



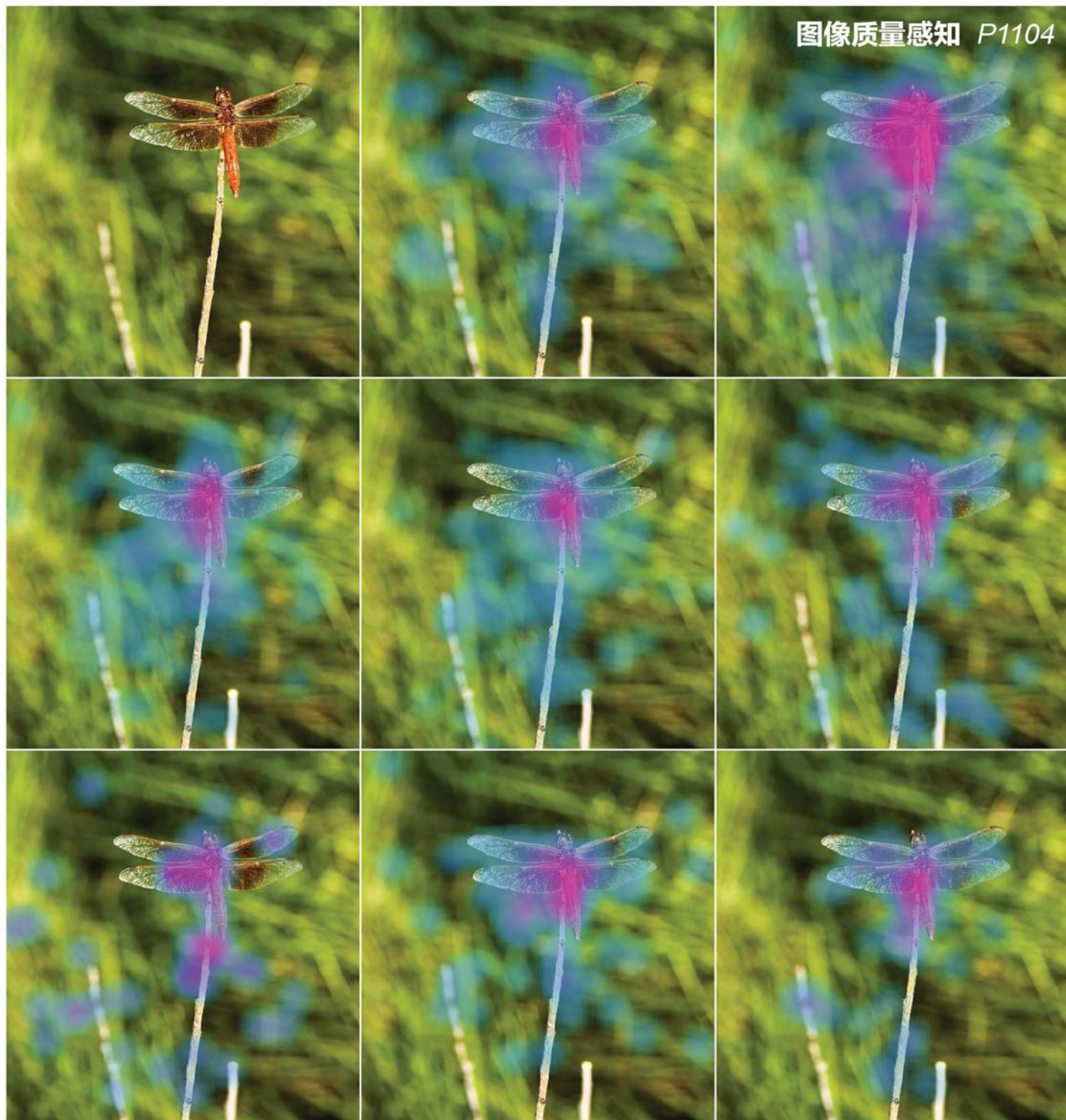
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

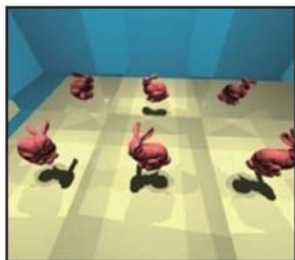
2014
07
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



多特征融合的图像自动变形
(第1012页)

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪(第1038页)

快速虚顶点光子映射的焦散
绘制(第1062页)

综述

打印机光谱特性化方法研究综述

万晓霞, 刘强 0985

图像处理和编码

图像场方向导数的局部区域重建

叶学义, 齐珍珍, 何志伟, 李汪兵 0998

Lytro相机的光场图像校正与重对焦方法

周文晖, 林丽莉 1006

多特征融合的图像自动变形

肖红光, 肖树根, 刘京, 李淳芃, 陈立福 1012

结合频谱扩散的指纹图像滤波增强

卞维新, 封举富, 罗永龙, 徐德琴 1021

图像分析和识别

中心投影变换的抗噪性分析

黄永东, 李三三, 杨建伟 1031

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪

宁纪锋, 赵耀博, 石武祯 1038

自主移动机器人自适应室外道路检测

杜明芳, 王军政, 李静, 崔广涛, 方建军, 曹海青 1046

分层树结构字典编码的行为识别

周同驰, 程旭, 吴镇扬 1054

计算机图形学

快速虚顶点光子映射的焦散绘制

李瑞瑞, 秦开怀 1062

双重视图下的3维网格模型可见水印

陆尘, 朱长青, 王玉海 1068

虚拟现实与增强现实

个性化编辑的轻量化3维树木模型构建

董天阳, 纪磊, 刘思远, 范菁, 熊丽荣 1074

遥感图像处理

带距离徙动校正的压缩感知PFA成像方法

段化军, 朱岱寅 1085

结合边缘和区域的活动轮廓模型SAR图像目标轮廓提取

王沛, 周鑫, 彭荣鲲, 符鹏 1095

第2届全国图像图形联合学术会议专栏

视线跟踪技术的图像质量主观数据库构建及其可视化

张昀, 牟轩沁 1104

丰富图像标签的正则化非负矩阵分解方法

夏召强, 冯晓毅, 彭进业 1112

CONTENTS

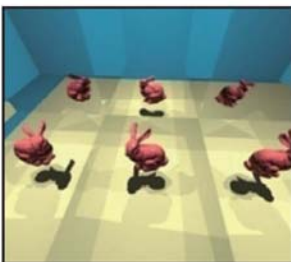
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Multi-feature fusion-based image morphing(P1012)



Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature(P1038)



Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations(P1062)

Review

Review of spectral printer characterization

Wan Xiaoxia, Liu Qiang 0985

Image Processing and Coding

Reconstructing image local regions based on directional derivative of a field

Ye Xueyi, Qi Zhenzhen, He Zhiwei, Li Wangbing 0998

Light field image rectification and refocus method for Lytro camera

Zhou Wenhui, Lin Lili 1006

Multi-feature fusion-based image morphing

Xiao Hongguang, Xiao Shugen, Liu Jing, Li Chunpeng, Chen Lifu 1012

The fingerprint enhancement using filtering combined with spectrum diffusion

Bian Weixin, Feng Jufu, Luo Yonglong, Xu Deqin 1021

Image Analysis and Recognition

Robustness to noise of central projection transformation

Huang Yongdong, Li Sansan, Yang Jianwei 1031

Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature

Ning Jifeng, Zhao Yaobo, Shi Wuzhen 1038

Adaptive outdoor road detection for autonomous mobile robot

Du Mingfang, Wang Junzheng, Li Jing, Cui Guangtao, Fang Jianjun, Cao Haiqing 1046

Action recognition using hierarchically tree-structured dictionary encoding

Zhou Tongchi, Cheng Xu, Wu Zhenyang 1054

Computer Graphics

Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations

Li Ruirui, Qin Kaihuai 1062

Visible watermarking for three-dimensional mesh model in two views

Lu Chen, Zhu Changqing, Wang Yuhai 1068

Virtual Reality and Augmented Reality

Construction of lightweight three-dimensional tree models supporting personalization editing

Dong Tianyang, Ji Lei, Liu Siyuan, Fan Jing, Xiong Lirong 1074

Remote Sensing Image Processing

PFA imaging with range migration correction by compressive sensing

Duan Huajun, Zhu Daiyin 1085

Active contour model based on edge and region attributes for target contour extraction in SAR image

Wang Pei, Zhou Xin, Peng Rongkun, Fu Peng 1095

Column of UCIG'2013

Eye tracking based image quality assessment database and visualization method

Zhang Yun, Mou Xuanqin 1104

Regularized non-negative matrix factorization method for image tag enrichment

Xia Zhaoqiang, Feng Xiaoyi, Peng Jinye 1112

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)07-1021-10

论文引用格式: Bian W X, Feng J F, Luo Y L, Xu D Q. The fingerprint enhancement using filtering combined with spectrum diffusion[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(7): 1021-1030. [卞维新, 封举富, 罗永龙, 徐德琴. 结合频谱扩散的指纹图像滤波增强[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(7): 1021-1030.] [DOI:10. 11834/jig. 20140705]

结合频谱扩散的指纹图像滤波增强

卞维新^{1,2}, 封举富², 罗永龙¹, 徐德琴¹

1. 安徽师范大学数学计算机科学学院, 芜湖 241003;

2. 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

摘要: **目的** 指纹图像增强是自动指纹识别系统中的重要环节, 是获取可靠的指纹细节特征的基础。为了弥补指纹图像的质量缺陷, 实现对低质量指纹图像的有效增强, 提出一种基于块质量评价和块频谱匹配滤波器的块频谱扩散指纹增强方法。**方法** 首先, 基于块内点方向一致性参数, 给出了块质量评价结果; 然后, 研究了复合窗口频谱扩散特性, 完成了基于一次模糊 K 均值聚类、一阶自适应带宽的 2 维巴特沃斯带通滤波器和 2 维高斯窗的块频谱匹配滤波器设计; 最后, 依据块质量等级的高低, 应用块频谱匹配滤波器对复合窗口的块频谱进行滤波增强。**结果** 选取 FVC 2004 指纹库中的大量指纹图像进行了实验, 实验结果表明, 该方法对高质量和低质量指纹图像均有良好的增强效果。**结论** 本文方法对指纹的脊线方向和频率等参数依赖较弱, 拥有很强的容错能力。实验结果验证了该方法在指纹图像增强中的有效性, 可适用于高质量和低质量的指纹图像增强。

关键词: 指纹识别; 块质量评价; 块频谱匹配滤波器; 频谱扩散

The fingerprint enhancement using filtering combined with spectrum diffusion

Bian Weixin^{1,2}, Feng Jufu², Luo Yonglong¹, Xu Deqin¹

1. School of Mathematics and Computer Science, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China;

2. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: **Objective** The enhancement of fingerprint plays an important role in automatic fingerprint identification system. It is the foundation that extracts fingerprint minutiae reliably. In order to make up for the defects of fingerprint image and enhance low quality fingerprint image effectively, this paper proposes a novel algorithm by using spectrum diffusion to enhancing the fingerprint image. The basic idea of the algorithm is to enhance the fingerprint by using block quality assessment and block spectrum matched filter in the frequency domain. **Method** First, the quality assessment result of block image is obtained according to the point direction coherence parameter. Second, this paper studies the diffusion characteristics of composite window spectrum, and then design out a block spectrum matched filter based on linear fuzzy k-means clustering and 2D Butterworth band-pass filter of one order adaptive bandwidth and two-dimensional Gaussian window. At last, the composite window spectrum is enhanced by block spectrum matched filter according to the block quality grade. **Result** Experiments on the database of FVC 2004 show that, compared with the previously proposed enhancement methods, the proposed method is more accurate and more robust against noise, and has a prominent effect on both low quality and

收稿日期: 2013-12-16; 修回日期: 2014-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61370050)

第一作者简介: 卞维新 (1974—), 男, 副教授, 硕士生导师, 北京大学信息科学技术学院访问学者, 2005 年于贵州大学获计算机应用技术专业硕士学位, 主要研究方向为图像处理和模式识别。E-mail: bwx2353@mail.ahnu.edu.cn

通信作者: 封举富, E-mail: fjf@ois.pku.edu.cn

high quality fingerprint image. **Conclusion** This paper presents a fingerprint enhancement using filter method of weak parameters dependencies in frequency domain. This method is of good fault tolerant. The experimental results show that both high quality and low quality fingerprint image can be enhanced effectively.

Key words: fingerprint identification; block quality assessment; block spectrum matched filter; spectrum diffusion

0 引言

自动指纹识别系统的研究主要集中在3个方面:图像增强,指纹分类和细节点匹配^[1]。大多数自动指纹识别系统基于点模式匹配来判断两枚指纹是否一致,系统的可靠性取决于细节点提取的准确程度。为了获取可靠的指纹细节特征,在特征提取之前实施指纹增强是十分重要的。

指纹增强方法有很多^[2],主要有空域增强和频域增强两类。上下文滤波是常用的一种指纹增强方法,依赖于脊线方向和频率参数的准确获取。最早设计并应用上下文滤波器在空间域中对指纹增强的是 O'Gorman 等人^[3-4]。该方法使用具有方向性的滤波器沿着指纹脊线方向进行平滑,同时还能够能够在梯度方向上提高纹理的对比度。Hong 和 Sherlock 等人则提出了另外一种在频域应用方向 Gabor 滤波器^[5]及 2 阶巴特沃斯带通滤波器^[6]对指纹进行滤波增强的方法。何余良等人^[7]提出了一种基于指纹脊线方向估计和二值化的空间域纹线滤波增强方法。为了克服传统 Gabor 滤波器参数对输入指纹图像质量敏感的缺陷,Yang 等人^[8]提出了一种改进的 Gabor 滤波方法,给出了一种自适应参数选择方案,可以更准确地保存指纹的模式结构。程建刚等人^[9]结合指纹全局和局部特征,在二元尺度空间将指纹图像分解为各尺度下的子图像,用各尺度下的方向高斯滤波函数对子图像进行去噪,融合各尺度下增强后的子图像,复原增强的指纹图像。由于奇异点区域方向变化较大,而大多指纹增强方法又把脊线方向作为滤波增强的重要参数,所以在奇异点区域的增强效果较差。Wang 等人^[10]为了克服这一缺陷,设计了一个圆形高斯带通滤波器在频域中对该区域进行滤波增强。Gottschlich^[11]则引入曲 Gabor 滤波器来增强指纹图像的高曲率区域,该方法也很大程度上依赖于方向场和脊线频率等参数。Chikkerur 等人^[12]提出了一种基于重叠块的短时傅里叶变换分析的方法,该方法依赖于脊线方向、频率和角带宽的频率域上下文滤波。李利等人^[13]

采用 Radon 变换来估计 Gabor 滤波中的方向和频率参数,然后进行 Gabor 滤波增强。Iwasokun 等人^[14]提出了一种多层次模型指纹增强方法,以便更准确地获取 Gabor 滤波参数。Bartunek 等人^[15]给出了一种基于上下文信息的多模块自适应增强方法,滤波参数可根据输入图像自动调整。上述增强方法都有各自的优点,但缺点是都严重依赖于指纹脊线信息参数的准确获取,对指纹奇异点区域以及无法准确获取方向和频率等信息的低质量指纹区域增强效果较差。Sutthiwichaiorn 等人^[16]在频率域中基于重叠窗口频谱及图像质量分析,结合噪声抑制、高斯带通滤波器和高斯方向窗实现了指纹增强。该方法把指纹脊线信息作为辅助参数,能准确地完成指纹增强,具有一定的优越性。

受 Sutthiwichaiorn 等人的启发,在空域对指纹分块,基于块点方向一致性估计,给出块质量等级。按照块质量等级,依次对各块进行频域增强,并结合块频谱内在特性,通过模糊聚类对块频谱进行噪声抑制。用具有自适应带宽的一阶 2 维巴特沃斯带通滤波器对脊线信号滤波,并用 2 维高斯函数平滑带通滤波后的频谱,完成块频谱匹配滤波器的设计。在频域用块频谱匹配滤波器对图像进行带通增强,将结果重新转换回空间域。由于采用了复合窗口和块优先级方法,使得高质量块的频谱得以扩散到低质量块,提高了低质量块的增强质量。此外,该方法对指纹的脊线方向和频率等模式信息依赖性较弱,对方向场和频率具有很高的容错能力,能高质量的增强指纹图像,并且增强结果可直接转换为二值化图像,无需再做额外的二值化处理。

1 指纹图像频域分析

1.1 频域参数估计

指纹具有独特的模式结构,很适合进行频域分析。考虑到指纹的纹理特征,把整幅指纹转换到频域分析并不合适。好的频域增强算法都是将指纹在空域分块,基于块傅里叶变换在频域进行频谱分析和滤波增强^[10-11]。块傅里叶变换定义为

$$F_{b(x,y)}(u,v) = \frac{1}{W^2} \sum_{m=0}^{W-1} \sum_{n=0}^{W-1} I_{b(x,y)}(m,n) e^{-\frac{2\pi j(mu+nv)}{W}} \quad (1)$$

式中, $I_{b(x,y)}(m,n)$ 为待处理的指纹图像块, $u=0, 1, \dots, W-1; v=0, 1, \dots, W-1$, $F_{b(x,y)}(u,v)$ 为图像块的傅里叶系数, W 为块的大小。

图1(a)为一大大小为 32×32 像素的高质量指纹图像块, 图1(b)为图1(a)的傅里叶变换频谱, 频域

原点对应于频谱的峰值, 即频谱的直流成分(DC), 这里将频域原点 $F(u_0, v_0)$ 移动到了图像中心, 并将原频谱进行了反色处理, 移除了直流频谱(令DC为0), 如图1(c)所示。移除直流频谱后具有最高峰值频谱的点 (u_p, v_p) 即为脊线频谱中心, 如图1(d)所示, 则脊线频率为

$$f_r = \sqrt{(u_p - u_0)^2 + (v_p - v_0)^2} \quad (2)$$

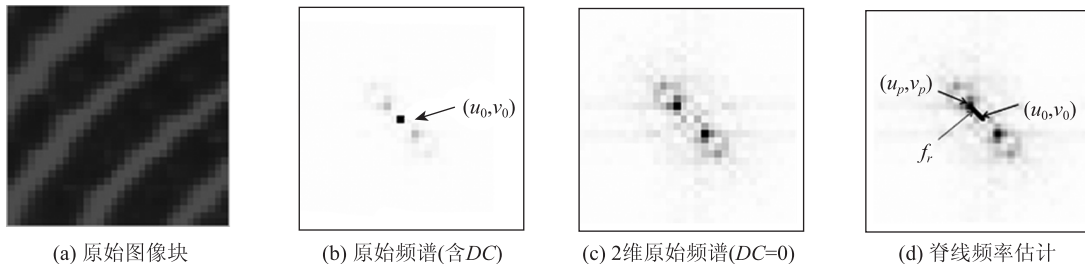


图1 频域指纹块脊线频率估计

Fig. 1 Frequency estimation of fingerprint block in the frequency domain

1.2 模糊 K 均值聚类脊线信号和噪声

文献[16]采用定比统计的方式进行噪声抑制, 但对于不同的块频谱, 脊线信号和噪声信号频谱的分布是不同的。图3给出了两类块频谱分布直方图, 可见在块频谱中脊线频谱只占极小部分, 且集中在高频部分; 噪声频谱占据了绝大部分, 均聚集在低频部分。此外, 噪声频谱和脊线频谱的幅值差异很大, 类间距离很大, 只要选择好合适的初始聚类中心, 一次模糊 K 均值聚类就可以稳定地将脊线频谱和噪声频谱进行分类。

取初始聚类数 K 为 4, 在低频和高频部分各设置两类聚类中心。为了处理方便, 先将块频谱转换到 1 维空间, 令 $\{S_i | 1 \leq i \leq W^2\}$ 为块频谱的 1 维数据集, 将其按降序排序得到 $\{DS_i | 1 \leq i \leq W^2\}$, 令 Cen_i, Set_i ($1 \leq i \leq 4$) 分别为初始聚类中心和各类聚类数据集, 给定各类初始聚类中心为

$$\begin{cases} Cen_1 = DS_{Pos1} + Span/2 \\ Cen_2 = DS_{Pos2} \\ Cen_3 = DS_{Pos3} \\ Cen_4 = DS_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中,

$$\begin{aligned} Pos1 &= W^2 \\ Pos2 &= \lfloor W^2 \times 2\% + 0.5 \rfloor \\ Pos3 &= \lfloor W^2 \times 1\% + 0.5 \rfloor \\ Span &= DS_{Pos2} - DS_{Pos1} \end{aligned}$$

以设定的聚类中心对块频谱进行一次模糊 K 均值聚类(FKMC): 将各频谱归为距初始聚类中心距离最近的类。取聚类结果中频谱分布最高的两类, 即以 Cen_3, Cen_4 为聚类中心的两类 Set_3, Set_4 为脊线频谱, 聚类结果中频谱分布较低的两类, 即以 Cen_1, Cen_2 和为聚类中心的两类为噪声频谱。则噪声抑制后的块频谱为

$$H_{FKMC;b(x,y)}(u,v) = \begin{cases} |F_{b(x,y)}(u,v)| & |F_{b(x,y)}(u,v)| \geq \min(Set_3) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

图2给出了两组实验结果: 图2(c)和(f)为一次模糊 K 均值聚类结果; 图2(d)和(g)为文献[16]的结果, 可见本文方法对噪声的抑制能力更好, 而且具有适应性; 文献[16]的方法对低质量块的噪声抑制不理想。

2 指纹图像增强

2.1 基于块内点方向一致性的块质量评价

块质量评价结果, 尤其是高质量块的评价结果对本文方法的增强结果影响非常大。这里的块质量评价标准和一般的指纹质量评价标准不同, 此处只要保证评价结果中的高质量块准确即可, 即保证最先增强的块一定是高质量块, 允许遗漏狭义上的高

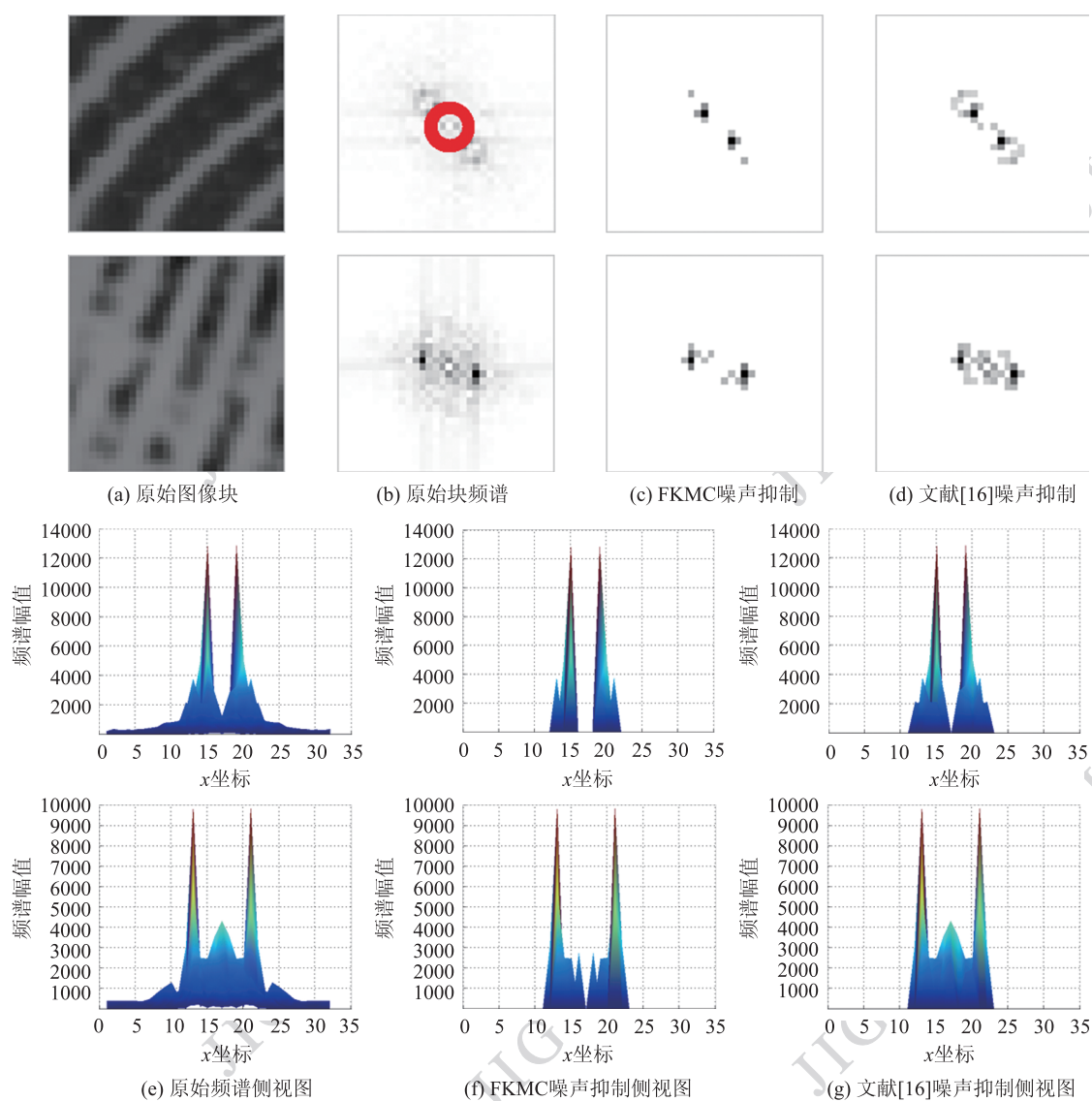


图2 频域脊线信号估计和噪声抑制

Fig. 2 Ridge signal estimation and noise suppression in the frequency domain

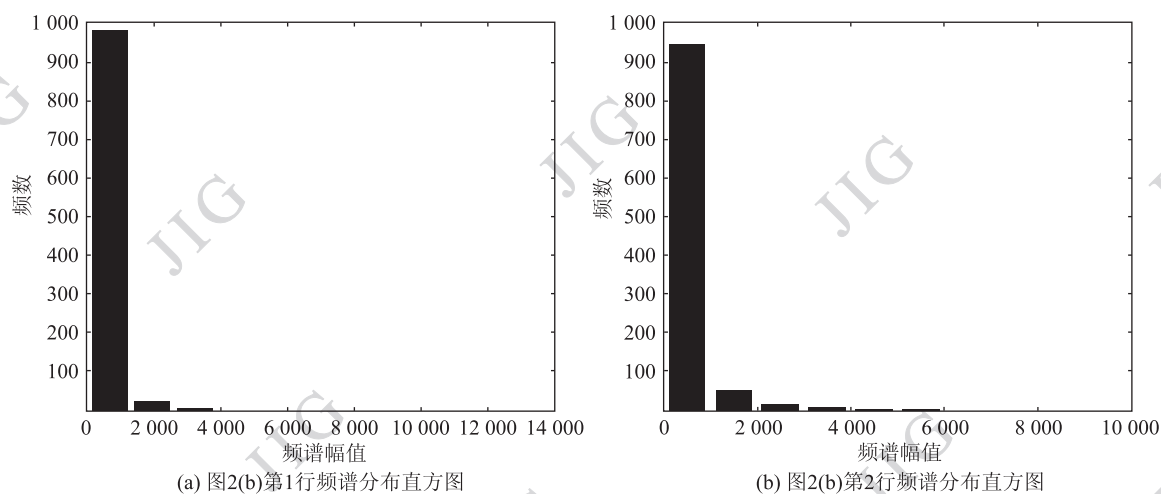


图3 块频谱分布直方图

Fig. 3 Histograms of the block spectra distribution

质量块(如奇异点区域),具有一定容错能力。

采用块点方向一致性估计的方法对块质量进行估计,该方法虽然不能保证评价结果完全准确,但可以保证评价结果中高质量块的可靠性。文献[17-18]分别基于结构张量和点梯度向量集线性投影分析给出了图像局部方向一致性度量和估计的方法,这两种方法本质上是一致的。这里采用文献[18]的方法来估计块内点方向的一致性。

令块点梯度向量集 $V_j (j=1, \dots, W^2)$ 为

$$V_j = \begin{bmatrix} G_{jx}(x, y) \\ G_{jy}(x, y) \end{bmatrix} \quad (5)$$

则有

$$V_s = \sum_{j=1}^{W \times W} V_j V_j^T = \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} \\ G_{xy} & G_{yy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $G_{xx} = \sum_{j=1}^{W \times W} G_{jx}^2$, $G_{yy} = \sum_{j=1}^{W \times W} G_{jy}^2$, $G_{xy} = \sum_{j=1}^{W \times W} G_{jx} G_{jy}$ 。

令 λ 是 V_s 的特征值,则有

$$\lambda_1 = \frac{(G_{xx} + G_{yy}) + \sqrt{(G_{xx} - G_{yy})^2 + 4G_{xy}^2}}{2} \quad (7)$$

$$\lambda_2 = \frac{(G_{xx} + G_{yy}) - \sqrt{(G_{xx} - G_{yy})^2 + 4G_{xy}^2}}{2}$$

块内点方向一致性参数定义为

$$Coh = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (8)$$

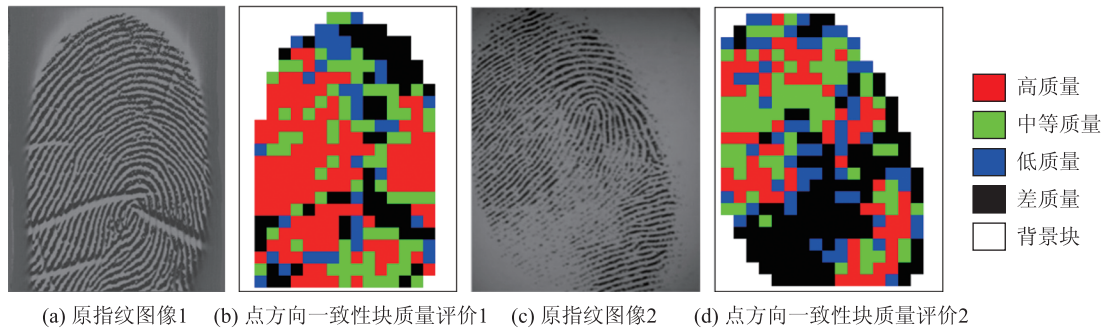
当块内所有点方向相同时, $\lambda_2 = 0$, Coh 的值为1;当块内所有点方向均匀分布时, $\lambda_1 = \lambda_2$, Coh 的值为0;其他情况下, Coh 的值介于0和1之间。令 $Q_{b(x,y)}$ 为块 $b(x,y)$ 的质量等级,则

$$Q_{b(x,y)} = \begin{cases} 1 & Coh \in [0.8, 1] \\ 2 & Coh \in [0.7, 0.8) \\ 3 & Coh \in [0.6, 0.7) \\ 4 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$Q_{b(x,y)}$ 的值1、2、3、4对应图像块的质量分别为高、中、低和差。图4给出了本文方法对块进行质量评价的结果。图4(a)(c)对应的指纹图像分别来自FVC2004指纹库的DB3_A的100_3和DB4_A的95_7。可见本文的块质量评价能够保证高质量块评价结果的准确性,基本不会误判。

2.2 块频谱匹配滤波器

块脊线频谱基本处于以频谱原点 (u_0, v_0) 为圆心,中心过脊线频谱中心 (u_p, v_p) 的圆形带内,称为脊线频谱带,如图2(b)中所示圆形带区域。因此在频域对指纹频谱进行带通滤波增强是非常合适



(a) 原指纹图像1 (b) 点方向一致性块质量评价1 (c) 原指纹图像2 (d) 点方向一致性块质量评价2

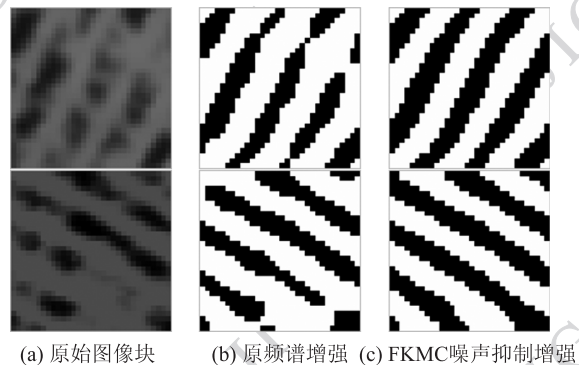
图4 图像块质量评价和分类

Fig. 4 Quality assessment and quality priority classification

的。但圆形频谱带内并不全是脊线频谱,还含有噪声,直接应用带通滤波器进行滤波增强^[10]将导致带内噪声也将增强。本文待增强的频谱是经1.2节噪声抑制后的频谱,基本移除了频谱带内的噪声信号,脊线信号得到有效增强,如图5所示。

一阶巴特沃斯带通滤波器 $H_{B;b(x,y)}$ 定义为

$$H_{B;b(x,y)}(u, v) = \frac{\left[\frac{D(u, v) \times BW}{D^2(u, v) - f_r^2} \right]^2}{1 + \left[\frac{D(u, v) \times BW}{D^2(u, v) - f_r^2} \right]^2} \quad (10)$$



(a) 原始图像块 (b) 原频谱增强 (c) KFMC噪声抑制增强

图5 原频谱和 KFMC 噪声抑制频谱增强

Fig. 5 Enhancement using original and KFMC spectrum

式中, BW 为带通滤波器的带宽, f_r 为脊线频率, $D(u, v)$ 是频谱原点 (u_0, v_0) 到点 (u, v) 的欧氏距离。由于滤波过程中依据块质量的高低选择不同的滤波窗口, 因此脊线频率也随着块大小的变化而变化, BW 也需相应调整。文献[16]为两类块大小分别设定固定的滤波带宽, 这很可能使得滤波带宽过小或过大, 从而造成脊线频谱的丢失或引入噪声。依据块频率, 自适应选择带宽为

$$BW = \begin{cases} \lfloor f_r + 0.5 \rfloor - 2 & \lfloor f_r + 0.5 \rfloor \geq 4 \\ 2 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

由于对原始频谱进行截断式的噪声抑制及带通滤波器的使用可能会丢失一部分高频信号, 导致空间域增强结果出现振铃效应。为了克服这一影响, 类似空域平滑, 在频域引入 2 维高斯窗对带通滤波频谱进行平滑处理, 2 维高斯窗定义为

$$H_G(u, v) = \frac{1}{2\pi\delta^2} e^{-(u^2+v^2)/(2\delta^2)} \quad (12)$$

式中, (u, v) 是 2 维高斯函数的窗口坐标, δ 是标准差。取窗口大小为 5×5 , $\delta = 0.8$ 。块频谱匹配滤波器 $H_{BM;b(x,y)}(u, v)$ 定义为带通滤波频谱和 2 维高斯窗的卷积, 即

$$H_{BM;b(x,y)}(u, v) = [H_{FKMC;b(x,y)}(u, v) H_{B;b(x,y)}(u, v)] * H_G(u, v) \quad (13)$$

图 6 为一组实验结果。图 6(a) 为图 2(c) 第 1 行对应的 FKMC 噪声抑制频谱; 图 6(b)(d) 为巴特沃斯带通滤波器对图 6(a) 滤波的结果, 可见远离脊线信号频谱中心的高频信号得到了有效移除; 图 6(c)(e) 是图 6(b) 频谱经高斯窗平滑结果, 即块频谱匹配滤波器的图示, 可见脊线频谱得到有效增强。

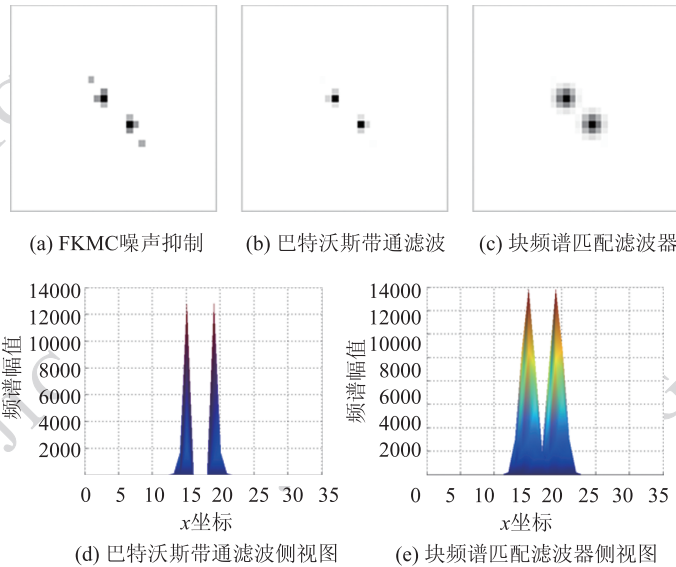


图 6 块频谱匹配滤波器

Fig. 6 Block spectrum matched filter

2.3 滤波增强块选择

滤波增强块的选择是本文算法成功应用的一个关键因素。令每一块的 8 邻域中已被增强块的数量为 Num_{Nei} , 则块的邻域优先级 B_{Pri} 定义为

$$B_{Pri} = \begin{cases} 1 & Num_{Nei} \geq 5 \\ 2 & 5 > Num_{Nei} \geq 2 \\ 3 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

B_{Pri} 的值为 1, 2, 3 对应块邻域优先级分别为高、中和低。

如果是第 1 次迭代, 即所有块都是未增强块, 则待滤波增强块由块质量等级唯一确定; 如果不是第

1 次迭代增强, 则待增强块的选择不仅取决于块质量 $Q_{b(x,y)}$, 而且还要考虑块的邻域增强优先级 B_{Pri} 。令 $Setc$ 为待增强块集, 初始为空。待增强块选择的具体过程为:

- 1) 如果是第 1 次迭代, 将所有 $Q_{b(x,y)} = 1$ 的块添加到 $Setc$, 结束, 否则转步骤 2);
- 2) 取当前具有最高质量等级的所有未增强块, 计算所有块的 B_{Pri} 值;
- 3) 如果存在 $B_{Pri} = 1$ 的块, 将所有 $B_{Pri} = 1$ 的块添加到 $Setc$, 结束, 否则转步骤 4);
- 4) 如果存在 $B_{Pri} = 2$ 的块, 将所有 $B_{Pri} = 2$ 的块

添加到 **Setc**, 结束, 否则转步骤 5);

5) 如果存在 $B_{Pri} = 3$ 的块, 将所有 $B_{Pri} = 3$ 的块添加到 **Setc**。

2.4 指纹图像频域滤波增强

本文算法首先在空域对指纹图像进行分块, 然后对指纹块进行空-频域变换, 最后在频域中进行增强并将结果重新转换到空域。

文献[10]在空域将指纹图像分割为互不重叠的 32×32 像素的块, 并转换到频域进行分析和增强。该方式会导致增强结果出现块效应: 块与块之间有交错痕迹。采用类似文献[11]的重叠块(复合窗口)方法, 将指纹图像分割为具有相同中心的外层块和内层块的策略, 如图 7 所示。

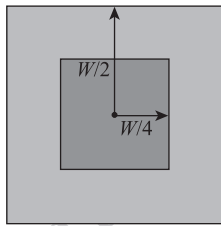


图 7 重叠窗口

Fig. 7 Overlapping window

复合窗口不仅可以消除块效应, 而且是本文算法成功应用的重要因素。本文算法是基于块优先级的, 高质量的块将优先增强, 确保先被增强块的准确性和可靠性。低级别优先级块在增强时其邻域中高质量块已被增强, 复合窗口的应用使高质量块频谱能够扩散到低质量块, 使得低质量块的频谱得到明显改善, 提高了增强质量。如图 8 所示, 第 1 行为原始内层块对应外层块的频谱; 第 2 行为内层块部分邻域增强后对应外层块的频谱。可见低质量块频谱在引入已增强的邻域高质量块频谱后得到明显改善。

在增强过程中采用复合窗口时, 外层块的选择也与块质量有关。如果是高质量块, 取对应外层块大小为 32×32 ; 对于其他质量块, 为了使较高质量块的频谱能更充分地扩散到较低质量块, 外层块取为 64×64 。以增强块为内层块, 取其对应的外层块, 通过傅里叶变换将其转换到频域, 在频域中进行块频谱匹配滤波器滤波增强, 即

$$F_{BM;b(x,y)}(u,v) = F_{b(x,y)}(u,v)H_{BM;b(x,y)}(u,v) \quad (15)$$

式中, $F_{b(x,y)}(u,v)$ 为对应图像块的傅里叶系数,

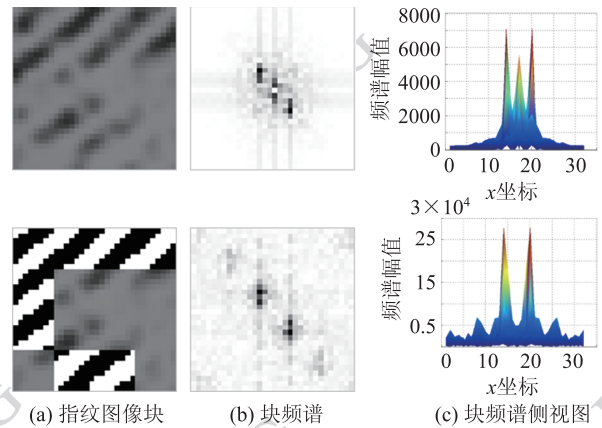


图 8 频谱扩散效应

Fig. 8 Spectrum diffusion effect

$H_{BM;b(x,y)}(u,v)$ 为块频谱匹配滤波器。

对频域增强结果 $F_{BM;b(x,y)}(u,v)$ 执行 2 维傅里叶逆变换, 将增强结果转换到空间域, 即

$$I_{E;b(x,y)}(m,n) = \sum_{u=0}^{W-1} \sum_{v=0}^{W-1} F_{BM;b(x,y)}(u,v) e^{\frac{2\pi j(mu+nv)}{W}} \quad (16)$$

式中, $m=0,1,\dots,W-1; n=0,1,\dots,W-1$ 。本文算法的空间域增强结果可直接转换为二值图像, 即

$$I_{E;b(x,y)}(m,n) = \begin{cases} 255 & I_{E;b(x,y)}(m,n) > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

在极少情况下会出现低质量频谱块被优先增强, 导致增强结果在空域几乎全部为背景(白色)的块。为解决这一问题, 在增强过程中引入块边界错误检测: 如果增强块的 4 个边界有两个以上全为白色, 则该块为错误增强块。

本文算法的具体过程:

1) 取内层块大小为 16×16 , 将原始指纹图像分块, 标记所有块为未增强块, 基于块点方向一致性划分所有块的质量等级。

2) 如果存在未增强块, 初始化 **Setc** 为空, 按 2.3 节方法选择当前待增强块集; 否则转步骤 9)。

3) 如果 **Setc** 为空, 转步骤 7); 否则, 按扫描方式取得待增强块集中的一块, 标记该块为增强块并将其从 **Setc** 中移除。以该块为内层块, 将对应的外层块通过块傅里叶变换转换到频率域, 按 2.2 节得到块频谱匹配滤波器。

4) 按照式(15)完成块频域滤波增强。

5) 按照式(16)将增强结果转换到空间域, 并按照式(17)将空间域增强结果转换为二值图像。

6)取增强块的内层块为有效增强块,填补对应指纹图像的块区域,转步骤3)。

7)检测所有增强块的边界错误,如果为错误增强块则修改块增强标记为未增强块,将该块还原为原指纹图像块,块质量等级重置为当前块质量等级的下一等级。

8)转步骤2)。

9)增强图像后处理:移除背景区域;对增强图像进行二值化中值滤波,去除空域增强图像存在的孤立和寄生噪声。

3 实验结果比较与分析

在 FVC2004 指纹库中提取多幅指纹,在 Intel Pentium 2.5 G 双核 CPU,2 G 内存的计算机,Matlab 7.0 平台上进行大量对比实验。图 9 给出了本文方法的一组实验结果,为了对比,同时给出了文献[16]方法的增强结果。可见本文方法对高质量和低质量指纹都能很好地增强。对比文献[16],本文方法对块质量等级,尤其是高质量块的划分更为可靠,

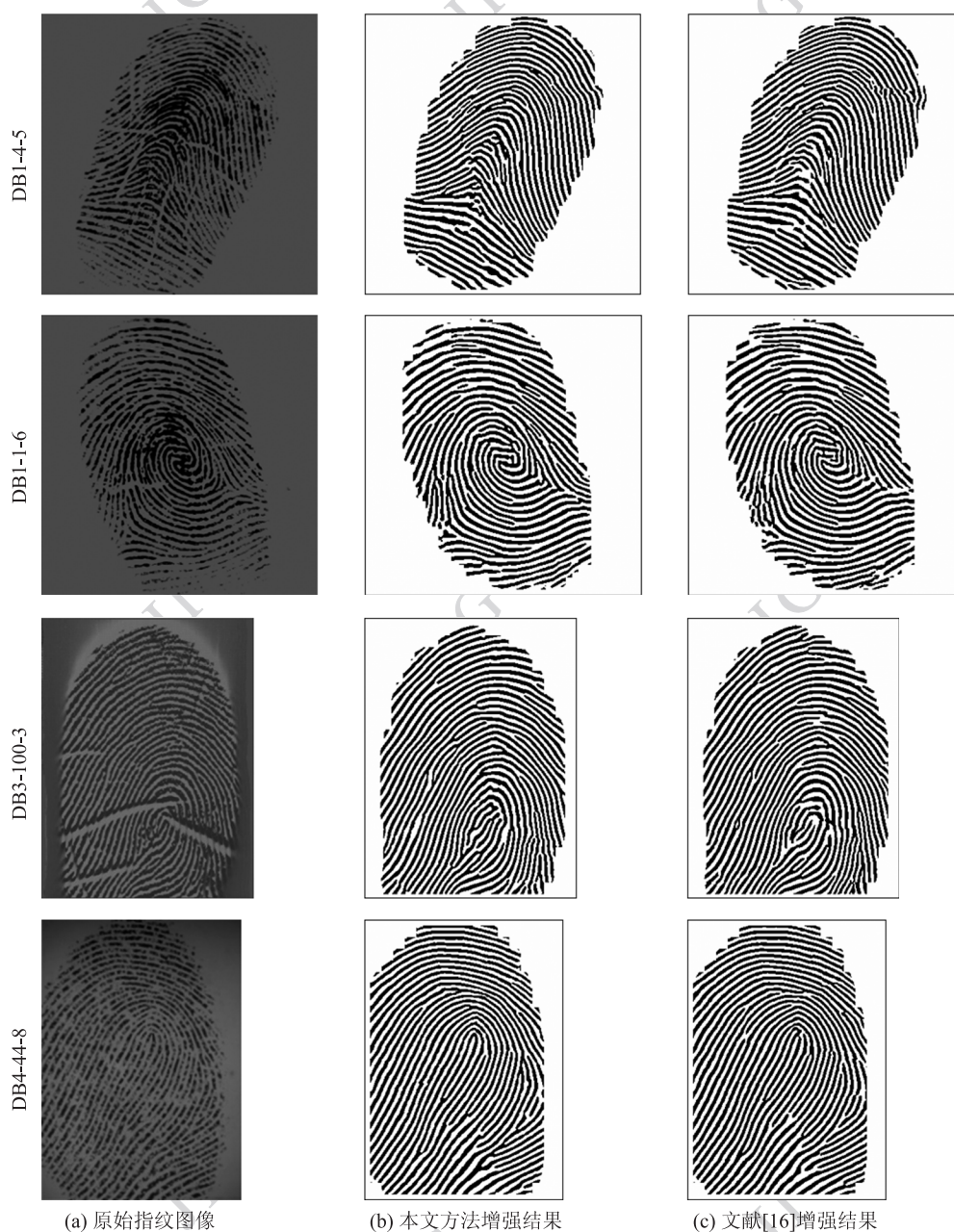


图9 指纹图像增强对比实验结果

Fig. 9 Contrast test results of fingerprint enhancement

这为后面迭代增强中高质量频谱的扩散提供了保障,使得本文方法增强结果更加稳定、准确。本文方法和文献[16]方法增强结果经细化^[19]后提取的细节点进行了对比实验。图10给出了图9第4行两种增强结果细节点提取的实验结果,图10(a)中矩形框和圆形框标注的分别为分叉点和末梢点。可见,本文方法增强结果提取的细节点的准确性更高。此外,本文算法在频谱增强过程中完全不依赖于块脊线方向,对脊线模式信息差的指纹图像也能获得很好的增强效果。

图11给出了一幅具有较高质量的指纹在本文方法各个主要处理阶段的实验结果,原始指纹为DB1_34_2。可见,本文基于点方向一致性的块质量评价方法对高质量块的估计是准确的,确保了高质量块优先增强;在低级别的块增强过程中,邻域优先级的提出使得邻域内拥有最多较高质量增强块的低质量块被优先增强,使得尽可能多的高质量频谱在复合窗口的作用下扩散到低质量块,大大改善了低质量块的频谱,提高了增强质量和可靠性。

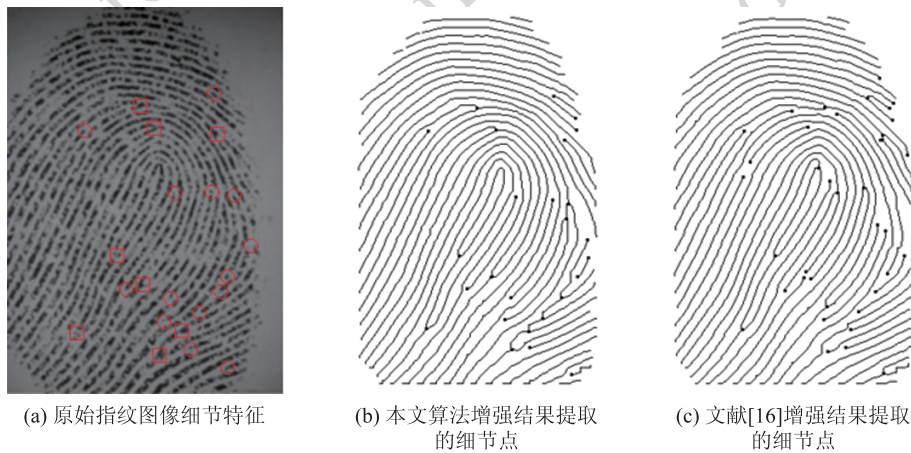


图10 指纹图像细节点提取对比实验结果

Fig. 10 Contrast test results of the minutiae feature extraction

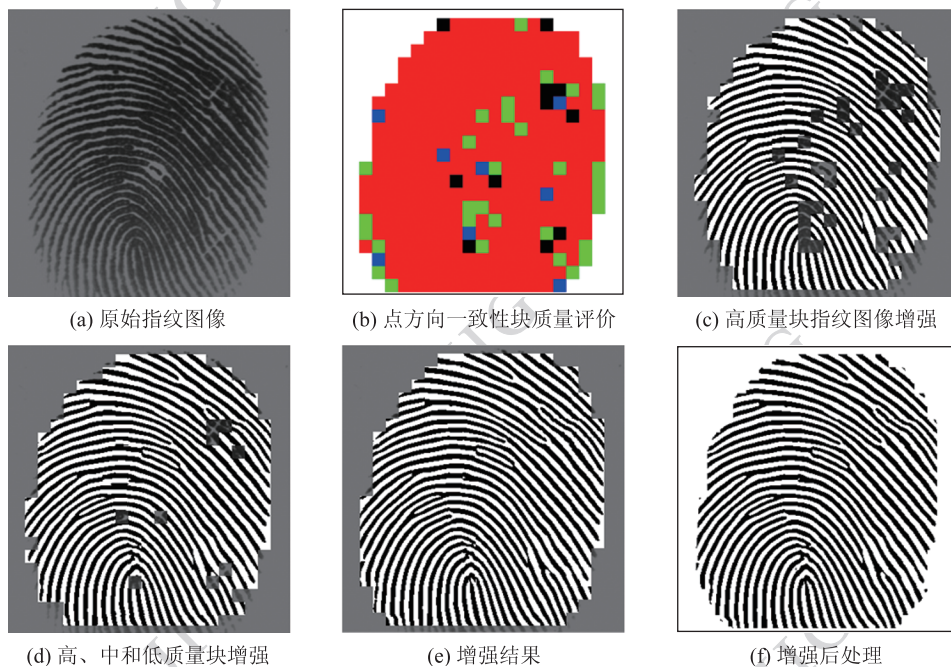


图11 基于频谱扩散的指纹图像增强示例

Fig. 11 Example of fingerprint enhancement based on spectrum diffusion

4 结 论

提出了一种基于块质量评价和块频谱匹配滤波器的块频谱扩散指纹增强方法。相比于传统指纹增强方法对脊线模式信息的依赖,提出的算法对指纹的脊线方向和频率等参数依赖较弱,拥有很强的容错能力,具有一定的优势。点方向一致性块质量评价虽不能完全准确地给出块质量分类,常将高质量的奇异点区域误判为低质量块,但可以保证评价结果中高质量块的可靠性,为后续迭代增强中高质量块频谱能够通过复合窗口扩散到低质量块提供了保障。基于频谱扩散,奇异点区域留待稍后增强也是合适的,更能保证该区域的增强质量。基于一次模糊 K 均值聚类、一阶自适应带宽的 2 维巴特沃斯带通滤波器和 2 维高斯窗的块频谱匹配滤波器的应用使得块噪声频谱得到有效抑制,脊线频谱得到很好增强,并避免了由于截断式噪声抑制而产生的振铃效应。此外,本文增强结果可直接转换为二值指纹图像,省去了一些算法中的二值化处理过程。

参考文献 (References)

- [1] Luo X P, Tian J. Image enhancement and minutia matching algorithms in automated fingerprint identification system[J]. Journal of Software, 2002, 13(5): 946-956. [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.]
- [2] Manju M, Kavitha V. Survey on fingerprint enhancement techniques[J]. International Journal of Computer Applications, 2013, 62(4): 41-47.
- [3] O'Gorman L, Nickerson J V. Matched filter design for fingerprint image enhancement[C]//Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. New York: IEEE, 1988, 2: 916-919.
- [4] O'Gorman L, Nickerson J V. An approach to fingerprint filter design[J]. Pattern Recognition, 1989, 22(1): 29-38.
- [5] Hong L, Wan Y, Jain A. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777-790.
- [6] Sherlock B G, Monro D M, Millard K. Fingerprint enhancement by directional fourier filtering[J]. IEEE Proceedings Vision Image and Signal Processing, 1994, 141(2): 87-94.
- [7] He Y L, Tian J, Luo X P, et al. Image enhancement and minutiae matching in fingerprint verification[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24: 1349-1360.
- [8] Yang J, Liu L, Jiang T, et al. A modified gabor filter design method for fingerprint image enhancement[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(12): 1805-1817.
- [9] Cheng J G, Tian J. Fingerprint enhancement with dyadic scale-space[J]. Pattern Recognition Letters, 2004, 25: 1273-1284.
- [10] Wang S, Wang Y S. Fingerprint enhancement in the singular point area[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(1): 16-19.
- [11] 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.
- [12] Chikkerur S, Cartwright A N, Govindaraju V. Fingerprint enhancement using STFT analysis[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(1): 198-211.
- [13] Li L, Fan J L. The method of fingerprint image enhancement based on radon transform[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(3): 417-421. [李利, 范九伦. 基于 Radon 变换的指纹图像滤波增强方法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(3): 417-421.] [DOI:10.11834/jig.20090306]
- [14] Iwasokun G B, Akinyokun O C, Angaye C O, et al. A multi-level model for fingerprint image enhancement[J]. Journal of Pattern Recognition Research, 2012, 7(1): 155-174.
- [15] Bartunek J S, Nilsson M, Sällberg B, et al. Adaptive fingerprint image enhancement with emphasis on preprocessing of data[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(2): 644-656.
- [16] Sutthiwichaiporn P, Areekul V. Adaptive boosted spectral filtering for progressive fingerprint enhancement[J]. Pattern Recognition, 2013, 46: 2465-2486.
- [17] Almansa A, Lindeberg T. Fingerprint enhancement by shape adaptation of scale-space operators with automatic scale selection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(12): 2027-2042.
- [18] Bian W X, Xu D Q. The application and study of linear projection analysis in fingerprint orientation field extraction[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(4): 921-925. [卞维新, 徐德琴. 线性投影分析在指纹方向场提取中的应用研究[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(4): 921-925.]
- [19] Bian W X, Xu D Q. Composite thinning algorithm for fingerprint image[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(6): 1015-1021. [卞维新, 徐德琴. 指纹图像细化的复合式算法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 1015-1021.] [DOI: 10.11834/jig.20110627]