



暨南大学
JINAN UNIVERSITY

暨南大学计算机科学系

《图像工程与处理》课程设计

成绩:

题 目: 一种新的去除随机脉冲噪声的
 方向加权中值滤波器

姓 名: 吕帅

学 号: 202234261009

专 业: 电子信息（计算机技术）

课程类别: 专业学位课

任课老师: 彭青玉

提交日期: 2023 年 7 月 6 日

0 摘要

传统基于中值的去噪方法在恢复受低噪声级别的随机值脉冲噪声影响的图像时效果较好,但在高度受损的图像上效果较差。本文提出了一种新的脉冲检测器,该检测器基于当前像素与其沿着四个主要方向对齐的邻域像素之间的差异。然后,我们将其与加权中值滤波器相结合,得到一种新的定向加权中值(Directional Weighted Median, DWM)滤波器。大量的仿真实验证明,所提出的滤波器不仅在抑制高噪声级别的脉冲方面表现更好,而且能够保留更多的细节特征,甚至是细线条,该滤波器在恢复受损的彩色图像方面也表现出色。

关键词: 图像去噪, 脉冲检测器, 随机值脉冲噪声

1 引言

在图像采集和传输过程中,常常会引入脉冲噪声。根据噪声值的不同,可以将其分类为较容易恢复的椒盐噪声和较难处理的随机值脉冲噪声^[1]。对于前者,已经有更多的去除方法,并且其中一些方法表现出很好的效果^[2-5]。因此,在这里我们只关注去除随机值脉冲噪声。

在各种脉冲噪声处理方法中,中值滤波器^[6]因其有效的噪声抑制能力和高计算效率而得以广泛应用。然而,它通过邻域像素的中值来均匀替换每个像素的灰度值,当窗口大小较大时会移除一些理想的细节。

为了改进中值滤波器,提出了许多带有脉冲检测器的滤波器,例如信号相关排序均值(SD-ROM)滤波器^[7]、多状态中值(MSM)滤波器^[1]、自适应中心加权中值(ACWM)滤波器^[8]、逐像素中值绝对偏差(PWMAD)滤波器^[9]和迭代中值滤波器^[10]。这些滤波器通常表现良好,但当噪声级别高于 30%时,它们倾向于从图像中移除许多特征或保留过多的脉冲噪声。

本文提出了一种新的脉冲检测器,它利用当前像素与其与四个主要方向对齐的邻域像素之间的差异。在脉冲检测之后,我们不仅仅通过中值滤波器的输出来简单替换识别出的噪声像素,而是继续利用四个方向的信息来加权处理窗口中的像素,以在去除噪声的同时保留细节。我们的定向加权中值(DWM)滤波器在

去除随机值脉冲噪声方面比其他基于中值的滤波器表现更好，特别是当噪声级别高达 60% 时。此外，它还能保留更多的细节特征，甚至是细线条。我们还将 DWM 滤波器扩展到去除受到随机值脉冲噪声影响的彩色图像，该情况下也表现出色。

本文的组织结构如下：第二节介绍了新的脉冲检测器的构建。第三节展示了滤波框架。第四节提供了一系列实验结果来证明新滤波器的性能。最后，在第五节中得出结论。

2 脉冲检测器

在介绍新的脉冲检测器之前，我们先回顾一个基本假设：无噪声的图像由局部平滑变化的区域和边缘分隔开。在这里，我们将重点关注与图 1 所示的四个主要方向对齐的边缘。

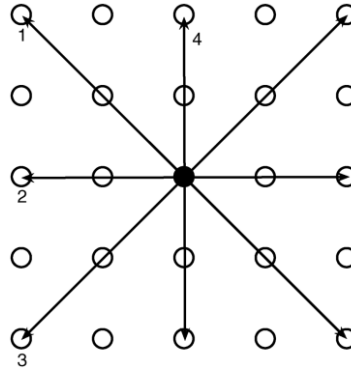


图 1 脉冲检测的四个方向

令 $S_k (k = 1 \text{ to } 4)$ 表示以 $(0,0)$ 为中心，与第 k 个方向对齐的坐标集合。

$$\begin{aligned} S_1 &= \{(-2, -2), (-1, -1), (0,0), (1,1), (2,2)\} \\ S_2 &= \{(0, -2), (0, -1), (0,0), (0,1), (0,2)\} \\ S_3 &= \{(2, -2), (1, -1), (0,0), (-1,1), (-2,2)\} \\ S_4 &= \{(-2,0), (-1,0), (0,0), (1,0), (2,0)\}. \end{aligned} \quad (1)$$

然后，对于所有的从 1 到 4 的 k ，令 $S_k^0 = S_k \setminus (0,0)$ 。在以 (i,j) 为中心的 5×5 窗口中，对于每个方向，定义 $d_{i,j}^{(k)}$ 为 $y_{i+s,j+t}$ 与 $y_{i,j}$ 之间灰度值的绝对差值之和，其中 $(s,t) \in S_k^0$ 。考虑到对于空间距离较小的两个像素，它们的灰度值应该接近，我们会对最接近的两个像素之间的绝对差值使用较大的权重值 w_m 进行加权，再计算总和。然而，如果 w_m 很大，将导致 $d_{i,j}^{(k)}$ 主要由 w_m 对应的差值决定。因此，令 $w_m = 2$ ，即距离比的倒数。因此，我们有：

$$d_{i,j}^{(k)} = \sum_{(s,t) \in S_k^0} w_{s,t} |y_{i+s,j+t} - y_{i,j}|, 1 \leq k \leq 4 \quad (2)$$

其中,

$$w_{s,t} = \begin{cases} 2, & (s,t) \in \Omega^3 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$\Omega^3 = \{(s,t): -1 \leq s, t \leq 1\} \quad (4)$$

我们将 $d_{i,j}^{(k)}$ 称为方向索引。每个方向索引对与给定方向对齐的边缘敏感。然后,这四个方向索引中的最小值用于脉冲检测,表示为:

$$r_{i,j} = \min \{d_{i,j}^{(k)}: 1 \leq k \leq 4\} \quad (5)$$

现在,我们将讨论 $r_{i,j}$ 在三种情况下的取值:

- 1) 当前像素是无噪声的平坦区域像素, $r_{i,j}$ 较小, 因为四个方向索引都较小。
- 2) 当前像素是边缘像素, $r_{i,j}$ 也较小, 因为至少有一个方向索引较小。
- 3) 当前像素是脉冲, $r_{i,j}$ 较大, 因为四个方向索引都较大。

在 $r_{i,j}$ 的定义中, 我们充分利用了与四个方向对齐的信息。因此, 从上述分析中我们可以发现, 通过使用一个阈值 T , 无论它们是在平坦区域、边缘还是细线上, 我们可以将脉冲与无噪声像素区分开来。然后, 我们将脉冲检测器定义为:

$$y_{i,j} \text{ is a } \begin{cases} \text{noisy pixel,} & \text{if } r_{i,j} > T \\ \text{noise-free pixel,} & \text{if } r_{i,j} \leq T \end{cases} \quad (6)$$

3 DWM 滤波器

在脉冲检测之后, 大多数基于中值的滤波器会用窗口内的中值替换噪声像素。在这里, 我们将基于四个方向的信息改进中值滤波器的输出。

首先, 我们分别计算与 $(s,t) \in S_k^0$ ($k = 1$ 到 4) 对应的所有 $y_{i+s,j+t}$ 的灰度值的标准差 $\sigma_{i,j}^{(k)}$, 定义如下:

$$l_{i,j} = \operatorname{argmin} k \{ \sigma_{i,j}^{(k)} : k = 1 \text{ to } 4 \} \quad (7)$$

其中，操作符 argmin 表示找到一个函数的最小值。由于标准差描述了一组像素值在均值周围聚集的紧密程度， $l_{i,j}$ 表示与该方向对齐的四个像素彼此最接近。因此，为了保持边缘（甚至细线条）的完整性，中心值也应该接近它们。因此，我们对这些像素分配权重 \tilde{w}_m ，并恢复噪声像素为：

$$m_{i,j} = \text{median}\{\tilde{w}_{s,t} \diamond y_{i+s,j+t} : (s,t) \in \Omega^3\} \quad (8)$$

其中， $\tilde{w}_{s,t} = \begin{cases} \tilde{w}_m, & (s,t) \in S_{l_{i,j}}^0 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$ ， \diamond 表示重复操作^[11]。考虑到脉冲噪声的影响，我们仅仅使用 $\tilde{w}_m = 2$ 。

现在，根据以上的符号表示，我们可以给出 DWM 滤波器的输出结果为：

$$u_{i,j} = \alpha_{i,j} y_{i,j} + (1 - \alpha_{i,j}) m_{i,j} \quad (9)$$

其中，

$$\alpha_{i,j} = \begin{cases} 0, & r_{i,j} > T \\ 1, & r_{i,j} \leq T \end{cases} \quad (10)$$

为确保检测的高准确性，我们使用递归和迭代的方式，并逐渐减小阈值。在早期迭代中，使用较大的阈值，脉冲检测器仅识别最有可能是噪声的像素。在后续的迭代中，我们减小阈值以包括更多的噪声。通过对各种图像进行广泛的模拟实验，我们观察到对于 8 位灰度图像，以下阈值选择始终产生令人满意的结果，即：

$$T_0 = 510, \text{ and } T_{n+1} = T_n \cdot 0.8 (n \geq 0) \quad (11)$$

其中 T_0 是初始阈值， T_n 是第 n 步的阈值。通常情况下，最大迭代次数 N_{\max} 的取值范围为[5, 10]。

4 仿真

在本节中，我们将 DWM 滤波器与一些现有的基于中值的滤波器进行比较，以去除随机值脉冲噪声。

4.1 图像恢复的比较

恢复结果的定量测量采用峰值信噪比（peak signal-to-noise ratio, PSNR），

定义如^[12]所示。表 1 显示了使用了不同噪声比率损坏的 512×512 图像 “Lena” 下不同滤波器得到的最佳结果的 PSNR 值。在 DWM 滤波器中，我们分别使用 $N_{\max} = 8、9、9、10、10$ 。

表 1 在 PSNR (dB) 方面的恢复结果比较

方法	“Lena” 图像				
	20%	30%	40%	50%	60%
中值滤波器 ^[6]	32.37	30.00	27.64	24.28	21.58
SD-ROM ^[7]	35.72	32.77	29.85	26.80	23.41
PSM 滤波器 ^[13]	35.09	30.85	28.92	26.12	22.06
MSM 滤波器 ^[1]	35.44	31.67	29.26	26.11	22.14
ACWM 滤波器 ^[8]	36.07	32.59	28.79	25.19	21.19
PWMAD 滤波器 ^[9]	36.50	33.44	31.41	28.50	24.30
迭代中值滤波器 ^[10]	36.90	31.76	30.25	24.76	22.96
DWM 滤波器	37.15	34.87	32.62	30.26	26.74

可以看出，我们提出的滤波器在 PSNR 方面提供了最佳结果。特别是当噪声比率大于 30% 时，DWM 滤波器的 PSNR 值比最接近的竞争滤波器高出 1dB。为了主观比较结果，我们在图 2 中给出一些恢复的图像。显然，DWM 滤波器的表现更好。其他滤波器恢复的图像存在许多噪点，而 DWM 滤波器减少明显的噪声。

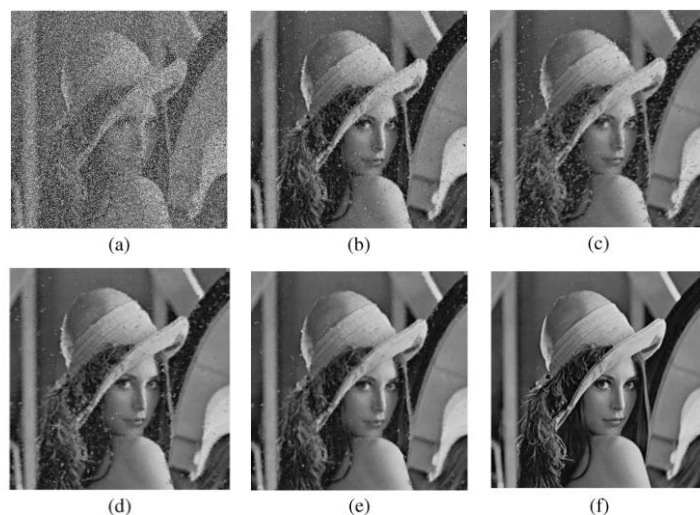


图 2 不同滤波器在恢复 60% 受损图像 “Lena” 方面的结果

(a) 带噪声的图像 (b) SD-ROM 滤波器 (c) MSM 滤波器
(d) PWMAD 滤波器 (e) DWM 滤波器 (f) 原始图像

我们还比较了恢复具有完整特征的图像，例如“桥”和“船”，恢复结果的 PSNR 值列在表 2 中。对于 DWM 滤波器，我们分别使用了 $N_{\max} = 7、8、10、8、9、10$ 。

表 2 在 PSNR (dB) 方面的恢复结果比较

方法	“桥” 图片			“船” 图片		
	40%	50%	60%	40%	50%	60%
SD-ROM 滤波器	23.80	22.42	20.66	26.45	24.83	22.59
MSM 滤波器	23.55	22.03	20.07	25.56	24.27	22.21
ACWM 滤波器	23.23	21.32	19.27	26.17	23.92	21.37
PWMAD 滤波器	23.83	22.20	20.83	26.56	24.85	22.32
DWM 滤波器	24.28	23.04	21.56	27.03	25.75	24.01

从表 2 可以看出，DWM 滤波器仍然比其他滤波器提供更好的结果。图 3 显示了图像“船”的放大区域，展示了我们的滤波器在图像细节上的表现。很容易看出，DWM 滤波器获得了出色的恢复结果。它能够有效去除大部分噪声，同时非常好地保留了细节，甚至是细线条。

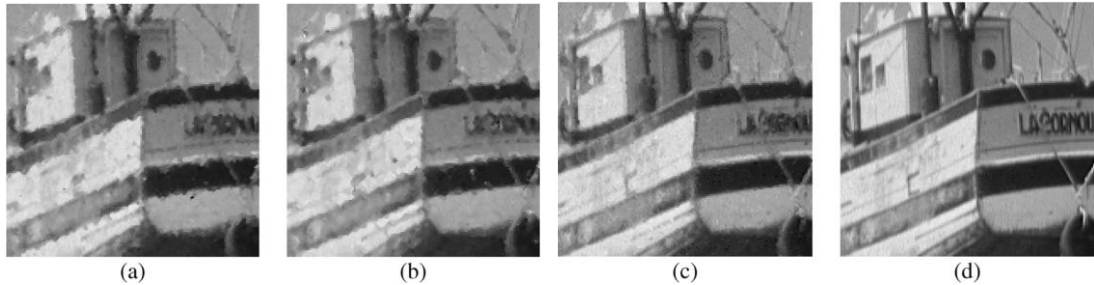


图 3 不同滤波器在恢复 40% 受损图像“船”方面的放大区域结果

(a) SD-ROM 滤波器（带训练） (b) PWMAD 滤波器
(c) DWM 滤波器 (d) 原始图像

4.2 噪声检测的比较

为了良好的性能，噪声检测的能力非常重要。我们在表 3 中列出了漏检的噪声像素数量的“miss”项和被误判为噪声的无噪声像素数量的“false”项。

由于随机值脉冲噪声的一些值与其邻居的差异并不像椒盐噪声^[12]那样大，因此在检测随机值脉冲噪声时，可能会有更多被误判为噪声的无噪声像素。在表

3 中, 尽管一些方法 (如 SD-ROM 和 ACWM 滤波器) 产生的 “false” 值比 DWM 滤波器少, 但未识别出的噪声像素过多, 而这些噪声像素导致明显的噪点存在。与其他方法相比, 即使噪声水平高达 60%, DWM 滤波器也能够在相对较少的错误中区分更多的噪声像素。此外, 如果我们计算 “miss” 项和 “false” 项的总和, DWM 滤波器在所有方法中具有最小的值。

表 3 图像 “Lena” 受随机值脉冲噪声损坏的检测结果比较

方法	40%		50%		60%	
	miss	false	miss	false	miss	false
SD-ROM	22842	411	32566	998	45365	2651
MSM	16582	7258	20857	10288	26169	15778
ACWM	16052	1759	23683	2895	32712	7644
PWMAD	11817	9928	14490	15003	17760	19577
DWM	9512	7761	9514	11373	12676	12351

4.3 彩色图像应用

与 BDND 滤波器^[5]类似, DWM 滤波器也可以扩展到对彩色图像去除随机值脉冲噪声。在脉冲检测器中, 我们将每个颜色分量视为独立实体。在计算与三个颜色通道对应的方向索引后, 我们将它们相加, 并找到最小值作为 $r_{i,j}$, 类似于公式 (5) 中的操作。然后, 脉冲检测器可以按照公式 (6) 中的方式定义。在噪声滤波中, 将使用 3×3 窗口的向量中值滤波器^[14]来恢复已经被识别出的噪声像素。



图 4 恢复 50% (左边两张) 和 60% (右边两张) 受损彩色图像 “Lena” 的结果
(a)和(c)向量中值滤波器; (b)和(d) DWM 滤波器 (使用 $T_0=1275$, $N_{\max}=10$)

图 4 展示了向量中值滤波器和 DWM 滤波器在恢复 50% 和 60% 受损图像“Lena”时的结果。可以清楚地看到,通过向量中值滤波器恢复的图像非常模糊,仍然包含许多明显的噪点,特别是对于恢复 60% 噪声水平的图像结果。相比之下,DWM 滤波器的表现更好,能够成功抑制噪声并保留更多的细节。

5 结论

在本文中,我们提出了一种新的基于中值的滤波器,用于去除随机值脉冲噪声,即 DWM 滤波器。它充分利用了脉冲和边缘的特点来检测和恢复噪声。仿真结果表明,DWM 滤波器在主观和客观(PSNR)评估中的表现要好于许多现有的基于中值的滤波器。特别是在去除噪声的同时,它能够很好地保留边缘,甚至是细线条。此外,它可以扩展到恢复受随机值脉冲噪声损坏的彩色图像,并且表现良好。在这里,我们只考虑了四个主要方向。然而,如果有更多关于图像细节的信息,可以很容易地对其进行改进。

6* 思考与分析

这篇论文介绍了一种新的图像去噪方法,名为方向加权中值滤波器(DWM),用于去除随机值脉冲噪声。这篇论文的**创新点**在于它能够有效地区分图像中的平坦区域、边缘和脉冲噪声,并通过结合加权中值滤波和方向信息对噪声像素进行恢复。

为什么这篇论文的滤波效果那么好? **从物理学的角度来看**,图像的方向信息反映了图像的局部结构和变化,如平坦区域、边缘、纹理等。这些结构和变化是图像的重要特征,也是人眼感知图像的依据。随机值脉冲噪声是一种非结构化的干扰,它会破坏图像的方向信息,导致图像质量下降。**利用方向信息来检测和恢复噪声**,可以有效地保持图像的结构和变化,提高图像质量。另外,**从数学的角度来看**,图像的方向信息可以用一些数学工具来描述和提取,如梯度、方向导数、方向滤波器等量化地衡量图像在不同方向上的差异和相似度。随机值脉冲噪声会导致图像在某些方向上出现异常大或小的差异,而在其他方向上保持相似。因此,

利用方向信息来检测和恢复噪声，可以有效地区分噪声和非噪声像素，以及根据不同方向上的相似度来加权平滑噪声像素。

同时，通过阅读论文也获得了一些启示：首先，图像去噪方法应该充分利用图像的局部结构信息，如方向、边缘和纹理等，以提高去噪效果并保持图像质量；其次，图像去噪方法需要考虑自适应性，即能够根据不同的噪声水平和图像特征来调整参数和策略；此外，设计图像去噪方法的通用性非常重要，使其能够处理不同类型和分布的噪声，适用于不同的图像模态和格式。

在应用领域的思考方面，我认为这篇论文提出的方向加权中值滤波器(DWM)是一种适用于医学图像去噪的有效算法，在提高医学图像质量和可分析性方面具有重要意义。例如，将 DWM 算法应用于去除超声图像中的斑点噪声，将 DWM 算法应用于去除核磁共振(MRI)图像中的高斯白噪声，DWM 算法也可以与基于神经网络或深度学习的算法进行结合，在保持 MRI 图像质量和对比度的同时，使得客观评价指标（如 PSNR、SSIM 等）上取得更高的数值。

参考文献

- [1] Chen, Tao, and Hong Ren Wu. "Space variant median filters for the restoration of impulse noise corrupted images." *IEEE transactions on circuits and systems II: analog and digital signal processing* 48.8 (2001): 784-789.
- [2] Hwang, Humor, and Richard A. Haddad. "Adaptive median filters: new algorithms and results." *IEEE Transactions on image processing* 4.4 (1995): 499-502.
- [3] Zhang, Shuqun, and Mohammad A. Karim. "A new impulse detector for switching median filters." *IEEE Signal processing letters* 9.11 (2002): 360-363.
- [4] Chan, Raymond H., Chung-Wa Ho, and Mila Nikolova. "Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization." *IEEE Transactions on image processing* 14.10 (2005): 1479-1485.
- [5] Ng, Pei-Eng, and Kai-Kuang Ma. "A switching median filter with boundary discriminative noise detection for extremely corrupted images." *IEEE Transactions on image processing* 15.6 (2006): 1506-1516.
- [6] W. K. Pratt, "Median filtering," Image Process. Inst., Univ. Southern California, Los Angeles, Sep. 1975, Tech. Rep..
- [7] Abreu, Eduardo, et al. "A new efficient approach for the removal of impulse noise from highly

- corrupted images." *IEEE transactions on image processing* 5.6 (1996): 1012-1025.
- [8] Chen, Tao, and Hong Ren Wu. "Adaptive impulse detection using center-weighted median filters." *IEEE signal processing letters* 8.1 (2001): 1-3.
- [9] Crnojevic, Vladimir, Vojin Senk, and Zeljen Trpovski. "Advanced impulse detection based on pixel-wise MAD." *IEEE Signal processing letters* 11.7 (2004): 589-592.
- [10] Luo, Wenbin. "A new efficient impulse detection algorithm for the removal of impulse noise." *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences* 88.10 (2005): 2579-2586.
- [11] Brownrigg, David RK. "The weighted median filter." *Communications of the ACM* 27.8 (1984): 807-818.
- [12] A. Bovik, Handbook of Image and Video Processing. New York: Academic, 2000.
- [13] Wang, Zhou, and David Zhang. "Progressive switching median filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images." *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing* 46.1 (1999): 78-80.
- [14] Astola, Jaakko, Petri Haavisto, and Yrjo Neuvo. "Vector median filters." *Proceedings of the IEEE* 78.4 (1990): 678-689.