

# 基于二次圆周补偿的虹膜边界定位方法

薛雅迪, 王劲松\*, 樊纯璨

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 为提高虹膜定位的准确性与实时性,提出了基于二次圆周补偿的虹膜边界定位算法。所提算法以近似半径补偿与近似圆心补偿为核心,对虹膜内及其外边缘进行定位。定位内边界时,利用最小灰度均值法进行粗定位,并在提取内边缘图像后采用近似圆心补偿法进行细定位;定位外边界时,采用近似半径补偿法进行粗定位,再根据近似圆心补偿法进行细定位。实验结果表明,从CASIA虹膜库中随机选取了2000张不同虹膜图像进行了验证,算法平均定位时间为0.29 s,定位准确率为98.1%。所提算法在准确度与实时性方面都较对比方法有所提高。

**关键词** 机器视觉; 虹膜定位; 二次圆周补偿; 圆心补偿; 半径补偿

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.101505

## Iris Boundary Localization Method Based on Double Circular Compensation

Xue Yadi, Wang Jinsong\*, Fan Chuncan

School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In order to improve the accuracy and real-time performance of iris location, an iris boundary location algorithm based on double circular compensation is proposed. The approximate radius compensation and approximate circle center compensation are used as the core to locate the inner and outer boundary of the iris by the proposed algorithm. When locating the inner boundary, the minimum gray average method is used to perform coarse localization, and the approximate circle center compensation method is used for locating the inner boundary exactly after extracting the inner boundary images. When locating the outer boundary, the approximate radius compensation method is used to perform coarse locating, and the exact locating is performed by the approximate circle center compensation method. Experimental results show that 2000 different iris images from CASIA for verification are randomly selected. The average locating time of the algorithm was 0.29 s, and the locating accuracy rate is 98.1%. The proposed algorithm is more accurate and faster than the contrast method.

**Key words** machine vision; iris location; double circular compensation; center compensation; radius compensation

**OCIS codes** 150.1135; 100.2980; 150.0155

## 1 引言

虹膜识别<sup>[1]</sup>是一种新颖的、基于生物特征的身份鉴别方法,与其他生物识别方法(指纹<sup>[2]</sup>、人脸<sup>[3]</sup>等)相比,其唯一性、稳定性、非侵犯性和安全性更强,故其在安防设备以及有高度保密需求的场所有着广泛应用。虹膜定位是虹膜识别过程中的重要步骤,其目的是对虹膜的内外边界进行定位,准确提取虹膜所在区域特征,保证虹膜识别时编码和匹配结果的准确性。由于虹膜区域常被头发、眼睑、睫毛以及光斑等因素干扰,且虹膜外边缘相对模糊,因此虹

膜定位存在一定的难度。

在虹膜定位领域,较为经典的算法有Daugman<sup>[4]</sup>的圆微积分算法和Wildes<sup>[5]</sup>提出的边缘检测与霍夫(Hough)变换相结合的算法。两种算法的缺点是均需要复杂计算,不仅耗时而且无法在睫毛、光斑等干扰因素下进行有效定位。近年来,国内外学者对虹膜定位算法进行了研究。吴建华等<sup>[6]</sup>提出了一种基于小范围(SSS)搜索的虹膜定位算法,该算法通过缩小内外圆心范围以减少Hough变换(HT)算法搜索的盲目性,提高了算法的实时性与抗干扰能力,但其定位实时性依旧有待提升;Li

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-04-18; 录用日期: 2018-05-25

基金项目: 吉林省科技发展计划重点研发项目(20180201025GX)

\* E-mail: soldier\_1973@163.com

等<sup>[7]</sup>提出了一种基于感兴趣区域(ROI)的虹膜定位算法,采用改进的 Daugman 算法检测虹膜边界,优点是得到更准确的圆形边界,但缺点是实时性不高;邹德旋等<sup>[8]</sup>提出了基于改进粒子群(IPSO)的虹膜定位算法,根据 IPSO 算法对虹膜内外边缘进行定位,在实时性和准确性上都取得了较好效果,但该方法的稳健性不强。

为了提高虹膜定位的实时性与准确性,本文提出一种基于二次圆形补偿的虹膜定位方法(DCC)。实验表明:该方法在传统 Hough 变换的基础上,利用二次数据补偿方法进行改进,不仅可以保留 Hough 变换原有的优越性,而且大大减少 Hough 变换的计算量与无用信息量,进而提高定位的实时性与准确性。

## 2 原理概述

假设  $X$ - $Y$  平面上有若干待拟合点,可以对应平面上若干圆形。在传统的 Hough 变换中,需要以图像上所有点为圆心,每个灰度值为 1 的点(即边缘检测后的图像边缘点)为圆上点,以半径从小到大迭代的方式于参数平面上拟合圆。这样做不仅需要建立  $X$ - $Y$ - $R$  三维平面,计算耗时,而且稳健性差,拟合结果受瞳孔环状纹理、眼睑、睫毛等无关因素影响较大。为此,采用近似半径补偿与近似圆心补偿的二次圆周补偿与 Hough 变换相结合的方法进行虹膜内外边缘定位。

### 2.1 近似半径补偿

虹膜定位实质为在图像平面( $X$ - $Y$  平面)确定一个圆周,设所提边缘图像上所有灰度值为 1 的点

(即边缘点)集合,而点 $(X,Y)$ 为其中的一点。

如果该点在圆周上,则其满足圆方程:

$$(x-a)^2+(y-b)^2=R^2, \quad (1)$$

式中 $(a,b)$ 为圆心, $R$ 为圆周半径。但实际上,圆并非正圆形,而是近似正圆却与正圆存在微小差异的圆周,虹膜的外边缘就明显对应此种情况。如果采用判断正圆的方法来判断虹膜内外边缘,则可能漏掉某些不属于正圆范畴内的边缘点,导致虹膜边缘点不能全部统计到对应的圆周上,导致虹膜边缘定位错误。

如果点 $(x,y)$ 满足补偿距离条件:

$$|(x-a)^2+(y-b)^2-R^2|<\delta, \quad (2)$$

则认为该点在圆心为 $(a,b)$ 、半径为 $R$ 的近似圆周上。其中, $\delta$ 为设定的半径补偿距离( $\delta\geq 0$ )。通过上述方法,可以对近似圆周进行有效粗略定位。

在对虹膜边缘进行拟合时,采用近似半径补偿方法将属于正圆范围内的点与不属于正圆范畴内且仅与正圆边缘存在微小距离的点包含进来,能最大程度地累积存在于虹膜内外边缘的点,规避了因眼睑遮挡虹膜环状纹理和边缘等而导致圆周定位不准的情况。

### 2.2 近似圆心补偿

圆周粗略圆心 $(X_p,Y_p)$ 与其实际圆心存在较小差异,故在 Hough 变换时采用圆周圆心补偿方法,即设定一个内圆心补偿区域,将以粗定位圆心为中心、圆心补偿量 $\Delta M$ 为半径的正方形区域均认为细定位圆心的可能区域。该方法只需考虑圆心矩阵 $C$ 内的坐标点,即 $(\Delta M\times 2+1)^2$ 个近似圆心,从而减少了计算量,提升了拟合过程的实时性。

$$C = \begin{bmatrix} (x_p - \Delta M, y_p - \Delta M) & \cdots & (x_p + \Delta M, y_p) \\ \cdots & (x_p, y_p) & \cdots \\ (x_p - \Delta M, y_p) & \cdots & (x_p + \Delta M, y_p + \Delta M) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

近似圆心补偿主要适用于以下情况:1)两圆近似为同心圆。已知其中一个圆的坐标后便可设置圆心补偿量 $\Delta M$ 确定另一圆圆心的可能区域。虹膜的内外边缘对应此种情况。2)已知某圆的粗略圆心坐标,通过设置圆心补偿量 $\Delta M$ 限制实际圆心的可能区域。内外边缘的粗定位圆与细定位圆对应此种情况。

在对虹膜边缘进行拟合时,采用近似圆心的方法缩小 Hough 变换寻找圆心的范围,将可能的圆心定义在一小块圆心矩阵内,一方面将内外边缘相关

联,提升了定位的准确性;另一方面,减少了 Hough 变换需要统计的圆的数目,提高了算法的实时性。

## 3 虹膜定位

### 3.1 图像的预处理

在运用本文算法对虹膜内外边缘进行定位前,需对虹膜图像进行下采样处理<sup>[9]</sup>。在保持虹膜边缘特征的前提下,对虹膜图像进行 $k$ 倍下采样,则待处理的数据量变为未下采样虹膜图像数据量的 $1/k^2$ ,有效减少了图像的运算复杂度;此外,去除虹

膜内部纹理、睫毛等干扰信息,可以减少后续定位的干扰项,提高后续定位的准确性。如图 1 所示,对比了两幅边缘图像,可以滤除虹膜原边缘图像中大量杂乱纹理和睫毛信息,有效提高后续定位的准确性。

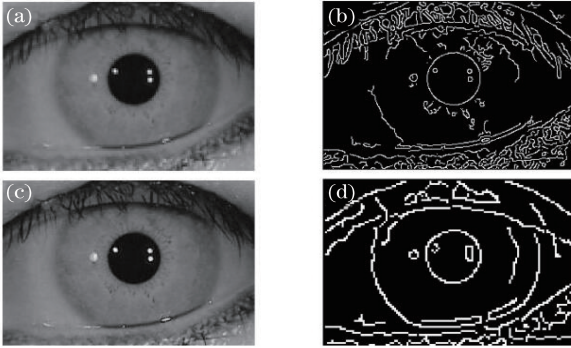


图 1 虹膜原图与下采样后虹膜边缘图像对比。(a)虹膜原图像;(b)虹膜原图边缘图像;(c)下采样后虹膜图像;(d)下采样后虹膜边缘图像

Fig. 1 Comparison between original iris image and down-sampled iris boundary images. (a) Original iris image; (b) original iris boundary image; (c) down-sampled iris image; (d) down-sampled iris boundary image

### 3.2 虹膜内边缘定位

通过分析人眼灰度图像可知,瞳孔与虹膜之间灰度差异相当大,边界分明,瞳孔区域灰度分布均匀且灰度值极低;瞳孔与睫毛之间灰度值差异较小,可判定睫毛为干扰项。故取灰度均值最小区域并排除睫毛等干扰项就可以有效定位虹膜内边缘。

#### 3.2.1 瞳孔的粗定位

利用瞳孔部分灰度分布均匀且与其他虹膜分别明显的特征,采用最小灰度平均值法<sup>[10]</sup>实现虹膜内边缘的初始定位。

1) 将图像分成如图 2 所示  $K \times L$  个大小为  $m \times m$  的窗口,统计每个窗口的灰度均值并进行排序,以找出灰度均值的最小值。

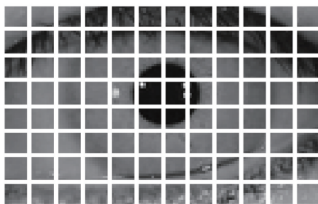


图 2 将图像均分为  $K \times L$  个灰度窗口

Fig. 2 Divide the image into  $K \times L$  gray level window

2) 取具有灰度均值最小值的窗口作为参考区域,以其作为阈值对图像进行二值化处理得到二值图像,如图 3 所示。



图 3 取灰度均值最小值为阈值进行二值处理  
Fig. 3 Take the minimum mean grayscale value as threshold value for binary processing

3) 均值滤波法消除睫毛、眼睑等噪声并对图像二值化取反,如图 4 所示。

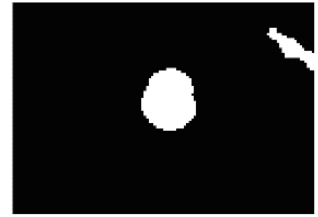


图 4 均值滤波并二值化取反后图像  
Fig. 4 Inverse image processed by mean filter and reverse binarization

4) 寻找最大连通区域作为待定的瞳孔区域,根据最大连通区域的大小、位置得出瞳孔的粗定位半径  $R_p$  以及粗定位内边缘圆心  $(x_p, y_p)$ 。

$$R_p = \frac{(H + L)}{4}, \quad (4)$$

$$x_p = x_A + \frac{(H + L)}{4}, \quad (5)$$

$$y_p = Y_A + \frac{(H + L)}{4}, \quad (6)$$

式中: $H$  为该区域宽度; $L$  为该区域长度; $x_A$  为待定瞳孔区域左上角横坐标; $y_A$  为待定瞳孔区域左上角纵坐标。根据粗定位的圆心以及半径数据,分割出如图 5 所示瞳孔边缘图像,为后续的细定位做准备。

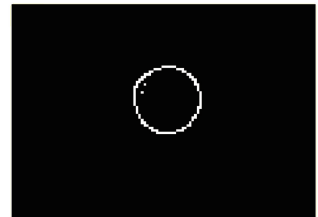


图 5 粗定位所提取的边缘图像

Fig. 5 Boundary image extracted by coarse location

#### 3.2.2 虹膜内边缘细定位

细定位时,可使用近似圆心补偿结合 Hough 变换的方法。Hough 变换时,所统计的边缘点的数目越少、半径范围越小,则圆心范围越小,Hough 变换计算量越少,结果也愈加准确。故根据粗定位的瞳孔圆心以及半径,分割出瞳孔边缘图像,以有效减少

运算量,提高算法的实时性。

Hough 变换时,可以根据内边缘圆心的粗定位坐标限制圆心细定位的圆心,根据粗定位的半径确定细定位的起始半径与最大半径。识别圆心时,根据设定圆心允许区域,如图 6 所示,  $(x_p, y_p)$  为粗定位内圆心坐标,  $\Delta M$  为允许内圆心半径范围,则细定位内圆心就限制在一个以  $(x_p, y_p)$  为中心,半径为  $\Delta M$  的区域内。

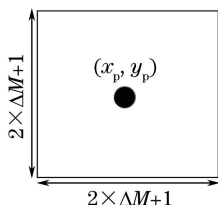


图 6 允许内圆心区域

Fig. 6 Allowable region of inner circle center

另外,同样设定一个允许半径范围,  $\Delta R_i$  为半径变换幅度,根据粗定位半径设置内边缘允许半径  $R$ :

$$R_p - \Delta R_i \leq R \leq R_p + \Delta R_i. \quad (7)$$

为此,所需拟合的内圆的总量为

$$Q_i = (2 \times \Delta R_i + 1) \times (2 \times \Delta M_i + 1)^2. \quad (8)$$

通过设置近似圆心补偿,可以减少 Hough 变换的盲目性并提升其速度,并得出虹膜内边缘细定位圆心  $(x_i, y_i)$  和半径  $R_i$ 。如图 7 所示,采用上述方法得到了较为准确的虹膜内边缘细定位结果。

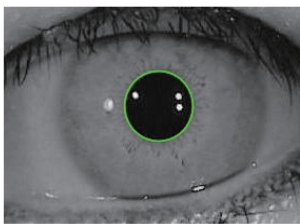


图 7 虹膜内边缘的细定位

Fig. 7 Precise location of inner iris boundary

### 3.3 虹膜外边缘定位

由于不同个体间的差异性 or 采集时的不同条件,虹膜外边缘明显度存在差异,给虹膜外边缘提取造成了一定困难。故可以采用直方图均衡化对图片进行对比度增强后,再对虹膜外边缘进行边缘提取。

虹膜边缘图像存在着大量杂碎纹理信息,不仅会影响 Hough 变换定位虹膜外边缘的速度,而且还会降低虹膜外边缘的准确度。如睫毛、眼睑、杂乱虹膜纹理等信息,大大增加了 Hough 变换所需检测的点数;而虹膜上的某些环状纹理信息,又将会影响虹膜外边缘定位的准确度。因此,用近似半径补偿

的方法对外边缘进行粗定位。

由于虹膜本身并非绝对意义上的圆,而是近似圆,故设置虹膜外边缘半径补偿值为  $\delta_0$ ,对粗定位进行补偿,即满足如下条件,就可认为虹膜图像上点近似在以  $(a, b)$  为圆心、 $R$  为半径的圆周上。取内边缘细定位圆心  $(x_i, y_i)$  作为外边缘粗定位圆心。

$$|(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 - R^2| < \delta_0. \quad (9)$$

类似于 Hough 变换,设置一个半径点数累积器,包含了所有的半径值及其包含的点数。统计该半径下圆周上拟合所得的点数,选取累加器最大点数相对应的半径作为虹膜外边缘粗定位半径:

$$R_{op} = \max \sum P_r(i, j). \quad (10)$$

虹膜外边缘细定位时,采用近似圆心补偿的方法。以内边缘细定位结果  $(x_i, y_i)$  为根据设置允许圆心区域,并设定外边缘允许半径变换幅度  $\Delta R_0$  进行 Hough 变换。

由于虹膜内边缘圆心与虹膜外边缘圆心并非在同一点,而是有微小差异。故设置虹膜外边缘细定位圆心矩阵  $C_0$ ,则允许的圆心区域表示为以内边缘细定位圆心  $(x_i, y_i)$  为中心、 $\Delta M_0$  为半径的矩阵,其对应虹膜图像大小为  $(2 \times \Delta M_0 + 1)^2$  区域。

据此,进行 Hough 变换,得出外边缘细定位圆心  $(x_0, y_0)$  半径  $R_0$ 。图 8 所示为采用二次圆周补偿算法的虹膜外边缘细定位结果,可以看出,该算法可以对虹膜外边缘准确定位。

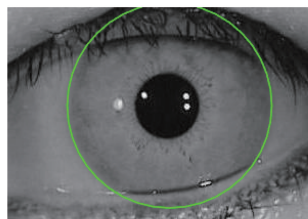


图 8 虹膜外边缘的细定位

Fig. 8 Precise location of outer iris boundary

## 4 实验结果分析

为验证本文算法的有效性与实时性,对不同虹膜定位方法 (HT、SSS、IPSO 算法) 进行了实验对比。实验环境为 MatlabR2016a, CPU 为 Core i5-4200H,内存为 2.79 GHz、内存,对中国科学院自动化研究所 CASIA(2.0)的虹膜数据库进行定位。该数据库包括 50 人的虹膜图像,每人左右眼各 20 个样本,共计 2000 幅虹膜图像。本文算法参数设置为内圆粗略圆心补偿  $\Delta M_i = 2$ ,外圆粗略圆心补偿  $\Delta M_0 = 2$ ,外边缘半径补偿值  $\delta_0 = 5$ ,内圆允许半径

变换幅度  $\Delta R_i = 2$ , 外圆允许半径变换幅度  $\Delta R_o = 2$ 。文献[8]中 IPSO 算法参数设置与该文献实验中设置一致。

图 9 为 4 种算法的定位结果示例图, 从结果可以看出, 睫毛、眼睑、光斑等无效信息均得到有效滤除, 而本文算法更是呈现了较准确的定位结果。

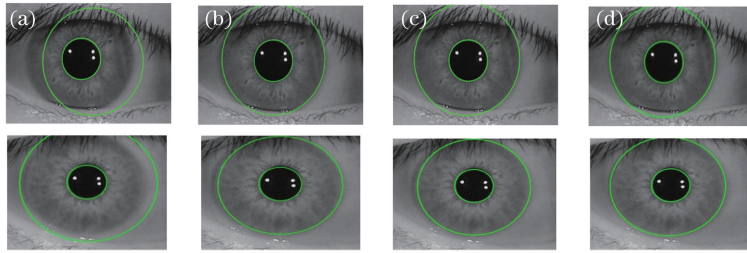


图 9 各算法定位结果。(a) HT 算法;(b) SSS 算法;(c) IPSO 算法;(d) DCC 算法

Fig. 9 Location results with different algorithms.

(a) HT algorithm; (b) SSS algorithm; (c) IPSO algorithm; (d) DCC algorithm

通过比较不同算法的内定位、外定位, 以及整个定位所对应的最短时间  $t_{\min}$ 、最长时间  $t_{\max}$ 、平均时间  $t_{\text{mean}}$  与定位成功率  $S_R$  来衡量算法的优越性, 如表 1 所示。

$$S_R = \frac{N_s}{N}, \quad (11)$$

式中  $N$  为定位的总虹膜个数,  $N_s$  为成功定位的虹膜个数。图 10 所示为 2000 张图像取每 10 张为一组, 各组图片在不同算法下所对应的总定位时间。

表 1 不同算法定位结果分析

Table 1 Location results of different algorithms

Iris location	Algorithm	$t_{\min}/s$	$t_{\max}/s$	$t_{\text{mean}}/s$	$N_s$	$S_R/\%$
Inner boundary location	HT	1.435416	5.045672	2.684303	1857	92.85
	SSS	0.334644	1.523456	0.754786	1871	93.57
	IPSO	0.119433	0.164882	0.130152	1914	95.70
	DCC	0.023233	0.055470	0.041848	1975	98.75
Outer boundary location	HT	1.955118	8.361484	5.285438	1851	92.55
	SSS	0.896752	3.876857	2.554334	1867	93.35
	IPSO	0.201587	0.255893	0.225897	1924	96.20
	DCC	0.177222	0.303612	0.242757	1965	98.25
Whole location	HT	3.951651	12.358547	7.161322	1851	92.25
	SSS	1.382678	4.577682	3.243762	1859	92.95
	IPSO	0.281020	0.420775	0.351049	1906	95.30
	DCC	0.210455	0.359082	0.288605	1962	98.10

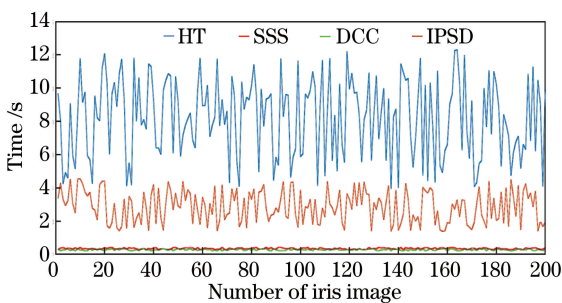


图 10 本文方法的部分实验结果

Fig. 10 Part of the location results with proposed algorithm

从上述结果可以看出, 与传统的 Hough 变换相比, 本文算法稳健性较强, 能忽略虹膜纹理、睫毛以及眼睑的影响, 实现较准确的虹膜定位; 与 SSS 算

法对比, 本文算法的定位准确性与实时性都有了一定提高; 与 IPSO 算法对比, 本文算法在定位准确性上并未呈现太大优势, 但算法实时性有了一定提高。在定位实时性上, 本文算法的平均总定位时间 ( $t_{\text{mean}} = 0.288605$  s) 要优于 Hough 变换的平均总定位时间 ( $t_{\text{mean}} = 7.161322$  s) 与 IPSO 算法的平均总定位时间 ( $t_{\text{mean}} = 0.351049$  s); 另外, 本文算法的定位成功率为 98.10% 分别优于 Hough 变换的 92.25% 和 IPSO 算法的 95.30%。图 11 为本文算法的部分实验结果。

即便如此, 依然存在定位不准的情况。图 12 所示两张虹膜图片及其定位结果。说明本方法对不良拍摄条件下的虹膜仍然有局限性, 依然有提升空间。

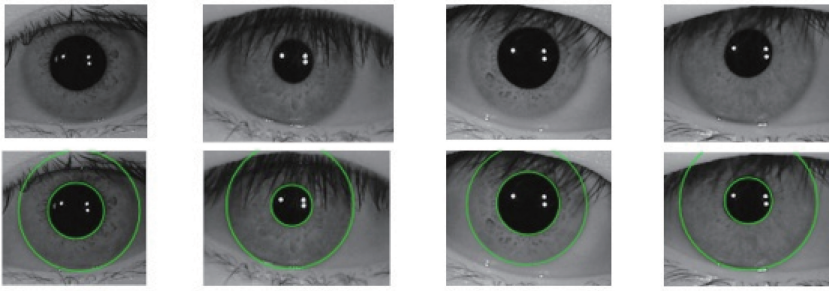


图 11 本文方法的部分实验结果

Fig. 11 Part of the location results with proposed algorithm

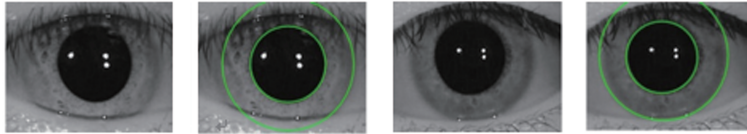


图 12 定位失败的结果

Fig. 12 Failed location results

## 5 结 论

提出了一种基于二次圆周补偿的虹膜边界定位算法。内定位时,对虹膜图片进行下采样,使用最小灰度平均值法对内边缘进行粗定位,采用近似圆周补偿的方法对内边缘进行细定位;外定位时,采用近似半径补偿的方法对外边缘进行粗定位,再采用近似圆周补偿的方法对外边缘进行细定位。利用本文算法以及引用文献中算法对虹膜数据库 CASIA (2.0)中的图片进行了实验,实验表明:使用本文算法定位成功率为 98.10%,平均定位时间为 0.29 s,本文算法的实时性与准确性均较其他算法有了一定提高。

## 参 考 文 献

- [1] Han M, Peng Y H, Zhang S L, *et al.* Iris recognition based on empirical mode decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 364-368.  
韩民, 彭玉华, 张顺利, 等. 基于经验模态分解的虹膜识别[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 364-368.
- [2] Zhou L, Chi Y D, Guo L. Optical system design of object-telecentric dual finger fingerprint scanner [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 102201.  
周路, 迟耀丹, 郭亮. 物方远心双指指纹采集光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 102201.
- [3] Xia J, Pei D, Wang Q Z, *et al.* Face recognition based on local adaptive ternary derivative pattern coupled with Gabor feature [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 111004.  
夏军, 裴东, 王全州, 等. 融合 Gabor 特征的局部自适应三值微分模式的人脸识别[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 111004.
- [4] Daugman J. How iris recognition works [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, 14(1): 21-30.
- [5] Wildes R P. Iris recognition: an emerging biometric technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(9): 1348-1363.
- [6] Wu J H, Zou D X, Li J H. Iris location algorithm based on small-scale searching [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(8): 1704-1708.  
吴建华, 邹德旋, 李静辉. 基于小范围搜索的虹膜定位方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(8): 1704-1708.
- [7] Li Y, Li W, Ma Y D. Accurate iris location based on region of interest [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology*, 2012: 704-707.
- [8] Zou D X, Wang X, Chen C H, *et al.* Iris location algorithm based on improved particle swarm optimization [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 1056-1063.  
邹德旋, 王鑫, 陈传虎, 等. 基于改进粒子群的虹膜定位算法 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 1056-1063.
- [9] Wang Y X, Liu T G, Jiang J F. Rapid iris localization algorithm based on image sampling [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(9): 122-126.

王云新, 刘铁根, 江俊峰. 基于图像抽样的快速虹膜定位算法[J]. 光电工程, 2008, 35(9): 122-126.

[10] Ma Y D, Zhou L J, Li Y. Iris location algorithm by vector field convolution [J]. Infrared and Laser

Engineering, 2014, 43(10): 3497-3503.

马义德, 周丽君, 李园. 基于矢量场卷积的虹膜定位[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3497-3503.