

## 基于矢量场卷积的虹膜定位

马义德<sup>1</sup>, 周丽君<sup>1,2</sup>, 李 园<sup>1</sup>

- (1. 兰州大学 信息科学与工程学院, 甘肃 兰州 730000;
2. 西北民族大学 电气工程学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 为了提高虹膜定位的精度和准确性, 从而进一步提高虹膜识别系统的识别率, 提出了一种基于矢量场卷积(Vector Field Convolution, VFC)的虹膜定位算法, 用于精确定位虹膜内边界。首先利用最小灰度平均值法自动确定 VFC 模型的初始化轮廓, 在活动轮廓内外力作用下实现虹膜内边界定位; 然后对于虹膜外边界, 采用改进的 Daugman 算法进行定位。利用多个虹膜图库进行了大量实验, 并与几种常见的虹膜定位算法进行了比较, 实验结果表明: 该方法定位准确度更高, 虹膜内边界定位更接近真实边界, 定位结果有明显改善。

**关键词:** 虹膜定位; 虹膜识别; Snake 模型; VFC 模型; Daugman 算法

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3497-07

## Iris location algorithm by vector field convolution

Ma Yide<sup>1</sup>, Zhou Lijun<sup>1,2</sup>, Li Yuan<sup>1</sup>

- (1. School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. School of Electrical Engineering, Northwest University For Nationalities, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In order to improve the precision and accuracy of iris location, and furthermore enhance the recognition rate of the iris recognition system, a iris location algorithm based on Vector Field Convolution (VFC) was proposed to locate the iris inner boundary accurately. Firstly, minimum grey value method was used to determine initialization contour of VFC model automatically, so that the iris inner boundary could be located precisely under the internal and external force of active contour, then the improved Daugman algorithm was adopted to locate the iris outer boundary. Performed abundant experiments make use of several iris image databases, and also compared with common several kinds of iris localization methods. The experimental results show that the location accuracy of this method is higher, the iris inner edge location is much closer to the real boundary, and the result of location have been improved significantly.

**Key words:** iris location; iris recognition; Snake model; VFC model; Daugman algorithm

收稿日期: 2014-02-05; 修订日期: 2014-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61175012); 中国高等教育博士学科点专项科研基金(20110211110026);

甘肃省自然科学基金(1208RJZA265)

作者简介: 马义德(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事人工神经网络、数字图像处理、模式识别、数字信号处理、计算机视觉等方面的研究。Email: ydma@lzu.edu.cn

## 0 引言

随着数字时代的到来,传统的个人身份验证方法正在慢慢退出历史舞台,取而代之的是一种数字化和隐性的个人身份验证技术。为了维护社会安定和保障自身利益,一种新型的生物特征识别技术应运而生。其中,虹膜识别技术以其高可靠性和高稳定性占据了一定地位。虹膜定位是虹膜识别技术的关键环节和重要组成部分,也是实现虹膜身份验证和识别的前提<sup>[1-3]</sup>。虹膜定位准确与否直接影响着虹膜识别系统性能的优劣<sup>[4-5]</sup>。为了确保虹膜识别系统的有效性,国内外相关文献进行了多种虹膜定位算法的研究<sup>[1,5-7]</sup>。目前,有关虹膜内外边界的定位算法主要有 Daugman 提出的圆微积分算法<sup>[1]</sup>、Wildes 提出的边缘检测和 Hough 变换相结合的算法<sup>[5]</sup>、徐光柱等提出的最小灰度平均值法<sup>[6]</sup>、王蕴红等提出的最小二乘拟合的定位算法<sup>[7]</sup>等。上述方法都取得了较好的定位效果,但都认定虹膜内外边界为圆形,而虹膜包含纹理信息的部分是内外两个近似圆形边界之间的部分,尤其是纹理信息较为丰富的虹膜内边界,在很多情况下已不属于圆的范畴。因此,以上方法在定位精度上仍存在着一定的误差。经典的微积分算法和 Hough 变换算法共同的缺点是计算复杂、比较耗时,当遇到睫毛、眼睑等噪声干扰时,往往会导致定位不准确。徐光柱提出的算法利用图像灰度特性,找到图像灰度最小的分块作为阈值分割图像,虽缩短了定位时间、减小了计算复杂度,但当虹膜内外边界过于模糊或睫毛与眼睑遮挡比较严重时,此方法会失效。王蕴红等提出的最小二乘拟合的定位算法在定位瞳孔时会受到光照及一些遮挡物的影响,导致定位不准确。

为了解决上述提到的问题,文中提出了一种基于矢量场卷积(简称 VFC)的虹膜定位算法。首先,利用最小灰度平均值法自动确定 VFC 模型的初始化轮廓,在活动轮廓内外力作用下收敛到虹膜内边界,实现虹膜内边界的精确定位,对于纹理信息比内边界附近少的虹膜外边界则采用改进的 Daugman 算法进行定位。实验表明,文中方法有效地提高了虹膜定位的准确度,尤其是虹膜内边界的定位准确度。

## 1 算法简介

VFC(Vector Field Convolution)是矢量场卷积的

简称,是一种改进的 Snake 模型,其矢量场由矢量场卷积核和边界图像卷积得来。经典的 Snake 模型<sup>[8-9]</sup>实质上就是拟合误差“能量”为最小的曲线,它是在曲线本身的内力和图像外部的约束力共同作用下移动的活动轮廓线。其中,内力起平滑的约束作用,外力则引导活动轮廓向图像特征移动<sup>[10]</sup>。设  $v(s)=[x(s),y(s)]$  为活动轮廓线, $s \in [0,1]$  表示弧长,则其能量函数可以表示为:

$$E_{\text{Snake}} = \int_0^1 \left[ \frac{1}{2} (\alpha |v'(s)|^2 + \beta |v''(s)|^2) + E_{\text{ext}}(v(s)) \right] ds \quad (1)$$

式中: $v'(s)$ 和 $v''(s)$ 是 $v(s)$ 对 $s$ 的一阶导数和二阶导数。 $\alpha$ 和 $\beta$ 是加权参数,分别代表了轮廓的平滑度和拉紧度, $E_{\text{ext}}(v(s))$ 表示外部能量函数,它是由图像能量函数和外部约束产生的能量共同作用的结果:

$$E_{\text{ext}}(v(s)) = \gamma(s)E_{\text{image}}(v(s)) + E_{\text{constraint}}(v(s)) \quad (2)$$

图像能量 $E_{\text{image}}(v(s))$ 反映了图像的本质特征,如边缘和线条等,对于灰度图像 $I(x,y)$ ,其图像能量函数可以表示为:

$$E_{\text{image}}(x,y) = -|\nabla [G_{\sigma}(x,y) * I(x,y)]|^2 \quad (3)$$

式中: $G_{\sigma}(v(s))$ 为标准差为 $\sigma$ 的二维高斯函数;\*表示两项做卷积,也就是使用标准差为 $\sigma$ 的二维高斯函数对图像进行滤波,对图像平滑去除相应的噪声点。其中,公式(1)必须满足欧拉-拉格朗日方程:

$$\alpha v''(s) - \beta v''''(s) - \nabla E_{\text{ext}}(v(s)) = 0 \quad (4)$$

式中: $\nabla$ 为梯度算子。内力 $\alpha v''(s) - \beta v''''(s)$ 控制曲线的连续性和平滑性;外力 $F_{\text{ext}} = -\nabla E_{\text{ext}}(v(s))$ 吸引活动轮廓移动至真实边界,最终内外力达到平衡(即内外力之和等于0)。此时,Snake模型就停留在了真实轮廓上,完成了分割。

VFC活动轮廓模型<sup>[11]</sup>是将VFC场力作为Snake模型的外部能量,内部能量与经典的Snake模型相同。其核心部分是矢量场的计算。其中,矢量场流 $f_{\text{VFC}}(x,y)$ 由矢量场卷积核 $k(x,y)$ 和边界图像 $f(x,y)$ 卷积得来。具体计算如公式(5)所示:

$$f_{\text{VFC}}(x,y) = f(x,y) * k(x,y) = [f(x,y) * u_k(x,y), f(x,y) * v_k(x,y)] \quad (5)$$

式中: $u_k(x,y)$ 和 $v_k(x,y)$ 是矢量场卷积核的两个分量,其作为实数矩阵的实部和虚部,经过快速傅里叶变换之后再与边界图像的傅里叶变换相乘,乘积经傅里叶变换后所得就是VFC矢量场的两个分量。用 $f_{\text{VFC}}$ 矢量场代替Snake模型的外力 $F_{\text{ext}}$ ,就可以得到

VFC 活动轮廓模型的能量函数,表示如下:

$$E_{VFC} = \int_0^1 [(\alpha|v'(s)|^2 + \beta|v''(s)|^2) + \gamma(s)f_{VFC}] ds \quad (6)$$

VFC 模型作为一种改进的 Snake 模型,它不仅有一个大的捕捉范围,而且对噪声的鲁棒性好、对初始化区域不敏感、还降低了计算复杂度。文中采用 VFC 模型为指导来实现虹膜内边界的精确定位,实验数据表明定位结果有明显的改善。

### 2 虹膜定位算法

虹膜定位的关键在于准确地分割出虹膜的内外边界,但是传统的圆拟合定位方法会误把部分瞳孔信息当作虹膜信息,以至于影响后续的特征提取和匹配识别。为了解决这一问题,文中提出了一种基于 VFC 模型的虹膜定位算法,算法框图如图 1 所示。首先,利用最小灰度平均值法自动确定 VFC 模型的初始化轮廓,然后根据虹膜图像的灰度特性,对 VFC 模型设置合适的参数值,在 VFC 模型内外力作用下收敛到虹膜内边界,实现虹膜内边界的精确定位。最后,在内边界定位基础上完成虹膜外边界的定位。

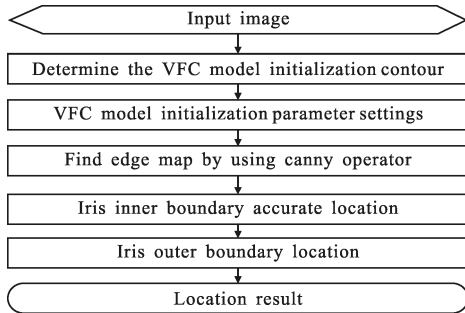


图 1 基于 VFC 模型的虹膜定位算法框图

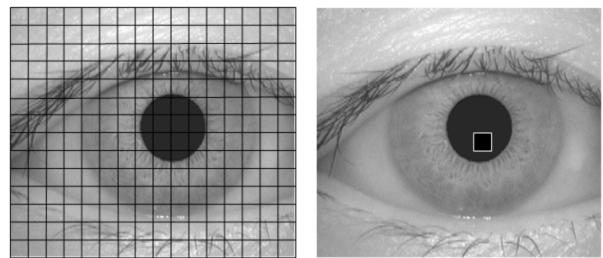
Fig.1 Diagram of iris location algorithm based on VFC model

#### 2.1 自动确定 VFC 模型的初始化轮廓

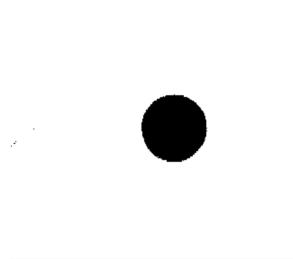
在 VFC 模型中,需要给待处理图像赋予一个初始化轮廓,这个初始化轮廓可以是任何形状但关系到是否可以准确收敛。在一些典型的 Snake 模型中,都是根据图像灰度特性手动给定初始化轮廓,给图像处理带来极大不便。文中利用虹膜近似圆形且灰度特征明显的特性,采用最小灰度平均值法实现 VFC 模型的自动初始化:(1) 将人眼图像分割成许多具有固定尺寸的矩形区域,如图 2(a)所示,其中具有最小灰度平均值的分块作为参考区域,见图 2(b);

(2) 以此参考区域的灰度均值作为阈值对人眼图像进行二值化处理;(3) 在二值化处理后的图像(如图 2(c)所示)中对上述参考区域进行扩张,直到瞳孔边界,并根据边界信息计算出瞳孔的半径和圆心;(4) 设瞳孔区域的左、右、上、下边界的坐标分别为  $X_l, X_r, Y_t, Y_b$ ,瞳孔圆心坐标为  $(X_p, Y_p)$ ,瞳孔半径为  $R_p$ ,则瞳孔的圆心坐标和半径大小可以通过公式(7)计算<sup>[12]</sup>。

$$\begin{aligned} X_p &= (X_l + X_r) / 2; \\ Y_p &= (Y_t + Y_b) / 2; \\ R_p &= (|X_l - X_r| + |Y_t - Y_b|) / 4 \end{aligned} \quad (7)$$



(a) 分块后的矩形区域 (b) 具有最小灰度平均值的区域  
 (a) Rectangular area after sub-block (b) Minimum average gray areas



(c) 二值化后的图像  
 (c) Iris image after binarization

图 2 虹膜图像二值化过程图

Fig.2 Process diagram of iris image binarization

通过上述处理后,就可得到如图 3 所示的圆形虚线,作为 VFC 模型的初始轮廓,实现了 VFC 模型

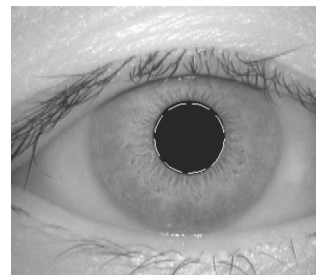


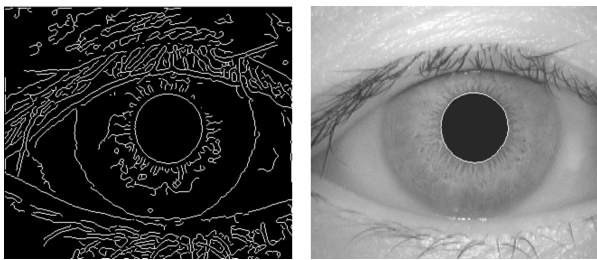
图 3 VFC 模型的初始轮廓

Fig.3 Initial contour of the VFC model

的自动初始化。从图 3 可以看出采用此方法确定的初始化轮廓已非常接近虹膜内边界,减小了 VFC 模型收敛时的迭代次数,可以加速收敛。

## 2.2 精确定位虹膜内边界

从图 3 中也可以看出,一般的瞳孔定位结果往往小于瞳孔的真实边界,这样的定位结果会误把瞳孔信息当作虹膜信息处理,影响后续的特征提取和匹配识别。因此,虹膜边界的精确定位就显得尤为重要。在虹膜内边界精确定位过程中,原始虹膜图像 $I(x,y)$ 提供了图像的基本信息。VFC 模型能准确收敛的另一个关键因素是提供外力支撑的边缘图,这里采用 Canny 算子<sup>[13]</sup>提取虹膜内边界的边缘信息(如图 4(a)所示),作为 VFC 模型的边缘图(Edge map),实现虹膜内边界的精确定位,虹膜内边界精确定位结果如图 4(b)所示。Canny 算子相比于 Sobel 等其他算子,其具有不丢失重要边缘,不含虚假边缘,实际边缘和检测到的边缘位置之间的偏差最小且边缘检测的精度可以通过参数设置以适应不同类型的图像等优点,更适用于虹膜图像寻找边界轮廓。参考文献[9]使用了传统的 Snake 模型精确定位虹膜内外边界,但是,传统的 Snake 模型对初始化区域比较敏感、抗噪性能较差、计算比较复杂。对虹膜图像来说,眼睑、睫毛等噪声的干扰,就会极大的影响定位结果。而文中 VFC 模型的引入克服了这些不足之处,定位结果更准确。VFC 模型的参数设置将在第三节中详细说明。



(a) Canny 算子检测边缘图 (b) 虹膜内边界定位结果  
(a) Canny operator edge map (b) Result of iris inner boundary detection location

图 4 虹膜内边界精确定位

Fig.4 Iris inner boundary accurate location

## 2.3 虹膜外边界定位

虹膜外边界附近的纹理信息要少于虹膜内边界,而且外边界更接近于圆形。所以,这里采用改进的 Daugman 微积分法定位虹膜外边界。算法可用

公式表示为:

$$\max_{(r,x_0,y_0)} \left| G_\sigma(r) * \frac{\partial}{\partial r} \int_{r,x_0,y_0} \frac{I(x,y)}{2\pi r} ds \right| \quad (8)$$

式中: $I(x,y)$ 表示的是一幅图像的像素; $G_\sigma(r)$ 是一个尺度为 $\sigma$ 的高斯滤波器,起到了平滑滤波的作用;“\*”是卷积符号;“ $\int$ ”是积分符号,表示 $I(x,y)$ 在半径为 $r$ ,圆心为 $(x_0,y_0)$ 的圆周上进行曲线积分。在 VFC 模型初始化的过程中,已找到了瞳孔的近似圆心 $(X_p,Y_p)$ 和半径 $R_p$ ,利用虹膜内外边界是两个近似的同心圆这一特点和图像灰度特性就可估算出外圆的圆心和半径。为了减小眼睑、睫毛等噪声对虹膜外边界定位的干扰,这里仅选取虹膜内外边界左 $(\pi,5/4\pi)$ 和右 $(7/4\pi,2\pi)$ 的对称区域作为检测模板实现虹膜外边界定位。定位结果如图 5 所示。

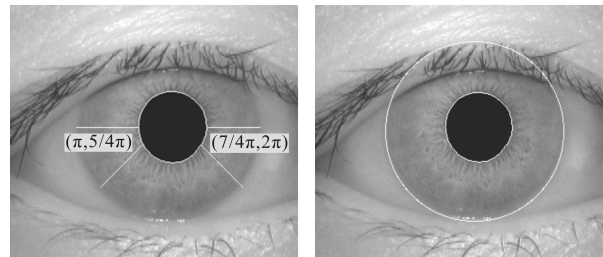


图 5 虹膜外边界定位结果图

Fig.5 Result of iris outer boundary location map

## 3 实验

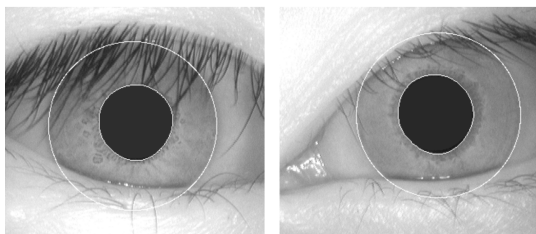
### 3.1 图像的选择

文中在虹膜数据库 CASIA v1.0<sup>[14]</sup>、MMU v1.0<sup>[15]</sup>、MMU v2.0<sup>[16]</sup>上进行了大量实验。CASIA v1.0 虹膜数据库包括 108 只不同眼睛的虹膜图像样本,每只眼睛有 7 幅 8 bit(共 756 幅)灰度图像,每幅图像的分辨率为 $320 \times 280$ ,但此图库对瞳孔区域进行了相应的处理,属于较理想的虹膜图库,比较适合对虹膜外边界定位进行评测;MMU v1.0 虹膜图库包含 450 幅来自于 90 只不同眼睛的图像,分辨率为 $320 \times 240$ ,此图库相对而言没有经过人为处理,图片有较多干扰;MMU v2.0 虹膜图库包含 995 幅虹膜图像,分辨率为 $320 \times 238$ ,图片干扰较多,定位较困难。仿真环境为:Pentium(R) E5300 2.6 GHz 处理器,内存为 2 GB,实验在 Matlab2009a 下进行。

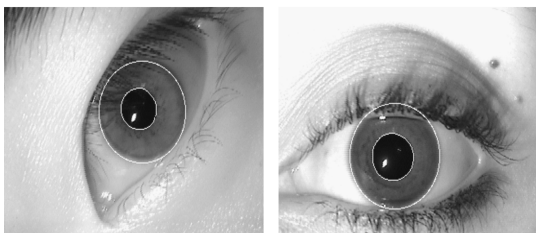
### 3.2 参数选择

定位虹膜内边界时,近似的圆形有较大的曲率,

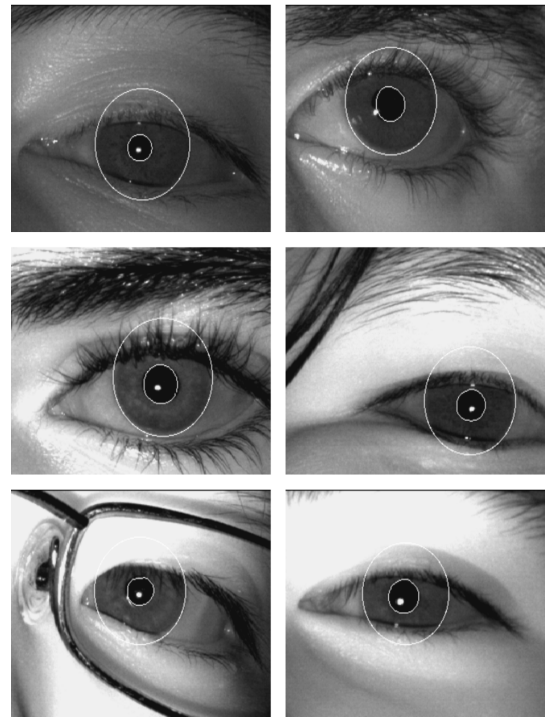
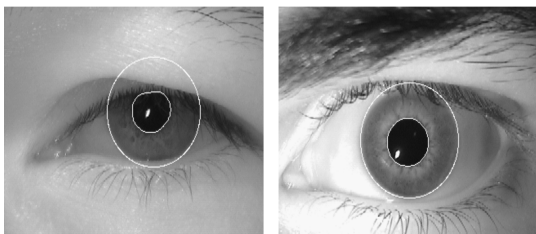
而且虹膜区域附近干扰较多,所以,笔者将平滑性系数  $\alpha$  取相对较大的值,拉紧度系数  $\beta$  相对较小。平滑性系数  $\alpha$  选取过大会导致瞳孔边界过收敛(定位边界小于实际瞳孔边界),选取过小会受到外界干扰产生外溢(瞳孔边界外的不平滑曲线),当外界干扰较多时(比如眼睑、睫毛等),可以相应的增大  $\alpha$  的值,对干扰有一定的抑制作用。这里取各项系数  $\alpha=10.5$ ,  $\beta=4.0$ ,  $\gamma=0.5$ ,  $\tau=0.5$ 。在使用 Canny 算子获得边缘图时,选取阈值为 0.05(选取阈值过大会丢失图像的重要细节,阈值选取过小会导致掺入不必要的干扰,影响检测效果)。因为初始化轮廓已非常接近真实边界,所以这里仅取迭代系数为 10,既能有效地迭代至虹膜真实内边界,又能减少定位时间。实验结果表明:文中方法提高了定位准确度,有较好的鲁棒性和普适性。最终定位结果如图 6 所示。



(a) CASIA v1.0 虹膜图库定位结果  
(a) Location result of CASIA v1.0 iris database



(b) MMU v1.0 虹膜图库定位结果  
(b) Location result of MMU v1.0 iris database



(c) MMU v2.0 虹膜图库定位结果  
(c) Location result of MMU v2.0 iris database

图 6 虹膜定位结果图

Fig.6 Results of iris location map

### 3.3 实验结果分析

图 6 为不同图库不同类型眼睛的定位结果图,可以看出部分瞳孔已不再是圆形,该方法的定位结果更接近于瞳孔的真实边界,更准确。从图 6 中也可以看出,尽管图像受到不同程度的干扰,如眼睑、睫毛、瞳孔变形、眉毛、头发、光斑、化妆、眼镜等,该方法都能显示出较好的定位效果。李艳等提出的基于感兴趣区域的虹膜定位方法<sup>[17]</sup>在定位虹膜内边界时,采用了映射表的思想,并利用梯度算子精确定位虹膜内边界,也取得了较好的效果,但是,其采用的梯度算子比较简单,抗噪性能并不是很好。如表 1 和表 2 给出了文中方法和前述的经典的参考文献[1]、参考文献[5]定位算法以及新近的参考文献[6]、参考文献[17]方法的定位准确率、定位时间的比较结果。这里算法的准确率=(算法可有效确定的样本数/所有参加定位实验的样本数)×100%。其中,算法可有效确定的样本数,通过对虹膜图像中虹膜边缘点进行人工标记和算法标记确定。

对于上述 3 种图库来说,通过表 1 的实验数据对比可以看出,相比于已有的其他 4 种方法,文中方

法都能够较准确的实现虹膜定位,且明显地提高了定位准确度。

表 1 定位准确度比较(单位:%)

Tab.1 Accuracy of iris location(Unit:%)

Methods	Accuracy/%		
	CASIA v1.0	MMU v1.0	MMU v2.0
Reference [1]	95.44	56.25	40.12
Reference [5]	95.77	64.33	55.67
Reference [6]	97.22	76.52	73.73
Reference [17]	98.28	95.26	91.33
Proposed	98.54	98.44	97.58

表 2 是 5 种方法定位时间的比较结果,由此可见,相比于上述 4 种方法,文中方法在一定程度上缩短了定位时间,但相对于参考文献[6]方法来说,还是有所增加。这是因为文中方法在提高定位准确率的同时,由于 VFC 模型蛇点收敛的复杂性而牺牲了定位时间。

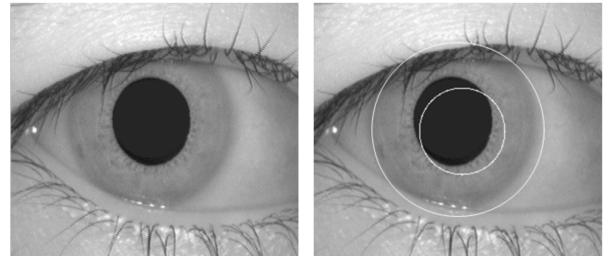
表 2 定位时间比较(单位:s)

Tab.2 Time of iris location(Unit:s)

Methods	Location speed/s		
	CASIA v1.0	MMU v1.0	MMU v2.0
Reference [1]	27.84	24.17	28.14
Reference [5]	20.11	18.75	25.56
Reference [6]	1.41	1.03	1.57
Reference [17]	4.87	3.25	3.43
Proposed	1.81	1.58	1.89

为了进一步展示文中方法有效提高了虹膜定位的准确度,采用 CASIA v1.0 图库中的两幅图像(图 7(a)和图 8(a))进行对比实验,这里图 7(a)中瞳孔存在严重变形,已不再是圆形;图 8(a)中眼睑和睫毛极大地干扰了瞳孔边界,且虹膜外边界比较模糊。这两幅图可以很好地评测虹膜定位结果的有效性。下文将文中方法与前述 4 种方法进行实验对比:从图 7 和图 8 可以看出,参考文献[1]、参考文献[5]和参考文献[6]方法都默认虹膜内外边界为圆形,所以在效果上都存在很大不足。参考文献[17]所提方法在定位虹膜内边界时也取得了较好的定位效果,定位结果优于前述三种方法,但是其在内边界定位时依据连接离散的

点获得内边界轮廓,曲线不够平滑,当瞳孔边界上有光斑或睫毛遮挡较严重时,会导致错误的检测结果。而文中方法相比于前述 4 种方法,更能准确定位出虹膜内外边界,且提高了定位准确率,更具鲁棒性。

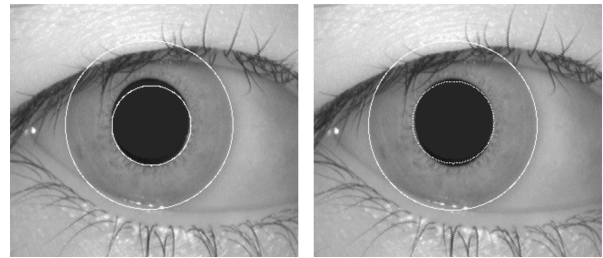


(a) 原始虹膜图像

(b) 参考文献[1]方法

(a) An original iris image

(b) Reference [1] method

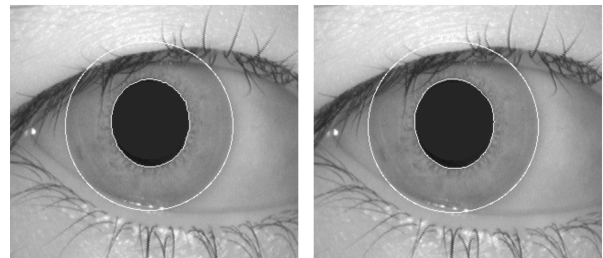


(c) 参考文献[5]方法

(d) 参考文献[6]方法

(c) Reference [5] method

(d) Reference [6] method



(e) 参考文献[17]方法

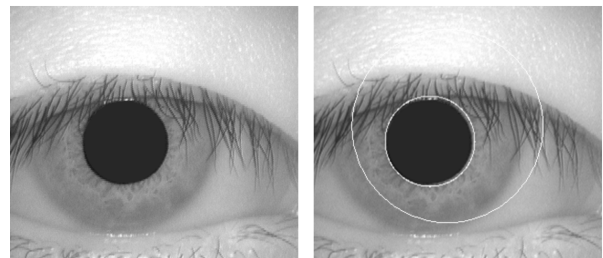
(f) 文中方法

(e) Reference [17] method

(f) Proposed method

图 7 实验结果对比图(A 组)

Fig.7 Area chart of experimental results(group A)



(a) 原始虹膜图像

(b) 参考文献[1]方法

(a) An original iris image

(b) Reference [1] method

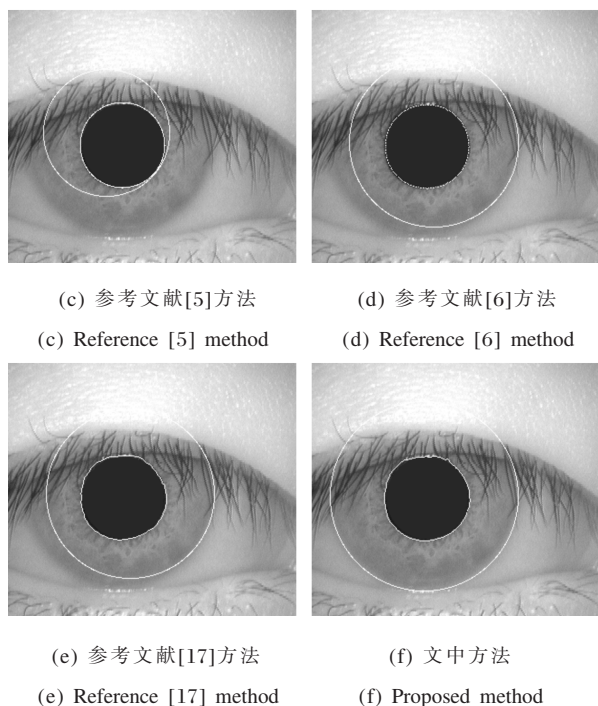


图 8 实验结果对比图(B 组)

Fig.8 Area chart of experimental results(group B)

## 4 结论

文中方法突破了以往都是在圆拟合基础上定位虹膜内边界的局限,矢量场卷积 VFC 模型的引入使定位结果更准确地收敛到了虹膜的真实边界,提高了定位准确度,为后续的特征提取、匹配识别奠定了坚实的基础。采用最小灰度值法确定的圆形区域为 VFC 模型提供了初始化轮廓,一定程度上解决了 VFC 模型手动初始化的问题。实验结果表明:该方法明显的提高了定位准确度,是一种鲁棒、自适应的、准确的定位算法。该方法在睫毛和眼睑严重遮挡了瞳孔边缘且光斑非常接近眼睑时会导致定位不准确,在后续工作中将继续对其改进。

## 参考文献:

- [1] Daugman J. How iris recognition works [J]. *IEEE*, 2004, 14(1): 21-30.
- [2] Daugman J. Recognizing people by their iris patterns [J]. *Information Security Technical Report*, 1998, 3(1): 33-39.
- [3] Daugman J. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(11): 1148-1161.
- [4] Daugman J. Statistical richness of visual phase information [J]. *Recognizing Persons by Iris International Journal of Computer Vision*, 2001, 45(1): 25-38.
- [5] Wildes R. Iris recognition: An emerging, biometric technology [J]. *Proceeding of IEEE*, 1997, 85(9): 1348-1363.
- [6] Xu Guangzhu. The study on biometrics based on human iris [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007. (in Chinese)  
徐光柱. 基于人体虹膜的生物识别技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [7] Wang Yunhong, Zhu Yong, Tan Tieniu. Biometrics personal identification based on iris pattern [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(1): 1-10. (in Chinese)  
王蕴红, 朱勇, 谭铁牛. 基于虹膜识别的身份鉴别[J]. *自动化学报*, 2002, 28(1): 1-10.
- [8] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: Active contour models [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1987, 4(1): 21-33.
- [9] Zhang Zhijia, Zhang Haifeng, Zhou Chunbing, et al. Iris location method based on improved snake [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 767-771. (in Chinese)  
张志佳, 张海峰, 周纯冰, 等. 采用改进 Snake 模型的虹膜定位方法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 767-771.
- [10] Jarjes A A, Wang K Q, Mohammed G J. Iris localization: Detecting accurate pupil contour and localizing limbus boundary[C]//International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2010, 2: 349-352.
- [11] Lp B, Scott T. Active contour external force using vector field convolution for image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8): 2096-2106.
- [12] Farmanullah J, Imran U, Shahrukh A. Reliable iris localization using hough transform, Histogram-bisection, and eccentricity [J]. *Signal Processing*, 2013, 93: 230-241.
- [13] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, 8(6): 679-698.
- [14] 中国科学院自动化研究所. CASIA 虹膜图像库 (v1.0)[EB/OL]. [2004-05-26]. <http://www.cbsr.ia.ac.cn/IrisDatabase/irislogin.html>.
- [15] 马来西亚多媒体大学. MMU 虹膜图像库 (v1.0)[EB/OL]. [2004-09-25]. <http://www.cbsr.ia.ac.cn/IrisDatabase/irislogin.html>.
- [16] 马来西亚多媒体大学. MMU 虹膜图像库 (v2.0)[EB/OL]. [2006-09-19]. <http://www.cbsr.ia.ac.cn/IrisDatabase/irislogin.html>.
- [17] Li Y, Li W, Ma Y D. Accurate iris location based on region of interest [C]//International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology, 2012, 2: 704-707.