

# 基于高斯调制二维正弦曲面滤波器的指纹增强算法

詹小四 蔡乐毅

(浙江外国语学院科技学院, 杭州, 310012)

**摘要:** 针对指纹图像的纹理特征, 深入分析了指纹图像的纹理结构及与二维正弦曲面模式的相似性, 构造设计了二维正弦曲面滤波器。为了降低边缘噪声对滤波器性能的影响, 提升滤波器的滤波增强效果, 采用二维高斯函数对二维正弦曲面滤波器进行调制, 最终构建了高斯调制二维正弦曲面滤波器, 设计实现了基于该滤波器的指纹增强算法。分组实验结果表明, 文中提出的基于高斯调制二维正弦曲面滤波器的指纹增强算法能够有效地提高指纹图像的质量, 对普遍存在于低质量指纹图像中的断线、疤痕和粘连等强噪声区域的增强效果更好。

**关键词:** 指纹识别系统; 指纹图像增强; 二维正弦曲面滤波器; 高斯函数; 加博滤波器

**中图分类号:** TP391.41      **文献标志码:** A

## Fingerprint Enhancement Algorithm Based on Two-Dimensional Sine Quadric Surface Filter Modulated by Gaussian Function

Zhan Xiaosi, Cai Leyi

(School of Science and Technology, Zhejiang International Studies University, Hangzhou, 310012, China)

**Abstract:** A two-dimensional sine quadric surface filter is constructed and designed after analyzing the texture structure of fingerprint image and the comparability between the texture structure and two-dimensional sine quadric surface pattern. To reduce the effect of marginal noise on the performance of the filter and improve the enhancement capability of the filter, the paper adopts two-dimensional Gaussian function to modulate the two-dimensional sine quadric surface filter. Finally, the paper produces the fingerprint enhancement algorithm based on two-dimensional sine quadric surface filter modulated by Gaussian function. The grouping experimental results show that the proposed fingerprint enhancement algorithm can improve the quality of fingerprint image and reduce the effect of strong noise, such as the broked texture, the scar and the conglutination in the low-quality fingerprint image.

**Key words:** fingerprint identification system; fingerprint image enhancement; two-dimensional sine quadric surface filter; Gaussian function; Gabor filter

## 引 言

随着信息技术的发展和人们对各类系统安全性能要求的提高, 指纹识别、人脸识别及虹膜识别等生

物特征识别技术受到广泛关注,应用领域和使用人群也在不断扩大<sup>[1,2]</sup>。虽然指纹识别技术已逐步走向应用,但对非理想采集条件下获取的低质量指纹图像的处理和识别仍然存在困难。为了提高自动指纹识别技术的性能,需要提高指纹图像的清晰度和可靠性,这就要求能够修复低质量指纹图像中普遍存在的疤痕、断线和粘连等,以便降低这些噪声信息对自动指纹识别技术性能的影响,提高识别的准确率。迄今为止,研究人员对指纹增强算法进行了深入而广泛的研究,提出了很多有效的指纹增强算法,这些算法基本上可以归纳为4类:空域指纹增强算法、频域指纹增强算法、Gabor滤波指纹增强算法和其他指纹增强算法<sup>[1-10]</sup>。作为纹理图像的内在结构信息,指纹纹线的方向信息被多数指纹图像增强算法使用,指纹纹线的频率信息也被Gabor滤波等增强算法使用。为了有效提高指纹图像增强算法的性能,只有充分利用纹线的方向信息和频率信息等指纹图像内在的结构信息才能有效地对指纹图像进行增强处理。

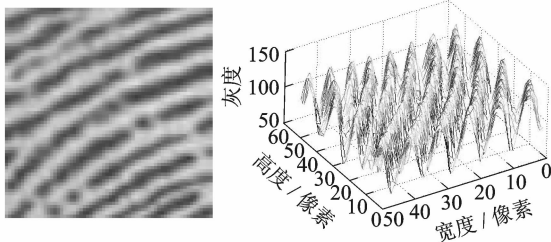
在现有的指纹增强方法中,Gabor滤波器指纹增强方法是增强效果最好的一种。Hong等<sup>[2]</sup>首先提出了一种Gabor滤波器指纹图像增强算法,详细测试、分析该方法对指纹图像的增强性能,充分验证了Gabor滤波器对指纹图像增强的有效性。后来,Hong等<sup>[3]</sup>通过设计一组加博滤波器并分别对指纹图像进行增强处理,获得了一个滤波图像集,然后采用图像合成获得最终的增强图像,提高了实际增强效果。尹义龙等<sup>[4]</sup>在深入分析Gabor滤波器的原理以及方向信息和频率信息对滤波器性能影响的基础上,重新设计了Gabor滤波器,通过改进方向信息和频率信息提取算法获得了更为准确、可靠的方向信息和频率信息,进一步提升了Gabor滤波指纹图像增强算法的性能。Kamei等<sup>[5]</sup>构造了一组方向滤波模板,通过方向滤波模板实现对指纹图像的增强处理,获得了较好的增强结果。在此基础上,武妍等<sup>[6]</sup>重新设计了方向滤波模板,实现了基于改进的方向滤波模板的指纹图像增强算法,进一步提升了增强算法的性能。王玮等<sup>[7]</sup>提出了Log-Gabor滤波器,并采用该滤波器对指纹图像进行增强处理,获得了不错的效果。另外,詹小四等<sup>[8]</sup>从指纹图像的实际纹理考虑,设计了二维正弦曲面滤波器,并分别采用8个方向的滤波器模板分别实现对指纹图像的增强处理,然后通过计算纹线清晰度对8幅增强后的指纹图像进行融合,最终实现了基于该滤波器的指纹图像增强算法,该算法能够很好地在整幅图像水平上实现对低质量指纹图像的增强处理。彭章平等<sup>[9]</sup>将非平稳信号频谱分析引入到指纹增强处理过程中,将指纹图像看做一种非平稳信号,通过对指纹图像的频谱分析实现对指纹图像的增强处理。程建刚等<sup>[10]</sup>通过引入非线性扩散方程,设计并实现了一种新的基于非线性扩散方程的增强算法,但该方法对强噪声的指纹图像的处理存在困难。从局部区域分析,指纹图像是具有较为规则的二维正弦曲面模式的纹理图像。因此,本文深入分析了二维正弦曲面模型的构造过程,设计了二维正弦曲面滤波器,并通过二维高斯函数对滤波器进行优化,获得了高斯调制二维正弦曲面滤波器,最后采用该滤波器对分块指纹图像进行增强处理,获得增强指纹图像。为了验证滤波器的增强效果,本文深入探讨了滤波器的指纹纹线方向信息和频率信息的准确度对指纹增强结果的影响。实验结果表明,文中方法能够对低质量指纹图像进行有效的增强处理,获得高质量的增强指纹图像,比Gabor滤波指纹增强方法具有更强的断线连接能力和更好的鲁棒性。

## 1 指纹纹理特征及滤波器设计

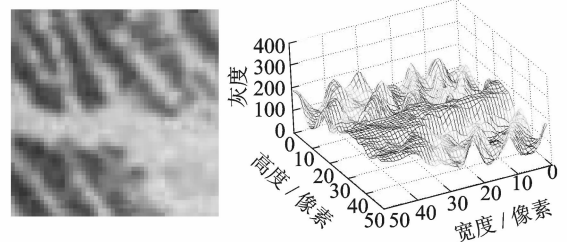
### 1.1 指纹纹理特征分析

从现有的文献资料可以看出,研究人员普遍认为指纹图像本质上是一类相对规则的纹理图像,从垂直于指纹纹线方向分析,符合正弦或余弦变化<sup>[2-5,8]</sup>。分析图像的局部区域可以发现,质量较高的指纹图像在指纹图像的局部区域表现为非常规则的二维正弦曲面模型,如图1所示。但由于多方面原因(如手指皮肤受损、暴皮、皮肤过于干燥或潮湿、采集仪的电磁信号干扰以及外部环境因素等),实际所采集到

的指纹图像往往存在各类噪声信号,破坏了指纹图像本身的纹理特征,从而使得指纹图像不再表现为非常规则的二维正弦曲面模式,如图2所示。



(a) 高质量指纹区  
(a) High-quality fingerprint region  
(b) 对应的二维正弦曲面  
(b) Two-dimensional sine quadric surface of (a)



(a) 低质量指纹区  
(a) Low-quality fingerprint region  
(b) 对应的二维正弦曲面  
(b) Two-dimensional sine quadric surface of (a)

图1 高质量指纹区及对应的二维正弦曲面模式

图2 低质量指纹区及对应的二维正弦曲面模式

Fig. 1 High-quality fingerprint image region and corresponding two-dimensional sine quadric surface model

Fig. 2 Low-quality fingerprint image region and corresponding two-dimensional sine quadric surface model

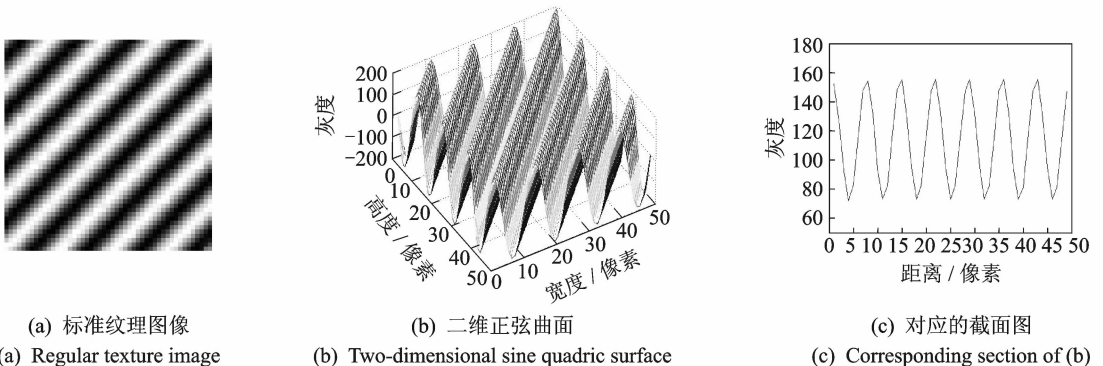
对比图1(b)和图2(b)可以发现,正常的指纹图像区域有着非常规则的二维正弦曲面模式,和前文的分析一致。受强噪声干扰的低质量指纹图像区域不再表现为规则的二维正弦曲面模式,而是形成了不规则的模式,需要通过指纹增强技术进行合理有效的恢复,以便能够保持指纹自身的纹理特性,从而提高自动指纹识别技术的准确率,提升系统的性能。

## 1.2 二维正弦曲面滤波器

图1(b)所表示的二维正弦曲面由角度 $\theta$ ,频率 $f$ 和幅值 $A$ 3个参数共同决定,如式(1)所示,即

$$M(x, y) = A \cdot \{ \sin(2\pi f(x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta))) \} \quad (1)$$

式中: $M(x, y)$ 为指纹图像中对应像素点的灰度值; $\theta$ 和 $f$ 分别为像素点所在区域的纹线方向和纹线频率(在指纹图像处理中,频率一般定义为纹线距离的倒数); $A$ 为该区域的灰度幅值。显然,式(1)定义的是一个严格的二维正弦纹理图像,其纹理的规律性强,符合二维正弦曲面模型,如图3所示。但是,式(1)所示模型没有经过任何的调制,是严格定义的规则二维正弦曲面模型,依托该公式所设计的滤波器没有考虑到信号的衰减,在边际噪声较大时会对增强处理结果形成不利影响,因此需要对该滤波器进行调制。



(a) 标准纹理图像  
(a) Regular texture image  
(b) 二维正弦曲面  
(b) Two-dimensional sine quadric surface  
(c) 对应的截面图  
(c) Corresponding section of (b)

图3 标准的纹理图像、对应的二维正弦模型及其截面图

Fig. 3 Tectonic regular texture image, corresponding two-dimensional sine quadric surface and section

### 1.3 高斯调制二维正弦曲面滤波器

高斯函数被广泛应用于图像处理、人脸识别等领域,取得了很好的处理效果<sup>[11,12]</sup>。二维高斯函数是一种具有旋转不变性的单值函数,在数字图像处理领域多被用于对图像进行平滑滤波运算。旋转不变性是指二维高斯滤波器在各个方向上的平滑程度是相同的,在后续的图像处理中不会偏向于任何一个方向。单值函数表明,在高斯滤波器进行去噪过程中用像素邻域的加权平均值代替该像素值时,权值随着该点与中心点之间距离的递增而单调递减。在对二维正弦滤波器进行调制的过程中,正是需要上述两大性质作为基础,才能保证调制结果满足指纹图像增强需要。因此,本方法采用高斯函数对二维正弦滤波器进行调制。二维高斯函数定义为

$$f(x,y) = a \cdot e^{-((x-b)^2+(y-b)^2)/c^2} \tag{2}$$

式中: $a, b, c$ 为高斯常数,决定了二维高斯函数的形态。二维高斯函数在空间中的表示如图4所示。因此,本文定义高斯调制二维正弦曲面滤波器为

$$M(x,y) = (a \cdot e^{-((x-b)^2+(y-b)^2)/c^2}) \cdot A \cdot \{\sin(2\pi f(x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta)))\} \tag{3}$$

由上述分析可知,高斯调制二维正弦曲面滤波器由频率、方向、幅值和高斯常数共同决定。为了能够有效拟合真实的指纹区域模式,滤波器的频率和方向应该和对应区域的指纹纹线的实际频率和方向保持一致,高斯常数的确定应保证高斯函数调制后二维正弦滤波器的曲面不改变二维正弦滤波器基本形态,这样才能获得最优的增强效果。

式(3)中,坐标原点(0,0)被确定为滤波器的中心点,显然不符合指纹图像增强处理的实际需要。由增强模板设计的基本原理可知,增强模板的中心点应该为需要进行增强处理的像素,定义其坐标为 $(x', y')$ ,然后以该像素点为中心的一个 $w \times w$ 邻域为增强模板区间。因此,本文以 $(x', y')$ 为滤波器的中心,修正高斯调制二维正弦曲面滤波器,即有

$$M(x,y) = f(x,y) \cdot A \cdot \{\sin(2\pi fL)\} \tag{4}$$

式中: $f(x,y) = a \cdot e^{-((x-x')^2+(y-y')^2)/c^2}$ ;  $L = (x-x') \cdot \cos(\theta) + (y-y') \cdot \sin(\theta)$ 。式(4)定义了一个由角度 $\theta$ ,频率 $f$ ,幅值 $A$ ,中心点 $(x', y')$ 和高斯常数共同构建的高斯调制二维正弦滤波器,如图5所示。图5中对应的频率 $f$ 为 $1/9$ ,角度 $\theta$ 为 $\pi/4$ ,幅值 $A$ 可以设置为灰度阶的一半左右,文中取为120,高斯常数 $a=2.0, c=8.0, b$ 取为模板的中心点坐标,邻域模板的尺寸 $w$ 为49。其他各个方向上的高斯调制二维正弦滤波器可以通过对该滤波器旋转相应的角度获得。

在实际的图像增强处理中,需要根据指纹图像的方向信息和频率信息构造和该指纹图像区域的方向和频率相一致的滤波器增强模板,并利用增强模板对图像进行增强处理。因此,方向和频率的准确度对增强算法的性能有着非常大的影响。

### 1.4 高斯调制二维正弦曲面滤波器的方向频率响应

为了进一步深入分析高斯调制二维正弦曲面滤波器对方向和频率的响应,考察指纹纹线的方向信息和频率信息对滤波器性能

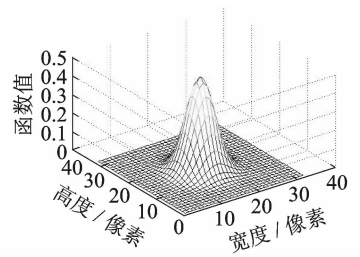
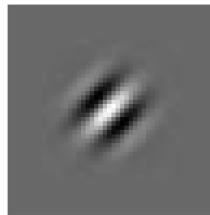
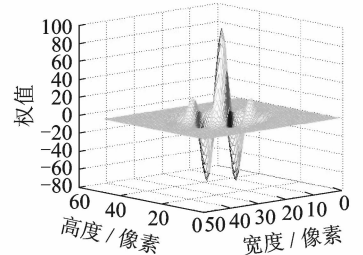


图4 二维高斯函数  
Fig. 4 Two-dimensional Gaussian function



(a) 滤波器的二维图形  
(a) Two-dimensional model of filter



(b) 滤波器的三维图形  
(b) Three-dimensional model of filter

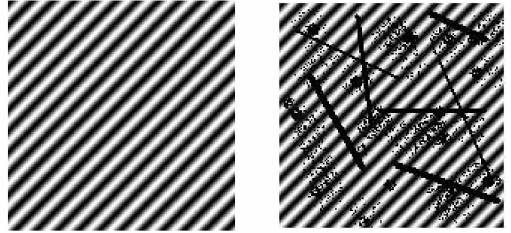
图5 高斯调制二维正弦曲面滤波器

Fig. 5 Two-dimensional sine quadric surface filter modulated by Gaussian function

的影响,本文首先通过式(1)构造了规则的类似指纹纹理的规则图像(如图 6(a)所示),然后在图像中加入各类强噪声信息,以获得大噪声低质量图像(如图 6(b)所示),最后分别采取不同的频率和方向构造相应的高斯调制二维正弦曲面滤波器模板,并采用模板对加噪的低质量图像进行增强处理,获得增强后图像。

#### 1.4.1 滤波器对纹线方向的响应

本实验的目的是为了测试不同方向信息所构造的高斯调制二维正弦曲面滤波器的实际增强效果,以获得方向信息对滤波器性能的影响。为了精确测试滤波器对方向的实际响应效果,实验确定频率为构造纹理图像的真实频率,然后采用不同的 8 个方向值构造高斯调制二维正弦曲面滤波器模板,并采用各个方向模板对加噪图像进行增强处理,图 7 为实际增强结果。



(a) 构造的规则纹理图 (b) 添加强噪声图像  
(a) Tectonic regular texture image (b) Strong-noised image

图 6 构造的规则纹理图及对应的添加强噪声图像  
( $\theta=\pi/4, f=1/9$ , 噪声为点噪声和模拟疤痕)

Fig. 6 Tectonic regular texture image and corresponding strong-noised image

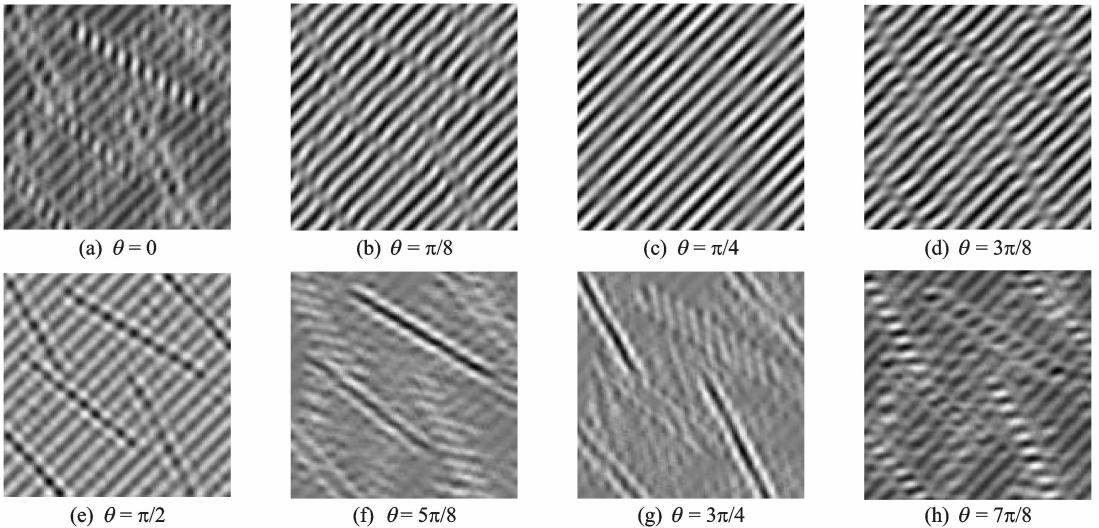


图 7 不同方向构造的滤波器对加噪图像的实际增强结果

Fig. 7 Enhancement results of strong-noised image using the same frequency value and different orientation values

由图 7 可以看出,滤波器的最佳响应角度为  $\pi/4$ ,此角度是纹线的实际角度。而随着角度偏离实际纹线角度的程度越大,降噪能力随之逐渐下降,图像增强效果也就越差。当滤波器的角度与实际纹线角度垂直时,图像中原有的纹理几乎不存在了。当角度有一定偏差(与真实的纹线角度偏差值在一个合理的范围,本文中可以为  $\leq \pi/8$ )时,滤波器的降噪效果比较明显,可以较为有效地增强图像。

#### 1.4.2 滤波器对纹线频率的响应

本实验的目的是为了测试不同频率信息所构造的高斯调制二维正弦曲面滤波器的实际增强效果,以获得频率信息对滤波器性能的影响。为了精确测试滤波器对频率的实际响应效果,实验确定方向为构造纹理图像的真实方向,然后采用不同的 8 个频率值构造高斯调制二维正弦曲面滤波器模板,并采用各个频率模板对加噪图像进行增强处理,图 8 为各个滤波器对噪声图像的实际增强结果。

由图 8 可以看出,滤波器的最佳响应频率为  $f=1/9$ ,此频率是纹线的实际频率。而随着频率偏离

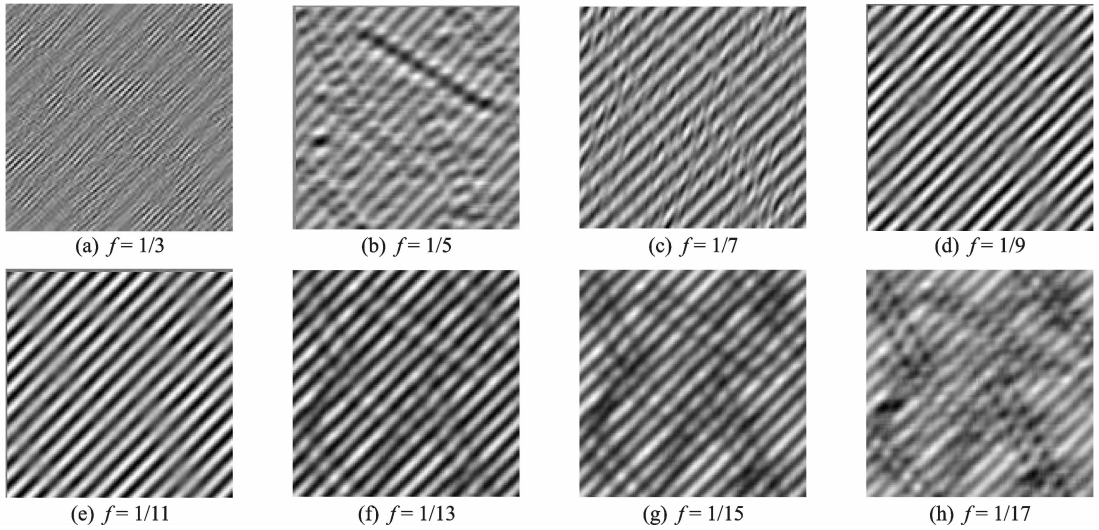


图 8 不同频率构造的滤波器对加噪图像的实际增强结果

Fig. 8 Enhancement results of strong-noised image using the same orientaiton value and different frequency values

实际纹线频率的程度越大,降噪能力也随之逐渐下降,对图像的增强效果也就越差。深入分析图 8 后发现,虽然纹线距离的变化量相同(以 9 为中心,逐次增加或减少,步长为 2),但所获得的增强效果差别很大,距离增大时的增强效果的下降速度要明显慢于距离减少时的增强效果。这启示我们在计算实际纹线距离时,可以取一个比实际纹线距离稍大一点的值,而尽量不要取比实际纹线距离小的值。

## 2 指纹增强算法

由上述分析可知,纹线方向和纹线频率是影响高斯调制二维正弦曲面滤波器性能的两个重要参数,为滤波器提供准确可靠的方向信息  $\theta$  和频率信息  $f$  是算法能够实现对指纹图像有效增强的前提。本文为了能够获得较为准确可靠的方向信息  $\theta$  和频率信息  $f$ ,分别采用文献[13]中提出的方向信息求取方法和文献[14]中提出的纹线距离计算方法,实验结果表明,这两种方法求取的纹线方向信息和频率信息能够满足算法的实际增强处理需要。

在获取了准确的方向信息和频率信息后,本文首先需要根据高斯调制二维正弦曲面滤波器模型(如式(5)所示)构造指纹图像中各个子块对应的卷积模板。然后利用模板对该块指纹图像区域进行卷积运算,实现对指纹图像的增强处理,最后对增强后图像进行归一化处理,将像素值调整到 $[0, 255]$ 区间,获得最终的增强后指纹图像。具体的卷积运算公式为

$$E(i, j) = \sum_{k=-\omega/2}^{\omega/2} \sum_{l=-\omega/2}^{\omega/2} M(k, l) * I(i+k, j+l) \tag{5}$$

式中: $M$ 为对应指纹图像子块的高斯调制二维正弦滤波器模板; $I$ 为原始指纹图像; $E$ 为增强模板和指纹图像进行卷积运算后的增强指纹图像; $\omega$ 为增强模板尺寸; $M(k, l)$ 表示增强模板对应位置的权值; $I(i, j)$ 和  $E(i, j)$ 分别表示原始指纹图像和增强指纹图像中第 $(i, j)$ 点像素的灰度值。

综上所述,本文提出的高斯调制二维正弦曲面滤波器指纹图像增强算法的实现过程如下

输入:有效分割处理后的指纹图像

输出:本文算法增强处理后的指纹图像

(1) 按照分块尺寸  $k \times k$  对指纹图像进行分块处理,本文中  $k$  设定为 8;

(2) 采用文献[14]中提出的方法求取每块指纹图像的方向信息  $\theta_i$ ;

(3) 采用文献[15]中提出的方法求取每块前景指纹区的纹线距离  $d_i$ ;

(4) for (每一个前景指纹图像块  $i$ ) 根据该图像块的方向  $\theta_i$ , 纹线频率  $f_i = 1/d_i$  和相应的高斯常数构造对应该块指纹图像区域的高斯调制二维正弦曲面滤波器的卷积模板; 采用卷积模板对指纹图像进行模板卷积运算, 实现对指纹图像的增强处理; 对增强后图像进行归一化处理, 将像素值调整到  $[0, 255]$  区间;

End

(5) 对所有前景图像块进行增强处理后, 输出增强后的指纹图像。

### 3 实验结果

为了验证本文提出的高斯调制二维正弦曲面滤波器对指纹图像的增强能力, 首先采用文中算法对添加了强噪声的标准纹理图像进行增强处理, 获得增强后图像, 并和原图像进行比较分析, 然后采用本文算法对典型的低质量指纹图像进行滤波增强处理, 获得增强后指纹图像数据, 并和经典的 Gabor 滤波器算法增强结果进行对比分析。

#### 3.1 本文算法对标准纹理图像的增强效果

针对图 6(b) 所构造的添加了强噪声的标准纹理图像, 采用标准纹理图像的实际方向值  $\theta = \pi/4$  和频率值  $f = 1/9$  构造高斯调制二维正弦曲面滤波器模板, 并采用模板对加噪图像进行卷积运算, 获得滤波增强图像, 最后对图像进行二值化处理, 将结果和原图进行比较。具体结果如图 9 所示。

对比增强结果图(图 9)和原图(图 6(a))可以看出, 在对添加了各类强噪声的纹理图像进行增强处理后, 图像的纹理完整地保留了下来, 且纹线之间的界限非常清晰, 不存在叉连, 说明本文算法有非常好的去噪能力, 并能够保持纹理结构的完整。

#### 3.2 本文算法对实际指纹图像的增强结果

为了更好地分析文中算法对低质量指纹图像的增强处理能力, 本文依托山东大学指纹图像数据库和 NIST 指纹图像数据库进行了多组实验, 并将本文算法的增强结果和经典的 Gabor 滤波器增强结果进行了比较分析。图 10 给出了两种算法对两幅低质量指纹图像进行增强处理后的图像, 两幅原始指纹图像分别选自两个不同的指纹图像库, 图像中白色圆圈标记了强噪声区域的位置。分析图像中的噪声类型可以看出, 第一幅图像中主要是横切性疤痕, 形成了图像中的断线, 第二幅图像中主要是纹路不清晰, 容易形成叉连。

由图 10 可以看出, Gabor 滤波增强算法和本文提出的高斯调制二维正弦曲面滤波器增强算法都能够有效地实现对指纹图像的增强处理, 极大地提高了指纹图像质量。但深入对比分析两种算法对典型指纹图像的增强处理结果可以看出, 本文算法对断线的连接力度更强, 对横切性疤痕、纹线粘连等强噪声指纹图像区域具有更好的鲁棒性, 增强后的指纹图像更为清晰、合理且纹线叉连现象更少, 对图 10 (a) 中白色圆圈所标记的强噪声区域的增强结果可证明本文方法的有效性。

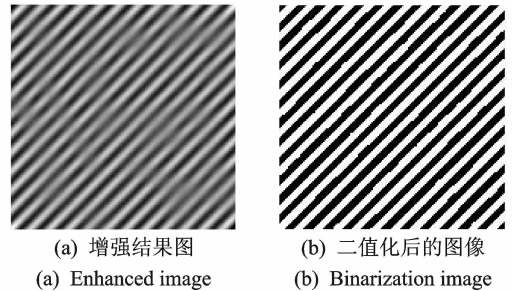


图 9 对加噪的标准纹理图像(图 7(b))的增强结果  
Fig. 9 Enhanced image of noised typical texture image using proposed enhancement algorithm

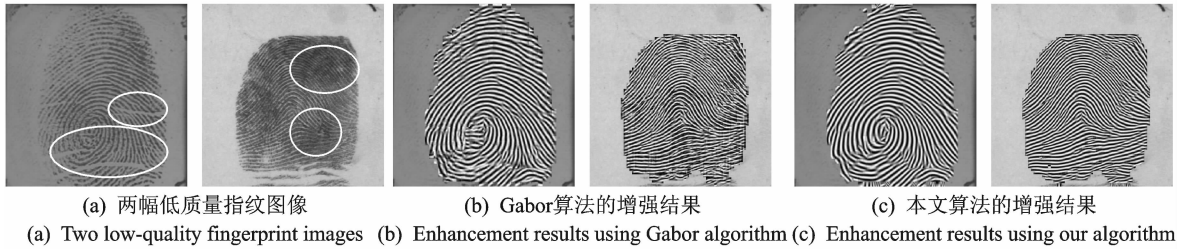


图 10 本文算法和经典的 Gabor 滤波增强算法的增强结果

Fig. 10 Enhancement results of proposed algorithm and Gabor filter enhancement algorithm

## 4 结束语

本文首先深入分析了指纹图像的纹理结构,在此基础上指出指纹纹理是一种比较规则的二维正弦曲面。通过构造与指纹纹线结构相一致的二维正弦曲面滤波器对指纹图像进行增强处理,可以有效地去除指纹图像中的各类噪声信息,修复低质量指纹图像中的疤痕、断线和粘连等,提高指纹纹线的清晰度,改善指纹图像质量。同时,为了有效降低边缘噪声对增强算法效果的影响,文中采用二维高斯函数对二维正弦曲面滤波器进行了调制,对该滤波器进行进一步优化,最终设计实现了高斯调制二维正弦曲面滤波器,并采用该滤波器对指纹图像进行增强处理。具体实验结果表明,本文提出的基于高斯调制二维正弦曲面滤波器的指纹增强算法比基于 Gabor 滤波器的指纹图像增强算法的性能更好,能够有效地修复低质量指纹图像中普遍存在的疤痕、断线、粘连等强噪声区,具有更强的断线连接能力,能有效提高指纹图像增强的实际效果,从而可以提高细节特征信息提取结果的准确性,提升自动指纹识别系统的准确率、使用范围以及适用人群。同时,本文算法对频率信息更为敏感,不准确的频率会降低滤波器的性能。因此,可靠的频率信息可以有效地提升算法的实际增强效果,尤其是在强噪声区。在后续的研究工作中,需要进一步优化滤波器,提高指纹方向信息提取算法和指纹纹线频率信息提取算法的实际效果,获得更为准确、可靠的方向信息和频率信息,以保证构造的滤波器能够更好地对低质量指纹图像进行增强处理,获得高质量的增强指纹图像,满足自动指纹识别技术的实际应用需要。

## 参考文献:

- [1] 罗希平, 田捷. 自动指纹识别中的图像增强和细节匹配算法[J]. 软件学报, 2002, 13(5): 946-956.  
Luo Xiping, Tian Jie. Image enhancement and minutia matching algorithm in automatic fingerprint identification system[J]. Journal of Software, 2002, 13(5): 946-956.
- [2] Hong L, Wan Y, Jain A K. Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on PAMI, 1998, 20(8): 777-789.
- [3] Hong L, Jain A K, Pankanti S, et al. Fingerprint enhancement[C]//Proc IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. Sarasota, FL: IEEE, 1996:202-207.
- [4] 尹义龙, 詹小四, 谭台哲, 等. 基于加博函数的指纹增强算法及其应用[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 483-489.  
Yin Yilong, Zhan Xiaosi, Tan Taizhe, et al. An algorithm based on Gabor function for fingerprint enhancement and its application[J]. Journal of Software, 2003, 14(3): 483-489.
- [5] Kamei T, Mizoguchi M. Image filter design for fingerprint enhancement[C]//Proc ISVC'95. Coral Gables, FL: [s. n.], 1995:109-114.
- [6] 武妍, 杨磊. 一种改进的基于方向滤波的指纹图像增强算法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(2): 22-25.  
Wu Yan, Yang Lei. An improved orientation filter-based algorithm for fingerprint enhancement[J]. Journal of Huazhong University Science & Technology: Natural Science Edition, 2007, 35(2): 22-25.
- [7] 王玮, 李见为, 黄非非, 等. 基于 Log-Gabor 滤波的指纹增强[J]. 计算机科学, 34(7):241-243, 2007.  
Wang Wei, Li Jianwei, Huang Feifei, et al. Fingerprint enhancement based on Log-Gabor[J]. Computer Science, 2007, 34



(7): 241-243.

- [8] 詹小四, 尹义龙, 孟祥旭, 等. 基于二维正弦曲面滤波器的指纹图像增强算法研究[J]. 山东大学学报:工学版, 2009, 29(2): 8-14.  
Zhan Xiaosi, Yin Yilong, Meng Xiangxu, et al. Research on fingerprint image enhancement algorithm based on two-dimensional sine quadric surface filter[J]. *Journal of Shandong University: Engineering Science Edition*, 2009, 39(2): 8-14.
- [9] 彭章平, 彭小奇, 伍更新. 基于非平稳信号频谱分析的指纹图像增强算法[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(1): 35-39.  
Peng Zhangping, Peng Xiaoqi, Wu Gengxin. Fingerprint enhancement algorithm based on non-stationary signal frequency spectrum analysis[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2008, 23(1): 35-39.
- [10] 程建刚, 田捷, 何余良. 基于非线性扩散滤波的指纹增强算法[J]. 自动化学报, 2004, 20(6): 854-862.  
Cheng Jiangan, Tian Jie, He Yuliang. Fingerprint enhancement based on nonlinear diffusion filter[J]. *Journal of ACTA Automatic Sinica*, 2004, 20(6): 854-862.
- [11] 赵晓丽, 孔勇. 基于高斯小波的多尺度积图像边缘检测算法[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(4): 490-494.  
Zhao Xiaoli, Kong Yong. Image edge detection algorithm based on multi-scale product of Gaussian wavelet[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2008, 23(1): 490-494.
- [12] Jiang Murong, Zhong Yinghao, Wang Xin, et al. Improve the nonparametric image segmentation with narrowband levelset and fast Gauss transformation[J]. *Applied Mathematics*, 2012, 3(11): 1836-1841.
- [13] 詹小四, 宁新宝, 尹义龙, 等. 基于多级分块尺寸下的指纹方向信息提取[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2003, 39(4): 476-482.  
Zhan Xiaosi, Ning Xinbao, Yin Yilong, et al. The algorithm for distilling fingerprint orientation in multi-level block size[J]. *Journal of Nanjing University: Nature Science Edition*, 2003, 39(4): 476-482.
- [14] 陈蕴, 尹义龙, 张晓梅, 等. 一种基于统计窗的纹线距离估计方法[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(3): 266-270.  
Chen Yun, Yin Yilong, Zhang Xiaomei, et al. A method based on statistical window for ridge distance estimation in fingerprint image[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(3): 266-270.

#### 作者简介:



詹小四(1975-), 男, 教授, 研究方向: 图像处理与模式识别、机器学习, E-mail: xiaoszhan@zisu.edu.cn.



蔡乐毅(1981-), 男, 讲师, 研究方向: 图像处理与模式识别, E-mail: cly@zisu.edu.cn.

