

虹膜识别算法的研究及实现

黄惠芳, 胡广书

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: Daugman 提出的虹膜识别算法具有准确性高、速度快的优点, 但是有关该算法的具体实现却未见文献报道。对 Daugman 的算法进行了研究, 并尝试该算法的实现, 提出了一种新的粗定位和精定位相结合的算法来快速定位虹膜。在滤波过程中仅利用了实部滤波器就可减少代码长度, 而不影响识别效果, 其中包括图像的预处理、多尺度 2D Gabor 滤波器的构造, 虹膜码及 Hamming 距离的计算等。实验结果表明, 该方法计算速度快, 提取特征的效果好, 可用于实际的身份鉴别系统。

关键词: 虹膜识别; 虹膜定位; Gabor 滤波器; 特征提取; Hamming 距离

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2002)05-0404-06

Study and implementation of iris recognition algorithms

HUANG Hui-fang, HU Guang-shu

(Department of Electrical Engineering and Applied Electronic Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The algorithms for iris recognition set forth by Daugman can perform identification accurately and quickly, but the implementation about the algorithms has not been reported in open literatures. The algorithms are studied and implemented. A new method combining coarse location with fine location is proposed to locate the iris quickly. Furthermore, only the real parts of filters are used during the filtering, which can decrease code length and still have good results. The detailed procedure of implementing the algorithms is given, including preprocessing, constructing Gabor filters and the computation of iris codes and Hamming distances. The results show that this approach has very high speed of operation and good results of feature extraction and can be used for actual personal identification system.

Key words: Iris recognition; Iris location; Gabor filter; Feature extraction; Hamming distance

1 引言

近几年,人们对身份的自动鉴别产生了极大兴趣,希望找到可靠、快速和无侵犯的身份鉴别方法。一种新的身份鉴别方法是基于人体自身所固有的生理特征,这些特征包括指纹、掌形、脸像、虹膜等。与传统方法中身份标识物相比,生物特征的优点是不会丢失、遗忘和伪造,是安全的鉴别方式。

虹膜识别技术是最近发展起来的身份鉴别技术,其优点如下:

- (1) 唯一性高。虹膜模式具有 266 个可测特征。
- (2) 稳定性好。虹膜可以保持终生不变。
- (3) 具有防伪性。利用虹膜本身有规律的震颤特性以及虹膜随光强度变化缩放的特性,可以识别假冒的虹膜。
- (4) 准确性高。
- (5) 速度快。识别一个人一般只花 2~3s。虹膜识别已有一定规模的商业应用,如机场检票系统、ATM 取款机等,另外在网上支付、门禁保安、远程登录以及对罪犯或嫌疑人的识别与管理等领域都有很好的应用前景。

英国剑桥大学的 John. G. Daugman 于 1993 年提出了识别算法。他提出的虹膜识别算法准确性高、速度快,一经提出就在生物识别领域引起了极大关注。但是 Daugman 只给出了算法的框架,有关算法的具体实现却未见文献报道,在实现的过程中有许多问题值得研究。对虹膜识别的算法进行了实现,并针对实现过程中出现的问题提出了解决办法,同时也提出了一些新观点。具体的实现包括图像预处理、构造多尺度 Gabor 滤波器、计算虹膜码及比较 Hamming 距离。实验证明识别效果较好。

2 虹膜图像的预处理

虹膜是眼睛的一个受保护的内部器官,位于角膜和水样液的后方,晶状体的前方,它是唯一一个通常

在外部可见的人体内部器官。虹膜即是瞳孔之外的圆环部分,在虹膜表面有各种可见特征,在可见光下或红外光下可形成明显的纹理。

虹膜图像可以通过 CCD 摄像头及图像采集卡输入计算机。图 1(a) 为采集到的一幅虹膜图像,其中虹膜占较大部分,但由于没有对受试者施加过多的限制,因此图像中还包括眼睛周围的区域。而且每次虹膜在图像中的位置、大小以及虹膜的面积都不一样。因此在提取虹膜特征之前,需要对虹膜图像进行预处理,补偿平移、大小及瞳孔缩放引起的变异,将虹膜图像归一化。

2.1 虹膜定位

虹膜定位,包括虹膜内边界的定位和外边界的定位。虹膜内边界也就是瞳孔的边界,瞳孔呈圆形,可以用瞳孔的中心坐标及半径表征。圆形边缘检测器检测瞳孔的效果比较好,但是如果对整幅图像搜索,却极为费时。一种新的粗定位与精定位相结合的方法可快速定位瞳孔的中心及半径,这样既可减少定位搜索的盲目性,节省计算时间,又可避免采用较为复杂的定位过程。先通过粗定位找到瞳孔的大致位置,然后在这个位置附近较小的范围内利用圆形检测器进行精定位,从而找到瞳孔的精确位置及半径。粗定位的方法比较简单、高效,充分利用了图像的灰度特征。瞳孔明显比眼睛的其他部分暗,因此可以采用二值化的方法定出瞳孔,提取瞳孔边界。为了求出瞳孔的参数,需要求出二值化后的图像在水平方向的灰度投影量及垂直方向的灰度投影量,然后分别求导、平滑。通过检测明显的峰值找到瞳孔中心的坐标及半径。由于二值化后的图像中不仅包括瞳孔,还有部分灰度值比较小的睫毛存在,因此这种方法定位不够精确,但给出了精定位的大致范围。将圆形检测器的搜索范围限制在这个范围内进行精确定位,这样定出的参数可达到单像素精度,有利于精确的匹配。通过两步法,瞳孔定位不仅准确,而且速度很快,约 0.9s,可以满足实时性的要求。对于虹膜外边界的定位,由于虹膜略偏向于鼻侧,与瞳孔是不同心的,因此可以利用类似的边缘检测器分别求出瞳孔中心到虹膜左右

边界的距离。虹膜外边界其他各点的位置及到瞳孔中心的距离可以通过几何方法计算求得。通过虹膜定位,就将虹膜从图像中分离出来,补偿了虹膜平移引起的变异,如图1(b)。

2.2 虹膜图像的归一化

为了实现精确的匹配,还要对图像进行归一化,补偿大小和瞳孔缩放引起的变异。虹膜的内外边界都为圆形,可以简单地利用几何方法归一化。以瞳孔圆心为起点,与虹膜内外边界的交点坐标分别为 $(x_p(\theta), y_p(\theta))$ 和 $(x_s(\theta), y_s(\theta))$,则利用下式:

$$\begin{cases} x(r, \theta) = (1-r)x_p(\theta) + rx_s(\theta) \\ y(r, \theta) = (1-r)y_p(\theta) + ry_s(\theta) \end{cases} \quad (1)$$

可将虹膜图像中的每个点一一映射到极坐标 (r, θ) 中。

由于上眼皮会部分地遮挡虹膜顶端,为了排除这一部分,以瞳孔为中心,逆时针截取 $135^\circ \sim 360^\circ$ 的虹膜区域。这样截取一方面比较简单,另一方面利用截取的这部分纹理信息可以识别出不同的人。然后将截取的虹膜区域在极坐标系中展成矩形,使矩形的行对应半径,矩形的列对应所取的角度,如图1(c)所示。虹膜纹理从瞳孔内侧起沿半径方向由细到粗,不同的空间特征在各种尺度上非常明显。因此,为了捕获虹膜的空间细节,利用多尺度表达,将虹膜图像沿半径方向分成8个带。图像的各个带展成多大是一个值得考虑的问题。因为每个带还要在后面进行滤波运算,因此每个带的行数应与相应滤波器的行数相

等。但滤波器的尺寸都比较大,如果按滤波器的行数展开会增加计算时间。因此各带图像展开的实际行数要比滤波器的小些,可以通过后面的数据扩展达到要求。这样做可以节省展开图像所花费的时间。另外不能为了节省时间使各带图像展开的列数太小,因为纹理特征主要分布在行方向,图像列数太小降低了纹理的分辨率,会影响识别效果。

3 虹膜纹理的特征提取

3.1 Gabor 滤波器

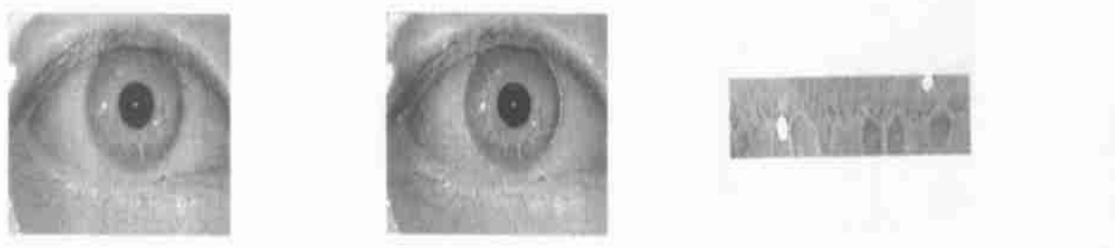
从图像中提取纹理信息的有效策略之一是将图像与带通滤波器卷积,其中带通滤波器可以选择2D Gabor滤波器。1D Gabor滤波器是Dennis Gabor于1946年提出的^[1]。2D Gabor滤波器最初由Daugman在1980年提出^[2],其形式如下:

$$G(x, y) = \exp\{-\frac{1}{2}[(x-x_0)^2/a^2 + (y-y_0)^2/b^2]\} \times \exp\{-2j[u_0(x-x_0) + v_0(y-y_0)]\} \quad (2)$$

其2D傅里叶变换为:

$$F(u, v) = \exp\{-\frac{1}{2}[(u-u_0)^2/a^2 + (v-v_0)^2/b^2]\} \times \exp\{-2j[x_0(u-u_0) + y_0(v-v_0)]\} \quad (3)$$

Daugman在1985年详细论述了它们的数学特性^[3],指出2D Gabor滤波器提供空间频率、方向、空间位置



(a) 原始虹膜图像

(a) Original iris image

(b) 虹膜定位后图像

(b) Image after iris location

(c) 虹膜归一化后的图像

(c) Image after iris normalization

图1 图像预处理

Fig. 1 Image preprocessing

的最大分辨率,因此在空间域和频率域中具有良好的联合定位能力。这些特性特别适合纹理分析。2D Gabor 函数通过缩放、旋转和平移可以形成一组自相似的小波。利用这些小波对图像进行变换,就称为 Gabor 小波变换。这些函数与原始图像像素相乘和积分可产生一系列系数,从而可以提取图像纹理信息。

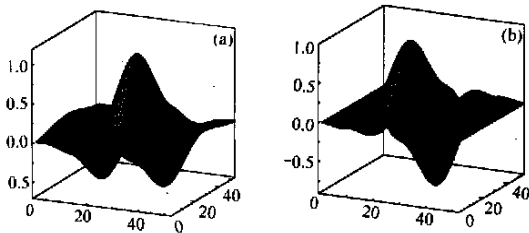


图 2 第一分析带上的 Gabor 滤波器((a)为实部,(b)为虚部)

Fig. 2 (a) Real and (b) imaginary components of the 2D Gabor filter used across the first zone of analysis

3.2 构造多尺度 2D Gabor 滤波器

Daugman 在虹膜识别中使用的 2D Gabor 滤波器是在极坐标系中定义的,形式如下^[4,5]:

$$G(r, \theta) = e^{-i(\theta - \theta_0)} e^{-(r-r_0)^2/2} e^{-(\theta - \theta_0)^2/2} \quad (4)$$

它是 2D 高斯函数与复指数的乘积。尺度参数 r_0 和 θ_0 决定滤波器的大小,他们与频率 ω 成反比变化,这样产生一组自相似的多尺度小波,只不过这些小波的频率调制方向都是沿着 θ 方向,位置由 θ_0 和 r_0 确定。但它的实部不是带通滤波器。纹理图像含有直流分量,为了使计算出的虹膜码独立于照明强度,应除去直流响应,使它成为带通滤波器。虚部本身就是带通的。带通滤波器还可以滤掉高频分量,消除图像中的高频噪声。这与虹膜纹理的频率分布特点很吻合,因此,能可靠地提取纹理。

构造 Gabor 滤波器时,尺度的选择很重要,在很大程度上与虹膜展开图的大小有关。尺度过大会漏掉纹理特征,造成相同虹膜的 Hamming 距离偏大,不同虹膜的 Hamming 距离偏小;尺度过小,会把高频噪声当作纹理特征,结果使 Hamming 距离都比较大。

取样点数与尺度成正比增加,并且要保证足够的取样点数,使波形完整。频率与取样点数成反比变化,设 p 为取样点数, $\omega = 4 / (p - 1)$ 。这样,构造 8 个不同尺度但是形状相同的 Gabor 滤波器,其具体参数如表 1 所示,第一分析带使用的 Gabor 滤波器,如图 2 所示。

表 1 2D Gabor 滤波器的参数

Tab. 1 Parameters of 2D Gabor filters

Zone of analysis	n	Scale	frequency
1	18	2 / 26	53
2	19	2 / 28	57
3	20	2 / 30	61
4	21	2 / 32	65
5	22	2 / 34	69
6	24	2 / 38	77
7	26	2 / 42	85
8	30	2 / 46	93

3.3 计算虹膜码

某一分析带内的虹膜纹理可以取分析带的中间一行,虹膜纹理特征表现为不同宽度的峰和谷,如图 3 所示。

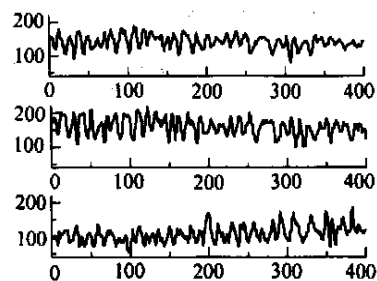


图 3 虹膜图像的纹理(其中上、中曲线来自同一个虹膜,下图来自另一个虹膜)

Fig. 3 Textures of iris images: the first and second curves from same iris; the final one from another different iris

用构造的 8 个多尺度 Gabor 滤波器对虹膜图像的各个分析带滤波。大尺度 Gabor 滤波器在频域的频谱很窄,中心频率较小,可以通过较低频率的纹理

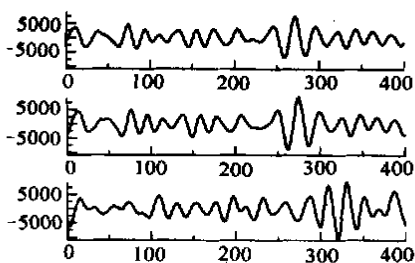


图4 滤波结果

Fig. 4 Filtered results

成分;相反小尺度 Gabor 滤波器的频谱较宽,中心频率较大,可以通过较高频率的纹理成分。因此,在靠近瞳孔的一侧使用小尺度滤波器,随着半径的增加,滤波器尺度不断加大。另外,仅利用了实部滤波器,原因在后边阐述。在滤波时,由于 Gabor 滤波器的行数大于各分析带的行数,需要对分析带进行行扩展,使两者的行数相等;并且还要进行列扩展,使滤波后的点数等于原来数据的列数。扩展方法是周期扩展,实验结果表明这种扩展方法比其他扩展方法效果好。扩展后,每个 Gabor 滤波器在相应的分析带内沿着中间行逐点移动,计算卷积,可产生长度为 400 点的 1D 信号。图 4 是图 3 的 2D 滤波结果。可以看出输出的信号围绕 0 点上下波动,使图 3 中的纹理特征更加突出。将所有的滤波结果根据符号进行量化,可以产生 8 段代码,每段为 400 位,一共 400Bytes 的虹膜码。因为滤波只是对每个分析带的中间一行进行,而不是对每个分析带的所有行,这就使计算量明显减小,加快运算速度。

4 虹膜码间的 Hamming 距离

虹膜图像变成 400Bytes 的代码后,需要进行模式匹配。利用 Hamming 距离可以比较两个虹膜码间的距离,任两个虹膜码间的 Hamming 距离定义为:

$$HD = \frac{1}{3200} \sum_{j=1}^{3200} A_j (XOR) B_j \quad (5)$$

即将不同的虹膜码进行按位异或比较,其中, A 和 B

表示不同的虹膜码, j 表示虹膜码的位,范围在 1 ~ 3200。由于头部或照相机倾斜、眼睛扭转使虹膜转动时,会造成虹膜码的 8 段量化结果移位。因此需要对两个虹膜码的对应段进行移位比较,为各段代码指定的移动位数均为 10。从这些移位比较中找出一个最小的 Hamming 距离值作为每段的 Hamming 距离,一共 8 个 Hamming 距离。两个虹膜码间的 Hamming 距离就是 8 个 Hamming 距离的平均值。

5 实验结果及分析

对 15 个人的不同虹膜进行实验,其中每个虹膜在不同条件下采集两幅图像,采集到的虹膜图像大小为 640 × 480,是 8 位灰度图像。对这 30 个图像分别计算出 Hamming 距离,并可得到 Hamming 距离的分

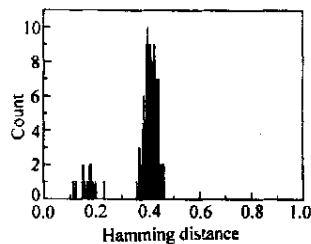


图5 根据实验结果计算出的 Hamming 距离分布

Fig. 5 Distribution of Hamming distances computed according to experimental results

布,如图 5 所示。其中相同虹膜的 Hamming 距离分布的均值为 0.1680,不同虹膜的 Hamming 距离分布的均值为 0.4122。英国电信计算出的相同虹膜的 Hamming 距离分布的均值为 0.084,不同虹膜的 Hamming 距离分布的均值是 0.456。与英国电信的数据相比,得到的相同虹膜的 Hamming 距离偏大,而不同虹膜的 Hamming 距离偏小。估计原因是采集到的虹膜图像上有反射光斑,并且光斑的位置是不确定的,如果想办法将光斑除掉的话,识别效果应该更好些。尽管如此,相同虹膜的 Hamming 距离的最大值小于 0.25,而不同虹膜的 Hamming 距离最小值大于 0.35。得到的数据在 0.25 ~ 0.35 之间没有分布,因此可以在此区间选择分离点。一般希望误接收率低

些,可以将分离点的 Hamming 距离选择的小些,定为 0.27,比 0.27 小判为来自相同虹膜,比 0.27 大判为来自不同虹膜。当然,目前的图像数还比较少,以后还要进行大量图像实验,分离点可以根据需要进行调整。

在计算虹膜码时,仅利用了实部滤波器,而不是同时使用虚部滤波器。表 2 和表 3 是 Gabor 滤波器分别提取实部、虚部和实部加虚部时虹膜码的 Hamming 距离的比较。

表 2 不同 Gabor 滤波器对相同虹膜的 Hamming 距离比较

Tab. 2 Comparison of Hamming distances from the same irises of Gabor filters in different types

Hamming distance	Real	Imaginary	Real plus imaginary
Mean	0.1680	0.1691	0.1681
Standard deviation	0.0292	0.0347	0.0315

表 3 不同 Gabor 滤波器对不同虹膜的 Hamming 距离比较

Tab. 3 Comparison of Hamming distances from the different irises of Gabor filters in different types

Hamming distance	Real	Imaginary	Real plus imaginary
Mean	0.4122	0.4089	0.4106
Standard deviation	0.0220	0.0223	0.0214

从上表可以看出,三种情况下效果差不多,Gabor 滤波器实部的效果甚至略好一些。实际上 Gabor 滤波器的实部在变成带通滤波器后,它的频谱分布和虚部相似,因而它们的滤波效果很接近。同时,还可以看出实部加上虚部后,对 Hamming 距离也没有太大

的改进。因此,只需要选择 Gabor 滤波器的实部进行滤波就可以了。这样会使代码长度减少一半,从而使模式匹配时间减少,更重要的是节省了虹膜码的存储空间。

6 结 论

对 Daugman 提出的虹膜识别方法进行了尝试和研究,提出了新的虹膜定位方法,而且 Gabor 滤波器对分析带滤波的计算量很少,从而也可满足速度上的要求,便于实时实现。实验证明,该方法识别效果较好,对虹膜的平移、缩放、旋转和瞳孔缩放、光照强度不敏感,而且在有反射光斑的情况下仍然可以达到满意的识别效果。但是 Gabor 滤波器参数的选择对识别效果的影响还需要进一步研究。实验样本较少,还需进行大量样本实验,以验证算法的健壮性。

参考文献:

- [1] Gabor D. Theory of communication[J]. J Inst Elec Eng, 1946, 93:429-457.
- [2] Daugman J G. Two-dimensional spectral analysis of cortical receptive field profiles[J]. Vision Research, 1980, 20:847-856.
- [3] Daugman J G. Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters[J]. Journal of the Optical of America A, 1985, 2(7): 1160-1169.
- [4] Daugman J G. 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.
- [5] Daugman J G. Biometric personal identification system based on iris analysis[P]. US Patent 5291560, 1994-03-01.
- [6] Daugman J. Recognizing persons by their iris pattern[J]. Information Security Technical Report, 1998, 13(1):33-39.