

# 基于二维正交滤波的虹膜识别算法

方强 姚鹏

(中国科学技术大学信息科学技术学院 合肥 230000)

**摘要** 提出一种针对灰度虹膜图像进行虹膜特征提取及匹配的方法,其利用四元数二维正交 Log Gabor 小波提取虹膜图像的纹理特征,以滤波后图像的解析信号作为虹膜的特征编码。该方法可以同时表征虹膜纹理多方向上的特征,更加全面地描述了虹膜纹理的特征空间。特征匹配采用类似汉明距的方式,同时以虹膜图像中眼睑、睫毛以及光斑的分布为匹配模板来减少它们的干扰。大量实验的结果表明该方法具有非常优越的识别性能。

**关键词** 虹膜识别, Log Gabor, 四元数正交滤波, 解析信号

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.5.057

## Reliable Iris Recognition Using 2D Quadrature Filters

FANG Qiang YAO Peng

(School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230000, China)

**Abstract** This paper investigated a new approach for iris recognition with gray iris image. The approach extracts iris feature using 2D quadrature Log Gabor filter obtained by quaternion fourier transform. The method can get reliable iris phase information by orthogonal directions and calculate analytic signal of the filtered iris image as feature. The method characterizes iris feature in multidirectional ways. Thus iris feature encoding with high complexity that makes the iris feature more comprehensive is obtained. Feature matching adds template and uses the similar way of hamming distance to reduce the disturbance of eyelid, eyelash and facula. The results with 2D Log Gabor quadrature filters achieve significant recognition performance.

**Keywords** Iris recognition, Log Gabor, Quaternion quadrature filters, Analytic signal

## 1 引言

生物特征识别是以人类自身生理特征或者行为特征作为识别媒介,进行智能身份识别<sup>[1,2]</sup>。人类的虹膜是唯一外部可见的内部器官,具有很高的稳定性和复杂性,是一种重要的身份特征。虹膜识别在目前生物识别技术中具有最高的识别率,因此近年来利用虹膜进行身份识别受到了越来越多的重视<sup>[3]</sup>。然而由于高质量虹膜图像的采集比指纹采集、人脸图像采集等困难得多,导致在实际应用中,虹膜识别技术仍然没有指纹识别、人脸识别等生物特征识别技术应用广泛。高质量虹膜图像采集这一难点主要体现为采集的图像中很容易包含没有完整眼睛、闭眼、斜视、模糊等不合格虹膜图像,这些情况都将会造成无法准确表达人类的虹膜信息,也就无法提取出真实情况下的虹膜信息编码。

在虹膜图像较理想的情况下,目前很多的虹膜识别算法都有着较高的识别率。1993年 Daugman<sup>[4-6]</sup>首次提出了利用二维 Gabor 复小波进行提取虹膜纹理的相位特征,使用汉明距的方法进行匹配。该算法利用 Gabor 小波的局部性和方向性对虹膜纹理进行分解编码。Wildes 等人<sup>[7,8]</sup>采用拉普拉斯金字塔分解算法对虹膜图像进行处理以提取虹膜特征,再通

过 Fisher 线性变换进行匹配。Boles 和 Boashah 等人<sup>[9]</sup>使用一维三次样条小波对虹膜图像进行小波变换,并且使用过零点和过零点之间积分后的平均值作为虹膜图像的特征。2004年 Ma<sup>[10]</sup>提出对经过向量化归一化后的虹膜图像进行一维二值小波变换来得到二进制编码。2006年 Sun<sup>[11,12]</sup>提出了一种级联分类器的概念。第一层分类器提取虹膜图像的二进制编码,进行汉明距离分类;第二层分类器利用虹膜图像的全局特征或者 LBP 直方图特征进行分类。另外,随着近年来稀疏表示方法相关领域研究的发展,基于稀疏表示的虹膜识别方法也被提出。2011年 Pillai 等人<sup>[13]</sup>提出了一种基于稀疏表示和随机投影的鲁棒虹膜识别方法,其取得了很好的效果。在这些虹膜识别算法中, Daugman 的二维 Gabor 复小波的方法<sup>[4-6]</sup>以优越的识别性能成为了目前国内外的虹膜识别设备中采用的主流算法。

本文提出一种新的虹膜识别方法,使用四元数二维正交滤波器对虹膜纹理特征进行提取,将该正交滤波器应用于虹膜特征提取上可以得到多方向上虹膜特征编码。本文第 2 节详细介绍了四元数二维 Log Gabor 正交滤波器;然后在第 3 节重点介绍了使用该正交滤波器进行虹膜特征提取和匹配的方法;最后给出了实验的结果,并进行了分析、总结。

到稿日期:2014-06-12 返修日期:2014-09-12

方强(1989-),男,硕士生,主要研究方向为生物特征识别、图像处理, E-mail:fangqiang927@gmail.com;姚鹏(1974-),男,博士,讲师,主要研究方向为生物特征识别、模式识别、嵌入式系统, E-mail:yaopeng@ustc.edu.cn(通信作者)。

## 2 四元数二维正交滤波器

### 2.1 四元数及 QFT

四元数起源于寻找复数的三维对应物,由英国数学家哈密顿于 1843 年提出<sup>[14,15]</sup>。由于四元数乘法不具有交换性,使得四元数的应用要困难得多,直到 20 世纪 60 年代末,四元数才开始得到实际应用。目前,四元数理论与方法已成功应用到计算机图形学及图像处理等领域。四元数又称为超复数,由 1 个实部和 3 个虚部组成。与传统复数相比,四元数的乘法并不具有交换性。因此,四元数是复数的不可交换延伸。如果将四元数的集合考虑成多维实数空间,四元数就代表着一个四维空间,相对于复数的二维空间。

四元数定义如下:

$$q = w + ix + jy + kz \quad (1)$$

这里,  $w, x, y, z \in \mathbb{R}$ ,  $i, j, k$  是 3 个基元。基元  $i, j, k$  的运算规则为:

$$\begin{aligned} i^2 = j^2 = k^2 = ij = jk = ki = -1 \\ ij = k, jk = i, ki = j \end{aligned} \quad (2)$$

$$ji = -k, kj = -i, ik = -j$$

可以看出四元数的乘法是不满足交换律的。

四元数的共轭、模、逆分别为:

$$\bar{q} = w - ix - jy - kz$$

$$|q| = \sqrt{w^2 + x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

$$q^{-1} = \bar{q} / |q|^2$$

$w=0$  时,  $q$  称为纯四元数;  $|q|=1$  时,  $q$  称为单位四元数。

四元数还可以表示成极坐标的方式:  $q = |q| e^{i\varphi} e^{j\theta} e^{k\psi}$ , 用于表征图像时,  $\varphi, \theta$  表示了图像两个垂直方向上的局部相位, 而  $\psi$  则包含了整个图像的相位特征。

Ell 最早给出了四元数域的傅立叶变换的概念<sup>[16]</sup>, 并且由于四元数乘法的不可交换性, Ell 同时指出了四元数傅立叶变换 (Quaternion Fourier Transform, QFT) 和四元数傅立叶逆变换 (Inverse Quaternion Fourier Transform, IQFT) 应该有 3 种不同形式的定义: 左型 QFT (IQFT)、右型 QFT (IQFT) 以及双边 QFT (IQFT)。其中双边 QFT 和 IQFT 的定义如下:

$$F_{L-R}(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\mu_1 2\pi u x} f(x, y) e^{-\mu_2 2\pi v y} dx dy \quad (4)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\mu_1 2\pi u x} F_{L-R}(u, v) e^{\mu_2 2\pi v y} dudv \quad (5)$$

这里  $\mu_1$  和  $\mu_2$  为纯单位四元数, 并且  $\mu_1$  和  $\mu_2$  相互正交。即  $|\mu_1| = |\mu_2| = 1, \mu_1 \cdot \mu_2 = 0$ 。

卷积定理指出实域中的滤波可以通过频域中的相乘得到, 而在四元数域中的卷积定理则不是这么简单。根据 Bülow 的研究结果<sup>[17]</sup>, 并且考虑到图像和频率域中的滤波器一般都是实值, 而只有双边 QFT 在该条件下满足实域中的卷积对应频率中的相乘, 另外两种形式的 QFT 就需要频域中更加复杂的公式进行修正, 因此本文选择使用双边 QFT; 并且取  $\mu_1 = i, \mu_2 = j$ , 这样做是为了与 Bülow 和 Sommer 等人提出的四元数解析信号<sup>[17]</sup>定义保持一致。

### 2.2 四元数解析信号

解析信号在图像处理的时频分析领域有着重要意义<sup>[18,20]</sup>。从信号上来看, 通过实信号的解析信号可以很方便

地获得它的瞬时幅值、瞬时相位以及频率等参数。对于一维  $f(x)$ , 其解析信号  $f_A(x)$  的实部为  $f(x)$ , 虚部为  $f(x)$  的 Hilbert 变换:

$$f_A(x) = f(x) + i \left( \frac{1}{\pi x} * f(x) \right) \quad (6)$$

在频域可以写成如下形式:

$$F_A(u) = (1 + \text{sgn}(u)) F(u) \quad (7)$$

其中,  $\text{sgn}(u)$  为符号函数:

$$\text{sgn}(u) = \begin{cases} 1, & u > 0 \\ 0, & u = 0 \\ -1, & u < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Bülow 等人<sup>[17,19]</sup>证明了二维实函数的 QFT 是满足四元数 Hermite 对称的, 因此二维实函数的所有 QFT 信息可以由一个象限的 QFT 完全得到。另外, 实信号的 QFT 频谱是关于两个坐标轴对称的, 由此可以得出实信号  $f(x, y)$  的四元解析信号在频域上的定义<sup>[17]</sup>:

$$F_A(u, v) = (1 + \text{sgn}(u))(1 + \text{sgn}(v)) F(u, v) \quad (9)$$

$F(u, v)$  为  $f(x, y)$  的频域表达,  $f_A(x, y)$  可由 IQFT 求出。

实际上二维实信号的  $f_A(x, y)$  可以表示为:

$$f_A(x, y) = f(x, y) + i f_i(x, y) + j f_j(x, y) + k f_k(x, y) \quad (10)$$

$f_i(x, y)$  和  $f_j(x, y)$  分别为  $f(x, y)$  在两个正交方向  $i, j$  上的部分 Hilbert 变换,  $f_k(x, y)$  为  $f(x, y)$  的总体 Hilbert 变换。可见  $f_A(x, y)$  综合了  $f(x, y)$ 、 $f_i(x, y)$ 、 $f_j(x, y)$  和  $f_k(x, y)$  的信息。

### 2.3 二维 Log Gabor 正交滤波器

在虹膜特征提取中, 我们希望能够得到尽可能宽的虹膜图像谱信息。Field 在文献<sup>[23]</sup>中已经证明: 人类的视觉系统是一种具有对数性质的非线性系统; 同时指出, 使用对数频率尺度上为高斯函数的滤波器可以对图像进行更有效的编码, 而这种对数频率尺度上为高斯函数的滤波器即为 Log Gabor 小波。Log Gabor 小波在极坐标上的定义如下:

$$G_B(w, \theta) = \exp\left\{-\frac{\ln^2(w/w_0)}{2\ln^2(k/w_0)}\right\} * \exp\left\{-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{2T(\Delta\theta)}\right\} \quad (11)$$

其中,  $w_0$  为中心频率,  $k$  控制  $w$  方向上的带宽,  $\theta_0$  是滤波器的方向,  $T$  是与  $\theta$  方向有关的参数。

Field 对自然图像统计的研究<sup>[23]</sup>表明了自然图像的幅值会在  $1/w$  处衰落。为了更好地表征具有这种谱特征的图像, 需要选择相似频谱特征的滤波器来对图像进行滤波。

正是由于 Log Gabor 的良好特性<sup>[21,22]</sup>, 并结合四元数可以分解为两个相互正交的复函数的性质, 因此, 本文根据 Log Gabor 小波进行了四元数域的处理, 构建得到四元数二维 Log Gabor 正交滤波器 (Quaternion 2D Log Gabor Quadrature filters):

$$g_q = iqft\{(1 + \text{sgn}(u))(1 + \text{sgn}(v))G_B(u, v)\} \quad (12)$$

$iqft$  表示求四元数傅立叶逆变换,  $G_B(u, v)$  是 Log Gabor 在直角坐标中的表达。

该四元数正交滤波器继承了 Log Gabor 小波良好的方向选择特性, 保留了 Log Gabor 小波的多尺度分析结构及时频分析能力, 具有近似平移不变的特征, 可以方便地对信号进行灵活分析与处理, 而且在此基础之上将单一方向的选择特征

拓展为多方向,提供了不同尺度下1个幅值和3个相位的信  
息。将该正交滤波器应用于虹膜特征提取上可以得到复杂度  
很高的虹膜特征编码。图1即为由二维 Log Gabor 小波构建  
的四元数二维 Log Gabor 正交滤波器。该滤波器由4个不同  
的滤波器组成,分别对应了四元数的实部和3个虚部。

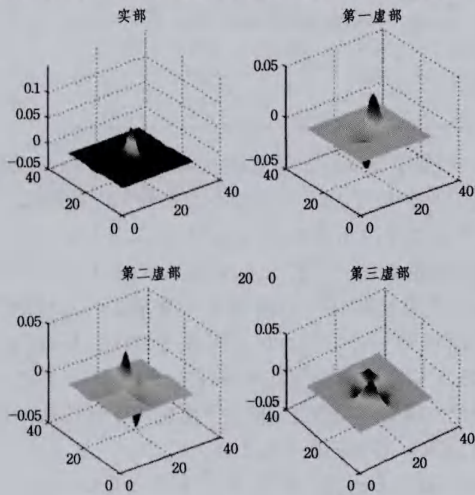


图1 二维 Log Gabor 正交滤波器

从图1中可以看出,当该滤波器用于虹膜特征提取时可  
以从不同的方向来提取虹膜的特征,因此可以更加全面地描  
述虹膜图像的纹理特征,保证了虹膜特征编码的唯一性。

### 3 虹膜特征提取和匹配

#### 3.1 特征提取

使用二维 Log Gabor 正交滤波器对虹膜图像进行滤波  
后,得到了不同方向的4个虹膜特征。因此我们定义了采用  
正交滤波进行虹膜特征提取的编码方式:

$$A_{(1,i,j,k)} = \text{sgn}_{(1,i,j,k)}^+ \{g_q * f(x,y)\} \quad (13)$$

式中, $f(x,y)$ 为虹膜图像, $g_q$ 为四元数二维 Log Gabor 正交  
滤波器, $\text{sgn}_{(1,i,j,k)}^+$ 表示对实部和3个虚部对应取非负号操作。

本文对虹膜特征点的选取进行了调整,使用归一化后  
 $512 * 48$ 大小的虹膜图像,将每一个像素点都作为特征点,共  
 $512 * 48$ 个特征点。因此,特征提取后的特征文件占用了  
15kB的存储空间,其中包括3kB的眼睑模版, $4 * 3$ kB的编  
码。

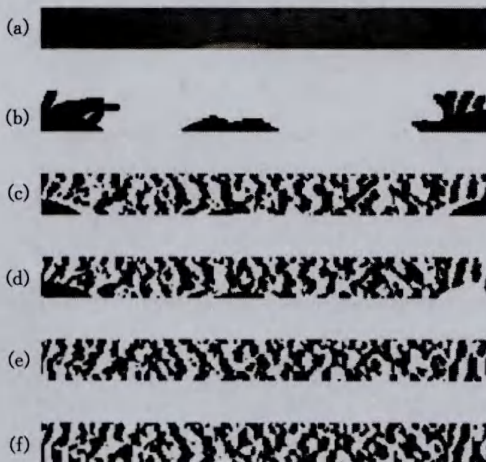


图2 虹膜编码

图2为利用四元数正交 Log Gabor 小波提取得到的虹膜  
特征编码。其中,(a)为归一化后的虹膜矩形图像;(b)为眼睑  
模版;(c)为实部编码;(d)-(f)分别为第一、二、三虚部编码。

#### 3.2 特征匹配

本文方法在虹膜定位阶段同时检测出眼睑位置,并且检  
测出位于虹膜区域中的杂质部分(如眼睫毛、光斑等),通过膨  
胀处理后,将该杂质部分在归一化矩形中的位置设为0,作为  
匹配过程中所使用的匹配模版,如图2(b)所示。当两幅虹膜  
图像进行匹配时,和模版进行“与”操作,可以最大限度地减少  
杂质部分的干扰。

两幅虹膜特征编码之间进行匹配一般是采用标准汉明距  
的计算方法<sup>[24]</sup>:

$$HD = \frac{\|(\text{code}A \otimes \text{code}B) \cap \text{mask}A \cap \text{mask}B\|}{\|\text{mask}A \cap \text{mask}B\|} \quad (14)$$

式中, $\text{code}A$ 、 $\text{code}B$ 表示两幅虹膜编码, $\text{maske}A$ 、 $\text{mask}B$ 分  
别为对应的眼睑模版。 $\otimes$ 为异或, $\cap$ 为与操作。

为了计算多元虹膜编码之间的汉明距,本文对标准汉明  
距的方法进行了如下修改:

$$D(A,B) = \frac{1}{4MN} \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M \sum_{i=1}^4 \frac{\|(A_i(x,y) \otimes B_i(x,y)) \cap A_M \cap B_M\|}{\|A_M \cap B_M\|} \quad (15)$$

式中, $D(A,B)$ 表示两幅虹膜编码之间的汉明距, $A$ 、 $B$ 为两幅  
虹膜编码。 $M * N$ 为虹膜编码的大小, $\otimes$ 为位异或, $\cap$ 为位与  
操作。 $A_M$ 、 $B_M$ 为对应两幅虹膜编码的眼睑模版。

在实际匹配中需要两幅虹膜编码中的一个左右移动来进  
行多次匹配,以多次匹配中汉明距最小的作为最后的匹配结  
果。例如,虹膜编码平移14个像素就对应原虹膜图像旋转大  
约10度,这样就可以减小因采集虹膜时头部的倾斜而造成的  
匹配误差。模版的加入也有效地去除了眼睑、睫毛、光斑及其  
它的干扰,提高了识别的性能。

### 4 实验结果

为了验证四元数正交滤波器提取虹膜特征的效果,分别  
在ICE 2005和中科院自动化所CASIA-IrisV4的虹膜数据库  
上进行了大量的实验。ICE 2005<sup>[25,26]</sup>是由美国国家标准技  
术研究所(National Institute of Standards and Technology,  
NIST)在2005年建立管理的虹膜数据库,该研究所组织了基  
于该数据库的虹膜识别算法性能测试,并公布了当时参加测  
试优秀算法的识别结果。该数据库包括132人的244只眼睛  
的2953幅图像,其中右眼1426幅图像,左眼1527幅图像。  
本文方法在该数据库上共进行左眼24442次类内比较和  
2007608次类间比较,右眼29306次类内比较和2300896次  
类间比较。表1和表2是2005年NIST公布的部分优秀虹  
膜识别算法的测试结果<sup>[26]</sup>与本方法测试结果的比较(文献  
[26]中公布的是2005年的测试结果,这些算法经过后来的改  
善,识别性能可能会在2005年的基础之上有所提高。但是由  
于没有相关文献给出这些算法目前的识别结果,因此本文只  
给出了与2005年测试结果之间的比较)。

表 1 右眼识别率

误识率 (FAR)	本文右眼识别率	SAGEM	IritchD	CMU	Cam1	Cam2	CAS1	CAS3	WVU	Pelco
0.001	99.77%	99.87%	99.53%	99.61%	99.34%	99.48%	97.80%	97.23%	97.84%	96.78%
0.0001	99.58%	99.78%	99.47%	99.45%	99.22%	99.13%	97.48%	97.02%	96.72%	93.36%

表 2 左眼识别率

误识率 (FAR)	本文左眼识别率	SAGEM	IritchD	CMU	Cam1	Cam2	CAS1	CAS3	WVU	Pelco
0.001	98.97%	99.03%	99.14%	99.07%	98.84%	98.87%	98.53%	97.70%	96.74%	96.58%
0.0001	98.65%	98.86%	98.58%	98.14%	98.39%	98.62%	97.17%	96.97%	93.80%	91.98%

通过上面两个表格可以看出,右眼识别中本方法的识别率仅比 2005 年 SAGEM 公司的虹膜识别算法稍低,好于当时其它的虹膜识别算法;而在左眼识别中比 SAGEM 和 IritchD 的算法识别率稍低,也要好于当时其它优秀的算法。这表明,本方法具有较高的虹膜图像识别率,利用二维 Log Gabor 正交滤波器进行虹膜识别是有效的。由于这些算法是各公司的商业机密,其使用方法并没有公开,因此本文不再进一步对之进行性能上的比较以及性能差异上的分析。

CASIA-IrisV4 是中科院 2009 年公布的共享虹膜数据库<sup>[27]</sup>,分为 6 类不同情景下采集的虹膜图像组。本文使用的是 CASIA-Iris-Lamp 中的子虹膜数据库,该数据库使用日本 OKI 公司研制的手持虹膜摄像机拍摄了共计 411 个个体的 16212 幅图像,适合于非线性虹膜归一化和虹膜特征的鲁棒性描述等问题的研究。我们在该数据库上共进行了左眼 153726 次类内匹配和 65951304 次类间匹配、右眼 152454 次类内匹配和 65142026 次类间匹配。Daugman 的识别算法是唯一广泛使用于商业领域的虹膜识别算法,为了比较本文方法的性能,将 Daugman 算法在同一虹膜数据库上进行了比较。

为了避免其它因素的干扰,采用了相同的虹膜预处理、定位和归一化算法。图 3 为本方法在数据库上运行时得到的汉明距分布密度,图 4 为 ROC 识别率曲线比较。由 ROC 曲线可以看出本文方法的效果比 Daugman 算法的效果有了明显的提高。

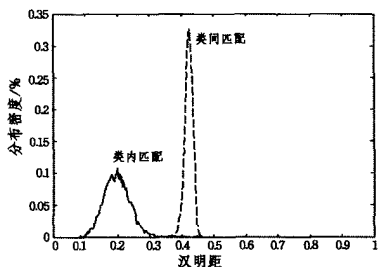


图 3 汉明距分布

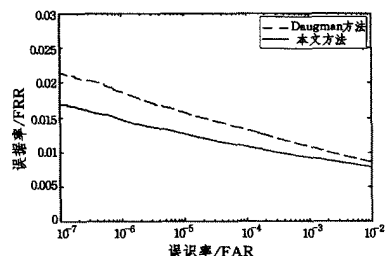


图 4 ROC 曲线

等错误率也是一项重要的性能指标,本方法的等错误率

为 0.63%,低于 Daugman 算法的 0.85%。由于一次 QFT 相当于做了两次 FFT,因此本方法在运算时间上要稍长。我们在 P4 32 位系统内存 2.97G 的台式机上采用 VC6.0 编程,特征提取的时间平均值小于 0.2s,特征匹配的时间平均值小于 0.5ms,因此算法的运算时间也完全满足实时系统的要求。由于同时得到 4 种不同方向上虹膜的纹理特征,因此一幅  $512 \times 48$  大小虹膜图像的特征编码需要 15kB 的空间。如何在降低虹膜编码复杂度的前提下优化特征编码的长度和运算时间,是下一步需要研究的工作。

另外,通过分析可以发现,ICE 2005 和 CASIA-Iris-Lamp 数据库中的虹膜图片中包含了一些质量较差的虹膜图像,如图 5、图 6 所示。从本方法的实验结果可以看出,本文方法在虹膜图像不理想的情况下也表现出了较好的鲁棒性。



图 5 ICE2005 虹膜数据库中部分不合格图像



图 6 CASIA-Iris-Lamp 虹膜数据库中部分不合格图像

**结束语** 本文以二维 Log Gabor 小波来构建四元数正交滤波器,同时表征虹膜纹理的多方向上的特征,更加全面地描述了虹膜纹理的特征空间,得到了复杂度很高的虹膜特征编码。特征匹配采用类似汉明距的方式,同时以虹膜图像中眼睑、睫毛以及光斑的分布为匹配模版来减少它们的干扰,取得了良好的效果。这表明,将四元数正交滤波器应用虹膜特征提取上确实能提高虹膜特征编码的复杂度,降低误识率。在保证虹膜特征复杂度的前提下,减小虹膜编码的长度以及运算时间将是下一步所要进行的工作。

## 参考文献

- [1] Faundez-Zanuy M. Biometric security technology [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006, 23(6): 15-26
- [2] Jain A K, Ross A, Prabhaker S. An Introduction to Biometric Recognition [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(1): 4-20
- [3] Ross A. Iris Recognition: The Path Forward [J]. IEEE Computer Society, 2010, 43(2): 30-35
- [4] Daugman J. How Iris Recognition Works [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(1): 21-30
- [5] 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
- [6] Daugman J. Probing the Uniqueness and Randomness of IrisCodes; Results From 200 Billion Iris Pair Comparisons [J]. Proceeding of the IEEE, 2006, 94(11):1927-1935
- [7] Wildes R P. Iris recognition; an emerging biometric technology [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(9):1348-1363
- [8] Wildes R P, Asmuth J C, Green G L, et al. A system for automated iris recognition[C]//Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IEEE Workshop on Applications of Computer Vision Sarasota. IEEE Computer Society, 1994:121-128
- [9] Boles W W, Boashan B. A human identification technique using images of the iris and wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(4):1186-1188
- [10] Ma L, Tan T, Wang Y, et al. Efficient iris recognition by characterizing key local variations[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(6):739-750
- [11] Sun Z, Wang Y, Tan T, et al. Improving iris recognition accuracy via cascaded classifiers [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2005, 35(3):435-441
- [12] Sun Z, Tan T, Qiu X. Graph matching iris image blocks with local binary pattern[C]//Proceedings of the 2006 International Conference on Biometrics, 2006:366-372
- [13] Pillai J K, Patel V M, Chellappa R, et al. Secure and robust iris recognition Using random projections and sparse representations [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(9):1877-1893
- [14] Hamilton W R. Elements of Quaternions [M]. London, UK: Longman, 1866
- [15] Hamilton W R. Lectures on Quaternions: Containing a Systematic Statement of a New Mathematical Method[M]. Dublin; Hodges and Smith, 1853
- [16] Ell T A. Quaternion-Fourier Transforms for Analysis of Two-Dimensional Linear Time-Invariant Partial Differential Systems [C]//Proc. 32nd IEEE Conference on Decision and Control. San Antonio, Texas, USA, Dec 1993, 2:1830-1841
- [17] Bülow T, Sommer G. Local hypercomplex signal representations and applications[C]//Geometric Computing with Clifford Algebras. London; Springer-Verlag, 2001:255-289
- [18] Bülow T, Sommer G. Hypercomplex signals—a novel extension of the analytic signal to the multidimensional case [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(11):2844~2852
- [19] Bülow T, Sommer G. Local hypercomplex signal representations and applications[C]//Geometric Computing with Clifford Algebras. London; Springer-Verlag, 2001:255-289
- [20] 崔峰, 曹学光, 彭思龙. 新的四元数解析信号相位定义[J]. 中国图像图形学报, 2006, 11(2):251-258
- [21] 肖志涛, 周澄明, 于明, 等. Log Gabor 函数在人类视觉系统特性研究中的应用[J]. 信号处理, 2002, 18(5):399-402
- [22] 姚鹏, 叶学义, 张文聪, 等. 基于改进的 Log-Gabor 小波的虹膜识别算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(5):563-568
- [23] Field D J. Relation between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells[J]. J. of The Optical Society of America A, 1987, 4(12):2379-2394
- [24] 姚鹏. 复杂条件下的虹膜识别算法的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005
- [25] ICE 2005 Iris Database[OL]. <http://www.nist.gov/itl/iad/ig/ice.cfm>
- [26] ICE\_2005\_Results\_30March2006.pdf[OL]. <http://www.nist.gov/itl/iad/ig/ice-presentations.cfm>
- [27] CASIA 虹膜数据库(V 4.0)[OL]. <http://www.cbsr.ia.ac.cn/china/Iris%20Databases%20CH.asp>

(上接第 273 页)

## 参 考 文 献

- [1] Pitkou J E, Schutze H, Cass TA, et al. Personalized search[J]. Comm. ACM, 2002, 45(9):50-55
- [2] Abbas A E, Bell D E. One-Switch Independence for Multiattribute Utility Functions [J]. Operations Research, 2011, 59:764-771
- [3] Bobadilla J, Hernande A, Ortega F, et al. Preference Elicitation Techniques for Group Recommender Systems [J]. Information Sciences, 2012, 189(1):155-175
- [4] Kießling W, Hafenrichter B, Fischer S, et al. Preference XPATH: A query language for E-commerce [C]//Proceedings of the 5th International Conference Wirtschaftsinformatik. Augsburg, Germany, 2001:43-62
- [5] Boutilier C, Brafman R, Domshlak C, et al. CP-nets; a tool for representing and reasoning with conditional ceteris paribus statements [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2004, 21:135-191
- [6] Goldsmith J, Lang J, Truszczynski M, et al. The computational complexity of dominance and consistency in CP-nets [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2008, 33(1):403-432
- [7] Brafman R, Domshlak C, Shimony E. On graphical modeling of preference and importance [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2006, 25:389-424
- [8] Bouveret S, Endriss U, Lang J. Conditional Importance Networks; A Graphical Language for Representing Ordinal, Monotonic Preferences over Sets of Goods [C]//Proceedings of the 21st Int Conf on Artificial Intelligence. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2009:67-72
- [9] Ciaccia P. Querying databases with incomplete CP-nets [C]//Multidisciplinary Workshop on Advances in Preference Handling, 2007:1-8
- [10] Endres M, Kießling W. Transformation of Tcp-net queries into preference database queries [C]//Proceedings of the ECAI 2006 Multidisciplinary Workshop on Advances in Preference Handling. 2006:23-30
- [11] Bosc P, Hadjali A, Pivert O. On database queries involving competitive conditional preferences [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2011, 26(3):206-227
- [12] 刘惊雷. CP-nets 及其表达能力研究 [J]. 自动化学报, 2011, 37(3):290-302
- [13] 刘惊雷, 廖士中, 张伟. CP-nets 的完备性及一致性研究 [J]. 软件学报, 2012, 23(6):1531-1541
- [14] 孙雪姣, 刘惊雷. CP-nets 的可满足性及一致性研究 [J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(4):754-762
- [15] 孙雪姣, 刘惊雷. CP-nets 的定性偏好决策及一致性推理 [J]. 计算机科学, 2013, 40(2):274-278