

文章编号:1000-582X(2003)05-0064-04

图像压缩的小波系数模型*

刘国金,杨小帆,董世都,黄向生

(重庆大学 计算机学院,重庆 400044)

摘要:通过对3种经典的小波系数模型(EZW模型, SPIHT模型, EBCOT模型)进行仿真实验,表明SPIHT的压缩性能优于EZW(平均高0.6 dB),而EBCOT的压缩性能又优于SPIHT(平均高0.5 dB),再通过对3种模型的分析,明确了3种模型性能差异的根源在于对子带内小波系数的相关性和子带间小波系数的相似性的不同利用。最后,综合上述3种模型的优点,充分利用子带内小波系数的相关性和子带间小波系数的相似性,提出了一种新型小波系数模型。实验表明该模型在压缩比方面优于上述3种模型。

关键词:小波; EZW; SPIHT; EBCOT; 嵌入式编码; 图像压缩

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

小波分析由于具有优良的时频局部化分析性质,能以有效的信号表征方式处理图像中非平稳信号,在静态图像和视频压缩中得到快速的运用。已在JPEG2000和MPEG-4静态纹理压缩中取代DCT变换成为图像去相关的变换标准。小波图像压缩的框架是:前端对图像进行离散小波变换得到变换系数;然后利用小波系数不同子带间相关性或子带内相邻系数的相关性,对系数建模,最后,进行高效的自适应算术编码。目前已有研究证明^[1]:在相同的压缩比条件下,基于小波变换比基于DCT变换的图像压缩编码,峰值信噪比最多提高1 dB。

大量的统计研究表明:图像经小波变换后,系数分布具有较好的能量压缩特性。在低频子带,系数的能量比较集中,而在高频部分,系数的能量基本为零。利用小波系数的这些特点,出现了EZW^[2]、SPIHT^[3]、EBCOT^[4]、SFQ^[5]、CREW^[6]、EPWIC^[7]等多种方法。其中,最典型的有3种建模方法: EZW、SPIHT和EBCOT。EZW和SPIHT基于小波系数不同子带之间的相关性,构造零树,进行变形变长编码;而EBCOT基于子带内相邻系数相关性,组织良好上下文,从而提高编

码效率。模型输出的码流采用嵌入式位平面方法编码,它能以任意的比特率压缩图像;解码时,可在任意处截断,实现从有损到无损的渐进传输,适用于低码率和带宽有限的情况,非常适合在Internet上使用。

笔者分析了3种模型所基于的算法、思想,对比3种模型,给出它们在有损情况下,图像重建质量和码率的对比结果,分析各个编码优劣的原因。最后,综合上述模型的优点提出了一种新型小波系数模型。实验表明该模型在压缩比方面优于上述3种模型。

1 EZW、SPIHT和EBCOT模型的假设和思想

1.1 EZW模型

Shapiro提出了小波系数的嵌入式零树编码方案(EZW, Embedded Zerotree Wavelet Coding)^[2]。主要假设是:1)不同尺度间小波系数具有偏序性,即对于一个尺度中的系数,在小尺度中,空间相同区域的4个系数极有可能比它小;2)不同尺度间小波系数自相似性,若大尺度系数不显著,在小尺度中,空间相同区域的系数也不显著。EZW的基本思想是:它将小波系数的编码,分解为对显著系数重要性图的编码和对

* 收稿日期:2002-11-11

基金项目:国家教育部光电技术及系统重点实验室访问学者基金资助项目

作者简介:刘国金(1974-),男,河南信阳人,重庆大学硕士研究生,主要从事图像压缩方面的研究。

显著系数的幅度编码两部分,利用不同子带间小波系数存在较强的相关性(偏序性和自相似性),将不同子带间的系数构造一种二叉树结构,形成一棵棵零树,如果整棵零树都小于当前给定的域值,那么就用一个比特位“0”编码表示这棵树。EZW 实际上变相地利用游程编码的概念,即将一棵零树用一个零来编码,从而提高了总体编码效率。EZW 编码使得嵌入式位平面编码取代矢量量化成为静态图像压缩的主流。

1.2 SPIHT 模型

Said 和 Pearlman 在 EZW 的基础上提出了 SPIHT (Set Partitioning in hierarchical Trees) 图像编码算法^[3]。它同样基于 EZW 的 2 个假设,不同的是更注重一些细节的处理,实现对二叉树的分层次处理。SPIHT 的主要改进是:在小波系数树中,当一个父系数是显著的,而它的子孙都不显著时,EZW 对间接子孙构造二叉零树,形成多个零树,需要多个“0”比特位编码。而 SPIHT 给系数的所有子孙用一个“0”比特位编码,提高了编码效率。

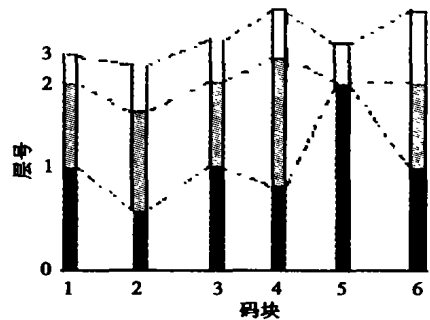
1.3 EBCOT 模型

David Taubman 提出的 EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation) 是一种基于子带内部的熵编码方案^[4]。它不同于 EZW 和 SPIHT 基于子带间系数的偏序性和自相似性,而是基于子带内相邻系数的相关性(显著性统计近似满足 Markov 性)。

EBCOT 模型的假设是小波系数的显著性仅仅依赖于与其相邻的 8 个系数的值^[4],即待编码的小波系数的显著性与其直接相邻的 8 个系数的显著性情况有关。该模型获得优良性能的原因在于将小波系数划分成互相独立编码块(Block),对块内的系数进行一轮 3 次扫描来构造良好的上下文。尤其是显著性扩展扫描(Significance Propagation Pass),充分利用小波系数统计近似满足 Markov 性,对已经显著的系数的周围连续扫描,使显著的系数出现在连续的比特流里的概率大,结合该系数直接相邻 8 个系数的显著情况形成的上下文,从而使后续的算术编码得以高效地实现。此外,EBCOT 算法在清除扫描(cleanup pass)中也利用了游程编码思想。

同 EZW 和 SPIHT 模型不同,EBCOT 采用了两步编解码方案。第 1 步是码块(Block)的编解码,第 2 步是在所有的码块编码完成以后,对所有码块进行 1 次后处理,将各个码块在每一轮 3 次扫描编码得到的码

流以多分辨率方式、失真率等多种形式组织成层(Layer)进行 2 次编解码。第 1 步解码是对局部区域(码块)的不断细化重建,在第 2 步解码过程中,解码层数的增加是对整个图像的不断细化。两步编码可使 EBCOT 具有良好的性能如:多分辨率的渐进传输、特定区域随机访问、特定区域(ROI)编码等。码流以失真率组织时,在每块的嵌入位流的第 1 个截断处,得到图像质量目标截断块的第 1 层;调整目标位率,失真度参数,对所有子块进行满足新要求的截断点计算,这样又得到第 2 层;如此重复,随着层的增加,图像的质量越来越高,直到完美重建原图像,如图 1 所示。



不同颜色的高度代表各个码块对层的字节贡献,第 2 层中没有码块 5 的数据

图 1 EBCOT 编码中层和码块的关系

2 3 种模型的实验结果

在实验中,为了便于对比,前端小波变换统一采用 9/7 滤波器,使用 5 级小波变换。用典型的 4 幅标准测试图片对 EBCOT、SPIHT、EZW 的有损压缩结果作了比较,得到表 1 的实验结果。表 2 为 3 种模型的性质对比。

表 1 不同码流率条件下的 PSNR(单色图片、9/7 Filter) dB

测试图片	模型	码 率			
		0.125bpp	0.250bpp	0.500bpp	1.000bpp
Lena (512 * 512)	EBCOT	31.04	34.14	37.30	40.40
	SPIHT	31.11	33.53	36.90	40.46
	EZW	30.23	33.17	36.28	39.55
Barbara (512 * 512)	EBCOT	25.43	28.40	32.22	37.16
	SPIHT	24.16	27.09	31.40	36.42
	EZW	24.03	26.77	30.53	35.14
Goldhill (512 * 512)	EBCOT	29.15	30.59	33.25	36.59
	SPIHT	28.48	30.56	33.13	36.55
	EZW	28.20	30.31	32.87	36.20
Baboon (512 * 512)	EBCOT	22.25	24.12	26.10	29.85
	SPIHT	21.72	23.27	25.65	29.17
	EZW	21.46	22.95	24.90	28.45

表2 3种模型的性能对比

性能	模型		
	EBCOT	SPIHT	EZW
无损压缩比	++++	++++	+++
有损压缩	++++	++++	+++
渐进分辨率传输	++++	—	—
SNR 伸缩性	++++	++++	+++
感兴趣区域编码	++++	—	—
随机访问	++++	—	—
低复杂度	++++	+++	++
容错能力	+++	—	—

说明: + 越多表示性能越好。

实验结果表明:

1) EBCOT 支持分辨率伸缩、空间区域伸缩、特定区域的编码。而 SPIHT 和 EZW 没有这些特性。

2) 在相同位码率下, EBCOT 具有更好的图像重建质量, 性能平均比 SPIHT 高 0.5 dB, 比 EZW 高 1.1 dB。

3) 同样条件下, SPIHT 比 EZW 的性能平均高 0.6 dB。

3 种模型性能差异的原因是:

1) SPIHT 和 EZW 基于小波系数子带间的偏序性和自相似性这一假设, 将小波系数形成二叉树结构, 用零树的根结点(系数)来预测其它子带的子孙结点(系数)。不能以渐进分辨率方式传送图片, 而 EBCOT 是基于子带内系数统计近似满足 Markov 性这个假设, 通过周围的 8 个系数显著性来预测当前系数, 从而构造良好的上下文将各个子带独立编码, 可以实现渐进分辨率方式传送图片。在低码率下, 达到更好的图像重建质量。

2) EBCOT 是各个子带独立编码, 能实现特定区域编码, 各个区域按不同的逼真度编码, 容错性较好, 而 SPIHT 和 EZW 是树型结构, 不能实现上述特性。

3) SPIHT 性能比 EZW 好是由于 SPIHT 对小波树中显著的父系数和不显著的所有子孙分开编码, 对不显著的所有子孙用一个“0”编码, 而对显著的直接子孙单独编码。

SPIHT 和 EZW 没有充分利用小波系数子带内相邻系数的相关性, 而 EBCOT 没有利用子带间系数的相关性, 因此可以把两者结合起来, 达到更好的效果。

3 偏序零树的小波系数编码(POMS 模型)

小波系数的偏序性、自相似性和相邻系数的 Markov 性都是小波系数的共性, 因此, 可以将这 3 种性质利用在一起。充分利用小波系数的零树偏序性和周围系数 Markov 性, 将小波系数构造成一棵棵零树, 在对零树的根结点编码时, 采用 EBCOT 算法中的 3 次扫描, 即显著性扩展扫描 (Significance Propagation Pass)、幅度精细化扫描 (Magnitude Refinement Pass)、

清除扫描 (Cleanup Pass), 并构造出相应的上下文, 以便后续的算术编码。而对零树的子孙编码是采用变形的变长编码, 即如果该零树的所有子孙都小于当前门限, 那么就用一个比特位“0”表示该零树的所有子孙; 如果该零树不是所有子孙都小于当前门限, 那么就看看该零树的所有间接子孙是否小于当前门限, 如果是, 就用一个比特位“0”表示该零树的所有间接子孙, 如果不是, 就将该零树分成 4 棵相似的小零树。

扫描时, 不同子带之间的扫描顺序与嵌入式零树编码 (EZW) 一样, 先扫描低频子带, 再扫描高频子带。但子带内部的扫描顺序就有所不同, 在一个子带内, 先扫描那些已经显著的系数的周围, 然后对已经显著的系数进行细化扫描, 最后对上面两轮扫描都没有扫描到的系数进行清除扫描编码。在对零树子孙编码时, 采用零树的一部分作为划分子集的方法。这些子集的划分很简单 (初始化划分是 $D(i, j)$, 其中 (i, j) 是第 1 层子带的坐标):

1) 如果 $D(i, j)$ 显著的, 就将其划分为 $L(i, j)$, 并将 4 个直接子孙加入到 $O(i, j)$;

2) 如果 $L(i, j)$ 是显著的, 就将其划分为 4 棵子树。

3.1 算法的数据结构

$O(i, j)$: 表示结点 (i, j) 的所有直接子孙;

$D(i, j)$: 表示结点 (i, j) 的所有子孙;

$L(i, j)$: 表示结点 (i, j) 除直接子孙外的所有子孙, 即间接子孙;

m_Node : 用于存放待编码结点标志位的数组;

$m_SignificanceFlag$: 用于存放待编码结点的显著性标志的数组;

LIS: 不显著集合列表, 在该列表中既表示 $D(i, j)$, 又表示 $L(i, j)$, 为了区分它们, 称集合 $D(i, j)$ 为类型 A, 集合 $L(i, j)$ 为类型 B; LSP: 显著系数列表;

$S(\varphi)$: 是一个显著性判断运算, 即当集合 φ 中有一个元素大于当前域值, 计算结果为 1, 否则, 计算结果为 0。

3.2 算法描述

1) 初始化

计算出“最大不为零的比特位”所在的比特平面 n ; 初始化 LSP, 使其内容为空; 将和低频及第 1 层子带坐标相一致的 m_Node 置为 1; 将第 1 层子带的所有坐标以类型 A 加入 LIS。

2) 扫描编码

① 对与 m_Node 中为 1 的坐标相一致的小波系数进行扫描编码。

如果当前比特平面为最上层的比特平面, 只做清除扫描 (Cleanup Pass); 否则, 就进行 3 次扫描, 在扫描过程中, 如果遇到显著系数, 就在 $m_SignificanceFlag$ 中相应的位置置为“1”; 并将坐标点加入到 LSP 的列表里。

②对零树子孙进行编码

对列表 LIS 中的每一项 (i, j) 进行如下编码。

a. 如果该项是类型 A, 输出显著性 $S(D(i, j))$; 如果 $S(D(i, j)) = 1$ 则对每一个 $(k, l) \in O(i, j)$ 进行如下操作: 输出 $S(k, l)$; 如果 $S(k, l) = 1$, 那么将 (k, l) 加入到 LSP 列表中, 并输出符号位。如果 $S(k, l) = 0$, 那么 $m_Node(k, l)$ 置为“1”; 如果 $L(i, j)$ 不为空集, 则将 (i, j) 以类型 B 移到 LIS 的列表的后面。否则, 将 (i, j) 从列表 LIS 中删除。

b. 如果该项是类型 B, 输出 $S(L(i, j))$; 如果 $S(L(i, j)) = 1$, 则将每一个 $(k, l) \in O(i, j)$ 以类型 A 加入到 LIS 列表里; 将 (i, j) 从列表中删除。

3) 系数幅度精细化扫描

对 LSP 中的每一项 (i, j) (除刚刚在 2) 扫描中为重要的项), 输出第 n 个重要的比特位。

4) 量化步长更新 $n = n - 1$, 并回到 2)。

4 POMS 模型的实验结果

在本算法的仿真实验中, 前端采用标准的 S + P 变换^[8], 后端接 4 个不同小波系数编码方案, 即 EZW、SPIHT、EBCOT、偏序零树小波系数编码; 选择的常用测试图像有: airplane, baboon, barbara, boats, goldhill, Lena - y, perpners, sailboat, tiffany, washat, zelda 等等 512 * 512 的标准灰阶图片。

实验中主要做的是无损压缩。实验结果见表 3。

表 3 各种压缩方法的无损压缩结果 Bits/Pixel

测试图片名	模 型			
	POMS 无损	EBCOT	SPIHT	EZW
Airplane	3.975	3.782	4.098	4.530
Baboon	5.745	5.874	6.167	6.853
Barbara	4.576	4.723	5.094	5.749
Boats	4.231	4.392	4.748	5.322
Goldhil	14.765	4.837	5.184	5.771
Lena	4.503	4.304	4.625	5.189
Perpers	4.246	4.439	4.838	5.493
Sailboat	4.786	4.951	5.290	5.940
Tiffany	4.227	4.031	4.324	4.860
Washat	4.341	4.434	4.700	5.294
Zelda	4.231	4.003	4.372	4.926

实验表明: 在大多数情况下, 本算法比经典的算法效果要好一些, 但在某些情况下比 EBCOT 效果差。原因是: 本算法主要是利用树的偏序性和自相似性将子孙编为一个比特, 但如果 EBCOT 算法的块与树的某一代子孙一样大, 那么能在 POMS 算法中编码为一个比特的子孙, 在 EBCOT 中就不用对该位平面编码。而当 EBCOT 中块的大小跨多棵树的子孙, 且多棵树的子孙同时小于当前域值时, 整个位平面都不用编码; 而这时 POMS 算法反而要用多个比特表示。此外, 在 EBCOT

中, 每个块必须用 3 比特表示最大的位平面位置, 所以块越多这种额外开销就越大; 当然, 块越少, 位平面位置越有可能高, 必须编码的位平面就越多; 所以块的大小本身就是一个折中取法。综上所述, 可以发现, EBCOT 和 POMS 算法性能的本身就与图像的特征有关, 高纹理图像就适合于 POMS 算法, 而平滑的比较适合 EBCOT; 还有, 与 EBCOT 块的大小有关。

5 结束语

目前, 没有绝对好的系数建模方法, 经典的 3 种系数模型 EZW、SPIHT 和 EBCOT 也不例外。EZW 和 SPIHT 虽然利用了子带间系数的相关性, 但是却没有利用同一子带内相邻系数的相关性, EBCOT 恰恰相反, 因此不可能达到最高的压缩比。这里提出的 POMS 模型结合上述模型的优点, 在大多数情况下, 获得了比 3 种模型更高的压缩比。尽管没有 EBCOT 的丰富功能, 但提供了一种新的系数建模思路, 相信以后经过改进的 POMS 模型会取得更好的效果。

参考文献:

- [1] XIONG Z, RAMACHANDRAN K, ORCHARD M T, et al. A Comparative Study of DCT-And Wavelet-ased Image Coding[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Processing August, 1999, 9(5):692 - 695.
- [2] SHAPRIO J M. Embedded Image Coding Using Zerotrees of Wavelet Coefficients[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(12):3 445 - 3 462.
- [3] SAID A, PEARLMAN W A. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Processing, 1996, 6:243 - 250.
- [4] TAUBMAN D. High Performance Scalable Image Compression with EBCOT[J]. IEEE Trans on Image Processing[J]. 2000, 9(7):1 158 - 1 170.
- [5] XIONG Z, RAMACHANDRAN K, ORCHARD M T. Space-Frequency Quantization for Wavelet Image Coding[J]. IEEE Trans IP, 1997, 6(5):677 - 693.
- [6] BOLIEK M, GORMISH M J, SCHSARTZ E L, et al. Next generation image compression and manipulation using [EB/OL]. <http://www.ridon.COM/CREW>, 2002 - 11 - 11.
- [7] BUCCIGROSSI R, SIMONCELLI E P. Embedded Predictive Wavelet Image Coder, GRASP Laboratory [EB/OL]. <http://www.cis.upenn.edu/~butch/EPWIC/index.html>, 2002 - 11 - 11.
- [8] SAID A, PEARLMAN W A. An image multiresolution representation for lossless and lossy compression [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1996, 5(9):1 303 - 1 310.

(下转第 75 页)

Roheological Effect for Magneteroheological Fluids

SI Hu, PENG Xiang-he

(College of Resource & Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Magneteroheological Fluids have very wide application due to the particular magneteroheological effect. It is the key to develop ment of magneteroheological fluids and application to research on the magneteroheological effect. This pa-per discusses the magneteroheological effect for Magneteroheological (MR) fluids from the view of theory and experiment. It describes the influence of the applied magnetic field, volume fraction of the particles and the size of the magnetic par-ticles on the rheological effect of MR fluids. It is shown that the experiment result agrees with the theoretic one. That provide the basis for the engineering development and the engineering applications.

Key words: magneteroheological fluid; magneteroheological effect; shear stress; shear strain rate.

(责任编辑 刘道芬)

(上接第 67 页)

Embedded Image Coding on Wavelet Coefficients

LIU Guo-jin, YANG Xiao-fan, DONG Shi-du, HUANG Xiang-sheng

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The modeling of wavelet coefficient for still image compression is studied. Firstly, through simulation experi-ments on three classical wavelet coefficient models (i. e. , EZW model, SPIHT model/and EBCOT model), it is shown that SPIHT is superior to EZW in terms of compression performance (0.6 dB higher) and the compression performance of EBCOT is significantly better than that of SPIHT on average. Then the cause for such performance differences is ex-plaind through the analysis of models. Finally a new wavelet coefficients model is proposed which combines the advanta-ges of the three classical models. Experimental results show that our model is better than the above mentioned three mod-els with respect to compression ratio.

Key words: wavelet; EZW; SPIHT; EBCOT; embedded coding; image compression

(责任编辑 张 苹)