

文章编号 1004-924X(2008)11-2263-05

空间自适应和正则化技术的盲图像复原

郭永彩, 王婀娜, 高 潮

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:在原非负支撑域递归逆滤波(NAS-RIF)算法基础上,提出了一种基于空间自适应和正则化技术的改进的盲图像复原算法。该算法在原 NAS-RIF 算法的代价函数中引入两项空间自适应加权项,分别用来确保图像复原的逼真和平滑。自适应加权项可根据观察图像的局部特性和噪声方差求得;加入正则化项,则用于抑制噪声。提出了根据观察图像来估计噪声方差的方法,不需要知道噪声方差的先验条件,采用共轭梯度算法来进行求解。对 3 幅不同背景和不同信噪比的图像进行了仿真实验。实验结果表明:采用改进算法得到的信噪比增益(Δ SNR)比原算法分别提高了 0.207 3 dB, 1.023 9 dB 和 2.862 8 dB,取得了更优的图像复原效果。

关键词:盲图像复原;空间自适应;正则化;非负支撑域递归逆滤波;噪声方差估计

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Blind image restoration algorithm based on space-adaptive and regularization

GUO Yong-cai, WANG E-nuo, GAO Chao

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

Abstract: Based on original Nonnegativity and Support constraint Recursive Inverse Filtering (NAS-RIF) algorithm, an improved blind image restoration algorithm was proposed. In order to achieve the trade-off between the fidelity of observed image and the smoothness of restored image and to prevent noise amplification, a new cost function of the NAS-RIF algorithm was introduced by adding space-adaptive terms and a regularization term. The space-adaptive terms could be calculated through the local properties of the observed image and the the noise variance. A algorithm using conjugate-gradient routine to calculate the optimal result was proposed to estimate the noise variance in unknown transcendental condition. The improved algorithm and original algorithm were both used to restore three different degraded images. The experimental results show that the Δ SNRs by proposed algorithm are increased by 0.207 3 dB, 1.023 9 dB, 2.862 8 dB as compared with those of original NAS-RIF algorithm. It demonstrates that the improved algorithm is more efficient.

Key words: blind image restoration; space-adaptive; regularization; Nonnegativity and Support constraint Recursive Inverse Filtering (NAS-RIF); estimation of noise variance

收稿日期:2007-12-21;修订日期:2008-03-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 90510020)

1 引言

在宇航卫星、航空测绘、遥感、天文学等许多应用领域中得到的图像会由于大气湍流、光学系统的像差及摄像机与物体之间的相对运动而降质;X 射线成像系统由于 X 射线散布会使医学上得到的照片分辨率和对比度下降;电子透镜的球面像差也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,是图像处理研究领域中的热点。

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的,这样的图像复原被称为经典的图像复原。而更常见的情况是模糊过程未知或不确定,这样的图像复原叫盲图像复原。由于盲图像复原技术不依赖于系统的传递函数,因而有着更为广泛的实用价值^[1]。现有的盲图像复原方法可分为两大类,一类是点扩散函数的预先估计法,ARMA 参数估计法,奇异值分解法估计点扩散函数法等^[2]。另一类是联合辨识法,即对点扩散函数和真实图像同步进行估计。该类方法主要有迭代盲目反卷积(IBD)法、McCallum 提出的模拟退火算法(SA)和 D Kunder 提出的非负支持域递归逆滤波算法(NAS-RIF)^[3]。IBD 算法计算复杂度低,但算法的收敛性和唯一性不确定。SA 算法具有全局收敛性,但收敛到全局最优的速度慢。NAS-RIF 算法简单,收敛性好,因而受到广泛的关注,该算法的最大缺点是在低信噪比的情况下,会带来噪声的放大,从而导致算法的恶化^[3-4]。

本文针对 NAS-RIF 算法的弱点,对该算法进行了改进。在原 NAS-RIF 算法的代价函数中引入空域加权因子以达到图像复原的逼真和平滑之间的平衡;同时引入正则化项,来抑制噪声的放大。

2 NAS-RIF 算法简介^[4]

一幅图像的退化过程可用式(1)表示:

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

其中, $g(x, y)$ 为模糊图像, $f(x, y)$ 为真实图像, $h(x, y)$ 为点扩散函数(PSF), $n(x, y)$ 为加性噪声。

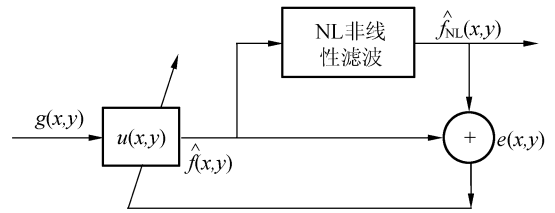


图 1 NAS-RIF 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of NAS-RIF algorithm

NAS-RIF 算法是一种逆滤波的方法,它的具体流程如图 1 所示。NAS-RIF 算法的前提是:图像退化过程符合式(1)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,最终通过逆滤波来达到图像复原的目的。图 1 中 $u(x, y)$ 为可变 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 $\hat{f}(x, y)$ 通过一个非线性滤波器 NL 得 $\hat{f}_{NL}(x, y)$, $\hat{f}_{NL}(x, y)$ 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:

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

设 L_B 为模糊图像背景的灰度值。当 $L_B = 0$ 时, $\gamma \neq 0$, 加入偏移项 $\gamma \sum_{\forall (x, y)} [u(x, y) - 1]^2$ 以防止收敛于全零解;当 $L_B \neq 0$ 时, $\gamma = 0$ ^[4-8]。 $\hat{f}_{NL}(x, y)$ 的定义如下:

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

其中, D_{sup} 为支持域内部所有像素的集合, \bar{D}_{sup} 为支持域外部所有像素的集合。经过化简后得到:

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

3 NAS-RIF 算法的改进

由于原 NAS-RIF 算法存在噪声放大问题,特别是在低信噪比的情况下,图像复原的效果很差,因此可以通过引入正则化项来抑制噪声的放大,并通过空间加权因子来达到图像的逼真和平滑间的平衡。改进 NAS-RIF 算法的代价函数可用如下的式子来表示:

$$J(u) = \sum_{\forall(x,y)} w_1(x,y) [\hat{f}_{NL}(x,y) - \hat{f}(x,y)]^2 + \lambda \sum_{\forall(x,y)} w_2(x,y) [c(x,y) * \hat{f}(x,y)]^2 + \gamma \left[\sum_{\forall(x,y)} u(x,y) - 1 \right]^2, \quad (5)$$

其中, $w_1(x,y)$ 和 $w_2(x,y)$ 为空域加权因子,第二项为正则化项, $c(x,y)$ 为正则化算子, λ 为正则化参数。

3.1 正则化算子和正则化参数的确定

正则化算子 $c(x,y)$ 为一高通滤波器,通常选取为 Laplace 算子,即:

$$c(x,y) = \begin{bmatrix} 0 & -0.25 & 0 \\ -0.25 & 1 & -0.25 \\ 0 & -0.25 & 0 \end{bmatrix}.$$

正则化参数 λ 用来控制图像细节恢复和噪声抑制之间的平衡。由于实际图像的平滑度和观察到的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。本文确定正则化参数的方法如下:首先估计图像的局部噪声,选取一个均匀算子 $z = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 \end{bmatrix}$,令它与退化图像进行卷积得 $z_1 = g * z$,得到图像局部噪声方差的估计为:

$$\sigma_n^2 = \sigma_g^2 - \sigma_{z_1}^2, \quad (6)$$

可选取正则化参数 $\lambda = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_g^2}$,由这个式子可以看出:在局部噪声方差大,而图像局部方差小处,取一个较大的值作为正则化参数可使得平滑加强,抑制噪声。而在局部噪声方差小,图像局部方差大处,取一个较小的正则化参数可以保持图像的细节。

3.2 空域加权因子的计算

通过加权因子来进一步实现空域的自适应。 $w_1(x,y)$ 是为了加强图像的逼真度,在噪声比较小或图像的灰度变化较大的区域选取的,式(5)中的 $w_1(x,y)$ 的值较大;反之,则 $w_1(x,y)$ 的值较

小。而在噪声较大或图像灰度变化不大的区域, $w_2(x,y)$ 的值较大来加强平滑。 $w_1(x,y)$ 和 $w_2(x,y)$ 可以用下面的公式来表示:

$$w_1(x,y) = \frac{1}{1 + (\mu \max[0, \sigma_g^2(x,y) - \sigma_n^2])^{-1}}, \quad (7)$$

$$w_2(x,y) = \frac{1}{1 + (\mu \max[0, \sigma_g^2(x,y) - \sigma_n^2(x,y)])^{-1}}. \quad (8)$$

σ_n^2 可通过式(6)的估计获得,参数 μ 的确定和具体图像有关,根据经验^[5]取为:

$$\mu = \frac{1\ 000}{\max_{\forall(x,y)} [\sigma_g^2(x,y) - \sigma_n^2]}. \quad (9)$$

在进行空间自适应滤波时,为了避免 PSF 的支持域较大,待处理的图像过分模糊,可以使用迭代结果的局部方差 σ_{jk}^2 (k 为迭代次数)代替 σ_g^2 来进行空间自适应的加权。

4 实验结果

将本文所提出的算法用不同的图像来进行仿真测试。测试时使用了空域加权因子和权矩阵迭代更新的空间自适应加权正则化项,并采用共轭梯度法来求解代价函数的最小化问题,得到如图 2,图 3,图 4 所示的结果。图 2(a)是 9×9 的高斯模糊算子,模拟因抖动而产生的模糊。图 3(a)是半径为 5 的离焦模糊算子,模拟因为离焦而产生的模糊。图 4(a)是 5×5 的高斯模糊算子,模拟因抖动而产生的模糊,图 4(c)是经过该图 4(a)模糊后加入随机噪声而产生的模糊图像。

如何评估一个复原算法处理的结果,目前还是一个未解决好的问题。但为了通过计算机模拟来比较各种算法,通常使用一个品质参数,这个品质参数称为图像信噪比增益。它的计算公式如式(10)。

$$\Delta \text{SNR} = 10 \lg \frac{\sum_{(i,j) \in D} \|y(i,j) - x(i,j)\|_2^2}{\sum_{(i,j) \in D} \|\hat{x}(i,j) - x(i,j)\|_2^2}. \quad (10)$$

$x(i,j)$ 和 $\hat{x}(i,j)$ 分别代表原始图像数据和估计图像的数据, $y(i,j)$ 为观察到的模糊图像的数据。分别采用原算法和改进算法对不同原因引起的模糊图像进行复原,得到的信噪比增益 ΔSNR 如表 1 所示。



(a)模糊算子 (b)原始图像 (c)模糊图像 (d)原算法复原结果 (e)改进算法复原结果
 (a) Blur operator (b) Original image (c) Degraded image (d) Restored image of original algorithm (e) Restored image of improved algorithm

图 2 “图像”的复原结果

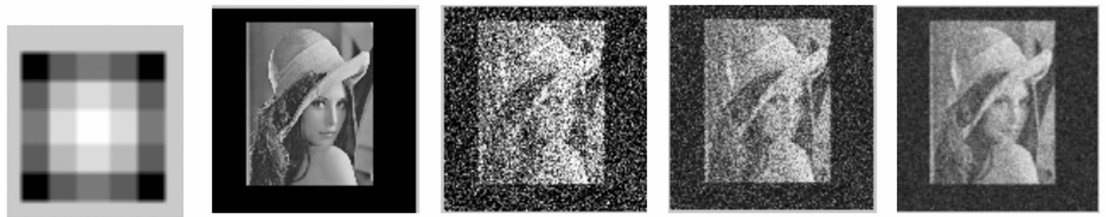
Fig. 2 Restored results of ‘tu xiang’



(a)模糊算子 (b)原始图像 (c)模糊图像 (d)原算法复原结果 (e)改进算法复原结果
 (a) Blur operator (b) Original image (c) Degraded image (d) Restored image of original algorithm (e) Restored image of improved algorithm

图 3 “circles”的复原结果

Fig. 3 Restored results of ‘circles’



(a)模糊算子 (b)原始图像 (c)模糊图像 (d)原算法复原结果 (e)改进算法复原结果
 (a) Blur operator (b) Original image (c) Degraded Image (d) Restored image of original algorithm (e) Restored image of improved algorithm

图 4 “Lena”的复原结果

Fig. 4 Restored results of ‘Lena’

表 1 原算法和改进算法的 Δ SNR 比较结果

Tab. 1 Comparison of Δ SNRs between original and improved algorithms

Δ SNR 图	算 法	
	原算法	改进算法
“图像”	0.956 5 dB	1.163 8 dB
圆	1.428 2 dB	2.452 1 dB
“Lena”	1.155 1 dB	4.017 9 dB

5 结 论

本文提出了一种基于空间自适应和正则化技术的盲图像复原算法。该算法对原有的 NAS-RIF 算法进行了改进,在代价函数中引入了空域自适应加权因子和正则化项,从而使复原的图像在保持逼真度和抑制噪声,保持细节和平滑度之

间达到平衡。同时,本文也提出了一种估计图像局部噪声方差的方法,因而不需要知道图像噪声方差的先验知识。本算法所需的先验条件仅为图像的支持域。实验结果表明:与原 NAS-RIF 算法相比,本文提出的算法复原效果更好,对三幅不

同的退化图像分别采用本算法和原算法对其进行复原,采用本算法得到的信噪比增益(Δ SNR)分别比原算法提高了 0.207 3 dB, 1.023 9 dB, 2.862 8 dB。对有噪声存在的图像,改进的算法抑制了噪声的放大,复原效果明显优于原算法。

参考文献:

- [1] 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.
ZHANG H, LUO D Y. Status and development of study on blind image restoration algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(10): 1145-1150. (in Chinese)
- [2] 汪源源,孙志民,蔡钰. 改进的奇异值分解法估计点扩散函数[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)
- [3] KUNDER D, HATZINAKOS D. Blind image deconvolution [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, 13(3): 43-64.
- [4] KUNDER D, HATZINAKOS D. A novel blind deconvolution scheme for image restoration using recursive filtering [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46 (2): 375-389.
- [5] CHOW T W S, LI X D, CHO S Y. Improved blind image restoration scheme using recurrent filtering[J]. *IEEE Proc-vis Image Signal Process*, 2000, 147(1): 23-28.
- [6] CHIN A O, CHAMBERS J A. Enhanced NAS-RIF algorithm for blind image deconvolution[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(7): 988-992.
- [7] 薛梅,杨绿溪,邹采荣,等. 用于二值含噪图像的改进 NAS-RIF 图像盲复原算法[J]. 数据采集与处理, 2002, 17(2): 156-160.
XUE M, YANG L X, ZOU C R, et al. Improved NAS-RIF blind image restoration algorithm for noised two-valued images [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2002, 17 (2): 156-160. (in Chinese)
- [8] 仲伟波,宁书年,金声震. 一种基于 NAS-RIF 的 SST 图像盲恢复新方法[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(5): 679-683.
ZHONG W B, NING SH N, JIN SH ZH. New SST image blind restoration algorithm based on NAS-RIF[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2006, 35(5): 679-683. (in Chinese)
- [9] 谭毅华,田金文,柳健. 边缘保持正则化低码率压缩图像后处理算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 592-598.
TAN Y H, TIAN J W, LIU J. Post-processing of low rate compressed image using edge preserving regularization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 592-598. (in Chinese)
- [10] 高潮,郭永彩,刘国祥. 基于频域共轭梯度算法的盲目图像恢复[J]. 计算机学报, 2003, 26(9): 1151-1156.
GAO CH, GUO Y C, LIU G X. Blind image restoration based on frequency domain conjugate gradient algorithm [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(9): 1152-1156. (in Chinese)
- [11] 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.
JIANG J, DENG Q, ZHANG G J. Regularization algorithm for blind image restoration based on wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 582-586. (in Chinese)

作者简介:郭永彩(1963—),女,重庆人,教授,博士生导师,主要从事光电技术与智能仪器以及数字信号处理方面的科研和教学工作。E-mail:ycguo@cqu.edu.cn