

# 基于快速小波分形插值的声纳图像缩放算法

李宇<sup>†</sup> 黄勇 黄海宁 张春华

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

**摘要** 本文讨论主动图像声纳的图像结果显示问题,主要介绍一种基于快速小波分形插值的实时声纳图像缩放算法。并通过对合成孔径声纳图像数据进行算法比较,发现此算法比通用的图像插值算法,如双线性插值和双三次样条插值等,具有更好的性能。由于可以分块并行实现,因此本算法易于应用于实时图像声纳工程中。

**关键词** 小波, 分形插值, 声纳图像

## A fast wavelet based fractal interpolation for sonar image

LI Yu HUANG Yong HUANG Hai-Ning ZHANG Chun-Hua

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract** A new fast wavelet based fractal interpolation algorithm for the processed image by active image sonar is described. Comparing with the conventional algorithms, such as the bilinear interpolation and bicubic interpolation, this algorithm has better performance in image data reduction by displaying the real synthetic aperture sonar image. Because of its ability of localization and parallel computation, the proposed algorithm is easy to be applied into the real-time image sonar system.

**Key words** Wavelet, Fractal interpolation, Sonar image

## 1 引言

在主动声纳系统中,由于实际孔径和显示界面条件的限制,使得怎样合理地将声纳结果缩放到有限的显示界面上,以减少声纳显示结果信息损失和提高声纳显示图像分辨能力,成为主动声纳显示系统设计和开发中需要考虑的问题之一。在主动探测声纳中,可以利用结果数据的统计特征进行抽值或插值来达到数据显示的缩放目

的<sup>[1,2]</sup>。但是在图像声纳,如合成孔径声纳或者侧扫声纳中,这些算法往往得不到较好的效果,这是因为这些算法只考虑了点目标的情况,而对具有复杂特征的体目标未做考虑,其效果类似图像插值中的近邻算法,具有较明显的锯齿效应。而如果采用目前常用的插值算法,如双线性插值、样条插值等,直接对图像声纳数据进行处理,往往产生不适当的平滑,使得图像的细节信息缺失,不利于声纳图像的目标分辨。

2006-10-20 收稿; 2008-04-09 定稿

作者简介:李宇(1977-),男(土家族),贵阳人,助研,博士,研究方向:水声信号处理。

黄勇(1965-),男,副研,博士,硕士生导师。

黄海宁(1969-),男,研究员,博士,博士生导师。张春华(1962-),男,研究员,博士,博士生导师。

<sup>†</sup> 通信联系人 E-mail: ly@mail.ioa.ac.cn

为了解决传统算法存在的问题,本文将介绍一种利用分块小波变换和分形插值对声纳图像进行缩放的快速算法。算法利用声纳图像特别是声纳地质图像中的分形特征,采用二维快速正交小波变换和分形插值相结合的方法进行声纳图像的缩放。由于分形插值能够更好地减少图像高频段的纹理信息损失,因此通过对小波变换后的高频分量进行分形参数估计,并用通过参数进行插值可以得到纹理信息保持得比较好的图像,这对于进行声纳图像的分析 and 识别具有比较重要的意义。

本文将按如下结构组织:第二部分将对算法进行详细的描述和分析,第三部分将通过比较一组对合成孔径图像声纳数据的处理结果来说明算法的优点,在最后一部分将给出本文的结论。

## 2 算法描述

对于图像声纳而言,为了满足分辨率和测绘范围的条件,往往得到的可供显示的数据量巨大,而这往往给数据的显示带来相当大的困难。比如要满足 10cm × 10cm 的分辨率和 200m × 200m 的测绘范围就需要 2000 × 2000 象素显示分辨能力,这在实际工程应用中是很难达到的。因此,考虑图像声纳数据进行显示缩放问题是在图像声纳工程实现过程中必须考虑的问题,这个问题可以分为两个方面,一方面是怎样在保持原有图像信息的基础上缩小图像以满足显示条件,另一方面是怎样对所感兴趣的局部显示图像进行无失真的放大。要满足这两方面的要求就需要使图像缩放算法具有多分辨率和无失真的特点,而传统的图像缩放算法,如双线性插值和双三次样条插值等算法,都无法很好地满足图像声纳显示的需求。在这一背景下,本文将具有多分辨特性的快速小波变换和能够有效地保持插值图像纹理特征的分形插值结合起来,应用于图像声纳的实时显示过程中,可以有效地满足对图像声纳结果的缩放显示要求。下面将简单介绍有关快速小波变换和分形插值的有关特点。

小波变换是一种非平稳信号分析方法,它

具有相当广泛的应用范围和形式,这里本文仅对二维快速正交小波变换进行简单的描述<sup>[3]</sup>:

对于原始离散图像  $a_0[n, m]$  可以通过定义:

$$a_0[n, m] = \langle f, \phi_{0,n,m} \rangle$$

来刻画唯一的  $f \in V_0^2$ , 其中  $\langle \rangle$  为内积符号。对于任何尺度  $2^j$ , 我们记:

$$a_j[n, m] = \langle f, \phi_{j,n,m} \rangle$$

和

$$a_j^k[n, m] = \langle f, \psi_{j,n,m}^k \rangle$$

这里  $1 \leq k \leq 3$ 。

通过一个与小波  $\psi$  关联的共轭镜像滤波器  $h[n]$  和  $g[n]$ , 在  $2^{j+1}$  尺度上, 使用二维可分离卷积和子采样可以得到分解公式:

$$\begin{aligned} a_{j+1}[n, m] &= a_j \otimes \bar{h} \bar{h}[2n, 2m] \\ d_{j+1}^1[n, m] &= a_j \otimes \bar{h} \bar{g}[2n, 2m] \\ d_{j+1}^2[n, m] &= a_j \otimes \bar{g} \bar{h}[2n, 2m] \\ d_{j+1}^3[n, m] &= a_j \otimes \bar{g} \bar{g}[2n, 2m] \end{aligned} \quad (1)$$

和重构公式:

$$\begin{aligned} a_j[n, m] &= \tilde{a}_{j+1} \otimes hh[n, m] \\ &+ \tilde{d}_{j+1}^1 \otimes hg[n, m] \\ &+ \tilde{d}_{j+1}^2 \otimes hg[n, m] \\ &+ \tilde{d}_{j+1}^3 \otimes gg[n, m] \end{aligned} \quad (2)$$

其中, 式(2)中的  $[\tilde{a}_{j+1}, \tilde{d}_{j+1}^1, \tilde{d}_{j+1}^2, \tilde{d}_{j+1}^3]$  是由  $[a_{j+1}, d_{j+1}^1, d_{j+1}^2, d_{j+1}^3]$  插零扩展而得。

由于二维可分离卷积可以通过因式分解法用六组一维卷积计算出四个二维卷积, 而一维卷积可以通过快速离散傅立叶变换完成, 因此这样的分解与重构方法在工程上是相当实用的。

分形插值是一种利用自然图像中的分形特征, 通过分形估计参数进行图像插值的方法, 这种方法既克服了传统插值方法由于平滑产生的失真, 又减少了图像纹理特征的高频损失, 是一种失真度比较小的插值方法, 比较适用于图像声纳所测绘的地质图像。这里首先介绍一下分数布朗运动(Fractional Brownian Motion, FBM)。

分数布朗运动是一种零均值高斯非平稳随机过程, 其过程函数  $FB_H(X)$  满足:

$P_r(FB_H(x+\tau) - FB_H(x)/|\tau|^H < y) = G(y)$   
其中,  $\tau$  是样本间距,  $G(y)$  表示标准差为  $\sigma$ 、零均值的高斯随机过程,  $H$  是分形特征参数, 表征函数的粗糙度, 一般  $1 > H > 0$ 。

对于图像而言, 如果  $H$  和  $\sigma$  可以确定, 就能够构造一个分数布朗随机过程来描述图像的分形特征, 本文所描述的方法就是根据快速小波变换之后得到的三个高频分量计算出  $H$  和  $\sigma$ , 再通过  $H$  和  $\sigma$  以及构造的高斯随机变量  $G$  对三个高频图像分量进行分形插值, 来保持集中在高频部分的纹理信息的。另外, 由于实际上声纳图像不会是完全理想分形的,  $H$  必须在一定范围才能看作常数, 因此在实际运算中往往把图像分为多个互不重叠的子图像进行分形参数估计。

具体计算  $H$  和  $\sigma$  的公式如式(3)所示<sup>[4]</sup>:

$$\text{var}(d_{j+1}^i[n, m]) = \sigma_i^2 (2^{j+1})^{2H_i+1} \quad (3)$$

其中,  $i = 1, 2, 3$

而对高频图像分量的分形插值可以通过迭代的随机中点置换方法实现<sup>[5,6]</sup>:

(1) 当图像点  $(n, m)$  的  $n, m$  为奇数时, 灰度值由  $d_{j+1}^i[n, m]$  原值确定。

(2) 当  $n, m$  为偶数时,

$$\begin{aligned} f(n, m) = & \frac{1}{4} [f(n-1, m-1) \\ & + f(n+1, m-1) \\ & + f(n-1, m+1) \\ & + f(n+1, m+1)] \\ & + \sqrt{1-2^{2H-2}} * |h|^H * \sigma * G \end{aligned}$$

(3) 当  $n, m$  中有一个为偶数时,

$$\begin{aligned} f(n, m) = & \frac{1}{4} [f(n, m-1) + f(n+1, m) \\ & + f(n-1, m) + f(n, m+1)] \\ & + 2^{-H/2} \sqrt{1-2^{2H-2}} * |h|^H * \sigma * G \end{aligned}$$

通过插值得到的三个高频图像分量和一个低频图像分量根据式(2)可以重构任何尺度  $2^j$  上的图像, 从而达到对声纳图像的缩放。

综上所述, 本文所描述的方法可以分为如下几个步骤:

(1) 对图像声纳数据进行分块的二维快速正交小波变换, 得到  $2^{j+1}$  尺度下的  $[a_{j+1},$

$d_{j+1}^1, d_{j+1}^2, d_{j+1}^3, ]$ ;

(2) 对  $2^{j+1}$  尺度下三个高频分量  $[d_{j+1}^1, d_{j+1}^2, d_{j+1}^3, ]$  分别进行分形参数  $H$  和  $\sigma$  估计;

(3) 利用分形参数  $H$  和  $\sigma$  以及构造的高斯随机变量  $G$  对  $[d_{j+1}^1, d_{j+1}^2, d_{j+1}^3, ]$  进行分形插值得到  $[d_{j+1}^1, d_{j+1}^2, d_{j+1}^3, ]$ ;

(4) 利用得到  $[d_{j+1}^1, d_{j+1}^2, d_{j+1}^3, ]$  重构尺度下的图像。

通过上述四个步骤, 可以得到任何  $2^j$  尺度下的声纳图像数据, 从而达到对大数据的声纳图像进行显示缩放的效果。

### 3 示例说明

为了研究本文所提出算法的性能, 这里采用某合成孔径声纳湖试的图像数据进行算法比较。原始的声纳图像为  $1600 \times 1600$  的湖底地貌图像。为了方便比较这里将  $2^j$  尺度下的低频图像作为基图像, 然后将对  $2^{j+1}$  尺度的图像进行直接双线性插值、双三次  $B$  样条插值以及快速小波分形插值所得到的图像与基图像的峰值信噪比 (PSNR) 进行比较, 同时分析一下运算所耗费的时间。

峰值信噪比 (dB) 可以定义为:

$$PSNR = 20 \log_{10} \left[ \frac{\text{graylevel}_{\max}}{RMSE} \right]$$

其中,  $\text{graylevel}_{\max}$  取 255,  $RMSE$  为均方根误差, 等于:

$$RMSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (x_{m,n} - x'_{m,n})^2$$

这里,  $x_{m,n}, x'_{m,n}$  分别是原图像与重构图像对应灰度值。

图1-图4分别给出了  $1/8$  倍的基图像、直接双线性插值图像、双三次  $B$  样条插值图像以及快速小波分形插值图像, 而表1是它们的峰值信噪比和运算时间。通过这些结果, 可以看出快速小波分形插值算法能够比较好地保持图像的纹理特征, 这对分析和识别声纳地质图像具有重要的意义。另外, 虽然快速小波分形插值运算时间与其它两种插值方法相比较多, 但是由于可以分块实现, 运算量可以被处理芯片分摊, 因此也容易被实时实现。

表 1 三种插值方法比较表

	直接双线性插值	双三次 B 样条插值	快速小波分形插值
PSNR(dB)	31.4574	31.6572	33.7542
运算时间(ms)	1196	1225	13745

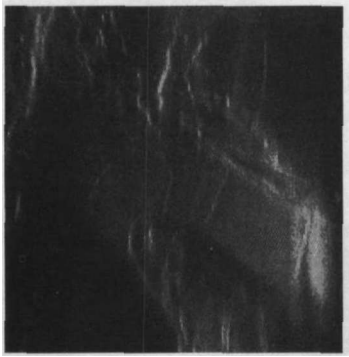


图 1 基图像

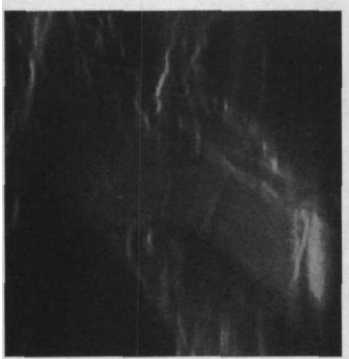


图 2 直接双线性插值图像

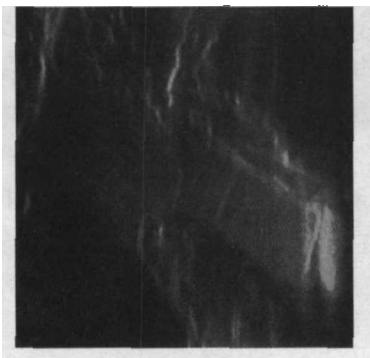


图 3 双三次 B 样条插值图像

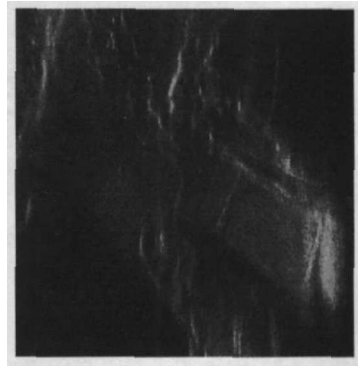


图 4 快速小波分形插值图像

## 4 结论

本文介绍并分析一种采用二维快速正交小波变换和分形插值进行声纳图像缩放的算法,并通过对实际声纳图像进行处理和比较,证明了此算法比原有的图像插值算法具有更好的性能。同时,由于算法中考虑了快速计算和数据分块问题,比较容易进行实时处理,适用于实际工程中。

## 参 考 文 献

- [1] 李启虎,数字式声纳设计原理,安徽教育出版社,2003.
- [2] 李宇,黄海宁,张春华,等,主动声纳自适应显示数据缩减算法,应用声学,2006,25(3):156-161.
- [3] S. Mallat, A wavelet tour of signal processing, Academic Press, 1998.
- [4] H. O. Peitgen and D. Saupe, The Science of Fractal Images, Springer, 1988.
- [5] P. Flandrin, Wavelet analysis and synthesis of fractional Brownian motion, IEEE Transaction on information theory, 1992,38(2):910-917.
- [6] H. Honda, M. Haseyama and H. Kitajima, Fractal Interpolation for Natural Images, International Conference on ICIP99, 1999,3: 657-661.