

小波图像的膨胀-游程编码算法

吴 铮 何明一

(西北工业大学电子信息学院 西安 710072)

摘要: 提出了一种基于形态膨胀运算和游程编码的新型小波编码器——膨胀-游程(Dilation-Run)算法。编码器根据图像小波变换后重要系数的带内聚类特性和重要系数分布的带间相似性,利用数学形态学中的膨胀运算搜索并编码各聚类中的重要系数;同时使用一种高效的游程编码技术对各聚类的种子系数,即膨胀运算起始点的位置进行编码,从而避免了小波图像中非重要系数的逐个编码。编码器算法简单,并且基于位平面实现,因此输出码流具有渐进性。实验结果表明,膨胀-游程算法的性能优于零树小波编码器 SPIHT,并能与两种形态学小波编码器 MRWD 和 SLCCA 的性能媲美。对于聚类特性显著的图像,算法的性能则优于上述形态学小波编码器。

关键词: 图像压缩, 小波变换, 数学形态学, 膨胀, 游程编码

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)07-1030-05

Wavelet Image Coding by Dilation-Run Algorithm

Wu Zheng He Ming-yi

(School of Electronics & Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract A novel wavelet image coder based on morphological dilation and run-length coding, dilation-run algorithm, is proposed according to both intra-subband clustering of significant wavelet coefficients and inter-subband dependency in significant fields. The algorithm mainly involves discrete wavelet transform, bit-plane coding, morphological dilation of significant coefficient cluster within subbands, coefficient's significance predicting across subbands, run-length coding of the insignificant coefficients before each seed and adaptive arithmetic coding. The two key features of the algorithm are morphological dilation and run-length coding. The morphological dilation operator is used to search and encode the significant coefficients in each cluster, while a new run-length coding method is used to encode the position of the seed of each cluster, which is the start pixel of the dilation. The dilation-run algorithm, as a kind of embedded coder, is also rate scalable. The experimental results show that the new coder outperforms the zerotree coder SPIHT and is competitive with the morphology coder MRWD and SLCCA. For images with strong clustering feature after the wavelet transform, the new coder outperforms both the morphology coders above.

Key words Image compression, Wavelet transform, Mathematical morphology, Dilation, Run-length coding

1 引言

近年来,小波变换在图像压缩领域取得了空前的成功,若按编码器对小波系数统计特性的利用方式进行划分,小波编码器主要分为两类:一类是以 Shapiro 的 EZW^[1]和 Said 等人的 SPIHT^[2]为代表的零树编码器,这类方法主要利用了小波系数沿方向子带从低频向高频的幅度衰减特性,并以方向零树数据结构记录非重要小波系数;另一类是以 Servetto 等人的 MRWD^[3]和 Chai 等人的 SLCCA^[4]为代表的形态学编码器,这类方法则主要利用了重要小波系数在子带内的聚类特性,使用数学形态学中的膨胀运算对各聚类中的重要系数进行搜索、提取和编码。由于形态学编码器搜索重要系数的过

程直观简便,其性能也超越了零树编码器,因此正受到越来越多的关注。近年来,国内研究者也提出了多个高性能的小波形态学编码器,如张宗平等人提出的嵌入分层聚类小波零树编码^[5]和武拴虎等人提出的基于形态学的小波域静态图像编码器^[6]。

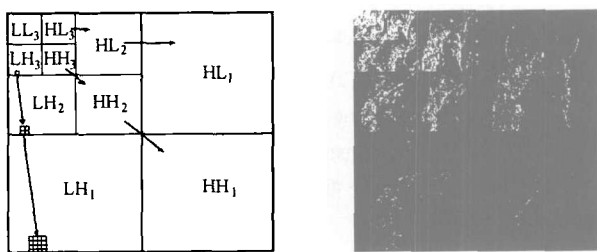
本文提出了一种新的基于形态膨胀运算和游程编码的小波编码器,主要特点为:(1)同时利用了重要小波系数在子带内的聚类特性和带间的相似性,减少了需要编码的种子系数,即膨胀运算起始点的个数;(2)利用一种高效的游程编码方法记录种子系数的位置,不必对系数的重要性逐个进行编码;(3)算法基于位平面实现,不进行预先的分析和优化处理,输出码流具有渐进性。由于算法的两个基本要素是形态膨胀

运算和游程编码,因此称为膨胀-游程(Dilation-Run, D-R)算法。实验结果表明本算法具有优良的编码性能,压缩结果优于 SPIHT,并能与 MRWD 和 SLCCA 算法相媲美。

2 图像小波变换系数的统计特性

图像的小波变换系数具有良好的统计特性。在小波编码中,如果一个小波系数的幅值大于给定的阈值 T ,则称该系数是重要的。对于自然图像,小波变换系数的能量主要分布在低频子带上,并且由低分辨率向高分辨率逐渐衰减,因此各子带中重要系数的出现概率也从低频向高频逐渐降低。对图像进行 L 级小波分解后,若记低频子带为 LL_L ,记分辨率 l 上水平、垂直和对角方向的高频子带分别为 HL_l 、 LH_l 和 HH_l ,其中 $l=1,2,\dots,L$,则各子带按重要性由高到低依次排列为 $LL_L, HL_L, LH_L, HH_L, HL_{L-1}, LH_{L-1}, HH_{L-1}, \dots, HL_1, LH_1, HH_1$ 。在各高频子带内,重要的小波系数呈聚类特性,它们反映了原始图像中边界和纹理区域的信息。同时小波变换又是原始图像的多分辨率表示,因此各子带中重要系数的分布是相似的。

图 1 是一个图像三级小波变换的示意图,变换后各子带的分布如图 1(a)所示,图中的箭头表示了各方向上高频子带间的父子对应关系,某一个系数的父系数即是指该方向低一级分辨率子带中与其位于同一位置的系数。图 1(b)是 Lena 图像小波变换后重要系数的示意图,从图中可看出,对于所有子带,重要系数的分布符合前述的排序关系,编码时应按照这一顺序对各子带的系数进行扫描;在各子带内,重要系数多聚集在一起,从重要系数聚类中的某一点开始进行形态膨胀运算,就能搜索到整个聚类,这是编码重要系数的有效方法;在各子带间,父子系数的重要性具有相关性,可以依据低分辨率子带中重要系数的分布对高分辨率子带中重要系数的分布进行预测,从而进一步提高编码效率。



(a) 小波分解和父子关系示意图 (b) Lena 图像重要小波变换系数示意图

图 1 图像小波变换示意图

3 小波图像的膨胀-游程编码算法

膨胀-游程算法是基于小波系数二进制位平面的渐进编码器,也就是以一系列阈值 $T=2^n$ ($n=N, N-1, N-2, \dots$)

对系数进行逐次逼近量化和编码,其中 N 是小波系数最大幅值的二进制位数。这类编码器输出的码流具有渐进性,解码器可以按照码率要求截取从码流起始端到任意位置的一段数据进行图像重构。在每一层位平面上,即对于阈值 $T=2^n$,算法利用形态膨胀运算对原有的重要系数聚类进行扩张,并利用游程编码算法定位新产生的聚类。下面首先介绍重要系数聚类的形态膨胀运算和种子系数的游程编码,然后再给出完整的算法。

3.1 重要系数聚类的形态膨胀运算

本文只简要介绍数学形态学中的膨胀运算,更为详细的内容可参考文献[7]。

定义 1 设集合 $A \subseteq Z^2, B \subseteq Z^2$, 集合 A 关于集合 B 的形态学膨胀为 $A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b$, 其中 A_b 表示对集合 A 中所有元素平移 b 后得到的集合。

定义 2 设集合 $A \subseteq Z^2, B \subseteq Z^2, C \subseteq Z^2$, 且 $A \subseteq C$, 则 A 关于 B 在 C 下的形态学条件膨胀为 $D^1(A, B, C) = (A \oplus B) \cap C$; 如果 $D^k(A, B, C) = D(D^{k-1}(A, B, C), B, C)$, 则当 $D^k(A, B, C) = D^{k-1}(A, B, C)$ 时,即可由集合 A , 通过 B , 在 C 内产生了一个聚类。

上述定义中的 B 也称为结构元素,图 2 为几个示例,图中的黑色像素称为结构元素的原点。膨胀运算产生的集合是一个包括原始集合 A 及邻域元素的较大集合,条件膨胀则是利用约束集合 C 进一步界定膨胀运算产生的集合。在编码时,假设对重要系数聚类 C 进行编码,并且已知聚类 $A \subseteq C$, 因此可以利用某种结构元素 B 对 A 进行膨胀运算,然后检测集合中新增加的系数是否重要,即用 C 对膨胀集合进行界定,这一过程迭代进行下去,最终将找到完整的聚类 C 。

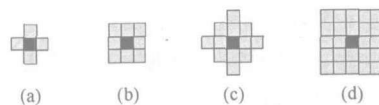


图 2 结构元素示意图

下面给出利用膨胀运算搜索和编码重要系数的算法,算法假定 (i, j) 处的小波变换系数是重要的。

算法 1 重要系数聚类编码

BEGIN Cluster-Encode (i, j)

对 $\{(i, j)\} \oplus B$ 中的每一个非重点点 $(i + di, j + dj)$ 执行:

如果点 $(i + di, j + dj)$ 未被搜索到,则

- (1) 记录点 $(i + di, j + dj)$ 已被搜索;
- (2) 输出点 $(i + di, j + dj)$ 处小波系数的重要性,若重要输出“1”,否则输出“0”;
- (3) 如果点 $(i + di, j + dj)$ 处的小波系数重要,则
 - (3.1) 输出该点处系数的符号,若为正输出“+”,若为负输出“-”;
 - (3.2) 调用 Cluster-Encode ($i + di, j + dj$)。

END Cluster-Encode (i, j)

3.2 种子系数的游程编码

种子系数是重要系数聚类膨胀运算的起始点, 从种子系数出发, 利用算法1就能搜索到整个聚类。由于小波变换后图像的能量只集中在少数系数上, 非重要系数出现的概率要大于重要系数出现的概率。特别是对于形态学小波编码器, 很多重要系数都可以通过膨胀运算搜索到, 因此在对尚未被搜索到的非重要系数进行扫描以寻找种子系数的过程中, 种子系数出现的概率将会更小。如果对依次扫描到的两个种子系数之间的非重要系数游程进行编码输出, 不仅能够确定种子系数的位置, 也可以达到压缩的目的。之后再以种子系数为起点进行膨胀运算, 就能搜索到聚类中所有的重要系数。这就是膨胀-游程算法的主要思想。

膨胀-游程算法优点是对扫描过程中连续出现的非重要系数不必逐个进行编码, 而只是编码其游程长度, 从而降低了计算复杂度。在对游程编码器精心设计后, 可以大大提高种子系数位置的编码效率, 从而有利于渐进编码算法的高效实现。在本文算法的游程编码中, 每找到一个种子系数, 就输出非重要系数的游程长度和种子系数的正负符号。其中游程长度用二进制表示, 并使用“0”和“1”两种符号输出; 种子系数的正负符号用“+”和“-”输出, 同时也用于标志游程长度编码的结束; 最后使用结束符号“E”标志扫描过程中不再有新的种子系数出现。在编码游程长度时, 从其二进制表示的最低位向最高位输出, 由于最高位总为1, 因此该位不输出, 但是对于那些二进制表示后各位都是1的游程长度, 为避免混淆, 最高位则要输出。

下面给出游程编码的算法。

算法2 重要系数聚类搜索通道和种子系数的游程编码

BEGIN Cluster-Seek-Pass (k)

(1) 初始化游程长度 Run_length = 0;

(2) 对子带 k 中的系数以光栅扫描方式进行搜索, 并对每一个非重点 (i, j) 执行:

如果点 (i, j) 尚未被搜索到, 则

(2.1) 记录点 (i, j) 已被搜索;

(2.2) 如果点 (i, j) 处的小波系数不重要,

Run_length = Run_length + 1;

(2.3) 如果点 (i, j) 处的小波系数重要, 则

(2.3.1) 调用 Run_length-Sign-Encode (Run_length, Sign), Sign 为 (i, j) 处小波系数的正负符号“+”或“-”。

(2.3.2) 重新设置 Run_length = 0;

(2.3.3) 调用 Cluster-Encode (i, j);

(3) 该通道对于子带 k 的编码结束, 输出符号“E”。

END Cluster-Seek-Pass (k)

BEGIN Run_length-Sign-Encode (Run_length, Sign)

(1) 用二进制表示 Run_length, 并依次输出最低位到次

高位上的比特符号“0”或“1”;

(2) 若 Run_length 各比特位都是“1”, 则输出“1”;

(3) 输出正负符号 Sign。

END Run_length-Sign-Encode (Run_length, Sign)

3.3 编码算法

对图像进行 L 级小波分解后, 共得到 $3L+1$ 个子带, 根据第2节中给出的重要性排序对各子带依次编号为 $k=0, 2, \dots, 3L$ 。膨胀-游程编码算法在每一层位平面上依次扫描各子带的系数, 并由4个通道完成编码: (1) 子带内重要系数聚类生长通道 (Intraband-Cluster-Grow-Pass), 即对先前编码时找到的重要系数聚类进行膨胀运算, 生长成新的聚类; (2) 子带间重要系数聚类生长通道 (Interband-Cluster-Grow-Pass), 即利用父系数预测子系数的重要性, 如果父系数重要, 则编码子系数的重要性, 若子系数仍是重要的, 则以该系数为种子系数生长出新的聚类; (3) 重要系数的细化通道 (Significant-Pixel-Refine-Pass), 即对本层位平面编码前找到的所有重要系数幅值进行细化; (4) 重要系数聚类搜索通道 (Cluster-Seek-Pass), 即寻找出新的孤立聚类。下面给出完整的膨胀-游程编码算法。

算法3 膨胀-游程编码

BEGIN Dilation-Run-Encode ()

(1) 找到幅值最大的小波系数, 标记其幅值为 Max, 输出 $n = \lfloor \log_2 \text{Max} \rfloor$;

(2) 设置重要性判别阈值 $T = 2^n$;

(3) 聚类编码和细化:

(3.1) for $k = 0:1:3L$ 调用

Intraband-Cluster-Grow-Pass (k);

(3.2) for $k = 0:1:3L$ 调用

Interband-Cluster-Grow-Pass (k);

(3.3) for $k = 0:1:3L$ 调用

Significant-Pixel-Refine-Pass (k);

(3.4) for $k = 0:1:3L$ 调用

Cluster-Seek-Pass (k);

(4) $n = n - 1$, 返回(2)。

END Dilation-Run-Encode ()

BEGIN Intraband-Cluster-Grow-Pass (k)

对子带 k 中的每一个重要系数聚类调用算法1进行膨胀生长。

END Intraband-Cluster-Grow-Pass (k)

BEGIN Interband-Cluster-Grow-Pass (k)

对子带 k 中的每一个非重点 (i, j) 执行:

如果点 (i, j) 尚未被搜索到, 并且其父系数是重要的:

(1) 记录点 (i, j) 已被搜索;

(2) 输出点 (i, j) 处小波系数的重要性;

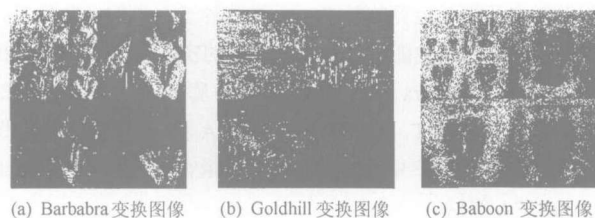
(3) 如果点 (i, j) 处的小波系数重要, 则输出系数的正负符号, 并调用算法1对该点所在的重要系数聚类进行膨胀生长。

表2 膨胀-游程算法性能同其它编码器的比较(峰值信噪比 PSNR) (单位: dB)

编码算法	Barbara				Goldhill				Baboon			
	0.125 64:1	0.25 32:1	0.5 16:1	1 8:1	0.125 64:1	0.25 32:1	0.5 16:1	1 8:1	0.125 64:1	0.25 32:1	0.5 16:1	1 8:1
SPIHT	24.86	27.58	31.39	36.41	28.48	30.56	33.13	36.55	21.72	23.27	25.64	29.17
MRWD1 ^[3,4]	25.27	27.86	31.44	36.24	28.47	30.53	33.15	36.56	-	23.26	25.74	29.35
MRWD2 ^[3]	-	-	-	-	28.31	30.61	32.92	35.96	-	-	-	-
SLCCA ^[4]	25.36	28.18	31.89	36.69	-	30.60	33.26	36.66	-	23.44	25.86	29.36
膨胀-游程算法	25.45	28.47	32.18	37.27	28.61	30.67	33.43	36.84	21.86	23.29	25.78	29.26



图4 实验图像

图5 实验图像重要小波变换系数示意图(阈值 $T=16$)

5 结论

本文提出了一种新的基于形态膨胀运算和游程编码的高性能小波编码器,即利用形态膨胀运算编码图像小波变换后的重要系数聚类,并利用游程编码方法对各聚类种子系数的位置进行编码。算法简单,同时也获得了很好的压缩结果。在大部分情况下,本文算法的性能优于3种经典的高性能小波编码器 SPIHT, MRWD 和 SLCCA 算法,但是对于小波域中重要系数聚类性较差的图像,如 Baboon, 本文算法的性能略逊于 SLCCA 算法。另外,本文算法编码输出的码流具有渐进性,可用于图像渐进传输和图像数据库浏览中。

参考文献

[1] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3445 - 3462.

- [2] Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technol.*, 1996, 6(3): 243 - 250.
- [3] Servetto S D, Ramchandran K, Orchard M T. Image coding based on a morphological representation of wavelet data. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1999, 8(9): 1161 - 1174.
- [4] Chai B, Vass J, Zhuang X. Significance-linked connected component analysis for wavelet image coding. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1999, 8(6): 774 - 784.
- [5] 张宗平, 刘贵忠, 杨一文. 嵌入分层聚类的小波零树图像编码. *计算机学报*, 2002, 25(11): 1189 - 1194.
- [6] 武拴虎, 谈正, 邢延超. 一种基于形态学的小波域静态图像编码算法. *软件学报*, 2002, 13(4): 797 - 803.
- [7] 章毓晋编著. 图像处理和分折. 北京: 清华大学出版社, 1999, 附录 A.
- [8] Witten I H, Neal R M, Cleary J G. Arithmetic coding for data compression. *Communication of the ACM*, 1987, 30(6): 520 - 540.
- [9] Boliek M, Christopoulos C, Majnai E. JPEG 2000 Part I Final Committee Draft Version 1.0. ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 N1646R, 2000, Annex D.
- [10] Tsai M J, Villasenor J D, Chen F. Stack-run image coding. *IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technol.*, 1996, 6(5): 519 - 521.

吴 铮: 女, 1977 年生, 博士生, 研究方向为小波变换和图像压缩。

何明一: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理、遥感图像处理和三维成像技术。