

Fast Iris Localization Method Based on Morphology and Least Squares Fitting of Circle

Shi Hai-Liang¹, Wei Tao²

1. Dept. Math. and Info. Science, Zhengzhou Univ. of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

2. Dept. Computer Science & Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China

1. e-mail hlshi@zzuli.edu.cn, 2. e-mail 5900171@163.com

Abstract: Iris localization is a key technology in iris recognition system. Considering the properties of physical eyes and iris images, a novel fast iris localization method based on morphology and nonlinear least Squares fitting of circle is proposed. This method consists of two steps: the inner circle localization and the outer circle localization; the former use the methods of morphology, thresholding and maximum connected component successively to locate the inner circle; the latter finds a group of points which locate in outer circle with prior knowledge of inner circle and methods of morphology and thresholding firstly, then locate the outer circle through nonlinear least Squares fitting of circle. The experiment results on CASIA V3.0 Interval and CASIA V1.0 iris image database show that the proposed method can maintain the performance in robustness and precision, and outperforms the existed methods in speed.

Keywords: iris recognition; iris localization; morphology; least Squares fitting of circle

基于形态学和最小二乘圆拟合的快速虹膜定位

时海亮¹, 魏涛²

1. 郑州轻工业学院数学与信息科学系, 郑州, 中国, 450002

2. 河南工程学院计算机科学与工程系, 郑州, 中国, 451191

1. e-mail hlshi@zzuli.edu.cn, 2. e-mail 5900171@163.com

【摘要】虹膜定位是虹膜识别系统的关键技术之一。根据眼睛的生理特点和数字虹膜图像的实际情况, 提出了一种基于形态学和非线性最小二乘圆拟合的快速有效的虹膜定位算法。该算法主要分为两部分: 内圆边界定位和外圆边界定位; 前者先后使用形态学、阈值化和最大连通区域等方法确定内圆边界; 后者利用内圆边界参数等先验信息, 结合形态学和阈值化等方法确定一组外圆边界边缘点, 并利用非线性最小二乘圆拟合方法进行定位。仿真实验先后采用 CASIA V3.0 Interval 和 CASIA V1.0 虹膜数据库, 结果表明本文算法在保持定位稳定性和定位精度等性能的同时, 在定位速度方面明显优于现有文献的虹膜定位算法。

【关键词】虹膜识别; 虹膜定位; 形态学; 最小二乘圆拟合

1 引言

虹膜识别由于不同于传统身份鉴别以及其他生物特征识别, 如面部识别, 视网膜识别、指纹识别、步态识别等, 具有唯一性、稳定性、非接触性、生物活性和防伪性等优点, 越来越受到关注^[1]。

虹膜识别大致分为四个步骤: 虹膜定位, 虹膜归一化, 虹膜特征提取及编码, 特征匹配。虹膜定位是虹膜识别的第一个阶段, 是虹膜识别技术的关键环节, 它将虹膜从眼睛图像中分离出来, 其算法的有效

性和鲁棒性将直接影响虹膜识别系统的性能。虹膜区域的内外边界可由两个圆近似表示, 其中内圆边界分离虹膜和瞳孔, 外圆边界分离虹膜和眼白等^[2]。目前虹膜定位方法基本上分为三类: 第一类为 Daugman 的积分微分算子^[1,3]; 第二类为基于边缘检测和 Hough 变换的算法^[4,5]; 第三类为基于活动轮廓模型技术的算法^[6]。其中第一类方法需在三维空间搜索参数, 定位速度慢, 占用内存, 并对反射光斑点等噪声敏感; 第二类方法亦需在三维空间搜索参数, 易受边缘毛刺或随机噪声的影响; 第三类方法的定位速度较前两种方法有所提高, 但需首先粗略估计瞳孔的位置。

河南省教育厅自然科学研究计划(2009A110021)和郑州轻工业学院校科研基金(2008XJJ007)资助课题。

本文提出一种基于形态学和非线性最小二乘圆拟合的快速虹膜定位算法，该算法首先利用形态学对眼睛图像进行预处理，结合图像阈值化方法定位出内边界，再利用内边界参数等作为先验信息，结合形态学和图像阈值化方法确定出一组外边界边缘点序列，最后利用非线性最小二乘圆拟合方法定位外边界。其优势在于该算法定位速度快，占用内存小，可适于实时虹膜识别。

2 形态学

腐蚀和膨胀^[8]是形态学的基础，其腐蚀或膨胀的方式和程度由一个结构元素控制。形态学开运算可完全删除不能包含结构元素的对象区域，一般使对象的轮廓变得光滑，断开狭窄的间断和消除细的突出物；闭运算同样使轮廓线更为光滑，它通常消除狭窄的间断和长细的鸿沟，消除填充比结构元素小的孔洞，并填补轮廓中的断裂。将开运算和闭运算组合起来能够非常有效的去除噪声。

3 非线性最小二乘圆拟合

非线性最小二乘圆拟合是对一组给定点利用非线性最小二乘方法按照最小化几何距离准则拟合一个圆，确定圆的圆心与半径^[7]。设边缘点为 $X=[X_1, X_2, \dots, X_m]^T$ ，其中 $X_1=(x_{11}, x_{12})^T$ ，设圆方程为 $F(X)=aX^T X + b^T X + c = 0$ ，其中 $a \neq 0$ ， $X, b \in R^2$ 。

$$\text{令 } B = \begin{bmatrix} x_{11}^2 + x_{12}^2 & x_{11} & x_{12} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1}^2 + x_{m2}^2 & x_{m1} & x_{m2} & 1 \end{bmatrix}, \text{ 对于参数}$$

$u=(a, b_1, b_2, c)^T$ ，则有 $Bu=0$ 。为得到有意义解，附加约束条件 $\|u\|=1$ 。对于 $m \geq 3$ ，有 $\begin{cases} \arg \min \|Bu\| \\ \text{s.t. } \|u\|=1 \end{cases}$ 。求解

该问题可得圆心 $Z=(z_1, z_2)=(-b_1/2a, -b_2/2a)$ ，半径 $R=\sqrt{\|b\|^2/4a^2 - c/a}$ ，并将此 Z 和 R 作为初始向量。然后基于最小化几何距离准则，对于边缘点 X_i 有 $d_i^2=(\|Z-X_i\|-R)^2$ 。对于未知参数 $u=(z_1, z_2, R)^T$ ，满足 $\arg \min_u \sum_{i=1}^m d_i(u)^2$ ，利用牛顿-高斯方法求解该非线性最小二乘问题，迭代计算求得最佳拟合圆的参数，即圆心和半径。

4 基于形态学和最小二乘圆拟合的快速虹膜定位算法

4.1 内圆边界定位

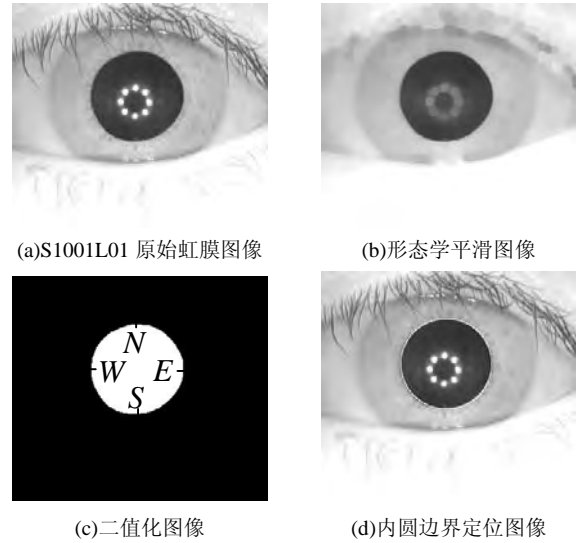


图 1. 内圆边界定位

首先对原始虹膜图像进行形态学平滑处理，即使使用形态学开运算和闭运算的结合操作，除去或减少图像中人为亮和暗的因素和噪声，减小睫毛等低灰度区域对瞳孔和虹膜可能产生的干扰。图 1 (a) 所示为 CASIA V3.0 Interval 版虹膜数据库^[9]中编号为 S1001L01 的原始虹膜图像，图 1 (b) 为形态学平滑后图像。对所得灰度图像 $f(x, y)$ 进行阈值化处理：

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) < T \\ 0 & f(x, y) \geq T \end{cases}, \text{ 其中阈值 } T \text{ 根据图像灰度}$$

直方图的双峰分布特性选择。由于睫毛浓密处和眼睑的灰度在平滑后仍然和瞳孔的灰度接近，在阈值化处理后将产生细小的突出物，而瞳孔区域的反射光斑在阈值化后也易产生小的孔洞，对此可再次进行开运算和闭运算的组合操作，消除这些噪声，产生较清晰的瞳孔区域图，并搜索最大连通区域并作为瞳孔区域，如图 2 (c) 所示，这样容易求得瞳孔区域在水平和垂直方向上的最大值和最小值。

对于已知瞳孔区域上的坐标 (X, Y) ，有两种方法可以求得内边界的圆心和坐标。一种为利用水平和垂直方向上最大值和最小值的几何关系直接求出：圆心 $Z_p(x_p, y_p)$ $x_p = (\max(X) + \min(X))/2$ ， $y_p = (\max(Y) + \min(Y))/2$ ；半径 R_p ： $R_p = \max((\max(X) - \min(X))/2, (\max(Y) - \min(Y))/2)$ 另一种方法为利用水平和垂直方向上最大值和最小值的几何关系确定一组特殊点，如瞳孔区域中正交坐标系四个方向上的终点，即 N、S、E、W，如图 1 (c) 所示，利用这些特殊点进行非线性最小二乘圆形拟合，求出圆心和坐标，如图 1 (d) 所示。

4.2 外圆边界定位

虹膜区域与瞳孔区域的灰度差别较大，具有突变特性，边界较为明显,相对容易定位；而虹膜区域与眼白区域之间的灰度变化，明显有一个过渡带，边界不甚明显，对其定位相对较为困难。我们的思路是搜索外边界上的边缘点信息，通过非线性最小二乘圆拟合来确定外边界的圆心和坐标，故首要任务是搜索外边界边缘点。

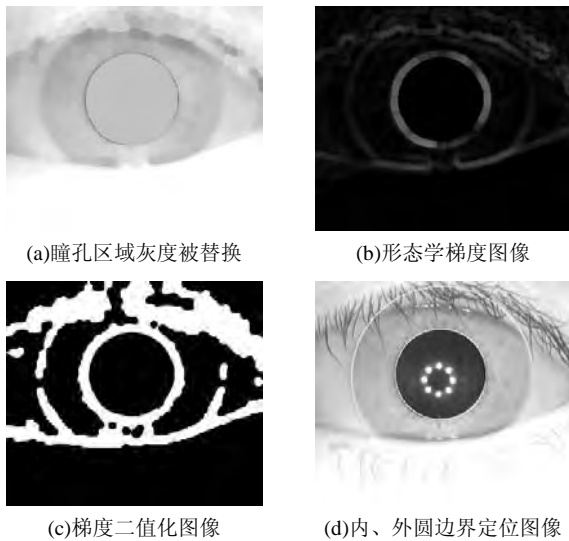


图 2. 外圆边界定位

首先，对于内圆边界定位步骤中的进行过形态学平滑处理的图像，即图 1 (b)，利用内圆边界的圆心和半径等先验信息求得虹膜区域中近瞳孔区域的平均灰度，并将该图中的对应瞳孔区域像素置为该灰度，以此来降低虹膜区域和瞳孔区域的对比度，达到增强虹膜区域和眼白等其他区域的对比度的目的，如图 2 (a) 所示。

然后利用形态学梯度方法，得到对应的边缘检测梯度图像，如图 2 (b) 所示。形态学梯度可使输入图像中灰度级的跃变更为急剧，相对于传统的梯度算法对边缘方向性的依赖更小。

对所得梯度图像再次利用内边界的圆心和半径等先验信息以及全局灰度信息，确定阈值 T ： $T = w_1 T_1 + w_2 T_2$ ，其中 $w_1 + w_2 = 1$ ， T_1 为该图虹膜区域中近瞳孔区域的平均灰度， T_2 为全局灰度阈值，由 Otsu 方法^[7]确定。进而进行阈值化处理得到二值图像，如图 2 (c) 所示，得到一个较为清晰的外圆边界轮廓。

考虑到外边界与内边界一般不是同心圆，内圆边界相对靠下，但将内圆圆心粗略作为外圆圆心对边缘点的定位并无影响。另外，由于眼睑、睫毛等的干扰，虹膜的外边界一般在 $[-\pi/4, \pi/4]$ 和 $[3\pi/4, 5\pi/4]$ 区域

内清晰可见^[6]。在图 2 (c) 中还可看到，在虹膜中近瞳孔区域由于虹膜纹理的影响，瞳孔的边界并不光滑，产生很多小的突起，为消除其对搜索外圆的边缘点的影响，可通过设置适当的外界边缘点的搜索范围来克服。故将边缘点的搜索圆心设置为内圆圆心 $Z_p(x_p, y_p)$ ，搜索半径设置为 $[3R_p/2, 3R_p]$ ，搜索角度设置为 $[-\pi/4, \pi/4]$ 和 $[3\pi/4, 5\pi/4]$ ，搜索径向方向上的第一个“1”值点，即白点作为边缘点。

需要注意的是，根据非线性最小二乘圆拟合理论，对于给定 3 个边缘点即可拟合确定一个圆，为提高算法稳定性，防止图像中噪声的干扰，可多利用一些外边界上的边缘点。但由于搜索出每个角度的点的意义不大，为减小计算量，可每 5° 搜索确定一个点。另外，由于由形态学梯度方法得到的梯度图像不是单像素的边缘图像，不能准确表示外边界，所以对得到的边缘点需要根据在确定梯度图像时形态学结构元素的大小来进行校正。根据校正后的边缘点信息，进行圆拟合，可得外圆边界的圆心和半径，如图 2 (d) 所示。

5 实验及结果

为验证本文提出的基于形态学和最小二乘圆拟合的虹膜定位方法的有效性，本文在中国科学院 CBSR 提供的 CASIA 虹膜数据库^[9]上进行实验。首次实验采用 CASIA V3.0 Interval 版数据库，该数据库包含 249 人、396 类的共 2655 个虹膜图像样本，每个样本为 8 位灰度图像，分辨率为 320×280 。编程环境为 Matlab 7.4。

表 1 基于 CASIA V3.0 Interval 虹膜数据库的实验结果

方法\指标	定位速度 (s)	定位稳定性	定位精度
LM 方法	32.648	2436/2655	内边界较高
		=0.9175	外边界较高
本文方法	0.721	2379/2655	内边界较高；外边界较高，略低于 LM 方法
		=0.8960	

表 2 基于 CASIA V3.0 Interval 虹膜数据库的实验结果

方法\指标	定位速度 (s)	定位稳定性	定位精度
LM 方法	29.706	670/756=0.8862	内边界较高
			外边界较高
本文方法	0.652	665/756=0.8796	内边界较高；外边界较高，略低于 LM 方法

为了对实验结果进行比较分析，验证本文方法的快速性和鲁棒性，另采用 Libor Masek 提供的算法（简称 LM 方法）^[10]进行虹膜定位实验，该算法采用的是 Canny 边缘检测和 Hough 变换相结合的方法进行虹膜定位。为便于对实验结果进行分析，分别在定位速度、稳定性、精度方面进行比较^[5,6]。不同的虹膜图像在处理时间上略有差别，故定位速度采用平均定位时间来度量；定位稳定性采用能够正确定位的虹膜图像数量与总虹膜图像数量的比值来度量；定位精度采用主观评价方式来确定内、外圆边界的定位效果。实验结果见表 1。

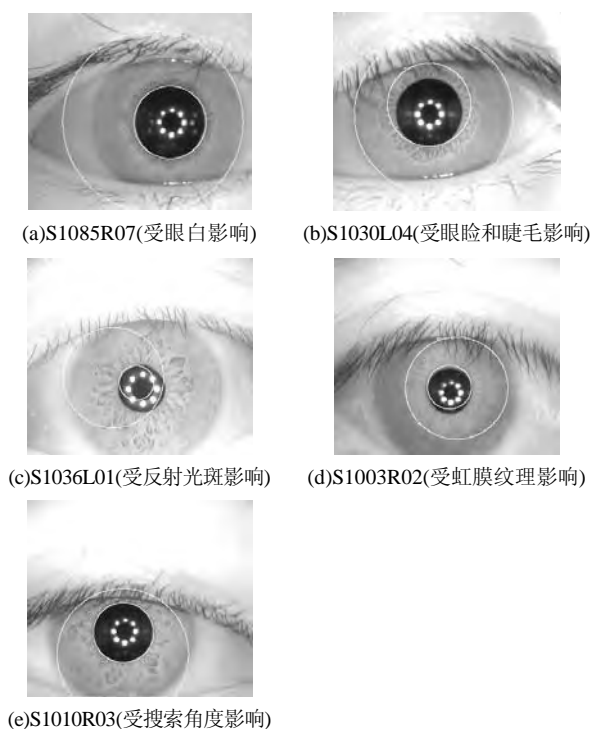


图 3. 虹膜定位出错的图像

实验数据除了采用 CASIA V3.0 Interval 版数据库外，还采用 CASIA V1.0 版虹膜数据库再次实验进行对比分析，该数据库包含 80 人、108 类的共 756 个虹膜图像样本，每个样本为 8 位灰度图像，分辨率为 320*280。其与 CASIA V3.0 Interval 版数据库中的样本均由相同的设备在相同的近红外采光条件下采集，不同处在于 CASIA V1.0 的样本的瞳孔区域被替换为具有灰度不变的圆形区域，消除了反射光斑，更易于虹膜边界检测。实验结果见表 2。

从表 1 和表 2 中的实验结果数据可以看出，在定位速度方面，本文方法明显优于以 LM 方法为代表 Hough 变换结合边缘检测的方法；在定位稳定性方面，

效果略低于 LM 方法；在定位精度方面，两种方法的内边界定位效果都比较好，性能相当，但在外边界的定位精度上，LM 方法略优于本文方法，可归因于外边界较为模糊，呈过渡带状。

通过分析实验结果图像可以看出，出现虹膜定位错误的图像多是由于虹膜区域与瞳孔、眼睑、睫毛、眼白之间较低的灰度对比度造成的，也有一部分为反射光斑或虹膜区域中富含纹理部分与只含少量纹理部分之间形成较明显的灰度对比所造成。图 3 为受各种因素影响定位错误的虹膜图像。另一方面，虹膜定位错误与算法中的具体参数设置有关，例如，在本文方法中，内边界定位中的阈值选择直接影响内边界的定位，并影响后续的外边界定位，但依照灰度直方图的双峰分布特性选择的阈值对于某些特定的虹膜图像仍然出现误差；另外，外边界边缘点的角度搜索范围设置为 $[-\pi/4, \pi/4]$ 和 $[3\pi/4, 5\pi/4]$ 并不对于所有图像成立，某些图像中的可见虹膜区域相对于瞳孔可能过于靠上或靠下，以至搜索范围不合适而出错，适当调整该范围可能效果更好；搜索半径范围也可能由于瞳孔的收缩或扩张而出现定位错误；在 LM 方法中，Canny 边缘检测中阈值的确定、虹膜和瞳孔的搜索半径的设置都可能引起定位错误。上述基于 CASIA V1.0 数据库的 LM 方法实验中瞳孔和虹膜搜索半径设置分别为 [23, 70] 和 [80, 150]，相比文献 [015] 中瞳孔和虹膜搜索半径为 [28, 75] 和 [90, 150] 的实验所得的定位稳定性 83% 显然要高。

6 结论

本文提出了一种基于形态学和非线性最小二乘圆拟合的快速虹膜定位算法。利用形态学的各项技术较好的解决了虹膜定位中眼睑及睫毛等遮挡问题和内、外圆边界的定位问题；非线性最小二乘圆拟合则有效解决了边界定位中圆参数的确定问题；相比基于 Hough 变换的虹膜定位算法，该算法在尽量保持定位稳定性和定位精度等性能的同时，大大缩短了定位时间，减小了计算量，提高了定位速度。同时，提出了几个虹膜定位中容易出现的问题，可作为算法改进的方向。

致谢

本文所用图片来源于中国科学院自动化研究所生物识别与安全技术研究中心所提供的虹膜数据库，感谢他们向同行免费提供该数据库。

References (参考文献)

- [1] John G. Daugman, High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence, *IEEE Trans. on pattern analysis and machine intelligence*, 1993, 15(11): 1148–1150.
- [2] Milena Bueno Pereira, Antonio Claudio Paschoarelli Veiga. Application of genetic algorithm to improve the reliability of an iris recognition system. 2005 IEEE Workshop on Machine Learning for Signal Processing. Mystic, CT, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2005. 159–164.
- [3] John G. Daugman. How iris recognition works. Proceedings of 2002 International Conference on Image Processing. Rochester, NY, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2002. 1/33–1/36.
- [4] Li Ma, Tieniu Tan, Yunhong Wang, Dexin Zhang. Person identification technique based on iris texture analysis. *IEEE Trans. on pattern analysis and machine intelligence*, 2003, 25(12): 1519–1533.
- [5] L. Ma, Y. Wang, T. Tan, Iris recognition using circular symmetric filters. *Proceeding of International conference on pattern recognition*, 2002, 16(2): 414–417.
- [6] Arun Ross, samir shah. Segmenting non-ideal irises using geodesic active contours. *Proceeding of Biometrics Symposium*. Baltimore, USA: Biometrics Symposium, 2006.
- [7] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. RUAN Qiu-qi, RUAN Yu-zhi et al. *Digital Image Processing*, 2nd Edition Beijing: Press of PHEI, 2003. 105–107.
- [8] Walter Gander, Gene H. Golub, Rolf Strebler. Least-Squares fitting of circle and ellipses. *BIT Numerical Mathematics*, 1994, 34(4): 558–578.
- [9] 中国科学院自动化研究所生物识别与安全技术研究中心, <http://www.cbsr.ia.ac.cn/IrisDatabase.htm>
- [10] Libor Masek, Recognition of human iris patterns for biometric identification, <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/studentprojects/libor/>.