

基于关系矩阵的快速嵌入零树 小波图像编码算法

王向阳^{1),2)} 赵红¹⁾ 左珂可¹⁾ 邹乃建¹⁾

¹⁾(辽宁师范大学计算机与信息技术学院,大连 116029) ²⁾(计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学),南京 210093)

摘要 为了快速获得更好的图像复原质量,提出了一种基于关系矩阵的快速嵌入零树小波(EZW)图像编码算法。该算法的基本工作步骤为:(1)对原始图像进行小波分解;(2)对最低频小波子带进行DPCM编码;(3)对所有高频子带系数构造零树结构;(4)首先确定初始阈值,并构造小波系数的关系矩阵,然后结合关系矩阵对高频子带系数进行逐次逼近量化编码。实验结果表明,该算法具有较好的图像复原质量和较快的编码速度,整体性能明显优于EZW方案(特别是低比特率下)。

关键词 图像编码 嵌入零树小波 逐次逼近量化 关系矩阵

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)11-1368-04

Fast Embedded Zerotree Wavelet Image Coding Based on Relation Matrix

WANG Xiang-yang^{1),2)}, ZHAO Hong¹⁾, ZUO Ke-ke¹⁾, ZHOU Nai-jian¹⁾

¹⁾(School of Computer and Information Technique, Liaoning Normal University, Dalian 116029)

²⁾(State Key Laboratory for Novel Software Technology at Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract In this paper, a new fast embedded zerotree wavelet(EZW) image coder based on relation matrix is presented. Firstly, the discrete wavelet transform is performed on the origin image. Secondly, the wavelet coefficients of the lowest frequency subband are encoded by using DPCM. Thirdly, the zerotrees are defined for the wavelet coefficients of the high frequency subbands. Finally, the initial threshold is identified and relation matrix is constructed, and the wavelet coefficients of the high frequency subbands are encoded progressively by using relation matrix. The experiment results show that the new still image compression scheme provides higher perceptual quality and less encoding time than EZW, especially at low bit rates.

Keywords image coding, embedded zerotree wavelet(EZW), successive approximation quantization, relation matrix

1 引言

小波(wavelet)变换是20世纪80年代中期出现的新时频域信号分析工具。自1989年Mallat首次将小波变换引入图像处理以来,小波变换以其优异的时频局部能力及良好的去相关能力在图像压缩编码领域得到了广泛应用,并取得了良好效果^[1-6],其

中,由Shapiro提出的嵌入零树小波编码(embedded zerotree wavelet, EZW)被认为是目前国际上最先进的方法之一,该算法以零树结构和逐次逼近量化为基础,不仅结构简单、可以产生嵌入编码,且无需任何训练^[1]。然而,理论分析和实验结果表明,该算法也存在一些不足,具体表现为:(1)最低频子带包含了原始图像的绝大部分能量,其小波系数的绝对值比其他子带的小波系数大几个数量级。而EZW

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(20032100);计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学)开放基金项目(03-02)

收稿日期:2005-08-16;改回日期:2005-09-15

第一作者简介:王向阳(1965~),男,教授。1995年获吉林大学计算机专业硕士学位。主要研究领域为多媒体信息处理技术、网络信息安全技术。E-mail: wxy37@126.com

编码算法却把所有子带进行了统一处理。显然,若要提高复原图像质量,则必须增加逐次逼近量化次数;否则,对最低频子带的较小损失,可能会较大地影响复原图像质量;(2)在逐次逼近量化过程中,针对小于阈值的小波系数,为了确定该系数是零树根还是孤立零,EZW 编码算法必须利用小波系数间存在的双亲—子女 (parent-children) 关系去搜索扫描整个四叉树,而这必然会大大影响图像编码效率。

本文提出一种基于关系矩阵的快速图像压缩算法,该算法能够通过以下 2 项措施来提高 EZW 编码算法的工作效率:(1)通过单独编码最低频子带来提高复原图像质量;(2)通过定义并利用关系矩阵来提高逐次逼近量化的搜索扫描速度。

2 最低频子带的 DPCM 编码

2.1 2 维 DPCM 预测器

最低频子带 LL 集中了图像的大部分能量,其不仅集中了大部分重要系数,而且这些系数具有很强的相关性。对于 LL 子带系数的处理,已产生了经典的 DPCM (differential pulse code modulation) 技术。本算法选取了北京大学无线电系徐孟侠教授所提出的固定预测系数 2 维 DPCM 预测器来进行子带系数处理。通过多幅测试图像的统计分析与其他常用的经典预测器的主观对比实验可知,使用该 2 维 DPCM 预测器不仅所得到的误差信号熵值最小,且复原图像的主观质量最优。该 2 维 DPCM 预测器属于因果性的预测区域,其构造如图 1 所示。

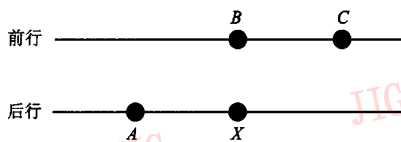


图 1 2 维 DPCM 预测器示意图
Fig.1 2-dimension DPCM predictor

当前像素 X 的预测值按照如下公式计算:

$$X = 0.5A + 0.25B + 0.25C$$

当遇到边界情况时,预测方式有以下几种变化形式:

- (1) 当 B 与 C 缺席时, $X = A$;
- (2) 当 A 缺席时, $X = 0.75B + 0.25C$;
- (3) 当 C 缺席时, $X = 0.5A + 0.5B$ 。

对于左上角的第 1 个像素来说,若 3 者(A、B 和

C) 均缺席,则该像素将不作预测,而将其值作为单独的信息保存在输出码流的头信息中。

2.2 最优量化器

一般说来,为了提高图像的压缩效率及为了利用人眼的视觉特性,需采用带有量化器的 DPCM 编码系统来压缩最低频子带内的小波系数。其中,由于量化器设计合理与否,将直接影响整个压缩系统的性能,所以量化器设计必须从整体上来综合考虑映射变换、量化以及熵编码器之间的相互配合。通常,可根据人眼视觉特性将量化器设计为非均匀的量化台阶,如广泛应用的 Pirsch 15 级量化器: $PQ_{15} = \{0, 5, 10, 17, 28, 39, 52, 67\}$ 。理论分析和实际应用表明,对于 Pirsch 量化器来说,由于图像的灰度值只是在 0~255 之间,故其能够很好地对图像信号进行预测编码;然而,由于图像小波分解后低频系数幅值最高可达数千,且图像边缘区域相邻系数间的幅值差别可能很大,因此必然导致某些情况下的预测误差值也相当大。同时,由于它们往往对应于最低频子带能量较大的系数,而这些系数又对于复原图像质量影响较大,可见,常规量化器已无法适用于最低频子带的预测编码,为此,本文根据预测误差幅值分布直方图、均方误差、复原图像主观质量等来对不同预测器和量化器的压缩性能进行了比较评价,并从中选出了最优的一组构成预测编码系统,该最优量化器所包含的基本参数为:量化级数为 63,量化步长为 4,压缩因子为 10。

3 关系矩阵与逐次逼近量化的完善

为了进一步提高图像编码效率,本文将首先通过定义关系矩阵来刻画系数结点及其后代系数结点关系(即指示出是否存在大于当前小波系数的后代小波系数),然后利用关系矩阵来完善逐次逼近量化过程。

3.1 关系矩阵的定义

所谓关系矩阵,就是一个用于指示某小波系数及其后代小波系数之间关系的矩阵。该关系矩阵与图像小波变换所得到的系数矩阵有相同的元素个数,且其矩阵元素和小波系数矩阵中的元素一一对应。关系矩阵的元素取值只有“1”和“0”两种。若关系矩阵的某位置元素取值为“1”,则表示在小波系数矩阵中相应位置的小波系数大于其所有后代小波系数。若关系矩阵的某位置元素取值为“0”,则

表示在小波系数矩阵中相应位置的小波系数至少小于其后代小波系数中的某一个。

下面以一个经过 3 级小波变换的 8×8 矩阵为例来简要说明关系矩阵的建立过程 (如图 2 所示)。

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
LL_1	HL_1	HL_2	HL_2	HL_1	HL_1	HL_2	HL_1
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
LH_1	HH_1	HL_2	HL_2	HL_1	HL_1	HL_2	HL_1
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
LH_2	LH_2	HH_2	HH_2	HL_1	HL_1	HL_2	HL_1
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
LH_1	LH_1	LH_1	LH_1	HH_1	HH_1	HH_1	HH_1
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
LH_1	LH_1	LH_1	LH_1	HH_1	HH_1	HH_1	HH_1
X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
LH_1	LH_1	LH_1	LH_1	HH_1	HH_1	HH_1	HH_1
X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
LH_1	LH_1	LH_1	LH_1	HH_1	HH_1	HH_1	HH_1

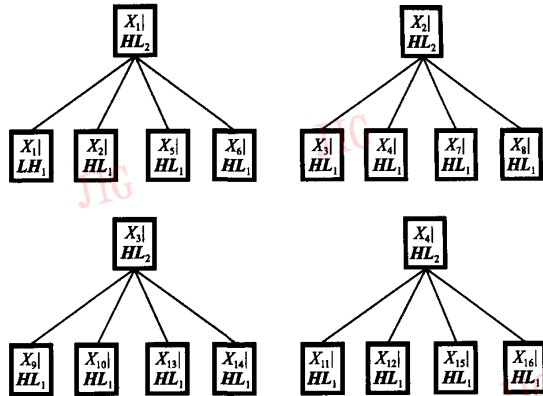


图 2 小波系数(结点)的比较

Fig. 2 The comparison of wavelet coefficients (nodes)

(1) 确定最高频子带 LH_1 、 HL_1 、 HH_1 内小波系数所对应的关系矩阵元素,即初始化关系矩阵 (8×8) 和临时矩阵 (4×4)。初始化方法为:将关系矩阵中的所有元素置为“1”,将临时矩阵中的所有元素置为“0”,其中,两个矩阵的左上角元素并不使用。

(2) 从最高频子带开始比较子结点及其父结点的大小,以确定次高频子带 LH_2 、 HL_2 、 HH_2 内小波系数所对应的关系矩阵元素。其具体操作如下:

① 首先将 $X_1|HL_1$ 、 $X_2|HL_1$ 、 $X_3|HL_1$ 和 $X_4|HL_1$ 进行比较(根据绝对值),并得到其中的大者,然后再将大者与 $X_1|HL_2$ 进行比较,若 $X_1|HL_2$ 绝对值大,则将关系矩阵中与 $X_1|HL_2$ 相对应的元素置“1”,否则置“0”,最后,将上述几个小波系数中的最大者保存在临时矩阵中的 $X_1|HL_2$ 位置;

② 将 $X_3|HL_1$ 、 $X_4|HL_1$ 、 $X_5|HL_1$ 和 $X_6|HL_1$ 进行比较(根据绝对值),并得到其中的值大者;然后再将该大者与 $X_2|HL_2$ 进行比较,若 $X_2|HL_2$ 绝对值大,则将关系矩阵中与 $X_2|HL_2$ 相对应的元素置“1”,否则置“0”,最后,将上述几个小波系数中的最大小波系数保存在临时矩阵中的 $X_2|HL_2$ 位置;

③ 将 $X_9|HL_1$ 、 $X_{10}|HL_1$ 、 $X_{13}|HL_1$ 和 $X_{14}|HL_1$ 进行比较(根据绝对值),并得到其中的大者,然后再将该大者与 $X_3|HL_2$ 进行比较,若 $X_3|HL_2$ 绝对值大,则将关系矩阵中与 $X_3|HL_2$ 相对应的元素置“1”,否则置“0”,最后,将上述几个小波系数中的最大小波系数保存在临时矩阵中的 $X_3|HL_2$ 位置;

④ 将 $X_{11}|HL_1$ 、 $X_{12}|HL_1$ 、 $X_{15}|HL_1$ 和 $X_{16}|HL_1$

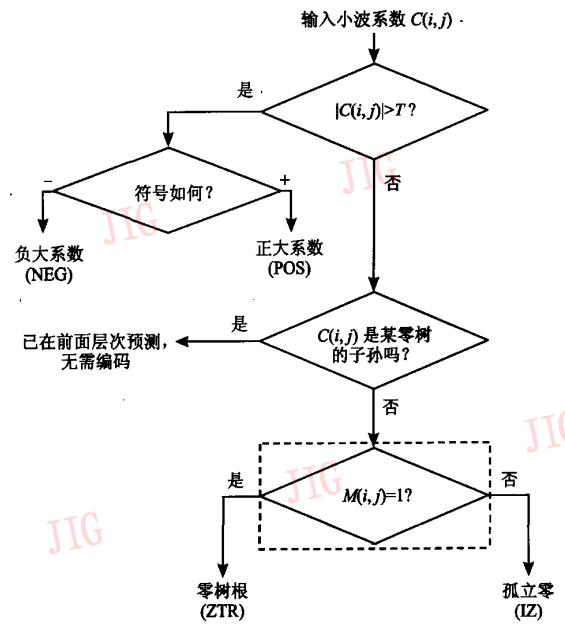


图 3 基于关系矩阵的小波系数判别

Fig. 3 The judge procedure based on relation matrix

进行比较(根据绝对值),并得到其中的值大者,然后再将该值大者与 $X_4|HL_2$ 进行比较;若 $X_4|HL_2$ 绝对值大,则将关系矩阵中与 $X_3|HL_2$ 相对应的元素置“1”,否则置“0”,最后,将上述几个小波系数中的最大小波系数保存在临时矩阵中的 $X_4|HL_2$ 位置。

(3) 首先确定其他中高频子带(即最低频子带以外的所有子带)内小波系数所对应的关系矩阵元素,并将中高频子带内的小波系数与临时矩阵中的

4 个相应元素进行比较(根据绝对值),如果小波系数的绝对值大,则将关系矩阵中与小波系数相对应元素置“1”,否则置“0”,然后将小波系数及 4 个临时矩阵元素中的值大者保存在临时矩阵中的与小波系数相对应的位置。

3.2 逐次逼近量化过程的完善

为提高图像编码效率,本文将结合关系矩阵来改进小波系数的判别策略,以进一步完善 EZW 编码方案的逐次逼近量化过程。基于关系矩阵的小波系数判别策略如图 3 所示。由图 3 不难看出,本方案已将搜索扫描整个四叉树转换为判别一个关系矩阵元素(即虚线框部分),这必然可节省大量处理时间(包括扫描、比较等时间)和存储空间。

4 仿真实验与结论

本文所提出的快速嵌入零树小波图像编码算法主要包含以下 3 个部分:(1)对原始图像进行小波分解;(2)首先对最低频子带系数直接进行 DPCM 编码,然后再进行自适应算术编码;(3)先对高频子带系数进行改进的逐次逼近量化编码,然后再进行游程编码与 Huffman 编码。

为了验证本文图像压缩编码算法的高效性,在 Pentium 4/1.8GHz 计算机上,以 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 标准图像 Lena 为例进行了仿真实验,并与 EZW 编码方案^[1]进行了比较。实验中,小波分解级数选取为 3 和 7,小波分解重构采用了常见的双正交 9/7 小波滤波器。仿真实验结果如图 4 和表 1 所示。



(a) EZW 算法

(b) 本文算法

图 4 Lena 标准图像不同算法重构效果对照(0.25bpp)

Fig.4 The reconstructed image for different methods(0.25bpp)

本文提出了一种新的快速图像压缩算法,实验表明,该算法能够通过单独编码最低频子带、完善逐次逼近量化过程等措施来提高 EZW 算法的工作效

表 1 两种图像压缩编码算法的性能比较

Tab.1 The compression results for different methods

小波分解级数	比特率 (bpp)	信噪比 (dB)		编码时间 (s)	
		本文算法	EZW	本文算法	EZW
3	1.0	39.087	38.984	0.343	0.531
	0.5	35.616	35.414	0.203	0.389
	0.25	32.238	31.985	0.109	0.197
	0.125	29.129	28.800	0.094	0.186
7	0.0625	26.272	25.870	0.047	0.084
	1.0	39.126	39.036	0.328	0.519
	0.5	35.635	35.482	0.172	0.372
	0.25	32.458	32.189	0.094	0.196
	0.125	29.453	29.163	0.047	0.084
	0.0625	26.927	26.557	0.016	0.028

率。由实验结果可得如下结论:

(1)在相同压缩比下,本文算法的图像复原质量优于 EZW 算法;

(2)本文算法的编码速度明显优于 EZW 算法(提高 40% 左右)。另外,本文所提出的关系矩阵思想可应用于现存的所有基于嵌入零树小波的图像压缩方案,以大幅度提高其编码速度。

参考文献 (References)

- Shapiro J M. Embedding image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445 ~ 3462.
- Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3): 243 ~ 250.
- WANG Xiang-yang, YANG Hong-ying. A fast image coding algorithm based on human visual system [J]. Journal of Software, 2003, 14(11): 1964 ~ 1970. [王向阳, 杨红颖. 基于人眼视觉特性的快速图像编码算法 [J]. 软件学报, 2003, 14(11): 1964 ~ 1970.]
- Basel Karger. Image and video compression: the principles behind the technology [J]. Telemedicine and Teledermatology, 2003, 32(1): 17 ~ 23.
- Barni M, Bartolini F, Piva A. Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(5): 783 ~ 791.
- Francois G. Meyer, Amir Z. Averbuch, and Jan-Olov Strömberg. Fast adaptive wavelet packet image compression [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(5): 792 ~ 800.