

基于上下中值型噪声检测的自适应中值滤波器

袁世强¹⁾ 谭永红²⁾

¹⁾(上海交通大学自动化系, 上海 200030) ²⁾(桂林电子科技大学智能控制实验室, 桂林 541004)

摘要 基于噪声检测的中值滤波器已广泛用于消除图像中的脉冲噪声。然而,在高噪声密度情况下,过多的像素被错误地分类,这个缺陷将会对图像滤波产生负面影响,为了克服这个缺陷,提出了一种上下中值型噪声检测器。基于这种噪声检测方法,又提出了一种自适应中值滤波算法。实验结果显示,该算法能够有效地消除脉冲噪声,并且保留了原始图像的更多细节。

关键词 噪声检测 脉冲噪声 上中值 下中值 自适应中值滤波

中图分类号: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)11-1971-05

Adaptive Median Algorithm Based on the Upper-lower Median Noise Detector

YUAN Shi-qiang¹⁾, TAN Yong-hong²⁾

¹⁾(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

²⁾(Laboratory of Intelligent Control, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004)

Abstract Noise detection-based median filters have been widely adopted to reduce impulse noise in images. However, more pixels were misclassified at the high noise density. The drawback has negative effect on image filtering. In order to overcome the drawback, in this paper, the upper-lower median-type noise detector is proposed. Based on the noise detector, an adaptive median algorithm is presented. Experimental results show that the new algorithm can effectively remove the impulse noise and preserve more details of original images.

Keywords noise detection, impulse noise, upper median, lower median, adaptive median filter

1 引言

自从20世纪70年代Tukey^[1]提出中值滤波以来,它就被广泛地应用于消除图像中的脉冲噪声。Standard median filter(SMF)^[2]首先被提出用于消除脉冲噪声,但是,一些细节如边缘和细线容易丢失,为了克服这些缺点,一些改进的技术,如weighted median(WM)^[3]、center weighted median(CWM)^[4]。在文献[5]中提出了拓扑中值滤波器(TMf),它可以在一定程度上保留物体更多的阶跃边缘。然而,由于在滤波过程中没有受到噪声侵蚀的像素也要被处理,这样很可能会影响滤波图像的整体品质,因

此,在图像滤波之前就需要进行噪声检测。在文献[6]中提出了基于切换的中值滤波方法,但是,由于这种算法使用了固定的噪声检测阈值,其结果不能令人满意,因此,一些补救的滤波算法被提了出来,如基于一致性信息的中值滤波算法^[7]和两输出非线性滤波方法^[8]等。为了减少错误分类的像素数量,在文献[9]和[10]中提出了改进的噪声检测器。尽管上述提到的噪声检测器做了很大改进,但是在高噪声密度的情况下噪声检测结果和图像滤波质量仍不能令人满意,因此,本文提出了上下中值型噪声检测器,同时在噪声检测的基础上又提出了自适应中值滤波算法。

收稿日期:2006-05-22; 改回日期:2006-08-14

第一作者简介:袁世强(1974~),男,上海交通大学控制理论与控制工程博士研究生。主要研究方向为图像滤波、信息融合。E-mail: shiqiang_yuan@163.com

2 上下中值型脉冲噪声检测器

在本文中,所有测试图像都是 512 × 512 的 8 位灰度图像,图像中的噪声是脉冲噪声。首先,一个噪声图像被分成许多尺寸为 M × M 的块,这些块相邻但是互不重叠。在噪声检测的过程中,要求每个块中的未受噪声侵蚀的像素是“homogeneous”(同一),即像素值接近,然而,一些不确定因素会对每个块的尺寸产生负面影响。根据文献[9],任意一个 8 × 8 块中的非噪声像素是“homogeneous”,因此,在本文中每个块的尺寸设定为 8 × 8。

2.1 噪声图像中某个 8 × 8 块中的像素分类

假设 $Q_{8 \times 8} = \{p_{1,1}, p_{1,2}, \dots, p_{1,8}, \dots, p_{8,1}, \dots, p_{8,8}\}$ 表示某个 8 × 8 块中的所有像素的集合。基于像素值,设 q_1, q_2, \dots, q_{64} 是 $Q_{8 \times 8}$ 中的一个升序。根据下面的像素分类规则,假设 q_1, \dots, q_i, q_{i+1} 已经被分好类。设 $\Psi_1, \dots, \Psi_{i-1}, \Psi_i$ 是 $Q_{8 \times 8}$ 中的子集,并且由 $q_1, \dots, q_i, q_{i+1}, \dots$ 组成,其中 $\Psi_i = \{q_j, q_{j+1}, \dots, q_i, q_{i+1}\}$ ($1 \leq i$ and $1 \leq j \leq i+1$)。设 Ψ_{i+1} 是个空集,并且 $q_{i+2}, q_{i+3}, \dots, q_{64}$ 还没有被分类。 q_{i+2} 分类方法如下:

- (1) 如果 $q_{i+2} - q_{i+1} \leq 2(q_{i+3} - q_{i+2})$, 则 $q_{i+2} \in \Psi_i$, 否则 $q_{i+2} \in \Psi_{i+1}$ 。
- (2) 如果 $q_{i+2} - q_{i+1} < \frac{1}{2}(q_{i+3} - q_{i+2})$, 则 $q_{i+3} \in \Psi_{i+1}$ 。
- (3) 如果 $\Psi_{i+1} = \{q_{i+2}\}$ 或 $\{q_{i+3}\}$, 则初始化一个新的空集 Ψ_{i+2} 并且 Ψ_i 不再参与像素分类。

根据选举制度中 2/3 绝对多数的原则,本文选择常数 1/2 和 2 作为比例阈值。依据这 3 条规则, $q_{i+2}, q_{i+3}, \dots, q_{64}$ 依次被分类。最后 $Q_{8 \times 8}$ 就被分成若干子集: $Q_{8 \times 8} = \bigcup_{i=1}^L \Psi_i$, 其中 L 表示子集的数量。由于非噪声像素是“homogeneous”(同一性),因此这些像素的差别较小,但是噪声像素和非噪声像素的值却明显不同,这表明非噪声像素和噪声像素是明显不同的两种像素,因此,一个子集通常只能包含一种像素,噪声的或者是非噪声的。

2.2 噪声检测

根据上述的像素分类规则,在 $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_L$ 中包含了单元元素子集和多元素子集。设 $\tilde{\Psi} = \{\tilde{\Psi}_l | 1 \leq l \leq L_{multi}\}$, 其中 $\tilde{\Psi}_l$ 是一个多元素子集, L_{multi} 表示多元素子集的个数。为了进行检测噪声,需要找出

$\tilde{\Psi}$ 的中子集。具体步骤如下: 设 $\tilde{\Psi}_{l_1}$ 和 $\tilde{\Psi}_{l_2}$ 为 $\tilde{\Psi}$ 中的任意两个元素。 $\tilde{\Psi}_{l_1} = \{q_{i_1,1}, q_{i_1,2}, \dots, q_{i_1,k}\}$, $\tilde{\Psi}_{l_2} = \{q_{i_2,1}, q_{i_2,2}, \dots, q_{i_2,m}\}$, 其中 $q_{i_1,1} \leq q_{i_1,2} \leq \dots \leq q_{i_1,k}$ 并且 $q_{i_2,1} \leq q_{i_2,2} \leq \dots \leq q_{i_2,m}$ 。如果 $q_{i_1,k} < q_{i_2,1}$ (即 $l_1 < l_2$), 那么设 $\tilde{\Psi}_{l_1} < \tilde{\Psi}_{l_2}$, 其中算子 $<$ 表示 $\tilde{\Psi}_{l_1}$ 比 $\tilde{\Psi}_{l_2}$ 小。因此, $\tilde{\Psi}$ 中的元素就可以按升序排列, 即 $\tilde{\Psi}_1 < \tilde{\Psi}_2 < \dots < \tilde{\Psi}_{L_{multi}}$ 。按照这个序列, 就可以搜索到中子集 $\tilde{\Psi}_{med}$, 这里有两种情形:

- (1) 如果 L_{multi} 是奇数, 则 $\tilde{\Psi}_{med} = \tilde{\Psi}_{(L_{multi}+1)/2}$ 。
- (2) 如果 L_{multi} 是偶数, 则 $\tilde{\Psi}_{med} = \tilde{\Psi}_{L_{multi}/2} \cup \tilde{\Psi}_{L_{multi}/2+1}$ 。

设 $d_{med} = \min \tilde{\Psi}_{med}$ 并且 $u_{med} = \max \tilde{\Psi}_{med}$, 其中 u_{med} 和 d_{med} 被称为 $Q_{8 \times 8}$ 的上下中值。设 P_{nos} 表示这个 8 × 8 块的像素矩阵, $p_{nos}(x, y)$ 表示 P_{nos} 在 (x, y) 点的像素值, 则像素识别的上下界根据如下公式导出:

$$\begin{cases} \Delta_{up} = \sqrt{\frac{1}{n_{sub}} \sum_{i=1}^{n_{sub}} (p_{nos}(x_i, y_i) - u_{med})^2}, p_{nos}(x, y) \geq u_{med} \\ \Delta_{low} = -\sqrt{\frac{1}{m_{sub}} \sum_{j=1}^{m_{sub}} (p_{nos}(x_j, y_j) - d_{med})^2}, p_{nos}(x, y) \leq d_{med} \end{cases} \quad (1)$$

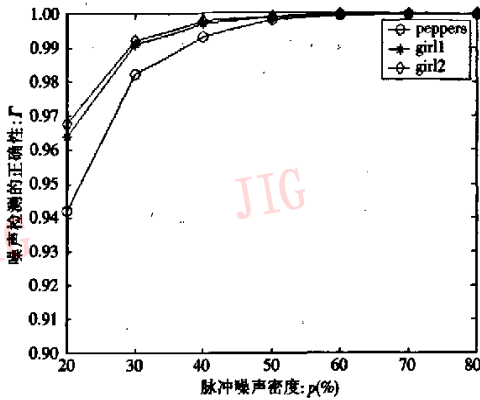
其中, n_{sub} 表示 $p_{nos}(x_i, y_i) \geq u_{med}$ 的数量, m_{sub} 表示 $p_{nos}(x_j, y_j) \leq d_{med}$ 的数量, 根据式(1), 本文所提出的噪声检测规则描述如下:

如果 $p_{nos}(x, y) - u_{med} > \Delta_{up}$ 或者 $p_{nos}(x, y) - d_{med} < \Delta_{low}$, 那么像素 (x, y) 被当作是噪声像素, 其中 $p_{nos}(x, y) \notin \Psi_{med}$ 。

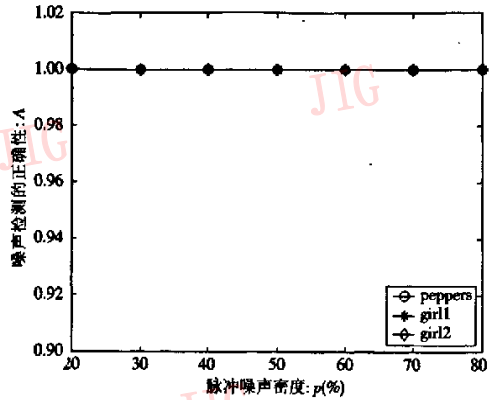
根据这条规则, 一幅噪声图像中所有 8 × 8 的块中的噪声像素就可以被很好地识别。

2.3 噪声检测器的性能测试

在滤波之前, 噪声检测器的性能需要测试一下, 本文采用 3 幅测试图像: peppers、girl2 和 girl1, 并将密度从 20% 到 80% 的噪声依次添加到原始图像中, 测试软件为 MATLAB6.5.1。假设 Ω_s 表示被检测器认为是噪声像素的集合, Ω_d 表示图像中所有真实噪声像素的集合。测试指标包括检测的精确性 $\Gamma = \frac{\tau_1}{\tau_d}$ 和检测的正确性 $A = \frac{\tau_1}{\tau_s}$, 其中 τ_s 表示 $\Omega_s \cap \Omega_d$ 中像素的数量, τ_d 表示 Ω_d 中像素的数量, 而 τ_s 是 Ω_s 中像素的数量。测试结果如图 1 所示, 其中 x 轴表示噪声级别。从图 1(a)中可以看到, 当噪声密度比较低时, 过多的非噪声像素被识别成噪声像素, 而当噪声密度提高后非噪声像素被错误识别的数量逐渐



(a) 检测的精确性



(b) 检测的正确性

图 1 不同级别的噪声对噪声检测的影响

Fig. 1 Effect of different noise levels on the noise detection

减少,这是因为在噪声密度较低的情况下,式(1)所产生的上下界之间的区间宽度较窄,而随着噪声密度增加这个区间宽度逐渐变宽,因此会产生图 1(a)中的曲线。从图 1(a)和图 1(b)可以看出 $\frac{\Gamma}{A} = \frac{\tau_s}{\tau_d} \leq 1$, 因此 $\Omega_s \subset \Omega_d$ 。这表明未被侵蚀的像素可以被认为是噪声像素,而受侵蚀的像素则不能看作是非噪声像素。

3 基于上下中值型噪声检测的中值滤波器

基于上下中值型噪声检测的中值滤波器 (upper-lower-median-noise-detection based adaptive median filter, ULAM) 的框架如图 2 所示,在图像滤波过程中,噪声像素由 ULAM 来处理,而非噪声像素则不进行滤波。

在第一次图像滤波时,每个噪声像素的滤波窗口开始选择的尺寸是 3×3 ,如果非噪声像素的个数至少为 3 个的话,则噪声像素由非噪声像素的中值

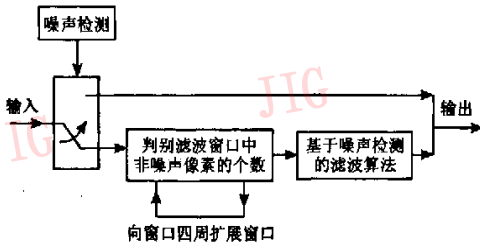


图 2 ULAM 滤波算法框图

Fig. 2 Frame of ULAM algorithm in image filtering

来代替,否则滤波窗口按照 $5 \times 5, 7 \times 7$ 等膨胀,直到非噪声像素的个数至少为 3 个。但是,如果窗口大小为 11×11 之后还不能满足要求,则窗口扩张停止并且噪声像素值由窗口中所有像素的中值来取代。在以后的反复图像滤波中,噪声像素由滤波窗口中的所有像素的中值来替代,其他步骤和第 1 次图像滤波的步骤相同。因此,这种滤波方法是一种自适应中值滤波算法。

4 仿真实验

在仿真实验中,采用 3 幅经典图像:peppers、girl2 和 girl1。peppers 图像中的噪声密度是 $p = 40\%$, girl1 图像中的是 $p = 60\%$, girl2 图像被密度为 $p = 80\%$ 的噪声所侵蚀,测试软件为 MATLAB6.5.1。

首先,粗略测试一下 ULAM 的性能。从图 3 中可以看出,两次重复滤波就可以有效地消除脉冲噪声,并且经过若干次滤波之后图像的质量也不会下降。

这是由于新型噪声检测器的采用,使噪声像素和非噪声像素被很好地识别。在图像滤波的过程中,非噪声像素不进行处理,同时噪声像素由非噪声像素来决定,因此,噪声像素的估计值在少数几次图像处理之后就会收敛。

在仿真过程中,SMF (standard median filter)、拓扑中值滤波器 (topological median filters, TMF)^[5] 和改进切换的中值滤波器 (improved switching median filters, ISM)^[10] 作为对比算法。除了在视觉上的比较外,数值也作为重要的性能指标,本文采用峰值信

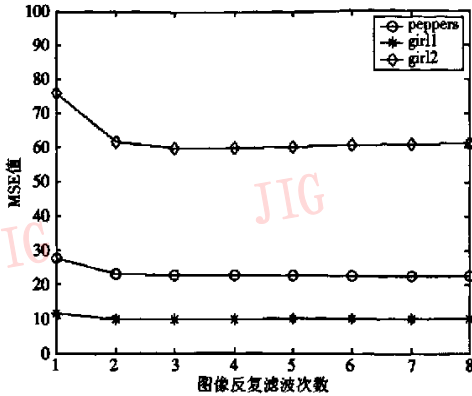


图 3 ULAM 的性能测试:滤波次数对图像质量的影响
Fig. 3 Performance testing of ULAM; effect of iteration times on the qualities of filtered images

噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 和平均绝对值差 (mean absolute error, MAE) 作为衡量滤波质量的数值指标,其形式如下:

$$\begin{cases} \text{MSE} = \frac{1}{512^2} \sum_{i=1}^{512} \sum_{j=1}^{512} (x_{i,j} - y_{i,j})^2 \\ \text{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{255^2}{\text{MSE}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{512^2} \sum_{i=1}^{512} \sum_{j=1}^{512} |x_{i,j} - y_{i,j}| \quad (3)$$

其中, $x_{i,j}$ 和 $y_{i,j}$ 分别表示原始图像和滤波图像的像素值,这些性能指标如表 1 所示。从表中可以看出在从低到高的不同密度的不同图像,在 3 种数值方面 ULAM 的性能都是突出的,从数值上看,本文所提出的滤波算法处理的图像最接近原始图像(如图 4 所示)。

表 1 由 4 种算法处理后的性能指标

Tab. 1 The performance indices of four filters

			standard median filter			TMF	ISM	ULAM	
			5 × 5	7 × 7	9 × 9				
peppers	噪声图像	PSNR	9.36	29.68	28.75	27.94	29.82	30.08	34.13
	噪声密度 $p = 40\%$	MAE	50.78	4.54	5.03	5.50	4.30	3.77	1.82
girl1	噪声图像	PSNR	7.01	31.44	31.11	30.05	30.83	31.91	38.02
	噪声密度 $p = 60\%$	MAE	76.07	3.51	3.69	4.11	3.69	3.18	1.41
girl2	噪声图像	PSNR	6.43	16.62	22.01	24.32	22.08	24.48	30.27
	噪声密度 $p = 80\%$	MAE	102.04	16.47	10.10	9.20	11.79	9.17	4.93

由于 3 幅图像 (peppers, girl2 和 girl1) 的滤波结果在视觉对比上很类似,为了避免重复说明,在文中只给出 girl1 的视觉比较结果如图 5 所示。对于 SMF 来说,采用被 5 × 5 SMF 滤波的图像。从这些图像整体来看,由 ULAM 算法滤波的图像质量是最好的,尤其是细节部分,如 girl12 的头发和眼睛。

根据上述仿真结果,在噪声密度从低到高的情况下 ULAM 性能是令人满意的,而且 ULAM 大幅度地减弱了像素错位和图像模糊的程度,因而在实验中更多的细节得以保留。

5 结论

本文提出了一种新的噪声检测器,它克服了过多像素被错误分类的缺点。噪声检测由两个步骤组成,首先对噪声图像中的每个 8 × 8 块中的所有像素进行分类,然后导出每个块的多元素中子集;其次,根据每个 8 × 8 块中的上下中值得出像素识别的上下界,噪声像素由这对上下界来识别。基于这种噪声检测,在本文中提出了一种自适应中值滤波,根据非噪声像素的个数来决定是处理噪声像素还是继续膨胀滤波窗口。在仿真过程中,几个经典的中值滤波器作为参照方法和本文滤波算法进行了比较,实



(a) peppers (b) girl2

图 4 原始图像

Fig. 4 Original images

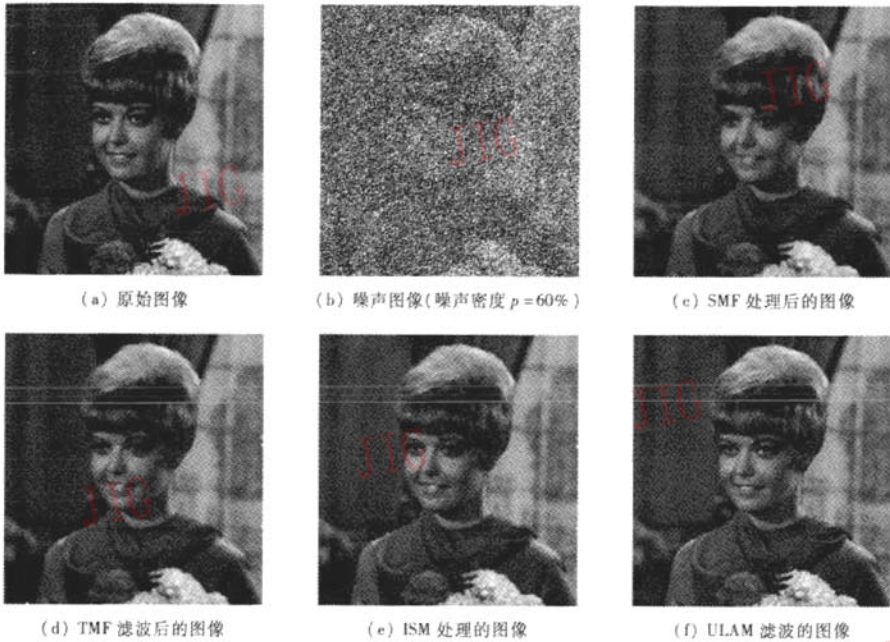


图 5 对“girl1”图像的滤波结果

Fig.5 Results of “girl1” filtered

验结果显示新的算法在所有的测试项目中都是出色的,因此,本文提出的噪声检测和滤波算法是有效和实用的。

参考文献 (References)

- 1 Tukey J W. Nonlinear (nonseparable) Methods for Smoothing Data [A]. In: Proceedings of Congress Records EASCOM' 74, 1974: 673 ~ 681.
- 2 Niles T A, Callagher N C. Median filters: some modifications and their properties [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1982, 30(5): 739 ~ 746.
- 3 Brownrigg D. The weighted median filter [J]. Communication Association Computer, 1984, (3): 807 ~ 818.
- 4 Ko S J, Lee Y H. Center weighted median filters and their applications to image enhancement [J]. IEEE Transactions on Circuits System, 1991, 38(9): 984 ~ 993.
- 5 Senel H G, Peters R A II, Dawant B. Topological median filters [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(2): 89 ~ 104.
- 6 Florencio D, Schafer R. Decision-based median filter using local signal statistics [A]. In: Proceedings of SPIE International Symposium Visual Communications Image Processing, Chicago, Illinois, USA, 1994: 268 ~ 275.
- 7 Pok G, Liu J C, Nair A S. Selective removal of impulse noise based on homogeneity level information [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(1): 85 ~ 92.
- 8 Russo, Fabrizio. Impulse noise cancellation in image data using a two-output nonlinear filter [J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2004, 36(3-4): 205 ~ 213.
- 9 Eng H L, Ma K K. Noise adaptive soft-switching median filter [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 242 ~ 251.
- 10 Zhang S, Karim M A. A new impulse detector for switching median filters [J]. IEEE Signal Processing Letter, 2002, 9(11): 360 ~ 363.