

文章编号: 1005-0523(2009)01-0076-05

# 指纹图像预处理方法的研究与比较

崔媛媛<sup>1</sup>, 蒋先刚<sup>2</sup>, 许伦伦<sup>2</sup>

(华东交通大学 1. 交通信息工程与控制研究所; 2. 基础科学学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 指纹图像预处理需针对不同的噪声产生原因而采用不同的方法, 先对采集到的退化图像进行 Wiener 滤波, 然后对复原后的图像进行增强预处理. 着重对主要预处理方法 Gabor 方法和各向异性扩散技术进行了分析对比, 并就这些方法中的参数选择进行了对比研究.

**关键词:** Wiener 滤波; Gabor 滤波; 各向异性扩散; 指纹图像

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

由于指纹具有唯一性、不变性和可采集性, 从而成为证明个人身份的应用最广泛的生物识别特征. 现今, 大多数的指纹自动识别系统都是基于细节特征匹配的, 而我们所采集到的指纹图像都伴随着各种各样的噪声, 从而影响了指纹细节特征的提取.

首先需要对采集到的带噪退化指纹图像进行复原, 这里采用 Wiener 滤波方法滤除掉噪声, 然后对复原图像进行增强处理. 指纹图像的增强就是对指纹采用一定的算法, 使其纹线结构清晰, 尽量突出和保留固有的特征信息, 避免产生伪特征信息以保证信息提取的准确性和可靠性. 根据指纹图像特有的纹路和细节特征, 我们对 Gabor 和各向异性扩散的滤波技术进行了研究与对比, 并就不同的算法和在同一算法不同参数下所得的结果进行了比较.

## 1 指纹图像滤波及增强技术对比

### 1.1 Wiener 滤波技术

Wiener 滤波器是一种线性滤波器, 它是基于最小均方误差准则而设计的一种滤波器. 在一般情况下, 图像信号可近似地认为是一种平稳随机过程, 维纳滤波将原始图像  $f$  和对原始图像的估计  $\hat{f}$  看作是随机变量. 假设  $R_f$  和  $R_n$  是  $f$  和  $n$  的相关矩阵, 其定义为

$$R_f = E\{ff^T\}, R_n = E\{nn^T\}$$

其中:  $E\{\}$  代表数学期望运算, 容易看出  $R_f$  和  $R_n$  均为对称矩阵.

在大多数图像中, 邻近的像素点是高度相关的, 而距离较远的像素点的相关性却较弱. 通常  $f$  和  $n$  的元素之间的相关不会延伸到 20~30 个像素的距离之外. 如果任意两个像素之间的相关是像素之间距离的函数而不是位置的函数, 则  $R_f$  和  $R_n$  可近似为分块循环矩阵, 建立其相应的数学模型, 得到图像复原估计值

$$F(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \frac{\gamma S_n(u, v)}{S_f(u, v)}} G(u, v)$$

收稿日期: 2008-10-20

作者简介: 崔媛媛 (1984-), 女, 河南安阳人, 硕士研究生, 研究方向为数字图像处理.

式中:  $u, v=0, 1, \dots, N-1$ ;  $|H(u, v)|^2 = H^*(u, v)H(u, v)$ , 此式为参变维纳滤波法, 对噪声放大具有自动抑制作用. 如果  $\gamma=1$ , 则称之为维纳滤波器, 此时, 并不是在约束条件下得到的最佳解, 即并不一定满足  $\|g - Hf\|^2 = \|n\|^2$ .

利用最小均方误差估计, 把维纳滤波器应用到图像处理中, 使图像估计  $\hat{f}(x, y)$  与原始图像  $f(x, y)$  的误差  $E\{[f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2\}$  最小时, 有

$$w(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \frac{P_n(u, v)}{P_f(u, v)}}$$

我们定义  $\frac{P_f(u, v)}{P_n(u, v)}$  为信噪比, 但通常这两个功率值, 尤其是噪声的功率谱难于得到, 并且在实际应用中, 对这个值的精度要求并不非常苛刻, 因此我们可以选用一个正常数  $K$  来近似信噪比的倒数, 因而维纳滤波器的估计值为

$$\hat{F}(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + K} G(u, v)$$

其中:  $G(u, v)$  是  $W(u, v)$  的傅里叶变换.

本文采用多级维纳滤波方法, 其基本思想是通过维纳滤波器对采集到的指纹图像进行逐级处理, 可滤除不同尺度下的噪声.

## 1.2 Gabor 指纹增强技术

结合时空域的特性, 针对指纹的 Gabor 滤波算法, 把指纹在局部小区域内认为是一组平行的具有一定频率的直线, 那么可以顺着脊线的方向使用 Gabor 窗函数去过滤图像, 使脊线的信息得到加强. 在顺着脊线方向上具有平滑的作用, 可以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, 可以在有效去除脊线噪声的同时而保持脊线的结构.

通常二维 Gabor 滤波算子的定义如下

$$h(x, y, \theta, f) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_0^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_0^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \times \exp(j2\pi fx_0)$$

$$x_0 = x\cos\theta + y\sin\theta, \quad y_0 = -x\sin\theta + y\cos\theta$$

这是一个复变函数形式的表达式, 在实际使用时, 只是用它的实数部分, 也叫偶对称的 Gabor 滤波算子:

$$h_{\text{even}}(x, y, \theta, f) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_0^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_0^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \times \cos(2\pi fx_0)$$

式中:  $\theta$  是 Gabor 滤波器的方向;  $f$  是频率, 这两个参数在局部范围内可以看作是不变的.  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别是沿  $x$  轴和  $y$  轴的 Gaussian 包络常数, 它们的取值直接关系到滤波结果的好坏, 取值过大会产生伪线, 取值过小又会使一些频率不能通过, 影响滤波质量. 一般情况下  $\sigma_x$  不小于  $\sigma_y$ . 为了减少标准方差, 我们在各个垂直于脊线的方向上确定  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  的值, 合理地选取  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  的值, 不仅可以减少杂散脊线, 而且将使滤波器的滤噪功能更加强大.

设计 Gabor 滤波器时, 我们首先需要对指纹图像进行灰度化、归一化, 然后把要处理的指纹图像分割成许多小块, 确定每一小块区域的方向和频率, 局部方向场和频率的准确度对滤波增强的结果影响很大. 下面的式子表示了滤波后的图像数值结果.

$$\varepsilon(i, j) = \sum_{u=-\frac{w\Phi}{2}}^{\frac{w\Phi}{2}} \sum_{v=-\frac{w\Phi}{2}}^{\frac{w\Phi}{2}} (h(u, v, \theta(i, j), f(i, j))G(i-u, j-v))$$

### 1) 方向场的计算

方向场表达了指纹图像的最基本的信息, 即描述了指纹的大致形状. 指纹方向场真实地反映了指纹图像最本质的纹理特征, 再现了指纹的中心花纹、外围包络线及脊线的形状和走势. 计算方向场的方法一般为掩膜法和公式法两大类.

用公式法计算方向场的主要步骤如下

- (1) 将规格化的图像分成大小为  $w \times w$  的方块, 用方块的方向代替方块中每一个点的方向.
- (2) 计算每个像素点  $(i, j)$  的梯度  $\partial_x(i, j)$  和  $\partial_y(i, j)$ , 在具体计算的时候我们选用了 Soble 算子.
- (3) 用下面公式来计算以  $(i, j)$  为中心的每一块的方向值.

$$V_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} (2\partial_x(u, v)\partial_y(u, v)), \quad V_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{W}{2}}^{i+\frac{W}{2}} \sum_{v=j-\frac{W}{2}}^{j+\frac{W}{2}} (\partial_x^2(u, v) - \partial_y^2(u, v))$$

$$\theta(i, j) = -\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{V_y(i, j)}{V_x(i, j)}\right)$$

式中:  $\theta(i, j)$  是局部脊线方向的最小平方差估计, 它表示这个方向垂直于  $W \times W$  窗的傅里叶频率的主方向. 当  $V_x(i, j) = 0$  时,  $\theta(i, j)$  为  $90^\circ$ ; 当  $V_x(i, j)$  不为 0 时, 则取以  $(i, j)$  为中心的块方向的主方向, 这个方向的估计值可以利用一个低通滤波器对该方向进行修正.

- (4) 计算出  $(i, j)$  的局部方向场.

$$O(i, j) = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\varphi'_y(i, j)}{\varphi'_x(i, j)}\right)$$

- (5) 计算像素点  $(i, j)$  所在块邻域方向的一致性.

## 2) 频率的计算

在垂直于脊线方向上, 用脊线和谷线呈现的离散正弦波形的特征来计算脊线频率. 该算法认为正弦波形中波峰与波峰之间的距离就是脊线之间的距离, 而脊线频率即为脊线距离的倒数. 计算采用的公式如下

$$X[k] = \frac{1}{W} \sum_{d=0}^{W-1} G(u, v) \cdots k=0, 1, \dots, L-1$$

$$u = i + \begin{cases} d - \frac{W}{2} \\ d - \frac{W}{2} \end{cases} \cos\theta(i, j) + \begin{cases} k - \frac{L}{2} \\ k - \frac{L}{2} \end{cases} \sin\theta(i, j)$$

$$v = j + \begin{cases} d - \frac{W}{2} \\ d - \frac{W}{2} \end{cases} \sin\theta(i, j) + \begin{cases} k - \frac{L}{2} \\ k - \frac{L}{2} \end{cases} \cos\theta(i, j)$$

式中:  $G(u, v)$  为图像的灰度值, 方向窗口大小为  $L \times W$ . 为了更好地界定每一小块区域的中心, 在计算脊线频率时, 我们把归一化的图像分成单块大小为  $15 \times 15$  的像素.

## 1.3 各向异性扩散的指纹增强技术及改进

各向异性扩散算法是根据图像空间位置的梯度值来确定扩散系数, 对图像平坦区域平滑作用加强, 对边界区域平滑作用减弱. 它的算法的方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}[c(\|\nabla u\|^p) \cdot \nabla u]$$

其中:  $\text{div}$  为散度算子;  $u$  是图像像素的灰度值;  $\nabla$  为梯度算子;  $t$  是物理中热扩散时间, 程序设计中用迭代步长表示;  $c$  为扩散系数, 通常是图像梯度值  $\|\nabla u\|^p$  的非负单调递减函数. 常使用的扩散系数有

$$c(\|\nabla u\|^p) = \frac{1}{1 + \frac{\|\nabla u\|^p}{k^2}}$$

$k$  是门限参数, 它决定了所能平滑的梯度的最大值. 由于各向异性扩散方程采用了图像不同方向上的梯度的单调递减函数作为扩散系数, 在同质区域内部, 即灰度值变化不大, 梯度较小, 于是扩散系数较大, 可以有效地平滑同质区域内的噪声; 而在图像的边缘部分, 即灰度值变化剧烈, 梯度较大, 扩散系数较小, 能够保留图像的边缘信息.

### 1) 各向异性扩散算法

以四向的各向异性扩散为例, 具体算法如下

- (1) 计算第  $n$  次迭代时像素点  $f(i, j)$  上下左右 4 个点的梯度.

$$G_n(i, j) = \sqrt{[f(i, j) - f(i, j-1)]^2 + [f(i, j) - f(i-1, j)]^2}$$

- (2) 计算这四个点的扩散系数.
- (3) 计算第  $n$  次迭代扩散后的灰度值.

$$u_{n+1}(i, j) = u_n(i, j) + \Delta t \left\{ \begin{aligned} & \frac{[c_n(i, j) + c_n(i-1, j)]}{2} \cdot u_n(i-1, j) + \frac{[c_n(i, j) + c_n(i+1, j)]}{2} \cdot u_n(i+1, j) \\ & + \frac{[c_n(i, j) + c_n(i, j-1)]}{2} \cdot u_n(i, j-1) + \frac{[c_n(i, j) + c_n(i, j+1)]}{2} \cdot u_n(i, j+1) \\ & - \frac{[4c_n(i, j) + c_n(i-1, j) + c_n(i+1, j) + c_n(i, j-1) + c_n(i, j+1)]}{2} \cdot u_n(i, j) \end{aligned} \right\}$$

其中:  $\Delta t$  是迭代步长;  $u_n(i, j)$  是第  $n$  步迭代时的点  $(i, j)$  的灰度值.

- (4) 判断是否迭代完毕, 是则退出, 否则转向 (1).

随着迭代次数增加, 各向异性扩散在同质区域内的平滑效果将更好. 迭代次数越多, 效果越好, 但对图像的处理时间越长.

八向各向异性扩散与四向各向异性扩散的算法类似, 只是需要扩展到像素点  $f_i(i, j)$  周围的 8 个点上来计算.

### 2) 各向异性扩散指纹增强技术的改进

各向异性扩散有效地平滑了噪声, 同时保留了边缘. 但在某些情况下, 希望图像在各向异性扩散的同时, 边缘信息也得到增强, 使细节更加突出. 本文根据梯度不同而进行边缘增强, 在梯度大的地方边缘加强, 梯度小的地方几乎不变化, 用下面的迭代公式来进行边缘增强.

$$u'(i, j) = \min(255, \max(0, \text{round}(u(i, j) + \text{power} \cdot [4u(i, j) - u(i-1, j) - u(i+1, j) - u(i, j-1) - u(i, j+1)])))$$

$u'(i, j)$  是变换后的灰度值;  $u(i, j)$  是变换前的灰度值;  $\text{power}$  是边缘增强系数. 如先对图像边缘增强, 再进行各向异性扩散, 在增强边缘的同时, 也增强了噪声, 滤波效果不太理想. 若先对图像进行各向异性扩散, 然后再进行边缘增强, 这样就可以避免使噪声的梯度变大, 从而改善对指纹图像的平滑效果.

## 1.4 指纹图像预处理方法的比较与分析

图 1 是 Wiener 滤波的结果, 其中 (c) 是采用模板为  $3 \times 3$  的 Wiener 滤波结果, 可以看出一级滤波的结果使退化图像中的噪声得到了一定的削弱, 但由于 Wiener 滤波是基于最小均方误差为准则的, 滤波后尚存在残留的该尺度噪声. 将一级 Wiener 滤波结果作为二级滤波的原始数据输入, (d) 是对一级滤波结果采用模板为  $5 \times 5$  的 Wiener 滤波结果图像, 可以看出经过这样的多级处理有效减小了原始图像的噪声, 但同时图像边缘变得模糊.

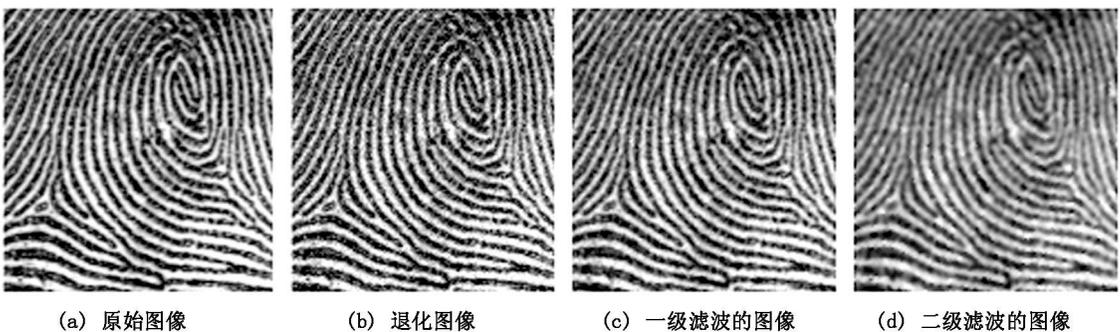


图 1 Wiener 滤波效果比较

对图 1 中的原始图像进行 Gabor 滤波, 结果如图 2 所示, 可以看出参数  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  的选择对滤波结果的好坏有很大的影响. 当  $\sigma_x = 3, \sigma_y = 1$  时, 滤波器对原始图像的滤噪作用不是太好, 当  $\sigma_x = 4, \sigma_y = 4$  时, 指纹图像滤噪效果较好, 但脊线间的伪线增多, 整体滤波效果也不佳, 当  $\sigma_x = 4, \sigma_y = 3$  时, Gabor 滤波效果比前两者都要好.

图 3~5 是在不同参数条件下, 采用各种各向异性扩散方法对指纹图像滤噪后的结果. 其中, 图 3 和图 4 中的 (a)、(b)、(c)、(d) 分别代表四向各向异性扩散、八向各向异性扩散、边缘增强异性扩散、改进的边缘增强异性扩散, 它们是在迭代次数  $n$  不同, 其它参数值相同, 均为  $k=0.08, t=0.16, \text{power}=0.5$  ( $\text{power}$  参数只

对后两种方法有影响)的条件下,对图 1中的原始图像处理得到的.通过图 3和图 4的对比,可以看出迭代次数越大,四种算法的各向异性扩散的效果越明显,需要的时间也越多.它们的时间对比如图 6所示.对比图 3或图 4中的四幅指纹图像,我们可以看出这四种各向异性扩散算法都不同程度地滤除了噪声,平滑了同质区域,使指纹的纹路更清晰,八向各向异性扩散比四向异性扩散的平滑效果要好,当然这是以付出时间为代价的,在实验中前者需要的时间几乎是后者的两倍.边缘增强的异性扩散增强了指纹纹路的边缘信息,使细节更突出,但在这种算法中噪声也得到了加强,平滑效果并不理想,而改进后的算法由于避免了噪声加强,需要的时间稍有减少,并且效果也最好.改变 power参数,令  $power=1$ ,其它的参数设置均与图 4相同,得到边缘增强的异性扩散和改进的边缘增强的异性扩散效果图,如图 5.把图 4(c)、(d)和图 5进行对比,可以看出梯度增强系数  $power$ 越大,指纹图像的边缘增强效果越强,指纹的纹路表现得越清晰,便于后续的指纹图像匹配.同时随着步长  $l$ 的增大,脊线的平滑效果越好,而纹路的边缘则将变得模糊.

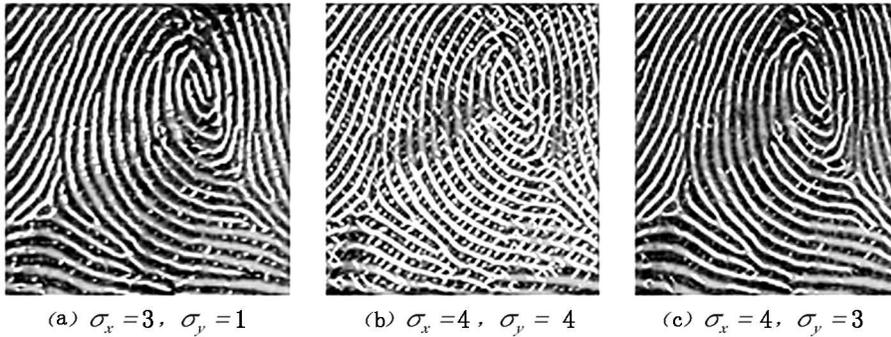


图 2 不同参数下的 Gabor滤波效果比较



图 3  $n=16$ 时四种不同异性扩散的效果图



图 4  $n=30$ 时四种不同异性扩散的效果图

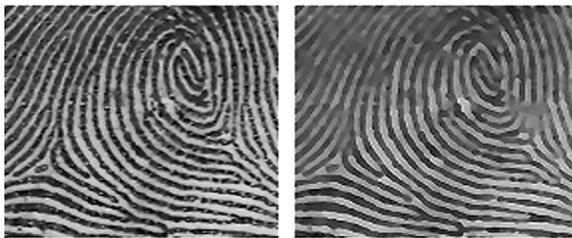


图 5  $power=1$ 时边缘增强和改进边缘增强的异性扩散

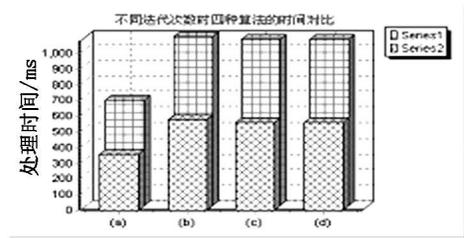


图 6  $n=16, n=30$ 时四种算法的时间对比

## 2 结束语

根据指纹图像在采集过程中噪声产生原因的不同, 对采集的指纹图像的噪声采用 Wiener 滤除, 得到较理想的图像, 又针对指纹图像特有的纹路和细节特征, 采用图像增强技术 Gabor 和各向异性扩散技术对指纹图像进行了预处理分析, 在实验的基础上对这两种预处理方法中各个参数的选择对指纹图像处理的影响进行了对比, 得出了在现有算法基础上的较佳的参数选择。

### 参考文献:

- [1] 柯 丽, 杜 强, 苏 哲. 应用多级维纳滤波的 OCT 图像除噪方法 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 740—744.
- [2] 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.
- [3] Li Hong Yi-fei Wan Anil Jain. Fingerprint image enhancement algorithm and performance [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence 1997, 19 (4): 302—305.

## A Research and Comparison on the Methods of Fingerprint Image Pre-processing

CUI Yuan-yuan<sup>1</sup>, JIANG Xian-gang<sup>2</sup>, XU Lun-lun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Traffic Information Engineering and Control Institute, <sup>2</sup> School of Basic Sciences, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The fingerprint image pre-processing is conducted by different ways according to different reasons. It firstly applies Wiener filtering to the degraded images, and then make an enhancement pretreatment to the recovered images. It focuses on comparison and analysis of the key methods of the Gabor and anisotropic diffusion, and also conducts a comparison research in the parameter selection used in these methods.

**Key words:** Wiener filtering; Gabor filtering; anisotropic diffusion; fingerprint image

(责任编辑: 刘棉玲)

## 喜讯

### 我刊“建筑科学”栏目被评为江西省期刊“优秀栏目”

我刊“建筑科学”栏目在继去年 6 月被评为江西省高校学报“优秀栏目”后, 在去年 11 月江西省新闻出版局举办的江西省期刊评比中再度获得“优秀栏目”称号。这又一次标志着我校学报在期刊质量和建设重点栏目等方面取得了突破性的进展。

重点栏目的建设和成绩的取得必将带动其他栏目乃至整个学报质量和层次的提升。刚刚开完的学报编委会一致呼吁本校的教师和科研人员将自己的优秀论文投向本校学报, 同时推荐和邀请同研究领域的校外专家学者向我刊赐稿。只要全校上下一起来爱护、支持我们的学报, 我刊的质量和层次一定会上一个新的台阶, 我刊在对外宣传本校教学、科研成果、树立学校形象方面将发挥更大的作用。

我们取得的成绩凝结着广大校内外专家学者对我刊的一贯爱护和支持, 在此表示衷心感谢!

学报编辑部