

基于内存优化和启发式深度优先搜索的小波零树 图像编码算法

王 娜¹, 纪 震¹, 贾传英², 李 霞¹

(1. 深圳大学信息工程学院, 深圳 518060; 2. 大连海事大学交通信息工程与控制实验室, 大连 116026)

摘 要: 本文提出了一种基于内存优化和启发式深度优先搜索的小波零树图像编码算法, 采用标志位和启发式的深度优先搜索策略完成零树编码中的排序和细化过程. 采用一张标志位图标识细化过程中的重要系数, 代替零树编码中的链表, 节省了内存占用. 同时采用启发式的深度优先搜索策略检索树结构中的不重要元素集合信息, 不仅省去了存储排序全局信息的链表和位图, 符合优化内存的需要, 还减少了排序过程中的定位信息, 提高了信噪比. 实验表明, 和现有的小波零树编码算法相比, 较大地节省了编解码内存, 信噪比虽略低于 SPIHT(Set Partition In Hierarchal Tree) 算法, 但高于 EZW(Embedded Zerotree Wavelet)、LZC(Listless Zerotree Coding) 等编码算法, 为硬件实现小波零树编码算法探讨了一条有效途径.

关键词: 零树小波; 内存优化; 启发式深度优先搜索

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2005)03-0440-04

A Wavelet Zerotree Image Coding Method Based on Memory Optimization and Heuristic Depth Finding Strategy

WANG Na¹, JI Zhen¹, JIA Chuang-Ying², LI Xia¹

(1. Faculty of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. The Lab of Information Engineering and controls, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: A wavelet zerotree image coding method based on memory optimization and heuristic Depth Finding Strategy (DFS) is presented in this paper. The form of flag and heuristic DFS are introduced in the sorting and refining process. The flag map instead of lists in the refining process is used to keep significant wavelet coefficients. The DFS is used to search insignificant wavelet sets in the sorting process. Therefore, both the memory of coding and the oriented information of sorting are decreased. Experimental results show that compared to the existing wavelet zerotree coding method, the memory is significantly reduced. Although the PSNR is little lower than SPIHT's, it is higher than EZW's and LZC's. This proposed method provides an efficient hardware implementation.

Key words: wavelet zerotree; memory optimization; heuristic depth finding strategy

1 引言

近几年来基于小波变换的图像编码成为图像压缩领域的一个研究热点^[1]. 研究方向大致可分为两类: 一类是依托小波变换, 改进基于傅立叶变换的编码手段以提供高质量和高压缩比的编码方法^[3-5]; 另一类是利用小波变换的多分辨率特性, 能提供更多编码灵活性(如码流嵌入性、图像传输渐进性等)的低复杂度编码方法, 以小波零树编码方法为代表^[6-8]. 结合小波变换改进传统量化方法的编码算法编码码率单一, 不适合现今的网络图像通信. 而小波零树编码具有多码率和多分辨率特性, 适合网络传输, 但小波零树编码方法速度慢, 所需存储空间

大. 以具有代表性的小波零树编码 SPIHT^[6] 算法为例, 由于在编码过程中需要维护 3 个链表, 而链表的每一项又需要 18bit 的内存, 所以对于一幅 $N \times N$ 大小的图像, 共需要内存 $N \times N \times 3 \times 8$ bits, 巨大的数据量使编码时的内存消耗很大, 既影响编码速度又不利于硬件实现. 因此研究如何节省编码内存成为小波零树编码方法是否实用的一个关键因素.

本文提出了一种基于内存优化和启发式深度优先搜索策略的小波树编码方法, 用标志位的形式存储重要系数, 用启发式的深度优先搜索策略编码树结构中的不重要元素集合信息, 达到优化内存的目的. 实验表明本文算法和现有小波零树编码算法相比, 较大地节省了内存占用, 信噪比虽略低于 SPIHT

算法,但高于 EZW^[7]、LZC^[8] 等编码算法,为硬件实现小波零树编码算法探讨了一条有效途径。

2 小波零树图像编码算法分析

小波零树编码是由 J. M. Shapiro 于 1993 年提出的,他通过巧妙地利用小波图像多分辨率的信息组织特点,用零树的方法既预测了不重要系数,又提供了编码的定位信息,用较低的编码复杂度实现了较高性能的编码,开辟了小波编码方法的新篇章,并提供了一个非常适合网络图像传输的编码特性—嵌入性。此后涌现出了一批基于零树的改进算法^[10-12]。

小波零树编码思想就是将对小波变换系数的编码分解为对标志系数重要性图的编码和对重要系数的幅度编码两部分,概括为渐进量化的位平面编码,所以这类小波编码都是通过排序和细化两个过程来实现的。排序过程要完成小波系数的渐进量化,需要存储排序信息以维持排序过程。细化过程要完成重要系数的位平面编码,即找出相对于量化阈值的重要系数位,需要存储重要系数以实现细化。所以小波零树编码算法需要占用大量内存。如在 EZW 编码算法中始终有两个列表完成排序和细化过程。采用主列表记录每个尚未被确定为重要系数的系数坐标,维护排序过程。副列表存储重要系数幅度实现重要系数的细化。在 SPIHT 算法中采用三个单向链表(LSP、LIP、LIS)存储重要系数和多层集合分割信息,LIS 链表记录对于当前量化阈值为不重要的象素集合,LIP 链表记录对于当前量化阈值为不重要的象素,实现对重要系数的搜索。LSP 链表记录已经被确定为重要象素的系数幅度,实现重要系数的细化。这些用于存储排序信息和重要系数信息的链表需要大量内存,而对于普通的 PC 机和一般的硬件,内存都是很有限制的,所以小波零树编码方法存在着内存消耗大和速度慢的缺点。

针对小波嵌入零树编码方法的内存占用问题^[9],Wen, Guolin 提出了 LZC 编码算法,即采用两张状态位图 F_c 和 F_d 存储排序信息,用一个单向链表存储重要系数幅度。相对纯链表结构,结合状态位图的链表方法在一定程度上减少了内存占用,但增加了搜索过程中重要系数的定位信息,导致了信噪比的降低。如对图 1 所示的小波变换域图像编码。假设只有阴影部分的系数为重要系数,而该系数的兄弟系数为不重要系数。在排序过程中,对于 EZW 算法该重要系数已经存储到副链表中,假设检测阈值减半时,没有发现新的重要系数,这时以这个重要系数的父节点为根节点的树为零树,该

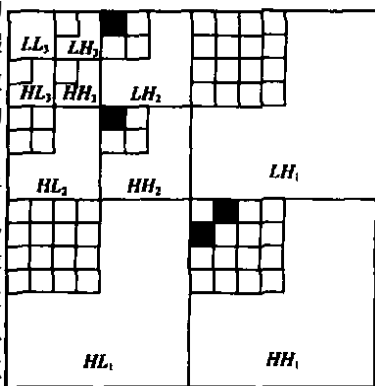


图 1 小波变换域示意图

重要系数的兄弟节点包含在这棵零树中,可以用单一零码字编码;对于 SPIHT 算法,该重要系数存储到重要系数链表的同时,它的不重要兄弟节点存储到了不重要象素集合 LIP,它的孙子

里后代节点存储到了不重要集合 LIS 里,在阈值减半时,在没有发现新的重要系数时,也可以用单一零码字编码;所以 EZW、SPIHT 算法中的链表是至关重要的,而这又与内存占用相矛盾。对于 LZC 算法,在阈值减半时,已经为重要系数的父节点在状态位图中已经表明有重要子孙,如果该重要系数的兄弟节点还是不重要系数,产生了虚假重要子孙的问题,于是会出现三个多余的零码字作为搜索重要系数的定位信息,增加了搜索信息比特。并且可以看到,重要系数不论出现在小波分解的哪个高频子带中,即处在 LH_i 、 HL_i 、 HH_i 的任一位置,如果兄弟系数有 3 个不重要系数就会浪费 3 个零码字,2 个不重要系数就会浪费 2 个零码字,1 个不重要系数就会浪费 1 个零码字,即 $R = (B_1 - B_2)(4 - X)$,其中 R 为浪费的零码字, X 为重要系数个数, B_1 为已经检测为重要系数的父节点时的位平面值, B_2 为兄弟系数出现重要系数时的位平面值。可见兄弟系数越少,浪费的零码字越多,且兄弟系数相差越大,浪费的零码字也越多,这对于一幅稍大的图像浪费的位比特信息就相当可观了。所以虽然 LZC 算法采用链表结合位图的形式减少了内存占用,但使信噪比降低了。

本人针对 LZC 算法信噪比的降低问题,曾提出过一种改进的无表零树编码方法^[2]。由于采用的仍是 LZC 的两种位图形式,没有克服虚假重要子孙系数的问题。所以本文就是在对此进行了进一步研究的基础上,提出一种基于内存优化和启发式深度优先搜索策略的小波零树编码算法。采用一张状态位图 F_c 标示重要系数,省去了 LZC 算法中标志重要系数子孙的位图 F_d 和存储重要系数的链表,减少了排序和细化过程中的内存占用;采用启发式深度优先搜索策略检索树结构,一经访问到某树节点,就访问它的所有子孙,克服了虚假重要子孙系数的问题,减少了排序过程中的定位信息,进一步提高了信噪比。下节将详细介绍本文提出的内存优化和启发式深度优先搜索策略的小波零树图像编码算法。

3 基于内存优化和启发式深度优先搜索策略的小波零树图像编码算法

3.1 内存优化的编码结构

基于内存优化小波零树图像编码算法仍然采用零树结构组织小波分解系数,定义以 $X(m, s, i, j)$ 为根节点的树 $Tree(X)$ 为:

当 $m = 1$ 时, $Tree(X) = \{C(m, s, i, j)\}$;

当 $m \neq 1$ 且 $s = LL$ 时, $Tree(X) = \{C(m, s, i, j)Tree(m-1, s, 2i, 2j)Tree(m-1, s, 2i+1, 2j+1) \cup Tree(m-1, s, 2i+1, 2j)Tree(m-1, s, 2i+2, 2j+1)\}$;

当 $m = L$ 且 $s = LL$ 时, $Tree(X) = \{C(m, s, i, j)Tree(m, s, i+LL, j)Tree(m, s, i, j+LL)Tree(m, s, i+LL, j+LL)\}$;

其中 m 表示小波系数所处的层数 ($m = 1$ 表示小波系数位于第一分解层, $m = L$ 表示小波系数位于最高分解层), s 表示小波系数所处的频带 ($s = LL$ 表示小波系数处于最低频子带), i, j 表示图像的行和列。

对小波系数的编码就归结为对树的搜索。在搜索过程中提出只采用一张状态位图 F_c ,既提供搜索过程中的状态信息

以维护排序过程,又用来标记树节点本身是否为重要像素系数.和传统的基于零树结构的算法相比,省去了存储排序和细化信息的链表.和LZC算法相比,省去了标记重要子孙的状态位图 F_d 和存储重要系数的链表,从而减少了搜索过程中的内存占用. F_c 图定义如下:

$$F_c(m, s, i, j) = \begin{cases} 1, & c(m, s, i, j) \text{ is significant} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

F_c 图和原图大小相同,如果 $F_c(m, s, i, j) = 1$,表明该系数为重要系数,因此对于一幅 512×512 的灰度图像,用来存储零树结构占用的内存只有32Kbytes.和SPIHT算法占用1.688Mbytes的内存相比,内存占有量减少了54倍,较大地减少了编码内存.和LZC算法相比,内存占有进一步减少了8Kbytes.

3.2 编码树结构的启发式深度优先搜索策略

为了配合一张状态位图 F_c 的编码结构,进一步减少码流中的定位信息,本文提出对整个树编码采用启发式的深度优先搜索策略,即把树当作状态空间,把树中节点的子孙是否有重要系数看作启发性信息,问题归结为寻找处于不同位平面的重要系数和不重要像素集合.重要系数逐次按位平面输出,不重要像素集合用单一零码字编码.

具体思想是:从根节点开始,首先判断根节点的重要性,若是重要像素,则利用⑦进行编码,然后利用集合重要性检测函数

$$S_s(\text{Tree}(m, s, i, j)) = \begin{cases} 1, & \text{若 } |C(m, s, i, j) \in \text{Tree}| \geq 2^B, \\ & \text{且 } F_c(m, s, i, j) \neq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

作为启发信息,其中 B 表示当前搜索的位平面的值,如果式(2)为1,表明根节点的子孙中有重要像素,就把子节点压入栈中,再在其子节点中选择一个节点进行考察,若是重要像素,一方面利用下面⑦进行重要系数的编码,另一方面再在该子节点的子节点中选择一个节点进行考察,一直如此向下搜索,当到达某个子节点且该子节点不能扩展时,再选择其兄弟节点进行考察.

对一棵树的搜索过程就可归结如下:

- ①把根节点压入栈中;
- ②如果栈空,则退出;
- ③取出栈中的第一个节点,判断该像素是否为重要像素,若是,则转⑦;④以该节点作为树根利用式(2)进行重要性检测;若不重要,则转②;
- ⑤若该节点不可扩展则转②;
- ⑥扩展该节点,将其子节点压入栈中,且转第③步;
- ⑦输出重要系数的相对应的重要位,在状态位图 F_c 相应位置标志1,之后转④;

从启发式的深度优先搜索过程中可以看出,一经访问到某节点就访问到了它的所有子孙,不用预分配内存来存储这些树节点,只用到了状态位图 F_c 的信息,省去了LZC编码中的标志重要子孙的标志位图 F_d 和传统零树编码算法中的排序信息链表,较好的满足了节省内存占用编码的需要.同时由

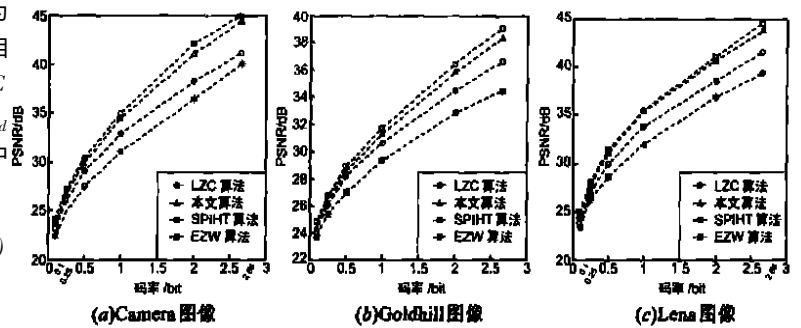


图2 不同图象的压缩信噪比

于不采用标志位图 F_d ,在阈值减半时,就不会产生虚假重要子孙系数,进一步减少了搜索重要系数的定位信息.

3.3 基于内存优化和启发式深度优先搜索策略的小波零树编码算法

对一幅小波分解之后的图像进行内存优化的小波嵌入零树编码步骤如下:

- (1)选定初始阈值为 $T = 2^{\lfloor \log_2 \max(c(i, j)) \rfloor}$, $c(i, j)$ 表示小波系数值, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整运算;
- (2)令 $T = T/2$,如果阈值 $T < 1$,则退出;
- (3)初始一个空栈,并把小波分解最低频子带系数压入栈中;
- (4)把状态位图标志 F_c 为1的重要像素输出相对应的重要位;
- (5)从栈中弹出一节点,按启发式深度优先搜索策略遍历树;
- (6)如果栈空,则转(2),否则转(5);

由此可见,采用一张状态位图 F_c 标志系数的重要性,代替了SPIHT、EZW算法中的重要像素链表;且结合深度优先搜索策略,省去了SPIHT和EZW算法中的用于存储排序信息的链表,把集合重要性检测函数当作搜索过程中的启发信息,省去了LZC算法中的标志重要子孙的重要位图 F_d ,既节省编码时内存占用,又减少搜索过程中的定位信息,提高了信噪比.

4 实验结果与分析

本文算法在PIII 700MHz的微机上用Visual C++ 6.0进行了验证,选用 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 的标准测试灰度图像Camera、Goldhill和Lena,其中Lena图像为纹理丰富图像,Goldhill为风景图像,Camera为背景简单细节丰富的图像.测试图像的大小为 $N \times N$.小波滤波器采用Antonini 9/7双正交滤波器,在图像边界处采用了对折式扩展.熵编码算法采用自适应算术编码方案.图2显示了EZW算法、SPIHT算法、LZC算法和本文算法对几幅图像的压缩信噪比.EZW算法、SPIHT算法、LZC算法都具有对称性,编码速度和解码速度基本相同.由于LZC算法的编解码速度最快,图3显示了本文算法和LZC算法编解码时间.图4是在低码率下即高压比下几幅图像采用本文算法的重构效果图.几种算法占用内存如表1所示.

表1 几种小波零树编码算法的内存占用表(单位: bytes)

编码算法	SPIHT 算法	EZW 算法	LZC 算法	本文算法
占用内存	27/4 $\times N \times N$	9/2 $\times N \times N$	1/8 $\times N \times N$ + 1/32 $\times N \times N$	1/8 $\times N \times N$

从实验结果图 2~ 4 和表 1 中可以看出,本文算法信噪比略低于 SPIHT 编码算法,但明显高于 EZW 和 LZC 算法,编码速度略高于 LZC 算法,在较低码率下压缩比高,重构的视觉效果较好,且内存占用最少,适合硬件实现零树编码。

5 结论

适合网络图像通信的小波零树编码算法由于要采用零树结构组织小波系数,所以需要开辟大量内存来存储排序和细化过程中的全局信息。本文提出的内存优化方法通过采用一张状态位图的形式可以大大减少小波零树编码算法所需的存储空间,同时采用了启发式的深度优先搜索策略,减少了排序过程中的定位信息,提高了信噪比,也为硬件实现图像压缩编码找到了一种有效的方法。用硬件实现本文算法,进一步提高编解码速度是本文今后的研究方向。

参考文献:

- [1] Geoff Davis, Aria Nosratinia. Wavelet based image coding: An overview [J]. Applied and Computational Control, Signals and Circuits, 1998, 1 (7): 141- 151.
- [2] 王娜, 贾传炎. 一种改进的无表零树编码的图像压缩方法 [J]. 电子学报, 2003, 6(31): 879- 881.
- [3] Worr-Ha Kim, Yir-Hen Hu, Truong Q. Nguyen. Wavelet based image coder with entropy constrained lattice vector quantizer [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1998, 8(45): 1015- 1030.
- [4] Vij M, Kingsbury N. Entropy coded pyramid vector quantization for interband wavelet image coding [J]. IEE Proceedings Vision Image and Signal Processing, 2000, 4(147): 304- 312.
- [5] Chen W S, Hsieh L. Wavelet based adaptive vector quantization for still image coding [J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2002, 12(4): 166- 174.
- [6] U Bayazit, W A Pearlman. Algorithmic Modifications to SPIHT [C]. ICIP2001 Proceedings, Thessaloniki, Greece, Oct., 2001, (3): 800- 803.
- [7] J M Shapiro. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE Trans Signal Process, 1993, 41(12): 3445- 3462.
- [8] Wen Kuo Lin, N Burgess. Listless zerotree coding for color images [J]. Proc Of the 32nd Asilomar Conf On signals, System and computers, 1998, (1): 231- 235.
- [9] Frederick W Wheeler, W A Pearlman. Low Memory Packetized SPIHT

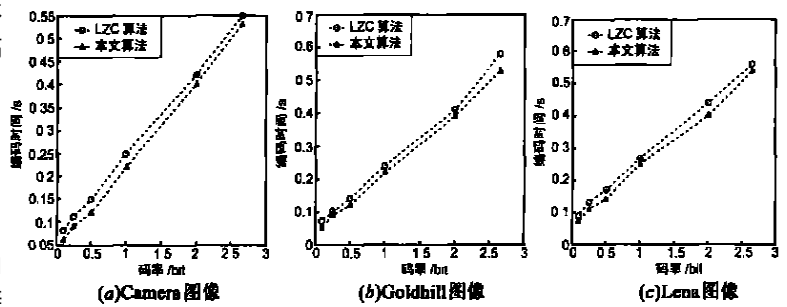


图 3 不同图象的编码速度图



图 4 高压比下不同图象的重构视觉效果图

- [10] K Rogers, P C Cosman. Robust wavelet zerotree image compression with fixed-length packetization [C]. Proc of Data Compression Conference, Utah, USA: Snowbird, March, 1998, (3): 418- 427.
- [11] R Kutil. A significance map based adaptive wavelet zerotree code [J]. SPIE Proceedings, 2002, 1(4674): 61- 71.
- [12] D Taubman. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9(7): 1158- 70.

作者简介:



王 娜 女, 1977 年出生于河北保定, 工学博士, 深圳大学信息工程学院讲师, 主要从事图像编码、小波理论、模式识别等方面的研究工作。E Mail: wangna@szu.edu.cn.

纪 震 男, 1973 年出生于江苏溧阳, 工学博士, 深圳大学信息工程学院副教授, 主要从事图像编码、小波分析、数字水印等方面的研究工作。E Mail: Jizhen@szu.edu.cn.