

文章编号 1004-924X(2007)04-0582-05

基于小波变换的正则化盲图像复原算法

江 洁, 邓 琼, 张广军

(北京航空航天大学 仪器与光电工程学院, 北京 100083)

摘要:提出了一种将小波变换和自适应正则化方法相结合的盲图像复原算法。该算法先对退化后的图像进行小波分解, 得到图像在不同子频段的信息; 然后针对各个子频段内图像的频率和方向特性, 使用不同的自适应正则化复原方法, 在图像的低频段进行去模糊; 高频子频段则进行抑制噪声和保边缘特征; 最后通过小波逆变换得到复原后的图像。实验结果表明, MSE 减少了 1.60, 信噪比增量为 1.76, 算法性能和复原效果相对空间自适应正则化方法, 都有一定的提高。

关键词:盲图像复原; 小波变换; 正则化

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Regularization algorithm for blind image restoration based on wavelet transform

JIANG Jie, DENG Qiong, ZHANG Guang-Jun

(School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering,
Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: A wavelet based adaptive regularization scheme for blind image restoration is presented. The degraded image is decomposed to obtain its wavelet coefficients in wavelet domain, and the image's different frequency sub-bands are obtained also. Then, different adaptive regularization image restoration schemes are used in different sub-bands: removing blur in the low frequency sub-bands, while reducing noise and preserving edges in the high frequency sub-bands, and the algorithm finally obtains a restored image by adverse transforming. The experiments show that the MSE has a reduction of 1.60, while the SNR is increased by 1.76. It demonstrates that the blind image restoration method is more efficient compared with traditional space-adaptive regularization method.

Key words: blind image restoration; wavelet transform; regularization

1 引 言

图像生成和传输的过程中, 各种不利因素, 均

可引起图像质量退化, 如物体与摄像机之间的相对运动、大气湍流和散焦等, 都可能使所得到的图像模糊, 同时噪声对图像质量也会产生严重影响^[1]。图像复原的目的就是从所得到的退化图

像,去除退化因素,以最大的保真度恢复原图像。

当退化过程的点扩散函数(PSF)未知时(如湍流退化图像),从观测到的退化图像同时估计出原始图像和模糊因子的过程称为盲图像复原。目前已存在的盲图像复原方法主要有 Ayers 和 Dainty 提出的迭代盲反卷积(IBD)算法、McCallum 提出的模拟退火方法(SA)、ARMA 参数模型方法以及 Deepa Kundur 提出的非负支撑域递归滤波(NAS-RIF)方法。IBD 算法由于其具有较低的计算复杂度而被广泛使用,但算法的收敛性和唯一性不确定;SA 算法具有可靠性而且在有噪声的情况下也能得出合理的结果,但收敛到代价函数全局最小的速度太慢;ARMA 模型并不总是能正确模拟图像和 PSF,而且会导致图像边缘的平滑和振铃效应;NAS-RIF 算法对噪声十分敏感,在低信噪比情况下不能得到满意的结果。

近年来,小波理论成为图像处理的一个重要工具。因为信号的小波变换具有多分辨率和时频局部变化特性,所以基于小波变换的图像多尺度复原方法的研究引起不少学者的重视^[2-3]。将小波变换和自适应正则化方法相结合,实现盲图像复原,是本文的主要贡献。主要思路是通过小波分解得到图像的低频分量和各个高频分量,针对不同子频段的不同特性,分别选用不同的自适应正则化复原方法,提高复原效果。

2 图像退化模型

通常,图像的退化模型可以用图 1 所示线性移不变模型描述:

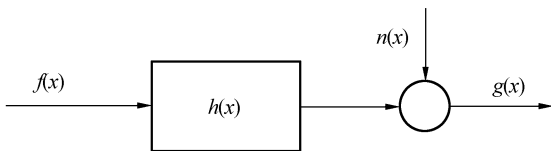


图 1 一般图像退化模型

Fig. 1 Degrading model of images

用数学解析式表示为:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y) \quad (x, y) \in \Omega, \quad (1)$$

其中, $\Omega \subset R^2$ 是图像的集, $f(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 和 $n(x, y)$ 分别表示原图像、退化模型(点扩展函数)、退化图像和加性噪声, $*$ 表示卷积运算。

为了简化模型,忽略噪声 $n(x, y)$,则式(1)可以为:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) \quad (x, y) \in \Omega. \quad (2)$$

对于盲图像复原,本算法的目的就是在 $h(x, y)$ 未知的情况下,从 $g(x, y)$ 中同时估计 $f(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 。

3 空间自适应正则化盲复原算法

正则化方法是近年来处理“盲”问题的一种有效的方法,有学者结合其在图像盲复原中的应用,提出了空间自适应正则化的图像复原思想^[1],即在一定的约束条件下,最小化一个含正则化项的代价函数,得到复原后图像灰度值矩阵。

自适应正则化项的选取直接关系到算法的性能优劣。结合图像退化和盲图像复原的机理,本文提出一种新的空间自适应正则化的模糊过程辨识方法,在条件下,最小化代价函数:

$$\hat{h}(x, y) \geq 0, \quad (3)$$

$$\sum_{(x, y) \in D} \hat{h}(x, y) = 1, \quad (4)$$

$$0 \leq \min \hat{f}(x, y) \leq \max \hat{f}(x, y) \leq \infty, \quad (5)$$

$$L(\hat{h}, \hat{f}) = 0.5 \sum_{x, y \in \Omega} \omega_1(x) [g(x, y) - \hat{h}(x, y) * \hat{f}(x, y)]^2 + 0.5 * \lambda \sum_{x \in \Omega} \omega_2(x) [c(x) * \hat{f}(x, y)]^2 + 0.5 * \gamma \sum_{x, y \in D} \omega_3(x) [d(x) * \hat{h}(x, y)]^2, \quad (6)$$

其中 $g(x, y)$ 为退化后的图像, $\hat{f}(x, y)$ 为真实图像的估计, $\hat{h}(x, y)$ 是退化的点扩展函数的估计。 $c(x)$ 是估计 $\hat{f}(x, y)$ 的正则化算子,通常为高通滤波,算法中选用 3×3 的拉普拉斯算子。 $d(x)$ 是估计 $\hat{h}(x, y)$ 的正则化算子,算法中选用平滑算子。 λ 和 γ 是正则化参数,用来控制估计图像 $\hat{f}(x, y)$ 与观测图像 $g(x, y)$ 之间的逼近程度,以及对 $\hat{f}(x, y)$ 和 $\hat{h}(x, y)$ 进行平滑的程度。 $\omega_1(x)$ 、 $\omega_2(x)$ 和 $\omega_3(x)$ 为权值矩阵。

算法对 $\hat{h}(x, y)$ 和 $\hat{f}(x, y)$ 分别采用式(3)、(4)和(5)的约束:成像系统是一个能量守恒系统;图像的灰度值为非负的,且灰度值通常限制在一定的范围内,这里选定 $0 \leq \hat{f}(x, y) \leq 255$ 。

空域的自适应正则化方法,就是通过对复原

图像与点扩展函数的迭代,使得式(6)中代价函数最小,从而实现对退化图像的复原。实验结果表明,其不失为一种有效的盲复原方法,但仍有对噪声敏感、计算量大、收敛速度慢等缺点。另外,算法中涉及的参数较多,很难针对图像的特点设定不同的参数,复原结果有一定的局限性。

4 基于小波变换的正则化盲复原算法

4.1 算法基本原理

小波变换具有多分辨率和时频局部化特性,将其应用到图像复原中来,可以对图像的低频分量和各个高频分量分别进行处理,以改善图像的复原效果。

通过小波变换,退化图像被分解成低频子频段 LL,和 3 个高频子频段:水平方向高频垂直方向低子频段 HL,垂直方向高频水平方向低子频段 LH 和对角方向高频子频段 HH,记为 $g_{ll}, g_{hl}, g_{lh}, g_{hh}$ 。

图 2 给出了基于小波变换的正则化图像复原

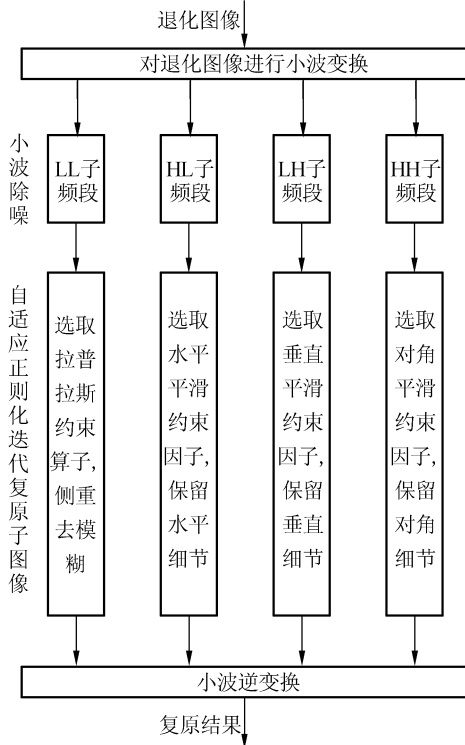


图 2 基于小波变换的正则化图像复原原理框图

Fig. 2 Regularization algorithm for image restoration based on wavelet

的原理框图:如图 2 所示,对分解后的四个子频段图像,算法设定不同的自适应正则化迭代复原过程,在低频侧重去模糊,高频侧重抑制噪声和保持细节。在正则化迭代之前,加入小波除噪的过程,克服了自适应正则化方法对噪声敏感的缺点;算法实现过程中,参与迭代的是小波分解后的子图像,能在一定程度上减少计算量,保证算法的收敛速度。

4.2 参数选择

图像进行小波分解后,对图像的复原变成了四个独立的收敛问题。针对图像的不同特点选择参数,成为影响算法性能和效果的关键。若参数选择不合适,轻则使算法收敛速度变慢,复原效果变差,重则可能导致算法不收敛。本算法中有较多参数,主要是正则化参数和正则化算子。

4.2.1 正则化算子

经小波分解后,图像的主要能量分布在 LL 带,它的水平、垂直和交叉方向的高频分量分别在 HL、LH 和 HH 带中。因此在图像恢复的过程中,在低频子频段着重去模糊,在高频子频段则更强调去噪声和保高频细节。LL 子频段更接近图像的真实信息,所以用一个高通滤波作为正则化算子,本文选用 3×3 的拉普拉斯算子,即

$$c_{ll} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}。 \text{考虑到 HL 和 LH 分别保有}$$

图像的垂直边界和水平方向的边界,本文分别选定垂直和水平方向的平滑因子作为正则化算子,即 $c_{hl} = [-1 \ 2 \ -1]^T$, $c_{lh} = [-1 \ 2 \ -1]$ 。考虑到 HH 子频段对图像主观视觉效果影响不大,取其对正则化算子为 0,即在对 HH 子频段进行恢复的时候,不考虑对原图像的约束。对于点扩展函数,其正则化算子取为 $d_{ll} = d_{hl} = d_{lh} = d_{hh} = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ 。

4.2.2 正则化参数

在正则化参数的选定上,采用文献[4]给出的方法。它们之间的数量级关系按式(7)确定:

$$\frac{\gamma}{\lambda} = \sum_{(x,y) \in \Omega} \hat{f}(x,y) \max_{(x,y) \in \Omega} \hat{f}(x,y), \quad (7)$$

确定数量级后, γ 与 λ 的实际大小根据退化图像来确定。

4.3 代价函数的优化

算法采用交替迭代算法,来最小化式(6)所示 $L(\hat{h}, \hat{f})$, 迭代过程说明如下:

为了使 $L(\hat{h}, \hat{f})$ 最小, 分别对 $\hat{f}(x, y)$ 和 $\hat{h}(x, y)$ 求偏导并令其为零, 则有:

$$\frac{\partial L(h, f)}{\partial f} = -h^T \omega_1 g + h^T \omega_1 h f + \lambda c^T \omega_2 c f = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial L(h, f)}{\partial h} = -f^T \omega_1 g + f^T \omega_1 f h + \gamma d^T \omega_3 d h = 0, \quad (9)$$

移项变形为:

$$(h^T \omega_1 h + \lambda c^T \omega_2 c) f = h^T \omega_1 g, \quad (10)$$

$$(f^T \omega_1 f + \gamma d^T \omega_3 d) h = f^T \omega_1 g, \quad (11)$$

采用共轭梯度法^[5-6]对式(10)中形如 $Ax = b$ 的方程寻求最优解。搜索的步长和方向如式(12)。每次迭代中都对梯度 p^k 和步长 β^k 进行修正, 以保证迭代向收敛的方向进行, 得到迭代公式为:

$$f^{k+1} = f^k + \beta_j^k (h^T \omega_1 g - (h^T \omega_1 h + \lambda c^T \omega_2 c) f^k), \quad (12)$$

$$h^{k+1} = h^k + \beta_h^k (f^T \omega_1 g - (f^T \omega_1 f + \gamma d^T \omega_3 d) h^k), \quad (13)$$

整个迭代过程, 使用共轭梯度法解线性方程, 可以达到比较快的收敛。对 163×163 的图像, 通常持续几十次迭代就能获得一个满意的解。如果点扩展函数和图像尺寸较大, 迭代次数可能需要更多。对于具体迭代次数, 根据实验来确定。

5 实验结果

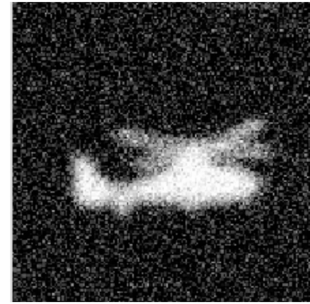
本文实验采用的原图像为 163×163 的飞机图像, 小波基选用“sym4”正交小波。对原图加 9×9 的高斯模糊, 和方差为 20 的高斯噪声。本文对加小波前后的两种自适应正则化图像复原方法进行了实验, 复原结果如图 3 所示:

表 1 给出了空域自适应正则化方法和基于小波正则化复原算法的复原结果。对比中, 考虑三个评价指标——误差矩阵的范数 error, 最小均方误差 MSE 和信噪比增量 DSNR。从表 1 可以看出加入小波变换环节后, 自适应正则化方法图像复原的效果明显提高。



(a) 原图像

(a) Original image



(b) 退化后图像

(b) Degraded image



(c) 不加小波正则化方法复原结果

(c) Restored image without wavelet transform



(d) 基于小波的正则化自适应方法复原结果

(d) Restored image with wavelet transform

图 3 两种正则化方法复原结果

Fig. 3 Results of the two regularization algorithms

表 1 两种自适应正则化方法复原结果

Tab. 1 Comparison results of the two algorithm

	复原前	无小波正则化复原后	小波正则化复原后
Error	33.726 7	24.752 6	22.731 6
MSE	25.383 3	16.284 1	14.680 0
DSNR	/	6.209 2	8.064 7

6 结 论

本文利用小波变换的时频局部化特性^[8],将之与自适应正则化盲复原方法相结合,并在代价

函数中加入对图像和点扩展函数的平滑约束,为图像复原提供了一种有效的方法。实验结果表明:相对于空间自适应正则化盲复原方法,本算法结合小波变换,根据子带的不同特性采取不同的正则化复原方法,得到了较原算法更优的复原结果,MSE 减少了 1.604 1,信噪比提高了 1.755 5;小波分解使得参与迭代计算的图像数据变小,一定程度上减少了计算量,提高了算法性能;另外,实验过程中增加小波除噪过程,克服了原算法对噪声敏感的缺点。

参考文献:

- [1] 薛梅, 邹采容, 杨娟, 等. 一种空间自适应正则化图像盲复原算法[J]. 中国图象图形学报, 2002, 4, 7(4): 356-362.
XUE M, ZOU C R, YANG J, *et al.* A space-adaptive regularization approach for blind image restoration [J]. *J. Image Graphics*, 2002, 7(4): 356-362. (in Chinese)
- [2] 洪汉玉, 张天序. 基于小波分解的湍流退化图像的快速复原算法[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(6): 451-456.
HONG H Y, ZHANG T X. Fast restoration algorithm for turbulence-degraded images based on wavelet decomposition [J]. *J. Infrared Millim Wave*, 2003, 22(4): 451-456. (in Chinese)
- [3] 刘杰平, 余英林. 基于小波变换的盲图像恢复[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(8): 73-79.
LIU J P, YU Y L. A blind image restoration algorithm based on wavelet decomposition [J]. *Micro-electron. Comput.*, 2004, 21(8): 73-79. (in Chinese)
- [4] YOU Y L, KAVECH M. A regularization approach to joint blur identification and image restoration [J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 1996, 5(3): 416-428.
- [5] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 国防工业出版社, 2001.
ZOU M Y. *Deconvolution and Signal Recovery* [M]. National Defence Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 汪源源, 孙志民, 蔡铮. 改进的奇异值分解法估计图像点扩展函数[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 520-525.
WANG Y Y, SUN ZH M, CAI ZH. Estimation of PSF of image system using modified SVD method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 520-525. (in Chinese)
- [7] 张雷, 黄廉卿, 赵唯佳. 一种超光谱图像分层压缩方法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 478-484.
ZHANG L, HUANG L Q, ZHAO W J. A multi-layered decomposition of hyper-spectral image compression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 478-484. (in Chinese)
- [8] 陈升来, 黄廉卿, 郭静寰. 基于整型提升小波变换的图像处理及 DSP 实现[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 498-502.
CHEN SH L, HUANG L Q, GUO J H. Image processing based on integral lifting scheme and its implement by DSP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 498-502. (in Chinese)

作者简介: 江洁(1973—), 女, 福建人, 博士, 副教授, 主要从事光电信息处理和光电导航的研究。E-mail: jiangjie@buaa.edu.cn