

一种基于平稳小波域的红外图像增强方法

龚昌来, 罗 聪, 杨冬涛, 黄杰贤

(嘉应学院电子信息工程学院, 广东 梅州 514015)

摘 要:针对红外图像对比度和分辨率低、噪声大的特点,提出一种基于平稳小波域的红外图像增强新方法。对高频子带中幅值较小的噪声系数进行衰减,幅值较大的边缘细节系数进行放大;对低频子带系数的幅值采用所提出的正弦函数进行伸缩处理。实验结果表明,本文提出的方法在有效地增强红外图像对比度及边缘细节的同时,又能很好地抑制背景噪声,综合性能明显优于传统的直方图均衡化和反锐化掩膜增强方法。

关键词:红外图像;图像增强;平稳小波变换;正弦变换

中图分类号:TP391 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.023

Infrared image enhancement method based on stationary wavelet domain

GONG Chang-lai, LUO Cong, YANG Dong-tao, HUANG Jie-xian

(School of Electronic & Information Engineering, Jiaying University, Meizhou 514015, China)

Abstract: According to the low contrast, low resolution and big noise characteristics of the infrared image, a new method for infrared image enhancement based on stationary wavelet domain is proposed. The high-frequency sub-band noise coefficients of the smaller amplitude are attenuated, while the bigger edge detail coefficients are magnified. The amplitude of the low-frequency sub-band coefficients are scale enhance processed by the proposed sine function. The experimental results show that the proposed method enhances the image contrast and edge detail of the infrared image, and also suppresses background noise very well. Comprehensive performance is better than traditional histogram equalization and unsharp mask enhancement method.

Key words: infrared image; image enhancement; stationary wavelet transform; sine transform

1 引 言

在红外成像技术中,由于受红外传感器的固有分辨率限制以及红外线在传输过程中受大气吸收和散射的作用,使得红外图像噪声大,缺乏较好的对比度和分辨率。为了便于人眼观察以及有利于后续的红外图像目标识别、跟踪、检测等处理,必须对红外图像进行增强预处理。传统的红外图像增强方法可分为空间域增强和频率域增强两大类。空间域增强直接对图像像素灰度值进行运算处理,如灰度变换、直方图均衡化、反锐化掩膜等^[1]。频率域增强是对图像经傅里叶变换后的频谱成分进行操作,再经傅

里叶逆变换获得所需的结果,如频域低通滤波、高通滤波、同态滤波等^[2-3]。这些传统方法存在一个共同的缺点是增强图像的同时噪声也被放大。

近年来,以小波变换为代表的多尺度分析方法在红外图像增强处理中获得应用,取得了一些研究成果^[4-6]。相对于传统方法,小波分析在时域和频

基金项目:广东省自然科学基金项目(No. S2012010010368)资助。

作者简介:龚昌来(1962-),男,硕士,副教授,研究方向为图像与信号处理。E-mail: dzxgcl@sohu.com

收稿日期:2012-11-29

域上都具有良好的局部特性,可以有选择地增强某种尺度的图像特征,更适合人眼的视觉特性。小波变换可分为正交小波变换和非正交小波变换两大类,平稳小波变换^[7]属于非正交小波变换,它是对传统的正交小波变换的一种改进。与正交小波变换相比,平稳小波变换的主要特点是具有冗余性和平移不变性,更适合于处理相关性问题。由于红外图像的灰度间的相关性较大,因而对于红外图像的去噪、增强等处理,采用平稳小波变换更为合适^[8]。

本文基于离散平稳小波变换,提出一种红外图像非线性增强方法。实验结果表明,本文提出的方法能在有效增强图像的同时较好地抑制噪声,其增强效果明显优于传统增强方法。

2 算法原理

对图像 $f(x, y)$ 进行多层二维离散平稳小波分解,每层分解可得到一个低频子带 $D_A^j(x, y)$ 和水平、垂直、对角三个方向的高频子带 $D_H^j(x, y)$, $D_V^j(x, y)$, $D_D^j(x, y)$, $j=1, 2, \dots, n$ 为小波分解尺度。本文根据各子带小波系数所包含的图像信息不同,分别采用不同的增强算子进行增强处理,最后小波重构得到增强的图像。

2.1 高频子带的边缘增强与去噪

高频子带包含了图像的边缘细节信息与大部分噪声,本文采用如下的高频增强算子:

$$\hat{D}_k^j(x, y) = \begin{cases} \alpha_1 D_k^j(x, y) & |D_k^j(x, y)| \geq T \\ \alpha_2 D_k^j(x, y) & |D_k^j(x, y)| < T \end{cases} \quad (k=H, V, D; j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, T 为阈值; α_1, α_2 为增强系数,且 $\alpha_1 > 1, 0 < \alpha_2 < 1$; $\hat{D}_k^j(x, y)$ 为增强后的高频小波系数; $D_k^j(x, y)$ 为增强前的系数。

小波变换使信号的能量集中在一些较大的小波系数中,而噪声的能量却分布于整个小波域内。因此,经小波分解后,信号的小波系数幅值要大于噪声的系数幅值,可以认为,幅值较大的小波系数一般以信号为主,而幅值较小的系数在很大程度上是噪声。因而可以设定一个阈值 T ,对高频子带中的信号与噪声进行分割,将大于阈值的系数视为边缘细节信号,并进行增强处理($\alpha_1 > 1$);将小于阈值的系数视为噪声,并进行衰减处理($0 < \alpha_2 < 1$)。这样,就可以达到对红外图像边缘细节信息进行增强,提高清晰度,同时降低噪声的作用。阈值 T 采用 Donoho 等人提出的通用阈值^[9]:

$$T = \sigma_n \sqrt{2 \log(N)} \quad (2)$$

式中, σ_n 为噪声标准差; N 为给定高频子带中小波系数的总数。 σ_n 采用第一层的对角方向高频子带 $D_H^1(x, y)$ 系数的绝对值中值进行估计^[9]:

$$\hat{\sigma}_n = \frac{\text{Median}(|D_H^1(x, y)|)}{0.6745} \quad (3)$$

2.2 低频子带的对比度增强

红外图像表征景物的温度分布,一般情况下,背景区域温度较低,相应的图像灰度值相对较小,而目标区域温度较高,图像灰度值相应较大。红外图像经平稳小波分解后,低频子带主要表征图像的轮廓,能量相对集中,幅值也相对较大。低频子带中幅值较大的小波系数表示目标,而幅值较小的小波系数表示背景。根据这一特点,采用对低频子带系数的幅值进行伸缩方法,即对较小幅值系数(背景)进行压缩,对较大幅值系数(目标)进行拉伸,即可达到图像对比度增强的效果。目前,常用的图像灰度伸缩增强函数采用S曲线,有双曲正切函数、幂函数和伽马函数等,由于这些函数均通过渐近线取得极限值,而且大部分是关于拐点对称的,会导致部分灰度区域无法达到,而且不能够结合图像灰度特征进行针对性增强^[10]。本文采用式(4)的正弦变换增强函数:

$$g(x) = \begin{cases} (x-a) \times \left[\sin\left(\frac{x-a}{q-a} \times \frac{\pi}{2}\right) \right]^k + a & a \leq x \leq q \\ (x-b) \times \left[\cos\left(\frac{x-q}{b-q} \times \frac{\pi}{2}\right) \right]^k + b & q \leq x \leq b \end{cases} \quad (4)$$

式(4)的波形图如图1所示。 q 为拐点,当 $x < q$ 时进行压缩, $x > q$ 时进行拉伸。指数因子 k 改变变换曲线各部分的斜率, k 值增大时,伸缩强度增大,增强效果增加。整个变换曲线由两段正弦曲线组合而成,呈S形状,其导数是光滑的,伸缩性能好;伸缩的拐点 q 及伸缩强度 k 均可控制,应用灵活方便,通用性强。

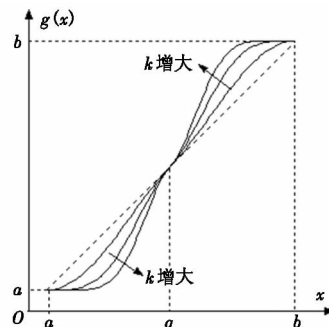


图1 正弦变换曲线

如何选择式(4)中拐点 q 的参数是本文方法的

一个关键问题。一幅红外图像的信息可划分为目标区域和背景区域二部分,阈值法是一种简单有效的图像目标与背景分割方法,因此,对于本文研究的问题,可将红外图像目标与背景分割阈值作为式(4)中拐点 q 的参数选择。红外图像目标与背景分割阈值的计算有多种方法如迭代阈值法、最优阈值法、Otsu 法等^[1],这些方法所获阈值虽然分割比较准确,但计算量大。本文采用一种计算简单的平均值阈值法,先计算低频子带图像的幅度平均值 T_0 ,以 T_0 为初始阈值将低频子带图像分割成两部分,根据红外图像的特点,目标的亮度一般像高于背景,设大

于 T_0 的部分为目标区域 A ,小于 T_0 的部分为背景区域 B 。再计算背景区域 B 的小波系数幅度平均值作为最终的阈值 T_j 。

$$T_0 = \frac{1}{M \times N} \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M |D_A^j(x,y)| \quad (5)$$

$$T_j = \frac{1}{N_B} \sum \sum |D_A^j(x,y)| \quad (6)$$

$$|D_A^j(x,y)| < T_0, j=1,2,\dots,n$$

式中, M,N 表示低频子带图像的尺寸; N_B 为区域 B 的总像素数。考虑到低频子带系数的正负符号,本文采用式(7)的低频子带增强算子。

$$\hat{D}_A^j(x,y) = \begin{cases} \text{sign}(D_A^j(x,y)) \times \left[(|D_A^j(x,y)| - a_j) \times \left[\sin\left(\frac{|D_A^j(x,y)| - a_j}{T_j - a_j} \times \frac{\pi}{2}\right) \right]^k + a_j \right] & a_j \leq |D_A^j(x,y)| \leq T_j \\ \text{sign}(D_A^j(x,y)) \times \left[(|D_A^j(x,y)| - b_j) \times \left[\cos\left(\frac{|D_A^j(x,y)| - T_j}{b_j - T_j} \times \frac{\pi}{2}\right) \right]^k + b_j \right] & T_j \leq |D_A^j(x,y)| \leq b_j \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数; $\hat{D}_A^j(x,y)$ 为第 j 层低频子带增强后的系数; $D_A^j(x,y)$ 为增强前的系数; a_j, b_j 为第 j 层低频子带系数绝对值的最小与最大值。

$$\begin{cases} a_j = \min \{ |D_A^j(x,y)| \} \\ b_j = \max \{ |D_A^j(x,y)| \} \\ x = 1, 2, \dots, M; y = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

3 算法步骤

本文方法的算法步骤如下:

- (1) 读取待增强的红外图像。
- (2) 对红外图像进行多层离散平稳小波变换。
- (3) 对各层高频子带小波系数,先由式(2)和式(3)计算阈值 T ,再按式(3)进行增强处理。
- (4) 对各层低频子带小波系数,先由式(5)、式(6)和式(8)计算有关参数,再按式(7)进行增强处理。
- (5) 进行逆平稳小波变换,重建红外图像。
- (6) 对重建图像的灰度值进行限幅处理,输出增强后的图像。式(9)为对 8 bit 图像的限幅处理计算公式。

$$g(x,y) = \begin{cases} 0 & f(x,y) < 0 \\ f(x,y) & 0 \leq f(x,y) \leq 255 \\ 255 & f(x,y) > 255 \end{cases} \quad (9)$$

表 1 三种算法增强图像客观评价数据

测试图像	评价指标	原图像	直方图均衡化增强图像	反锐化掩膜增强图像	本文方法增强图像
图 2(a)	信息熵	6.6028	6.5038	7.1999	7.3956
	标准差	31.3222	73.9180	45.8440	55.4294
图 3(a)	信息熵	7.0566	6.8068	7.3366	7.5517
	标准差	39.5722	73.8798	46.0674	62.5619

4 实验结果与分析

为验证本文方法的有效性,将本文方法与传统的直方图均衡化和反锐化掩膜法进行增强效果对比实验。采用二幅电力设备红外热像灰度图像作为测试图像,如图 2(a)和图 3(a)所示。实验中,本文方法的有关参数选择为:平稳小波变换选用 db8 小波分解 3 层;式(1)中的 α_1 取 2, α_2 取 0.5;式(7)中的伸缩强度 k 取 2。采用信息熵和标准差作为增强效果的定量评价指标。

信息熵:

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} p(i) \log_2 p(i) \quad (10)$$

标准差:

$$s = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{y=1}^M \sum_{x=1}^N (f(x,y) - \bar{f})^2} \quad (11)$$

式中, $p(i)$ 表示灰度为 i 的像素出现的概率; L 为图像的灰度级数; \bar{f} 表示图像 $f(x,y)$ 的灰度平均值; M 和 N 表示图像的行数和列数。图像的信息熵反映图像包含的信息量大小,信息熵越大,图像中含有的信息量就越多。图像的标准差反映图像的细节信息,标准差越大,图像细节信息就越多。实验结果数据如表 1 所示,三种算法的增强图像如图 2、图 3 所示。

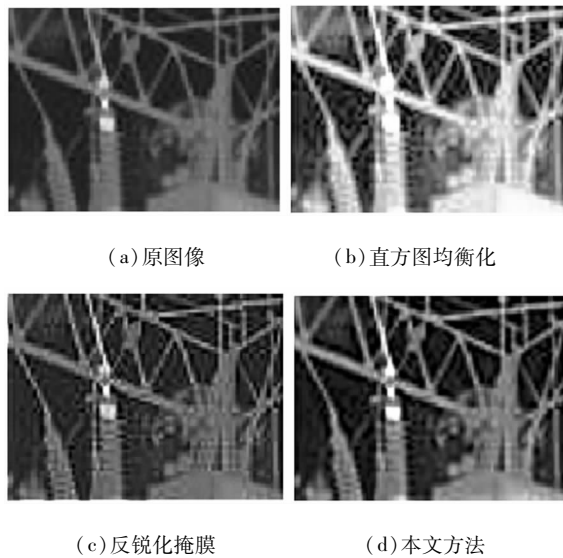


图2 电力设备1 红外图像增强实验结果

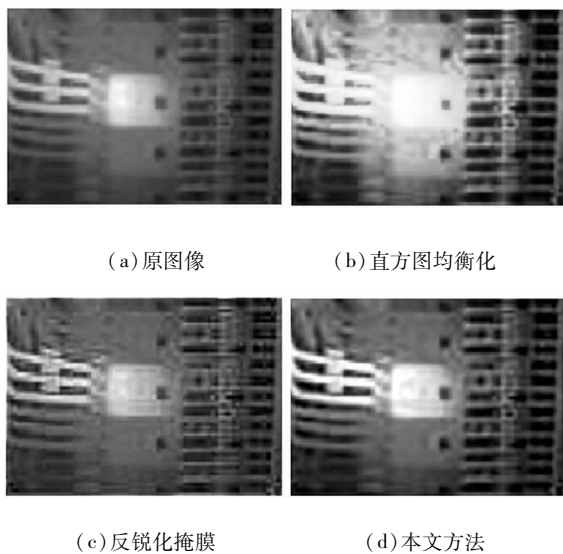


图3 电力设备2 红外图像增强实验结果

在主观评价上,由图2、图3可见,直方图均衡化图像的部分区域出现“过亮”现象,图像细节欠丰富,一些杂乱的背景噪声也被增强;反锐化掩膜法提高了目标图像清晰度,但是背景中的杂波和噪声明显被放大;本文方法的增强图像细节丰富,目标清晰度高,背景噪声低,增强图像的主观视觉效果明显优于前两种方法。

在客观评价上,由表1可知,直方图均衡化增强图像的标准差虽然最大,但信息熵最小,低于原始图像的信息熵,整体增强效果差。反锐化掩膜法增强图像的信息熵和标准差都比原始图像提高,具有一定的增强效果。本文方法增强图像的信息熵和标准差都高于反锐化掩膜法,整体增强效果最好,这正好与主观评价的结果保持一致。

5 结论

针对红外图像对比度低,噪声干扰大,用传统方法增强时,噪声增大的问题,本文基于平稳小波域提出一种新的增强方法。对高频子带中幅值较小的噪声系数进行衰减,幅值较大的边缘细节系数进行放大,提高了图像的边缘清晰度,降低了噪声;对低频子带系数的幅值采用所提出的正弦函数进行伸缩,对幅值较小的背景系数进行压缩,对幅值较大的目标系数进行拉伸,增强了图像的对比度。实验结果表明,本文方法综合性能明显优于传统的直方图均衡化和反锐化掩膜增强方法,有一定工程实用价值。

参考文献:

- [1] He Dongjian. Digital Image Processing [M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 51 - 73. (in Chinese)
何东健. 数字图像处理 [M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 51 - 73.
- [2] Hu Douming, Zhao Haisheng, Li Yunchuan, et al. A new approach to infrared image enhancement based on homomorphic filter [J]. Infrared Technology, 2012, 34 (4): 224 - 228. (in Chinese)
胡窦明, 赵海生, 李云川, 等. 一种基于同态滤波的红外图像增强新方法 [J]. 红外技术, 2012, 34 (4): 224 - 228.
- [3] Liu Bin, Jin Weiqi, Wang Lingxue, et al. Infrared image detail enhancement based on the spatial and frequency domain processing [J]. Infrared Technology, 2011, 33 (8): 477 - 482. (in Chinese)
刘斌, 金伟其, 王岭雪, 等. 基于空域和频域处理的红外图像细节增强算法 [J]. 红外技术, 2011, 33 (8): 477 - 482.
- [4] Chen Jun, Zhang Changjiang. Infrared image enhancement using arc-tangent transformation in stationary wavelet domain [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48 (9): 145 - 148. (in Chinese)
陈军, 张长江. 平稳小波域红外图像增强的反正切变换法 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48 (9): 145 - 148.
- [5] Feng Zhen, Ma Qishuang. Research on infrared image nonlinear enhancement algorithm based on wavelet analysis [J]. Laser & Infrared, 2010, 40 (3): 315 - 318. (in Chinese)
冯贞, 马齐爽. 基于小波分析的红外图像非线性增强算法 [J]. 激光与红外, 2010, 40 (3): 315 - 318.
- [6] Zhang Changjiang, Fu Mengyin, Jin Mei, et al. Approach to enhance contrast of infrared image based on wavelet

- transform[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, 23(2): 119 - 124. (in Chinese)
- 张长江, 付梦印, 金梅, 等. 一种红外图像对比度增强的小波变换法[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(2): 119 - 124.
- [7] Nason G P, Silverman B W. The stationary wavelet transform and some statistical applications[C]. *Lecture Notes in Statistics*, 1995, 103: 281 - 299.
- [8] Zhang Changjiang, Fu Mengyin, Jin Mei, et al. Contrast enhancement of infrared image based on discrete stationary wavelet transform[J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(3): 221 - 224. (in Chinese)
- 张长江, 付梦印, 金梅, 等. 基于离散平稳小波变换的红外图像对比度增强[J]. *激光与红外*, 2003, 33(3): 221 - 224.
- [9] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. *Biometrika*, 1994, 81: 425 - 455.
- [10] Kou Xiaoming, Liu Shangqian, Hong Ming, et al. Approach for adaptive infrared thermal image enhancement[J]. *Xi'an; Journal of Xidian University*, 2009, 36(6): 1070 - 1074. (in Chinese)
- 寇小明, 刘上乾, 洪鸣, 等. 一种自适应红外图像增强技术[J]. *西安: 西安电子科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(6): 1070 - 1074.