

文章编号 1004-924X(2007)05-0798-09

改进型距离方向矢量滤波器

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, 湖北 武汉 430074)

摘要:提出了一个基于心理距离的空间距离加权公式,并结合传统的距离方向滤波器(DDF),构造出相应新的基于空间距离加权的自适应距离方向滤波器。实验表明,新的距离方向滤波器在抑制脉冲噪声、保持色调、保护细节或边缘方面,胜过传统的 DDF 和其它几个典型的矢量滤波器,特别是在低污染率的情况下(小于 10%),其归一化均方误差(NMSE)平均减少了 1/3 之多,而其归一化色彩误差(NCD)则减少到原来的 50%以下。

关键词:距离方向滤波器;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

Improved directional-distance filter

JIN Liang-hai, LI De-hua

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

Abstract: Based on psychological distance, a spatial-distance weighting function is presented to quantify the influence of spatial distances on filtering effect. Combining this formula with the traditional Directional-Distance Filter(DDF), a new filter, Adaptive spatial Distance-weighted Directional-distance Filter (ADWDDF), is proposed. The experimental results show that the new filter, compared with the traditional DDF and several other representative vector filters, provides better performance and filtering effect on noise attenuation, chromaticity retention, and edge or detail preservation. In particular, when the contaminated rate is not larger than 10%, the proposed algorithm provides a significant performance improvement with a decrease of about 1/3 in Normalized Mean Square Error(NMSE) and a decrease of more than 50% in Normalized Color Difference(NCD) averagely, compared with the traditional DDF.

Key words: directional-distance filter; spatial distance weighting; impulsive noise; color image; adaptive technique

收稿日期:2006-11-22;修订日期:2007-02-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 69775022);国家高技术研究发展计划资助项目(No. 863-306-ZT04-06-3)

1 引言

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]。彩色图像滤波和去噪的目标就是同时达到削弱噪声,保持色调和保护边缘或细节信息^[2]。彩色图像的滤波技术经历了从标量滤波法到矢量滤波法的发展过程。标量滤波法是对彩色图像的三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三个分量之间的内在联系,容易造成局部不协调的色彩,从而破坏色调和边缘细节信息。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表示为一个三维列矢量,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。

人们对图像去噪的方法做了大量的研究^[4-12]。其中,距离方向滤波器(Directional-distance filter, DDF)^[4],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和色调异常的噪声^[5]。它是另外二种具有代表性、高效的矢量滤波器:矢量中值滤波器(Vector Median Filter, VMF)^[6]和基本矢量方向滤波器(Basic Vector Directional Filter, BVDF)^[7]的一种综合,其特点是同时考虑了矢量的方向(图像的色调)和矢量的长度(图像强度)。由于VMF仅考虑了矢量的长度,没有考虑矢量的方向,所以VMF只是从图像的强度(亮度)方面来考虑噪声,它只能有效地去除强度相差很大的脉冲噪声;而BVDF则相反,仅考虑了矢量的方向,没有考虑矢量的长度,所以BVDF只是从图像的色调方面来考虑噪声,仅能消除色调相差较大的噪声。DDF则不然,它同时考虑了图像的强度和色调,从这两个方面来去除噪声,所以具有非常好的滤波效果。除了上述三个经典的矢量滤波算法外,人们还对噪声进行了大量的研究^[8-12]。例如,文献[8]分析了CCD相机不同噪声的产生原理,并设计了相应的噪声抑制电路和处理电路;文献[9]研究了设备噪声模式的主分量特征表示方法及其应用;文献[10]设计出了一种基于人类视觉感官的自适应距离加权矢量滤波器;文献[11]提出了

L-曲率流滤波器的图像降噪(滤波)算法;文献[12]则给出了一种利用小波变换来消除光谱信号中的噪声和基线干扰的算法。

但是,上面提及的各种文献所记载的滤波器,都没有考虑在滤波器窗口内,像素之间的空间距离对滤波效果的影响。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 到窗口内的其它所有矢量的混合距离和 γ_1, γ_2 非常接近(DDF排序准则),又假设 γ_2 是滤波器窗口内的所有矢量(像素)到其它矢量的混合距离和中的最小值,那么,这时常规的DDF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DDF,构造出了新的基于空间距离加权的自适应距离方向滤波器(Adaptive Spatial Distance-weighted Directional-distance Filter, ADWDDF)。实验表明,新的滤波器ADWDDF明显胜过传统的DDF和其它二个典型的矢量滤波器(VMF、BVDF)。

下面先介绍传统的DDF,再介绍本文建议的基于空间距离加权的ADWDDF的设计原理和方法,最后给出仿真结果和结论。

2 传统的距离方向滤波器 DDF

假设RGB彩色图像大小为 $N_1 \times N_2$,用 x_{ij} ($1 \leq i \leq N_1, 1 \leq j \leq N_2$)表示图像在位置 (i, j) 处的像素,同时也表示该像素对应的矢量,用 r_{ij}, g_{ij}, b_{ij} 表示该像素的R、G、B灰度值,则 $x_{ij} = [r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}]^T$ 。另外,假设滤波器窗口大小为: $(2L_1 + 1) \times (2L_2 + 1)$,将滤波器窗口在图像中滑动,设滤波器窗口中心在图像的位置 (i, j) 处,将窗口 $\Gamma_{(i,j)}$ 内的像素从上到下、从左到右排列,写成:

$$\Gamma_{(i,j)} = \{X_1^{(i,j)}, X_2^{(i,j)}, \dots, X_{(L_1+1)/2}^{(i,j)}, \dots, X_L^{(i,j)}\}, \quad (1)$$
 其中, $L = (2L_1 + 1)(2L_2 + 1)$ 。

于是传统的DDF输出可写成:

$$Y_{(i,j)}^{DDF} = \arg \min_{X_k^{(i,j)}} \left[\sum_{l=1}^L \| X_l^{(i,j)} - X_k^{(i,j)} \|_g \right]^p \times \left[\sum_{l=1}^L \cos^{-1} \left(\frac{[X_l^{(i,j)}]^T X_k^{(i,j)}}{\| X_l^{(i,j)} \|_2 \| X_k^{(i,j)} \|_2} \right) \right]^{1-p}, \quad (0 \leq p \leq 1), \quad (2)$$

其中, $\| \cdot \|_g$ 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。 $[X_l^{(i,j)}]^T$ 表示矢量 $X_l^{(i,j)}$ 的转置。这样, $\| X_l^{(i,j)} - X_k^{(i,j)} \|_g$ 表示了矢量 (像素) $X_l^{(i,j)}$ 和 $X_k^{(i,j)}$ 之间的欧氏距离, 代表这两个像素在强度 (亮度) 上的误差; 而 $\cos^{-1} \left(\frac{[X_l^{(i,j)}]^T X_k^{(i,j)}}{\| X_l^{(i,j)} \|_2 \| X_k^{(i,j)} \|_2} \right)$ 则表示了矢量 (像素) $X_l^{(i,j)}$ 和 $X_k^{(i,j)}$ 的夹角距离, 代表着它们的色调误差。所以公式 (2) 中等号右边的前一项表示了滤波器窗口内的像素 $X_k^{(i,j)}$ 与窗口内的其它所有像素关于强度 (亮度) 的误差和, 而后一项则表示了 $X_k^{(i,j)}$ 与窗口内的其它所有像素关于色调的误差和。所以 DDF 既考虑了图像的强度, 又考虑了图像的色调。

值得说明的是, 公式 (2) 中的参数 p 表示了矢量的模 (图像强度) 和矢量的方向 (图像的色调) 在滤波时的重要性^[4], 当 $p=1$ 时, DDF 实际上就是 VMF; $p=0$ 时, DDF 实际上就是 BVDF。

3 基于空间距离加权的自适应距离方向滤波器 (ADWDDF) 设计

3.1 基本原理

根据文献[13], 图像中像素之间的空间距离与人类心理感觉是一种指数关系。根据这个原理, 本文经过大量的实验, 提出了一个符合人眼视觉感觉的归一化空间距离加权公式:

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

权值 $\omega(r)$ 表示空间距离为 r 的二个像素的相互作用的程度 (注意, $\omega(r)$ 与实际的相互作用的程度相反, 即相互作用越强, $\omega(r)$ 越小; 相互作用越小, $\omega(r)$ 就越大), $0 \leq \omega(r) \leq 1.0$ 。 $k_1, k_2(\omega, d)$ 是两个参数, 用于调节权值的大小和非线性度, 其中 $k_2(\omega, d)$ 是滤波器窗口大小 ω 和噪声分布密度 d 的函数。显然, $\omega(r)$ 应满足如下条件:

① $\omega(r)$ 是一个关于 r 不减函数, 即随着二个像素的空间距离的 r 增大, 它们之间的相互作用就越小, $\omega(r)$ 就越大; ② 当 r 比较小时 $\omega(r)$ 增加较快, 而当 r 较大时 $\omega(r)$ 增加缓慢, 即当二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。

特别地, 若取 k_1 或 $k_2(\omega, d)$ 为 $+\infty$, 则 $\omega(r) = 1$, 这时表示权值 $\omega(r)$ 与距离 r 的远近无关。

图 1 是一个关于 $\omega(r)$ 的示意图。

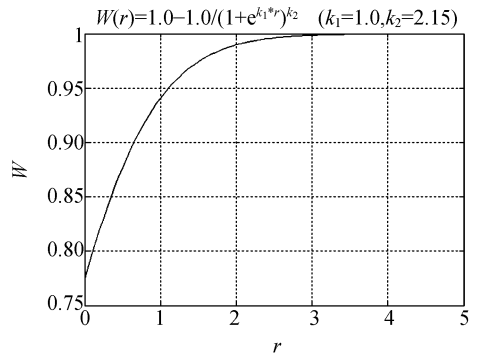


图 1 $\omega(r)$ 的示意图 ($k_1 = 1.0, k_2(\omega, d) = 2.15$)
Fig. 1 Curve of $\omega(r)$ ($k_1 = 1.0, k_2(\omega, d) = 2.15$)

通过把上述加权公式 (3) 引入到公式 (2) 所定义的 DDF 中, 则可构造出本文提出的滤波器 ADWDDF:

$$Y_{(i,j)}^{ADWDDF} = \arg \min_{X_k^{(i,j)}} [\omega(r_{k,(L+1)/2}^{(i,j)})]^2 \times \left[\sum_{l=1}^L \omega(r_{l,k}^{(i,j)}) \| X_l^{(i,j)} - X_k^{(i,j)} \|_2 \right]^p \times \left[\sum_{l=1}^L \omega(r_{l,k}^{(i,j)}) \cos^{-1} \left(\frac{[X_l^{(i,j)}]^T X_k^{(i,j)}}{\| X_l^{(i,j)} \|_2 \| X_k^{(i,j)} \|_2} \right) \right]^{1-p}, \quad (4)$$

其中:

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

在上面公式中, $\omega(r_{p,q}^{(i,j)})$ 表示像素 $X_p^{(i,j)}$ 和 $X_q^{(i,j)}$ 相互影响的程度 ($X_{(L+1)/2}^{(i,j)}$ 对应滤波器窗口的中心样本像素 x_{ij}), 它是这两个像素之间的空间距离 $r_{p,q}^{(i,j)}$ 的函数。设 $X_p^{(i,j)}$ 和 $X_q^{(i,j)}$ 在滤波器窗口中的坐标分别为 (x_p, y_p) 和 (x_q, y_q) , 则: $r_{p,q}^{(i,j)} = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2}$ 。

在公式 (4) 中, 在计算完像素 $X_l^{(i,j)}$ 和 $X_k^{(i,j)}$ 的欧氏距离 $\| X_l^{(i,j)} - X_k^{(i,j)} \|_2$ 和夹角距离 \cos^{-1}

($\frac{[X_l^{(i,j)}]^T X_k^{(i,j)}}{\|X_l^{(i,j)}\|_2 \|X_k^{(i,j)}\|_2}$) 之后,考虑到 $X_l^{(i,j)}$ 和 $X_k^{(i,j)}$ 的空间距离的作用,再对这二种距离进行调整,即进行空间距离加权 $\omega(r_{l,k}^{(i,j)})$ 。因此 $\omega(r_{l,k}^{(i,j)}) \|X_l^{(i,j)} - X_k^{(i,j)}\|_2$ 和 $\omega(r_{l,k}^{(i,j)}) \cos^{-1}(\frac{[X_l^{(i,j)}]^T X_k^{(i,j)}}{\|X_l^{(i,j)}\|_2 \|X_k^{(i,j)}\|_2})$ 分别表示了像素 $X_l^{(i,j)}$ 和 $X_k^{(i,j)}$ 之间的一种加权的欧氏距离和加权的夹角距离,而这二种加权距离都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 $X_k^{(i,j)}$ 到滤波器窗口内其它所有像素的加权欧氏距离和 $\sum_{l=1}^L \omega(r_{l,k}^{(i,j)}) \|X_l^{(i,j)} - X_k^{(i,j)}\|_2$ 、加权夹角距离和 $\sum_{l=1}^L \omega(r_{l,k}^{(i,j)}) \cos^{-1}(\frac{[X_l^{(i,j)}]^T X_k^{(i,j)}}{\|X_l^{(i,j)}\|_2 \|X_k^{(i,j)}\|_2})$ 之后,因为像素 $X_k^{(i,j)}$ 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 $X_k^{(i,j)}$ 对中心像素 $X_{(L+1)/2}^{(i,j)}$ 在空间距离上的作用,于是再对这二种总的加权距离和进行调整(加权) [$\omega(r_{k,(L+1)/2}^{(i,j)})$]²。这样就确保了在滤波器窗口内,即使二个像素具有相同的混合距离和,其中离中心像素较近的像素也将会被优先考虑。

特别地,在由公式(5)计算权值 $\omega(r_{p,q}^{(i,j)})$ 时,若取参数 k_1 或 $k_2(\omega, d)$ 为 $+\infty$,则可以证明,新的 ADWDDF 就等价于传统的 DDF。

3.2 参数的自适应确定

在利用 3.1 节中的公式(5)计算权值 $\omega(r_{p,q}^{(i,j)})$

$$k_2(\omega, d) = \begin{cases} 0.0016067s^5 - 0.042365s^4 + 0.39624s^3 - 1.6306s^2 + 3.9158s + 0.47601, & \omega < (5 \times 5) \\ -0.0048802s^4 + 0.090172s^3 - 0.57946s^2 + 2.1009s + 0.29025, & \omega \geq (5 \times 5) \end{cases}, \quad (6)$$

其中: $s = \max((100d)/5.0, 0.01)$, $0.0 \leq d \leq 0.4$,

因此,根据脉冲噪声的分布密度 d 就能由表 1 确定滤波器窗口大小 ω ,再根据公式(6)就可以计算出参数 $k_2(\omega, d)$ 的值了。

现在的问题是,由于没有关于噪声密度分布的先验知识,因而无法获得噪声的分布密度 d 。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,本文采用如下的方法来粗略地确定脉冲噪声的分布密度 d :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:

时,需要确定二个参数: k_1 或 $k_2(\omega, d)$ 。在本文的实验中,取 $k_1 = 1.0$,这样就只需要确定一个参数 $k_2(\omega, d)$ 。 $k_2(\omega, d)$ 是滤波器窗口大小 ω 和噪声密度 d 的函数。一般地,在不追求最佳滤波效果的情况下,可取 $k_2(\omega, d)$ 为固定值,如 $k_2(\omega, d) = 3.95$ 。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 $k_2(\omega, d)$ 的值。

表 1 脉冲噪声密度 d 与滤波器窗口大小 ω
Tab.1 Suggested window size ω for the noise density d

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

在下面的实验中,仅仅加入 $0\% \sim 40\%$ 的脉冲噪声。为了方便,当噪声密度为 $30\% \sim 40\%$ 时,也取 5×5 大小的滤波窗口(没有按表 1 取 7×7 大小的滤波窗口),即当噪声密度为 $0\% \leq d < 15\%$,使用 3×3 的滤波窗口; $15\% \leq d < 40\%$ 时,使用 5×5 的滤波窗口。

下面提出一个 $k_2(\omega, d)$ 的经验公式:

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

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

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

在公式(7)中, $x_{R(i,j)}$ 、 $x_{G(i,j)}$ 和 $x_{B(i,j)}$ 为图像 (i,j) 处像素的 R、G、B 灰度值。 $X_{R(l)}^{(i,j)}$ 、 $X_{G(l)}^{(i,j)}$ 和 $X_{B(l)}^{(i,j)}$ 代表滤波器窗口 $\Gamma_{(i,j)}$ 的内部位置 l 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 d 。

3.3 ADWDDF 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,根据公式(7~9)来粗略地确定图像中脉冲噪声的分布密度 d , 然后根据表 1 确定将要使用的滤波器窗口的大小 ω , 再根据公式(6)来确定参数 $k_2(\omega, d)$ 的值, 最后根据加权公式(5)计算在滤波器窗口内各种可能的距离所对应的权值; 在第二遍扫描中, 使用所选定大小的滤波器和计算好的权值列表, 按 ADWDDF 的定义(3.1 节)对整个图像进行滤波, 最后就得到了 ADWDDF 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^[14-15]。下面是比较常用的二种方法:

(1) 归一化均方误差 (Normalized Mean Square Error, NMSE)^[14]

$$\text{NMSE} = \frac{\sum_{x=1}^{N_1} \sum_{y=1}^{N_2} \| f(x,y) - \hat{f}(x,y) \|_2^2}{\sum_{x=1}^{N_1} \sum_{y=1}^{N_2} \| f(x,y) \|_2^2}, \quad (10)$$

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源图像在 (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 表示了二个图像在明度 (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)^[15]

为了让二个图像之间的差异符合人类视觉感观, 文献[15]定义了一种在与人类感观一致的均匀颜色空间 (Uniform color space) CIELAB 中的二个图像之间的误差估计 NCD:

$$\text{NCD} = \frac{\sum_{x=1}^{N_1} \sum_{y=1}^{N_2} \| \Delta E_{ab}(x,y) \|_2}{\sum_{x=1}^{N_1} \sum_{y=1}^{N_2} \| E_{ab}^*(x,y) \|_2}, \quad (11)$$

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

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 ADWDDF 的性能, 选用被广泛使用的彩色图像“Lena”(512×512, 24 位 RGB 格式) 作为测试图像。在这个图像中加入各种比例 (0%~40%) 的脉冲噪声 (噪声是由 Matlab 的例程 IMNOISE(1, 'salt & pepper', D) 加入的), 然后使用本文建议的滤波器 ADWDDF 和传统的滤波器 DDF 及另外二个典型的矢量滤波器 (VMF、BVDF) 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 的二种滤波窗口, DDF^[4] 和 ADWDDF 采用参数 $p=0.75$ 。

表 2 和表 3 分别列出了各种滤波器的输出图像关于 NMSE 和 NCD 的详细数据。从这二个表中可以清楚地看出, ADWDDF 的性能是最佳的。当噪声密度比较低时 (<10%), ADWDDF 的性能是非常好的, 当噪声密度不超过 30% 时, ADWDDF 的滤波性能也相当不错, 但当噪声密度很大时 (如 40%), ADWDDF 的性能与 5×5 滤波窗

口的 VMF 和 DDF 基本差不多。

为了直观地观察 ADWDDF 的滤波效果,图 2 显示了加入了 25% 噪声的“Lena”图像及经过各种滤波器滤波后的输出图像。其中,图 2(a)为没有加入噪声的“Lena”源图像,图 2(b)是被 25% 脉冲噪声污染后的“Lena”图像,图 2(c~i)分别是 ADWDDF、3×3 VMF、3×3 BVDF、3×3 DDF、5×5 VMF、5×5 BVDF、5×5 DDF 的输出图像。从图中可以看出,在 3×3 滤波窗口的 VMF、BVDF 和 DDF 的输出图像中明显有一些噪声没有滤掉,而 5×5 滤波窗口的 VMF、BVDF

和 DDF 的输出图像轻微有些模糊或者不如 ADWDDF 光滑,ADWDDF 的滤波效果最好。

为了更直观地观察 ADWDDF 对于“保护边缘或细节”的性能,图 3 显示了在“Lena”图像中加入 25% 的脉冲噪声后,各种滤波器输出的残差图像(即未被噪声污染的图像和滤波后的图像的差),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)。从图中可以明显看出,ADWDDF 在保护“边缘或细节”方面,比其它的各种滤波器具有明显的优势。

表 2 各种滤波器的 NMSE 比较(Lena 图像)

Tab. 2 Comparison of NMSEs for restored "Lena" image

(NMSE)	Window	0%	3%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
ADWDDF	Adaptive	0.000015	0.000911	0.001184	0.002085	0.003303	0.004379	0.005646	0.006850	0.008801	0.011431
DDF	3×3	0.001463	0.001702	0.001889	0.002618	0.004183	0.007438	0.014166	0.025255	0.040370	0.062963
	5×5	0.003002	0.003137	0.003238	0.003723	0.004391	0.005274	0.006419	0.007412	0.009152	0.011622
BVDF	3×3	0.001834	0.002156	0.002470	0.003737	0.007408	0.015528	0.030718	0.053727	0.081920	0.114374
	5×5	0.003519	0.003701	0.003894	0.004662	0.005531	0.006911	0.009315	0.013957	0.025057	0.047136
VMF	3×3	0.001431	0.001677	0.001876	0.002589	0.004083	0.007178	0.013600	0.024295	0.039095	0.061344
	5×5	0.002956	0.003103	0.003212	0.003699	0.004362	0.005271	0.006401	0.007416	0.009170	0.011418

表 3 各种滤波器的 NCD 比较(Lena 图像)

Tab. 3 Comparison of NCDs for restored "Lena" image

(NCD)	Window	0%	3%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
ADWDDF	Adaptive	0.000104	0.008942	0.012669	0.019648	0.022217	0.028228	0.034636	0.040852	0.048083	0.056183
DDF	3×3	0.027863	0.029487	0.030654	0.034005	0.038862	0.047385	0.062168	0.084547	0.115384	0.158710
	5×5	0.036671	0.037439	0.038020	0.039821	0.042279	0.045096	0.048596	0.051910	0.056393	0.062172
BVDF	3×3	0.029142	0.030729	0.031993	0.036033	0.043208	0.056322	0.078791	0.111050	0.152102	0.201021
	5×5	0.037711	0.038454	0.039056	0.041114	0.043580	0.046830	0.051532	0.058276	0.070444	0.091611
VMF	3×3	0.027738	0.029502	0.030717	0.034121	0.038981	0.047383	0.062083	0.084438	0.115733	0.159432
	5×5	0.036511	0.037398	0.038036	0.039960	0.042482	0.045310	0.048850	0.052179	0.056655	0.062318



(a) Noise-free image "Lena"

(b) Corrupted "Lena" with 25%
impulsive noise

(c) ADWDDF



(d) 3×3 VMF



(e) 3×3 BVDF



(f) 3×3 DDF



(g) 5×5 VMF



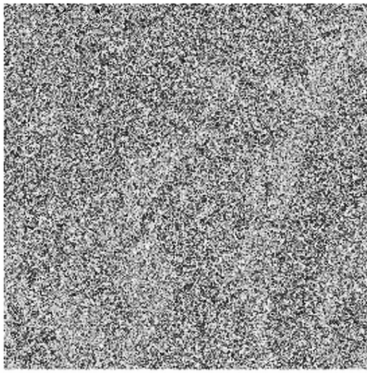
(h) 5×5 BVDF



(i) 5×5 DDF

图 2 各种滤波器的滤波效果

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



(a) Artificial noise(25%)



(b) ADWDDF



(c) 3×3 VMF



(d) 3×3 BVDF



(e) 3×3 DDF



(f) 5×5 VMF



(g) 5×5 BVDF



(h) 5×5 DDF

图 3 各种滤波器的误差图像

Fig. 3 Estimation errors emphasized by a factor of 3.5 related to the test image "Lena" degraded by 25% impulsive noise

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,并结合传统的距离方向滤波器 DDF,构造出相应新的基于空间距离加权的自适应距离方向滤波器 ADWDDF。通过自适应地调整加权公式中的一个参数,能使新的滤波器达到可能最好的滤波效果。实验结果表明,新的 ADWDDF 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 DDF 和其它二个典型的矢量滤波器(VMF、BVDF)。特别是在噪声污染率不太高的情况下($<10\%$),新方法表现出了显

著的性能改善:其归一化均方误差 NMSE 平均减少了 $1/3$,而其归一化色彩误差 NCD 下降到原来的 50% 以下。

参考文献:

- [1] PLATANIOTIS K N, ANDROUTSOS D, VENETSANOPOULOS A N. Vector directional filters: An overview [C]. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. St. John, Canada*, 1997, 1 (1) : 106-109.
- [2] 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.
- [3] PITAS I, VENETSANOPOULOS A N. Order statistics in digital image processing [J]. *IEEE*, 1992, 80 (12) : 1893-1921.
- [4] KARAKOS D G, TRAHANIAS P E. Generalized multichannel image-filtering structures [C]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6 (7) : 1038-1045.
- [5] VARDAVOULIA M I, ANDREADIS I, TSALIDES P. A new vector median filter for color image processing [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2001, 22 : 675-689.
- [6] ASTOLA J, HAAVISTO P, NEUVO Y. Vector median filters [J]. *IEEE*, 1990, 78 (4) : 678-689.
- [7] TRAHANIAS P E, KARAKOS D G, VENETSANOPOULOS A N. Directional processing of color images: theory and experimental results [C]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5 (6) : 868-880.
- [8] 李云飞,司国良,郭永飞. 科学级 CCD 相机的噪声分析及处理技术[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(增): 158-163.
LI Y F, SI G L, GUO Y F. Noise analyzing and processing for scientific grade CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (Supp.) : 158-163. (in Chinese)
- [9] 何清波,冯志华,孔凡让. 设备噪声监测中主分量的特征表示 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14 (6) : 1093-1099.
HE Q B, FENG ZH H, KONG F R. Principle component representations for machine noise monitoring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (6) : 1093-1099. (in Chinese)
- [10] 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, 13 : 8-12.
JIN L H, LI D H, YAO X ZH. An improved adaptive basic vector directional filter [J]. *Comput. Eng. Appl.*, 2006, 13 : 8-12. (in Chinese)
- [11] 周昌雄,于盛林,祖克举. 基于 L-曲率流滤波器的图像降噪算法 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13 (6) : 759-765.
ZHOU CH X, YU SH L, ZU K J. Image denoising algorithm based on L-curvature flow filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (6) : 759-765. (in Chinese)
- [12] 方勇华,孔超,兰天鸽,等. 应用小波变换实现光谱的噪声去除和基线校正 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14 (6) : 1088-1092.
FANG Y H, KONG CH, LAN T G, *et al.*. Denoising and baseline correction of spectrum by wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (6) : 1088-1092. (in Chinese)
- [13] SHEPARD R N. Toward a universal law of generalization for psychological science [J]. *Science*, 1987, 237 : 1317-1323.
- [14] ESKICIOGLU A M, FISHER P S. Image quality measures and their performance [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, 43 (12) : 2959-2965.
- [15] PLATANIOTIS K N, VENETSANOPOULOS A N. *Color Image Processing and Applications* [M]. Berlin : Springer, 2000.

作者简介:金良海(1966—),男,湖北人,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)博士研究生,高级工程师,主要研究方向为图像处理、模式识别和智能系统。E-mail: lhjin518@sina.com
李德华(1946—),男,广东人,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)教授,博士生导师,主要研究方向为人工智能和思维科学。

(本栏目编辑 黄廉卿)