

〈图像处理与仿真〉

自适应加权的总变分正则化图像超分辨率重建

蒋晓慧^{1,2}, 赵勋杰¹, 李成金^{1,2}, 张雪松²

(1.苏州大学 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006;

2.光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 燕郊 065201)

摘要: 在 Farsiu 提出的双边总变分正则化方法中, 尺度加权系数和正则化参数为定值, 在边缘、纹理区域, 重建图像效果不理想。针对这个问题, 提出了一种自适应加权正则化函数和正则化参数的重建算法, 该方法利用图像局部结构信息控制权函数形状、带宽和正则化参数, 使这些参数根据图像局部结构信息自适应地调整。对所提出的算法进行了仿真实验, 实验结果表明, 与传统的总变分重建方法相比较, 该算法能更好地重建图像的纹理细节, 重建图像的对比度高。

关键词: 超分辨率重建; 自适应加权; 总变分; 正则化参数

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)04-0290-04

A Super-Resolution Algorithm Based on Adaptive Weighted Total Variation

JIANG Xiao Hui^{1,2}, ZHAO Xun-jie¹, LI Cheng-jin^{1,2}, ZHANG Xue-song²

(1.School of Physical Science and Technology, Soochow University, Jiangsu Suzhou 215006;

2.Science and Technology on Electro-optical Security Laboratory, Hebei Yanjiao 065201)

Abstract: In bilateral total variation regularization method (BTV), which was proposed by Farsiu, the scale weight is a constant, so the image reconstruction effect is not ideal for texture and edge region. In order to solve this problem, an adaptive weighted regularization function and regularization parameter algorithm is proposed in this paper. In the proposed algorithm, the local structure information of image is used to control the shape, bandwidth of the weighted function and the regularization parameter. The experimental results show that the proposed algorithm, compared with BTV, can retain the image details better and improve the image contrast.

Key words: super resolution reconstruction, adaptive weight, total variation, regularization parameter

0 引言

图像超分辨率 (super resolution, SR) 重建是通过对多帧具有互补信息的低分辨率图像进行处理, 重建出一幅或多幅高分辨率图像。利用 SR 重建技术可以提高现有成像系统的空间分辨力, 因此, SR 技术在红外成像、医疗影像、视频监控、遥感图像识别等诸多领域有着广泛的应用前景^[1]。

从数学的角度看, 超分辨率重建问题是一个典型的不适定问题^[2-3]。对于不适定问题的求解, 正则化方法是非常有效的。正则化方法就是通过加入不同性质的先验信息来约束重建过程, 以保证求解过

程的稳定性, 从而将超分辨率图像重建由不适定转化为适定。

总变分 (Total variation, TV) 超分辨率重建方法最早由 Osher 等^[4]提出, 实验证明该超分辨率重建方法能够有效地去噪和消除模糊。但 TV 方法在强噪声下图像的平滑区域会产生阶梯效应, 而且不能很好的保持图像的纹理信息。随后, Farsiu 等^[5]在 TV 方法的基础上又提出双边总变分 (Bilateral Total Variation, BTV) 正则化方法。在 BTV 正则化方法中引入了值域和空域双约束, 所以双边总变分方法比总变分方法有更好的重建效果。但是 BTV 方法是分别对值域和空域进行滤波, 并且尺度加权系

收稿日期: 2013-11-16; 修订日期: 2014-02-27。

作者简介: 蒋晓慧 (1989-), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 研究方向为计算机视觉及应用。

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目。

数为一定值，没有考虑图像的局部结构特征，在边缘和纹理区域重建图像效果不理想。针对这种情况，本文对 BTV 方法进行改进，首先用可控核函数^[6]取代固定核函数，即核函数的带宽和取向均随图像的局部纹理特征而变化；其次，用自适应正则化参数取代固定的正则化参数，以避免取值的主观性。

1 正则化重建方法

假设有 N 幅低分辨率观测图像 $\{Y_k\}_{k=1}^N$ ，每幅图像大小为 $M_1 \times M_2$ ， X 为高分辨率图像，大小为 $rM_1 \times rM_2$ ， r 为采样因子，且 $r > 1$ 。它们之间的关系由公式表示如下：

$$Y_k = \mathbf{D}\mathbf{H}\mathbf{F}_k X + V_k, \quad k=1,2,3,\dots,N \quad (1)$$

式中： \mathbf{D} 为下采样矩阵； \mathbf{H} 为模糊矩阵； \mathbf{F}_k 为几何变换矩阵； \mathbf{V}_k 为系统噪声。

根据式(1)表示的观测模型，定义一个代价函数来估计高分辨率图像 X 。代价函数的作用是使解与高分辨率图像具有一定的相似度，最常用的是最小二乘代价函数^[7]，它使观测残差的 q 阶范数最小化：

$$\hat{X} = \arg \min_X \sum_{k=1}^N \|Y_k - \mathbf{D}\mathbf{H}\mathbf{F}_k X\|_q^q \quad (2)$$

上式所得估计 \hat{X} 是 X 的极大似然估计。

在代价函数中加入一个正则化项 (regularization term) 以约束解空间获得问题的稳定解。正则化方程如下：

$$\hat{X} = \arg \min_X \left(\sum_{k=1}^N \|Y_k - \mathbf{D}\mathbf{H}\mathbf{F}_k X\|_q^q + \lambda U(X) \right) \quad (3)$$

式中： $\sum_{k=1}^N \|Y_k - \mathbf{D}\mathbf{H}\mathbf{F}_k X\|_q^q$ 表示数据拟合项； $U(X)$ 为正则项； λ 为正则化参数，是调节数据拟合项和正则项权重的参数，正则化参数 λ 既可以根据经验选取一个确定的值，也可以用相关算法确定。

采用正则化方法进行超分辨率重建需要解决两个问题：第一是正则化函数 $U(X)$ 的确定，选择的正则化函数，既要有效地去除噪声，还要很好的保留图像的细节；第二是正则化参数 λ 的确定。对于正则

化重建算法中的正则化参数的选取是很重要的^[8]，如果 λ 过大，会使得重建后的图像过于平滑，不能保留图像的细节信息；如果过小，则不能很好的抑制噪声。合理的选择是：在边缘和纹理区域，选择比较小的 λ ，而在平滑区域，选择比较大的 λ 。

Farsiu 等^[5] 在 TV 正则化的基础上，提出了双边滤波正则化方法（即 BTV），其正则化函数为：

$$U_{\text{BTV}}(X) = \sum_{l=-p}^p \sum_{m=0}^p \alpha^{|m|+|l|} \|X - S_x^l S_y^m X\| \quad (4)$$

式中： p 为选取窗口的半径， S_x^l 和 S_y^m 分别为图像沿 x 和 y 方向分别平移 l 和 m 个像素算子， α 为尺度加权系数，取值范围(0,1)。

2 本文采用的正则化函数和参数

我们注意到式(4)中的 α 为定值，也就是说在离中心像素点相同距离的像素的加权系数值是相同的，这种处理在很多情况下是不合理的，比如，对于边缘像素的重建，沿边缘方向和垂直边缘方向（相同距离处）的像素的权重显然不应该相同，核函数的形状和带宽应该根据图像边缘取向自适应的改变。此外，BTV 方法中正则化参数也没有自适应于图像的局部特征。本文在 BTV 方法的基础上，对其中的正则化函数和参数进行改进，使二者随图像局部特征自适应地变化。

首先，我们用文献[6]给出的可控核代替尺度加权系数 α ，该可控核为：

$$K_{H_i}(X_i - X) = \frac{\sqrt{\det(C_i)}}{2\pi h^2 \mu_i^2} \exp \left\{ -\frac{(X_i - X)^T C_i (X_i - X)}{2h^2 \mu_i^2} \right\} \quad (5)$$

式中： C_i 是局部灰度值的协方差矩阵， h 为平滑参数， μ_i 为局部采样密度参数。由文献[6]我们知道， C_i 决定了核函数的尺度参数 γ_i 、旋转参数 θ_i 和拉伸参数 σ_i ；尺度参数 γ_i 在平滑区域较小，在纹理区域较大。图 1 说明了这 3 个参数对核的作用。

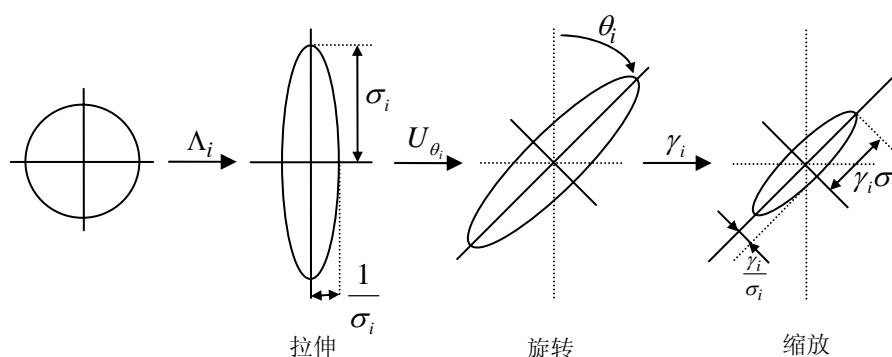


图 1 C_i 对核函数尺度、形状的作用

Fig.1 The effects of the steering matrix on the size and shape of the regression kernel

本文构建的正则化函数如下：

$$U(X) = \sum_{l=-p}^p \sum_{m=-p}^p K_{H_i}(V) \|X - S_x^l S_y^m X\| \quad (6)$$

式中： V 为相对位移量，在 x 和 y 的坐标下分别为 l 和 m 。可控核根据图像局部图像数据的主导方向建立核函数，更合理地确定邻域像素的权重，从而能更好地保持图像边缘信息。

此外，本文构建自适应正则化参数如下：

$$\lambda(\gamma_i) = \frac{c}{\gamma_i^b + e} \quad (7)$$

式中： e 、 c 为控制常数； b 为大于零的常数，取值根据实验确定。由(7)式给出的正则化参数，在平滑区域较大，在边缘和纹理区域较小。

将式(6)和式(7)代入式(3)得：

$$X = \arg \min_X \left\{ \sum_{k=1}^N \|Y_k - DHF_k X\|_1 + \lambda(\gamma_i) \sum_{l=-p}^p \sum_{m=-p}^p K_{H_i}(V) \|X_n - S_x^l S_y^m X_n\| \right\} \quad (8)$$

3 实验结果及分析

实验一选择分辨率为 120×120 的 EIACen 图像依次进行平移、模糊、欠采样并加入噪声生成 10 幅分辨率为 60×60 的低分辨率图像，其中模糊函数为 3×3 ，方差为 1 的高斯核函数。实验步骤为：首先采用文献[9]的方法进行图像配准，估计变换矩阵 F_k ，然后采用 3 次样条 2 倍插值图像作为高分辨率图像初始估计，最后利用最速下降法迭代求解（迭代步长为 β ）。

图 2(a)为一帧低分辨率图像，图 2(b)和图 2(c)

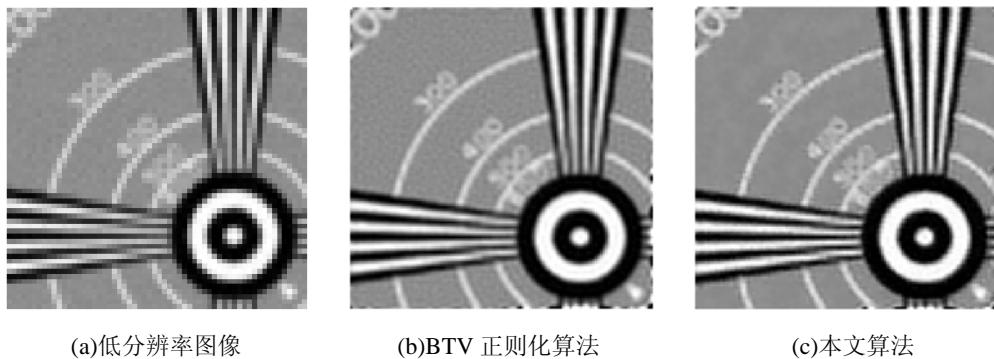


图 2 图像重建结果比较 Fig.2 Comparison of reconstruction

表 1 实验结果衡量标准对比 Table 1 Comparison of measurement criteria

方法	BTV 正则化算法	本文算法
PSNR/dB	16.0402	16.2754

分别给出了 BTV 正则化算法和本文算法重建图像。

BTV 正则化算法中， $\alpha=0.6$ ， $\lambda=0.005$ ， $p=2$ ， $\beta=1$ ；本文算法中，我们取 $p=2$ ， $\beta=1$ ， $c=0.01$ ， $e=0.0001$ ， $b=3$ （实验结果显示，当 $b=3$ 时，PSNR 值最大）。可以看出，本文算法比 BTV 算法更好的保留了图像的边缘信息。为了客观地评价超分辨率重建图像的效果，我们还计算了图像的 PSNR，结果列在表 1 中，可以看出本文算法的 PSNR 大于对比算法，也说明了本文算法的有效性。

实验二所选用的图像序列是取自文献[5]的 disk 序列。实验步骤同实验一。图 3 所示为 disk 图像序列重建的结果的比较。图 3(a)为采用 BTV 正则化得到的重建结果，其中 $\alpha=0.5$ ， $\lambda=0.005$ ， $p=2$ ， $\beta=1$ ；图 3(b)为采用本文算法得到的重建结果，其中 $p=2$ ， $\beta=1$ 。从主观视觉上看，本文算法重建出来的图像，边缘细节保持的较好。平均梯度计算也说明了这一点，BTV 算法重建图像的平均梯度为 5.7020，本文算法的为 6.5509。

4 结束语

本文提出了一种自适应正则化函数和正则化参数的重建算法，其主要为：一是利用可控核作为尺度加权系数，自适应的确定邻域像素的权值；二是利用可控核的尺度参数构建正则化参数，使其根据图像局部结构信息自适应地调整，以保证取值的合理性。实验结果表明，本文算法能更好的重建图像的边缘和纹理信息，提高图像的对比度。

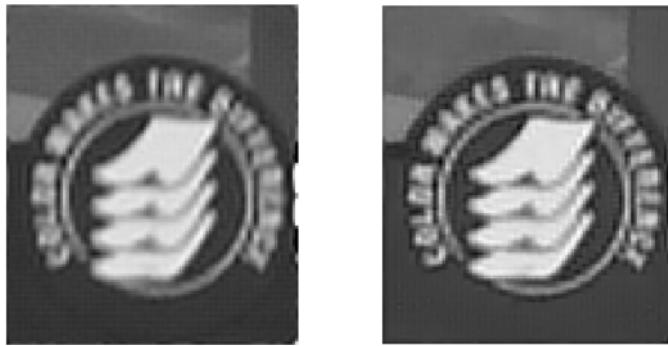


图3 disk 图像序列超分辨率重建结果的比较

Fig.3 The comparison of results for super-resolution reconstruction to ‘disk’ image sequence

参考文献：

- [1] Park C S, Park K M, Kang G M. Super-resolution image reconstruction: a technical overview[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2003, **20**(3): 21-36.
- [2] Elad M, Feuer A. Restoration of a single super-resolution image from several blurred, noisy, and undersampled measured images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, **6**(12): 1646-1658.
- [3] 江静, 张雪松. 图像超分辨率重建算法综述[J]. 红外技术, 2012, **34**(01):24-30.
- [4] Rudin L, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. *Physical Review D*, 1992, **60**: 259-268.
- [5] Farsiu S, Robinson M D. Fast and robust multi-frame super resolution[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(10): 1327-1344.
- [6] Takeda H, Farsiu S, Milanfar P. Kernel regression for image processing and reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16**(2): 349-366.
- [7] 韩玉兵. 基于正则化处理的超分辨率重建[D]. 南京: 东南大学, 2007.
- [8] Kang M G, Katesaggelos A K. General choice of the regularization functional in regularized image restoration[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, **4**(5): 594-602.
- [9] Lucchese L, Cortelazzo G M. A noise-robust frequency domain technique for estimating planar roto-translations[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, **48**(6): 1769-1786.