

自适应去噪滤波器组合的训练与设计方法

李睿 章毓晋 谭华春
(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要 该文通过建立噪声信道模型提出一种对噪声自适应的去噪滤波器组合进行训练和设计的方法。通过对训练图像及噪声信道输出图像的有监督训练,建立自适应于噪声的滤波器组合模型,并可在随后的应用中采用该模型对通过噪声信道的图像进行盲滤波达到滤除图像噪声和保留图像细节的目的。为验证设计方法的有效性,采用高斯调制的加权中值滤波器组对信道中常见的椒盐噪声和均匀分布脉冲噪声进行滤除,效果较现有方法有明显优势。该设计方法可以推广应用到其它具有适应性的去噪滤波器之上,使它们对不同强度、不同类型的信道噪声进行更柔性化的处理。

关键词 图像处理, 滤波器设计, 噪声信道, 有监督训练, 加权中值滤波

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)07-1165-04

A Hybrid Filter Training and Design Method for Adaptive Noise Cancellation

Li Rui Zhang Yu-jin Tan Hua-chun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A hybrid filter training and design method for adaptive image noise cancellation with establishing noise channel model is presented in this paper. Trainings are performed with input and output test images for channels of different types and/or different intensities to establish channel-adaptive hybrid filter models. In practice the image transferred through the specific channel is filtered blindly by corresponding model to maintain detail and eliminate noise simultaneously. For certificating the efficiency of this design method, Gaussian weighted median filters are adopted to remove well known channel noise, i.e., pepper and salt noise and uniform distributed impulse noise, in this framework. The results outperform some prior methods markedly. This design method can be generalized to other filters with adaptability to treat different channel noise flexibly.

Key words Image processing, Filter design, Noisy channel, Training, Weighted median filter

1 引言

图像在获取和传输过程中不可避免的受到噪声的影响,设计滤波器去除噪声是图像处理领域经典的研究课题^[1]。本文把噪声污染图像的过程看作图像经过加性噪声信道的过程。前人已经为图像去噪设计了大量的滤波器,这些滤波器的适用范围都有一定的局限性,例如维纳滤波适用于高斯噪声信道,中值滤波适用于椒盐噪声信道,我们希望把这些噪声滤波器结合起来设计对噪声信道具有自适应性的滤波器组合。图1展示了本文滤波器的设计框架,包括训练和盲滤波两个部分。在训练部分利用输入的训练图像以及对应的信道输出训练图像进行有监督训练获得该信道的混合滤波器模型,随后在盲滤波部分利用该滤波器组合模型对该信道所传输的图像进行盲滤波来去除噪声。

本文以信道中常见的椒盐噪声和均匀脉冲噪声以及加权中值滤波器为例说明设计方法,对于其它类型的信道和滤波器可以用类似的方法进行设计。有关加权中值滤波器的详

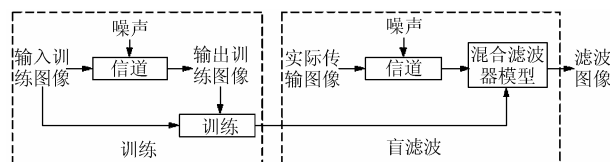


图1 信道训练与盲滤波设计框架

Fig.1 Design framework for channel training and blind filtering
详细介绍可以参见文献[1],文献[2-4]为加权中值滤波器的一些具体应用。我们设计了一系列高斯函数调制的加权中值滤波器,它们分别可以良好地滤除脉冲噪声或保留图像细节。实验表明设计的滤波器性能与已有方法相比主观和客观评价都有比较大的提高。

下文分为4个部分:滤波器训练及设计;高斯调制加权中值滤波器设计;滤波结果与分析;结束语。

2 滤波器训练及设计

设用可去除图像信道噪声的 N 个滤波器 F_1, F_2, \dots, F_N 组成滤波器组,它们分别适用于不同类型、不同强度的噪声去除。因此,可以考虑采用这些滤波器的线性组合针对无法确定的信道进行图像噪声滤除。假设在滤波器组当中滤波器 F_j 对于当前噪声有最好的滤除效果,当线性组合只选择 F_j 作为

2004-11-09 收到, 2005-04-11 改回
教育部高等学校博士学科点专项科研基金(RFDP-20020003011)和国家自然科学基金(60172025)资助课题

输出的话至少可以达到单个滤波器最好的结果，而如果滤波器加权系数选择合适的话，该滤波器组合能比单独使用某个滤波器更好地滤除图像信道噪声。同时，由于信道噪声的随机性，对图像造成的污染也存在空间不均匀性，使用这种滤波器组合可以对噪声图像局部使用不同的加权系数进行自适应滤波，并在滤除噪声的同时保留图像中的细节。这就是本文的主要思路。然而如何在没有任何信道已知条件的情况下根据噪声信道选择加权系数是一个难题。本文希望通过有监督训练的方法在图像的局部特征空间和滤波器加权系数之间建立联系，并利用这种联系设计适应于不同类型、不同强度噪声信道的滤波器组合。

2.1 特征空间的选择

选择好的特征能够较好地地区分类型、大小不同的噪声，以达到适应信道噪声并保留图像细节的目的。实验中应用很多特征进行测试，例如梯度特征、灰度特征和邻域最小灰度差特征等。结果表明对于椒盐噪声或均匀分布脉冲噪声信道应用灰度特征和局部特征的二维特征空间的效果较好。其中灰度特征 $I(x, y) = f(x, y)$, $f(x, y)$ 为图像在 (x, y) 处的灰度；局部特征 $D(x, y) = |f(x, y) - M(x, y)|$, 其中 $M(x, y)$ 为图像在 (x, y) 处的中值滤波结果。由以上的两个特征得到二维特征空间 $I \times D$, I 和 D 分别表示灰度特征空间和局部特征空间, \times 表示笛卡儿积。对于其它噪声信道采用其它的特征空间可能取得更好的训练结果。

2.2 成员函数训练系统

应用通过噪声信道的训练图像进行有监督训练，如图 2 所示，可建立起二维特征空间和不同滤波器行为之间的联系。

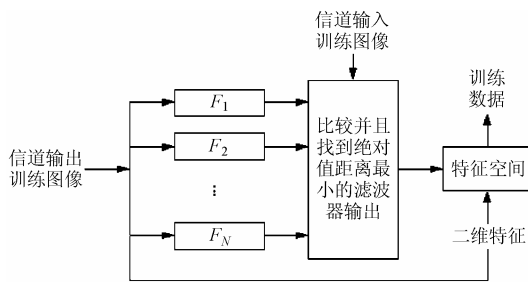


图2 训练系统流程图

Fig.2 Flowchart of training system

把通过噪声信道后的输出训练图像送入到滤波器组中所有的滤波器，每个滤波器的输出都与原始训练图像进行比较，选出结果与原始图像绝对值距离最接近的滤波器，在特征空间中的对应位置上计数。在训练系统中训练图像中的每一个像素都是一个训练样本，对整个图像进行训练之后就得到了特征空间 $I \times D$ 上的训练数据，由于噪声影响的不均匀性，训练可以得到较为全面的噪声描述。

$$Td(i, d) = \{Num_1(i, d), Num_2(i, d), \dots, Num_N(i, d)\} \quad (1)$$

这里特征 i 和 d 分别属于特征空间 I 和 D ，它们的取值范围为 $0 \sim 255$ ； $Num_j(i, d)$ 表示在所有训练数据当中特征为 I

和 d 的训练样本并且应用第 j 个滤波器作为最佳滤波器的个数。于是 $Num_j(i, d)$ 可以看作是自变量在二维空间 $I \times D$ 上的函数，这个函数包括了所有训练样本特征空间和滤波器选择之间的关系，而这个样本空间就代表了信道噪声的不同类型和强度。随后进一步对该二维训练数据如式(2)进行归一化，求得第 j 个滤波器在特征 (i, d) 处作为最佳滤波器所占的比例。

$$\alpha_j(i, d) = \frac{Num_j(i, d)}{\sum_{k=1}^N Num_k(i, d)} \quad (2)$$

考虑到训练数据的离散性本文还对训练数据在特征空间上应用了均值滤波等方法使训练数据变得平滑，并且排除了一些特例情况的出现。如图 3 所示为滤波器组中某滤波器典型训练数据归一化并平滑之后的结果，可以看到随着灰度差 d 的增大该滤波器的使用比例明显降低，可见该滤波器对平滑区域滤波效果较好。

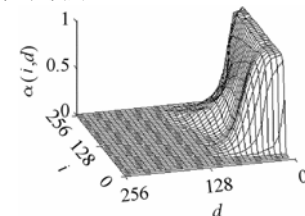


图3 某滤波器典型训练数据

Fig.3 Typical training data for specific filter

2.3 滤波器设计

利用以上训练系统得到的训练数据可以通过计算得出针对于特定噪声信道的滤波器的加权系数，滤波器设计框图如图 4。

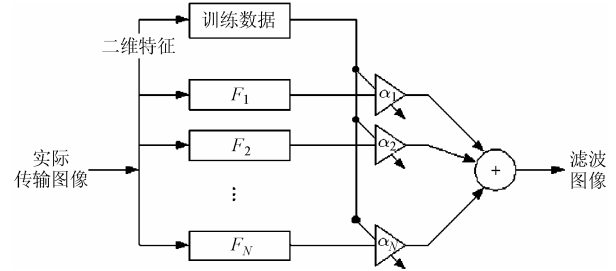


图4 滤波器设计流程图

Fig.4 Flowchart of filter design

滤波器的输出可以由 N 个滤波器的输出 $F_j(x, y)$, $j = 1, \dots, N$ 加权求和决定。

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{j=1}^N \alpha_j(I(x, y), D(x, y)) F_j(x, y) \quad (3)$$

其中 $I(x, y)$ 和 $D(x, y)$ 分别为当前像素的灰度特征和局部特征。

3 高斯调制加权中值滤波器设计

滤波器组 F_1, F_2, \dots, F_N 可以由已知的任何滤波器组成，由于本文所针对的噪声主要是椒盐噪声和均匀分布脉冲噪声，所以提出对这两种噪声滤除效果较好加权中值滤波器，并利用不同方差的 0 均值的二维高斯函数对权值进行调制从而形成滤波器组。

3.1 加权中值滤波器

加权中值滤波器^[1]可以定义为最小化如下函数 Φ 的值 β ,

$$\Phi(\beta) = \sum_{i=1}^N W_i |X_i - \beta| \quad (4)$$

其中 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_N)$ 为输入的时间离散信号序列; $\mathbf{W} = (W_1, W_2, \dots, W_N)$ 为大于 0 的加权系数。由于式(4)为一个分段线性函数, 所以当 β 取到 X_i 中的某个值时 Φ 最小。在实际应用中首先对序列 \mathbf{X} 进行排序, 随后按照 \mathbf{X} 从小到大的顺序对加权系数进行累加, 当累加值跨越 0.5 时对应的信号 X_M 即为加权中值滤波的输出值。为输入信号加入不同的权重使中值滤波器更加柔性化, 在图像处理中应用不同的权重可以更多地保留细节或者滤除噪声。

3.2 高斯调制加权中值滤波器

本文提出一种高斯函数调制的加权中值滤波器, 把二维高斯函数用作加权中值滤波的系数, 即二维加权中值滤波的系数为

$$G(x, y) = G(x)G(y) \quad (5)$$

其中 $G(x)$ 是均值为 0 标准差为 σ 的一维高斯向量, 因为 σ 越大高斯函数越平缓, 所以存在值 σ_B , 当 $\sigma > \sigma_B$, 使 $G(x, y)$ 的所有元素都相等, 加权中值滤波就退化成为中值滤波; 另一方面, 存在值 σ_S , 当 $\sigma < \sigma_S$, 使中心权重 $G(0, 0) > 1/2\Sigma G(x, y)$, 加权中值滤波退化成为直通滤波。对于 5×5 的加权中值滤波器, σ_B 和 σ_S 分别可以取到 0.5 和 1.4。

在具体的加权中值滤波器设计当中, 通过控制 σ 从 σ_S 到 σ_B 变化可得到不同的权重矩阵, 这一系列的加权中值滤波器形成滤波器组。图 5 中展示了这个滤波器组对应不同 σ 的具体表现, 其中加入的噪声为 20% 的椒盐噪声, 滤波器大小为 5×5 , 不同的高斯调制函数方差标注在滤波图像的下方。

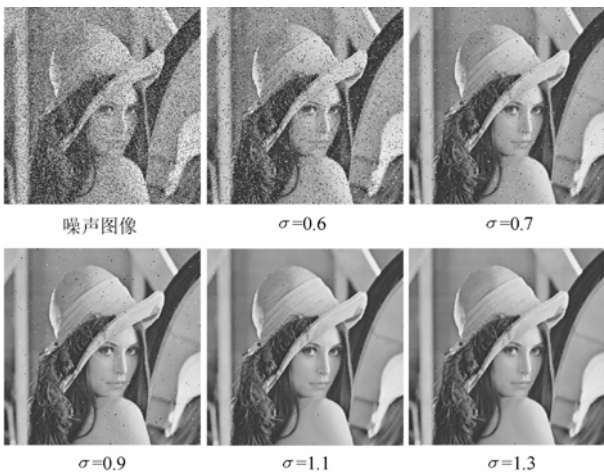


图 5 不同方差的加权中值滤波器滤波效果

Fig.5 Filter result of weighted median filters with different variance

从图 5 中可以看出当 σ 比较小的时候, 图像中噪声比较明显但细节比较丰富, 例如“Lena”图像中帽穗等细节比较丰富的区域得到了比较好的保留; 随着方差 σ 的增加, 更多的

噪声被滤除, 但同时图像的也被模糊。可见该高斯调制的加权中值滤波器组分别适用于不同的噪声强度, 可以作为滤波器组进行线性组合形成对信道自适应的滤波器组合模型。

4 实验结果与分析

实验中利用高斯调制的加权中值滤波器组合模型对不同强度的椒盐噪声信道和均匀分布脉冲噪声信道进行测试。由于“Lena”图像中既有比较平滑的区域也有变化比较剧烈的区域, 可以同时代表这两类典型的图像内容, 所以应用“Lena”图像进行训练得到训练数据并应用 2.3 节中方法设计滤波器后对测试图像“Bridge”, “Baboon”和“Boat”进行滤波以评价滤波效果。图 5 中训练图像和测试图像的大小均为 512×512 。本文实验中所采用的滤波器组为 5×5 的高斯调制加权中值滤波器组, 其高斯调制函数的方差分别为: 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3 和 1.4, 如需加快算法速度可以减少滤波器的数量。

4.1 椒盐噪声信道的滤波结果

椒盐噪声信道以一定的概率在图像中加入亮点或暗点, 图 6 中为通过 20% 椒盐噪声信道的“Boat”图像的滤波结果。图 6(a)为通过噪声信道后的图像; 6(b)为 5×5 的中值滤波器的滤波结果; 6(c)为 5×5 的中心加权滤波器^[5]的滤波结果, 其中心权重为 13; 6(d)为本文滤波方法的滤波结果。

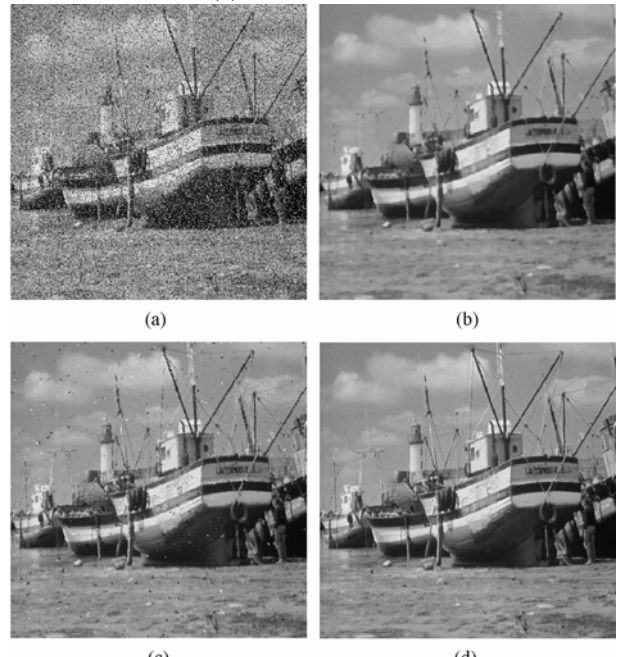


图 6 滤波器对椒盐噪声的滤除作用

Fig.6 Filter effects for pepper and salt noise

测试图像通过 20% 的椒盐噪声信道后, 用本文所设计的滤波器进行滤波表现出了良好的滤波效果。与 5×5 的标准中值滤波器滤波结果进行比较可以看出, 本文算法保留了大量的图像细节, 例如“Boat”图像中帆船上的文字等; 另外相对于保留图像细节比较好的中心加权中值滤波器, 本文滤波器对噪声的滤除作用要好的多, 图像中基本看不到噪声留下的

痕迹。因此从主观评测上本文所设计的滤波器能够在滤除噪声的同时达到保留图像细节的目的,较已有算法有比较大的提高。

图7中为所有测试图像通过不同强度的椒盐噪声信道后用本文滤波器所得滤波图像的平均PSNR与现有滤波器的比较结果。其中中值滤波和中心加权中值滤波的参数如上所述,自适应维纳滤波算法使用 5×5 窗口参见文献[6],模糊中值滤波算法参见文献[7]。从图7比较中可以看出,本文设计的滤波器无论在高强度椒盐噪声信道还是在低强度椒盐噪声信道下的性能都大大优于其它几种滤波器。

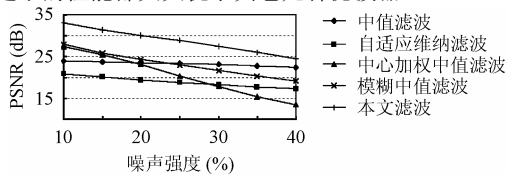


图7 对椒盐噪声的滤波器结果比较

Fig.7 Filter results comparison with pepper and salt noise

4.2 均匀分布脉冲噪声信道滤波结果

与椒盐噪声信道取固定幅度噪声不同,均匀分布脉冲噪声信道以一定的发生概率在图像中加入均匀分布的随机噪声,图8为本文算法对20%均匀分布脉冲噪声的滤波结果,图像中子图的含义与上一部分相同。

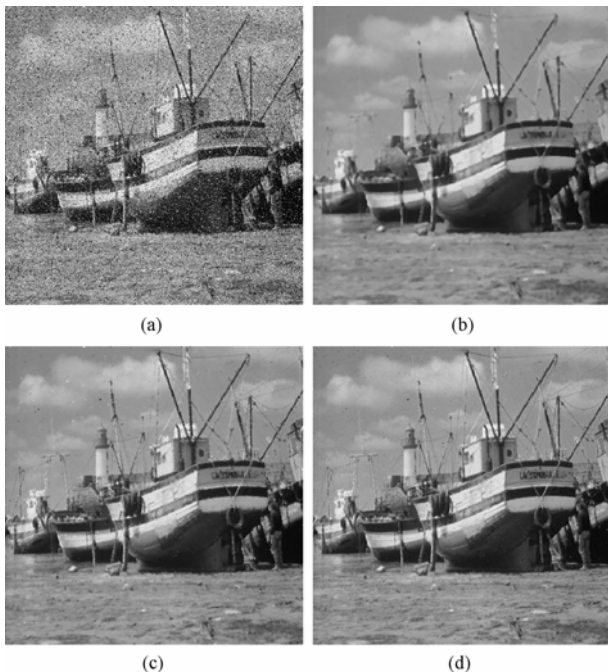


图8 本文滤波器对均匀分布脉冲噪声的滤除作用

Fig.8 Filter effects for uniform distributed impulse noise

从主观视觉上分析,对于均匀分布脉冲噪声信道本文滤波算法与现有算法相比较依然可以得到较好的滤波结果。图9为对通过均匀分布脉冲噪声信道图像滤波结果的平均PSNR(dB),本文算法依然取得了最好的客观评价结果,可以

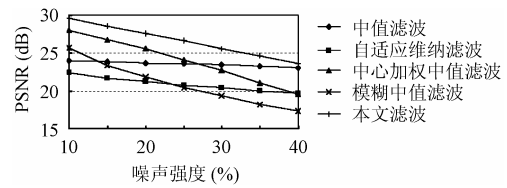


图9 对均匀分布脉冲噪声的滤波器结果比较

Fig.9 Filter results comparison with uniform distributed impulse noise
看出本文滤波器对不同类型的噪声信道有比较强的适应性。

5 结束语

本文提出了一种对不同类型、不同强度噪声信道自适应的去噪滤波器设计方法,它利用滤波器组对不同噪声的适应,用有监督训练的方法得到噪声信道的图像特征与最佳滤波器输出之间的关系,并且利用这个关系设计了能够良好去除信道噪声同时保留图像细节的滤波器组合对通过噪声信道的进行盲滤波。本文以高斯函数调制加权中值滤波器组合滤除椒盐噪声信道和均匀分布脉冲噪声信道噪声为例说明了训练和设计方法,如实验结果所示,滤波器的滤波结果较已有滤波器在图像直观视觉感受和客观图像信噪比上都有很大的改进,并且可以自适应地适用于不同类型、不同强度的噪声信道。

参考文献

- [1] Justusson B J, Huang T S. Two Dimensional Digital Signal Processing II. Berlin: Springer, 1991: 161-196.
- [2] Eng H L, Ma K K. Noise adaptive soft-switching median filter. *IEEE Trans. Image Processing*, 2001, 10(2): 242-251.
- [3] Lee C S, Kuo Y H, Yu P T. Weighted fuzzy mean filters for image processing. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, 89: 157-180.
- [4] Rahman S M, Hasan M K. Wavelet-domain iterative center weighted median filter for image denoising. *Signal Processing*, 2003, 83: 1001-1012.
- [5] Muneyasu M, Nishi N, Hinamoto T. A new adaptive center weighted median filter using counter propagation networks. *Journal of the Franklin Institute*, 2000, 337: 631-639.
- [6] Lim J S. Two-Dimensional Signal and Image Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Press, 1990, chapter 9.
- [7] Arakawa K. Median filter based on fuzzy rules and its application to image restoration. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 77: 3-13.

李睿: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为图像处理。

章毓晋: 男, 1954年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为图像工程。

谭华春: 男, 1975年生, 博士生, 研究方向为图像分析。