

# 一种改进的基于 Gabor 滤波的指纹图像增强算法

万鹏, 王厚大

(南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 在指纹识别系统中, 图像增强效果的好坏对特征提取及指纹鉴别的识别率具有决定性的影响。根据指纹图像具有方向性和频率的特点, 将 Gabor 滤波器应用在指纹增强处理中。利用 Gabor 滤波器的方向选择和频率选择特性, 把指纹图像的局部方向和脊线频率作为 Gabor 滤波函数的参数, 然后将 Gabor 函数与纹理图像进行卷积, 以此去除噪声, 达到增强图像的目的。在算法设计上提高了运算速度, 节省了运算时耗。实验证明, 算法工作稳定, 效果好, 具有很强的鲁棒性。

**关键词:** 指纹增强; 方向图; 圆形; Gabor 滤波

中图分类号: TP391

文献标识码: A

## An improved Gabor filter algorithm for fingerprint enhancement

WAN Peng, WANG Hou Da

(College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** In fingerprint recognition system, the results of image enhancement have an important affect on minutia extracting and recognition. A Gabor filter is applied in the fingerprint image enhancement according to its characteristic which is a kind of special image that has characters of direction and frequency. Also, a Gabor filter has characters of direction and frequency selectivity. Accordingly, we can use the local direction and frequency of the fingerprint image as the Gabor filter function's parameters, and then compute the convolution of the Gabor filter and fingerprint images. In this way, we remove noises from fingerprint images effectively and enhance fingerprint images. In this paper, an algorithm which enhances the calculation speed and reduce the operation time is designed. From the experimental results, we prove that this algorithm is steady, effective and robust.

**Key words:** fingerprint enhancement; orientation image; circle; Gabor filter

在信息技术高速发展的今天, 信息安全变得尤为重要。指纹识别的效率和好坏很大程度上依赖于指纹图像的预处理。一个好的预处理方法将大大减少伪特征点数, 减少对原始采集图像的依赖。对于采集到的不清晰的指纹图像, 为弥补图像质量上的缺陷, 保证指纹后处理算法对指纹图像具有足够的鲁棒性, 图像增强步骤是十分必要的。从理论上分析, 由脊线和谷线组成的指纹图像的灰度直方图应具有明显的双峰性质, 但由于指纹采集时的种种因素影响, 使得实际得到的灰度直方图与理论上有较大差异, 如果采用一般的基于灰度值的图像增强方法, 如对比度增强、平滑算法、拉普拉斯算法、直方图均衡算法和中值滤波等, 增强效果都不太理想, 应考虑利用指纹本身具有的局部方向特性和局部频率特性来改善指纹图像质量。指纹图像增强算法除了具有良好的增强效果之外, 还应当算法的速度、鲁棒性和稳定性方面也具有较好的特性。但是这几个性能指标通常

是相互制约的, 必须针对指纹图像的特点, 设计出综合性能最优的增强算法。指纹图像局部区域的纹线分布具有较稳定的方向和频率, 根据这些方向和频率数值设计出相应的带通滤波器就能有效地在局部区域对指纹进行修正和滤噪。Gabor 变换是一个比较理想的指纹图像增强算法, Gabor 小波变换是一种 Gauss 窗的加窗 Fourier 变换。1980 年 Daugman 首次将一维 Gabor 小波推广到二维, 并用于视觉简单神经元的视野感受模型。由于 Gabor 滤波器可以同时空域和频域上获得最佳的分辨率, 具有良好带通性和方向选择性, 因此可以采用 Gabor 滤波器来实现图像增强。

### 1 Gabor 滤波器

Gabor 滤波器增强使用方向场图像来进行增强, 是指纹增强算法中最常见的一种。这种算法的基本出发点是基于指纹的数学模型, 指纹在局部小区域内可以认为是一组平行的具有一定频率的直线, 这样可以顺着脊线

图形、图像与多媒体

Image Processing and Multimedia Technology

的方向使用 Gabor 窗函数过滤图像,使脊线的信息得到加强。由于是顺着脊线的方向滤波,在顺着脊线方向上有平滑的作用,因此能将一些断裂的脊线修复回原来的状态,同时由于 Gabor 滤波器具有良好的频率选择性,因此可以在有效去除脊线上的噪声的同时保持脊线的结构。

通常的二维 Gabor 滤波算子的定义如下:

$$h(x,y,\theta,f) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_\theta^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_\theta^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \times \exp(j2\pi fx_\theta)$$

其中,  $y_\theta = -x\sin\theta + y\cos\theta$ ,  $x_\theta = x\cos\theta + y\sin\theta$ 。

取其实数部分得:

$$h_{\text{even}}(x,y,\theta,f) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_\theta^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_\theta^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \times \cos(j2\pi fx_\theta)$$

图像滤波后得到:

$$G'(i,j) = \sum_{u=-\frac{W_x}{2}}^{\frac{W_x}{2}} \sum_{v=-\frac{W_y}{2}}^{\frac{W_y}{2}} (h_{\text{even}}(u,v,O(i,j),f)G(i,j))$$

其中,  $G'(i,j)$  为滤波后的图像,  $G(i,j)$  为原始指纹图像。

对一个如图 1 所示的原始指纹图像, Gabor 小波方向的时域谱和滤波后的指纹图像如图 2 所示。



图 1 原始指纹图像

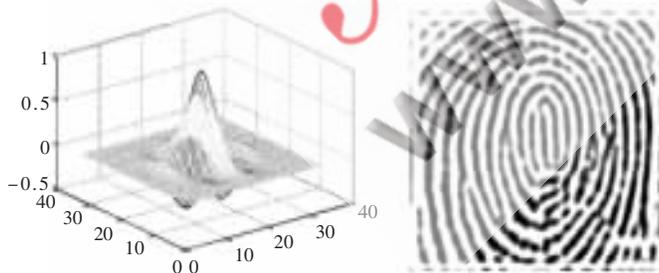


图 2 Gabor 时域图(左)和滤波后指纹图像(右)

2 圆形 Gabor 滤波器

2.1 圆形 Gabor 滤波器构造

指纹图像由具有方向和频率的纹路组成, HWJ 方法采用固定大小的方向 Gabor 滤波器对指纹图像进行增强, 在每个图像块将滤波器的方向和频率调节为块的局部方向和局部频率。实验中发现, 不同的图像块采用局

部频率进行增强有时会导致相邻块的衔接不平滑, 这种块效应可以通过将滤波器的频率调节为需要被增强的图像的平均纹路频率而克服, 因为各图像块的纹路频率和平均纹路频率差异很小, 而且实验表明 Gabor 滤波器的频率和被增强的纹路的频率存在微小的差异, 不会影响增强效果。除了这种类型的块效应外, HWJ 方法对不同方向的纹路有不同的增强结果, 这种类型的块效应是由滤波器的形状(方形, 如图 3(a)所示)导致的, 为了消除这种块效应, 本章采用圆形滤波器进行增强, 如图 3(b)所示。实验表明, 圆形 Gabor 滤波器可以将不同方向的纹路增强得到相同的增强程度。另外, 滤波器的尺寸对增强结果会有一定影响。HWJ 方法将滤波器设置为固定大小 11×11, 这种固定的大小不能适应所有的纹路频率, 因此本文将圆形滤波器的直径设置为平均纹路间距的 3/2 倍(实验获得的经验), 大致刚好跨过一条纹路以及和该纹路紧邻的两条纹谷。

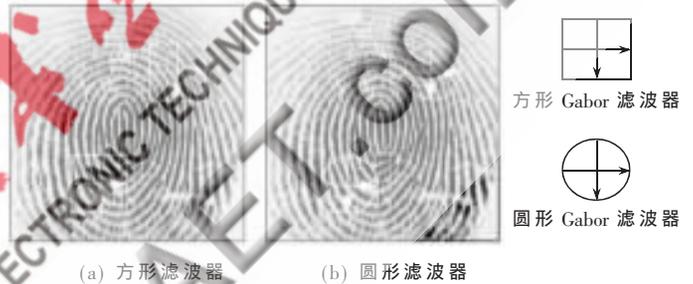


图 3 不同形状的滤波器

假如  $I$  为原图像,  $I_c(i,j)$  为增强后的图像,  $\tau = 3 \times \frac{T}{4}$  为滤波器的半径,  $f$  为  $I$  的平均纹路频率,  $W(i,j)$  为图像块,  $O(W(i,j))$  为  $W(i,j)$  的纹路方向,  $M(W(i,j))$  标识  $W(i,j)$  为前景( $M(W(i,j))=1$ )还是背景( $M(W(i,j))=0$ )。  $I_c$  的计算过程如下:

$$X(x,y,\gamma) = -x\sin\gamma + y\cos\gamma \quad Y(x,y,\gamma) = -y\sin\gamma - x\cos\gamma$$

$$h(x,y,\gamma,f) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X(x,y,\gamma)^2}{d_x^2} + \frac{Y(x,y,\gamma)^2}{d_y^2}\right)} \cos(2\pi fX(x,y,\gamma))$$

$$h''(x,y,\gamma,f) = \begin{cases} h(x,y,\gamma,f) & x^2 + y^2 \leq \tau^2 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

其中,  $h''(x,y,\gamma,f)$  是一个圆形 Gabor 滤波器。

$$I_c(i,j) = \begin{cases} \sum_{u=-r}^r \sum_{v=-r}^r h''(u,v,O(W)([i/w],[j/w]))fI(i-u,j-v) & M(W([i/w],[j/w]))=1 \\ 255 & \text{else} \end{cases}$$

2.2 圆形 Gabor 滤波器优越性

假设  $I_h$  是图像  $I$  用  $h(x,y,\gamma,f)$  得到的增强结果, 而  $I_{h'}$  是图像  $I$  用  $h'(x,y,\gamma,f)$  得到的增强结果。假设  $I^{i,j,\theta}$  是图像  $I$  围绕点  $(i,j)$  逆时针方向旋转角度  $\theta$  得到的旋转图像, 若  $\gamma$  是图像  $I$  在点  $(i,j)$  处的纹路方向, 则图像  $I^{i,j,\theta}$  在点  $(i,j)$  处的纹路方向为  $\theta + \gamma$ 。使用圆形 Gabor 滤波器  $h''(x,y,\gamma,f)$  得到  $I$  和  $I^{i,j,\theta}$  的增强图像  $I_{h'}$  和  $I_{h'}^{i,j,\theta}$ , 它们在  $(i,j)$  处的

图形、图像与多媒体

$$I_h(i, j) = \iint_{u, v \in [-\gamma, \gamma]} h(u, v, \gamma, f) I(i-u, j-v) = \iint_{u^2+v^2 \leq \gamma^2} h(u, v, \gamma, f) I(i-u, j-v)$$

$$I_h^{i, j, \theta}(i, j) = \iint_{u, v \in [-\gamma, \gamma]} h(u, v, \gamma + \theta, f) I^{i, j, \theta}(i-u, j-v) = \iint_{u^2+v^2 \leq \gamma^2} h(u, v, \gamma + \theta, f) I^{i, j, \theta}(i-u, j-v)$$

灰度分别为:

显然  $|I_h(i, j) - I_h^{i, j, \theta}(i, j)| = 0$ 。将  $|I_h(i, j) - I_h^{i, j, \theta}(i, j)|$  称为圆形 Gabor 滤波器的方向感应 CGOE (Circular Gabor Filter's Orientation Effect),  $\theta$  可以看作 2 个滤波器的角度差异, 随着角度  $\theta$  的改变, CGOE 保持不变, 如图 4(a) 所示。这是在用圆形 Gabor 滤波器增强的指纹图像中, 各方向上的纹路有大致相同的增强程度的根本原因。

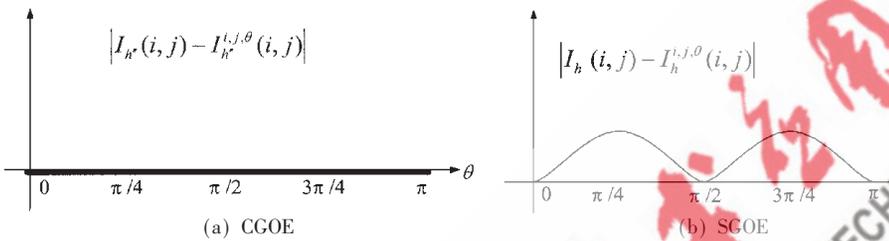


图 4 CGOE 和 SGOE 曲线

类似地, 将  $|I_h(i, j) - I_h^{i, j, \theta}(i, j)|$  称为方形 Gabor 滤波器的方向感应 SGOE (Square Gabor Filter's Orientation Effect)。使用方形 Gabor 滤波器  $h(x, y, \gamma, f)$  得到  $I$  和  $I^{i, j, \theta}$  的增强图像  $I_h$  和  $I_h^{i, j, \theta}$ , 它们在  $(i, j)$  处的灰度分别为:

$$I_h(i, j) = \iint_{u, v \in [-\gamma, \gamma]} h(u, v, \gamma, f) I(i-u, j-v) = \iint_{u^2+v^2 \leq \gamma^2} h(u, v, \gamma, f) I(i-u, j-v) + \iint_{\substack{u, v \in [-\gamma, \gamma] \\ u^2+v^2 > \gamma^2}} h(u, v, \gamma, f) I(i-u, j-v) = I_h(i, j) + \iint_{\substack{u, v \in [-\gamma, \gamma] \\ u^2+v^2 > \gamma^2}} h(u, v, \gamma, f) I(i-u, j-v)$$

$$I_h^{i, j, \theta}(i, j) = \iint_{u, v \in [-\gamma, \gamma]} h(u, v, \gamma + \theta, f) I^{i, j, \theta}(i-u, j-v) = \iint_{u^2+v^2 \leq \gamma^2} h(u, v, \gamma + \theta, f) I^{i, j, \theta}(i-u, j-v) + \iint_{\substack{u, v \in [-\gamma, \gamma] \\ u^2+v^2 > \gamma^2}} h(u, v, \gamma + \theta, f) I^{i, j, \theta}(i-u, j-v) = I_h^{i, j, \theta}(i, j) + \iint_{\substack{u, v \in [-\gamma, \gamma] \\ u^2+v^2 > \gamma^2}} h(u, v, \gamma + \theta, f) I^{i, j, \theta}(i-u, j-v)$$

则:

$$|I_h(i, j) - I_h^{i, j, \theta}(i, j)| = \left| \iint_{\substack{u, v \in [-\gamma, \gamma] \\ u^2+v^2 > \gamma^2}} h(u, v, \gamma, f) I(i-u, j-v) - \iint_{\substack{u, v \in [-\gamma, \gamma] \\ u^2+v^2 > \gamma^2}} h(u, v, \gamma + \theta, f) I^{i, j, \theta}(i-u, j-v) \right| \geq 0$$

$|I_h(i, j) - I_h^{i, j, \theta}(i, j)|$  的值随着  $\theta$  的变化而周期性地变化, 如图 4(b) 所示, 这种变化导致了方形 Gabor 滤波器对不同方向的纹路产生不同的增强程度。

如上述分析可知, 圆形 Gabor 滤波器可以将不同方向的纹路增强得到相同的增强程度, 达到良好的增强效果。

由于指纹图像在其纹理梯度方向上有很好的频域特性, 与 Gabor 在空间上的频域特性有很好的吻合, 因此, 用 Gabor 小波来进行指纹图像的增强是合理的, 实验也证明了用 Gabor 小波对指纹图像进行增强达到了很好的效果。本文介绍了从 Gabor 小波滤波器的构造, 到 Gabor 滤波器在指纹图像预处理中的应用, 并从原理上分析了在用 Gabor 滤波器进行图像增强中遇到的问题和

解决方法。Gabor 算子对具有纹理特性的图像具有很强的增强作用, 对于高噪声的指纹图像, 采用该滤波方法也能取得比较好的效果。实验表明 Gabor 滤波算法对指纹的增强比一般的其他方法有很大的优越性。

本文的创新点是采用圆形 Gabor 滤波器, 使得指纹图像各个方向都能得到很好的增强效果。同时圆形 Gabor

滤波器的直径设为平均纹路间距的 3/2, 这个从实验中得出的数据对各种指纹图像有很好的适用性, 大大减少了计算的复杂度, 而且计算出的方向不需要再进行量化, 可以直接代入公式进行 Gabor 滤波, 减少了运算时间, 满足了指纹识别系统的实时性。

参考文献

- [1] HONG L, WAN Y, JAIN A K. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation. IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777-789.
- [2] BAZEN A M, GEREZ S H. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints. IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 905-919.
- [3] MAIO D, MALTONI D. Direct grayscale minutiae detection in fingerprints. PAMI, 1997, 19(1): 27-40.
- [4] CHANG J H, FAN K C. Fingerprint ridge allocation in direct grayscale domain. PR, 2001, 34(10): 1907-1925.
- [5] WILLIS A J, MYERS L. A cost-effective fingerprint recognition system for use with low-quality prints and damaged fingertips. Pattern Recognition, 2001, 34(2): 255-270.
- [6] JAIN A K, HONG L, BOLLE R M. Online fingerprint verification. IEEE

- Trans.on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1997, 19(4):302-314.
- [7] 程建刚.指纹图像分析及其自动识别[D]. 中科院自动化所博士学位论文,2004.
- [8] VINCKEN K L, KOSTER A S E, MAX K. Viergever, probabilistic multiscale image segmentation.IEEE Trans.on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1997,19(2): 109-120.
- [9] JEONG H,KIM C.Adaptive determination of filter scales for edge detection.IEEE Trans.on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1992,14(5):579-585.
- [10] WU Chen Yu, ZHOU Jie, BIAN Zhao Qi, et al. Robust crease detection in fingerprint images.In Proceedings of CVPR2003.
- (收稿日期:2009-12-15)

作者简介:

王厚大,男,1946年生,教授,主要研究方向:模式识别、图像处理。

万鹏,男,1984年生,在读硕士生,主要研究方向:自然信息系统与应用。

