

基于遗传算法的自适应中值-开闭滤波器

谢可夫

(湖南师范大学图像识别与计算机视觉研究所, 长沙 410081)

摘要 提出了一种新的中值-开闭滤波器结构,并以此为基础设计了自适应中值-开闭滤波器。该滤波器由一个中值-开闭滤波器和学习优化模块组成。在学习优化子模块中,应用遗传算法,通过对含噪声的图像样本进行学习,使得该滤波器的结构能根据待滤波的输入图像自动地调整以获得最优的滤波效果。计算机仿真实验表明该滤波器具有非常好的噪声滤除能力和滤波效果。

关键词 图像滤波 中值滤波器 数学形态学 遗传算法 图像降噪

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2004)08-0951-06

The Self-adaptive Median-opening-closing Filter Based on Genetic Algorithm

XIE Ke-fu

(Institute of Image Recognition & Computer Vision, Hunan Normal University, Changsha 410081)

Abstract A new self-adaptive median-opening-closing(MOC) filter is proposed to remove the salt noise of images in this paper. The self-adaptive MOC filter is composed of a MOC filter and a learning optimizing module. In order to achieve the best effect of removing the salt noise, a group of sample images are given to the optimizing module for learning regularity of salt noise and a genetic algorithm is applied to the module to automatically adjust the structure of the MOC filter according to the result of the learning in the optimizing procedure. An optimized structure of MOC filter is generated at the end of the learning and optimizing process and then may be used as an optimized filter in practice for reducing the salt noise in image. Computer simulation experiments are done separately when image contain salt noise of different intensity. The results obtained in the simulation process show that using the self-adaptive MOC filter can achieve good effect of filtering the salt noise of the images compared to use individual median or morphological filter, specially when the image contain more salt noise. How to select parameters about the optimizing process is also discussed in this paper.

Keywords simage filtering, median filter, mathematics morphology, genetic algorithm, image denoising

1 引言

近年来,随着计算机技术的发展和普及,数字图像被普遍使用。然而在数字图像产生、传输和处理的过程中却不可避免地要受到噪声的干扰。噪声对图像的干扰严重地影响了图像的质量,给图像的观测、特征信息的提取和分析等处理过程带来了极大的困难。因而,消除和降低图像中的噪声便成为图像处理领域中持续关注的课题。

椒盐噪声是一类常见的噪声,在灰度图像中椒

盐噪声的灰度值为 $\{0,1\}$ 或 $\{0,255\}$ 。中值滤波器和形态开-闭滤波器是对椒盐噪声滤除效果较好的两类重要的非线性滤波器。

中值滤波器1971年由Tukey提出,其实质为对图像像素的邻域运算,即将待处理像素点的某一邻域内的所有像素按灰度值进行排序,然后取其中间值来替代待处理像素的灰度值。中值滤波器被认为在滤除噪声的同时能较好地保护图像的细节^[1]。但实际上,中值滤波的滤波效果将受到如下两个方面因素的制约:

(1) 噪声强度 q ,例如当椒盐噪声的强度增加

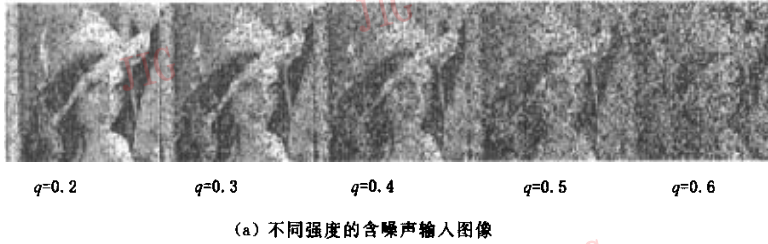
时,滤波效果将变差,如图 1 为噪声强度增加时用邻域模板 dom_1 进行中值滤波的结果;

(2) 邻域模板的大小和形状。如图 2 为噪声强度为 0.3 时用不同的邻域模板进行中值滤波的结果,显然,不同形状的邻域模板将得到不同的滤波效果。

其中,

$$dom_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad dom_2 = \begin{bmatrix} \times & 1 & \times \\ 1 & 1 & 1 \\ \times & 1 & \times \end{bmatrix}$$

此处“1”表示邻域模板中参与灰度排序的元素位置,而“×”位置的元素不参与灰度排序。



(a) 不同强度的含噪声输入图像



(b) 对应(a)中各输入图像的 dom_1 中值滤波结果

图 1 固定邻域模板 dom_1 的中值滤波器对不同强度的噪声图像的滤波结果

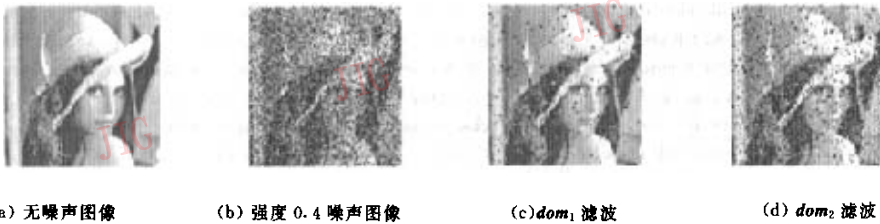


图 2 邻域模板大小和形状的选择对中值滤波效果的影响

形态滤波器由 Serra 在 1988 年提出, Serra 将形态滤波器定义为满足递增性和幂等性的形态算子并将其应用于信号和图像处理领域^[2~4]。目前人们所采用的形态滤波器主要是开、闭滤波器以及它们的各种加权组合。形态开-闭滤波器因可同时抑制尺度小于结构元素 SE 的正、负脉冲噪声而尤其适合于灰度图像中椒盐噪声的滤除,然而其滤波效果的好坏却严重地依赖于结构元素 SE 的形状和大小,如图 3 为用不同的扁平结构元素对受强度为 0.25 的椒盐噪声干扰的灰度图像进行形态开-闭滤波的结果,其中,

$$SE_1 = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad SE_2 = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$



(a) 噪声 ($q=0.25$) (b) SE_1 滤波结果 (c) SE_2 滤波结果

图 3 结构元素的大小和形状对开闭滤波效果的影响

综上所述,单独使用中值滤波器或形态-开闭滤波器,其滤波能力均非常有限,尤其是在噪声强度较大时(例如当椒盐噪声强度大于 0.5 时,无论怎样选取邻域模板,中值滤波的效果均将变差),而且邻域模板和结构元素的大小和形状将严重地影响滤波的效果。显然要取得好的滤波效果,必须根据噪声的强

度自动调整邻域模板或结构元素的大小和形状。但在传统的滤波器设计中, 邻域模板或结构元素的大小和形状的选择却完全凭借设计者的经验。

针对上述问题, 提出一种自适应中值-开闭组合滤波器, 该滤波器可通过对噪声样本图像的学习, 利用遗传算法对其中的邻域模板和结构元素的大小和形状进行自适应调整, 从而获得最优的滤波器结构。通过优化的中值-开闭组合滤波器较单独的中值滤波器或形态开闭滤波器有更好的噪声滤除能力。

2 中值-开闭滤波器

2.1 中值滤波原理

把一组数 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 按数值大小顺序排列为 $x_{i1} \leq x_{i2} \leq x_{i3} \leq \dots \leq x_{in}$, 则其中值为

$$x_M = \text{Med}\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} = \begin{cases} x_{i(\frac{n+1}{2})} & n \text{ 为奇数} \\ \frac{1}{2}[x_{i(\frac{n}{2})} + x_{i(\frac{n+1}{2})}] & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (1)$$

中值滤波的基本原理是把数字图像中一点的值用该点的一个邻域模板中各点值的中值代替。若数集 $\{f(x, y), (x, y) \in Z^2\}$ 表示数字图像, dom 为邻域模板, 则数字图像的二维中值滤波定义为

$$f_{ML}(x, y) = \text{Med}\{x_{x+r, y+s}, (r, s) \in dom, (x, y) \in Z^2\} \quad (2)$$

上式中灰度图像 $f(x, y), (x, y) \in Z^2$ 关于 dom 的中值滤波简记为

$$f_{ML}(x, y) = \text{Med}(f(x, y), dom) \quad (3)$$

2.2 灰度数学形态学基础

设 $f(x), x \in Z^2$ 为定义在 Z^2 上的离散函数, 结构元素 SE 为 Z^2 上的有限子集, SE 关于原点的对称集合为 $SE^S = \{-b : b \in SE\}$, SE 关于点 x 的平移集合为 $SE_x = \{b+x : b \in SE, x \in Z^2\}$, 则 $f(x)$ 关于 SE 的 4 种形态算子定义为

腐蚀 $(f \oplus SE^S)(x) = \max_{b \in SE_x} \{f(b)\} \quad (4)$

膨胀 $(f \ominus SE^S)(x) = \min_{b \in SE_x} \{f(b)\} \quad (5)$

开 $(f \circ SE)(x) = [(f \ominus SE^S) \oplus SE](x) = \max_{a \in SE_x^S} \{ \min_{b \in SE_x} f(b) \} \quad (6)$

闭 $(f \bullet SE)(x) = [(f \oplus SE^S) \ominus SE](x) = \min_{a \in SE_x^S} \{ \max_{b \in SE_x} f(b) \} \quad (7)$

由形态开、闭运算可构成形态开-闭滤波器:

$$OC(f(x), SE) = (f \circ SE \bullet SE)(x) \quad (8)$$

在灰度图像处理中 SE 通常为扁平结构元素, 下文均指此类结构元素。

2.3 中值-开闭滤波器

设 $D = \{dom_1, dom_2, \dots, dom_i, \dots, dom_n\}$, $S = \{SE_1, SE_2, \dots, SE_j, \dots, SE_m\}$ 分别为中值滤波邻域模板集和形态滤波的结构元素集, 则灰度 $f(x), x \in Z^2$ 关于 dom_i, SE_j 的中值-开闭滤波器 $MedOC$ 定义为

$$MedOC_{ij}(f(x)) = OC(\text{Med}(f(x), dom_i), SE_j) \quad (9)$$

3 邻域模板和结构元素的优化

由式(9)可见, 中值-开闭滤波器的滤波效果取决于不同大小、形状的邻域模板和结构元素的组合 (dom - SE 组合)。

3.1 遗传编码

中值-开闭滤波器的每一可能的邻域模板和结构元素的组合表现为一染色体, 每一染色体用一个 18 位的二进制码表示, 高 9 位对应邻域模板 dom_i 的编码, 低 9 位为结构元素 SE_j 的编码。例如 dom_i - SE_j 的编码为

0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

其中, $dom_i = \begin{bmatrix} \times & 1 & \times \\ 1 & 1 & 1 \\ \times & 1 & 1 \end{bmatrix}$

$SE_j = \begin{bmatrix} \cdot & \times & \cdot \\ \times & \cdot & \times \\ \cdot & \times & \cdot \end{bmatrix}$

“1”和“·”分别表示邻域模板和结构元素中的点。

3.2 优化过程的适应度函数

设 $\{I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_N\}$ 和 $\{I_{q1}, I_{q2}, \dots, I_{q_i}, \dots, I_{qN}\}$ 为两组灰度学习样本, 其中 I_i 为第 i 个无噪声干扰的灰度图像, I_{q_i} 为 I_i 加入强度为 q 的椒盐噪声后的含有噪声的图像。 $\{I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{fi}, \dots, I_{fN}\}$ 为 $\{I_{q1}, I_{q2}, \dots, I_{qi}, \dots, I_{qN}\}$ 中对应的图像进行中值-开闭滤波后的输出图像组。由于在计算机中, 灰度以矩阵的形式表示, 所以 I_i, I_{q_i} 和 I_{f_i} 实际上为对应的灰度矩阵。在遗传算法^[5]优化过程中, 当噪声强度为 q 时个体的适应度函数取为

$$f_q = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{k,j} [I_i(k, j) - I_{q_i}(k, j)]^2 - \sum_{k,j} [I_i(k, j) - I_{f_i}(k, j)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

其中, $I_i(k, j)$ 、 $I_q(k, j)$ 和 $I_f(k, j)$ 分别为矩阵 I_i 、 I_q 和 I_f 的第 k 行、第 j 列元素, 当所有的 $I_i = I_f$ 时, 有最大适应度。

3.3 学习样本和优化子程序

优化算法中所用的 5 幅无噪声干扰的灰度图像

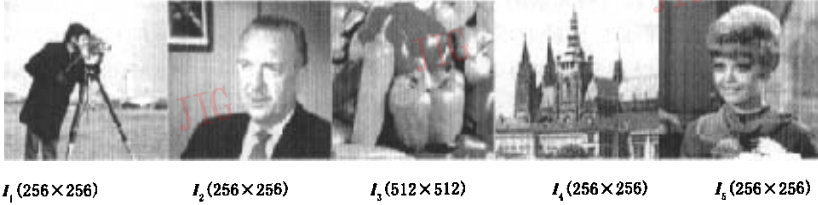


图 4 无噪声学习样本组

具体算法描述如下:

- (1) 输入含椒盐噪声的灰度图像 I , 计算其噪声强度 q 。
- (2) 输入无噪声干扰的灰度图像组 $I_i, i=1, 2, \dots, 5$ 。
- (3) 对每一 $I_i, i=1, 2, \dots, 5$, 加入强度为 q 的椒盐噪声生成图像组 $I_q, i=1, 2, \dots, 5$ 。
- (4) 随机产生 30 个 18 位的二进制数串 $S_j, j=1, 2, \dots, 30$ 作为初始种群。
- (5) 设置进化世代数为 K 。
- (6) 对种群中的每一个体 S_j , 将其转化为对应的 $dom-SE$ 组合, 然后利用该组合对图像组 $I_q, i=1, 2, \dots, 5$, 进行中值-开闭滤波, 输出 30 组滤波结果 $I_q(j) = \{I_{q,j_1}, I_{q,j_2}, I_{q,j_3}, I_{q,j_4}, I_{q,j_5}\}, j=1, 2, \dots, 30$, 并利用灰度图像组 $I_i, i=1, 2, \dots, 5$ 和图像组 $I_q(j)$ 按式(10)计算对应个体 S_j 的适应度。取适应度最大所对应的个体为第 K 代的最优个体, 保存其对应的 $dom-SE$ 组合和适应度, 分别记为 $dom-SE(K)$ 和 $f(K)$ 。

(7) 根据 S_j 的适应度计算每一个体 S_j 的选择概率和累积概率。

(8) 利用轮盘赌选择参与再生繁殖交叉操作的个体, 随机生成交叉位置, 以 0.3 的交叉概率对选择出来的个体按交叉位置随机单点交叉进行再生繁殖。

(9) 对经历交叉后形成的种群的每一个体, 以 0.05 的变异概率在随机生成的位置进行变异操作, 生成新一代种群 $S'_j, j=1, 2, \dots, 30$ 。若达到世代数 K , 则执行下一步, 否则转步骤 6。

(10) 对所有 $f(K)$ 求最大值, 以该最大值所对应的 $dom-SE(K)$ 组合为优化输出 $domBEST-$

$I_i, i=1, 2, \dots, 5$, 如图 4 所示, 另一组用于学习训练的含噪声的灰度图像 $I_q, i=1, 2, \dots, 5$, 由对应的 $I_i(i=1, 2, \dots, 5)$ 加入强度为 q 的椒盐噪声后生成。优化过程在达到预先确定的世代数时结束, 并取所有世代中适应度最大的个体为最后输出的优化个体。

SEBEST.

本优化算法构成子程序 Optimizing, 作为下面的自适应中值-开闭滤波器的学习优化子模块。

3.4 自适应中值-开闭滤波器

基于上述优化子程序的自适应中值-开闭滤波器的结构如图 5 所示。

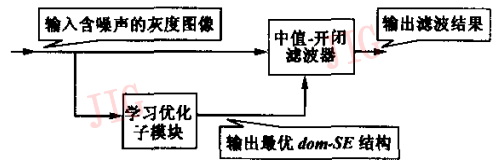


图 5 自适应中值-开闭滤波器结构

4 仿真实验

仿真实验中以 Lena (208×222) 和 Saturn (438×328) 为测试图像, 在加入强度为 $q=0.2, 0.4$ 和 0.5 的椒盐噪声后, 分别用自适应中值-开闭滤波器进行滤波, 输出结果如图 6 和图 7 所示。

在滤波过程中学习优化子模块自适应生成的最优 $dom-SE$ 组合的形状和大小分别为

$$dom-SE_{best0.2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \times & \times & \times \\ \cdot & \cdot & \times \\ \cdot & \cdot & \times \end{bmatrix}$$

$$dom-SE_{best0.4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cdot & \times & \cdot \\ \times & \cdot & \cdot \\ \cdot & \times & \cdot \end{bmatrix}$$

$$dom-SE_{best0.5} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \times & \cdot & \times \\ \cdot & \times & \cdot \end{bmatrix}$$

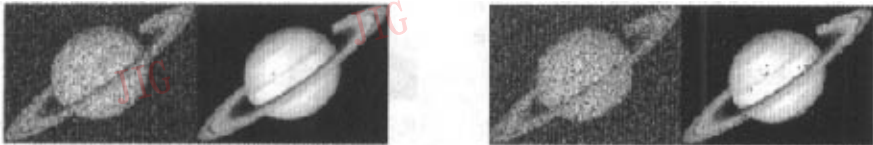


图 6 自适应中值-开闭滤波器滤波结果(Lena)



(a) 无噪声的 Saturn 原始图像

(b) $q=0.2$ 的噪声图像及滤波结果



(c) $q=0.4$ 的噪声图像及滤波结果

(d) $q=0.5$ 的噪声图像及滤波结果

图 7 自适应中值-开闭滤波器滤波结果(Saturn)

比较图 6、图 7 和图 1、图 2、图 3 可见,自适应中值-开闭滤波器有更好的滤波效果,并且能较好地保留图像的细节,尤其在噪声强度较大时。由此表明:该滤波器中的学习优化子模块能够通过含有噪声的样本图像的学习,把握随机噪声的统计规律,自适应地调整优化中值-开闭滤波器中 *dom-SE* 结构的大小和形状。

在优化算法中,基本遗传操作(交叉、变异)的概率由实验确定。在重复进行仿真实验的过程中,通过观察进化过程的收敛情况,发现交叉概率在 0.3、变异概率在 0.05 附近,收敛过程起伏较小。而对于种群大小的设置,主要视染色体编码的长度而定。编码长度为 18 位,种群大小在 [30,40] 之间取值时,进化过程均比较平稳。但考虑到种群的个体较多时,进化

过程中每一世代的计算量增加,使得进化过程的耗时增大,所以设置种群的大小为 30。

在优化算法中,另一个要考虑的问题是进化过程的终止条件。事实上,由于中值滤波和形态开、闭滤波对图像的平滑作用,要通过式(10)所描述的适应度函数取最大值来终止进化过程是不可能的。所以,进化过程只能通过设置固定的迭代次数来终止。为了保证在给定的迭代次数内,优化过程能在相对较短的时间内搜索到适应度尽可能大的个体,进化过程迭代次数可先设置大一点,然后通过对优化过程进化曲线的观察再做适当调整。

图 8 分别为 $q=0.2$ 、0.4 和 0.5 时,用学习优化子模块进行 *dom-SE* 优化时的进化曲线,横坐标为世代数,纵坐标为对应世代的最大适应度。进化世代

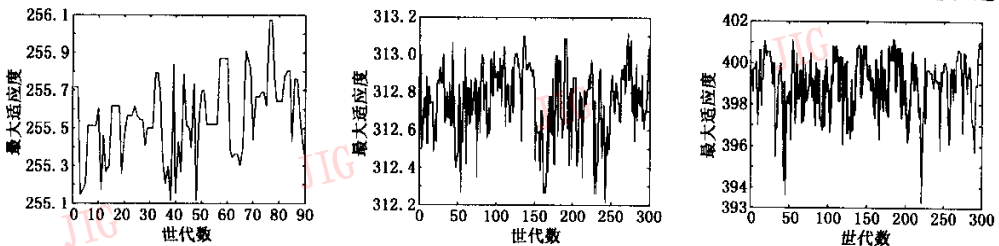


图 8 学习优化子程序对 *dom-SE* 优化时的进化曲线

数分别设置为 $K=90, 300, 300$ 。

由图8可见,当噪声强度分别为0.2、0.4和0.5时,最优个体分别出现在第77、274和273迭代世代。重复不同噪声强度下仿真实验,可获得迭代次数设置的规律。在具体应用中,可在滤波器中,增加一个噪声强度检测算法(对椒盐噪声检测很容易实现),这样就可根据反复实验所得到的规律,自动设置学习迭代次数来终止学习进化过程。

5 结 论

借助遗传算法,通过样本图像的学习对自适应中值-开闭滤波器的 *dom-SE* 组合进行优化选择,使得该滤波器能根据所输入的含有噪声的图像自动地调整 *dom-SE* 组合的形状和大小以保证最优的滤波效果。计算机仿真实验验证了这种自适应中值-开闭滤波器的噪声滤除能力和滤波效果。

参 考 文 献

- 1 Castleman K R. Digital Image Process(影印版)[M]. 北京:清华大学出版社,1998:247~249.
- 2 Serra J. Introduction to mathematical morphology[J]. Image Processing, 1986,35(3):283~305.
- 3 Serra J. Morphological filtering: An overview [J]. Signal Processing, 1994,38(1):3~11.
- 4 Peters, Richard Alan II. New algorithm for image noise reduction using mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995,4(5):554~568
- 5 王小平,曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002:19~67.

谢可夫 1956年生。副教授。1988年毕业于哈尔滨船舶工程学院水声工程专业研究生毕业,现为中南大学自动控制专业在读博士研究生。主要研究方向为信号和图像处理、故障诊断理论和技术等。已发表论文20余篇。



E-mail: kefuxie@hunnu.edu.cn