $d_{\max}$ 。

上述方法得到的 ϕ' 近似于 ϕ ,因此求出的瞳孔中心也是近似的。为了获得精确的瞳孔中心,提出一种中心检测的修正方法。将遮挡下的瞳孔轮廓可以看做两个圆相交而遮挡(上眼睑与瞳孔所在圆的相交),将两个圆的交点作为眼睑与瞳孔的交点,计算出旋转角度。如图 9 所示,通过对眼睑和瞳孔分别进行圆检测。实际中,只考虑上眼睑与瞳孔相交的情况,故找出两个相交圆,得到相应圆形结构的参数,根据两个圆的参数计算两个圆的交点 (P_1, P_2) 。

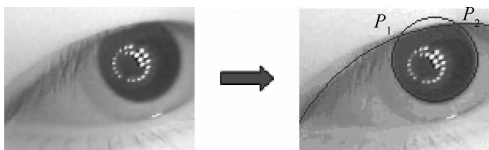


图 9 圆检测求得眼睑与瞳孔的交点示意图

Fig. 9 Diagram of the intersections between the pupil and eyelid obtained by circle detection

具体修正步骤如下:

1) 利用圆形轮廓算子检测二值化瞳孔图像中可能存在的圆,优化瞳孔中心位置,圆形检测如下^[11-12]:

$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left| \mathbf{G}_\sigma(r) \times \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r, x_0, y_0} \frac{\mathbf{I}(x, y)}{2\pi r} ds \right| \quad (1)$$

式中, $\mathbf{G}_\sigma(r)$ 为高斯函数, $\mathbf{I}(x, y)$ 为图像灰度分布, ds 是一段以 (x_0, y_0) 为圆心,以 r 为半径的圆弧。式(1)表示算子在以 (x_0, y_0) 为圆心,以 r 为半径的圆周 ds 上,对像素值进行积分,再求差分极值对应的坐标,即是一个以尺度 σ 模糊化的圆形边界探测器,它对瞳孔边界的定位是在 (r, x_0, y_0) 3 参数空间不断迭代求最优解(即求最大值)的过程。

2) 利用已经估算的瞳孔中心 (x_{01}, y_{01}) ,限制圆形算子的搜索空间:在粗定位周围很小范围内变化 $(x_{01} \pm 5, y_{01} \pm 5)$; r 为要检测的圆半径,取粗定位确定的伪半径(伪半径取中心与边缘图像中所有边缘点的最大距离 $d_{\max}$) ± 10 范围内的值,搜索圆形元素;然后在该限制空间以外空间搜索新的圆形元素。

3) 求取两种情况下获得的圆形结构的参数,计算两个图形的交点 (P_1, P_2) ,以求得的交点作为眼睑与瞳孔的交点。

眼睑和瞳孔的分界线可以用带有弧度的曲线表示, P_1 与 P_2 两点连成的直线 $l_{P_1P_2}$ 的倾斜角度 θ 作为分界线的偏转角。根据 $P_1(x_{P_1}, y_{P_1})$ 与 $P_2(x_{P_2}, y_{P_2})$ 两点连成的直线,求出直线 $l_{P_1P_2}$ 的斜率及其倾斜角

$$k = \frac{y_{P_1} - y_{P_2}}{x_{P_1} - x_{P_2}} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} k \quad (3)$$

平行四边形法得到的图像中心 (x_{01}, y_{01}) ,假设原椭圆坐标点 (x, y) ,逆时针旋转 θ 角度后,新的坐标位置为

$$x_1 = (x - x_{01}) \cos \theta - (y - y_{01}) \sin \theta + x_{01} \quad (4)$$

$$y_1 = (x - x_{01}) \sin \theta + (y - y_{01}) \cos \theta + y_{01} \quad (5)$$

根据旋转角度将轮廓图像旋转至水平位置后,再利用平行四边形法重新求出旋转后的椭圆中心。

3 瞳孔参数计算

瞳孔边缘的椭圆方程可表示为

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (6)$$

瞳孔参数计算即对椭圆中心、长短轴、旋转角度的求解,采用 5 点法,即从瞳孔边缘上取 5 个点,来计算上述 5 个参数。由于眼睑遮挡的存在,必须对瞳孔边缘从下往上取点,边缘底部取一点,往上 1/4 处左右两端各取一点,然后再往上 1/2 处左右两端各取一点,共 5 点。由高斯消去法求得椭圆方程系数,计算出椭圆的中心

$$x_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \quad (7)$$

$$y_0 = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \quad (8)$$

为了确保所取的点是正确的,比较 5 点法计算出的椭圆中心和平行四边形法求得的中点是否一致。若不一致,则另取 5 点,其中瞳孔边缘上的最低

点保持不变,将两边上的4点作小步长移动,重新计算椭圆的中心,直到与平行四边形法求得的中点一致。若5点法求得的中心始终没能和平行四边形法求得的中心重合,则设定一定的误差范围,牺牲精度以实现算法稳定性;得到正确的5点后,计算出长短半轴和旋转角。

$$a = \sqrt{\frac{2(Ax_0^2 + Bx_0y_0 + Cy_0^2 - F)}{(A + C) - \sqrt{B^2 + (A - C)^2}}} \quad (9)$$

$$b = \sqrt{\frac{2(Ax_0^2 + Bx_0y_0 + Cy_0^2 - F)}{(A + C) + \sqrt{B^2 + (A - C)^2}}} \quad (10)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{B}{A - C} \right) \quad (11)$$

为使计算出的椭圆边界和实际的边缘点更为吻合,提出进一步改进的方法:找到一组椭圆边界点使其到实际边缘点的欧氏距离在非线性最小二乘意义下最小^[13-14]。非线性最小二乘拟合的初值可由上述5点法得到。

取过中心点水平线以下的所有实际边缘点到椭圆边界点距离平方和最小为最小二乘意义下的最优拟合,目标函数为

$$M = \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \right)^2 \quad (12)$$

其中

$$(x - x_0)^2 = a^2 b^2 / \left(a^2 \left(\frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \sin \theta + \cos \theta \right)^2 + b^2 \left(\sin \theta - \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \cos \theta \right)^2 \right),$$

(x_i, y_i) 为边缘点, (x, y) 为边界点, N 为旋转水平线下方边缘点的数量。当 M 取最小值时,可得与边缘点非线性最小二乘意义下拟合所得到最好的椭圆。

4 实验与分析

为了检验本文方法的运行效果,对各种眼部图像进行实验,眼部图像为 $320 \times 240 \times 3$ 的 RGB 图像,来自一段视频的某帧。实验在 3.2 GHz CPU, 1G 内存的硬件条件下进行,用 VC6.0 编程实现。如图 10 所示,本文方法在瞳孔正视(正椭圆)和转动(斜椭圆)过程中,当存在眼睑遮挡时,均能恢复出完整的瞳孔椭圆,具有良好的鲁棒性。

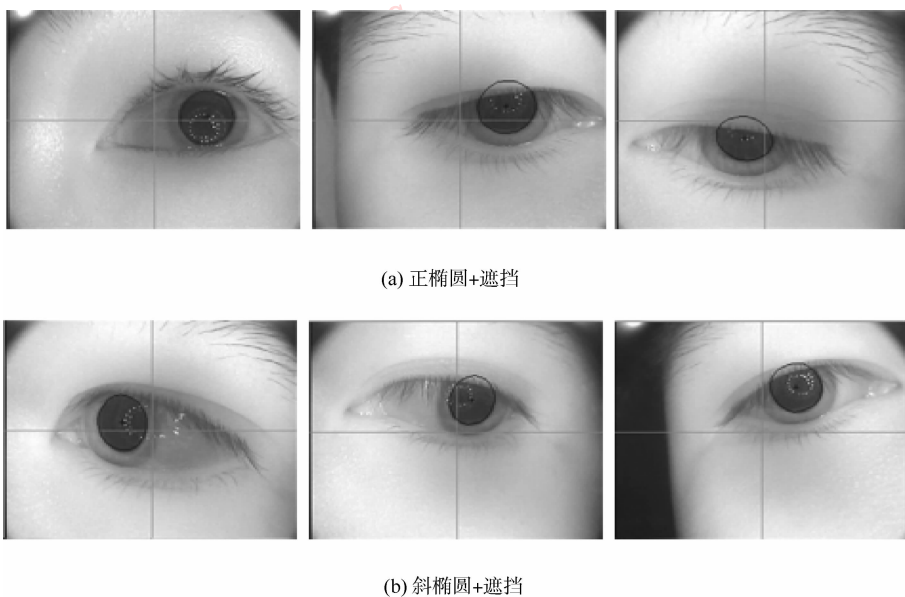


图 10 本文方法恢复的椭圆

Fig. 10 Algorithm to recover the ellipse

为了检验恢复出的瞳孔椭圆的精度,采用平均误差来度量。平均误差定义为实际边缘点到椭圆边界点距离平方和(不计算遮挡边缘部分),平均误差率为平均误差除以实际边缘点到

标定中心的欧氏距离平方和,把多次手工标定中心的平均值设为标定中心。图 11 是 5 点法和本文方法结果对比,明显看出本文方法提取的椭圆更接近瞳孔的边缘。将本文方法得到的椭圆和 5

点拟合得到椭圆进行平均误差比较,表 1 是图 10 中两个例子的误差比较。

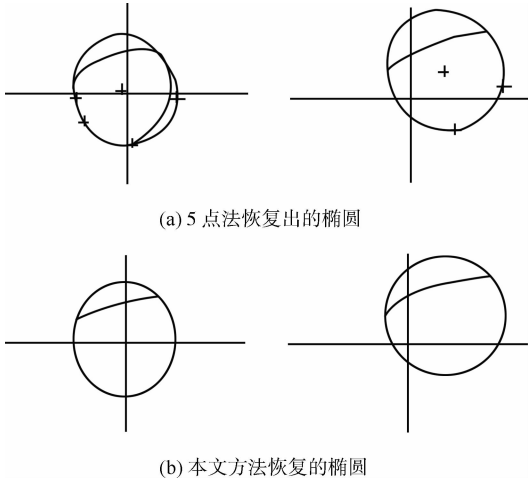


图 11 两种方法结果对比

Fig. 11 Comparison of two methods of fitting results

表 1 算法检测误差比较
Table 1 Comparison of measurement error between algorithms

	平均误差率		/%
	5 点拟合	本文方法	
图 10(a)(左)	8.32	3.47	
图 10(b)(右)	5.58	2.04	

从图 11 及表 1 的结果可以看出,本文方法的精度与 5 点拟合法相比有较大的提高。另外,对于正椭圆和斜椭圆,本文方法均可达到较好的效果。文献[6]是一种正椭圆遮挡下的方法,其误差小于 4%,和本文方法的精度相当;而本文在斜椭圆遮挡下的误差经过统计能达到 6% 以下。

本文方法在平行四边形求中心、圆形检测法求旋转角以及非线性最小二乘拟合获得最佳椭圆轮廓中均使用到迭代计算,迭代计算的停止由迭代次数和误差范围来控制。为了提高精度,往往需要增加迭代次数和减小误差范围,但这也降低了检测的实时性。因此,对这些参数的选择需要根据不同的应用需求确定。比如在眼底拍照中,瞳孔受固视点的引导,位置相对固定,此时对于检测方法准确性的考虑要优于实时性;而疲劳驾驶检测侧重于求瞳孔参数的变化量,需对瞳孔的变化做及时分析,此时可以适当降低检测精度,满足实时性要求。

5 结 语

本文将瞳孔检测分成 3 个步骤:瞳孔提取,瞳孔中心定位和瞳孔参数计算,着重研究遮挡条件下瞳孔椭圆边界的恢复和参数计算。对于暗适应下的瞳孔^[15],即瞳孔直径大于 4 mm 的情况下,本文方法具有良好的鲁棒性和较高的精度,并能够应用于实时检测。

当遮挡超过瞳孔椭圆面积的 1/2 时,即使进行旋转,平行四边形法仍无法找到正确的中心,此时可改变 5 点的取法,从瞳孔边缘底部取一点,两边的 1/8 和 1/4 位置左右各取两点,然而采用这种方式,瞳孔参数的精度就无法保证。因此,如何在遮挡比较多的情况下,进行瞳孔参数的精确检测是今后工作的重点。

参考文献 (References)

[1] Skander D R, Collins M J, Mioschek S, et al. Automatic pupillometry from digital image [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004, 51 (9) : 1619-1627.

[2] Dongheng L, Winfield D, Parkhurst D J. Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches [C] // Proceedings of the 2nd IEEE CVPR Workshop on Vision for Human-Computer Interaction. San Diego, USA: IEEE Computer Society Press, 2005, 3: 79-86.

[3] Chen Y, Wyatt H J, Swanson W H. Pupillary evaluation of retinal asymmetry: Development and initial testing of a technique [J]. Vision Research, 2005, 45 (9) : 2549-2563.

[4] Takayuki S, Masami K. A pupil diameter measurement system for accident prevention [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Taipei, Taiwan: IEEE Press, 2006, 2: 1699-1703.

[5] Nair P S, Saunders Jr A T. Hough transform based ellipse detection algorithm [J]. Pattern Recognition Letters, 1996, 17: 777-784.

[6] Long X, Tonguz O K, Kiderman A. Real time pupil size monitoring as a screening method for diabetic retinopathy [C] // Proceedings of Biomedical Circuits and Systems Conference. Montreal, Canada: IEEE Press, 2007: 215-218.

[7] Long X, Tonguz O K, Kiderman A. A high speed eye tracking system with robust pupil center estimation algorithm [C] // Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Lyon, France: IEEE Press, 2007: 3331-3334.

[8] An X Y, Zhou Z T, Hu D W. Ellipse fitting based on non-linear

- least squares[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(18):188-190. [安新源,周宗潭,胡德文. 椭圆拟合的非线性最小二乘方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(18):188-190.]
- [9] Shen H P, Feng H J, Xu Z H. Gaze tracking system based on pupil detection[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(8):961-964. [沈海平,冯华君,徐之海. 基于瞳孔检测的注视点跟踪系统[J]. 光电子·激光, 2005, 16(8):961-964.]
- [10] Sun C T, Zhou C G, Liu X D, et al. An improved iris location algorithm[J]. Mini-Micro Systems, 2006, 27(7):1335-1338. [孙彩堂,周春光,刘向东,等. 一种改进的虹膜定位方法[J]. 小型微型计算机系统, 2006, 27(7):1335-1338.]
- [11] He J F, Ye H N, Ye M Y. A study on iris image quality evaluation[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(4):387-391. [何家峰,叶虎年,叶妙元. 虹膜图象质量评价的研究[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(4):387-391.]
- [12] Daugman J G. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence [J]. IEEE Transactions on PAMI, 1993, 15(11):1148-1161.
- [13] Fitzgibbon A, Pilu M, Fisher R B. Direct least square fitting of ellipses[J]. IEEE Transactions on Pattern Anal Mach Intell, 1999:476-480.
- [14] Sheng D W, He X F, Lv Y. A cattle iris segmentation method based on least square principle [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(10):2132-2136. [盛大玮,何孝富,吕岳. 基于最小二乘原理的牛眼虹膜分割方法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(10):2132-2136.]
- [15] Guo S, Jin L, Qin S X. The measurement of scotopic pupil diameter with nocontact tonometer [J]. Journal of Clinical Ophthalmology, 2009, 17(4):337-338. [郭晟,金玲,秦士新. 非接触眼压计测量暗适应下瞳孔直径[J]. 临床眼科杂志, 2009, 17(4):337-338.]