

基于整数小波变换和子带比特平面编码的 图象压缩算法

杨志高¹⁾ 李飞鹏²⁾ 梅天灿²⁾ 秦前清²⁾ 朱秋萍¹⁾

¹⁾(武汉大学电子信息学院, 武汉 430072)

²⁾(武汉大学测绘与遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要 在分析图象整数小波变换的基础上, 提出了基于子带比特平面编码的压缩算法. 该算法将整数小波系数按子带分为若干比特平面, 称之为子带比特平面, 并采用简单高效的率失真优化算法确定子带比特平面的编码顺序, 且这一顺序与图象无关. 按此顺序对子带比特平面进行自适应 MQ 算术编码, 便得到嵌入式压缩码流. 该算法可以从无损到有损, 以任意倍率或质量进行图象压缩, 压缩效率达到了浮点 EZW 算法和 JPEG2000 整数小波编码方案的水平, 而速度远快于这两者的速度. 该算法还具有复杂度低, 占用内存少的优点.

关键词 计算机图象处理(520·6040) 整数小波变换 比特平面编码 MQ 算术编码 图象压缩

中图分类号: TN919.81 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)06-0625-06

A Scalable Image Compression Scheme Based on Integer-to-integer Wavelet Transform and Subband Bit-plane Coding

YANG Zhi-gao¹⁾, LI Fei-peng²⁾, MEI Tian-can²⁾, QIN Qian-qing²⁾, ZHU Qiu-ping¹⁾

¹⁾(Dept. of Electronics and Information, Wuhan University, Wuhan 430072)

²⁾(National Key Lab for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract This paper provides an image compression scheme called SBPC algorithm based on subband bit-plane coding and integer-to-integer wavelet transform. SBPC algorithm divides the coefficients of integer-to-integer wavelet transform into bit planes within each subband which are named as subband bit-planes. For these subband bit-planes, the algorithm uses simple but effective rate-distortion optimization method to determine the coding order. Unlike the JPEG2000 standard, this R-D optimized coding order is independent of images. According to the coding order, the coefficient bits are coded by adaptive MQ arithmetic coder. SBPC algorithm can compress an image at any given bit-rate or image quality from lossless to lossy, and the coding stream is scalable both in spatial resolution and in image quality. The algorithm can also realize coding of images with region of interest (ROI) by compressing the ROI losslessly. The experiments show that SBPC algorithm is comparable to the float-point EZW algorithm and JPEG2000 reversible coding scheme in the coding efficiency, while the coding/decoding speed is much faster than that of the other two algorithms. In addition, SBPC algorithm needs very low memory and its computation complexity is also low.

Keywords Computer image processing, Integer-to-integer wavelet transform, Bit-plane coding, MQ arithmetic coder, Image compression

0 引言

整数小波变换是将整数映射到整数的小波变

换, 即输入信号为整数, 变换后的小波系数也为整数, 且原信号可以由逆变换精确恢复^[1]. 由于数字图象信号一般为整数, 采用整数小波变换可以实现从无损到有损, 以任意倍率或质量进行图象压缩. 其压

基金项目: 国家重点实验室开放研究基金(WKL10070401)

收稿日期: 2002-08-05; 改回日期: 2002-11-19

缩效率与浮点小波变换差别不大,特别是对于低比特率压缩,与浮点小波变换十分接近^[2];而压缩和解压速度远远快于基于浮点小波变换的算法。

整数小波变换一般来说不是单位变换,因此传统的浮点小波编码算法 EZW^[3]和 SPIHT^[4]已不适合基于整数小波变换的图象编码^[5](编码效率有较大降低)。因此针对整数小波变换的这一特点,提出了基于子带比特平面编码的压缩算法(Subband Bit Plane Coding, 以下简称为 SBPC 算法)。SBPC 算法采用简单高效的率失真优化方案与自适应 MQ 算术编码相结合进行压缩编码,压缩效率达到了采用浮点小波变换的 EZW 算法和 JPEG2000 整数小波编码方案的水平^[6,7],而速度更快,并且算法复杂度低,占用内存少。

1 基于提升方案的整数小波变换

由于整数小波变换建立在浮点小波提升算法的基础上^[1],因此先介绍浮点小波变换的提升算法,然后再介绍如何由提升算法得到整数小波变换。

1.1 浮点小波变换的提升算法

采用提升算法计算浮点小波变换由若干个步骤组成。首先计算一个简单小波变换,其可以是 Lazy 小波或多相变换,然后通过交替使用初提升和次提升步骤来提高滤波的性能(如图 1 所示)。

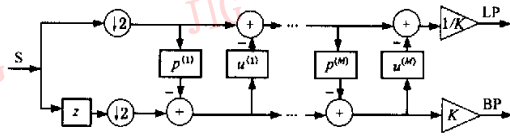


图1 浮点小波变换的提升算法示意图

(S 表示输入信号,LP 和 BP 分别表示低频小波系数和高频小波系数)

Lazy 小波变换只是将信号的奇数采样点和偶数采样点分离开来

$$d_{1,l}^{(0)} = s_{1,2l+1} \quad s_{1,l}^{(0)} = s_{1,2l}$$

偶提升步骤是对偶数采样点滤波后,用奇数采样点减去滤波输出的值

$$d_{1,l}^{(i)} = d_{1,l}^{(i-1)} - \sum_k p_k^{(i)} s_{1,l-k}^{(i-1)}$$

奇提升步骤与次提升恰恰相反,是对奇数点滤波后,用偶数点减去滤波输出的值

$$s_{1,l}^{(i)} = s_{1,l}^{(i-1)} - \sum_k u_k^{(i)} d_{1,l-k}^{(i-1)}$$

因此,经过 M 对奇提升和偶提升,再进行增益调整后,奇数采样点输出的就是低频小波系数 $s_{1,l}$,偶数采样点输出的则是高频小波系数 $d_{1,l}$

$$s_{1,l} = s_{1,l}^{(M)} / K, \quad d_{1,l} = K d_{1,l}^{(M)}$$

对于逆变换,只需颠倒正变换时的计算步骤和计算符号即可,如图 2 所示。

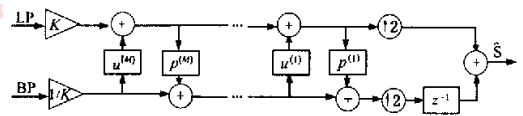


图2 浮点小波逆变换的提升算法示意图

S 为恢复出的信号

首先计算出 $s_{1,l}^{(M)} = K s_{1,l}$, $d_{1,l}^{(M)} = d_{1,l} / K$

然后再对奇提升和偶提升步骤依次撤销

$$s_{1,l}^{(i-1)} = s_{1,l}^{(i)} + \sum_k u_k^{(i)} d_{1,l-k}^{(i)}$$

$$d_{1,l}^{(i-1)} = d_{1,l}^{(i)} + \sum_k p_k^{(i)} s_{1,l-k}^{(i-1)}$$

最后恢复出信号的奇数点和偶数点采样

$$s_{1,2l+1} = d_{1,l}^{(0)}, \quad s_{1,2l} = s_{1,l}^{(0)}$$

对于提升算法,有以下定理^[1]

任何采用有限长滤波器的小波或子带变换,都可以通过首先进行 Lazy 小波变换,再进行有限次的主提升和次提升计算,最后进行增益调整来实现。

1.2 整数小波变换的实现

根据以上定理,对于每一个浮点小波变换,都可以通过其整数形式来近似,这只需对提升步骤中的滤波运算取整即可。对于偶提升,取整运算写为

$$d_{1,l}^{(i)} = d_{1,l}^{(i-1)} - \left\lfloor \sum_k p_k^{(i)} s_{1,l-k}^{(i-1)} + 1/2 \right\rfloor$$

对于奇提升,取整运算写为

$$s_{1,l}^{(i)} = s_{1,l}^{(i-1)} - \left\lfloor \sum_k u_k^{(i)} d_{1,l-k}^{(i-1)} + 1/2 \right\rfloor$$

逆变换时的运算步骤则写为

$$d_{1,l}^{(i-1)} = d_{1,l}^{(i)} + \left\lfloor \sum_k p_k^{(i)} s_{1,l-k}^{(i-1)} + 1/2 \right\rfloor$$

$$s_{1,l}^{(i-1)} = s_{1,l}^{(i)} + \left\lfloor \sum_k u_k^{(i)} d_{1,l-k}^{(i-1)} + 1/2 \right\rfloor$$

增益因子的处理方式有两种^[1]。一般作法是将其忽略^[8],这样实际上相当于低频系数具有了 K 倍增益,而高频系数具有了 $1/K$ 倍增益。由此得到的整数小波变换将不再具有单位增益,这是与浮点小波变换的一个重要区别。根据这一特点,提出了基于子带比特平面编码的压缩算法。

2 子带比特平面编码算法

采用 Mallat 算法对图象进行整数小波分解后,将得到 $3N+1$ 个小波子带, N 为分解次数,如图 3 所示。

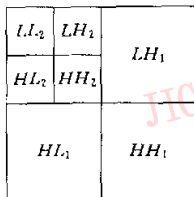


图3 图象的2级 Mallat 小波分解

因为小波系数均为整数,所以每个子带内小波系数直接构成若干个比特平面,比特平面的个数由该子带小波系数的最大值决定,这些子带内的比特平面称为子带比特平面。因为小波系数符号位的编码不牵涉到率失真优化方案,所以上述比特平面不包括符号平面。设 $C_{i,j}$ 为子带 S_j 内的第 i 个系数,则 S_j 中比特平面的个数为

$$P_j = \begin{cases} \lfloor \log_2 |\max_i(C_{i,j})| \rfloor + 1 & \text{if } |\max_i(C_{i,j})| \neq 0 \\ 1 & \text{if } |\max_i(C_{i,j})| = 0 \end{cases}$$

而全部子带比特平面的个数为 $\sum_j P_j$ 。由于 Mallat 分解得到的最低频子带是图象的平滑逼近,能量高度集中,因此应当直接存储或无损压缩,不参与率失真优化编码。

2.1 子带比特平面的率失真优化编码顺序

对于除最低频子带外的其他子带,设编码一位系数比特需要的码率为 ΔR ,减少的重建图象失真为 ΔD ,则该比特在率失真曲线上的斜率 $R_s = \Delta D / \Delta R$,如图 4 所示。

显然,从率失真优化的观点来看, R_s 值大的比特应该先编码^[9]。对于同一个子带比特平面内的比特来说, R_s 值在统计上差别不大,因此可以按照光栅的扫描顺序依次编码。而对于不同子带比特平面, R_s 值差别很大,应当按照 R_s 值来确定各子带比特平面的编码顺序。通过实验证明,不同子带比特平面的 R_s 值的相对大小主要由 ΔD 决定。为了提高算法速度和降低算法复杂度,通过 ΔD 来确定子带比特平面的编码顺序。下面叙述 ΔD 的计算方法。

首先,子带 S_j 内的量化误差与重建图象失真

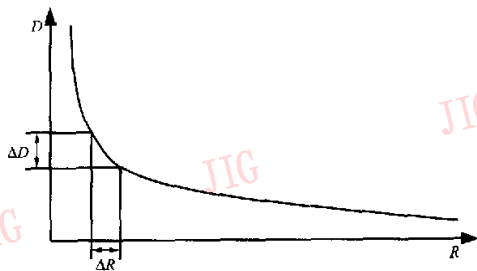


图4 率失真斜率 R_s 的计算

D_j (采用均方误差 MSE 作为度量)的关系为^[6]

$$D_j \approx w_j^2 \sum_i (\hat{C}_{i,j} - C_{i,j})^2$$

$\hat{C}_{i,j}$ 表示量化后的系数, w_j 表示该子带小波基函数的 L2 范数。该式成立的条件是小波变换为正交变换或各系数的量化误差不相关。因为浮点小波变换为正交变换,其对应的整数小波变换也近似正交,所以此式对于整数小波变换也成立。对于浮点小波变换来说, w_j^2 一般等于 1;而对于整数小波变换,由于省略了增益调整,不同子带的 w_j^2 值相差很大,低频子带的 w_j^2 值远大于高频子带的 w_j^2 值。 w_j^2 也可以采用其他图象失真度量标准来确定,如人眼视觉特性曲线。因为人眼对图象的低频失真较高频失真更为敏感,所以加大低频子带的 w_j^2 值可以获得更好的视觉效果。

设 $p_{k,j}$ 表示子带 S_j 的第 k 个比特平面,则该平面内比特位的权值为 2^k ,因此, $p_{k,j}$ 比特平面的 ΔD 可以估算为

$$\Delta D_{k,j} \approx A 2^{2k} w_j^2$$

式中, A 为常数。常数 A 不影响子带比特平面间 R_s 值的相对大小,故将之略去,得到相对失真

$$\Delta \tilde{D}_{k,j} \approx 2^{2k} w_j^2$$

计算出各子带比特平面的 $\Delta \tilde{D}_{k,j}$ 后,就可以按照其大小顺序确定各子带比特平面的编码顺序,即 $\Delta \tilde{D}_{k,j}$ 值大的子带比特平面先编码,而 $\Delta \tilde{D}_{k,j}$ 值小的子带比特平面后编码。若有两个或两个以上子带比特平面的 $\Delta \tilde{D}$ 相等,则按照从低频子带到高频子带的顺序对这些子带比特平面进行编码;同一分解级内,则由 $LH \rightarrow HL \rightarrow HH$ 的顺序确定编码顺序。由于 w_j^2 不可能为零,因此上述公式计算出 $\Delta \tilde{D}_{k,j}$ 的值能够保证同一子带内,高比特平面一定比低比特平面先编码,从而保证了编码的可实现性。此编码顺序与图象无关,可将其作为先验知识存储在一个表中

供程序使用。相对于 JPEG2000 与图象相关的率失真优化方案, SBPC 算法的复杂度得到了很大程度的降低。

2.2 系数比特和符号位的 MQ 自适应算术编码

MQ 自适应算术编码器^[7]专用于二进制信源的编码,在编码过程中仅用到加减和移位运算,并通过高效的自适应概率估计算法来提高编码效率,特别适合非平稳信源(如图象)的压缩编码,而编码速度远远快于普通算术编码器。图 5 给出了 MQ 编码器的框图。图中,上下文 CX(Context)表示用于对比特 B 进行概率估计的已编码的信息, CX 一般由邻近像素的取值来确定。输入 B 和 CX 的值以后,编码器按照估计出的条件概率 $P(B|CX)$ 对比特 B 进行编码。

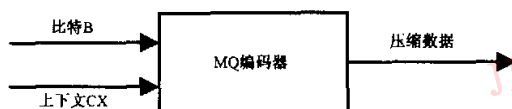
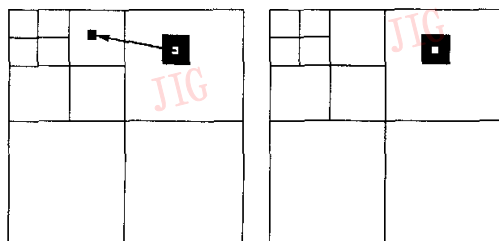


图 5 MQ 编码器框图

定义 $S_{i,j}$ 表示系数 $C_{i,j}$ 的最高非零位是否已被编码,若已被编码,则 $S_{i,j}=1$,否则 $S_{i,j}=0$ 。经验证,小波系数的统计特性服从 Markov 模型^[6,10]。因此, SBPC 算法采用当前系数的 8 个邻近系数的 $S_{i,j}$ 值,以及上一分解级同方向子带中对应位置系数的 $S_{i,j}$ 值,构成的 9 比特变量作为 CX,输入到 MQ 编码器,对当前系数比特进行编码。编码过程中,一旦系数 $C_{i,j}$ 的 $S_{i,j}$ 值由 0 变为 1,则必须对其符号位进行编码。符号位编码所采用的 CX 为当前系数的 8 个相邻系数的符号所构成的一个 8 比特变量,对于还未进行符号位编码的相邻系数,默认其符号为正,以保证能够正确解码。以上两种 CX 的选择如图 6 中的阴影部分所示。



(a) 编码系数比特时的 CX

(b) 编码符号位时的 CX

图 6 MQ 编码器 CX 的选取

可以看出, SBPC 算法最后所得到的编码码流

具有嵌入式特性,即从任何位置截断都是率失真优化的。

3 实验结果及比较

实验中采用了 (5/3) 整数小波变换^[2],正变换公式为

$$d[n] = d_0[n] - \left[\frac{1}{2}(s_0[n+1] + s_0[n]) \right]$$

$$s[n] = s_0[n] - \left[\frac{1}{4}(d[n] + d[n-1]) + \frac{1}{2} \right]$$

逆变换公式可由正变换公式很方便地推导出来。小波分解级数取为 6 级。实验中采用的测试图象为 Lena 和 Barbara,均为 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 的标准灰度图象。实验程序全部用 C++ 语言编写。

图 7 给出了 Lena 图象 SBPC 算法压缩结果,同时给出 JPEG2000 整数小波方案的压缩结果作为对比。

表 1 比较了 SBPC 算法与 JPEG2000 整数小波方案和浮点小波 EZW 算法的 PSNR 值(单位为 dB),其中“无损”一栏给出的是无损压缩时得到的压缩倍率。由表 1 可以看出, SBPC 算法与另外两种算法的结果十分接近。

表 1 3 种压缩算法 PSNR 值的比较 单位: dB

图象	压缩倍率	SBPC 算法	EZW 算法	JPEG2000
Lena	无损	1.845 2	—	1.840 4
	8	39.39	39.55	39.27
	16	36.18	36.28	36.41
	32	33.14	33.17	33.16
	64	30.40	30.23	30.23
	128	27.67	27.54	27.39
	256	25.33	25.38	25.14
	512	23.49	23.63	22.79
Barbara	无损	1.665 0	—	1.672 4
	8	35.32	35.14	35.79
	16	30.41	30.53	30.99
	32	27.01	26.77	27.28
	64	24.52	24.03	24.79
	128	22.91	23.10	22.89
	256	21.86	21.94	21.77
	512	20.70	20.75	20.19

表 2 比较了 SBPC 算法与基于整数小波的 Jasper JPEG2000 程序^[11]的计算速度,测试图象为 Lena 图象,运行环境为 Intel Pentium4 1.4GHz,时间单位为秒。由表 2 可见, SBPC 算法的压缩速度和解压速度均明显快于 Jasper JPEG2000 程序;压缩



图7 不同压缩倍率下2种算法得到的重建图象

表2 2种算法的速度比较

压缩倍率	SBPC 算法		JPEG2000	
	压缩速度	解压速度	压缩速度	解压速度
无损	0.240 0	0.210 0	0.370 0	0.290 0
8	0.160 0	0.140 0	0.340 0	0.190 0
32	0.120 0	0.110 0	0.320 0	0.150 0
128	0.090 0	0.080 0	0.310 0	0.140 0
512	0.080 0	0.070 0	0.300 0	0.130 0

倍率从低到高变化时,压缩速度提高了35%到73%,解压速度提高了27%到46%。其特点是:高倍率时速度的提高比低倍率时显著,压缩速度的提高比解压速度的显著。

4 结 论

SBPS 编码方案,充分利用了整数小波变换后各子带系数的特点,实现了高速高性能的图象压缩。SBPC 算法得到的是嵌入式码流,可实现信噪比可变的网络渐进传输;同时由于算法是按子带比特平面进行编码,因此可只传输低频子带的编码码流,以得到低分辨率(小尺寸)的解码图象,这样就能实现

分辨率可变的渐进传输。该算法还能对图象中的感兴趣区域进行无损编码,而对其他区域进行有损编码。SBPC 算法的复杂度远低于 JPEG2000 的整数小波压缩算法,具有很高的实用性,非常适合于需要进行实时、高速编码或无损压缩的场合,并容易利用硬件来实现。

参 考 文 献

- 1 Calderbank A R, Daubechies Ingrid, Seldens Wim *et al.* Wavelet transforms that map integers to integers[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis (ACHA)*, 1998, 5(3): 332~369.
- 2 Adams Michael D, Faouzi Kossentini. Reversible interger-to-interger wavelet transforms for compression: performance evaluation and analysis[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(6): 1010~1024.
- 3 Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients[J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1993, 41(12): 3445~3462.
- 4 Said Amir, Pearlman William A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees[J]. *IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technol.*, 1996, 6(6): 243~250.
- 5 乔世杰,智贵连. 一种快速的小波变换图象编码算法[J]. *中国图*

象图形学报, 2001, 6A(5): 434~438.

- 6 Taubman David. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2000, 9(7): 1158~1170.
- 7 JPEG 2000 Part 1 Final Committee Draft Version 1.0 International Standard (ISO/IEC FDIS15444-1) ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1855[S], Aug. 2000.
- 8 Adams Michael D. Faouzi Kossentini. Low-complexity reversible integer-to-integer wavelet transforms for image coding [A]. In: Proc. of IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing [C], Victoria, BC, Canada, 1999: 177~180.
- 9 Li Jin, Shawmin Lei. An embedded still image coder with rate-distortion optimization [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1999, 8(7): 913~924.
- 10 Simoncelli E P, Buccirossi R W. Embedded wavelet image compression based on a joint probability model [A]. In: Proc of Fourth Int'l Conf. on Image [C], Santa Barbara, CA, USA, 1997, 1: 640~643.
- 11 Adams Michael D. Faouzi Kossentini. JasPer: A Software-Based JPEG-2000 Codec Implementation [EB/OL]. <http://spmjg.ece.ubc.ca> and <http://www.imagepower.com>



杨志高 1977年生, 2000年获武汉大学电子信息学院学士学位, 现为该院多媒体信息处理与网络传输方向硕士生。主要研究方向为图象和视频处理、压缩编码和网络应用。



李飞鹏 1975年生, 1996年6月获武汉大学电信学院理学学士学位, 1999年6月于该校获工学硕士学位, 现为测绘遥感信息工程国家重点实验室讲师、博士生。研究方向为图象与信号处理。



梅天灿 1969年生, 1997年获武汉测绘科技大学工学硕士学位, 同年在武汉测绘科技大学任教(现并入武汉大学), 现在武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室攻读博士学位, 主要研究方向包括图象测量及模式识别方法的研究。



秦前清 1961年生, 1989年7月获南开大学概率统计专业理学博士学位, 1999年11月调入武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室任教授、博士生导师。长期从事概率统计、信息论、小波分析、分形几何、多元统计分析、数据处理的应用基础及应用技术研究。



朱秋萍 1946年生, 武汉大学电信学院教授, 博士生导师。主要研究领域为多媒体信息处理与通信。