

# 基于均值操作的快速自适应滤波器

张政 张宇 马樟萼 王希勤

(清华大学电子工程系信号检测教研组, 北京 100084)

**摘要** 为了满足图象实时处理对算法速度和高斯噪声、脉冲噪声混合的噪声环境对算法鲁棒性的要求, 以及适应能够同时抑制高斯噪声和脉冲噪声的需要, 提出了一种可以有效滤除混合噪声(高斯噪声和正负脉冲噪声), 而且可以快速实现的自适应滤波器——ABA滤波器。ABA滤波器应用了自适应的滤波结构, 它将对脉冲噪声和高斯噪声、边缘区域和平坦区域分别进行处理; 它的自适应判断和操作以均值操作为主, 并将均值操作的结果充分利用在自适应处理中。实验仿真所得的数据显示, 在脉冲噪声的密度小于10%的情况下, 与其它一些滤波器相比, ABA滤波器的图象噪声抑制效果(包括主观的视觉效果和客观的信噪比改善)有所改善或基本相仿, 但滤波器的运算量大大减少, 可以应用在实时图象处理系统中。

**关键词** 图象处理 自适应滤波器 混合噪声 噪声滤除 边缘检测 视频信号处理

**中图法分类号:** TP317.4 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-8961(2000)06-0530-05

## An Averaging-Based Adaptive Filter

ZHANG Zheng, ZHANG Yu, MA Zhang-e, WANG Xi-qin

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** This paper presents a new filter, called Averaging-Based Adaptive Filter (ABA Filter), whose objective is to overcome the deficiency of current filters that they can not simultaneously possess the merits of both efficiency and simplicity when dealing with mixed noise. Although adaptive filters are robust owing to their effectual structures, the complexity of these filters is generally too great to be realized in real time. However, for video applications, it is very important to design a fast filter. Compared with other adaptive filters, ABA filter uses averaging as its major operation and the averaging value is utilized repeatedly in its adaptive processing so that it needs much less processing time. The adaptive structure makes ABA filter able to adopt different algorithms according to different noise and different image areas. The experimental results show clearly that, when the density of impulse noise is lower than 10%, ABA filter is capable of eliminating the mixed Gaussian noise and impulse noise with much fewer operations.

**Keywords** Image processing, Adaptive filter, Mixed noise, Noise removal, Edge detection, Video processing

## 0 引言

图象在拍摄和传输过程中, 由于所使用的器件和传输通道的局限性, 而被加入了大量的噪声, 严重影响了图象的视觉效果, 甚至妨碍了人们的正常识别。因此, 图象的噪声滤除就成为图象处理的一项重要任务。目前最常用的图象去噪工具是均值滤波

器(Mean Filter)和中值滤波器(Median Filter), 它们分别是线性滤波器和非线性滤波器的代表。两者不仅算法迥然不同, 而且均值滤波器和中值滤波器它们针对的是不同的噪声源, 其中, 均值滤波器主要用来抑制高斯噪声, 而中值滤波器则主要用来抑制脉冲噪声。但当面对高斯噪声和脉冲噪声组成的混合噪声时, 二者皆无法达到很好的效果, 而混合滤波器(Hybrid Filter)就是为了解决这一问题而提出

的. 所谓混合滤波器<sup>[1,2]</sup>就是将线性滤波器和非线性滤波器进行某种形式的并联或级联, 以便对两种噪声都有一定的抑制作用. 它通常采用一个可调的参数, 在线性滤波和非线性滤波之间进行调节, 所以, 混合滤波器是一种折衷的改进方法. 与此不同, 另一类滤除混合噪声的滤波器——自适应滤波器 (Adaptive Filter)<sup>[3-6]</sup>, 则是根据对图象局部特征判断, 采用不同的滤波方法, 分别抑制高斯噪声和脉冲噪声, 以更好地发挥线性滤波器或非线性滤波器的作用.

然而, 自适应滤波器普遍存在着计算复杂、运算量大的问题. 大家知道, 在图象的实时处理中, 算法的快速性是衡量一种算法可行性的首要条件. 而过于复杂的滤波器, 是不能接受的. 本文就是力图找到一种既快速而又有效的滤波算法.

均值算法虽因其破坏图象边缘而具有局限性, 但其也有简单快速的优势, 因为它只包括有限步的简单加法和一次乘法. 而其它非线性算法(如中值算法), 都需要排序运算, 从而带来了大量的比较和存取操作, 因此, 其运算量是相同窗口下均值算法的数倍, 甚至更多. 如果能够在均值操作的基础上, 开发出一种有效的噪声滤除方法, 对于图象实时处理大有裨益. 同时, 应该注意这样一个事实, 即窗口内的均值本身就是一个重要的图象局部信息, 它可以表征图象的某些特征. 若将它结合到自适应滤波处理中, 便完全有可能弥补均值滤波器在克服脉冲噪声干扰方面的不足. 通过研究, 本文提出一种基于均值操作的自适应滤波器 (Averaging-Based Adaptive Filter).

## 1 基于均值操作的快速自适应滤波器

由于均值操作对脉冲噪声相当敏感, 因此在利用均值算法滤除噪声之前, 必须对图象中的脉冲噪声有所判断和处理. 另外, 均值算法还存在比较严重的破坏边缘的缺陷. 大家知道, 图象的边缘通常包含重要的细节, 同时视觉感知又极大地依赖于边缘信息, 所以, 对边缘的判断和处理也是非常必要的. 基于上述思路, 本文提出了具有如图1所示结构的自适应滤波器.

此种自适应结构充分考虑了不同的噪声源和不同的图象局部特征, 应该说, 这是一种比较典型的结构, 在其它一些文章中也有类似思路<sup>[4]</sup>. 但是具体以

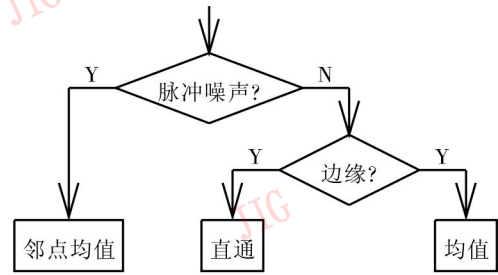


图1 自适应算法结构

何种标准进行判断以及相应地应采取何种滤波算法, 却各有不同. 本文所提出的算法, 其出发点是基于实时的图象去噪, 因此该算法采用的是以均值操作为主的简单运算.

这种处理就是滤波器首先对脉冲噪声予以识别和滤除. 目前对脉冲噪声的识别有好几种方法<sup>[4,7,8]</sup>, 其出发点都是从窗口中心点与其相邻点之间灰度值上的差异来考虑. 本文所采用的方法是, 先计算处理窗口  $W$  内, 除去中心点外其余点的灰度均值  $AVRG_1$  (本文称其为邻点均值), 再将其与中心像素点的灰度值比较, 若其差值的绝对值大于某一门限  $T_1$ , 则被判为脉冲噪声, 并可直接将此排除了脉冲噪声点的窗口均值  $AVRG_1$  作为滤波器的输出. 如果脉冲噪声的密度不是太高(对于  $3 \times 3$  的窗口, 脉冲噪声的密度不宜高于 10%), 则  $AVRG_1$  受到窗口内其它脉冲噪声点的影响不会很大, 这种对脉冲噪声的线性处理方法, 在快速的同时, 可以达到较理想的效果.

大家知道, 脉冲噪声多表现为或亮(正脉冲噪声)或暗(负脉冲噪声)的像素点, 其灰度值分布在灰度级的两端. 这里, 对正脉冲噪声和负脉冲噪声的识别只使用了一个相同的门限  $T_1$ . 显然, 可以在暗区域将识别负脉冲噪声的门限绝对值相对降低, 同样在亮区域也可将识别正脉冲噪声的门限绝对值相对降低. 不过, 在暗区域, 对图象上负脉冲噪声不够敏感, 而在亮区域又对正脉冲噪声不敏感, 所以, 可以仅根据实际处理图象中脉冲噪声的灰度范围、高斯噪声的方差和图象的平均亮度, 选择使用一个比较合适的门限值.

在排除脉冲噪声点的干扰之后, 滤波器将对高斯噪声进行处理. 此时, 均值滤波便可以很好地发挥其优势, 而且由上一步计算已经得到的邻点均值也将被利用, 也就是说, 只需再花费一次加法和一次乘法的计算量即可完成处理.

根据前面的分析, 在均值滤波之前, 还需对边缘

进行适当的判断和处理. 目前对边缘的判断也有不少方法, 如计算窗口内局部方差值. 但本文仍以快速有效为原则, 采用传统的差分算子来检验图象边缘. 这里, 将选用 Roberts 梯度算子  $GM$ , 它的定义如下:

$$GM(i, j) = |f(i, j) - f(i-1, j-1)| + |f(i-1, j) - f(i, j-1)| \quad (1)$$

其中,  $f(i, j)$  为窗口中心像素点, 其余为其相邻点 (如图 2 所示).

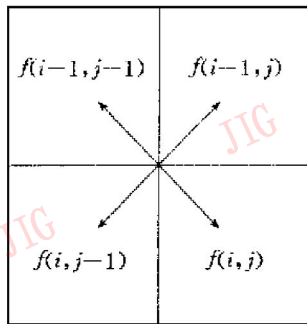


图 2 求梯度的差分算法

如果梯度值  $GM(i, j)$  大于某一门限值  $T_2$ , 则将此中心点  $f(i, j)$  判为处于图象边缘的点, 将予以直通, 也就是直接将该点作为输出, 以最大程度地保存边缘信息; 否则, 以整个窗口内的平均亮度  $AVRG_2$  作为最终输出. 值得注意的是, 由于 Roberts 梯度算子对斜方向敏感, 因而对边缘处理有偏向性, 若计算速度允许, 可考虑使用拉普拉斯算子.

$T_2$  的选择, 同样与图象的局部性质有关. 根据韦伯定理, 人的视觉在亮区域对噪声的敏感程度比在暗区域时小, 因此, 在亮区域, 可以适当减弱去噪, 而着力于多保存细节; 在暗区域, 则尽量地抑制噪声. 由此, 可以将  $T_2$  设置为与局部亮度  $AVRG_2$  相关的门限, 即  $AVRG_2$  大的区域,  $T_2$  略小;  $AVRG_2$  小的区域,  $T_2$  略大. 这里, 令

$$T_2 = -k \times AVRG_2 + b \quad (2)$$

式中,  $k$  为调节系数,  $k$  值越小, 去噪越强; 反之, 边缘保护越好, 因此  $k$  值可根据不同需要调节.  $b$  为门限  $T_2$  的最大值, 它与所使用的差分算子和图象的边缘突出程度有关. 由式(2)可见, 在确定门限  $T_2$  的自适应运算中, 再次有效地利用了图象窗口内的均值.

还有一点细节值得注意. 当脉冲噪声处理完毕, 应该用处理结果取代原先该点的灰度值, 以参与以后的滤波处理. 否则, 将会影响到第二步对图象边缘的判断, 也会影响其它相邻窗口内均值的大小.

综上所述, 滤波器的最终输出  $y(i, j)$  表示如下:

$$\begin{aligned} & \text{IF } (|f(i, j) - AVRG_1| > T_1) \\ & \quad y(i, j) = AVRG_1; \\ & \text{ELSE IF } (GM(i, j) > T_2) \\ & \quad y(i, j) = f(i, j); \\ & \text{ELSE } y(i, j) = AVRG_2 \end{aligned} \quad (3)$$

对于  $3 \times 3$  的处理窗口,  $AVRG_1$  和  $AVRG_2$  可由图 3 表示, 图中黑点即代表参与平均的像素点. 可见, 整个滤波器的核心算法也就是这种简单的平均.

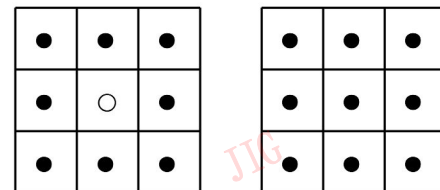


图 3  $3 \times 3$  窗口时  $AVRG_1$  和  $AVRG_2$

本文的自适应滤波器由于考虑了脉冲噪声和高斯噪声混杂的情况, 并对边缘进行了判断处理, 因此, 将能很有效地滤除混合噪声和保护图象边缘细节; 正是由于均值操作简单, 且其均值结果在自适应处理中又能充分利用, 因而使得此种滤波器具有快速实时的优点.

## 2 仿真结果

在对被叠加了混合噪声, 灰度级为 256 的图象 Lena 进行了不同算法的仿真后, 现对其滤波后的图象效果、信噪比改善和算法计算量作一比较.

在引言中, 曾介绍过混合滤波器是对付混合噪声的一种有效方法, 其中, FIR 中值混合(FMH)滤波器<sup>[1,9]</sup>是比较典型, 且综合效果较好的一种混合滤波器. 该滤波器是先在窗口内某几个感兴趣的方向上(如中心点的东南西北 4 个方向)分别求均值, 然后将计算结果与中心点归在一起求取中值, 作为输出. 其特点是所选取的几个方向上的细节保存较好, 计算量也不是很大, 但由于参与滤波的像素点有限, 因此它对噪声的抑制也比较有限.

自适应滤波是另一类被广泛研究的对付混合噪声的方法, 其具体结构不一而足. 这里再介绍一种与本文自适应滤波器有相似结构的 RAMPM (Robust Adaptive Mean P-Median) 滤波器<sup>[4]</sup>, 以便与本文进行比较. 虽然 RAMPM 滤波器对图象性质的判断和处理方法较复杂, 且计算量也非常大, 但滤波效果是相当不错的.

由于本文所提出的滤波器强调均值操作, 因此也将均值滤波器参与比较, 以观察它在对付混合噪声时的不足.

为陈述方便, 本文姑且称此基于均值操作的自适应滤波器为 ABA 滤波器 (Averaging-Based Adaptive Filter). 在仿真中, 我们对 ABA 滤波器设置如下参数

$$T_1 = 65, T_2 = -0.3 \times AVR G_2 + 160 \quad (4)$$

图 4 就是原图 Lena、叠加了混合噪声的 Lena 图象和几种  $3 \times 3$  滤波器的输出结果. 其中, 混合噪声为

绝对方差  $\sigma=20$  的高斯噪声和分布密度为 5% 的脉冲噪声 (即含有 2.5% 的灰度值为 255 的正脉冲噪声和 2.5% 灰度值为 0 的负脉冲噪声).

由图 4 可见, 均值滤波器的滤波效果受到脉冲噪声的严重干扰; FMH 滤波器对细节的保留最好, 但其对高斯噪声的抑制效果不佳, 表现为 Lena 图象面部不平滑; 而 RAMPM 滤波器和 ABA 滤波器均为自适应滤波器, 它们在保存边缘细节的基础上, 对脉冲噪声和高斯噪声都有较好的抑制作用.

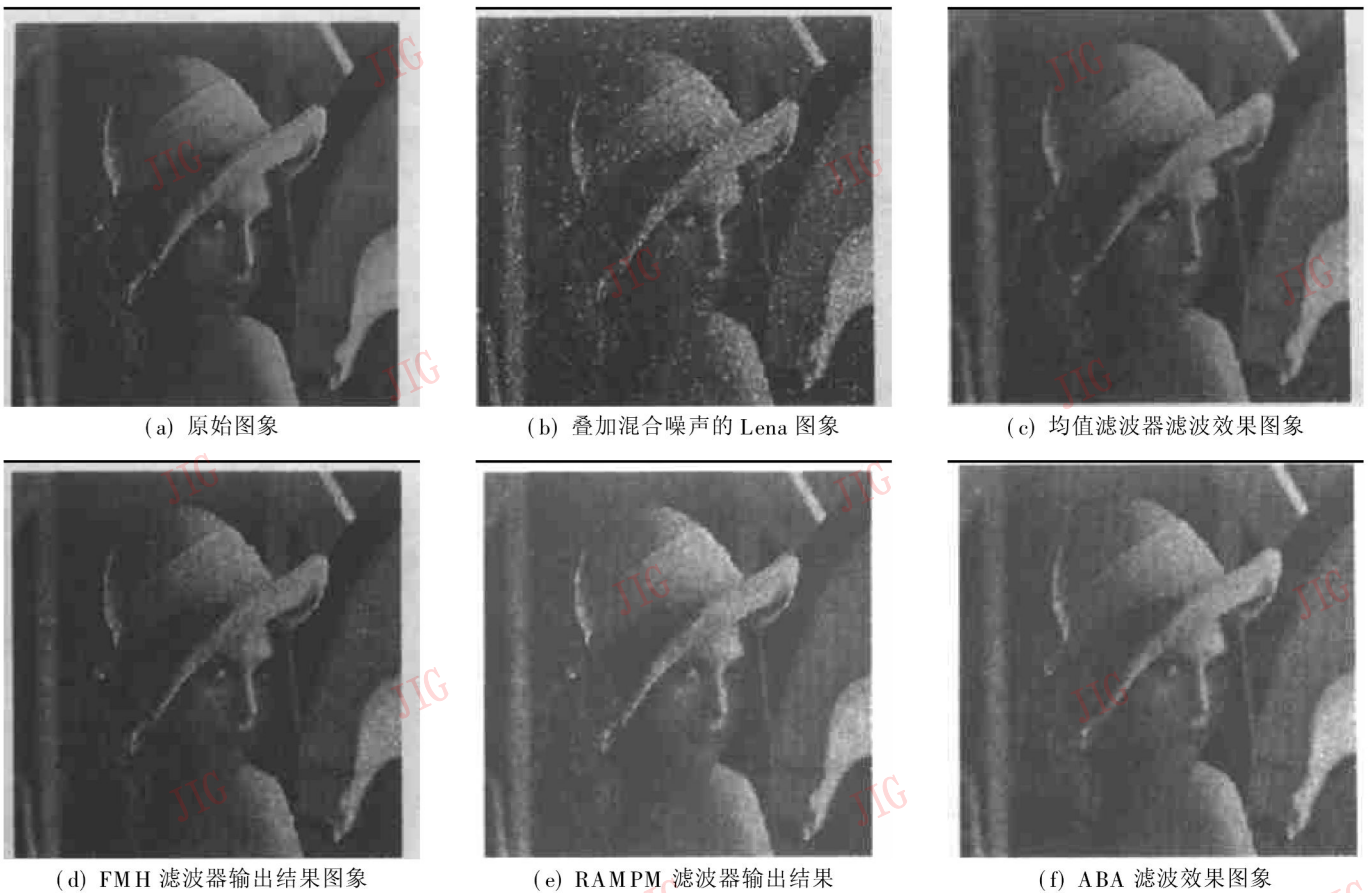


图 4 对 Lena 的滤波输出结果比较

对滤波效果的评价, 除了图象的主观视觉效果外, 信噪比的改善作为一种客观标准, 也是衡量滤波器去噪能力的重要标志. 因此本文定义一个信噪比改善因子  $SIF$  (SNR Improvement Factor)

$$SIF = -20 \log \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |y(i,j) - x(i,j)|}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |f(i,j) - x(i,j)|} \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

其中, 图象窗口的尺寸为  $N \times N$ ,  $y(i,j)$  为滤波器输出图象,  $x(i,j)$  为原始图象,  $f(i,j)$  为滤波器输入图象 (即叠加了混合噪声的图象).

若  $SIF$  为正数, 则说明滤波后噪声被抑制, 且

$SIF$  越大, 信噪比改善越明显.

另外, 再定义一个等效指令数  $EIN$  (Equivalent Instruction Number), 以衡量算法的计算量. 在线性滤波器中, 主要运用加法操作和少量的乘法操作以及比较操作; 在非线性滤波器中主要运用的是排序操作, 它由比较操作和存取操作组成. 为了进行比较, 可将每一步加法操作、乘法操作、比较操作或存取操作的运算量都等效为一条等效指令数, 这也符合不少处理芯片的规范. 其中, 计算中值运算的运算量时, 中值运算将采用冒泡排序的方法, 且排序操作进行到中值确定即结束.

表 1 就是在绝对方差  $\sigma=20$  的高斯噪声和不同

密度的脉冲噪声混合的情况下,各种  $3 \times 3$  滤波器对图象 Lena 滤波所得到的信噪比改善因子 *SIF* 和平均每点所需的等效指令数 *EIN*.

表1 滤波器指标比较

密度(%)	指标	MEAN	FMH	RAMPM	ABA
15	<i>SIF</i> (dB)	3.92	6.45	7.30	6.08
	<i>EIN</i> (/p)	9	28	70.3	17.5
10	<i>SIF</i> (dB)	4.28	5.82	6.37	6.06
	<i>EIN</i> (/p)	9	28	71.9	17.6
5	<i>SIF</i> (dB)	4.56	4.86	5.29	5.63
	<i>EIN</i> (/p)	9	28	72.9	17.8
2	<i>SIF</i> (dB)	4.71	4.11	4.53	5.26
	<i>EIN</i> (/p)	9	28	73.5	17.9

由表1可以清晰的看出,ABA滤波器的计算量约为RAMPM滤波器的1/4,也明显比FMH滤波器计算量少.这对实时的视频信号处理具有积极意义;从信噪比的改善程度来看,在脉冲噪声密度小于10%的情况下,ABA滤波器的信噪比改善因子*SIF*比RAMPM滤波器要略小,而当脉冲噪声密度减小时,它的信噪比改善最佳.但正如前面提到的,当脉冲噪声密度高于10%时, $3 \times 3$ 的ABA滤波器对脉冲噪声的判断和处理尚存在缺陷.

### 3 结论

本文提出的基于均值操作的快速自适应滤波器(ABA Filter),旨在用快速实时的方法来完成对混合噪声的滤除,以改进已有滤波器在有效性和实时性上无法兼顾的缺点.从仿真结果来看,在脉冲噪声密度不高于10%的条件下,ABA滤波器达到了预期的效果,能够快速有效地滤除混合噪声,是一种鲁棒性好又适于实时图象处理的滤波器.

### 参考文献

1 Fong Yu-Shan. Comparison study of nonlinear filters in image processing applications. *Optical Engineering*, 1989, 28(7): 749 ~ 760.

- Lee Yong Hoon. Generalized median filtering and related nonlinear filtering techniques. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1985, ASSP-33(3): 672~ 683.
- Sebastien Guillon. Adaptive Nonlinear Filters for 2D and 3D Image Enhancement. *Signal Processing*, 1998, 67(3): 237 ~ 254.
- Xu You. A robust adaptive estimator for filtering noise in images. *IEEE Trans. Image Processing*, 1995, 4(5): 693~ 699.
- Amlam Kundu. Combination median filter. *IEEE Trans. Image Processing*, 1992, 1(3): 422~ 429.
- Hwang H. Adaptive median filters: New algorithms and results. *IEEE Trans. Image Processing*, 1995, 4(4): 499~ 502.
- Reinhard Bernstein. Adaptive nonlinear filters for simultaneous removal of different kinds of noise in images. *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 1987, CAS-34(11): 1275~ 1291.
- Kundu A. Application of two-dimensional generalized mean filtering removal of impulse noises from images. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing.*, 1984, ASSP-32(3): 600 ~ 609.
- Pekka Heinson. FIR-median hybrid filters. *IEEE Trnas. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1987, ASSP-35(6): 832~ 838.



张政 清华大学电子工程系硕士研究生.主要从事数字信号处理和数字图象处理方面的研究.



张宇 清华大学电子工程系博士研究生.主要从事数字信号处理和数字图象处理方面的研究.