

一种基于正则化技术的超分辨影像重建方法

沈焕锋 李平湘 张良培

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要 超分辨率影像重建已经成为近年来人们广泛研究的热点,利用超分辨率重建技术,可以得到分辨率高于原始影像的重建影像。为此,提出了一个利用多幅具有亚像素位移的低分辨率欠采样影像重建一幅高分辨影像的超分辨率重建方法。该方法利用正则化技术,通过迭代运算求解重建影像的最优解。在迭代过程中,得到的重建影像用于求解下一次迭代的正则化参数,不断的循环迭代,最后求解出重建影像的最优解。对 Lena 影像进行了处理,并用 PSNR 影像评价方法对重建影像进行了定量评价。实验结果证明,该方法能较大幅度地减弱噪声对重建结果的影响,当重建比率较大时,仍可得到高质量的高分辨率重建影像。

关键词 超分辨率 影像重建 正则化

中图分类号: TP751 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)04-0436-05

A Regularized Super-resolution Image Reconstruction Method

SHEN Huan-feng, LI Ping-xiang, ZHANG Liang-pei

(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping & Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract Super-resolution image reconstruction has been one of the most active research areas in recent years. In this paper, a super-resolution solution is proposed to the problem of obtaining a high resolution image from several low resolution images that have been subsampled and displaced by different amounts of sub-pixel shifts. The method is based on the regularization technique, solving the constrained optimization by proposed iteration steps. At each iteration step, the regularization parameter is determined using the partially reconstructed image solved at the last step. The proposed algorithm is tested on synthetic images, and the reconstructed images are evaluated by a PSNR method. The results indicate that the proposed algorithm has considerable effectiveness in terms of both objective measurements and visual evaluation.

Keywords super resolution, image reconstruction, regularization

1 引言

高分辨率的影像能更详细地表示景物的细节信息,在诸多领域(如计算机视觉、遥感、医学等)有着广泛的应用。目前,高分辨率影像主要通过改进高精度的光学器件及传感器等硬件设备来获得。然而,高精度硬件设备代价昂贵,人们往往希望在付出较低经济代价的前提下获得较高分辨率的影像。另外,由于传感器散粒噪声的影响,通过改进硬件设备

性能的途径并不能无限地提高获取影像的分辨率,而是有一个技术极限,当前的影像传感器技术已经较为接近这个技术极限^[1]。于是,通过软件途径来得到高分辨率影像的超分辨率(SR)重建技术已经成为人们广泛研究的热点。

早期的超分辨率重建技术主要是针对单幅影像复原而言的,单幅影像复原技术经过长期的发展已经形成一套统一的理论框架,但这种方法固有的局限性严重阻碍了图像复原效果的大幅度提高^[2]。

Tsai 和 Huang 首先提出用多幅欠采样影像来提

基金项目:国家自然科学基金(40471088);国家“973”项目(2003CB415205)

收稿日期:2004-05-21;改回日期:2004-09-24

第一作者简介:沈焕锋(1980~),男。2002年毕业于武汉大学测绘学院,现为武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士研究生。主要从事摄影测量与遥感、图像处理和地理信息系统等方面的研究。E-mail:shenhf@whu.edu.cn

高影像空间分辨率的频率域方法^[3]。之后,相继产生了多种超分辨率重建方法,如非均匀内插法^[4]、迭代反投影法^[5]、凸集投影(POCS)法^[6,7]、统计复原方法(最大似然估计(ML)方法^[8]和最大后验估计(MAP)方法^[9])、混合MAP(or ML)/POCS方法^[10,11]、以及自适应滤波方法^[12]等。

在文献[13]中,Fryer和McIntosh提出了一种超分辨率重建方法(本文中简称为FM方法),在此方法中,利用高、低分辨率影像像素之间严格的几何关系建立观测模型,模型的求解则基于最小二乘理论。该方法具有直观、与设备无关、无需先验约束条件等优点,处理后影像分辨率可以提高1.0~1.9倍。然而,该方法对噪声敏感,当原始影像中存在较大噪声时会对处理结果产生较大的影响,而且,即使在原始影像噪声较小,但重建比率相对较大(如大于1.6)时,处理结果也不理想,产生的高分辨率影像质量不高。因此,本文在FM方法的基础上,在求解过程中引入正则化技术,提出了一种正则化的求解方法,试图较大幅度地消除噪声产生的不利影响。

2 FM超分辨率重建方法

FM超分辨率重建方法主要分为以下几个步骤:

(1)选择用于超分辨率重建的低分辨率影像,并确定重建比率,其取值大于1小于2。

(2)如果所选的低分辨率影像之间的相对位移为未知,则任意选定一幅影像作为参考影像,通过影像配准技术确定其他影像与参考影像之间的相对位移。

(3)利用重建比率、影像之间的相对位移量和低分辨率影像的像素值,列出观测方程组,方程组中的未知量为所求高分辨率影像的像素值。

(4)用最小二乘法解求以上方程组,得出高分辨率影像,并显示结果。

在建立观测方程时,要把每一个低分辨率像素都投影到高分辨率影像像素坐标中,确定出每一个低分辨率像素对哪些高分辨率像素的求解产生影响,并以此为基础建立观测方程。图1为高、低分辨率影像的简略像素坐标图,重建比率为1.5。

如果将低分辨率影像的像素 $Y(1,1)$ 投影到高分辨率影像像素坐标中,它将覆盖高分辨率影像像

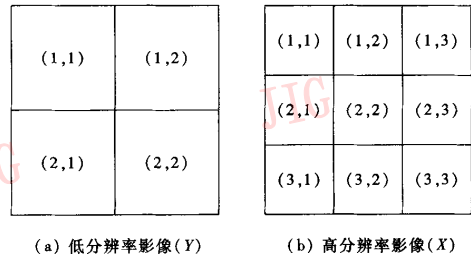


图1 低分辨率影像和高分辨率影像的像素坐标图

Fig. 1 Pixel coordinate of low and high resolution images

素 $X(1,1)$ 的全部、 $X(1,2)$ 和 $X(2,1)$ 的 $1/2$ 及 $X(2,2)$ 的 $1/4$,由此可得如下方程:

$$Y(1,1) = [X(1,1) + 0.5X(1,2) + 0.5X(2,1) + 0.25X(2,2)]/\rho^2 \quad (1)$$

式中, $Y(1,1)$ 为低分辨率影像像素值, $X(1,1)$ 、 $X(1,2)$ 、 $X(2,1)$ 和 $X(2,2)$ 为高分辨率影像的像素值, ρ 为重建比率。通过此方法,对每一个低分辨率影像的像素都可以建立一个观测方程,组成观测方程组。

于是,观测模型可以写为

$$y = Ax + n \quad (2)$$

式中, y 表示低分辨率影像像素矩阵; x 为高分辨率影像像素矩阵; A 为系数矩阵; n 为附加噪声。

基于最小二乘理论,所解的 x 要使误差的平方和为最小,即

$$x = \arg \min \|n\|^2 = \arg \min \|y - Ax\|^2 \quad (3)$$

方程式(2)的解为

$$x = [A^T A]^{-1} A^T y \quad (4)$$

通过以上过程求得 x ,得到高分辨率的重建影像。

3 正则化求解方法

利用式(4)进行超分辨率重建,虽然理论上分辨率可以提高1.1~1.9倍,但是随着重建比率的增加,已知量(低分辨率影像像素数量之和)不变,未知量(高分辨影像像素数量)增加,使得方程的超定性变弱。因此文献[13]认为,当重建比率大于1.6时,产生的高分辨率影像并不可靠。另外,当原始的分辨率影像噪声较大时,即使重建比比较小,重建的高分辨率影像也不理想。为此,提出一种利用正则化技术解决的方案。

3.1 正则化影像复原的基本原理

正则化影像复原可以看作是约束最优化问题,即式(3)改写为

$$\mathbf{x} = \arg \min \{ \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}\|^2 + \alpha \|\mathbf{C}\mathbf{x}\|^2 \} \quad (5)$$

其中, α 为正则化参数; \mathbf{C} 为正则算子, 一般为高通滤波算子。为起到平滑噪声的作用, 选择一个 2 维的拉普拉斯算子, 即

$$\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} = f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y) \quad (6)$$

此时, 方程式(2)的约束解为

$$\mathbf{x} = [\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \alpha \mathbf{C}^T \mathbf{C}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (7)$$

通过上式计算, 可以得到影像带有约束条件的

优化解。

3.2 正则化参数 α 的选择

在式(5)中, 正则化参数 α 控制着 $\|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}\|^2$ 和 $\|\mathbf{C}\mathbf{x}\|^2$ 在求解过程中的相对贡献量, 约束着重建影像的失真度和平滑度^[14]。如果 α 选得过小, 则噪声问题没有得到很好地解决, 重建影像仍会失真较大; 如果 α 过大, 则重建影像会过于平滑, 造成影像细节的消失。

为了验证 α 对处理结果的影响, 利用一幅 SPOT 卫星影像进行超分辨率重建的实验。实验中, 正则化参数 α 分别选为 10^{-6} 、 10^{-3} 和 10^{-1} , 实验结果如图 2 所示。通过比较, 可以看出不同的 α 将对重建影像产生较大的影响。

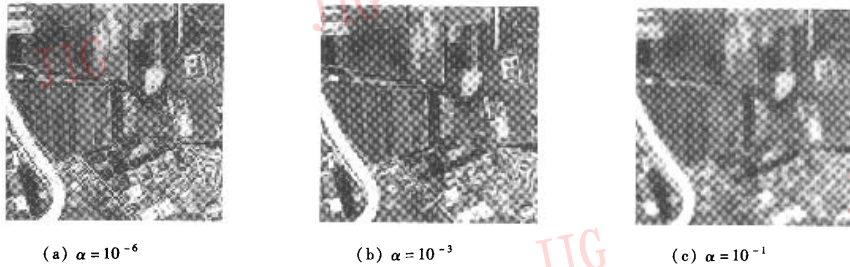


图 2 选取不同的 α 处理结果对比图

Fig. 2 Results of different α

由此可见, α 的选择非常关键, 它直接影响着重建影像的质量。为此给出一种求解 α 并进行影像重建的方法, 主要思路是通过迭代过程, 不断更新 α 和重建影像, 新得到的重建影像将被用于求解下一次迭代的 α 。如此循环迭代, 最后求解出重建影像的最优解。

在建立正则化参数 α 的求解公式时, α 应满足以下 3 种基本属性:

- (1) α 大于 0;
- (2) α 与 $\|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}\|^2$ 成正比关系;
- (3) α 与 $\|\mathbf{C}\mathbf{x}\|^2$ 成反比关系。

根据以上特点, 本文给出 α 的求解公式:

$$\alpha_{k+1} = \ln \left(\lambda \frac{\|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}_k\|^2}{\|\mathbf{C}\mathbf{x}_k\|^2 + r} + 1 \right) \quad (8)$$

式中, α_{k+1} 为第 $k+1$ 次迭代的正则化参数; \mathbf{x}_k 为第 k 次迭代所求得的重建影像; r 是一个很小的数, 用于保证分母不为零; λ 为步长修正因子。较小的 λ 将使迭代过程过慢, 减弱了处理的效率; 较大的 λ 会使迭代过程过快, 错过最优值, 从而影响了重建质

量。通过对多幅影像的实验证明, 较好的步长修正因子是 $\lambda = 0.01$ 。

3.3 迭代求解

在迭代求解过程中, 正则化参数 α 确定后, 可以直接利用式(7)来求解本次迭代的高分辨率重建影像。但是, 由于式(7)中存在着矩阵的求逆运算, 如果每次迭代都用它来进行计算, 计算量会非常大, 因此采用如下式进行迭代求解:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + [\mathbf{A}^T \mathbf{y} - (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \alpha_{k+1} \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \mathbf{x}_k] \quad (9)$$

这样就充分利用了上一次迭代求解的重建影像, 避免了矩阵的求逆运算, 运算效率大幅度提高。可以看出, 当 \mathbf{x}_{k+1} 和 \mathbf{x}_k 非常接近时, 式(9)即为式(7)。

在迭代过程中, 当相邻两次迭代求解重建影像的差异小于设定阈值时, 就终止迭代, 终止条件为

$$\|\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k\|^2 / \|\mathbf{x}_k\|^2 \leq d \quad (10)$$

式中, d 为终止迭代的阈值。

通过以上的迭代过程来求解重建影像, 能够较大幅度地消除噪声对结果的影响, 从而得到高质量的高分辨率影像。

4 实验与分析

4.1 处理方式与评价方法

以 Lena 影像为例来对 FM 方法和本文方法进行实验。在算法实现过程中,两种方法都采用分块计算的方式,分块大小为 $10\rho \times 10\rho$ (ρ 为重建比率)。同时,为了减小分块边缘噪声的影响,相邻分块之间有 3 个像素的重叠。

采用 PSNR 影像评价方法对重建影像进行定量评价

$$PSNR = 10\log_{10}\left(\frac{255^2 N}{\|\hat{x} - x\|^2}\right) \quad (11)$$

式中, N 为影像像素的总数量, x 和 \hat{x} 分别为参考影像和被评价影像。

4.2 重建比率 ρ 的影响

利用 FM 方法对影像进行超分辨率重建,当重建比率 ρ 较大时,由于方程超定性减弱,重建的影像并不可靠。为了验证本文方法在这方面的优越性,采用图 3 所示的方法对影像进行处理和评价:首先

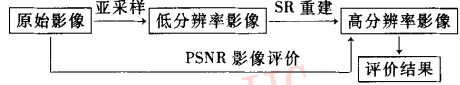


图 3 影像处理、评价流程图

Fig. 3 The flow chart of image process and evaluate

对原始影像进行亚采样,采样比率为 $1/\rho$,得到 4 幅有亚像素位移的低分辨率影像;然后对低分辨率影像进行超分辨率重建,重建比率为 ρ ,即得到和原始影像大小相同的重建影像;最后用 PSNR 影像评价方法对重建影像进行评价,输出评价结果。

实验中,重建比率分别选择为 1.5、1.6、1.7 和 1.8,用 FM 方法和本文方法分别进行处理、评价,评价结果如表 1 所示。同时,原始 Lena 影像和重建比率为 1.5、1.8 时的低分辨率影像和高分辨率重建影像如图 4 所示。

表 1 不同重建比率重建结果评价表

Tab. 1 Results of different construction ratio

	$\rho = 1.5$	$\rho = 1.6$	$\rho = 1.7$	$\rho = 1.8$
FM 方法	34.903	32.901	28.883	21.113
本文方法	34.915	33.432	32.232	31.783



(a) 原始影像

(b) 低分辨率影像($\rho = 1.5$)

(c) 低分辨率影像($\rho = 1.8$)



(d) FM 方法重建影像($\rho = 1.5$)

(e) 本文方法重建影像($\rho = 1.5$)

(f) FM 方法重建影像($\rho = 1.8$)

(g) 本文方法重建影像($\rho = 1.8$)

图 4 没有噪声干扰的 Lena 影像重建结果对比图

Fig. 4 Experiment results without noise

从表 1 和图 4 可以看出,当重建比率较低时,本文方法的优势并不大,随着重建比率的增加,优势愈加明显。如当重建比率 $\rho = 1.8$ 时,利用 FM 方法得到的重建影像部分细节出现畸变,而且受分块边缘噪声的影响较大;而在相同的条件下,利用本文算法

则得到了较为理想的重建影像,PSNR 评价结果从 21.113dB 提高到 31.783dB。

4.3 噪声的影响

以上实验是在原始影像没有噪声或噪声很小的情况下进行的,为了进一步验证本文算法,对 $\rho = 1.5$

时的 4 幅低分辨率影像分别加入 2% 的高斯噪声, 然后用 FM 方法和本文方法分别进行了超分辨率重建, 结果如图 5 所示。从视觉效果看, 利用本文方法处理得到的结果要好于 FM 方法处理的结果。同样采用 PSNR 影像评价方法对两幅影像进行了定量评

价, 评价结果分别为 19.571dB 和 26.219dB。由此可见, 在原始低分辨率影像噪声较大时, FM 方法对噪声较为敏感, 重建影像质量不高; 而本文提出的方法受噪声影响较小, 重建影像的质量得到了较大的提高。



图 5 高斯噪声干扰下的 Lena 影像处理结果对比图

Fig. 5 Experiment results with noise

5 结 论

基于正则化技术的超分辨率重建方法, 考虑了噪声对重建结果的影响。实验结果证明, 当重建比率较大时, 利用该方法仍可得到无明显畸变、质量较好的高分辨率重建影像; 同时, 当原始低分辨率影像存在较大噪声时, 能较大地减弱噪声对重建结果的影响, 使重建影像的信噪比得到较大程度的提高。

参考文献 (References)

- 1 Park S C, Park M K, Kang M G. Super-resolution image reconstruction: a technical overview [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(3): 21 ~ 36.
- 2 Xinming Z, Lansun S. The development of super resolution restoration from image sequences [J]. Measure and Control technique, 2002, 21(5): 33 ~ 35. [张新明, 沈兰荪. 超分辨率复原技术的发展[J]. 测控技术, 2002, 21(5): 33 ~ 35.]
- 3 Tsai R Y, Huang T S. Multiple frame image restoration and matching [A]. In: Advances in Computer Vision and Image Processing [M], Greenwich, CT: JAI Press, 1984: 317 ~ 339.
- 4 Clark J J, Palmer M R, Laurence P D. A transformation method for the reconstruction of functions from nonuniformly spaced samples [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Processing, 1985, 33(5): 1151 ~ 1165.
- 5 Irani M, Peleg S. Improving resolution by image matching [J]. Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(3): 231 ~ 239.
- 6 Stark H, Oskoui P. High resolution image recovery from image-plane

arrays, using convex projections [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1989, 6(11): 1715 ~ 1726.

- 7 Tekalp A M, Ozkan M K, Sezan M I. High-resolution image reconstruction from lower-resolution image sequences and space varying image restoration [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference of Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) [C], San Francisco, CA, 1992: 169 ~ 172.
- 8 Tom B C, Katsaggelos A K. Reconstruction of a high-resolution image by simultaneous matching, restoration, and interpolation of low-resolution images [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference of Image Processing [C], Washington, DC, 1995, 2: 539 ~ 542.
- 9 Schulz R R, Stevenson R L. Extraction of high-resolution frames from video sequences [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(6): 996 ~ 1011.
- 10 Elad M, Feuer A. Restoration of a single superresolution image from several blurred, noisy, and undersampled measured images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1646 ~ 1658.
- 11 Su Bing-hua, Jin Wei-qi. POCS-MPMAP based super-resolution image restoration [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(5): 502 ~ 504.
- 12 Elad M, Feuer A. Super resolution restoration of an image sequence: adaptive filtering approach [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(3): 387 ~ 395.
- 13 Fryer J, McIntosh K. Enhancement of image resolution in digital photogrammetry [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(6): 741 ~ 749.
- 14 Kang M G, Katsaggelos A K. General choice of the regularization functional in regularized image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(5): 594 ~ 602.