

指纹图像融合迭代增强

李朝友¹, 孙济洲²

(1. 天津公安警官职业学院 计算机系, 天津 300382; 2. 天津大学 计算机科学与技术学院, 天津 300072)

(lichao@tjpu.edu.cn)

摘要:从刑事现场采集的嫌疑人的指纹图像常是低质量的、残缺的,针对现有方法只做一次增强或不适合增强这类指纹图像,提出了指纹图像融合迭代增强方法。该方法分别在频域和空域两次增强,并采用小波图像融合技术进行迭代增强,有效地提高了脊线的清晰度,接续了脊线的断裂,修补了脊线的残缺。实验结果表明,该算法具有良好的指纹图像增强效果,适合增强低质量的指纹图像。

关键词:指纹图像增强;小波图像融合;迭代;脊线连接;指纹图像修补

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Fingerprint image fusion iterative enhancement

LI Chao-you¹, SUN Ji-zhou²

(1. Department of Computer, Tianjin Public Security Profession College, Tianjin 300382, China;

2. School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Suspect fingerprint images acquired from criminal scenes are often of low quality, or incomplete. The existing algorithms/methods found in literature are not suitable for enhancing these fingerprint images, because these algorithms/methods only perform enhancement once. In this paper, a new method for fingerprint image enhancement was proposed. The proposed method enhanced fingerprint image in Fourier domain and spatial domain by using iterative and wavelet fusion technique. Experimental results indicate that the proposed method significantly improves the performance of fingerprint enhancement — not only was the ridge definition enhanced, but also the ridge fracture was connected and the incompleteness was mended. Therefore, the proposed method is suitable for enhancing low quality fingerprint images.

Key words: fingerprint image enhancement; wavelet image fusion; iterative; ridge connection; fingerprint image mending

0 引言

指纹识别系统的性能严重依赖指纹的质量^[1],指纹图像增强的目的是提高指纹图像质量,从而提高指纹识别系统的性能。实践中获得的指纹图像有相当大的比例是质量差的^[2-4],特别是在刑事现场采集的嫌疑人的指纹图像质量往往更差。学者们对指纹图像增强技术进行了大量研究,提出了许多算法,空域滤波和频域滤波是常用的方法,目前最流行的算法是使用 Gabor 滤波器增强指纹图像。

空域滤波方法适合处理质量较好的指纹图像,如直接通过指纹传感器采集的活体指纹图像;频域滤波方法适合处理质量较差的指纹图像^[5-6]。对于质量较好的指纹图像,频域滤波或空域滤波的效果的差异不明显^[6]。

然而,传统的算法都只对指纹图像进行一次滤波增强,不能有效地滤除低质量指纹图像的背景噪声,更不能修复指纹图像的残缺。

因此,本文提出了指纹图像融合迭代增强方法,由于低质量指纹图像的增强效果频域滤波更好,先在频域增强指纹图像,后在空域二次增强指纹图像;如果效果不满意,经图像融合,再次进行上述的增强处理;如果效果仍然不满意,循环往复上述融合增强过程,直到主观判断增强效果满意为止。这种方法适合增强低质量的指纹图像,并具有脊线扩散生长的功能,能在一定程度上修复指纹图像的残缺,特别适合处理从刑事现场采集的嫌疑人的低质量指纹图像。

1 指纹图像融合迭代增强

指纹图像融合迭代增强方法流程如图1所示。

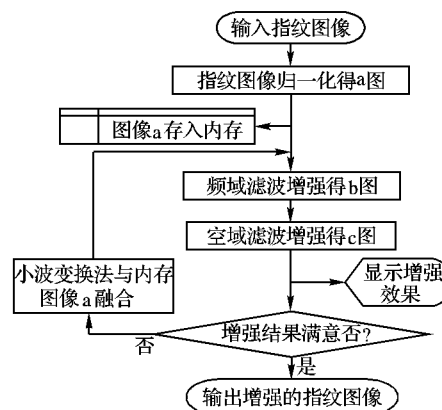


图1 指纹图像融合迭代增强方法流程

1.1 指纹图像归一化

指纹图像在进行增强以前都要进行归一化处理,这是因为指纹图像的对比度和尺度都有很大的离散性,不利于后期的增强。

1.1.1 对比度归一化

对比度归一化使图像灰度值的局部最大值为255,这对各种背景灰度值的指纹图像起到了统一的作用,有利于后期的增强。

收稿日期:2010-11-11;修回日期:2011-01-16。 基金项目:2010年天津市公安局科研基金资助项目(2010KYSJJY014)。

作者简介:李朝友(1958-),男,天津人,副教授,主要研究方向:数字图像处理、模式识别、刑事侦查;孙济洲(1949-),男,天津人,教授,博士生导师,博士,CCF会员,主要研究方向:计算机真实感图形生成、基于图像的造像与绘制、科学技术可视化、虚拟现实。

对比度归一化实现的方法是,统计图像的灰度分布,根据灰度分布某灰度级,计算该灰度级的像素数量,并除以面积,用此值改写该像素的灰度值。计算公式如下:

$$f(x) = 255 \frac{\sum_{i=0}^x H_i}{A_0}$$

其中: x 为灰度级, H_i 为第*i*级灰度的像素个数, A_0 为图像面积。

1.1.2 尺度归一化

图像尺度是指图像的大小。指纹图像大小的不同造成指纹图像的脊线(或谷线)宽度差异很大,这不利于后期的增强。图像尺度归一化的目的就是使不同指纹图像的脊线(或谷线)都具有相对一致的宽度。

人手指宽度的差异性不是很大,如果把指纹图像有效区域分割出来,有效区域是指去除背景只包含指纹纹理的部分,并把分割出来的有效区域图像大小调整到一个固定的尺度,从而使不同大小的指纹图像的脊线(或谷线)宽度都具有相对一致的宽度。本文实验程序设定图像尺度为 $256 \times (kN)$ (宽度 \times 高度,以像素为单位),图像呈竖直状态, N 为原图像高度, k 为缩放因子, $k = 256/\text{原图像宽度}$,保持图像的高宽比例不变。

对比度归一化后,紧接着进行图像分割。指纹图像的分割是通过计算图像灰度值梯度场的幅度值分布进行的。指纹图像的背景与指纹纹理的区别主要表现为灰度值梯度场幅度值的不同,背景区域的值低,指纹纹理区域的值高。计算图像的灰度值梯度幅度值分布图,把低于阈值的像素置为0,把高于阈值的像素置为255,从而得到图像分割掩模图,用此掩模图对指纹图像进行分割,并用分割出来的指纹纹理区域的最大外接矩形裁剪图像,最后,根据上述的方法缩放图像尺度,即可得到尺度归一化图像。灰度值梯度场幅度值计算公式如下:

$$|T(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \approx \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right| + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right|$$

其中: $f(x, y)$ 为图像函数, $T(x, y)$ 为图像在 (x, y) 点的梯度。

图像掩模图计算如下:

$$\text{Mask}(x, y) = \begin{cases} 255 & |T(x, y)| \geq A \\ 0 & |T(x, y)| < A \end{cases}$$

其中: $\text{Mask}(x, y)$ 为掩模图函数, A 为分割阈值。

分割阈值 A 的选择与图像质量有关。选择 A 前,先平滑梯度图像,去掉梯度图像噪声。对质量好的指纹图像, A 取梯度图像平均值,根据统计,一般在50左右^[7];对质量差的指纹图像, A 要大于50。指纹图像质量越差, A 值越大,不过,分割效果对 A 值并不很敏感。本文实验用的指纹图像质量很差,不但脊线有断续,还有划痕残缺,选 A 值为100。

1.2 频域滤波增强

本文主要研究的对象是从刑事现场采集的嫌疑人的指纹图像,这些指纹图像质量一般都很差,频域滤波法适合增强这些指纹图像。

频域滤波增强采用短时傅里叶变换算法(Short Time Fourier Transform, STFT)^[8],其核心算法如下。

二维STFT计算公式为:

$$X(\tau_1, \tau_2, \omega_1, \omega_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) W^*(x - \tau_1, y - \tau_2) e^{-j(\omega_1 x + \omega_2 y)} dx dy$$

其中: τ_1, τ_2 表示窗体 $W(x, y)$ 位置, ω_1, ω_2 表示频率参数。

指纹脊线纹波模型为:

$$I(x, y) = A \{ \cos(2\pi f(x \cos(\theta) + y \sin(\theta))) \}$$

$I(x, y)$ 的Fourier变换的极坐标表示为 $F(r, \theta)$ 。 $F(r, \theta)$ 的概率密度为:

$$p(r, \theta) = \frac{|F(r, \theta)|^2}{\iint_{r, \theta} |F(r, \theta)|^2}$$

$p(r, \theta)$ 的边缘概率密度为:

$$p(r) = \int_{\theta} p(r, \theta) d\theta$$

$$p(\theta) = \int_r p(r, \theta) dr$$

脊线方向图为:

$$E\{\theta\} = \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{\int_{\theta} p(\theta) \sin(2\theta) d\theta}{\int_{\theta} p(\theta) \cos(2\theta) d\theta} \right\}$$

脊线频率图为:

$$E\{r\} = \int_r p(r) r dr$$

1.3 空域滤波增强

经STFT滤波增强后,指纹图像脊线不光滑,且具有分块效应,这不利于后期的识别。由于低质量的指纹图像已在频域得到增强,指纹图像的质量有了很大的提高,适合应用空域滤波法进一步增强,不但增强效果进一步提高,而且使脊线光滑,去除分块效应。

空域滤波增强采用最为流行的Gabor滤波法。Gabor小波函数的二维表达式为:

$$H(x, y) = \exp(-j2\pi f'x') \exp\left\{-\frac{(x/\lambda)^2 + y^2}{2\sigma^2}\right\}$$

其中: $G(x, y)$ 为高斯分量, f' 为宽度比例因子, σ 为高斯扩散因子, λ 为坐标轴比例因子, θ 为旋转因子。

坐标旋转公式为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta) \cos(\theta) \\ -\cos(\theta) \sin(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Gabor滤波的关键是获得脊线的方向和频率。脊线的方向场为:

$$\theta(x, y) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{V_x(x, y)}{V_y(x, y)} \right)$$

其中: $V_x(x, y) = \sum_{u=i-w/2}^{i+w/2} \sum_{v=j-w/2}^{j+w/2} 2G_x(u, v) G_y(u, v)$

$$V_y(x, y) = \sum_{u=i-w/2}^{i+w/2} \sum_{v=j-w/2}^{j+w/2} (G_x^2(u, v) - G_y^2(u, v))$$

脊线的频率场为:

$$f = \frac{\int_{x_1}^{x_2} \left| \frac{dh(x)}{dx} \right| dx}{2a_m(x_2 - x_1)}$$

其中: $h(x)$ 为区间 $[x_1, x_2]$ 内点 (x, y) 方向场垂直方向上的灰度函数, a_m 为区间 $[x_1, x_2]$ 内波形的平均振幅。

1.4 小波变换图像融合

经频域和空域增强,指纹图像质量已经有了很大提高,如果脊线的断裂没有得到有效的接续,缺损没有得到有效的修复,脊线不够光滑,则认为增强效果不满意,可以把增强后的指纹图像(图1中c图),与归一化的指纹图像(图1中a图)进行融合,图像融合采用小波变换图像融合技术,融合后的指纹图像进一步在频域和空域滤波增强;如果增强效果还不满意,继续进行融合增强处理;如此循环往复,直到主观判断增强效果满意为止,输出增强的指纹图像,这就是指纹图像融合迭代增强方法。指纹图像融合迭代增强不仅能使增强效果进

一步提高,还具有脊线扩散生长的功能,在一定的程度上,修补指纹图像的残缺。

对两幅图像完成小波变换,小波系数的绝对值越大,对应于更为尖锐的灰度变化,在小波融合中,主要思想是判断两幅图像对应小波系数绝对值的大小。在变换域的每一个小波系数都取绝对值较大的那个,这样,便实现了在所有分辨率级别上的小波系数融合,并且新组合的小波系数完好地保存了更多的频带特性,融合后的图像可以通过小波逆变换得到^[9]。

图像的有用特征信息并非集中在一个像素点上,利用逐点的绝对值比较方法并不是最佳的系数融合方法,一个比较好的方法是考虑邻域点的判别决策。在比较点 $W_1(i,j)$ 和点 $W_2(i,j)$ 过程中,分别在各自的变换系数中取 3×3 的邻域,脊线处的像素值小于谷线处的像素值,设:

$$W_{\text{new}}(i,j) = \begin{cases} W_1(i,j), & R_{s1} > R_{s2} \\ W_2(i,j), & \text{其他} \end{cases}$$

其中:

$$R_{s1} = \sum_{m,n=-1}^1 W_1(i+m, j+n)$$

$$R_{s2} = \sum_{m,n=-1}^1 W_2(i+m, j+n)$$

$W_{\text{new}}(i,j)$ 是融合后的小波系数。

1.5 算法复杂度分析

本算法分7步:1)指纹图像归一化;2)图像分割;3)尺度归一化;4)频域增强;5)空域增强;6)小波融合;7)迭代增强。

传统算法,即频域滤波法要经历上述的1)、2)、3)和4)步;空域滤波法要经历1)、2)、3)和5)步。

本文算法比传统算法的频域滤波法多进行了5)、6)和7)步运算;比传统算法的空域滤波法多进行了4)、6)和7)步运算。

用惠普 6531s 笔记本电脑运行实验程序,显示各步运算时间如下:第1)~5)步 1565 ms(其中第4)步 813 ms,第5)步 110 ms),第6)步 78 ms,第7)步 1063 ms。

本文算法与传统算法耗时比较如下。

传统算法耗时:频域法为 1455 ms,空域法为 752 ms。

本文算法耗时:不进行迭代时,为 1565 ms;每进行一次迭代增强,比不进行迭代,将多耗时 1141 ms。

每进行一次迭代,本文算法比传统算法的空域法多耗费 1 倍多的运算时间,比传统算法的频域法多耗费接近 1 倍的运算时间,不适合应用于对实时性要求高的指纹图像识别系统。但是,本文研究的对象是增强从刑事现场采集的嫌疑人的指纹图像,增强后的指纹图像用于后续的公安自动指纹识别系统,不要求实时性。

2 实验结果分析

图 2(a)是原始指纹图像,是过于干且有划痕残缺的低质量指纹图像。图 2(b)是单纯用 Gabor 小波在空域滤波增强效果图,由于原始图像质量过低,增强效果很差,无法用于自动指纹识别。图 2(c)是单纯用 STFT 在频域增强效果图,增强效果比图 2(b)有明显提高,但有脊线不光滑且有分块效应缺陷,这是因为在进行 STFT 的时候,把整个指纹图像分成许多互相重叠的小块,然后在这些小块上进行 STFT,最后再把这些小块合并在一起,从而在各小块的边缘脊线连续处形成不光滑和分块效应。图 2(d)是先用 STFT 在频域增强,再用 Gabor 小波在空域增强效果图,增强效果比图 2(c)有明显提高,脊线光滑且无分块效应,这是先在频域对低质量图像增

强,再在空域增强得到的好处,但增强的效果仍然不理想,还有一些脊线不连续,划痕的残缺处没有得到有效修补。图 2(e)是用小波图像融合技术对图 2(d)图像进行 2 次迭代增强效果图,增强效果明显提高,但仍然有一些脊线不连续或不够光滑。图 2(f)是用小波图像融合技术对图 2(d)图像进行 3 次迭代增强效果图,增强效果已经很理想,经在公安自动指纹识别系统上实验,识别效果理想。



图 2 实验结果

3 结语

对在刑事现场采集的低质量的残缺的指纹图像进行了深入研究,本文提出了指纹图像融合迭代增强方法,先在频域后在空域进行增强,并根据观察的增强效果,进行图像融合多次迭代增强。实验结果显示,脊线的清晰度得到了明显提高,断裂得到了接续,残缺得到了修补,增强效果较文献已报道的方法有很明显的提高。实际应用验证,能够满足非实时性的低质量的指纹识别工作的要求。但迭代的次数还需要人工主观判断干预,这有待于今后进一步深入研究,实现自动判断最佳迭代次数。

参考文献:

- [1] RATHA J N K, KARU K, CEN S, *et al.* A real-time matching system for large fingerprint databases [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(8): 799-813.
- [2] JAIN L C, HALICI U, HAYASHI I, *et al.* Intelligent biometric techniques in fingerprint and face recognition [M]. Boca Raton: Taylor & Francis, 1999: 3-34.
- [3] LIM E, JIANG X, YUAN W. Fingerprint quality and validity analysis [C]// *IEEE International Conference on Image Processing*. Washington, DC: IEEE, 2002: 22-25.
- [4] SHENG L L, KOT A, KOO W M. Quality measures of fingerprint images [C]// *Proceedings of the 3rd International Conference Audio-and Video-based Biometric Person Authentication*. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 182-271.
- [5] TIAN J, CHEN X J, ZHANG Y Y, *et al.* Recent progress in fingerprint recognition [J]. *Progress in Nature Science*, 2006, 16(3): 231-240.
- [6] WILLIS A J, MYERS L. A cost-effective fingerprint recognition system for use with low-quality prints and damaged fingertips [J]. *Pattern Recognition*, 2001, 34(2): 255-270.
- [7] 李昊. 精通 Visual C++ 指纹模式识别系统算法及实现 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 82-93.
- [8] CHIKKERUR S, CARTWRIGHT A N, GOVINDARAJU V. Fingerprint image enhancement using STFT analysis [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(1): 198-211.
- [9] 靳济芳. Visual C++ 小波变换技术与工程实践 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004: 105-108.