

# 低分辨率图像中的瞳孔中心精确定位方法

闫 蓓 吴梦瑶

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

**摘 要:** 针对低分辨率图像中瞳孔边缘模糊、瞳孔受上下眼睑遮挡等问题,提出了一种由粗及精的瞳孔中心精确定位方法,该方法主要使用瞳孔的几何特征和人眼的方向信息进行定位。首先基于显式形状回归方法提取人脸特征点,根据人脸特征点粗定位瞳孔中心;其次根据半径搜索范围,采用射线法提取准确的瞳孔边缘,通过改进的随机抽样一致性算法剔除伪边界点,基于最小二乘法精确定位瞳孔中心。最后本文算法在自制人脸库和公开人脸库 BioID 上进行了验证,瞳孔中心精确定位准确率为 82.2%。结果表明该算法能够克服头部姿势变化和眼睑遮挡等问题,与其他算法相比表现出良好的鲁棒性和准确性。

**关键词:** 瞳孔检测;人脸特征点;射线法;随机抽样一致;圆拟合

**中图分类号:** TP391;TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

## Accurate human pupil center localization in low-resolution images

Yan Bei Wu Mengyao

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of occlusion by eyelids and the blur edges of pupil in low-resolution images, a coarse to fine algorithm for accurate pupil center localization is proposed. The proposed method uses the geometrical information of the iris. Firstly, the explicit shape regression method is used to locate the facial landmarks and calculate the rough pupil center. Secondly, the iris edge is detected by starburst with eye direction and the precise pupil center is estimated using circle fitting. The performance of the proposed method is evaluated both in self-made database and in public database BioID and achieves an accuracy of 82.2%. Experimental results show great improvement compared to the state of the arts.

**Keywords:** pupil detection; facial landmarks; starburst; random sample consensus; circle fitting

## 0 引 言

基于红外相机的视线跟踪系统,采用近红外光源照射眼部时,因为瞳孔对红外线的反射性低,而虹膜对红外线的反射性较高,因此眼睛图像中瞳孔与虹膜的差异变大,而虹膜与眼白之间的差异变小,此特性可以用于检测瞳孔位置。红外相机的视线跟踪系统<sup>[1-2]</sup>视线定位精度高,但是容易受到外界其他光源的影响,应用场景受限。因此基于普通摄像机的视线跟踪系统成为现阶段的研究热点。

基于普通相机的视线跟踪系统在实现视线定位时,首先需要提取多个人脸特征点对头部姿态进行估计,然后再定位瞳孔中心,根据头部姿态、瞳孔中心、眼角点等构造特征向量,实现视线定位,其中瞳孔定位精度直接影响视线的。因此基于普通摄像头的瞳孔中心提取成为视线跟踪技术的一个重要研究方向。

从普通摄像机提取到的人眼图像中,虹膜与瞳孔之间的界限并不明显,所以基于灰度图像的瞳孔中心提取一般都是提取虹膜中心,在本文中,如无特殊说明,提取瞳孔中心即指提取虹膜中心。瞳孔中心定位常用的算法有基于梯度的方法<sup>[3]</sup>、等照度曲线<sup>[4]</sup>、基于 hough 变换的圆拟合<sup>[5]</sup>等。基于梯度的方法使用瞳孔的灰度信息,即瞳孔中最多梯度向量相交的点即为瞳孔中心,该方法运算复杂度低。等照度曲线为瞳孔中灰度值相同的点的连线,其中心即为瞳孔中心,该方法在瞳孔被遮挡时准确度下降。基于 hough 变换的方法运算复杂度高,实时性差。

因此本文提出一种基于人脸特征点的低分辨率图像中瞳孔中心精确定位的方法,该方法的主要优点是主要使用瞳孔的几何特征以及人眼方向信息,计算量小,定位准确率高。首先利用显式形状回归方法提取人脸特征点并提取出眼睛位置,粗定位瞳孔中心。然后基于人眼方向信息利用

收稿日期:2018-05

• 74 •

射线法提取瞳孔边界点,结合改进的随机抽样一致性算法(random sample consensus, RANSAC)进一步剔除伪边界点,最后利用最小二乘法拟合瞳孔中心。该方法可以有效克服上下眼睑对瞳孔边界提取的影响。

## 1 瞳孔中心粗定位

本文首先采用基于显式形状的人脸特征点定位<sup>[6-7]</sup>提取出人眼所在位置,该方法对于光照变化以及头部旋转均有很好的鲁棒性。人脸特征点是指人脸上一与其他部位有明显区别的点,例如眼角点、嘴角点等。显式形状回归方法使用 2 层结构的级联回归分类器,设  $(R_1, \dots, R_T)$  为  $T$  个弱分类器,其中每个弱分类器  $R_i$  又由  $k$  个弱分类器  $(r_1, \dots, r_k)$  组成,每一级的分类器用于解决上一级分类器残留下的误差,通过不断迭代求解,最终精确定位人脸特征点。

人脸特征点定位结果如图 1 所示。在人眼边缘总共有 12 个特征点,其中编号 37~42 为左眼特征点,编号 43~48 为右眼特征点。其中 38、39、41、42 分别为左眼眼睑边缘 4 点,44、45、47、48 为右眼眼睑边缘 4 点,因此可以根据人眼上的特征点进行圆拟合,粗定位瞳孔中心。

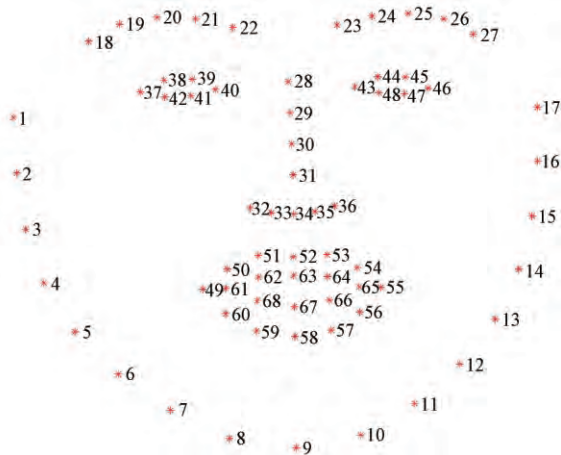


图 1 人脸特征点定位

## 2 瞳孔中心精确定位

由于显式形状回归提取的人眼特征点并不是准确分布在瞳孔边缘上,所以需要进一步精确定位瞳孔中心,本文采取的思路为准确提取出瞳孔边缘,消除上下眼睑的影响,利用最小二乘法拟合圆心作为最终的瞳孔中心定位。图 2 所示为部分不同姿态下提取的人眼图像,图像质量已经过直方图均衡处理,可以看出由于图像分辨率较低,部分示例中瞳孔被上下眼睑遮挡,瞳孔中心已很难直接通过圆拟合。

### 2.1 Sobel 算子检测人眼图像边缘

在人眼图像中,瞳孔为图像中灰度值最大的部分,因此可以采用阈值分割法提取出瞳孔所在位置,为了消除人眼图像中由于光照不均造成的瞳孔灰度值不均,即人眼图像

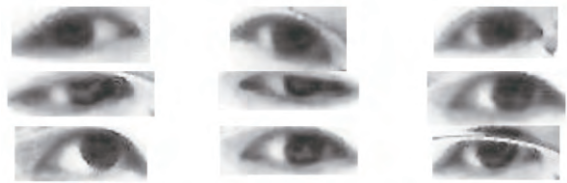


图 2 不同姿态的人眼图像

中可能存在的光斑,在对图像进行二值化处理之后再行图像形态学中的闭运算,闭运算可以在不改变物体轮廓的同时填充物体内的细小孔洞,即消除由光照不均带来的细小光斑。

Sobel 算子是一种常用的检测图像边缘的算子,Sobel 算子包含 2 个  $3 \times 3$  的矩阵,1 个用来计算水平方向的梯度,1 个用来计算竖直方向的梯度,如要计算某点的梯度值,只需要将水平和竖直方向的梯度进行加权。如以  $I$  代表原始图像,  $G_x, G_y$  代表水平方向和竖直方向的边缘图像,则有:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times I, G_y = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \times I \quad (1)$$

图像中每个像素的梯度的幅值和方向可以使用式(2)计算:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \theta_g = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (2)$$

### 2.2 基于人眼方向信息及射线的瞳孔边缘提取

在提取瞳孔边缘时,也会将人眼上下眼睑检测出来,在瞳孔运动幅度较大时,部分瞳孔图像被上下眼睑遮挡,此时上下眼睑对瞳孔边缘检测以及最后的圆拟合有很大影响,本文分 2 步剔除不正确的瞳孔边缘点。首先是基于人眼方向信息的射线瞳孔边缘提取<sup>[8-9]</sup>,其次是下文将要描述的基于改进的 RANSAC 对瞳孔边缘点进行过滤。

首先根据显式形状回归提取出的人眼内外眼角点,可以计算出人眼方向,假设内眼角点的坐标为  $(x_{in}, y_{in})$ , 外眼角点的坐标为  $(x_{out}, y_{out})$ , 则可以计算出人眼在平面内的旋转角度:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_{in} - y_{out}}{x_{in} - x_{out}}\right) \quad (3)$$

假设粗定位的瞳孔中心为  $(x_c, y_c)$ , 则以粗定位的瞳孔中心为原点,以人眼旋转角度为参考角度,在参考角度  $\pm \varphi$  的范围内发射射线,当射线遇到灰度值梯度变化较大的地方,即前文所提取的瞳孔边缘时停止,并记录该点的位置作为真正的瞳孔边缘。射线由式(4)描述。

$$\begin{aligned} x &= x_c + k \cos \alpha \\ y &= y_c + k \sin \alpha \\ \alpha &\in [-\varphi + \theta, \varphi + \theta] \cup [-\varphi + \pi - \theta, \varphi + \pi - \theta] \\ r_{\min} &\leq k \leq r_{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $k$  为射线步长;  $r_{\min}$  和  $r_{\max}$  为最小搜索半径和最大搜索半径, 由人眼图像的宽度决定。  $\alpha$  为发射射线的角度,  $\varphi$  为沿着人眼方向发射射线的范围。图 3 所示为  $\varphi=30^\circ$  时的瞳孔边界点提取结果。

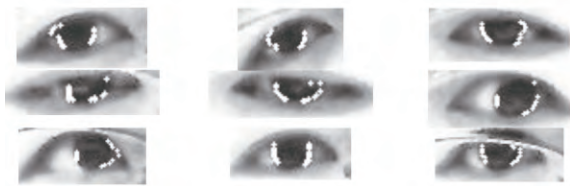


图 3 不同姿态下的瞳孔边缘点提取结果

由图 3 可以看出, 基于人眼方向信息的射线法能够有效的提取出真正的瞳孔边缘点, 去除人眼上下眼睑影响。当人眼处于正视方向时, 瞳孔边缘提取最准确, 当人眼有一定的旋转角度时, 少部分边缘点有所偏差。

### 2.3 改进的 RANSAC 瞳孔中心定位

RANSAC 采用迭代的方法从一组带有噪声的数据中剔除错误数据, 保留正确数据并计算出模型参数。传统的 RANSAC 算法在每次取样时完全随机, 造成迭代次数过多、耗时较长等问题。因此本文采用附加限制条件的采样方法。已知圆上的 3 点可以确定 1 个圆, 由于前文提取的瞳孔边缘点可以分成 2 个子集, 左边缘点和右边缘点, 所以用于拟合模型的第 1 个点从左边缘点集合中随机提取, 第 2 个点从右边缘点集合中随机提取, 第 3 个点随机选取, 以避免提取的 3 个点位于同一侧而带来的模型拟合误差, 也可以提高算法的效率。得到准确的边缘点数据集后, 采用最小二乘法拟合圆心, 即为精确的瞳孔中心。

## 3 实验结果及分析

为了验证本文算法的有效性, 将在自建人脸库和 BioID 人脸库上进行实验。本文算法的测试环境为 Intel Core i7 7500U, 2.7 GHz 的笔记本电脑, 操作系统为 Windows 10。

### 3.1 自建人脸库结果分析

自建人脸库包含 100 幅彩色人脸图像, 采用笔记本电脑自带的摄像头 (USB 2.0 HD UVC WebCam) 于白天和夜晚在实验室中所拍摄, 光线均为自然光和灯光, 无辅助光源, 被拍摄者头部可以自由运动。图 4 所示为部分检测结果。

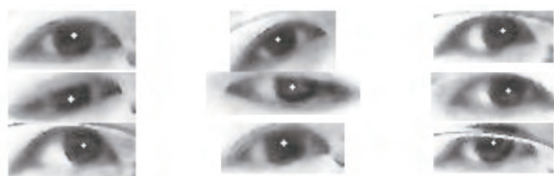


图 4 自制人脸库中瞳孔中心定位结果

从图 4 中可以看出, 笔记本电脑自带的摄像头像素较低, 所获取的眼部图像边缘较为模糊, 本文算法能够准确地定位出瞳孔中心。在示例中, 部分图像中瞳孔被上下眼睑或眼睛框所遮挡, 部分图像中由于瞳孔运动幅度较大, 在灰度上与左右眼角点难以区分, 本文算法仍能精确定位到瞳孔中心, 表现出了较好的鲁棒性。

### 3.2 基于 BioID 数据库结果分析

为了进一步检验本算法的有效性, 本文将在 BioID (<http://www.bioid.com>) 数据集上进行再次验证。该数据库包含 1 521 幅分辨率为  $384 \times 286$  像素的灰度图像, 分别来自 23 名测试人员, 包含多种头部姿态、面部表情、不同肤色、睁眼与闭眼、戴眼镜与不戴眼镜等图片, 因此 BioID 数据集一直被认为是最难定位瞳孔中心的数据集之一。且 BioID 包含手工标注的真实瞳孔中心的坐标, 便于定量分析算法的准确性。

验证本文算法时, 将选用此数据集中的所有图片。为了衡量人眼定位的准确度, 下文将采用归一化误差作为参考。瞳孔中心定位的归一化误差为<sup>[10]</sup>:

$$e = \frac{\max(d_l, d_r)}{d} \quad (5)$$

式中:  $d_l, d_r$  分别代表左右眼瞳孔中心的估计值与真实值之间的距离;  $d$  代表真实的左右眼瞳孔中心之间的距离, 即瞳距。式(5)可以看成每幅图中左右眼定位的误差最大值。同时也引入最优标准化误差 (best eye characteristic) 和平均标准化误差 (average eye characteristic, AEC) 来衡量本文算法。其定义如式(6)所示。

$$e_{BEC} = \frac{\min(d_l, d_r)}{d}, e_{AEC} = \frac{\text{mean}(d_l, d_r)}{d} \quad (6)$$

在此标准下,  $e \leq 0.05$  说明计算出的瞳孔中心可以看作是真实的瞳孔中心,  $e \leq 0.1$  说明计算出的瞳孔中心在虹膜之内,  $e \leq 0.25$  约等于瞳孔中心到眼角点的距离, 说明计算出的瞳孔中心在眼睛之内。

图 5 所示为部分定位结果准确的图片, 图 6 所示为部分定位结果有偏差的图片。

从图 5 中可以看出, 对于不同光线亮度、不同人脸以及人眼姿态以及佩戴或不佩戴眼镜的情况, 本文算法均能精确的定位瞳孔中心。如图 6 所示, 本文算法失效的情况多在于眼睛处于几乎闭合的状态, 未能提取到有效的瞳孔边缘, 或者由于眼镜强烈的反光使提取到的人眼图像已经失去了明显的几何特征。

表 1 所示为本文算法的 3 种标准化误差评价体系下的准确度结果。可以看出, 对于最差标准化误差 (worst eye characteristic, WEC),  $e \leq 0.05$  时的准确率达到 82.2%,  $e \leq 0.1$  时的准确率为 98.1%, 表示本文算法几乎所有的定位结果都在真实虹膜之内。对于最优标准化误差,  $e \leq 0.05$  的准确率达到 97.1%, 即对于几乎所有样本, 本文算法至少能够精确定位 1 个瞳孔中心。结合平均





图 5 瞳孔中心精确定位结果



图 6 瞳孔中心定位失效结果

标准化误差  $e \leq 0.05$  的准确率 92.2%,可以看出在瞳孔中心未被精确定位时,其定位结果也未严重偏离瞳孔。

表 1 不同类型的误差结果 (%)

误差类型	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.15$
BEC	97.1	99.5	99.5
AEC	92.2	99.3	99.5
WEC	82.2	98.1	99.3

为了进一步说明本文算法的有效性,将本文算法与几种现有算法进行比较。Timm 等人<sup>[3]</sup>使用瞳孔的梯度信息,最多梯度向量相交的点即为瞳孔中心,Valenti 等人<sup>[4]</sup>使用等照度线方法投票出瞳孔中心,Asadifard 等人<sup>[11]</sup>首先提取出眼部区域,然后利用累积分布函数实现定位过程,Camoadelli 等人<sup>[12]</sup>使用 Haar 小波变换和 SVM 进行定位,Pang 等人<sup>[13]</sup>首先同样使用显式形状回归的方法提取人脸特征点,再利用等照度线的属性精确定位瞳孔中心,Grag 等人<sup>[14]</sup>考虑瞳孔的圆形性质以及瞳孔巩膜之间的灰度差异,提出一种叫做 Snakuscul 的边缘特征用于定位。George 等人<sup>[15]</sup>首先利用 1 个卷积算子粗定位瞳孔中心,再提取瞳孔边缘进行椭圆拟合。Wei 等人<sup>[16]</sup>结合了人脸特征点提取和等照度曲线特征进行定位。

表 2 为本文算法与其他文献算法在 BioID 上的准确率比较。可以看出,本文在  $e \leq 0.05$  时的准确率为 82.2%,与其他文献算法相比并未有显著提高,但是当  $e \leq 0.1$  和  $e \leq 0.15$  时,本文算法准确度明显高出其他算法,即本文算法在定位上产生误差时,定位结果也基本会在虹膜之内,即并未在严重偏离真实值的地方,说明本文算法的鲁棒性较好。此外,本文算法主要使用瞳孔的几何特征以及人眼方向信息,计算复杂度小。

表 2 与其它文献比较结果 (%)

方法	$e \leq 0.05$	$e \leq 0.1$	$e \leq 0.15$
文献[3]	82.5	93.4	95.2
文献[4]	77.2	82.1	86.2
文献[11]	47.0	86.0	89.0
文献[12]	62.0	85.2	87.6
文献[13]	83.6	96.1	98.6
文献[14]	77.6	88.7	98.6
文献[15]	85.8	94.3	96.7
文献[16]	77.6	91.8	97.9
本文	82.2	98.1	99.3

## 4 结 论

本文提出了一种基于人脸特征点提取的瞳孔中心精确定位方法。该方法充分利用了瞳孔的几何特征和人眼的方向信息,通过带有方向信息的射线法和改进的 RANSAC 方法,精确提取出瞳孔边界点,利用最小二乘法的圆拟合方法确定瞳孔的最终位置。与现有方法相比,本文方法准确率高,计算复杂度小,能够有效克服头部姿态和上下眼睑的影响,可以用于在低分辨率图像中精确定位瞳孔中心。

## 参考文献

- [1] JUNG Y, KIM D, SON B, et al. An eye detection method robust to eyeglasses for mobile iris recognition[J]. Expert Systems with Applications an International Journal,

- 2017, 67(C):178-188.
- [2] 陈健,郑绍华,潘林,等. 结合椭圆拟合与参数传递的瞳孔检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8):1890-1899.
- [3] TIMM F, BARTH E. Accurate eye centre localisation by means of gradients[C]. Visapp 2011, DBLP, 2011: 125-130.
- [4] VALENTI R, GEVERS T. Accurate eye center location and tracking using isophote curvature [C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2008:1-8.
- [5] 刘念,苏杭,郭纯宏,等. 基于 Hough 变换圆检测的人眼定位方法改进[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(4): 1359-1362.
- [6] KAZEMI V, SULLIVAN J. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees[C]. Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2014:1867-1874.
- [7] CAO X, WEI Y, WEN F, et al. Face alignment by explicit shape regression[C]. 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012: 2887-2894.
- [8] LI D, WINFIELD D, PARKHURST D J. Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches [C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005:79-79.
- [9] 张国英,毛辉,徐宁,等. 基于自适应射线群的图像边缘检测算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(4):232-234.
- [10] JESORSKY O, KIRCHBERG K J, FRISCHHOLZ R W. Robust face detection using the hausdorff distance[M]. Audio and Video-Based Biometric Person Authentication. Springer Berlin Heidelberg, 2001:90-95.
- [11] ASADIFARD M, SHANBEZADEH J. Automatic adaptive center of pupil detection using face detection and CDF analysis[J]. Lecture Notes in Engineering & Computer Science, 2010, 2180(1):13-14.
- [12] CAMPADELLI P, LANZAROTTI R, LIPORI G. Precise eye localization through a general-to-specific model definition [C]. Proceedings of the British Machine Vision Conference, 2006:187-196.
- [13] PANG Z, WEI C, TENG D, et al. Robust eye center localization through face alignment and invariant isocentric patterns[J]. Plos One, 2015, 10(10):e0139098.
- [14] GRAG S, TRIPATHI A, CUTRELL E. Accurate eye center localization using Snakuscul[C]. 2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), 2016.
- [15] GEORG A, ROUTRAY A. Fast and accurate algorithm for eye localization for gaze tracking in low resolution images[J]. IET Computer Vision, October 2016, 10(7):660-669.
- [16] WEI C, PANG Z, CHEN D. Combining shape regression model and isophotes curvature information for eye center localization [C]. 7th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics, IEEE, 2014.

#### 作者简介

闫蓓, 博士, 副教授, 主要研究方向为先进视觉检测技术、先进航空测试系统、检测技术与自动化装置。

E-mail: yanbei@buaa.edu.cn

吴梦瑶, 硕士研究生, 主要研究方向为先进视觉检测技术。

E-mail: mengyao.wu@outlook.com