

# 彩色图像脉冲噪声的自适应矢量滤波

郁伯康\*\* 郁梅

(杭州电子工业学院电子工程系 杭州 310037)

**【摘要】** 提出了基于噪声像素检测的自适应矢量滤波器的新方法, 该法对图像中噪声像素进行检测时, 仅对噪声像素进行矢量滤波, 而非噪声像素则保持其原值不变, 并可根据图像噪声情况自适应地选择滤波窗口。新滤波器能有效地滤除彩色随机脉冲噪声, 并保持图像边缘与细节, 其性能优于经典的矢量中值滤波器、方向-距离滤波器、方向-幅度矢量滤波器等非线性滤波器。

**关键词** 彩色图像; 脉冲噪声; 噪声检测; 自适应矢量滤波器

中图分类号 TN713

彩色图像滤波技术作为彩色图像系统中一个重要环节, 已广泛应用于多媒体信号处理、压缩与传输和彩色计算机视觉系统中。实际的彩色图像可能受到不同类型的噪声干扰, 而噪声干扰的类型和程度取决于解码误差、通信错误或图像传输通道中的噪声等许多因素。

对于彩色图像脉冲噪声的滤波, 矢量处理方法是把彩色像素作为一个三维矢量来处理。结合有序统计方法, 彩色矢量间的距离信息和方向信息能有效地应用于彩色图像滤波和分析。对于给定的彩色像素集合, 其矢量中值是一个能有效反映其特征的矢量。基于矢量中值的滤波方法通常被称为矢量中值滤波(VMF)<sup>[1]</sup>。在矢量中值滤波的基础上, Buchowicz 等采用了多通道距离滤波器<sup>[2]</sup>, Trhanias 等则利用彩色矢量间的方向信息给出了矢量方向滤波器(VDF)<sup>[3]</sup>。结合矢量中值滤波和矢量方向滤波, 人们又提出了方向-距离滤波器(DDF)<sup>[4,5]</sup>。此外, Plataniotis 等还提出了方向-幅度滤波器(DMVF)<sup>[6]</sup>。

对于矢量滤波器的设计, 存在如何进一步提高图像细节保持能力的问题。实际应用中, 我们希望仅对噪声像素进行有序滤波, 而非噪声像素则保持其原值不变。在矢量滤波器的滤波窗选择上, 对高噪声情况选用较大的滤波窗, 而在低噪声情况下选用小滤波窗有助于进一步提高滤波性能。基于这一思想, 本文提出了彩色图像随机脉冲噪声的自适应滤波器。实验中所有的噪声图像由 PaintShopPro-5.0 软件产生幅度可变的随机彩色脉冲噪声<sup>[7]</sup>, 实验结果表明基于噪声检测的自适应彩色图像滤波器能有效滤除彩色随机脉冲噪声, 并保持图像边缘与细节, 其性能优于经典的 VMF、DDF 及 DMVF 等非线性滤波器。

## 1 脉冲噪声检测及分析

给定彩色像素集合  $S = \{v_k; 1 \leq k \leq n\}$ ,  $v_k = (r_k, g_k, b_k)$  是 RGB 彩色空间的一个像素,  $r_k, g_k, b_k$  分别为对应于 RGB 彩色空间的三个分量, 则集合  $S$  中  $n$  个矢量的矢量中值  $v_{VM} = (r_{VM}, g_{VM}, b_{VM})$ , ( $v_{VM} \in S$ ), 满足  $\sum_{k=1}^n \|v_{VM} - v_k\| \leq \sum_{k=1}^n \|v_h - v_k\|$ ,  $\forall v_h \in S$ ,  $\|\cdot\|$  为矢量范数。类似地, 加权矢量中值可定义为: 给定由  $n$  个彩色像素构成的集合  $S = \{v_k; 1 \leq k \leq n\}$  及相应的权值  $W = \{w_k; k=1, 2, \dots, n\}$ ,  $w_k$  为非负整数。令  $S_w = \{w_1 \diamond v_1, w_2 \diamond v_2, \dots, w_n \diamond v_n\}$ ,  $w_j \diamond v_j$  表示将  $v_j$  重复  $w_j$  次, 即  $S_w$  中有  $w_1$  个  $v_1, w_2$  个  $v_2, \dots, w_n$  个  $v_n$ ,

1999年12月30日收稿

\* 浙江省自然科学基金资助项目, 基金号: 698064

\*\* 男 58岁 大学 副教授

共  $m = \sum_{k=1}^n w_k$  个矢量, 则  $S$  的加权矢量中值  $v_{WVM} = (r_{WVM}, g_{WVM}, b_{WVM}), (v_{WVM} \in S)$ , 满足

$$\sum_{k=1}^n w_k \|v_{WVM} - v_k\| \leq \sum_{k=1}^n w_k \|v_h - v_k\| \quad \forall v_h \in S$$

矢量中值(或加权矢量中值)滤波的方法是以滤波窗中矢量集合  $S$  的矢量中值  $v_{VM}$ (或加权矢量中值  $v_{WVM}$ )替代当前的彩色像素。虽然矢量中值及加权矢量中值滤波器等作为非线性滤波器, 能较好地滤除图像中的随机脉冲噪声, 但在细节保持上仍需进一步改进。实际的含脉冲噪声的彩色图像  $\{v_{ij}; 1 \leq i \leq K, 1 \leq j \leq L\}$  可表示为真实图像  $\{s_{ij}\}$  与幅度为  $h_{i,j}$ 、概率为  $p$  的随机脉冲噪声的复合, 即

$$v_{i,j} = \begin{cases} s_{i,j} + h_{i,j} & \text{概率为 } p \\ s_{i,j} & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

对于受脉冲噪声干扰的彩色图像, 比较合理的滤波方案是仅对噪声像素进行有序滤波, 而非噪声像素保持其原值不变, 因而有效的噪声检测是提高滤波器细节保持能力的关键。本文给出三种脉冲噪声检测方案。由于图像的三个通道可能被噪声独立干扰, 因此对三个通道进行单独检测。

### 1.1 脉冲噪声检测方案 1 (IND<sub>VM</sub>) 和方案 2 (IND<sub>WVM</sub>)

方案 1(或方案 2)利用实际像素值与矢量中值(或加权矢量中值)滤波后的图像像素值(即估计像素值)之间的差值, 来判断该像素是否受噪声干扰。定义实际噪声图像像素  $v_{ij}$  与其估计像素值  $v_{e(i,j)}$  之间的差值矢量为  $D_{i,j} = (d_{i,j}^r, d_{i,j}^g, d_{i,j}^b)$ , 则

$$d_{i,j}^r = |r_{i,j} - r_{e(i,j)}| \quad d_{i,j}^g = |g_{i,j} - g_{e(i,j)}| \quad d_{i,j}^b = |b_{i,j} - b_{e(i,j)}| \quad (2)$$

方案 1 中  $v_{e(i,j)}$  为矢量中值  $v_{VM(i,j)}$ , 而在方案 2 中为加权矢量中值  $v_{WVM(i,j)}$ 。当像素  $v_{ij}$  的 RGB 任意一个通道的距离  $d_{i,j}^c$  ( $c=r, g$ , 或  $b$ ) 大于阈值时, 则认为该像素被噪声污染, 即

$$N_{i,j} = \begin{cases} 1 & d_{i,j}^r > T_{i,j}^r \text{ 或 } d_{i,j}^g > T_{i,j}^g \text{ 或 } d_{i,j}^b > T_{i,j}^b \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $N_{i,j}$  为噪声检测结果,  $N_{i,j}=1$  表明图像像素  $v_{ij}$  可能被噪声干扰。局部阈值  $T_{i,j}^c$  定义如下

$$T_{i,j}^c = \alpha + \log_2 d_{i,j}^c \quad c=r, g \text{ 或 } b \quad (4)$$

式中  $\alpha$  为局部阈值的下限, 经验数据为 26。平滑区域内的局部阈值通常低于非平滑区域(边缘与细节部分)的局部阈值, 因为平滑区域内的  $d_{i,j}^c$  通常较小。

### 1.2 脉冲噪声检测方案 3 (IND<sub>MASK</sub>)

方案 1 和方案 2 利用脉冲噪声不同于其相邻像素的特性进行噪声检测, 但由于图像边缘上的像素也明显不同于其相邻像素, 因而在噪声检测中容易被误认为是脉冲噪声。考虑到脉冲噪声通常为孤立像素, 而边缘像素非孤立, 我们定义如图 1 所示的 8 个模板以区分边缘像素和脉冲噪声。以  $R$  通道为例, 对于每一个模板, 分别计算中心像素与其 5 个阴影中的相邻像素在  $R$  通道上的距离  $\{d'_{x,y}\}$ , 用 5 个距离中最小的 3 个求平均距离。例如对图 1 中的第一个模板, 令  $\{d'_{x,y} = |r_{x,y} - r_{i,j}|\}$ ,  $r_{x,y}$  为阴影中五邻域的  $R$  分量, 对  $d'_{x,y}$  按从小到大排序得到  $d'_{(1)}, d'_{(2)}, \dots, d'_{(5)}$ , 则按模板 1 所得的平均距离为  $D'_1 = (d'_{(1)} + d'_{(2)} + d'_{(3)})/3$ 。类似地, 我们可以计算对应于其余 7 个模板的  $D'_k$  ( $2 \leq k \leq 8$ ),

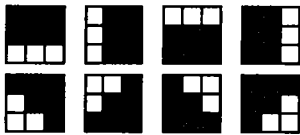


图 1 噪声检测方案 3 的 8 个模板

最终像素  $v_{ij}$  在  $R$  通道上与其相邻像素的距离定义为  $D'_{i,j} = \min\{D'_k; 1 \leq k \leq 8\}$ 。当  $D'_{i,j} > T'_{i,j}$  时, 则认为像素  $v_{ij}$  的  $R$  通道被噪声感染,  $T'_{i,j} = \alpha + \log_2 D'_{i,j}$ 。同样, 可以对图像的另外两个通道进行检测, 并由式(3)得到相应的噪声检测结果  $\{N_{ij}; 1 \leq i \leq K, 1 \leq j \leq L\}$ 。

为了评估脉冲噪声检测的准确性与合理性, 引入参数  $\eta_r$ 、 $\eta_p$  和  $\eta_d$ , 分别定义如下

$$\eta_r = \frac{N_{\text{correct}}}{N_{\text{total}}} \quad \eta_p = \frac{N_{\text{correct}}}{N_{\text{estimate}}} \quad \eta_d = \eta_r \eta_p \quad (5)$$

式中  $N_{\text{correct}}$  为噪声检测器正确检测出的脉冲噪声像素数;  $N_{\text{total}}$  为噪声图像中实际脉冲噪声像素总数;  $N_{\text{estimate}}$  为噪声检测器所估计的脉冲噪声像素总数。  $\eta_r$  和  $\eta_p$  分别反映了噪声检测器避免漏检和误检的能力,  $0 \leq \eta_r, \eta_p \leq 1$ ;  $\eta_d$  则体现了噪声检测器的综合能力。我们希望噪声检测器的  $\eta_r$  和  $\eta_p$  越大越好。当  $\eta_r$  接近于 1, 表明噪声检测器基本检测出了图像中的噪声点; 当  $\eta_p$  接近于 1, 表明噪声检测器检测出的噪声点基本上为图像中的噪声点, 误检的噪声点数很小。最终, 希望  $\eta_d$  的值尽可能大。尽管以上 3 个参数可用来评价噪声检测器的优劣, 但也不是绝对的。这是因为在实际图像滤波中, 平滑区域内的噪声误检对滤波效果的影响小于边缘区域的噪声误检, 相反平滑区域内的噪声漏检对滤波效果的影响则大于边缘区域的噪声漏检。

## 2 彩色图像脉冲噪声自适应滤波器设计

改进矢量中值滤波性能的基本思想是通过上述的噪声检测, 仅对噪声像素进行滤波, 而对未受干扰的像素则保持原值, 可表示为

$$\tilde{v}_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j} & N_{i,j} = 0 \\ v_{VM(i,j)} & N_{i,j} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

在用 VMF 进行滤波时, 选用的滤波窗口将直接影响滤波的效果。对于小概率噪声, 采用小的滤波窗口能较好地保持图像的细节, 而噪声较大时则应选用大的滤波窗口。因此, 式(6)可进一步改进为

$$\tilde{v}_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j} & N_{i,j} = 0 \\ v_{CVM(i,j)} & N_{i,j} = 1, \text{ 且 } v_{i,j} \text{ 的四邻域中至多有一个噪声像素} \\ v_{SVM(i,j)} & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $v_{CVM(i,j)}$  和  $v_{SVM(i,j)}$  分别为采用十字窗和方形窗的矢量中值。

由于采用了局部自适应滤波窗口, 式(7)的滤波方案优于式(6)。对应于上述三种噪声检测方案  $IND_{VM}$ 、 $IND_{WVM}$  和  $IND_{MASK}$ , 结合式(7)可得到 3 个相应的自适应彩色图像滤波器, 分别表示为  $AF_{VM}$ 、 $AF_{WVM}$  和  $AF_{MASK}$ 。

## 3 实验结果

为测试上述三个滤波器的性能, 将其与典型的非线性彩色图像滤波器 VMF、DDF、DMVF 以及另一基于脉冲噪声检测的自适应滤波器进行了比较<sup>[8]</sup>, 对许多不同类型的彩色图像进行了测试分析。所有的噪声图像由 PaintShopPro-5.0 软件产生随机的彩色脉冲噪声而得到。图 2 为典型测试图像 Bird(244×372)。此图像既有较为平滑的区域, 也有丰富的细节或边缘。实验中, 采用 MAE 评价标准来评估滤波器的性能

$$MAE = \frac{1}{K \times L} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L \|s_{i,j} - \tilde{v}_{i,j}\|_1 \quad (8)$$

图 3a~3c 给出了测试图像在不同噪声情况下采用  $IND_{VM}$ 、 $IND_{WVM}$ 、 $IND_{MASK}$  以及文献[8]中自适应滤波器 LAF 的噪声检测方案所对应的  $\eta_r$ 、 $\eta_p$  和  $\eta_d$  参数值。图中横坐标表示所加脉冲噪声  $N$  的百分比值, 纵坐标则为 3 个



图2 测试图像

参数的值。图 3d 给出了测试图像加 1%~20% 随机彩色脉冲噪声时, 采用不同滤波器滤波后的 MAE 值。图中, 新方法滤波器  $AF_{VM}$ 、 $AF_{WVM}$  和  $AF_{MASK}$  的 MAE 值明显小于 VMF、DDF 和 DMVF。 $AF_{WVM}$  和  $AF_{MASK}$  则总体上优于 LAF。 $AF_{MASK}$  特别适合处理噪声污染程度较小的图像, 但随着噪声

污染程度的增加,其滤波性能下降较快。这是因为 $IND_{MASX}$ 利用脉冲噪声多为孤立点而边缘像素非孤立来提高滤波器的图像细节保持能力。而随着噪声污染程度的增加,非孤立噪声数也相应增加。从 $\eta_r$ 来看, $IND_{MASX}$ 的值最小,表明提高细节保持能力与滤除噪声能力是矛盾的。此外,从图3中可看出, $\eta_r$ 、 $\eta_p$ 和 $\eta_d$ 虽然可用来评价噪声检测器的性能,但不是绝对的,滤波器的最终效果还取决于漏检或误检的噪声是在平滑区域还是在非平滑区域。图4给出了不同滤波器滤波后清晰度的比较情况,实验中Bird图像受4%随机彩色脉冲噪声干扰。显然新方法自适应滤波器在图像细节保持上明显优于VMF、DDF和DMVF,而 $AF_{MASX}$ 的细节保持能力最强。

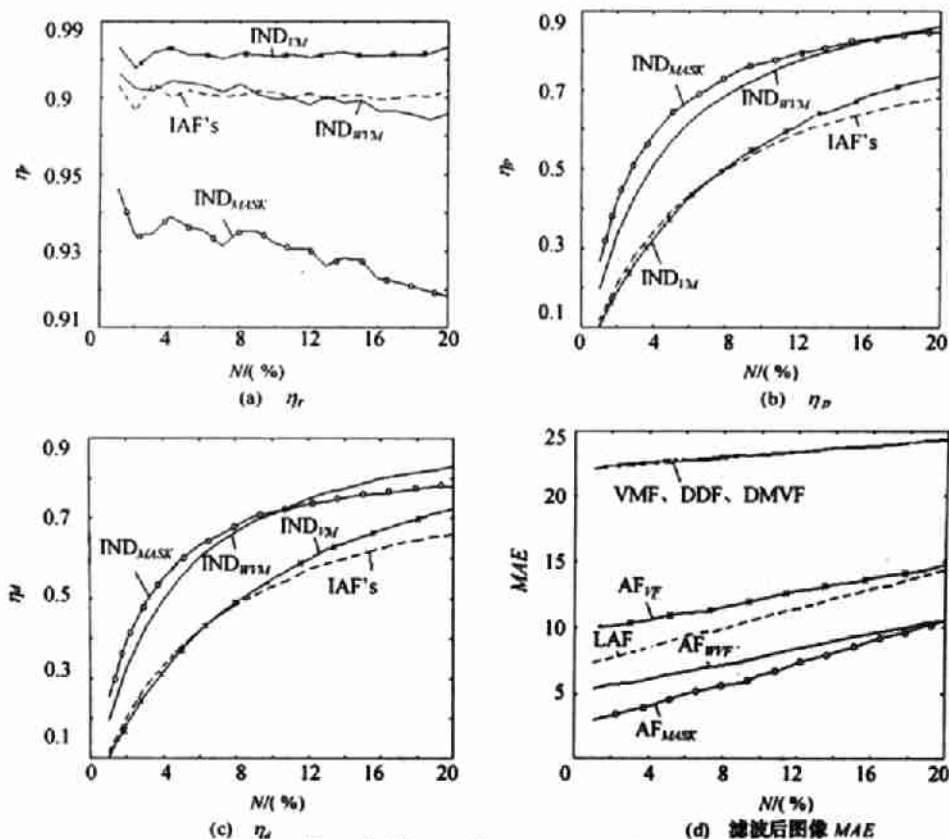


图3 图像Bird的 $\eta_r$ 、 $\eta_p$ 、 $\eta_d$ 和MAE

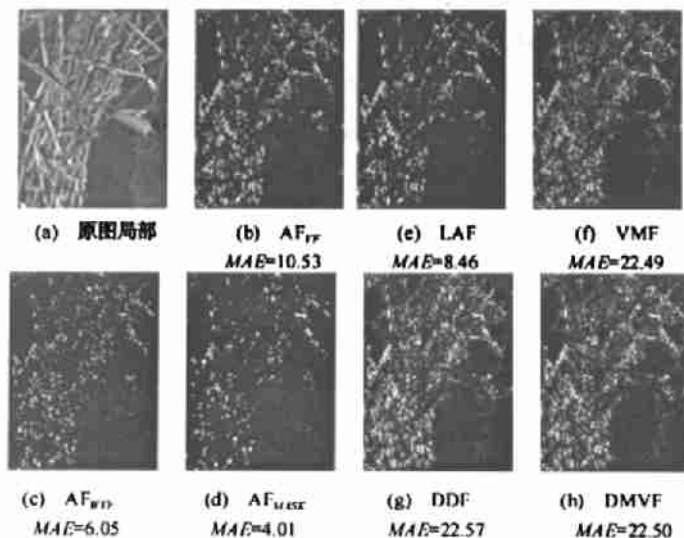


图4 各滤波器图像细节保持能力的比较

## 4 结 论

彩色图像滤波技术已广泛应用于数字图像传输、视觉分析和自动图像理解。本文就彩色图像随机脉冲噪声的滤波进行了研究,提出了具有细节保持能力的自适应滤波新方法。通过合理有效的彩色图像脉冲噪声检测,对噪声像素采用滤波窗口自适应的有序滤波,而非噪声像素则保持其原值不变,既有效地滤除了随机脉冲噪声,又较好地保持了彩色图像边缘与细节。实验结果表明,自适应滤波器的滤波性能优于经典的矢量中值滤波器(VMF)、方向-距离滤波器(DDF)和方向-幅度矢量滤波器(DMVF)等非线性滤波器。

### 参 考 文 献

- 1 Astola J, Haavisto P, Neuvo Y. Vector median filter. *Processings of the IEEE*, 1990, 78: 678~689
- 2 Buchowicz A, Pitas I. Multidimensional distance filters. *Proc of IEEE Int Conf on Image Processing 94*, 1994, 2: 575~579
- 3 Trahanias P E, Venetsanopoulos A N. Vector directional filters—a new class of multichannel image processing filters. *IEEE Trans Image Processing*, 1993, 2: 528~534
- 4 Karakos D G, Traniias P E. Combining vector median and vector directional filters: the directional-distance filters. *Proc of IEEE Int Conf On Image Processing 95*, 1995, 1: 171~174
- 5 Trahanias P E, Pitas I, Venetsanopoulos A N. Directional processing of color image: theory and experimental results. *IEEE Trans Image Processing*, 1996, 5: 868~880
- 6 Plataniotis K N, Androustos D, Venetsanopoulos A N. Content-based color image filters. *Electronics Letters*, 1997, 33: 203~212
- 7 Jasc Software Inc. Paint shop pro Version 5.0 shareware.
- 8 Lee K C, Song H J, Sohn K H. Detection-estimation based approach for impulsive noise removal. *Electronics Letters*, 1998, 34: 449~450

## Adaptive Vector Filters for Impulse Noise Removal in Color Image

Yu Bokang Yu Mei

(Dept. of Electronics Engineering, Hangzhou Institute of Electronics Engineering Hangzhou 310037)

**Abstract** In this paper, new filters based on noise detection are proposed for impulse noise removal in color images. In the new method, impulse noise is properly detected, and the detected noisy pixels are filtered with adaptive selection of filter window, while the noise-free pixels are kept without any changes. Experimental results show that the proposed filters remove impulse noise and preserve edges and details very well, which perform better than the classical vector median filter (VMF), direction-distance filter (DDF), and directional-magnitude vector filter (DMVF).

**Key words** color image; impulse noise; noise detection; adaptive vector filter