

堆栈滤波的递归实现

张薇 沈允春 张曙

(哈尔滨工程大学电子工程系, 哈尔滨 150001)

摘要 堆栈滤波器是一类能够有效滤除脉冲类噪声,同时能较好地保护图象边缘与细节的非线性滤波器.它所具有的阈值分解和堆栈两个重要性质保证了滤波过程可以在二进制域并行实现.虽然MAE(平均绝对误差)准则下最优堆栈滤波器可由LMA(最小平均绝对误差)算法给出,但直接推导得到的滤波器仍属于非递归型滤波器.基于此,提出了MAE准则下最优堆栈滤波器的递归实现方法.该方法不仅采取直接递归和最优递归两种方案实现递归,而且后者更好地解决了信号与滤波器的匹配问题.仿真结果表明,尽管二者的边缘细节保护特性相似,但递归滤波器的噪声滤波性能明显优于非递归滤波器,由此可见,递归方法的引入使滤波器的性能得到进一步改善,对于堆栈滤波器的发展有积极意义.

关键词 堆栈滤波 递归滤波 非线性滤波

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)10-0851-06

Recursive Implementation of Stack Filtering

ZHANG Wei, SHEN Yun-chun, ZHANG Shu

(Department of electric engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract As a kind of nonlinear filters, stack filters can suppress impulse noise effectively, and keep edges and details at the same time. Those have two important properties: the threshold decomposition and the stack properties, which ensure that the filtering process go on in binary field parallelly. The optimal stack filters under mean absolute error (MAE) criterion can be developed with least mean absolute error (LMA) algorithm. The filters developed directly are non-recursive filters. Based on the above, the recursive implementation approach of optimal stack filters under MAE criterion are advanced. Two approaches are used: direct recursive approach and optimal recursive approach, the latter resolve the matching between filter and input signals. The result of simulation with computer software illustrate that, the characteristics of noises removing of recursive stack filters are superior to that of non-recursive filters, and the characteristics of edges and details preserving of the former are similar to the latter. So we can conclude that the advanced recursive approaches improve the function of the stack filters, which is meaningful to the advanced study for theory of stack filtering.

Keyword Stack filtering, Recursive filtering, Nonlinear filtering

0 引言

对于脉冲类噪声的滤除,与线性滤波器相比,非线性滤波器具有较好的效果,因此近年来非线性滤波器被广泛应用于图象处理中.堆栈滤波器是最近

十几年发展起来的一种非线性滤波器.由于其具有并行结构,同时主要的滤波工作在二进制域进行,且实现简单,因此具有重要的应用价值.从实现域角度来看,堆栈滤波器可以认为是在二进制域实现某些非线性滤波器的一种方式;从广义上讲,秩排序统计滤波器、加权秩排序统计滤波器、形态滤波器及中值

滤波器等非线性滤波器都属于堆栈滤波器。

由于 MAE 准则下最优堆栈滤波器^[1]在某一时刻的输出仅与该时刻对应的输入序列有关,因此从根本上讲,它也是非递归型滤波器.本文提出了利用直接递归和最优递归两种递归方案来实现对堆栈滤波器的递归.

1 堆栈滤波器结构和算法

1.1 堆栈滤波器的结构

堆栈滤波器具有阈值分解和堆栈两个重要性质.前者建立了非线性滤波器的并行结构;后者则赋予并行结构各层之间一种有效的排序关系,使滤波器实现简单^[2].由以上性质决定的堆栈滤波器结构如图1所示.

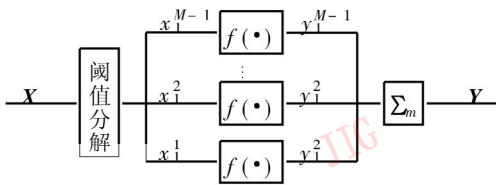


图1 堆栈滤波器结构

设堆栈滤波器的输入 M 值为非负信号矢量 $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_N], X_i \in \{0, 1, \dots, M-1\}$. \mathbf{X} 能够分解成 $M-1$ 个二进制矢量 \mathbf{x}^m , 其中 $m = 1, 2, \dots, M-1$, 为分解层层数. 利用阈值分解函数 T^m , 可将 X_i 分解为^[1,3]

$$x_i^m = T^m(X_i) = \begin{cases} 1 & \text{若 } X_i \geq m \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

且有

$$\mathbf{X} = \sum_{m=1}^{M-1} T^m(\mathbf{X}) = \sum_{m=1}^{M-1} \mathbf{x}^m \quad (2)$$

若 \mathbf{x}^m 分别经各层的二进制滤波器 $f(\cdot)$ 滤波后,得到相应的输出矢量 \mathbf{y}^m , 则十进制域的输出 \mathbf{Y} 为

$$\mathbf{Y} = \sum_{m=1}^{M-1} \mathbf{y}^m \quad (3)$$

公式(1)、(2)、(3)即为堆栈滤波器阈值分解性质的表述.

已知对于任意两个二进制矢量 $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ 和 $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_n]$, 若对于 $a_i \leq b_i$, 其中 $\forall i (i = 1, 2, \dots, n)$, 存在 $\mathbf{a} \leq \mathbf{b}$, 则称 \mathbf{a} 与 \mathbf{b} 之间存在“堆栈”关系; 若用二进制滤波器 $f(\cdot)$ 对 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 进行滤波, 当且仅当 $f(\mathbf{a}) \leq f(\mathbf{b}), \mathbf{a} \leq \mathbf{b}$ 时, 称二进制滤波器 $f(\cdot)$ 拥有堆栈性质. 公式(2)各个二进制矢量信号

的元素之间存在堆栈关系, 即 $\mathbf{x}^{M-1} \leq \dots \leq \mathbf{x}^m \leq \dots \leq \mathbf{x}^1$. 同时, 在堆栈滤波器各层上的二进制滤波器 $f(\cdot)$ 必须是具有堆栈性质的正布尔函数, 以保证堆栈滤波器的堆栈特性. 对任一已给函数集合 $\Phi(\mathbf{x}), \phi_1(\mathbf{x}), \dots, \phi_K(\mathbf{x})$, 可以定义一个分离函数

$$G(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^K W_i \phi_i(\mathbf{x}) - W_{K+1} = \mathbf{W}^T \tilde{\Phi}(\mathbf{x})$$

其中, $\mathbf{W} = [W_1, W_2, \dots, W_K, W_{K+1}]^T$

$$\tilde{\Phi}(\mathbf{x}) = [\phi_1(\mathbf{x}), \phi_2(\mathbf{x}), \dots, \phi_K(\mathbf{x}), -1]^T$$

满足条件: $\phi_i(\mathbf{x})$ 是 \mathbf{x} 的正布尔函数; $W_i \geq 0, i = 1, \dots, K, K+1$. 当且仅当①正布尔函数能被表示为 $f(\mathbf{x}) = U(G(\mathbf{x}))$, 且 $\phi_i(\mathbf{x})$ 用 \mathbf{x} 表示时, 正布尔函数 $f(\cdot)$ 称为线性可分离正布尔函数^[1,4]; ② $\phi_i(\mathbf{x})$ 为非线性函数时, $f(\cdot)$ 称为非线性可分离正布尔函数.

所有的堆栈滤波器可以看作是带有非线性输入的线性可分离函数. 由正布尔函数 $f(\cdot)$ 定义的堆栈滤波器 S_f 如下式所示

$$S_f(\mathbf{X}) = \sum_{m=1}^{M-1} S_f(\mathbf{x}^m) = \sum_{m=1}^{M-1} f(\mathbf{x}^m) \quad (4)$$

式(4)充分体现了堆栈滤波器的阈值分解和堆栈性质.

1.2 LMA 算法

LMA 算法的目的, 就是从所有窗宽为 N 的堆栈滤波器中, 挑选一个能够使滤波器输出与理想信号之间的平均绝对误差最小的滤波器. 设输入过程 $R(j)$ 是被污染的期望过程 $S(j)$ (理想信号), j 表示时域的某一时刻或空域的某一位置. 堆栈滤波器的输出是对期望过程 $S(j)$ 的估计, 用 $\hat{S}(j)$ 表示^[1], 即

$$\hat{S}(j) = S_f(\mathbf{R}(j))$$

其中

$\mathbf{R}(n) = [R(n - N_1), \dots, R(n), \dots, R(n + N_2)]^T$ $N_1 + N_2 + 1 = N, N$ 和 N_1, N_2 是整数. 则平均绝对误差表述为

$$E[|S(j) - S_f(\mathbf{R}(j))|] = \sum_{m=1}^{M-1} E[|s^m(j) - f(\mathbf{r}^m(j))|] = \sum_{m=1}^{M-1} E[|s^m(j) - U(\mathbf{W}^T \tilde{\Phi}(\mathbf{r}^m(j)))|]$$

用线性函数替代单位阶跃函数, 并注意到在二进制域平均绝对误差与均方误差相同, 则估计堆栈滤波器中正布尔函数的问题就等价于估计相应分离函数的正权值, 因而上式可重写为^[1]

$$\sum_{m=1}^{M-1} E | (s^m(j) - \mathbf{W}^T \tilde{\Phi}(\mathbf{r}^m(j)))^2 | = 2 \left| \frac{1}{2} \mathbf{W}^T \mathbf{R} \mathbf{W} - \mathbf{W}^T \mathbf{R}^s + \frac{1}{2} E | s^2(j) | \right|$$

其中

$$\mathbf{R} = \sum_{m=1}^{M-1} E | \tilde{\Phi}(\mathbf{r}^m(j)) \tilde{\Phi}(\mathbf{r}^m(j))^T |$$

$$\mathbf{R}^s = \sum_{m=1}^{M-1} E | s^m(j) \tilde{\Phi}(\mathbf{r}^m(j)) |$$

这与线性 LMS 算法相似, 不同之处在于由 LMA 算法得到的滤波器必须服从堆栈约束, 即必须保证滤波器系数 $W_i \geq 0, i=1, \dots, K, K+1$. 最优解 \mathbf{W}' 的推导由以下 3 个步骤完成:

(1) 置初值 将 $\mathbf{W}(0)$ 中所有权值设置为正有理数, 并为 α 赋一个较小的正值, α 为迭代公差.

(2) 迭代

$$\mathbf{W}(k+1) = P[(I - \mu \mathbf{R}) \mathbf{W}(k) + \mu \mathbf{R}^s] \quad (5)$$

$$0 < \mu < 2/(\lambda_1 + \lambda_{k+1})$$

这里 λ_1 和 λ_{k+1} 分别是矩阵 \mathbf{R} 最小和最大的特征值;

(3) 收敛 如果

$$\sum_{i=1}^{K+1} (W_i(k+1) - W_i(k))^2 \leq \alpha \quad (6)$$

$\mathbf{W}(k+1)$ 即为解; 否则转向步骤(2). 当 $k \rightarrow \infty$ 时, $\mathbf{W}(k+1)$ 将收敛于最优解 \mathbf{W}' . 在步骤(2)中存在投影算子 P , 其定义如下:

如果 $\mathbf{V} = [V_1, V_2, \dots, V_{K+1}]^T$ 是 Z^{K+1} 上的矢量, 那么,

$$P(\mathbf{V}) = [Q(V_1), Q(V_2), \dots, Q(V_{K+1})]^T$$

其中,

$$Q(V_i) = \begin{cases} V_i & V_i \geq 0 \\ 0 & V_i < 0 \end{cases}$$

由此可见, 投影算子 P 保证了最优解的正性^[4].

另外, 根据分离函数和概率函数之间的关系, 有 $P(1 | \mathbf{r}^m) = \mathbf{W}^T \tilde{\Phi}(\mathbf{r}^m)$. 因为不能保证 $P(1 | \mathbf{r}^m)$ 的估计肯定是 1 或者是 0, 所以需用下面的方法估计堆栈滤波器

$$f(\mathbf{r}^m(j)) = \begin{cases} 1 & P(1 | \mathbf{r}^m(j)) \geq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

因此最优解 $\mathbf{W}' = [W'_1, W'_2, \dots, W'_K, W'_{K+1}]^T$ 必须改变为 $\mathbf{W}' = \left| W'_1, W'_2, \dots, W'_K, W'_{K+1} + \frac{1}{2} \right|^T$.

2 两种递归方案

回顾线性 IIR 数字滤波器的基本原理, 滤波器的输出不仅取决于过去的和现在的输入, 而且也取决于过去的输出^[5], 即因为这种滤波器是将过去的部分或全部输出反馈到输入端, 所以称为递归型数字滤波器.

若将这种递归思想引入到堆栈滤波器中, 即用每次滤波后的输出数据替代原有的数据, 那么, 对于一维滤波而言, 其中心位置为 X^i , 窗宽为 N 的滤波窗口则取为

$$[Y_{i-N_1}, \dots, Y_{i-1}, X_i, X_{i+1}, \dots, X_{i+N_2}]$$

其中, $N_1 + N_2 + 1 = N$, 而且窗口内的前 N_1 个观测值就是与各个位置对应的滤波器的输出值. 这说明, 对应于 X_i 的输入 Y_i 不仅由输入值决定, 也由以前的输出值决定. 由于这些输出值是对相应位置理想值的估计, 也比观测值 $X_{i-N_1}, \dots, X_{i-1}$ 更接近于期望值, 因而对于 Y_i 的获得更有帮助. 根据这一基本原理, 我们采用直接递归和最优递归两种方案来实现堆栈滤波器的递归.

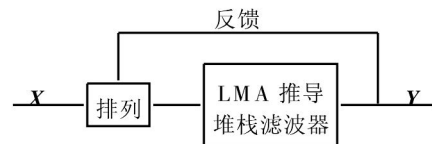


图 2 递归堆栈滤波器模型

2.1 直接递归方案

实现堆栈滤波器的直接递归方案主要包含以下两个方面:

(1) 用于估计 \mathbf{R}^s 和 \mathbf{R} 的期望过程 $\mathbf{S}(j)$ 和输入过程 $\mathbf{R}(j)$, 将分别从原始图象及含噪声图象中获得.

例如, 在二维情况下, 估计 \mathbf{R}^s 和 \mathbf{R} 时, 对应于原始图象中某一象素 $S_{i,j}$, 当需要得到的滤波器窗宽为 $N \times N$ 时, 则噪声图象中选取的相应输入过程为

$$\begin{bmatrix} R_{i-N_1, j-N_1} & \dots & R_{i-N_1, j} & \dots & R_{i-N_1, j+N_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{i, j-N_1} & \dots & R_{i, j} & \dots & R_{i, j+N_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{i+N_1, j-N_1} & \dots & R_{i+N_1, j} & \dots & R_{i+N_1, j+N_1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

一般情况下, 训练样本的选取占整个训练用图象的四分之一. 由此得到 \mathbf{R}^s 和 \mathbf{R} 后, 再利用 LMA 递推

算法得到滤波器的系数 W' 。

(2) 利用上述(1)中推导出的滤波器 W' 对噪声图象进行滤波时,其滤波器输出值直接反馈到滤波器的输入端,取代所对应的噪声图象信号,并作为滤波器输入信号的一部分。

也就是说,在二维滤波情况下,相应于中心位置的 $X_{i,j}$ (噪声图象中 (i,j) 位置象素灰度值),当无反馈存在时,则窗宽为 $N \times N$ 的滤波窗口取为

$$\begin{bmatrix} X_{i-N_1,j-N_1} & \dots & X_{i-N_1,j} & \dots & X_{i-N_1,j+N_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i,j-N_1} & \dots & X_{i,j} & \dots & X_{i,j+N_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i+N_1,j-N_1} & \dots & X_{i+N_1,j} & \dots & X_{i+N_1,j+N_1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $2 \times N_1 + 1 = N$ 。此时滤波器的输出只决定于原始输入信号。当存在反馈时,窗宽为 $N \times N$ 的滤波窗口取为

$$\begin{bmatrix} Y_{i-N_1,j-N_1} & \dots & Y_{i-N_1,j} & \dots & Y_{i-N_1,j+N_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{i,j-N_1} & \dots & Y_{i,j} & \dots & Y_{i,j+N_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i+N_1,j-N_1} & \dots & X_{i+N_1,j} & \dots & X_{i+N_1,j+N_1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

这表明,对应 $X_{i,j}$ 的输出 $Y_{i,j}$,由 $X_{i,j}$ 邻域内 $X_{i,j}$ 位置前的输出及 $X_{i,j}$ 后的输入决定。滤波时,将窗口内的值逐行排成一列,则得到滤波器输入值序列

$$[Y_{i-N_1,j-N_1}, \dots, Y_{i,j-1}, X_{i,j}, X_{i,j+1}, \dots, X_{i+N_1,j+N_1}] \quad (10)$$

通过对式(10)滤波窗口内的值进行计算,则得到 $Y_{i,j}$ 。

当输出 $Y_{i,j}$ 得到后,用 $Y_{i,j}$ 替换相应的 $X_{i,j}$,同时二维窗口向右移动一列,则二维滤波窗口变为

$$\begin{bmatrix} Y_{i-N_1,j-N_1+1} & \dots & Y_{i-N_1,j+1} & \dots & Y_{i-N_1,j+N_1+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{i,j-N_1+1} & \dots & Y_{i,j+1} & \dots & Y_{i,j+N_1+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{i+N_1,j-N_1+1} & \dots & Y_{i+N_1,j+1} & \dots & Y_{i+N_1,j+N_1+1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

此时,对应滤波器的输出为 $Y_{i,j+1}$ 。依此类推进行处理,就可得到滤波后的图象。

这种方法类似于递归中值滤波的实现。由于反馈回输入端的滤波后的信号比原信号更接近理想信号值,因此滤波效果要优于非递归型滤波器。

直接递归方案存在的问题是当输入信号中噪声概率较高时,滤波器与输入信号的匹配较差,因此我

们又提出另一种使滤波器与输入信号更好匹配的方案——最优递归方案。

2.2 最优递归方案

从递归的角度讲,由于滤波器的输入已经改变为公式(6)所表示的形式,因此在本方案中,推导滤波器的算法仍采用 LMA 算法,但对应 R 及 R^* 矩阵的估计则采用改变的输入条件。由于滤波后的估计值未知,因此估计 R 及 R^* 矩阵时,窗口的选取如下

$$\begin{bmatrix} S_{i-N_1,j-N_1} & \dots & S_{i-N_1,j} & \dots & S_{i-N_1,j+N_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{i,j-N_1} & \dots & S_{i,j} & \dots & S_{i,j+N_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{i+N_1,j-N_1} & \dots & S_{i+N_1,j} & \dots & S_{i+N_1,j+N_1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)与式(9)相比,相应滤波器的输出用其理想值 $S_{i,j}$ 替代;与式(7)相比,则更加与滤波器的输入相匹配。因此用式(12)所示窗口选取训练样本,来估计 R 及 R^* 矩阵,将其代入递推算法后得到的滤波器是与输入样本最佳匹配的滤波器,而且该滤波器的输入窗口仍为式(9)所示窗口。

3 递归与非递归堆栈滤波器性能比较

对于加有 10% 和 20% 随机脉冲噪声的 256×256 象素大小,灰度为 256 级的标准 Lady 加噪图象,分别利用 LMA 算法得出其对应 MAE 准则下堆栈滤波器的参数,并对加噪图象进行滤波,然后通过噪声滤波特性和边缘细节保护特性的比较来验证递归与非递归堆栈滤波器的性能。

实验结果如图 3 中(b)~(e)及表 1 所示。实验结果表明,递归方法的引入,使得对图象的去噪效果有了明显的提高,尤其是均方误差明显降低,这表明图象中的脉冲噪声得到了较好的抑制。这个结果从图象中也可以明显看出来。

另外,还用一幅构造的几何图象来说明和比较不同滤波器对处理图象边缘与细节的保护特性。图 4(a)是所构造的几何图象,其中包括直线、直角矩形、圆角矩形、圆和栅状图形。图 4(b)~(e)是加有 10% 随机脉冲噪声的几何图象及递归与非递归堆栈滤波器的滤波结果。

从滤波器对图象的边缘和细节保护特性来看,非递归堆栈滤波器稍优于递归堆栈滤波器,但差别不是十分明显。

表 1 3 种滤波方法的误差比较

滤波方法	噪声概率 $p = 10\%$		噪声概率 $p = 20\%$	
	MAE	MSE	MAE	MSE
非递归堆栈滤波器	0.014 079 8	0.002 427 65	0.022 570 1	0.004 443 46
直接递归堆栈滤波器方案	0.013 873 1	0.001 453 78	0.020 635 2	0.001 895 19
最优递归堆栈滤波器方案	0.013 873 1	0.001 453 78	0.023 930 4	0.002 362 55

加噪图象: Lady. bmp 噪声灰度值: 200 滤波窗口: $N = 3 \times 3$ 训练样本: 左下角 128×128 个像素



(a) Lady 原图象(256× 256)



(b) Lady 加噪图象($p = 20\%$)



(c) 非递归堆栈滤波器

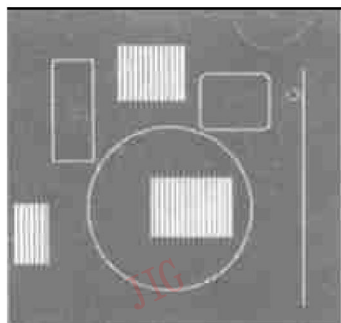


(d) 直接递归滤波方案

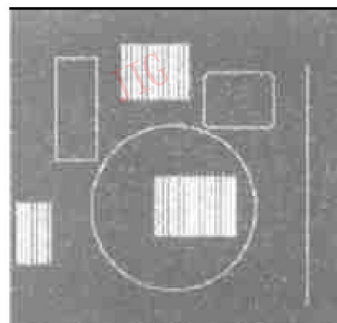


(e) 最优递归滤波方案

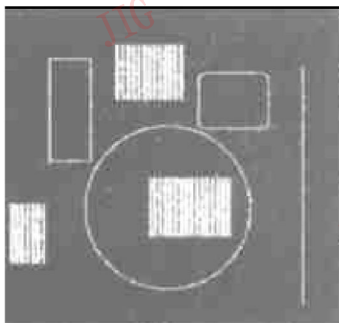
图 3 Lady 图象噪声滤波效果



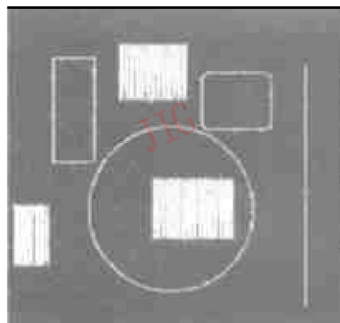
(a) 构造几何图象



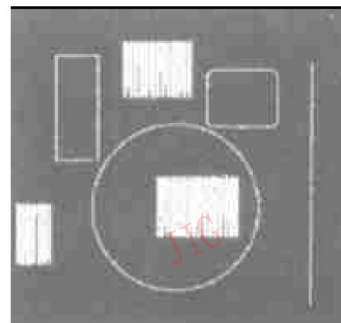
(b) 噪声几何图象($p = 10\%$)



(c) 非递归堆栈滤波器



(d) 直接递归滤波方案



(e) 最优递归滤波方案

图 4 几何图象噪声滤波效果

4 结 论

本文在 LMA 算法基础上, 提出两种递归堆栈滤波方案——直接递归堆栈滤波方案和最优递归堆栈滤波方案. 综合比较 MAE 准则下非递归堆栈滤波器及递归堆栈滤波器的性能发现, 引入递归方法后, 滤波器的噪声滤波特性有了进一步的改善, 脉冲噪声滤除效果明显增强. 而非递归堆栈滤波器滤波后图象中的边缘和细节信息保持得较好, 尤其当图象中噪声概率较高时, 这一优点更为明显.

本文只是对堆栈滤波器递归实现方案的初步探索, 还有很多工作需要进一步的研究, 如递归方法的收敛, 边缘细节保护特性的定性分析, 以及如何提高高噪声概率图象的滤波效果等等.

参 考 文 献

- 1 陈贺新著. 非线性滤波器与数字图象处理. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- 2 Peter D W *et al.* Stack filters. IEEE Transactions On Acoustics, Speech, And Signal Processing, 1986, 3~ 6.

- 3 Lin Yin *et al.* Adaptive stack filtering with application to image processing. IEEE Transactions On Signal Processing, 1993, 166~ 171.
- 4 陈尚勤, 李晓峰. 快速自适应信息处理. 北京: 人民邮电出版社, 1993.
- 5 J Patrick Fitch *etc.* Median filtering by threshold decomposition. IEEE Transactions On Acoustics, Speech, And Signal Processing, 1984, 1183~ 1188.



张 薇 1972 年生, 1994 年、1999 年于哈尔滨工程大学电子工程系获得学士学位、硕士学位, 现为该校电子工程系讲师. 主要研究领域包括信号与信息处理、图象处理等.



张 曙 1967 年毕业于哈尔滨军事工程学院电子工程系, 现为哈尔滨工程大学教授, 博士生导师. 1983 年、1995 年两次赴比利时国立根特大学合作访问. 主要研究领域包括编码、图象信息处理等.

《中国图象图形学报》

征 订 通 知

本刊是由中国图象图形学学会、中国科学院遥感应用研究所、北京应用物理与计算数学研究所共同主办的集计算机图象、图形学术研究与高新技术、科技信息与开发应用于一体的综合性学术期刊. 主要刊登图象分析与处理、计算机视觉与图象理解、多媒体信息融合与处理、计算机图形学、科学计算可视化、虚拟现实、模式识别等学科及其应用方面具有创新性的高水平学术论文、研究报告、专题综述等文章. 报道国际上该领域最新研究成果和国内外有关学术活动. 现已开始 2001 年期刊的征订工作, 请到全国各地邮局进行订购(邮发代号: 82-831), 也可以向本刊编辑部直接订阅(北京市海淀区花园路 6 号《中国图象图形学报》编辑部, 邮编: 100088), 定价: 全年 12 期共 144 元.

欢迎订阅、欢迎投稿