

基于相似度函数的图像椒盐噪声自适应滤除算法

宋宇¹ 李满天¹ 孙立宁¹

摘要 在分析现有的细节保护滤波算法的基础上, 提出了一种基于相似度函数的自适应权重滤波算法. 主要技术包括分析 Maximum-minimum 椒盐噪声检测算子的局部极值误判缺陷, 并利用具有良好细节保护特性的相似度函数自适应权重算法来解决这一问题. 在滤波过程中采用极值剪切操作来估计图像的局部噪声密度, 用来选择合适形式的滤波窗口 (递归或非递归), 从而利用单一的 3×3 滤波窗口就实现了对不同密度椒盐噪声的自适应有效去除. 实验表明, 该算法的噪声滤除能力、细节保护能力以及运算效率都可以得到满意的结果.

关键词 细节保护, 椒盐噪声点检测算子, 相似度函数, 极值剪切
中图分类号 TP391.41

Image Salt & Pepper Noise Self-adaptive Suppression Algorithm Based on Similarity Function

SONG Yu¹ LI Man-Tian¹ SUN Li-Ning¹

Abstract Through summarizing the existing detail-preserving salt & pepper noise suppression methods, a new similarity function self-adaptive weighted algorithm is proposed. It analyzes and overcomes the shortcoming of the local extremum misjudgment of the Maximum-minimum noise detector by using a similarity function self-adaptive weighted algorithm. The local window noise probability is estimated by applying extremum trimming operation to select a suitable filtering window (recursive window or non-recursive window). Thus the proposed algorithm realizes self-adaptive suppression of different salt & pepper noise probabilities using a 3×3 filtering window. Experiments show that the results of salt & pepper noise suppression, detail-preserving and computation efficiency are satisfactory.

Key words Detail-preserving, salt & pepper noise detector, similarity function, extremum trimming operation

1 引言

图像信号在形成和传输过程中会由于噪声的引入而使图像质量下降. 而椒盐噪声是导致图像信号质量下降的主要噪声之一, 这种噪声表现为某一像素相对于其邻域内的其它像素的灰度值突变而与图像中的边缘细节一样具有较大的梯度值, 于是对图像分析工作尤其是边缘检测会造成极大的困难. 为此, 解决椒盐噪声的有效滤除与图像细节保护之间的矛盾已经成为图像预处理领域的热点研究方向之一.

非线性的中值滤波算法作为排序统计滤波器族的典型代表而广泛地应用于数字图像的预处理领域. 它与线性平滑滤波器相比, 能在一定程度上减少图像模糊的同时有效地实现椒盐噪声的滤除. 中值滤波的去噪声效果依赖于滤波窗口的大小, 随着滤波窗口的增大, 在噪声滤除能力增强的同时又会损失太多的图像细节, 造成图像模糊. 为了进一步保护

图像细节, 学者们提出了许多改进型的中值滤波器, 如中心加权中值滤波器^[1~3], 通过赋予滤波窗口中心像素不同的权值而改变中心像素的重要性来达到细节保护目的, 但牺牲的是噪声的消除能力, 随着赋予中心像素的权值的增加, 滤噪声能力降至恒等滤波器; 边缘保护定向中值滤波器^[4,5], 在消除噪声的同时, 可以将某一方向上的定向特征保护起来, 如十字型采样模板可以保护水平与垂直方向的细节特征. 但边缘保护中值滤波器由于滤波窗口的缩减, 滤噪声能力将会大幅度降低, 仍然没有很好地解决滤除椒盐噪声与细节保护之间的矛盾. 近些年来, 随着对该领域的研究的不断深入, 逐渐形成了两大类细节保护噪声滤除方法: 代价函数最小化方法和开关滤波方法.

1) 代价函数最小化方法^[6~8]: 目标在于通过最小化全局代价函数来实现有效的噪声滤除与细节保护. 但其缺点在于代价函数最小化过程需要求解非线性方程, 从而存在运算效率低下的问题 (比中值滤波运算效率低两个数量级).

2) 开关滤波处理策略^[9~26]: 这一类滤波器在滤波操作之前, 利用噪声检测器将图像像素划分为受污染的像素和未污染的像素两类, 并仅对受污染的像素利用一定的策略进行有效处理, 从而在保护图像边缘细节方面有了进一步提高, 是一种有前

收稿日期 2005-12-13 收修改稿日期 2006-7-2
Received December 13, 2005; in revised form July 2, 2006
国家自然科学基金 (505C5056) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (505C5056)
1. 哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150001
1. Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001
DOI: 10.1360/aas-007-0474

途的、广受关注的方法. 典型代表如: 开关中值滤波 (SM)^[13]、自适应中值滤波 (AMF)^[24]、大范围相关 (LRCF)^[25]、递进开关中值滤波 (PSW)^[22]、改进的峰谷滤波 (MPVF)^[26] 和自适应模糊转换滤波 (AFSF)^[20] 等.

本文在开关滤波的理论框架上提出一种基于相似度函数的自适应椒盐噪声滤波算法. 通过分析 Maximum-minimum 椒盐噪声检测算子的图像灰度局部极值点的误判缺陷, 采用相似度函数自适应加权的方法来解决该缺陷以实现保护图像细节的目的. 同时利用极值剪切方法对滤波窗口内的椒盐噪声密度进行估计, 当滤波窗口内椒盐噪声密度很高时, 转为递归运算以实现高密度椒盐噪声的有效去除. 从而仅利用 3×3 滤波窗口就成功解决了对不同密度椒盐噪声的自适应滤除问题.

2 提出的算法

2.1 椒盐噪声检测

开关滤波器设计的焦点之一集中在椒盐噪声像素检测问题上. 许多学者提出了很多的方法, 如 Maximum-minimum 椒盐噪声点检测算子^[6,9,24,26] 认为滤波窗口内的灰度极大、极小值为椒盐噪声分量, 对被判断为极值的滤波窗口中心像素采用滤波处理而非极值点直接输出. 中值松弛判别法^[11] 采用排序统计理论, 在对滤波窗口内的像素排序统计后, 将中值以统计顺序分别向前、向后延拓 R_1, R_2 个单位, 若滤波窗口中心的灰度值落在该区域内, 则认为该点为未受噪声污染的像素而直接输出, 否则判断为噪声点. 基于梯度的判别法考虑到椒盐噪声点与邻域采样点间的梯度值较大, 故而设定梯度阈值判断滤波窗口中心点是否为噪声. [21] 采用 4 个方向的一维 Laplacian 算子对图像卷积, 利用其中绝对值响应的最小值来代表滤波窗口中心的梯度. 中值变化判别法^[15,22] 是考虑到椒盐噪声点经中值滤波后会有较大的变化, 故而利用滤波窗口中心点灰度值与滤波窗口的中值输出间的差值是否大于某一设定阈值来判断滤波窗口中心点是否为噪声. 如大于阈值, 则判为噪声点, 以邻域中值取代, 否则直接输出. 其它的椒盐噪声点检测方法有如 Schulte S^[19] 提出的模糊决策方法, 该方法通过综合滤波窗口内的模糊梯度信息来决策滤波窗口中心点是否为噪声点. 另外还有自适应模糊转换滤波 AFMF^[20] 也是建立在基于梯度的判别方法之上, 不同之处在于计算滤波窗口的 Laplacian 梯度后, 不是设定阈值来判定滤波窗口中心点是否为噪声点, 而是使用 S 型隶属度函数将滤波窗口中心像素的 Laplacian 梯度值映射为该像素隶属于噪声点的程度, 并采用该模

糊隶属度值作为权值将原图像与滤波图像进行加权来实现细节保护目的.

经过对以上几种方法的总结, 可以发现中值松弛判别法、基于梯度的判别法、中值变化判别法等, 需要准确地选取与图像的滤波效果有着很大关系的阈值 (AFMF 也需设定 S 型模糊隶属度函数的参数), 但阈值选取是个非常困难的问题, 不容易解决. 故而本文采用不需阈值的 Maximum-minimum 算子作为椒盐噪声检测器, 并在随后对该算子的缺陷进行详细讨论.

2.2 基于相似度函数的自适应权重算法

Maximum-minimum 椒盐噪声检测器认为滤波窗口内的灰度极大、极小值像素为椒盐噪声像素, 当图像仅受到低密度椒盐噪声污染时, 将会有很多未受污染区域的局部极值被误判为椒盐噪声分量. 如果对 256 灰度级的未受椒盐噪声污染的 Lena 图像使用 Maximum-minimum 检测器检测, 将有 16% 的局部灰度极值像素被误判为椒盐噪声点, 从而说明了这个问题. 而基于 Maximum-minimum 算子的开关中值滤波^[13] (SM) 与自适应中值滤波^[24] (AMF) 是利用中值来代替这些被判断为椒盐噪声分量的区域局部极值, 将有可能破坏这些局部极值点, 从而造成图像细节的损失.

针对这一问题, 采用基于相似度函数的自适应加权算法对 Maximum-minimum 算子判别的区域局部极值进行处理以实现保护细节的目的. 相似度函数的自适应加权算法是建立在均值滤波基础上的, 利用相似度函数对滤波窗口内的像素点赋予不同的权值, 然后采用滤波窗口内的像素点加权平均的方式计算窗口中心的输出响应. 设数字化的图像 F 在索引位置 (i, j) 处的灰度值为 $f(i, j)$, 滤波窗口大小为 3×3 , 则权值 $\omega_{s,t}$ 大小的意义反映为滤波窗口内某一像素点 $(i + s, j + t)$ 的灰度值 $f(i + s, j + t)$ 与采样窗口中心像素点灰度值 $f(i, j)$ 的相似程度, 其表达式为

$$\omega_{s,t} = \mu(|f(i + s, j + t) - f(i, j)|) \quad (1)$$

式中, μ 为以 $|f(i + s, j + t) - f(i, j)|$ 为自变量的相似度函数, 满足:

1) $\mu(x)$ 为区间 $x \in [0, +\infty)$ 上的单调递减函数.

2) $\mu(0) = 1, \mu(+\infty) = 0$.

提出的基于相似度函数的自适应椒盐噪声滤除算法设计思想为: 图像通过 Maximum-minimum 算子检测后, 对于被判断为椒盐噪声点的像素采用相似度函数的自适应加权算法进行处理, 但对于可能为噪声点的滤波窗口内的邻域像素 (灰度极大值和

灰度极小值像素) 应禁止参与加权平均. 如果窗口内的邻域像素全部可能为噪声点, 则改为采用递归形式的采样窗口, 以实现高密度噪声有效去除. 设图像 F 经过滤波后的输出图像为 G , G 在索引位置 (i, j) 处的灰度值为 $g(i, j)$, 则算法具体描述如下:

1) 如果滤波窗口中心的灰度值 $f(i, j)$ 小于其滤波窗口内的灰度极大值, 同时大于滤波窗口内灰度极小值, 则认为 $f(i, j)$ 为未被噪声污染的像素, 直接输出, 即有 $g(i, j) = f(i, j)$.

2) 如果采样中心点 $f(i, j)$ 等于其滤波窗口内的灰度极大值或者灰度极小值, 说明 (i, j) 有可能是被椒盐噪声污染的像素. 为了避免噪声像素参与加权运算, 在剪除全部滤波窗口内的灰度极值像素点后 (即采样窗口内的灰度极值像素点赋权值为 0), 采用基于相似度函数的自适应加权滤波算法计算滤波窗口中心输出. 如果滤波窗口内的像素全部被剪除, 则说明采样模板下有可能全为噪声像素 (噪声密度较大), 此时转为采用如图 1 所示的递归形式的滤波窗口中已经处理过的 4 个邻域像素对窗口中心进行相似度函数自适应加权.

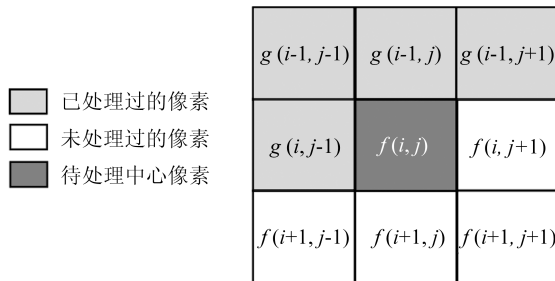


图 1 3×3 的递归形式的滤波窗口
Fig. 1 3×3 recursive filtering window

算法中采用的相似度函数为

$$\mu(x) = \frac{1}{1 - x^2} \quad (2)$$

设非递归采样窗内 8 邻域点 $(i + s, j + t)$ 处的权值为 $\omega_f(s, t)$, 递归采样窗内处理过的 4 邻域点 $(i + s, j + t)$ 处的权值为 $\omega_g(s, t)$, 则被噪声检测器检测为噪声点的采样点的滤波输出为

$$g(i, j) = \begin{cases} \frac{\sum \omega_f(s, t) f(i + s, j + t)}{\sum \omega_f(s, t)} & \sum \omega_f(s, t) \neq 0 \\ \frac{\sum \omega_g(s, t) g(i + s, j + t)}{\sum \omega_g(s, t)} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

3 试验研究

3.1 算法滤波性能试验

为了验证提出的算法能够有效地滤除不同密度的椒盐噪声并且保护图像细节信息, 在 Matlab6 平台上选用 256×256 大小的 256 灰度级的 Lena 图与 512×512 大小的 256 灰度级的 Sailboat 图进行处理. 图 2 和图 3 为分别加入密度为 10% 和 80% 的椒盐噪声的 Lena 图和经过 3×3 滤波窗口的本文算法处理后的输出图像. 图 4 和图 5 为分别加入密度为 15% 和 90% 的椒盐噪声的 Sailboat 图和经过 3×3 滤波窗口的本文算法处理后的输出图像.



图 2 10% 椒盐噪声污染的 Lena 图像及滤波后结果
Fig. 2 Lena image corrupted by 10% salt & pepper noise and the filtering result

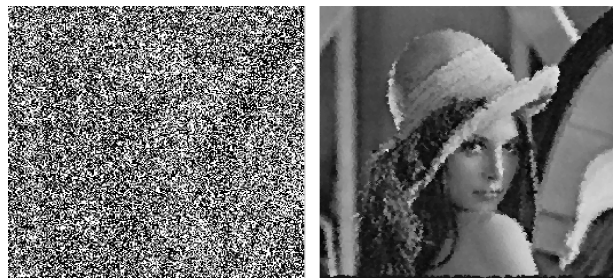


图 3 80% 椒盐噪声污染的 Lena 图像及滤波后结果
Fig. 3 Lena image corrupted by 80% salt & pepper noise and the filtering result



图 4 15% 椒盐噪声污染的 Sailboat 图像及滤波后结果
Fig. 4 Sailboat image corrupted by 15% salt & pepper noise and the filtering result

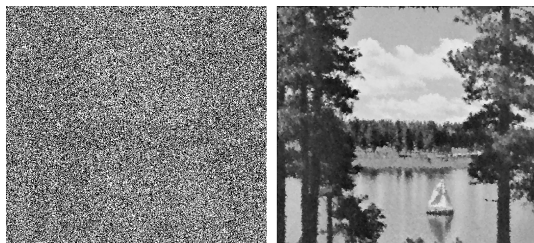


图5 90% 椒盐噪声污染的 Sailboat 图像及滤波后结果
Fig.5 Sailboat image corrupted by 90% salt & pepper noise and the filtering result

对试验结果用输出图像的峰值信噪比 (PSNR) 和相对平均误差 (MAE) 作为评价滤波性能的客观标准. 则图 2、图 3 和图 4、图 5 的滤波结果的客观评价见表 1.

表1 提出算法输出图像的客观评价结果
Table 1 Evaluation results of the proposed algorithm

	Lena	Lena	Sailboat	Sailboat
椒盐噪声密度	10%	80%	15%	90%
PSNR	33.7373	23.6773	39.7028	27.8280
MAE	0.0127	0.0760	0.0120	0.0876
运算时间 (s)	0.8906	1.2969	3.8125	5.4531

3.2 对比试验

为了对提出的算法与同类滤波算法进行对比, 采用细节信息极为丰富的 512×512 大小的 256 灰度级的 Baboon 图进行处理, 并对 Baboon 图像分别加入密度为 1%、5%、10%、20%、40%、60% 的椒盐噪声, 然后分别采用 5×5 模板中值滤波 MF、 5×5 模板自适应模糊转换滤波 AFSF^[20]、改进的峰谷滤波 MPVF^[26]、大范围相关 LRCF^[25]、递进开关中值滤波 PSW^[22]、MMEM^[23]、自适应中值滤波 (3×3 窗口到 7×7 窗口) AMF^[24] 和 3×3 滤波窗口的本文算法进行处理. 滤波结果采用 PSNR 作为滤波方法性能的客观评价标准, 评价结果见表 2.

图6~图15分别为受密度为 60% 的椒盐噪声污染的含有胡须等丰富细节信息的 Baboon 嘴部图像及各种算法处理后的滤波输出图像. 从滤波结果可以看出, MF 不能有效地去除噪声, MPVF、AFSF、AMF 对噪声的滤除也不彻底, LRCF 和 PSW 破坏了胡须细节, MMEM 由于其均值滤波的本质而造成了一定的图像模糊, 而本文算法在完全去除噪声的同时对胡须细节信息保护的最好. 表 3 为处理 60% 的椒盐噪声污染的 Baboon 图像时各种算法处理过程所需时间耗费 (所有运算均在 Matlab 6 平台上进行, 计算机 CPU 为 Intel Pentium IV 2.0 GHz, 内存 512Mb). 从滤波效果、表 2 的客观评价结果以及表 3 的计算时间上可以看

出, 本文算法在滤波效果、客观评价结果和运算效率上具有明显的优势.

表2 各种算法输出结果的客观评价 (PSNR)

Table 2 Evaluation results of the different algorithms (PSNR)

椒盐噪声密度	1%	5%	10%	20%	40%	60%
MF	21.1262	21.0456	20.9415	20.6257	19.1768	14.0474
AFSF	25.2303	25.1001	24.9366	24.4238	22.8430	19.6229
MPVF	27.5648	27.5008	27.2707	26.5722	24.2314	21.2659
LRCF	31.4049	28.6499	26.5971	23.8042	19.5758	16.2507
PSW	29.8217	27.9841	26.4284	24.1620	20.2699	16.2011
MMEM	23.7396	23.5930	23.4571	23.2741	22.8748	22.1409
AMF	27.8098	27.6604	27.2588	26.1845	23.6545	20.2594
提出算法	33.3994	31.2061	29.4720	27.1780	24.4892	22.4968

表3 各种算法的运算时间对比

Table 3 Comparison of computation time for the algorithms

算法	AFSF	MPVF	LRCF	PSF	MMEF	AMF	提出算法
计算时间 (s)	14.328	14.6875	32.8438	29.8750	4.5781	35.8594	4.9219

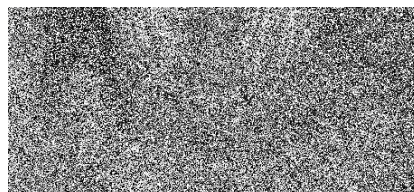


图6 60% 椒盐噪声污染的 Baboon 图像
Fig.6 Baboon image corrupted by 60% salt & pepper noise

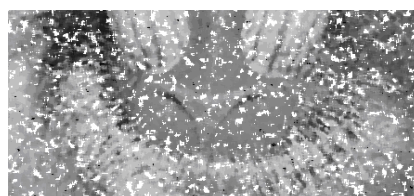


图7 中值滤波 (MF) 结果
Fig.7 Result of MF

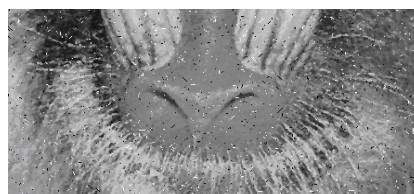


图8 自适应模糊转换滤波 (AFSF) 结果
Fig.8 Result of AFSF

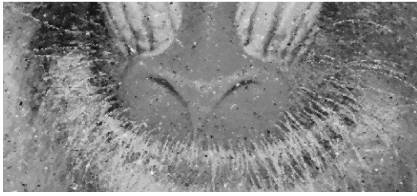


图 9 改进的峰谷滤波 (MPVF) 结果
Fig. 9 Result of MPVF



图 10 大范围相关 (LRCF) 结果
Fig. 10 Result of LRCF

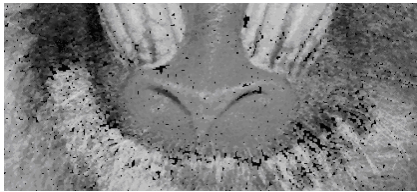


图 11 递进开关中值滤波 (PSW) 结果
Fig. 11 Result of PSW

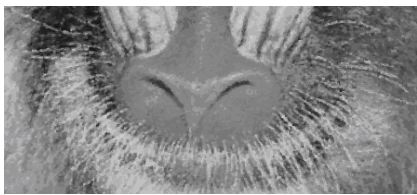


图 12 MMEM 结果
Fig. 12 Result of MMEM

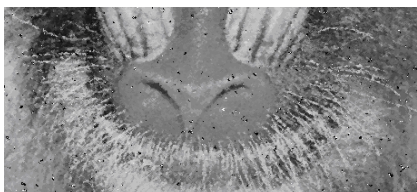


图 13 自适应中值滤波 (AMF) 结果
Fig. 13 Result of AMF

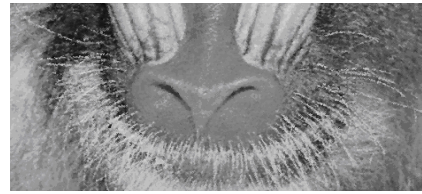


图 14 提出算法结果
Fig. 14 Result of proposed algorithm

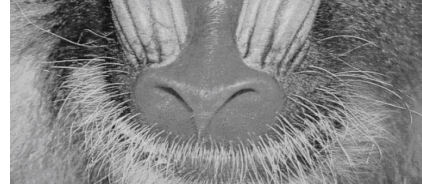


图 15 Baboon 原始图像
Fig. 15 Original Baboon image

4 结论

在回顾细节保护滤波器的发展基础上, 重点讨论了比较有发展前景的开关滤波方法, 并在该方法的基本框架上提出了一种更为优秀的细节保护滤波算法, 主要成果总结如下:

1) 分析了 Maximum-minimum 椒盐噪声点检测算子的优点和缺陷: 优点在于不需要设定阈值, 缺点在于局部极值点的误判问题.

2) 针对 Maximum-minimum 椒盐噪声点检测算子的局部极值误判问题而采用相似度函数自适应加权法来保护图像细节信息.

3) 利用极值剪切策略来实现对采样窗口内椒盐噪声密度的估计, 对于高密度椒盐噪声转为采用递归运算的形式. 从而仅利用单一的 3×3 模板就实现了不同密度椒盐噪声的有效去除, 并且有效地保护了图像细节. 这样避免了一味地采用递归运算所造成的误差的累积传播问题, 也避免了增大采样窗口所带来细节移位和计算负担加重问题.

试验表明, 提出的算法在滤波效果、客观评价结果和运算效率上都可以得到令人满意的结果, 特别当图像椒盐噪声的密度高达 80% 甚至是 90% 时提出的算法仍然有效.

致谢

文章全体作者对评审专家在论文成文过程中提出的宝贵建议表示衷心地感谢.

References

- 1 Ko S J, Lee Y H. Center weighted median filters and their application to image enhancement. *IEEE Transactions on Circuits System*, 1991, **38**(9): 984~993
- 2 Yin L, Yang R K, Gabbouj M, Neuvo Y. Weighted median

- filters: a tutorial. *IEEE Transactions on Circuit and System*, 1996, **43**(3): 157~192
- 3 Yang R K, Yin L, Gabbouj M, Neuvo Y. Optimal weighted median filtering under structural constraints. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, **43**(3): 591~604
 - 4 Guo Xiao-Xin, Lu Yi-Nan, Xu Zhi-Wen, Wang Yun-Xiao, Pang Yun-Jie. Adaptive directional weighted median filtering. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2005, **43**(4): 495~499
(郭晓新, 卢奕南, 许志闻, 王云霄, 庞云阶. 自适应定向加权中值滤波. 吉林大学学报(理学版), 2005, **43**(4): 495~499)
 - 5 Wang Zhang-Wei, Zheng Chang-Qiong, Wang Jing-Xi. Application of a new self-adaptive median filter in medical ultrasonic images processing. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2000, **32**(5): 92~95
(王章伟, 郑昌琼, 王景熙. 一种新型自适应中值滤波器在超声医学图像中的应用. 四川大学学报(工程科学版), 2000, **32**(5): 92~95)
 - 6 Chan R H, Chung-Wa H, Nikolova M. Salt and pepper noise removal by median type noise detectors and detail-preserving regularization. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(10): 1479~1485
 - 7 Chan R H, Chung-Wa H, Nikolova M. An interactive procedure for removing random-valued impulse noise. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, **11**(12): 921~924
 - 8 Nikolova M. A variational approach to remove outliers and impulse noise. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2004, **20**: 99~120
 - 9 Sun T, Neuvo Y. Detail-preserving median based filters in image processing. *Pattern Recognition Letters*, 1994, **15**(4): 341~347
 - 10 Wang Z, Zhang D. Progressive switching median filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images. *IEEE Transactions on Circuits System*, 1999, **46**(1): 78~80
 - 11 Hamza A B, Luque-Escamilla P L, Aroza J M, Roman-Roldan R. Removing noise and preserving details with relaxed median filters. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 1999, **11**(2): 161~177
 - 12 Hsia S Cm, Chen C L. A fast efficient restoration algorithm for high-noise image filtering with adaptive approach. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2005, **16**(3): 379~392
 - 13 Qin Peng, Ding Run-Tao. Ordering threshold switching median filter. *Journal of Image and Graphics*, 2004, **9**(4): 412~416
(秦鹏, 丁润涛. 一种基于排序阈值的开关中值滤波方法. 中国图象图形学报, 2004, **9**(4): 412~416)
 - 14 Lukac R. Adaptive vector median filtering. *Pattern Recognition Letters*, 2003, **24**(12): 1889~1899
 - 15 Guan Xin-Ping, Zhao Li-Xing, Tang Ying-Gan. Mixed filter for image denoising. *Journal of Image and Graphics*, 2005, **10**(3): 332~337
(关新平, 赵立兴, 唐英干. 图象去噪混合滤波方法. 中国图象图形学报, 2005, **10**(3): 332~337)
 - 16 Smolka B, Plataniotis K N, Chydzinski A, Szczepanski M, Venetsanopoulos A N, Wojciechowski K. Self-adaptive algorithm of impulsive noise reduction in color images. *Pattern Recognition*, 2002, **35**(8): 1771~1784
 - 17 Windyga P S. Fast impulsive noise removal. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, **10**(1): 173~179
 - 18 Abreu E, Lightstone M, Mitra S, Arakawa K. A new efficient approach for the removal of impulse noise from highly corrupted images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, **5**(6): 1012~1025
 - 19 Schulte S, Nachttegaal M, Dewitte V. A fuzzy impulse noise detection and reduction method. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(5): 1153~1162
 - 20 Xu H X, Zhu G X, Peng H Y. Adaptive fuzzy switching filter for images corrupted by impulse noise. *Pattern Recognition Letters*, 2004, **25**(15): 1657~1663
 - 21 Zhang S, Karim M A. A new impulse detector for switching median filters. *IEEE Signal Process Letters*, 2002, **9**(11): 360~363
 - 22 Wang Z, Zhang D. Progressive switching median filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images. *IEEE Transactions on Circuits System*, 1999, **46**(1): 78~80
 - 23 Han W Y, Lin J C. Minimum-maximum exclusive mean (MMEM) filter to remove impulse noise from highly corrupted images. *IEEE Electronics Letters*, 1997, **33**(2): 124~125
 - 24 Hwang H, Haddad R A. Adaptive median filters: new algorithms and results. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, **4**(4): 499~502
 - 25 Wang Z, Zhang D. Restoration of impulse noise corrupted images using long-range correlation. *IEEE Signal Processing Letters*, 1998, **5**(1): 4~7
 - 26 Alajlana N, Kamela M, Jernigan E. Detail preserving impulsive noise removal. *Signal Processing: Image Communication*, 2004, **19**(10): 993~1003

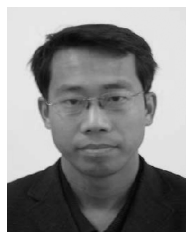


宋宇 哈尔滨工业大学机器人研究所博士研究生. 主要研究方向为数字图像处理, 视觉伺服, 微小型移动机器人和显微操作技术. 本文通信作者.

E-mail: songyuhit@163.com

(SONG Yu Ph.D. candidate at Robotics Institute of Harbin Institute of Technology. His research interest

covers digital image processing, visual servoing, miniature mobile robots, and micro manipulation. Corresponding author of this paper.)



李满天 哈尔滨工业大学机器人研究所博士, 主要研究领域为智能机器人, 微小型移动机器人.

E-mail: limt@hit.edu.cn

(LI Man-Tian Ph.D. at Robotics Institute of Harbin Institute of Technology. His research interest covers intelligence robots and miniature mobile

robots.)



孙立宁 哈尔滨工业大学机器人研究所教授, 博士生导师, 主要研究领域为微驱动, 微操作, 医疗机器人, 微小型移动机器人. E-mail: lnsun@hit.edu.cn

(SUN Li-Ning Professor at Robotics Institute of Harbin Institute of Technology. His research interest covers micro drive, micro manipulation, medical

robots and miniature mobile robots.)