基于非局部自相似性的低对比度图像降噪算法

刘迪仁，马 澳

（长江大学 地球物理与石油资源学院，武汉 430100）

摘 要：为改善低对比度图像边缘平滑性并提高其清晰度，本文设计了一种基于非局部自相似性的低对比度图像降噪算法。该算法基于低对比度图像中图像块的差异度构建自相似数据集，在此基础上计算图像块相似度，并结合二值标识矩阵区分噪声点与有效像素点，引入加权系数对像素点实施加权平均运算，得到过渡图像。由此，通过计算原始图像和过渡图像的绝对差分和判断降噪是否完成，若绝对差分和≤0，则实现降噪。实验结果表明，本文算法的结构相似度稳定在0.9左右，且去噪后的图像更加清晰真实，说明本文算法可以更好地保留原始信息和结构信息，使得降噪图像在视觉上更加自然与真实。

关键词：非局部自相似性；低对比度图像；图像降噪；过渡图像；椒盐噪声

中图分类号：TP391 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2025)07-2378-05

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240594

Low contrast image denoising algorithm based on non local self similarity

LIU Di-ren，MA Ao

（*College of Geophysics and Petroleum Resources*，*Yangtze University*，*Wuhan* 430100，*China*）

Abstract：In order to improve the edges smoothness and clarity of low contrast image，a low contrast image denoising algorithm based on non local self similarity is designed in this paper. Based on the difference between image blocks in low contrast images，a self similarity dataset is constructed. On this basis，the similarity of image blocks is calculated，and a binary identification matrix is used to distinguish noise points and effective pixel，weight coefficients are introduced to perform weighted averaging on the pixels，resulting in a transition image. Therefore，based on the absolute difference sum between the original image and the transition image is calculated to determined whether has completed denoising. If the absolute difference sum is less than or equal to 0，denoising is achieved. The experimental results show that the SSIM of the proposed algorithm has remained around 0.9，and the denoised image is clearer and more realistic. It is shown that the proposed algorithm can better preserve the original information and structural information，making the denoised images more natural and realistic visually.

Key words：non local self similarity；low contrast images；image denoising；transition image；salt and pepper noise

收稿日期：2024-05-29.

基金项目：国家重点研发计划项目子课题(2018YFC060330502).

作者简介：刘迪仁(1965-)，男，教授，博士.研究方向：地球物理测井及光纤传感技术.

E-mail：liudr@yangtzeu.edu.cn

0　引　言

在图像获取、传输等环节中,由于外部环境条件、设备局限等因素,图像会不可避免地产生噪声(包含颗粒状斑点、变色等)[1]。低对比度图像的颜色变化范围较小,噪声会更加明显,导致无法从中准确提取有效信息[2]。为有效处理低对比度图像的噪声问题,不同学者提出一系列解决方案,旨在通过不同技术手段,降低或去除低对比度图像中的噪声,提升图像信息的可辨识度。

陈晓军等[3]采用噪声水平评估法检验图像噪声水平值,使用编码器-解码器架构的骨干网络初步降噪,以最小化损失为目标,运用随机梯度下降算法调整网络参数值得到去噪图像。但该方法没有充分挖掘噪声图像的多尺度信息,降噪效果有限。孙晓辉等[4]基于限幅滤波原理,引入相邻边缘点组建滑动模子,创建局部轮廓结构模型并计算图像边缘信息,通过超限点与预测值的差异锁定噪声区域并实施消噪处理。然而,限幅滤波阈值的选择对降噪效果有很大影响,如果图像内容变化较大,需要频繁调整阈值,增加了算法的复杂性。管继祥等[5]使用均值滤波提取噪声空间分布特征,运用线性滤波去除固定模式噪声,再采用非线性滤波去除椒盐噪声。但当图像噪声分布不均匀时,均值滤波无法有效提取噪声空间分布特征,致使图像去噪不彻底。

非局部自相似性是图像的重要特性,它表明图像不同位置可能存在相似的局部结构或纹理。这种相似性不仅存在于空间上相邻的区域,也可能存在于远离当前位置的其他区域。为更有效地去除低对比度图像中的噪声,本文提出基于非局部自相似性的低对比度图像降噪算法。通过寻找并利用相似的图像块,该算法能在有效降噪的同时,保留图像的细节和纹理信息。

1　低对比度图像降噪

1.1　图像自相似性数据集构建

在低对比度环境下,图像中的细节信息会被噪声淹没,使得图像的局部信息难以支持有效的降噪处理。若直接使用降噪算法去除噪声,则容易损失这些重要的细节信息。而挖掘图像中的自相似性可以充分利用图像的全局信息,提升降噪效果[6]。因此,对于图像中每个目标块(即需降噪区域),通过挖掘自相似性,可以识别出噪声和真实图像结构的差异,从而更准确地降噪。

假设 t 时段,含噪低对比度图像 a^t 在坐标 x 处的像素值为:

$$a(x,t)=b(x,t)+\delta(x,t) \tag{1}$$

式中:$b(x,t)$ 为图像实际像素;$\delta(x,t)$ 为噪声。

低对比度图像可分割为多个 $m\times m$ 像素的参考图像块,以步长 m_{step} 将图像 a^t 分割成图像块 a_x^t、a_y^t,并将 a_x^t 拟作参考块。a_x^t、a_y^t 的差异度可以表示为:

$$\operatorname{dis}\left(a_x^t,a_y^t\right)=\frac{\left\| B_{2\mathrm{D}}\left(a_x^t\right)-B_{2\mathrm{D}}\left(a_y^t\right)\right\|_2^2}{(m)^2} \tag{2}$$

式中:$B_{2\mathrm{D}}$ 为余弦变换;$\|\cdot\|$ 为欧氏距离。

计算并提取 a_x^t 的相似图像块[7-9],构建自相似数据集,记作:

$$\begin{cases} x=xr-i_{\mathrm{f}}\times\Delta \\ E_x^t=\left\{(x,t+i);\ \operatorname{dis}\left(a_x^t,a_y^t\right)<T_j\right\} \\ i_{\mathrm{f}}=-o,-o+1,\cdots,0,o-1 \end{cases} \tag{3}$$

式中,E_{xr}^t 为低对比度图像相似图像块数量;T_j 为差异度阈值;o 为图像像素值;Δ 为图像色彩明艳度;i_f 为序列编码。

1.2　低对比度图像降噪处理

在参考块 a_x^t 的自相似数据集 E_{xr}^t 中,各图像块间同位置的像素差异主要由椒盐噪声引起。

以 a_x^t 中的像素点 q_{ij} 为例,将该像素点的相邻像素点定义为:

$$\omega=\left\{(i-1,j-1),(i-1,j),(i-1,j+1),(i,j-1)\right\} \tag{4}$$

式中:q 为涵盖椒盐噪声的图像;ω 为 q_{ij} 的邻近像素点方位数据集;(i,j) 为像素点坐标。

图像降噪处理的关键步骤是准确区分图像中的噪声点和非噪声点[10,11]。对非噪声点保持初始像素值,最大限度保留图像中的真实信息,并将其标记为“非干扰对”;对疑似噪声点,将其标记为“干扰对”。图像块相似度评估公式为:

$$\delta=\omega\left[W(i,j)\right]L_\varphi(n)^2 \tag{5}$$

式中:$L_\varphi(n)$ 为标准差是 σ 的高斯核;$W(i,j)$ 为欧式距离平均值;n 为像素点总和。

低对比度图像的高频信息中通常包含丰富的细节和纹理信息,这些细节信息通常以像素极值的形式存在[12,13]。由此,为明确区分低对比度图像中的噪声点与非噪声点,根据上述评估结果,为

图像中的每一个像素点分配一个值,从而构建出与原始图像尺寸相同的二值标识矩阵C,记作:

$$C=\begin{cases}0,\delta=0\\1,\delta=1\end{cases} \tag{6}$$

在二值标识矩阵中,噪声点被标记为1[14,15],而非噪声点被标记为0。

基于二值标识矩阵,在保证计算精度的前提下,引入加权系数$z(i,j)$对含椒盐噪声的像素点实施加权平均运算[16],得到过渡图像Q':

$$Q'=\frac{\bar{q}_{ij}C}{z(i,j)} \tag{7}$$

式中:$\bar{q}_{ij}$为低对比度图像块的像素均值。

在低对比度图像中,图像细节和噪声的灰度值差异较小,直接使用灰度差异可能无法准确反映图像块间的差异。而绝对差分和作为一种绝对值度量方式,能够更好地适应这种低对比度环境,更准确地反映图像块间的差异。

设U为原始的低对比度图像,对于图像中的每一个像素位置(k,l),U和Q'的像素值绝对差可以表示为:

$$D(k,l)=\left|U(k,l)-Q'(k,l)\right| \tag{8}$$

将所有位置的绝对差分进行求和,得到的绝对差分和为:

$$D_S=\sum_{k=1}^{I}\sum_{l=1}^{J}D(k,l),k\in I,l\in J \tag{9}$$

式中:I、J分别为图像的宽度和高度。

$D_S\geqslant 0$时表明过渡图像Q'与U存在差异,即过渡图像中不存在椒盐噪声;反之,过渡图像中存在椒盐噪声,引入加权系数继续实施加权平均运算,直到满足条件,即完成低对比度图像降噪。

2 实验分析

2.1 实验设置

利用MATLAB平台进行实验对比,通过定量与定性分析验证本文降噪算法的实际效果,考虑图像块大小与噪声强度的自适应关系,设定噪声强度为0.73,图像块大小为6×6。定性分析选取一幅灰度级为256的列车低对比度含噪图像为测试样本,如图1所示。实验过程中的相关参数设置如表1所示。

在上述参数设置的基础上,对本文算法处理后图像的结构相似度进行计算。结构相似度通过量化像素之间的相似度评估降噪效果,其计算公式为:



图1 低对比度含噪图像

Fig. 1 Low contrast noisy image

表1 实验参数设置

Table 1 Experimental parameter settings

参数名称	参数值
图像块大小	8×8
差异度阈值	100
搜索窗口大小	32×32
相似度阈值	0.7
二值化阈值	20%
滤波窗口大小	5×5
ADS阈值	1 000

$$\mathrm{SSIM}=\frac{(2\lambda_{x_t}\lambda_{y_t}+d_1)(2\rho_{x_ty_t}+d_2)}{(\lambda_{x_t}^2+\lambda_{y_t}^2+d_1)(\rho_{x_t}^2+\rho_{y_t}^2+d_2)} \tag{10}$$

式中:λ_{x_t}、λ_{y_t}为图像平均值;$\rho_{x_t}^2$、$\rho_{y_t}^2$为图像方差;$\rho_{x_ty_t}$为图像协方差;d_1、d_2为常数。

降噪结构相似度结果如图2所示。分析图2可知,本文方法的结构相似度稳定在0.9左右,表明所提方法可以通过像素结构相似度计算有效地评估降噪效果。

2.2 结果与分析

将本文算法与无监督深度法(文献[3]方法)、局部结构形态法(文献[4]方法)进行横向比较,评估各种算法在去噪性能上的差异。不同方法低对比度图像降噪性能对比结果如图3所示。

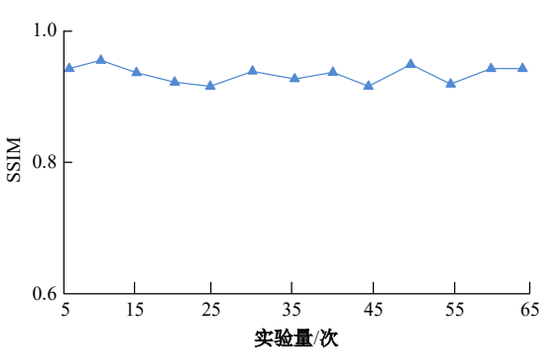


图2 降噪结构相似度

Fig. 2 Noise reduction structure similarity



(a) 本文方法　　(b) 无监督深度法　　(c) 局部结构形态法

图 3　不同方法低对比度图像降噪性能对比

Fig. 3　Comparison of denoising performance of low contrast images using different methods

分析图 3 可知,尽管无监督深度法和局部结构形态法能够在一定程度上去除图像中的噪声,但去噪后的图像仍存在细微噪声残留,失真程度明显增大,对图像视觉效果产生负面影响。而本文方法的降噪性能最优,能显著提升图像清晰度。这是因为本文方法使用非局部自相似性策略,并不是仅考虑图像中相邻像素的相似性,而是利用块与块的相似性作为图像去噪的先验信息,计算更为稳定,去噪质量更佳,从根本上优化了图像质量。

采用峰值信噪比作为实验评估指标。峰值信噪比展现了去噪图像与初始图像的关联度,计算公式为:

$$\mathrm{PSNR}=10\times\lg\left(\frac{255^2}{A'\times B'\sum_{i=1}^{A'}\sum_{j=1}^{B'}(i,j)^2}\right)\tag{11}$$

式中:y_f为去噪后的图像;x_f为无噪图像;A'、B'为图像尺寸。

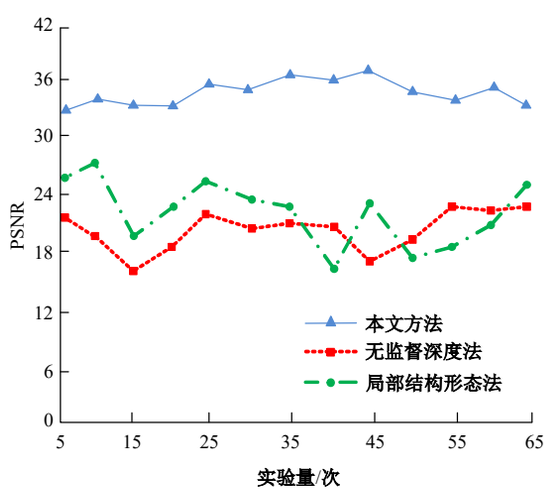


图 4　降噪峰值信噪比对比

Fig. 4　Comparison of peak signal-to-noise ratio for noise reduction

3 种方法的峰值信噪比结果如图 4 所示。分析图 4 可知,随着实验次数的增多,本文方法图像降噪后的峰值信噪比高于文献方法。其计算稳定性强,相比文献方法未出现明显的数值波动,展现出更优秀的去噪能力,更好地保留图像原始信息和结构细节,使得降噪后的图像在视觉上更加自然、真实,进一步验证了本文方法的稳定性和可靠性。

综上,在实际应用中,本文方法能更好地满足各种场景下图像降噪需求,为用户带来更加清晰的视觉体验。

3　结束语

低对比度图像中相邻像素的灰度差异较小,导致图像色彩失真、图像细节被掩盖,无法准确识别重要的图像信息。为提高图像质量,本文提出一种基于非局部自相似性的低对比度图像降噪算法。实验结果表明,该算法能保证图像细节信息不被干扰,提升图像质量。然而,该算法的计算复杂度较高,仍存在一定优化空间。在未来工作中,将进一步探索优化模式,提高不同类型图像降噪的鲁棒性,降低计算复杂度并深入优化降噪性能。

参考文献:

[1] 蒋澎涛, 欧阳建权. 改进稀疏去噪算法下图像自适应融合研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(5): 224-227, 266.
Jiang Peng-tao, Ouyang Jian-quan. Research on adaptive image fusion based on improved sparse denoising algorithm[J]. Computer Simulation, 2023, 40(5):224-227,266.

[2] 王蕾, 王永波, 边兆英, 等. 基于非局部能谱相似特征的基物质分解方法用于双能 CT 图像去噪[J]. 南方医科大学学报, 2022, 42(5): 724-732.
Wang Lei, Wang Yong-bo, Bian Zhao-ying, et al. A nonlocal spectral similarity-induced material decomposition method for noise reduction of dual-energy CT images[J]. Journal of Southern Medical University, 2022, 42(5): 724-732.

[3] 陈晓军, 李芬, 徐少平, 等. 基于无监督深度图像生成的盲降噪模型[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(7): 2224-2229.
Chen Xiao-jun, Li Fen, Xu Shao-ping, et al. Blind denoising model based on unsupervised deep image generation[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(7): 2224-2229.

[4] 孙晓辉, 蔡永洪, 林雁飞. 基于局部结构形态改进图像边缘限幅滤波算法研究[J]. 计量学报, 2022, 43(1): 21-25.
Sun Xiao-hui, Cai Yong-hong, Lin Yan-fei. Improved image edge clipping and filtering algorithm based on local structural shape[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(1): 21-25.

[5] 管继祥, 李林, 张超, 等. 基于组合滤波的CMOS图像固定模式噪声降噪算法[J]. 应用激光, 2022, 42(4): 173-180.
Guan Ji-xiang, Li Lin, Zhang Chao, et al. Fixed pattern noise removal algorithm for CMOS image based on combined filter[J]. Applied Laser, 2022, 42(4): 173-180.

[6] 郑艳, 何欢, 卜丽静, 等. 自相似性和边缘保持分解的超分辨率重建算法[J]. 测绘通报, 2022(7): 54-59.
Zheng Yan, He Huan, Bu Li-jing, et al. Super-resolution reconstruction method based on self-similarity and edge-preserving decomposition[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(7): 54-59.

[7] Dhillon D, Chouhan R. Edge-preserving image denoising using noise-enhanced patch-based non-local means[J]. Multimedia Systems, 2023, 29(3): 1025-1041.

[8] 张莹莹, 任超, 朱策. 基于形状自适应非局部回归和非局部梯度正则的深度图像超分辨[J]. 计算机应用, 2022, 42(6): 1941-1949.
Zhang Ying-ying, Ren Chao, Zhu Ce. Depth image super-resolution based on shape-adaptive non-local regression and non-local gradient regularization[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(6): 1941-1949.

[9] Hongyu W, Ying L, Songtao D, et al. Adaptive denoising for magnetic resonance image based on nonlocal structural similarity and low-rank sparse representation[J]. Cluster Computing, 2023, 26(5): 2933-2946.

[10] Abdelkader R, Ramou N, Khorchef M. Welding defects detection in radiographic images using an improved denoising technique combined with an enhanced Chan-Vese model[J]. International Journal of Engineering Research in Africa, 2022, 60: 155-172.

[11] 龙超, 金恒, 黎玲, 等. 基于特征融合的非局部均值CT图像降噪[J]. 光学学报, 2022, 42(11): 281-291.
Long Chao, Jin Heng, Li Ling, et al. CT image denoising with non-local means based on feature fusion[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(11): 281-291.

[12] Zhang H, He Z, Wang X. A novel mesh denoising method based on relaxed second-order total generalized variation[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2022, 15(1): 1-22.

[13] 王春智, 牛宏侠. 基于直方图均衡化与MSRCR的沙尘降质图像增强算法[J]. 计算机工程, 2022, 48(9): 223-229.
Wang Chun-zhi, Niu Hong-xia. Sand-dust degraded image enhancement algorithm based on histogram equalization and MSRCR[J]. Computer Engineering, 2022, 48(9): 223-229.

[14] Popa J, Lou Y, Minkoff S E. Low-rank tensor data reconstruction and denoising via ADMM: Algorithm and convergence analysis[J]. Journal of Scientific Computing, 2023, 97(2): 1-26.

[15] 黄小莉, 陈春梅, 刘桂华. 混合二阶全变分的抗核辐射图像降噪方法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2022, 34(4): 585-594.
Huang Xiao-li, Chen Chun-mei, Liu Gui-hua. A hybrid second-order total variational noise reduction method for radiation-resistant images[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2022, 34(4): 585-594.

[16] An B, Kim Y. Image link through adaptive encoding data base and optimized GPU algorithm for real-time image processing of artificial intelligence[J]. Journal of Web Engineering, 2022, 21(2): 459-496.