

## 傅里叶频域下基于曲面变换的指纹增强算法

梅 园<sup>a,b,c</sup>, 张夏苗<sup>c</sup>

(南京信息工程大学 a. 江苏省网络监控中心;

b. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心; c. 计算机与软件学院, 南京 210044)

**摘 要:** 已有傅里叶频域下的指纹增强工作存在指纹非平缓区域增强效果较差、块窗口尺度不易选择的缺陷。为此, 提出一种新的基于曲面变换的指纹增强算法。把曲面变换(定位曲面区域并映射到二维数组)用于傅里叶频域下, 根据曲面区域的频谱图选择合适的滤波器方向。将指纹图像划分为平缓区域与非平缓区域, 只对非平缓区域执行曲面变换以提高执行效率, 引入复合窗口模板来解决块窗口尺度问题。实验结果表明, 相比于非曲面算法, 改进方案有更好的增强效果, 增强后指纹的匹配正确率可以达到 99.74%, 同时, 运行时间比曲面 Gabor 算法明显降低。

**关键词:** 指纹; 傅里叶变换; 曲面变换; 滤波器; 指纹增强

**中文引用格式:** 梅 园, 张夏苗. 傅里叶频域下基于曲面变换的指纹增强算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(8): 251-256.

**英文引用格式:** MEI Yuan, ZHANG Xiamiao. Fingerprint enhancement algorithm based on surface transformation under Fourier frequency domain[J]. Computer Engineering, 2018, 44(8): 251-256.

## Fingerprint Enhancement Algorithm Based on Surface Transformation Under Fourier Frequency Domain

MEI Yuan<sup>a,b,c</sup>, ZHANG Xiamiao<sup>c</sup>

(a. Network Monitoring Center of Jiangsu Province;

b. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology;

c. School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**[Abstract]** The previous works enhance fingerprint images in Fourier domain based on block. But there are some shortcomings in these works, they are not robust enough to non-smooth areas, and the size of the window is not easy to determine. A curved-regions-based fingerprint enhancement algorithm in Fourier domain is proposed to solve these problems. Curved-region transform, which finds curved region and map to 2-D array, is used in Fourier domain, and filters are designed based on the frequency images of curved regions. Fingerprint image is partitioned into smooth areas or non-smooth areas, and only construct curved regions in non-smooth areas in order to improve the execution efficiency. Composite window is introduced to resolve the choice of window size. Experimental result shows that the improved method has better enhancement effect than the algorithms based on block. The matching accuracy of enhanced fingerprints can reach 99.74%. At the same time, the running time is significantly lower than that of the surface Gabor algorithm.

**[Key words]** fingerprint; Fourier transformation; surface transformation; filter; fingerprint enhancement

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0048024

### 0 概述

鉴于指纹皮肤干湿、清洁度、破损及传感器噪声等因素, 往往会造成较大比例采集到的指纹图像中存在低质量区域。为了确保低质量区域特征提取的准确性, 需要对指纹进行增强, 其目的是提升指纹脊、谷纹路的清晰度。

宏观上讲, 常用的指纹图像增强方法主要分为

空域增强和频域增强, 其基本思想都是利用指纹图像在局部所呈现的方向性信息及脊、谷线交替的频率信息来设计滤波器以达到增强目的。

1) 空域增强主要的代表工作有方向滤波<sup>[1-3]</sup>、Gabor 滤波<sup>[4-7]</sup>等。方向滤波预先设计一组具有固定方向的滤波模板, 通过选择与当前待增强区域方向一致的滤波模板来实现增强。Gabor 滤波器具有天然的频率和方向双重选择性质, 该方法沿脊线方向

**基金项目:** 国家自然科学基金(2012g094); 中国博士后基金(20110491413)。

**作者简介:** 梅 园(1981—), 男, 副教授、博士, 主研究方向为图像处理、机器学习、自动指纹识别; 张夏苗, 硕士研究生。

**收稿日期:** 2017-07-19    **修回日期:** 2017-09-12    **E-mail:** 961222550@qq.com

实施低通滤波以连接断开的脊线,在脊线垂直方向实施带通滤波以分离粘连的脊、谷线。

2) 频域增强将指纹图像从空域转换到频域下,依据频谱特征设计滤波器以实现指纹增强。文献[8]给出了一种基于傅里叶变换的增强算法,其主要步骤为:对原指纹图像做傅里叶变换获得频谱图像;使用  $0-n$  个方向带通滤波器分别对频谱图像滤波,得到一组滤波后频谱图  $PF_0 - PF_n$ ;对滤波后频谱图做傅里叶逆变换获得一组预滤波图像  $pf_0 - pf_n$ ;依据每个像素点方向,从方向一致的预滤波图像中选取该像素来组成滤波后图像;设置阈值对滤波后图像进行二值化,得到增强图像。该算法需要对整幅频谱图像进行  $n+1$  次方向滤波和傅里叶逆变换,因此,运算复杂度较高。

区别于上述工作,文献[9-11]在指纹局部块上进行傅里叶变换,其主要思路为:将指纹图像划分为一系列互不重叠的块;对每个块做二维离散傅里叶变换得到局部频谱图像;设计滤波器对频谱图像滤波;逆变换之后得到滤波后图像;重复上述步骤直到遍历所有块,重新组合获得增强结果。该类算法只需对指纹图像的每个局部区域做一次傅里叶变换、滤波和傅里叶逆变换,运算复杂度明显降低,但该类工作<sup>[12-13]</sup>也存在 2 个问题:对非平缓区域增强效果较差;由于块窗口尺度引起块效应问题。

为此,本文提出一种傅里叶频域下基于曲面变换的指纹增强算法,以改善非平缓区域的增强效果,解决块窗口尺度问题。为了便于描述,以下将基于局部块的增强算法称为基于非曲面的指纹增强算法。

## 1 相关工作及讨论

基于非曲面的指纹增强算法存在以下问题:

### 1) 平缓区域与非平缓区域问题

对于指纹方向变化较小的平缓区域,其频谱图呈现出中心对称的 2 个亮斑;亮斑连线与水平轴之间的夹角即脊线梯度方向;亮斑与中心点之间距离代表频率大小。平缓区域频谱图像能量集中在沿脊线梯度方向中心对称的两点,增强所用滤波器方向与待增强区域脊线梯度方向一致时,可以有效地滤除噪声,保留重要的指纹频率信息。方向变化范围较大的非平缓区域的频谱图,其频谱图像能量集中区域近似为一个圆环,增强时无法确定主要的滤波方向,取某一特定方向会丢失圆环上其他方向所保留的指纹信息,使得方向滤波的增强效果较差。指纹局部区域的频谱图如图 1 所示。

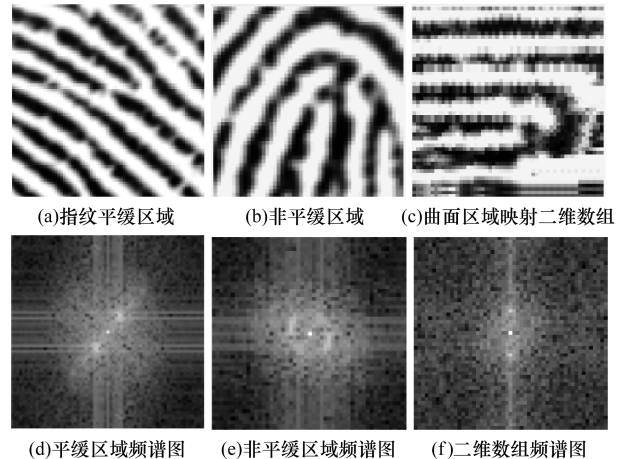


图 1 指纹局部区域的频谱图

### 2) 块窗口尺度问题

当窗口较大时,其间包含多条脊、谷线,频率信息较为明显,但相邻块之间方向差异较大,从而导致增强后相邻块之间不能很好地连接在一起,本文将该现象称为块效应;当窗口较小时,频率信息不明显,不适合进行频域滤波增强。

综上所述,非平缓区域方向范围较大,滤波增强时无法确定主要的滤波方向,增强效果较差。受文献[6]的曲面 Gabor 滤波和文献[7]的正交双曲线 Gabor 滤波的启发,本文将曲面变换用于频域增强,解决非平缓区域的增强问题。

文献[6]提出的曲面如图 2 所示,曲面区域为一个包含  $2p+1$  条平行曲线的区域,且每条曲线均包含  $2q+1$  个点。定位像素点  $(i, j)$  处曲面区域  $C_{i,j}$  的大致过程如下:

#### 1) 定位平行曲线的中点

把像素点  $(i, j)$  作为曲面中心,从中心点出发,沿着垂直脊线的 2 个方向初始化平行曲线的中点(如图 2 中的竖直方向点所示),每一个方向拓展  $p$  个像素单元即可得到  $2p+1$  个曲线中点。在每一次拓展中,所取方向始终正交于局部脊线方向。

#### 2) 寻找平行曲线

从每一个曲线中点出发,沿着脊线方向  $\theta$  和脊线相反方向  $\theta + \pi$  分别拓展  $q$  个像素单元即可得到  $2q+1$  条长为  $2q+1$  的曲线。由此得到了一个大小为  $(2p+1) \times (2q+1)$  的曲面区域  $C_{i,j}$ 。

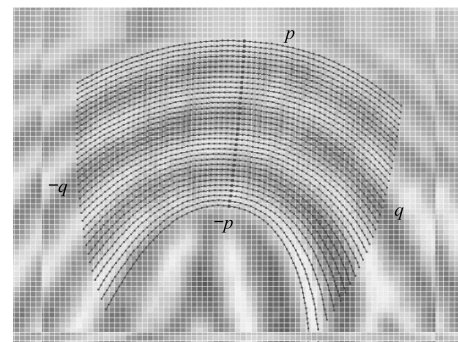


图 2 曲面区域  $C_{i,j}$

本文将定位曲面区域并将其映射到二维数组的过程称为曲面变换。在曲面变换过程中,记录二维数组中每一个元素在原指纹图像中的对应坐标,这些坐标值用于将二维数组映射回曲面区域,该过程称为逆曲面变换。

在非平缓区域使用曲面变换得到二维数组(如图 1(c))所示,其频谱图(如图 1(f))呈现出沿垂直方向中心对称的 2 个亮斑,这表明频谱能量集中在垂直方向,因此,增强时滤波方向选为垂直方向可以达到较好的增强效果。

由于曲面变换比较耗时,为了提高执行效率,本文只在非平缓区域执行曲面变换,为此需要区分平缓区域与非平缓区域。

本文借鉴文献[14]定义的变化度来解决该区分问题,变化度反映当前块与 8 个相邻块之间的方向差异,其定义如下:

$$Var(i, j) = \frac{\sum_{m=i-1}^{i+1} \sum_{n=j-1}^{j+1} \min(\alpha, \beta)}{8} \quad (1)$$

其中:

$$\alpha = |\theta_B(m, n) - \theta_B(i, j)|$$

$$\beta = \pi - |\theta_B(m, n) - \theta_B(i, j)|$$

其中,  $\theta_B(i, j)$  表示当前块的方向,  $\theta_B(m, n)$  表示 8 个相邻块的方向。设置一个阈值,当块的变化度小于阈值时,该块被标记为平缓区域;否则,被标记为非平缓区域。图 3 展示了一个指纹图像标记平缓区域和非平缓区域后的结果,窗口大小为  $11 \times 11$ ,其中,灰色区域为非平缓区域,其他区域为平缓区域。



图 3 标记非平缓区域

文献[15]引入复合窗口模板解决在方向场计算过程中由于窗口尺寸引起的准确性与抗噪性的矛盾。受其启发,本文引入复合窗口模板来解决块窗口尺度问题。复合窗口模板<sup>[15]</sup>(如图 4 所示)将窗口分为内层窗口和外层窗口,且外层窗口大于内层窗口,将较小的内层窗口作为当前需要增强的窗口。由于较大窗口指纹图像包含足够多的脊线,频率信息较为明显,因此先在较大的外层窗口上实现滤波增强得到增强后图像,然后将内层窗口在外层窗口中的对应区域作为该内层窗口的增强结果,以减小增强后图像的块效应。

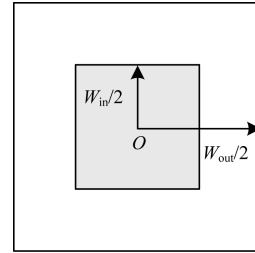


图 4 复合窗口模板

## 2 算法实现

本文提出一种傅里叶频域下基于曲面变换的指纹增强算法,以克服基于非曲面算法在非平缓区域增强效果较差的问题,同时解决非曲面增强所产生的块效应问题。其流程如图 5 所示。

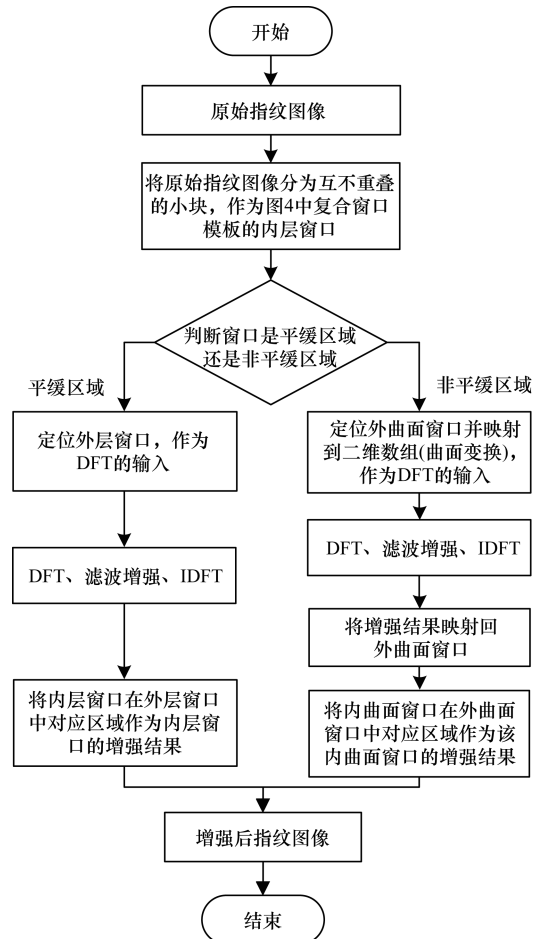


图 5 指纹增强算法流程

本文算法所用滤波器包括径向滤波器  $H_\rho$  和方向滤波器  $H_\theta$ ,公式如下:

$$H(\rho, \theta) = H_\rho(\rho)H_\theta(\theta) \quad (2)$$

$$H_\rho(\rho) = e^{-\frac{\rho^2}{2D_L^2}} \times (1 - e^{-\frac{\rho^2}{2D_H^2}}) \quad (3)$$

$$H_\theta(\theta) = \begin{cases} \cos^2 \frac{\pi(\theta - \theta_c)}{2\theta_{bp}}, & |\theta - \theta_c| < \theta_{bp} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\rho$ 、 $\theta$  分别代表频率和方向,  $D_L$  和  $D_H$  为截断频率,  $\theta_{bp}$  是滤波器的角度带宽,  $\theta_c$  是滤波方向。

在本文算法中, 若窗口为平缓区域, 则用  $W_{plane\_in}$ 、 $W_{plane\_out}$  分别表示内层窗口和外层窗口, 用  $E_{plane\_in}$ 、 $E_{plane\_out}$  分别表示内层窗口和外层窗口增强后图像。若窗口为非平缓区域, 则用  $W_{curve\_in}$ 、 $W_{curve\_out}$ 、 $W_{array\_out}$  分别表示内曲面窗口、外曲面窗口和外曲面窗口映射得到的二维数组,  $E_{curve\_in}$ 、 $E_{curve\_out}$ 、 $E_{array\_out}$  分别表示内曲面窗口、外曲面窗口和外曲面窗口映射得到的二维数组的增强后图像。

以下将依据图 5 所示流程, 详细阐述每个步骤的具体内容。

**步骤 1** 将原始指纹图像划分成一系列互不重叠的小块, 作为图 4 中复合窗口模板的内层窗口。

**步骤 2** 依据式 (1) 定义的变化度来判断内层窗口是平缓区域还是非平缓区域。

**步骤 3** 如果该窗口是平缓区域, 用  $W_{plane\_in}$  来表示, 首先找到复合模板的外层窗口  $W_{plane\_out}$ ; 在外层窗口上进行离散傅里叶变换 (DFT) 得到频谱图  $F$ ; 然后采用式 (2) 的滤波器  $H(\rho, \theta)$  对频谱图  $F$  进行滤波, 此时滤波器方向为窗口中心点处梯度方向; 逆傅里叶变换 (IDFT) 得到增强后的外层窗口  $E_{plane\_out}$ ; 将内层窗口  $W_{plane\_in}$  在外层窗口  $E_{plane\_out}$  中对应区域作为该内层窗口的增强后图像  $E_{plane\_in}$ 。

**步骤 4** 如果该窗口是非平缓区域, 用  $W_{curve\_in}$  来表示, 首先使用曲面变换定位外曲面窗口  $W_{curve\_out}$  并映射得到二维数组  $W_{array\_out}$ ; 对得到的二维数组  $W_{array\_out}$  进行 DFT 得到相应的频谱图  $F$ ; 然后采用垂直方向的滤波器  $H(\rho, \theta)$  对  $F$  进行滤波; 经过 IDFT 得到二维数组的增强结果  $E_{array\_out}$ ; 逆曲面变换将结果  $E_{array\_out}$  映射到外曲面窗口, 得到增强后的曲面  $E_{curve\_out}$ ; 将内曲面窗口  $W_{curve\_in}$  在  $E_{curve\_out}$  中的对应区域  $E_{curve\_in}$  填充到新图像对应区域。

**步骤 5** 重复上述步骤 2 ~ 步骤 4 直到遍历完所有内层窗口, 重新组合即可得到增强后指纹图像  $g$ 。

### 3 实验与讨论

为了验证提出的基于曲面变换的指纹增强算法的增强效果, 将本文算法与文献 [6] 曲面 Gabor 增强算法、文献 [9] 傅里叶频域下基于非曲面的指纹增强算法进行对比。实验从增强效果、指纹匹配结果和时间复杂度 3 个角度进行算法性能评估。实验在 FVC2002 的 DB1 和 DB2 指纹库上进行, DB1 与 DB2 各包含 100 个不同的手指, 每个手指保存了 8 幅指纹图像。

为了尽可能地提高对比性, 本文在实验设计时做了以下 3 点工作:

1) 在实现对比时, 单窗口应与复合窗口的外层

窗口大小一致。在实验中, 复合窗口的外层窗口大小选为  $31 \times 31$ , 内层窗口大小为  $11 \times 11$ , 复合窗口大小的选择采用文献 [15] 推荐的参数值。

2) 曲面 Gabor 算法及非曲面算法均采用了与本文算法一致的方向场。

3) 算法采用文献 [14] 推荐的参数值作为变化度的阈值以实现平缓区域与非平缓区域的区分。

#### 3.1 增强效果对比

在指纹库 FVC2002 上, 分别实现曲面 Gabor 算法、非曲面算法和本文算法, 以验证本文算法中的复合窗口、曲面变换的有效性。抽取库中一幅指纹图像, 其增强效果对比图如图 6 所示, 从图 6(d)、图 6(h)、图 6(l) 与图 6(b)、图 6(f)、图 6(j) 的对比可以看出, 本文算法相比于非曲面算法具有更好的增强效果, 可以有效解决非曲面算法存在的块效应问题和在非平缓区域增强效果差的问题。从图 6(d)、图 6(h)、图 6(l) 与图 6(c)、图 6(g)、图 6(k) 的对比可看出, 视觉上本文算法与经典的曲面 Gabor 算法的增强效果相当。



图 6 增强实验结果对比 1

图 7 展示了 FVC2002 指纹库几幅质量较差指纹的增强效果对比图。可以看出,本文算法的增强效果明显优于非曲面算法,相比于曲面 Gabor 算法,本文算法在连接断开脊线、增强非平缓区域等方面的效果更好。

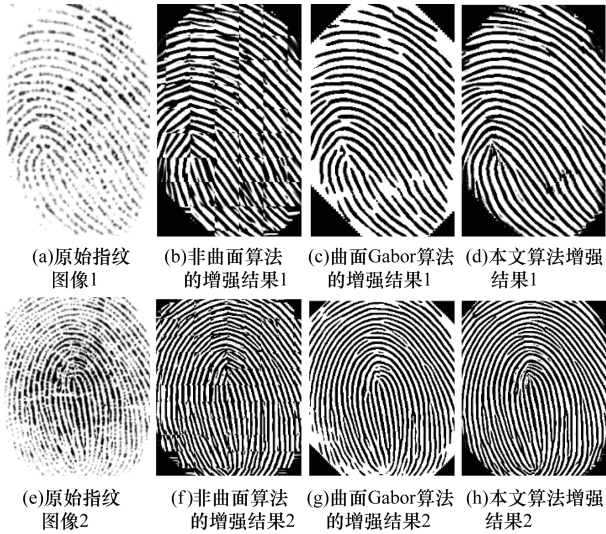


图 7 增强实验结果对比 2

### 3.2 指纹匹配结果对比

实验利用匹配性能来评估算法的增强效果. 采用文献[15]的匹配系统,该匹配系统主要包括指纹图像分割、方向场计算、指纹增强、二值化与细化、细节点提取和匹配等部分。实验中使用曲面 Gabor 算法、非曲面算法和本文算法来替代原系统中的指纹增强方法。本文实验将不同阈值(细节点匹配数目)下的正确率作为性能评价指标,如果指纹 A、B 来自同一个手指且结果是匹配,或者指纹 A、B 来自不同的手指且结果是不匹配,那么这样的匹配结果是正确的,反之则为错误结果,正确的匹配结果数与总的匹配次数的比值即为正确率。在统计每个指纹库的正确率时,抽取 50 个手指,每个手指取 6 幅指纹图像,共 300 幅指纹图像。将每个手指的第 1 张图像注册入库,然后将剩下的 250 幅指纹与库中所有图像进行匹配,因此共计进行  $50 \times 250 = 12\ 500$  次匹配。

表 1、表 2 分别为曲面 Gabor 算法、非曲面算法和本文算法在 FVC2002 DBA 的 DB1、DB2 上的匹配实验对比结果。

表 1 曲面 Gabor 算法、非曲面算法、本文算法在 DB1 的匹配实验结果对比

阈值	曲面 Gabor 算法			非曲面算法			本文算法		
	正确匹配次数	错误匹配次数	匹配正确率/%	正确匹配次数	错误匹配次数	匹配正确率/%	正确匹配次数	错误匹配次数	匹配正确率/%
7	12 407	93	99.25	12 311	189	98.49	12 444	56	99.55
8	12 440	60	99.52	12 354	146	98.83	12 456	44	99.65
9	12 442	58	99.54	12 357	143	98.86	12 460	40	99.68
10	12 445	55	99.56	12 361	139	98.89	12 462	38	99.70
11	12 454	46	99.63	12 371	129	98.97	12 464	36	99.71

表 2 曲面 Gabor 算法、非曲面算法、本文算法在 DB2 的匹配实验结果对比

阈值	曲面 Gabor 算法			非曲面算法			本文算法		
	正确匹配次数	错误匹配次数	匹配正确率/%	正确匹配次数	错误匹配次数	匹配正确率/%	正确匹配次数	错误匹配次数	匹配正确率/%
7	12 430	70	99.44	12 206	294	97.65	12 452	48	99.62
8	12 454	46	99.63	12 301	199	98.41	12 567	33	99.74
9	12 457	43	99.66	12 304	196	98.43	12 466	34	99.73
10	12 463	37	99.70	12 307	193	98.47	12 464	36	99.71
11	12 464	36	99.71	12 317	183	98.54	12 466	34	99.73

实验结果表明:

1) 本文算法的匹配正确率明显高于非曲面算法。该结果表明曲面变换和复合窗口的使用可以有效解决块窗口尺度问题,以及非曲面算法在非平缓区域增强效果较差的问题,从而改善算法增强效果,提高匹配正确率。

2) 本文算法的匹配正确率高于经典的曲面 Gabor 算法。说明本文算法的增强效果优于曲面 Gabor 算法。

综上所述,曲面变换和复合窗口的引入使得本文算法具有很好的增强效果。

### 3.3 时间复杂度对比

本文将算法在 FVC2002 指纹库的 DB1 和 DB2 上的平均运行时间作为时间复杂度评价指标。硬件环境为 2.93 GHz CPU、2 GB RAM,软件环境为 Windows 操作系统,编程语言为 Matlab。表 3 展示了曲面 Gabor 算法、非曲面算法和本文算法在时间复杂度方面的对比结果。

表 3 在 DB1、DB2 上的平均运行时间对比

指纹库	曲面 Gabor 算法	非曲面算法	本文算法 (曲面复合窗口)
DB1	27.69	0.07	0.50
DB2	31.04	0.08	0.52

实验结果显示:

1) 本文算法的时间复杂度高于非曲面算法。原因在于:本文算法使用复合窗口,在外层窗口上实现滤波增强后,把内层窗口的结果作为最终图像的一部分,而非曲面算法使用的是单层窗口,直接把较大外层窗口的增强结果作为最终图像的一部分,故复合窗口算法的时间复杂度是单窗口算法的 $(W_{out} \times W_{out}) / (W_{in} \times W_{in})$ 倍;本文算法需要对非平缓区域的每个内层窗口进行曲面变换,找到其对应的曲面区域后再实现滤波增强,相比于非曲面算法,本文算法增加了曲面变换的时间消耗。

2) 本文算法的时间复杂度明显低于曲面 Gabor 算法。曲面 Gabor 算法在空域实现指纹增强,比本文算法更加耗时,运行时间是本文算法的近 55 倍。

#### 4 结束语

基于曲面变换和复合模板,本文提出一种傅里叶频域下基于曲面变换的指纹增强算法。实验结果表明,与非曲面算法相比,对于指纹非平缓区域,该算法能取得更好的增强效果,引入的复合窗口模板可以有效解决非曲面算法存在的块效应问题。与曲面 Gabor 算法相比,运行时间明显降低。本文算法将曲面变换用于傅里叶频域下的指纹增强,下一步将对曲面变换在其他频域下的应用进行研究。

#### 参考文献

- [1] 黄贤武,苏鹏程,柏培权.基于方向滤波分割的指纹自动识别系统算法[J].中国图象图形学报,2002,7(8):829-834.
- [2] 蔡秀梅,范九伦.两种菱形结构指纹图像方向滤波器组的设计[J].计算机研究与发展,2012,49(5):1142-1148.
- [3] MENG Lingfeng, MA Yide, ZHENG Xiao, et al. A new fingerprint image enhancement based on decimation-free directional filter bank[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing and Communications. Washington D. C., USA;IEEE Press,2007:1059-1062.
- [4] KHAN M A U, KHAN T M. Fingerprint image enhancement

using data driven directional filter bank [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics,2013,124(23):6063-6068.

- [5] POKHRIYAL A, SENGAR P, LEHRI S. Fingerprint enhancement using improved orientation and circular Gabor filter [J]. International Journal of Computer Applications,2012,43(2):7-12.
- [6] 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.
- [7] MEI Yuan, ZHAO Bo, ZHOU Yu, et al. Orthogonal curved-line Gabor filter for fast fingerprint enhancement [J]. Electronics Letters,2014,50(3):175-177.
- [8] 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.
- [9] POPOVIC B M, BANDJUR M V, RAICEVIC A M. Robust fingerprint enhancement by directional filtering in Fourier domain [J]. Elektronika Ir Elektrotehnika,2015,107(1):37-40.
- [10] DYRE S, SUMATHI C P. Hybrid approach to enhancing fingerprint images using filters in the frequency domain[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research. Washington D. C., USA;IEEE Press,2014:1-6.
- [11] ZAIDI S, SINGH S K, TARAR S. To evaluate the performance of fingerprint enhancement techniques [C]//Proceedings of IEEE India Conference. IEEE Press,2015:1-6.
- [12] 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.
- [13] TARAR S, KUMAR E. Fingerprint image enhancement: Iterative fast Fourier transform algorithm and performance evaluation [J]. International Journal of Hybrid Information Technology,2013,6(4):11-20.
- [14] MEI Yuan, SUN Huaijiang, XIA Dshen. A gradient-based combined method for the computation of fingerprints' orientation field [J]. Image & Vision Computing,2009,27(8):1169-1177.
- [15] MEI Yuan, CAO Guo, SUN Huaijiang, et al. A systematic gradient-based method for the computation of fingerprint's orientation field [J]. Computers & Electrical Engineering,2012,38(5):1035-1046.

编辑 刘冰