

一种有效保持边缘特征的散焦模糊图像复原方法

肖 泉¹ 丁兴号^{1,2} 廖英豪¹

(厦门大学信息科学与技术学院 厦门 361005)¹

(厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361005)²

摘 要 图像复原过程中图像的主观视觉质量与图像的局部细节信息之间密切相关。针对散焦模糊图像,提出一种新的图像复原方法。所提方法在传统双边总变分正则化方法基础上,通过引入一种具有结构自适应的局部权值函数,构造了一种新的图像复原目标函数。该目标函数综合考虑了图像的全局与局部统计特性,即在整体保真情况下还充分考虑了图像的局部结构信息,使得所提复原方法能更有效地保持图像的边缘等细节信息。与传统 BTV 正则化方法的比较实验表明,所提方法在边缘保持方面更有效,复原后的图像具有更好的主、客观视觉质量。

关键词 图像复原,点扩散函数,双边总变分,局部权值函数

中图法分类号 TN911.73 **文献标识码** A

Novel Edge-preserving Algorithm for Defocus Blurred Image Restoration

XIAO Quan¹ DING Xing-hao^{1,2} LIAO Ying-hao¹

(School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)¹

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)²

Abstract Relevant research on image restoration indicates that image's subjective visual quality is closely related to its local details. A novel restoration algorithm for defocus blurred image was proposed. The proposed algorithm based on BTV regularization framework by introducing a local adaptive weighted function constructs a new cost function for image restoration. This cost function which not only takes into account the global data-fidelity, but also considers the local statistical properties of image, meaning to fully consider the local structural features of image under global data-fidelity, hence behaves much better in edge preservation. Experimental results confirm the effectiveness of the proposed method. The image is restored with better subjective and objective visual quality, compared with other methods such as traditional BTV regularization approach.

Keywords Image restoration, Point spread function, Bilateral total variation, Local weighted function

图像采集过程中,由于成像系统对焦不准,导致图像散焦模糊,是影响图像视觉质量的一个重要因素。而在一些识别应用领域,如智能交通、天文、医疗及刑侦等特定场合,根据不同要求往往又需要较为清晰的图像,因此散焦模糊图像的清晰化研究具有重要的实际意义。

散焦模糊图像的空间退化过程具有低通特性,通常将模糊机制即点扩散函数(Point Spread Function, PSF)建模为一低通滤波器,这使得散焦模糊图像复原成为一个典型的病态反问题求解过程。针对模糊图像复原问题,目前已出现多种方法,如早期经典的 Wiener 滤波法和 Lucy 反卷积方法^[1]等,均能取得一定的复原效果。随着问题研究的深入,近年来针对此类病态反问题,基于正则化理论的图像复原方法逐渐受到广泛关注^[2-7],如较早提出的 Tikhonov 模型^[2]和经典的 TV 模型^[3]均取得一定效果。但由于 Tikhonov 模型基于图像光滑性假设的本质,复原后图像往往过于平滑,细节信息损

失较严重;而 TV 模型考虑了图像具有边缘结构特征,因此复原过程中能有效保持图像边缘特征,性能得到很大改善。如 T. F. Chan 等^[4]提出基于 TV 模型的模糊图像复原方法,并推广至盲复原领域,取得初步成效。但 TV 模型对于观测噪声较敏感,当信噪比较低时,性能急剧下降。2004 年, Farsiu 等人^[6]在 TV 模型基础上结合双边滤波思想^[8]提出了双边总变分(Bilateral Total Variation, BTV)模型,用于解决此类病态反问题,有效地提高了复原方法的鲁棒性能。而国内贲圣兰等^[7]则在 BTV 模型基础上提出一种改进方法,并在文本图像复原中取得较好的效果,实验结果证实 BTV 模型在边缘保持和抑制噪声方面都优于 TV 模型。

本文旨在研究散焦模糊图像的复原问题,并提出一种能够有效保持边缘特征的图像复原方法。首先对散焦模糊图像退化模型进行简单描述;随后基于传统 BTV 正则化复原方法,通过引入一个具有结构自适应的局部权值函数,构造了一

到稿日期:2009-08-25 返修日期:2009-11-11 本文受福建省自然科学基金(2008J0032, 2009J01301, 2009J01302),厦门大学 985 二期信息创新平台资助项目(0000-X07204),厦门市科技计划高校创新项目(3502Z20083006)资助。

肖 泉(1985—),男,博士生,主要研究方向为图像复原等, E-mail: xq_xmu@yahoo.com.cn; 丁兴号(1976—),男,副教授,主要研究方向为图像处理等; 廖英豪(1960—),男,讲师,主要研究方向为模式识别、图像处理等。

个新的目标函数。相关仿真实验表明,本文所提方法相比于传统 BTV 正则化方法进一步提高了边缘保持能力,获得了更优的主、客观效果。

1 散焦模糊图像退化模型

在成像过程中,物理世界中的物体可视为呈二维分布的许多点光源。通过成像系统,物体的最终成像由分布在空间的点扩散光斑叠加而成,因此成像系统可近似描述为一个线性移不变系统。图 1 给出了散焦模糊图像的退化模型。

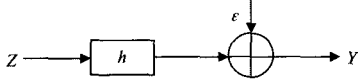


图 1 散焦模糊图像退化模型

将该退化模型描述为如下数学形式:

$$Y = h * Z + \varepsilon \quad (1)$$

式中, Y 为模糊图像, h 为成像系统的 PSF, $*$ 表示卷积运算, Z 为理想的清晰图像, ε 为加性观测噪声。通常情况下,将 h 建模为一个均匀分布的圆盘函数:

$$h(u, v) = \begin{cases} 1/\pi r^2, & u^2 + v^2 \leq r^2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, r 为圆盘函数的半径,即散焦 PSF 的模糊半径。

2 散焦模糊图像复原

2.1 双边总变分正则化方法

采用基于 BTV 模型的正则化方法,可将上述散焦模糊图像复原问题归结为如下最优化问题:

$$\hat{Z} = \arg \min_Z \{ \|Y - HZ\|_2^2 + \lambda \cdot \gamma_{BTV}(Z) \} \quad (3)$$

式中, H 表示散焦模糊的矩阵表达形式。上式中第一项为具有 L2 范数形式的数据保真项;第二项为 BTV 正则化项,其具体形式如下:

$$\gamma_{BTV}(Z) = \sum_{l=-p}^p \sum_{m=-p}^p \alpha^{|l|+|m|} \|Z - S_{x_{l1}}^l S_{x_{l2}}^m Z\| \quad (4)$$

式中, $S_{x_{l1}}^l$ 和 $S_{x_{l2}}^m$ 分别代表沿水平和垂直方向移动 l 和 m 个像素, p 为移动窗口的半径, α 定义为距离衰减因子,并有 $0 < \alpha < 1$ 。由式(4)可知, BTV 模型实际上是 TV 模型的一种推广形式(当 p 和 α 均取 1 时即 TV 模型)。BTV 模型由于同时利用了邻域像素点间的距离和数值属性,相比于 TV 模型在有效保持边缘的同时对噪声具有更强的抑制能力,因此能获得更好的性能。

基于 BTV 正则化模型所构造的目标函数不具备二次型,一般可采用最陡下降法求解,其迭代形式如下:

$$\hat{Z}^{k+1} = \hat{Z}^k + \mu(2H^T(Y - HZ) + \lambda \cdot \nabla \gamma(Z)) \quad (5)$$

$$\nabla \gamma(\cdot) = \sum_{l=-N}^N \sum_{m=-N}^N \alpha^{|l|+|m|} (I - S_{x_{l1}}^l S_{x_{l2}}^m) \text{sign}(Z - S_{x_{l1}}^l S_{x_{l2}}^m Z) \quad (6)$$

2.2 有效保持边缘的图像复原方法

通过对式(3)的分析可知,该目标函数中的数据保真项及正则化项都是对图像进行整体操作。对于正则化项,由于实质上是利用图像的全局统计特性作为先验约束,因此该项对图像进行整体操作是合理的。但式中的数据保真项也是全局处理方式,即对图像中所有像素点失真的惩罚权重一致。但

一般自然图像中,由于存在边缘和纹理等结构信息,相比于平滑区这些结构特征对视觉影响更大。若将全体像素点等对待,则在复原过程中不利于保护这些细节信息,容易导致最终的复原结果与主观视觉感受不相符。因此,在图像复原过程中应充分考虑图像的局部结构特征。为此,本文在传统 BTV 正则化方法基础上通过引入一个局部权值函数对目标函数进行重新构造,具体形式如下:

$$\hat{Z} = \arg \min_Z \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \Omega_i} [(y_j - Z_H(x_i))^2 \cdot w_{x_j}] + \lambda \cdot \gamma_{BTV}(Z) \right\} \quad (7)$$

$$Z_H = HZ$$

式中, $x_i = [x_{i1}, x_{i2}]^T$ 为像素点坐标, N 为图像中所含像素点的总数, Ω_i 表示以当前估计点 x_i 为中心的邻域,局部权值 w_{x_j} 则表示 Ω_i 中不同像素点对估计点 x_i 的权重。由式(6)可知,本文所构造的目标函数通过引入权值函数后,保真项部分中每个像素点的残差估计并不仅依赖于本身,而是由其邻域像素点通过加权来获得,因而对保真项的残差估计更具鲁棒性。

对于局部权值 w_{x_j} 的构造,最简单的一种形式是采用距离高斯核函数来确定。但如前所述,实际图像由于存在各相异性的结构特征,因此采用各相同性的高斯核函数并不适合。为了构造具有结构自适应的局部权值,本文结合双边加权思想来获得^[8],即在距离高斯核函数基础上将邻域内像素点的灰度值属性也考虑进来,从而能够有效区分邻域内不同属性像素点,保证权值函数具有结构自适应性。所构造的双边核函数形式如下:

$$w_{x_j} = w_{x_j}^d \cdot w_{x_j}^r \quad (8)$$

式中, $w_{x_j}^d$ 为距离高斯核函数, $w_{x_j}^r$ 为灰度值高斯核函数,其形式分别如下:

$$w_{x_j}^d = \exp \left\{ -\frac{(x_j - x_i)^T (x_j - x_i)}{2h_d^2} \right\} \quad (9)$$

$$w_{x_j}^r = \exp \left\{ -\frac{(y_j - y_i)^2}{2h_r^2} \right\} \quad (10)$$

式中, h_d 为距离相近度因子, h_r 为灰度值相似度因子。

由此,本文构造了一种新的散焦模糊图像复原方法(具体形式如式(6)所示),其中保真项采用 L2 范数并结合局部双边核函数来构造,正则化项则采用 BTV 模型。对于该优化问题,依然可采用最陡下降法求解。但值得注意的是,数据保真项中局部权值函数是作用于待估计点的局部邻域,而正则化项则是对图像进行全局约束。具体迭代形式如下:

$$\hat{Z}(x_i)^{k+1} = \hat{Z}(x_i)^k - \mu \cdot \nabla \hat{Z}(x_i)^k \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \nabla \hat{Z}(x_i)^k &= -2w_{x_j}^T (Y_H^T \cdot j - \hat{Z}_H^T H(x_i)^k) + \nabla \gamma(Z(x_i)) \\ Y_H^T &= H^T Y \quad Z_H^T H = H^T HZ \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $j \in \Omega_i$, $\nabla \hat{Z}(x_i)^k$ 为第 k 次迭代时当前点 x_i 的梯度,而正则化项的梯度计算与式(6)一致。

3 仿真实验与结果分析

为验证本文所提方法的有效性,实验中选择了大小为 256×256 的“Lena”图像和一幅文本图像,如图 2 所示用于实验比较分析。在模糊机制 PSF 已知的情况下(采用第 2 节所提的散焦模糊机制),对不同模糊程度的图像进行复原处理,

其中用于与本文比较的方法有:①经典的 Lucy 反卷积方法;②基于传统 BTV 正则化的复原方法。客观指标则采用峰值信噪比(PSNR)。

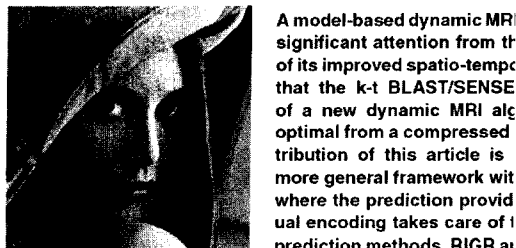


图 2 实验所用原始图像

图 3 给出了散焦模糊半径 $r=5$ 时对 Lena 图像采用不同方法得到的复原效果比较图。由图 3 可看出,所采用方法均取得了一定的复原效果,但几种比较方法的主观视觉质量均不如本文方法。主要体现在比较方法所得复原图像会产生伪影现象,其中 Lucy 反卷积方法最为明显,复原效果最差。传统 BTV 正则化方法较 Lucy 方法伪影现象有所改善,但仍不能完全消除(如 Lena 图像中‘帽檐’等边缘处表现尤为明显),且边缘保持方面也不如本文方法,影响图像的主观视觉质量。而本文方法则较好地克服了伪影现象,且很好地保持了图像边缘特征,复原后图像整体视觉感受非常自然,说明了本文方法的有效性。

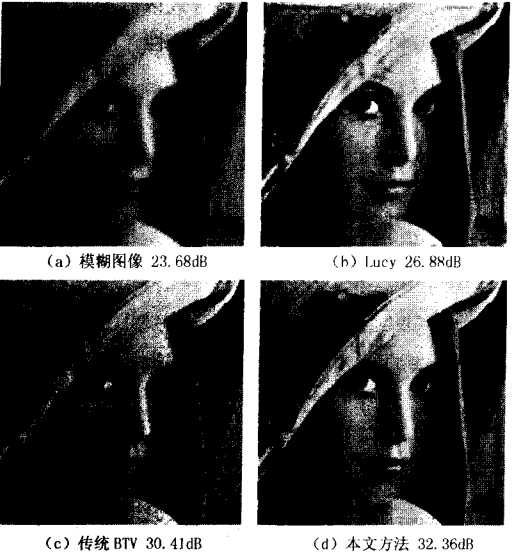


图 3 模糊半径 $r=5$ 时,对 Lena 图像不同方法效果比较

图 4 则给出了散焦模糊半径 $r=7$ 时对模糊文本图像得到的效果比较图。文本图像具有明显的局部分段光滑性,主要体现在具有较多的阶跃边缘,这就要求所用复原方法应具有较强的局部特征保持能力。由图 4 可看出,本文方法所得复原效果仍明显优于比较方法。由于引入了局部双边权值函数,使得所构造的目标函数充分考虑了图像的局部结构特征,因此获得了最优的复原结果。

最后,表 1 列出了两幅实验图像在不同模糊程度下利用本文方法和比较方法所得复原结果的 PSNR 值。由表 1 可知,本文所提复原方法获得的客观性能同样明显优于比较方法,这与主观视觉效果也是一致的。

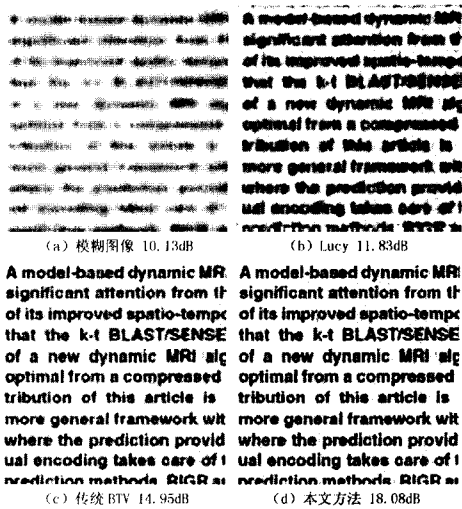


图 4 模糊半径 $r=7$ 时,对模糊文本图像不同方法效果比较

表 1 Lena 和文本图像不同复原方法客观性能比较

图像	r	PSNR(dB)			
		模糊图像	Lucy 方法	文献[2]	本文方法
Lena	3.0	26.63	30.22	33.17	34.90
	5.0	23.68	26.88	30.41	32.36
	7.0	22.15	24.91	28.29	30.59
	10.0	20.66	23.15	26.58	28.83
文本	3.0	11.59	15.50	20.19	26.26
	5.0	10.15	13.89	16.91	21.57
	7.0	10.13	11.83	14.95	18.08
	10.0	9.54	11.02	12.61	15.29

结束语 本文研究了一种新的散焦模糊图像复原方法。由于图像的主观视觉质量与图像局部结构信息密切相关,因此在复原过程中应充分考虑图像的局部结构特征。本文所得到的新的复原目标函数正是从此点出发,由于引入了具有结构自适应的双边权值函数并结合经典的 BTV 正则化模型,使得所构造的目标函数在全局保真下充分考虑了图像的局部结构特征。从而能更有效地保持图像的细节边缘特征,实验结果证实了所提方法的有效性。

参 考 文 献

[1] Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. Journal of the Optical Society of America,1972,62 (1):55-59

[2] Elad M,Feuer A. Restoration of single super-resolution image from several blurred, noisyy and down-sampled measured images [J]. IEEE Trans. Image Process, 1997, 6:1646-1658

[3] Rudin L, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. Physica D,1992,60:259-268

[4] Chan T F, Wong C K. Total variation blind de-convolution [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1998, 3(7):370-375

[5] Babacan S D, Molina R, Katsaggelos A K. Total Variation Image Restoration and Parameter Estimation Using Variational Posterior Distribution Approximation [C]//IEEE International Conference on Image Processing. 2007, 1:97-100

[6] Farsiu S, Robinson M D, Elad M, et al. Fast and Robust multi-frame super resolution [J]. IEEE Transaction on Image Process, 2004, 13(10):1327-1344

[7] 贾圣兰,杨静宇,苏光大. 文本图像的双边总变分超分辨率恢复方法 [J]. 计算机科学, 2007, 34(11):201-204

[8] Elad M. On the Bilateral Filter and Ways to Improve It[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2002, 11(10):1141-1151