

彩色图像矢量滤波技术综述

金良海¹⁾ 姚行中^{1),2)} 李德华¹⁾

¹⁾ (华中科技大学图像识别与人工智能研究所图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 武汉 430074)

²⁾ (第二炮兵指挥学院, 武汉 430012)

摘要 彩色图像滤波是彩色图像处理的最基本的研究领域之一。彩色图像滤波技术可以分成标量滤波法和矢量滤波法两大类。其中,标量滤波法只是早期的滤波方法。大量的研究表明,矢量滤波法比标量滤波法更加有效,因为它更能保护彩色图像的光谱特性。为使人们对彩色图像矢量滤波技术及其应用有个系统的了解,该文首先全面地总结了彩色图像矢量滤波的基本理论和方法,并跟踪该领域的最新进展,同时分析介绍了彩色图像矢量滤波技术的一些典型应用;然后对彩色图像矢量滤波技术进行了分类,并对每种类型的滤波算法中经典和目前最常用的算法做了详细的介绍和阐述;接着结合笔者对该领域的研究,提出了一些新的研究方法;最后,对于一些有代表性、经常使用的矢量滤波算法,以冲击噪声为例,给出了其视觉上的滤波效果和客观的评估数据。

关键词 矢量滤波 彩色图像 噪声 冲击噪声 加性噪声 混合噪声

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)02-0243-12

A Survey on Color Image Vector Filtering Techniques

JIN Liang-hai¹⁾, YAO Xing-zhong^{1),2)}, LI De-hua¹⁾

¹⁾ (State Education Commission Key Laboratory for Image Processing and Intelligent Control, Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

²⁾ (The Second Artillery Command College, Wuhan 430012)

Abstract Color image filtering is one of the most common research tasks in the area of color image processing. Color image filtering techniques can be divided as component-wise methods and vector processing based methods. However, the component-wise methods were only used in the early time and a large amount of research indicates that the vector filtering methods are more efficient than the component-wise methods since the vector processing based methods can preserve better the spectral characteristics of color images. This paper systematically summarizes and analyzes the fundamental theories and methods of color image vector filtering, and discusses the recent, important developments in this field. Some typical applications of color image vector filtering techniques are also reported in this paper. First, the classification of color image vector filtering techniques is analyzed, and for each class of filtering technique, the most commonly-used, representative filtering algorithms are introduced and explained in detail. Then, combining the authors' research on this field, some new research methods are proposed. Finally, for some representative, frequently-used filtering algorithms, by taking the impulsive noise for example, both the perceptual visual effect and objective evaluation data are presented to illustrate their filtering performance.

Keywords vector filtering, color images, noise, impulsive noise, additive noise, mixed noise

基金项目: 国家自然科学基金项目(69775022); 国家高技术研究发展计划(863)项目(306-ZT04-06-3)

收稿日期: 2007-01-25; 改回日期: 2007-06-14

第一作者简介: 金良海(1966 ~), 男。2008年于华中科技大学获模式识别与智能系统专业博士学位。现为华中科技大学计算机学院副教授。主要研究方向为图像处理和模式识别。E-mail: lhjin518@sina.com; lhjin518@gmail.com

1 引言

随着成像设备和其他相关的图像硬件设备的快速发展,以及人眼对色彩的敏感性,彩色图像处理技术越来越引起人们的兴趣。但由于图像成像设备的不完善以及传输信道和外界环境等原因,致使图像会不可避免地被各种各样的噪声所干扰。显然在进行图像应用和分析之前,先进行图像增强和滤波去噪是十分必要的。因此可以认为,图像去噪是图像处理的一个永恒的课题,最普通的图像处理任务就是图像去噪和图像增强^[1-2]。彩色图像滤波和去噪的目标就是同时达到下面 3 个目的:削弱噪声、保持色调、保护边缘和细节信息^[1-2]。

彩色图像的滤波技术经历了从标量滤波法(component-wise filtering)到矢量滤波法(vector filtering)的发展过程^[1]。其中,标量滤波法^[3-4]是先对彩色图像的 3 个分量图像分别进行滤波,然后合成起来形成新的彩色图像。显然,这种方法没有利用彩色图像的 3 个分量之间的内在联系,这样就容易导致产生原图像所没有的新颜色,甚至出现局部不协调的色彩,从而破坏了色调和边缘细节信息。由于这个原因,人们普遍认为,基于统计理论和矢量处理技术的非线性矢量滤波法是去除彩色图像中的噪声的最好方法^[1-2],它在消除噪声、保持色调和保护边缘与细节上有较好的稳健性^[1-2]。

彩色图像矢量滤波技术可以应用到很多场合,下面介绍几个典型的应用。①数码艺术画的修复,由于艺术画会不可避免地暴露在各种环境中(如阳光、温度、细菌等),因而随着时间的推移,会发生颜色漂移、色素沉淀、细小裂缝等,这时可以先将受损伤的艺术画数字化,以形成数码制品,然后利用彩色图像滤波技术来恢复这些数码制品的颜色和填补裂缝等;②电视图像的去噪,受发射环境和大气层的影响,使电视图像很容易地被噪声所干扰^[2],而采用图像滤波算法就能有效地去除这些噪声;③图像放大(插值),现有一般的彩色图像插值算法只是利用了空间信息,而未考虑向量特性,显然,在需要插值的位置的周围几个像素中,处于向量中心(不是空间距离中心)的像素应当赋予更多的权重,在这方面,就可以使用矢量滤波的技术去估算需要插值的像素;④彩色图像的锐化,一般在进行彩色图像锐化处理时,都是直接应用灰度图像的锐化算子对彩色

图像的各个通道进行处理,而由于这些算子没有考虑彩色像素的向量特性,所以容易造成虚假颜色。显然,基于统计特征的非线性图像锐化技术是解决这个问题的重要途径,这可以通过矢量滤波技术来实现^[5]。

近年来,虽然彩色图像矢量滤波技术得到了很快的发展,各种新的滤波理论和方法被不断地提出来,然而,国内很少有文献系统全面地介绍和总结这个研究领域的研究情况。为此,本文对彩色图像滤波的理论和方法进行了系统全面的概括和总结,并跟踪该领域的最新进展,同时结合笔者对该领域进行的研究,提出了一些新的研究方法和展望。最后,以“Lena”彩色图像和添加冲击噪声的图像为例,对于一些典型的、常用的矢量滤波方法,给出了它们直观的滤波效果和客观的性能评估数据。

2 彩色图像滤波技术分类

彩色图像中的每一个像素可以表示为一个 3 维列矢量(矢量的元素为彩色像素的 3 个通道的灰度值),其中矢量的方向隐含着该像素的色调,而矢量的模则可用于度量像素的亮度。彩色图像的矢量滤波法大概可以分成如下几类:

- (1)经典的矢量滤波器(CVF)
- (2)混合方向滤波器(HDF)
- (3)模糊矢量滤波器(FVF)
- (4)加权的矢量滤波器(WVF)
- (5)开关型矢量滤波器(SVF)
- (6)基于相似度的矢量滤波器(SBVF)
- (7)一些最新的矢量滤波方法

2.1 经典的矢量滤波器

使用最广泛的经典矢量滤波器包括:矢量中值滤波器(VMF)^[6]、基本矢量方向滤波器(BVDF)^[7-8]和距离方向滤波器(DDF)^[9]。这 3 种滤波器都是先计算滤波器窗口内的每个像素到其他所有像素的聚合距离,然后选取聚合距离最小的像素作为滤波器的输出。其中,VMF 采用的是 Euclidean 距离,它来自于输入矢量的模的最大可能性估计(MLE)^[6],能有效地去除在矢量的模上相差很大的噪声像素;BVDF 是基于角度距离的,它来自于输入矢量方向的最大可能性估计^[7-8],它能有效地去除色调相差较大的噪声像素;而 DDF 由于采用的是混合距离,它是 VMF 和 BVDF 的综合,所以 DDF 既能去除矢

量的模相差较大的噪声像素,又能消除色调相差较大的噪声像素。

设滤波器窗口大小为 $L(L$ 为奇数),将滤波器窗口内的样本像素(矢量)从上到下、从左到右排列,写成

$$\Gamma = \{x_1, x_2, \dots, x_L\} \quad (1)$$

显然, $x_{(L+1)/2}$ 为中心像素。为了叙述方便,下面先写出彩色像素 x_l 和 x_k 的 Euclidean 距离 $D(l, k)$ 和夹角距离 $A(l, k)$, 即

$$D(l, k) = \|x_l - x_k\|_2 \quad (2)$$

$$A(l, k) = \cos^{-1} \left(\frac{x_l^T x_k}{\|x_l\|_2 \|x_k\|_2} \right) \quad (3)$$

其中, $\|\bullet\|_2$ 表示矢量的 L_2 范数(Euclidean 距离), x_l^T 表示矢量 x_l 的转置。

于是,VMF、BVDF 和 DDF 的输出 y^{VMF} 、 y^{BVDF} 和 y^{DDF} 可分别表示为

$$y^{VMF} = \arg \min_{x_k \in \Gamma} \sum_{l=1}^L D(l, k) \quad (4)$$

$$y^{BVDF} = \arg \min_{x_k \in \Gamma} \sum_{l=1}^L A(l, k) \quad (5)$$

$$y^{DDF} = \arg \min_{x_k \in \Gamma} \left\{ \left[\sum_{l=1}^L D(l, k) \right]^p \left[\sum_{l=1}^L A(l, k) \right]^{1-p} \right\} \quad (6)$$

$0 \leq p \leq 1$

从上面的公式中可以清楚地看出,VMF 是基于矢量模的距离, BVDF 是基于矢量夹角的距离,而 DDF 则同时考虑了矢量模的距离和夹角的距离。因此,VMF 仅能有效地消除在矢量的模上相差很大的噪声像素, BVDF 只能有效地去除色调相差较大的噪声像素,而 DDF 则能同时有效地消除这两类噪声。式(6)中的 p 表示了矢量模的距离和矢量的夹角距离在 DDF 滤波中的重要性,显然, $p=0$ 时, DDF 实际上就是 BVDF; $p=1$ 时, DDF 实际上就是 VMF; 而 $p=0.5$ 则表示矢量的模和矢量的夹角在 DDF 滤波中同样重要。根据文献[8]的分析,对于各种类型的噪声,取 $p=0.25$ 是比较安全的。

2.2 混合方向滤波器

除了上述3种经典的矢量滤波器(VMF、BVDF、DDF),另外一种比较典型高效的、经常使用的矢量滤波器是混合方向滤波器^[10]。这种滤波器能同时有效地抑制各种类型的噪声。它首先计算当前像素的 VMF 输出 y^{VMF} 和 BVDF 输出 y^{BVDF} , 然后按照一定

的规则组合它们作为自己的输出。该文献还设计出了一个有着更好滤波性能的自适应型混合方向滤波器(adaptive HDF, AHDF)。HDF 和 AHDF 的输出 y^{HDF} 和 y^{AHDF} 被分别定义为

$$y^{HDF} = \begin{cases} y^{VMF} & y^{VMF} = y^{BVDF} \\ \frac{y^{BVDF}}{\|y^{BVDF}\|_2} \|y^{VMF}\|_2 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$y^{AHDF} = \begin{cases} y^{VMF} & y^{VMF} = y^{BVDF} \\ V_1^{out} & y^{VMF} \neq y^{BVDF} \text{ 和} \\ & \sum_{l=1}^L \|V_1^{out} - x_l\|_2 < \sum_{l=1}^L \|V_2^{out} - x_l\|_2 \\ V_2^{out} & y^{VMF} \neq y^{BVDF} \text{ 和} \\ & \sum_{l=1}^L \|V_1^{out} - x_l\|_2 \geq \sum_{l=1}^L \|V_2^{out} - x_l\|_2 \end{cases} \quad (8)$$

其中 V_1^{out} 和 V_2^{out} 的定义如下:

$$V_1^{out} = \frac{y^{BVDF}}{\|y^{BVDF}\|_2} \|y^{VMF}\|_2 \quad (9)$$

$$V_2^{out} = \frac{y^{BVDF}}{\|y^{BVDF}\|_2} \left\| \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_l \right\| \quad (10)$$

上面的公式表示,对于当前中心像素,若其 VMF 输出 y^{VMF} 和 BVDF 输出 y^{BVDF} 相同,则是最好的情况;否则取它的方向估计矢量 y^{BVDF} ,同时对 y^{VMF} 的模进行调整:在 HDF 中,使它的模大小等于 y^{VMF} 的模大小;在 AHDF 中,要么取 y^{VMF} 的模(V_1^{out}),要么取均值矢量的模(V_2^{out}),这取决于 V_1^{out} 和 V_2^{out} 哪一个更接近滤波器窗口内所有矢量的中心。

2.3 模糊矢量滤波技术

一般来说,由于图像边缘、细节等的非确定性,使得人们很难精确地区分这些边缘细节像素和噪声^[1-2],而模糊理论则正好能适应这些非确定性,所以模糊集就很自然地用在图像滤波去噪上^[11-16]。结合矢量滤波技术,模糊理论被用来自适应地决定滤波器窗口内每个像素的权值^[11-13],还被用来检测噪声^[14]和被用来计算像素间的相似度^[15],以及被用来构造一种新的模糊中值滤波器^[16]。在这些应用中,最典型的就是使用模糊技术来构造模糊加权的均值滤波器^[11-12]。一般地,这种均值模糊矢量滤波器的定义如下^[1]:

$$\mathbf{y}^{\text{FVF}} = \frac{\sum_{l=1}^L w_l \mathbf{x}_l}{\sum_{l=1}^L w_l} \quad (11)$$

其中, w_l 为相对于像素 \mathbf{x}_l 的权值。因为根据文献 [17] 可知, 在通常情况下, 实际测量出的距离与人类的心理感知是一种指数关系, 所以一般使用下面的指数模糊隶属函数来实现加权值:

$$w_l = \frac{\beta}{[1 + \exp(S_l)]^r} \quad (12)$$

其中, r 用于调节加权的效应; β 是归一化常数; S_l 为关于像素 \mathbf{x}_l (矢量) 的聚集距离, 可定义为 Euclidean

聚集距离 $S_l = \sum_{k=1}^L D(l, k)$ 或夹角聚集距离 $S_l = \sum_{k=1}^L A(l, k)$ 。

文献 [12] 就是根据上面的加权公式设计出了一个典型的自适应模糊矢量滤波器 (AVDF)。

这样通过调节式 (12) 中的各个参数, 就可得到各种加权的均值模糊矢量滤波器。

2.4 加权的矢量滤波器

虽然经典的矢量滤波器 (VMF、BVDF、DDF) 和混合方向滤波器能很好地去掉冲击噪声^[1-2], 但是它们经常摧毁图像的边缘和细节信息。这是因为它们在滤波时, 引进了最大数量的平滑 (对每个像素都进行平滑)。为了在抑制噪声的同时还能保护图像细节, 人们设计出了加权类型的矢量滤波器和开关型的矢量滤波器, 这两种矢量滤波器能在抑制噪声和细节保护之间达到一个比较好的平衡。通过利用滤波器窗口内的样本矢量的局部关系, 加权的矢量滤波器^[18-29] 能获得增强的滤波性能。这些加权的矢量滤波器包括: 加权的矢量中值滤波器^[18-20]、中心加权的矢量中值滤波器^[21]、自适应中心加权的矢量中值滤波器^[22]、基于空间距离加权的矢量中值滤波器^[23-24]、加权的矢量方向滤波器^[25-26]、空间距离加权的矢量方向滤波器^[27]、空间距离加权的距离方向滤波器^[28], 以及归一化选择加权的矢量滤波器^[29]。在这些加权类型的矢量滤波器中, 最典型的是选择加权的矢量滤波器 (SWVF)^[29]。假设非负元素集合 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_L\}$ 对应滤波器窗口 Γ 内的所有样本像素的加权系数, 则 SWVF 的输出 \mathbf{y}^{SWVF} 被定义为

$$\mathbf{y}^{\text{SWVF}} = \arg \min_{\mathbf{x}_l \in \Gamma} \left\{ \left[\sum_{k=1}^L \omega_k D(l, k) \right]^p \times \left[\sum_{k=1}^L \omega_k A(l, k) \right]^{1-p} \right\} \quad (13)$$

式中, $0 \leq p \leq 1$, 它表示矢量的模和方向在滤波时的重要性, $p = 0.5$ 表示同等重要。这样通过调节参数 p 和权集合 ω , 就可得到各种专门的滤波器。例如, 令 $\omega_k = 1$ ($k = 1, 2, \dots, L$), 则 SWVF 就变成了 DDF^[8]; 令 $p = 1$, 则 SWVF 实际上就是加权的矢量中值滤波器^[18-20]; 令 $p = 0$, 则 SWVF 实际上就是加权的基本矢量方向滤波器^[25-26]。

通过优化参数 p 和权值集合 ω , 就能保证在不同的图像像素上实现不同程度的平滑, 从而实现了在噪声抑制 (平滑) 和细节保护之间的平衡, 进而达到了保护图像细节的目的。

式 (13) 给出的只是加权的矢量滤波器的一般框架, 但不实用, 因为它需要确定滤波器窗口内所有像素的权值。文献 [21] 给出了一种被广泛使用的中心加权的矢量中值滤波器 (CWVMF), 这篇文献还设计了一个改进型的版本 (modified CWVMF, MCWVMF)。为了说明这种滤波器的原理, 下面将中心加权 (CW) 的 Euclidean 聚集距离 (关于像素 \mathbf{x}_l) 定义为

$$D_l^{\text{CW}} = D(l, 1) + \dots + D(l, (L+1)/2 - 1) + \omega_0 D(l, (L+1)/2) + D(l, (L+1)/2 + 1) + \dots + D(l, L) \quad (14)$$

其中, ω_0 为中心像素 $\mathbf{x}_{(L+1)/2}$ 的权值 (其他像素的权值为 1)。于是 CWVMF 的输出为

$$\mathbf{y}^{\text{CWVMF}} = \arg \min_{\mathbf{x}_l \in \Gamma} D_l^{\text{CW}} \quad (15)$$

对于改进型的中心加权的矢量中值滤波器 (MCWVMF), 可将聚集距离定义为

$$R_l = \begin{cases} \omega_0 \sum_{k=1}^L D\left(\frac{L+1}{2}, k\right) & l = \frac{L+1}{2} \\ \sum_{k=1}^L D(l, k) & l \neq \frac{L+1}{2} \end{cases} \quad (16)$$

于是 MCWVMF 的输出为

$$\mathbf{y}^{\text{MCWVMF}} = \arg \min_{\mathbf{x}_l \in \Gamma} R_l \quad (17)$$

2.5 开关型矢量滤波器

对于图像滤波去噪来说,理想的情况是仅仅在噪声像素上进行滤波,而对于没有受到噪声污染的信号像素则保留不变,SVF正是根据这个机制设计的。因此,与加权的矢量滤波器相比,SVF更能在抑制冲击噪声的同时,有效地保护图像的边缘和细节信息^[30-40]。一般地,对每个图像像素,SVF首先利用某些技术检测它是否为噪声,若是,则利用某些鲁棒性的矢量平滑滤波器(RSVF)的输出去代替它,否则保留该像素不变。根据RSVF的不同,SWVF包括开关型的矢量中值滤波器(switching VMF, SVMF)^[30-36]和开关型的矢量方向滤波器(SVDF)^[37-38]。文献[39]为3个经典的矢量滤波器设计了一个一般的开关型矢量滤波器的框架;文献[40]的开关机制则是为了提高噪声检测率而专门设计的;为了适应实时处理的需要,文献[41]提出了一个简单而快速的噪声检测算法。而最近由笔者设计的几种开关型滤波算法^[32-35],与目前几乎所有的冲击噪声滤波器相比,则具有更好的滤波性能和边缘、细节保护能力。

开关型矢量滤波器的一般形式如下:

$$\mathbf{y}^{\text{SVF}} = \begin{cases} \mathbf{y}^{\text{RSVF}} & V(\mathbf{I}) \geq T \\ \mathbf{x}_{(L+1)/2} & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

其中, \mathbf{y}^{RSVF} 为某个鲁棒性的平滑滤波器(RSVF)的输出(例如 \mathbf{y}^{VMF} 、 \mathbf{y}^{BVDF} 或 \mathbf{y}^{DDF}); $\mathbf{x}_{(L+1)/2}$ 为当前正在处理的中心像素; T 为阈值,它可以是固定的值,也可以是自适应的; $V(\mathbf{I})$ 是滤波器窗口 \mathbf{I} 内的所有样本像素的函数,不同的滤波算法(开关型)有不同的噪声检测函数 $V(\mathbf{I})$ 。当 $V(\mathbf{I}) \geq T$ 时,则表示当前像素 $\mathbf{x}_{(L+1)/2}$ 为噪声,这时就用 \mathbf{y}^{RSVF} 去代替它;否则,认为当前像素是信号像素,保留不变。特别地,当 $T=0$ 时,SVF就是RSVF(因为这时SVF对每个像素都用RSVF去平滑);而当 T 非常大时,则SVF总是输出源图像自身(不进行任何滤波)。

下面介绍3种目前经常被使用的开关型矢量滤波器:VLUM(vector LUM smoother)^[30]、AVMF(adaptive vector median filter)^[31]和FPGF_{VMF}(fast peer group filter for VMF)^[41]。

(1) VLUM^[30]

VLUM是一种基于中心加权的矢量中值滤波技术^[21]的自适应开关型矢量滤波器,它具有较好的滤波性能。在中心加权的Euclidean聚集距离

D_l^{CW} (式(14))中,定义 $\omega_0 = L - 2k + 2$ ($k = 1, 2, \dots, (L+1)/2$),这样对于每个给定的 k ,就有一个固定的 ω_0 ,并记

$$\mathbf{y}_k = \arg \min_{\mathbf{x}_l \in \mathbf{I}} D_l^{\text{CW}} = \mathbf{y}^{\text{CWVMF}} \quad (19)$$

显然,当 $k = (L+1)/2$ 时, $\omega_0 = 1$,这时 $\mathbf{y}_k = \mathbf{y}^{\text{VMF}}$ (VMF的输出)。于是VLUM的输出为

$$\mathbf{y}^{\text{VLUM}} = \begin{cases} \mathbf{y}_{(L+1)/2} & \sum_{k=\lambda}^{\lambda+2} \|\mathbf{y}_k - \mathbf{x}_{(L+1)/2}\|_2 \geq T \\ \mathbf{x}_{(L+1)/2} & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

其中 λ, T 是2个参数。在 3×3 ($L=9$)的滤波窗口下,取 $T=80, \lambda = \begin{cases} 2, & \text{噪声率小于等于 } 10\% \\ 3, & \text{噪声率大于 } 10\% \end{cases}$ 。

(2) AVMF^[31]

这种开关型滤波器具有很好的性能。它先根据VMF的排序准则对滤波器窗口内的所有像素进行从小到大的排序,设排序结果为 $\{\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(L)}\}$,则AVMF的输出定义为

$$\mathbf{y}^{\text{AVMF}} = \begin{cases} \mathbf{y}^{\text{VMF}} & \left\| \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r \mathbf{x}^{(k)} - \mathbf{x}_{(L+1)/2} \right\|_2 \geq T \\ \mathbf{x}_{(L+1)/2} & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

式中, r, T 是2个参数,在 3×3 ($L=9$)的滤波窗口下,取 $T=60, r=5$ 。

(3) FPGF_{VMF}^[41]

FPGF_{VMF}是最近为适应实时处理的需要而开发的开关型滤波器,同时它还具有较好的滤波性能。FPGF_{VMF}的输出定义如下:

$$\mathbf{y}^{\text{FPGF}_{\text{VMF}}} = \begin{cases} \mathbf{y}^{\text{VMF}} & N(\mathbf{x}_{(L+1)/2}, d) < m \\ \mathbf{x}_{(L+1)/2} & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

其中, $N(\mathbf{x}_{(L+1)/2}, d)$ 表示在滤波器窗口内与中心像素 $\mathbf{x}_{(L+1)/2}$ 的Euclidean距离小于 d 的像素个数,只有当这个个数小于 m 时,才进行滤波。在 3×3 ($L=9$)的滤波窗口下,取

$$d = 45, m = \begin{cases} 2 & \text{对于低污染的图像} \\ 3 & \text{其他} \end{cases}$$

2.6 基于相似度的矢量滤波器

利用开关型矢量滤波器,Smolka等人提出了一组基于相似度的矢量滤波器(SBVF)^[42-45]。SBVF

使用下面的相似度测量函数:

$$\hat{D}_{(L+1)/2} = \sum_{\substack{k=1, k \neq l \\ k \neq (L+1)/2}}^L \mu(\|x_k - x_{(L+1)/2}\|) \quad (23)$$

$$\hat{D}_l = \sum_{\substack{k=1, k \neq l \\ k \neq (L+1)/2}}^L \mu(\|x_k - x_l\|) \quad l \neq (L+1)/2 \quad (24)$$

其中, $\|\bullet\|$ 表示矢量的某种范数(如 L_1 或 L_2 范数), 式(23)表示关于中心像素 $x_{(L+1)/2}$ 的相似度(该像素与滤波器窗口内其他所有像素的相似度之和), 式(24)表示关于非中心像素 x_l 的相似度(注意它不包括 x_l 与 $x_{(L+1)/2}$ 之间的相似度)。相似度函数 $\mu(\bullet)$: $[0, +\infty]$ 应满足: ①非上升凸函数; ② $\mu(0) = 1$ 和 $\mu(\infty) = 0$, 即像素与自身的相似度最大(为 1), 而像素 $(0, 0, 0)$ 和 $(255, 255, 255)$ 的相似度应当接近于 0(在 RGB 彩色空间内)。文献[43]提出了下面几个常用的相似度函数:

$$\begin{aligned} \mu_1(t) &= \exp\left\{-\left(\frac{t}{h}\right)^2\right\}, & \mu_2(t) &= \exp\left\{-\frac{t}{h}\right\} \\ \mu_3(t) &= \frac{1}{1+t/h}, & \mu_4(t) &= \frac{1}{(1+t)^h} \\ \mu_5(t) &= 1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{t}{h}\right), & \mu_6(t) &= \frac{1}{1 + \exp(t/h)} \\ \mu_7(t) &= \frac{1}{1+t^h}, & \mu_8(t) &= \begin{cases} 1 - \frac{t}{h} & t \leq h \\ 0 & t > h \end{cases} \end{aligned}$$

式中, $h \in (0, +\infty)$ 。

通过比较 $\hat{D}_{(L+1)/2}$ 和 $\hat{D}_l (l=1, \dots, L; l \neq (L+1)/2)$ 这些基于相似度的矢量滤波器 SBVF 的输出定义为

$$y^{\text{SBVF}} = \begin{cases} y^{\text{MAXS}} & \hat{D}_{(L+1)/2} \leq \min_{\substack{l=1, \dots, L \\ l \neq (L+1)/2}} \{\hat{D}_l\} \\ x_{(L+1)/2} & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

这里,

$$y^{\text{MAXS}} = \arg \max_{x_l} \{\hat{D}_l \quad l=1, \dots, L; l \neq (L+1)/2\} \quad (26)$$

式(26)表示, 在滤波器窗口内的所有像素的聚集相似度中(一个像素与窗口内其他所有像素的相似度之和), 只有当中心像素的聚集相似度最小时, 才使用具有最大聚集相似度的邻域像素去代替它,

否则保持不变。

2.7 一些最新的矢量滤波方法

最近人们设计了一些新的高性能滤波算法^[32-33, 46-48]。文献[46]提出了一个基于图像色调的矢量滤波器, 它首先将图像分解成 CIEYUV 信号, 然后分别在亮度通道 Y 和色调通道 (u, v) 进行独立的滤波, 最后再合成为结果图像。这种滤波器在去除噪声的同时, 能很好地保护图像的色调。由于一般的矢量滤波器仅仅是针对某种特定类型的噪声(如冲击噪声或高斯加性噪声), 而不能同时有效地消除各种类型的噪声, 针对这种情况, 文献[47]、[48]提出了一种自适应的滤波技术, 它能同时有效地去除各类噪声。这种滤波器首先分析每个像素的类别(如信号像素、轻度污染的像素、中度污染的像素, 或重污染的像素, 等等), 然后对每种类别的像素采取相应的不同策略(如不作改变、轻度平滑、深度平滑, 等等)。这种滤波器在各种噪声污染的情况下, 都能取得非常好的滤波效果。

最近, 由笔者开发的两种滤波技术^[32-33]具有很好的滤波性能, 不仅如此, 它们还能有效地保护细线、边缘等图像细节信息。这两篇文章的贡献在于: ①首次正式将四元数^[49]的理论和方法成功地应用到彩色图像滤波上; ②提出了 4 个新的方向算子, 这 4 个方向算子既具有高效的冲击噪声检测能力, 也具有较好的细线检测能力。下面以文献[32]为例来介绍这个新的算法。这个算法主要是用于去除冲击噪声的, 属于开关型矢量中值滤波器。

(1) 四元数基本概念

一个四元数^[49] q 由一个实部和 3 个虚部组成: $q = a + b i + c j + d k$, 其中 a, b, c 和 d 是实数, i, j 和 k 是 3 个虚单位, 并满足下面的非交换规则:

$$\left. \begin{aligned} i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \\ ij = k, \quad jk = i, \quad ki = j \\ ji = -k, \quad kj = -i, \quad ik = -j \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

当实部 $a = 0$ 时, 则称 q 为纯虚四元数。四元数 q 的模和共轭分别定义为

$$|q| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}, \quad q^* = a - b i - c j - d k$$

(2) 彩色图像的四元数表示

一般可使用纯虚四元数来表示一个 RGB 彩色图像。设像素 $x_{i,j} = [r_{i,j}, g_{i,j}, b_{i,j}]^T$, 其中 $r_{i,j}, g_{i,j}, b_{i,j} \in \{0, 1, 2, \dots, 255\}$, 为了对称, 本文将 RGB 空间

的原点坐标从(0,0,0)移到(127.5,127.5,127.5),则像素 $\mathbf{x}_{i,j}$ 的纯虚四元数可表示为 $\mathbf{q}_{i,j} = (r_{i,j} - 127.5)\mathbf{i} + (g_{i,j} - 127.5)\mathbf{j} + (b_{i,j} - 127.5)\mathbf{k}$ 。

(3) 彩色像素的色差表示

令单位四元数 $R = (\mathbf{i} + \mathbf{j} + \mathbf{k})/\sqrt{3}$,则通过分析四元数的旋转理论,两个彩色像素(四元数表示) \mathbf{q}_1 和 \mathbf{q}_2 的色差四元数可表示为

$$Q(\mathbf{q}_1 + R\mathbf{q}_2R^*) = Q(\mathbf{q}_3) = \left(r_3 - \frac{r_3 + g_3 + b_3}{3}\right)\mathbf{i} + \left(g_3 - \frac{r_3 + g_3 + b_3}{3}\right)\mathbf{j} + \left(b_3 - \frac{r_3 + g_3 + b_3}{3}\right)\mathbf{k} \quad (28)$$

其中, $\mathbf{q}_3 = \mathbf{q}_1 + R\mathbf{q}_2R^* = r_3\mathbf{i} + g_3\mathbf{j} + b_3\mathbf{k}$ 。

(4) 新的算法设计

新的滤波算法属于开关型的矢量中值滤波器,即对于每个像素 $\mathbf{q}_{s,t}$,先判断它是否为冲击噪声,若是,则用 VMF 的输出 $\mathbf{q}_{s,t}^{VMF}$ 去代替它,否则保持不变,即

$$\mathbf{q}_{s,t}^{proposed} = \begin{cases} \mathbf{q}_{s,t}^{VMF} & \text{如果 } V \geq T \\ \mathbf{q}_{s,t} & \text{否则} \end{cases} \quad (29)$$

其中, T 是一个阈值, V 是一个冲击噪声检测函数, $V \geq T$ 时,则表示 $\mathbf{q}_{s,t}$ 是噪声。为了判断 $\mathbf{q}_{s,t}$ 是否为噪声,该文提出如下4个四元数算子:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{R} & \mathbf{1} & R & R \\ \mathbf{R} & \mathbf{R} & \mathbf{1} & R & R \\ \mathbf{1} & \mathbf{R} & \mathbf{R} & \mathbf{R} & \mathbf{R} \\ \mathbf{R} & \mathbf{R} & \mathbf{R} & \mathbf{R} & \mathbf{R} \end{pmatrix}$$

可用 $\mathbf{K}_h (h=1,2,3,4)$ 表示上面4个算子,并设 \mathbf{K}_h 中的非0元素所对应的图像像素分别为 $\{\mathbf{q}_{s,t}^{(h,1)}, \mathbf{q}_{s,t}^{(h,2)}, \mathbf{q}_{s,t}^{(h,3)}, \mathbf{q}_{s,t}^{(h,4)}\}$,其中 $\mathbf{q}_{s,t}$ 为需要滤波的像素(位于滤波器窗口中心)。本文通过构造下面的公式来计算 V 的值:

$$V_h = \frac{1}{4} \sum_{l=1}^4 |Q(\mathbf{q}_{s,t}^{(h,l)} + R\mathbf{q}_{s,t}R^*)| \quad h = 1,2,3,4 \quad (30)$$

$$V = \min(V_1, V_2, V_3, V_4) \quad (31)$$

在实验中,先让 $\{\mathbf{q}_{s,t}^{(h,1)}, \mathbf{q}_{s,t}^{(h,2)}, \mathbf{q}_{s,t}^{(h,3)}, \mathbf{q}_{s,t}^{(h,4)}\}$ 尽可能地取自经过滤波处理后的数据,若 $V \geq T$,则让这

些元素全部取滤波前源图像中的数据,然后重新计算 V 的值。

另外,式(29)中的阈值 T 取22。

3 矢量滤波技术的评估标准

为了客观评价彩色图像的滤波效果,人们提出了各种评估方法^[1,15,31,36,42,48,50]。下面是比较常用的几种:

- (1) 归一化均方误差 (NMSE)^[1,50]
- (2) 归一化色彩误差 (NCD)^[1]
- (3) 平均绝对误差 (MAE)^[31,36,48]
- (4) 平均均方误差 (MSE)^[31,36,48]
- (5) 峰值信噪比 (PSNR)^[15,42],即

$$NCD = \frac{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \left\{ [L_y^*(i,j) - L_o^*(i,j)]^2 + [a_y^*(i,j) - a_o^*(i,j)]^2 + [b_y^*(i,j) - b_o^*(i,j)]^2 \right\}^{1/2}}{\left\{ \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \left\{ [L_o^*(i,j)]^2 + [a_o^*(i,j)]^2 + [b_o^*(i,j)]^2 \right\}^{1/2} \right\}} \quad (32)$$

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \|y(i,j) - o(i,j)\|_2^2}{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \|o(i,j)\|_2^2} \quad (33)$$

$$MAE = \frac{1}{3HW} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \|y(i,j) - o(i,j)\|_1 \quad (34)$$

$$MSE = \frac{1}{3HW} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \|y(i,j) - o(i,j)\|_2^2 \quad (35)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{\frac{1}{3HW} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \|y(i,j) - o(i,j)\|_2^2} \quad (36)$$

其中, H 和 W 是图像的高和宽, (i,j) 表示像素位置, $o(i,j)$ 是没有污染的源图像 o 中的点 (i,j) 的像素值, $y(i,j)$ 是滤波后的输出图像 y 点 (i,j) 的像素值, $\|\bullet\|_2$ 表示矢量的 L_2 模 (Euclidean 距离), $\|\bullet\|_1$ 表示矢量的 L_1 模 (City-block 距离)。式(32)表示色彩误差(在均匀颜色空间 CIELAB 中测量),其中, $L_y^*(i,j)$ 和 $L_o^*(i,j)$ 代表 $y(i,j)$ 和 $o(i,j)$ 在 CIELAB 空间中的亮度值,同样地, $a^*(i,j)$ 和 $b^*(i,j)$ 一起表示色调值。

很明显,在上面的评判标准中, NCD 直接表示了两个彩色图像的色彩差异(这种色彩差异比较符

合人类的视觉感知,因为它是在与人类视觉感知一致的均匀颜色空间 CIELAB 中测量出的); MAE 用于衡量算法对于图像的边缘、纹理等细节的保护能力^[29]; 而 MSE、PSNR 和 NMSE 则表示两个彩色图像在关于矢量模上的整体差异。另外, MSE 和 PSNR 是等价的。在早期的滤波算法中,一般采用 NMSE 和 NCD; 但最近的文献一般都采用 MSE、MAE 和 NCD, 或者采用 PSNR、MAE 和 NCD 进行评估。因为 MSE 和 MAE (或者 PSNR 和 MAE) 比 NMSE 更能反映两个图像的误差。

4 噪声模型

在研究彩色图像滤波技术时,为了测试一种新的滤波算法,常常需要在原始(无噪声)的测试图像中加入仿真的噪声,这样才能客观评价新算法的滤波性能。图像中的噪声一般有冲击噪声、加性噪声和混合噪声。

(1) 冲击噪声

光电传感器的缺陷和通道传输错误都容易引起冲击噪声^[1,51]。冲击噪声经常使用下面的模型^[7,47]:

$$\mathbf{x}(s, t) = \begin{cases} \mathbf{o}(s, t) & \text{概率 } 1 - p_1 \\ \mathbf{n}_1(s, t) & \text{概率 } p_1 \end{cases} \quad (37)$$

式中, (s, t) 表示像素的坐标; p_1 (下角 1 代表 impulse) 是图像冲击噪声污染率; $\mathbf{o}(s, t)$ 是理想的、没有受到噪声污染的彩色矢量(像素); $\mathbf{x}(s, t)$ 是受到噪声污染的彩色矢量; $\mathbf{n}_1(s, t)$ 表示噪声矢量(至少有一个通道受到噪声污染), 当污染值是以 0.5 的概率取通道灰度值的最大和最小值时, 则称为椒盐噪声, 当污染值是服从均匀分布的随机值时, 则称为随机冲击噪声。在仿真冲击噪声时, 一般使用如下的两步方法: 首先, 3 个通道独立地以概率 p_1 接受冲击值的腐蚀; 然后, 对于每个被污染的像素, 使用相关因子 $\rho = 0.5$ 去仿真通道的相关性, 即如果一个像素至少在一个通道上受到污染, 则其他每个没有受到污染的通道都以 50% 的概率接受冲击腐蚀。

(2) 加性噪声

各种电子电路的发热和光电传感器的光子波动都会产生加性噪声^[1,51]。加性噪声一般服从均值为 0 的高斯分布或其他分布, 其模型是^[1,47,51]:

$$\mathbf{x}(s, t) = \mathbf{o}(s, t) + \mathbf{n}_A(s, t) \quad (38)$$

这里 $\mathbf{n}_A(s, t)$ (下角 A 代表 additive) 一般是均值为 0 的高斯噪声, 即服从如下的分布:

$$p[\mathbf{n}_A(s, t)] = (2\pi\sigma^2)^{-3/2} \exp\left[-\frac{\|\mathbf{n}_A(s, t)\|_2^2}{2\sigma^2}\right] \quad (39)$$

在仿真加性噪声时, 与仿真冲击噪声不同, 不需要考虑通道之间的相关性, 即在每个通道中按式(38)和式(39)独立地引入加性噪声。

(3) 混合噪声

在很多场合下, 彩色图像会同时被通道传输错误、传感器故障和电子元器件的热效应等因素所影响^[1], 这时它就会同时污染上冲击噪声和加性噪声, 即混合噪声。下面是混合噪声的模型^[1,47]:

$$\mathbf{x}(s, t) = \begin{cases} \mathbf{o}(s, t) + \mathbf{n}_A(s, t) & \text{概率 } 1 - p_1 \\ \mathbf{n}_1(s, t) & \text{概率 } p_1 \end{cases} \quad (40)$$

混合噪声的仿真过程也就是冲击噪声的仿真过程和加性噪声的仿真过程的组合。

5 滤波效果

[注: 本节的大部分实验数据来自于文献[32]、[33]]

为了直观地考察各种矢量滤波算法的滤波效果和客观的滤波性能, 本文先使用冲击噪声模型(式(37))给“Lena”彩色图像(24-bit RGB, 512 × 512)加入 3% ~ 25% 的随机冲击噪声, 然后使用一些有代表性的、经常使用的矢量滤波器(见表 1)进行滤波, 并使用 MSE, MAE 和 NCD 来评估其滤波性能(评估结果见表 2)。滤波器窗口大小采用 3 × 3。

由表 2 可以看出, 两个古典的滤波器(VMF、DDF)、混合方向滤波器(HDF、AHDF)和自适应模糊滤波器 AVDF 的性能比较平稳和鲁棒; 开关型滤波器 AVMF 和 FPGF_{VMF} 的滤波性能比较优秀, 其中 FPGF_{VMF} 在各种污染率下, 其性能都胜过古典的滤波技术; 而其他滤波器(文献[32]滤波算法除外)在高污染率的情况下, 滤波性能则不太理想; 但不管从那个指标(MSE、MAE、NCD)来看, 文献[32]所提出的滤波算法的滤波性能明显优于其他滤波技术。

另外, 为了直观地观察各种滤波器的滤波效果和它们的细线保护性能, 笔者先在含 10% 随机冲击噪声的“Lena”图像中画了一个对角线相连的细线

表 1 各种用于性能评估的矢量滤波器

Tab. 1 Filters used in the comparative evaluation

滤波器名称缩写	滤波器名称	类别	参考文献
IF ⁽¹⁾	Identity filter		
VMF	Vector median filter	Classic vector filter (见 2.1 节)	[6]
BVDF	Basic vector directional filter	Classic vector filter (见 2.1 节)	[8]
DDF	Directional-distance filter	Classic vector filter (见 2.1 节)	[9]
HDF	Hybrid directional filter	Hybrid directional filter (见 2.2 节)	[10]
AHDF	Adaptive hybrid directional filter	Hybrid directional filter (见 2.2 节)	[10]
AVDF	Adaptive vector directional filter	Fuzzy vector filter(见 2.3 节)	[12]
CWVMF	Center-weighted vector median filter	Weighted vector filter (见 2.4 节)	[21]
MCWVMF	Modified center-weighted vector median filter	Weighted vector filter (见 2.4 节)	[21]
VLUM	Vector LUM smoother	Switching vector filter (见 2.5 节)	[30]
AVMF	Adaptive vector median filter	Switching vector filter (见 2.5 节)	[31]
FPGF _{VMF}	Fast peer group filter	Switching vector filter (见 2.5 节)	[41]
文献[32]滤波算法	Quaternion based switching vector filter	Developed recently (见 2.7 节)	[32]

注:(¹) IF 滤波器总是输出当前像素自身(不进行任何滤波操作)。

表 2 各种滤波器的滤波性能比较 (Lena 图像, 3 × 3 窗口)

Tab. 2 Comparison of the performance in terms of MSE, MAE and NCD using Lena test image (3 × 3 window)

滤波器	不同噪声水平下滤波后图像的 MSE 值、MAE 值、NCD 值																	
	3%			5%			10%			15%			20%			25%		
	MSE	MAE	NCD	MSE	MAE	NCD	MSE	MAE	NCD	MSE	MAE	NCD	MSE	MAE	NCD	MSE	MAE	NCD
IF	524.13	4.55	0.046 6	850.55	7.41	0.075 2	1 653.70	14.39	0.143 8	2 378.88	20.71	0.202 6	3 061.38	26.60	0.255 6	3 680.94	32.00	0.303 0
VMF	34.18	3.39	0.029 8	38.81	3.59	0.031 3	60.48	4.20	0.036 3	107.66	5.11	0.044 4	207.65	6.61	0.058 5	383.09	8.90	0.080 9
BVDF	43.83	3.91	0.031 0	51.67	4.12	0.032 4	88.04	4.85	0.037 9	180.69	6.14	0.047 7	378.81	8.42	0.065 4	701.94	11.81	0.091 4
DDF	34.56	3.43	0.029 8	39.17	3.61	0.031 2	60.14	4.20	0.036 0	106.47	5.10	0.043 8	204.25	6.57	0.057 7	376.90	8.84	0.079 6
HDF	34.18	3.54	0.030 7	39.08	3.74	0.032 2	62.07	4.44	0.037 7	113.42	5.59	0.047 3	223.76	7.57	0.064 4	404.20	10.45	0.089 7
AHDF	33.84	3.53	0.030 6	38.60	3.73	0.032 1	61.49	4.44	0.037 7	114.81	5.63	0.047 3	229.61	7.70	0.064 7	415.30	10.72	0.090 3
AVDF	33.19	3.76	0.031 9	37.19	3.94	0.033 2	58.48	4.70	0.039 4	109.15	6.10	0.051 1	212.98	8.38	0.070 7	382.94	11.49	0.097 3
CWVMF	21.51	1.16	0.010 3	41.86	1.57	0.014 1	179.50	3.40	0.032 7	470.80	6.63	0.064 7	919.58	11.18	0.109 8	1 479.91	16.55	0.161 5
MCWVMF	18.88	0.73	0.006 8	35.51	1.09	0.010 6	165.92	2.94	0.030 7	450.51	6.16	0.064 5	923.87	10.88	0.112 5	1 539.26	16.60	0.168 8
VLUM	14.60	0.55	0.005 3	24.79	0.91	0.008 9	78.69	2.16	0.021 7	188.43	3.95	0.039 9	381.85	6.50	0.066 0	674.80	9.94	0.100 3
FPGF _{VMF}	16.24	0.63	0.005 8	24.52	1.01	0.009 1	53.40	2.03	0.018 6	103.83	3.31	0.030 3	204.78	5.16	0.047 6	382.03	7.83	0.073 1
AVMF	16.25	0.63	0.006 4	25.73	1.03	0.010 4	59.54	2.12	0.021 5	117.34	3.45	0.034 7	223.45	5.28	0.052 8	404.51	7.88	0.078 6
文献[32]滤波算法	12.05	0.54	0.004 5	18.45	0.87	0.007 4	43.70	1.83	0.015 6	92.48	3.10	0.026 7	190.45	4.90	0.043 3	359.04	7.49	0.068 1

矩形,然后使用表 1 中列出的滤波器进行滤波。图 1 显示了各种滤波器的输出图像。由图 1 可见,非常明显,文献[32]所设计的滤波算法,其滤波后的图像具有很好的细线保护能力和最好的视觉效果。

6 结 语

本文对彩色图像矢量滤波的基本理论和方法进

行了总结和分类,并列举了每种类型的滤波算法中的最经典和目前最常用的算法。然而,由于彩色图像比灰度图像更为复杂,其 3 个通道之间存在着强烈的内在联系,所以对彩色图像的处理比灰度图像复杂得多。笔者认为,好的数学工具是研究彩色图像的重要工具,在这方面,四元数的理论或许是合适的,但需要更多的探索。彩色图像矢量滤波技术的应用也应当拓展,它不仅可用于消除噪声,还可将它



图 1 各种滤波器的滤波效果

Fig. 1 Restoration results of different filters operating on the test image "Lena"

应用到彩色图像插值、彩色边缘检测和其他的应用，相信也会取得很好的效果，这需要不断地去探索和研究。

参考文献 (References)

- Plataniotis K N, Venetsanopoulos A N. Color Image Processing and Applications [M]. Berlin, German: Springer, 2000.
- Lukac R, Smolka B, Martin K, *et al.* Vector filtering for color imaging [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, **22**(1): 74-86.
- 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.
- Rantanen H, Karlsson M, Pohjala P, *et al.* Color video signal processing with median filters [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1992, **38**(3): 157-161.
- Hardie R C, Boncele C G. A class of rank-order-based filters for smoothing and sharpening [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, **41**(3): 1061-1076.
- Astola J, Haavisto P, Neuvo Y. Vector median filters [J]. Proceedings of the IEEE, 1990, **78**(4): 678-689.
- Trahanias P E, Venetsanopoulos A N. Vector directional filters: a new class of multichannel image processing filters [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1993, **2**(4): 528-534.
- Trahanias P E, Karakos D G, Venetsanopoulos A N. Directional processing of color images: theory and experimental results [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, **5**(6): 868-880.
- Karakos D G, Trahanias P E. Generalized multichannel image-filtering structures [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, **6**(7): 1038-1045.
- Gabbouj M, Cheikh F A. Vector median-vector directional hybrid filter for color image restoration [A]. In: Proceedings of the European Signal Processing Conference (EUSIPCO) [C], Trieste, Italy,

- 1996; 879-881.
- 11 Plataniotis K N, Androutsos D, Venetsanopoulos A N. Colour image processing using fuzzy vector directional filters [A]. In: Proceedings of the IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing [C], Neos Marmaras, Halkidiki, Greece, 1995, 2: 535-538.
- 12 Plataniotis K N, Androutsos D, Venetsanopoulos A N. Color image processing using adaptive vector directional filters [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1998, 45(10): 1414-1419.
- 13 Lukac R, Plataniotis K N, Smolka B, *et al.* cDNA microarray image processing using fuzzy vector filtering framework [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 152(1): 17-35.
- 14 Hore E S, Qiu B, Wu H R. Improved vector filtering for color images using fuzzy noise detection [J]. Optical Engineering, 2003, 42(6): 1656-1664.
- 15 Morillas S, Gregori V, Peris-Fajames G, *et al.* A fast impulsive noise color image filter using fuzzy metrics [J]. Real-Time Imaging, 2005, 11(5-6): 417-428.
- 16 Chatzis V, Pitas I. Fuzzy scalar and vector median filters based on fuzzy distances [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(5): 731-734.
- 17 Plataniotis K N, Androutsos D, Venetsanopoulos A N. Adaptive fuzzy systems for multichannel signal processing [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(9): 1601-1622.
- 18 Viero T, Östämö K, Neuvo Y. Three-dimensional median related filters for color image sequence filtering [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1994, 4(2): 129-142.
- 19 Lucat L, Siohan P, Barba D. Adaptive and global optimization methods for weighted vector median filters [J]. Signal Processing: Image Communication, 2002, 17(7): 509-524.
- 20 Shen Y, Barner K E. Fast adaptive optimization of weighted vector median filters [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(7): 2497-2510.
- 21 Smolka B. Efficient modification of the central weighted vector median filter [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2002, 2449: 166-173.
- 22 Lukac R, Marchevsky S. Adaptive vector LUM smoother [A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) [C], Thessaloniki, Greece, 2001: 878-881.
- 23 Charles D, Davies E R. Distance-weighted median filters and their application to colour images [A]. In: Proceedings of the International Conference on Visual Information Engineering [C], Guildford, UK, 2003: 117-120.
- 24 Jin Liang-hai, Li De-hua. An adaptive spatial distance-weighted vector median filter [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(6): 970-976. [金良海, 李德华. 一种基于空间距离加权的自适应矢量中值滤波器 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(6): 970-976.]
- 25 Lukac R, Smolka B, Plataniotis K N, *et al.* Selection weighted vector directional filters [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004, 94(1-3): 140-167.
- 26 Lukac R, Plataniotis K N, Venetsanopoulos A N. Color image denoising using evolutionary computation [J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2005, 15(5): 236-251.
- 27 Jin Liang-hai, Li De-hua, Yao Xing-zhong. An improved adaptive basic vector directional filter [J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(13): 8-12. [金良海, 李德华, 姚行中. 一种改进型的自适应基本矢量方向滤波器 [J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(13): 8-12.]
- 28 Jin Liang-hai, Li De-hua. An improved directional-distance filter [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(5): 798-806. [金良海, 李德华. 一种改进型的距离方向矢量滤波器 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 798-806.]
- 29 Lukac R, Plataniotis K N, Smolka B, *et al.* Generalized selection weighted vector filters [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2004, 12(15): 1870-1885.
- 30 Lukac R. Vector LUM smoothers as impulse detector for color images [A]. In: Proceedings of European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD) [C], Espoo, Finland, 2001: 137-140.
- 31 Lukac R. Adaptive vector median filtering [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(12): 1889-1899.
- 32 Jin Liang-hai, Li De-hua. An efficient color impulse detector and its application to color images [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(6): 397-400.
- 33 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.
- 34 Jin Liang-hai, Li De-hua. A switching vector median filter based on quaternion rotation [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(12): 2089-2095. [金良海, 李德华. 基于四元数旋转的开关型矢量中值滤波器 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(12): 2089-2095.]
- 35 Jin Liang-hai, Li De-hua. A switching vector median filter based on CIELAB color space [J]. Mini-Micro Systems, 2007, 28(9): 1700-1704. [金良海, 李德华. 基于 CIELAB 空间的开关型矢量中值滤波器 [J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(9): 1700-1704.]
- 36 Lukac R, Plataniotis K N, Venetsanopoulos A N, *et al.* A statistically-switched adaptive vector median filter [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 2005, 42(4): 361-391.
- 37 Lukac R. Adaptive color image filtering based on center-weighted vector directional filters [J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2004, 15(2): 169-196.
- 38 Lukac R. Color image filtering by vector directional order-statistics [J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2002, 12(3): 279-285.
- 39 Lukac R, Smolka B, Plataniotis K N, *et al.* Vector sigma filters for noise detection and removal in color images [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2006, 17(1): 1-26.
- 40 Ma Z, Feng D, Wu H R. A neighborhood evaluated adaptive vector filter for suppression of impulse noise in color images [J]. Real-Time Imaging, 2005, 11(5-6): 403-416.
- 41 Smolka B, Chydzinski A. Fast detection and impulsive noise removal

- in color images [J]. *Real-Time Imaging*, 2005, **11**(5-6): 389-402.
- 42 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.
- 43 Smolka B, Plataniotis K N, Lukac R, *et al.* Similarity based impulsive noise removal in color images [A]. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) [C]*, Barcelona, Spain, 2003: 105-108.
- 44 Smolka B, Plataniotis K N, Chydzinski A, *et al.* Self-adaptive algorithm of impulsive noise reduction in color images [J]. *Pattern Recognition*, 2002, **35**(8): 1771-1784.
- 45 Smolka B, Chydzinski A, Wojciechowski K, *et al.* On the reduction of impulsive noise in multichannel image processing [J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(6): 902-908.
- 46 Lucchese L, Mitra S K. A new class of chromatic filters for color image processing: theory and applications [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(4): 534-548.
- 47 Ma Z, Wu H R, Qiu B. A robust structure-adaptive hybrid vector filter for color image restoration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(12): 1990-2001.
- 48 Ma Z, Wu H R, Feng D. Partition-based vector filtering technique for suppression of noise in digital color images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(8): 2324-2342.
- 49 Hamilton W R. *Elements of Quaternions [M]*. Boston, MA, USA: GINN & Company, 1887.
- 50 Eskicioglu A M, Fisher P S. Image quality measures and their performance [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, **43**(12): 2959-2965.
- 51 Pratt W K. *Digital Image Processing [M]*. New York, USA: Wiley, 1991.