

综述与专论

虹膜的计算机识别原理*

严民军 汪云九

(中国科学院生物物理研究所, 中国科学院视觉信息加工开放实验室, 北京 100101)

摘要 新出现的虹膜计算机识别技术利用人虹膜纹理的独特性, 可以完成自动身份识别的任务. 在现有的各虹膜识别系统中, 基于 Gabor 小波编码虹膜纹理的 Daugman 系统尤为突出. 虹膜识别原理可以分为编码原理和统计决策原理.

关键词 小波分析, 感受野, Gabor 函数, 模式识别, 虹膜纹理, 虹膜代码

学科分类号 Q616

人眼的虹膜, 这种可见生物组织结构依赖于胚胎期中胚层的初始条件, 在人群中的分布可能是随机的或是混沌的, 但一出生就终生稳定. 而且每个人的虹膜纹理是不同的, 统计表明有几百个自由度. 即使是同样基因型(如同卵双胞胎或一个人的两个孩子)两者虹膜的表现型表达是不相关的^[1]. 虹膜适合用于自动身份识别有以下一些优点^[2]: a. 位于角膜和水样液之后, 与外界环境隔离开来, 不易受损. b. 一般外科手术不能改变虹膜的纹理. c. 瞳孔的大小即便在注视时也是变化的. 虹膜系统仍可在这种变化中找出不变量, 同时还可检测真或假的虹膜图像. 如果盗用他人的虹膜, 由于盗用的虹膜不可能对光起反应, 瞳孔的大小也就不变. 虹膜识别系统捕捉到这种“惰性”, 这样这种特性就提供了天然的防伪测试^[3]. d. 毋须物理接触, 即可在一定的距离获得被试的纹理图样. e. 生来具有的极坐标几何特性, 提供天然的极坐标系统.

虹膜识别技术应用于自动身份识别, 如《泰晤士报》1997 年报道的基于此原理的自动取款机, 可说是基础科学研究成果转化应用技术的范例. 在猫的纹状皮层早就发现有呈 Gabor 函数形式的感受野的简单细胞^[4], 当时是没想到可用 Gabor 函数作为母函数来抽取虹膜纹理特征的. Daugman^[5]当初以 Gabor 函数用来图像压缩(因为生物视觉表征应符合最简约原则)时, 也是没意料到的. 直到 Daugman^[6]提出 AMPM(幅度和相位调制)算法, 发现虹膜的纹理适用于相位表征, 才使这一技术有了雏形. 加上引入小波变换, 减少许多自由度, 得

到等长的虹膜代码, 可以实时地处理; 统计测试可达到错误率仅为 $1/2^{173}$, 因此可用于安全系统检测. 这使虹膜的计算机识别成熟走向市场. 本文就 Daugman 的虹膜计算机识别原理分成编码原理和统计决策原理两部分作阐述.

1 Gabor 小波编码虹膜纹理

1.1 Gabor 小波用于图像压缩

自 Gabor 于 1946 年提出具有信息论意义上的 Gabor 函数(又称信息函数)以来, Marcelja 将其用以解释皮层简单细胞感受野模型, Daugman^[7]又加以推广至二维并阐明其可达最小不确定性^[8]; 人类视觉生理和心理实验与二维 Gabor 函数模型符合得很好^[9~11]. Daugman 随后将之应用于图像分割、压缩, 引入神经网络和小波分析法, 最后将二维复值 Gabor 函数用于虹膜的识别^[12~14].

Daugman 提出的二维 Gabor 函数具有生理上的意义. Pollen 和 Ronner^[10]报道初级视皮层细胞有一个惊人的特性即相邻简单细胞有 90° 的相差. Jones 和 Palmer^[4]在猫的纹状皮层所测 36 个感受野, 有 33 个与 2D Gabor 函数模型相符合.

80 年代初, Meyer 等创导小波潮流, 将一维信号多尺度分解成自相似的小波族. 这些小波彼此能通过母函数的膨胀、平移得到. Daugman 将之推广至 2D Gabor 小波系列. 这时 2D Gabor 函数作

* 国家自然科学基金资助项目(39893340 - 06, 39670186, 69835020).

Tel: (010) 64888535, E-mail: yjwang@sun5.ibp.ac.cn

收稿日期: 1999-06-23, 修回日期: 1999-11-01

为基小波经膨胀、旋转、平移得到一系列的小波。每一个小波相当于一个自由度，而且神经生理及心理物理数据表明视觉空间机制有 log-polar 形式的二维变换特性。皮层细胞朝向柱间，朝向敏感性在 $\pm 15^\circ$ 的角度内，而且空间频率宽度也是倍频程形式，所以二维傅里叶平面并非笛卡尔网格而是 log-polar 分布网格。这样，采用 log-polar 形式并通过二维 Gabor 母函数彼此膨胀、旋转、平移减少不少自由度。可见，用自相似基函数表征图像是可以减少复杂度的。仅用较少的朝向表征，图像重构就得到很好的图像。此外，还用于图像分割。通过 Lena 图的重构可知，只用三个朝向，五个不同尺度，在系数所占信息量较小时也可得到很好的重构图^[5]。

1.2 虹膜代码的生成

Daugman^[6]提出一种 AMPM 法（幅度和相位调制）将模式编码成局域相位子，认为任何模式都可以表征为在空间域确定其幅度调制和相位调制的 AMPM 复相位器对单一载波的调制。从数学上简单地说，任何模式 $S(x, y)$ 可表示成复数调制相位器（即 Phasor） $Z(x, y)$ 与载波 $C(x, y)$ 的乘积。在一些频率集中的模式，如纹理模式，AMPM 表征明显具有比原始图像更低的复杂度，产生高密而有效的编码。

虹膜细节的独特纹理结构为 AMPM 表征提供很好的模式。Daugman^[1,2,6]采用一种算符，利用瞳孔的整圆特性和边界的对比度的变换，寻找所摄图像中的虹膜，准确定位其内、外边界，即瞳孔与虹膜的边界和虹膜与角膜的边界。

虹膜可看成一张各向同性的橡皮薄膜，虹膜上的斑点对于瞳孔边缘和角膜边缘的相对位置是不变的。为了统一调焦参数，如焦距不同使得成像后虹膜的大小不一，因此要将虹膜灰度图像 $I(x, y)$ 投射于双无量纲、非同心的极坐标系统 (r, θ) ，可以这么表示为：

$$I(x(r, \theta), y(r, \theta)) \rightarrow I(r, \theta), r \in [0, 1]$$

虹膜编码中任一 h 位可看作复平面逻辑单位正方形的四个顶点之一。 h 是通过如下一种分析方法得到，即计算图像从虹膜图像 $I(r, \theta)$ 投射到一个复值 2D Gabor 滤波器所得实部和虚部的符号。

同一般的图像编码原理一样：一系列的小波族能很好地表征原图像，选取一些能捕捉原图像典型特征的小波——这如同图像傅里叶变换选取一些能量比较集中（即代表图像信息）的傅里叶展开项。对于不同的图像，例如不同的虹膜图像，则各小波

的系数是不同的。将这些小波系数规化并数字化，则可得到图像的小波编码。Daugman 就用了 1 024 个这样的小波。每一个小波就是无量纲虹膜域 (r, θ) 下一系列具有特定大小、位置参数 $(r_0, \theta_0; \alpha, \beta, \omega)$ 的一简单复 2D 滤波器。每一个滤波器作用于整个无量纲虹膜域 (r, θ) 。得到系数的大小用两个位来表示，其中一个位是滤波器实部产生的结果，另一个是滤波器虚部产生的结果。由这些产生的结果的正负确定二进制位是 0 还是 1。也就是将一个小波系数近似为逻辑正方形的四顶点之一。这四个顶点是 $(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)$ 。

这样用 1 024 个小波（即 1 024 个滤波器）可得到 $2 \times 1 024$ 位（相当于 256 字节）的虹膜代码。这虹膜的编码算法具有编码零交叉的能力；零交叉信息在限带信号中是极其丰富的。由于小波系数用二个位就可表征，因此可以投射到四个象限，也就是四个顶点。而且各小波由一个母函数缩放、平移、旋转生成，这样虹膜代码的每两位对应于一个小波。每一小波的积分范围是整个虹膜，所以这也可称为多尺度编码。

2 统计决策

怎样来度量由上节得到的来自不同虹膜的虹膜代码（iriscode）？

系统的决策理论是基于比较两虹膜代码的海明距（Hamming distance, HD ）^[1,2]来实现的。虽然在任何指定虹膜编码中有 2 048 位，但此编码拥有远少于 2 048 个独立二进制的自由维数。一个理由是在虹膜中的确存在径向的相关性，例如某一沟将影响几个不同分析尺寸上的编码的不同部分。仅滤波器带宽就可将虹膜编码的信息容量减低 4.05 倍，从 2 048 位到 506 位。经过这些相关后，保留在虹膜编码中的独立自由维数是否提取出来，可通过检测某群不相关虹膜编码计算得到的海明距分布来估计。比较虹膜编码 A 和虹膜编码 B 的每位，如下定义海明距为两者间不一致位的分数：

$$HD = \frac{1}{2 048} \sum_{j=1}^{2 048} A_j (XOR) B_j,$$

其中布尔操作符 XOR（异或）仅在 A_j, B_j 不同时才为 1。有两种极端：两虹膜代码完全相同， HD 则为 0；两虹膜代码完全不同，即每一位都不同， HD 则为 1。

若虹膜代码 2 048 位完全独立，则两不相关的

虹膜代码的海明距分布是一个 $N = 2\ 048$, $P = 0.5$ 二项式分布. 但统计所得的海明距分布曲线拟合结果是 $N = 173$, $P = 0.5$ 二项式分布, 均值为 $u = 0.038$, 标准方差 $\sigma = 0.497$. 这相应于 $N = 173$ 的伯努利试验. 所以来自不同虹膜的两虹膜代码完全一致的可能性为 $1/2^{173}$.

同一虹膜与不同虹膜的作海明距比较时均值是不同的, 有着不同的海明距分布. Daugman 通过 1 208 次同一虹膜的比较和 2 064 次不同虹膜的比较, 并考虑到可能的头/眼歪斜而进行的多次伯努利试验, 得到均值各为 0.084 和 0.450. 因此, 当从相同的虹膜在不同时刻得到的两虹膜编码, 任何相应位都有 0.084 的概率匹配不上. 同样, 当从两不同的虹膜计算得到的虹膜编码有 0.450 的概率匹配不上.

3 总结和展望

最先用虹膜识别作为身份检测的, 可以追溯到巴黎刑罚系统中肉眼察看囚犯的虹膜 (特别是颜色的图样). 1987 年, Flown 和 Safir 最先提出虹膜识别系统的概念^[15]. 1991 年美国阿拉尔莫斯实验室最先实现这种系统. 之后, 在北美和欧洲都有研究小组展开这项工作. 目前的虹膜识别系统还需被试者的参与, 如在取图样时被试者的某种程度的合作. 未来的发展将是结合计算机视觉技术在三维立体中自动搜索虹膜. 此外, 虹膜的老年性变化和有些虹膜的病变, 由于会影响其纹理, 在设计更完善的虹膜识别系统时也不得不考虑.

参 考 文 献

- 1 Daugman J G. Neural image processing strategies applied in real-time pattern recognition. *Real-Time Imaging*, 1997, 3 (3): 157 ~ 171
- 2 Daugman J G. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15 (11): 1148 ~ 1161
- 3 Lawrence S, Fergus W C. Pupil unrest: an example of noise in a biological servomechanism. *Nature*, 1958, 182 (4639): 857 ~ 858
- 4 Jones J P, Palmer L A. An evaluation of the 2D Gabor filter model of simple receptive fields in cat striate cortex. *Journal of Neurophysiology*,

1957, 58 (6): 1233 ~ 1258

- 5 Daugman J G. Complete discrete 2-D Gabor transform by neural networks for image analysis and compression. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1988, 36 (7): 1169 ~ 1179
- 6 Daugman J G. Demodulation, predictive coding, and spatial vision. *Journal of Optical Society of American A*, 1995, 12 (4): 641 ~ 660
- 7 Daugman J G. Two-dimensional spectral analysis of cortical receptive field profiles. *Vision Research*, 1980, 20 (10): 847 ~ 856
- 8 Daugman J G. Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters. *Journal of Optical Society America A*, 1985, 2 (7): 1160 ~ 1169
- 9 Daugman J G. Spatial visual channels in the Fourier plane. *Vision Research*, 1984, 24 (9): 891 ~ 910
- 10 Pollen D A, Ronner S F. Phase relationships between adjacent simple cells in the visual cortex. *Science*, 1981, 212 (4501): 1409 ~ 1411
- 11 Daugman J G. Quadrature-phase simple-cell pairs are appropriately described in complex analytic form. *Journal of the Optical Society of American A*, 1993, 10 (2): 375 ~ 377
- 12 Daugman J G. Entropy reduction and decorrelation in visual coding by oriented neural receptive fields. *IEEE Transactions on Biomedical Engineer*, 1989, 36 (1): 107 ~ 114
- 13 Daugman J G. Pattern and motion vision without Laplacian zero crossings. *Journal of the Optical Society of American A*, 1987, 5 (7): 1142 ~ 1148
- 14 Daugman J G. Networks for image analysis motion and texture. In: *IEEE TAB Neural Network Committee ed. International Joint Conference on Neural Network*, Washington D C, 1989. San Diego: IEEE TAB Neural Network Committee, 1989. Part 1: 189 ~ 193
- 15 Richard P W, Jane C A, Gilbert L G, et al. A machine-vision system for iris recognition. *Machine Vision and Applications*, 1996, 9 (1): 1 ~ 8

Principle of Iris Computer Recognition. YAN Min-Jun, WANG Yun-Jiu (*Institute of Biophysics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*).

Abstract Iris recognition, an emerging biometric technology, which exploits the uniqueness of human iris texture, can accomplish automatic personal identification. Of all iris recognition systems so far, Daugman's system based on Gabor wavelets encoding iris texture is more robust. The principle of iris computer recognition was reviewed in two parts, the principle of encoding and the principle of statistical strategy.

Key words wavelet analysis, receptive field, Gabor function, pattern recognition, iris texture, iriscodes