

文章编号 1004-924X(2009)01-0179-06

基于相位一致性最大响应方向的虹膜识别方法

苑玮琦, 徐 露, 林忠华

(沈阳工业大学 视觉检测技术研究所, 辽宁 沈阳 110178)

摘要: 为了进一步提高虹膜识别的准确性, 提出了一种基于相位一致性最大响应方向的虹膜识别方法。该方法对人眼图像进行图像预处理, 得到归一化的虹膜图像; 然后, 提取像素对于相位一致性的最大响应方向作为可区分性特征, 并将最大响应方向的序号编码为简单易处理的二进制虹膜代码; 最后, 通过计算两个虹膜代码之间的加权汉明距离衡量二者的差异, 并给出识别结果。实验结果表明, 该方法的等错率为 0.871 5%, 正确识别率为 99.851 8%。与经典的虹膜识别方法相比, 该方法具有更高的识别准确性。

关键词: 生物特征识别; 虹膜识别; 相位一致性; 特征提取

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

Iris recognition based on maximal responding orientation of phase congruency

YUAN Wei-qi, XU Lu, LIN Zhong-hua

(Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of iris recognition further, an iris recognition method based on the maximal responding orientation of phase congruency is proposed. Firstly, the normalized iris images are obtained by preprocessing eye images. Then, the maximal responding orientation of phase congruency for each pixel is extracted and the numbers of maximal responding orientation is encoded into a simple binary iris code that is easy to be processed. Finally, the difference of two iris codes is measured through weighted Hamming distance and the recognition results are given. The experimental results demonstrate that the proposed method has the equal error rate of 0.871 5% and the correct recognition rate of 99.851 8%. Compared with the classical methods, the proposed method has a higher accuracy.

Key words: biometric recognition; iris recognition; phase congruency; feature extracting

1 引 言

目前, 传统身份识别方法已经相对落后, 生物

特征识别却发展很快。生物特征识别主要有指纹识别^[1], 人脸识别^[2-3], 虹膜识别^[4]等。虹膜识别是 20 世纪 90 年代发展起来的一种生物特征识别技术。丰富的纹理使虹膜具有唯一性、稳定性、难

收稿日期: 2008-03-02; 修订日期: 2008-05-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60672078), 辽宁省自然科学基金资助项目(No. 20042028)

更改性、非侵犯性等特点^[5-6],也使虹膜识别成为目前错误率最低的生物特征识别技术^[4]。

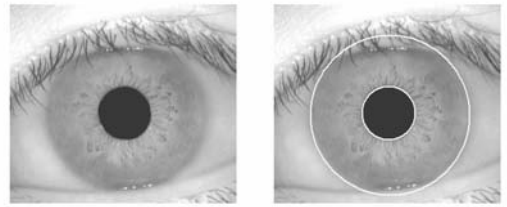
世界各国的研究人员已经提出了很多的虹膜识别方法^[4-12];Daugman^[6]利用多尺度 Gabor 滤波器对虹膜纹理进行局部相位量化和编码,用汉明距离来测量虹膜代码之间的差异;Wildes^[7]采用高斯-拉普拉斯滤波器在不同分辨率下分解虹膜图像,将对应的图像进行相关性比较;Boles^[8]通过计算一维小波变换在不同分辨率级上的过零点来描述虹膜特征,用相异性函数进行模式匹配;Proenca 等^[9]将虹膜图像划分并归一化为 6 个子区域,分别在每个子区域内进行特征提取和比较,然后将 6 个区域内相似度结合起来进行分类判别,以实现模式匹配;侯文君等^[10]首先利用 Radon 变换将二维虹膜纹理信息转换为一维纹理信号,然后使用小波变换多尺度能量算子提取虹膜的特征信息,最后利用相异性函数进行匹配判别;陈爱萍等^[11]提出了一种基于图像相位谱互相关的虹膜识别方法,先对虹膜图像进行滤波和增强等预处理,再利用相位谱互相关匹配算法对虹膜图像进行识别,最后进行了小样本的实验;苑玮琦等^[12]根据虹膜图像的局部信息与全局信息、局部信息与局部信息之间的比较关系进行分块编码,通过计算虹膜代码之间的汉明距离给出识别结果。目前虹膜识别面临的主要困难是:在实际应用的采集条件下,现有方法不能总是稳定地从虹膜图像中提取出可区分性特征,使得虹膜识别的准确性偏低。

为了进一步提高虹膜识别的准确性,本文提出了基于相位一致性最大响应方向的虹膜识别方法,试图将相位一致性引入虹膜识别方法中,并通过实验证明该方法的有效性。该方法通过图像预处理得到归一化的虹膜图像;然后,提取像素对于相位一致性的最大响应方向作为可区分性特征,并将方向序号编码为二进制的虹膜代码;最后,计算不同虹膜代码之间的加权汉明距离。

2 图像预处理

图像采集设备捕获到的人眼图像中不仅包含虹膜,往往还有眼睑、瞳孔、巩膜等无关区域,需要在人眼图像中确定虹膜内外边界,提取出有效的虹膜纹理区域,即虹膜定位。本文采用文献

[13]中给出的方法进行虹膜定位。在获取人眼图像时,由于光照变化引起的瞳孔缩放以及镜头与人眼距离的不同,会造成虹膜在人眼图像中的大小不同。虹膜纹理的这种弹性变形将会影响到特征提取和匹配的结果。因此在预处理时必须对这种变形进行补偿,并将虹膜的大小和比例调整到统一的标准,即归一化。本文从内边界中心右侧的水平半径开始按逆时针方向将环形虹膜展开成 512×64 的矩形虹膜图像。图 1 给出了图像预处理的结果图像示例。



(a) 原始人眼图像

(b) 虹膜定位结果

(a) Original eye image (b) Result of iris location



(c) 归一化结果

(c) Result of normalization

图 1 图像预处理的结果

Fig. 1 Results of image preprocessing

3 虹膜识别

3.1 相位一致性

本文采用式(1)来计算相位一致性^[14]:

$$\begin{cases} PC_2(x) = \frac{\sum_n W(x) \lfloor A_n(x) \Delta \Phi_n(x) - T \rfloor}{\sum_n A_n(x) + \epsilon}, \\ \Delta \Phi_n(x) = \cos(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x)) - |\sin(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x))| \end{cases} \quad (1)$$

其中, ϵ 是一个很小的常数,其作用是避免分母被零除; T 是经过计算估计出来的噪声干扰的阈值,它可以消除噪声对相位一致性计算的影响; $W(x)$ 是相位一致性的加权函数,用于频率扩展;符号“ \lfloor ”表示当其中的值为正数时值不变,否则值变为零; $\Delta \Phi_n(x)$ 的作用是使相位一致性的值尽可能地接近于随着相位偏差本身变化^[14]。

可以采用不同尺度和不同方向的 Log-Gabor 滤波器组来计算 PC_2 的值。二维 Log-Gabor 滤波器比较特殊,它在频率域中构造并由两个部分组成,分别是如式(2)所示的半径滤波器和角度滤波器:

$$\begin{cases} G(\omega) = e^{-\frac{(\log(\omega/w_0))^2}{2(\log(k/w_0))^2}} \\ G(\theta) = e^{-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{2\sigma_\theta^2}} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, ω_0 是滤波器的中心频率,随着 ω_0 的变化, k/ω_0 的值应该保持不变,这样可以得到固定形状的比例滤波器; θ_0 是滤波器的方向角, σ_θ 是角度方向高斯函数的标准偏差。

3.2 特征提取和表示

从相位一致性的计算过程可以发现,对于图像中的任意一点来说,该点在不同方向上的相位一致性程度不同,而相位一致性最大的方向,就是该点的最大响应方向。由于虹膜图像中每个像素的这种最大响应方向都不相同,因此可以作为虹膜图像中的可区分性特征用于虹膜识别。

基于相位一致性最大响应方向的特征提取和表示方法如下:

(1) 对于虹膜图像中的每个像素,计算其在 o 个不同方向上的相位一致性,并找出 o 个方向上的相位一致性中最大的一个,记录该最大值所对应的方向序号;

(2) 将每个像素的相位一致性最大响应方向的序号用 $m = \text{ceil}(\log_2(o))$ 位二进制代码表示,这样就得到了用于表示虹膜模式的虹膜代码。其中, $\text{ceil}(\sim)$ 表示求大于此数的最小整数操作。

图 2 以方向数 $o=8$ 为例说明了二进制虹膜代码是如何生成的。

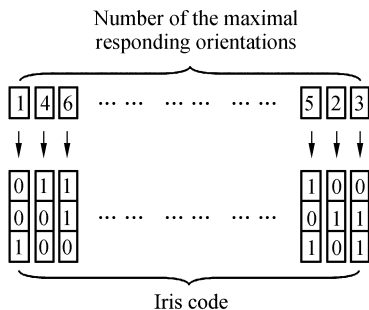


图 2 虹膜代码的生成过程

Fig. 2 Generation of iris codes

3.3 模式匹配

为了准确地衡量虹膜代码之间的差异,本文采用式(3)所示的加权汉明距离进行模式分类:

$$\text{WHD} = \frac{\sum_{j=1}^{\text{Row}} \sum_{i=1}^{\text{Col}} \left\{ \sum_{k=1}^m [(A_{(i-1) \times m + k, j} \oplus B_{(i-1) \times m + k, j}) \times 2^{m-k}] \right\}}{\text{Row} \times \text{Col} \times (2^m - 1)}, \quad (3)$$

其中, WHD 表示加权汉明距离; Col 和 Row 分别表示图像的长和宽; A 和 B 表示虹膜代码; m 表示每个方向序号的编码位数; “ \oplus ”表示异或运算。

在获取人眼图像时,可能会因为头部的旋转使人眼图像发生旋转失真,因此需要对旋转失真进行调整。人眼图像中的旋转失真在虹膜图像中就变成了平移失真,因此要在匹配过程中保持一个虹膜代码不变,使另一个虹膜代码分别向左右各平移一定的次数,每平移一次就进行一次匹配,于是得到多个加权汉明距离,取这些距离中的最小值作为最终的匹配距离。这里的平移一次是指将虹膜代码在行方向上滑过 m 位,正常使用虹膜识别系统时不会发生很大程度的旋转,因此调整范围不必太大。

4 实验结果与分析

实验使用的图像来自中科院自动化所提供的 CASIA 虹膜图像库(Ver1.0)^[15]。在 CASIA 图像库中,绝大部分人眼图像的虹膜区域都存在眼睑和眼毛等干扰,为了保证用于特征提取和匹配实验的虹膜纹理没有任何干扰,本文从该图像库中选取了 60 个类,每类 7 幅图像,共 420 幅图像用于特征提取和匹配实验。这些人眼图像的共同特点是:经过图像预处理以后,归一化虹膜图像的右上角 256×32 大小的区域内没有眼睑和眼毛等干扰。

在进行虹膜识别实验时,可以用错误拒绝率(False Reject Rate, FAR),错误接受率(False Accept Rate, FRR),等错率(Equal Error Rate, EER)、正确识别率(Correct Recognition Rate, CRR)等数据来衡量方法的性能。其中, FAR 是指假冒者被错误地接受为真实者的概率; FRR 是指真实者被误判为假冒者而被拒绝的概率; EER 是指在接收者操作特征(Receiver Operating

Characteristic, ROC) 曲线上 FAR 和 FRR 相等时二者的值; CRR 是指在给定的阈值下, 正确给出接受或拒绝结果的概率。

对于本文提出的方法来说, 最重要的两个参数就是尺度数 n 和方向数 o 。尺度数 n 越大, 频率成分的数量越多, 造成相位一致性偏低; 尺度数 n 越小, 频率成分的数量越少, 造成相位一致性偏高。相位一致性偏低或偏高都会影响最大响应方向的正确性。方向数 o 越大, 频谱覆盖的一致性越好, 却会增加虹膜代码的长度和方法的计算代价; 方向数 o 越小, 虽然虹膜代码很短, 却会降低最大响应方向的可区分性。另外, 为了充分地利用每个像素的 m 个编码位, 令 $o=2k(k \in N)$, N 为自然数。

通过上述讨论发现, 尺度数 n 和方向数 o 影响识别的准确性。本文对尺度数 $n=3, 4, 5, 6$ 和方向数 $o=4, 8, 16$ 进行了 12 次实验, 每次实验包括 $C_{120}^2=87\ 990$ 次匹配, 其中类内匹配(将来自相同虹膜的图像进行匹配) $60 \times C_7^2=1\ 260$ 次, 类间匹配(将来自不同虹膜的图像进行匹配) $C_{120}^2 - 1\ 260=86\ 730$ 次。上述 12 次实验的等错率数据见表 1。

表 1 有关尺度数 n 和方向数 o 取值的等错率

Tab. 1 EER(%) of different values of n and o

	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$
$o=4$	1.297 9	2.079 5	3.566 6	4.226 4
$o=8$	0.871 5	1.038 4	1.884 8	1.657 1
$o=16$	1.413 8	1.683 2	2.341 3	3.584 6

从表 1 可以得到如下结论: 当 $n=3$ 且 $o=8$ 时, 该方法的准确性最高。但是, 由于方向数 o 的取值比较离散, 使得表 1 不能直观地反映出 EER 随 n 和 o 变化的规律, 因此不能只根据表 1 确定 n 和 o 的最终取值。为了直观地看出 EER 随 n 和 o 变化的规律, 本文利用表 1 中的数据, 画出了 n 和 o 与 EER 之间的关系曲线, 分别如图 3 和图 4 所示。

从图 3 可以看出, 无论方向数 o 取何值, 都是当尺度数 $n=3$ 时 EER 最低。从图 4 可以看出, 无论尺度数 n 取何值, 都是当方向数 $o=8$ 时 EER 最低。因此可以确定, 当 $n=3$ 且 $o=8$ 时识

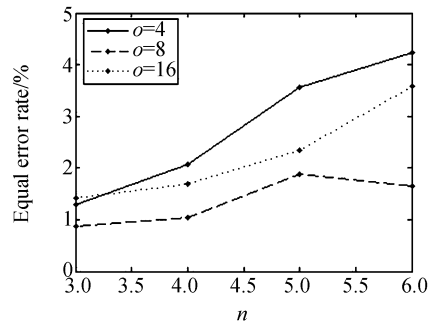


图 3 尺度数 n 与 EER 之间的关系

Fig. 3 Relationship between scale number and EER

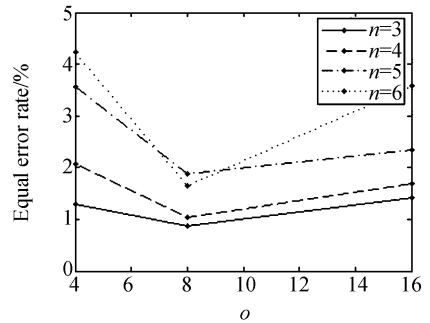


图 4 方向数 o 与 EER 之间的关系

Fig. 4 Relationship between orientation number and EER

别准确性最高, 这与从表 1 中得到的结论相一致。

当 $n=3$ 且 $o=8$ 时, 可以得到 $256 \times 32 \times \log_2(8)=24\ 576$ 位的二进制虹膜代码。 $n=3$ 且 $o=8$ 时的实验结果如图 5 和图 6 所示。从图 5 可以得到, 类内距离分布与类间距离分布在 $WHD=0.474\ 8$ 处发生交叉, 此时 $FAR=0.121\ 8\%$, $FRR=1.968\ 2\%$ 。若令判别阈值 $T=0.460\ 1$, 则正确识别率 $CRR=99.851\ 8\%$ 。从图 6 可以得到该方法的 $EER=0.871\ 5\%$ 。

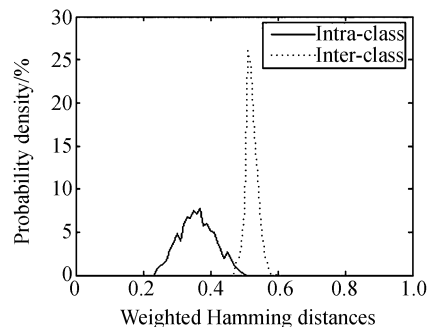


图 5 加权汉明距离分布图

Fig. 5 Distributions of weighted Hamming distances

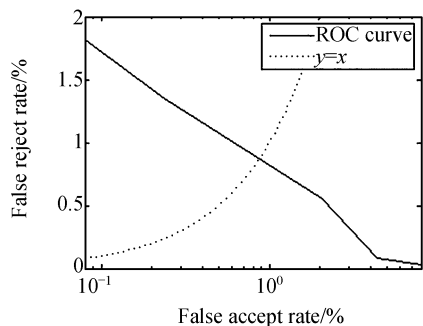


图 6 接受者操作特征曲线

Fig. 6 Curves of receiver operation characteristics

实验结果证明,当 $n=3$ 且 $o=8$ 时,基于相位一致性最大响应方向的虹膜识别方法在可用纹理区域面积很小的情况下仍然具有很高的识别准确性。

为了将提出的方法与其他方法进行比较,本文对 Daugman 的方法和 Boles 的方法以及文献 [12] 的方法在相同的人眼图像样本上,利用相同的可用纹理区域进行了实验,实验数据见表 2。

参考文献:

- [1] 乌旭, 胡家升, 梁殿亮. 基于区域分割的指纹奇异性检测及中心点计算[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 229-235.
WU X, HU J SH, LIANG D L. An algorithm for singularity detection and center point calculation based on fingerprint segmentation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 229-235. (in Chinese)
- [2] 李粉兰, 徐可欣. 一种应用于人脸正面图像的眼睛自动定位算法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 320-326.
LI F L, XU K X. An algorithm applied in frontal-view face images for automatically localizing eyes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 320-326. (in Chinese)
- [3] 聂祥飞, 郭军. 利用 Gabor 小波变换解决人脸识别中的小样本问题[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 973-977.
NIE X F, GUO J. Solution of small sample size problem in face recognition using Gabor wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 973-977. (in Chinese)
- [4] 王蕴红, 朱勇, 谭铁牛. 基于虹膜识别的身份鉴别

表 2 与其他虹膜识别方法的比较

Tab. 2 Comparison with other iris recognition methods

Methods	Daugman	Boles	Reference [12]	Proposed
CRR (%)	99.788 6	93.525 3	99.396 2	99.851 8
EER (%)	0.824 5	7.045 2	1.256 9	0.871 5

5 结 论

本文为了进一步提高虹膜识别的准确性,提出了基于相位一致性最大响应方向的虹膜识别方法。首先,提取虹膜图像中的像素对于相位一致性的最大响应方向作为可区分性特征,并采用简单易处理的二进制虹膜代码表示虹膜模式。然后,通过计算虹膜代码之间的加权汉明距离对不同的虹膜模式进行分类。最后,通过实验为该方法的主要参量选择了比较合理的取值。实验结果证明:该方法具有 0.871 5% 的等错率和 99.851 8% 的正确识别率。与 Daugman 提出的方法、Boles 提出的方法、以及文献 [12] 提出的方法相比,该方法具有更高的准确性。

[J]. 自动化学报, 2002, 28(1): 1-10.

WANG Y H, ZHU Y, TAN T N. Biometrics personal identification based on iris pattern [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(1): 1-10. (in Chinese)

- [5] DAUGMAN J G. Recognizing persons by their iris patterns [C]. *Proceedings of the 2004 Chinese Conference on Biometric Recognition, Guangzhou, P. R. China*, 2004, 3338: 5-25.
- [6] DAUGMAN J G. How iris recognition works [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, 14(1): 21-30.
- [7] WILDES R P, ASMUTH J C, HSU S, *et al.*. Automated, noninvasive iris recognition system and method [P]. *United States*: 5 572 596, 1996.
- [8] BOLES W W. A security system based on human iris identification using wavelet transform [C]. *Proceedings of the First International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, Adelaide, Australia*, 1997: 533-541.
- [9] PROENCA H, ALEXANDRE L. Toward noncooperative iris recognition: a classification approach using multiple signatures [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007,

29(4):607-612.

- [10] 侯文君, 李杨, 都思丹. 基于 Radon 变换的多尺度虹膜识别算法 [J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(2):208-211.

HOU W J, LI Y, DU S D. A multi-scale iris recognition algorithm based on radon transform [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007, 37(2):208-211. (in Chinese)

- [11] 陈爱萍, 石跃祥. 基于相位谱互相关的虹膜识别方法研究 [J]. 计算机与数字工程, 2007, 35(1):5-7, 1.

CHEN A P, SHI Y X. Research method of iris recognition based on phase correlation [J]. *Computer and Digital Engineering*, 2007, 35(1):5-7, 1. (in Chinese)

- [12] 苑玮琦, 徐露, 林忠华. 一种基于局部信息统计的虹膜分块编码方法 [J]. 光学学报, 2007, 27(11):2047-2053.

YUAN W Q, XU L, LIN ZH H. An iris block-encoding method statistic of local information [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11):2047-2053. (in Chinese)

- [13] 苑玮琦, 徐露, 林忠华. 一种基于人眼图像灰度分布特征的虹膜定位算法 [J]. 光电子·激光, 2006, 17(2):226-230.

YUAN W Q, XU L, LIN ZH H. Iris localization algorithm based on gray distribution features of eye images [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(2):226-230. (in Chinese)

- [14] KOVESI P. Image features from phase congruency [J]. *Journal of Computer Vision Research*, 1999, 1(3):1-27.

- [15] Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. CASIA Iris Images Database (Ver 1.0) [Z]. <http://www.sinobiometrics.com>.

作者简介:



苑玮琦(1960—),男,辽宁沈阳人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事机器视觉检测、图像处理与模式识别、生物特征身份识别、基于 DSP 的图像采集与处理系统等技术研究。E-mail: yuan60@126.com



徐露(1981—),男,内蒙古海拉尔人,博士研究生,主要从事图像处理与模式识别、生物特征身份识别等技术研究。E-mail: xulu0330@126.com

林忠华(1979—),男,辽宁丹东人,博士研究生,主要从事图像处理与模式识别、生物特征身份识别等技术研究。E-mail: lzhyhf@126.com

●下期预告

基于内模 PID 控制的大型望远镜伺服系统

李洪文

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

针对目前大型望远镜伺服系统调试参数较多的现状,基于内模 PID 控制方法对大型望远镜伺服系统进行了详细研究,简化了调试过程,分析和仿真结果证明了该算法应用于高精度应用场合的可行性和具有较强的鲁棒性,并就一具体项目验证了该算法的实用性。应用结果表明,该方法调试简单,一个控制环路只需要调整一、两个参数就能满足要求;高速运行时无超调,低速平稳运行达到 15",具有一定的实用性和推广价值。