

基于非线性扩散滤波的指纹增强算法¹⁾

程建刚^{1,2} 田捷^{1,2} 何余良^{1,2} 杨鑫^{1,2}

¹⁾(中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室 北京 100080)

²⁾(中国科学院研究生院 北京 100039)

(E-mail: tian@doctor.com)

摘要 根据指纹图像的特性提出了一种利用非线性扩散滤波增强指纹图像以提取细节点的方法. 该算法利用指纹图像的结构张量构造扩散张量, 使得滤波沿着指纹脊线方向扩散. 在求解非线性扩散滤波中最重要的是怎样选取迭代时间和迭代步长. 为了解决这两个问题, 根据扩散张量在大小为 $(2n+1) \times (2n+1)$ 窗口上的离散形式, 分解扩散滤波为 $4n$ 个方向的和, 然后利用托马斯-高斯消元法在每个方向快速求解非线性滤波后的指纹增强图像. 该算法的优点是可以有效地连接断裂脊线, 而不会改变指纹脊线的连续性和奇异性. 在 NIST27 数据库及 FVC2002 数据库上的实验结果表明, 基于非线性扩散滤波的指纹增强算法可以有效地提高提取细节点的性能和指纹匹配率.

关键词 指纹增强, 非线性扩散, 指纹细节点

中图分类号 TP391

Fingerprint Enhancement Algorithm Based on Nonlinear Diffusion Filter

CHENG Jian-Gang^{1,2} TIAN Jie^{1,2} HE Yu-Liang^{1,2} YANG Xin^{1,2}

¹⁾(Key Laboratory of Complex Systems & Intelligence Science, Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²⁾(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

(E-mail: tian@doctor.com)

Abstract This paper proposes a nonlinear diffusion filter to enhance fingerprint image and extract the minutiae according to the characteristic of the fingerprint. The algorithm uses the structure tensor to construct diffusion tensor, and makes the filter diffuse along the ridge direction. In order to improve the computing efficiency, according to the discrete format of the diffusion tensor in a window size of $(2n+1) \times (2n+1)$, the diffusion filter is split into $4n$ directions, after that, in each direction the fingerprint enhancement image is computed with Thomas-Gaussian elimination algorithm. The advantage of this algorithm

1) 国家杰出青年科学基金 (60225008)、国家自然科学基金 (60332010) 和国家自然科学基金青年科学基金 (60303022) 资助

Supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholars of P.R. China (60225008), National Natural Science Foundation of P.R. China (60332010) and Young Scientist's Fund of National Natural Science Foundation of P.R. China

通讯作者 田捷

收稿日期 2003-07-09 收修改稿日期 2003-11-11

Received July 9, 2003; in revised form November 11, 2003

is to connect the breaking ridges in an effective way, and without changing the continuity and singularity of the ridge. Experiments on NIST27 and FVC2002 databases show that the enhancement algorithm based on nonlinear diffusion filter could improve the performance of extracting minutiae and correct fingerprint matching ratio.

Key words Fingerprint enhancement, non-linear diffusion filter, minutiae

1 引言

在信息社会对人的身份进行识别越来越受到人们的关注. 而作为生物特征识别中的指纹识别技术除了传统的法律公安上应用, 还作为计算机确认用户的手段, 以及访问网络资源的口令. 此外, 它也可用于银行 ATM 机和信用卡的使用者、各类智能 IC 卡的双重确认, 以及雇员证明、海关身份鉴定、家用电子门锁等许多方面.

自动指纹识别主要包括指纹特征提取和指纹匹配. 可靠提取指纹细节点是指纹识别的基础, 也是自动指纹识别中的难点. 主要原因是由于受噪声和采集环境等因素的影响, 采集的指纹图像质量比较差, 而细节点作为指纹的局部特征易受噪声的影响. 统计数据表明, 低质量的指纹图像在指纹数据库中约占 10% 的比例. 为了可靠提取指纹细节点, 一般采用图像处理的方法对指纹图像进行增强, 然后二值化图像, 细化图像, 最后在细化图像上提取细节点, 如文献 [1] 中的方法.

指纹增强, 就是对低质量的指纹图像采用一定的算法进行处理, 使其纹线结构清晰化, 尽量突出和保留固有的特征信息而避免产生伪特征信息, 其目的是保证特征信息提取的准确性和可靠性. 迄今为止, 已有不少文献对指纹增强的算法进行了研究^[2~7]. 结合时空域的特性, Hong 等提出了带方向的 Gabor 滤波算法来增强指纹图像^[2], 但是该方法需要估计脊线频率, 而正确估计脊线频率的技术实现难度比较大. 由于指纹增强的目的是提取指纹特征点, Maio 等提出在灰度图像上直接跟踪脊线提取细节点的方法^[3], 但是对于质量差的指纹图像其提取细节点的效果并不理想, 比如在文献 [4] 中, 用 350dpi 的采集仪采集的指纹图像就遗漏 11.8% 的真细节点, 增加 24.2% 的伪细节点. Almansa 提出尺度空间理论来自适应指纹脊线的指纹增强算法^[5], 尽管这种方法在理论上完备, 但是为了估计脊线宽度以及滤波的参数, 模型复杂而耗时过多, 并不适合自动指纹识别系统的要求. Gorman 在文献 [6] 中利用方向滤波器和多分辨技术来增强指纹图像. 以上这些算法都是在图像的空间域里做指纹增强, 也有文献提出在图像的频率域做指纹增强, 例如文献 [7]. 这些方法利用数字化的形式来估计参数和滤波, 其结果是错误地估计指纹参数就会“污染”指纹脊线, 并且这些算法并没有解决指纹中的“折痕”(由断裂的指纹脊线形成) 这样的结构模式. Wu 等在文献 [8] 中设计了一个提取器来提取指纹的“折痕”, 但是, 这种方法并没有用到自动指纹识别系统中, 其原因是他们的提取器是由 12 个方向滤波器组成的滤波簇, 这样的提取器占用内存多, 时间开销也大. 为了避免传统方法的缺点, 本文使用非线性扩散滤波来增强指纹图像, 其优点是指纹滤波沿着脊线方向扩散, 因此能够对指纹图像中的一些“折痕”进行恢复, 即连接断裂的指纹脊线.

非线性扩散滤波算法在分析纹理模式中以及边缘提取中取得了很好的效果^[9,10]. 在图像处理中, 保存边缘以及连接断裂的纹线是用非线性滤波的主要原因, 而低效率是不用非线性滤波的主要原因. 采取用非线性扩散滤波增强指纹图像的方法, 并克服了在使用非线

性滤波中效率不高的缺点. 结构安排如下: 第 2 节介绍非线性扩散滤波; 为了快速增强指纹图像, 分解滤波算法在第 3 节进行讨论; 第 4 节讨论在数据库 NIST27 以及 FVC2002 上的实验结果; 最后对非线性扩散滤波算法进行总结.

2 非线性扩散模型及其分析

以 I 为初始值的非线性扩散方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \operatorname{div}(D\nabla u), \quad (i, j) \in I, \quad t \in (0, +\infty) \\ u(i, j, 0) &= I(i, j), \quad (i, j) \in I, \quad t \in (i, j) \\ \langle D\nabla u, n \rangle &= 0, \quad (i, j) \in \Gamma, \quad t \in (0, +\infty) \end{aligned} \quad (1)$$

上式中 D 是一个对称正定二维矩阵, 称为扩散张量; Γ 是图像 I 的边界, n 是 Γ 的外法向量; ∇ 是梯度算子; $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示内积. 条件 $\langle D\nabla u, n \rangle = 0$ 表示扩散在边缘就停止, 也就是物理意义上的绝缘边界条件. 在物理上 $u(\cdot, \cdot, t)$ 表示能量在经过 t 时刻后能量扩散的状态, 而在图像处理中表示对图像滤波的结果.

由于在一幅指纹图像中, 脊线的弯曲程度不一致, 因此在对指纹图像增强时, 需要根据指纹的局部结构去调整 D , 使得式 (1) 沿着指纹脊线方向扩散. 而反映图像局部结构的方法是用结构张量. 设

$$g_\sigma(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

$$v(i, j, t) = g_\sigma * u(i, j, t) \quad (3)$$

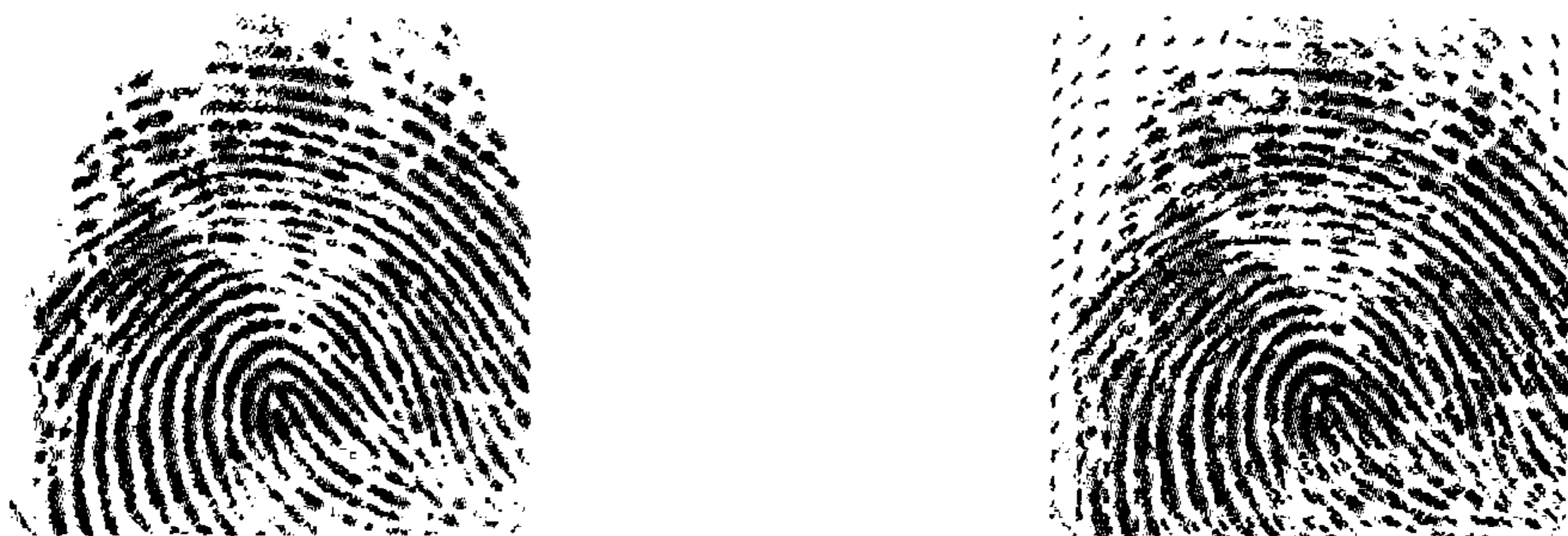
$$S = \begin{pmatrix} a & b \\ d & c \end{pmatrix} = g^\rho * \nabla v \otimes \nabla v = g^\rho * \begin{pmatrix} v_x^2 & v_x v_y \\ v_x v_y & v_y^2 \end{pmatrix}$$

其中 $*$ 为卷积运算, \otimes 表示张量外积, S 称为结构张量, σ 和 ρ 是常量, 并且取 $\sigma = 0.5, \rho = 5$.

结构张量在分析指纹图像时起着非常重要的作用. S 有两个特征向量, 特征值大的特征向量对应于垂直指纹脊线的方向, 而特征值小的特征向量对应于指纹脊线的方向.

设 S 的特征向量 w_2 对应指纹的脊线方向. 因此对每一象素点 $I(i, j)$ 求得对应的特征向量 $w_2 = (w_{21}, w_{22})^T$ 后, 则点 (i, j) 的脊线方向 $O(i, j) \in [0, \pi)$ 为 $O(i, j) = \tan^{-1}(w_{21}/w_{22})$.

图 1 就是根据 w_2 得到的指纹方向场



(a) 原始指纹图像 (Original fingerprint image)

(b) 表示方向场 (Orientation field)

图 1 利用结构张量得到的方向场

Fig. 1 Orientation field obtained by structure tensor

为了使式 (1) 滤波主要沿着指纹脊线方向, 根据结构张量构造扩散张量如下:

$$D = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{21} \\ w_{12} & w_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中 λ_1, λ_2 的取值见文献 [9]. 构造出扩散张量 D 后, 可以用直接显式法求解式 (1)

$$u^{k+1}(i, j) = u^k(i, j) + \Delta t \sum_{m=1,2, n=1,2} L_{mn}^k u^k(i, j) \quad (5)$$

其中 L_{mn} 表示二阶差分.

尽管式 (1) 能够很好的去噪, 但是, 只有在 $\Delta < 0.5$ 的条件下, 式 (5) 才收敛. 为了有效的去除噪声, 不得不进行多次迭代, 因此直接求解式 (1) 计算代价比较大, 不适用于指纹识别对计算时间的要求. 如图 2 所示, 迭代 256 次化费的时间大约 5 分钟.

为了不受 $\Delta < 0.5$ 的限制, 可以采取半隐式的离散形式求解式 (1)

$$(1 - \Delta t \sum_{m=1,2, n=1,2} L_{mn}^k) u^{k+1}(i, j) = u^k(i, j)$$

因为图像是 2 维矩阵, 把上式写成矩阵的形式, 则有

$$(I - \Delta t A(u^k)) u^{k+1} = u^k \quad (6)$$

3 改进的非线性扩散滤波法

为了改进式 (5), 把模型 (1) 改写成下式:]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \int_0^\pi \frac{\partial}{\partial e^\theta} \left(g^\rho \left(\left| \frac{\partial g_\sigma}{\partial e^\theta} * u \right| \right) \frac{\partial u}{\partial e^\theta} \right) d\theta = \sum_{i=0}^{180} \frac{\partial}{\partial e_i} \left(g^\rho \left(\frac{\partial g_\sigma}{\partial e_i} * u \right) \frac{\partial u}{\partial e_i} \right) \quad (7)$$

其中 e_θ, e_i 分别表示 θ 和 i 方向的单位向量. 式 (7) 表示式 (1) 的扩散方程可以表示为在 0 到 180 个方向上扩散的和, 而每个方向上都是一维非线性的滤波. 先考虑一维情况, 假设沿 x 轴方向扩散滤波为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \partial_x (g^\rho (\partial_x g_\sigma * u) \partial_x u)$$

由式 (5), 其半隐式离散迭代算法为

$$u^k = (I - \Delta t A(u^k)) u^{k+1} \quad (8)$$

其中 Au^k 为三对角矩阵. 根据矩阵理论中的 LU 分解算法, 由文献 [11] 知, $A(u^k)$ 可以分解为一个下三角矩阵和一个上三角矩阵的乘积.



图 2 由式 (5) 滤波图 1(a) 中的结果, 迭代 256 次

Fig. 2 Filter the image (a) in figure 1 through equation (5), iterated 256 times

由于 $A(u^k)$ 为三对角矩阵, 根据托马斯 - 高斯消元法就可以快速解出 u . 并且式 (8)

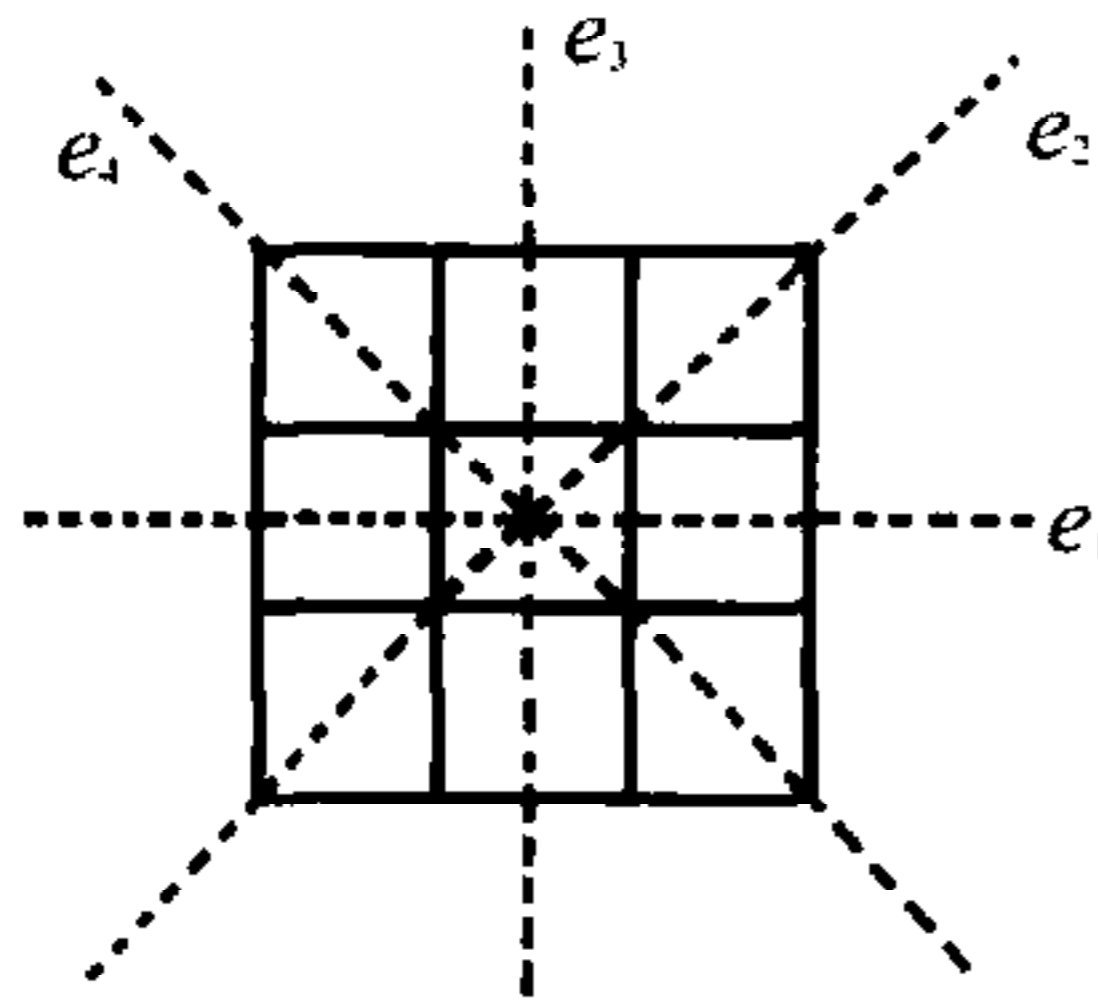


图 3 3×3 窗口确定的 4 个方向

Fig. 3 The four directions in a 3×3 window

中的 Δt 不必小于 0.5, 其速度快并且稳定^[11].

为了对二维指纹图像进行有效的去噪, 根据式 (7), 我们的思想是分解式 (1) 为一些一维的组合, 而对每个一维的情况可以用式 (8) 快速求解.

考虑在 $(2n + 1) \times (2n + 1)$ 的窗口上, 共有 $4n$ 个方向, 则式 (1) 可以分解为 $4n$ 个方向之和. 以 3×3 窗口为例, 在 3×3 的窗口上只有 4 个方向, 如图 3 所示.

$$e_i = (\cos \theta_i, \sin \theta_i)^T, \quad \theta_i = \pi * i / 4, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

根据式 (7), 式 (1) 可以变为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \text{div}(D\nabla u) = \partial_{e_1}(\alpha_1 \partial_{e_1} u) + \partial_{e_2}(\alpha_2 \partial_{e_2} u) + \partial_{e_3}(\alpha_3 \partial_{e_3} u) + \partial_{e_4}(\alpha_4 \partial_{e_4} u) \\ &= \sum_{i=1}^4 \alpha_i (u_{xx} \cos^2 \theta_i + 2u_{xy} \sin \theta_i \cos \theta_i + 2u_{yy} \sin^2 \theta_i) \end{aligned} \quad (9)$$

而

$$\text{div}(D\nabla u) = au_{xx} + 2bu_{xy} + cu_{yy} \quad (10)$$

比较式 (9) 和 (10), 有

$$\alpha_1 = \eta - b, \quad \alpha_2 = a - \eta, \quad \alpha_3 = c - \eta, \quad \alpha_4 = \eta + b \quad (11)$$

其中 η 是一个待定的数, 只需保证 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 为非负即可. 本文取

$$\eta = \frac{b + \min(a, c)}{2}$$

这样, 在每个方向上用式 (8) 求解就可以得到最终的 u . 因此, 我们的算法如下:

- 1) 对每一像素点, 由其结构张量根据式 (4) 构造扩散张量;
- 2) 设窗口大小为 $(2n + 1) \times (2n + 1)$, 总共 $4n$ 个方向, 根据式 (9)~(11) 求出其一维分解;
- 3) 对 $i = 1, \dots, 4n$, 根据式 (8) 求解出 $u_i, u_i^k = (I - \Delta t A_i(u_i^k))u_i^{k+1}$;
- 4) 计算 $u = \frac{1}{4n} \sum_{i=1}^{4n} u_i$.



图 4 三次迭代后指纹滤波图

Fig. 4 Filtered image after 3 iterations

以上算法解决了模型 (1) 中两个固有的缺点: 1) 时间步长 Δt 不再受 $\Delta t < 0.5$ 的约束; 2) 计算时间大大缩短, 即把二维分解为一维, 然后利用 LR 分解矩阵, 用高斯消元法快速求出滤波后的指纹图像.

为了加速计算, 在算法开始对每个像素求结构张量时, 需要作高斯卷积, 首先创建高斯函数查找表, 然后利用滑动窗口技术提高运算速度. 如图 4 所示滤波结果.

经过以上的处理后, 利用二值化和细化算法就可以提取出细节点.

4 实验和结果评估

在缺少客观参考数据的情况下, 衡量指纹细节点提取算法的准确性非常困难. 文献 [1] 提出了两种方法: 第一种是计算 Goodness Index(GI), 这种方法的基础是要靠专家首先提取出细节点; 第二种是把提取细节点的方法加到指纹识别系统中, 衡量指纹识别性能是否提升. 文献 [2] 提出了一种统计的方法来评价其算法和别的算法在提取细节点方面的优劣, 并且这种统计方法可以间接求出 GI. 鉴于此, 衡量本文的指纹细节点提取算法如下: 首先测试算法的计算效率; 第二是用文献 [2] 的统计方法; 第三是把本文的提取细节点方法加入自动指纹识别系统中.

4.1 计算效率和增强对比

所有的测试都在 Intel Celeron1.2GHz 的 PC 上进行, 其内存大小为 256M. 算法在 FVC2002 及 NIST27 上的计算时间如表 1.

表 1 算法提取细节点的平均时间
Table 1 The average time using our method to extract minutiae

数据库	FVC02 db1_a	FVC02 db2_a	FVC02 db3_a	FVC02 db4_a	NIST27
图像大小	388×374	296×560	300×300	288×384	800×768
平均处理时间	1.358s	1.548s	0.862s	1.062s	5.671s

从表 1 中可以看出, 若指纹图像比较大, 例如在 NIST27 上, 我们的算法更适用于离线部分. 而对 FVC2002 这样的数据库, 我们的算法能满足在线指纹识别的要求. 图像增强的对比结果如图 5 所示. 从图 5 中可看出本文算法更能保持脊线的完整性.

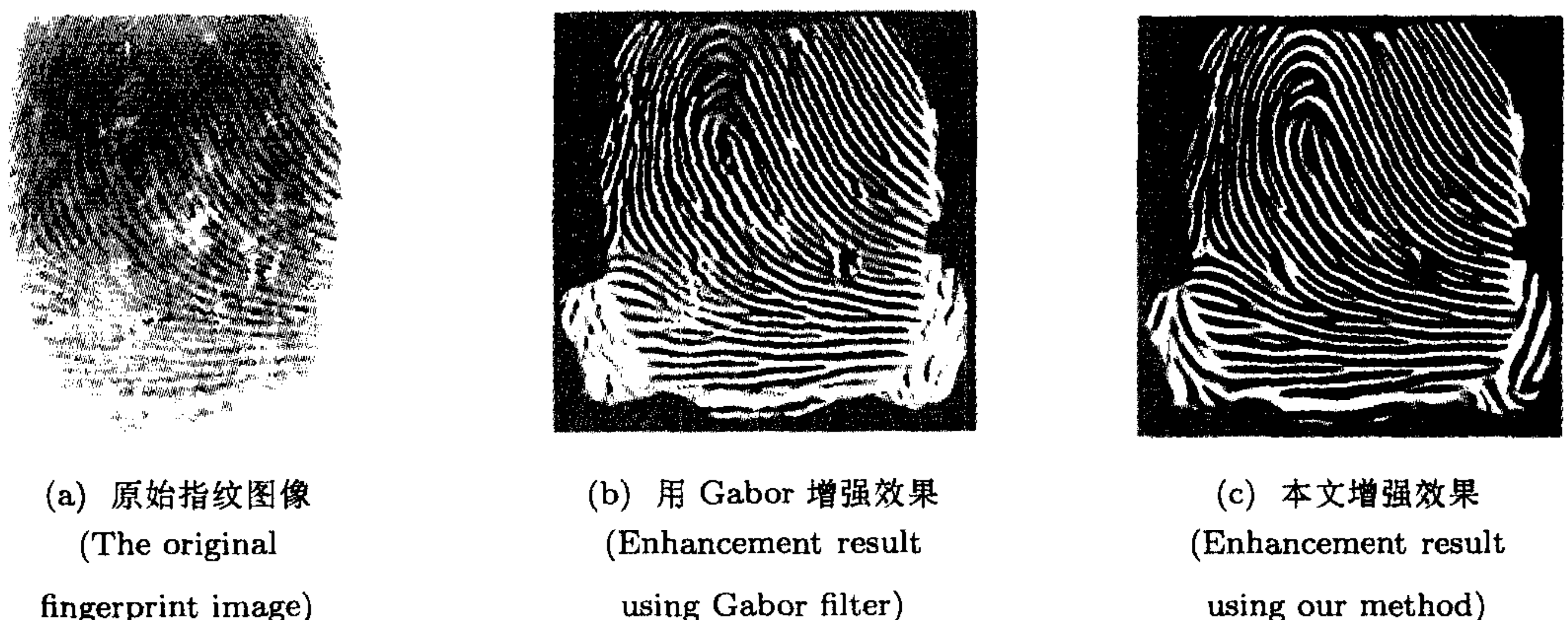


图 5 两种方法的指纹增强效果

Fig. 5 Result of image enhancement by two methods

4.2 性能评价和比较

设指纹数据库上专家手工提取出的细节点集为 M . 本文算法提取的细节点集为 E . 为了客观评价性能指标, 定义如下集合:

$FP = E - M$ 为错误细节点集; $FN = M - E$ 为遗漏细节点集; $LC = CC \cup FC = E \cap M$ 为正确提取的细节点. 这里 CC 表示位置和类型都正确的细节点, FC 表示位置正确而类

型错误的细节点. 一些指纹识别系统是不用细节点类型信息的, 因此就可以仅仅考虑 LC . 设 M_a 是提取的细节点, 而 M_e 是专家手工提取的细节点, 若 M_a 落在 M_e 的一个邻域中, 则认为细节点 M_a 和 M_e 是同一细节点. 这里取的邻域大小为 8.

为了反应和专家提取细节点集的一致程度, 需要定义以下参数.

FN/M : 算法遗漏细节点的比例. 若假设 6~12(约占一幅指纹细节点的 10%) 对细节点匹配上, 就认为两幅指纹匹配上, 则 FN/M 比例稍高一些也可允许.

FP/E : 是错误细节点的比例.

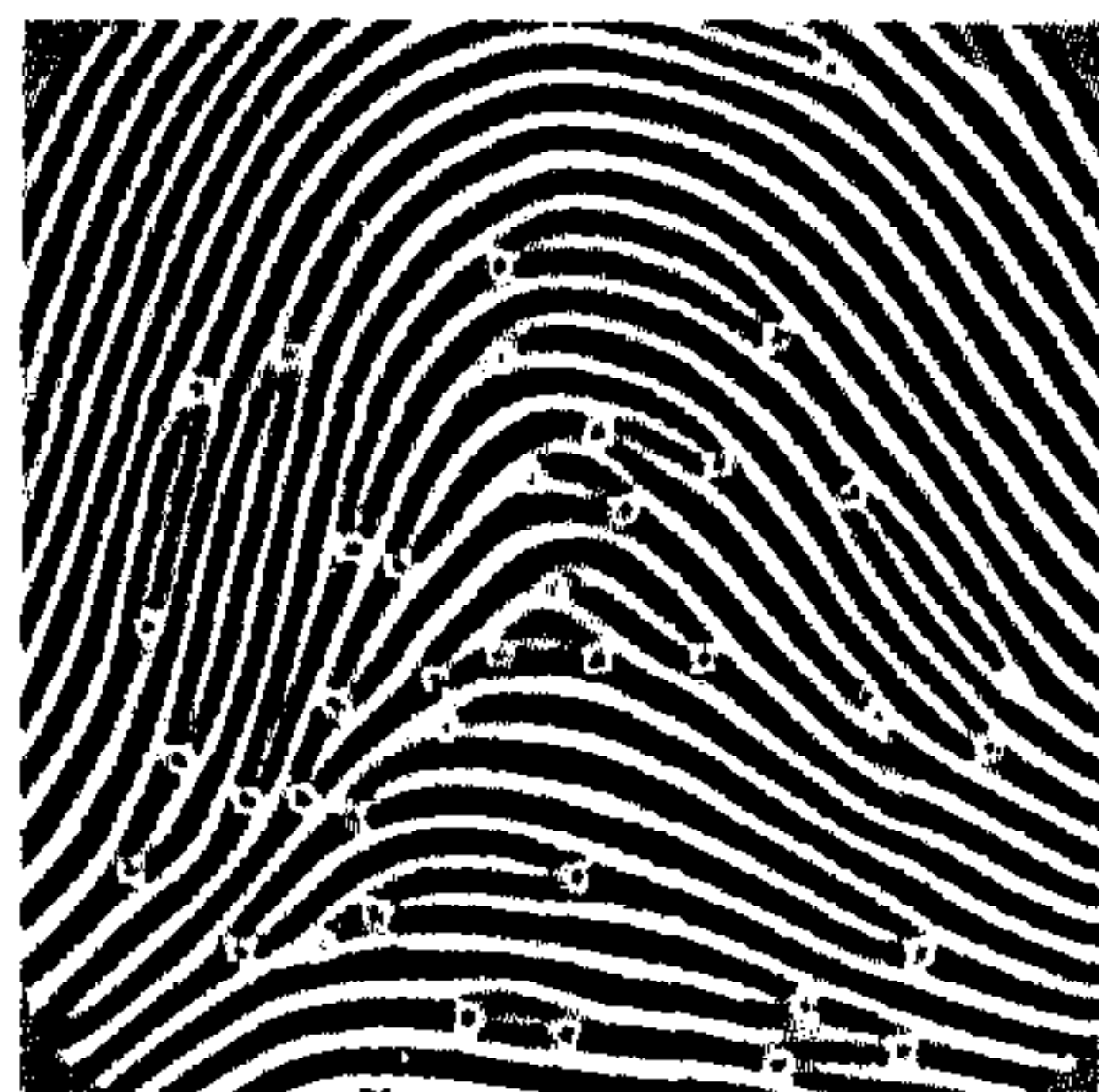
LC/E : 正确提取细节点的比例. LC/E 比例越高, 提取的细节点越正确, 则两幅指纹越易匹配上.

文献 [3] 在 14 幅图像上对 5 种提取细节点的方法进行了性能比较. 这 14 幅图像都由专家手工提取出细节点, 其中 2 幅图像手工提取的细节点可以见文献 [3], 而其它 12 幅

表 2 细节点提取算法的性能比较
Table 2 The performance coparison of the minutiae extraction algorithms

	IM Image 1 and 13		
	A	G	Q
FN/M	0.00%	28.00%	12.00%
FP/E	3.60%	3.60%	8.30%
FC/E	20.00%	19.60%	9.70%
CC/E	19.90%	76.80%	81.90%

图像的细节点信息并没有公开. 由于不同的人手工提取细节点会不同, 鉴于此, 为了和文献 [3] 的方法作一个相对比较, 文献 [5] 仅在公开的 2 幅图像上进行比较, 本文首先也在这两幅图像上进行对比. 记文献 [3] 的方法为 A, 文献 [5] 的方法为 G, 而本文方法记为 Q. 图 6 为本文算法提取的细节点. 其性能比较如表 2 所示.



(a) No.1



(b) No.13

○ 表示末稍点

(Represents the end points)

□ 表示分叉点

(Represents the bifurcation points)

图 6 算法提取的细节点

Fig. 6 Extracted minutiae by our algorithm

和文献 [3,5] 相比, 本文更准确的提取出细节点, 并且在指纹识别系统中, 在本质上比率 FC/E 和 CC/E 更影响正确识别指纹的性能.

为了进一步估计本文的增强算法, 利用 NIST27 指纹数据库进行测试, NIST27 包含 258 幅油墨采集的指纹, 并且所有指纹图像的细节点坐标方向都由指纹专家标记出. 图 7 为本文算法 Q 与专家提取的细节点示意图. 表 3 是其中 10 幅指纹图像提取的细节点情况.

从表 3 可以看出, 正确提取的细节点大约 85% 和专家提取的一致. 根据 NIST27 数据库的特点, 若平均每幅指纹图像包含 80 个细节点, 则其中 68 个细节点是正确提取的.



○ 专家提取出的细节点 (Represents the expert extracted minutiae) □ 本文算法提取的细节点 (Represents the minutiae extracted by our method)

图 7 本文算法与专家提取的细节点示意图

Fig. 7 The example applying on method and expert to extracted by our method

表 3 本文算法在 NIST27 上提取的细节点
Table 3 The extracted minutiae in database NIST27 by our method

	Image1	Image2	Image3	Image4	Image5	Image6	Image7	Image8	Image9	Image10	平均值	方差
M	106	99	101	120	142	112	88	92	102	109		
E	97	115	109	118	134	109	77	87	115	130		
FN	15	17	14	18	15	21	17	10	11	10		
FP	6	33	22	16	7	18	6	5	24	31		
CC	91	82	87	102	127	91	71	82	91	99		
FN/M	0.142	0.172	0.139	0.15	0.107	0.188	0.193	0.109	0.108	0.092	0.14	0.036
FP/E	0.062	0.287	0.202	0.136	0.052	0.165	0.078	0.057	0.209	0.238	0.149	0.085
CC/E	0.938	0.713	0.798	0.864	0.948	0.835	0.922	0.943	0.791	0.762	0.8514	0.085

4.3 识别系统的评价

为了进一步测试本文算法, 用本文算法增强 FVC2002 数据库的图像, 然后用匹配算法测试自动指纹识别系统的性能, 这样间接反映本文算法的性能. 首先用本文算法增强图像提取细节点, 然后用文献 [9] 的三角匹配算法在 FVC2002 上进行测试, 得到在 FVC2002 4 个数据库上的识别性能, 记为 $FMatch$. 同时也用文献 [2] 的 Gabor 滤波增强指纹图像, 并在此基础上用三角匹配进行识别, 记为 $FGabor$. 在我们的三角匹配算法中只用细节点的位置、方向和类型这 3 个参数, 而没有用穿越脊线的数目. 另外, 为了和别的算法进行比较, 我们选出参加 FVC2002 所有科研机构的算法, 并和这些科研机构中最好的一个 PA24 进行比较. 表 4 列出了在 4 个数据库上的对比结果.

表 4 算法在 FVC2002 数据库上的综合性能比较
Table 4 Comprehensive comparison in FVC2002 databases among difference method

	Db1			Db2			Db3			Db4		
	EER	FMR100	ZeroFMR	EER	FMR100	ZeroFMR	EER	FMR100	ZeroFMR	EER	FMR100	ZeroFMR
PA24	2.36	2.82	4.64	2.35	2.64	5.36	6.62	9.68	20.43	3.7	5.54	17.71
$FMatch$	2.48	3.21	18.17	2.9	9.96	21.96	5.13	18.21	23.35	4.39	15.96	21.82
$FGabor$	4.95	13.42	16.28	1.77	4.35	5.46	9.25	18.42	22.03	5.67	13.96	25.5

从表 4 可以看出, 以本文增强算法为基础的自动指纹识别算法和来自于科研机构的指纹识别性能相比, 同样具有竞争力.

5 结论

针对指纹图像中细节点提取, 提出一种基于非线性滤波的指纹增强算法. 修改了扩散滤波方程的离散形式, 可以有效地处理指纹图像的噪声. 实验结果表明, 扩散方程在指纹识别中完全可以有效地提取出指纹细节点. 基于非线性扩散滤波的指纹增强算法, 除了有效地连接一些断裂的指纹脊线外, 和别的算法相比, 这种方法参数的选择比较简单, 仅仅需要考虑高斯函数的方差. 另外, 本文的算法不仅仅对指纹图像有效, 而且还可以对其它的图像, 比如医学图像进行有效滤波.

References

- 1 Yuliang He, Jie Tian, Xiping Luo, Tanghui Zhang. Image Enhancement and Minutia Matching In Fingerprint Verification. *Pattern Recognition Letter*, 2003, **24**: 1349~1360
- 2 Lin Hong, Yifei Wan, Anil Jain. Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation. *IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(8): 777~789
- 3 Dario Maio, Davide Maltoni. Direct Gray-Scale Minutiae Detection In Fingerprints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, **19**(1): 27~40
- 4 Dario Maio, Davide Maltoni. Neural Network Based Minutiae Filtering Fingerprints. In: Proceedings of 14th International Conference on Pattern Recognition. Brisbane: IEEE CS Press, 1998. 1654~1658.
- 5 Andrés Almansa, Tony Lindeberg. Fingerprint Enhancement by Shape Adaptation of Scale-Space Operators with Automation Scale Selection. *IEEE Transactions On Image Processing*, 2000, **9**(12): 2027~2042
- 6 L O'Gorman, J V Nicherson. An Approach to Fingerprint Filter Design. *Pattern Recognition*, 1989, **22**(1): 29~38
- 7 B G Sherlock, D M Monro, K. Millard. Fingerprint Enhancement by Directional Fourier Filtering. *IEEE proceedings of Conference on Vision, Image and Signal Processing*, 1994, **141**(2): 87~94
- 8 Chenyu Wu, Jie Zhou, Zhao-qi Bian, Gang Rong. Robust Crease Detection in Fingerprint Images. In: Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition Vol2. USA: IEEE CS Press, 2003. 505~510
- 9 Joachim Weickert, Coherence-enhancing Diffusion Filtering. *International Journal of Computer Vision*, 1999, **31**: 111~127
- 10 Perona P Malik J. Scale Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, **12**: 629~639
- 11 LI Qing-Yany, WANG Neng-Chao, YI Da-Yi. Numerical Value Analysis. Huhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1994 (in Chinese)
- 12 Xudong Jiang, Yau Wei-Yun. Fingerprint Minutiae Matching Based on the Local and Global Structures. In: Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition, 2. Barcelona, Spain: 2000. 1042~1045

程建刚 中科院自动化所博士生, 主要研究领域为图像处理, 模式识别和生物特征识别.

(**CHENG Jian-Gang** Ph.D candidate at Institute of automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include image processing, pattern recognition and biometrics.)

田捷 中科院自动化所博士生导师, 主要研究领域为医学图像处理, 模式识别以及生物特征识别.

(**TIAN Jie** Professor and Ph.D. director at Institute of automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include medical image processing, pattern recognition and biometrics.)

何余良 中科院自动化所博士生, 主要研究领域为图像处理, 模式识别和生物特征识别.

(**HE Yu-Liang** Ph.D candidate at Institute of automation, Chinese Academy of Sciences. His research interests include image processing, pattern recognition and biometrics.)

杨鑫 博士, 中国科学院副研究员. 主要研究领域为模式识别和生物特征识别及其应用.

(**YANG Xin** Ph.D, associate professor at Institute of automation, Chinese Academy of Sciences. Her research interests include pattern recognition, biometrics and its application.)