

# 基于 Meyer 窗函数剪切波变换的蝗虫切片图像去噪

李晓飞 梅树立 李丽

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 蝗虫显微切片图像纹理边缘细节丰富, 在图像获取、增强等预处理过程中经常会受到外部噪声的干扰, 因此针对蝗虫切片图像去噪同时并保留纹理边缘细节的探索是研究不同蝗虫种类细胞构造的基础。基于张量的传统二维小波因其滤波器各向同性, 只能表示水平和垂直两个方向, 在去噪的同时会把图像中边缘纹理等细节模糊, 而剪切波构造的滤波器各向异性, 能够表示多个方向, 这些优点使得剪切波可以有效地处理高维数据, 在逼近奇异曲线时达到最优逼近。本文提出的基于 Meyer 窗函数的剪切波算法可以识别出图像边缘和纹理, 并在去噪的同时保留纹理, 以 Meyer 小波作为剪切波基函数, 利用 Meyer 小波函数和尺度函数构造窗函数, 然后采用 Meyer 窗函数来建立各向异性剪切波滤波器, 再利用该剪切波滤波器对蝗虫切片图像进行多尺度分析, 经过剪切波变换获得剪切波系数, 最后应用硬阈值方法去除蝗虫切片图像噪声系数, 经过逆变换得到蝗虫切片去噪图像。采用经典图像质量评价指标均方误差 (MSE)、峰值信噪比 (PSNR)、结构相似度 (SSIM) 对本文算法去噪性能进行评价, 在噪声标准差等于 30 时, 将本文算法与 Meyer 小波、偏微分方程等去噪方法进行比较, 其中 PSNR 比 Meyer 小波提高 2.5 dB 左右, 比偏微分方程算法的 PSNR 提高 2 dB 左右。仿真试验结果表明, 本文算法去噪后的蝗虫切片图像去噪效果明显优于其他传统去噪算法, 去噪结果在视觉效果上也优于其他传统去噪算法。

**关键词:** 蝗虫切片; 图像去噪; Meyer 窗函数; 多尺度分析; 各向异性; 剪切波变换

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0449-08

## Image Denoising of Locust Slices Based on Meyer Window Function Shearlet Transform

Li Xiaofei Mei Shuli Li Li

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The images of locust slices with abundant textures are often negatively impacted by external noises during image acquisition, enhancement and so on. These noises then destroyed the textures of the locust slice images and hindered the study of the locust cell structures. In the frequency domain, traditional 2D wavelet transform based on tensor, in which only have two directions, horizontal and vertical, can't deal with high dimensional data effectively. Besides, the filter that constructed wavelet was isotropic, so the traditional denoising methods using wavelet denoising noise made image edge and texture blur. Shearlet often uses a compactly supported traditional wavelet function as its wavelet basis. Then this wavelet basis through translation, dilation and shear transform, makes shearlet express multiple directions. The shearlet filter is anisotropic. Shearlet uses the special frame structure, in which can preserve texture and edge so as it will not be noised. Shearlet transform was based on multi-scale geometric analysis. Shearlet can represent image sparsely. Thus this paper proposed a Shearlet algorithm based on Meyer window function. The algorithm used Meyer wavelet as the wavelet basis function, since Meyer wavelet was symmetric and infinitely differentiate. First, Meyer wavelet function and scale function were used to construct a Meyer window function. Meyer window function was used to decompose the noisy locust slice

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271618, 41171337)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAK04B01)

作者简介: 李晓飞(1991—), 男, 硕士生, 主要从事计算机图像处理及虚拟系统设计研究, E-mail: lixiaofeicau@cau.edu.cn

通信作者: 李丽(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机图形图像处理技术研究, E-mail: lili.li@cau.edu.cn

images in frequency domain, and compute Shearlet norms in each scale and each direction. Second, the traditional hard threshold method was used to process the Shearlet coefficient. Finally, through Shearlet inverse transform, the locust slices images were restructured. In the experimental section, two groups of experiments were set up. In the first group experiment, the proposed algorithm was compared to other denoising algorithms, such as Meyer wavelet threshold denoising algorithm, partial differential equation denoising algorithm and so on. The classical image quality evaluation index was adopted to evaluate the performances of these algorithms. The adopted evaluation index included mean squared error (MSE), peak signal to noise ratio (PSNR), and structure similarity (SSIM). When the noise standard deviation was 30, the PSNR got by this paper was 2.5 dB higher than that got by Meyer wavelet threshold denoising algorithm, and 2 dB higher than that got by partial differential equation denoising algorithm. The second group experiment, in order to verify the retain texture with different directions, a locust cell image with much more texture was selected. The final experiment result showed that this algorithm can retain effectively. Others traditional denoising algorithm made the edge and textures blur.

**Key words:** locust slices; image denoising; Meyer window function; multi-scale geometric analysis; anisotropic; Shearlet transform

## 引言

蝗虫显微切片试验的主要目的是研究蝗虫细胞及其神经组织构造,揭示蝗虫繁殖和农药除虫工作原理,以辅助生物农药的研发,减少化学农药的使用<sup>[1-2]</sup>。蝗虫切片图像在采集和增强过程中容易受到外部噪声的干扰,使得蝗虫切片图像颜色暗淡、纹理边缘模糊。为有效抑制和去除蝗虫切片图像中的噪声,在获取蝗虫切片图像之后,应先对其进行图像去噪预处理。

基于张量积的传统二维小波阈值去噪算法在领域中只具有水平、垂直2个方向,且在小波变换过程中,滤波器各向同性,不能很好地表示图像中带有方向的纹理信息,在去噪的同时会模糊图像边缘、纹理等细节;偏微分方程(PDE)的去噪方法虽然能够识别出纹理和边缘区域,且去噪处理后能够有效保留纹理和边缘,达到保边降噪效果,但其适用于噪声标准差较小的图像,对噪声标准差较大的图像去噪效果并不十分理想<sup>[3]</sup>。为了克服这些不足,GUO等<sup>[4]</sup>和YI等<sup>[5]</sup>提出多尺度几何分析(Multiscale geometric analysis, MGA)和剪切波相结合的方法,并将其应用于检测、表示和处理高维数据方面。多尺度几何分析思想是小波尺度 $a$ 由小到大的变化,大尺度下,小波分析范围大,只能看到目标轮廓;同理,小尺度下,小波分析范围小,可以观察到目标的细微部分,随着尺度由大到小变化,在各尺度上可以由粗及精地观察目标。小波基的频域支撑空间为带方向的长条形,这样可以使使用最少的系数来逼近奇异曲线。将MGA方法应用于图像去噪也是目前研究的热点之一,另外,关于剪切波的图像融合算法也被广

泛研究,高国荣等<sup>[6]</sup>将非抽样剪切波算法应用于遥感图像的图像融合当中。2007年,GUO等<sup>[4]</sup>使用合成膨胀的仿射系统构造出了剪切波理论。剪切波(Shearlet)变换因其不仅能够对图像进行稀疏表示,还可以最优逼近奇异光滑曲线<sup>[7]</sup>,已被应用于图像去噪,2010年,LIM等<sup>[8-9]</sup>发表了基于使用离散剪切波变换稀疏方向图像的相关论文,在图像去噪研究中取得了良好的效果。但至今未见针对蝗虫切片图像的多尺度剪切波变换去噪方法研究。蝗虫显微切片图像中纹理丰富、轮廓较模糊,为使蝗虫切片图像在去噪处理后能够保留边缘纹理,去除噪声,满足应用研究要求,本文提出基于Meyer窗函数剪切波变换的蝗虫切片图像去噪算法。

## 1 剪切波变换去噪原理及实现

### 1.1 剪切波构造

LABATE等<sup>[10]</sup>提出了连续剪切波变换,连续剪切波变换是一个各向异性且对于方向十分敏感的连续小波变换。当维度为2时,连续剪切波变换为

$$SH_f(a, s, t) = \langle f, \psi_{a,s,t} \rangle \quad (1)$$

其中  $\psi_{a,s,t}(x) = |\det \mathbf{A}|^{-\frac{1}{2}} \psi(\mathbf{B}^s \mathbf{A}^a x - t)$   
 $(a \in \mathbf{R}^+, s \in \mathbf{R}, t \in \mathbf{Z}^2, \varphi \in \mathbf{L}^2(\mathbf{R}^2), |\det \mathbf{B}| = 1)$  (2)

式中  $\psi_{a,s,t}(x)$ ——时域中剪切波函数  
 $a$ ——尺度参数  $s$ ——剪切参数  
 $t$ ——平移参数  
 $\mathbf{A}$ ——各向异性膨胀矩阵  
 $\mathbf{B}$ ——剪切矩阵

矩阵 $\mathbf{A}$ 与尺度变换有关,矩阵 $\mathbf{B}$ 与保持面积不

变的几何剪切变换有关<sup>[11-12]</sup>。通常情况下,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & \sqrt{a} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ , 令  $\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ , 尺度矩阵  $\mathbf{A}$  (抛物线尺度) 通过 2 个坐标轴上提供的不同膨胀因子来控制剪切波的尺度, 不同的尺度也体现出剪切波各向异性的特征, 剪切矩阵  $\mathbf{B}$  用来控制剪切波的方向, 剪切波的平移参数同传统小波一样可以检测出奇异点位置, 不同的是剪切波的剪切参数  $s$  可以识别出奇异曲线的方向<sup>[13]</sup>。

对于  $\xi = (\xi_1, \xi_2) \in \mathbf{R}^2 (\xi_1 \neq 0)$ , 令  $\psi$  满足

$$\hat{\psi}(\xi) = \hat{\psi}_1(\xi_1) \hat{\psi}_2\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right) \quad (3)$$

式中  $\hat{\psi}$  ——  $\psi_{a,s,t}$  的傅里叶变换

$\psi_1, \psi_2$  —— 普通小波

$\psi_1, \psi_2$  支撑域分别是  $[-2, -1/2] \cup [1/2, 2]$

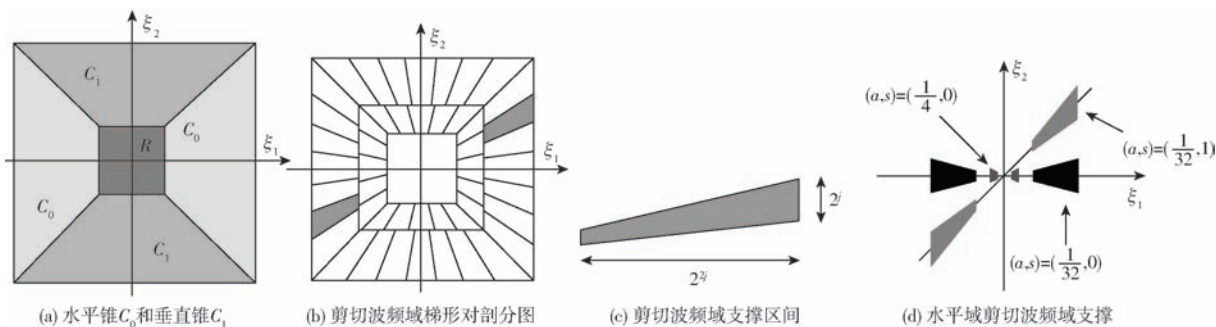


图 1 剪切波频域图像

Fig. 1 Shearlet frequency image

## 1.2 剪切波基函数构造

由前所述, 剪切波以普通小波作为基函数, 通过对基函数进行尺度变换、剪切变换、平移变换来处理高维数据。为了使蝗虫切片图像在去噪处理后获取更佳的视觉效果, 在选取剪切波基函数时, 需要增加小波的光滑性或连续可微性, 即增强用来刻画函数光滑程度的正则性条件。正则性越高, 函数的光滑性越好, 但一般情况下, 正则性高, 支撑长度就长, 计算时间就越大, 因此还需要平衡正则性和支撑长度的关系<sup>[14-15]</sup>。

普遍认为, 在 Meyer 小波被构造出来之前, 时域和频域中不存在连续、光滑、紧支撑的小波函数与尺度函数。Haar 小波时域性好、频域性差, Shannon 小波频域局域性好、时域局域性差, 而 Meyer 小波的时域、频域的局域性介于两者之间<sup>[16]</sup>。另外, Meyer 小波和尺度函数表达式是定义在频域中, 因此本文选取 Meyer 小波作为剪切波基函数。

Meyer 小波的尺度函数表达式为

和  $[-1, 1]$ , 在频域中, 时域剪切波函数的傅里叶变换可表示为

$$\hat{\psi}_{a,s,t}(\xi_1, \xi_2) = a^{\frac{3}{4}} e^{-2\pi i \xi_1 t} \hat{\psi}_1(a \xi_1) \hat{\psi}_2\left(a^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\xi_2}{\xi_1} - s\right)\right) \quad (4)$$

并且  $\hat{\psi}_{a,s,t}$  支撑域为

$$\{(\xi_1, \xi_2) : \xi_1 \in [-2/a, -a/2] \cup [a/2, 2/a], | \xi_1 / \xi_2 - s | \leq \sqrt{a}\} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知, 对于不同尺度  $a$ ,  $\hat{\psi}_{a,s,t}$  支撑域在以原点为对称点,  $s$  为斜率的梯形对上(图 1d), 从图 1a 可以看出, 剪切波框架整个频域将划分成水平锥和垂直锥 2 个区域, 垂直锥也可以看作是将水平锥旋转  $90^\circ$  得到, 图 1b 中成对出现的梯形对使得剪切波对于方向十分敏感, 图 1c 为剪切波的抛物线尺度, 图 1d 是剪切波水平支撑区间, 当  $0 < a < 1$  时,  $a$  趋于 0 (精细尺度), 支撑区间变窄, 将图 1d 旋转  $90^\circ$  可得相应参数下的剪切波垂直支撑区间。

$$\phi(x) = \begin{cases} 1 & (|x| \leq \frac{1}{4}) \\ \cos\left(\frac{\pi}{2}v\left(\frac{4}{3}|x| - \frac{1}{3}\right)\right) & (\frac{1}{4} < |x| \leq 1) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (6)$$

Meyer 小波函数表达式为

$$\hat{\varphi}(x) = \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi}{2}v\left(\frac{4}{3}|x| - \frac{1}{3}\right)\right) & (\frac{1}{4} \leq |x| \leq 1) \\ \cos\left(\frac{\pi}{2}v\left(\frac{1}{3}|x| - \frac{1}{3}\right)\right) & (1 < |x| \leq 4) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (7)$$

其中  $v(x)$  满足条件

$$\begin{cases} v(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0) \\ 1 & (x \geq 1) \end{cases} \\ v(x) + v(1-x) = 1 \quad (0 \leq x \leq 1) \end{cases} \quad (8)$$

$v(x)$  是小波辅助函数, 也称光滑函数。光滑函数能够使小波具有较快的时域衰减性, 而小波函数

的正则性与光滑函数相同<sup>[17-18]</sup>,所以 Meyer 小波的特性取决于光滑函数的选取。由选定的光滑函数就能得到具体的 Meyer 尺度函数和 Meyer 小波函数。DAUBECHIES 提出的光滑函数是一个 7 次多项式函数<sup>[19]</sup>,即

$$v(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3) \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (9)$$

为了降低程序中数值计算的复杂度,根据光滑函数条件,构造出一个 3 次多项式的 Meyer 小波光滑函数,构造方法如下:

首先,设光滑函数为 4 次多项式函数:  $v(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d + ex^4$ ,由光滑函数条件式(8)能够得到

$$\begin{cases} v(0) = 0 \\ v(1) = 1 \\ v(x)'|_{x=0} = 0 \\ v(x)'|_{x=1} = 0 \\ \int_0^1 v(x) = \frac{1}{2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{则有} \begin{cases} d = 0 \\ a + b + c + d + e = 1 \\ c = 0 \\ 3a + 2b + c + 4e = 0 \\ 15a + 20b + 30c + 60d + 12e = 30 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)的线性方程组的系数矩阵  $\mathbf{A}$  为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 15 & 20 & 12 & 30 \\ 15 & 10 & 20 & 0 \end{bmatrix}$$

解得

$$\begin{cases} a = -2 \\ b = 3 \\ c = 0 \\ d = 0 \\ e = 0 \end{cases}$$

综上,本文构造出的光滑函数为  $v(x) = 3x^2 - 2x^3$ ,该 Meyer 小波的光滑函数、尺度函数、小波函数

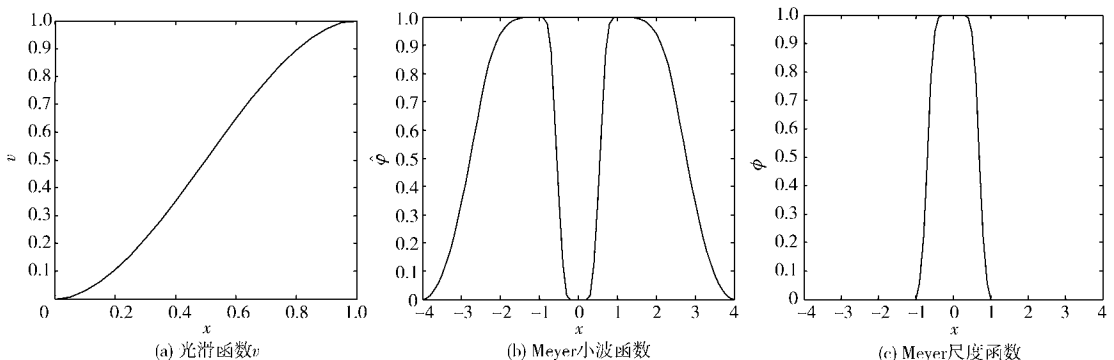


图2 Meyer 小波构造

Fig. 2 Meyer wavelet construction

图像如图 2 所示。

### 1.3 基于 Meyer 窗函数的剪切波滤波器

构造尺度、方向变化的窗函数 ( $W_{j,l}^{(d)}$ ) 在频域中对图像进行剖分是为了实现方向局部化,以得到各个方向上的高频分量<sup>[20]</sup>。构造窗函数时必须满足条件:  $\sum_{d=0}^l \sum_{l=-2^j}^{2^j} |W_{j,l}^{(d)}(\xi_1, \xi_2)|^2 = 1$ 。不同尺度和方向的 Meyer 窗函数如图 3 所示。

### 1.4 离散剪切波变换

连续剪切波变换分为多尺度分解和方向局部化,为了实现多尺度分解和方向局部化,需要利用尺度变换矩阵  $\mathbf{A}_0$  和  $\mathbf{A}_1$  沿剪切方向构造不同尺度的各向异性小波基<sup>[21]</sup>。而要应用剪切波变换对图像进行去噪,就必须对连续剪切波变换进行离散化处理,对尺度参数  $a$ 、剪切参数  $s$ 、平移参数  $t$  选取恰当的值后,对连续剪切波进行采样,即剪切波算法的离散化,在各向异性膨胀矩阵  $\mathbf{A}$  中,选取  $a = 2^{-j}$ ,错切矩阵  $\mathbf{S}$  中,令  $s = -l, j, l \in \mathbf{Z}, k \in \mathbf{Z}^2$ ,矩阵

$$\mathbf{M}_{a,s} = \mathbf{M}_{2^{-j}, -l}$$

$$\mathbf{M}_{2^{-j}, -l}^{-1} = \mathbf{M}_{2^j, l} = \begin{bmatrix} 2^j & l2^{j/2} \\ 0 & 2^{j/2} \end{bmatrix} = \mathbf{B}_0^l \mathbf{A}_0^j$$

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

引进  $j, l, k$  变量后,得到的离散剪切波函数为

$$\psi_{j,l,k} = |\det \mathbf{A}_0|^{j/2} \psi(\mathbf{B}_0^l \mathbf{A}_0^j x - k) \quad (12)$$

### 1.5 基于 Meyer 窗函数剪切波算法流程

首先读入蝗虫显微切片图像并将其灰度化为灰度图像,依次给蝗虫切片图像加入标准差为 10、20、30 的高斯噪声,然后使用 Meyer 小波和尺度函数构造一个 Meyer 窗函数,对 Meyer 窗函数进行错切、平移、伸缩变换来建立各向异性的剪切波滤波器,再应用建立的 Meyer 窗函数剪切波滤波器对蝗虫切片含噪图像进行多尺度分解,随后计算在每一层上各个尺度和方向上的剪切波范式,本文算法是 4 层尺度分解。在经过剪切波变换后得到蝗虫切片剪切波系

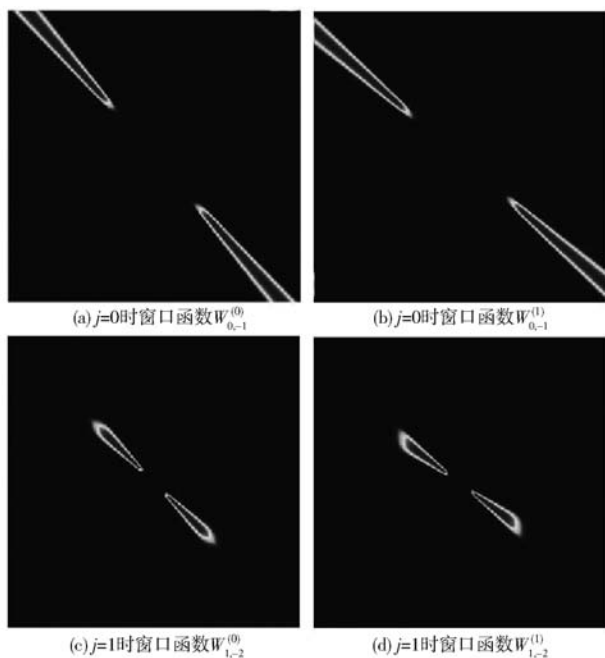


图3 Meyer窗函数剪切波滤波器

Fig.3 Shearlet filter of Meyer window function

数, 对此时得到的剪切波系数进行阈值化处理除去其中的噪声系数, 采用硬阈值的方法来对剪切波系数。阈值处理后的剪切波系数在经过剪切波逆变换后得到去噪蝗虫切片图像。本文基于 Meyer 窗函数剪切波变换蝗虫切片图像去噪算法流程图如图 4 所示。

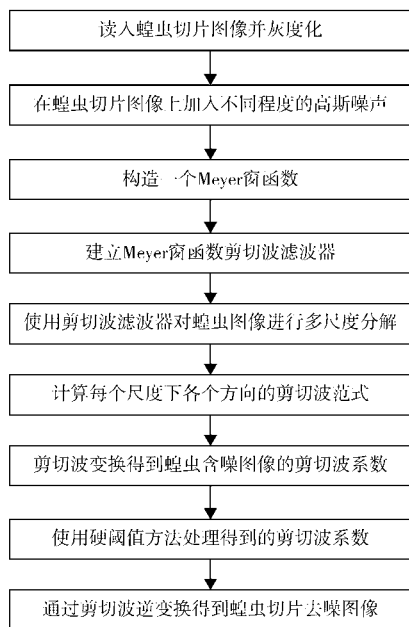


图4 本文方法降噪流程图

Fig.4 Flow chart of proposed denoising algorithm

## 2 基于 Meyer 窗函数剪切波算法的蝗虫切片图像去噪试验

通过试验验证, 对本文去噪算法和其他去噪算法从客观指标和视觉效果 2 方面进行评价。

### 2.1 去噪性能评价

#### 2.1.1 图像质量评价标准

图像客观评价标准将采用均方误差 (Mean squared error, MSE)、峰值信噪比 (Peak signal to noise ratio, PSNR)、结构相似度 (Structural similarity image measurement, SSIM) 3 项指标评价。去噪后 MSE 越小表明算法去噪性能越好, PSNR、SSIM 越大表明算法的去噪性能越好<sup>[22]</sup>。MSE、PSNR、SSIM 分别被定义为

$$M_{SE} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f(x,y) - f(x,y))^2 \quad (13)$$

$$P_{SNR} = 10 \lg \frac{(f_{\max} - f_{\min})^2}{M_{SE}} = 10 \lg \frac{255^2}{M_{SE}} \quad (14)$$

$$S_{SIM} = \frac{(2\mu_x\mu_y + D_1)(2\sigma_x\sigma_y + D_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + D_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + D_2)} \quad (15)$$

式中  $f(x,y)$ ——原始图像在点  $(x,y)$  处的灰度  
 $f'(x,y)$ ——降噪图像在点  $(x,y)$  处的灰度  
 $M$ ——图像长度  $N$ ——图像宽度  
 $u_x$ ——图像  $X$  的均值  
 $u_y$ ——图像  $Y$  的均值  
 $f_{\min}$ ——原始图像中像素灰度最小值  
 $f_{\max}$ ——原始图像中像素灰度最大值  
 $\sigma_x$ —— $X$  的方差  $\sigma_y$ —— $Y$  的方差  
 $D_1, D_2$ ——常数

为了避免分母为零的情况, 通常取  $D_1 = (K_1L)^2, D_2 = (K_2L)^2, K_1 = 0.01, K_2 = 0.03, L = 255$ 。

#### 2.1.2 客观指标试验结果评价与分析

为验证本文算法对蝗虫切片图像的去噪性能, 在试验中对加入不同强度高斯噪声 (噪声标准差  $\sigma$  分别取 10、20、30) 的蝗虫切片图像, 分别应用维纳滤波、PDE、Meyer 小波、本文去噪算法进行去噪试验, 获得的 3 个图像质量客观评价指标 MSE、PSNR、SSIM 数据分别如表 1~3 所示。

表1 不同图像去噪算法的 MSE

Tab.1 Compared MSE with different denoising algorithms

噪声标准差 $\sigma$	加噪图像	维纳滤波	PDE	Meyer 小波	本文算法
10	9.991 6	9.851 6	7.462 0	8.501 6	6.155 1
20	20.019 7	11.693 5	9.832 8	11.896 6	8.740 5
30	30.094 5	13.669 3	13.612 8	14.373 0	10.739 2

如图 5 所示的数据对比折线图能够形象、直观地反映出表 1~3 中不同噪声强度的 MSE、PSNR、SSIM 评价指标的变化趋势。

由表 1、表 2、表 3 和图 5 试验结果分析可知, 噪声标准差在 10~30 范围内, 使用本文去噪算法处理

表2 不同图像去噪算法的 PSNR

Tab.2 Compared PSNR with different denoising

噪声标准差 $\sigma$	algorithms					dB
	加噪图像	维纳滤波	PDE	Meyer小波	本文算法	
10	22.117 5	28.260 6	30.673 7	29.540 8	32.359 5	
20	16.081 0	26.771 9	28.277 3	26.622 3	29.300 1	
30	12.540 5	25.415 9	25.451 9	24.979 8	27.511 4	

加噪蝗虫切片图像后得到的 PSNR 值最大,其余去噪算法去噪后得到的 PSNR 值从大到小依次是 PDE 去噪算法、维纳滤波去噪算法、Meyer 小波阈值去噪算法。随着高斯噪声标准差的加大,本文去噪算法

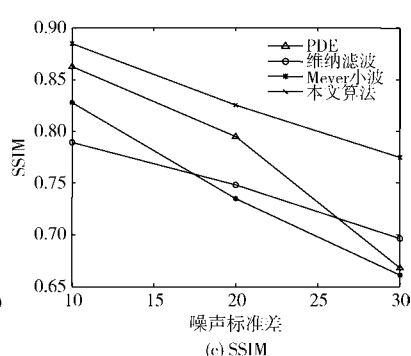
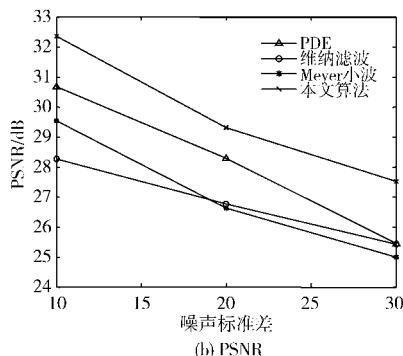
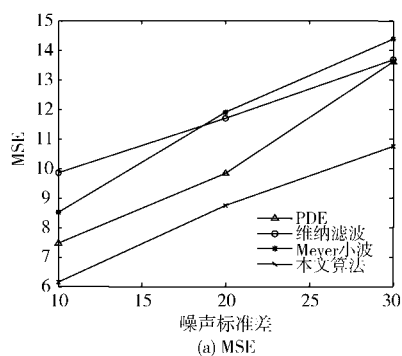


图5 不同去噪算法去噪结果数据对比

Fig.5 Results comparison of different denoising algorithms

## 2.2 去噪性能的视觉评价

由于试验用图像数量较多、占幅较大,本文选取其中2组对比试验评价本文算法去噪的视觉效果。

第1组试验是应用本文算法和其他图像去噪算

法对蝗虫切片噪声图像(噪声标准差  $\sigma = 30$ ) 进行去噪处理时蝗虫切片图像去噪的效果图,结果如图6所示。

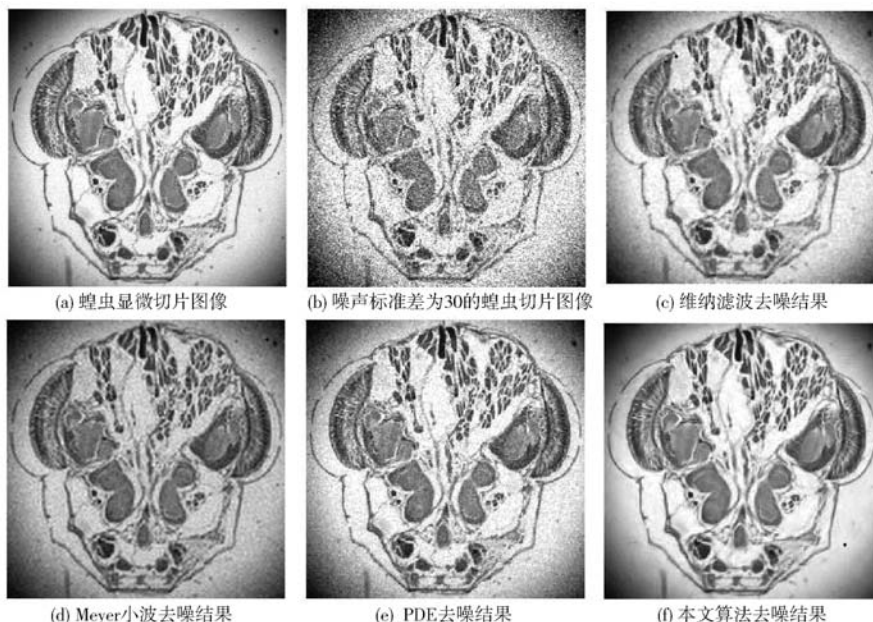


图6 蝗虫切片噪声图像和各种去噪算法结果图像

Fig.6 Locust noise image and results of different denoising algorithms

另外,为进一步验证本文算法对方向的敏感性,即在去噪的同时保留蝗虫图像纹理和边缘信息的性

能,第2组试验选择富含纹理的蝗虫细胞含噪图像(噪声标准差  $\sigma = 10$ ),分别应用维纳滤波、PDE、

Meyer 小波阈值、本文去噪算法进行去噪试验, 试验结果如图 7 所示。

试验结果表明, 本文去噪算法针对蝗虫切片图像, 特别是带有方向的纹理图像, 去噪后纹理信息保持完好, 而维纳滤波及其他传统图像去噪算法都没

有有效保留带有方向的纹理。另外, 本文算法与其他去噪算法去噪后得到的图像相比, 视觉上更加平滑。所以本文算法可以在去噪的同时有效保持带有方向的蝗虫细胞纹理和边缘信息。

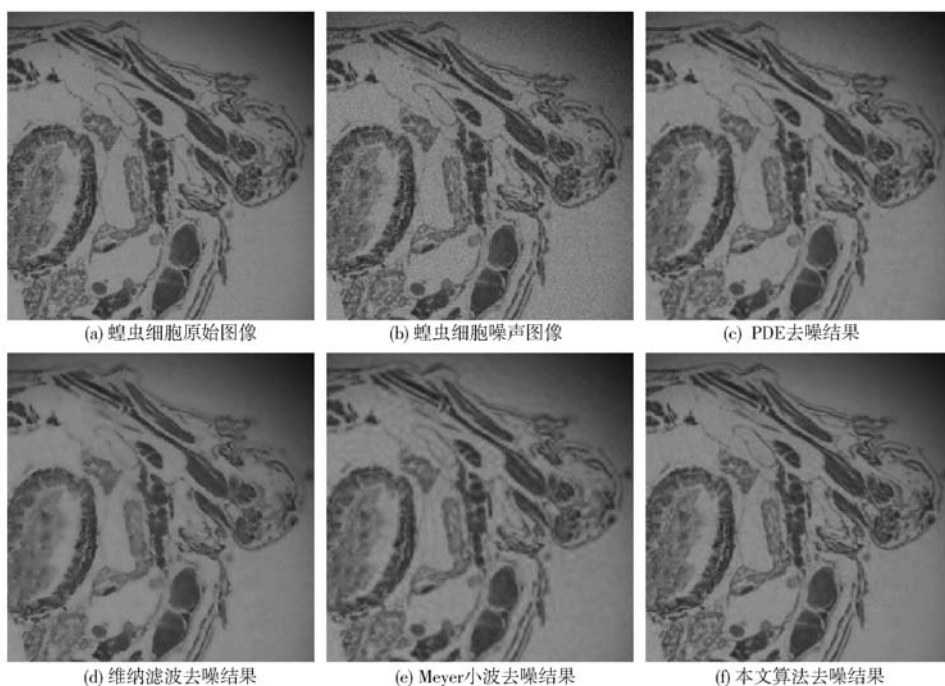


图 7 各种去噪算法纹理去噪结果对比

Fig. 7 Different denoising algorithm results of texture comparison

### 3 结论

(1) 本文去噪算法与 PDE 去噪算法、维纳滤波去噪算法、Meyer 小波阈值去噪算法相比, 去噪处理加噪蝗虫切片图像后得到的 PSNR、SSIM 最大, MSE 最小, 其去噪性能优于其他算法。

(2) 在噪声标准差 10 ~ 30 范围内, 本文算法在

去噪的同时能够有效保持图像边缘、纹理等信息, 与传统小波去噪方法相比较, 去噪后图像更加平滑, 视觉效果更好。

(3) 当图像中噪声强度较大时, 本文算法去噪后的图像上会产生少量人工伪影, 伪影的存在对图像的视觉效果产生了一定的影响, 因此, 可继续针对如何去除少量伪影研究剪切波算法及应用。

### 参 考 文 献

- 李丽, 郭双双, 梅树立, 等. 基于单元最邻近匹配的蝗虫切片图像修复方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 15-19.  
LI Li, GUO Shuangshuang, MEI Shuli, et al. Image restoration of locust slices based on nearest unit matching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 15-19. (in Chinese)
- 李丽, 张楠楠, 梅树立, 等. 基于自适应小波偏微分方程的蝗虫切片图像去噪[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 172-177.  
LI Li, Zhang Nannan, MEI Shuli, et al. Image de-noising of locust sections based on adaptive wavelet and partial differential equation method[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 172-177. (in Chinese)
- 胥斌, 唐远炎, 房斌. 基于剪切波变换的纹理图像分类[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(29): 15-17.  
XU Bin, TANG Yuanyan, FANG Bin. Image texture features classification based on Shearlet transform[J]. Computer Engineering and Application, 2011, 47(29): 15-17. (in Chinese)
- GUO K, LABATE D. Optimally sparse multidimensional representation using shearlets[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2007, 39(1): 298-318.
- YI S, LABATE D, EASLEY G R, et al. A shearlet approach to edge analysis and detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(5): 929-941.
- 高国荣, 许录平, 冯冬竹. 基于非抽样剪切波变换的遥感图像融合方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 221-226.  
GAO Guorong, XU Luping, FENG Dongzhu. Fusion method in remote sensing image based on NSST[J]. Transactions of the

- Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(12):221-226. (in Chinese)
- 7 KUTYNIOK G, LABATE D. Resolution of the wavefront set using continuous shearlets [J]. Transactions of the American Mathematical Society, 2009, 361(5): 2719-2754.
  - 8 LIM W Q. The discrete shearlet transform: a new directional transform and compactly supported shearlet frames [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(5): 1166-1180.
  - 9 EASLEY G R, LABATE D, COLONNA F. Shearlet-based total variation diffusion for denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(2): 260-268.
  - 10 LABATE D, LIM W Q, KUTYNIOK G, et al. Sparse multidimensional representation using shearlets [C] // Optics & Photonics 2005. International Society for Optics and Photonics, 2005: 59140U-1-59140U-9.
  - 11 吴勇. 基于小波的信号去噪方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.  
WU Yong. The study of the method based on wavelets in signal denoising [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
  - 12 唐飞. 基于 Contourlet 变换和 Shearlet 变换的图像去噪算法研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.  
TANG Fei. Research on image denoising methods based on Contourlet transform and Shearlet transform [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014. (in Chinese)
  - 13 韩文方. 基于稀疏表示的剪切波域图像去噪算法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
HAN Wenfang. Research on Shearlet domain image denoising algorithm via sparse representation [D]. Guangzhou: South China University Technology, 2013. (in Chinese)
  - 14 查显杰, 傅容珊, 戴志阳, 等. 小波基函数选择对 SAR 干涉图去噪的影响 [J]. 遥感信息, 2008(2): 17-20.  
CHA Xianjie, FU Rongshan, DAI Zhiyang, et al. The influence on SAR interferograms noise reduction due to the selection of wavelet base function [J]. Remote Sensing Information, 2008(2): 17-20. (in Chinese)
  - 15 EASLEY G, LABATE D, LIM W Q. Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2008, 25(1): 25-46.
  - 16 LIM W Q. Nonseparable shearlet transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(5): 2056-2065.
  - 17 王希常, 马磊. Meyer 小波构造中 S 形函数的多项式实现 [J]. 山东大学学报, 2005, 35(5): 122-124.  
WANG Xichang, MA Lei. The construction polynomial S-function for Meyer wavelet designing [J]. Journal of Shandong University, 2005, 35(5): 122-124. (in Chinese)
  - 18 胡英, 陈基明. Meyer 型正交小波基的构造与性质 [J]. 应用数学与计算数学学报, 2000, 14(1): 63-69.  
HU Ying, CHEN Jiming. Construction and characterization of orthogonal Meyer wavelet [J]. Communication on Applied Mathematics and Computation, 2000, 14(1): 63-69. (in Chinese)
  - 19 张旭莹. Meyer 小波变换像空间的再生核函数 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.  
ZHANG Xuying. The reproducing kernel of Meyer wavelet transform image space [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
  - 20 DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage [J]. Journal of the American Statistical Association, 1995, 90(432): 1200-1224.
  - 21 MALLAT S. A wavelet tour of signal processing [M]. New York: Academic Press, 1999.
  - 22 STARCK J L, CANDÈS E J, DONOHO D L. The curvelet transform for image denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(6): 670-684.