

一种零树与游程相结合的小波图象编码方法

黄卓君 马争鸣

(中山大学电子系信息处理实验室, 广州 510275)

摘 要 Shapiro 的零树编码方法是众多小波图象编码方法中的佼佼者, 但通过研究发现, 图象的小波系数经过量化和零树编码后, 如果按一定的顺序扫描, 则零树根会连续出现, 因此, 若对 Shapiro 的零树编码方法进行改进, 即在零树编码之后, 熵编码之前, 对连续排列的零树根进行游程编码, 则可以进一步提高图象编码的压缩比. 理论分析和实验结果均表明, 该方法可取得较好的效果.

关键词 小波图象编码 零树编码 游程编码

中图法分类号: TN919.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2001)11-1118-07

Wavelet Image Coding Combining Zerotree and Runlength Coding

HUANG Zhuo-jun, MA Zheng-ming

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

Abstract After quantization, a lot of image's wavelet coefficients will become zero valued. How to encode the location of these zero-valued coefficients with as few symbols as possible is the key to increase the compression ratio of image coding. Shapiro presented the so-called zerotree structure to encode these zero-valued coefficients, in which the root of a zerotree is the only symbol to be encoded. One can obtain from the root's location the locations of all zero-valued coefficients within the zerotree. Shapiro's zerotree coding has been accepted by JPEG2000, a new image coding international standard. In this paper we present an improvement to Shapiro's zerotree coding. We find in practice that after quantization and zerotree coding of image's wavelet coefficients, the roots of zerotrees will appear consecutively if they are scanned following a certain order. Thus, we add the runlength coding of consecutive roots of zerotrees before entropy coding to increase the compression ratio of image coding. Theoretical analysis and experimental results presented in this paper show that our algorithm improves the performance of Shapiro's zerotree coding.

Keywords Wavelet image coding, Zerotree coding, Runlength coding

0 引 言

由于图象的小波系数经过量化后, 会出现大面积的零系数, 因此, 怎样用最少的符号来表示这些零系数的位置, 则是图象编码提高压缩比的关键. Shapiro 的零树编码^[1]提供了一个绝好的方法, 即只要记住零树根的位置, 就可记住零树结构中所有零系数的位置. 由于这种零树编码方法可以极大提高

压缩比, 因此现在零树编码已经成为新的图象编码国际标准 JPEG2000^[2]的一个组成部分. 通过实践发现, 如果按一定的顺序扫描, 由于零树根会连续出现, 因此, 可以采用游程编码的方法来表示这些连续出现的零树根, 从而进一步提高图象编码的压缩比.

1 Shapiro 的零树编码方法

一幅二维图象经过一层小波分解后成为如下 4

个子图象; LL_1 子图象(水平,垂直方向都是低频分量)、 LH_1 子图象(水平方向是低频,垂直方向是高频)、 HL_1 子图象(水平方向是高频,垂直方向是低频)和 HH_1 子图象(水平,垂直方向都是高频)。上述子图象统称为第 1 层子图象。如果对 LL_1 子图象再进行一层小波分解就可得到 LL_2 、 LH_2 、 HL_2 和 HH_2 等第 2 层子图象,如此下去,当分解层数为 M 时,子图象总数为 $3M+1$ 。图 1 是 $M=3$ 时的小波分解示意图。由于小波分解的特点,其小波系数的大小总的来说是低频的大于高频的,即高层的大于低层的,水平和垂直的大于对角的。

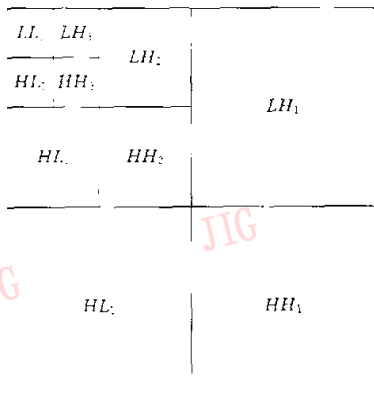


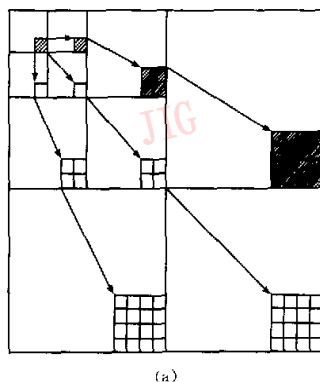
图 1 图象的小波分解

1.1 零树的定义

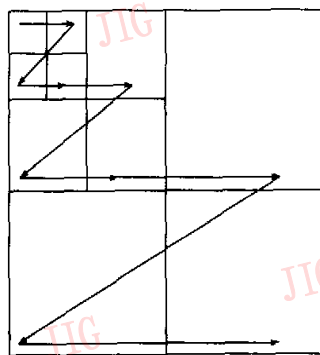
零树结构的定义为:对于给定的阈值 T ,如果小波系数 $x < T$,则称 x 是小系数;如果一个处于低分辨率(低频尺度)上的小波系数对于给定的阈值 T 是小系数,而且处于同样空间位置的高分辨率(高频尺度)上的小波系数都小于给定的阈值 T ,则该结构就称为零树(Zerotree)。

对于给定的低频子图象中的系数而言,与其对应的具有相同空间定位的高频子图象(如果存在的话)中的系数称为是它的子孙;同样,对于定位在高频子图象中的系数而言,跟它对应的处于相同空间的低频子图象中的系数称为是它的祖先。这样就构成了父子关系。由此可见,对于一个分解层数为 M 的小波分解图象来说, LL_M 子图象的每一个系数有 3 个子代系数;而 LH_1 、 HL_1 和 HH_1 子图象的系数则没有子孙;其余子图象的每个系数有 4 个子代系数。这样,从 LL_M 子图象的某个系数开始,根据子孙关系伸展下去,就得到了一个树形结构。零树编码就是针对这些树形结构进行的。图 2(a)是小波分解后

从某一个系数伸展开的父子关系示意图,并且图中画出了一个树形结构。



(a)



(b)

图 2 零树结构和扫描顺序

1.2 零树编码的扫描方式以及符号流的形成

图 2(b)所示是零树编码时的扫描方式,亦即扫描顺序图。由于对于每个子图象内部的系数是按行从左到右的顺序扫描,而对于不同的子图象,是按从低频到高频,然后从水平到垂直再到对角的顺序进行扫描,因此,对于 $M=3$ 的小波分解图象(如图 2),其顺序为:

$$LL_3 \rightarrow LH_3 \rightarrow HL_3 \rightarrow HH_3 \rightarrow LH_2 \rightarrow HL_2 \rightarrow HH_2 \rightarrow LH_1 \rightarrow HL_1 \rightarrow HH_1$$

总的看起来就像一种 Z 型的扫描方式。

在规定了扫描方式以后,结合零树的定义就可以用下面的判决来将小波系数变为零树编码的符号流,以便进行熵编码。对于某一个小波系数,已知阈值为 T ,则根据零树判决,它只能是下面情况其中的一种:

- (1) POS(正):如果 $|x| \geq T$,并且 $x > 0$;
- (2) NEG(负):如果 $|x| \geq T$,并且 $x < 0$;

(3) ZTR(零树根):如果 $|x| < T$,其子孙全部小于 T ,并且 x 的祖先不是ZTR;

(4) IZ(孤立零点):如果 $|x| < T$,且其子孙中有系数大于 T ;

(5) Z(零):如果 $|x| < T$,且 x 已没有子孙.

由此可以看出,Z是ZTR的特殊情况,因此任何一个系数都可用4个符号中的一个来表示,这就是零树编码的一般步骤.结合到具体的情况,则一般采用渐进压缩与渐进传输的方式,并逐次减少 T 的值,即先对一个进行一次零树编码,然后经熵编码后直接传输,并将POS和NEG的系数全置为0;再将 T 减少,进行下一轮精度更高的零树编码,如此循环下去,直到压缩率或图象质量达到要求为止,这样即可以灵活地控制压缩的进行,由此可见,便于采用逐步逼近也是零树编码的一个很大的优点.

2 零树与游程相结合的编码方法

2.1 零树与游程相结合的可行性

小波系数经过量化后,就可以进行渐进传输了.在每次传输时,先设定一个阈值 T ,将超过阈值 T 的小波系数进行传输;而低于阈值 T 的小波系数则被认为零,并在本次传输时不进行传输,Shapiro采用的零树结构,虽然可以通过零树根来表示那些在

本次传输中被认为是零的小波系成的位置,但通过实际操作发现,随着传输次数的增加,多个零树根连续出现的情况愈来愈频繁,下面是一幅 8×8 的图象经过3层($M=3$)小波分解后小波系数的分布图:

63	-34	49	10	7	13	-12	7
-31	23	14	-13	3	4	6	1
15	14	3	-12	5	-7	3	9
-9	-7	-14	8	4	2	3	2
-5	9	-1	47	4	6	-2	2
3	0	-3	2	3	-2	0	4
2	-3	6	-4	3	6	3	6
5	11	5	6	0	3	-4	1

图3 经三层小波分解后小波系数分布图^[1]

按照Shapiro的方法,对这些小波系数进行零树编码的步骤如下:

(1)以 $T=32$ 作为第1次传输的阈值,超过 T 的小波系数,按其正负分别用POS或NEG表示,而低于 T 的小波系数,则按其子孙的情况分别用零树根(ZTR)或孤立零(IZ)表示,得到如图4所示的小波系数与零树编码符号关系图.

63	-34	49	10	7	13	-12	7
-31	23	14	-13	3	4	6	-1
15	14	3	-12	5	-7	3	9
-9	-7	-14	8	1	-2	3	2
-5	9	-1	47	1	6	-2	2
3	0	-3	2	3	-2	0	4
2	-3	6	-4	3	6	3	6
5	11	5	6	0	3	-4	1

阈值 $T=32$

POS	NEG	POS	ZTR	ZTR	ZTR	x	x
IZ	ZTR	ZTR	ZTR	ZTR	ZTR	x	x
ZTR	IZ	x	x	x	x	x	x
ZTR	ZTR	x	x	x	x	x	x
x	x	ZTR	POS	x	x	x	x
x	x	ZTR	ZTR	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x

图4 第1次传输后小波系数与零树编码符号关系图

其转化为符号流则为

POS、NEG、IZ、ZTR、POS、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、IZ、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、POS、ZTR、ZTR

从上述的符号流可以看到,零树根连续出现3

次,最长的一次有7个零树根.

(2)以 $T=16$ 作为第2次传输的阈值,即得到如图5所示小波系数与零树编码关系示意图(左图是将第1次传输的POS和NEG置为零后的数据)

0	0	0	10	7	13	-12	7
-31	23	14	-13	3	4	6	-1
15	14	3	-12	5	-7	3	9
-9	-7	-14	8	4	-2	3	2
-5	9	-1	0	4	6	-2	2
3	0	-3	2	3	-2	0	4
2	-3	6	-4	3	6	3	6
5	11	5	6	0	3	-4	4

阈值 $T=16$

IZ	ZTR	x	x	x	x	x	x
NEG	POS	x	x	x	x	x	x
ZTR	ZTR	ZTR	ZTR	x	x	x	x
ZTR	ZTR	ZTR	ZTR	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x

图 5 第 2 次传输后小波系数与零树编码符号关系示意图

其转化为符号流则为

IZ、ZTR、NEG、POS、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR

从上述的符号流可以看到,零树根连续出现 1

次,包含 8 个零树根。

(3) 以 $T=8$ 作为第 3 次传输的阈值,则得到第 3 次传输后小波系数与零树编码关系示意图(左图是将第 2 次传输的 POS 和 NEG 置为零后的数据)

0	0	0	10	7	13	-12	7
0	0	14	-13	3	4	6	-1
15	14	3	-12	5	-7	3	9
-9	-7	14	8	4	-2	3	2
-5	9	-1	0	4	6	-2	2
3	0	-3	2	3	-2	0	4
2	-3	6	-4	3	6	3	6
5	11	5	6	0	3	-4	4

阈值 $T=8$

IZ	IZ	IZ	POS	ZTR	POS	NEG	ZTR
IZ	IZ	POS	NEG	ZTR	ZTR	ZTR	ZTR
POS	POS	ZTR	NEG	ZTR	ZTR	ZTR	POS
NEG	ZTR	NEG	ZTR	ZTR	ZTR	ZTR	ZTR
ZTR	POS	ZTR	ZTR	x	x	ZTR	ZTR
ZTR	ZTR	ZTR	ZTR	x	x	ZTR	ZTR
ZTR	ZTR	x	x	ZTR	ZTR	x	x
ZTR	POS	x	x	ZTR	ZTR	x	x

图 6 第 3 次传输后小波系数与零树编码符号关系示意图

其转化为符号流则为

IZ、IZ、IZ、IZ、IZ、POS、POS、NEG、POS、POS、NEG、ZTR、ZTR、NEG、NEG、ZTR、ZTR、POS、ZTR、NEG、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、POS、ZTR、ZTR、ZTR、POS、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、POS、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR、ZTR

从上述的符号流可以看到,零树根连续出现 7 次,最长的一次有 9 个零树根。

从上面的编码过程中,可以看到如下一些本文方法与 Shapiro 编码方法的不同之处:

① 随着传输次数的增加,多个零树根连续出现的情况愈来愈频繁,这表明在每次传输所产生的符号串中,零树根的出现具有一定的相关性,本文方法充分利用了这种相关性;可是,在 Shapiro 的编码方法中,这种相关性并没有得到利用,在该方法中,只是将零树根作为符号串中一个独立的符号,而单独地进行多模式算术编码^[3]。

② 从重建图象的角度来看,如果零树根出现在符号串的末尾,那么这些零树根没有必要进行编码,且解码时,对于那些不能确定符号的位置填零即可。这样即可以缩短符号串的长度,从而提高编码效率;可是,在 Shapiro 的编码方法中,这些位于符号串末尾的零树根,却要么作为零树根(ZTR),要么作为零

(Z),进行多模式算术编码。

本文认为,可以仿效 JPEG 标准中游程编码[4]的方法,对连续出现的零树根进行游程编码,从而达到进一步提高压缩比的目的。

2.2 零树根游程编码的原理和实验结果

本文是采用(yyyy/dd)形式来对零树编码后产生的符号串进行游程编码的,这里2位二进制数 dd 表示非零树根符号,如 NEG(11), POS(10), IZ(01),4位二进制数 yyyy 表示该非零树根符号与前一个非零树根符号之间连续出现的零树根数目,称为零树根的游程,例如,(0011/01)表示(ZTR、ZTR、ZTR、IZ),如果多于15个零树根连续出现,就用多个游程来表示,例如,如果有21个零树根(二进制表示为00010101)连续出现,随后紧跟的符号是 NEG,就用(0101/00)(0001/10)来表示,其中,第1个 dd=00 表示零树根的连接性还没有结束,第1个 yyyy=0101 是21的二进制码的低4位,第2个 yyyy=0001 是21的二进制码的高4位,若按照这种方法,来对上述第3次传输出现的符号串进行编码,则有如下的码串

(0000/01), (0000/01), (0000/01), (0000/01),
(0000/01), (0000/10), (0000/10), (0000/11),
(0000/10), (0000/10), (0000/11), (0010/11),
(0000/11), (0010/10), (0010/11), (1000/10),
(0011/10), (1001/10)

注意:基于前面提到的理由,对于出现在符号串末尾的零树根没有进行编码。

由于本文是用固定码位来表示零树根的游程(4位二进制数或多个4位二进制数)和非零树根符号(2位二进制数)的,因此,上述游程编码中的括号、斜杠及逗号都可以去掉:

00000100000100000100000100000100000100
0001100001000001000001100101100001100101000
10111000100011101000110

将以上的二进制码流再进行自适应二进制算术编码,即可大大提高压缩比。

Lena、Barbara 和 Playboy 3幅标准图象(512×512)分别进行零树根游程编码后与没有加入游程编码的压缩比比较,其提高的百分比见图7~图9。

图7~图9的横坐标表示用Shapiro的零树编码方法得到的压缩比,也即没有加入零树根游程编码的压缩比,熵编码是采用多模式算术编码,图7~图9的纵坐标表示在相同信噪比的条件下,加入零树根游

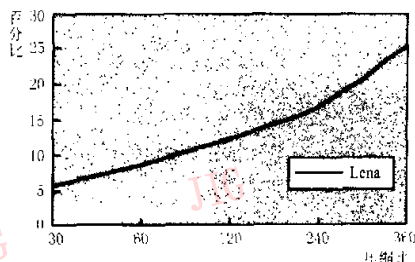


图7 Lena 图象加游程前后的压缩比比较

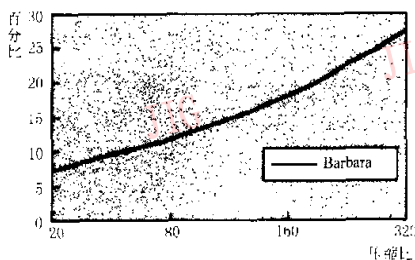


图8 Barbara 图象加游程前后的压缩比比较

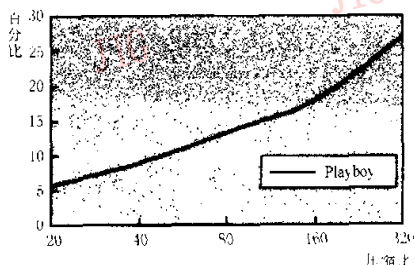


图9 Playboy 图象加游程前后的压缩比比较

程编码后压缩比增加的百分数。为了适应游程编码的需要,本文采用的算术编码不是Shapiro采用的多模式算术编码,而是自适应二进制算术编码。

从图7~图9中可以看到,加入游程编码后,图象的压缩比增加了。例如,按照Shapiro零树编码方法对Lena图象进行编码,在渐进传输的某次传输中达到24倍的压缩比,加入游程编码后,压缩比可增加16%左右,也即达到28倍。另外,从图7~图9中还可以看到,随着Shapiro零树编码方法的压缩比的提高,加入游程编码后,压缩比增加的幅度更为明显,最大的可增加二十几个百分点,这对于低码率图象传输,有较好的实用价值。

3 实验结果

本文的部分实验结果已经在 2.2 节给出,下面将给出本文其余的实验结果.图 10 是 Lena 标准图象,图 11 是用 Shapiro 零树编码方法对 Lena 标准图象压缩后又重建的图象,图 12 是用本文提出的零树与游程相结合的编码方法对 Lena 标准图象压缩后又重建的图象.由表 1 和图 12 可见,本文的方法比 Shapiro 的方法在峰值信噪比相同的条件下,压缩比提高的百分比及其变化趋势(图 13)均较明显.



图 10 Lena 原图(8bpp)



图 11 没有游程编码(0.12bpp, PSNR=27.60dB)



图 12 有游程编码(0.12bpp, PSNR=28.65dB)

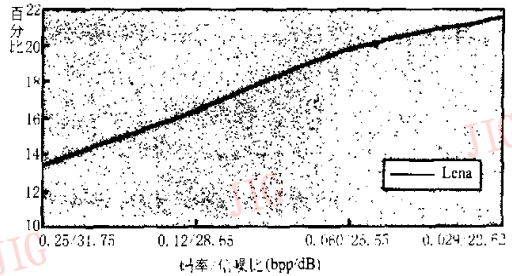


图 13 在不同码率/信噪比条件下 Lena 图象编码压缩比的提高曲线

表 1 不同码率/峰值信噪比条件下 Lena 图象编码后压缩比比较

码率/峰值信噪比(bpp/dB)	增加的压缩比(%)
0.25/31.75	13.36
0.12/28.65	16.12
0.060/25.55	19.76
0.029/22.62	21.56

对于这些实验结果,可做如下的讨论:

讨论 1 上述实验结果是在 Pentium120、16MRAM 的 PC 机上,WIN95 平台,Borland C++ 5.0 的实验环境下得出的.

讨论 2 本文是按照 Shapiro 零树编码方法来对 Lena 标准图象进行压缩和重建的,由于本文的实验环境与 Shapiro 的实验环境不同,因此用文献[1]方法模拟出的结果(图 11)与文献[1]的结果有少许差别.

讨论 3 比较图 11 和图 12 可以看到,在相同压缩比的条件下(由 8bpp 压缩到 0.12bpp,即 67 倍左右),图 12 的峰值信噪比要高于图 11 的峰值信噪比,而且图 12 的视觉效果也要比图 11 的视觉效果好.

讨论 4 从表 1 和图 13 可以看到,在 Shapiro 方法的基础上,当引入小波系数的量化和零树根的游程编码后,压缩比至少提高 10% 以上.峰值信噪比不同,提高的幅度也不同.例如,在峰值信噪比保持为 28.65dB 时,如果没有加游程编码,码率为 0.12bpp,也即压缩比为 67 倍左右;加游程编码后,压缩比可以提高 16.42%,也即码率可达 0.103bpp.在峰值信噪比保持为 22.6dB 时,压缩比提高的幅度甚至超过了 20%.

4 结 语

(1) Shapiro 是在研究图象小波系数渐进传输

时才提出零树结构的概念.他发现,如果某个小波系数量化后为零值,则其处于同方向、同空间位置,但低分辨率的小波系数量化后也为零的机率很大,而且这些小波系数就可以构成一棵零树;现在的研究表明,零树现象是小波系数局部空频特性的反映.由于这种零树结构中的小波系数,其实都与、且只与原图象某个局部的内容有关,因此,它们量化后出现进退的现象就不足为怪了.

(2) 按照 Shapiro 的零树编码方法产生的符号串,其零树根连续出现具有一定的相关性,而位于符号串末尾的零树根或最高分辨率层的零点则具有冗余性,而且这些相关性和冗余性似乎没有得到充分的利用,只是将符号串直接送去熵编码器进行多模式算术编码.本文提出的方法则是,在熵编码之前,就通过类似 JPEG 标准中游程编码的方法,先对符号串进行二次编码,然后再送去熵编码器进行自适应二进制算术编码.理论分析和实验数据都表明,本文提出的方法编码效果较好.

参考文献

- 1 Shapiro Jerome M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(12):5445~5462.

- 2 ISO/IEC FCD15444-1, JPEG2000 still image coding system[S]. Ol. J. March, 2000, <http://www.jpeg.org>
- 3 Witten H, Neal R, Cleary J G. Arithmetic coding for data compressing[J]. Comm. ACM, 1987, 30(6):520~540.
- 4 ISO/IEC DIS 10918-1, Digital compression and coding of continuous-tone still images[S]. Feb. 1992.



黄卓君 1974 年生,中山大学通信与信息系统专业硕士研究生,研究方向为多媒体数据处理与传输.



马争鸣 1957 年生,1989 年获清华大学模式识别与智能控制专业博士学位,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.