

基于混合噪声模型的射线图像降噪方法

申清明, 王国博, 赵建中, 许管利

(西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 针对射线数字图像的特点, 提出了一种基于混合噪声模型的小波中值滤波降噪方法。对射线数字图像噪声成分构成进行分析, 建立了混合噪声模型。根据混合噪声模型来计算噪声方差, 进而计算 BayesShrink 阈值, 解决了 BayesShrink 阈值计算中因射线数字图像小波系数不服从广义高斯分布而导致的 Donoho 噪声方差计算方法失效的问题。为了消除 BayesShrink 阈值处理引起的图像失真, 对小波阈值处理结果进行中值滤波。采用射线数字图像对该方法的有效性进行了验证, 实验表明, 该方法的降噪效果优于 OracleShrink 和 SureShrink 阈值法。

关键词: 信息处理技术; 混合噪声模型; 小波; 图像降噪

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2014)12-2087-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.12.022

Multi-noise Model-based Denoising Method for Radiographic Image

SHEN Qing-ming, WANG Guo-bo, ZHAO Jian-zhong, XU Guan-li

(Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xianyang 712099, Shaanxi, China)

Abstract: A multi-noise model-based denoising method for radiographic image is proposed, in which wavelet transform and median filtering are used. The composition of the image noise is analyzed, and a multi-noise model is established. The variance of noise is calculated in terms of the multi-noise model, and then the BayesShrink threshold is calculated, which solves the problem of that the Donoho's noise algorithm is invalidated since the wavelet coefficients do not obey the generalized Gaussian distribution. A median filtering is used to refine the result obtained by the wavelet transform to eliminate the image distortion caused by the BayesShrink thresholding. Radiographic images are used to verify the effectiveness of the proposed method. Experiments show that the performance of the proposed method is better than those of OracleShrink and SureShrink.

Key words: information processing technology; multi-noise model; wavelet; image denoising

0 引言

射线检测广泛应用于航空、航天、兵器、船舶等国防领域, 在零部件内部质量检测中发挥着重要作用。

射线检测数字图像(以下简称“射线数字图像”)作为智能化检测的输入介质, 其噪声水平对于检测结果的准确度具有直接影响。因此, 对射线数字图像进行降噪是非常必要的。

目前,射线数字图像的降噪方法主要包括空域滤波^[1]、频域滤波^[2]和小波变换 3 大类。相比较而言,小波阈值收缩法具有更好的降噪效果^[3]。小波阈值法主要包括 OracleShrink 阈值、SureShrink 阈值^[4]和 BayesShrink 阈值^[5]。其中,BayesShrink 阈值是基于贝叶斯风险最小而得到,降噪效果优于其他几种阈值^[6-7]。

BayesShrink 阈值中采用 Donoho 提出的利用含噪图像的小波变换系数来计算噪声方差,采用该方法的条件是图像高频子带小波系数直方图统计必须服从广义高斯分布,然而,射线数字图像不满足该条件,这给采用 BayesShrink 阈值法对射线数字图像进行降噪带来了困难。为了解决上述问题,本文根据射线数字图像的特点提出了一种基于混合噪声模型的小波中值滤波降噪方法。

1 降噪算法

1.1 算法原理

如图 1 所示,本文提出的基于噪声模型的小波中值滤波降噪方法步骤如下:

- 步骤 1** 对射线数字图像的噪声成分构成及其水平进行分析,建立射线数字图像的混合噪声模型;
- 步骤 2** 依据射线数字图像和混合噪声模型确定小波处理阈值;
- 步骤 3** 对射线数字图像进行小波阈值处理;
- 步骤 4** 对步骤 3 所得图像进行中值滤波,消除小波阈值处理引起的图像失真。

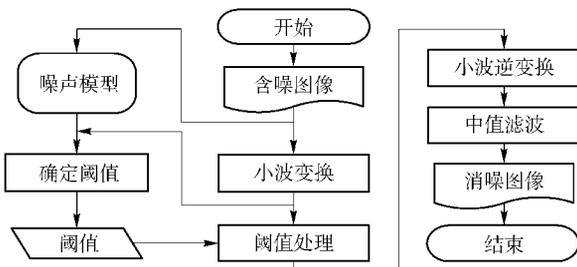


图 1 降噪流程

Fig. 1 Denosing process

1.2 混合噪声模型

本文研究的射线数字图像的噪声成分包括:暗电流噪声、散粒噪声和胶片颗粒噪声,3 种成分噪声均为加性噪声,噪声混合服从加性噪声叠加原理,混

合噪声模型为

$$\varepsilon(x, y) = \varepsilon_h(x, y) + \varepsilon_1(x, y) + \varepsilon_g(x, y), \quad (1)$$

式中: $\varepsilon(x, y)$ 为混合噪声; $\varepsilon_h(x, y)$ 为暗电流噪声; $\varepsilon_1(x, y)$ 为散粒噪声; $\varepsilon_g(x, y)$ 为胶片颗粒噪声。3 种成分噪声均服从高斯分布,因而只需确定 3 种噪声的均值和方差便可确定混合噪声。

暗电流噪声仅与图像采集设备有关,通过分析不同曝光参数下的遮光图像,来计算其标准方差:

$$\sigma_h = \sqrt{E((V_h)^2) - (E(V_h))^2}, \quad (2)$$

式中: σ_h 为暗电流噪声的标准方差; V_h 为遮光图像的高频分量; $E(\cdot)$ 为期望值。

散粒噪声是感光器件的固有噪声,很难通过后续电路处理来进行抑制或者消除。在大量光子存在的情况下,散粒噪声呈现为高斯分布,通常用高斯白噪声来描述,根据加性噪声叠加原理其标准方差计算公式为

$$\sigma_1 = \sqrt{\max(E((V_1)^2) - (E(V_1))^2 - \sigma_h^2, 0)}, \quad (3)$$

式中: σ_1 为散粒噪声标准方差; V_1 为光强图像的高频分量。

胶片颗粒噪声的数学模型为均值为 0 的高斯白噪声,噪声标准方差与局部颗粒平均密度的立方根呈正比,根据加性噪声叠加原理,标准方差为

$$\sigma_g = \beta \sqrt{\max(E((V_g)^2) - (E(V_g))^2 - \sigma_h^2 - \sigma_1^2, 0)}, \quad (4)$$

式中: σ_g 为胶片颗粒噪声的标准方差; V_g 为射线数字图像高频分量; β 为系数,取值范围为 $[0, 1]$ 。

1.3 阈值处理

阈值计算方法有很多种,其中 Chang 等提出的 BayesShrink 阈值在降噪效果方面要优于其他方法,BayesShrink 阈值的基本思想是寻找一个阈值 T_B ,使得降噪后的图像与测试图像之间的贝叶斯风险最小^[6],其阈值计算公式为

$$T_B = \frac{\hat{\sigma}_n^2}{\hat{\sigma}_s}, \quad (5)$$

式中: T_B 为 BayesShrink 阈值; $\hat{\sigma}_n^2$ 为噪声小波系数方差; $\hat{\sigma}_s$ 为信号标准方差。

采用混合噪声模型来计算噪声标准方差为

$$\hat{\sigma}_n = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_1^2 + \sigma_g^2}, \quad (6)$$

式中: $\hat{\sigma}_n$ 为噪声标准方差; σ_n^2 为暗电流噪声方差; σ_1^2 为散粒噪声方差; σ_g^2 为胶片颗粒噪声方差。含噪图像小波系数高频分量方差、信号小波系数高频分量方差和噪声方差之间满足如下关系:

$$\hat{\sigma}_s = \sqrt{\max(\sigma_o^2 - \sigma_n^2, 0)}, \quad (7)$$

式中: $\hat{\sigma}_s$ 为信号标准方差; σ_o^2 为含噪图像小波系数高频分量的方差; σ_n^2 为噪声方差。采用软阈值函数对射线数字图像进行阈值处理, 将待降噪射线数字图像进行小波变换将其转换到频域, 具体表示为

$$Y = Wf, \quad (8)$$

式中: f 为待降噪的射线数字图像 Y 的小波系数; W 为二维小波变换矩阵。其中 $Y = \{Y_{LL}, Y_{HH}, Y_{HL}, Y_{LH}\}$, Y_{HH} 、 Y_{HL} 、 Y_{LH} 分别为对角方向、水平方向和垂直方向的高频子带, 利用(5)式分别计算 Y_{HH} 、 Y_{HL} 、 Y_{LH} 的阈值 T_{B1} 、 T_{B2} 和 T_{B3} , 然后依据上述阈值分别对小波系数的每个子带进行阈值处理如下:

$$\hat{Y}_{HH} = \text{sgn}(Y_{HH}) \max(|Y_{HH}| - T_{B1}, 0), \quad (9)$$

$$\hat{Y}_{HL} = \text{sgn}(Y_{HL}) \max(|Y_{HL}| - T_{B2}, 0), \quad (10)$$

$$\hat{Y}_{LH} = \text{sgn}(Y_{LH}) \max(|Y_{LH}| - T_{B3}, 0). \quad (11)$$

经阈值处理后的小波系数为 $\hat{Y} = \{Y_{LL}, \hat{Y}_{HH}, \hat{Y}_{HL}, \hat{Y}_{LH}\}$, 对 \hat{Y} 进行小波逆变换得到小波阈值处理后的图像为

$$\hat{f}' = W^{-1}\hat{Y}, \quad (12)$$

式中: \hat{f}' 为降噪后的图像; W^{-1} 为二维小波逆变换矩阵。

1.4 中值滤波

为了消除因小波阈值处理引起的图像失真, 采用中值滤波对小波阈值处理结果进行滤波, 滤波采用 $N \times N$ 模板进行, 图像边缘采用复制相邻列的方法进行拓展, 中值滤波具体表示为

$$\hat{f} = \text{Median}_{N \times N}(\hat{f}'), \quad (13)$$

式中: $\text{Median}_{N \times N}(\hat{f}')$ 表示将 $N \times N$ 区域内像素灰度中值赋值给 $N \times N$ 区域内的中心像素点, 依次对图像中的每个像素点进行处理, 完成对整幅图像的中值滤波。

2 应用实例

采用不同曝光时间下的零增益灰度图像进行实验, 实验图像分为 3 类, 遮光图像、光强图像和射线底片数字图像, 如图 2 所示。为描述方便, 将某个曝

光时间下的图像用“曝光时间#”来表示, 如曝光时间为 100 μm 的图像用“100#”来表示。计算机配置为 Intel Core 2 Duo E6320 1.86 GHz PC, 2 G RAM, Windows XP.

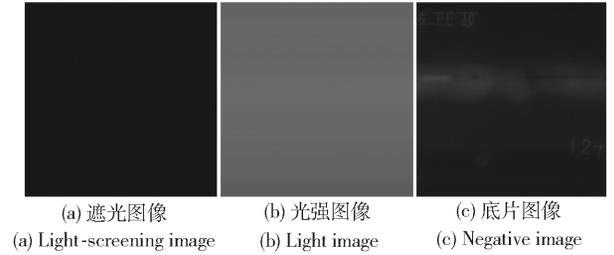


图 2 实验样本图像

Fig. 2 The images of experimental sample

表 1 是 6 组不同曝光参数下的遮光图像的灰度分布统计(每组 5 幅图像, 取平均值)。由表 1 可知, 感光器件的暗电流噪声中只有水平较低、相对均匀的热噪声, 没有由晶格缺陷引起的暗电流尖峰即没有椒盐噪声。表 2 给出了遮光图像的均值 \bar{f} 和小波系数高频分量的标准方差 σ_h 。

表 1 遮光图像灰度分布

Tab. 1 Gray distribution of light-screening image

实验 图像	灰度值分布/%					
	0	1~6	7	8	9	10~255
100 号	0.087 533	0	4.44×10^{-5}	99.912	0	0
200 号	0.087 533	0	2.54×10^{-5}	99.912	0	0
300 号	0.087 533	0	1.27×10^{-5}	99.912	0	0
400 号	0.087 533	0	3.17×10^{-5}	99.912	6.35×10^{-6}	0
500 号	0.087 533	0	1.27×10^{-5}	99.912	2.60×10^{-5}	0
600 号	0.087 533	0	0	99.912	1.27×10^{-5}	0

表 2 遮光图像均值与标准方差

Tab. 2 Mean and standard deviations of light-screening image

参数	实验图像						平均值
	100 号	200 号	300 号	400 号	500 号	600 号	
\bar{f}	7.993	7.993	7.993	7.993	7.993	7.993	7.993
σ_h	6.55×10^{-4}	0	4.14×10^{-4}	5.86×10^{-4}	5.08×10^{-4}	5.08×10^{-4}	4.45×10^{-4}

表 3 是 6 组相同光强不同曝光时间下的光强图像的平均灰度 \bar{f} 和散粒噪声的平均标准方差 σ_1 。对表 3 的数据进行线性拟合, 得散粒噪声标准方差与图像平均灰度之间的关系如下:

$$\sigma_1 = \begin{cases} 0.0075\bar{f} + 0.1829, & 0 \leq \bar{f} \leq 238; \\ -0.0106\bar{f} + 4.5014, & 238 < \bar{f} \leq 244; \\ -0.0311\bar{f} + 9.5288, & 244 < \bar{f} \leq 248; \\ -0.2365\bar{f} + 60.5070, & 248 < \bar{f} \leq 255. \end{cases} \quad (14)$$

式中： σ_1 为散粒噪声的标准方差； \bar{f} 为图像平均灰度。

表 3 光强图像均值与散粒噪声标准方差

Tab.3 Mean and standard deviations of shot noise of light image

实验图像	\bar{f}	σ_1	实验图像	\bar{f}	σ_1
50 号	23.79	0.358 1	600 号	191.81	1.601 8
100 号	39.12	0.481 1	620 号	199.01	1.666 8
150 号	54.40	0.586 6	640 号	205.14	1.703 0
200 号	69.91	0.708 7	660 号	211.91	1.758 2
250 号	84.08	0.810 4	680 号	220.66	1.827 3
300 号	99.76	0.932 1	700 号	228.31	1.884 3
350 号	115.60	1.070 1	720 号	232.65	1.949 9
400 号	130.74	1.167 6	740 号	237.66	1.989 6
450 号	146.08	1.278 3	760 号	244.41	1.918 3
500 号	161.63	1.399 8	780 号	248.24	1.799 2
550 号	177.67	1.501 8	800 号	254.96	0.208 4

表 4 是 6 组不同曝光时间下的射线数字图像胶片颗粒噪声的平均标准方差 σ_g , 从中可以看出射线数字图像胶片颗粒噪声的方差较小。胶片颗粒噪声可以用均值为 0、方差为 σ_g 的高斯噪声来描述。

表 4 胶片颗粒噪声的标准方差

Tab.4 Standard deviations of film grain noise

实验图像	σ_g	实验图像	σ_g
100 号	0.186 17	400 号	0.267 10
150 号	0.189 80	450 号	0.286 78
200 号	0.204 82	500 号	0.304 19
250 号	0.214 77	550 号	0.326 39
300 号	0.230 85	600 号	0.338 04
350 号	0.250 79		

为了验证本文方法的有效性,对测试图像进行加噪,然后利用基于混合噪声模型的小波中值滤波法对加噪后的测试图像进行降噪,并与 OracleShrink 和 SureShrink 阈值法的降噪效果进行比较。采用峰值信噪比和均方误差对降噪效果进行评估,实验结果如图 3 所示。

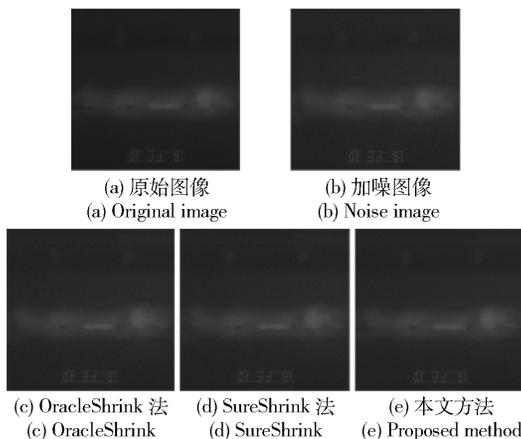


图 3 实验对比

Fig.3 Experimental comparison

图 4 和图 5 分别是 10 幅不同测试图像在不同噪声水平下的平均峰值信噪比和平均均方误差,从中可以看出本文方法的峰值信噪比比 OracleShrink 和 SureShrink 阈值法的要高、均方误差比 OracleShrink 和 SureShrink 阈值法的要低。此外,随着噪声水平的增加,本文方法实验结果的峰值信噪比的下降速度比 OracleShrink 和 SureShrink 阈值法的要慢;均方误差的上升速度比 OracleShrink 和 SureShrink 阈值法的要慢,因此本文方法具有较好的鲁棒性。

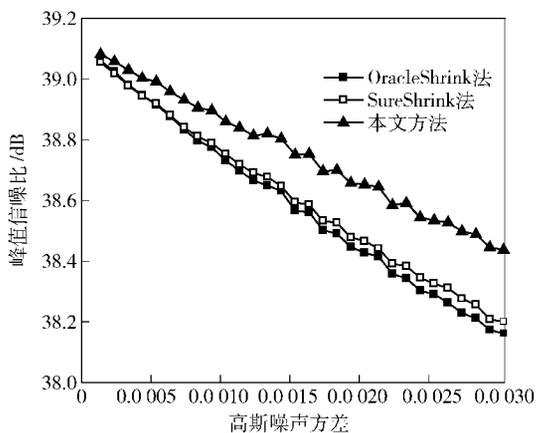


图 4 峰值信噪比

Fig.4 Peak signal-to-noise ratio

3 结论

本文提出了一种基于混合噪声模型的小波中值滤波降噪方法。解决了 BayesShrink 阈值法应用于射线图像降噪时,阈值计算中的 Donoho 噪声方差计

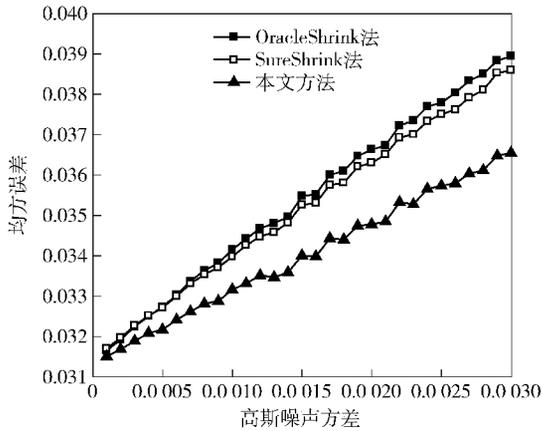


图 5 均方误差

Fig. 5 Man-square error

算方法失效的问题。同时,给出了一种通过分析射线图像噪声成分来建立图像的混合噪声模型的噪声建模方法。实验结果表明,经本文方法降噪后的图像的峰值信噪比比 OracleShrink 和 SureShrink 阈值法的要高、均方误差比 OracleShrink 和 SureShrink 阈值法的要低,且峰值信噪比的下降速度和均方误差的上升速度均比 OracleShrink 和 SureShrink 阈值法的要慢。因此,本文方法的降噪效果优于 OracleShrink 和 SureShrink 阈值法,且具有较好的鲁棒性。

参考文献 (References)

- [1] Hoque M R, Rashed-al-Mahfuz M D. A new approach in spatial filtering to reduce speckle noise[J]. International Journal of Soft Computing and Engineering, 2011, 1(3): 2231 - 2307.
- [2] 原瑞宏, 余能国, 唐力伟, 等. 炮膛疵病图像的去噪研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2011(2): 71 - 73.
YUAN Rui-hong, YU Neng-guo, TANG Li-wei, et al. Research on denosing of gun bore flaw image[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2011(2): 71 - 73. (in Chinese)
- [3] Ruikar S D, Doye D D. Wavelet based image denoising technique [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2011, 2(3): 49 - 53.
- [4] Luisier F, Blu T, Unser M. A new SURE approach to image denoising: interscale orthonormal wavelet thresholding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(3): 593 - 606.
- [5] Om H, Biswas M. An improved image denoising method based on wavelet thresholding [J]. Journal of Signal and Information Processing, 2012, 3(1): 109 - 116.
- [6] Chang S G, Yu B, Vetterli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(9): 1532 - 1546.
- [7] Garg R. A comparative study of non-linear threshold filtering for image denoising [J]. Journal of Computing Technologies, 2013, 2(5): 32 - 34.