

文章编号:1004-4213(2010)09-1712-4

基于双边滤波和双树复小波的图像去噪算法^{*}

曹剑中,周祚峰,唐焱,郭敏,王浩

(中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)

摘要:提出了基于空域双边滤波和双树复小波变换的图像去噪算法.该算法使用双树复小波变换对含噪图像进行多尺度和多方向的分解,对各个高频方向子带使用带有方向窗的局部维纳滤波算法进行去噪.在重构过程中,对每一个尺度上重构得到的低通图像使用空域的双边滤波算法进一步的去噪.实验结果表明本文提出的图像去噪算法获得了明显的去噪性能改善.

关键词:双边滤波;双树复小波;局部维纳滤波;图像去噪

中图分类号:TN911.73

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103909.1712

0 引言

数字图像在生成、存储以及传输等过程中受到设备噪声、周围环境噪声的干扰,图像的质量不可避免的会受到影响.因此,就需要对获得的数字图像进行去噪来改善获取的图像的质量,以利于图像分割和目标识别等图像理解和图像分析后续处理.

图像去噪算法一般可分为空域滤波和变换域滤波两类.早期的图像去噪算法一般是对图像进行空域滤波^[1],常用的空域滤波器包括均值滤波器和空域维纳滤波器等线性空域滤波器,但线性空域滤波算法通常会造出图像中边缘信息的明显模糊.最近,文献[2-3]等提出了双边滤波和中值滤波等非线性空域滤波器,这些非线性滤波器可以比线性滤波器在去除噪声的同时更好的保留图像中的边缘信息.图像的很多特性在空域并不能很好的表现出来.因此,在变换域对数字图像进行滤波处理就成为目前研究的一个热点.目前,图像去噪中常用的变换包括小波变换^[4]、双数复小波变换^[5-6]和 Contourlet 变换^[7-9]等等.这些变换一般都可以提取图像在不同尺度和不同方向上的信息,然后再使用统计建模的方法对变换域的系数进行处理来去除噪声.变换域滤波相比于空域滤波能获得更好的去噪效果,但付出的代价就是计算复杂度的增加.

文献[3]综合考虑了空域滤波和变换域滤波的优点,提出了多分辨率双边滤波图像去噪算法.它将小波变换与双边滤波相结合,除了对小波变换后的高频子带进行阈值处理来去噪之外,还对小波变换

重构过程中的每一个尺度上的低频图像进行双边滤波来更进一步的去除噪声,获得了很好的去噪效果.但文献[3]中使用的二维小波变换不具有平移不变性,且只能提取图像在水平和垂直两个频率方向上的信息.

考虑到双树复小波变换具有近似的平移不变性、低冗余度和能够提取图像在六个频率方向上信息的优点,本文中使用的双树复小波变换代替传统的小波变换,提出了一种基于双边滤波和双树复小波变换的图像去噪算法.对双树复小波分解后各个高频方向子带使用带有方向窗的局部维纳滤波算法进行去噪;对每一个尺度上重构得到的低通图像使用空域的双边滤波算法进一步的去噪.实验结果表明本文提出的图像去噪算法相比于文献[3]的图像去噪算法获得了明显的去噪性能改善.

1 本文提出的算法

假定原始图像被加性的均值为 0,方差为 σ_ϵ^2 的高斯白噪声污染,则含噪图像可以表示为

$$y(i, j) = s(i, j) + \epsilon(i, j) \quad (1)$$

式中 $s(i, j)$ 表示原始图像, $\epsilon(i, j)$ 表示噪声.图像去噪的目的就是尽可能的从含噪图像 $y(i, j)$ 中恢复出原始图像 $s(i, j)$.

图 1 给出了本文提出的图像去噪算法的框图表示,其中 BF (Bilateral Filtering) 表示空域双边滤波, LWF (Local Wiener Filtering) 表示对双树复小

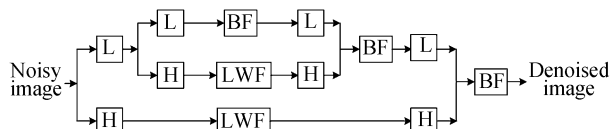


图 1 本文去噪算法框图

Fig. 1 The framework of the proposed image denoising algorithm

^{*} 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”资助

Tel: 029-88887193

Email: zfzhou@opt.ac.cn

收稿日期: 2009-02-05

修回日期: 2009-06-09

波变换后的系数进行局部维纳滤波, L 和 H 分别表示双树复小波变换中使用的低通和高通滤波器。

为了表示方便,这里只对图像进行两层的双树复小波分解.如图 1 所示,对含噪图像使用双树复小波变换进行分解,将会得到一个最低频子带和若干的高频方向子带.由于噪声是白的,其能量大部分集中在高频子带.因此,大部分变换域图像去噪算法都只针对高频子带系数进行滤波处理来达到去除噪声的目的.本文中提出使用方向窗首先对各个高频方向子带的能量分布进行估计,然后使用局部维纳滤波算法来对各个高频方向子带的系数进行滤波.实际上,噪声的能量不全分布在高频子带,在低频子带中也是有残留的.因此,同文献[3]中思想,本文对每一个尺度上的低频重构图像使用空域的双边滤波来进一步的去除噪声.

1.1 双边滤波

双边滤波的概念最初是由 Tomasi^[2] 等人于 1998 年提出的,是一种非线性和非迭代的滤波算法.双边滤波在处理像素邻域内的灰度值时,不仅考虑空间位置上的距离关系,同时也考虑相邻像素灰度值之间的距离关系,通过对二者的非线性组合,自适应的滤波来去除噪声.在空域滤波算法中,双边滤波算法相比于均值滤波等线性滤波算法可以在有效的去除噪声的同时实现对边缘信息的良好保留.

对像素 $x=[i, j]$ 做双边滤波,一种常用且简单的双边滤波器是移不变高斯滤波器,定义为

$$\bar{I}(x) = \frac{1}{C} \sum_{k \in W(x)} \exp\left(-\frac{\|k-x\|^2}{2\sigma_d^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|I(k)-I(x)|^2}{2\sigma_r^2}\right) I(x) \quad (2)$$

式中 $I(x)$ 表示 x 处的灰度值, $W(x)$ 表示以 x 为中心的一个空间邻域, σ_d 和 σ_r 分别是控制空间距离和灰度距离的参数, C 是归一化因子,定义为

$$C = \sum_{k \in W(x)} \exp\left(-\frac{\|k-x\|^2}{2\sigma_d^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|I(k)-I(x)|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (3)$$

1.2 双树复小波变换和局部维纳滤波

文献[3]中使用二维实小波变换对含噪图像进行多尺度分解,对高频子带使用贝叶斯阈值方法进行去噪.但是二维实小波变换有其局限性,例如缺乏平移不变性和有限的方向信息提取能力.严格来说,二维实小波变换只能提取图像在水平和垂直两个频率方向上的信息.针对二维实小波变换的缺点,文献[4]提出了双树复小波变换,它在保留二维小波变换的优点(如多分辨率分析、完全重构性等)的同时,又具备了近似平移不变特性、六个方向上信息的提取能

力、有限的冗余和高效的计算效率等特性.

为了说明双树复小波变换的方向提取能力,本文给出一个例子.图 2 是一幅同心圆图像,它含有任意方向上的信息.图 3 是对图 2 使用双树复小波变换进行分解后一个尺度上的能量分布情况.由图 3 可以看出,双树复小波变换可以有效的提取图像在 $\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 75^\circ$ 六个方向上的信息.有关双树复小波变换的其它特性可以参考文献[4].

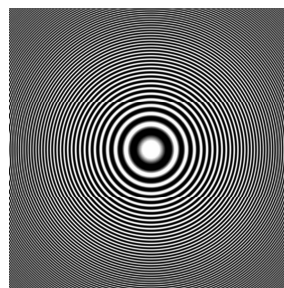


图 2 同心圆图像

Fig. 2 The circle image

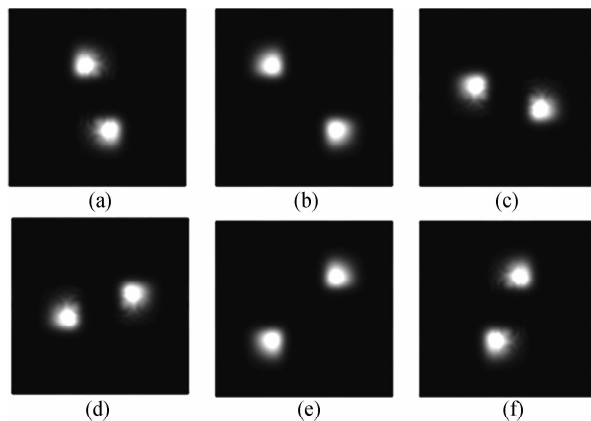


图 3 六个方向上的信息提取

Fig. 3 The information extraction of six directions

为了有效的利用双树复小波提取出来的这六个方向上的信息,本文使用带有方向窗的局部维纳滤波算法对各个高频方向子带的系数进行滤波来去除噪声.局部维纳滤波是一种空间自适应的简单且有效的滤波方法.含噪图像在变换域的局部维纳滤波主要由两部分组成.首先首先每一点信号的方差 $\hat{\sigma}^2(i, j)$ 由以它为中心的一个窗中的所有变换域系数的平均得到,即

$$\hat{\sigma}^2(i, j) = \left(\frac{1}{\#W} \sum_{(p, q) \in W} \tilde{y}^2(i+p, j+q) - \sigma_e^2 \right)_+ \quad (4)$$

式中 $(x)_+ \equiv \max(0, x)$, W 和 $\#W$ 分别代表方向窗和窗中点的个数, $\tilde{y}(i, j)$ 是含噪图像经过双树复小波变换后高频方向子带中的系数.接着通过对含噪图像变换域系数的局部维纳滤波来估计原始图像的变换域系数,即

$$\hat{s}(i, j) = \frac{\hat{\sigma}^2(i, j)}{\hat{\sigma}^2(i, j) + \sigma_e^2} \tilde{y}(i, j) \quad (5)$$

局部维纳滤波中最关键的就是对信号的方差的

估计. 本文使用带有方向性的窗函数内所有值的平均来估计信号的方差, 方向窗的方向选取为匹配于双树复小波变换的频率提取方向. 相比于矩形窗等窗函数方向窗可以更准确的估计信号的方差. 本文中方向窗定义为

$$W(r, a, \theta) = \left\{ (m, n) : \left(\frac{\sin^2 \theta}{a^2} + a^2 \cos^2 \theta \right) m^2 + \frac{a^4 - 1}{a^2} \sin 2\theta mn + \left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + a^2 \sin^2 \theta \right) n^2 \leq r^2 \right\} \quad (6)$$

式中 $r, a \geq 0$ 控制方向窗的大小和形状, $\theta \in [-\pi, \pi]$ 决定方向窗的方向. 图 4 中给出了匹配于图 3 所示的六个高频方向子带的方向窗.

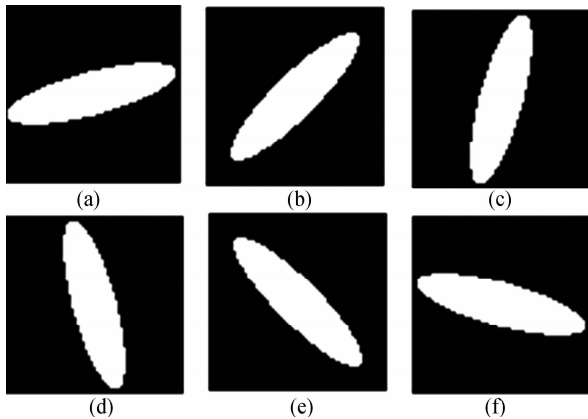


图 4 匹配于图 3(a)~(f) 的六个方向窗

Fig. 4 The six directional windows corresponding to Fig. 3(a)~(f)

2 实验结果

实验中选用标准的 512×512 大小的灰度图像 "Lena", "Barbara", "Boat" 和 "House" 进行仿真来验证本文去噪算法的有效性. 实验中对仿真图像进行四层的下采样双树复小波分解, 边界采用对称延拓方式. 双边滤波算法中的参数选取同文献[3], 窗取为 3×3 的矩形窗. 双树复小波分解中采用近似对称的长度为 13 的双正交滤波器和 $1/4$ 采样平移的长度为 6 的正交滤波器对图像进行分解. 在局部维纳滤波算法中, 方向窗的参数从最细到最粗子带依次选取为 $r = 4, 3, 3, 2$ 和 $a = 1.5$. 仿真实验表明方向窗参数的变化对最终去噪效果影响不大. 噪声的方差是采用常用的绝对中值估计子进行估计. 考虑到噪声样本的随机性, 对每一个输入信噪比, 输出的峰值信噪比表示取 20 次噪声样本下的输出峰值信噪比的平均值. 表 1 给出了不同噪声标准差情况下本文算法和其它使用双边滤波算法的去噪效果比较.

表 1 不同噪声标准差情况下, 本文算法与其他算法的比较
Table 1 Comparison of different denoising algorithms under different noise standard deviation

Reference	Lena			Boat		
	10	20	30	10	20	30
BF ^[2]	33.65	30.33	28.54	32.02	28.40	26.57
MBF ^[3]	34.48	31.28	29.33	32.58	29.25	27.24
DBF	34.97	31.72	29.76	32.76	29.25	27.15
Reference	Barbara			House		
	10	20	30	10	20	30
BF ^[2]	31.37	27.02	24.69	33.77	29.63	28.11
MBF ^[3]	31.79	27.74	25.61	34.62	31.37	29.24
DBF	33.06	28.53	26.08	35.04	31.63	29.31

由表 1 可以看出, 对于 "Boat" 图像, 本文算法的去噪效果和文献[3]算法的去噪效果相当, 但要优于文献[2]的去噪效果. 对于其它三幅测试图像, 本文算法的去噪效果都要明显的优于文献[2-3]算法, 峰值信噪比相比于文献[3]提高了有 0.4 dB 左右, 获得了明显的去噪性能改善. 但由于采用了下采样的双树复小波变换, 本文算法的计算复杂度是文献[3]算法的两倍.

3 结论

本文将双边滤波和双树复小波变换相结合, 使用双树复小波变换对含噪图像进行多尺度和多方向的分解, 对各个高频方向子带使用带有方向窗的局部维纳滤波算法进行去噪. 在重构过程中, 对每一个尺度上重构得到的低通图像使用空域的双边滤波算法进一步的去除噪声. 实验结果表明本文提出的图像去噪算法获得了明显的去噪性能改善.

参考文献

- [1] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S. Digital image processing[M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [2] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]. *Proceeding of International Conference on Computer Vision*, 1998: 839-846.
- [3] ZHANG Ming, GUNTURK B K. Multi-resolution bilateral filtering for image denoising [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2008, **17**(12): 2324-2333.
- [4] SHUI P L. Image denoising algorithm via doubly local Wiener filtering with directional windows in wavelet domain[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, **12**(10): 681-684.
- [5] SELESNICK I W, BARANIUK R G, KINGSBURY N G. The dual-tree complex wavelet transform [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, **22**(6): 123-151.
- [6] LUO Peng, GAO Xie-ping. Image denoising algorithm based on dual tree complex wavelet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 604-608.
罗鹏, 高协平. 基于双树复小波变换的图像去噪方法[J]. 光子学报, 2008, **37**(3): 604-608.

- [7] DO M N, VETTERLI M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2005, **14**(12):2091-2106.
- [8] ZHANG Qiang, GUO Bao-long. Fusion of multifocus images based on nonsubsampling contourlet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4):838-843.
张强,郭宝龙.一种基于非下采样 Contourlet 变换的多聚焦图像融合方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4):838-843.
- [9] LIU Sheng-peng, FANG Yong. A contourlet domain image denoising method based on mathematical morphology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1):197-201.
刘盛鹏,方勇.基于数学形态学的 Contourlet 变换图像降噪方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1):197-201.

Image Denoising Algorithm Based on Bilateral Filtering and Dual-Tree Complex Wavelet

CAO Jian-zhong, ZHOU Zuo-feng, TANG Yao, GUO Min, WANG Hao

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: An image denoising algorithm based on bilateral filtering and dual-tree complex wavelet transform is proposed. The noisy image is decomposed into multi-scale and multi-directional subbands by dual-tree complex wavelet transform, and each high-pass directional subband is denoised by local Wiener filtering with directional windows. During the reconstruction, each low-pass constructed image is further denoised by the bilateral filtering in spatial domain. The experiment results show that the proposed image denoising algorithm achieves significant improvement of denoising performance.

Key words: Bilateral filtering; Dual-tree complex wavelet; Local Wiener filtering; Image denoising



CAO Jian-zhong was born in 1969. He received the M. S. degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, in 1994. Now he is a researcher and his research interests focus on image processing and optics system.