

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108294

结合小波变换和双边滤波的 SICM 图像降噪算法^{*}陈妍¹ 徐海黎¹ 邢强¹ 庄健²

(1.南通大学机械工程学院 南通 226019; 2.西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

摘要: 扫描离子电导显微镜(SICM)能够实现微纳米级的形貌测量,引起广大学者的关注研究。针对 SICM 形貌图像易受噪声污染,影响后续应用的问题,提出了一种基于小波分层阈值处理的双边滤波算法。针对 SICM 形貌图像的多特征融合噪声,采用伪中值滤波局部处理图像中的强斑点噪声,有机结合小波阈值去噪和双边滤波去除图像高频和低频噪声,最终得到去噪效果较好的形貌图像。通过仿真实验和实测实验进行多次验证,该算法对比中值滤波、双边滤波和小波去噪 3 种去噪算法,其峰值信噪比提升幅度均大于 9.8%。实验表明该算法在 SICM 形貌图像去噪方面具有更大优势。

关键词: 扫描离子电导显微镜;融合噪声;小波阈值去噪;双边滤波;图像处理

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

A denoising algorithm for SICM image based on wavelet and bilateral filtering

Chen Yan¹ Xu Haili¹ Xing Qiang¹ Zhuang Jian²

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Scanning ion conductivity microscopy (SICM) is capable of achieving micron-scale and nanometer-scale morphology measurements, which has attracted the attention of scholars for research. A bilateral filtering algorithm based on wavelet hierarchical thresholding is proposed to solve the problem that SICM morphology images are vulnerable to contamination, which can affect subsequent applications. For the multi-feature fusion noise of SICM morphological image, pseudo-median filtering is applied to partly process the strong speckle noise in the image, and wavelet threshold denoising and bilateral filtering are organically combined to remove the high-frequency and low-frequency noise of the image. Finally, a morphological image with good denoising effect is obtained. The algorithm is verified several times through the simulation experiment and the real test experiment, and its peak signal-to-noise ratio improvement is greater than 9.8% when comparing the three denoising algorithms of median filtering, bilateral filtering and wavelet denoising. The experimental results show that this algorithm has more advantages in the denoising of SICM morphological images.

Keywords: scanning ion conductance microscope; fusion noise; wavelet threshold denoising; bilateral filtering; image processing

0 引言

在生物、医学、材料、制造等学科中,对微纳材料表面的三维形貌及电化学特性的测量具有十分广泛的应用前景,例如零件缺陷检测、表面腐蚀程度评测、生物学中活体细胞无损测量与物质投递、微纳米材料的物理性质测量以及微结构器件制造等^[1-4]。扫描离子电导显微镜(scanning ion

conductance microscope, SICM)是一种多功能、高分辨率、非接触式的微纳米成像技术^[5-8],SICM 探头是一种带有纳米或微米尖端的玻璃吸管,在两个银/氯化银电极之间构成闭合回路,当探头接近样品表面时,将其离子电流的变化量作为反馈信号,可以获得该点处的高度信息,然后借助 X、Y 方向的进给运动便可实现样品三维形貌的定量测量,最终得出由二维数据组成的 SICM 形貌特征图像数据。

收稿日期:2021-11-08

^{*} 基金项目:国家自然科学基金面上项目(52175515)、南通市科技项目(JC2021034)资助

形貌测量是 SICM 最基础、但也最重要的功能,其扫描图像的质量直接影响着最终效果,因此,形貌图像去噪在 SICM 扫描的处理过程中是必不可少的步骤。SICM 形貌图像噪声主要来源有:1)样品基片带来的噪声;2)扫描过程中来自外部的随机噪声;3)反馈控制电路中放大器等引起的噪声;4)由光和电的基本性质引起的噪声。本文对 SICM 扫描的形貌图像的噪声特征进行分析,得出如下结论:1)扫描形貌图像所含噪声类型主要为高斯噪声和椒盐噪声^[9];2)扫描形貌图像噪声包含低频噪声和高频噪声,低频噪声产生的主要原因为外部的随机干扰,高频噪声产生的主要原因为内部电子元器件的干扰;3)由于 SICM 扫描过程极易受外界干扰,扫描形貌图像所含的噪声中,存在一定数量的与领域数据差异很大的强斑点噪声。

传统的图像去噪方法有中值滤波、均值滤波、理想低通滤波、双边滤波、小波去噪等^[10-14],这些方法有各自的特点与应用场景,而在面对多样或复杂的去噪场景时,存在着容易损失原始图像中的边缘细节信息或去噪效果不佳等缺陷^[15]。SICM 系统输出的形貌图像常用于对微小结构进行分析观察,因此在 SICM 形貌图像的去噪问题上,需要尽可能在保留数据细节的基础上消除噪声的干扰,避免丢失有效的细节信息,从而影响形貌的观测。目前,针对 SICM 形貌图像处理技术的相关研究较少,Bartels 等^[16]利用逆滤波技术来提高电化学显微镜图像质量,提高图像清晰度,但对图像边缘部分进行模糊。王小东^[17]构建了一种频率定位陷波滤波器,定位形貌图像的周期噪声的频率点并建立陷波滤波器进行去噪,仅局限于周期噪声去噪,并没有对图像中的随机噪声进行去噪处理。王伟等^[9]将 LoG 算法与 NEDI 插值算法结合在一起,消除电化学显微镜图像模糊的同时保留图像边缘,但并没有考虑到扫描过程中产生的随机噪声和周期噪声。

本文结合小波去噪算法对高频噪声敏感和双边滤波对低频噪声敏感的优势,提出一种基于小波分层阈值处理的双边滤波算法,在双边滤波的基础上,结合小波去噪算法,利用小波分解对图像中的高频信息进行处理,并提出改进的中值滤波对图像中的强斑点噪声进行局部处理。本文将3种不同算法有机结合,对形貌图像中的不同类型噪声进行针对性处理,同时尽可能保留形貌图像的有效信息,避免造成图像数据过处理。通过仿真实验和实测实验进行多次验证,证明其不仅可以有效抑制 SICM 形貌图像的融合噪声,还显著提高了 SICM 形貌图像的可读性,提高了数据的真实性和准确率,为扫描样品形貌的后续相关研究提供有效帮助。

1 基于小波分层阈值处理的双边滤波算法

1.1 小波变换原理

小波变换建立在短傅里叶变换的基础上,其通过时频域的局部分析的方法提取有效的信息^[18-19]。在小波变换

中,选取合适的小波基函数分离出高频和低频信号系数,采用阈值处理高频信号系数,然后进行小波逆变换重构图像,可以达到图像去噪目的。

对于一个平方可积的二维信号 $f(x, y)$, 二维小波变换表达式如式(1)所示。

$$WF_f(a, b_x, b_y) = \iint f(x, y) \psi_{a, b_x, b_y}(x, y) dx dy \quad (1)$$

式中: $WF_f(a, b_x, b_y)$ 表示二维小波的变换系数, a 为尺度因子, b_x 和 b_y 分别表示在水平、垂直两个维度上平移因子, $\psi(x, y)$ 为母小波, 其伸缩平移得到小波基函数 $\psi_{a, b_x, b_y}(x, y)$ 。小波变换可以理解为输入信号 $f(x, y)$ 以 $\psi(x, y)$ 为核函数的积分变换。

二维小波的逆变换为:

$$f(x, y) = \frac{1}{C_\psi} \iint \iint W_f(a, b_x, b_y) \psi_{a, b_x, b_y} db_x db_y \frac{da}{a^3} \quad (2)$$

式中: $C_\psi = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\psi}(w)|^2}{|w|} dw < \infty$ 。

图像经过小波变换后,具有可分解性,对高频信号去噪具有针对性,较于传统的图像去噪可以保留较多图像细节特征,在图像处理领域应用广泛^[15],可运用于本文所提出的基于小波分层阈值处理的双边滤波的二维去噪过程中。

1.2 双边滤波基本原理

双边滤波(bilateral filter)属于非线性滤波器,可以达到图像降噪平滑和边缘保留的效果^[20-21]。双边滤波输出像素值由邻域像素的加权组合得到,本文定义 (i, j) 为中心点坐标,点 (k, l) 为中心点 (i, j) 领域 S 中的任意一点,领域 S 中点 (k, l) 到点 (i, j) 的空间距离 $d(i, j, k, l)$ 和灰度差域值矩阵 $r(i, j, k, l)$ 如式(3)和(4)所示。

$$d(i, j, k, l) = e^{-\frac{(i-k)^2 - (j-l)^2}{2\sigma_d^2}} \quad (3)$$

$$r(i, j, k, l) = e^{-\frac{|f(k, l) - f(i, j)|^2}{2\sigma_r^2}} \quad (4)$$

结合空间距离和灰度差矩阵,式(3)和(4)相乘得到双边滤波的权重矩阵计算公式,如式(5)所示。

$$\omega(i, j, k, l) = e^{-\frac{(i-k)^2 - (j-l)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{|f(k, l) - f(i, j)|^2}{2\sigma_r^2}} \quad (5)$$

最后,对该坐标点的邻域 S 进行加权滤波,从而代替该点初始值,如式(6)所示。

$$g(i, j) = \frac{\sum_{(k, l) \in S} f(i, j) \omega(i, j, k, l)}{\sum_{(k, l) \in S} \omega(i, j, k, l)} \quad (6)$$

双边滤波器在边缘保护和平滑图像上相较于高斯滤波器、中值滤波器等滤波器具有明显的优势,对低频噪声处理效果更好,但双边滤波难以有效地滤除强斑点噪声等问题^[22],而本文上节所提到的小波变换侧重于对图像信息的高频信号进行滤波,对图像的低频信息保留较为完整,因

此,有机结合小波变换和双边滤波可以达到更好的图像去噪效果。

1.3 基于小波分层阈值处理的双边滤波算法实现

根据 SICM 系统的扫描特性,SICM 所得的含噪形貌图像中存在强斑点噪声,直接采用中值滤波容易过滤掉数据中的细节信息,而小波变换和双边滤波对于强斑点噪声很难去除。本文提出了伪中值滤波方法对含噪图像进行预处理。

$$F(i, j) = X(i, j) + C(i, j) \quad (7)$$

式中: X 为原始形貌图像, C 为随机的噪声污染, F 为最终得到含噪形貌图像。其中, X 、 F 和 C 均为二维方阵。

首先对含噪图像进行阈值筛选,提取差异值较大的数据点进行单独的中值处理,其余点的数值保持原值,保留原始数据的大部分细节。

$$F'(i, j) = \begin{cases} Median(F_H(i, j)), & D > thr \\ F(i, j), & D < thr \end{cases} \quad (8)$$

式中: $D = |F(i, j) - Median(F_H(i, j))|$, thr 为阈值, $F_H(i, j)$ 表示窗口 H 区域的数据值按大小排序的数组, $Median(X)$ 表示序列 X 的中值。

在伪中值预处理后,对处理好的形貌图像进行小波分解,得到 1 个低频分量 A_1 和 3 个高频分量 H_1 、 V_1 、 D_1 ,分别为水平方向分量 H_1 、垂直方向分量 V_1 和对角方向分量 D_1 。本文采用分层阈值的去噪方法,对 3 个高频通道分量分别进行自适应阈值处理,针对异常数据进行去噪,其阈值函数定义如式(9)和(10)所示。

$$A_k = \frac{\sum_{ij} T_k(i, j)}{N}, k = 1, 2, 3 \quad (9)$$

$$H_k = \eta_k \sqrt{\frac{\sum_{ij} (|T_k(i, j)| - A_k)^2}{N}}, k = 1, 2, 3 \quad (10)$$

式中: T_1 、 T_2 、 T_3 分别表示 3 个高频分量 H_1 、 V_1 、 D_1 ; N 表示分量 T_k 中的元素个数; η_k 表示预设的阈值基数; H_k 表示各层分量的阈值。

本文算法得到各层分量阈值后对每层分量分别进行阈值去噪,对图像细化剖分,然后经过二维小波逆变换函数,重构得到小波阈值去噪处理后的形貌图像,但此时得到数据仅对高频噪声进行了处理,所得形貌图像在平滑度上依然有所欠缺,因此需要对处理后的图像进行一次双边滤波处理,处理后得到本文所需的去噪图像。基于小波分层阈值处理的双边滤波算法的基本描述如下。

步骤 1:对输入的形貌图像进行伪中值滤波的局部预处理,去除图像中的强斑点噪声。

步骤 2:对预处理后的形貌图像进行小波分解,分解为 4 个部分,其中 1 个低频分量 A_1 , 3 个高频分量:水平分量 H_1 、垂直分量 V_1 和对角分量 D_1 。

步骤 3:根据 3 个高频分量的情况,对 3 个不同的高频分量分别进行自适应阈值去噪。

步骤 4:然后将处理后的不同信号进行小波逆变换,得到对高频去噪后的形貌图像。

步骤 5:最后进行双边滤波处理,得到最终的去噪形貌图像。

基于小波分层阈值处理的双边滤波算法的基本流程如图 1 所示。

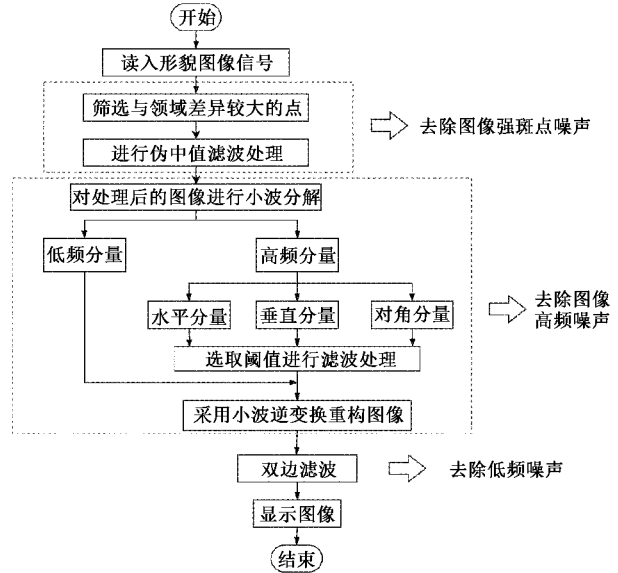


图 1 基于小波分层阈值处理的双边滤波方法的基本流程

2 实验与分析

为了验证基于小波分层阈值处理的双边滤波的二维去噪的算法性能,进行了两组 SICM 形貌图像去噪实验:仿真去噪实验和实际去噪实验。

2.1 自研 SICM 设备简介

本文实验采用装置由西安交通大学机械工程学院自行研发的 SICM 系统,其结构主要由扫描探头、离子电流回路、信号采集器、离子电流放大器、微电机及其控制器、压电陶瓷及其控制器、FPGA 主控制器以及上位机组成^[23-27]。SICM 系统采用粗略/精密定位装置,先由 X、Y、Z 三向微电机控制探头进行模糊定位,再由微电机上的 X、Y、Z 三向压电陶瓷控制探头进行精确定位,快速准确地实现探头与样品之间点到点的移动。SICM 系统通过信号采集器采集探头与样品接触时的电压变化,再经由离子电流放大器,将采集到的信号进行去噪放大,然后传递到主控制器。SICM 测量原理如图 2 所示,SICM 系统组成如图 3 所示。

2.2 实验 1:仿真去噪实验

实验样品由平板印刷技术²⁸压印而成,样品材料为聚二甲基硅氧烷(PDMS),样品表面为外径 24 μm 、内径 8 μm 的圆柱体阵列,图 4(a)为该样品的无噪 SICM 形貌图像,根据 SICM 系统扫描形貌图像的噪声特征,对其添加高斯白噪声和椒盐噪声的混合噪声,其中高斯白噪声的均值为 0,方差 $\sigma = 0.3$,椒盐噪声的噪声密度为 0.01,随后得到如

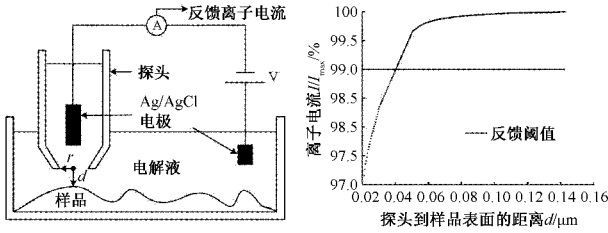


图2 SICM的工作原理

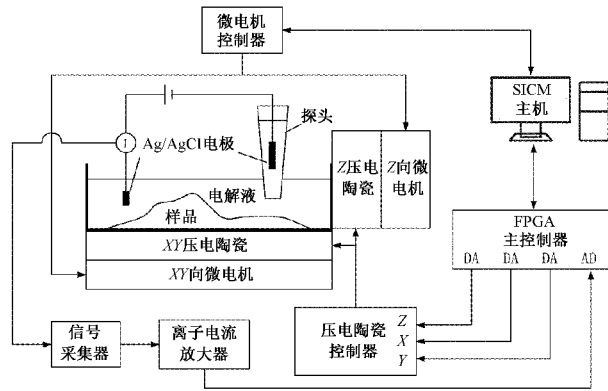


图3 SICM系统组成

图4(b)所示的加噪形貌图像,仿真模拟SICM系统扫描所得形貌图像。本文所处理的形貌图像大小不固定,且没有较大的图像数据集,并不适用于当前较为流行的深度学习去噪方法,在对于显微镜图像处理中常用的去噪方法主要有中值滤波、双边滤波、小波去噪等算法^[15],因此,本文对加噪图像采用中值滤波、双边滤波、小波去噪和本文去噪算法4种滤波方案进行对比分析,通过MATLAB模拟仿真结果如图5所示。

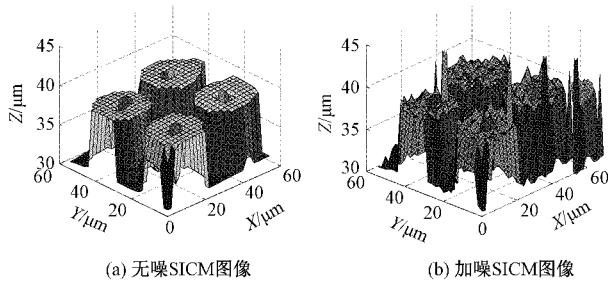


图4 实验1 SICM形貌图像

4种不同方法的去噪效果对比如图5所示,从图5(a)中可以看出中值滤波可以有效去除形貌图像中的噪点,但是无法平滑化图像且柔化了图像边缘,丢失了很多形貌信息;图5(b)双边滤波与中值滤波相反,其平滑化形貌图像,

保留边缘细节,却无法去除图像中较大的噪点;图5(c)小波去噪方法较前两种方法效果较差,仅对高频噪声达到了抑制效果,较大噪点无法去除;图5(d)为本文所提出的基于小波分层阈值处理的双边滤波的二维去噪算法,可以明显看出本文算法在图像的平滑度,在强斑点噪声去除率和边缘保留程度各方面都有很好的表现。在SICM形貌图像方面,本文算法去噪性能优于其他几种算法。

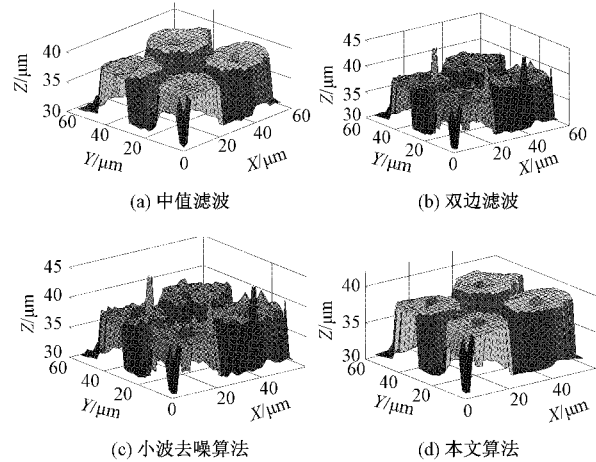


图5 4种方法下形貌去噪效果对比

峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)是最常见的衡量图像去噪效果的量化指标,常用于表示信号最大可能功率和影响它的表示精度的破坏性噪声功率的比值^[29-30],其数值越大,表明图像的信息损失越小,图像去噪效果越好,计算式如式(11)所示。

$$PSNR(\mathbf{R}_0, \mathbf{R}) = 10 \cdot \log \left[\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{R}_0(i, j)^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\mathbf{R}(i, j) - \mathbf{R}_0(i, j))^2} \right] \quad (11)$$

式中: \mathbf{R}_0 代表大小为 $M \times N$ 数据大小的SICM无噪形貌图像; \mathbf{R} 代表用算法处理后的形貌图像。

均方误差(mean-square error, MSE)是反映估计量与被估计量之间差异程度的一种度量,其数值越小,图像信息重合率越高,图像还原程度越好,计算式如式(12)所示。

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\mathbf{R}(i, j) - \mathbf{R}_0(i, j))^2} \quad (12)$$

本实验中使用了峰值信噪比(PSNR)和均方差(MSE)作为图像去噪效果的客观评测因素,对不同方法下的实验效果进行可观对比,结果如表1所示。

表1 不同方法对实验效果对比

方法	加噪图像	中值滤波算法	双边滤波算法	小波去噪算法	本文算法
峰值信噪比/dB	50.919 0	50.587 6	51.853 9	51.407 8	56.885 9
均方差	0.526 2	0.568 0	0.424 3	0.470 2	0.133 2

表 1 中可以明显看出,中值滤波处理后的图像信息数据丢失最多,而经本文算法处理后的图像与无噪图像的信息重合度最高,细节数据丢失率最小,本文算法对比其他几种算法具有较好的图像去噪效果。结合本实验的实验结果和客观评测两方面,与其他 3 种去噪方法进行对比,均可得出如下结论:本文所提出的基于小波分层阈值处理的双边滤波的二维去噪算法在 SICM 形貌图像去噪方面,具有更好的去噪效果。

2.3 实验 2:实测去噪实验

为了验证本文算法去噪性能,本文实验采用 0.1 mol/L 的氯化钾溶液作为电解液,选取两个具有阵列形貌的 PDMS 样品,对其使用去离子水进行简单清洗,然后放入 0.1 mol/L 的氯化钾溶液中进行形貌测量,图 6 和 7 分别为样品 1 和样品 2 的 SICM 实际扫描的形貌图像,采用中值滤波、双边滤波、小波去噪和本文去噪算法对两个样品形貌图像进行去噪处理,对比分析其去噪结果,在实际案例中分析算法可行性。本实验结果如图 8 和 9 所示。

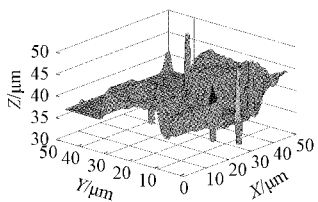


图 6 样品 1 实测 SICM 形貌图像

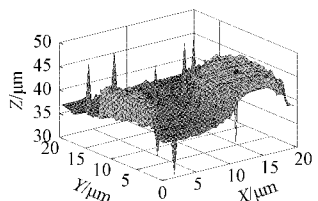


图 7 样品 2 实测 SICM 形貌图像

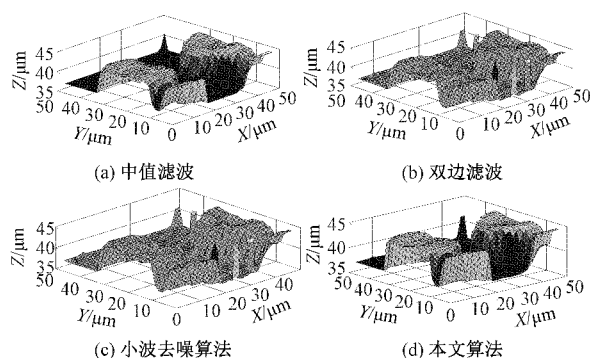


图 8 样品 1 图像去噪结果

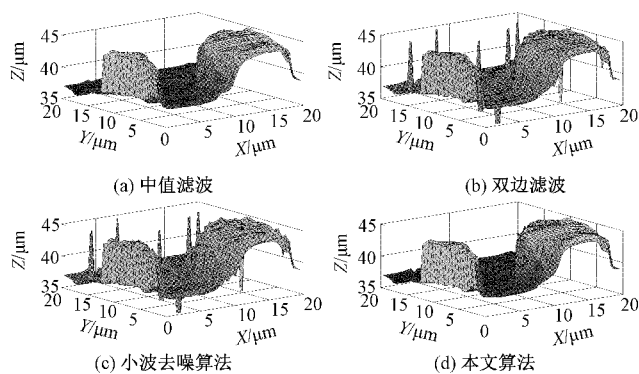


图 9 样品 2 图像去噪结果

本文根据 ITU-R BT. 500-11 和 ITU-R 1438 两个图像主观质量测试标准^[31],采用主观质量评分法(mean opinion score, MOS)对 4 种去噪算法的去噪结果进行主观打分。主观打分采用 5 分制(其中,1 分表示质量最差;2 分表示质量较差;3 分表示质量中等;4 分表示质量较好;5 分表示质量最好),几种去噪算法的 MOS 评价结果和强斑点去噪结果如表 2 所示。

表 2 样品 1 和样品 2 去噪结果评价

评价方法	含噪图像	中值滤波算法	双边滤波算法	小波去噪算法	本文算法
MOS 评价尺度	1	4	3	2	5
强斑点个数(样品 1/样品 2)	7/9	0/0	7/9	7/9	0/0

结合实验结果和表 2 的评价尺度可以看出,中值滤波算法仅消除了原图像大部分的椒盐噪点,图像表面低幅度的噪声依然存在,双边滤波算法和小波去噪都无法消除图像中的较大噪点,本文算法不仅去除了图像中的强斑点噪声,柔滑图像,同时保留图像边缘特征,具备良好的可读性,为该样品的后续研究提供更好的支持。

以上两组样品实验结果表明:本文的去噪算法对比其他几种去噪方法,在对 SICM 形貌图像去噪的同时,能够更好地保留 SICM 形貌图像边缘和细节信息,更适用于 SICM 系统扫描的形貌图像去噪。

3 结 论

本文提出了一种基于小波分层阈值处理的双边滤波算法。针对 SICM 形貌图像噪声特性,本文算法利用伪中值滤波局部处理图像中的强斑点噪声,结合小波阈值去噪和双边滤波去除图像高频和低频噪声,最终得到去噪效果较好的形貌图像。通过进行多次仿真实验和实测实验,本文算法在 PSNR、MSE 值以及 MOS 评价标准上均具有一定的优势,验证了本文算法在 SICM 形貌图像去噪方面具有更大优势。在后续研究与深度学习进行结合,加强算

法对真假噪声的识别能力,实现更好的噪声抑制,保留更多的形貌细节特征。

参考文献

- [1] EBEJER N, GÜELL A G, LAI S C S, et al. Scanning electrochemical cell microscopy: A versatile technique for nanoscale electrochemistry and functional imaging [J]. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 2013, 6(1): 329-351.
- [2] NEIL E, MATHIAS S, ALEXANDER W C. et al. Localized high resolution electrochemistry and multifunctional imaging: Scanning electrochemical cell microscopy [J]. *Analytical Chemistry*, 2010, 82(22): 9141-9145.
- [3] MOMOTENKO D, PAGE A, ADOBES-VIDAL M, et al. Write-read 3D patterning with a dual-channel nanopipette [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(9): 8871-8878.
- [4] WILLIAMS C G, EDWARDS M A, COLLEY A L, et al. Scanning micropipet contact method for high-resolution imaging of electrode surface redox activity [J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(7): 2486-2495.
- [5] 郎瑾新,李亚北,杨耀维,等. 扫描离子电导显微镜在细胞表征中的应用研究 [J]. *中国科学: 化学*, 2019, 49(6): 844-860.
- [6] 滕泽宇,于鹏,杨洋,等. 基于电流偏差补偿模型的 SICM 自适应控制 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(9): 2258-2265.
- [7] WANG Z, ZHUANG J, GAO Z, et al. A fast scanning ion conductance microscopy imaging method using compressive sensing and low-discrepancy sequences [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, DOI:10.1063/1.5048656.
- [8] ZHUANG J, JIAO Y, LI Z, et al. A continuous control mode with improved imaging rate for scanning ion conductance microscope (SICM) [J]. *Ultramicroscopy*, 2018, 190: 66-76.
- [9] 王伟,刘振邦,包宇,等. 数字图像处理技术在扫描电化学显微镜中的应用 [J]. *分析化学*, 2018, 46(3): 342-347.
- [10] 黄懿. 结合谱聚类理论的形态小波域水下地貌图像去噪技术研究 [D]. 大理: 大理大学, 2021.
- [11] 梁亚卓. 基于压缩感知的全变分图像去噪算法改进研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- [12] 程卓越. 一种高效的自适应双边滤波方法 [J]. *数字技术与应用*, 2019, 37(10): 121-123.
- [13] 崔程程,周先春,咎明远,等. 基于自适应滤波的 BM3D 降噪算法 [J]. *电子测量技术*, 2021, 44(12): 97-101.
- [14] 张雪峰,闫慧. 基于中值滤波和分数阶滤波的图像去噪与增强算法 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(4): 482-487.
- [15] 李寄仲. 基于小波变换和免疫算法自适应改进的医学图像去噪研究 [D]. 上海: 东华大学, 2021.
- [16] BARTELS K, LEE C, BOVIK A, et al. Digital restoration of scanning electrochemical microscope images [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1991: 30-39.
- [17] 王小东. 扫描探针显微镜图像处理关键技术研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [18] 袁志超. 小波去噪算法的改进及其在湿蒸汽 CCD 图像降噪中的应用 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [19] 张俊杰,冯俞. 分层阈值电力电缆局放信号的小波去噪研究 [J]. *电子测量技术*, 2018, 41(5): 68-72.
- [20] 李俊峰. 双边滤波算法的快速实现及其在图像处理的应用 [D]. 广州: 南方医科大学, 2013.
- [21] 王玉灵. 基于双边滤波的图像处理算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [22] 艾加秋,王非凡,杨兴明,等. 基于背景匀质性双边滤波的 SAR 图像斑点噪声抑制算法 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(5): 1071-1084.
- [23] 郭仁飞,庄健,于德弘. 用于三维形貌定量测量的调制电流式扫描离子电导显微镜 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(7): 83-88, 139.
- [24] ZHUANG J, CHENG L, LIAO X, et al. A fuzzy control for high-speed and low-overshoot hopping probe ion conductance microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(3): 033703.
- [25] YJA B, JIAN Z, QZA B, et al. A high accuracy ion conductance imaging method based on the approach curve spectrum [J]. *Ultramicroscopy*, 2020, 215: 113025.
- [26] ZHUANG J, WANG Z, LIAO X, et al. Hierarchical spiral-scan trajectory for efficient scanning ion conductance microscopy [J]. *Micron*, 2019, 123: 102683.
- [27] ZHUANG J, GUO R, LI F, et al. Large-scale and non-contact surface topography measurement using scanning ion conductance microscopy and sub-aperture stitching technique [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, DOI:10.1088/0957-0233/27/8/085402.
- [28] YE X, DING Y, DUAN Y, et al. Room-temperature capillary-imprint lithography for making micro-/nanostructures in large areas [J]. *Journal of Vacuum & Technology B*, 2010, 28(1): 138-142.
- [29] LI B, REN W, FU D, et al. Benchmarking single image dehazing and beyond [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019: 492-505.
- [30] WANG Z M. Review of no-reference image quality assessment [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(6): 1062-1079.
- [31] 富振奇,邵枫. 三维重定向图像主观和客观质量评价方法 [J]. *计算机应用*, 2019, 39(5): 1434-1439.

作者简介

陈妍, 硕士, 主要研究方向为机电系统智能控制及信息处理。

E-mail: 1051719690@qq.com

徐海黎(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为机电系统的智能控制与信息处理。

E-mail: 87353319@qq.com