

一种自适应中值梯度倒数加权的图像滤波算法

王志军¹, 于之靖¹, 马凯², 吴军^{2*}, 诸葛晶昌¹

¹ 中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300;

² 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300

摘要 针对单独的线性滤波和非线性滤波方法难以解决混合噪声滤除的问题, 基于现有的标准自适应中值算法和梯度倒数加权平滑算法, 提出一种自适应中值梯度倒数加权的图像滤波算法。该算法自适应调节窗口大小检测出椒盐噪声并进行中值滤波处理, 同时通过设定的阈值对高斯噪声进行梯度倒数加权平滑, 以达到滤除混合噪声的目的。实验表明, 该算法与标准自适应中值滤波算法和梯度倒数加权平滑算法相比, 能够很好地滤除高斯噪声、椒盐噪声, 以及两者的混合噪声, 并且对高强度的图像噪声具有明显的滤波优势。

关键词 图像处理; 自适应中值; 梯度倒数加权; 混合噪声

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.121001

An Image Filtering Algorithm Based on Adaptive Median and Gradient Inverse Weight

Wang Zhijun¹, Yu Zhijing¹, Ma Kai², Wu Jun², Zhuge Jingchang¹

¹ College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

² College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract Based on the existing standard adaptive median filtering algorithm and gradient inverse weight smoothing algorithm, we propose an image filtering algorithm based on adaptive median and gradient inverse weight, aiming at the difficulty of mixed noise filtering by either single liner filter or non-linear filter. In order to filter the mixed noise, this algorithm adaptively adjust the window size to detect the salt & pepper noise and does median filtering, meanwhile, the gradient inverse weight smoothing is performed for the Gaussian noise by setting threshold. Experimental results show that this algorithm filters well for Gaussian noise, salt & pepper noise and the mixed noise, compared with the standard adaptive median filtering algorithm and the gradient inverse weight smoothing algorithm. And it has obvious filtering advantages for the high intensity image noise.

Key words image processing; adaptive median; gradient inverse weight; mixed noise

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 100.4997

1 引言

数字图像在采集、传输和处理过程中会受到外界环境噪声干扰、自身设备硬件限制以及信号转换误差的影响而产生图像噪声, 造成图像质量退化, 为图像后续的分析 and 研究带来不便^[1]。因此, 提高图像品质, 正确获取图像信息, 并对图像进行噪声滤除成了图像处理中的关键步骤。

收稿日期: 2017-06-05; **收到修改稿日期:** 2017-07-05

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合项目(U1533111)、中央高校基本科研业务费项目(3122017033)

作者简介: 王志军(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理相关方法方面的研究。E-mail: 1004409337@qq.com

导师简介: 于之靖(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事自动化检测技术、光纤传感技术和计算机视觉测量方面的研究。

E-mail: 13001303328@163.com

* **通信联系人.** E-mail: j-wu@cauc.edu.cn

数字图像噪声根据不同的分类标准可以细分为多种噪声,在实际应用中,高斯噪声和椒盐噪声对图像质量的影响较大,两者结合而成的混合噪声也较为常见^[2-4]。图像噪声滤波方法根据处理域不同分为空间域去噪和频域去噪,其中,空间域去噪又主要包括线型滤波器和非线性滤波器^[4-5]。线型滤波器中梯度倒数加权平滑(GIW)滤波器较传统的均值滤波器在平滑高图像噪声时能更好地保持图像边缘和细节信息,但在滤除图像椒盐噪声污染时效果不理想^[6-7]。非线性滤波器中的图像中值滤波是当前应用和研究的主流滤波方法,传统的中值滤波算法能够很好地去掉椒盐噪声,但由于该方法无区别地对所有点进行中值滤波处理,因此常会导致图像边缘模糊、细节破坏^[8-9]。文献[10]提出的标准自适应中值滤波器(AMF)通过调整处理窗口大小能够较好地滤除椒盐噪声,但边缘和细节的丢失仍比较明显;后续提出的由自适应中值算法衍生出的改进算法^[11-16]在椒盐噪声滤除方面的性能有很大提高,但在处理高斯噪声时仍有较大的局限性。鉴于单独利用线性滤波或非线性滤波滤除混合噪声均无法达到预期效果,文献[17]将梯度倒数加权与自适应中值滤波结合起来,但仅就该方法对椒盐噪声的滤除效果进行了研究;文献[7]将自适应窗口理论应用到梯度倒数加权滤波算法上,但仅对高斯白噪声的滤除情况进行了研究。本文提出一种自适应中值梯度倒数加权(AMGI)滤波算法,在邻域空间内不仅能够滤除单一的高斯噪声、椒盐噪声,而且还能很好地滤除两者的混合噪声。

2 算法原理及实现

2.1 AMF 算法

AMF 算法通过调节合适的邻域窗口尺寸,将窗口内像素点灰度值按照大小排序,获取排序后的中值,并用其替换所检测到的目标噪声像素点灰度值。假设待处理的噪声灰度图像中目标像素点的位置为 (i, j) , $x(i, j)$ 为该点的灰度值, w 为以点 (i, j) 为中心的 $n \times n$ ($n > 1$, 为奇数)邻域窗口, w_{\max} 为最大限制的 (i, j) 邻域窗口, $y(i, j)$ 为滤波处理后目标像素点 (i, j) 的输出灰度值。标准 AMF 的工作过程如下:

1) 令 $A_1 = z_{\text{med}} - z_{\min}$, $A_2 = z_{\max} - z_{\text{med}}$ 。如果 $A_1 > 0$ 且 $A_2 < 0$, 则进行下一步; 否则, 增大邻域窗口 w 的尺寸。若邻域窗口尺寸 $w < w_{\max}$, 重复步骤 1); 否则, 输出 $y(i, j) = z_{\text{med}}$ 。

2) 令 $B_1 = x(i, j) - z_{\min}$, $B_2 = x(i, j) - z_{\max}$ 。如果 $B_1 > 0$ 且 $B_2 < 0$, 则输出 $y(i, j) = x(i, j)$; 否则, 输出 $y(i, j) = z_{\text{med}}$ 。

上述步骤中 z_{\min} 表示像素点 (i, j) 邻域窗口 w 中的最小灰度值, z_{\max} 表示像素点 (i, j) 邻域窗口 w 中的最大灰度值, z_{med} 表示像素点 (i, j) 邻域窗口 w 中的中值灰度值。

2.2 GIW 算法

在灰度图像内以目标像素点 (i, j) 为中心, 取 $n \times n$ 的邻域窗口, 把中心像素点与其邻域窗口内像素点之间灰度差值的绝对值的倒数定义为各邻点的梯度加权值。目标像素点灰度值被邻域内像素点加权平均替代后, 在保证边缘和细节清晰的同时使图像得到平滑。为使平滑滤波后的像素灰度值仍在原图像灰度范围之内, 应将梯度倒数归一化处理作为加权系数。GIW 滤波器的实现过程如下:

1) 若 $x(i+u, j+v) = x(i, j)$, 令 $g(i+u, j+v) = 0$, 执行 3); 否则, 执行 2)。

2) $g(i+u, j+v) = 1/|x(i+u, j+v) - x(i, j)|$ 。

3) $G(i, j) = \sum_{u=-n}^n \sum_{v=-n}^n g(i+u, j+v)$, 若 $G(i, j) = 0$, 令 $r = 0$, 执行 5); 否则, 执行 4)。

4) $t(i+u, j+v) = [g(i+u, j+v)]/[G(i, j)]$, $r = 0.5$ 。

5) $y(i, j) = x(i, j) * r + \sum_{u=-n}^n \sum_{v=-n}^n t(i+u, j+v) * x(i+u, j+v) * (1-r)$ 。

上述步骤中 $0 \leq u \leq n$, $0 \leq v \leq n$, n 一般取值为 3, $g(i+u, j+v)$, $t(i+u, j+v)$ 分别为邻域窗口像素点 $(i+u, j+v)$ 处的梯度倒数和归一化后的梯度倒数加权系数, r 为中心像素点的加权系数。

2.3 AMGI 滤波算法

集合 AMF 对椒盐噪声敏感、梯度倒数加权滤波器对高斯噪声敏感的优点, 将 AMF 算法与梯度倒数加权滤波算法结合起来, 设计出一种 AMGI 滤波算法。AMGI 滤波算法在进行图像混合噪声检测时: 对于椒盐噪声, 目标像素点灰度值首先为以其为中心邻域窗口内灰度值的极值, 且该点在图像上是极亮的(灰度值为满级)或者极暗的(灰度值为 0), 然后通过将该点自身灰度与邻域灰度梯度倒数加权均值相比较, 根据设

定合适的阈值排除该点为边缘、细线区域等正常信号后,即可确定该点为椒盐噪声;对于高斯噪声,利用梯度倒数加权滤波赋予目标像素点邻域内不同的权值,能够有效避免传统均值滤波造成的图像边缘模糊、细节退化情况,省去了高斯噪声的甄别、检测步骤,降低了算法的复杂程度和运算量。

假设噪声图像中以 w 为邻域、窗口尺寸为 $n \times n$ 的中心目标像素点为 (i, j) , 最大限制邻域窗口为 w_{\max} , 该点初始输入灰度值为 $x(i, j)$, 经 AMGI 滤波器后输出灰度值为 $y(i, j)$ 。该滤波算法的具体实现如图 1 所示。

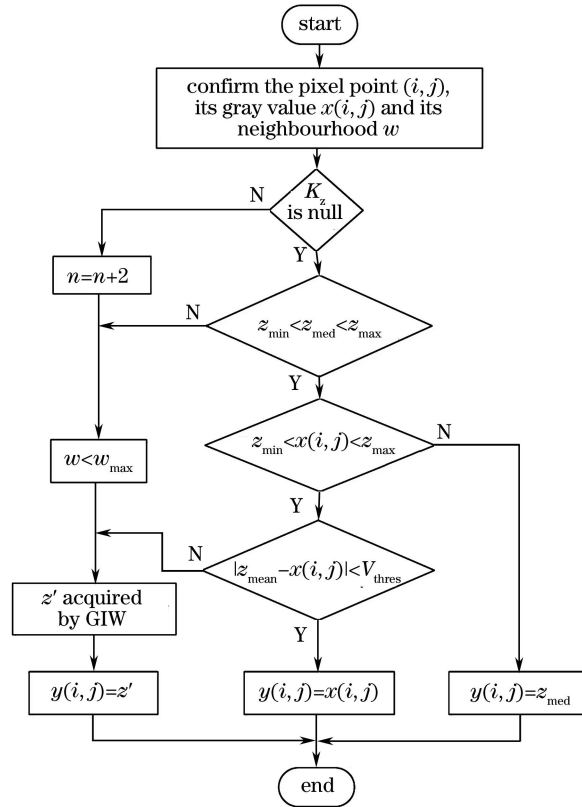


图 1 AMGI 滤波算法实现流程图

Fig. 1 Implementation flow chart of AMGI filter algorithm

图 1 中 (i, j) 、 $x(i, j)$ 和 w 分别表示目标像素点及其灰度值和邻域; n 表示邻域 w 的像素尺寸, w_{\max} 表示目标像素点最大邻域; K_z 表示邻域内非极值灰度值像素点的集合, 即 $K_z = \{z, z_{\min} < z < z_{\max}\}$, z' 表示在自适应窗口下 GIW 算法滤波后的目标像素点灰度值; z_{med} 表示在自适应窗口下中值滤波算法滤波后的目标像素点灰度值; z_{mean} 表示邻域窗口内除极值像素点外的平均灰度值, 即 $z_{\text{mean}} = \sum K_z / (n \times n - m)$ (m 为邻域内极值点个数); V_{thres} 为一设定的阈值。阈值 V_{thres} 与最大窗口尺寸 w_{\max} 的大小对 AMGI 滤波器的滤波效果和滤波效率有一定影响。

由图 1 可知, AMGI 滤波算法的最终输出有 3 种可能: 1) 当判断目标像素点为非噪声点时, 保持该点原灰度值 $x(i, j)$ 不变; 2) 当判断目标像素点为高斯噪声时, 对该点及其邻域作自适应 GIW 滤波, 并用得到的滤波后灰度值 z' 替换原灰度值 $x(i, j)$; 3) 当判断目标像素点为椒盐噪声时, 对该点及其邻域进行 AMF, 并用得到的滤波后灰度值 z_{med} 替换原灰度值 $x(i, j)$ 。由此可知, 正确判断目标像素点是否为噪声点并辨别出噪声类型是 AMGI 滤波算法实现图像滤波的关键, 该判别过程由算法中多次的相关像素灰度值对比、判断来实现。另外, 由于 AMGI 滤波算法不仅增加了对目标像素点的判断、辨别次数, 而且还在自适应窗口的基础上增加了对 AMF 算法和 GIW 算法的选择, 因此该算法在图像滤波上耗时略长。

3 实验结果与分析

为检验 AMGI 滤波器的滤噪性能,以像素尺寸为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 、比特位为 8 的 Lena 图像和 Baboon 图像作为原始灰度图像,首先分别对两者添加高斯噪声、椒盐噪声以及两者的混合噪声,然后利用本文提出的 AMGI 滤波器对噪声图像进行滤波处理,并与 AMF、GIW 滤波器作对比,最后根据图像处理评价指标评价该滤波算法的滤噪效果。目前常用的客观评价指标有平均绝对误差(MAE)、均方误差(MSE)、归一化均方误差(NMSE)、峰值信噪比(PSNR)等^[3,4,18],本文采用 PSNR 和 MAE 来对滤波算法性能进行客观评价,其数学表达式如下:

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \times \lg \frac{NM \times 255^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [f(i,j) - g(i,j)]^2}, \quad (1)$$

$$E_{\text{MAE}} = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |f(i,j) - g(i,j)|, \quad (2)$$

式中 N 、 M 表示灰度图像的尺寸, $f(i,j)$ 、 $g(i,j)$ 分别表示待评价灰度图像与原始灰度图像上像素点 (i,j) 的灰度值。由(1)、(2)式可知,PSNR 值越小,MAE 值越大,滤波后图像整体像素点的灰度值越接近原始灰度图像,表明滤波器的滤波效果越好。

3.1 高斯噪声滤除实验

首先在 Lena 和 Baboon 原始灰度图像上分别添加不同强度的高斯噪声,然后利用 AMF、GIW 滤波器和 AMGI 滤波器进行噪声滤除处理,最后对滤噪结果进行评价。实验中添加的高斯噪声参数均为均值为 0,方差 σ 为 0.003、0.007、0.03、0.07,涵盖不同强度的高斯噪声。在本实验及本文后续实验中取最大限制窗口尺寸 $w_{\text{max}} = 7 \times 7$,同时参考文献[15],取阈值为 34。

根据表 1、2 可知,在各个高斯噪声强度阶段,AMGI 滤波器总体的滤波效果要好于 AMF 和 GIW 滤波器。当高斯噪声强度较低时(方差为 0.003、0.007),AMGI 滤波器的滤波效果略好于 AMF;当高斯噪声强度较高时(方差为 0.03、0.07),AMGI 滤波器明显优于 AMF 和 GIW 滤波器。

表 1 Lena 图像高斯噪声滤波前后相关 PSNR、MAE 值

Table 1 PSNR and MAE values before and after the Gaussian noise filtering of Lena image

Noise intensity σ	Noise image		AMF		GIW filter		AMGI filter	
	PSNR	MAE	PSNR	MAE	PSNR	MAE	PSNR	MAE
0.003	24.8058	11.6611	27.5616	8.3220	25.2690	11.1850	27.7652	8.1445
0.007	20.9297	18.3017	23.4733	13.5207	21.7524	16.9092	23.7862	13.0060
0.03	15.3723	35.0543	18.0312	25.4385	17.2740	28.5755	19.3025	23.0175
0.07	12.4579	49.5947	15.1758	35.4597	14.5784	39.1800	16.5735	30.5880

表 2 Baboon 图像高斯噪声滤波前后相关 PSNR、MAE 值

Table 2 PSNR and MAE values before and after the Gaussian noise filtering of Baboon image

Noise intensity σ	Noise image		AMF		GIW filter		AMGI filter	
	PSNR	MAE	PSNR	MAE	PSNR	MAE	PSNR	MAE
0.003	23.5740	13.4068	22.7501	13.5976	23.7860	13.1114	23.6548	12.8434
0.007	20.4693	19.2738	20.9733	17.6008	21.1567	17.9313	21.6168	17.2305
0.03	15.1913	35.7353	17.0956	28.3071	16.9909	29.1875	17.9011	25.8626
0.07	12.3132	50.5889	14.5287	38.2987	14.2943	40.2266	15.7595	33.3561

3.2 椒盐噪声滤除实验

首先在 Lena 和 Baboon 原始灰度图像上分别添加不同强度的椒盐噪声,然后利用 AMF、GIW 滤波器和 AMGI 滤波器进行噪声滤除处理,最后对滤噪结果进行评价。实验中添加的椒盐噪声密度 ρ 为 0.03、0.09、0.15、0.40,涵盖不同强度的椒盐噪声。

根据表 3、4 可知,在各个椒盐噪声强度阶段,AMGI 滤波器总体的滤波效果要好于 AMF 和 GIW 滤波器。当椒盐噪声强度较低时(噪声密度为 0.03、0.09),AMGI 滤波器的滤波效果略优于 AMF;当椒盐噪声强

度较高时(噪声密度为 0.15、0.40), AMGI 滤波器明显优于 AMF 和 GIW 滤波器。

表 3 Lena 图像椒盐噪声滤波前后相关 PSNR、MAE 值

Table 3 PSNR and MAE values before and after the salt & pepper noise filtering of Lena image

Noise intensity ρ	Noise image		AMF		GIW filter		AMGI filter	
	PSNR	MAE	PSNR	MAE	PSNR	MAE	PSNR	MAE
0.03	20.4280	9.4690	30.5221	4.2926	23.4755	9.5322	31.2123	4.3181
0.09	15.9165	18.0237	24.2046	7.9646	19.3261	15.6425	25.8232	7.8519
0.15	13.7818	25.0476	20.6443	11.6784	16.9279	20.0110	22.7191	11.2550
0.40	9.5886	54.2655	13.8042	28.0648	11.3974	43.7802	16.0333	23.3380

表 4 Baboon 图像椒盐噪声滤波前后相关 PSNR、MAE 值

Table 4 PSNR and MAE values before and after the salt & pepper noise filtering of Baboon image

Noise intensity ρ	Noise image		AMF		GIW filter		AMGI filter	
	PSNR	MAE	PSNR	MAE	PSNR	MAE	PSNR	MAE
0.03	20.4280	9.4690	30.5221	4.2926	23.4755	9.5322	31.2123	4.3181
0.09	15.9165	18.0237	24.2046	7.9646	19.3261	15.6425	25.8232	7.8519
0.15	13.7818	25.0476	20.6443	11.6784	16.9279	20.0110	22.7191	11.2550
0.40	9.5886	54.2655	13.8042	28.0648	11.3974	43.7802	16.0333	23.3380

3.3 混合噪声滤除实验

首先在 Lena 和 Baboon 原始灰度图像上分别添加不同强度的混合噪声, 然后利用 AMF、GIW 滤波器和 AMGI 滤波器进行噪声滤除处理, 最后对滤噪结果进行评价。实验中添加的混合噪声为高斯噪声与椒盐噪声的组合噪声, 其中: 低强度混合噪声参数(σ, ρ)为(0.001, 0.01)、(0.003, 0.03)、(0.005, 0.05)、(0.007, 0.07)、(0.009, 0.09); 高强度混合噪声参数(σ, ρ)为(0.01, 0.10)、(0.03, 0.15)、(0.05, 0.20)、(0.07, 0.25)、(0.09, 0.30)。由于实验中混合噪声由高斯噪声方差 σ 和椒盐噪声密度 ρ 确定, 因此可将实验结果绘制成双 x 轴坐标曲线图。

如图 2、3 所示, AMGI 滤波图像的 PSNR 数值始终大于其他 3 个滤波图像的 PSNR 数值, 且随着混合噪声强度增大, AMGI 滤波图像的 PSNR 数值与其他 3 个滤波图像的 PSNR 数值的差值也越来越大; AMGI 滤波图像的 MAE 数值始终小于其他 3 个滤波图像的 MAE 数值, 且随着混合噪声强度增大, AMGI 滤波图像的 MAE 数值与其他 3 个滤波图像的 MAE 数值的差值也越来越大。根据图 2、3 可知, 在对低强度混合噪声进行滤波处理时, AMGI 滤波器总体的滤波效果优于 AMF 和 GIW 滤波器。图中 AMGI 滤波图像曲线与 AMF 图像曲线的数值大小及数值变化趋势相近, 表明低强度混合滤波时, AMGI 滤波器的滤波性能较优于 AMF, 但滤波优势不突出。

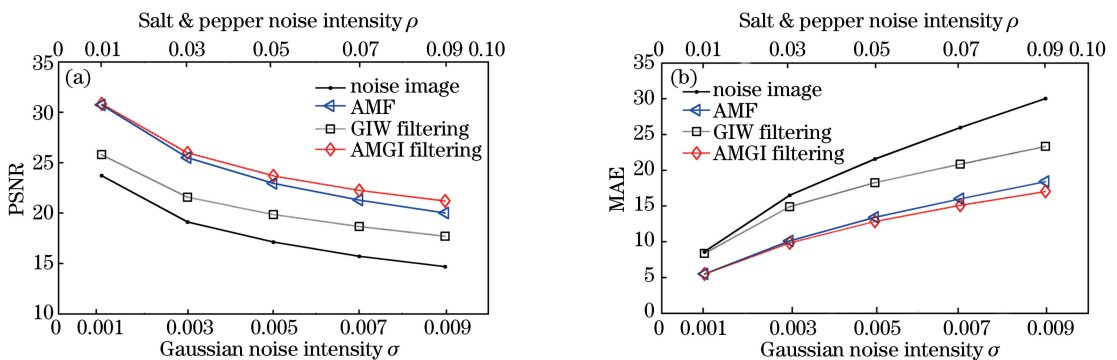


图 2 Lena 图像低强度混合噪声滤波前后 PSNR 评价指标曲线(a)和 MAE 评价指标曲线(b)

Fig. 2 PSNR evaluation index curve (a) and MAE evaluation index curve (b) before and after low-intensity mixed noise filtering of Lena image

如图 4、5 所示, AMGI 滤波图像得到的 PSNR 数值明显大于 AMF、GIW 滤波图像以及噪声图像的 PSNR 数值, 而 MAE 数值明显小于 AMF、GIW 滤波图像以及噪声图像的 MAE 数值。根据图 4、5 可知, 在

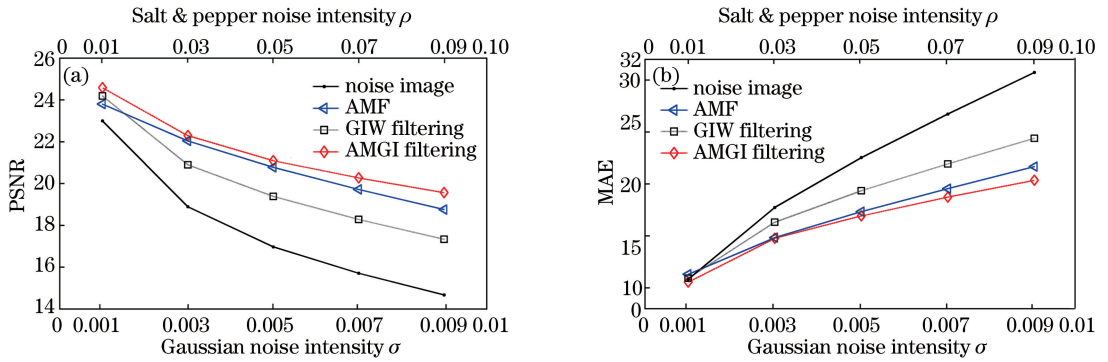


图3 Baboon 图像低强度混合噪声滤波前后 PSNR 评价指标曲线(a)和 MAE 评价指标曲线(b)

Fig. 3 PSNR evaluation index curve (a) and MAE evaluation index curve (b) before and after low-intensity mixed noise filtering of Baboon image

对高强度混合噪声进行滤波处理时,AMGI 滤波器的总体滤波效果优于 AMF 和 GIW 滤波器,且由 AMGI 滤波曲线的数值大小及数值变化趋势可知,高强度混合滤波时,AMGI 滤波器相比另两种滤波器具有明显的滤波优势。

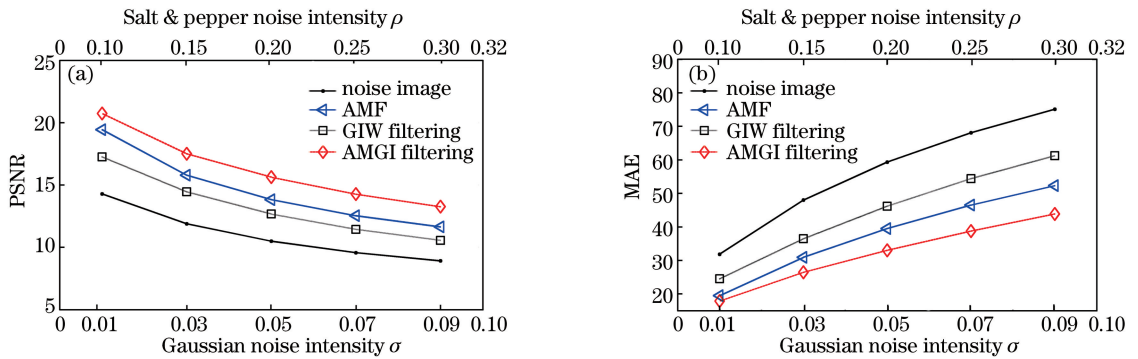


图4 Lena 图像高强度混合噪声滤波前后 PSNR 评价指标曲线(a)和 MAE 评价指标曲线(b)

Fig. 4 PSNR evaluation index curve (a) and MAE evaluation index curve (b) before and after high-intensity mixed noise filtering of Lena image

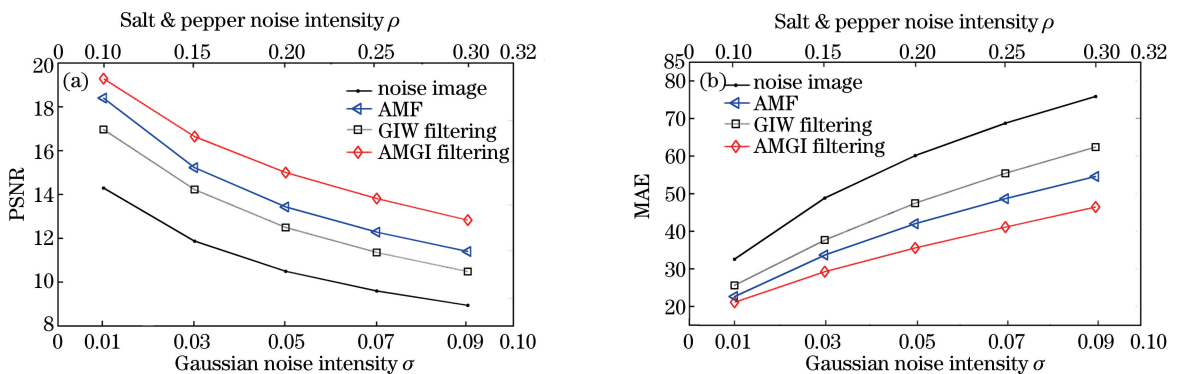


图5 Baboon 图像高强度混合噪声滤波前后 PSNR 评价指标曲线(a)和 MAE 评价指标曲线(b)

Fig. 5 PSNR evaluation index curve (a) and MAE evaluation index curve (b) before and after high-intensity mixed noise filtering of Baboon image

4 结 论

基于 AMF 算法和 GIW 算法,提出一种 AMGI 滤波算法。利用上述 3 种算法分别对高斯噪声、椒盐噪声和两者的混合噪声进行滤波实验,并通过 PSNR 和 MAE 对滤波效果进行评价。根据滤波实验的噪声滤

除效果和获取的评价指标数据分析可知,AMGI滤波算法能够有效地滤除图像的高斯噪声、椒盐噪声以及两者的混合噪声,且滤波效果要优于AMF算法和GIW算法。实验结果表明,AMGI滤波算法在滤除高强度的图像噪声时效果显著。

参 考 文 献

- [1] Gou Zhongkui, Zhang Shaojun, Li Zhongfu, *et al.* New adaptive median filter algorithm based on extreme value[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(1): 98-101.
苟中魁, 张少军, 李忠富, 等. 一种基于极值的自适应中值滤波算法[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(1): 98-101.
- [2] 刘勃, 温志贤, 杨筱平, 等. 现代数字图像噪声滤除技术及其评价[J]. *自动化与仪器仪表*, 2012(2): 146-148.
- [3] Zhang Yu. Research on filtering algorithm for salt-and-pepper noise of digital image[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009: 10-13.
张宇. 数字图像椒盐噪声滤波算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009: 10-13.
- [4] Guo Bin. Image denoising[D]. Xi'an: Xidian University, 2012: 5-19.
郭斌. 图像去噪处理技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 5-19.
- [5] Xu Lizhong, Wang Huimin. An image pre-processing algorithm based on human visual properties and rough sets[J]. *Journal of Image and Graphics*, 1999, 4(11): 911-914.
徐立中, 王慧敏. 一种图象预处理的新算法[J]. *中国图象图形学报*, 1999, 4(11): 911-914.
- [6] Wei Dan, Chen Shuzhen, Chen Bin, *et al.* Improvement and implementation of gradient inverse weight smoothing algorithm[J]. *Application Research of Computers*, 2005(3): 153-154, 157.
魏丹, 陈淑珍, 陈彬, 等. 梯度倒数加权平滑算法的改进与实现[J]. *计算机应用研究*, 2005(3): 153-154, 157.
- [7] Zhu Lei, Xu Peixia. A reciprocal weight image filtering algorithm using adaptive neighborhood statistics [J]. *Measurement & Control Technology*, 2006, 25(5): 33-35, 38.
朱磊, 徐佩霞. 一种倒数加权的窗口自适应邻域图像滤波算法[J]. *测控技术*, 2006, 25(5): 33-35, 38.
- [8] Ataman E, Aatre V K, Wong K M. Some statistical properties of median filters[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, 29(5): 1073-1075.
- [9] Gallagher N C, Wise G L. A theoretical analysis of the properties of median filters [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, 29(6): 1136-1141.
- [10] Lin H M, Willson A N. Median filters with adaptive length[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988, 35(6): 675-690.
- [11] Li Zuoyong, Tang Kezong, Hu Jinmei, *et al.* Directional weighted mean filter for image with salt & pepper noise[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(11): 1407-1415.
李佐勇, 汤可宗, 胡锦美, 等. 椒盐图像的方向加权均值滤波算法[J]. *中国图象图形学报*, 2013, 18(11): 1407-1415.
- [12] Liu Pengyu, Ha Rui, Jia Kebin. Improved adaptive median filter and its' application[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(4): 581-586.
刘鹏宇, 哈睿, 贾克斌. 改进的自适应中值滤波算法及其应用[J]. *北京工业大学学报*, 2017, 43(4): 581-586.
- [13] Li Yuqian, Su Guangda. Fast implementation of adaptive median filter based on neighborhood processor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2016(7): 120-122.
李余钱, 苏光大. 基于邻域处理器的自适应中值滤波快速实现[J]. *仪表技术与传感器*, 2016(7): 120-122.
- [14] Xiao Lei, He Kun, Zhou Jiliu, *et al.* Image noise removal on improvement adaptive medium filter[J]. *Laser Journal*, 2009, 30(2): 44-46.
肖蕾, 何坤, 周激流, 等. 改进自适应中值滤波的图像去噪[J]. *激光杂志*, 2009, 30(2): 44-46.
- [15] Zeng Xianyou, Huang Zuohua, Zhou Jinzhao, *et al.* An adaptive extremum and median filtering algorithm for salt and pepper noise[J]. *Computer and Modernization*, 2012(11): 70-73, 77.
曾宪佑, 黄佐华, 周进朝, 等. 一种去除椒盐噪声的自适应极值中值滤波算法[J]. *计算机与现代化*, 2012(11): 70-73, 77.
- [16] Yang Zhuodong, Zhang Xin, Zhang Tao, *et al.* Image noise-removal on modified adaptive median filter [J]. *Communications Technology*, 2015, 48(11): 1257-1260.
杨卓东, 张欣, 张涛, 等. 改进自适应中值滤波的图像去噪[J]. *通信技术*, 2015, 48(11): 1257-1260.
- [17] 韩殿元. 基于梯度倒数加权和中值滤波的图像平滑改进算法[J]. *潍坊学院学报*, 2008, 8(6): 9-11.
- [18] Wang Yiyao. The study of image denoising algorithm[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2008: 3-5.
王益艳. 图像去噪算法的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2008: 3-5.