

一种基于空间距离加权的自适应矢量中值滤波器

金良海 李德华

(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)

摘要 矢量中值滤波器(vector median filter, VMF)是一种经典和高效的矢量滤波器,主要用于消除彩色图像中的脉冲噪声,但它没有考虑在滤波器窗口内各个像素由于位置的不同而对滤波效果产生的不同的影响。根据人类视觉感知,在一个滤波器窗口中,即使二个像素具有相同的颜色值,其中离中心像素较近的像素应当对中心像素影响较大,而距离较远的像素对中心像素影响较小。基于此,试图将空间距离对滤波效果的影响量化,提出了一个基于心理距离的加权公式,并结合传统的矢量中值滤波器 VMF,构造出了一种新的基于空间距离加权的自适应矢量中值滤波器。实验表明,新的矢量中值滤波器,在抑制脉冲噪声、色调保持、细节或边缘保护方面,胜过传统的 VMF 和其他几个基本的典型矢量滤波器。

关键词 矢量中值滤波器 空间距离加权 脉冲噪声 彩色图像 自适应技术

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)06-0970-07

An Adaptive Spatial Distance-weighted Vector Median Filter

JIN Liang-hai, LI De-hua

(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)

Abstract Vector median filter (VMF) is a kind of traditional and highly effective vector filter which is mainly used to remove impulsive noise from color images. But it doesn't take account of a fact that the pixels located at different positions in a filtering window have different influence on filtering effect. According to the human visual perception, even though two pixels in a filtering window have the same color values, the one that is closer to the central pixel should have greater influence on the central pixel, and the other's influence should be less. Based on this principle, this paper attempts to quantify the influence of different spatial distances on filtering effect by suggesting a spatial-distance weighting function which is based on psychological distance. Combining this function with the traditional VMF, a new filter, namely adaptive spatial distance-weighted vector median filter (ADWVMF), is proposed. The experimental results show that the new ADWVMF, compared with the traditional VMF and several other representative vector filters, has better performance and filtering effect on noise attenuation, chromaticity retention, and edges or details preservation.

Keywords vector median filters, spatial distance weighting, impulsive noise, color images, adaptive techniques

1 引言

彩色图像去噪的目标是削弱噪声,提高图像质量,同时要求尽可能地保持色调不变、保护边缘或细节信息^[1]。起初,有人采取标量滤波法对彩色图像去噪,即对彩色图像的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,将会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。

近年来,基于矢量的滤波方法越来越被人们所接受,认为彩色图像矢量滤波法比标量滤波法更合适^[2]。矢量滤波法作为基于统计排序的非线性滤波法,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^[3]。彩色图像中的每一个像素可以

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资助项目(863-306-ZT04-06-3)

收稿日期:2005-12-28;改回日期:2006-02-24

第一作者简介:金良海(1966~),男,高工。现为华中科技大学图像识别与人工智能研究所博士研究生。研究方向为图像处理、模式识别和智能控制。E-mail: lhjin518@126.com

表示为一个 3 维列矢量,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。

矢量中值滤波器 (vector median filter, VMF)^[4],是一种经典和高效的矢量滤波器,它根据滤波器窗口内的一个矢量到窗口内的其他所有矢量的 L_1 或 L_2 距离和,对滤波器窗口内的所有矢量进行排序,然后选取距离和最小的矢量作为滤波器输出。这种滤波器对于抑制脉冲噪声很有效果。

近来,人们对矢量滤波的方法做了大量的研究^[4-10]。其中,基本矢量方向滤波器 (basic vector directional filter, BVDF)^[5,6]、距离方向滤波器 (directional-distance filter, DDF)^[7,8] 是另外二种具有代表性、高效的矢量滤波器。BVDF 根据窗口内的一个矢量到窗口内的其他所有矢量的夹角和,对滤波窗口内的所有矢量进行排序,这种滤波器在抑制彩色图像中噪声的同时,能有效地保护图像色调;DDF 则是 VMF 和 BVDF 的一种综合,它根据一种混合距离排序准则对滤波器窗口内的所有矢量进行排序,这种滤波器的特点是同时考虑了矢量的方向 (图像的色度) 和矢量的长度 (图像强度)。

但是上述提及的各种文献所记载的矢量滤波技术,都没有考虑在滤波窗口内各个像素由于离中心像素空间距离的不同而对滤波效果产生的不同的影响。事实上,根据人类心理和视觉感观,空间距离对滤波效果是有较大影响的:在滤波器窗口内,离中心像素距离较近的像素应当对中心像素影响较大,而距离较远的像素对中心像素影响较小。例如,假设在滤波器窗口内有二个矢量 (像素) x_1 和 x_2 ,其中 x_2 到中心像素的空间距离比 x_1 到中心像素的空间距离大得多,并且 x_1, x_2 到窗口内的其他所有矢量的距离和 d_1, d_2 非常接近 (VMF 的排序准则),又假设 d_2 是滤波器窗口内的所有矢量 (像素) 到其他矢量的距离和中的最小值,那么,这时常规的 VMF 的输出将为 x_2 ,但根据人类视觉感观, x_1 作为滤波器的输出可能更加合理。基于这个原理,本文试图模仿人类对空间距离的视觉感知,提出了一个基于心理距离的归一化距离加权公式,并结合传统的矢量中值滤波器 VMF,构造出了新的基于空间距离加权的自适应矢量中值滤波器 (adaptive spatial distance-weighted vector median filter, ADWVMF)。实验数据表明,新的滤波器 ADWVMF 与传统的滤波器 VMF 和其他两个典型的矢量滤波器 (BVDF, DDF) 相比,在抑制脉冲噪声、色调保持、细节或边缘保护方面,

都具有好得多的性能。

下面先回顾一下传统的矢量中值滤波器 VMF,再介绍本文提出的基于空间距离加权的自适应矢量中值滤波器 ADWVMF 的设计原理和方法,最后给出了仿真结果和结论。

2 传统的矢量中值滤波器 VMF

假设 RGB 彩色图像大小为 $N_1 \times N_2$,滤波器窗口大小为 $(2L_1 + 1) \times (2L_2 + 1)$ 。用 $\Gamma_{i,j}$ 表示中心位于图像的位置 (i, j) 处的滤波器窗口所包含的图像像素,将窗口内的像素从上到下、从左到右排列,写成:

$$\Gamma_{i,j} = \{X_1^{(i,j)}, X_2^{(i,j)}, \dots, X_{(L+1)/2}^{(i,j)}, \dots, X_L^{(i,j)}\} \quad (1)$$

$$(L = (2L_1 + 1) \times (2L_2 + 1))$$

其中, $X_p^{(i,j)}$ ($p \in \{1, 2, \dots, L\}$) 是一个 3 维列矢量,其元素为对应的彩色图像像素的 R、G、B 灰度值。

对于滤波器窗口内的样本矢量 $X_p^{(i,j)}$ ($p \in \{1, 2, \dots, L\}$),定义一种关于矢量模的距离测度函数

$$d_p^{(i,j)} = \sum_{q=1}^L \|X_p^{(i,j)} - X_q^{(i,j)}\|, 1 \leq p \leq L \quad (2)$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示矢量的某种度量值 (some appropriate norm),如矢量的 L_1 或 L_2 范数,本文采用 L_2 范数。显然, $d_p^{(i,j)}$ 是滤波器窗口内的矢量 $X_p^{(i,j)}$ 与窗口内的其他所有矢量的关于矢量模的误差和,它隐含着窗口内的像素 $X_p^{(i,j)}$ 与窗口内其他所有像素关于亮度的误差和。

于是可以得到 VMF 的定义:

对 $\Gamma_{i,j} = \{X_1^{(i,j)}, X_2^{(i,j)}, \dots, X_{(L+1)/2}^{(i,j)}, \dots, X_L^{(i,j)}\}$ 中的每个像素 $X_p^{(i,j)}$ ($p \in \{1, 2, \dots, L\}$),按式 (2) 定义的 $d_p^{(i,j)}$ 从小到大进行排序,设排序结果为 $\{X_{(1)}^{(i,j)}, X_{(2)}^{(i,j)}, \dots, X_{((L+1)/2)}^{(i,j)}, \dots, X_{(L)}^{(i,j)}\}$,则 VMF 的输出为 $Y_{i,j} = VMF(\Gamma_{i,j}) = X_{(1)}^{(i,j)}$ 。

3 基于空间距离加权的自适应矢量中值滤波器 ADWVMF 设计

3.1 基本原理

根据人类视觉感知,滤波窗口内的像素由于位置的不同而应当对滤波效果产生不同程度的影响,而且这种影响应当随着离中心像素距离的增加而减弱。所以我们需要设计一个根据空间距离 r 进行加权的函数 $w(r)$ 。考虑到 VMF 采用的是最小聚集距离和准则,可以将 $w(r)$ 理解为空间距离为 r 的两

个像素的相互作用的程度,但它与实际的相互作用的程度相反,即实际相互作用越强, $w(r)$ 越小;相互作用越小, $w(r)$ 就越大。显然, $w(r)$ 应当满足如下两个条件:① $w(r)$ 是一个关于 r 不减函数,即随着两个像素的空间距 r 的增大,它们之间的相互作用就越小, $w(r)$ 就越大;②当 r 比较小时 $w(r)$ 增加较快,而当 r 较大时 $w(r)$ 增加缓慢,即当两个像素的空间距离在很小的范围内变化时,其相互作用程度的变化比较显著,而当它们距离较远时,相互作用程度的变化就比较缓慢。

为了设计这个加权函数,还应当参考人类心里和视觉感知。文献[11]分析了实际空间距离和人类心里距离的关系,并指出空间距离与人类心理感觉是一种指数关系。根据这个结论及上面列出的加权函数 $w(r)$ 应当满足的两个条件,并且进行规一化,我们首先设计出了一个如下的加权函数: $w(r) = 1.0 - 1.0/e^{kr}$,但发现当 $r=0$ 时 $w(r)=0$,它使得滤波器中心像素对应的聚集距离和为 0,因此滤波器总是输出这个中心像素(实际上是没有滤波)。于是,经过多次对这个公式进行修改并实验,最终提出了一个归一化的经验公式:

$$w(r) = 1.0 - \frac{1.0}{(1.0 + e^{k_1 r})^{k_2(w,p)}} \quad (3)$$

其中, $k_2(w,p)$ 是滤波器窗口大小 w 和噪声分布密度 p 的函数,参数 k_1 和 $k_2(w,p)$ 用于调节权值的大小和非线性度。

特别地,若取 k_1 或 $k_2(w,p)$ 为 $+\infty$,则 $w(r) = 1$,这时,权值 $w(r)$ 与距离 r 的远近无关。

图 1 是一个关于 $w(r)$ 的示意图。

通过把上述加权式(3)引入到式(2)定义的距离度量函数 $d_p^{(i,j)}$ 中,就可根据 VMF 构造出本文设计的滤波器 ADWVMF。为此,定义一种相应新的距

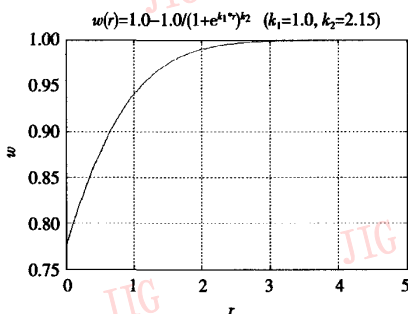


图 1 $w(r)$ 的示意图 ($k_1 = 1.0, k_2(w,p) = 2.15$)
Fig. 1 The curve of $w(r)$ ($k_1 = 1.0, k_2(w,p) = 2.15$)

高度量函数 $\eta_p^{(i,j)}$ ($1 \leq p \leq L$):

$$\eta_p^{(i,j)} = [w(r_{p,(L+1)/2}^{(i,j)})]^2 \sum_{q=1}^L w(r_{p,q}^{(i,j)}) \|X_p^{(i,j)} - X_q^{(i,j)}\|_2 \quad (4)$$

其中,

$$w(r_{p,q}^{(i,j)}) = 1.0 \frac{1.0}{(1.0 + e^{k_1 r_{p,q}^{(i,j)}})^{k_2(w,p)}} \quad (5)$$

在上式中, $\eta_p^{(i,j)}$ 表示位于滤波器窗口 $\Gamma_{i,j}$ 内部的某个像素 $X_p^{(i,j)}$ 到窗口内其他所有像素的一种加权的欧氏距离和 ($\Gamma_{i,j}$ 的中心位于图像的 (i,j) 处,见式(1))。 $X_{(L+1)/2}^{(i,j)}$ 为滤波器窗口中心对应的图像样本像素。 $w(r_{p,q}^{(i,j)})$ 表示像素 $X_p^{(i,j)}$ 和 $X_q^{(i,j)}$ 的相互影响的程度,它是这两个像素之间的空间距离 $r_{p,q}^{(i,j)}$ 的函数(见式(3))。设 $X_p^{(i,j)}$ 和 $X_q^{(i,j)}$ 在滤波器窗口中坐标分别为 (x_p, y_p) 和 (x_q, y_q) ,则 $r_{p,q}^{(i,j)} = \sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2}$ 。

在式(4)中,在计算完像素 $X_p^{(i,j)}$ 、 $X_q^{(i,j)}$ 的欧氏距离 $\|X_p^{(i,j)} - X_q^{(i,j)}\|_2$ 后,考虑到 $X_p^{(i,j)}$ 到 $X_q^{(i,j)}$ 的空间距离的作用,再对这种距离进行调整,即进行空间距离加权: $w(r_{p,q}^{(i,j)})$ 。因此 $w(r_{p,q}^{(i,j)}) \|X_p^{(i,j)} - X_q^{(i,j)}\|_2$ 表示了像素 $X_p^{(i,j)}$ 和 $X_q^{(i,j)}$ 之间的一种加权的欧氏距离,而这种加权距离包含了这两个像素之间的空间距离所带来的影响。然后在计算完像素 $X_p^{(i,j)}$ 到滤波器窗口内其他所有像素的加权欧氏距离和 $\sum_{q=1}^L w(r_{p,q}^{(i,j)}) \|X_p^{(i,j)} - X_q^{(i,j)}\|_2$ 后,因为像素 $X_p^{(i,j)}$ 有可能是滤波器的输出,即有可能用它去替换中心像素 $X_{(L+1)/2}^{(i,j)}$,所以需要考虑 $X_p^{(i,j)}$ 对中心像素 $X_{(L+1)/2}^{(i,j)}$ 在空间距离上的作用,于是再对这个总的加权距离和进行调整(加权): $[w(r_{p,(L+1)/2}^{(i,j)})]^2$ 。这样就确保了在滤波器窗口内,即使两个像素具有相同的加权欧氏距离和,其中离中心像素较近的像素也将会被优先考虑(因为其 $\eta_p^{(i,j)}$ 较小)。

于是可以推出 ADWVMF 的定义:

对 $\Gamma_{i,j} = \{X_1^{(i,j)}, X_2^{(i,j)}, \dots, X_{(L+1)/2}^{(i,j)}, \dots, X_L^{(i,j)}\}$ 中的每个像素 $X_p^{(i,j)}$ ($p \in \{1, 2, \dots, L\}$),按式(4)中定义的 $\eta_p^{(i,j)}$ 从小到大进行排序,设排序结果为 $\{X_{(1)}^{(i,j)}, X_{(2)}^{(i,j)}, \dots, X_{((L+1)/2)}^{(i,j)}, \dots, X_{(L)}^{(i,j)}\}$,则 ADWVMF 的输出为 $Y_{i,j} = \text{ADWVMF}(\Gamma_{i,j}) = X_{(1)}^{(i,j)}$ 。

特别地,在由式(5)计算权值 $w(r_{p,q}^{(i,j)})$ 时,若取参数 k_1 或 $k_2(w,p)$ 为 $+\infty$,则容易证明,新的矢量中值滤波器 ADWVMF 就等价于传统的矢量中值滤波器 VMF。

3.2 参数的自适应确定

在利用 3.1 节中的式 (5) 计算权值 $w(r_{p,q}^{(i,j)})$ 时,需要确定两个参数: k_1 和 $k_2(w,p)$ 。在实验中,取 $k_1 = 1.0$,这样就只需要确定一个参数 $k_2(w,p)$ 。 $k_2(w,p)$ 是滤波器窗口大小 w 和脉冲噪声密度 p 的函数。一般地,在不追求最佳滤波效果的情况下,可取 $k_2(w,p)$ 为固定值,如 $k_2(w,p) = 3.95$ 。但本文目标是要获取可能最佳的滤波效果,因此需要自适应地调整 $k_2(w,p)$ 的值。

实验表明,为使常规的矢量中值滤波器 VMF 达到较好的滤波效果,滤波器窗口大小 w 与脉冲噪声的分布密度 p 应当有如下关系(表 1)。

在实验中,仅仅加入 0 ~ 40% 的脉冲噪声。为

$$k_2(w,p) = \begin{cases} 0.0016067s^5 - 0.042365s^4 + 0.39624s^3 - 1.6306s^2 + 3.9158s + 0.47601 & w < (5 \times 5) \\ -0.0048802s^4 + 0.090172s^3 - 0.57946s^2 + 2.1009s + 0.29025 & w \geq (5 \times 5) \end{cases}$$

其中

$$s = \max((100 \times p)/5.0, 0.01) \quad (6)$$

$$0.0 \leq p \leq 0.4$$

因此,根据脉冲噪声的分布密度 p 就能由表 1 确定滤波器窗口大小 w ,再根据式 (6) 就可以计算出参数 $k_2(w,p)$ 。

现在的问题是,我们没有关于脉冲噪声密度分布的先验知识,因而无法获得噪声的分布密度 p 。因为脉冲噪声一般都是基于下面两个假设的:①没有受到脉冲噪声干扰的图像区域是局部平滑的,这些局部平滑区域由边缘(edges)分隔开;②脉冲噪声在彩色图像的某些分量图像中,具有非常大或非常小的灰度值,接近这些分量图像的灰度值范围的上下界。所以一般来说,脉冲噪声在这些分量图像中的灰度值与其周围的局部平滑区域中的没有受到噪声干扰的像素的平均灰度值相比,相差会很大。基于这个假设,采用如下的方法来粗略地确定脉冲噪声的分布密度 p :将滤波器窗口 $\Gamma_{i,j}$ 分别在 R、G、B 分量图像中移动,若在某个分量图像中,中心像素的灰度值和滤波器窗口内所有像素的平均灰度值之差大于某一个阈值,则标记该中心像素为噪声像素,统计整个图像的噪声像素的个数,则可粗略地计算出噪声的分布密度。即

$$\delta_{i,j} = \max \left(\left| x_{R(i,j)} - \frac{1}{L} \sum_{p=1}^L X_{R(p)}^{(i,j)} \right|, \left| x_{G(i,j)} - \frac{1}{L} \sum_{p=1}^L X_{G(p)}^{(i,j)} \right|, \left| x_{B(i,j)} - \frac{1}{L} \sum_{p=1}^L X_{B(p)}^{(i,j)} \right| \right) \quad (7)$$

表 1 脉冲噪声密度 p 与滤波器窗口大小 w

Tab.1 Suggested window size w for the noise density p

脉冲噪声的密度 p	滤波器窗口大小 w
$0 \leq p < 15\%$	3×3
$15\% \leq p < 30\%$	5×5
$30\% \leq p < 45\%$	7×7
$p \geq 45\%$	9×9

了方便,当噪声密度为 30% ~ 40% 时,也取 5×5 大小的滤波器(没有按表 1 取 7×7 大小的滤波器),即当噪声密度为 $0 \leq p < 15\%$,使用 3×3 的滤波器; $15\% \leq p \leq 40\%$ 时,使用 5×5 的滤波器。

下面,提出一个 $k_2(w,p)$ 的经验公式:

$$N(x_{i,j}) = \begin{cases} 1 & \delta_{i,j} \geq T \\ 0 & \delta_{i,j} < T \end{cases} \quad (8)$$

$$p = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} N(x_{i,j}) \quad (N_1 \times N_2 \text{ 为图像大小}) \quad (9)$$

在式(7)中, $x_{R(i,j)}$ 、 $x_{G(i,j)}$ 和 $x_{B(i,j)}$ 为图像中 (i,j) 处像素的 R、G、B 灰度值。 $X_{R(p)}^{(i,j)}$ 、 $X_{G(p)}^{(i,j)}$ 和 $X_{B(p)}^{(i,j)}$ 代表滤波器窗口 $\Gamma_{i,j}$ 的内部位置 p 所指像素的 R、G、B 灰度值($\Gamma_{i,j}$ 的中心在图像的位置 (i,j) 处)。

在测试噪声密度的实验中,取 3×3 的滤波器窗口 ($L=9$) 和阈值 $T=127$,就能大概估算出脉冲噪声的分布密度 p 。

3.3 ADWVMF 的实现

根据前面的分析,采用对图像的两步扫描来实现新的滤波器设计。在第一遍扫描中,根据式(7) ~ (9)来粗略地确定图像中脉冲噪声的分布密度 p ,然后根据表 1 确定将要使用的滤波器窗口的大小 w ,再根据式(6)来确定参数 $k_2(w,p)$ 的值,最后根据加权式(5)计算滤波器窗口内各位置所对应的加权系数;在第二遍扫描中,使用所选定大小的滤波器和计算好的加权系数,按 ADWVMF 的定义(3.1 节)对整个图像进行滤波,最后就得到了 ADWVMF 的输出图像。

4 实验结果

为了客观评价图像滤波效果,人们提出了各种

评估方法^[12,13]。下面是比较常用的两种方法:

(1) 归一化均方误差(normalized mean square error, NMSE)^[12]

$$NMSE = \frac{\sum_{x=1}^{N_1} \sum_{y=1}^{N_2} \|f(x,y) - \hat{f}(x,y)\|_2^2}{\sum_{x=1}^{N_1} \sum_{y=1}^{N_2} \|f(x,y)\|_2^2}$$

其中, N_1, N_2 表示图像的大小, $f(x,y)$ 代表没有加入噪声的原图像在 (x,y) 处的矢量, $\hat{f}(x,y)$ 表示在源图像 $f(x,y)$ 中加入噪声后经过滤波器滤波后的输出图像在 (x,y) 处的矢量。

很显然,NMSE表示了两个图像在明度(亮度)上的相对误差,它没有直观地反映色彩误差。

(2) 归一化色彩误差(normalized color difference, NCD)^[13]

为了使两个图像之间的差异符合人类视觉感觉,文献[13]定义了一种在与人类感觉一致的均匀颜色空间(Uniform color space)CIELAB中的两个图像之间的误差估计NCD:

$$NCD = \frac{\sum_{x=1}^{N_1} \sum_{y=1}^{N_2} \|\Delta E_{ab}(x,y)\|_2}{\sum_{x=1}^{N_1} \sum_{y=1}^{N_2} \|E_{ab}^*(x,y)\|_2}$$

$$E_{ab}^*(x,y) = [L^*(x,y)]^2 + [a^*(x,y)]^2 + [b^*(x,y)]^2, \Delta E_{ab}(x,y) = [L^*(x,y) - \hat{L}^*(x,y)]^2 + [a^*(x,y) - \hat{a}^*(x,y)]^2 + [b^*(x,y) - \hat{b}^*(x,y)]^2$$

其中, $L^*(x,y), a^*(x,y), b^*(x,y)$ 代表没有加入噪声的源图像 $f(x,y)$ 在 (x,y) 处像素关于 L^*, a^*, b^* 分量图像的灰度值, $\hat{L}^*(x,y), \hat{a}^*(x,y), \hat{b}^*(x,y)$ 代表在源图像 $f(x,y)$ 中加入噪声后经过滤波器滤波后的输出图像 $\hat{f}(x,y)$ 在 (x,y) 处像素关于 L^*, a^*, b^* 分量图像的灰度值。

为了测试ADWVMF的性能,我们使用了两个被广泛使用的彩色图像:Lena(512×512,24位)和

Peppers(512×512,24位)作为测试图像。在两个图像中加入各种比例(0~40%)的脉冲噪声,然后使用我们建议的滤波器ADWVMF和传统的滤波器VMF及另外两个典型的矢量滤波器(BVDF,DDF),分别进行滤波,并测试它们各自的输出图像关于NMSE和NCD的指标。其中,VMF、BVDF和DDF同时使用了3×3和5×5的两种滤波窗口,同时DDF采用参数 $p=0.25$ ^[7]。

为了直观上观察ADWVMF的滤波效果,图2、图3分别显示了加入了25%噪声的Lena和Peppers图像及经过ADWVMF和VMF滤波后的输出图像。其中,图3(a)为没有加入噪声的Lena(Peppers)原图像,图3(b)是被25%脉冲噪声污染后的Lena(Peppers)图像,图3中的图(c)、(d)、(e)分别是3×3VMF、5×5VMF、ADWVMF的Lena(Peppers)输出图像。从图中可以看出,在3×3VMF的输出图像中明显有一些噪声没有滤掉,5×5VMF的输出图像轻微有些模糊,ADWVMF的滤波效果最好。

为了更直观地观察ADWVMF对于“保护边缘或细节”的性能,图4、图5分别显示了在Lena和Peppers图像中加入25%的脉冲噪声后,ADWVMF和VMF输出的残差图像(即未被噪声污染的图像和滤波后的图像的差异,为了便于观察,在这些残差图像中,各个像素的模放大了3.5倍,而方向不变)。其中,图(a)、(b)、(c)分别是3×3VMF、5×5VMF、ADWVMF的Lena(Peppers)残差图像。从图中可以明显看出,ADWVMF在保护“边缘或细节”方面,比传统的滤波器VMF具有明显的优势。

图6、图7则显示了在Lena、Peppers中加入0~40%的脉冲噪声后,各种滤波器(ADWVMF、VMF、BVDF和DDF)的输出图像关于NMSE和NCD的曲线。从这些曲线中可以清楚地看出,ADWVMF的性能是最佳的,特别是在色彩误差NCD指标上,ADWVMF比其他各种滤波器低得多,因此它具有非



图2 各种滤波器的滤波效果(Lena)

Fig. 2 Restoration results of different filters operating on the test image "Lena"

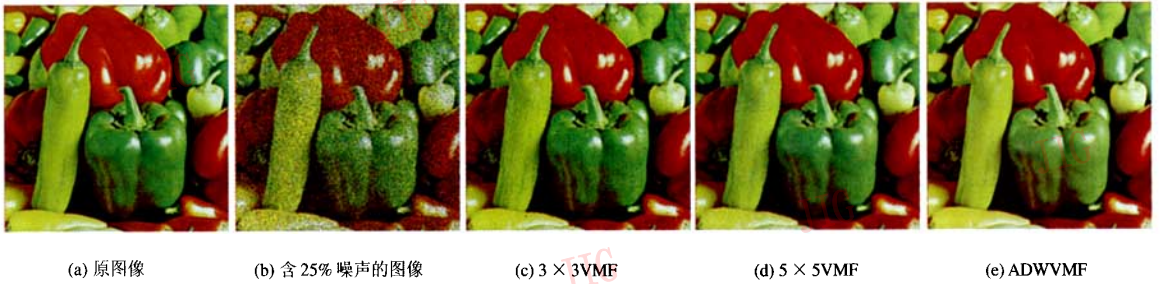


图 3 各种滤波器的滤波效果(Peppers)

Fig.3 Restoration results of different filters operating on the test image "Peppers"

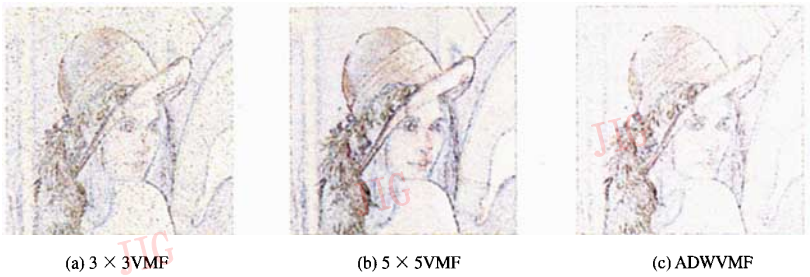


图 4 各种滤波器的误差图像(Lena)

Fig.4 Estimation errors emphasized by a factor of 3.5 related to the test image "Lena" degraded by 25% impulsive noise under the following filters

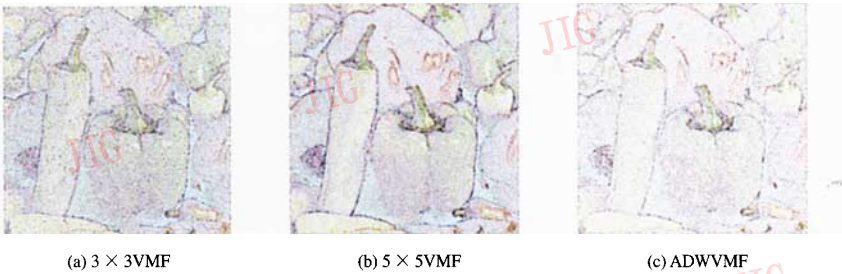


图 5 各种滤波器的误差图像(Peppers)

Fig.5 Estimation errors emphasized by a factor of 3.5 related to the test image "Peppers" degraded by 25% impulsive noise under the following filters

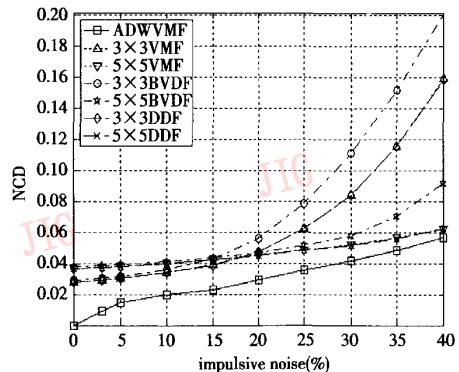
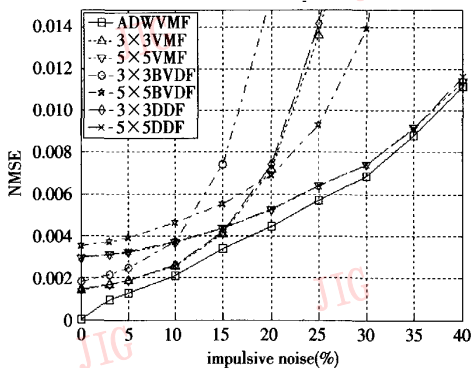


图 6 各种滤波器的 NMSE 和 NCD 曲线(Lena)

Fig.6 Comparison in NMSE & NCD among different filters operating on the "Lena" image

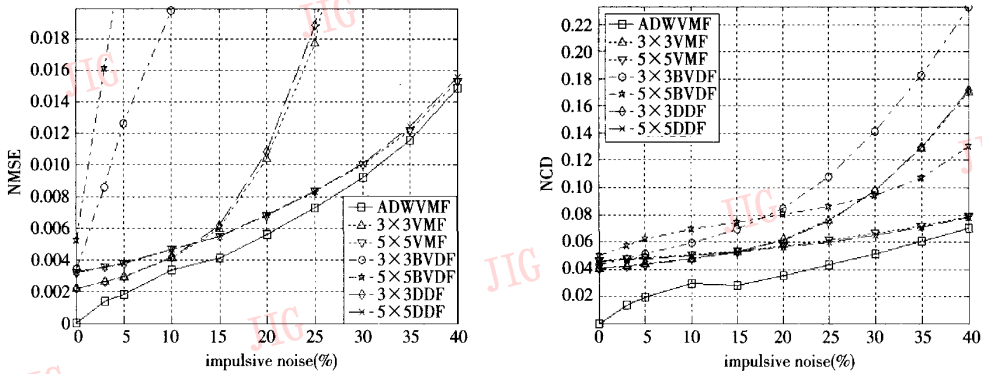


图 7 各种滤波器的 NMSE 和 NCD 曲线 (Peppers)

Fig. 7 Comparison in NMSE & NCD among different filters operating on the "Peppers" image

常好得色彩保护功能。

5 结论

在图像去噪滤波的算法中,考虑空间距离对中心像素的影响是比较重要的,也是符合人类心理和视觉感观的。本文提出了一种符合人类心理感知的空间距离加权公式,通过使用这个加权公式,结合传统的矢量中值滤波器 VMF,构造出相应新的基于空间距离加权的自适应矢量中值滤波器 ADWVMF。通过粗略地检测彩色图像中的脉冲噪声的分布密度 p ,来自适应地调整加权式(5)中的参数 $k_2(w, p)$,从而使 ADWVMF 达到可能最好的滤波效果。本文最重要的一点是,它试图模仿人类视觉感知,将人脑对图像像素之间的不同距离的心理作用量化并应用到图像去噪滤波算法上。实验结果表明,新的自适应矢量中值滤波器 ADWVMF,在抑制脉冲噪声、保持色调、保护细节或边缘方面,胜过各种窗口大小的传统的矢量中值滤波器 VMF 和另外两种典型的矢量滤波器(BVDF 和 DDF)。

参考文献 (References)

- 1 Tsai H H, Yu P T. Adaptive fuzzy hybrid multichannel filters for removal of impulsive noise from color images[J]. *Signal Processing*, 1999, **74**(2): 127 ~ 151.
- 2 Machuca R, Phillips K. Applications of vector fields to image processing[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1983, **5**(3): 316 ~ 329.
- 3 Pitas I, Venetsanopoulos A N. Order statistics in digital image processing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1992, **80**(12): 1893 ~ 1921.

- 4 Astola J, Haavisto P, Neuvo Y. Vector median filters [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1990, **78**(4): 678 ~ 689.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Karakos D G, Trahanias P E. Generalized multichannel image-filtering structures [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, **6**(7): 1038 ~ 1045.
- 8 Karakos D G, Trahanias P E. Combining vector median and vector directional filters: the directional-distance filters [A]. In: *IEEE International Conference on Image Processing [C]*, Washington, DC, USA, 1995, **1**: 171 ~ 174.
- 9 Yan D M, et al. De-noising in color image based on the noise-adjusted principal components analysis and image fusion[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, **8A**(10): 1126 ~ 1130. [闫冬梅等. 基于噪声调节主成分分析法的彩色图像融合滤波[J]. *中国图象图形学报*, 2003, **8A**(10): 1126 ~ 1130].
- 10 Zhang Z L, et al. A chromaticity-information-preserving vector median filter for color image [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2001, **37**(21): 99 ~ 101. [张志龙等. 一种保护彩色图像色度信息的矢量中值滤波器[J]. *计算机工程与应用*, 2001, **37**(21): 99 ~ 101.]
- 11 Shepard R N. Toward a universal law of generalization for psychological science [J]. *Science*, 1987, **237**(4820): 1317 ~ 1323.
- 12 Eskicioglu A M, Fisher-P S. Image quality measures and their performance [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, **43**(12): 2959 ~ 2965.
- 13 Plataniotis K N, Androutsos D, Venetsanopoulos A N. An adaptive nearest neighbor multichannel filter [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, **6**(6): 699 ~ 703.