

doi:10.3788/gzxb20154409.0910001

基于非局部均值和 SUSAN 算子的混合噪声滤除

吴一全^{1,2,3,4}, 王凯¹, 戴一冕¹

(1 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 南京 210016)

(2 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610000)

(3 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

(4 南京财经大学 江苏省粮油品质控制及深加工技术重点实验室, 南京 210046)

摘要:为了更好地滤除图像中脉冲噪声和高斯噪声组成的混合噪声,提出了一种基于非局部均值和 Small Univalued Segment Assimilating Nucleus(SUSAN)算子的混合噪声滤除方法.该方法首先根据脉冲噪声点与角点之间吸收核同值区形状特征的不同,采用 SUSAN 算子检测出大量的特征点,特征点主要是脉冲噪声点,也可能含有小部分角点.将特征点进行排序,出现频次最高两位的点为脉冲噪声点.然后采用改进的均值滤波法计算脉冲噪声点邻域中非脉冲噪声点的均值,以此替换脉冲噪声点灰度值.最后针对已滤除脉冲噪声的图像,采用考虑了图像块信息的非局部均值方法滤除剩余的高斯噪声.去噪实验结果表明:与自适应中值和加权均值结合的方法、中值滤波与小波结合的方法、脉冲耦合神经网络与中值滤波结合的方法相比,本文方法主观视觉效果更好,能够更好地保留图像中的边缘细节,客观评价指标峰值信噪比有较大的提高,滤除混合噪声的优势明显.

关键词:图像去噪;混合噪声;SUSAN 算子;改进的均值滤波;非局部均值

中图分类号:TN911.73

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)09-0910001-7

Mixed Noise Removal Based on Non-local Means Filter and SUSAN Operator

WU Yi-quan^{1,2,3,4}, WANG Kai¹, DAI Yi-mian¹

(1 College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610000, China)

(3 State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(4 Jiangsu Key Laboratory of Quality Control and Further Processing of Cereals and Oils, Nanjing University of Finance Economics, Nanjing 210046, China)

Abstract: To remove mixed noise better, which is composed of impulse noise and Gaussian noise, a mixed noise removal method based on non-local means filter and Small Univalued Segment Assimilating Nucleus (SUSAN) operator was proposed. Firstly, according to the difference of shape features of univalued segment assimilating nucleus between the impulse noise points and corner points, the method extracts many characteristic points by SUSAN operator, which contains mainly impulse noise points and may also contain a small part of corner points. The characteristic points are sorted. The points whose frequency of occurrence ranks top two are impulse noise points. Then, the mean of non-impulse noise points in the pulse noise point's neighborhood is calculated by the improved mean filter method to replace the impulse noise points's gray value. Finally, for the image whose impulse noise has been filtered, the remaining

基金项目:国家自然科学基金(No. 60872065)、油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学)项目(No. PLN1303)、同济大学海洋地质国家重点实验室开放基金项目(No. MGK1412)、南京财经大学江苏省粮油品质控制及深加工技术重点实验室开放基金(No. LYPK201304)和江苏高校优势学科建设工程项目资助

第一作者:吴一全(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为红外图像处理、目标检测与识别、视觉检测与图像测量、视频编码与视频处理、数字全息技术等. Email:nuaaimage@163.com

收稿日期:2015-04-02; **录用日期:**2015-06-08

<http://www.photon.ac.cn>

Gaussian noise is denoised by non-local means filter method. A large number of denoising experimental results show that, compared with the method combining adaptive median with weighted mean, the method combining median filter with wavelet transform, and the method combining pulse coupled neural network with median filter, the proposed method has better subjective visual effect, and preserves the edges and details of image better, and it has great improvement in objective quantitative evaluation indicators such as peak signal to noise ratio. The proposed method shows obvious advantages in removing mixed noise.

Key words: Image denoising; Mixed noise; SUSAN operator; Improved mean filter method; Non-local means filter

OCIS Codes: 100.0100; 100.2000; 100.3008; 100.4997; 110.4280

0 引言

在遥感、雷达和声纳等图像中,除了常见的高斯噪声,在成像和传输过程中还易受到大量具有尖峰脉冲特性的噪声干扰,导致高斯噪声和脉冲噪声这两种常见的数字图像噪声同时出现在图像中,一般将这种叠加而成的噪声称为混合噪声.混合噪声降低了图像对比度,模糊了图像中目标的细节,影响了后续特征提取和识别的正确性^[1],因此,研究图像混合噪声滤除方法具有重要的实际意义^[2].传统的噪声滤波器往往针对一种噪声设计,对混合噪声的滤除效果不佳^[3-5].现有的混合噪声滤波方法多数采用不同类型的噪声滤波器相结合.文献[6]提出了一种自适应中值和加权均值结合(Adaptive Median-Weighted Mean, AM-WM)的方法,先将脉冲噪声和高斯噪声分离,然后分别利用自适应中值滤波和自适应加权均值滤波滤除脉冲噪声和高斯噪声.自适应中值滤波方法中,滤波窗口尺寸的确定实质上依然采用硬阈值方法,并非完全自适应地随着噪声大小的变化而变化;并且,滤除脉冲噪声点时中值的计算易受到滤波窗口内高斯噪声的影响,导致去噪效果不是很理想.为了很好地保持图像的高频边缘细节,文献[7]通过中值与小波结合(Median-Wavelet, M-W)的方法,将含噪图像进行小波分解,再运用中值滤波法对不同频带的子图像进行处理.文献[8]以构建的模糊模型为基础,以加权平均值替换噪声点像素值,该算法能够抑制噪声像素对其邻域像素的影响,改善滤波效果.文献[9]给出了脉冲耦合神经网络(Pulse Coupled Neural Network, PCNN)和中值结合(Pulse Coupled Neural Network-Median, PCNN-M)的方法,采用改进的PCNN模型滤除小幅高斯噪声,并检测出脉冲噪声以及大幅高斯噪声,再用中值滤波算法滤除检测出来的噪声.其滤除混合噪声的性能优于文献[7]的模糊滤波算法.上述方法中去除高斯噪声的算法如均值算法和PCNN模型,只考虑了单个像素的相似性,没有利用图像块信息,不能较好地保留弱边缘和纹理细节,而文献[10]提出的非局部均值算法较好地解决了这个问题,其计算高斯噪声点所在图像块与其他

像素点所处图像块的关系权重,用加权平均值替换高斯噪声像素点灰度值.脉冲噪声像素点灰度值是动态范围内的随机值,且是邻域内的极值点,但不一定是椒盐噪声,因此,传统的最大最小值检测方法^[11]不适用. Small Univalued Segment Assimilating Nucleus (SUSAN)算子^[12-14]孤立点检测方法具有检测邻域内极值点的能力,可用于检测脉冲噪声.但是,用SUSAN算子检测的脉冲噪声点中会夹杂小部分角点,需要解决角点干扰的问题.为了更好地滤除检测出的脉冲噪声,研究了改进的均值滤波方法.若计算模板内均值时剔除掉脉冲噪声点,只允许非脉冲噪声点参与计算,则所得均值更接近真实值.

本文提出了基于非局部均值和SUSAN算子的混合噪声滤除方法,利用SUSAN算子分离脉冲噪声和高斯噪声,再分别用改进的均值滤波方法和非局部均值方法滤除这两种噪声以实现图像整体去噪.

1 混合噪声模型

脉冲噪声是图像采集和传输系统中经常出现的一类噪声.与邻域像素点相比,脉冲噪声点的灰度值有着显著的不同.其模型描述为

$$\mathbf{Y}(\beta) = \begin{cases} a, & p_r/2 \\ b, & p_r/2 \\ \mathbf{X}(\beta), & 1-p_r. \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{X} 表示大小为 $M \times N$ 的原始图像, \mathbf{Y} 表示含噪图像, $\beta \in \theta$ 表示当前像素坐标, $\theta = [1, \dots, M] \times [1, \dots, N]$ 表示图像像素坐标的取值范围. $a \in [l_{\min}, l_{\max}]$ 、 $b \in [l_{\min}, l_{\max}]$ 为脉冲噪声像素点灰度值, $a \leq b$, $[l_{\min}, l_{\max}]$ 为原始图像灰度值的动态取值区间. $p_r \in [0, 1]$,为脉冲噪声的污染比例.

另一种常见的噪声—高斯噪声,模型为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} + \mathbf{N}_g \quad (2)$$

式中, \mathbf{N}_g 表示高斯噪声.

混合噪声模型构建方法是:先在原始图像中加入高斯噪声,再用脉冲噪声污染,这样原始图像叠加的噪声即为混合噪声.设含混合噪声的图像为图像矩阵 \mathbf{I} .

2 混合噪声滤除原理

2.1 基于 SUSAN 算子的脉冲噪声检测

脉冲噪声的特点是噪声点像素与邻域像素存在明显差异,所以检测脉冲噪声的关键就是检测出这些存在明显差异的像素点,而基于 SUSAN 算子的孤立点检测方法能够检测出具有这种结构特性的像素点。

设图像 I 中像素点 (m, n) 的灰度值为 $I(m, n)$, $m=1, 2, \dots, M; n=1, 2, \dots, N$. SUSAN 算子采用近似圆形模板在图像 I 上移动,计算模板内的像素灰度值与模板中心像素灰度值之差,如果差值在给定的门限范围内,则认为该像素灰度与中心像素灰度同值. 同值像素组成的区域叫做吸收核同值区(Univalve Segment Assimilating Nucleus, USAN),判断模板内像素是否属于 USAN 区域的准则为

$$c(r, r_0) = \begin{cases} 1, & |I(r) - I(r_0)| \leq T_s \\ 0, & |I(r) - I(r_0)| > T_s \end{cases} \quad (3)$$

式中, r_0 表示模板中心像素点, r 表示模板内非中心像素点; $I(r)$ 、 $I(r_0)$ 分别为 r 、 r_0 的灰度值; $c(r, r_0)$ 为 r 是否属于 USAN 的判别函数,若 $c(r, r_0)$ 为 1, 则 r 属于 USAN, 否则不属于; T_s 为灰度差门限值。

USAN 的大小 $n(r_0)$ 可用模板内 $c(r, r_0)$ 的累加值衡量,即

$$n(r_0) = \sum_r c(r, r_0) \quad (4)$$

$n(r_0)$ 反映出模板中心像素点 r_0 在图像中的特征. 当 r_0 在图像平坦区域时, $n(r_0)$ 最大; r_0 为边缘点时, $n(r_0)$ 较小; r_0 为角点时, $n(r_0)$ 更小, 并且角点越尖锐, $n(r_0)$ 越小; r_0 为孤立噪声点时, $n(r_0)$ 最小. 图 1 分别给出了 r_0 为角点、孤立噪声点时, USAN 的 2 种典型形状特征。

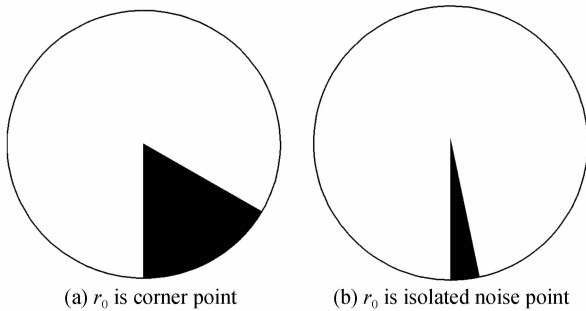


图 1 USAN 的 2 种典型形状特征

Fig. 1 Typical shape features of USAN

r_0 的特征显著性可直接度量为

$$R(r_0) = \begin{cases} g - n(r_0), & n(r_0) < g \\ 0, & n(r_0) \geq g \end{cases} \quad (5)$$

式中, g 为几何阈值, 提取图像初始边缘点时, g 设置为 $3n_{\max}/4$, n_{\max} 为 $n(r_0)$ 的最大值. 如果提取的边缘点是孤立噪声点, 那么 $R(r_0)$ 的尖锐程度最显著. 因此, $R(r_0)$ 满足式(6)的点 r_0 主要是图像的孤立噪声点, 也可能

包含小部分角点.

$$g_1 < R(r_0) \quad (6)$$

式中, g_1 为 $R(r_0)$ 的下限.

随后, 从原始图像 I 中提取出满足式(6)的点 $r_0 \in Q = \{r_0 | g_1 < R(r_0)\}$, 统计 Q 中灰度级 $I(r_0)$ 出现的频次 $p_i(r_0)$. 相比于其他像素点, 脉冲噪声点 $I(r_0) = a$ 和 $I(r_0) = b$ 出现的频次排在前两位. 所以, 可提取出 $p_i(r_0)$ 排在前两位的灰度值, 较大的灰度值即为 b 值, 较小的灰度值是 a 值.

2.2 改进的脉冲噪声均值滤波方法

均值滤波的原理是获取噪声点邻域范围内的平均值, 以此估计噪声点的真实灰度值^[15]. 待处理的当前像素点 (x, y) 的灰度值为 $I(x, y)$, 选择一个 $(2\kappa + 1) \cdot (2\kappa + 1)$ 模板, κ 为整数. 该模板由其近邻的若干像素组成, 求模板中所有像素的均值, 再把该均值赋予当前像素点 (x, y) , 作为处理后图像 J 在该像素点上的灰度值 $J(x, y)$, 即

$$J(x, y) = \frac{\sum_{i=(x-\kappa)}^{x+\kappa} \sum_{j=(y-\kappa)}^{y+\kappa} I(i, j)}{(2\kappa + 1) \cdot (2\kappa + 1)} \quad (7)$$

均值滤波时模板中所有的像素都参与计算, 脉冲噪声点像素值与邻域点的像素值差异显著, 对均值的结果影响较大, 容易导致滤波结果偏离真实值^[16]. 因此, 对于脉冲噪声, 首先剔除 $(2\kappa + 1) \cdot (2\kappa + 1)$ 模板中灰度值为 a 和 b 的像素, 用模板中剩余像素的灰度均值 $J(x, y)$ 代替中心像素点的原灰度值 $I(x, y)$, 即

$$J(x, y) = \frac{\sum_{i=(x-\kappa)}^{x+\kappa} \sum_{j=(y-\kappa)}^{y+\kappa} I(i, j)}{m} \quad (8)$$

式中, m 表示除去灰度值为 a 和 b 的像素点后剩余像素点的个数.

利用式(8)得到均值滤波后的图像 J , 再利用非局部均值滤波方法对图像 J 进行处理.

2.3 高斯噪声非局部均值滤波方法

设含噪图像在 i 处像素的灰度值为 $J(i)$, 去噪后 i 点的估计值 $J_N(i)$ 为

$$J_N(i) = \sum_{j \in \Omega} w(i, j) J(j) \quad (9)$$

式中, Ω 为以像素 i 为中心、半径为 T_N 的搜索区域; j 为该搜索区域中的像素; $J(j)$ 为 j 点的灰度值; $w(i, j)$ 为权值, 反映了以像素 i 为中心、相似窗半径为 S_N 的图像块 N_i 和以像素 j 为中心、同样大小的图像块 N_j 之间的相似程度. $w(i, j)$ 满足 $0 \leq w(i, j) \leq 1$ 和 $\sum_{j \in \Omega} w(i, j) = 1$, 定义为

$$w(i, j) = \frac{1}{Z(i)} \exp\left(-\frac{d(i, j)}{h^2}\right) \quad (10)$$

式中, $Z(i) = \sum_{j \in \Omega} \exp(-d(i, j)/h^2)$ 为归一化因子; h 为衰减参量, 控制非局部均值滤波的力度; $d(i, j)$ 代表图像块间的欧式距离, 其定义为

$$d(i, j) = \| \mathbf{J}(N_i) - \mathbf{J}(N_j) \|_{2,a}^2 \quad (11)$$

式中, $\mathbf{J}(N_i)$ 和 $\mathbf{J}(N_j)$ 分别为图像块 N_i 和 N_j 的灰度值, 图像中所有像素点都参与了计算^[17-18].

虽然非局部均值对滤除高斯噪声十分有效, 但是去除脉冲噪声的效果并不理想^[19-20]. 如果在非局部均值滤波前, 先滤除脉冲噪声点, 可望得到较好的去噪效果.

本文提出的基于非局部均值和 SUSAN 算子的混合噪声滤除方法具体步骤为:

Step1: 用 SUSAN 算子检测出脉冲噪声点. 由式 (3)~(6) 得到点集 $Q = \{r_0 | g_l < R(r_0)\}$, 主要由脉冲噪声点和小部分角点组成. 统计点出现的频次, 排在前两位的点为脉冲噪声点;

Step2: 用改进的均值滤波方法滤除脉冲噪声点;

Step3: 用非局部均值方法滤除图像中剩余的高斯噪声.

3 实验结果与分析

利用本文提出的基于非局部均值和 SUSAN 算子的混合噪声滤除方法, 对大量图像进行了去噪实验. 具体参量设置为: 灰度差门限值 $T_s = 50$, $g_1 = 0.749$, SUSAN 算子的模板大小为 3×3 , 搜索窗半径 $T_N = 10$, 相似窗半径 $S_N = 4$, 衰减参量取 $h = 20$. 为了验证本文方法的有效性, 将本文方法与自适应中值和加权均值结合的方法 (AM-WM)、中值滤波与小波结合的方法 (M-W)、PCNN 与中值滤波结合的方法 (PCNN-M) 等 3 种去噪方法进行了比较.

首先以经典 Lena 图像的去噪情况为例说明. 将标准差 $\sigma = 20$ 的高斯噪声和密度 $\rho = 0.2$ 的脉冲噪声的混合噪声加入 Lena 图像, 分别利用 4 种方法进行滤波处理, 图 2 给出了滤波处理结果.



图 2 受混合噪声污染 ($\sigma = 20, \rho = 0.2$) 的 Lena 图像去噪结果

Fig. 2 Denoising results of Lena image polluted by mixed noise ($\sigma = 20, \rho = 0.2$)

由主观视觉效果可以看出, 本文方法具有较强的滤除混合噪声能力; AM-WM 法滤除噪声后的图像整体模糊, 视觉效果不佳; M-W 法与 AM-WM 法相比, 图像的清晰度有所提高, 但是出现了过多斑点, 图像质量较差; PCNN-M 法的去噪能力有所增强, 图像平滑区域较模糊, 与原始图像相比, 整体偏亮, 亮暗对比度下降. 本文方法能有效去除噪声, 很好地保留图像细节和纹理, 例如图像中的帽檐边缘更接近原始 Lena 图像的真实边缘; 平滑区域更为平滑, 画质清晰; 但有时为

了去除强噪声, 会不可避免地抹除少量弱纹理.

为了客观定量地评价本文方法的去噪性能, 采用峰值信噪比 F_{PSNR} 作为评价指标, F_{PSNR} 定义为

$$F_{\text{PSNR}} = 10 \log \frac{255^2}{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [\mathbf{X}(m, n) - \mathbf{J}_N(m, n)]^2} \quad (12)$$

表 1 列出了 Lena 图像在标准差 σ 为 10、20、30 的高斯噪声污染下分别叠加大密度 ρ 为 0.1、0.2、0.3 的脉冲噪声时, 即在 9 种不同组合的混合噪声污染下, 4 种方法的峰值信噪比 F_{PSNR} 的值. 由表 1 可以看出, 与其

他方法相比,本文方法的 F_{PSNR} 值总体较高. 随着标准差 σ 和密度 ρ 的增大,本文方法的 F_{PSNR} 值下降缓慢,而其他方法的 F_{PSNR} 值则下降幅度很大,可见本文方法优势更加明显. 与对比方法依据像素点不同,本文方法采

用图像块来衡量像素之间的相似性,其计算复杂度为 $O(S_N^2 T_N MN)$,略高于对比方法,但混合噪声的去除效果远远优于对比方法. 对于去噪性能要求高的应用场合,本文方法更具实用价值.

表 1 受混合噪声污染的 Lena 图像去噪效果 (F_{PSNR}/dB)

Table 1 Denoising results of Lena image polluted by mixed noise (F_{PSNR}/dB)

Method	$\sigma=10$			$\sigma=20$			$\sigma=30$		
	$\rho=0.1$	$\rho=0.2$	$\rho=0.3$	$\rho=0.1$	$\rho=0.2$	$\rho=0.3$	$\rho=0.1$	$\rho=0.2$	$\rho=0.3$
AM-WM	27.49	27.33	27.06	26.33	25.93	25.6	24.96	24.59	24.01
M-W	27.64	26.01	23.78	26.35	25.07	23.56	25.17	23.79	22.7
PCNN-M	28.53	27.27	26.32	26.79	26.01	25.07	25.22	23.95	23.01
Proposed method	27.47	27.07	26.76	27.32	26.91	26.68	26.85	26.58	26.43

为了进一步说明本文方法的优越性,在储粮害虫原始图像、测井原始图像中分别加入标准差 $\sigma=20$ 高

斯噪声和密度 $\rho=0.2$ 脉冲噪声的混合噪声,运用 4 种方法进行滤波,结果如图 3 和图 4.

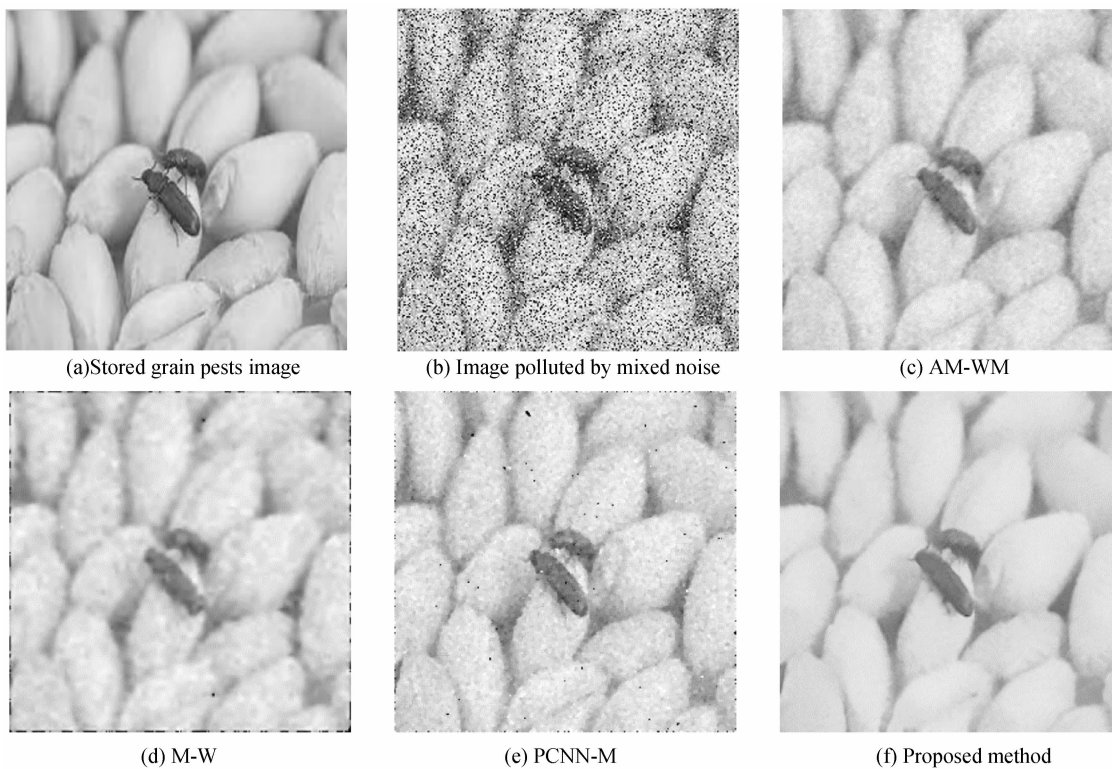
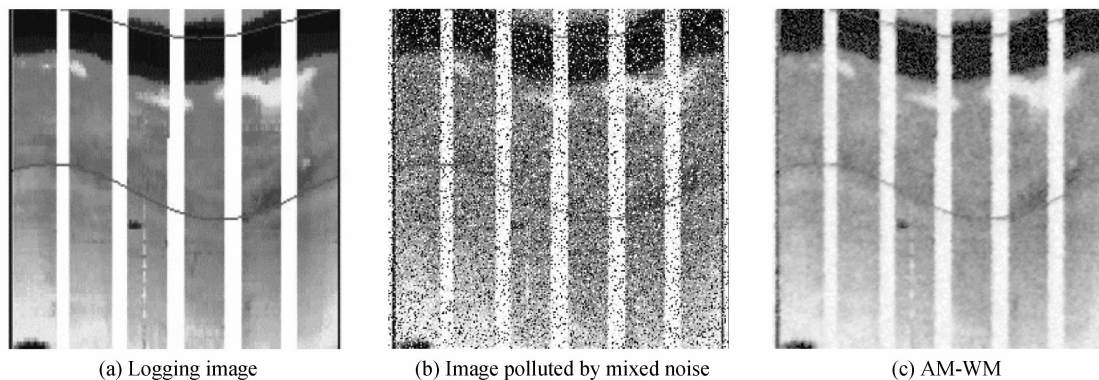


图 3 受混合噪声污染 ($\sigma=20, \rho=0.2$) 的储粮害虫图像去噪结果

Fig. 3 Denoising results of stored grain pests image polluted by mixed noise ($\sigma=20, \rho=0.2$)



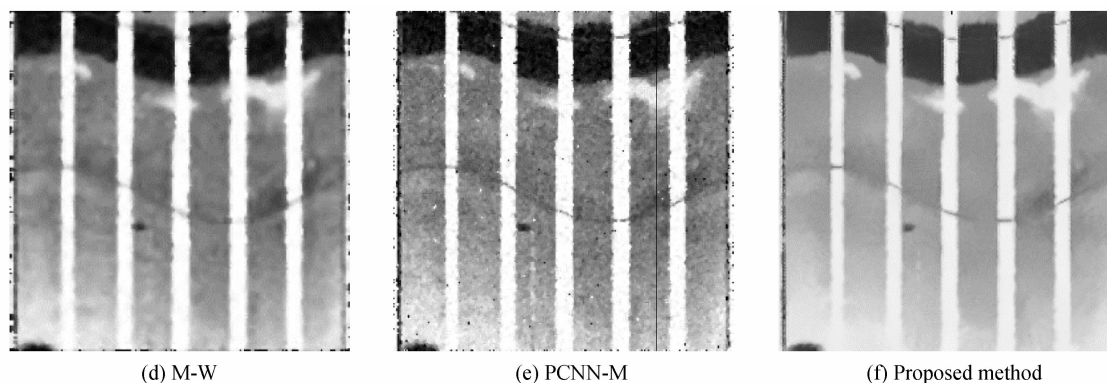
图4 受混合噪声污染($\sigma=20, \rho=0.2$)的测井图像去噪结果Fig. 4 Denoising results of Logging image polluted by mixed noise($\sigma=20, \rho=0.2$)

表2列出了储粮害虫原始图像在9种不同组合的混合噪声污染下的 F_{PSNR} 值.由图3和图4可以看出,与AM-WM法、M-W法、PCNN-M法相比,本文方法滤除噪声的同时,较好地保留了储粮害虫足、须和斑纹

细节.由表2可以看出,总体上本文方法的 F_{PSNR} 值高于AM-WM法、M-W法、PCNN-M法,并且随着标准差 σ 和密度 ρ 的增大,高出的幅度也越来越大.由此表明,本文方法滤除混合噪声的性能更优.

表2 受混合噪声污染的储粮害虫图像去噪效果($F_{\text{PSNR}}/\text{dB}$)Table 2 Denoising results of stored grain pests polluted by mixed noise($F_{\text{PSNR}}/\text{dB}$)

Method	$\sigma=10$			$\sigma=20$			$\sigma=30$		
	$\rho=0.1$	$\rho=0.2$	$\rho=0.3$	$\rho=0.1$	$\rho=0.2$	$\rho=0.3$	$\rho=0.1$	$\rho=0.2$	$\rho=0.3$
AM-WM	30.91	31.42	31.38	29.58	29.36	29.12	27.61	24.88	26.75
M-W	29.82	27.17	23.72	28.73	26.17	23.19	27.05	23.79	22.43
PCNN-M	29.43	26.19	22.14	26.59	24.12	25.07	23.98	22.15	19.67
Proposed method	30.48	30.52	30.16	30.52	30.63	30.13	29.97	29.75	29.28

4 结论

本文提出了一种基于非局部均值和SUSAN算子的混合噪声滤除方法,能够有效去除图像中的混合噪声.首先根据脉冲噪声的特点,采用SUSAN算子检测出脉冲噪声;然后用改进的均值滤波方法滤除脉冲噪声;最后用非局部均值方法去除图像剩余的高斯噪声.与AM-WM法、M-W法、PCNN-M法进行比较发现:本文方法在有效滤除图像混合噪声的同时,能够更好地保留图像的细节,随着混合噪声强度的提高,去噪优势更加突出.

参考文献

- [1] JIANG Jie-lin, ZHANG Lei, YANG Jian. Mixed noise removal by weighted encoding with sparse nonlocal regularization[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, **23**(6): 2651-2662.
- [2] LIU Jun, TAI Xue-cheng, HUANG Hai-yang, et al. A Weighted dictionary learning model for denoising images corrupted by mixed noise[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **22**(3): 1108-1120.
- [3] BECK A, TEBOULLE M. Fast gradient-based algorithms for constrained total variation image denoising and deblurring problems[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, **18**(11): 2419-2434.
- [4] ZHANG X, WANG R, JIAO L C. Partial differential equation model method based on image feature for denoising [C]. International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor

Remote Sensing and Mapping (M2RSM), 2011: 1-4.

- [5] LU Ya-ning, GUO Lei, LI Hui-hui. Total variation based band-limited shearlets transform for image denoising[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1430-1435.
路雅宁, 郭雷, 李晖晖. 带限剪切波变换与全变差结合的图像去噪[J]. *光子学报*, 2013, **42**(12): 1430-1435.
- [6] ZHANG Xu-ming, XU Bin-shi, DONG Shi-yun, et al. Adaptive median-weighted mean hybrid filter [J]. *Optical Technique*, 2005, **30**(6): 652-655.
张旭明, 徐滨士, 董世运, 等. 自适应中值-加权均值混合滤波器[J]. *光学技术*, 2005, **30**(6): 652-655.
- [7] TANG Shi-wei, LIN Jun. Image denoising with combination of wavelet transform and median filtering[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, **40**(8): 1334-1336.
唐世伟, 林君. 小波变换与中值滤波相结合图像去噪方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, **40**(8): 1334-1336.
- [8] CHEN Da-li, XUE Ding-yu, GAO Dao-xiang. New efficient fuzzy weighted mean filter approach for removal of mixed noise [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, **19**(3): 527-530.
陈大力, 薛定宇, 高道祥. 图像混合噪声的模糊加权均值滤波算法仿真[J]. *系统仿真学报*, 2007, **19**(3): 527-530.
- [9] TU Yong-qiu, LI Shao-fa, WANG Cheng, et al. Mixed-noise removal based on L&A-PCNN[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2009, **37**(4): 31-36.
涂泳秋, 黎绍发, 王成, 等. 基于L&A-PCNN模型的混合噪声滤除[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2009, **37**(4): 31-36.
- [10] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A review of image denoising algorithms, with a new one [J]. *Multiscale Modeling & Simulation*, 2005, **4**(2): 490-530.

- [11] HE Yi-ming, ZHANG Gang-bing, QIAN Xian-yi. Salt and pepper noise removal algorithm based on neighborhood mean [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2011, **35**(6): 764-767, 768.
何一鸣, 张刚兵, 钱显毅. 基于邻域均值的去椒盐噪声算法 [J]. *南京理工大学学报*, 2011, **35**(6): 764-767, 768.
- [12] KU D, CHENG J, GAO G. Translucent-static TV logo recognition by SUSAN corner extracting and matching[C]. IEEE Third International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH), 2013: 44-48.
- [13] TIAN Wei-gang, GUO Lei, LI Hui-hui, *et al.* A point based algorithm for multi-spectral image registration using mutual information of region[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2008, **19**(6): 799-803.
田伟刚, 郭雷, 李晖晖, 等. 基于区域互信息的特征级多光谱图像配准[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(6): 799-803.
- [14] YAN Min-qi, TANG Hui-jun, ZHANG Bian-lian. A new approach to moving target tracking based on improved SUSAN detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1933-1938.
闫旻奇, 唐慧君, 张变莲. 基于改进 SUSAN 算法的箭环目标跟踪与测量[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1933-1938.
- [15] WANG S, ZHOU Z, SHI W. Adaptive minimum-maximum exclusive mean filter for impulse noise removal[J]. Eprint arXiv: 1405.6174, 2014.
- [16] SHRIVASTAV A, PRATAP S, RICHHARIY A. Removal of impulse noise using first order neighborhood mean filter [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2014, **87**(4): 34-39.
- [17] YIN X, ZHU J. Salt-and-pepper noise removal based on nonlocal mean filter[C]. IEEE International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, 2013: 577-580.
- [18] ZHANG P, LI F, ZHANG P, *et al.* A new adaptive weighted mean filter for removing salt-and-pepper noise[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, **21**(10): 1280-1283.
- [19] MELIGY A, IBRAHEM H M, SHOMAN S, *et al.* A highly effective adaptive switching mean filter algorithm for salt and pepper noise removal[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2013, **61**(19): 28-34.
- [20] ZHANG Shuang, ZHOU Hui-xin, NIU Xiao-xue, *et al.* Temporal high-pass filter nonuniformity correction algorithm based on non-local means filter for infrared focal plane array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 0110003.
张爽, 周慧鑫, 牛肖雪, 等. 基于非局部均值滤波与时域高通滤波的非均匀性校正算法 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 0110003.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 60872065); the Open Fund of State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (Southwest Petroleum University) (No. PLN1303); the Open Fund of State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University (No. MGK1412); the Open Fund of Jiangsu Key Laboratory of Quality Control and Further Processing of Cereals and Oils, Nanjing University of Finance Economics (No. LYPK201304); the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions