

文章编号: 0253-2239(2006)10-1537-6

基于灰度曲面匹配的虹膜识别方法*

苑玮琦 徐 露 林忠华

(沈阳工业大学视觉检测技术研究所, 沈阳 110023)

摘要: 目前的虹膜识别都是采用在图像上提取特征点,并将特征点编码为固定长度的特征数据用于匹配的方式。这种方式使虹膜识别系统易受攻击。为了进一步提高虹膜识别系统的安全性和识别速度,提出了一种基于灰度曲面匹配的虹膜识别方法。该方法抛弃了特征提取和编码等传统操作,在特征分析的基础上直接利用了灰度曲面匹配的思想,首先对两幅图像中的像素灰度做差,得到灰度差曲面,然后求出该灰度差曲面的方差。将此方差作为衡量两个虹膜特征曲面之间距离的依据,并据此判定两个虹膜是否来自同一只眼睛。在给定阈值为 40 的前提下,正确识别率为 96.89%,识别时间为 53.2 ms。实验结果证明,该方法识别准确率高,识别速度快。

关键词: 医用光学与生物技术;生物特征识别;虹膜识别;曲面匹配;方差

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A

Iris Identification Method Based on Gray Surface Matching

Yuan Weiqi Xu Lu Lin Zhonghua

(Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023)

Abstract: Nowadays, all of the iris identification methods are utilizing the strategy that extracts the feature points in the iris image firstly and then encodes these points into a certain length feature data for matching. But this strategy can make the iris identification system fragile to be attack. In order to improve the security and speed of iris identification systems, an iris identification method based on gray surface matching is proposed. This method abandons the traditional operations including the feature extracting and encoding, but uses the theory of gray surface matching based on feature analysis. Firstly, it computes the gray difference of two pixels from two different images and gets the gray difference surface. Secondly, it calculates the variance of the gray difference surface and considers this variance as the distance between two feature surfaces. At last, it decides whether these two irises are in the same eye or not according to the variance. When the distance threshold equals to 40, the accuracy is 96.89% and the speed is 53.2 ms. Experimental results demonstrate that this method has high accuracy and speed.

Key words: medical optics and biotechnology; biometrics; iris identification; surface matching; variance

1 引 言

虹膜识别技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种生物特征鉴别技术。近些年来,虹膜识别技术凭借其高稳定性、高可靠性、非接触性等优点,已经成为生物特征鉴别领域中的一个研究热点,世界各国的研究人员也提出了很多不同的虹膜识别算法^[1~12]。在现有的这些虹膜识别技术中,以英国剑桥大学的 John Daugman^[1]开发的虹膜识别算法成熟度最高,并且已经产品化。Daugman 算法的核心部分从来没有公开过,并且已经受到专利保护。因此继续研究 Daugman

的虹膜识别算法已经失去意义,开发具有自主知识产权的虹膜识别算法具有很大的必要性。

目前的虹膜识别技术,通常是先在登录的虹膜图像上利用各种数学手段提取特征值,然后与事先注册的虹膜图像上提取的特征值(该特征值通常保存在数据库中)进行比较,根据二者的匹配程度判定是否来自同一只眼睛。这些虹膜识别方法的一个共同特点是,匹配操作必须在虹膜图像特征值这个层面上进行。这类方法的优点是匹配速度快,非常适合在大型数据库中寻找相同虹膜。但是这种方法存在着如下

* 国家自然科学基金(60472088)和辽宁省自然科学基金(20042028)资助课题。

作者简介: 苑玮琦(1960~),男,辽宁沈阳人,沈阳工业大学教授,博士,主要从事机器视觉检测、图像处理与模式识别、生物特征识别、基于数字信号处理的图像采集与处理系统等研究。E-mail: yuan60@126.com

收稿日期: 2005-11-07; 收到修改稿日期: 2006-04-13

问题,1)在特征提取过程中,由于所采取的数学手段和实现方法不同,准确率和执行时间也不相同,而且都需要很长的特征提取时间;2)用于匹配的特征值仅仅是一组数据(通常称为虹膜代码),极易被窃取和仿冒。如果避开系统的外围部分(即虹膜采集装置),完全可以通过线路直接输入一组伪造的虹膜代码实现虹膜识别。因此,这种方法在特征提取时间和系统安全性方面尚有待于改进和提高。

本文提出了一种与上述方法完全不同的虹膜识别方法,该方法在虹膜图像灰度这个层面上直接进行匹配,抛弃了特征提取操作,使参与匹配的是整个虹膜纹理图像,而不是一组作为特征值的虹膜代码。人眼图像中的虹膜区域在三维灰度级空间的分布实际上是一个曲面,若两个虹膜来自同一只眼睛,由于二者的纹理分布相同,该灰度级分布曲面将具有相同的或相似的形状;若两个虹膜来自不同眼睛,则二者的纹理分布不同,该灰度级分布曲面将具有完全不同的形状。只要能够检测出两个虹膜在三维灰度级空间中分布曲面的差异,就可以据此判定二者是否来自同一只人眼。

2 图像预处理

通常用虹膜采集装置捕获到的是人眼图像,在该图像上不可能仅仅包含虹膜区域,往往还含有眼睑、瞳孔、巩膜等无关区域,所以必须先在人眼图像中准确地找到虹膜的内外边界,提取出有效的虹膜纹理区域。在人眼图像上,虹膜为近似的圆环形状。从匹配的角度出发,应该考虑在环形虹膜上直接进行灰度级曲面的匹配操作。在不考虑旋转失真的情

况下,这种方法是可行的。但是在采集图像时,人眼相对采集装置的角度将不可避免地发生变化,这就使得人眼图像上的环形虹膜存在不同程度的旋转失真。于是必须在匹配过程中进行一定的调整,实现算法的旋转不变性。在直角坐标系下实现对环形的旋转操作是相当麻烦的,因此将直角坐标系下的环形虹膜展开成极坐标系下的矩形虹膜,直角坐标系下对环形虹膜的旋转操作转换成在极坐标系下对矩形虹膜的平移操作,便于对旋转失真进行调整。

图像预处理包括以下步骤:1)虹膜定位。即确定虹膜的位置和大小,在人眼图像中分离出虹膜纹理区域。这一步操作可以解决平移失真对匹配结果的影响;2)归一化。从虹膜内边界中心左侧的水平半径开始,按逆时针方向将环形虹膜展开成矩形虹膜,并对虹膜的大小进行标准化。该步骤对瞳孔与虹膜不同心以及二者都不是标准圆的问题进行了调整,使得在展开后的矩形虹膜图像中瞳孔边界与虹膜边界是两条平行的水平线,即图像的上下两条边。该步骤同时还解决了缩放失真对匹配结果的影响。由于分离虹膜纹理区域的实现方法不属于本论文的研究内容,在此不做赘述。图1为虹膜图像预处理的全过程。图1(a)为原始虹膜图像;图1(b)为虹膜定位的结果,图像中半径 OA 为归一化展开时的起始位置;图1(c)为展开并标准化以后的矩形虹膜图像,线段 BA 对应展开起始半径 OA 上虹膜环内的部分,右侧白色矩形内标注出了不受任何噪声干扰的可用虹膜纹理区域,线段 BC 和 AD 分别代表展开后的瞳孔边界和虹膜边界;图1(d)为图1(c)中矩形虹膜图像对应的空间灰度分布曲面。

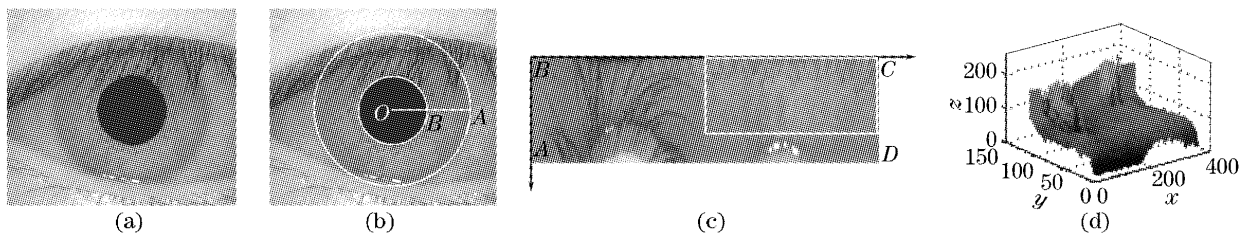


图1 虹膜图像预处理的全过程

Fig. 1 Whole process of iris image preprocessing

3 虹膜特征曲面

矩形虹膜图像在三维灰度级空间上的分布曲面的起伏波动形状与虹膜纹理分布具有明显的对应关系,可以用该分布曲面表示纹理特征。以图像水平方向为 x 轴,垂直方向为 y 轴,以像素灰度值为 z 轴

建立三维空间坐标系,则虹膜图像中任意像素都可由坐标 (x, y, z) 来表示,也就得到了矩形虹膜图像在三维灰度级空间上的分布曲面[如图1(d)所示]。为了清楚地描述算法,本文将虹膜图像在三维灰度级空间上的分布曲面称为特征曲面。

对照图1(c)和图1(d)可以清楚地看出虹膜纹理

与特征曲面起伏波动的对应关系。纹理灰度越深,特征曲面的起伏就越大。曲面的形态直接反映了虹膜纹理特征。如果两个特征曲面具有相同的或相似的形状,则它们在三维空间中的位置关系必然是重合或者平行。可以通过计算两个特征曲面之间距离的方式,来测量二者在形状上的差异。在虹膜采集过程中,不能保证每一次采集时的光照强度完全相同。虹膜表面纹理将发生两种不同情况的变化。第一种是纹理深度的变化,这种变化在特征曲面上表现为灰度起伏幅度的变化,从几何的角度讲,是发生了拓扑变形。但是这种变形只是特征曲面的高度发生变化,而位置没有变化或者变化很小;另一种是整个虹膜表面的亮度发生变化,这种变化在特征曲面上表现为整体灰度平均值的变化,即特征曲面在三维空间中沿灰度级方向发生了平移。对于第一种变化,算法中通过将所有图像的灰度调整到统一的范围来消除其对匹配结果的影响;对于第二种变化,由于只是在整体灰度上发生了平移,而对应的纹理位置不会变化,即曲面的起伏波动不会变化,所以不会影响匹配结果。

4 匹 配

在矩形虹膜图像中提取出不受眼睑和睫毛等噪声影响的可用纹理区域,并将该区域内的图像裁剪出来。对每幅可用纹理图像进行灰度调整,将所有图像的灰度调整到一致的范围。得到两幅可用纹理图像的特征曲面,求出两个特征曲面的灰度差曲面,计算该灰度差曲面的方差,根据方差给出识别结果。

4.1 提取可用纹理区域

经过观察和数据分析发现,人眼图像中的虹膜区域具有这样几个特点:1)虹膜纹理由瞳孔向外呈放射状结构,反映在归一化的矩形虹膜图像上,这些特征就是沿垂直方向分布的;2)虹膜纹理总是在越靠近瞳孔的区域越丰富,在越靠近巩膜的区域越稀少;3)眼睑和睫毛总是遮挡住虹膜外侧的部分区域,其中上眼睑和其上的睫毛对虹膜的遮挡范围大于下眼睑和睫毛的遮挡范围,所以在矩形虹膜图像的左半侧区域内可用的纹理信息少于右半侧。实验证明,在归一化的矩形虹膜图像中,只利用右半侧从上到下(也就是从瞳孔边界开始向外)的若干行像素即可,这个范围内的虹膜纹理已经完全可以满足虹膜识别的需要。经过裁剪后剩下的虹膜可用纹理图像可由式(1)表示

$$I' = \sum_{j=1}^H \sum_{i=1}^W I(i, j), \quad (1)$$

其中 I 表示输入图像, I' 表示裁剪后的图像, W 表示

可用纹理区域的宽度, H 表示可用纹理区域的高度。

4.2 灰度调整

由于虹膜采集时光照条件的差异,同一个虹膜的不同灰度图像存在灰度平均值和方差的差异。这个差异将影响虹膜图像之间的匹配结果。必须对每幅图像进行灰度调整,将所有虹膜图像的灰度值调整到统一的范围,从而消除亮度不一致造成的影响。设原图像中像素的灰度值为 $f(x, y)$, 灰度调整后该像素的灰度值为 $g(x, y)$, 则二者之间的关系可由(2)式表示:

$$g(x, y) = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} [f(x, y) - f_{\min}] + g_{\min}, \quad (2)$$

其中 f_{\max} 和 f_{\min} 分别为原图像中灰度的最大值和最小值, g_{\max} 和 g_{\min} 分别为调整后图像中灰度的最大值和最小值。

4.3 特征曲面匹配

设登录虹膜的特征曲面为 P , 已注册虹膜的特征曲面为 Q , 直观地观察特征曲面 P 和 Q 可以看出,若两个虹膜来自同一只人眼,则曲面 P 与 Q 的形状将完全或者基本一致。否则,二者的灰度起伏波动形状将具有很大的差异。从数学的角度讲,空间曲面形状上的差异,完全可以用二者之间的某种距离来测量。本文算法以两个特征曲面 P 和 Q 的灰度差曲面的方差作为 P 与 Q 之间的距离。

为了得到特征曲面 P 和 Q 之间的距离,可以先按(3)式求出曲面 P 和 Q 对应位置上像素的灰度差,从而得到曲面 P 和 Q 的灰度差曲面 R :

$$R_{ij} = P_{ij} - Q_{ij}, \quad (3)$$

其中 R_{ij} 为灰度差曲面 R 上 (i, j) 处的灰度差, P_{ij} 和 Q_{ij} 分别对应曲面 P 和 Q 上 (i, j) 处的灰度值, $i = 0, 1, 2, \dots, \text{Width}$, $j = 0, 1, 2, \dots, \text{Height}$ 。图 2 给出了两种不同情况下的灰度差曲面,其中 R_1 代表来自同一个虹膜的两幅不同图像之间的灰度差曲面, R_2 代表来自不同虹膜的两幅图像之间的灰度差曲面。 R_1 和 R_2 下方是用 5 个等间隔的平面对灰度差曲面 R_1 和 R_2 做切割所得到的二维曲线。

在得到灰度差曲面 R 以后,就可以按(4)式求出灰度差曲面 R 的方差 S^2 :

$$\begin{cases} S^2 = \frac{1}{W \times H} \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H (|R_{ij}| - \bar{X})^2, \\ \bar{X} = \frac{1}{W \times H} \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H |R_{ij}|. \end{cases} \quad (4)$$

从图 2 中可以看到,来自同一个虹膜的不同图

像之间的灰度差曲面比较平坦,没有很大的波动起伏。这样的灰度差曲面其方差也很小,而来自不同虹膜的图像之间的灰度差曲面情况则方差很大。可

以在求出灰度差曲面的方差之后,利用该值来衡量两个特征曲面之间的距离,根据其距离来判定两个虹膜是否来自同一只人眼。

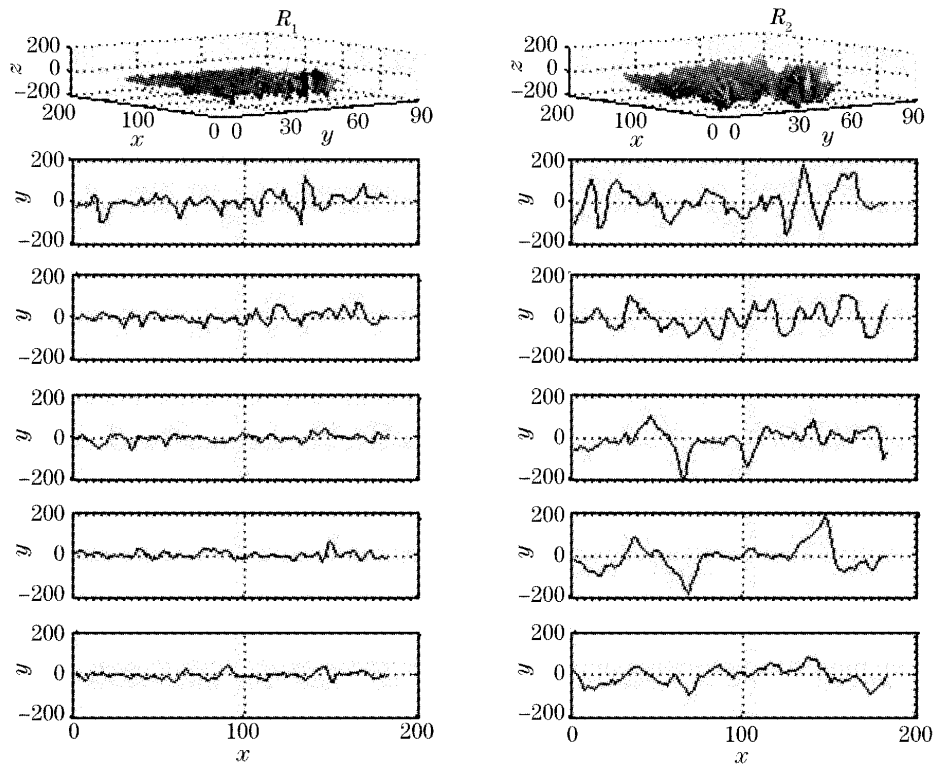


图 2 两种不同情况下的灰度差曲面

Fig. 2 Two gray difference surfaces under different conditions

在图像获取时,对登录者不做严格要求,当人眼旋转时,会使虹膜纹理在人眼图像中发生位置上的旋转偏移(称为旋转失真)。即使将来自同一个虹膜的不同图像进行匹配,灰度差曲面的方差也会很大,造成识别错误。为了消除旋转失真造成的影响,使算法具有旋转不变性,必须在匹配操作中对旋转失真进行一定的调节,即要在一定角度范围内进行旋转匹配,以找到最佳的匹配位置。在环形虹膜上发生的旋转失真,体现在矩形虹膜上就是平移失真。在调节旋转失真时,只要保持一个特征曲面的位置不变,将另一个特征曲面向左或者向右平移一定的距离,再将两个特征曲面进行匹配即可。图 3 为调节旋转失真时几种不同情况下的灰度差曲面。 R_3 代表将来自同一个虹膜的两幅不同图像直接进行匹配得到的灰度差曲面, R_4 代表将来自同一个虹膜的两幅不同图像旋转后进行匹配时得到的灰度差曲面, R_5 代表将来自不同虹膜的两幅图像旋转后进行匹配时得到的灰度差曲面。

在图 2 和图 3 中, x 轴表示图像宽度,即列号; y 轴表示图像高度,即行号; z 轴表示灰度差的值。二维坐标系的定义为: x 轴表示每行的像素个数; y 轴

表示灰度差的值。

灰度曲面匹配算法实现的基本步骤为:1)分别建立登录虹膜的特征曲面 P 和已注册虹膜的特征曲面 Q ;2)计算曲面 P 和 Q 对应位置上像素的灰度差,得到曲面 P 和 Q 的灰度差曲面 R ;3)计算灰度差曲面 R 的方差 S^2 ,根据方差 S^2 给出识别结果。

5 实验结果与分析

文献[7]对 Daugman, Wildes, Boles 等的算法进行了详细的实验和比较,为便本文介绍的算法与其具有可比性,本文采用了与文献[7]相同的实验条件。所用图像来自中国科学院自动化研究所提供的 CASIA 虹膜图像数据库(版本 1.0)^[15],共有 756 幅图像,包括 80 人 108 只不同眼睛的虹膜样本,每只眼睛有 7 幅图像,分辨力为 320×280 。对上述的 108 类虹膜图像样本进行了 286146 次匹配实验,其中类内匹配 3024 次,类间匹配 283122 次。类内匹配是指将来自同一个虹膜的不同图像进行匹配,类间匹配是指将不同虹膜的图像进行匹配。

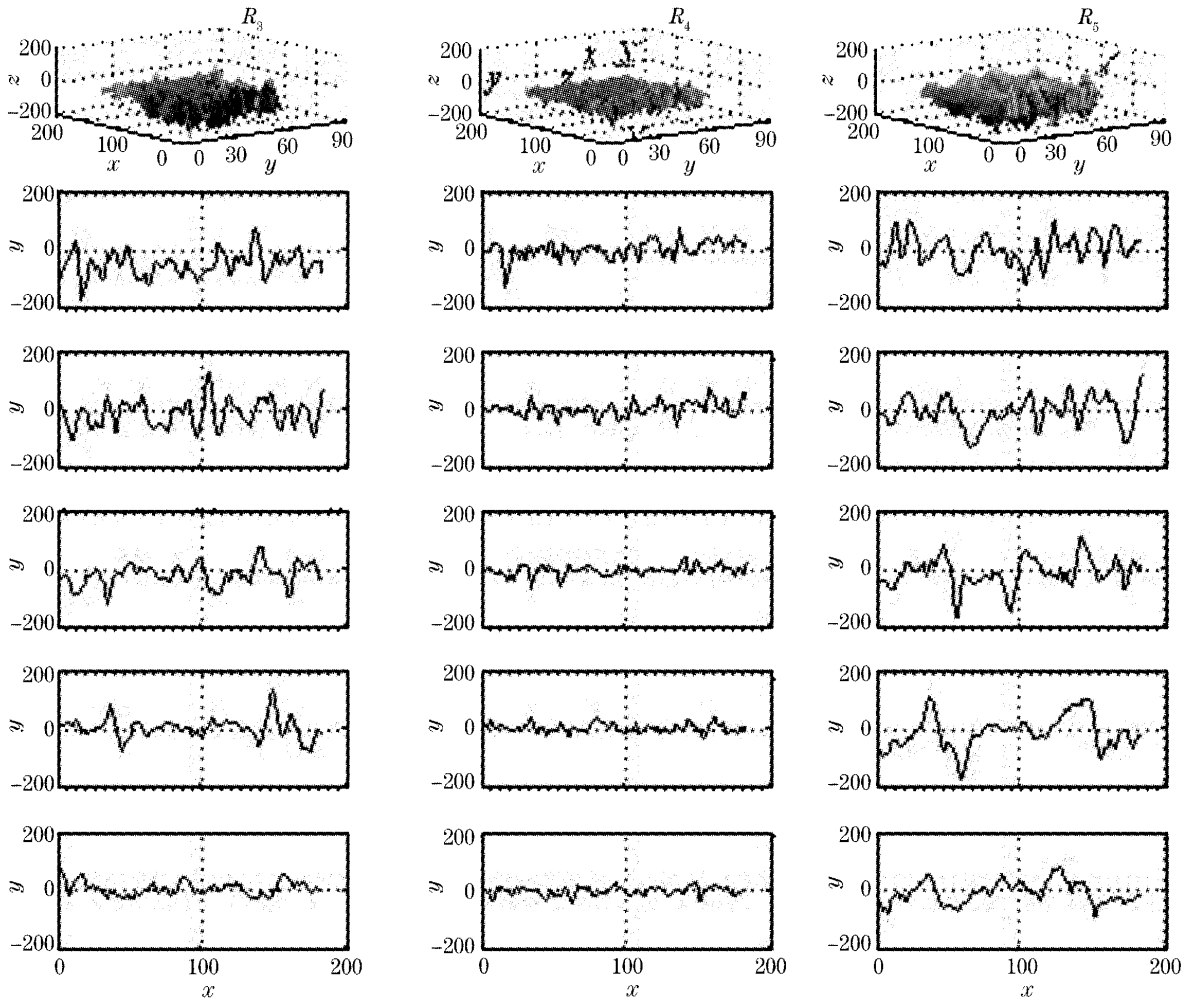


图 3 旋转失真的调节

Fig. 3 Modulation of circumrotation distortions

在给定阈值 $T = 40$ 时, 算法的错误拒绝率 (False reject rate), $R_{FR} = 4.13\%$, 错误接受率 (False accept rate), $R_{FA} = 3.10\%$, 正确识别率 (Correct recognition rate), $R_{CR} = 96.89\%$ 。即在 286146 次匹配实验中, 正确给出识别结果 277245 次, 错误拒绝 125 次, 错误接受 8776 次。另外, 对 Daugman, Wildes, Boles^[1~5] 提出的 3 种经典算法在相同的图像样本上进行了实验^[7], 如表 1。在表 1

中, 每种算法的正确识别率是在经过分类训练后获得的阈值下得到的, 等错率 (Equal error rate, EER) 是从算法各自的接受者操作特征 (Receiver operating characteristic, ROC) 曲线上得到的。对算法的执行时间进行了测试, 其中包括特征提取时间、匹配时间、以及特征提取与匹配的总时间等。算法执行时间的具体实验数据见表 1。

表 1 算法性能比较

Table 1 Comparison of algorithms

Methods	Correct recognition rate / %	Equal error rate / %	Feature extraction time / ms	Matching time / ms	Total time / ms
Daugman	100	0.08	682.5	4.3	686.8
Wildes	—	1.76	210.0	401.0	611.0
Boles	92.64	8.13	170.3	11.0	181.3
This	96.89	3.76	0	53.2	53.2

6 结 论

提出了一种基于灰度曲面匹配的虹膜识别方

法, 在原理上与现有典型方法完全不同, 抛弃了传统的在匹配之前进行的特征提取和编码操作, 直接将

两幅虹膜图像的特征曲面用于匹配,使参与匹配的是整个虹膜纹理图像,不再是一组作为特征值的虹膜代码。在共有 108 类 756 幅虹膜图像样本的数据库上进行大量实验的结果证明,该算法的正确识别率和等错率只比 Daugman 的识别算法低,而比其他两种算法都高,已经具有了很高的实用性。该算法不需要特征提取操作,省去了特征提取时间,虽然匹配时间并不占明显优势,但整个识别时间仍然是最快的,具有很高的实时性。通过图像预处理和旋转匹配等操作,实现了算法的平移、缩放、旋转等不变性。

致谢 感谢中国科学院自动化研究所(北京)提供的 CASIA 虹膜数据库(版本 1.0),使我们的课题得以顺利进行。

参 考 文 献

- 1 John Daugman. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, **15** (1): 1148~1161
- 2 John Daugman. The importance of being random: statistical principles of iris recognition [J]. *Pattern Recognition*, 2003, **36**(2): 279~291
- 3 John Daugman. How iris recognition works [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, **14**(1): 21~30
- 4 Richard . P Wildes. Iris recognition: an emerging biometric technology[C]. *Proc. IEEE*, 1997, **85**(9): 1348~1363
- 5 W W Boles, B Boashash. A human identification technique using images of the iris and wavelet transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, **46**(4): 1185~1188
- 6 Jaemin Kim, Seongwon Cho, Jinsu Choi *et al.*. Iris recognition using wavelet features[J]. *J. VLSI Signal Processing*, 2004, **38**(2): 147~156
- 7 Li Ma, Tieniu Tan, Yunhong Wang *et al.*. Efficient iris recognition by characterizing key local variations [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(6): 739~750
- 8 Huang Yaping, Luo Siwei, Chen Enyi. An iris recognition algorithm based on independent component analysis [J]. *J. Computer Research and Development*, 2003, **40** (10): 1451~1457 (in Chinese)
黄雅平,罗四维,陈恩义. 基于独立分量分析的虹膜识别方法 [J]. *计算机研究与发展*, 2003, **40**(10): 1451~1457
- 9 Hung Heifang, Hu Guangshu. Wavelet transform algorithm for iris recognition [J]. *J. Tsinghua University (Science and Technology Edition)*, 2003, **43**(9): 1210~1213 (in Chinese)
黄惠芳,胡广书. 一种新的基于小波变换的虹膜识别方法 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, **43**(9): 1210~1213
- 10 Wang Xiangjun, Zhang Min, Zhou Xinling *et al.*. Research on non-contact method of capturing iris image and extracting feature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 319~323 (in Chinese)
王向军,张敏,周鑫玲等. 非接触式虹膜图像获取及特征提取方法的研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 319~323
- 11 Yuan Weiqi, Xu Lu, Lin Zhonghua. An accurate and fast iris location method based on the features of human eyes [C]. In *Proceedings of 2nd International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2005, **LNAI 3614**: 306~315
- 12 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
- 13 Yu Yang, Huang Weiyi. High similarity gray-scale image recognition with modified morphological correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1362~1367 (in Chinese)
余杨,黄惟一. 改进形态学相关算法以识别高相似度灰度图像 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1362~1367
- 14 Zhao Peng, Pu Zhaobang, Zhang Tianwen. A new tracking method of dynamic contour based on image fusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 760~766 (in Chinese)
赵鹏,浦昭邦,张田文. 基于图像融合的动态轮廓线跟踪新方法 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 760~766
- 15 Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. CASIA Iris Image Database (ver 1.0). <http://www.sinobiometrics.com>. 2004