

文章编号:1001-9014(2012)01-0057-05

## 镜像曲波掌部静脉影像增强方法

蒋敏<sup>1</sup>, 刘士建<sup>2</sup>, 李丹<sup>2</sup>, 李范鸣<sup>2</sup>, 汪俊<sup>1</sup>

(1. 江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**针对掌部静脉红外影像信噪比低、对比度不高、难以实现准确特征提取的情况,提出一种基于多尺度镜像曲波变换的掌部静脉影像增强新方法.基于多尺度曲波系数表达能力的剖析,该方法完全抑制了噪声高、特征信息少的高频子带系数,在去噪的同时非线性增强了细节特征丰富的中频子带系数,拉伸了反映影像整体对比度的低频子带系数.实验表明,该方法主观视觉评价和客观评价指数都显著提高,有效增强了低对比度掌部静脉红外影像特征,提高了影像信噪比和信息熵,其对静脉边缘特征的表达能力更优于双正交小波增强和直方图均衡化方法.

**关键词:**影像增强;掌部静脉;曲波变换;多尺度;镜像

中图分类号:TP391.41 文献标识码:A

## Palm vein image enhancement based on mirror-extended curvelet transform

JIANG Min<sup>1</sup>, LIU Shi-Jian<sup>2</sup>, LI Dan<sup>2</sup>, LI Fan-Ming<sup>2</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>

(1. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;  
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** A novel low contrast IR image enhancement method based on multi-scale mirror-extended curvelet transform was proposed to solve the problems of the palm vein IR images, such as low SNR (Signal/Noise) and low grayscale contrast as the results of incorrect feature extraction of palm vein. Based on the analysis of the strong relationship between multi-scale curvelet coefficients and different scales of detailed vein features, coefficients of high frequency subbands, where most of the noises and few features located, were set zero. The coefficients of middle frequency subbands, where most of the features concentrated, were nonlinearly enhanced during the denoising process. The coefficients of low frequency subbands who determined the global grayscale contrast were stretched. Experimental results show that the proposed method can efficiently enhance the features of low contrast palm vein IR images with increased evaluation indexes such as SNR and Entropy. By this method the features of vein edges are better preserved and more smoothly emphasized than enhancement methods of biorthogonal wavelet and histogram equalization.

**Key words:** image enhancement; palm vein; curvelet transform; multi-scale; mirror-extended

**PACS:** 07.05.Pj

### 引言

掌部静脉特征因具有其他生物特征不具备的独特、持久和活体防伪性及其红外检测方法的非接触性,使其成为当前世界上先进的生物特征身份认证技术之一.但是,在红外光照强度、手背曲度、手背厚度以及静脉分布深度等各种不利因素影响下,采集所得手背静脉影像的局部血管脉络模糊,影像信噪

比不高及对比度低下等因素制约了静脉的后续特征识别.

目前对于掌部静脉的红外影像增强的研究还不成熟,公开发表的相关文献为数不多,其中方向微分直方图法<sup>[1]</sup>主要基于静脉与背景的急剧变化,适用于目标突出、背景单一的情况,对影像质量要求较高;频率滤波法<sup>[2-3]</sup>目前的研究主要基于小波和脊波理论,但是小波变换的各向同性特征决定了变换方

收稿日期:2011-05-21,修回日期:2011-12-18

Received date: 2011-05-21, revised date: 2011-12-18

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP111A41, JUSRP211A36);国家自然科学基金重大国际合作研究项目(60910005)

Foundation item: Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (JUSRP111A41, JUSRP211A36); National Natural Science Foundation of China Major International Program (60910005)

作者简介:蒋敏(1978-),女,江苏无锡人,副教授,博士,主要研究领域为机器视觉、行为感知. E-mail: jmtree@126.com.

向选择有限,只能捕捉“点”的奇异信息,不能有效地表示含“曲线”奇异的信息,而脊波也不具有最优的非线性逼近误差衰减;直方图均衡法<sup>[4-5]</sup>虽然在一定程度上增强了影像的对比度,但对于颜色单一,视觉效果不好的红外影像的增强效果存在局限。

文献[6-7]提出的曲波变换保留了小波变换多尺度的特点,并具有更好的方向辨识能力.本文针对曲波增强的方向性和对边缘特征的有效表达,提出了一种基于镜像曲波变换的掌部静脉影像增强方法。

## 1 镜像曲波变换

离散曲波的实质是通过足够小的窗口  $\tilde{U}_j$  将频率域空间划分为若干个同心的“笛卡尔环”,其中每一格即为一个“楔形”基支撑区间.该区间体现了曲波的方向性,使其具有典型的各向异性.当“楔形”方向与奇异性特征的几何形状接近时,相应的曲波系数将得到增强<sup>[6-7]</sup>,表现为较大值,变化后能量更加集中。

**定义 1:** 已知多维傅立叶变换  $\hat{f}(\omega) = \int e^{-ix \cdot \omega} f(x) dx$ , 斜率序列  $\tan\theta_l := l \cdot 2^{-[j/2]}$ ,  $l = -2^{[j/2]}, \dots, 2^{[j/2]} - 1$ , 剪切矩阵  $S_\theta := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\tan\theta & 1 \end{bmatrix}$ , 频率窗  $\tilde{U}_{j,l}(\omega) := \tilde{W}_j(\omega) V_j(S_\theta \omega)$ , 则二维笛卡尔坐标下的离散曲波变换为:

$$C(i, j, k) = \int \hat{f}(\omega) \tilde{U}_j(S_\theta^{-1} \omega) e^{i(b, S_\theta^{-1} \omega)} d\omega \\ = \int \hat{f}(S_\theta \omega) \tilde{U}_j(\omega) e^{i(b, \omega)} d\omega \quad (1)$$

其中半径窗<sup>[6]</sup>  $W$  和角窗<sup>[6]</sup>  $V_j$  分别为:  $\tilde{W}_j(\omega) = \sqrt{\Phi_{j+1}^2(\omega) - \Phi_j^2(\omega)}$ ,  $j \geq 0$ ,  $V_j(\omega) = V(2^{[j/2]} \omega_2 / \omega_1)$ ,  $\Phi$  被定义为一维低通窗口的内积<sup>[6]</sup>。

由于曲波变换主要基于离散傅立叶变换,傅立叶变换在处理非周期函数时默认其为周期无限大的周期函数,这就引起一个问题:曲波变换时将影像一个边界默认为相对边界的延续,因此导致反变换得到的影像边界失真,出现条状干涉纹波,这种条状纹波很难与静脉特征相互区别,给后续静脉影像的特征分析造成很大的困难。

传统方法将红外静脉影像  $f(x_1, x_2)$  按  $[-1, 1]^2$  进行 4 个方向拓展得到镜像影像  $\tilde{u}(x_1, x_2)$ , 镜像关系满足公式(2):

$$\tilde{u}(x_1, x_2) = f(|x_1|, |x_2|) \quad (2)$$

从公式(2)看出,对镜像影像的傅立叶变换是

原始信号傅立叶变换的 4 倍计算量和冗余度,因此本文采用了一种新的镜像曲波变换,使用离散余弦变换代替傅立叶变换,在不增加计算量的基础上消除计算冗余,分析如下。

对上述拓展图片  $\tilde{u}(x_1, x_2)$  做傅立叶变换:

$$\hat{\tilde{u}}(\omega_1, \omega_2) = \iint_{[-1, 1]^2} e^{-j\pi(x_1\omega_1 + x_2\omega_2)/2} \tilde{u}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (3)$$

根据离散傅立叶变换的正交性与  $\tilde{u}(x_1, x_2)$  的对称性<sup>[8]</sup>,  $\tilde{u}(x_1, x_2)$  的傅立叶变换  $\hat{\tilde{u}}(\omega_1, \omega_2)$  与原始信号  $f(x_1, x_2)$  符合如下关系式:

$$\hat{\tilde{u}}(\omega_1, \omega_2) = 4 \iint_{[0, 1]^2} \cos(\pi x_1 \omega_1 / 2) \\ \cos(\pi x_2 \omega_2 / 2) f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (4)$$

由于余弦具有偶对称,所以得:

$$\hat{\tilde{u}}(\omega_1, \omega_2) = \hat{u}(|\omega_1|, |\omega_2|) \quad (5)$$

很显然,基于这种对称关系,  $\hat{\tilde{u}}(\omega_1, \omega_2)$  中其余 3 个象限的冗余计算完全可以映射到第一象限 ( $\omega_1, \omega_2 > 0$ ), 实际计算量接近拓展图片的 1/4, 很好地解决了计算量增加的问题。

## 2 基于镜像曲波的红外静脉影像增强

掌部红外静脉原始影像(图 1(a))经过镜像曲波变换后的中高频子带系数反映的是影像细节信息,中高频系数通常偏小,且含有噪声,因此在增强的同时,还需要做消噪;低频子带系数反映的影像的基本信息,决定了影像整体的对比度,通过对比度的拉伸,可以有效实现整体对比度的增强。

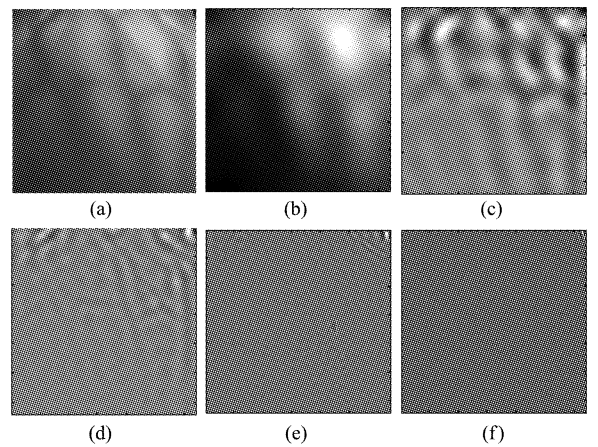


图 1 不同尺度曲波子带反变换 (a) 原始影像 (b) 尺度 1 (c) 尺度 2 (d) 尺度 3 (e) 尺度 4 (f) 尺度 5

Fig. 1 Multi-scale curvelet subbands inverse transform (a) Original image (b) Scale 1 (c) Scale 2 (d) Scale 3 (e) Scale 4 (f) Scale 5

## 2.1 中高频子带系数增强

从图 1(e)、(f) 可以看到,掌部静脉特征具有一定宽度,尺度 4、5 主要反映了其噪声,对静脉特征没有贡献或贡献很小,因此本文对该子带系数采用完全抑制的方法;图 1(d) 在含噪的情况下从不同的尺度(尺度 2~3) 表现了静脉特征细节,针对该部分曲波系数,在增强影像的同时还必须减少噪声干扰. 基于掌部静脉的特性,本文采用如下增强函数:

$$\begin{aligned}
 y_j(x) &= 0, (j > \max_j - 1) \\
 y_j(x) &= 1, \\
 &((|x| \leq k\sigma) \text{ or } (|x| \geq m\sigma)) \text{ and } (j < \max_j - 1) \\
 y_j(x) &= S_j \left( \frac{x - k\sigma}{k\sigma} \left( \frac{m\sigma}{k\sigma} \right)^p + \frac{2k\sigma - x}{k\sigma} \right), \\
 &(k\sigma < |x| < 2k\sigma) \text{ and } (j < \max_j - 1) \\
 y_j(x) &= S_j \left( \frac{m\sigma}{m} \right)^p, \\
 &(2k\sigma \leq |x| < m\sigma) \text{ and } (j < \max_j - 1) . \quad (6)
 \end{aligned}$$

这里  $k$ 、 $m$ 、 $S_j$ 、 $p$  是用户设定参数,其中  $k$ 、 $m$  保证了噪声不被增强,本文的参数取值分别为  $k = 1.1$ 、 $m = 50$ 、 $p = 0.5$ 、 $S_j = 6$ . 另由于曲波系数中大部分噪声都位于高频,因此本文采用蒙特卡洛方法<sup>[9]</sup> 通过最高频子带估计噪声方差  $\sigma$ .

## 2.2 低频子带系数增强

对于低对比度影像,其分解后的低频子带系数较接近,值域拉伸可以增强其对比度,公式如下:

$$\begin{aligned}
 y(x) &= 0 \quad (x < x_1) \\
 y(x) &= y_2 \times (x - x_1) / (x_2 - x_1) \quad (x_1 \leq x \leq x_2) \\
 y(x) &= (y_{\max} - y_2) \times (x - x_2) / (y_{\max} - x_2) + y_2 \\
 &\quad (x > x_2) , \quad (7)
 \end{aligned}$$

通过该方法,可将值域  $[x_1, x_2]$  拓展至  $[0, y_2]$ .

## 2.3 具体方法描述

文中增强方法共分为 4 步:

步骤 1, 将低对比度影像  $I$  进行尺寸归一化处理,处理后影像  $I'$  尺寸为  $128 \times 128$ ;

步骤 2, 对影像  $I'$  进行镜像曲波变换,变换尺度  $J = \lfloor \log_2(N) - 3 \rfloor + 1$ ;

步骤 3, 分解子带系数,对体现噪声的高频子带系数进行完全抑制;对中频子带系数应用公式(6) 进行非线性增强去噪;对低频子带系数应用公式(7) 进行阈值拓展;

步骤 4, 融合各个调整后的子带系数,应用曲波逆变换得到增强后影像.

## 3 实验结果与评价

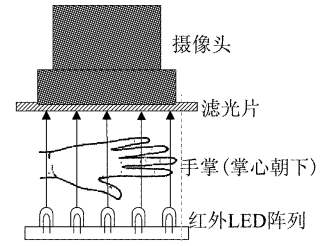


图 2 实验方案示意图

Fig. 2 Experiment scheme diagram

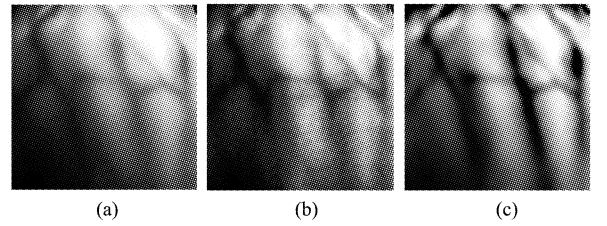


图 3 影像增强仿真结果比较 (a) 直方图均衡化 (b) 双正交小波 (c) 镜像曲波

Fig. 3 Comparison of image enhancement simulation experiments (a) Histogram equalization (b) Biorthogonal wavelet (c) Mirror-Extended curvelet

本仿真实验基于红外静脉影像采集器自然光条件下采集的真实数据(红外滤光: 900 nm). 实验方案如图 2 所示.

实验采用直方图均衡化方法、基于小波变换的增强方法与本文方法进行增强实验对比(见图 3), 各种客观评价指数如表 1 所示.

表 1 影像增强客观评价指数

Table 1 Objective evaluation indexes of image enhancement

客观评价指数	PSNR	SNR	MSE	ENTROPY
原始影像	-	-	-	6.9126
直方图均衡化	21.6502	5.0054	42.0108	5.9628
双正交小波	21.2020	4.4549	44.2354	6.9744
镜像曲波	25.8087	5.2505	26.0276	7.2754

从实验结果可以看到:

(1) 采用直方图均衡化方法和双正交小波方法, 尽管影像得到一定增强, 但是增强效果并不明显, 影像噪声明显被放大; 镜像曲波增强方法在非常有效地去除噪声的同时, 静脉特征显著增强.

(2) 由于原图左下方对比度非常低, 直方图均衡化方法和双正交小波方法出现了局部过增强. 相比于前两种方法, 对于极低对比度影像, 本文方法具有更好的增强效果.

(3) 相比于前两种方法,图 3(c) 静脉特征边缘更光滑、清晰,说明曲波具有更强的对方向的辨识能力和对边缘特征的表达。

(4) 通过对 PSNR(Peak Signal/Noise,峰值信噪比)、SNR(Signal/Noise,信噪比)、MSE(Mean Square Error,均方误差)、Entropy(信息熵)等客观评价指数的分析(见表 1),可以看到,镜像曲波增强方法不仅在主观视觉特性上得到增强,同时客观指数也有显著提高。

针对人眼视觉特性,人眼的敏感性与空间频率相关,因此局部对比度也是衡量影像的一个重要指标.图 4 分别给出了 4 副影像的局部(8×8 子图)对比度等高线图.从图中可以看出,原始影像(图 4(a))的局部对比度非常低,严重限制了特征的可识别性,采用镜像曲波增强方法处理图片后,图片(图 4(d))的局部对比度显著提升,明显优于直方图均衡化方法和双正交小波增强(见表 2)。

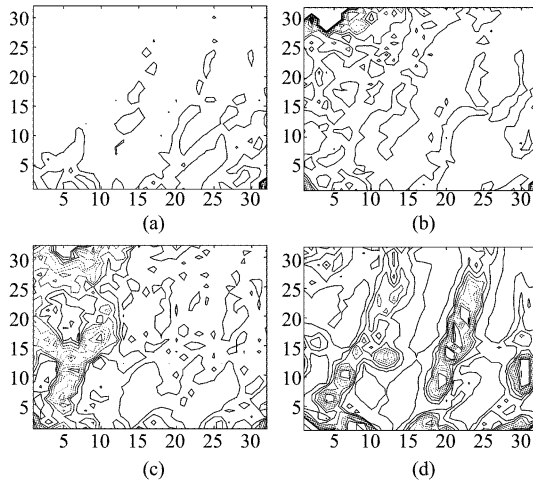


图 4 局部对比度比较 (a)原始影像 (b)直方图均衡化 (c)双正交小波 (d)镜像曲波

Fig. 4 Comparison of image contrast (a) Original image (b) Histogram equalization (c) Biorthogonal wavelet (d) Mirror-Extended curvelet

表 2 局部对比度均值比较

Table 2 Comparison of Local Contrast Mean Value

	原始影像	直方图均衡化	双正交小波	镜像曲波
局部对比度均值	0.081	0.272	0.383	0.424

## 4 结语

本文提出了一种基于镜像曲波变换的新的低对

比度影像增强方法,充分利用曲波增强的方向性与边缘表达能力,通过对高、中、低频子带系数非线性增强或抑制,既提高了影像整体的对比度,又突出了细节、抑制了噪声.从该方法与直方图均衡化和双正交小波方法的比较结果可知,本文方法在增强低对比度掌部静脉影像上效果更好,主观视觉评价和客观评价指数都显著提高.同时该方法对低对比度的连续影像特征提取<sup>[10]</sup>增强能力也明显具有优势,能够为后续影像分割、特征提取和识别提供有利条件。

## REFERENCES

- [1] ZHANG Hui-Lin, JIAN Xian-Zhong. Study on the Algorithms for Enhancing the Contrast of Hand Vein Image[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (张会林, 简献忠. 人体手背静脉血管图像增强处理方法研究. *仪器仪表学报*), 2005, **26**(8): 729-731.
- [2] WANG Jian-Gang, YAU Wei-Yun, Andy Suwandy, et al. Fusion of Palmprint and Palm Vein Images for Person Recognition Based on "Laplacianpalm" Feature[C]. In *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, USA: IEEE, 2007: 1-8.
- [3] CHEN Mao-Lin, QI Fei-Hu. Adaptive Filter in Low Quality Fingerprint Images[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈茂林, 戚飞虎. 低质量指纹图像的自适应滤波. *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(6): 440-444.
- [4] Mohapatra A K, Prakash N, Aggarwal S. Secured biometric template[C]. in *Networks*, 2008. *ICON 2008. 16th IEEE International Conference on*, New Delhi, India: IEEE, 2008: 1-4.
- [5] ZHOU Ying-Bo, Kumar A. Contactless palm vein identification using multiple representations[C]. in *Biometrics: Theory Applications and Systems (BTAS)*, 2010 *Fourth IEEE International Conference on*, Washington, DC, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [6] Emmanuel Candès, Laurent Demanet, David Donoho, et al. Fast discrete Curvelet transforms[J]. *Multiscale modeling & simulation*. 2006, **5**(3): 861-899.
- [7] Emmanuel Candès, David Donoho. New tight frames of Curvelets and optimal representations of objects with C2 singularities[J]. *Commun Pure Appl. Math*, 2004, **57**(2): 219-266.
- [8] Emmanuel Candès, Laurent Demanet, Curvelets and Fourier Integral Operators[J]. *Comptes Rendus Mathématique*, 2003, **336**(5): 395-398.
- [9] David Donoho, Jain Johnston. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. *Biometrika*, 1994, **81**(3): 425-455.
- [10] KONG Jun, TANG Xin-Yi, JIANG Min. Object location technique for moving target based on multi-scale feature extraction[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孔军, 汤心溢, 蒋敏. 基于多尺度特征提取的运动目标定位研究. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(1): 21-26.