

一种基于形态学的小波域静态图像编码算法*

武拴虎, 谈正, 邢延超

(西安交通大学 电子与信息学院 信息工程研究所, 陕西 西安 710049)

E-mail: wushuanhu@263.net; tanzh@xjtu.edu.cn

http://www.xjtu.edu.cn

摘要: 零树小波编码器 EZW 和 SPIHT 是近年来最优秀的两个编码算法,不足之处在于其表示父子关系使用了较多的辅助位.基于形态学表示的编码器 MRWD 是另一成功的编码算法,其不足之处在于没有利用带间小波系数相似性.利用这些编码器的优点,并基于小波数据的形态学表示,开发了一个新的高效小波编码器.新的编码算法的主要特点在于充分利用了带内小波系数的聚类特性和带间小波系数的相似性以及幅值衰减性.最突出的特点是利用形态算子和带间相似性进行聚类预测,从而克服了前述 3 个编码器的不足.具体数值实验结果表明,该算法的编码效率优于上述 3 类编码器,尤其对于含有大量纹理区域的复杂图像,编码效率的提高尤其显著.例如,对于 512×512 Barbara 图像,在 0.25b/p,新算法比 EZW, SPIHT 和 MRWD 算法的峰值信噪比(PSNR)分别提高 1.68dB, 0.87dB 和 0.59dB.

关键词: 图像形态学;带内聚类;带间相似性;图像编码

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

近年来,小波变换在图像压缩领域取得了空前的成功.新一代高性能图像压缩标准将以小波变换为基础,如 JPEG2000 静态图像压缩标准.小波编码器的成功之处在于合理地利用了图像在小波变换域的统计特性.零树编码器(EZW)^[1]和 SPIHT^[2]就是迄今为止最杰出的小波编码器之一.零树编码器的成功之处在于合理地利用了零值小波系数具有零树结构,使得大量的树结构的零系数只用一个零树根符号来表示,从而其编码效率大大超过了基于 DCT 变换的 JPEG 压缩标准^[3].由此可见数据组织和表示对于提高编码性能重要性.

图像形态学是近年来比较流行和热门的信号处理工具^[4,5].Servetto 等人使用形态算子来描述小波系数的聚簇(clustering)特性,开发了一个高效图像编码器 MRWD^[6],编码性能可与 SPIHT 算法相媲美.其编码算法主要特点是对小波域各子带进行光栅扫描,并利用形态进行聚类连通操作.通过这个过程,小波系数被划分成 4 个具有不同统计特性的模型,最后根据不同的统计模型进行自适应算术熵编码.在此之前, Servetto 等人开发的另外一个 MRWD 版本^[7],编码效率不高.主要原因是将小波子带内每个聚簇各用一个显式坐标来表示,其次是没有利用带间小波系数的相似性.

本文利用零树编码器^[1,2]和 MRWD 编码器^[7]各自的优点,开发了一个新的高性能小波编码器.主要特点如下:(1) 对小波系数进行显式一致标量量化,克服零树编码方法对零值小波系数的多次扫描和编码;(2) 利用带内小波系数的聚簇特性,减少零树编码方法表示父子连接的辅助位;(3) 根据频带间重要小波系数的相似性,使得每个聚簇只用一位就可标定其具体位置,大大节省了位率预算.这样,我们的算法不但有效地克服了零树编码器和 MRWD 编码器的缺点,同时也继承了两者的优点.具体数值实验结果表明,我们的算法具有优良的编码性能,压缩效果均优于 EZW, SPIHT 和 MRWD 这 3 个著名的算法.特别值得一提的是,对于含有大量纹理的图像,我们的算法其压缩结果峰值信噪比的提高尤其突出.

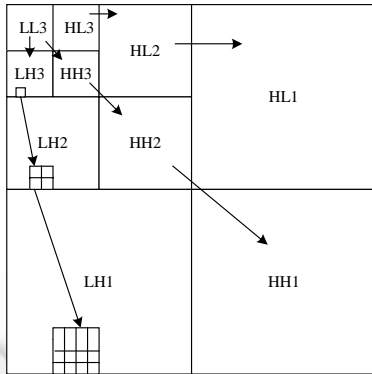
* 收稿日期: 2000-05-08; 修改日期: 2000-10-10

作者简介: 武拴虎(1965-),男,河南灵宝人,博士生,主要研究领域为图像压缩,信息处理,多媒体应用技术;谈正(1939-),男,江苏扬州人,教授,博士生导师,主要研究领域为图像处理,模式识别,虚拟现实,多媒体技术;邢延超(1972-),男,山东淄博人,博士生,主要研究领域为图像信息处理,人脸识别,多媒体应用技术.

1 图像小波变换的统计特性

1.1 频带内能量集中和聚簇

大多数自然图像由大部分的同性均匀区域和纹理区域以及相当小的一部分边缘和视觉上可以感知的边界组成.同性均匀区域过渡变化平滑,由低频分量构成;纹理区域过渡变化比较适度,由一定的低频含量和高频含量构成;边缘是区域过渡变化比较剧烈的地方,由高频含量构成.小波变换将大多数能量集中在低频通带内,而高频通带主要由边缘信息组成.另外,如图 1(b)所示,高频分量中的边缘信息具有聚簇特性.因此,使用形态膨胀算子对每个频带进行聚簇连通处理,进而得到要编码的重要小波系数不失为一种有效的方法.



(a) Illustration of parent-child relationship

(a) 小波分解和父子关系示意图



(b) Three-Scale wavelet decomposition of Lena image

(b) Lena 图像小波域重要系数分布图

Fig.1 Illustration of wavelet transform

图 1 图像小波变换示意图

1.2 频带之间的相似性

带间小波系数具有一定的相似性,其父子关系如图 1(a)所示.一个父系数由 4 个孩子系数组成.这些概念由 Lewis 和 Knowles^[8]首先引入并成功地得到了应用.实验证明,父亲小波系数的平方和孩子小波系数平方的相关性在 0.2 ~ 0.6 之间,基本集中在 0.35 周围^[1].本文正是利用了带间小波系数的相似特性将相邻子带的聚类区域用一位表示,克服了零树编码器采用二叉树来表示的不足,使得编码效率得到提高.

1.3 频带之间幅度衰减特性

虽然要想有效地刻画和充分地利用频带间幅度相似性比较困难,但是对于真实的自然图像,根据实验结果,我们可以得到一个合理的推测,那就是孩子小波系数的幅值几乎总是小于父亲小波系数.因此,对于自然图像来说,小波变换系数的大部分能量集中在低频分量上,并自粗分辨率到高分辨率逐渐衰减.因此,本文算法采用多分辨率编码方式,并在编码过程中判断细尺度频带中(如图 1(a)中的 LH3,HL3 和 HH3)最小小波系数的编码位面数是否小于粗尺度频带中(如图 1(a)中的 LH2,HL2 和 HH2)最小小波系数的编码位面数,如果小于则输出位“1”,否则输出位“0”.这样,在编码细尺度频带中的重要小波系数时,可以节省一个位面的编码.

2 基于形态算子的编码方法

2.1 形态膨胀算子及子带数据连通聚簇

在此关于形态算子我们只对本文相关的部分作简要介绍,详细的数学形态学的研究及应用请参考文献[5].设 E 表示在一个二值图像上对一行或一列进行索引的数的集合,一个二值图像可被考虑为 $E \times E$ 上的一个子集.一个像素属于这个子集当且仅当这个像素的值为“1”.

定义 1. 集合 $A \subseteq E \times E$ 关于集合 B 的膨胀为 $A \oplus B = \cup_{b \in B} A_b$, 其中 B 表示结构元素, A_b 表示对集合 A 作一个的平移量 b , \cup 表示逐个像素的并.

对于一个包含原点的结构元素 B , 膨胀算子处理的结果为一个包含集合 A 与其邻域组成的一个增大的集合. 因此, 我们定义下面的条件膨胀算子, 使其处理结果集合包含于集合 A 中. 如图 2(a)~(d) 所示, 为本文编码实验中使用的 4 个结构元素, 用其进行膨胀操作使所得到的区域分别称为 4 连通、12 连通、8 连通、24 连通区域.

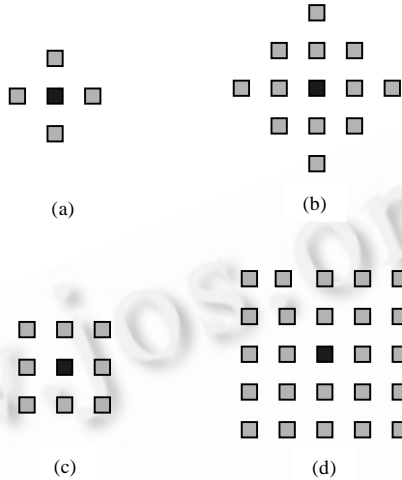


Fig.2 Structure element used by condition dilation

图 2 条件膨胀操作所用的结构元素

定义 2. 设 $A \subseteq E \times E$ 表示一个要重建的集合, 种子图像 $M \subseteq A$ (M 中的像素值为“1”)是集合 A 中任意一个子集, 那么集合 M 关于集合 A 的条件膨胀操作定义为 $D^1(M, A) = (M \oplus B) \cap A$; 其中 \cap 表示逐个像素的交. 如果定义 $D^n(M, A) = D^1(D^{n-1}(M, A), A)$, 则当 $D^n(M, A) = D^{n-1}(M, A)$ 时形成一个连通聚簇区域.

2.2 编码算法

为了更好地描述我们的算法, 首先定义两个列表集合: 重要小波系数坐标列表 LSC; 待检查孩子节点是否重要的或者是是否已经过聚簇连通处理之父节点坐标列表 LCK. 父亲节点 (i, j) 对应的 4 个孩子节点坐标集合定义为 $O(i, j) = \{(2i, 2j), (2i, 2j+1), (2i+1, 2j), (2i+1, 2j+1)\}$, 如图 1(a) 所示. 状态变量 $m_bSig[x, y]$, 表示 $[x, y]$ 处的小波系数是否重要 (重要为 1, 否则为 0), 状态变量 $m_bClustered[x, y]$ 表示坐标 $[x, y]$ 处的像素是否经过聚簇连通处理 (为 1 表示已经过处理, 否则为 0).

算法 1. 整体编码步骤

- (1) 初始化: 对原始图像进行塔式小波分解; 对于给定的位率, 采用合适量化步长, 对小波系数进行一致标量量化, 并用适当大小的结构元素滤掉对视觉不太重要的孤立像素.
- (2) 低频系数编码: 对所有低频小波系数按照光栅扫描顺序进行检查. 如果坐标为 (i, j) 处的小波系数 $C_{i, j}$ 不为 0 则为重要小波系数, 输出编码“1”, 并将 (i, j) 添加到 LSC 的末尾; 如果坐标为 (i, j) 的小波系数为 0, 则为不重要小波系数, 输出“0”. 计算输出最大小波系数幅值的位面数 $MaxNbp = \log_2 \{\max\{C_{i, j}\}\}$, 并对得到的重要小波系数列表 LSC 中重要小波系数按照最大位面数 $MaxNbp$ 进行位面编码.
- (3) LCK 初始化: 将低频子带 LL 划分为 4 个相等的子块, 除了左上角的一个块, 将其他 3 个块的坐标依次送入 LCK. 这样, LCK 中的每一个节点坐标为下一相邻高频带中对应的 4 个小波系数的父节点坐标.
- (4) 高频带小波系数编码: 设原始图像分解级数为 $N=Ndec$. 编码方法如下:
 - (4.1) 置列表 LSC 为空.
 - (4.2) 对节点集合列表 LCK 中每一节点坐标 (i, j) , 进行如下检查:
 - (4.2.1) 如果 $m_bClustered[2i, 2j] = 0$, 则检查孩子节点集合 $O(i, j)$ 中是否有重要小波系数:

- (a) 若 $O(i,j)$ 中存在重要小波系数, 输出位“1”, 并对 $O(i,j)$ 中每个节点 (k,l) 处的小波系数进行检查. 若 $m_bClustered[k,l]=1$, 则检查 $O(i,j)$ 下一节点; 否则检查 (k,l) 处的小波系数是否重要: 如果重要, 则输出位“1”, 置 $m_bClustered[k,l]=1$, 将 (k,l) 分别添加到集合列表 LSC 和 LCK 的尾部, 并以 (k,l) 为种子坐标按照算法 2(Cluster_And_Encoding(k,l))) 进行聚簇连通编码处理; 如果 (k,l) 处的小波系数为 0, 则输出位“0”, 并置 $m_bClustered[k,l]=1$.
- (b) 若 $O(i,j)$ 中没有重要小波系数, 输出位“0”, 接着检查 LCK 中的下一节点.
- (4.2.2) 如果 $m_bClustered[2i,2j]=1$, 则检查 LCK 中的下一节点.
- (4.2.3) 从 LCK 中删除坐标节点 (i,j) .
- (4.3) 计算列表 LSC 中的最大小波系数幅值位面数 $CurMaxNbp$. 如果 $CurMaxNbp < MaxNbp$, 输出位“1”, 置 $CurMaxNbp = MaxNbp - 1$; 否则, 输出“0”. 然后对 LSC 中的重要小波系数按照当前最大位面数 $CurMaxNbp$ 进行位面编码.
- (4.4) 置 $N=N-1$; 如果 $N < 0$, 结束编码; 否则转到步骤(4.1)继续编码.

算法 2. 聚簇连通、编码

BEGIN Cluster_And_Encoding(x,y)

对种子坐标 (k,l) 邻域中的每个 (dx,dy) :

- (a) 如果 $m_bClustered[x+dx,y+dy]=1$, 则检查 (k,l) 邻域中下一坐标;
- (b) 如果 $m_bClustered[x+dx,y+dy]=0$, 且 $(x+dx,y+dy)$ 处的小波系数重要, 输出位“1”, 并将 $(x+dx,y+dy)$ 添加到集合列表 LSC 和 LCK 的尾部, 置 $m_bClustered[x+dx,y+dy]=1$, 并递归调用 Cluster_And_Encoding($x+dx,y+dy$); 若 $(x+dx,y+dy)$ 处的小波系数为 0, 输出位“0”, 并置 $m_bClustered[x+dx,y+dy]=1$.

END Cluster_And_Encoding(x,y)

图 3 为利用本文算法聚类连通的结果. 解码过程非常简单, 按编码过程的反过程进行即可.



Fig.3 Clustering map got by 9-point structure element

图 3 使用 9 点结构元素生成的聚簇图

2.3 上下文自适应算术编码模型

为了进一步提高效率编码, 对以上过程的输出位采用自适应算术编码^[9]对输出位流的熵编码. 对 LSC 中重要小波系数的编码分为零编码、符号编码和幅值细化 3 个阶段. 在具体实现过程中, 我们利用前面定义的状态变量数组 m_bSig , 并在开始编码时初始化为“0”, 这时编码阶段为零编码阶段; 当坐标 (i,j) 处的重要小波系数从位面“0”过渡到

第 1 个不为 0 的位面“1”时,令 $m_bSig[i,j]=1$,这时零编码过程转变为幅值细化编码过程.零编码过程根据 (i,j) 邻域 8 个节点的状态(如图 4 所示),使用表 1 中的 9 个上下文模型自适应算术编码,表中 x 表示任意值.图 4 中, h,v,d 分别表示水平、垂直和对角方向 $m_bSig[i,j]=1$ 的像素个数.对于幅值细化编码,采用的 3 个上下文概率模型,见表 2.表 2 中定义了一个状态变量 $m_bRefine[i,j]$,初始化 0,在幅值细化操作完成前最后一步置为 1. h,v 的含义与表 1 相同.

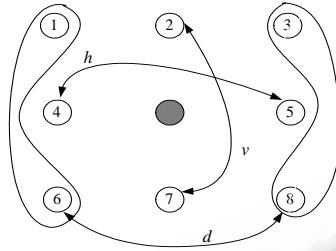


Fig.4 Neighbors involved in context formation

图 4 零编码涉及的上下文邻域

对于正、负号编码,采用固定概率模型,正、负号概率各为 0.5.对于聚簇连通处理得到的连通图,即所有 $m_bClustered[i,j]=1$ 的所有像素,根据其周围 8 个像素的 $m_bSig[i,j]$ 状态值按照表 1 的上下文进行编码.

Table 1 Context for zero coding

表 1 零编码上下文索引

For all subband(LL,HL,LH,HH)			
h	v	d	Context
2	x	X	8
1	≥ 1	X	7
1	0	≥ 1	6
1	0	0	5
0	2	x	4
0	1	x	3
0	0	≥ 2	2
0	0	1	1
0	0	0	0

对所有子带(LL,HL,LH,HH), 水平方向, 垂直方向, 对角方向, 上下文索引.

Table 2 Context for magnitude refinemrnt

表 2 幅值细化上下文

$m_bRefine[i,j]$	$h+v$	Context
1	x	2
0	≥ 1	1
0	0	0

3 实验结果

根据以上实现的算法,我们用它对常用的两幅大小为 512×512 的灰度图像(8bit/pixel)进行了实际编码.这两幅图像分别是 Barbara,Lena.实验中采用 9/7tap 双正交滤波器^[10],并对原始图像进行 5 级塔式分解.表 3 是本文算法和 EZW^[1],SPIHT^[2]和 MRWD 算法的最好版本^[6]对 Barbara,Lena(512×512)灰度图像压缩效果峰值信噪比对比结果.其中峰值信噪比定义为

$$PSNR(dB)=20 \cdot \log_{10}(255/RMSE),$$

其中 RMSE 为原始图像和压缩恢复图像的均方误差.从表 3 可以看出,本文算法与前述 EZW,SPIHT 和 MRWD 算法相比,具有更高的峰值信噪比(PSNR),特别对于含有大量纹理图像的 Barbara 图像,压缩结果峰值信噪比(PSNR)相对提高尤其明显.对于 Barbara 图像,本文算法压缩结果与 EZW,SPIHT 和 MRWD 算法的压缩结果相比,峰值信噪比(PSNR)平均值分别提高 1.716dB,0.795dB 和 0.655dB;对于 Lena 图像,PSNR 平均值分别提高 1.032dB,0.14dB 和 0.168dB.图 5(a)和图 5(b)所示为原始 Barbara 图像(512×512)与使用本文算法压缩 32 倍时的恢复图像.

Table 3 Comparison of performance of the proposed algorithms and EZW, SPIHT, MRWD**表 3** 本文算法与 EZW,SPIHT,MRWD 算法性能比较(PSNR)

	Rate (b/p)	1.00	0.50	0.40	0.30	0.25	0.125
Barbara	EZW ^[1]	35.14	30.53	-	-	26.77	24.03
	SPIHT ^[3]	36.41	31.39	30.10	28.56	27.58	24.86
	MRWD ^[6]	36.24	31.44	30.22	28.71	27.86	25.27
	Our method	37.246	32.318	30.933	29.402	28.454	25.318
Lena	EZW ^[1]	39.55	36.28	-	-	33.17	30.23
	SPIHT ^[3]	40.41	37.21	36.24	34.95	34.11	31.09
	MRWD ^[6]	40.33	37.17	36.20	34.93	34.12	31.09
	Our method	40.518	37.362	36.397	35.095	34.261	31.217

压缩位率, Barbara 图像, Lena 图像, 文献[1]算法, 文献[3]算法, 文献[6]算法, 本文算法.



(a) Original image Lena

(a) 原始 512×512 Babara 图像



(b) At rate 0.25bpp, PSNR=28.454 dB

(b) 位率 0.25b/pixel, PSNR=28.454dB

Fig.5 Coding result for Image Barbara

图 5 Barbara 图像编码效果

4 结 论

图像压缩算法性能的高低与数据的合理的组织和表示密切相关,本文基于图像的数学形态学研究实现的小波压缩算法给予了充分的展示.新算法利用了小波域数据的 3 种特性:(1) 频带内重要小波系数聚簇特性;(2) 频带间重要系数的空间依赖特性;(3) 带间系数衰减特性.成功之处在于利用带间小波系数的依赖性,并使用一个辅助位有效地标定了小波系数的聚簇区域位置,而且完全依赖低分辨率重要小波系数预测相邻高分辨率重要小波系数,减少了零树方法中用来表示父子预测关系的辅助信息位.因此,本文建议的算法不但吸取了 EZW,MRWD 和 SPIHT 这 3 个艺术化的小波图像编码器的优点,同时也相应地改进了它们各自的不足,充分说明了一个好的压缩算法并不一定完全依赖于算法是多么复杂,而在于如何挖掘数据的特性并合理地表示之.

References:

- [1] Shapiro, J.M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992,41(12):3445~3463.
- [2] Said, A., Pearlman, W.A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996,6(3):243~250.
- [3] Wallace, G.K. The JPEG still picture compression standard. Communications of the ACM, 1991,34(4):30~44.

- [4] Maragos, P., Schafer, R. Morphological systems for multidimensional signal processing. *Proceedings of the IEEE*, 1990,78(4):690~710.
- [5] Vincent, L. Morphological grayscale reconstruction in image analysis: application and effective algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993,2(4):176~201.
- [6] Servetto, S., Ramchandran, K., Orchard, M.T. Image coding based on morphological representation of wavelet data. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999,8(9):1161~1174.
- [7] Servetto, S., Ramchandran, K., Orchard, M.T. Wavelet based image coding via morphological prediction of significance. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*. Washington, DC: IEEE Computer Society Press, 1995. 530~533.
- [8] Lewis, A., Knowles, G. Image compression using the 2-D wavelet transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992,1(6):244~250.
- [9] Witten, I.H., Neal, R.M., Cleary, J.G. Arithmetic coding for data compression. *Communications of the ACM*, 1987, 30(6):520~540.
- [10] Antonini, M., Barlaud, M., Mathieu, P., *et al.* Image coding using wavelet transform. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1992,1(4):205~220.

A New Still Image Coding Algorithm Based on Morphology*

WU Shuan-hu, TAN Zheng, XING Yan-chao

(*Institute of Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

E-mail: wushuanhu@263.net; tanzh@xjtu.edu.cn

<http://www.xjtu.edu.cn>

Abstract: Zerotree-Based wavelet coders, EZW and SPIHT, are two excellent coding algorithms currently, but the imperfect point is that they need more bits to express the parent-children relationship. The another coder based on the morphological representation of wavelet data (MRWD) is also successful, but the shortage is that it doesn't use the interband similarity of wavelet coefficients. In this paper, a new wavelet-based coder is developed by taking the advantages of the above coders and based on morphology. The main property of the new coder is that it uses following characteristics of wavelet coefficients: (1) within-subband clustering of significant coefficients; (2) cross-subband similarity; (3) decay of magnitude of wavelet coefficients across subband. The advantage of the new coder is to utilize the property of intraband clustering and interband similarity to predict the interband clusters based on morphological operator and then to overcome the shortages of the above three coders. Experimental results show that the performance of the new coder is superior to the above three coders. In specially, the new coder has the outstanding performance for the images including a large portion of texture. For example, for Barbara image 512×512, at 0.25b/p, the new coder outperforms EZW, SPIHT and MRWD by 1.68dB, 0.87dB, and 0.59dB.

Key words: morphology; intraband clustering; interband similarity; image coding

* Received May 8, 2000; accepted October 10, 2000