

# 曲线拟合的虹膜定位算法研究

马争<sup>1</sup>, 黄祎<sup>1,2</sup>

(1. 电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054; 2. 重庆电子工程职业学院通信工程系 重庆 沙坪坝区 401331)

**【摘要】**虹膜定位是在虹膜图像中找到虹膜的内外边界,它是虹膜识别中的重要环节。该文提出了一种根据曲线拟合来进行虹膜快速定位的新方法,即先对图像进行分块并提取包含瞳孔的子图像块;再结合类间方差法提取瞳孔的二值化阈值,确定虹膜内边界点;然后根据关键的感兴趣区域灰度梯度信息确定虹膜外边界点;最后对内外边界点采用最小二乘法原理来进行曲线拟合,从而确定虹膜内外边界。通过实验表明该文提出的算法能快速准确地定位虹膜内外边界。

**关键词** 曲线拟合; 灰度梯度; 虹膜定位; 最小二乘法; 最大类间方差

中图分类号 TP391; Q-334

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1002-0548.2009.03.026

## Improved Iris Location Algorithm Based on Curve Fitting

MA Zheng<sup>1</sup> and HUANG Yi<sup>1,2</sup>

(1. School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Department of Communication Engineering, Chongqing College of Electronic Engineering Shapingba Chongqing 401331)

**Abstract** Iris location, an important link in iris recognition, is to detect inner and outer boundaries of iris in an iris image. In the paper, an improved algorithm is proposed to locate iris by means of curve fitting. In this algorithm, an iris image is blocked firstly and its sub-image blocks which cover pupil are extracted. Next, a binary threshold of pupil is set by means of the method of maximum variance between clusters, and the inner-boundary-points of iris are determined. And then, the outer-boundary-points of iris are gotten on the basis of gray gradient of key regions of interest. Consequently, some characteristic pixels in regions of interest are selected respectively and inner and outer boundaries of iris are fitted according to principles of least squares. The results of experiment show that the proposed algorithm can locate iris accurately and quickly.

**Key words** curve fitting; gray gradient; iris localization; least square method; maximum between-clusters variance

伴随着信息技术的发展和对智能认证系统的需要,生物认证识别技术得到了快速的发展和运用,由于虹膜具有唯一性、稳定性、防伪性、独特性以及非侵犯性等优点,因此,基于虹膜的生物认证识别技术得到了学术界和企业界的极大关注和重视,并在智能认证领域中得到了迅速发展和广泛应用<sup>[1-4]</sup>。

眼睛的外观图主要由瞳孔、虹膜和巩膜3部分构成,瞳孔位于眼睛的中心,巩膜为眼球外围亮度比较大的部分,虹膜位于巩膜和瞳孔之间,总体上为一种由里到外的放射状结构,虹膜的内外边界均近似圆形,但是两个圆形边界并不是完全同心的。在实际获取的虹膜图像中,除了眼睛外,还包括人脸的其他部分,如眼睑和睫毛等影像。虹膜定位就是在虹膜图像中对虹膜内外两个圆形边界进行位置确定,它是虹膜识别的重要环节,也是虹膜特征提取

的前提,其定位质量好坏决定了特征提取是否有效,以及编码是否准确,并在一定程度上直接决定了虹膜识别的精度。目前,虹膜定位经典的算法主要有以下3种:文献[5]提出的基于圆模板匹配的微积分方法;文献[6]提出的基于Hough变换的方法;文献[7]提出的基于最小二乘原理的方法。从本质上讲,前两种方法是进行参数搜索,后一种方法是进行参数拟合。就定位速度而言,最小二乘法速度最快,但容易受到二值化阈值的影响;微积分法容易受到虹膜图像中光源像点的影响,速度较慢;Hough变换算法对图像的清晰度和对比要求较高,并且计算量大,占用内存大,提取的参数受参数空间的量化间隔制约,速度最慢。本文采用类间方差法结合图像的灰度信息实现对虹膜内外边界的快速定位。即首先通过分块,提取包含瞳孔的区域,接着对提取的

收稿日期: 2008-03-24; 修回日期: 2008-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(60472046); 广东省科技计划项目(2006B37430002)

作者简介: 马争(1957-),男,博士,教授,主要从事图像处理和模式识别等方面的研究。

区域采用类间方差求得瞳孔的二值化阈值, 再通过搜索边界点, 对确定的边界点进行曲线拟合, 从而实现虹膜内边界的精确定位; 然后根据瞳孔的位置参数以及一些先验知识提取虹膜外边界的感兴趣区域, 对所选区域进行中值滤波和一阶梯度变换后, 采用局部梯度积分法确定虹膜外边界, 最后通过圆拟合确定虹膜外边界参数。本算法避免了图像二值化时阈值对直方图的依赖; 同时通过只处理感兴趣区域, 而不是针对整幅图像, 大大节省了图像的定位时间; 实验表明该算法的鲁棒性和定位效率都能满足图像实时处理的要求。

## 1 虹膜定位

### 1.1 内边界定位

图1为虹膜位置标识图。对于一帧虹膜图像, 如果直接对虹膜内边界进行定位, 则计算量大, 耗时较多, 因此, 在计算过程中, 可以通过对图像进行分块, 提取包含瞳孔的感兴趣区域子图像块, 再在提取的子图像块上采取二值化的方法来分离瞳孔。二值化的关键在于阈值的选取。基于二值化边界点的虹膜内边界定位方法对二值化阈值比较敏感, 由于环境光照对虹膜图像对比度的影响, 可能造成虹膜的边界模糊和对比度下降。如果图像直方图具有明显的双峰特性, 那么可以很容易地选择两峰之间的谷点作为阈值, 这就是常说的峰谷法。但是该方法却不适合于两峰值相差较大, 谷底平而宽的虹膜图像, 或者没有明显的双峰直方图的虹膜图像。鉴于此, 本文采用了最大类间方差法选取的二值化阈值来分离瞳孔, 避免阈值确定过程中对直方图峰值的依赖, 然后通过最小二乘法的原理<sup>[8]</sup>进行曲线拟合来定位虹膜内边界。其具体的实现步骤如下:

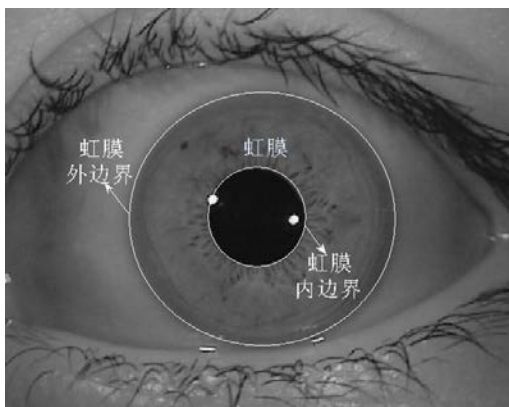


图1 虹膜位置标识图

1) 针对光斑和睫毛, 对图像进行预处理, 在行像素上提取包含瞳孔的感兴趣区域块。

(1) 填充光斑, 再选取适当的形态学结构元素对图像进行形态学的闭操作运算, 以减小光斑和睫毛等因素的影响。

(2) 分块图像, 自上而下选取一定的行(这里取行数为130)对图像进行分块(块与块之间有一定的重叠行)计算各块的灰度值, 找到灰度和值最小块的行坐标位置, 然后根据该位置在水平的行像素方向上提取包含瞳孔的感兴趣区域块  $B_a$  (如图2b所示); 在其对应的进行形态学运算前的图像中提取图像块  $B_b$  (图2c所示, 对应于原始图像块  $B_a$  与块  $B_b$  有相同的坐标位置)。

2) 判断睫毛位置, 确定瞳孔边界点。

(1) 针对可能存在的浓而长的睫毛对瞳孔定位的影响, 将  $B_a$  块与  $B_b$  块进行叠置分析(对应的像素的灰度值进行相减运算), 得到相应的目标区域  $B_c$  块, 以获得丰富的睫毛细节特征。对  $B_c$  块中各像素的灰度值  $B_c(i, j)$  设置一判别门限  $\Delta_g$ , 找到使  $B_c(i, j) \geq \Delta_g$  的对应的像素点, 然后分别在  $B_a$  与  $B_c$  块中对这些对应的像素点进行标记(令这些像素点的灰度值为一常数, 本文取该常数值为255); 而  $B_c(i, j) < \Delta_g$  的对应点的灰度值不变, 这样, 图像块  $B_a$  就变成  $B'_a$  (如图2e所示),  $B_c$  变成  $B'_c$  (如图2d所示)。

(2) 在图像块  $B'_a$  中按照一定的列对其进行分块, 对各块灰度值求和, 找到其值最小的块的列坐标位置, 根据该位置, 提取包含瞳孔的感兴趣区域块  $B_p$  (如图2f所示)。

(3) 采用内间方差法确定瞳孔的二值化阈值  $\tau_p$ , 对  $B_p$  块进行二值化运算:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq \tau_p \\ 0 & f(x, y) < \tau_p \end{cases} \quad (1)$$

统计图像  $B_p$  块中像素值不为255的像素点个数为  $N$ , 这些像素点的灰度和值为  $G_s$ , 其灰度均值:

$$\bar{L} = \frac{G_s}{N} \quad (2)$$

同时求出  $B_p$  块中的灰度极小值  $L_1$ , 确定瞳孔的大概灰度值区间  $[L_1, \bar{L}]$ , 对  $B_p$  块在所选灰度值区间内采取最大类间方差法求瞳孔二值化阈值  $\tau_p$ , 通过该阈值对提取出的  $B_p$  块进行二值化操作。

(4) 确定瞳孔边界点。在二值化后的图像中找到灰度值为0的面积的最大连通域, 将其他灰度值为0的像素点的灰度值设为1, 再对该图像进行填充和形态学的闭运算。

考虑到可能存在眼皮、睫毛以及光斑的干扰,

影响瞳孔的上半部分区域,但是其下边缘的轮廓信息基本不受影响,采用瞳孔二值图像(如图2g所示)的下边缘轮廓来定位虹膜的内边界。在瞳孔的下半部分边界中找到瞳孔下边缘边界点坐标  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $n>3$ ,  $n$ 为边界点总个数。

### 3) 定位虹膜内边界。

在通常情况下,虹膜的内边界都可以表示成圆形,其圆形描述的标准公式为:

$$(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 = R^2 \quad (3)$$

式中  $(x_p, y_p)$ 为圆心坐标,即瞳孔中; $R$ 为内边界半径。公式(3)的另一种曲线表达式可表示为:

$$x^2 + y^2 - 2x_p x - 2y_p y + x_p^2 + y_p^2 - R^2 = 0 \quad (4)$$

其中令:

$$a = -2x_p, \quad b = -2y_p, \quad c = x_p^2 + y_p^2 - R^2$$

进一步对式(4)进行变换,可得:

$$ax + by + c = -(x^2 + y^2) \quad (5)$$

将式(5)写成矩阵的表达形式:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_i & y_i & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(x_1^2 + y_1^2) \\ -(x_2^2 + y_2^2) \\ \dots \\ -M \\ \dots \\ -M \\ -(x_n^2 + y_n^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中  $(x_i, y_i)$ 是瞳孔下边缘边界点坐标,  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $n$ 为边界点总个数,  $n>3$ 。

令:

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_i & y_i & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -(x_1^2 + y_1^2) \\ -(x_2^2 + y_2^2) \\ \dots \\ -M \\ \dots \\ -M \\ -(x_n^2 + y_n^2) \end{bmatrix}$$

则有:

$$AX = B \quad (7)$$

根据最小二乘原理来进行曲线拟合,可得式(7)的最小二乘解为:

$$X = (A^H A)^{-1} A^H B \quad (8)$$

由式(7)可得到瞳孔的位置参数:

$$\begin{cases} x_c = -a/2 \\ y_c = -b/2 \\ R = \sqrt{x_p^2 + y_p^2 - c} \end{cases} \quad (9)$$

按照上述确定虹膜内边界的算法,其定位的主

要过程如图2所示。

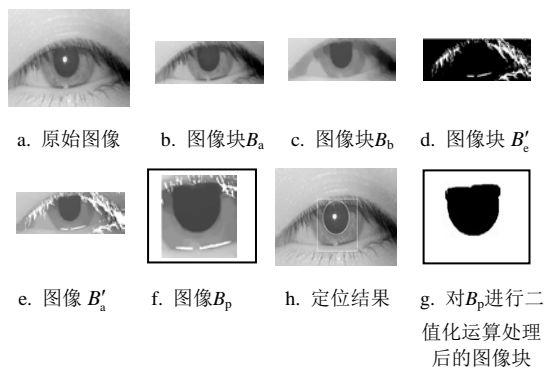


图2 瞳孔定位过程示意图

## 1.2 外边界定位

虹膜的外边界过渡带通常较宽,边界比较模糊,往往还存在睫毛和眼睑的遮挡。另外,虹膜本身丰富的纹理信息也可能给虹膜外边界的定位带来影响,因此,类似于文献[4]圆形模版的算法有时并不能准确地定位虹膜的外边界。本文提出了采用感兴趣区域的灰度梯度信息以及局部灰度梯度积分结果共同确定虹膜外边界点,然后采用最小二乘法原理拟合虹膜外边界。

1) 确定感兴趣区域的虹膜外边界大概位置。根据瞳孔位置参数以及基于瞳孔中心单行灰度梯度信息,同时考虑睫毛眼睑的影响,确定虹膜外边界的可靠位置区域(如图3a所示)。

2) 预处理所选的感兴趣区域。对第一步中所选区域采取适当的中值滤波函数进行滤波处理,以减小可能存在的睫毛、虹膜纹理等的影响。

3) 灰度梯度变换。根据虹膜图像的灰度分布特点,在巩膜与虹膜的边缘处,巩膜灰度高于虹膜灰度,因此,对步骤2中预处理后的左右区域进行灰度梯度变换,考虑可能存在的虹膜纹理及边界模糊的影响,再根据瞳孔位置,定义图像的灰度梯度为:

$$G_y(x_i) = \begin{cases} f(x_i, y) - f(x_i, y+1) & y_{L0} < y < y_{L1} \\ f(x_i, y+1) - f(x_i, y) & y_{R0} \leq y < y_{R1} \\ 0 & f(x_i, y) - f(x_i, y+1) < 0 \\ & y_{L0} < y < y_{L1} \\ 0 & f(x_i, y+1) - f(x_i, y) < 0 \\ & y_{R0} \leq y < y_{R1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $x_i$ 表示所选区域的第*i*行坐标; $G_y(x_i)$ 表示在第  $x_i$  行对纵坐标  $y$  求梯度; $f(x_i, y)$ 表示在坐标  $(x_i, y)$  的像素灰度值; $y_{L0}$ 、 $y_{L1}$ 是根据瞳孔中心位置在瞳孔左侧选取的关键的虹膜外边界区域的列坐

标界限; 而  $y_{R0}$ 、 $y_{R1}$  是在右侧选取的关键的虹膜外边界区域的列坐标界限。

4) 定位外边界。

(1) 找到每行外边界点可能存在的区间: 分别对梯度变换后的左右两侧的关键区域的每一行求梯度积分, 积分区间选为7个像素, 对于离散的变量梯度积分即为求梯度累加和, 再求出每一行左右两个所选区域的梯度积分的最大值  $S_{Lmax}(i)$  和  $S_{Rmax}(i)$ , 则分别找到取得最大梯度和值的区间:

$$\text{Max} \left( \sum_{y=j_0}^{j_0+6} G_y(x_i) \right) = \begin{cases} S_{Lmax}(i) & j_0 = y_{L0}, y_{L0} + 1, \dots, y_{L1} - 6 \\ & y_{L0} \leq y < y_{L1} \\ S_{Rmax}(i) & j_0 = y_{R0}, y_{R0} + 1, \dots, y_{R1} - 6 \\ & y_{R0} \leq y < y_{R1} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $y_{L0}$ 、 $y_{L1}$ 、 $y_{R0}$ 、 $y_{R1}$  及  $y$  与式(10)相同;  $S_{Lmax}(i)$ 、 $S_{Rmax}(i)$  为在左右所选的区域中第  $i$  行的像素分别在坐标区间  $[j_0, j_0 + 6]$  的梯度积分的最大值。

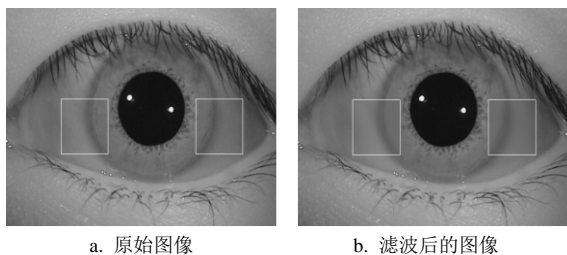
(2) 确定关键的感兴趣区域的外边界点: 根据步骤3中找到的梯度和值的区间值, 确定对应的第  $i$  行像素左右侧区域外边界点的可能坐标分别为:

$$\begin{cases} Y_{Li} = \frac{[j_0 + (j_0 + 6)]}{2} & y_{L0} \leq j_0 \leq y_{L1} - 6 \\ X_{Li} = x_i \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} Y_{Ri} = \frac{[j_0 + (j_0 + 6)]}{2} & y_{R0} \leq j_0 \leq y_{R1} - 6 \\ X_{Ri} = x_i \end{cases} \quad (13)$$

(3) 定位外边界: 对步骤2)中确定的外边界点坐标, 采用最小二乘法类似于瞳孔边界拟合的原理进行曲线拟合, 确定虹膜外圆的边界参数  $(X_{out}, Y_{out}; R_{out})$ 。

图3给出了虹膜外边界定位的主要过程示意图, 首先由瞳孔位置及一些先验知识确定感兴趣的两个局部区域(如图a所示), 接着对两个局部区域进行中值滤波处理(如图b所示), 继而是梯度变换(如图c所示)确定边界点, 最后是曲线拟合外边界的结果(如图d所示)。



a. 原始图像

b. 滤波后的图像

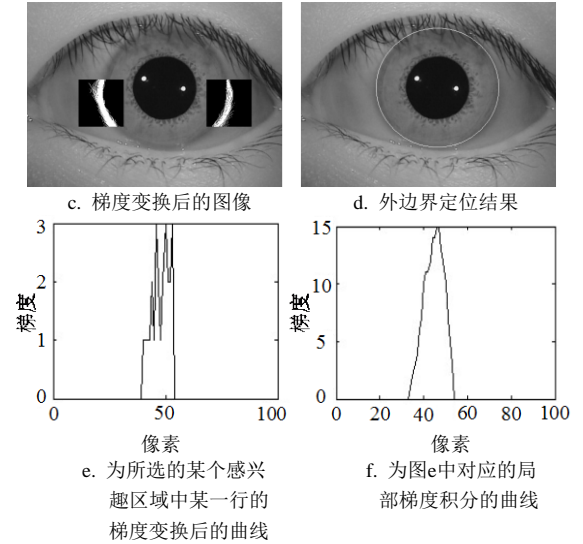


图3 外边界定位过程示意图

## 2 实验研究结果及分析

本文实验所用图像样本主要有两个来源, 一是中科院自动化所提供的虹膜库, 从中挑选了500幅高质量的虹膜图像; 一是本课题组的OKI便携式虹膜采集仪拍摄的虹膜图像, 分辨率为  $640 \times 480 \times 8$ , 对32个人的左、右眼进行了图像采集, 每只眼睛的虹膜图像挑选了20幅, 共1 280幅图像, 并对图像按质量分为高、中和低3类, 其中高质量的图像800幅, 中等质量和低质量的图像各240幅。高质量的图像没有离焦模糊和运动模糊, 光照均匀, 清晰度高, 几乎不受眼睑和睫毛等的影响; 中等质量的图像是图像清晰度较高, 有一定的睫毛或眼睑遮挡; 低等质量的图像是清晰度差, 存在一定的运动模糊或离焦模糊, 或者睫毛、眼睑遮挡严重, 甚至还有严重的光斑影响等。实验在主频为2.9 GHz的计算机上进行, 编程环境为Matlab 7.0。图4给出了不同质量类别的虹膜图像进行边界定位的结果。表1给出了几种典型算法对不同质量图像进行内外边界定位的处理精度和运算速度的对比结果。

表1 虹膜边界定位算法性能比较

| 算法       | 定位精度(%) |     |        |       |        |       | 平均定位速度/s |
|----------|---------|-----|--------|-------|--------|-------|----------|
|          | 高质量图像   |     | 中等质量图像 |       | 劣等质量图像 |       |          |
|          | 内边界     | 外边界 | 内边界    | 外边界   | 内边界    | 外边界   |          |
| 文献[5]的算法 | 100     | 100 | 89.13  | 80.02 | 51.42  | 54.58 | 11       |
| Hough变换  | 100     | 100 | 89.34  | 82.47 | 69.58  | 60    | 55       |
| 文献[7]的算法 | 100     | 100 | 90.21  | 84.21 | 66.67  | 61.67 | 2.5      |
| 本文提出的算法  | 100     | 100 | 100    | 92.38 | 75     | 65.83 | 1.5      |



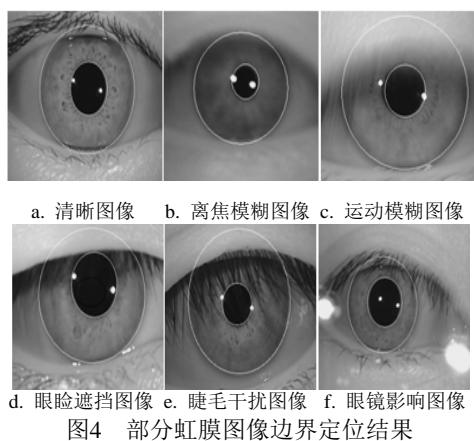


图4 部分虹膜图像边界定位结果

通过对几种典型算法对不同质量图像的实验结果分析可知: (1) 就定位精度而言, 对于高质量的虹膜图像, 本文提出的虹膜定位算法与文献[5]算法、Hough算法和文献[7]算法都能准确地进行虹膜内外边界定位, 对于中、劣等质量的虹膜图像, 本算法的虹膜内外边界定位精度要高于3种经典算法。(2) 就定位速度而言, 本算法的平均定位速度可达1.5帧/s, 远高于3种经典算法的平均定位速度。

由于不同的图像采集设备所采集的虹膜图像的灰度分布特点差异很大, 因此, 虹膜定位算法往往都是针对特定的图像采集设备而设计的, 几乎没有哪种定位方法能够同时适用于多种设备拍摄的虹膜图像。通过实验结果的对比分析进一步可知: (1) 拍摄的图像质量的好坏极大地影响着虹膜定位的精度和速度。(2) 文献[5]提出的算法对虹膜图像质量要求最高; Hough变换对图像质量要求较高, 耗时最多, 不利于实时图像处理; 文献[7]提出的算法对图像质量要求较低, 处理速度很快, 但对于没有双峰特性的直方图虹膜图像不能准确二值化瞳孔; 本文提出的算法对图像质量要求最低, 且处理精度最高、速度最快。

实验结果表明: 本文提出的改进的虹膜定位算法, 能够很好地分离瞳孔, 并快速准确地定位出虹膜的内外边界, 从而满足了虹膜识别系统的实时性要求。

### 3 结 论

本文提出的改进的虹膜定位算法兼顾了虹膜定

位的速度与精度, 并且鲁棒性效果较好, 具有一定的实效性和应用性。在下一阶段的研究中, 将从以下4个方面进一步加以改进: (1) 结合虹膜图像质量评估, 对图像的上下眼睑进行定位, 从而保证虹膜特征提取的有效性。(2) 结合虹膜归一化以及编码算法, 实现对虹膜内外边界非固定圆形<sup>[9]</sup>描述的准确定位。(3) 评估图像的旋转角度。(4) 进行大规模的实验样本(包括不同种族的人群)的研究分析, 以提高虹膜定位算法速度与精度的优越性及适用范围的广泛性等性能。

### 参 考 文 献

- [1] 冯薪桦, 丁小青, 方驰寿, 等. 虹膜内外边界的粗定位方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 1(47): 80-83.  
FENG Xin-hua, DING Xiao-qing, FANG Chi-shou. Iris coarse localization algorithm for both boundaries[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 1(47): 80-83.
- [2] 田启川, 潘 泉, 梁 彦, 等. 瞳孔中心指导的虹膜边界快速定位算法[J]. 系统仿真学报, 2006, 7(18): 1777-1780.  
TIAN Qi-chuan, PAN Quan, LIANG Yan, et al. Fast iris boundary localization algorithm supervised by pupil center[J]. Journal of System Simulation, 2006, 7(18): 1777-1780.
- [3] HE Xiao-fu, SHI Peng-fei. A new segmentation approach for iris recognition based on hand-held capture device[J]. Pattern Recognition, 2007, (40): 1326-1333.
- [4] BASIT A, JAVED M Y. Localization of iris in gray scale images using intensity gradient[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45: 1107-1114.
- [5] DAUGMAN J. The importance of being random: Statistical principles of iris recognition[J]. Pattern Recognition, 2003, 36(2): 279-291.
- [6] WILDES R P. Automated iris recognition: an emerging biometrics technology[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(9): 1348-1363.
- [7] 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.  
WANG Yun-Hong, ZHU Yong, TAN Tie-Niu. Biometrics personal identification based on iris pattern[J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(1): 1-10.
- [8] MA L, TAN T. Personal identification based on iris texture analysis[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 12(25): 1519-1533.
- [9] John Daugman. Handbook of Biometrics[M]. [S.l.]: Springer US, 2008: 71-90.

编辑 张 俊