

基于 FDCT 的低对比度指纹图像增强算法

王 宪 陶重犇 杨国梁 (江南大学 通信与控制工程学院 江苏 无锡 214122)

摘要: 针对传统方法在增强低对比度指纹图像时,效果不佳的状况,研究了一种利用快速曲波变换增强低对比度指纹图像的方法。图像经曲波分解后,对于低频分量引入基于 SMQT 的非线性函数调整低频子带系数,以提高指纹图像的对对比度;对于高频分量使用阈值去噪增强图像细节。实验表明,该方法优于直方图均衡化方法和基于小波变换的增强方法。该算法在增强低对比度指纹图像的同时降低了噪声。增强后的图像取得了较为理想的视觉效果。

关键词: 低对比度; SMQT; FDCT; 非线性函数; 去噪

Low Contrast Fingerprint Image Enhancement Based on FDCT

WANG Xian, TAO Chong-Ben, YANG Guo-Liang

(School of Communication and Control Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To overcome the shortcoming of the traditional method used to improve the low contrast of fingerprint images, a novel method is proposed for enhancing the low contrast of fingerprint images based on Fast Discrete Curvelet Transforms (FDCT). After the input image is decomposed, to enhance the contrast of the fingerprint image, this paper uses nonlinear function based on Successive Mean Quantization Transform (SMQT) to adjust the coefficient of low frequency sub-band in low frequency component. It uses threshold denoising to enhance the details of the image in high frequency component. The simulation results show that the proposed method is better than histogram equalization and the method based on wavelet transform. The proposed algorithm enhances the contrast of low contrast fingerprint image and reduces noise at the same time. The images have satisfactory visual quality after enhancement.

Keywords: low contrast; SMQT; FDCT; nonlinear transform; noise reduction

1 引言

指纹识别技术作为一种有效的生物识别技术,已经在社会的各个领域得到了应用。在现有的指纹匹配算法中,基于指纹特征点的匹配算法很多^[1,2]。因此,能否在增强指纹图像的同时很好的保持图像的细节信息,对于后续的匹配影响很大。特别是对于低对比度的指纹图像,在增强时能否有效的降低噪声、减少原有特征点信息的丢失,增强算法的好坏直接影响到后续匹配算法的效果。图像增强的方法可以分为空间域法和频率域法两大类。空间域方法有:线性拉伸、直方图均衡化、反锐化掩膜等^[3]。这些方法在增强低对比

度图像的同时,也会增强噪声,引起细节信息丢失。频率域方法主要有基于小波变换的增强方法^[4]。小波变换通过在变换域对小波系数的处理来提高指纹图像的对对比度和抑制噪声,但在指纹图像的边缘和细节位置会引起一定程度的模糊。这是由于小波变换反映的是奇异点的位置和特性,其基是各向同性(isotropy)的,因此很难准确表示指纹图像的线性特征和边缘的方向^[5,6]。然而线性特征和边缘是指纹图像重要的信息,为了克服小波的这一局限性,需要进行多尺度分析。

文中引入曲波(Curvelet)变换^[7],它是用多个尺度的局部直线来近似表示曲线,可以很好的逼近图像中

基金项目:国家自然科学基金(60574051)

收稿时间:2009-07-23;收到修改稿时间:2009-09-05

的奇异曲线。Curvelet 变换所引入的具有各向异性的方向参量,非常有利于表示指纹图像的线性特征和边缘的方向。

文中针对均衡化方法和小波增强方法在增强低对比度指纹图像时的不足,提出了基于 FDCT 的低对比度指纹增强算法。在分析了曲波算法的原理后,结合低对比度指纹图像的特点,引入基于 SMQT 的非线性函数提高指纹图像对比度,并用阈值去噪的方法减小噪声。通过与直方图均衡化(Histogram Equalization, HE)^[8]方法、小波增强方法^[4]的比较实验,得出该算法能有效的增强图像的细节、边缘信息及全局对比度,并取得了良好的视觉效果。

2 基于SMQT的指纹图像增强

2.1 SMQT 原理

连续均值量化变换^[9](Successive Mean Quantization Transform, SMQT)有揭示数据底层结构的能力。这种变换能自动使图像结构信息细化,这样就可以用层层递进的方式关注一幅图像的信息。

文中用集合理论来描述这个变换。让 x 代表数字图像 $D(x)$ 中的一个像素。像素的灰度值是 $V(x)$ 。SMQT 仅有一个输入变量,级数 L 。输出像素集定义为 $M(x)$ 。从 $D(x)$ 到 $M(x)$ 的变换级数 L 定义为

$$SMQT_L : D(x) \rightarrow M(x) \quad (1)$$

$SMQT_L$ 函数可以用一个二叉树来描述,树之间的顶点是均值量化单元(MQUs)。一个 MQU 由三步运算得到,分别是平均值计算,量化和输入集划分。算法步骤如下:

计算像素的平均值 $\bar{V}(x)$ 。根据公式

$$\bar{V}(x) = \frac{1}{|D|} \sum_{x \in D} V(x) \quad (2)$$

用这个平均值量化像素的灰度值为 0 或 1。量化函数可以用下面的公式表示

$$\xi(V(y), V(x)) = \begin{cases} 1, & \text{if } V(y) > \bar{V}(x) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $y \in D$ 。另外,令 \otimes 表示级联,则

$$U(x) = \otimes_{y \in D} \xi(V(y), \bar{V}(x)) \quad (4)$$

$U(x)$ 表示像素均值量化集合,是 MQU 一个主要的输出。从单个 MQU 输出的集合 $U(x)$ 既不是一个值也不是线性变换的相似系数,而是 $D(x)$ 的一个结构部分。

将输入集合 $D(x)$ 分解成两个子集

$$D_0(x) = \{x \mid V(x) \leq \bar{V}(x), \forall x \in D\} \quad (5)$$

$$D_1(x) = \{x \mid V(x) > \bar{V}(x), \forall x \in D\}$$

在二叉树中 D_0 和 D_1 分别在左右传输,如图 1 所示。

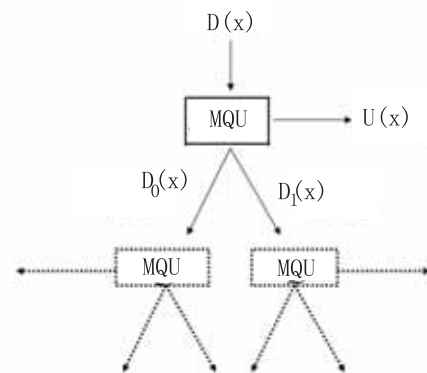


图 1 MQU 分解示意图

2.2 基于 SMQT 的低频分量增强

对于给定的源图像像素集 $D(x)$ 和经过增强后的像素集 $M(x)$,增强公式由这两部分集合构成。定义如下:

$$T(z) = \begin{cases} z \mid V(z) = (1 - \partial)V(x) + \partial V(y), \\ \forall x \in D(x), \forall y \in M(x) \end{cases} \quad (6)$$

其中 $V(x)$, $V(y)$ 和 $V(z)$ 表示的是像素的灰度值,是混合因子。对于默认的增强 $\partial = 1$,没有增强 $\partial = 0$,在 0 和 1 之间的值控制混合量。经过大量实验表明,文中算法中设置参数 $L=8$ 和 $\partial=0.8$ 时,对于指纹图像低频部分增强效果最佳。

3 曲波变换原理

3.1 曲波介绍^[7]

曲波由三个参数决定: j 为尺度, l 为方向, $k = (k_1, k_2) \in Z^2$ 为空间位置。当尺度为 2^{-j} ,旋转角度为 $\theta_1 = 2\pi \cdot 2^{\lfloor j/2 \rfloor} \cdot l, = 0, 1, \dots, 0 \leq \theta_1 \leq 2\pi$, 平移位置为 $x_k^{(j,l)} = R_{\theta_1}^{-1}(k_1 \cdot 2^{-j}, k_2 \cdot 2^{-j/2})$,其曲波定义的公式为: $\varphi_{j,k,l}(x) = \varphi_j(R_{\theta_1}(x - x_k^{(j,l)}))$,其中 R_{θ} 是对 θ 弧度的旋转, $R_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$, $R_{\theta}^{-1} = R_{\theta}^T = R_{-\theta}$ 。 φ_j 即 $\varphi_j(x)$,常称为“母小波”。在二维空间的情况下,也就是 R^2 , x 为空间域变量, ω 为频域变量,并且 r 和 θ 是频率域中的极坐标。 $W(r)$ 和 $V(t)$ 是一对窗,分别

称为“半径窗”和“角度窗”。它们都是平滑的,非负的和实值的。 W 取正的实数,并且 $r \in (1/2, 2)$ 支撑, V 取实数,并且 $t \in [-1, 1]$ 支撑。对于每一个 $j \geq j_0$,频率窗 U_j 在频域的定义为

$$U_j(r, \theta) = 2^{-3j/4} W(2^{-j} r) V\left(\frac{2^{\lfloor j/2 \rfloor} \theta}{2\pi}\right) \quad (7)$$

其中 $\lfloor j/2 \rfloor$ 是 $j/2$ 的整数部分。因此 U_j 的支持是由半径窗 W 和角度窗 V 定义的一个极型“楔形”,使用在各个方向上独立的窗宽度。

3.2 曲波变换

3.2.1 快速离散曲波变换(FDCT)

有两种实现快速曲波变换的算法,它们分别是USFFT(Unequally-Spaced Fast Fourier Transform)算法和Wrapping(Wrapping-Based Transform)算法^[7]。文中采用的是Wrapping算法,该算法的核心思想是:围绕原点进行包裹(wrap)。对任意区域,通过周期化的技术一一映射到原点的仿射区域。该算法的详细步骤见文献^[7]。

3.2.2 高频子带采用阈值去噪

指纹图像经过Curvelet分解后,各尺度各个方向的高频子带系数反映的是图像的细节信息。高频子带系数值要比低频子带系数值偏小,并且包含噪声。对于指纹图像来说,噪声方差 σ 是未知的。实验表明,经过Curvelet变换后,最高子带中包含了大部分的噪声,因此在最高子带中对 σ 进行估计比较准确。文中对噪声方差的估计采用经典公式^[11]

$$\sigma = \text{median}(\text{abs}(c)) / 0.6745 \quad (9)$$

其中 c 为Curvelet分解后的最高子带系数。在增强低对比度指纹图像抑制噪声时,阈值的选取是关键。文中取阈值 $T = \lambda \cdot \sigma$, $\lambda > 0$ 是一个整常数因子。经过大量实验,文中取 $\lambda = 4$ 。阈值增强函数形式如下:

$$Wh = \begin{cases} kc_H & , c_H \geq T \\ 0 & , c_H < T \end{cases} \quad (10)$$

其中 c_H 表示的是高频子带系数。

3.3 增强算法的描述及流程图

文中增强算法的步骤如下:

分解:对于要增强的低对比度指纹图像用Curvelet变换进行图像分解,得到一系列低频、高频子带系数。

子带系数处理:对低频子带系数采用基于SMQT的非线性函数改善图像对比度;对各高频子带系数进行阈值降噪。

重构:对经过处理的Curvelet系数进行Curvelet逆变换,得到重构图像。

综上所述,增强算法的框图如图2。

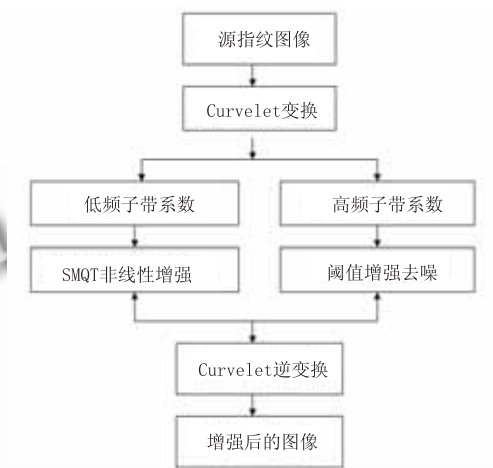


图2 文中增强算法流程图

4 实验结果与评价

在Pentium4 1.80GH的CPU,256MB内存的台式计算机上,在MatlabR2006环境下实现了上述算法,并进行了仿真实验。文中描述的方法使用公开数据集—指纹图像库FVC2004DB^[10]作为测试对象,并从库中选取低对比度指纹图像100枚进行增强实验。从中选FVC2004_DB\DB1_A\89_6.tif这张低对比度图像来给出仿真结果,如图3。



图3 图像增强仿真实验

4.1 客观参数评估

可以用定量的参数指标对增强算法的性能进行评估。文中使用如下四个客观估计量^[11]：

图像灰度级的标准偏差(Standard Deviation, STD)；

熵(Entropy), $-\sum P_i \log P_i$, 这里 P_i 是第 i 个灰度级的概率；

峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)；

对比度增量(Contrast Increment, CI), 定义为: $C_{processed} / C_{original}$ 。这里 C 是用大小的滑动窗按照计算所有的局部对比度的平均值。

给出文中算法和其他两种算法对这 100 枚指纹仿真后的图像熵及 PSNR 的比较示意图, 如图 4 和图 5。并任选出 89_6.tif 这枚指纹来产生这四个估计量, 见表 1。从图 4、图 5 及表 1 中可以看出文中方法与其它两种方法的比较结果。在四项对比度改善指标中, 文中算法图像信息熵最大, 说明在细节信息的保持上是最优的; 峰值信噪最大, 说明在增强图像信息的同时对噪声的控制要比 HE 法和小波增强法好; 标准差和对比度增量仅次于 HE 法。HE 法对图像过度增强, 也过度增强了噪声, 而小波增强法对比度增量不够。所以综合考虑这四个性能指标, 文中算法优于其他两种算法。

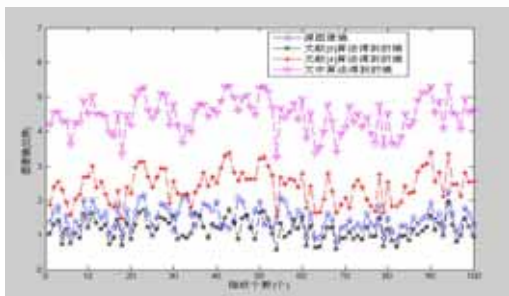


图 4 三种算法得到的图像熵比较

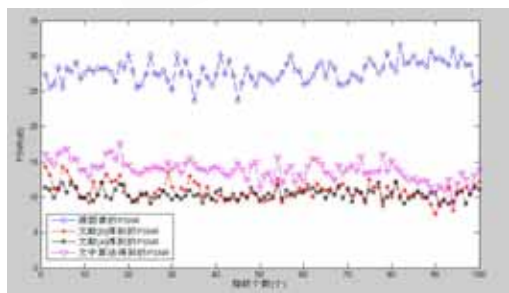


图 5 三种算法得到的 PSNR 的比较

表 1 三种算法评价参数的比较

评价参数	STD	Entropy	PSNR	CI
源图像	24.98	1.50	25.81	1.00
HE	79.62	1.18	11.51	15.28
小波增强	28.49	2.60	10.17	3.36
文中算法	42.44	4.38	14.05	7.32

5 结语

文中算法能有效的增强低对比度指纹图像的细节和边缘信息, 并使边缘位置不产生模糊的现象。在有效提高图像对比度的同时抑制了噪声, 因此经过该算法处理后可以得到平衡和自然的增强图像。从该算法和 HE 及小波增强算法比较结果可知, 该算法在增强低对比度指纹图像上效果更好, 并为后续二值化、细化和特征识别做好了准备。

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点匹配算法. 软件学报, 2002, 13(5): 946 - 955.
- 2 王伟希, 袁杰. 基于局部特征的点模式指纹匹配算法. 南京大学学报(自然科学), 2009, 45(1): 18 - 23.
- 3 张弘. 数字图像处理与分析. 北京: 机械工业出版社, 2007. 55 - 56.
- 4 李卓, 郭立红. 基于形态小波变换的低对比度图像增强算法. 电子器件, 2007, 30(6): 2137 - 2140.
- 5 段群, 吴粉侠. 一种基于 Curvelet 变换的指纹图像增强方法. 电子测量技术, 2009, 32(2): 124 - 127.
- 6 倪雪, 李庆武. 基于第二代 Curvelet 变换的低对比度图像增强. 计算机工程与应用, 2008, 44(17): 188 - 190.
- 7 Candes EJ, Demanet L, Donoho D. Fast Discrete Curvelet Transforms. Applied and Computational Mathematics. California Institute of Technology, 2005. 1 - 43.
- 8 Acharya T, Ray AK. 数字图像处理原理与应用. 田浩, 葛秀慧, 王顶, 译. 北京: 清华大学出版社, 2007. 81 - 82.
- 9 Nilsson M, Dahl M, Claesson I. The successive mean quantization transform. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005. 429 - 432.
- 10 <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004>.
- 11 Donohd DL, Johnstone I. Ideal spatial adaptation Via wavelet shrinkage. Biometrika, 1994. 425 - 455.