

# 基于小波双三次插值提高光学遥感图像空间分辨率的研究\*

屈有山 田维坚 李英才 张薇 达选福

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

**摘要** 为了尽可能的保持光学遥感图像的原始信息,提高图像的空间分辨率,有利于对图像的细节信息进行观察分析,本文提出了小波双三次插值方法,并将其应用于提高光学遥感图像空间分辨率.实验结果表明,该算法得到了比全小波插值和小波双线性插值更高的峰值信噪比和更好的图像细节效果,是一种适合提高光学遥感图像分辨率的有效算法.

**关键词** 小波双三次插值;小波变换;相似变换;空间分辨率

**中图分类号** TN911.73 **文献标识码** A

## 0 引言

在光学遥感中,人们总是希望在现有设备条件下,通过插值的方法提高原始图像的空间分辨率,改善图像细节,有利于人眼观察分析<sup>[1]</sup>.遥感图像具有数据量大、信息丰富、熵值较大的特点<sup>[2]</sup>,而光学遥感图像的目视解释又是遥感图像解释最基本的方法,因此要求在尽可能的保持原始图像信息情况下,对原始图像进行处理使其更适合于人眼观察.

目前常用的图像插值方法有分形插值法、最邻近插值法、双线性插值法、双三次插值法等<sup>[3]</sup>.直接使用这些插值方法对原始图像进行处理,可以使图像的视觉效果得到一定的改善,但是由于这些算法只考虑了图像像素邻近点的相关性,未考虑全局相关性.插值后的图像在改变图像视觉效果的同时,又一定程度上损坏了原始图像的高频细节信息.最近提出的小波双线性插值方法<sup>[1]</sup>,是将小波变换与双线性插值法结合的一种新算法.由于小波变换和小波逆变换是全局的,所以比较有效的克服了单纯插值法对原始图像进行插值存在局部受损的缺陷,但是该算法在进行高频成份相似性外推时采用的是双线性插值法,而双线性插值不是曲面拟合,所以双线性插值会使图像的高频成份受损<sup>[3]</sup>,所以该算法在进行全局处理前已经破坏了图像的高频细节,使图像的部分丰富细节丢失或破坏.为了有效的避免图像失真,本文提出了小波双三次插值算法.算法采用放大倍数小于 $10 \times 10$ 时,放大图像不失真的双三次插值算法代替双线性算法做小波分解后高频外推的

相似变换,使外推的图像能够有效的保持原始图像的高频细节,同时提高图像的空间分辨率,使处理后的图像更加有利于人眼观察.

## 1 图像的小波分解与重构算法

Mallat 提出了小波的快速分解与重构算法<sup>[4,5]</sup>,利用两个一维滤波器对二维图像实现快速小波分解,再利用分解时的两个一维滤波器的镜像滤波器来实现图像的重构.

设二维图像为

$$f = f(x, y) \in (V_0 \otimes V_0) \quad (1)$$

从 $(V_0 \otimes V_0)$ 到子空间 $(V_1 \otimes V_1), (V_1 \otimes W_1), (W_1 \otimes V_1), (W_1 \otimes W_1)$ 的投影算子为 $A_1, D_1^1, D_1^2, D_1^3$ ,则有

$$f(x, y) = A_1 f + D_1^1 f + D_1^2 f + D_1^3 f \quad (2)$$

图像经过 $J$ 步( $J > 0$ )小波分解之后为

$$f(x, y) = A_0 f = A_{-1} f + \sum_{j=-1}^{-J} \sum_{i=1}^3 D_j^i f \quad (3)$$

按照 Mallat 算法,其中投影算子矩阵具有如下的迭代关系

$$\begin{cases} C_j = H_r H_c C_{j+1} \\ D_j^1 = H_r G_c C_{j+1} \\ D_j^2 = G_r H_c C_{j+1} \\ D_j^3 = G_r G_c C_{j+1} \end{cases} \quad (j = 0, -1, \dots, -J) \quad (4)$$

矩阵 $H_r, H_c$ 和 $G_r, G_c$ 分别为对行和列操作的低通和高通滤波器, $D_j^i (i = 1, 2, 3)$ 则代表了图像的高频部分,即图像细节信息.

对应的二维图像的重构算法为

$$C_{j+1} = H_r^* H_c^* C_j + H_r^* G_c^* D_j^1 + G_r^* H_c^* D_j^2 + G_r^* G_c^* D_j^3 \quad (5)$$

式中 $H_r^*, H_c^*, G_r^*, G_c^*$ 分别是 $H_r, H_c, G_r, G_c$ 共轭转置矩阵,即镜像滤波器. Mallat 小波分解及重构算法可把任何二维图像 $f(x, y) \in L^2(R)$ 分解为分辨率为 $2^{-N}$ 下 $f(x, y)$ 的低频部分和分辨率为 $2^{-j} (-1 \leq j \leq$

\*“十五”项目(863-2002AA731264)与中国科学院创新基金项目资助

Tel: 029-88079375 Email: quyoushan@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-05-16

$N$ )下  $f(x,y)$  的高频部分,并可由以上各部分完全重构原始图像.

## 2 小波双三次插值算法

图像经过小波分解后,原始图像被分解成沿水平、垂直和对角三个方向的一系列高频信号带图像与一个低频图像,其中同一方向的高频图像信号之间具有相似性.小波图像插值就是利用这种相似性,进行高频外推,然后利用小波反变换重构出比原始图像分辨率更高的插值图像.

小波分解图像的过程如下:设原始图像为  $IL$ ,第一次分解为

$$[IL1, IH1, IV1, ID1] = DWT(IL) \quad (6)$$

第二次分解为

$$[IL2, IH2, IV2, ID2] = DWT(IL1) \quad (7)$$

其中  $IH1, IH2$  为水平高频细节;  $IV1, IV2$  为垂直高频细节;  $ID1, ID2$  为对角线方向高频细节;  $IL1, IL2$  为低分辨率图像;  $DWT$  为离散小波变换 ( $DWT$ —Discrete Wavelet Transform).将 cameraman 图像经过小波逐级分解成的不同分辨率图像如图 1.

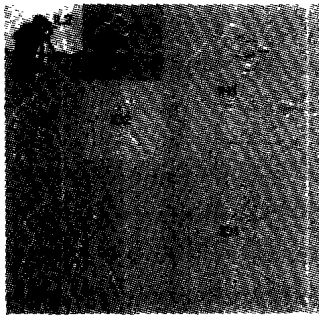


图1 cameraman 二级小波分解结果

Fig.1 The cameraman's wavelet decomposition at level 2

小波反变换过程为:对  $IL2, IH2, IV2, ID2$  进行小波反变换,重构高分辨率图像  $IL1$

$$IL1 = DWT^{-1}(IL2, IH2, IV2, ID2) \quad (8)$$

再对  $IL1, IH1, IV1, ID1$  反变换重构高分辨率图像  $IL$

$$IL = DWT^{-1}(IL1, IH1, IV1, ID1) \quad (9)$$

小波分解后水平、垂直、对角三个方向的细节图反映了原始图像在这三个方向上的边缘特征.由于边缘特征在同一个方向上的不同频带中的高频细节具有相似性,  $IH1, IV1, ID1$  分别相似于  $IH2, IV2, ID2$ ,所以知道一层分解的高频分量后,通过相似变换构造出更高层的高频分量,然后通过反变换可以得到分辨率更高的图像.不妨设原始图像为一低通滤波后得到的图像  $IL$ ,先通过小波变换把  $IL$  分解成  $IH1, IV1, ID1$  以及低频图像  $IL1$ ,然后采用相似变换外推得到高频细节  $IH, IV, ID$ ,再用小波反变换得到比原始图像分辨率更高的图像  $I$ .

$$I = DWT^{-1}(IL, IH, IV, ID) \quad (10)$$

如果高频相似外推采用的是双线性相似变换,然后进行小波重构的则称为小波双线性插值法<sup>[1]</sup>;如果高频相似外推采用的是双三次插值再进行小波重构的称为小波双三次插值法.双线性和双三次相似外推插值的计算公式可参考文献[3].

## 3 实验

为了说明小波双三次插值算法对光学遥感图像空间分辨率的改善能力,我们做了如下的实验.实验一,选择 testpat1 的局部作为重建实验的原始图像.先将图像用小波变换进行分解,然后从低分辨率边缘特性得到高分辨率边缘特性,并选择阈值 9 加以限制,再用小波逆变换重建高分辨率插值图像.为了比较插值效果,相似变换分别用了尺度函数插值、双线性插值和双三次插值的方法,分别称为全小波插值<sup>[6]</sup>、小波双线性插值和小波双三次插值.其中全小波插值算法是将原始图像作为小波重构的低频图像,水平、垂直和对角高频分量全部直接取零,然后进行小波逆变换,重构得到比原始图像分辨率更高的图像.小波双线性插值和小波双三次插值在上一节已经阐明.原图及重建结果如图 2 所示.

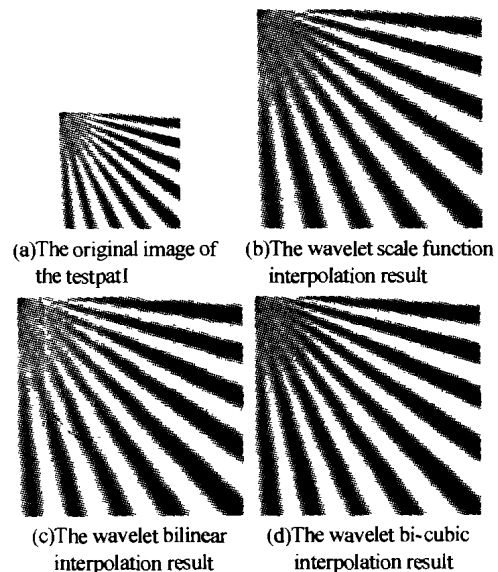


图2 Testpat1 重建实验

Fig.2 The construction experiment of the testpat1 image

峰值信噪比是一种比较接近人眼视觉效果的主观评价,因此选用峰值信噪比来比较插值图像与原始图像.峰值信噪比由下式计算

$$PNSR = 10 \log_{10} \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [E(i,j) - E'(i,j)]^2} \quad (11)$$

式中  $E(i,j), E'(i,j)$  分别是原始图像和插值重建的第  $(i,j)$  个像素的灰度值.

图 2 中各种算法处理结果对应的峰值信噪比见表 1.小波双三次插值比全小波插值的峰值信噪比

高 4.3 dB, 比小波双线性插值高 1.2 dB.

表 1 图像插值实验结果

插值方法	全	小波	小波
	小波插值	双线性插值	双三次插值
PNSR	26.1494dB	29.2163dB	30.4594dB

实验二, 选择了某城市光学遥感图像的一个小局部作为实验原图像(如图 3 所示), 各种算法重建的结果如图 4 所示, 其中小波双线性、双三次插值高频外推阈值取 6, 对应的峰值信噪比见表 2.



图 3 原始遥感图像(100 × 160)

Fig. 3 The original remote sensing image



(a)The wavelet scale-function interpolation result



(b)The wavelet bilinear interpolation result



(c)The wavelet bicubic interpolation result

图 4 实验结果

Fig. 4 The experiment result

表 2 图像插值实验结果

插值方法	全	小波	小波
	小波插值	双线性插值	双三次插值
PNSR	24.7893dB	30.2107dB	32.2746dB

从表 2 可以看出, 小波双三次插值的峰值信噪比比全小波插值高 7.5 dB, 比小波双线性插值高 2 dB.

从图 2、图 4 中可以看出: 全小波插值算法的结果虽然将图像的分辨率提高了, 但是图像的高频细节并没有得到改善, 可以看出全小波插值后图上有

条纹, 方块效应, 直线边缘为阶梯状, 所以图像的峰值信噪比低一些, 如表 1、表 2 所示; 小波双线性算法在提高空间分辨率的同时, 对高频细节有一定的改善, 但是双线性算法也不是曲面拟合, 所以对高频成分改善的同时会破坏某些高频细节, 直线边缘为锯齿状, 影响视觉判断效果, 所以其对应的峰值信噪比比全小波插值要高一些; 但比小波双三次算法的峰值信噪比要低; 小波双三次算法在高频外推上采用了双三次曲面拟合插值法, 在插值处的值和导数都连续, 细节表现清楚, 对全小波插值阶梯形块状现象与小波双线性插值高频受损的缺点都得到了较好的克服, 在改变图像空间分辨率的同时, 提高了图像的视觉效果.

## 4 结论

实验结果表明, 本文提出的小波双三次插值算法应用于光学遥感图像插值时, 不仅提高了图像的空间分辨率, 同时也提高了图像的峰值信噪比, 较好地保留了图像丰富细节信息. 经过处理后的图像更适合人眼观察, 细节丰富, 更加清晰, 畸变小, 这说明本文提出的小波双三次插值是一种提高光学遥感图像空间分辨率的有效方法.

## 参考文献

- 刘笑宙, 涂国防. 小波双线性插值应用于光学遥感图像. 中国科学院研究生院学报, 2003, 20(1): 39 ~ 43  
Liu X Y, Tu G F. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2003, 20(1): 39 ~ 43
- 余越, 李凤亭, 葛成辉. 小波变换在遥感图像压缩中的应用研究. 中国图像图形学报, 1998, 3(10): 849 ~ 853  
Yu Y, Li F T, Ge C H. *Journal of Image and Graphics*, 1998, 3(10): 849 ~ 853
- Kenneth R. Castleman. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, a Simon & Schuster Company, 1996
- Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674 ~ 693
- Jo Y T, Shen L X, Seng L L, et al. A general approach for analysis and application of discrete multi-wavelet transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(2): 457 ~ 464
- 郝鹏威, 朱重光. 基于小波的图像插值方法. 遥感学报, 1998, 2(2): 98 ~ 102  
Hao P W, Zhu C G. *Journal of the Remote Sensing*, 1998, 2(2): 98 ~ 102

## Improvement of the Space Resolution of the Optical Remote Sensing Image By the Wavelet Bi-cubic Interpolation

Qu Youshan, Tian Weijian, Li Yingcai, Zhang Wei, Da Xuanfu

*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068*

Received date: 2003-05-16

**Abstract** In order to preserve the original information of the optical remote sensing image, to improve its space resolution possibly high, and to favorably observe and analyze its detail information, the wavelet bi-cubic interpolation was proposed in this paper. The experiment result proved that the image processed by the wavelet bi-cubic interpolation had a relative higher peak-signal-noise ratio and better image detail information than the images processed by the wavelet scale-function Interpolation and the wavelet bi-linear interpolation. It is proved that the wavelet bi-cubic interpolation is an effect algorithm to improve the space resolution of the optical remote sensing image.

**Keywords** Wavelet bi-cubic interpolation; Wavelet transform; Similar transform; Space resolution



**Qu Youshan** received the Bachelor's Degree in the overall design of spacecraft in 1997 from the Harbin Institute of Technology (HIT), and the Master's Degree in mechanical and electrical engineering in 2000 from the Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics. Now he is a doctor candidate in space optics in the Space Optics Laboratory of Xi'an Institute of the Optics and Precision Mechanics. His research work focuses on the moving target recognizing and image processing.