

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)03-0330-06

论文索引信息: 钟灵, 章云. 等级阈值的彩色图像矢量中值滤波 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 330-335

# 等级阈值的彩色图像矢量中值滤波

钟灵, 章云

(广东工业大学自动化学院, 广州 510006)

**摘要:** 为消除彩色图像中的脉冲噪声, 提出一种新的基于等级阈值的矢量中值滤波器。该滤波器设计了一组随滤波窗口内当前像素排序位置而等级变化的阈值, 并根据当前像素与经典矢量滤波器输出的距离差值来判断噪声像素的存在。仿真实验证明, 该方法较其他非开关型和开关型矢量中值滤波器能更好保存原图像细节和消除脉冲噪声。

**关键词:** 矢量中值滤波; 开关型滤波; 脉冲噪声

## Vector median filter of ranked thresholds for color images

Zhong Ling, Zhang Yun

(Automation Faculty, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006 China)

**Abstract:** A new switching vector median filter using ranked thresholds is proposed to remove the impulsive noise from color images. The new method utilizes thresholds related rank position of the central pixel in filtering window and the distance between the output of the classic vector median filter and the original vector to determine the noise probability. Compared with other non-switching and switching vector median filters, simulation experiments show that the new filter outperforms them in terms of both noise suppression and detail preservation.

**Keywords:** vector median filter; switching filter; impulsive noise

## 0 引言

随着彩色传感器单元的日益普及, 彩色图像与视频已经广泛出现在各类数字图像系统中。在数据获取与传输的过程中, 图像数据很可能会受到噪声污染。有效地消除这些噪声污染对于提高系统的图像质量和后续的模式识别等环节都具有十分重要的意义。因而, 滤波器作为一种去噪手段, 已经成为大部分图像系统中必需的组成部分。

在自动光学检测、远程遥感图像传输、数字艺术品恢复等应用领域, 脉冲噪声信号是一类常见的图

像噪声<sup>[1]</sup>。该类噪声会出现在彩色图像各像素点的单通道或多通道上, 给图像局部产生较大视觉干扰。传统灰度图像系统通常采用标准中值滤波(SMF)去除脉冲噪声<sup>[1]</sup>。若彩色图片可看作多灰度图片的合成, 将SMF分别运行在其不同的色彩通道上, 则会产生原图中未出现的颜色<sup>[1]</sup>。文献[1]首次提出了矢量中值滤波(VMF)的方法, 避免了该问题的出现。类似的, 文献[2-3]采用不同的矢量距离度量进行滤波, 如文献[3]考虑了矢量间的夹角或夹角与欧氏距离的组合。为适应不同噪声比例, 文献[4]还提出了中心加权的方法。上述方法都对当前矢量(像素)施加统一处理, 即在滤波窗口

收稿日期: 2009-09-01; 修回日期: 2009-11-09

基金项目: 国家自然科学基金委-广东省联合重点项目(U0735003); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070562005); 广东省基金团队项目(8351009001000002)。

第一作者简介: 钟灵(1978—), 男, 讲师。现为广东工业大学控制理论与控制工程博士研究生, 研究兴趣为模式识别、优化理论、光学检测系统及算法。E-mail: tonnyzhong@163.com。

内寻找某种排序最小矢量后替换当前值,这样会造成滤波后的图片中许多细节变得模糊。

为克服传统矢量中值滤波器简单排序后替换的方法,一类智能的彩色滤波器<sup>[5-17]</sup>成为目前研究的热点。该类滤波器通过设计的噪声检测器,只将判断为噪声的像素进行滤波,而非噪声像素则保留原值。由于像素在被判断为噪声之后的替换方法类似,所以开关型滤波器关键在于噪声检测器的设计。文献[5-6]设计了基于相似度函数的矢量滤波(SBVF),将在传统颜色空间内矢量转换到设计的相似度空间上进行比较。文献[7]提出的自适应中心加权方向滤波(ACWVDF)通过自适应的调节当前像素与其他像素间距离的权值,保持了最小中心权值下的排序最小矢量。文献[8]通过计算对等组内的中心矢量与经典矢量中值滤波输出的距离来判断噪声。文献[9-10]提出将滤波窗口内离当前像素指定距离内的像素数量作为判断噪声的方法。文献[13-14]通过分析各方向上的最小排序矢量与当前像素的距离来判断噪声。文献[15]提出的鲁棒开关型矢量中值滤波(RSVMF)则通过比较矢量间的距离和来判断噪声。部分开关型滤波器<sup>[5-8,10,13-15]</sup>虽然比传统矢量中值滤波取得了更好的滤波效果,但也存在计算量较大,难以满足实时滤波需要的缺点。除此之外,综述文献[16-17]也比较、分析了近年来出现的其他各类滤波器的特点,有兴趣的读者可进一步作参考。

为了取得更好的滤波效果,本文提出了一种新的基于等级阈值的彩色图像矢量中值滤波方法。该方法通过获得当前矢量在滤波窗口内的排序位置,然后把当前矢量和矢量中值滤波的输出差值与该位置对应的阈值比较,判断该矢量为噪声的可能。实验结果表明,本方法相对传统的矢量中值滤波和其他的开关型矢量中值滤波能够有更好的滤波效果。

### 1 等级阈值的滤波算法

开关型滤波器会先通过噪声检测器判断当前像素是否被污染。若检测器判断为噪声,很多滤波器会选择把经典的矢量中值滤波的输出作为当前像素的替换值<sup>[8-9,11-13,15]</sup>,其中经典矢量中值滤波<sup>[1]</sup>的输出 $y_{VMF}$ 可定义如下:

$$y_{VMF} = \arg \min_{x_{(1)} \in W} \sum_{i=1}^N \|x_{(1)} - x_i\|_y \quad (1)$$

$$\|x_i - x_j\|_y = \left( \sum_{k=1}^m |x_{(ik)} - x_{(jk)}|^\gamma \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2)$$

式中,滤波窗口为  $W = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ,对应的  $x_c$  ( $c = (N + 1)/2$ ) 为当前要处理的像素,  $\|x_i - x_j\|_y$  为矢量的 Minkowski 范数。根据定义可知,矢量中值滤波算法的实质是先对滤波窗口  $W$  内每个矢量  $x_j$  计算其与其他矢量之间的距离和  $\sum_{i=1}^N \|x_j - x_i\|_y$ ,然后在递增排序后的矢量序列  $\{x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(N)}\}$  中选取排序最小的矢量  $x_{(1)}$  作为原中心的替换值。

已有的矢量中值滤波器显然都未考虑当前像素在滤波窗口内的排序位置  $R(x_c)$  对开关条件的影响。当前像素的排序位置  $R(x_c)$  是指当前像素在后的  $\{x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(N)}\}$  序列中的位置,即若  $x_c = x_{(t)}$ ,则有  $R(x_c) = t$ 。为研究  $R(x_c)$  和噪声存在之间的关系,图 1(a) 统计了 10% 噪声下(噪声模型见式(9))彩色 Lena(512 × 512, 24 bit) 图中各像素对应排序位置  $R(x_c)$  的分布情况,图 1(b) 也统计了每个当前像素的  $R(x_c)$  与矢量和经典矢量中值输出的矢量差值关系。图 1 中深色柱状部分是未污染像素的;而浅色

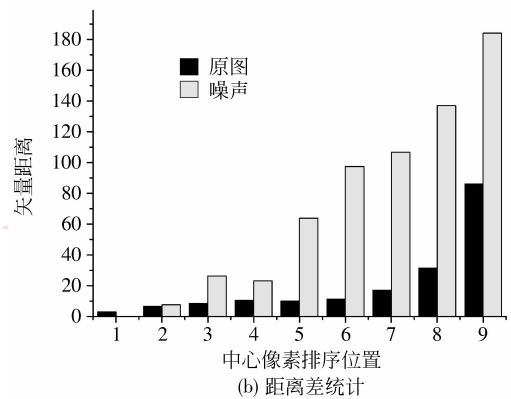
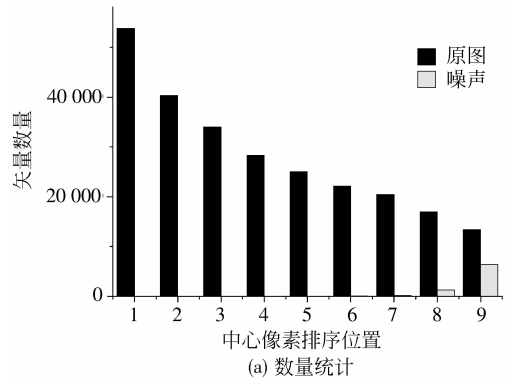


图 1 噪声 10% 的 LENA 彩图当前像素排序统计  
Fig. 1 The central vectors' rank statistics of image LENA corrupted by 10% impulsive noise

色部分是当前像素为噪声的。其中滤波窗口大小为常用的  $3 \times 3$ , 矢量距离也采用常见的  $\| \cdot \|_2$  欧氏范数。

从图 1(a) 可以看出,  $R(x_c)$  反映了该像素为噪声的可能性。  $R(x_c)$  取值范围为  $[1, N]$  之间的整数, 当前像素的  $R(x_c)$  越高, 原图像素的数量则越少, 而噪声像素的数量逐渐增大。显然在排序较小时, 当前像素被污染的可能性较小; 而排序位置较大时, 当前像素是噪声的可能性变大。从图 1(b) 进一步可以看出, 无论是原图像素还是噪声像素, 当前矢量与经典矢量中值滤波输出矢量差值  $\|x_c - x_{\text{VMF}}\|_y$  的均值是随着排序位置逐渐增加的, 但  $\|x_c - x_{\text{VMF}}\|_y$  的均值增长速度比噪声的要慢一些。可见, 根据当前矢量的排序位置给出不同等级的阈值能更好的区别原图像素与噪声。根据以上思想, 新的基于等级阈值的矢量中值滤波方法表达如下:

$$y_{\text{proposal}} = \begin{cases} y_{\text{VMF}} & \text{如果 } \|x_c - y_{\text{VMF}}\|_y > \text{Thr}(R(x_c)) \\ x_c & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $y_{\text{proposal}}$  为本文算法的输出,  $\|x_c - y_{\text{VMF}}\|_y$  表示  $x_c, y_{\text{VMF}}$  的矢量距离差, 矢量距离计算除采用欧氏距离外, 也可以采用如文献 [3] 中的矢量夹角或与距离的组合。  $\text{Thr}(R(x_c))$  则表示与  $R(x_c)$  对应的不同阈值, 且

$$\text{Thr}(R(i)) \geq \text{Thr}(R(j)) \quad R(i) < R(j) \quad (4)$$

式(4)表示当前矢量排序位置越大则阈值越小。新方法首先需要得到矢量中值滤波的输出  $y_{\text{VMF}}$  和当前像素的  $R(x_c)$ , 以此在开关条件中选择不同的阈值。计算  $y_{\text{VMF}}$  输出需要在一个无序的数组求最小值, 该操作本可以在一个循环内完成。新滤波器为快速取得当前像素的排序位置  $R(x_c)$  以提高算法的实时性, 可将求当前像素排序位置的操作也放入该循环内完成。这样本新算法需要的计算量与经典 VMF 计算复杂度几乎相当, 都为  $\Theta(N^2 \times K_1 \times K_2)$ , 其中  $K_1 \times K_1$  为图像分辨率,  $N$  如前定义为窗口的大小。

## 2 等级阈值参数的确定

等级阈值参数的取值决定了新算法的效果。若

滤波窗口大小为  $N$ , 需要确定  $\text{Thr}(1), \text{Thr}(2), \dots, \text{Thr}(N)$  等  $N$  个等级参数, 且需满足式(4)的要求。根据新滤波的定义式(3), 若当前像素  $x_c$  排序为最小, 则有  $x_c = y_{\text{VMF}}$ , 此时若定义  $\text{Thr}(1) > 0$ , 则滤波器不会发生替换。为设计方便, 本文设  $\text{Thr}(1) = +\infty$  (在程序实现中, 可设  $\text{Thr}(1) = \max(\| \cdot \|_y)$ )。下一步为确定剩下的  $N-1$  个等级阈值参数, 同时减少参数的数量, 本文设计了等级阈值参数的 2 次拟合曲线函数, 其定义如下:

$$\text{Thr}(r) = ar^2 + br + c \quad a > 0 \quad (5)$$

式中,  $r$  为噪声当前像素对应的等级值,  $a, b$  和  $c$  为曲线待定的参数, 由于本文只讨论当滤波窗口均采用了常用的  $3 \times 3$  大小和矢量距离采用  $\| \cdot \|_2$  的情况, 所以待定等级阈值参数个数为 8。

为确定 2 次曲线函数的参数, 本文采用了基于学习的遗传算法(GA)。在遗传算法学习过程中, 实验随机选择了 Kodak 图片库<sup>[18]</sup>的 50 张彩色图片(为加快学习过程, 将图片大小变化为等大小), 根据彩色脉冲噪声模型为彩图, 分别添加了 4 中不同的噪声(5% ~ 50%)。算法的适应函数值采用了 200 张污染后的彩色图片滤波后的归一化彩色标准差(NCD)的平均值, 经过近 300 轮的迭代学习后得到一组等级阈值为  $(+\infty, 130, 119, 110, 101, 94, 88, 84, 80)$ 。

## 3 实验结果及分析

为比较本文方法与其他矢量滤波器的效果, 实验采用了均值绝对差(MAE)和均值平方差(MSE)的评估函数, 其中 MAE 和 MSE 定义为

$$\text{MAE} = \frac{1}{mK_1K_2} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} |o_{ijk} - x_{ijk}| \quad (6)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{mK_1K_2} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} (o_{ijk} - x_{ijk})^2 \quad (7)$$

因 MAE 和 MSE 还不能够更好体现人眼对色彩感觉的差异, 在本文中采用了归一化彩色标准差的评价标准。归一化彩色标准差是将 RGB 色彩空间的矢量转换到 CIELAB 色彩空间后计算其距离差值并归一化, 该评价标准同时也作为在等级阈值参数训练中适应值函数所采用的评价标准。其定义为

$$NCD = \frac{\sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} \sqrt{(L_{o_i}^* - L_{x_i}^*)^2 + (u_{o_i}^* - u_{x_i}^*)^2 + (v_{o_i}^* - v_{x_i}^*)^2}}{\sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} \sqrt{(L_{o_i}^*)^2 + (u_{o_i}^*)^2 + (v_{o_i}^*)^2}} \quad (8)$$

$$x = \begin{cases} o & \text{with probability } (1 - p) \\ (r_1, o_2, o_3) & \text{with probability } (p_1 p) \\ (o_1, r_2, o_3) & \text{with probability } (p_2 p) \\ (o_1, o_2, r_3) & \text{with probability } (p_3 p) \\ (r_1, r_2, r_3) & \text{with probability } ([1 - (p_1 + p_2 + p_3)] \cdot p) \end{cases} \quad (9)$$

$\{L_{o_i}, u_{o_i}, v_{o_i}\}$  分别是未污染的原图矢量  $o_i$  在 CIELAB 色彩空间下的三分量, 即  $L_{o_i}$  代表矢量  $o_i$  的亮度,  $(u_{o_i}, v_{o_i})$  代表矢量  $o_i$  的色度。 $\{L_{x_i}, u_{x_i}, v_{x_i}\}$  则代表滤波后矢量  $x_i$  的 3 分量。

在添加彩色图像的脉冲噪声时, 本文采用文献 [9, 15-16] 提出的多通脉冲彩色噪声模型, 如式 (9)。其中,  $x$  为噪声模型输出, 以  $1 - p$  的概率输出当前像素  $o$ , 以  $p$  的概率输出为 4 种污染后的像素值, 前 3 种分别以  $p_1 p$ 、 $p_2 p$  和  $p_3 p$  的概率污染了 3 个单通道的取值, 最后一种则以  $[1 - (p_1 + p_2 + p_3)] p$  的概率 3 个通道全部都污染。

表 1 分别在 3 个 MAE、MSE 和 NCD 标准值上对本文设计的新滤波器 (表中记为 PROPOSAL) 与传统的非开关型滤波器 VMF [1]、BDVF [2]、DDF [3] 和 CWVMF [4], 以及典型开关型矢量中值滤波 SBVF [5, 6]、AVMF [8]、FPGF [9]、SCWVDF [7] 与 RSVMF [15] 进行比较, 实验噪声添加采用了式 (9) 的多通道噪声模型, 其中  $r_i (i = 1, 2, 3)$  都以等概率的等于极值 0 或 255。从各表在噪声比例 5%~30% 的比较上看, 新滤波器几乎都取得了最好的滤波效果, 尤其在 NCD 评估值上。

表 1 各滤波器的 MAE、MSE 和 NCD 比较

Tab. 1 Performance comparison in terms of MAE, MSE and NCD using different filters

滤波器	5%			10%			15%			20%			25%			30%		
	MAE	MSE	NCD	MAE	MSE	NCD	MAE	MSE	NCD	MAE	MSE	NCD	MAE	MSE	NCD	MAE	MSE	NCD
VMF	3.26	31.3	0.0407	3.39	33.7	0.0420	3.54	36.8	0.0435	3.69	40.9	0.0451	3.85	46.5	0.0468	4.04	53.9	0.0488
DDF	3.30	31.8	0.0408	3.42	34.1	0.0420	3.57	37.3	0.0435	3.71	41.2	0.0450	3.87	46.8	0.0467	4.06	54.3	0.0488
BDVF	3.78	39.9	0.0432	3.91	43.7	0.0445	4.05	47.9	0.0458	4.24	56.8	0.0478	4.43	69.2	0.0500	4.72	89.5	0.0532
CWVMF	0.92	10.1	0.0112	1.15	19.1	0.0143	1.47	39.2	0.0187	1.92	79.8	0.0257	2.53	149	0.0363	3.41	258	0.0513
SBVF	0.41	10.0	0.0043	0.64	12.7	0.0072	0.90	17.3	0.0124	1.26	27.5	0.0180	1.57	32.0	0.0202	1.94	48.1	0.0246
AVMF	0.31	7.3	0.0042	0.60	12.6	0.0081	0.90	18.9	0.0124	1.13	26.5	0.0170	1.57	36.3	0.0218	1.96	49.8	0.0276
SCWVDF	0.30	8.0	0.0038	0.64	18.9	0.0080	1.07	39.9	0.0137	1.54	67.0	0.0206	2.12	109	0.0288	2.82	166	0.0391
FPGF	0.34	19.2	0.016	0.62	21.4	0.0176	0.93	24.5	0.0196	1.25	28.6	0.0218	1.58	34.6	0.0244	1.96	42.4	0.0276
RSVMF	0.68	9.4	0.0080	0.80	13.4	0.0099	1.03	24.6	0.0133	1.38	52.8	0.0194	1.94	107	0.0296	2.83	207	0.0458
PROPOSAL	0.28	6.6	0.0035	0.58	10.6	0.0067	0.93	16.4	0.0107	1.25	26.8	0.0161	1.38	32.4	0.0197	1.78	40.1	0.0241

为了显示新滤波器在细节保存和去噪上的能力, 图 2 同时给出了各滤波器对 10% 噪声 LENA 局部滤波的效果图, 其中 (a) (b) 分别是局部原图和局部噪声图。从图 2 可以看出, 新算法 (图中记为 PROPOSAL) 的滤波效果与原图的接近程度是其中比较好的, 其原因在于对噪声的滤除和当前像素细节的保留度相对其他滤波器做得更好。同时在 Kodak 库上的其他彩色图片也几乎出现同样的滤波效果。

## 4 结 论

为更好的消除彩色图像中的脉冲噪声, 介绍一种新的基于等级阈值的滤波矢量中值滤波器。该新的滤波器根据滤波窗口内当前像素的排序位置, 设计了一种等级阈值递减的开关型噪声判断方法, 有效地检测出了彩图中的脉冲噪声, 然后选择性的进行经典矢量中值滤波。通过实验证明, 该滤波方式

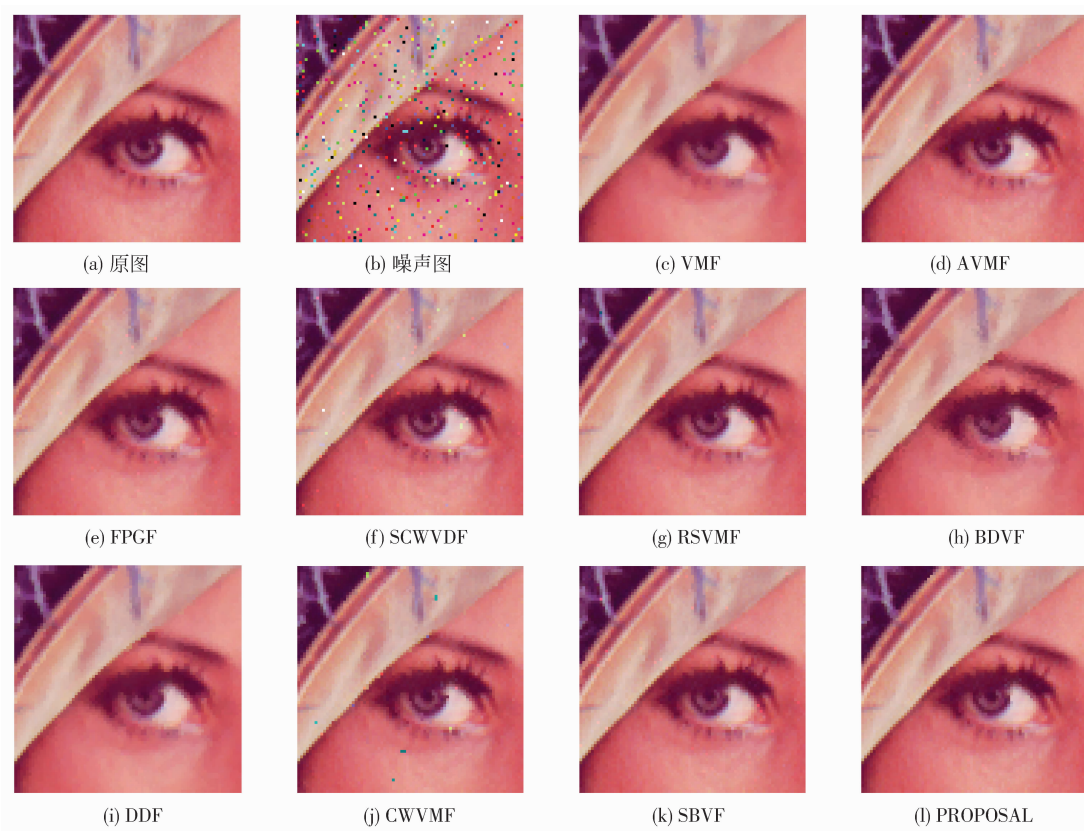


图 2 噪声 10% 的 Lena 细节图各滤波器效果比较

Fig. 2 Filtering results of different filters for the Lena detail image corrupted by 10% impulsive noise

相对传统的非开关型矢量中值滤波器和近年设计的其他开关型滤波器都有更好的滤波效果。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Astola J, Haavisto P, Neuvo Y. Vector median filters [ J ]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(4) :678-689.
- [ 2 ] Trahanias P E, Venetsanopoulos A N. Vector directional filters: a new class of multichannel image processing filters [ J ]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 2(4) :528-534.
- [ 3 ] Karakos D G, Trahanias P E. Generalized multichannel image-filtering structures [ J ]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7) :1038-1045.
- [ 4 ] Smolka B. Efficient modification of the central weighted vector median filter [ J ]. Lecture Notes in Computer Science, 2002, 2449:166-173.
- [ 5 ] Smolka B, Plataniotis K N, Lukac R, et al. Similarity based impulsive noise removal in color images [ C ] // Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing ( ICIP ). Barcelona, Spain: IEEE, 2003: 105-108.
- [ 6 ] Smolka B, Lukac R, Chydzinski A, et al. Fast adaptive similarity based impulsive noise reduction filter [ J ]. Real-Time Imaging, 2003, 9(4) :261-276.
- [ 7 ] Lukac R. Adaptive color image filtering based on center-weighted vector directional filters, Multidimens [ J ]. Multidimensional Systems and Signal Process, 2004, 15: 169-196.
- [ 8 ] Lukac R. Adaptive vector median filtering [ J ]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(12) :1889-1899.
- [ 9 ] Smolka B, Chydzinski A. Fast detection and impulsive noise removal in color images [ J ]. Real-Time Image, 2005, 11(5-6) : 389-402.
- [ 10 ] Lukac R, Smolka B, Plataniotis K N, et al. Vector sigma filters for noise detection and removal in color images [ J ]. Visual Commun. Image Represent, 2006, 17: 1-26.
- [ 11 ] Celebi M E, Kingravi H A, Uddin B, et al. Fast switching filter for impulsive noise removal from color images [ J ]. Imaging Sci. Tech, 2007, 51:155-165.
- [ 12 ] Smolka B, Konstantinos N Plataniotis. Ultrafast technique of impulsive noise removal with application to microarray image denoising [ C ] // Proceedings of Image Analysis and Recognition ( ICIAR ). Toronto, Canada: ICIAR, 2005, 3656:990-997.

- [13] Jin L H, Li D H. A switching vector median filter based on the CIELAB color space for color image restoration [J]. Signal Processing, 2007, 87: 1345-1354.
- [14] Jin L H, Li D H. An image denoising algorithm based on noise detection [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 21(3): 298-302. [金良海, 李德华. 基于噪声检测的图像去噪算法[J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21(3): 298-302.]
- [15] Celebi M E, Aslandogan Y A. Robust switching vector median filter for impulsive noise removal [J]. Journal of Electronic Imaging, 2008, 14(7): 043006(1-9).
- [16] Celebi M E, Kingravi H A, Aslandogan Y A. Nonlinear vector filtering for impulsive noise removal from color images [J]. Journal of Electronic Imaging, 2007, 16(3): 033008 (1-21).
- [17] Jin L H, Yao X Z, Li D H. A survey on color image vector filtering techniques [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(2): 45-56. [金良海, 姚行中, 李德华. 彩色图像矢量滤波技术综述[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(2): 45-56.]
- [18] Kodak Company. Kodak image database [DB/OL] (1996-01-23) [2009-05-18]. <ftp://ftp.kodak.com/www/images/pcd/>.