

基于小波系数零树结构的分形预测图象编码

谢鑫 马争鸣

(中山大学电子系信息处理实验室, 广州市 510275)

摘要 提出了一种基于小波系数零树结构的分形预测图象编码方法, 首先按照零树结构在同方向不同分辨率的各个子带图象上确定要预测的图象块(Range Block), 也就是将这些图象块串起来构成一棵与零树相类似的图象树(Range Tree); 然后, 对每一图象块, 在同方向低一级分辨率的子带图象上寻找与其最佳分形匹配的相似块(Domian Block), 而这些相似块也按照零树结构上下延伸, 以产生多棵相似树(Domain Tree), 其中与图象树最接近的相似树就是图象树的预测树. 理论分析和实验结果表明, 该方法在峰值信噪比稍微下降的情况下, 能够获得较高的压缩比.

关键词 分形图象编码 小波图象编码 小波系数的零树结构

中图法分类号: TN919.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)11-0920-05

Fractal Predictive Image Coding Based on Zerotrees of Wavelet Coefficients

XIE Xin, MA Zheng-ming

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

Abstract A new fractal predictive image coding scheme based on zerotrees of wavelet coefficients is presented. We first pick out the range blocks to be predicted based on the zerotrees from subimages of the same orientation but different resolutions. These range blocks will form a range tree, something like zerotrees. For each range block, we then look for its optimum fractally-matched domain block in the subimage of the same orientation but lower resolution than that of the range block. Each domain block obtained this way can extend through different resolutions along the same orientation to form a domain tree. Among all these domain trees, one closest to the range tree will be its predictive tree. Theoretical analysis and experimental results presented in the paper show that our scheme can obtain higher compression rate at the little cost of signal-to-noise ratio.

Keywords Fractal image coding, Wavelet image coding, Zerotrees of wavelet coefficients

0 引言

虽然一幅图象经过小波变换后, 可分解为不同方向不同分辨率的子带图象, 且同方向但不同分辨率的子带图象之间具有相似性, 但是, 早期的小波图象编码研究大都没有充分利用这一相似性. 1992年, Shapiro 在研究小波系数的渐进传输时, 开创了利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^[1]的先河. 这种零树提供了一种同方向但不同分辨率子带图象上小波系数互相联系的

数据结构. 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^[2], 我们亦有同感.

由于分形图象编码是基于图象的自相似性^[3], 因此, 近年来, 一些学者不断地在研究利用分形图象编码的一些方法来发掘和利用图象经过小波分解后所表现出来的相似性, 如1995年, Rinaldo 和 Calvagno 利用分形图象编码中的分形匹配方法, 实现了用低分辨率的子带图象来进行同方向高一级分辨率子带图象的预测^[4]; 1996年, Levy 和 Wilson 也发表过类似的研究结果^[5]; 1998年, Davis 把零树的概念引入到分形图象编码, 并把分形图象编码中的相似块(Domain Block)

和图象块 (Range Block) 扩大为相似树 (Domain Tree) 和图象树 (Range Tree), 从而使得相似块与和图象块之间的分形匹配转化为相似树与图象树之间的分形匹配^[6]. 国内也有学者从事这方面的研究 (参见文献[2]), 我们亦做过一些粗浅的工作^[7].

我们认为, Rinaldo 等人的方法^[4]只利用了同方向相邻二个分辨率子带图象之间的相似性, 尚未能充分发掘和利用同方向各个子带图象之间的相似性; 而 Davis 的方法^[6]虽把相似块和图象块扩大为相似树和图象树, 但这样做会造成计算量和局部极值点大幅度增加, 从而使得分形匹配的搜索十分困难, 为此, 本文提出了一种基于小波系数零树结构的分形图象预测编码方法, 理论分析和实验结果表明, 与 Rinaldo 的方法^[4]相比, 这种方法能够得到较高的压缩比; 与 Davis 的方法^[6]相比, 这种方法编码比较简单, 搜索时间较短.

1 基于相邻子带图象相似性的分形预测图象编码

基于相邻子带图象相似性的分形预测图象编码的核心算法就是用低分辨率的子带图象来预测同方向高一级分辨率的子带图象^[4,5,7], 其步骤大致如下:

(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 1 所示);

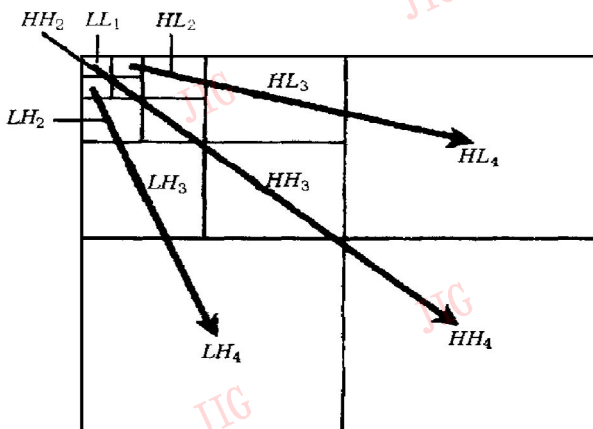


图 1 基于相邻子带图象相似性的分形预测图象编码方法示意图
(箭头方向所指为同一空间方向)

(2) 最低分辨率的子带图象 (如图 1 中的 LL_1 、 LH_1 、 HL_1 和 HH_1) 是分形预测的基础, 必须采用无失真或失真较少的图象编码方法来编码;

(3) 利用低分辨率的子带图象 (如图 1 中的 LH_i 、 HL_i 和 $HH_i, i \geq 1$), 对同方向高一级分辨率的

子带图象 (如图 1 中的 LH_{i+1} 、 HL_{i+1} 和 HH_{i+1}) 进行分形预测编码;

(4) 图象解码时, 先恢复最低分辨率的子带图象, 然后, 按照从低到高的次序, 逐级分形预测高分辨率的各个子带图象.

在核心算法的基础上, 可以做出各种各样的改进^[2,7], 这里不再赘述.

2 基于小波系数零树结构的分形预测编码

2.1 小波系数的零树结构

小波系数的零树结构是 Shapiro 在研究小波系数的渐进传输时提出来的^[1], 在渐近传输时, 这种零树结构上的小波系数被视为零值, 不予传输, 但现在零树结构的应用已经不仅仅限于渐进传输, 如今通过零树结构, 还可以把同方向不同分辨率的小波系数串接起来, 形成一棵棵互不相交的零树.

举例来说, 设 $a_{i,j}^{(k)}$ 表示位于 LH_k 子带图象上的小波系数, 其中, 下标 (i, j) 表示小波系数在子带图象上的位置, 则位于 LH_{k+1} 子带图象上的 4 个小波系数 $a_{2i-1,2j-1}^{(k+1)}$ 、 $a_{2i-1,2j}^{(k+1)}$ 、 $a_{2i,2j-1}^{(k+1)}$ 和 $a_{2i,2j}^{(k+1)}$ 就称为 $a_{i,j}^{(k)}$ 的 4 个子代小波系数, 而 $a_{i,j}^{(k)}$ 就称为 $a_{2i-1,2j-1}^{(k+1)}$ 、 $a_{2i-1,2j}^{(k+1)}$ 、 $a_{2i,2j-1}^{(k+1)}$ 和 $a_{2i,2j}^{(k+1)}$ 的父代小波系数. 每个子代小波系数又可以在 LH_{k+2} 子带图象上, 按同样方式繁衍自己的后代, 如此这般就形成了一棵四叉树 (见图 2), 并把 LH 方向上不同分辨率的小波系数按照树的结构, 建立起上下继承的关系.

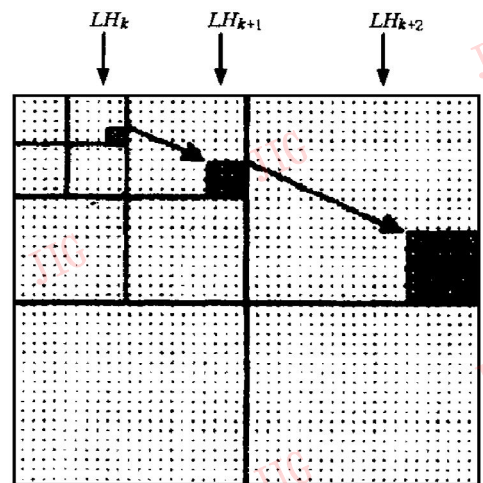


图 2 零树结构示意图

2.2 基于小波系数零树结构的分形预测图象编码
为了在分形预测图象编码中, 充分利用同方向

各个子带图象之间的相似性,本文引用并推广了零树的概念.举例来说,若设 $R^{(k)}$ 表示 LH_k 子带图象上一个 $2^k \times 2^k$ 的方块,则由 $R^{(k)}$ 所包含的父代小波系数来组成 LH_{k-1} 子带图象上一个 $2^{k-1} \times 2^{k-1}$ 的方块 $R^{(k-1)}$,而由 $R^{(k)}$ 所包含的子代小波系数组成 LH_{k+1} 子带图象上一个 $2^{k+1} \times 2^{k+1}$ 的方块 $R^{(k+1)}$.这样,我们就构造了一个贯穿 LH 各个子带图象的零树 $R = (R^{(1)}, R^{(2)}, \dots, R^{(M)})$, M 表示图象小波分解的次数.注意:这样构造的零树,其树根可能不是一个小波系数,而是包含若干个小波系数的方块.在分形预测图象编码的应用中,若 $R^{(k)}$ 表示图象块(Range Block),则由此产生的零树称为图象树(Range Tree);若 $D^{(k)}$ 表示相似块(Domain Block),则由此产生的零树称为相似树(Domain Tree),通常用 $D = (D^{(1)}, D^{(2)}, \dots, D^{(M)})$ 来表示相似树(图3).

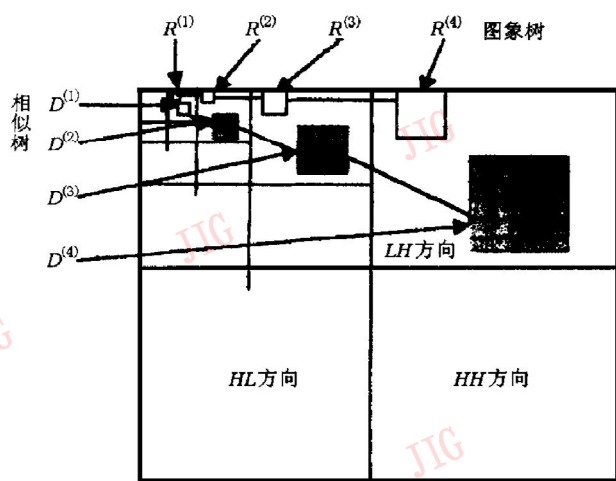


图3 图象树与相似树

根据上面对于零树的理解和推广,本文提出基于零树结构的分形预测图象编码方法,其核心算法大致如下(见图4):

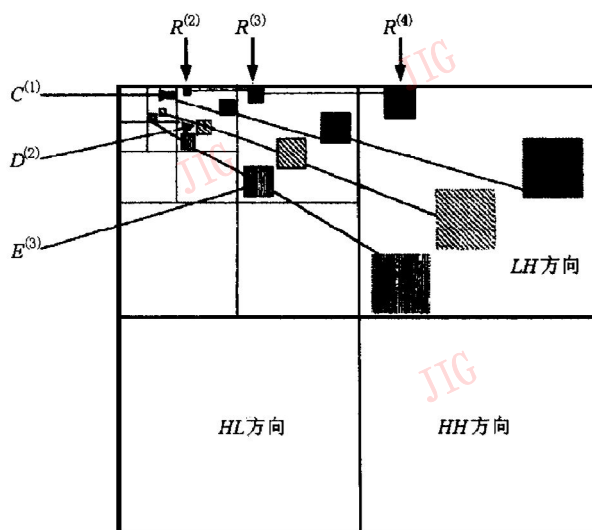


图4 基于零树结构的分形预测图象编码

编码步骤:

- (1) 对图象进行多次小波变换,产生各个子带图象;
- (2) 最低分辨率的子带图象,如图4中的 LL_1 、 LH_1 、 HL_1 和 HH_1 (也即 LL_2),是分形预测的基础,采用无失真或失真较少的图象编码方法来编码;
- (3) 把 LH 其它方向上的小波系数分成一棵棵图象树,图4中的 $R = (R^{(2)}, R^{(3)}, R^{(4)})$ 就是其中一棵图象树,然后按照如下步骤对图象树 $R = (R^{(2)}, R^{(3)}, R^{(4)})$ 进行编码:

首先,在 LH_1 中寻找与图象块 $R^{(2)}$ 最佳分形匹配的相似块 $C^{(1)}$,再由相似块 $C^{(1)}$ 按照零树结构产生一棵相似树 $C = (C^{(1)}, C^{(2)}, C^{(3)})$.

其次,在 LH_2 中寻找与图象块 $R^{(3)}$ 最佳分形匹配的相似块 $D^{(2)}$,再由相似块 $D^{(2)}$ 按照零树结构产生一棵相似树 $D = (D^{(1)}, D^{(2)}, D^{(3)})$.

然后,在 LH_3 中寻找与图象块 $R^{(4)}$ 最佳分形匹配的相似块 $E^{(3)}$,再由相似块 $E^{(3)}$ 按照零树结构产生一棵相似树 $E = (E^{(1)}, E^{(2)}, E^{(3)})$.

最后,分别计算图象树 R 与3棵相似树 C 、 D 、 E 的距离,距离最小的相似树就是图象树 R 的预测树.不妨假设 D 是 R 的预测树,于是, $D^{(2)}$ 在 LH_2 的位置以及经历的几何变换和仿射变换就是图象树 R 的分形预测编码.

- (4) HL 和 HH 方向按同样的方式编码.

注意:相似树不包含位于最大分辨率子带图象中的相似块(图4中边框为虚线的方块),而图象树则不包含位于最小分辨率子带图象中的图象块,因为它们不参加树与树的匹配运算.

解码步骤:

- (1) 先恢复 LL_2 子带图象,然后,对 LL_2 进行小波分解,得到 LL_1 、 LH_1 、 HL_1 和 HH_1 各个子带图象.

(2) 由 LH_1 、 HL_1 和 HH_1 分形预测 LH_2 、 HL_2 和 HH_2 .举例来说,要恢复位于 LH_2 中的图象块 $R^{(2)}$,按照零树结构,先由 LH_2 的相似块 $D^{(2)}$ 确定 LH_1 的相似块 $D^{(1)}$ (注意:在前述的编码过程中, $D^{(2)}$ 是整棵图象树 $R = (R^{(2)}, R^{(3)}, R^{(4)})$ 的预测块),再由 $D^{(1)}$ 分形预测 LH_2 的 $R^{(2)}$.

(3) 由 LH_2 、 HL_2 和 HH_2 分形预测 LH_3 、 HL_3 和 HH_3 .举例来说,可由位于 LH_2 中的相似块 $D^{(2)}$ 直接分形预测 LH_3 的图象块 $R^{(3)}$.

- (4) 由 LH_3 、 HL_3 和 HH_3 分形预测 LH_4 、 HL_4

和 HH_4 . 举例来说, 要恢复位于 LH_4 中的图像块 $R^{(4)}$, 按照零树结构, 先由 LH_2 的相似块 $D^{(2)}$ 确定 LH_3 的相似块 $D^{(3)}$, 再由 $D^{(3)}$ 分形预测 LH_4 的 $R^{(4)}$.

(5) 如此这般, 循序渐进, 最后完全恢复各个子带图像.

由于基于零树结构的分形预测图像编码只需对相似树 $D = (D^{(1)}, D^{(2)}, D^{(3)})$ 中的一个相似块 $D^{(2)}$ 进行分形编码, 而解码时, 其它相似块(如 $D^{(1)}$ 和 $D^{(3)}$), 就可以根据零树结构由 $D^{(2)}$ 推出, 然后再由 $D^{(1)}$ 、 $D^{(2)}$ 和 $D^{(3)}$ 分形预测图像块 $R^{(2)}$ 、 $R^{(3)}$ 和 $R^{(4)}$. 显然, 这样做大大提高了压缩比, 而且随着图像小波分解次数的增多, 压缩比也不断增高.

3 实验结果

为了便于比较, 本文分别做如下 2 个实验:

(1) 基于相邻子带图像相似性的分形预测图像编码实验;

(2) 基于小波系数零树结构的分形预测图像编码实验.



(a) Lena 原图像



(b) 基于相邻子带编码的恢复图像
素比特数为 0.244bpp, $PSNR = 30.71\text{dB}$



(c) 基于零树结构编码的恢复图像
素比特数为 0.192bpp, $PSNR = 30.13\text{dB}$

图 5 基于小波系数零树结构的分形预测图像编码结果

4 结 论

(1) 分形的本质特征是自相似性, 但由于自然图像的自相似性不强, 因此典型的分形图像编码方法难以对其进行高效压缩. 可是, 通过图像的小波分解, 可使其子带图像之间产生相似性, 若再利用分形图像编码的方法开发利用这些相似性, 就可以最大限度地发挥小波变换和分形编码的优势.

(2) 目前大致有二种小波与分形混合图像编码方法, 一种是利用低分辨率的子带图像分形预测高

表 1 列出了二种实验的对比数据, 从表 1 数据可见, 不论采用哪一种小波基, 本文提出的基于零树结构的分形预测图像编码方法都要比基于相邻子带图像相似性的分形预测编码方法提高近 10 倍压缩比, 而峰值信噪比仅仅下降 0.5db 左右, 图像的视觉效果几乎没有区别(图 5 为用 D9/7 小波进行实验的结果, 也即表 1 第 2 栏的结果). 在编码时间方面, 本文提出的基于小波系数零树结构的分形预测图像编码方法需要 2~ 3min; 基于相邻子带图像相似性的分形预测图像编码方法需要 2min 左右; DCT 图像编码方法(即 JPEG 方法)需要 0.5min 左右; 常规的小波图像编码方法需要 1min 多(实验平台为 PII 350, 64M RAM).

表 1 不同小波基的编码结果比较

小波类型	滤波器长度	零树结构编码结果		相邻子带编码结果	
		PSNR(dB)	压缩倍数	PSNR(dB)	压缩倍数
Villa2	13, 11	30.19	42.29	30.66	33.07
D9/7	9, 7	30.13	41.65	30.71	32.74
Villa4	5, 3	29.81	41.56	30.23	32.45
Villa6	9, 3	29.93	41.50	30.44	32.25

一级分辨率的子带图像^[4,5]; 另一种是利用零树结构, 即先把图像的小波系数分解成互不交叠的图像树集合(range pool)和有交叠的相似树集合(demain pool), 然后在相似树集合中寻找与图像树最佳分形匹配的相似树^[6]. 本文提出的方法, 则是先把图像的小波系数分解成互不交叠的图像树集合, 然后再对每棵图像树分别编码, 并在对一棵图像树编码时, 对于图像树中各个图像块, 先在同方向低一级分辨率子带图像中寻找与其最佳分形匹配的相似块; 然后把这些相似块拓展成相似树; 最后, 在这些相似树中寻找与图像树最接近的相似树. 与文献[4]、[5]的方法

相比,本文提出的方法,不但利用了相邻子带图象之间的相似性,而且还利用了同方向各个子带图象的相似性,从而大大提高了压缩比.与文献[6]的方法相比,本文提出的方法,只需在几棵($M-1$ 棵, M 是图象小波分解的次数,通常 M 为4~5)相似树中寻找与图象树最接近的相似树,从而大大提高了搜索效率.实验结果也表明,本文提出的方法是有效的.

参 考 文 献

- 1 Shapiro J. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. IEEE Trans. on Signal Processing, 1992, 41(12): 3445~ 3462.
- 2 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.
- 3 Jacquin A E. Fractal image coding: A review. Proceeding of IEEE, 1993, 81(10): 1451~ 1465.
- 4 Roberto Rinaldo, Giancarlo Calvagno. Image coding by block prediction of multiresolution subimages. IEEE Trans. on Image Processing, 1995, 4(7): 141~ 154.
- 5 Levy I, Wilson R. Predictive wavelet transform coding: Unifying fractal and transform coding. In: Proceedings of the International Picture Coding Symposium PCS'96, Melbourne, March, 1996: 562~ 564.

- 6 Davis G M. A wavelet-based analysis of fractal image compression. IEEE Trans. on Image Processing, 1998, 7(2): 141~ 154.
- 7 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.



谢鑫 1974年生,中山大学通信与信息系统专业硕士研究生.研究方向为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.

《微机图象处理系统》简介

本书从设计、制造、应用的角度,综合论述了微机图象处理系统的系统结构原理、系统设计方法及其关键技术,具体包括:

- (1) 介绍了微机图象处理系统的现状及其发展,论述了面向图象帧存和面向计算机内存的两种系统结构
- (2) 论述了视频数字化的原理及方法,主要论述了用数值波形法来设计扫描时序的方法及形成采样脉冲的方法
- (3) 论述了图象帧存储体的设计方法,包括帧存的管理、帧存的时序形成,并论述了邻域图象帧存储体的原理及实现方法
- (4) 论述了图象显示的原理及方法,包括查找表技术、灰度全窗口技术和动态显示技术
- (5) 论述了高速图象处理的多种技术,包括基于 DSP 的高速图象处理、利用 MMX/SSE 技术的高速图象处理以及邻域图象处理机的高速图象处理.
- (6) 论述了图象处理中的计算机接口技术,介绍了多种微机总线,特别介绍了基于 ISA 及 PCI 总线的微机图象接口.
- (7) 论述了图象软件系统的基础结构及图象处理常用算法等.
- (8) 主要介绍了摄像机、扫描仪及数码相机的性能指标.

本书软硬件相结合,内容新颖,可作为图象处理专业的教学用书,也可供从事图象处理技术的研究、开发及应用的科技人员参考.

本书由清华大学出版社于 2000 年 7 月正式出版.