

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

基于多小波的图像处理在电晕检测中的应用

王 欣¹, 于 晓^{2,3}, 隋永新², 杨怀江², 庞云阶¹

(1. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院 长春光学精密仪器机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 空军航空大学, 吉林长春 130022)

摘要:提出了基于多小波变换的图像处理方法,该方法以多小波变换为基础,在一次多小波分解与重构之间完成双谱段图像处理。首先进行多小波变换,将变换系数进行软阈值收缩消去噪声;然后根据图像中需增强的信息,选择增强系数进行子带增强;提出一种新的自适应权值融合规则,采用这个规则融合变换系数,最后重构得到处理后的单幅图像。实验表明,这种方法不仅能提高图像的视觉效果,增强源图像的边缘信息,而且能很好地将源图像中对电晕检测有用信息融合在一起,提高电晕检测系统的定位精度。

关键词:多小波变换;电晕检测;图像融合;多小波收缩;子带增强

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Application of multiwavelet based image processing to corona detection

WANG Xin¹, YU Xiao^{2,3}, SUI Yong-xin², YANG Huai-jiang², PANG Yun-jie¹

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;

3. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: With combination of the multiwavelet threshold shrinkage, subband enhancement and image fusion a image processing method accomplished by means of discrete multiwavelet transform was presented. In this method, Multi Wavelet Transform(MWT) is the first step and the MWT coefficients are denoised by soft threshold multiwavelet shrinkage. Then subband enhancement is used to enhance the edge related coefficients. A new adaptive weight average image fusion rule was proposed to merge the coefficients and acquire fused coefficients. The experimental results show that the proposed image processing method can produce visually acceptable image and reduce noise while the source image is enhanced. This method also can fuse details of input images and improve the locating precision of the corona detection system.

Key words: MWT; corona detection; image fusion; multiwavelet shrinkage; subband enhancement

收稿日期:2005-08-22;修订日期:2006-06-12.

基金项目:教育部博士点基金资助项目(No. 20010183)。

1 引言

绝缘子的缺陷、导体的破损或污染会导致高压设备的电晕放电,由于电晕表示部件的损坏,因此精确的定位电晕的起源以便采取适当的措施很重要。电晕放电在可见光波段能量非常微弱,观测困难;在紫外波段相对较强,但是单独采用紫外探测器又因缺少背景信息无法定位。为此,采用双光谱检测系统对电晕进行探测及定位。该系统用两台相机采集图像,调整两架相机视场重合,紫外相机对电晕成像,可见光相机对周围背景成像。对双光谱图像进行去噪、增强预处理,然后融合。得到的融合图像可显示紫外图像中的电晕,将可见图像中的信息作为背景,对精确的定位电晕十分有效。

小波因其时频局域性在图像处理领域得到了广泛的应用^[1-3]。小波在图像处理应用中,其正交性能保持能量,对称性适合于人眼视觉系统又使图像在边界易于处理,紧支性能保证精确的分解和重建。可是实系数单小波不能同时具有正交性、对称性和紧支集性质。而多小波保持了单小波的时频局域化特性,又同时拥有上述性质,用多小波进行图像处理具有很大的优越性。

因此本文提出基于多小波的双光谱电晕检测系统的图像处理方法。该方法将检测系统中对输入图像所做的去噪、增强和融合三者结合在一起,在一次多小波的分解与重构之间完成双光谱图像处理。通过对源图像处理达到抑制噪声、增强边缘信息的目的,最终得到的融合图像综合了两个图像的有用信息,在电晕检测系统应用得到了满意的效果。

2 多小波变换

多小波变换是单小波的推广,是由 $r \geq 2$ 的尺度函数 $\{\varphi_k(t)\}_{1 \leq k \leq r} \in L^2(R)$ 和相应的小波函数 $\{\psi_k(t)\}_{1 \leq k \leq r} \in L^2(R)$ 伸缩平移生成。设 $\Phi(t) = [\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_r(t)]^T$ 和 $\Psi(t) = [\psi_1(t), \psi_2(t), \dots, \psi_r(t)]^T$ 分别为尺度函数矢量和小波函数矢量, $\Phi(t)$ 、 $\Psi(t)$ 满足两尺度方程:

$$\Phi(t) = \sum_{k \in Z} H_k \Phi(2t - k)$$

$$\Psi(t) = \sum_{k \in Z} G_k \Phi(2t - k), \quad (1)$$

其中 H_k 、 G_k 是矩阵,分别为低通和高通滤波器序列。

将单小波中的分解与重构 Mallat 算法推广至多小波,得到多小波分解:

$$\begin{aligned} C_{j-1,k} &= \sqrt{2} \sum_{n \in Z} H_{n-2k} C_{j,n} \\ D_{j-1,k} &= \sqrt{2} \sum_{n \in Z} G_{n-2k} C_{j,n}, \end{aligned} \quad (2)$$

$C_{j-1,k}$ 是低通部分,称为尺度系数, $D_{j-1,k}$ 是高通部分,称为小波系数。

多小波重构:

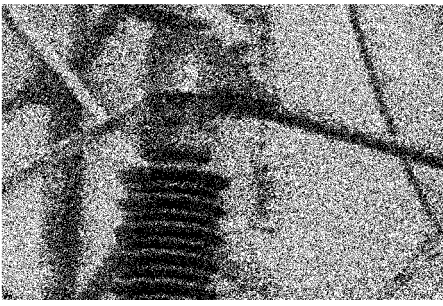
$$C_{j,k} = \sum_{n \in Z} H_{n-2k}^T C_{j-1,k} + \sum_{n \in Z} G_{n-2k}^T C_{j-1,k}, \quad (3)$$

单小波变换中,初始系数通常取近似: $C_{0,k} \sim f(k)$, $k=1, \dots, n$,而在多小波中需要处理 r 个小波函数,因此需进行适当的预滤波,将标量信号转换为矢量信号,得到 r 组初始系数序列。文献^[4]详细介绍了多种预滤波方法,但预滤波会破坏已构造的多小波的特性,如紧支性和正交性,Lebrun 和 Vetterli^[5]提出了“平衡”多小波,避免了预滤波。本文将平衡多小波处理用于电晕检测的双光谱图像。

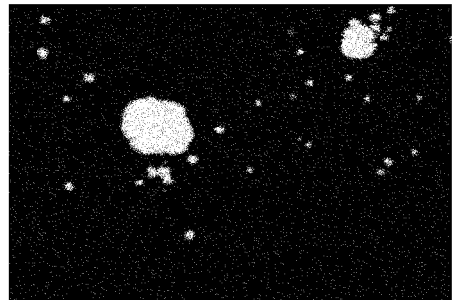
3 基于多小波的双光谱图像处理

图 1 为一组双光谱图像,图 1(a)是一个绝缘子及电线的可见光图像,图 1(b)是同一时刻同一视场的紫外图像。

首先对双光谱图像进行预处理。预处理方法根据双光谱图像的特点选择:由于紫外相机增益造成的紫外图像中的细小斑点对电晕的检测会产生干扰,所以采用中值滤波效果较好;而在可见光图像中噪声为高斯白噪声,在多小波域进行去噪和边缘增强能提高图像视觉质量。两幅图像信息互补,单独任一幅图像都无法完成电晕定位,因此预处理后需进行双光谱图像融合,双光谱图像处理包含图像去噪、增强和融合。图 2 给出了图像处理算法的示意图,采用平衡多小波,分解层数 3。以下主要介绍在多小波的分解与重构之间完成的可见光图像去噪、增强和双光谱图像融合的多光谱图像处理。



(a) 可见光图像
(a) Visible image



(b) 紫外图像
(b) UV image

图 1 双光谱图像

Fig. 1 Dual-spectral images

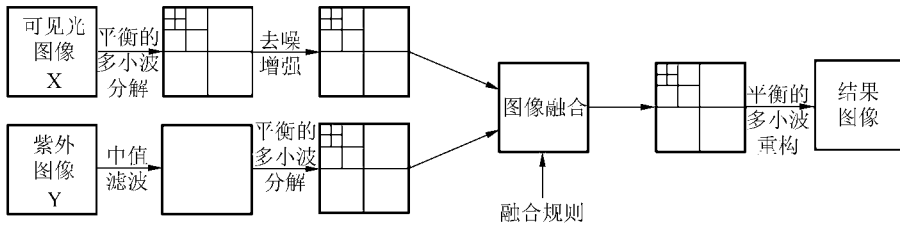


图 2 基于平衡多小波变换的双光谱图像处理算法示意图

Fig. 2 Dual-spectral images processing based on the balanced multiwavelet transform

图像经多小波分解后,得到多尺度分解 (Multiscale Decomposition, 简称 MSD) 系数。以下图像处理算法都是对 MSD 系数进行的。

3.1 多小波收缩去噪

把 Dohono^[6] 提出的小波阈值收缩方法推广为多小波阈值收缩方法,设有如下观测图像:

$$g_{xy} = f_{xy} + \epsilon_{xy} \quad x, y = 1, \dots, N, \quad (4)$$

其中 f_{xy} 为原始图像, g_{xy} 为受到加性高斯白噪声干扰的观测图像, ϵ_{xy} 为服从 $N(0, \sigma^2)$ 的高斯白噪声。图像去噪是在 g_{xy} 中移去噪声,得到 f_{xy} 的估计值 \hat{f}_{xy} 使均方误差最小。对式(4)两端做多小波分解,得到高频 MSD 系数形式如下:

$$D_{j,k} = u_{j,k} + v_{j,k}, \quad (5)$$

$D_{j,k}$ 、 $u_{j,k}$ 、 $v_{j,k}$ 分别是观测图像、原始图像和噪声对应的多小波系数。细节子带多小波系数由两部分构成:边缘相关系数和噪声相关系数,多小波阈值收缩去噪就是选定合适的阈值,在多小波域去掉 MSD 中噪声相关系数。本文采用软阈值化去噪:

$$\hat{D}_{j,k} = T_{\lambda}^S(D_{j,k}) = \text{sgn}(D_{j,k}) \cdot \max(|D_{j,k}| - \lambda, 0), \quad (6)$$

其中 λ 为阈值,当 $D_{j,k} > \lambda$ 时, $\hat{D}_{j,k}$ 与 $D_{j,k}$ 之间总存在恒定的偏差,影响重构信号与真实信号的逼真程度,造成边缘模糊。在软阈值收缩后进行图像增强,克服图像采集及去噪过程引入的模糊,增强边缘信息。

3.2 边缘增强

采用图像增强与去噪相结合,根据需要对阈值收缩后的 MSD 系数各子带成分进行增强。将图像软阈值函数 $\hat{D}_{j,k} = T_{\lambda}(D_{j,k})$ 表示成 $\hat{D}_{j,k} = S_{\lambda} \cdot D_{j,k}$, 其中 S_{λ} 为收缩因子。根据软阈值收缩的定义, S_{λ} 值域为 $[0, 1]$, 对子带成分进行增强,允许收缩因子大于 1。这里引入一个增益函数 $H_j: [0, 1] \rightarrow [0, +\infty]$, 用来对收缩因子进行修正。软阈值函数改写为如下形式:

$$T_{\lambda}^{\lambda}(D_{j,k}) = H_j(S_{\lambda}) \cdot D_{j,k} = H_j(T_{\lambda}(D_{j,k})), \quad (7)$$

其中 $H_j(\alpha)$ 是线性函数, $H_j(\alpha) = h_j \cdot \alpha$, h_j 是增益系数,用来控制不同尺度 2^j 下的增强程度。

对增益系数 h_j 的设定可以根据需要调整:当尺度 j 比较小, h_j 取较大值可以增强小的目标;反之如果希望增强比较大的区域则尺度 j 越大, h_j 取值越大。前者可以使图像灰度微小变化构

成的细节边缘得到增强且层次感强;后者使图像的某些感兴趣区域更加突出。在电晕检测中需要增强的是细节边缘,因此系数按前者方式设定。

3.3 双光谱图像融合

图像融合是将同一场景的多幅图像的互补信息合并成一幅新图像,以便更好地对场景进行监视和侦察^[3,6]。采用多小波域图像融合,根据 MSD 系数和原始图像在空域和频域两方面的对应关系,以及原始图像灰度的局部变化特性,按一定融合规则将源图像的多小波系数融合得到融合图像的多小波表示,最后做多小波逆变换得到经过去噪、增强并融合的结果图像。其中融合规则的确定是图像融合的核心,要根据源图像的特点以及对融合图像的要求确定。常用的多小波系数的融合方法有极值法和均值法^[2],对两幅源图像的 MSD 系数,极值法选取系数对中较大的作为融合系数,而均值法通过系数加权平均求取融合系数。

在电晕检测系统中,可见光图像的特点是细节比较多,在融合图像中希望尽可能保留;紫外图像特点为电晕区域亮度较高,而背景比较暗,暗背景不包含任何对电晕检测有用信息。本文提出一种新的适合双光谱图像特点的自适应加权平均图像融合算法,算法在保留可见光图像中的细节同时消去紫外图像的暗背景,其内容及运算步骤如下:

用 X 表示可见光图像, Y 表示紫外图像, Z 表示融合图像。用 $p=(m,n,k,l)$ 表示 MSD 系数的索引,其中 m,n 为某一频率子带的空间位置点, k 为分解层数, l 为频率子带。 $D_l(p)$ 表示图像 I 经过多小波分解后在 k 层, l 子带的 (m,n) 位置的 MSD 系数。自适应加权平均融合定义为:

$$D_z(p) = \omega_x(p)D_x(p) + \omega_y(p)D_y(p), \quad (8)$$

其中 $D_z(p)$ 是融合图像的 MSD 系数; $D_x(p), D_y(p)$ 分别是图像 X 和图像 Y 经预处理后的 MSD 系数; $\omega_x(p), \omega_y(p)$ 为规范化的自适应权值。

要确定 $\omega_x(p), \omega_y(p)$, 先要分别计算权值 $W_x(p)$ 和 $W_y(p)$:

$$W_x(p) = |D_x(p) - \bar{D}_x(p)|, \quad (9)$$

其中 $\bar{D}_x(p)$ 是 D_x 的均值,式(9)表示与均值距离越大,分配权值越高,保证可见图像细节部分获得较高权值。

$$W_y(p) = |D_y(p) - \bar{D}_y(p)| \cdot s(p)$$

$$s(p) = \begin{cases} 1 & \text{if } |D_i(p)| > T \\ 0 & \text{if } |D_i(p)| \leq T \end{cases}, \quad (10)$$

其中 $\bar{D}_y(p)$ 是 D_y 的均值; $s(p)$ 是阈值函数,控制紫外图像中小于阈值 T 的 MSD 系数不进行融合。最后根据下式进行规范化:

$$\omega_x(p) = W_x(p) / (W_x(p) + W_y(p))$$

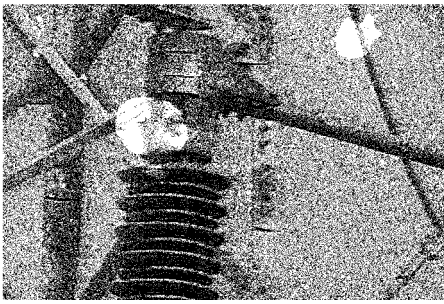
$$\omega_y(p) = 1 - \omega_x(p), \quad (11)$$

求得 $\omega_x(p), \omega_y(p)$ 。根据上述自适应权值融合方法得到 MSD 融合系数,经多小波重构得到经过去噪、增强并融合的结果图像。

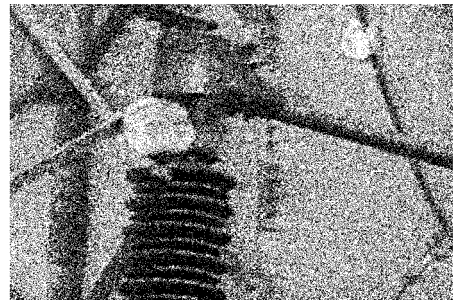
4 实验结果

实验采用图 1 所示的双光谱图像作为源图像,图像大小为 720×480 ,灰度级为 256。图 3(a)为基于本文提出的算法进行图像处理结果:对紫外图像采用大小为 10×10 的中值滤波器去噪;利用平衡 CL 多小波进行图像分解与重构,小波分解的最大分解尺度 J 取值为 3;可见光图像增益系数选取 $h_1=4, h_2=2, h_3=1$,增强图像中的细节边缘。图 3(b)是基于小波变换得到的融合图像,使用 Db8 进行分解与重构,其余算法同上。图 3(c)~(d)都基于平衡 CL 多小波变换,但采用了不同的融合规则:3(c)使用固定权值均值法融合规则,3(d)使用极值法融合规则。

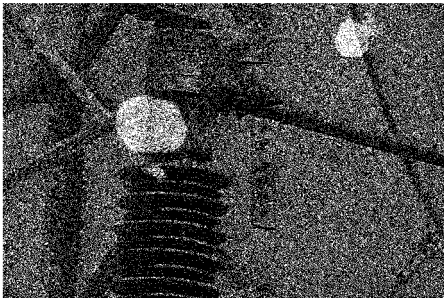
对生成的融合图像的质量进行主观和客观的评价。主观观察表明,基于小波的方法由于 Db8 不具有对称性,重构的融合图像不够精确;采用固定权值平均法融合规则得到的融合图像偏暗,可见背景细节不清晰,效果不理想;极值法融合规则得到的融合图像在紫外电晕区域观察不到可见光背景,定位不准确;采用本文提出的方法得到的融合图像包含紫外图像的电晕信息和可见光图像的背景信息,电晕区域边缘清晰,容易分辨,同时在该区域也可以清楚观察到可见背景的细节,对精确定位电晕很有帮助。客观评价采用了文献[9]中的互信息进行度量。互信息是一个变量包含另一个变量的信息量的量度, X, Y, Z 意义同上文,融合图像与可见光图像和紫外图像的互信息分别用 $I(X; Z)$ 和 $I(Y; Z)$ 表示。



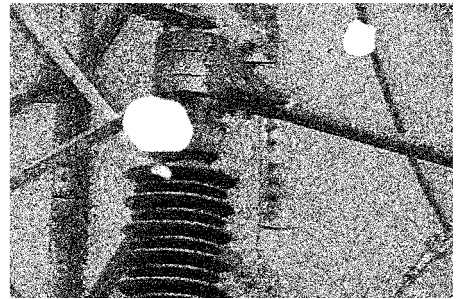
(a) 本文方法
(a) Proposed method



(b) 单小波-自适应加权融合规则
(b) Wavelet-adapted weighted average



(c) 多小波-固定均值法融合规则
(c) Multiwavelet-coefficient average



(d) 多小波-极值法融合规则
(d) Multiwavelet-selection

图 3 采用不同方法得到的结果图像

Fig. 3 Result images obtained by different methods

$$I(X; Z) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L h_{x,z} \log \frac{h_{x,z}}{h_x h_z}$$

$$I(Y; Z) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L h_{y,z} \log \frac{h_{y,z}}{h_y h_z}, \quad (12)$$

其中 h_x, h_y, h_z 是 X, Y, Z 的概率密度; $h_{x,z}, h_{y,z}$ 分别代表 XZ 和 YZ 两组图像的联合概率密度函数, L 为图像灰度级。用融合图像和双光谱图像的互信息之和 $MI = I(X; Z) + I(Y; Z)$ 作为图像融合的客观评价指标。 MI 值越大, 表示融合图像中包含的源图像信息越多, 融合效果越好。

表 1 融合图像与源图像的互信息量

Tab. 1 MI between the fused image and the source images

	本文方法	Db8 单小波	固定权值平均融合规则	极值法融合规则
M_i	2.16	2.03	1.69	1.92

从表 1 可以看出, 采用基于多小波分解与重构、自适应融合规则得到的图像客观评价也优于采用其它方法得到的图像。

5 结 语

通过主观观察与客观评价比较, 证明在双光谱图像处理系统中, 多小波变换优于使用单小波, 自适应权值融合优于极值法和固定权值融合法。多小波能同时拥有正交性和对称性, 正交性保证多小波变换后噪声信号能量集中在高频子带上, 获得好的去噪效果, 还保证精确的子带增强; 对称性保证重构后图像的视觉效果。根据双光谱图像的特征提出的自适应权值平均融合算法得到的融合图像较好地融合了来自不同图像的信息, 满足了电晕检测系统要求。

参考文献:

- [1] SHARK L K, YU C. Denoising by optimal fuzzy thresholding in wavelet domain [J]. *IEEE Electronical Letters*, 2000, 36 (6): 581-582.
- [2] PAJARES G., CRUZ J M. A wavelet-based image fusion tutorial [J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37(9): 1855-1872.
- [3] 陈洪波, 王强, 张孝飞, 等. 基于小波系数邻域特征的图像融合[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(5): 516-522.
CHEN H B, WANG Q, ZHANG X F, *et al.* Image fusion based on neighborhood features of wavelet coefficients [J]. *Optics and Precisions Engineering*, 2003, 11(5): 516-522. (in Chinese)
- [4] STRELA V. *Multiwavelets: Theory and Application*[D]. Ph. D. Dissertation, MIT, 1996.
- [5] LEBURN J, VETTERLI M. High order balanced multiwavelets [C]. *Proc. IEEE in Conf. Acoustic Speech Signal Process (ICASSP)*, 1998: 12-15.
- [6] DONOHO D. Denoising by soft thresholding [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1995, 41 (3): 613-627.
- [7] ZHANG Z, BLUM R S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application[C]. *Proc. IEEE*, 1999, 87(8): 1315-1326.
- [8] CHANG S G, YU B, VATTERLI M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(9): 1532-1546.
- [9] QU G H, ZHANG D L, YAN P F. Information measure for performance of image fusion [J]. *Electronic Letters*, 2002, 38 (7): 313-315.

作者简介:王欣(1975—),女,博士研究生,主要研究方