

文章编号:1007-2780(2018)09-0801-07

一种指纹奇异点区域图像增强算法

席诗琼, 韩 胜, 耿卫东*

(南开大学 光电子薄膜器件与技术研究所 光电子薄膜器件与技术天津市重点实验室

光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要: 指纹图像奇异点附近区域的增强一直是指纹图像增强的难点, 针对 Separable Gabor 滤波会破坏指纹邻近奇异点区域的纹线结构, 方向傅里叶滤波在一般区域修复指纹纹线效果不明显这一问题, 本文融合两种算法的优势, 提出一种新的滤波方法 (FS-Gabor)。先对指纹图像进行预处理, 得到指纹的方向、频率信息和掩膜信息。接着找出指纹图像的奇异点, 并在奇异点附近标记出一定大小区域。最后根据像素点的位置采用不同的滤波方法。同时, 本文提出了一种改进的指纹图像频率估计方法, 扩大了指纹图像有效区域面积。实验结果表明, 经本文方法滤波的指纹图像的 EER (Equal Error Rate) 比方向傅里叶滤波低 26%, 比 Separable Gabor 低 49%。

关键词: 指纹增强; 方向傅里叶滤波; Separable Gabor; 指纹奇异点

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183309.0801

Fingerprint singularity region image enhancement algorithm

XI Shi-qiong, HAN Sheng, GENG Wei-dong*

(Key Laboratory of Photo-Electronics Thin Film Devices and Technique of Tianjin,
Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology,
Ministry of Education, Institute of Photo-electronics Thin Film Devices and Technique,
Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Enhancement of fingerprint image near the singularity point is a big challenge in the fingerprint image enhancement. However, the ridge structure near the singular point of the fingerprint can be destroyed by the current Separable Gabor filter algorithm. And the performance in repairing the fingerprint ridge is bad by the current directional Fourier filter algorithm. These result in the bad performance in fingerprint image enhancement of the current Separable Gabor filter algorithm and Fourier filter algorithm. In order to improve the performance in the fingerprint image enhancement, this paper combines the advantages of the two algorithms and proposes the Fourier Separable Gabor algorithm (FS-Gabor). In the proposed FS-Gabor algorithm, the fingerprint image is preprocessed to obtain the fingerprint direction, frequency information and mask information firstly. Then in order to

收稿日期: 2018-02-26; 修订日期: 2018-06-06.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61372060); 中央高校基本科研业务费

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61372060); Fundamental Research Funds for the Central Universities

* 通信联系人, E-mail: gengwd@nankai.edu.cn

repair the fingerprint ridge, the algorithm marks the area near the singular point as the aim filter area in the fingerprint image. Finally, different filtering methods are chosen to obtain the aim fingerprint image according to the position of the pixel. In addition, in order to expand the effective area of fingerprint image, an improved fingerprint image frequency estimation method is proposed in the FS-Gabor algorithm. According to the experiment results, it is indicated that the EER of fingerprint image filtered by the FS-Gabor algorithm is 26% lower than the directional Fourier filter algorithm and 49% lower than the Separable Gabor algorithm.

Key words: fingerprint enhancement; directional Fourier filter; separable Gabor; fingerprint singular point

1 引言

指纹特征点的提取很大程度依赖于指纹图像的质量^[1]。然而,由于手指的皮肤状况(过干或过湿),传感器噪声和伤疤等原因,有相当一部分的指纹图像质量较低^[2]。利用图像增强技术改善指纹图像的结构清晰度,在指纹识别过程中就显得十分重要^[3-5]。然而由于指纹奇异点附近指纹纹线曲率较大,给指纹图像增强过程增加了许多难度。

Gabor 滤波能够修复断裂和错误粘连的纹线,但是 Gabor 滤波有两点不足,一是计算量太大;二是对方向依赖性太强,这就使得它在指纹方向变化较为平缓的一般区域滤波效果很好,但是在指纹奇异点附近,由于指纹纹线的方向变化较快,使得它会破坏指纹的纹线结构。

方向傅里叶滤波将滤波器的角带宽设为与像素点奇异点距离的分段线性函数,因此在奇异点附近滤波效果良好。然而它假定纹线的频率是固定的,否则滤波过程会产生过多的预滤波图像,使计算量成倍增加。在指纹图像中,指纹频率并非一成不变,不同区域的指纹图像频率会缓慢变化,所以在指纹实际频率与方向傅里叶滤波的预设频率有偏差的地方,增强效果不理想。

Chikkerur S^[6] 等对方向用方向傅里叶滤波做出了改进。将指纹分割为若干互不重叠的子块,计算子块内指纹纹线的方向和频率,根据子块的频率和方向用方向傅里叶滤波对子块进行滤波。然而对于包含了端点或分叉点的子块,由于其频率发生了变化,使得滤波后该子块整体的灰度值与相邻子块不同,依然不能解决方向傅里叶滤波在一般区域增强效果不理想的问题。

Gottschlich^[7] 等提出了 Curved Gabor 滤波算法,能够根据指纹纹线的曲率自适应地调整滤波器的形状。对于指纹奇异点附近曲率较大的纹线有很好的滤波效果,但是其计算复杂度较高,同时易受噪声干扰。

ZAHEDI M^[8] 提出了 FFT 和 Gabor 相结合的方法,在指纹密度较大的区域使用 FFT,密度较小的区域使用 Gabor,但是并没有提出有效的指纹分割方法,在增强指纹图像时需要人工干预。

AGUILAR G^[9] 提出分别用方向傅里叶滤波和 Gabor 独立处理同一幅图像,将两种方法得到的结果相加,对于结果大于 255 的像素点标记为 255,否则标记为 0。该方法虽然一定程度上改善了滤波结果,但是对于指纹奇异点附近纹线曲率较高的部分并没有针对性。

为了更好地解决奇异点区的指纹图像增强问题,本文提出了一种新的算法。能够在保留指纹曲率较大部分纹线结构的同时,快速修复指纹图像。

2 几种指纹增强方法

2.1 Separable Gabor 滤波

指纹图像的方向和频率能够为移除噪声提供有用的信息^[10]局部特定的方向上,脊和谷的正弦波形变化十分缓慢。因此,调整到相应的频率和取向的带通滤波器可以有效地去除不期望的噪声并保护真正的脊和谷结构^[11]。

因为 Gabor 函数非常贴合指纹图像的周期性,所以能够直观地表示指纹图像,是目前应用最广的指纹增强方法。

Gabor 滤波器可表示为^[12]:

$$h(x, y; \theta, f) =$$

$$\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x_{\varnothing}^2}{\sigma_x^2}+\frac{y_{\varnothing}^2}{\sigma_y^2}\right]\right\}\cos(2\pi f x_{\varnothing}), \quad (1)$$

$$x_{\varnothing}=x\cos\varnothing+y\sin\varnothing, \quad (2)$$

$$y_{\varnothing}=-x\sin\varnothing+y\cos\varnothing, \quad (3)$$

其中: $\varnothing$ 表示 Gabor 滤波的方向, f 为正弦波的频率, σ_x 和 σ_y 分别为高斯函数沿着 x 轴和 y 轴的标准差。 $[x_{\varnothing}, y_{\varnothing}]$ 是笛卡尔坐标系顺时针旋转 $(90^\circ-\varnothing)$ 后的 $[x, y]$ 坐标。

在指纹识别过程中,Gabor 滤波是计算量非常大的过程之一,Separable Gabor 把二维的 Gabor 滤波器在互相垂直的方向上分别拆分为一维带通滤波器和一维低通滤波器,使得计算复杂度降低,在增强结果相似的情况下,Separable Gabor 的滤波速度是 Gabor 滤波的 1.46 倍。

一维带通滤波器可表示为^[13]:

$$G_{BP}(x, f_0) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2}\right)\right\} \cos(2\pi f_0 x), \quad (4)$$

一维低通滤波器可表示为:

$$G_{LP}(y) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right\}. \quad (5)$$

对于一些需要滤波的方向,一些像素点可能不在被采样的笛卡尔网格内,这就需要插值过程。插值的位置在滤波方向和两个最近邻像素的交叉点上。

如图 1 所示,在滤波时,分别用两个一维滤波器对指纹图像卷积,对于第一个一维滤波器,先对大于目标图像块的图像进行卷积,以获得如图 1(a)所示的滤波结果。在这基础上,另一个一维滤

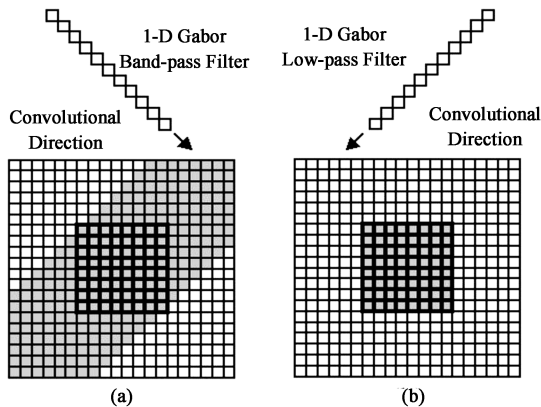


图 1 两个一维滤波器滤波过程

Fig.1 Example of practical 1-D separable filtering implementation for 2-D Gabor filter at 45° orientation

波器在垂直方向上卷积,最后得到如图 1(b)所示的滤波结果。

2.2 方向傅里叶滤波

方向傅里叶滤波由 Sherlock^[14] 提出,在傅里叶域进行滤波,使用极坐标来表示滤波器,以允许独立处理其角域和径向响应。

$$H(\rho, \varnothing) = H_\rho(\rho) H_\varnothing(\varnothing), \quad (6)$$

$$H_\rho(\rho) = \sqrt{\left[\frac{(\rho\rho_{BW})^{2n}}{(\rho\rho_{BW})^{2n} + (\rho^2 - \rho_0^2)^{2n}}\right]}, \quad (7)$$

$$H_\varnothing(\varnothing) = \begin{cases} \cos^2 \frac{\pi}{2} \frac{(\varnothing - \varnothing_c)}{\varnothing_{BW}} & \text{if } |\varnothing| < \varnothing_{BW} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (8)$$

其中: $H_\varnothing(\varnothing)$ 为中心点为 ρ_0 带宽为 ρ_{BW} 的带通滤波器, $\varnothing_{BW}$ 为滤波器的角带宽, $\varnothing_c$ 为 ρ_0 处纹线的方向。滤波过程如下:

(a) 原始指纹图像经快速傅里叶变换为 F 。

(b) n 个方向的滤波器 P_i 分别卷积指纹图像 F , 得到 n 个滤波后图像 $PF_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 。

(c) 每个 PF_i 经逆向快速傅里叶变换得到预滤波图像 $pf_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 。

(d) 增强后的图像 I_{enh} , 对于每个像素点,在滤波后的图像中选择滤波方向与该点纹线方向最接近的图像中相应的点为该点像素值,即 $I_{enh}[x, y] = pf_k[x, y]$, k 为滤波器编号,它的滤波方向与原始图像点 $[x, y]$ 处纹线方向最为接近。

Sherlock 认为,在纹线曲率较高的区域,纹线的方向变化较快,如果采用固定的角带宽,将会引入伪特征点。为解决这一问题, Sherlock 将滤波器的角带宽设为与像素点奇异点距离的分段线性函数。因此这一方法能够很好地处理奇异点区域。

然而该算法假定纹线的频率是固定的,否则会产生过多的预滤波图像,计算量将成倍增加。这就使它没有充分利用指纹图像的纹理信息,在指纹图像的一般区域增强效果不理想。

3 本文提出的方法

算法流程如图 2 所示。

3.1 指纹图像预处理

预处理过程是为了获得指纹图像纹线的方向和频率,它包括归一化、方向场估计、频率场估计

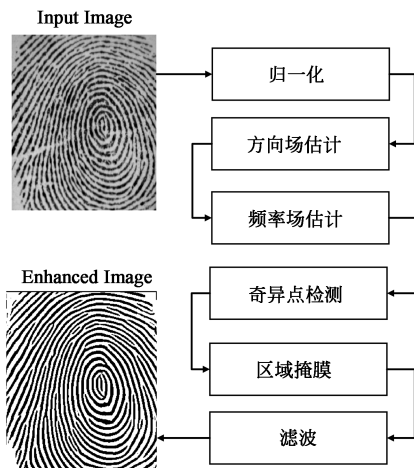


图 2 本文算法流程图

Fig. 2 Flowchart of proposed fingerprint enhancement algorithm

和区域掩膜,具体方法可参考[11]。

归一化是将采集到的指纹图像灰度的均值和方差调整到一个期望的范围,以便后续处理。归一化不会改变原始指纹图像纹线的结构,但是能够为后续处理提供一个较为统一的标准。

方向场描述了指纹图像某个像素点所在位置纹线的切线方向,通过计算指纹图像的梯度来获得,为后续的频率场估计、滤波提供不可缺少的信息。

频率场表示了指纹纹线的宽度,是形成滤波器不可缺少的信息之一。

奇异点检测是根据指纹图像的方向场检测出指纹的核心点和三角点。

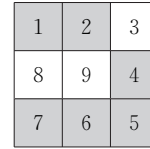
区域掩膜是在指纹图像中划分出有效区域(指纹图像中纹线清晰的区域)和无效区域(图像的边缘区域以及纹线模糊的区域),在后续的滤波过程和匹配过程中对无效区域不做处理,从而节省处理时间,同时排除在无效区域中的伪特征点。

在 HONG 提出的方法中,若某区域的频率不在指定范围内,则标记该区域频率为-1,表明此区域为无效区域。然而该区域未必是不可修复的,如果不对其进行处理,将会丢失有效的特征点,因此,本文对它进行了改进。

如图 3(a)所示,中间区域 9 为被标记为-1 的区域,1~8 为其周围区域,灰色区域为有效区域,白色区域为无效区域。通过计算 1~8 中灰色区域频率的均值来估计区域 9 的频率。如图 3

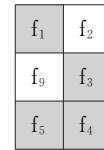
(b)所示,如果被标记为-1 的区域在指纹图像的边缘,同样,用周围有效区域的频率的均值来估计该区域频率。在图 3(b)中, f_9 可由式(9)计算:

$$f_9 = (f_1 + f_3 + f_4 + f_5) / 4. \quad (9)$$



(a) 在图像中间区域

(a) in the middle of the image



(b) 在图像边缘区域

(b) in the edge of the image

图 3 被标记为-1 区域频率估计

Fig.3 Estimate frequency in the area marked as -1

3.2 奇异点检测

本文采用 Poincare index 的奇异点检测方法检测奇异点。基于 Poincare index 的奇异点检测方法由 Kawagoe 和 Tojo^[15]提出,是目前使用最为广泛的奇异点检测方法。设 Q' 是指纹图像的方向场,在方向场给定点 (i, f) 的 Poincare index 计算如下:

$$\text{Poincare}(i, j) = \frac{1}{2\gamma} \sum_{k=0}^{N_\Psi} \Delta(k), \quad (10)$$

$$\Delta(k) = \begin{cases} \delta(k), & \text{if } |\delta(k)| < \frac{\gamma}{2} \\ \gamma + \delta(k), & \text{if } |\delta(k)| \leq \frac{\gamma}{2} \\ \gamma - \delta(k), & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (11)$$

$$\delta(k) = O'(\psi_x(i'), \psi_y(i')) - O'(\psi_x(i), \psi_y(i)), \quad (12)$$

$$i' = (i + 1) \bmod N_\Psi, \quad (13)$$

其中: $\psi_x(i)$ 和 $\psi_y(i)$ 分别是以给定点为中心的具有 N_Ψ 个像素点的封闭曲线上第 i 个点的 x 和 y 坐标。如果 Poincare index 值为 $1/2$,则给定点 (i, j) 就被确定为三角点,如果 Poincare index 值为 $-1/2$,则给定点 (i, j) 就被确定为核心点。

3.3 滤波

首先,根据输入指纹图像的方向,找出指纹图像中的奇异点。然后,对于每一个奇异点,以奇异

点为中心建立 $N \times N$ 的矩形子块。最后,根据每个像素点的方向和频率,用 Separable Gabor 处理子块之外的像素,而子块内的像素,用方向傅里叶滤波来处理。

在对图像进行分块时,需要设定分块大小 N 的值, N 太小不能完整地包含奇异点附近的曲率较大的区域, N 太大会使得奇异点区域包含过多的普通区域,从而引入伪特征点。

N 的设定与指纹的频率有关,由于指纹是由脊线和谷线相间形成,因此矩阵需要包含形成奇异点的脊线和谷线,同时要避免包含其他特征点。基于指纹的频率 f 采用公式(14)来计算 N 。

$$N = 2 \times \frac{2}{f} + 1, \quad (14)$$

f 为奇异点所在区域的频率。

图4为原始指纹图像,白色方框内为大小为 $N \times N$ 的矩形子块。



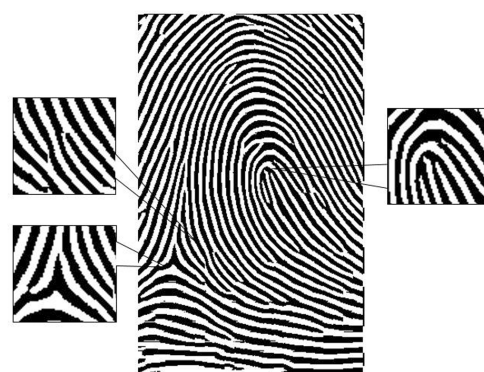
图4 标记出奇异点的原始图像

Fig.4 Original image marked with singularities

4 实验结果分析

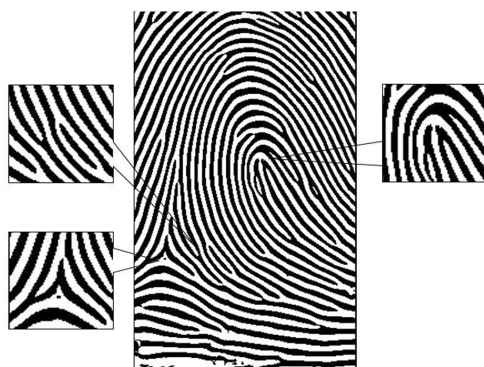
本文选择 FVC2002 数据库^[16],图5为分别用3种方法对图4的处理结果,5(a)为用方向傅里叶滤波方法增强图像,(b)为 Separable Gabor 滤波增强图像,(c)为 FS-Gabor 增强图像。每一幅图像的左侧为核心点区域的放大图像,右侧为分叉点和三角点的放大图像。

对于核心点附近区域,图5(b)采用的 Separable Gabor 滤波方法使得原本连接在一起的脊线断开,图5(a)采用的方向傅里叶滤波方法则完整保留了指纹



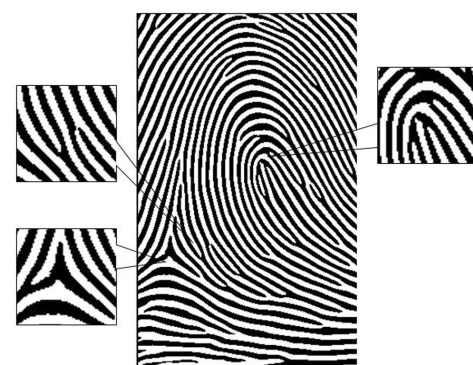
(a)方向傅里叶滤波

(a) Directional Fourier filter



(b)Separable Gabor

(b) Separable Gabor



(c)本文提出的方法

(c) Proposed method

图5 三种方法效果图

Fig.5 Enhanced images using three method

结构。对于三角点附近区域,图5(b)的方法产生了一个“孤岛”,这会引入伪特征点。

对于指纹非核心点区域的分叉点,图5(a)方向傅里叶滤波未能连接左上侧的分叉点,图5(b) Separable Gabor 左上侧连接了断开的分叉点。

图 5(c)采用了本文提出的 FS-Gabor 滤波方法,结合了两种滤波方法的优点,得到的结果比两种滤波方法要好。

一般采用“拒真率”(FRR)和“认假率”(FAR)来衡量指纹识别算法的精确度^[17]。拒真率是指错误地将两个来自于相同手指的指纹认为是不同手指的指纹的概率;认假率是指错误地将两个来自于不同手指的指纹认为是同一手指指纹的概率。

拒真率和认假率之间存在着此消彼长的关系,在一个确定的指纹识别算法中,拒真率越高认假率就越低。因此,选取拒真率和认假率相等时的错误率——等错率(EER)来评价算法性能。

为验证本文算法的有效性,将本文算法和其他两种算法在相同的实验条件下进行对比。表 1 展示了 3 种不同的算法在 FVC2002 数据库中测试 EER 的结果。可以看出,在相同实验条件下,比较 3 种方法处理 4 个数据库图像得到的 EER 的均值,FS-Gabor 滤波方法的 EER 比方向傅里叶滤波低 26%、比 Gabor 低 49%。

通过实验,我们比较了 FS-Gabor、Separable Gabor 和 Gabor 滤波算法的时间耗费,如表 2 所示。

表 1 算法在 FVC2002 数据库的 EER 比较

Tab.1 Comparison of EER in FVC2002 database (%)

数据库	方向傅里叶滤波	Separable Gabor	FS-Gabor
DB1	6.72	10.53	4.84
DB2	6.58	10.17	4.53
DB3	12.79	15.36	10.28
DB4	7.48	11.29	5.56
均值	8.39	11.84	6.21

FS-Gabor 的处理速度与 Separable Gabor 相当,比常用的 Gabor 滤波具有明显的优势。这是因为 FS-Gabor 算法在奇异点区域之外采用了 Separable Gabor 算法,而在奇异点区域内部采用了方向傅里叶滤波,而一幅指纹图像的奇异点只有 1~2 个。因此,FS-Gabor 算法不仅提高了指纹图像的识别精度,同时具有较快的处理速度。

表 2 三种方法所需时间比较

Tab.2 Comparison of the time required for the three methods (s)

数据库	DB1	DB2	DB3	DB4
FS-Gabor	0.429	0.572	0.387	0.341
Separable Gabor	0.418	0.565	0.374	0.326
Gabor	0.611	0.824	0.548	0.476

5 结 论

目前使用最为广泛的指纹滤波方法为 Gabor 滤波,它能够连接断开的纹线,同时断开错误粘连的纹线,但是对于指纹奇异点附近曲率较大部分的纹线,Gabor 滤波会破坏指纹结构。方向傅里叶滤波虽然能够保留指纹结构,但是纹线的修复效果并不理想。

本文根据指纹不同区域的特性,融合已有算法的优势,提出将方向傅里叶滤波和 Separable Gabor 相结合的 FS-Gabor 算法。该算法能够在指纹核心点周围区域脊线不被破坏的同时,快速修复指纹脊线。经本文方法滤波的指纹图像的 EER 比方向傅里叶滤波低 26%,比 Separable Gabor 低 49%。

参 考 文 献:

- [1] WANG Z F, CHEN S H, BUSCH C, *et al.* Performance evaluation of fingerprint enhancement algorithms [C]// *Proceedings of 2018 Congress on Image and Signal Processing*. Sanya, Hainan, China: IEEE, 2008: 389-393.
- [2] MEI Y, ZHAO B, ZHOU Y, *et al.* Orthogonal curved-line Gabor filter for fast fingerprint enhancement [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(3): 175-177.
- [3] 赵建. 分数阶微分在图像纹理增强中的应用[J]. *液晶与显示*, 2012, 27(1): 121-124.
ZHAO J. Fractional differential and its application in image texture enhancement [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(1): 121-124. (in Chinese)
- [4] 郝志成, 吴川, 杨航, 等. 基于双边纹理滤波的图像细节增强方法[J]. *中国光学*, 2016, 9(4): 423-431.

- HAO Z C, WU C H, YANG H, *et al.* Image detail enhancement method based on multi-scale bilateral texture filter [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 423-431. (in Chinese)
- [5] 王浩,张叶,沈宏海,等. 图像增强算法综述[J]. *中国光学*, 2017, 10(4): 438-448.
- WANG H, ZHANG Y, SHEN H H, *et al.* Review of image enhancement algorithms [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 438-448. (in Chinese)
- [6] CHIKKERUR S, WU C H, GOVINDARAJU V. A systematic approach for feature extraction in fingerprint images [C]//*Proceedings of the First International Conference*, ICBA 2004. Hong Kong, China: Springer, 2004, 3072: 344-350.
- [7] GOTTSCHLICH C. Curved-region-based ridge frequency estimation and curved Gabor filters for fingerprint image enhancement [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(4): 2220-2227.
- [8] ZAHEDI M, GHADI O R. Combining Gabor filter and FFT for fingerprint enhancement based on a regional adaption method and automatic segmentation [J]. *Signal Image and Video Processing*, 2015, 9(2): 267-275.
- [9] AGUILAR G, SANCHEZ G, TOSCANO K, *et al.* Multimodal biometric system using fingerprint [C]//*Proceedings of 2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems*. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2007: 145-150.
- [10] BARTUNEK J S, NILSSON M, SALLBERG B, *et al.* Adaptive fingerprint image enhancement with emphasis on preprocessing of data [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(2): 644-656.
- [11] YANG J W, LIU L F, JIANG T Z, *et al.* A modified Gabor filter design method for fingerprint image enhancement [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(12): 1805-1817.
- [12] HONG L, WAN Y F, JAIN A. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(8): 777-789.
- [13] AREEKUL V, WATCHAREERUETAI U, SUPPASRIWASUETH K, *et al.* Separable Gabor filter realization for fast fingerprint enhancement [C]//*Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Image Processing*. Genova, Italy: IEEE, 2005: III253-III256.
- [14] SHERLOCK B G, MONRO D M, MILLARD K. Fingerprint enhancement by directional Fourier filtering [J]. *IEE Proceedings- Vision, Image, and Signal Processing*, 1994, 141(2): 87-94.
- [15] KAWAGOE M, TOJO A. Fingerprint pattern classification [J]. *Pattern Recognition*, 1984, 17(3): 295-303.
- [16] MALTONI D, MAIO D, JAIN A K, *et al.* *Handbook of Fingerprint Recognition* [M]. New York: Springer, 2005.
- [17] ITO K, MORITA A, AOKI T, *et al.* A fingerprint recognition algorithm using phase-based image matching for low-quality fingerprints [C]//*Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Image Processing*. Genova, Italy: IEEE, 2005: II33-II36.

作者简介:耿卫东(1955—),男,河北沧州人,教授,博士生导师,主要从事平板显示技术与混合信号集成电路设计研究。

E-mail:gengwd@nankai.edu.cn

席诗琼(1992—),女,硕士研究生,研究方向为混合信号集成电路设计、模式识别。

韩 胜(1992—),男,硕士研究生,研究方向为混合信号集成电路设计、模式识别。