

文章编号: 0253-2239(2009)11-3000-04

# 基于小波变换和非负支撑域递归逆滤波 算法的盲目图像复原

郭永彩 高 潮 王婀娜

(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要** 提出了一种将自适应正则化方法与非负支撑域递归逆滤波(NAS-RIF)算法相结合用于小波域的盲图像复原算法。该算法先对降质图像进行小波分解,得到了图像在不同子频段的信息。在各个子频段采用 NAS-RIF 算法进行复原。针对各个子频段内图像的频率和方向特性,分别引入了不同的正则化约束项。在各个子频段估计出噪声方差,提出了根据噪声方差和图像局部方差来选取正则化参数。分别对两幅模糊图像进行了仿真实验,复原结果取得的信噪比分别为 19.66 dB 和 23.86 dB。实验结果表明,复原效果相对于空间自适应正则化方法有一定的提高。

**关键词** 图像处理; 盲目图像复原; 非负支撑域递归逆滤波(NAS-RIF)算法; 小波变换; 正则化

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3000

## Blind Image Restoration Algorithm Based on Wavelet Transform and NAS-RIF Algorithm

Guo Yongcai Gao Chao Wang Enuo

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract** An improved nonnegativity and support constraints recursive inverse filtering (NAS-RIF) algorithm based on wavelet transform is presented to restore blind images. The degraded image is decomposed to obtain its wavelet coefficients in wavelet domain. The image's different frequency sub-bands are also obtained. Then, NAS-RIF algorithm is used to restore degraded image in each sub-bands, different regularization terms are used in different sub-bands. By estimating the noise variance in each sub-bands, the adaptive regularization parameters can be calculated through the local properties of the observed image and the noise variance. The two simulating experiments are made and high signal to noise ratios (SNR) of 19.66 dB and 23.86 dB are obtained. The experimental results show that the method given by authors is more efficient than traditional space-adaptive regularization method.

**Key words** image processing; blind image restoration; NAS-RIF algorithm; wavelet transform; regularization

### 1 引 言

在许多应用领域中,会遇到图像降质问题。如宇航卫星、航空测绘、遥感、天文学中得到的图片,由于大气湍流、光学系统的像差及摄像机与物体之间的相对运动都会使图像降质; X 射线成像系统由于 X 射线散布会使医学上得到的照片的分辨率和对比度下降;电子透镜的球面像差往往会降低电子显微

照片的质量等。图像复原技术就是将这些降质图像恢复成原始图像。因此,图像复原技术有着广泛的应用需求,从而成为图像处理研究领域中的热点<sup>[1]</sup>。

现有的许多复原方法都是在确切知道模糊算子的前提下进行复原的。而更常见的实际情况是模糊过程未知或不确定,这样的图像复原叫盲目图像复原。盲目图像复原的方法主要有盲解卷积法,模拟

收稿日期: 2008-11-14; 收到修改稿日期: 2009-03-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90510020)和教育部科研重点项目(108174)资助课题。

作者简介: 郭永彩(1963—),女,博士,教授,主要从事光电技术及信号处理等方面的研究。E-mail: ycguo@cqu.edu.cn

退火和非负支撑域递归滤波 (NAS-RIF) 算法<sup>[1~4]</sup>。

## 2 NAS-RIF 算法

一幅图像的退化过程可用下式表示

$$g(x, y) = h(x, y) \times f(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

其中  $g(x, y)$  为模糊图像,  $f(x, y)$  为真实图像,  $h(x, y)$  为点扩展函数 (PSF),  $n(x, y)$  为加性噪声。NAS-RIF 算法是一种滤波的方法<sup>[5]</sup>, 它的具体流程图如图 1 所示。

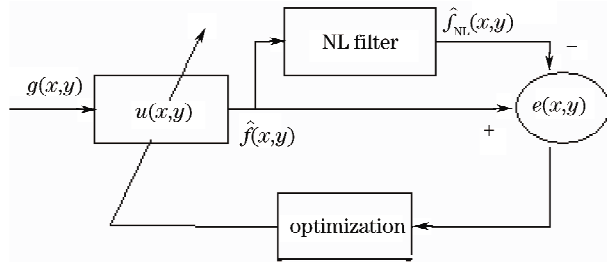


图 1 NAS-RIF 算法流程图

Fig. 1 Chart of NAS-RIF algorithm

NAS-RIF 算法的前提是: 图像退化过程符合 (1) 式所述的模型, 目标物体的支持域是已知的。该算法应用了一个可变滤波器, 通过支持域及像素非负性的约束来不断调节可变滤波器的系数, 最终通过滤波来达到图像复原的目的。算法流程图 1 中  $u(x, y)$  单元表示参数可改变的有限脉冲响应 (FIR) 滤波器, 其输入为观测到的退化图像  $g(x, y)$ , 输出为真实图像的估计  $\hat{f}(x, y)$ , 图像估计  $\hat{f}(x, y)$  通过一个非线性 (NL) 滤波器得到  $\hat{f}_{NL}(x, y)$ ,  $\hat{f}_{NL}(x, y)$  更接近于真实图像。通过  $\hat{f}_{NL}(x, y)$  与  $\hat{f}(x, y)$  的差来控制可变滤波器  $u(x, y)$  的系数。NAS-RIF 算法代价函数的表达式为

$$J(u) = \sum_{(x,y) \in D_{sup}} [\hat{f}_{NL}(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2 + \gamma \left[ \sum_{(x,y) \in D_{sup}} u(x, y) - 1 \right]^2. \quad (2)$$

设  $L_B$  为模糊图像背景的灰度值。当  $L_B = 0$  时,  $\gamma = 0$ , 加入偏移项  $\gamma \left[ \sum_{(x,y) \in D_{sup}} u(x, y) - 1 \right]^2$  以防止  $u$  收敛于全零解; 当  $L_B \neq 0$  时,  $\gamma = 0^{[2~4]}$ 。  $\hat{f}_{NL}(x, y)$  的定义如下:

$$\hat{f}_{NL}(x, y) = \begin{cases} L_B, & (x, y) \in D_{sup} \\ 0, & \hat{f}(x, y) < 0 \text{ and } (x, y) \in D_{sup} \\ \hat{f}(x, y), & (x, y) \in D_{sup} \text{ and } \hat{f}(x, y) \geq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

其中  $D_{sup}$  为支持域内部所有像素的集合,  $D_{sup}^-$  为支

持域外部所有像素的集合。经过化简后得到

$$J(u) = \sum_{(x,y) \in D_{sup}} \hat{f}^2(x, y) \left\{ \frac{1 - \text{sgn}[\hat{f}(x, y)]}{2} \right\} + \sum_{(x,y) \in D_{sup}^-} [\hat{f}(x, y) - L_B]^2 + \gamma \left[ \sum_{(x,y) \in D_{sup}} u(x, y) - 1 \right]^2, \quad (4)$$

## 3 NAS-RIF 算法与小波变换相结合

小波变换具有多分辨率和时频局部化特性, 给图像恢复提供了极其灵活的处理方法, 可以对图像的低频分量和各个高频分量分别进行处理, 以改善恢复图像的质量<sup>[6,7]</sup>。先对图像进行一级小波分解, 得到低频子频段 LL 和三个高频子频段 LH, HL, HH, 在每个子频率段, 分别利用 NAS-RIF 算法来进行恢复<sup>[8,9]</sup>。其流程框图如图 2 所示。其中,  $g(x, y)$  为观察到的图像,  $FIR_{pq}$  ( $p, q$  为 L, H) 为一组参数可变的滤波器, OP 表示最优化算法,  $f_{pq}$  为通过可变滤波器后输出的估计图像,  $f_{NL-pq}$  为经过非线性滤波器后输出的图像。  $e_{pq}$  为  $f_{pq}$  和  $f_{NL-pq}$  的差值, 通过不断减小  $e_{pq}$  来调节可变滤波器的系数。可得到各子频段的代价函数的表达式为

$$J_{pq}(u) = \sum_{(x,y) \in V} [f_{NL-pq}(x, y) - f_{pq}(x, y)]^2 + \gamma \left[ \sum_{(x,y) \in V} u_{pq}(x, y) - 1 \right]^2, \quad (5)$$

当  $J_{pq}(u)$  减小到一定值时, 得到各个子频带的图像信息的真实估计值, 通过小波逆变换得到复原图像  $f(x, y)$ 。

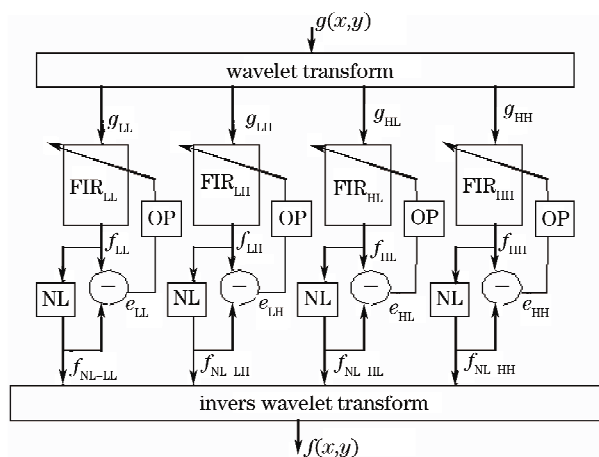


图 2 NAS-RIF 算法与小波变换结合复原算法流程图

Fig. 2 Flow diagram of the restoration algorithm combining NAS-RIF and wavelet transform

小波变换后, 各个子频带具有不同的频率特性和方向特性, 可对各个子频带分别进行恢复, 对低频子带的图像应该着重去模糊, 而对高频子带的图像

恢复应着重去噪声,可在不同的子频带采用不同的正则化算子和参数分别来控制各个子频带的平滑程度。得到各个子频带的代价函数的表达式为

$$J_{pq}(u) = \sum_{V(x,y)} [f_{NL-pq}(x,y) - f_{pq}(x,y)]^2 + \lambda \sum_{V(x,y)} [c(x,y) \times f_{pq}(x,y)]^2 + \gamma \left[ \sum_{V(x,y)} u_{pq}(x,y) - 1 \right]^2, \quad (6)$$

1) 正则化算子的选取

经过小波分解后,图像的主要能量集中在 LL 低频子频带,LL 子频带的图像接近于真实图像,在该子频带中,应强调图像的复原,着重去模糊,选取拉普拉斯算子作为该子频带的正则化算子。HL,LH 和 HH 子频带分别包含图像的水平、垂直和对角方向的高频能量。考虑到 HL 和 LH 分别要保留有图像的垂直和水平边界,在 LH 和 HL 子频带可分别选取  $C_{LH} = [-1 \ 2 \ -1]^{-1}$  和  $C_{HL} = [-1 \ 2 \ -1]$ ,作为正则化算子,考虑到 HH 子频带对恢复后图像的主观视觉影响不大,所以对该子频带不加正则化约束。

2) 正则化参数的选取

由于图像的方差和噪声在各个局部是不一致的,因而正则化参数的选择应根据图像局部的性质和噪声方差来确定<sup>[9]</sup>。可选取正则化参数为:  $\lambda = \frac{\delta_n^2}{\delta_g^2}$ ,其中  $\delta_n^2$  为噪声方差, $\delta_g^2$  为观察图像的局部方差。可知,在局部噪声方差大,而图像局部方差小的地

方,取得了一个较大的值作为正则化权系数,使得平滑加强,抑制噪声;而在局部噪声方差小,图像局部方差大的地方,取得一个较小的正则化权系数以保持图像的细节。为了在各个子频带使图像的恢复达到噪声抑制与细节保持之间的平衡,可以根据各个子频带图像信息的局部性质和噪声方差来自适应地选取正则化参数。

$\delta_n^2$  的估计:在 LL,LH,HL 子频带分别选取均匀算子:

$$d_{LL} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 \end{bmatrix}, d_{LH} = [0.5 \ 0.5]$$

$d_{HL} = [0.5 \ 0.5]^T, Z_{LL} = g_{LL} \times d_{LL}, Z_{LH} = g_{LH} \times d_{LH}, Z_{HL} = g_{HL} \times d_{HL}$ 。得到各子频带的噪声方差估计为

$$\delta_{nLL}^2 = \delta_{rLL}^2 - \delta_{zLL}^2, \delta_{nLH}^2 = \delta_{rLH}^2 - \delta_{zLH}^2, \delta_{nHL}^2 = \delta_{rHL}^2 - \delta_{zHL}^2,$$

从而得到各个子频带的正则化参数为:

$$\lambda_{pq} = \frac{\delta_{npq}^2}{\delta_{gpq}^2}.$$

4 实验结果与分析

将本文所提出的算法用不同的图像来进行模拟仿真实验<sup>[10,11]</sup>,得到的结果如图 3 和图 4 所示。

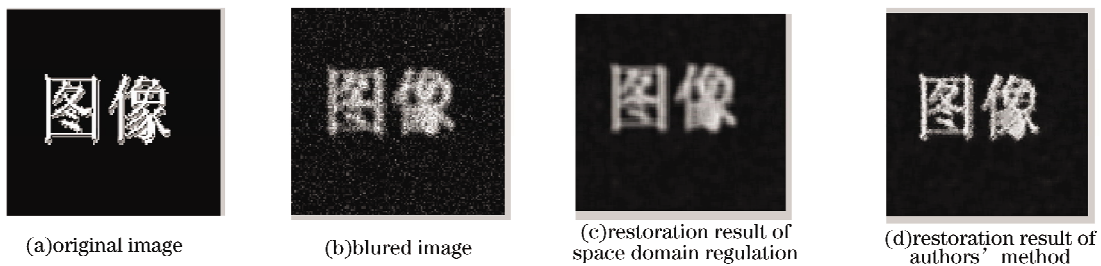


图 3 “图像”图像复原结果  
Fig. 3 The restoration results of “image”

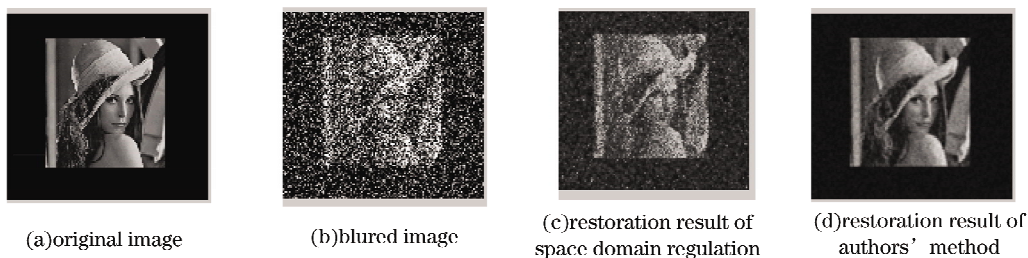


图 4 “lena”图像复原结果  
Fig. 4 The restoration results of “lena” image

图 3(a)中的“图像”经过  $3 \times 3$  的高斯模糊算子模糊(模拟因相机抖动而产生的模糊),再加入方差

为 0.002 的高斯白噪声后得到图 3(b)所示的模糊图像,在空域里采用正则化方法进行恢复得到的结

果如图 3(c)所示,本文提出的算法得到的结果如图 3(d)所示。图 4(a)中的“lena”原始图像经过半径为 3 的离焦模糊算子模糊后,再引入方差为 0.02 的高斯白噪声后得到图 4(b)所示的模糊图像,采用正则化方法在空域里进行复原,得到的结果如图 4(c)所示,本文提出的算法得到的结果如图 4(d)所示。

如何评估一个复原算法的复原结果,总的来说,是一个未解决的问题。为了通过计算机模拟来比较各种算法,通常采用峰-峰信噪比(PSNR)作为评估恢复图像的主要尺度。 $f_{\text{PSNR}}$ 的计算公式如下:

$$f_{\text{PSNR}} = 10 \lg(Q^2 / f_{\text{MSE}}), \quad (7)$$

式中  $Q$  为图像数据量化的级数,  $f_{\text{MSE}}$  为最小均方误差,定义如下式

$$f_{\text{MSE}} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2, \quad (8)$$

$f(x, y)$  和  $\hat{f}(x, y)$  分别表示原始图像的数据和估计图像的数据。空域自适应正则化方法复原图像和本文提出的算法得到的复原图像的 PSNR 如表 1 所示。针对不同原因引起的和不同信噪比的降质图像,本算法复原图像的 PSNR 均比空域自适应正则化方法复原图像的 PSNR 有所提高。

表 1 本文算法复原结果与空域正则化复原算法结果比较

Table 1 Results comparison of space regulation and authors' method

Processing images	PSNR /dB	
	"image"	"lena"
blurred image	16.9227	9.8179
result of space regulation method	17.7490	15.2741
result of authors' method	19.6641	23.8624

## 5 结 论

本文提出了一种将正则化技术与 NAS-RIF 算法相结合用于小波域的盲目图像复原方法。利用小波变换后各个子频带具有不同的频率特性和方向特性,分别采用不同的正则化算子。在各个子频带,根据图像信息的局部方差和噪声方差,提出了一种自适应地选取正则化参数的方法,使得细节的恢复和噪声的抑制之间达到平衡。本算法复原的结果比空域自适应正则化复原算法的效果好。

当然,本算法也存在必须知道图像支持域的局限,如何在各个子频带近似地估计出该子频段图像信息的支持域还有待于进一步研究。

## 参 考 文 献

- Zhang Hang, Luo Dayong. Status and development of study on blind image restoration algorithm[J]. *J. Image and Graphics*, 2004, 9(10): 1145~1152
- 张航, 罗大庸. 图像复原算法研究现状及其展望[J]. *中国图象图形学报*, 2004, 9(10): 1145~1152
- D. Kunder, D. Hatzinakos. A novel blind deconvolution scheme for image restoration using recursive filtering [J]. *IEEE Transactions On Signal Processing*, 1998, 46(2): 375~389
- T. W. S Chow, X. D. Li, S. Y. Cho. Improved blind image restoration scheme using recurrent filtering [J]. *IEEE Proceedings-Vision Image Signal Process*, 2000, 147(1): 23~28
- C. A. Ong, J. A. Chambers. Enhanced NAS-RIF algorithm for blind image deconvolution[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1999, 8(7): 988~992
- Jiang Jie, Deng Qiong, Zhang Guangjun. Regularization algorithm for blind image restoration based on wavelet transform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 582~586
- 江洁, 邓琼, 张广军. 基于小波变换的正则化盲图像复原算法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 582~586
- Zhao Dongjie, Zhou Hui. Image restoration algorithm of smoothing constrained least square based on wavelet denoising [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2005, 24(5): 82~84
- 赵东杰, 周辉. 基于小波去噪的平滑约束最小二乘图像复原算法[J]. *兵工自动化*, 2005, 24(5): 82~84
- Li Shuxia, Wang Rulin, Li Chunmei. New method of image denoising through wavelet shrinkage based on estimate of noise variance [J]. *Application Research of Computers*, 2007, 24(1): 220~221
- 李淑霞, 王汝霖, 李春梅等. 基于噪声方差估计的小波域图像去噪新方法[J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(1): 220~221
- Deng Shuiying, Zeng Sanyou, Xu Zhonghua. A new method for selection of regularization parameter [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 40(16): 50~52
- 邓水英, 曾三友, 许中华. 一种获取正则化参数的新方法[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 40(16): 50~52
- Miao Qing, Tang Binbing, Zhou Haiyin. An effective image restoration algorithm based on regularization in spatial domain [J]. *Systems Engineering*, 2005, 23(11): 91~94
- 苗晴, 唐斌兵, 周海银. 空域中基于正则化技术的图像复原算法[J]. *系统工程*, 2005, 23(11): 91~94
- Shi Wanming, Yang Yefei, Wu Yushu et al.. *Numeric Analysis* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002
- 史万明, 杨鹏飞, 吴裕树等. *数值分析* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002
- Liu Zhifang, Wang Yunqiong, Zhu Min. *Digital Image Processing and Analysis* [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2006
- 刘直芳, 王运琼, 朱敏等. *数字图像处理与分析* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006