

一种基于模糊决策的开关矢量中值滤波方法*

张辰锐¹, 樊养余¹, 刘 姝¹, 雷 涛^{1,2}, 王剑书¹

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 西安 710129; 2. 兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

摘 要: 针对现有的彩色图像脉冲噪声去除方法没有区分滑动窗口中的像素是否为噪声像素而导致滤波效果差的问题, 提出一种基于模糊决策的开关矢量中值滤波方法。该方法首先利用开关条件判断像素是否被污染, 针对被污染的像素, 通过模糊数学理论构造适合脉冲噪声去除的隶属函数; 然后计算滑动窗口内所有像素的模糊隶属度, 并根据置信区间去除疑似噪声像素以优化滑动窗口的取值空间; 最后对优化后的滑动窗口应用矢量中值滤波(VMF)以去除噪声像素。与现有方法相比, 新的方法去除了滑动窗口中心像素的邻域疑似噪声, 从而有效提升了滤波效果。实验验证了该方法的高鲁棒性和实用性。

关键词: 彩色图像处理; 矢量中值滤波; 模糊隶属度; 鲁棒性

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)12-3870-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.12.092

Switching vector median filter based on fuzzy decision

ZHANG Chen-ru¹, FAN Yang-yu¹, LIU Shu¹, LEI Tao^{1,2}, WANG Jian-shu¹

(1. School of Electronics & Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China; 2. School of Electronic & Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: According to the fact that conventional color image filtering algorithms do not distinguish whether the pixels in the sliding window are noise pixels and thus leading to poor filtering results, this paper proposed a switching vector median filtering method based on fuzzy decision. Firstly, it used the switching conditions to determine whether the center pixel of a neighborhood was noisy. For the corrupted pixels in color image, it constructed a membership function for removal of noise pixels according to fuzzy mathematical theory, estimated all the pixels' memberships in the sliding window according to the proposed membership function. And then it removed some pixels with high membership in terms of the confidence interval. Finally, it employed VMF in the optimized sliding window. Compared with the existing method, the novel method could improve the filtering results by removing the suspected noise pixels in the sliding window. Experimental results show that the proposed method performs better performance of robustness and practicality.

Key words: color image processing; VMF; fuzzy membership; robustness

0 引言

目前,关于灰度图像的去噪研究已有很多,但是相比灰度图像,彩色图像含有更多的信息。因此近年来,彩色图像去噪的相关算法成为新的研究热点。其中,在彩色图像噪声中,脉冲噪声是比较典型的一种^[1]。针对脉冲噪声,目前有两类滤波方法,即基于分量形式的滤波方法^[2]和基于矢量的滤波方法^[3]。分量形式的滤波方法是先对彩色图像的三个分量图像 R 、 G 、 B 分别滤波,然后再合成,形成新的彩色图像。然而,该方法由于没有考虑彩色图像三个分量之间的强相关性,导致滤波后的图像引入了新的颜色。基于矢量的滤波方法较好地解决了该问题。该类方法是基于统计理论的非线性滤波技术,在保证消除噪声的同时,很好地保持了色调等信息。许多研究证明,基于统计理论的非线性矢量滤波方法更适合抑制彩色图像的脉冲噪声^[4]。

Astola 等人^[5]最早提出了较为经典的矢量中值滤波(VMF)方法。之后, Trahanias 等人^[6]提出了另外一种具有代表性的矢量滤波方法,即矢量方向滤波(BVDF)方法。该方法基于角度距离,首先计算滑动窗口内每个像素到其他所有像素的聚合距离,然后选择聚合距离最小的像素作为滤波输出。Karakos 等人^[7]提出了方向距离滤波(DDF)方法,该方法原理与 BVDF 原理相同,不同之处是采用的距离为混合距离(欧式距离与角度距离),由于考虑了两种不同的距离,DDF 不仅能够消除矢量模相差较大的噪声像素,而且可以消除色调相差较大的噪声像素^[8]。然而,由于上述方法对图像的所有像素作等同处理,导致非噪声像素被平滑,使得滤波后的图像存在边缘模糊、视觉效果差等问题。针对上述问题, Smolka^[9]提出了一种改进的中心加权矢量中值滤波(CWVMF)方法,该方法对中心像素到邻域像素的距离加权,实现了抑制噪声和保护细节的平衡。Lukac^[10]提出了自适应中心加权方向滤波(AC-WVDF),该方法是 CWVMF 的一种改进,可以自适应地调节中

收稿日期: 2013-01-07; **修回日期:** 2013-03-05 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61202314); 中国博士后科学基金资助项目(2012M521801); 西北工业大学研究生创业种子基金资助项目(Z2013065)

作者简介: 张辰锐(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为图像处理、模式识别等(zhangchen_rui@163.com); 樊养余(1960-),男,教授,博士(后),主要研究方向为图像处理、信号处理、虚拟现实技术等; 刘姝(1989-),女,博士研究生,主要研究方向为计算机视觉、图像处理、虚拟现实; 雷涛(1981-),男,副教授,博士(后),主要研究方向为图像处理、数学形态学等; 王剑书(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为图像处理。

心像素到邻域像素距离的权值。此外,有人提出了开关型滤波方法,Smolka 等人^[8]提出了一种快速检测噪声的开关型滤波(FPGF)方法,该方法利用对等体组的概念,加入了检测脉冲噪声的开关机制。Celebi 等人^[11]提出了鲁棒的开关中值滤波(RSVMF)方法,该方法基于秩序统计,利用单变量中值算子判定中心像素是否为噪声。Jin 等人^[12]提出了基于 CIELAB 颜色空间的开关中值滤波(LABSVMF)方法,该方法首先将彩色图像从 RGB 空间变换到 CIELAB 空间,然后模仿 Laplacian 算子,提出了一种脉冲噪声检测算法。近来,基于一些新的数学理论,Smolka^[13]提出了对等体组开关中值滤波(PGSF)方法,该方法引入 Fisher 判别函数,首先将滑动窗口内像素分为两组,然后利用双阈值判断像素是否为噪声。Camarena 等人^[14]提出了基于模糊逻辑的两步式检测脉冲噪声的滤波(FRF)方法,该方法基于模糊度量及秩序差异统计,通过两个步骤检测脉冲噪声。Geng 等人^[15]提出了四元数开关中值滤波(QSF)方法,该方法计算中心像素与邻域像素的四元数差,利用差值大小判断噪声。

上述彩色图像去噪方法从不同的角度提升了去噪效果,并且在保护图像的边缘等细节信息方面也有了不同程度的提升。然而,其存在的问题如下:由于滑动窗口中心像素的邻域存在噪声,上述方法在执行滤波操作之前并没有去除邻域噪声,使得滤波后的中心像素可能被邻域噪声替换,影响去噪效果。此外,在噪声密度相对较高时,上述方法表现出较差的滤波性能。

为了进一步改善彩色图像的滤波效果,提出了一种基于模糊决策的开关矢量中值滤波(FDVMF)方法。该方法首先利用开关条件判断像素是否为噪声;其次,通过构造一个模糊隶属函数,计算滑动窗口内像素的模糊隶属度并设置合适的置信区间,根据置信区间去除疑似邻域噪声;最后,对剩余非噪声像素应用矢量中值滤波。新方法的优势在于不仅具有噪声检测功能(即滤波器开关功能),而且在执行滤波处理前优化了滑动窗口的取值,因此得到更好的滤波结果。将新的方法同经典的矢量中值滤波 VMF^[5]方法及近年来一些滤波方法 FPGF^[8]、LABSVMF^[12]、RSVMF^[11]、PGSF^[13]、FRF^[14]、QSF^[15]作比较,实验结果表明,该方法相比上述方法在去除脉冲噪声方面更具有优势,而且能有效地保护边缘等细节信息。

1 模糊决策开关矢量滤波法

1.1 脉冲噪声检测方法

设滑动窗口 W 的尺寸为 $N_1 \times N_2$ (其中, N_1 为窗口高度, N_2 为窗口宽度)。由于正负脉冲噪声(椒盐噪声)的值为最大值 255(正脉冲噪声)或最小值 0(负脉冲噪声),故定义如下的噪声检测规则:判断窗口中心像素的三个颜色分量值(R 、 G 、 B)是否都介于最大值 255 和最小值 0 之间,如果中心像素的三个颜色分量值均处于最大值 255 和最小值 0 之间,那么,该像素被判定为非噪声像素,并以保留;否则,中心像素被判定为噪声像素。设滑动窗口为 $W = \{X_1, X_2, \dots, X_{N_1 \times N_2}\}$, 一个尺寸为 3×3 的滑动窗口如下:

$$W = \begin{bmatrix} X_1 & X_4 & X_7 \\ X_2 & X_5 & X_8 \\ X_3 & X_6 & X_9 \end{bmatrix}$$

$X_C(C = \frac{N_1 \times N_2 + 1}{2})$ 为窗口中心像素,噪声判定公式为

$$\text{noised} = \begin{cases} 0 & \text{if } (0 < X_C^R < 255 \text{ and} \\ & 0 < X_C^G < 255 \text{ and} \\ & 0 < X_C^B < 255) \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\text{noised} = 0$ 表示非噪声, $\text{noised} = 1$ 表示噪声; X_C^R 、 X_C^G 、 X_C^B 分别为窗口中心像素 R 、 G 、 B 三个分量值。

1.2 模糊决策矢量中值滤波

由 1.1 节得出, $\text{noised} = 0$, 表明当前像素不是噪声, 此时保留原像素不处理; $\text{noised} = 1$, 表明该像素为噪声, 得出中心像素为噪声后, 首先对滑动窗口 W 中分量为 0 的像素应用极值变换运算(即 0 用 255 替代)。将该操作应用于彩色像素的所有三个颜色分量, 极值变换操作如下:

$$\begin{bmatrix} 127 & 24 & 0 \\ 0 & 67 & 180 \\ 89 & 255 & 146 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 127 & 24 & 255 \\ 255 & 67 & 180 \\ 89 & 255 & 146 \end{bmatrix}$$

其次, 计算滑动窗口 W 中各像素的模值(2 范数)并找出最大值, 在此基础上, 计算各像素的模糊隶属度。模值计算如下:

$$D_i = \|X_i\|_2 \quad (2)$$

其中, $i \in \{1, 2, \dots, N_1 \times N_2\}$ 。滑动窗口中 2 范数的最大值计算为

$$D_{\max} = \max_{i \in \{1, 2, \dots, N_1 \times N_2\}} \{D_i\} \quad (3)$$

根据隶属函数构造的原则, 并结合滑动窗口中像素的特点, 定义隶属函数为

$$\delta_i = D_i / D_{\max} \quad (4)$$

计算得出窗口中各像素的模糊隶属度之后, 设置阈值 th 获取置信区间 $[0, th]$ ($th = (0.9 + 0.1 \times p)$, $th \rightarrow 1$, 其中, p 表示噪声密度)。然后, 根据置信区间 $[0, th]$ 去除窗口中的疑似噪声像素, 即保留隶属度 $\delta_i \in [0, th]$ 的像素。由于计算模糊隶属度之前, 将滑动窗口中的 0 像素值用 255 替代, 导致噪声像素的模值较大, 故噪声像素的模糊隶属度趋近于 1。另外, 构造阈值 $th = (0.9 + 0.1 \times p)$ (p 表示噪声密度), 阈值 th 与噪声密度 p 呈线性增长关系, 这是因为当噪声密度增大时, 图像中被污染的像素随之增多, 滑动窗口内的噪声像素也相应增多, 导致窗口中有更多像素的模糊隶属度趋近于 1。为了更好地去除疑似噪声像素, 保留非噪声像素, 阈值 th 应随着噪声密度的增大也相应增大。然后, 对窗口中剩余的像素应用矢量中值滤波, 该步骤可以表示为

$$\varphi = \{i | 0 \leq \delta_i \leq th\} \quad (5)$$

$$X_{\text{out}} = \arg \min_{j \in \varphi} \left\{ \sum_{i=\varphi_1}^M \|X_i - X_j\|_2 \right\} \quad (6)$$

其中: φ 表示窗口中隶属度 δ_i 属于置信区间的像素的下角标集合; X_{out} 表示滤波输出; M 为隶属度 δ_i 属于置信区间的像素的总个数; φ_1 表示 φ 中的第一个值。综上所述, 本文提出的滤波方法可以表示如下:

$$X_{\text{NEW}} = \begin{cases} X_C & \text{if } (0 < X_C^R < 255 \text{ and} \\ & 0 < X_C^G < 255 \text{ and} \\ & 0 < X_C^B < 255) \\ X_{\text{out}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

其中, X_C 表示原始中心像素, X_{out} 表示应用模糊决策矢量中值滤波后的结果。本文提出的具体算法如下:

算法 1 FDVMF

初始化: 用 IMG 保存原始 RGB 图像, 复制 IMG 到 $\text{IMG}_{0 \rightarrow 255}$, 设最

滤波后图像为 X_{NEW} 。

a) 选择 $N_1 \times N_2$ 尺寸的滑动窗口, 在 IMG 图像中, 根据式(1)判断窗口中心像素 X_c 是否为噪声。如果 $noised = 0$, 则转向 b); 如果 $noised = 1$, 转向 c)。

b) 保留原始像素不变, 即 $X_{NEW} = X_c$ 。

c) 模糊决策矢量中值滤波。

(a) 极值变换运算(0 用 255 替代), 将 IMG 中当前窗口对应 IMG_{0-255} 图像相同位置的滑动窗口中分量值为 0 的像素值用 255 替代;

(b) 计算当前滑动窗口内像素的模糊隶属度 δ_i ;

(c) 判断各像素的模糊隶属度 δ_i 是否属于置信区间 $[0, th]$, 去除 IMG 滑动窗口中的疑似噪声像素, 对优化后的滑动窗口应用 VMF 输出: $X_{NEW} = X_{out}$ 。

d) IMG 中所有像素处理完后, X_{NEW} 就是滤波后的图像。

2 实验结果与分析

为了验证提出方法的有效性, 选用了标准测试图像 Lena (512 × 512, 24 bit) 与 Parrots (512 × 512, 24 bit) 作为实验图像, 如图 1(a) 和图 2(a) 所示, 并选用引言中已介绍过的七种具有代表性的彩色矢量滤波方法作为对比方法, 即 VMF、FPGF (对等体组参数: $m = 3, d = 45$)、LABSVMF (阈值参数: $T = 45$)、RSVMF (加权系数: $\alpha = 1.25$)、PGSF (阈值参数: $\Delta = 10, \delta = 5$)、FRF (阈值参数: $th_1 = 0.9 + \frac{p}{0.4} \cdot 0.07, th_2 = 0.87 + \frac{p}{0.4} \cdot 0.06, th_3 = 0.97 + \frac{p}{0.4} \cdot 0.01$, 其中 p 表示噪声密度)、QSF (阈值参数: $T = 35$)。本文提出的 FDVMF 中的阈值参数 $th = (0.9 + 0.1 \times p)$, 其中 p 表示噪声密度。脉冲噪声由 MATLAB 7.10.0 中指令“ $imnoise(I, 'salt \& pepper', D)$ ”产生, 其中 D 表示噪声密度。实验中选取的滑动窗口大小均为 3×3 。在两幅测试图像中均加入 30% 的椒盐噪声, 如图 1(b) 和图 2(b) 所示。利用八种方法对噪声图像滤波, 结果如图 1 和 2 的(c) ~ (j) 所示。图 1 和 2 的(a1) ~ (j1) 分别为图 1 和 2 的(a) ~ (j) 方框区域的局部放大图。



图 1 Lena 图像添加 30% 噪声下各种方法滤波后的结果

从图 1 和 2 中可以看出: VMF 滤波后图像效果相对较差, 图像细节被模糊较严重; FPGF 在抑制噪声与保留图像细节方面均优于 VMF; LABSVMF 的噪声抑制效果也的确好于 VMF, 但在保护图像细节信息方面与 VMF 相差不多, 这是因为 LABSVMF 主要保护的是细线条或边界, 对于其他类型的细节信息的保护能力相对较差; RSVMF、PGSF、FRF、QSF 也均不同

程度地改善了 VMF 的滤波效果, 滤波后的图像所含噪声均明显减少, 同时, RSVMF、PGSF、QSF 也更进一步地保护了图像的细节信息; FRF 在保护图像细节方面表现并不突出, 滤波后图像块效应相对较为严重, 噪声颗粒较大, 这是由于该方法的参数个数较多, 不同的参数值将导致最终滤波后的结果区别较大。由图 1 和图 2 的(j1) 可以看出, 本文提出的 FDVMF 在有效保留图像细节的同时对噪声作了最大抑制, 滤波后的图像所含噪声最少, 且细节区域得以较好保留, 在视觉效果上最接近原始图像, 滤波效果明显优于其他方法。这是因为 FDVMF 不仅具有噪声检测功能(即开关条件), 并且在滤除噪声前, 去除了滑动窗口中的疑似邻域噪声, 降低了中心像素被邻域噪声替换的概率, 从而提升了滤波效果。

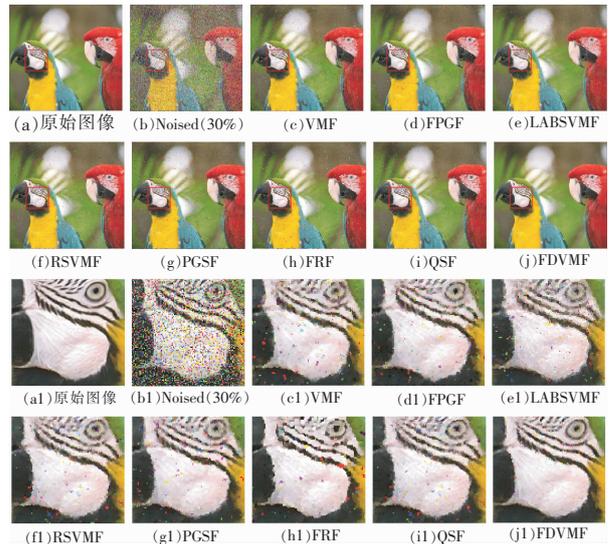


图 2 Parrots 图像添加 30% 噪声下各种方法滤波后的结果

采用三种常用的客观图像评价方法, 即峰值信噪比 (PSNR)、均方误差 (MSE)、归一化色彩误差 (NCD) 对上述七种方法和本文提出的方法作评价与比较。PSNR 值越大, MSE 值与 NCD 值越小, 则滤波后图像与原始图像差值越小, 表明滤波效果越好。

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{3 \times M \times N \times 255^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \|f(i, j) - g(i, j)\|^2} \quad (8)$$

$$MSE = \frac{1}{3M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \|f(i, j) - g(i, j)\|^2 \quad (9)$$

$$NCD = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \|f_{Luv}(i, j) - g_{Luv}(i, j)\|^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \|f_{Luv}(i, j)\|^2} \quad (10)$$

其中: f 表示原始图像; g 表示滤波后的图像; f_{Luv} 与 g_{Luv} 分别表示原始图像与滤波后图像从 RGB 颜色空间变换到 CIELAB 颜色空间的图像, 图像的尺寸为 $M \times N$ 。

表 1 ~ 6 给出了八种方法在 Lena 图像和 Parrots 图像添加 5% ~ 40% 的噪声密度下 PSNR、MSE、NCD 的测量值。从表中的数据可以看出, 在噪声密度低于或等于 25% 时, FPGF、LABSVMF、RSVMF、PGSF、FRF、QSF 的三项客观测量指标比 VMF 均有不同程度的提升, 其中, QSF 的性能相对最优。但是, 本文提出的 FDVMF 在不同噪声密度下均具有最高的 PSNR 值以及最低的 MSE 值和最低的 NCD 值, 与其他方法相比, 各项指标在 VMF 的基础上提升幅度更加显著。当噪声密度高于 25% 时, 用于对比的方法的各项指标比较接近 VMF, 在

噪声密度为 35% 和 40% 时, FPGF、RSVMF、PGSF、FRF 的部分测量指标甚至不如 VMF。然而, FDVMF 的各项测量值仍然是所有方法中最优秀的, 并且在 VMF 的基础上提升幅度仍较为明显。

表 1 八种方法在不同噪声密度下的 PSNR 测量值(Lena)

方法	噪声密度/%							
	5	10	15	20	25	30	35	40
VMF	32.1293	30.3418	27.3191	25.1159	23.7466	21.9065	19.8872	17.8299
FPGF	34.8094	32.6576	29.9100	27.0247	24.6952	22.3785	19.9089	17.7302
LABSVMF	35.9673	33.0695	30.0653	27.6528	25.6357	23.3444	20.8032	18.6430
RSVMF	35.8693	33.1680	30.0501	27.8622	25.7581	23.3350	20.8075	18.5876
PGSF	35.9094	32.8576	30.1100	27.3247	24.8952	22.3885	20.0089	17.7802
FRF	35.3179	32.0687	30.4015	28.5570	25.4276	23.1354	19.9364	17.6181
QSF	36.1260	33.6692	30.8863	28.7369	26.0102	23.6598	21.0088	18.7113
FDVMF	37.0238	34.5231	31.6657	29.4638	26.7472	24.2854	21.6596	19.2952

表 2 八种方法在不同噪声密度下的 MSE 测量值(Lena)

方法	噪声密度/%							
	5	10	15	20	25	30	35	40
VMF	35.4533	45.6616	72.2204	134.099	247.716	419.209	667.365	1071.1
FPGF	17.8707	35.2635	66.3867	129.004	245.239	376.038	664.027	1096.6
LABSVMF	17.3621	34.8624	65.7329	128.632	245.134	345.654	540.451	988.7413
RSVMF	16.2480	33.5569	64.9229	128.874	244.767	347.820	563.727	1093.2
PGSF	16.8707	34.8635	65.3867	128.704	244.939	365.038	620.027	1024.6
FRF	19.1112	40.3844	59.2834	90.6512	186.348	315.892	914.201	1127.9
QSF	14.4703	25.4777	42.1161	87.5320	169.1891	302.348	524.362	921.1333
FDVMF	12.3652	22.1865	37.1094	76.3698	150.2953	283.5238	486.167	862.8651

表 3 八种方法在不同噪声密度下的 NCD 测量值(Lena)

方法	噪声密度/%							
	5	10	15	20	25	30	35	40
VMF	0.0326	0.0368	0.0436	0.0587	0.0809	0.1100	0.1518	0.2051
FPGF	0.0089	0.0179	0.0301	0.0469	0.0742	0.1024	0.1445	0.2059
LABSVMF	0.0083	0.0169	0.0283	0.0468	0.0697	0.0953	0.1389	0.1935
RSVMF	0.0079	0.0157	0.0293	0.0483	0.0705	0.1034	0.1463	0.2119
PGSF	0.0075	0.0173	0.0291	0.0463	0.0727	0.1003	0.1419	0.2038
FRF	0.0069	0.0136	0.0261	0.0360	0.0550	0.0770	0.1208	0.1906
QSF	0.0083	0.0177	0.0266	0.0346	0.0473	0.0613	0.0816	0.1391
FDVMF	0.0058	0.0127	0.0236	0.0317	0.0441	0.0571	0.0795	0.1256

表 4 八种方法在不同噪声密度下的 PSNR 测量值(Parrots)

方法	噪声密度/%							
	5	10	15	20	25	30	35	40
VMF	35.0316	33.3651	30.7198	27.5314	24.4807	22.3350	20.1261	18.0493
FPGF	35.6402	33.8140	31.2174	28.3073	24.8784	22.5817	20.1164	17.8805
LABSVMF	36.1040	34.4952	31.8002	28.8952	25.2272	22.8671	20.2095	17.8362
RSVMF	35.8366	33.9873	31.5669	28.6529	24.9581	22.2618	19.9435	17.7742
PGSF	36.3879	34.6450	31.8894	28.7600	25.2153	22.6997	20.0605	17.5839
FRF	36.7845	34.8186	31.9566	28.9914	25.7317	22.9981	20.0117	18.0916
QSF	37.1539	35.3855	32.1142	29.0643	25.9119	22.9036	20.2960	18.0762
FDVMF	38.0291	36.0068	32.9488	29.8899	26.7841	23.2609	20.8573	18.8793

表 5 八种方法在不同噪声密度下的 MSE 测量值(Parrots)

方法	噪声密度/%							
	5	10	15	20	25	30	35	40
VMF	20.4138	29.9617	55.0935	114.799	231.7467	330.812	592.952	973.0847
FPGF	18.3406	26.6488	51.4449	87.5695	211.4641	358.848	633.048	1059.3
LABSVMF	15.3621	23.2458	42.6512	78.4638	203.2586	350.795	620.231	996.0395
RSVMF	17.0293	25.9629	45.3300	85.2278	206.4570	386.278	689.816	1085.6
PGSF	14.3775	22.0371	41.6825	79.5286	208.7838	380.309	656.126	1057.8
FRF	13.1645	20.8938	39.8983	76.2939	189.9749	331.266	579.415	943.6845
QSF	11.1607	18.1975	38.8839	73.9321	169.9310	316.638	568.676	923.0319
FDVMF	9.1589	16.9634	35.3061	68.9188	156.3533	304.775	539.971	889.149

表 6 八种方法在不同噪声密度下的 NCD 测量值(Parrots)

方法	噪声密度/%							
	5	10	15	20	25	30	35	40
VMF	0.0167	0.0200	0.0256	0.0367	0.0569	0.0763	0.1331	0.1958
FPGF	0.0136	0.0178	0.0210	0.0311	0.0539	0.0788	0.1224	0.1877
LABSVMF	0.0098	0.0133	0.01903	0.02864	0.0514	0.0769	0.1193	0.2062
RSVMF	0.0129	0.0164	0.0203	0.0305	0.0532	0.0833	0.1333	0.1951
PGSF	0.0085	0.0121	0.01889	0.0291	0.0537	0.0813	0.1214	0.2136
FRF	0.0076	0.0117	0.01798	0.0286	0.0522	0.0732	0.1194	0.1897
QSF	0.0069	0.0106	0.01693	0.0281	0.0491	0.0715	0.1021	0.1557
FDVMF	0.0053	0.0098	0.01452	0.0263	0.0456	0.0687	0.0966	0.1478

综上所述, FPGF、LABSVMF、RSVMF、PGSF、FRF、QSF 在噪

声密度较小时具有较好的滤波性能, 在噪声密度高于 25% 时, 滤波性能接近 VMF, 不具有普遍适用性。而 FDVMF 在 5% ~ 40% 范围内的噪声密度下, 滤波效果表现均较好, 是所有方法中最优秀的。同时, 通过测量多幅标准图像在不同噪声密度(5% ~ 40%)下的多项客观评价指标(PSNR、MSE、NCD)也验证了 FDVMF 的普遍适用性与鲁棒性。

3 结束语

本文提出一种基于模糊决策的开关矢量中值滤波方法。该方法根据脉冲噪声的特点, 给出了简单有效的开关条件, 有效地保护了彩色图像中边缘等细节信息。其次, 针对噪声像素, 根据模糊集理论, 构造了合适的隶属函数, 通过计算滑动窗口中像素的模糊隶属度, 去除疑似噪声, 对优化后的滑动窗口应用矢量中值滤波。该方法较好地解决了现有方法滤波后中心像素可能被邻域噪声替换的问题。实验数据表明, 该方法在滤波性能上要优于经典的 VMF 及近年来提出的一些优秀的矢量中值滤波方法, 并且在保护边缘细节上也同样具有优越性。

参考文献:

- [1] MELANGE T, NACHTEGAEL M, KERRE E E. Fuzzy random impulse noise removal from color image sequences[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2011, 20(4): 959-970.
- [2] ZHENG J, VALAVANIS K P, GAUCH J M. Noise removal from color images[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1993, 7(3): 257-285.
- [3] LUKAC R, PLATANOTIS K N. A taxonomy of color image filtering and enhancement solutions[C]//*Advances in Imaging and Electron Physics*, vol 140. 2006: 187-264.
- [4] LUKAC R, SMOLKA B, MARTIN K, et al. Vector filtering for color imaging[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(1): 74-86.
- [5] ASTOLA J, HAAVISTO P, NEUVO Y. Vector median filters[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1990, 78(4): 678-689.
- [6] TRAHANIAS P E, KARAKOS D, VENETSANOPOULOS A N. Directional processing of color images: theory and experimental results[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1996, 5(6): 868-880.
- [7] KARAKOS D G, TRAHANIAS P E. Generalized multichannel image-filtering structures[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1997, 6(7): 1038-1045.
- [8] SMOLKA B, CHYDZINSKI A. Fast detection and impulsive noise removal in color images[J]. *Real-Time Imaging*, 2005, 11(5-6): 389-402.
- [9] SMOLKA B. Efficient modification of the central weighted vector median filter[C]//*Lecture Notes in Computer Science*, vol 2449. 2002: 166-173.
- [10] LUKAC R. Adaptive vector median filtering[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(12): 1889-1899.
- [11] CELEBI M E, ASLANDOGAN Y A. Robust switching vector median filter for impulsive noise removal[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2008, 17(4): 043006.
- [12] JIN Liang-hai, LI De-hua. A switching vector median filter based on the CIELAB color space for color image restoration[J]. *Signal Processing*, 2007, 87(6): 1345-1354.
- [13] SMOLKA B. Peer group switching filter for impulse noise reduction in color images[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(6): 484-495.
- [14] CAMARENA J G, GREGORI V, MORILLAS S, et al. Two-step fuzzy logic-based method for impulse noise detection in colour images[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(13): 1842-1849.
- [15] GENG Xin, HU Xiao-guang, XIAO Jin. Quaternion switching filter for impulse noise reduction in color image[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(1): 150-162.