

基于小波变换和 Gabor 滤波的指纹图像增强算法

田俊, 周定康

(江西师范大学 计算机信息工程学院, 江西 南昌 330022)

摘要: 在指纹自动识别系统中, 图像增强是比较重要的一个环节, 它直接影响到指纹识别系统的识别精度. 利用指纹图像在经小波多尺度分解后, 低频部分集中了指纹图像的主要纹理信息这一特性, 提出了一种在小波域对指纹图像进行 Gabor 滤波增强的算法. 实验表明, 该算法能够使图像的质量明显得到增强, 方便了后续指纹特征的提取.

关键词: 指纹识别; 小波变换; 方向图; Gabor 滤波

中图分类号: TP391

文献标识码: A

指纹由于具有终身不变性和唯一性等特征, 现在被广泛用于生物识别技术中. 由于在指纹图像的采集过程中有很多的因素, 比如按捺用力不均匀、油墨过多或过少、捺印人的手指皱皮、皮肤干燥或潮湿、脏迹、指纹图像数字化过程中引入的噪声等, 一般都会不同程度使采集到的指纹图像存在纹线间的粘连、模糊和断裂等现象. 如果直接从这些指纹图像中进行特征提取的话, 会带来很多的问题, 如指纹纹理的方向错误、伪细节点的产生而真实的细节点的丢失、脊和谷的错位等. 这些问题都将直接影响到指纹识别系统的性能. 因此对指纹图像进行特征提取前, 必须对指纹图像做一些增强处理, 以提高指纹脊线结构的清晰度, 便于正确地提取指纹特征.

在本文中主要利用了一种基于指纹方向图的方法对指纹图像进行增强, 该方法主要步骤如下:

- (1) 指纹图像的归一化: 使指纹图像具有相同的均值和方差;
- (2) 对归一化的指纹图像做小波多尺度分解: 通过计算低频子图的方向图来确定整幅指纹图像的方向图;
- (3) 计算指纹图像的频率, 结合由 2) 计算得到的方向信息, 使用 Gabor 滤波器对指纹图像进行小波域的滤波增强;
- (4) 对小波多尺度分解的图像进行小波变换重构.

1 指纹图像的增强

1.1 指纹图像的归一化

归一化使得图像的灰度具有相同的均值和方差, 为后续的处理提供统一的规格. 对于采集到的指纹图像 (8 位灰度, 500 dpi, 长 L , 宽 W), 设 $G(i, j)$ 为指纹图像归一化后的灰度值, M_0 为指纹图像归一化后期望的灰度均值, VAR_0 为指纹图像归一化后期望的灰度方差, $I(i, j)$ 为指纹图像归一化前的灰度值, M 为指纹图像归一化前的灰度均值, VAR 为指纹图像归一化前的灰度方差. 一般按下式进行归一化处理.

收稿日期: 2008-03-27

作者简介: 田俊 (1982-), 男, 湖北襄樊人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、模式识别和多媒体通信.

$$G(i, j) = \begin{cases} M_0 + \sqrt{\text{VAR}_0(I(i, j) - M)^2 / \text{VAR}}, & \text{当 } I(i, j) > M \\ M_0 - \sqrt{\text{VAR}_0(I(i, j) - M)^2 / \text{VAR}}, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$M = 1 / (L * W) \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{W-1} I(i, j) \quad (2)$$

$$\text{VAR} = 1 / (L * W) \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{W-1} (I(i, j) - M)^2 \quad (3)$$

图 1 显示的是经过归一化后的指纹图像。

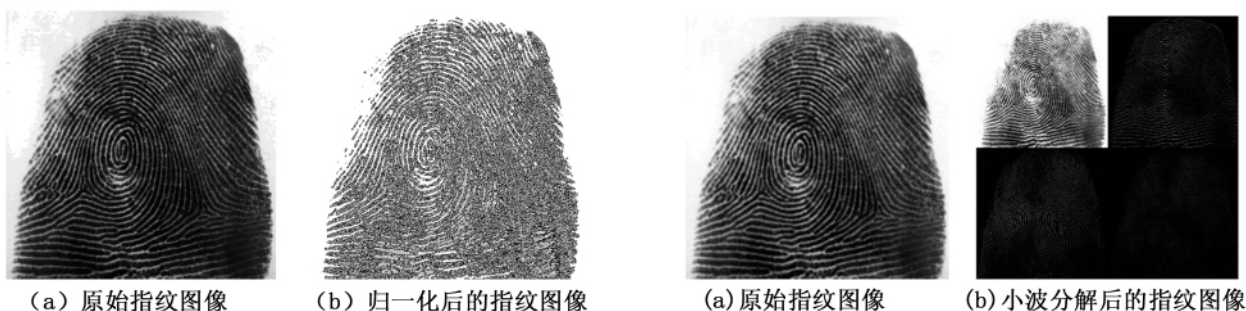


图 1 归一化后的指纹图像

图 2 经过一级小波分解后的图像

1.2 小波变换和指纹图像的小波分解

(1) 小波变换

传统的傅立叶变换是将完整的信号与一系列的正弦波或余弦波进行卷积计算,而小波变换则是选择具有更好局部性能的小波函数来替代傅立叶变换中的波函数,因此在处理信号时,小波变换比傅立叶变换具有更好的灵活性. 设输入信号为 $f(t)$, 小波函数为 $\Psi_{a,b}(t)$, 则小波变换 $W_f(a, b)$ 定义为信号 $f(t)$ 与小波函数 $\Psi_{a,b}(t)$ 的内积, 即

$$W_f(a, b) = \langle f(t), \Psi_{a,b}(t) \rangle = \int f(t) \Psi_{a,b}(t) dt \quad (4)$$

上面的小波变换为连续小波变换,也可以写成如下形式

$$\text{CWT}(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

其中 a 称为尺度因子, b 称为平移因子.

由于数字化的图像是离散信号,因此我们将要使用离散小波变换,其定义如下

$$\text{DWT}(m, n) = 2^{\frac{m}{2}} \sum f(k) \Psi(2^m k - n) \quad (6)$$

(2) 指纹图像的小波分解

通过研究指纹的纹理可以发现,指纹纹理在总体上的分布是均匀一致的,而且指纹的纹理方向信息大部分集中在图像的低频部分. 而小波多尺度分析,能将指纹图像分解成低频子图和高频子图. 低频子图的小波系数分布很好的反映了原始图像的纹理分布. 由于同一尺度下高频子图和低频子图的对应关系,高频子图滤波增强时所需要的纹理方向信息可以采用低频子图的纹理方向信息.

在本文中,对指纹图像做小波分解选用的是可以使高频子图含有较少能量的 Daubechies9/7 小波,如果输入图像的尺寸为 $L \times W$, 则经过一级小波分解后的低频子图的大小为 $(L/2) \times (W/2)$, 经过一级小波分解后的指纹图像如图 2 所示.

1.3 指纹图像方向图的计算

1.3.1 指纹图像方向图的计算

指纹图像方向图表示了指纹图像中像素点所处的局部区域的局部指纹纹线的切线方向. LinHong^[1] 等人在计算指纹的方向图时,选用了 Sobel 算子进行计算. 该方法简单快速,因此本文在计算方向图时也将采用这种算子. 该方法先将指纹图像分割成 $W \times W$ 的小块(本文取 $W = 17$), 然后按照下面的方法分别计算

这些小块的方向:

利用 Sobel 算子计算每个小块中各个像素点 $I(i, j)$ 的梯度 $\partial_x(i, j)$ 和 $\partial_y(i, j)$.

按照下面的公式计算各个小块的主方向^[1]

$$\begin{cases} \theta(u, v) = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{\sum_{i=0}^{16} \sum_{j=0}^{16} 2 \partial_x(i, j) \partial_y(i, j)}{\sum_{i=0}^{16} \sum_{j=0}^{16} (\partial_x^2(i, j) - \partial_y^2(i, j))} \right] \\ \partial_x(i, j) \neq 0, \partial_y(i, j) \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\theta(u, v)$ 为该块的方向. 如果 $\partial_x(i, j) = 0$ 或 $\partial_y(i, j) = 0$, 则表示 $\theta(u, v)$ 为 0° 或 90° .

1.3.2 指纹图像方向图的滤波平滑

由于指纹图像在采集的过程中可能会受到各种不利因素的影响,会造成指纹纹线的断裂和畸变等随机误差,我们可以通过对计算得到的指纹方向图进行一次低通滤波进行平滑,算法如下:

(1) 计算分块后像素点的正弦值和余弦值.

$$\varphi_x(u, v) = \cos(2\theta(u, v)) \quad (8)$$

$$\varphi_y(u, v) = \sin(2\theta(u, v)) \quad (9)$$

(2) 使用低通滤波器 $W(i, j)$ 对方向图进行平滑,这里采用的是 5×5 的高斯低通滤波器.

$$\varphi_x(u, v) = \sum_{i=-2}^2 \sum_{j=-2}^2 W(i, j) \varphi_x(u-i, v-j) \quad (10)$$

$$\varphi_y(u, v) = \sum_{i=-2}^2 \sum_{j=-2}^2 W(i, j) \varphi_y(u-i, v-j) \quad (11)$$

(3) 计算平滑后的指纹方向图.

$$\theta(u, v) = \frac{1}{2} \arctan(\varphi_y(u, v) / \varphi_x(u, v)) \quad (12)$$

1.4 指纹图像的 Gabor 滤波增强

指纹图像的脊线和谷线的灰度分布具有很好的频率特性,从垂直于指纹纹线的方向上看,指纹的脊线和谷线的灰度分布构成一个近似的正弦波,如图3所示.

指纹的这种纹理分布特性使其很适合使用 Gabor 滤波器进行滤波增强.

Gabor 函数的表达式如下:

$$G(x, y) = 1 / (2\pi\sigma_x\sigma_y) \exp(-(x^2/\sigma_x^2 + y^2/\sigma_y^2)/2) \exp(-2\pi jfx) \quad (13)$$

其中, σ_x 和 σ_y 为高斯包络面常数, f 为频率. 本文计算时取 $\sigma_x = 4, \sigma_y = 4$.

从式(13)中可以看出, Gabor 滤波器为在 X 方向带通, Y 方向低通的滤波器,结合指纹纹理的灰度分布考虑,它很适合指纹纹理的滤波增强. 根据欧拉公式,可将(13)式的实部和虚部分开,得到如下式子:

$$G(x, y) = E(x, y) + jV(x, y) \quad (14)$$

其中

$$E(x, y) = 1 / (2\pi\sigma_x\sigma_y) \exp(-(x^2/\sigma_x^2 + y^2/\sigma_y^2)/2) \cos(2\pi fx) \quad (15)$$

$$V(x, y) = 1 / (2\pi\sigma_x\sigma_y) \exp(-(x^2/\sigma_x^2 + y^2/\sigma_y^2)/2) \sin(2\pi fx) \quad (16)$$

在这里通过选择使用式(15) (即 Gabor 函数的实部) 将来构建 Gabor 滤波器.

将式(15) 旋转到与指纹纹理方向一致,得到下面的式子:

$$E(x, y) = 1 / (2\pi\sigma_x\sigma_y) \exp(-(x^2/\sigma_x^2 + y^2/\sigma_y^2)/2) \cos(2\pi fx) \quad (17)$$

其中, $x^2 = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$, $y^2 = -x \sin(\theta) + y \cos(\theta)$, θ 为当前操作点的指纹方向,频率 f 按照下面的计算步骤得到:

(1) 将指纹图像分成 17×17 的小块.

(2) 分别对中心在 (i, j) 位置的像素点的块,划分成 $W \times L$ 的方向窗,本文取 $W = 16, L = 32$,其中 L 为沿指纹图像投影基线的方向, W 为与指纹图像投影基线垂直的方向.

(3) 计算沿 W 方向的 W 个像素点的平均灰度值 $X[k]$, $X[k] = \frac{1}{W} \sum_{u=0}^{W-1} I(u, v)$, $k = 0, 1, \dots, L-1$, 则 $X[k]$

构成一个离散的正弦波.

(4) 计算 X 构成的正弦波中的两个波峰(或波谷)之间的距离,则频率 $f = \frac{1}{T}$. 如果没有连续的峰值,则 $f = -1$.

这样我们就得到了 Gabor 滤波器的增强系数,按照下面的式子对小波多尺度分解后的指纹图像进行处理,

$$EI(x, y) = \sum_{u=-w/2}^{w/2} \sum_{v=-w/2}^{w/2} E(x, y) I(x-u, y-v) \quad (18)$$

$EI(x, y)$ 为增强后的输出图像, $I(x, y)$ 为输入指纹图像. 对 $EI(x, y)$ 进行小波重构就可以得到原始指纹图像增强后的图像.

2 实验结果与结论

目前的图像滤波增强算法比较多,但是各种算法对不同纹理图像的滤波效果是不一样的,其适用的范围也不一样. 在实验中,作者将常用的几种滤波算法也做了实验,并同本文中介绍的算法做了对比.

图像的各种滤波算法处理得到的结果同本文的算法处理得到的结果进行比较如下:

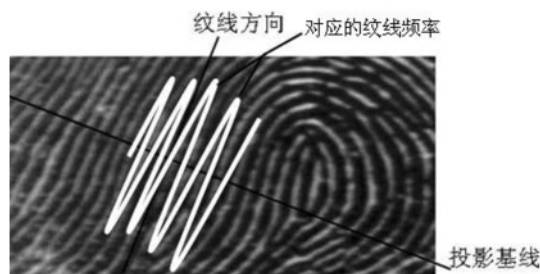


图3 指纹图像频率获取示意图

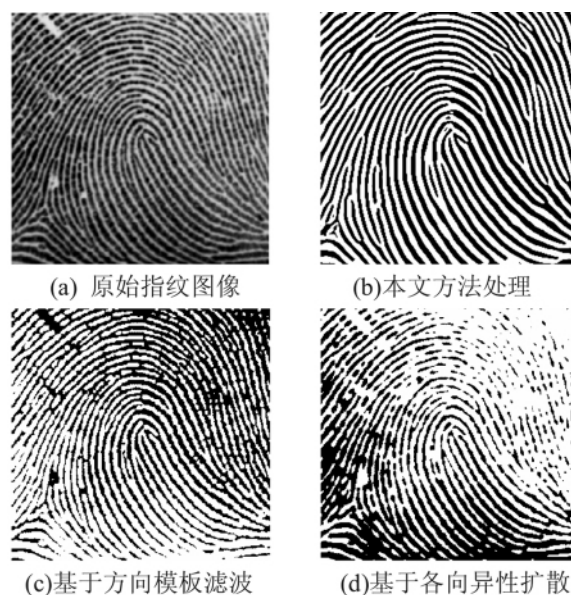


图4 各种滤波增强算法的对比效果图

图4(a)为未经处理的原始指纹图像. 图4(b)为采用本文介绍的方法处理后的指纹图像. 图4(c)为采用动态模板滤波增强^[5],并采用基于方向图的二值化算法^[6]进行二值化的结果. 图4(d)为采用基于偏微分方程的各向异性扩散方法^[7]对图像做平滑处理后,并采用基于方向图的二值化算法^[6]进行二值化的结果.

本文所提到的方法综合考虑到了指纹纹线的方向特性和频率特性. 从图中可以看到,经过本文方法处理后的指纹图像,消除了纹线的粘连和断裂,纹线变得比较清晰. 图4(c)中的图像虽然也在一定程度上消除了纹线的粘连,但是由于其采用的方向滤波模板没有考虑到指纹纹线的宽度并不是呈现一致的宽度分布,没有考虑到指纹纹线的频率特性,效果不如本文方法. 图4(d)中的图像滤波增强采用的是一种通用滤波增强算法^[8],在进行滤波时,没有考虑指纹图像的方向性这一特点,所以滤波增强效果并不明显. 虽然本文方法的滤波效果比较好,但是 Gabor 滤波过程中频率计算和滤波计算所消耗的时间在整个指纹图像的预处理过程中所占用的时间比重较大(见表1,实验环境为: windows XP Professional + Pentium IV 1.7GH + 1G Memory,图像尺寸 274* 269),这些部分还可以做进一步的优化研究,如何加快 Gabor 滤波时的速度,我们还处在这方面的研究中.

表1 指纹增强算法的时间分布表(单位 ms)

归一化	方向图	小波分解	计算频率	滤波	小波重构	二值化
300	801	708	3455	3695	691	100

参考文献:

- [1] LinHong,YifeiWan,Anil. Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1998,20(8):777-789.
- [2] 温苗利,梁彦,等. 基于 Gabor 函数的小波域指纹图像增强算法 [J]. 计算机应用,2006,26(3):589-594.
- [3] 郝玉峰,袁春伟. 基于各向异性逆扩散方程的指纹图像锐化去噪方法 [J]. 数据采集与处理,2005,20(3):258-259.
- [4] 罗希平,田 捷. 自动指纹识别中的图像增强和细节匹配算法 [J]. 软件学报,2002,13(5):948-948.
- [5] 舒乃秋等. 指纹图像的预处理方法 [J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(3):134-136.
- [6] 蒋先刚. 基于各向异性扩散的图像平滑及在三维重构预处理中的应用 [J]. 计算机应用,2007,27(1):249-251.

A Fingerprint Enhancement Algorithm Based on Wavelet Transform and Gabor Filtering

TIAN Jun,ZHOU Ding - kang

(College of Computer Information Engineering,Jiangxi Normal University,Nanchang 330022,China)

Abstract: The Fingerprint image's enhancement plays a key role in the auto fingerprint identification system,which directly influences the final accuracy of the fingerprint identification. Considering that the lower frequency part of the fingerprint image mostly stands for the fingerprint's general texture after the wavelet transform,a new full fingerprint enhancement algorithm based on Gabor filtering is discussed in detail. Experimental results show that the algorithm can enhance the fingerprint images and make it more convenient for the minutiae extraction.

Key words: fingerprint identification; wavelet transform; orientation map; Gabor filtering

(责任编辑: 周尚超)