

文章编号: 2095-2163(2019)05-0320-04

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

# 基于各向异性扩散和冲击滤波的指纹图像增强算法

王丹, 张小波

(西安石油大学 计算机学院, 西安 710065)

**摘要:** 指纹图像增强是指纹识别过程的预处理步骤中重要的一环, 目的是修复退化的指纹图像, 提高指纹图像的对比度以及连接断裂的纹线。在仔细研究各向异性扩散算法之后, 结合冲击滤波算法, 提出一种基于各向异性扩散和冲击滤波的两阶段式指纹图像增强算法。实验结果表明, 该方法既能够保留相干增强扩散的修补指纹图像间断线的积极成果, 又能增强指纹图像的边缘和对比度。

**关键词:** 各向异性扩散; 冲击滤波; 指纹增强; 对比度

## Fingerprint image enhancement algorithm based on shock filtering and anisotropic diffusion

WANG Dan, ZHANG Xiaobo

(School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**[Abstract]** Fingerprint image enhancement is an important part of the pre-processing step of the fingerprint recognition process. The purpose is to repair the degraded fingerprint image, improve the contrast of the fingerprint image and connect the broken lines. After careful study of the anisotropic diffusion algorithm, combined with the shock filtering algorithm, a two-stage fingerprint image enhancement algorithm based on anisotropic diffusion and shock filtering is proposed. The experimental results show that the method can not only preserve the advantages of repairing the ridge gap of coherent enhanced diffusion, but also sharpen the edge of the fingerprint ridge and enhance the contrast of the ridge line.

**[Key words]** anisotropic diffusion; shock filtering; fingerprint enhancement; contrast ratio

## 0 引言

指纹图像增强是在不破坏指纹脊线结构的基础上, 对采集的指纹图像进行一定的运算, 保留指纹的特征点信息。指纹图像增强的效果将直接影响指纹图像的质量, 对后期指纹特征点的提取和指纹匹配的效率有很大帮助, 因此一个好的指纹增强算法是提高指纹识别可靠性的根本保证。到目前为止已有不少指纹图像增强算法, 如 Hong 等人<sup>[1]</sup>提出的 Gabor 滤波器, 该算法结合空域和频域的特征来增强指纹图像, 但需要正确估计脊线的频率, 而计算脊线频率仍存有较大的难度。Maio 等人<sup>[2]</sup>提出直接在灰度图像上追踪脊线提取细节点的方法, 但该算法对质量较差的指纹图像仍有较大局限性。与此同时研究可知, 基于各向异性扩散的算法由于其区别于传统算法保留边缘的优越性, 在近近年来广受关注, 如郝玉峰等人<sup>[3]</sup>提出的各向异性逆扩散算法, 该算法通过增强指纹图像中的脊谷线对比度增强指纹图像的特征点。苏永利等人<sup>[4]</sup>对扩散张量进行了研究, 该算法兼顾了去噪和保边这一矛盾点的两

方面等等。

本文在综合现有研究的基础上, 提出了基于各向异性扩散和冲击滤波的两阶段式的指纹图像增强算法。文中阐述了各向异性扩散和冲击滤波的基本原理, 结合这 2 种算法各自的优势, 利用新算法对指纹图像进行增强处理, 最终给出实验结果和结论。对此拟展开研究论述如下。

## 1 各向异性扩散和冲击滤波的基本原理

### 1.1 各向异性扩散

Weickert<sup>[5]</sup>在 1999 年提出了相干增强各向异性扩散 (CED) 算法, 其基本思想是使用结构张量引导非线性扩散, 平滑和增强纹理相干方向的结构。该方法的方程为:

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}(\mathbf{D} \nabla u), \quad (1)$$

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y), \quad (2)$$

其中, 式(2)为初始条件,  $u_0(x, y)$  为原始图像; 式(1)中,  $t$  为扩散时间;  $u$  表示时刻  $t$  的扩散图像; 扩散张量  $\mathbf{D}$  是一个正定对称矩阵, 控制梯度方向和

切线方向的扩散。

扩散张量  $\mathbf{D}$  可通过结构张量  $\mathbf{J}$  来构造,结构张量  $\mathbf{J}$  可由下式计算求得:

$$\mathbf{J}(\nabla u) = G_\sigma * (\nabla u \nabla u^T) = \begin{pmatrix} G_\sigma * u_x u_x & G_\sigma * u_x u_y \\ G_\sigma * u_x u_y & G_\sigma * u_y u_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中,  $G_\sigma$  为标准差  $\sigma$  的高斯函数; \* 表示卷积;  $u_x$  和  $u_y$  是图像  $u$  关于  $x$  和  $y$  的一阶导数。运用特征分解,  $\mathbf{J}$  可表达为:

$$\mathbf{J}(\nabla u) = (v_1 \ v_2) \begin{pmatrix} u_1 & 0 \\ 0 & u_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1^T \\ v_2^T \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中,  $v_1$  和  $v_2$  是结构张量  $\mathbf{J}$  的特征向量,  $\mathbf{J}$  的特征值  $u_1, u_2$  可表示为:

$$u_1 = \frac{1}{2}(J_{11} + J_{22} + \sqrt{(J_{11} - J_{22})^2 + 4J_{12}^2}), \quad (5)$$

$$u_2 = \frac{1}{2}(J_{11} + J_{22} - \sqrt{(J_{11} - J_{22})^2 + 4J_{12}^2}), \quad (6)$$

扩散张量  $\mathbf{D}$  在计算时会用到如下公式:

$$\mathbf{D} = \mathbf{R}^T \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \mathbf{R} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, \quad (7)$$

其中,矩阵  $\mathbf{R}$  的列向量是矩阵  $\mathbf{J}$  的特征向量。 $\mathbf{D}$  的特征值  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  可通过下式来计算:

$$\lambda_1 = c \quad (8)$$

$$\lambda_2 = \begin{cases} c, & \text{if } u_1 = u_2; \\ c + (1 - c) \exp\left(\frac{-k}{(u_1 - u_2)^2}\right), & \text{else.} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $c \in (0, 1)$ ;  $k > 0$  为阈值参数,用于调控结构张量的平滑程度;当  $|u_1 - u_2| \rightarrow 0$ 、即当前像素点处于平滑区域时,为各向同性扩散;扩散率为常数  $c$ 。CED 在执行过程中,特征值  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  是沿着 2 个特征方向的扩散系数,2 个参数不同的取值可以构造不同的各向异性扩散方程。

### 1.2 冲击滤波

冲击滤波本质上是一种图像增强方法。其方程为:

$$u_t = - \text{sign}(\Delta u) | \nabla u |, \quad (10)$$

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y), \quad (11)$$

其中,公式(11)为初始条件,  $u_0(x, y)$  为原始图像。方程(10)中,  $u_t$  表示关于  $t$  的一阶偏导数;非线性扩散项  $| \nabla u |$  中,  $\nabla u = (u_x \ u_y)^T$  表示  $u$  的梯度;  $\Delta u = u_{xx} + u_{yy}$  表示  $u$  的拉普拉斯算子;  $\text{sign}(\Delta u)$  是边缘检测项。

在提高冲击滤波器的性能研究方面, Osher 等人<sup>[6]</sup>提出了沿着梯度方向  $\eta$  的二阶方向导数  $u_{\eta\eta}$ ,

并通过实验证明了  $u_{\eta\eta}$  的边缘检测性能优于  $\Delta u$ 。其基本思想是,计算图像目标的边缘点沿梯度方向  $\eta$  的二阶方向导数,然后判断该边缘点前后的二阶方向导数的符号,当符号为正时,进行形态学腐蚀运算;当符号为负时,进行形态学膨胀运算。该滤波器的偏微分方程为:

$$u_t = - \text{sign}(u_{\eta\eta}) | \nabla u |, \quad (12)$$

其中,  $\eta$  表示梯度  $\nabla u$  的方向;  $u_{\eta\eta}$  表示  $u$  沿着梯度方向  $\eta$  上的二阶方向导数,其计算方法为:

$$u_{\eta\eta} = \frac{u_{xx}u_x^2 + 2u_{xy}u_xu_y + u_{yy}u_y^2}{u_x^2 + u_y^2}, \quad (13)$$

为了使滤波过程更加稳定, Alvarez 等人<sup>[7]</sup>使用  $v_{\eta\eta}$  来代替方程(12)中的  $u_{\eta\eta}$ , 即:

$$u_t = - \text{sign}(v_{\eta\eta}) | \nabla u |. \quad (14)$$

其中,  $v = G_\sigma * u$ ,  $G_\sigma$  为标准差  $\sigma$  的高斯函数; \* 表示卷积。

为了更准确地获取图像的梯度方向, Weickert<sup>[8]</sup>在方程(14)的基础上,提出使用结构张量  $\mathbf{J}(\nabla u) = G_\sigma * (\nabla u \nabla u^T)$  来计算梯度  $\nabla u$ , 其中  $\eta$  描述了在指纹图像中对比度变化最大的方向。该方向与指纹线的方向正交。方向  $\eta$  保证滤波器产生和图像纹理的流动方向正交的冲击。在这个冲击方向上,对比度差异最大化。沿图像纹理的垂直流动方向,发生膨胀或腐蚀。

## 2 相干增强和冲击滤波的合成算法

在 FVC2004 的数据库中随机选取一张指纹图像进行相干扩散增强处理,研究得到的测试结果如图 1 所示。

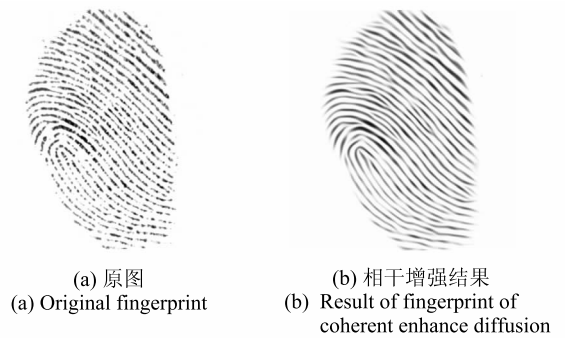


图 1 原图和相干增强结果图

Fig. 1 Original fingerprint and result of fingerprint of coherent enhance diffusion

从图 1(a)和图 1(b)的对比中可以看出,原始图像中断裂的指纹在经过 CED 增强后,断裂的脊线已经被修复。但是,指纹图像的对比度也被降低了,并且在脊线边缘部分呈现模糊的现象。由 1.2 节可

知,冲击滤波能够锐化图像的边缘。因而,依据这两种算法的特点,本文将采用两阶段式的算法对输入的指纹图像进行增强。设计研发步骤可阐释如下。

(1)输入退化的指纹图像。

(2)先对输入的图像进行第一阶段处理:利用输入图像的梯度,使用方程式(3),计算出结构张量的特征向量和特征值,并利用结构张量构造扩散张量,然后根据得到的扩散矩阵将方程式(1)离散化为:

$$u(x, y, t + 1) = u(x, y, t) + \Delta t \operatorname{div}(\mathbf{D} \nabla u(x, y, t)). \quad (15)$$

由此得到初始的增强图像。

(3)再将初始增强的图像进行第二阶段处理:利用初始增强图像的梯度代入到方程式(14)进行计算,经过一定次数的迭代后,锐化指纹纹理的边缘,得到最终的增强图像。

算法第一阶段和 CED 方法相同,在执行过程中,由方程式(8)和(9)可知,扩散度  $\lambda_2$  会随着  $|u_1 - u_2|$  的值增加而增大,从而使指纹图像边缘区域将会沿着纹理流动的方向扩散。而在处理平滑区域时,  $|u_1 - u_2|$  的值较小,扩散度  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  都会很小,该区域的处理方法类似于高斯平滑。算法的第二阶段和冲击滤波方法相同,经过多次迭代后,使指纹图像边缘变得清晰,该过程近似于卷积。

从整个算法来看,本文算法第一阶段是将指纹图像中脊线的断裂部分连接起来,第二阶段对相干扩散增强后的指纹图像进行冲击滤波,在边缘处产生较大的冲击,锐化指纹图像的边缘并增强对比度。在修复指纹图像中断裂脊线的同时,也增强了脊线边缘以及脊线和谷线的对比度。

### 3 实验结果与分析

为了公平比较,测试中,本文方法第一阶段和 CED 方法使用相同的参数,所涉及的参数设置为:标准偏差  $\sigma = 4$ ,扩散率  $c = 0.001$ ,阈值  $k = 1$ ,时间步长  $\Delta t = 0.15$ ,迭代次数 = 15。实验对比结果如图 2 所示。其中,图 2(a)为退化的指纹图像,图 2(b)为 CED 方法的实现结果。从图 2(a)和图 2(b)的对比中可以看出,CED 方法完成了中断指纹脊线的连接,但和原始图像相比,指纹图像的对比度明显降低。对比图 2(b)和图 2(d),本文的增强算法在增强图像对比度方面获得了比 CED 方法更好的效果。

算法的第二阶段设置的参数值和冲击滤波的参数值相等,所涉及的参数值设置为:标准偏差  $\sigma =$

0.5,迭代次数 = 15。冲击滤波的实现结果如图 2(c)所示。对比图 2(a)和图 2(c),冲击滤波后的指纹图像增强了脊线边缘和对比度,但脊线部分仍有断裂。对比图 2(d),本文算法增强后的图像不仅将脊线的间隙弥补上,也兼容了冲击滤波锐化图像边缘和增强脊谷线对比度的优势。

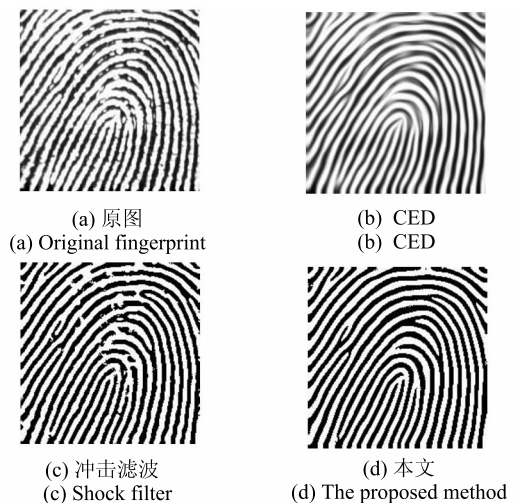


图 2 结果图的对比

Fig. 2 Comparison of results of fingerprint

### 4 结束语

本文提出了基于各向异性扩散和冲击滤波相结合的指纹图像增强算法。该算法首先对退化的指纹图像进行各向异性扩散增强,然后在增强后的指纹图像上进行冲击滤波,从而保留了各向异性扩散修补断裂纹线的积极成果。通过冲击滤波锐化了指纹图像的脊线边缘,同时提高了指纹图像的主观质量,避免了 Weickert<sup>[5]</sup>的 CED 方法增强图像时出现的对比度降低的现象。

### 参考文献

- [1] HONG Lin, WAN Yifei, JAIN A K. Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20 (8): 777-789.
- [2] MAIO D, MALTONI D. Direct gray-scale minutiae detection in prints [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19 (1): 27-40.
- [3] 郝玉峰,袁春望.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):258-262.
- [4] 苏永利,张博,张书玲.各向异性张量逆扩散指纹图像增强方法[J].计算机工程与应用,2009,45(31):180-182.
- [5] WEICKERT J. Coherence - enhancing diffusion filtering [J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 31 (2/3): 111-127.