

小波分形混合图象编码

谢鑫 马争鸣

(中山大学电子系信息处理实验室, 广州 510275)

摘要 该文在收集和阅读了与小波分形混合图象编码方法有关文献的基础上, 对小波分形混合图象编码方法的研究现状和发展前景进行了尽可能全面和详细的评述. 文中介绍了小波图象编码经过 10 年研究, 主要算法已经基本成熟, 并受到一些正在酝酿之中的图象编码国际标准的青睐, 而分形图象编码尚处于学术研究阶段, 并指出小波分形混合图象编码是分形图象编码从学术研究走向实际应用的出路之一.

关键词 小波图象编码 分形图象编码 小波分形混合图象编码

中图法分类号: TN919.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)09-0716-09

Image Coding Combining Wavelet and Fractals

XIE Xin, MA Zheng-ming

(Lab. of Information Processing, Dept. of Electronics, Zhongshan Univ., Guangzhou 510275)

Abstract This paper is a review of literatures about the methods of image coding combining wavelet and fractals. After collecting and reading a lot of papers on image coding combining wavelet and fractals, we present a complete and detailed review of this field, including its status and possible future. Through ten years of research, wavelet image coding has been ripe for practice and may be accepted by some international standards of image coding. These standards are expected to come soon. Fractal image coding, however, is still under academic research. Combination with wavelet image coding may be a way out for fractal image coding from academic research to practical application.

Keywords Wavelet image coding, Fractal image coding, Image coding combining wavelet and fractals

0 引言

小波图象编码和分形图象编码是二种不同的图象编码方法. 其中, 小波图象编码是把图象分解成不同空间方向和不同分辨率的子带图象, 人们可以根据需要, 对不同子带图象采用不同的量化策略来进行编码; 而分形图象编码则适用于自相似性较强的图象. 可惜的是, 一般自然图象的自相似性并不强, 但是, 经过小波变换后的图象, 其相同方向但不同分辨率的子带图象却具有较强的相似性. 因此, 人们可以利用这种相似性, 结合分形图象编码的方法来进行编码, 以大幅度地提高图象编码的压缩比. 因此,

小波分形混合图象编码已成为今后发展趋势.

1 小波图象压缩编码

由于小波变换是一种介于空间域和频率域的分析方法, 因而非常适用于信号分析. 1989年, Mallet 又提出了信号的多分辨率分析理论 (Multi-Resolution Analysis, MRA)^[1], 这种多分辨率分析思想的提出更极大地促进了小波变换在信号分析中的应用. 而 Shapiro 提出的零树小波编码方法^[2]则是小波图象编码研究的一个里程碑.

1.1 图象的小波分解和重建

Mallet 提出的快速塔式变换算法^[1]为小波图象

编码技术的发展起到了奠基性的作用. 所谓塔式变换算法, 就是将一幅图象经过二维小波变换分解为一系列尺度(频率)、方向、空间局部变化的子带(subband), 也称子图象. Mallat 二维塔式快速小波变换的分解和重建示意图如下:

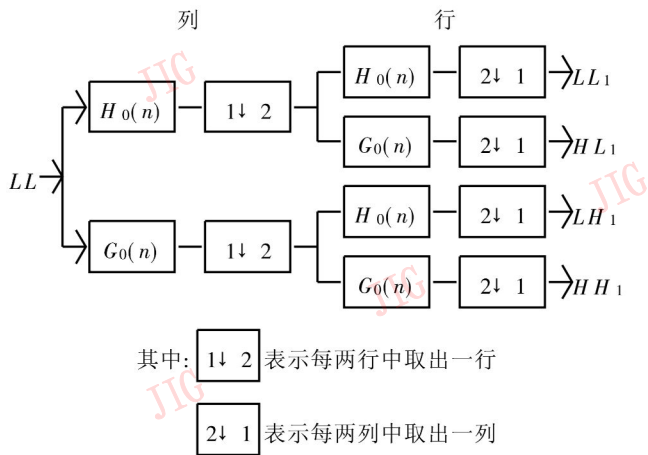


图 1 二维小波分解示意图
 $(H_0(n), G_0(n))$ 分别为低通和带通滤波器)

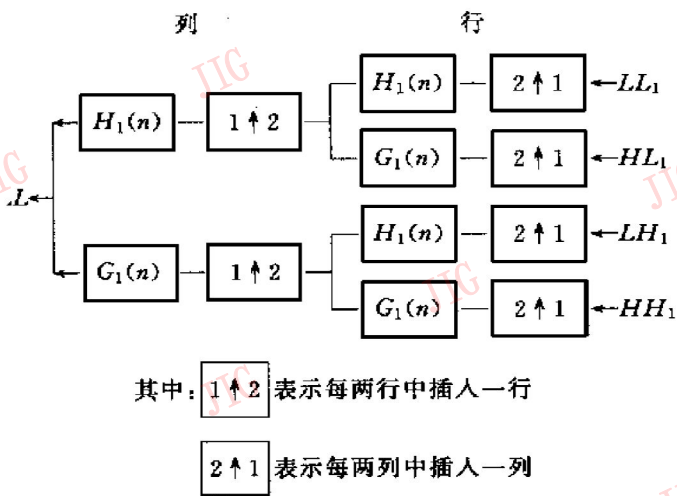


图 2 二维小波重建示意图
 $(H_1(n), G_1(n))$ 分别为低通和带通滤波器)

原图象 $A_{2^j+1}^d f(LL)$ 经过上述的二维小波分解后, 可以得到 4 幅子带图象(图 1): $A_{2^j}^d f(LL_1)$ 、 $D_{2^j}^1 f(HL_1)$ 、 $D_{2^j}^2 f(LH_1)$ 和 $D_{2^j}^3 f(HH_1)$. 它们分别表示在尺度 2^j 上的水平低通-垂直低通子图象、水平带通-垂直低通子图象、水平低通-垂直带通子图象和水平带通-垂直带通子图象. 而这 4 幅子带图象经过小波反变换后, 可以无失真地恢复出原图象 $A_{2^j+1}^d f(LL)$ (图 2).

利用上述的小波分解算法可对子图象 $A_{2^j}^d f(LL_1)$ 再次小波分解, 得到尺度 2^{j-1} 上的 4 幅子

带图象. 类似地可以对子图象 $A_{2^j-1}^d f(LL_2)$ 再次分解, 以此类推可得到图象的多级小波分解, 得到不同分辨率的子带图象.

图 3 是图象三级小波分解的例子: LL 表示水平低通-垂直低通子图象, LH 表示水平低通-垂直带通的子图象, HL 、 HH 分别表示水平带通-垂直低通和水平带通-垂直带通的子图象(下标表示不同分辨率).

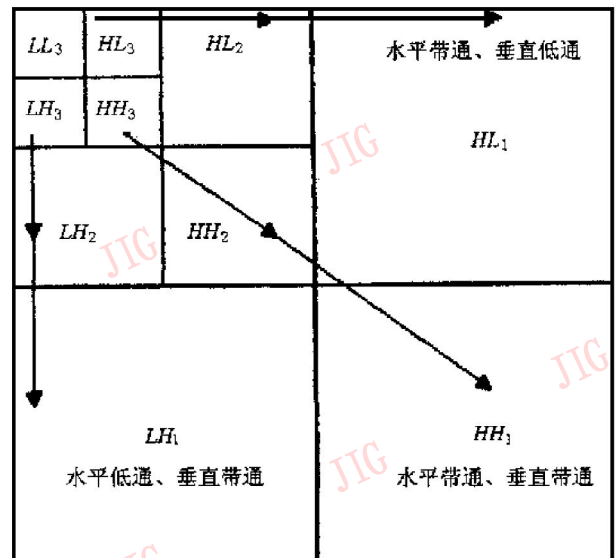


图 3 图象三级小波分解示意图
(箭头所指为同一空间方向)

图象经过小波变换后能获得很好的空间-频率多分辨率表示, 小波变换的一些主要特性如下:

- ① 不仅保持了原图象空间特性, 而且能很好地提取出图象的高频信息, 在低频处有很好的频率特性, 在高频处有很好的空间选择性;
- ② 小波分量具有方向选择性, 分为水平、垂直和斜方向, 这些特性都和人的视觉特性相吻合;
- ③ 能量主要集中在低频子图象, 各层的低通直流分量相等, 各带通分量均为零;
- ④ 低通模糊子图象具有很强的相关性, 水平子图象在水平方向相关系数大, 而垂直方向小, 垂直子图象在水平方向相关系数小而垂直方向大, 斜方向子图象在水平和垂直方向相关系数都小.

由于上述的这种独特的空间-频率特性, 故小波变换在图象分解中非常具有吸引力, 而且在小波分解后的低通模糊子图象和其他高频子带图象中, 小波系数的压缩构成了小波变换编码的基础^[3-5].

1.2 基于小波变换的图象编码方法

虽然小波图象压缩编码技术也属于经典的图象编码技术——变换法, 但由于小波变换具有多分辨

率分析特性、时域局部分析特性和尺度自相似性等,因而使得小波变换图象压缩编码成为一种非常有效的图象压缩编码方案.虽然运用小波变换进行图象压缩编码的方案多种多样,但其主要均是利用小波变换后的系数的分布特性来得到不同的方案.

传统的小波变换编码方法有小波变换和标量量化结合的方法、小波变换和矢量量化结合的方法以及结合小波系数的空间特性的编码方法等^[6-9].但这些方法大多数只利用了多分辨率子带图象所具有的不同频率通道和能量的分布特性,而没有考虑多分辨率子带图象中的空间局部特性,特别是不同尺度空间上空间局部小波系数所具有的相似特性,因此编码效果有限.

1992年Shapiro提出了零树小波编码方法^[2],即根据同方向、不同分辨率子带图象间的相似性,用所谓零树来表示某些处于同方向但不同分辨率子带图象上的小波系数,并取得了较好的编码效果.有些学者认为,Shapiro的零树概念是小波图象编码研究的一个里程碑,我们亦有同感,在我们的工作中也借鉴了Shapiro的零树思想.

1.3 图象编码中小波基的选择

利用小波变换对图象进行压缩编码时,不同种类小波基的选择^[10,11]对图象的压缩效果具有重要的意义.随着小波理论应用领域的扩展,为各种应用目的而构造的小波基不断出现,已构造的小波主要有样条小波、正交小波、双正交小波等,近年来又出现了矢量小波^[12,13].

由于样条小波相应滤波器的抽头数太多,导致变换时运算量大和重建边界误差的程序累积,通常不用于图象的压缩编码,又由于它在图象编码中广泛使用Mallat的快速算法,其相应的QMF(滤波器)结构的抽头数不能太多,否则计算量大,且边界误差会影响图象的质量,所以通常采用紧支集的小波(如正交小波和双正交小波)来进行图象编码;但由于紧支正交小波不具有对称性,导致其对应的小波滤波器不具有线性相位,而且在处理边界数据时,由于图象两端内容的不同,将使反变换重建图象时,产生所谓的振铃现象,因此,在使用具有线性相位的小波滤波器时,可利用对称扩展的方法来处理边界数据,以避免上述问题.为了解决正交性和对称性的矛盾,Cohenet等人引入了双正交小波^[13].在使用双正交小波时,由于非正交性的影响非常轻微,所以仍具有最佳的图象重建特性,而且双正交小波还可以

适用于Mallat的快速变换算法.

2 分形图象压缩编码

Mandelbrot于1975年创立了分形几何学,在他的专著《The Fractal Geometry of Nature》中是这样定义分形的:其组成部分与整体以某种方式相似的形体叫做分形. Barnsley最早将分形的概念引入到图象压缩编码领域^[14,15],但其编码过程需要人工干预,且非常耗时;1989年Jacquin提出局部迭代函数系统的概念^[16],实现了分块的自动分形图象编码算法,使分形图象编码取得了突破性进展,成为后人研究和扩展的起点.

2.1 基本的分形图象编解码方法

分形编码技术是一种不同于以往基于信源编码理论的编码方法,其数学基础是基于块的迭代收缩变换(Iterated Contractive transform)的分形理论,其相关的概念、定理主要有不动点定理,仿射变换,迭代函数系统IFS(Iterated Function System),吸引子定理,拼贴定理(Collage Theorem)等,这些概念、定理的详细情况可参见文献[16]~[18].

Jacquin提出将迭代函数系统的子映射定义域限制在图象的一个子块上(称为局部迭代函数系统LIFS),并在此基础上提出了基于分块的自动分形图象编码系统,其基本编解码过程如下^[16,17]:

(1) 把原图象 I 分割为互不重叠的Range块 $R_i, i=1, 2, \dots, N$, 即

$$I = \bigcup_{i=1}^N R_i$$

(2) 对于 R_i ,在 I 中搜索最优的Domain块 D_i (通常尺寸大于Range块),并确定对比度比例因子 S_i 、对称旋转因子 L_i 以及亮度平移值 T_i ,满足

$$\|R_i - |S_i \times L_i \times \hat{D}_i + T_i|\|_2 = \min_{D \subset I, S, T \in R} \|R_i - |S \times L \times \hat{D} + T|\|_2$$

其中, L_i 表示对图象块完成如 y 轴对称、 x 轴对称、 180° 旋转、 90° 旋转等变换^[16], $\hat{\cdot}$ 表示 D 块的收缩变换(收缩到和Range块大小相同).通过搜索就可得到变换 $\omega(X_i, Y_i, S_i, T_i, L_i)$,其中 X_i 和 Y_i 表示 D_i 块的位置.

(3) 由所有块搜索结果构成的PIFS(Partitioned Iteration Function System),即为图象的编码结果

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)$$

(4) 根据不动点定理和拼贴定理, 解码时, 从任意起始图象开始, 经过多次迭代, 即可重构图象.

我们用上面的方法实现了基本的分形编码过程, 实验结果如表 1 所示, 实验采用 256 级灰度、大小为 256×256 象素的 Lena 图象.

表 1 基本分形压缩编码的结果(实验平台为 PII 350)

编码时间(s)	压缩倍数	PSNR(dB)
1 694	10.34	29.88

从表中可以看到, 基本的分形压缩编码方法是非常耗时的.

2.2 分形图象编码的发展现状

上述分形编码方法仅仅是一个很基本的系统, 因而在很多方面都有改进的潜力. 当前分形编码的研究工作主要集中在图象分割、块分类、搜索算法、和其它变换方法相结合以及分形应用于视频编码等方面, 其发展现状如下:

(1) 在图象分割方面 一种好的分割方案应使分割后的区域具有最大可能的相似性, 同时为了在保持图象细节和压缩比方面得到平衡, 分割应该是自适应的. 目前比较常用的方法有四分树分割和 HV 分割法等^[16, 17].

(2) 块分类 一般要求通过块分类使匹配搜索仅在同类中进行, 从而加快编码速度. Jacquin 是根据视觉几何特性将相似块分为 shade 块、edge 块和 midrange 块^[16] 3 类. Fisher 等则提出根据块的亮度和亮度变化来对图象块和相似块进行分类^[17, 18], 这种方法比 Jacquin 的方法更为成功. 还有学者提出了将图象块和相似块进行小波变换后, 再根据小波系数的分布特性来分类的方法^[19].

(3) 搜索算法方面 搜索算法的改进是把搜索从相似块集转到它尽可能小的子集中去, 从而减少寻找最佳匹配块的时间. Nguyen 采用不带对称变换的局部搜索方法, 把匹配局限在图象块附近区域^[20]; 而 Lin 等则提出将图象像素作金字塔形排列, 然后构成多分辨率搜索树的作法^[21]; Saupe 则利用码书块允许重叠而具有的相关性, 提出了在频率域上使用的快速卷积法^[22].

(4) 在把分形和其它变换编码方法相结合方面, 可以充分利用分形和变换编码两者的优点. Barthel 等人提出的 FTC 方法^[23], 就是将图象块频谱的主要部分用分形变换来近似, 其它的频谱系数用变换编码的方法来编码; Hamzaoui 等则将分形和

矢量量化的方法相结合^[24]用于编码; 而将分形和小波相结合的编码方法则是近年来图象编码界的一大研究热点^[25~28].

(5) 虽然长期以来分形编码通常针对的都是单色、静止图象, 但随着研究的深入, 已经有很多学者对彩色图象的分形编码和分形应用于视频编码也做了相应的研究^[17, 29~31].

2.3 分形图象编码的特点

基于分块的分形编码技术是一种利用块间自相似性来减少图象冗余度的新型编码技术, 它具有以下的独特优势:

(1) 分形图象压缩既考虑局部与局部之间的相关性, 又考虑局部与整体之间的相关性, 因此它适合于自相似或自仿射的图象压缩, 有很广的适应范围.

(2) 因为分形图象是用数学公式(IFS 代码)而非位图来表示的, 所以可按高于或低于原编码图象的分辨率来解码, 且保持精细的结构, 因而这种图象缩放能力可以用做图象增强工具, 把低分辨率图象先分形编码, 然后再解码成高分辨率图象.

(3) 由于分形压缩是一非对称过程, 虽然编码很耗时, 但解码速度较快, 因此较适用于一次编码, 多次解码的应用, 如 CD-ROM 存储系统、多媒体播放系统、图象档案库、图象查询系统等.

尽管分形编码具有诸多优点, 但由于算法本身的特性, 使得编码过程计算量巨大、耗费时间很长, 因而实时性差.

3 小波和分形混合图象编码算法的研究现状

经过多级小波变换, 一幅图象(或图象块)被分解为一系列尺度(频率)、方向、空间局部变化的子带(subband). 由于小波变换能获得很好的空间-频率多分辨率表示, 而且在低频处有很好的频率特性, 在高频处有很好的空间选择性, 因此符合视觉特性, 能量也主要集中在低频子图象. 而且, 同方向不同分辨率的子带间具有相似性, 而分形的本质特征也恰好就是自相似性, 这就给利用两者进行混合图象编码创造了条件. 近年来很多的研究工作就是围绕分形图象编码中, 如何充分利用小波变换所具有的这些特点来展开的.

3.1 基于图象块小波分解特性的快速分形图象编码

传统的分形图象编码方法中, 由于寻找最佳匹

配块需要进行大量计算,从而使编码时间过长,而利用经过小波分解后,图象块所具有的独特空间-频率特性,可以构造较好的分类和搜索方法,因而大大加快了分形编码的速度。

3.1.1 基于图象块小波分解的块分类方法

在对图象块进行小波分解时,一次小波分解可得到4个子频带,它们分别表示亮度分量、水平边缘分量、垂直边缘分量和对角边缘分量。其中,对亮度分量子频带还可以进行多次分解,直到每一子带只有一个小波系数而不能继续分解为止。例如:对一个 4×4 的图象块进行两级小波分解,共产生7个子带(图4中用粗线隔开),其中,二次小波分解后的3个高频子带都只有一个小波系数(图中小波域的1、2和3)。

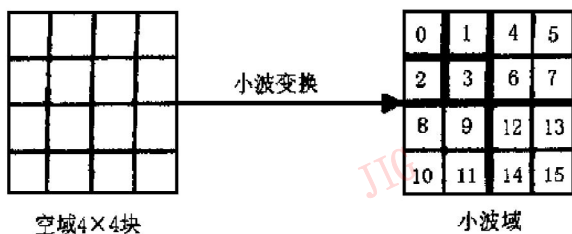


图4 图象块二级小波分解示意图

在文献[19],[32]中,分别提出了基于小波变换块分类的分形编码方法。由于人类的视觉生理和心理特点,决定了人类对图象边缘信息极其敏感,因此可以用图象的边缘来作为块分类的依据,而小波分解正好为此提供了工具,同时小波变换使能量集中于少数的小波系数,这样可以用比较少的系数来进行块分类。例如文献[32]中就是利用图象块小波变换后,表示不同边缘的小波系数来分类,其加速效果比传统的空域二叉树方法更好。同时,由于在这种块分类方法中结合了人眼的视觉特性,因此虽然最佳匹配块在均方误差意义下不是最佳,且客观上使恢复图象的 $PSNR$ 下降了,但恢复图象的视觉效果仍然很好。

3.1.2 基于图象块小波分解后能量分布特性的快速搜索算法

在上面提到的方法中,是利用图象块经过小波变换后不同边缘分量的小波系数,来对图象块进行分类,从而达到加速分形编码的目的。而从本文前面有关小波变换的叙述中可以知道,图象块经过小波变换后,各频带的能量分布不均匀,即通常是低频子带数据少,能量大;而高频子带数据多,能量小,因此,分形编码时,也可以利用这些特点。

在进行空域分形编码时,是利用仿射变换来描述两幅图象之间具有的相似性,即建立 Domain 块和 Range 块间的收缩映射。在文献[33],[34]中,证明了如果两幅图象存在一种线性关系,那么在图象经过小波变换后,除了一个象素仍然保持线性关系外,其它的对应象素都简化为只保留一个比例关系,从而将空域上的 MSE 准则转变为对小波域中各个子频带的能量比较。

在文献[33]中,提出了基于上述原理的分形加速算法,即首先对子图象块进行金字塔 Haar 变换;然后,从低频段开始,依次累加误差,并与预先设定的阈值比较,若大于阈值,则结束匹配。由于各频带的能量分布不均匀,许多搜索过程可以提前结束。同时只需要用对比度比例因子来估计误差,因而仅对搜索成功的块才计算亮度平移值。这样可以大大缩短分形编码所需要的时间。文献中所提供的实验结果显示:用普通微机对 512×512 大小的 Lena 图象编码时,在恢复图象的峰值信噪比 $PSNR$ 达到 29.6dB 的情况下,编码过程只需要 3.8s,这样的速度已经可以满足大部分图象应用时,对编码过程的时间要求。

3.2 基于小波变换域的分形图象编码方法

传统的空域分形编码方法是利用迭代函数系统 IFS 来抽取自然图象中存在的自相似性。在小波变换被引入图象编码领域后,许多学者都注意到,图象经过小波变换后,同方向不同分辨率的子带图象之间存在分形意义下的自相似性^[26,27,35];同时,在同分辨率不同方向子带图象中,其具有相同空间位置的小波系数之间尚存在较强的相关性^[28,36]。因此,将分形编码方法应用于小波变换域的子带图象编码将很有前景,当前很多学者的研究工作也由此展开。

3.2.1 基于图象小波分解的分形预测编码方法

Rinaldo 等人提出了一种很有代表性的基于小波变换的分形预测图象编码算法^[27]:即用变换域低分辨率的子带图象来预测高一分辨率的子带图象,预测时,采用与分形编码方法类似的仿射变换,但并不需要一定是收缩映射。同时解码时不需要迭代,而且可以直接估计均方误差。英国学者 Levy 和 Wilson 也发表过类似的研究结果^[35]。

这类分形预测编码方法的基本思想简述如下:

(1) 对图象进行多级小波分解,以得到不同方向和不同分辨率的各个子带图象,如图5所示。

(2) 对最低分辨率的子带图象,如上图中的

空域子块经多级小波分解构成,因此子块的对称变换就对应于相应小波子树所有分辨率的子带作相应对称变换;而旋转变换由于水平和垂直分量的换位,因此当小波子树所有子带变换后,各个分辨率上的垂直和水平子带系数则互换.

(3) 灰度变换 M 由于子块的均值为 0,因而偏移因子也为 0,所以灰度变换只包括尺度变换因子;而且小波子树中也没有直流分量,因此变换形式相同(即只有尺度变换).

如上所述,在 Haar 小波基的基础上,空域中的分形变换等价于小波域内的小波子树量化过程.这样一来,我们就可以将传统的空域分形编码问题转化到小波域内来解决,从而有利于充分利用小波变换的各种特性.

由于 Haar 小波基是不连续的,因此在小波系数量化编码时,会造成恢复图象中类似“块效应”的灰度变化不连续现象.很多学者研究了采用平滑的小波基条件下的离散分形-小波变换^[28,32,40,41]的方法,因为在平滑小波基基础上的分形-小波变换比 Haar 小波基具有更多的优点,主要表现在:

- ① 几何变换时,邻域平均和抽样更类似于滤波的过程;
- ② 小波子树不再简单对应于空域中互不相交的子块,而是综合了相邻子块对小波系数的贡献(类似于空域中可重叠 Range 块编码的情况),这样有利于消除恢复图象中的“块效应”.

3.2.3 基于离散分形-小波变换的编码方法

在离散分形-小波变换的基础上, Davis 提出了“小波子树自量化方法”(Self-Quantization of

Subtrees)^[28,42],即将传统空域内的分形压缩编码转化为小波域内小波子树的自量化编码,从而将传统的分形压缩归入到了小波编码的研究范畴.现将其基本的编码过程及特征简单介绍如下(如图 7):

- (1) 最低分辨率上的 4 个子带图象系数采用无失真或少失真的方法进行编码;
- (2) 分别构造小波子树 R_i^{k-1} 和 D_i^k (其中 k 表示小波子树从第 k 级开始),按分形编码的习惯说法,通常我们分别称之为 Range 子树和 Domain 子树(如图 7 中的 R_i^3 和 D_i^4);
- (3) 对于每一个 Range 子树 R_i^{k-1} ,寻找匹配子树 D_i^k .匹配参数即为相应 Range 子树的编码结果(包括匹配子树的位置、采用的几何变换和对称旋转变换等);
- (4) 解码时,先恢复单独编码的最低分辨率子带图象,然后由 Range 子树编码结果逐级外推各级分辨率的子带图象.

如上所述,小波子树 R_i^{k-1} 和 D_i^k 可被看作为传统分形编码中的 Range 块和 Domain 块,其大小分别为 $2^{k-1} \times 2^{k-1}$ 和 $2^k \times 2^k$,空域子块的均值量化过程可以看作是对应小波域最粗分辨率上子带系数的量化,这样就将空域中的基于子块分割的分形方法转变为小波域内小波子树的自量化编码过程.这种用小波子树自量化编码方法进行的编码,在解码过程中,可以用下面的定理来保证由已知的粗分辨率小波系数外推细分辨率小波系数过程的收敛性^[28,32].

定理 金字塔型小波分解的次数为 K ,如果已知第 K 级分辨率的小波系数,那么,由 $D_i^k(x, y)$ 外推 $D_i^{k-1}(x, y)$ 的迭代过程将在 $K-1$ 步内收敛.

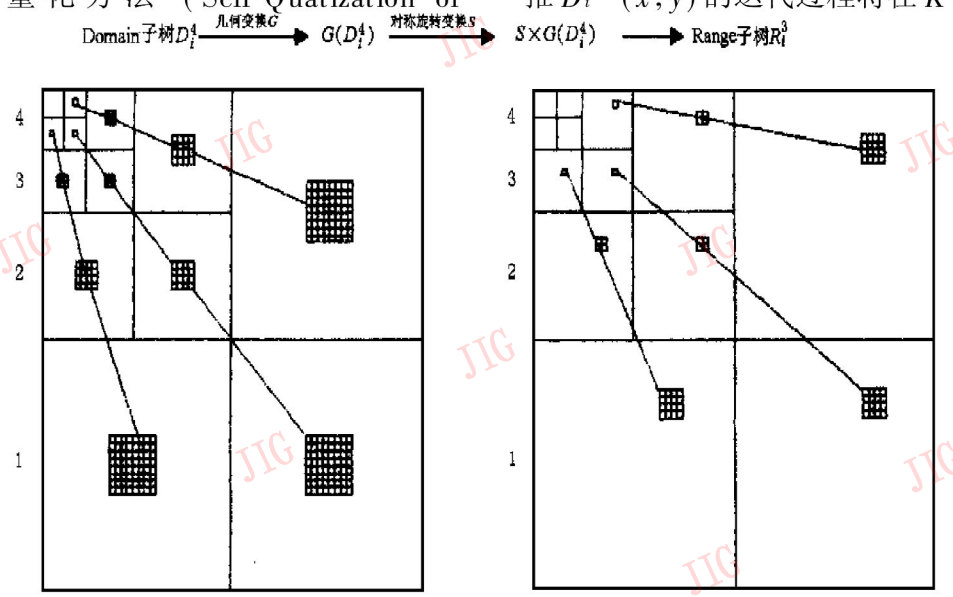


图 7 小波子树的自量化编码示意图

传统的分形编码算法中,对尺度因子通常要限定 $|s_i| \leq 1$,以保证迭代过程的收敛,可是,有时尽管 $|s_i| > 1$ 也可以保证收敛,但数学上并不能很好地解释;同时用传统的分形压缩方法进行编码,在解码时尚无法具体确定迭代次数.但由上述定理可以知道,小波域的小波子树量化解码过程,可在有限步内收敛,因此不再需要强制尺度因子 $|s_i| \leq 1$.这样空域中的收敛性问题在小波域内就很容易地解决了.

在离散分形-小波变换的基础上,很多学者提出了小波子树编码方法的各种改进方案:

如在张颖等人的工作中^[32,33],提出了“自适应分割的变长小波子树的分形编码”方案:它是根据小波子树编码时的具体误差情况,自适应地调整小波子树的大小,再分配不同的比特给不同复杂程度的小波子树,并成功地利用了不同分辨率小波系数之间的相关性,因此在高倍率压缩的同时,能保持较高质量的恢复图象.

又如在Vrscay的有关研究工作中^[40,43],引入了一系列二维的分形-小波变换过程,它和传统的IFS变换相比,其编码算法中是分别处理水平、垂直和对角线的四分树,虽然这样表面看来,增加了编码的消耗,但是在匹配准确性和低频能量保持等方面能得到更好的效果.

3.3 小波和分形混合算法的进一步研究方向

基于分形和小波混合编码的有关研究工作仍然处于起步阶段,目前的一些研究结果已经显示出其编码效果比传统的空域分形压缩方法要好很多,但仍然有很多方面可以进一步研究以充分挖掘其潜力,如:

(1) 深入研究分形-小波变换的内在联系,进一步用分形集合的几何相似性或统计相似性来表示小波分解域内子带间的相似特征;

(2) 对不同小波基分解后频带的特性和差别加以研究,以挖掘出适合于小波分形混合编码的小波基等;

(3) 将传统空域分形编码方法中一些行之有效的思想应用于分形-小波的混合编码,例如一些好的分类方法和快速搜索算法;

(4) 广泛集合一些目前发展已经相对完善的技术的优势(如子带编码、矢量量化和神经网络技术等),充分利用信号处理的研究成果为图象编码领域注入新的活力;

(5) 具体算法上,可以对仿射变换的类型、不同

方向和分辨率子带的处理策略、分形和非分形部分的划分准则等加以深入研究.

另外,目前有关研究工作主要还是集中在静止的灰度图象方面,而针对彩色图象和应用于视频等的分形-小波混合编码方法研究,也应该成为新的研究热点,目前已经有一些学者开展了相关的研究工作^[44].

4 结 论

传统的分形编码方法虽然具有独特的优势,但却存在诸如编码时间长等缺点,而以零树编码为代表,基于小波变换的编码方法已经被证明具有良好的压缩效果.由于分形和小波的混合图象编码方法能充分发挥小波和分形编码方法的优点,弥补相互的不足,因此应该成为图象压缩的一个重要研究方向.

目前分形和小波混合编码方法的研究工作已经取得了一定的进展,但和成熟的小波编码算法,如零树编码相比,其压缩效果还不能完全与之抗衡,很多方面都有待改善:例如编码复杂度相对较高,解码不够迅速,同时其压缩比和恢复图象的主客观质量都有待进一步的提高.

参 考 文 献

- 1 Mallat S A. A theory for multi-resolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Trans. on PAMI.*, 1989, 11 (7): 674~ 693.
- 2 Shapiro J. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1992, 41 (12): 3445~ 3462.
- 3 Amir Averbuch, Danny Lazar, Moshe Israeli. Image compression using wavelet transform and multiresolution decomposition. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1996, 5(1): 4 ~ 15.
- 4 Frank Hartung, Husor J H. Wavelet and subband coding of Images: Comparative study. *SPIE Proceeding: Mathematical Imaging*, 1993, 2043: 1028~ 1030.
- 5 Antonini M, Barland M, Mathieu P *et al.* Image coding using wavelet transform. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1992, 1 (2): 205~ 220.
- 6 王磊,戚飞虎. 基于双正交小波的快速矢量量化算法. *上海交通大学学报*, 1998, 32(6): 427~ 431.
- 7 Chen Jie, ITOH Shuichi, Takeshi Hashimoto. Scalar quantization noise analysis and optimal bit allocation for wavlet pyramid image coding. *IEICE Trans. Fundamentals*, 1994, E-76-a(9): 1285~ 1291.
- 8 Senoo T, Girod B. Vector quantization for entropy coding of image subbands. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1992, 1 (4): 526~ 532.
- 9 Nasrabadi N M, King R A. Image coding using vector

- quantization: A review. *IEEE Trans. on Communication*, 1988, 36(8): 957~ 971.
- 10 Coifman R R, Wickerhauser M V. Entropy-Based algorithms for best basis selection. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1992, 38(5): 713~ 718.
- 11 胡春玲, 陈义宽, 马常楼. 图象编码时小波基的选择. *中国图象图形学报*, 1998, 3(9): 830~ 836.
- 12 Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Communications on Pure and Applied Math.*, 1988, 41(7): 909~ 996.
- 13 Cohen A, Daubechies I, Feauveau J C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets. *Communications on Pure and Applied Math.*, 1992, 45(3): 485~ 500.
- 14 Barnsley M F. *Fractal Everywhere*. New York: Academic Press, 1988.
- 15 Barnsley M F, Hurd L P. *Fractal image compression*. Wellesley, MA: AK Peters Ltd., 1993.
- 16 Jacqin A. Fractal image coding: A review. *Proceedings of the IEEE*, 1993, 81(10): 1211~ 1225.
- 17 Fisher Y. *Fractal image compression—Theory and application*. New York: Springer Verlag, 1994.
- 18 Fisher Y, Jacobs B, Boss R. Iterated transform image compression. NOSC Technical Report 1408, Naval Ocean Systems Center, San Diego, CA, 1991, 1~ 27.
- 19 Zhang Y, Po L M. Speeding up fractal image encoding by wavelet-based block classification. *Electronics Letters*, 1996, 32(23): 2140~ 2141.
- 20 Nguyen T Thao. Local search fractal image compression for fast integrated implementation. E-mail: eethao@ee.ust.hk
- 21 Lin H, Venetsanopoulos A N. Fast fractal image coding using pyramid. In: *Proceeding of 8th International Conference on Image Analysis and Processing*, San Remo, Sept., 1995: 34~ 35.
- 22 Saupe D. A new view of fractal image compression as convolution transform coding. *IEEE Signal Processing Letters*, 1996, 3(7): 312~ 313.
- 23 Barthel K U, Schuttemeyer J, Voyer T *et al.* A new image coding technique unifying fractal and transform coding. In: *Proc. ICIP-94 IEEE International Conference on Image Processing*, Austin, Texas, Nov., 1994: 976~ 977.
- 24 Hamzaoui R, Muller M, Sque D. VQ-enhanced fractal image compression. *ICIP-96 IEEE International Conference on Image Processing*, Lausanne, 1996: 453~ 454.
- 25 Freeland G C, Durrani T S. IFS fractals and the wavelet transform. In: *Proc. ICASSP*, 1990: 2345~ 2348.
- 26 Wall Van der. Merging fractal image compression and wavelet transform methods. *NATO ASI Conf. Fractal Image Encoding and Analysis*, Trondheim, July, 1995.
- 27 Roberto Rinaldo, Giancarlo Calvagno. Image coding by block prediction of multiresolution subimages. *IEEE Trans on Image Processing*, 1995, 4(7): 141~ 154.
- 28 Davis G M. A wavelet-based analysis of fractal image compression. *IEEE Trans on Image Processing*, 1998, 7(2): 141~ 154.
- 29 Bernd Hurrigen, Paul Mols, Stephan F. Fractal transform coding of color images. *Visual Communications and Image Processing*, SPIE 94, Chicago, 1994.
- 30 Monro D M, Nicholls J. Low bit rate color fractal video. In: *Proc. ICIP-95, IEEE International Conference on Image Processing*, Washington D. C., 1995.
- 31 Bogdan A. Multiscale(Inter/Intra-Frame) fractal video coding. In: *Proc. ICIP-94 IEEE International Conference on Image Processing*, Austin, Texas, 1994.
- 32 张颖. 静止和运动图象压缩新方法研究——分形、小波及其混合编码[学位论文]. 广州: 华南理工大学, 1997.
- 33 张稟, 陈刚, 金以文. 基于金字塔正交小波分解的快速分形图象编码. *电子学报*, 1998, 26(8): 37~ 42.
- 34 Tang Y, Wee W G. Fractal-based image compression: A fast algorithm using wavelet transform. *SPIE Proc.*, 1997, 2308: 1674~ 1682.
- 35 Levy I, Wilson R. Predictive wavelet transform coding: Unifying fractal and transform coding. In: *Proceedings of the International Picture Coding Symposium PCS 96*, Melbourne, Mar., 1996.
- 36 Krupnik H, Malah D, Karnin E. Fractal representation of images via the discrete wavelet transform. In: *IEEE 18th Conv. Of EE in Israel*, Tel-Aviv, Mar., 1995.
- 37 谢鑫, 马争鸣. 基于小波分解的分形预测图象编码. *中国图象图形学报*, 1999, 4(3): 223~ 228.
- 38 王毅刚, 金以文. 在小波分解下的分形块方法图象编码. *中国图象图形学报*, 1996, 1(3): 201~ 204.
- 39 王大凯, 魏海. 小波分析应用于迭代分形和统计预测分形相结合的图象编码方法. *电子学报*, 1998, 26(11):
- 40 Mendivil F, Vrscay E R. Correspondence between fractal-wavelet transforms and iterated function systems with grey level maps. In: *Fractals in Engineering, Third Conference*, Arcachon, France, 1997.
- 41 Simon B. Explicit link between local fractal transform and multiresolution transform. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Image Processing*, Oct., 1995.
- 42 Davis G. Self-Quantization of qavelet subtrees. *Proc. SPIE Wavelet Applications II*, Orlando, 1995, 2491: 141~ 152.
- 43 Vrscay E R. A generalized class of fractal-wavelet transforms for image representation and compression. In: *Panchanathan S. Editor. To be appeared in a special issue of the Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering on "Visual Computing and Communications"*.
- 44 张鹤飞, 陶然, 周思永等. 小波分形混合图象压缩编码进展. *电子科技导报*, 1998, (10): 2~ 4.



谢鑫 1974年生, 北京邮电大学学士, 现为中山大学通信与信息系统专业硕士研究生, 研究方向为多媒体数据处理与传输。



马争鸣 1957年生, 华南理工大学学士、硕士, 清华大学博士, 现为中山大学电子系副教授, 主要学术兴趣为小波分析、分形几何和人工神经网络。