

基于码率预分配的 JPEG2000 自适应率控制算法

孔繁锺 李云松 王柯伊 庄怀宇

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 该文提出一种基于码率预分配和反馈控制的自适应率控制算法。算法引入了预测模板,对图像小波变换和量化后 EBCOT 编码码块的有效比特平面进行独立的熵估计,并以码块估计熵总和指导码率预分配,同时 T2 编码器由预分配编码比特率自适应地反馈控制编码深度、完成优化截取。实验结果表明,该算法码率分配精确,并有效地减少了编码器计算量和存储量,提高了编码效率,算法复杂度低,易于硬件实现。

关键词: 图像压缩; 率控制; 码率分配; 熵估计

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0066-05

An Adaptive Rate Control Algorithm for JPEG2000 Based on Rate Pre-allocation

Kong Fan-qiang Li Yun-song Wang Ke-yan Zhuang Huai-yu

(National Key Lab on ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel scheme for JPEG2000 adaptive rate control is proposed based on rate pre-allocation and feedback control. After wavelet transform and quantification, a prediction module is introduced to estimate the entropy of EBCOT code block within available bit plane, then using the summation estimate entropy of each code block to allocate the rate for each code block. T2 encoder sends feedback to control the coding depth by the pre-allocation bit rate and complete the rate-distortion optimization truncation. The experimental results show that the proposed scheme can efficiently reduce the cost of computation and memory usage, which is suitable for hardware implementation with low computation.

Key words: Image compression; Rate control; Bit rate allocation; Entropy estimate

1 引言

JPEG2000 采用率失真优化截取算法^[1-3] (PCRD, Post-compression Rate Distortion)来精确地进行率控制。但 PCRD 优化算法是在 tile 块上的全局优化过程,它必须要等到整个 tile 块的所有码块的所有通道编码完成后才能进行分层截取点的搜索,因此要存储所有可行截取点的斜率信息,并且要对所有量化的系数进行 T1 编码,所以该算法的复杂度比较大,存储开销很大,系统实时性差。因此,许多学者在这方面做出了大量的研究工作,提出了一些算法^[4-9],从不同程度提高编码效率。

Yeung 等^[4]根据编码码块中比特平面越高,其所含信息的重要性越高的特点提出 PSRA(Priority Scanning Rate Allocation)算法,在 PSRA 算法的基础上,Yeung 等^[4]提出了 PSOT(Priority Scan with Optimal Truncation)算法。PSOT 算法改进了 PSRA 算法的性能,其 PSNR 基本上等于 JPEG2000 标准算法,但是相比 PSRA 算法却大大增加了

计算量和存储空间,而且增加了 T2 率失真优化截取算法。在这个高编码通道优先编码框架中,需要在所有码块中循环切换码块编码,并且需要保存所有码块的上下文状态变量等状态信息,算法复杂度较高,相关信息存储量大,这在实时系统中是很难做到的。文献[5,6]提出的根据小波量化权值和编码通道数预先分配各个码块的压缩码字数,极大地降低了 JPEG2000 的 T1 编码器的计算量和存储空间,实现了实时截断编码,算法复杂度低。但是该算法 PSNR 较低,一般要低于 PCRD 算法 0.8dB 以上,图像质量损失较大。文献[8]中 Kim 提出了 MEPRD (Memory Efficient Progressive Rate-Distortion)算法,性能与标准算法基本相同,且大幅度减少了编码所需的运算量和时间,但是随着码率的增加,编码冗余也随之增加,而且增加了最小斜率搜索算法。

本文提出一种基于码率预分配(rate pre-allocation)和反馈控制(feedback control)的自适应率控制算法,对码块有效比特平面进行独立的熵估计,并以码块估计熵总和指导码率预分配,同时由编码比特率自适应地反馈控制编码深度。实验结果表明,本文算法码率预分配精确,大幅度减少了计算量和存储空间,在不同码率下均有效地提高了编码效率,而且获得了与标准算法基本相同的高压缩性能。

2007-07-03 收到, 2007-12-31 改回

国家自然科学基金重点项目(60532060)和国家自然科学基金项目(60507012)资助项目

2 基于码块预测的 JPEG2000 码率预分配算法

考虑到 JPEG2000 压缩算法本身的特性, 即 JPEG2000 的熵编码和码率控制是建立在小波变换和量化的基础上对码块有效的比特平面进行单独编码的。因此, 可以在小波域对各个码块的熵进行独立估计, 以此合理预分配码块的码率。现在问题的关键就是在不改变 JPEG2000 编解码方式的前提下, 找到一种较为精确的, 付出较小的计算代价的图像熵估计方法。

2.1 图像熵的估计方法

图像熵的评价方法有很多, 通常使用 Shannon 公式来衡量, 但是 Shannon 公式要在图像域对所有点的像素值进行统计, 而且还要对得到的统计概率进行对数运算, 计算量很大, 实时性差, 因此不是一种实用的熵计算方法。常用的预测方法有以下两种, 它们均为在图像域的预测方法, 一种是基于预测模板的熵估计法, 在图像域加一个预测模板, 对像素预测值与原值进行差值, 最后用累加的差值表示图像的熵值大小。常见的预测模板有 JPEG-LS 和 PNG。这种预测算法运算量小, 适合实时操作, 是一种比较合适的压缩率预分配算法, 但此算法对于细节丰富、分布均匀的灰度图像, 效果不十分理想。另一种是基于边缘检测的熵估计法, 边缘对于一幅图像来说是非常重要的, 一般说来, 检测出的边缘越丰富, 其图像熵就越大。检验边缘的算子很多, 如 Sobel 算子、Roberts 交叉算子, Laplace 算子, Prewitt 算子, Canny 算子等等, 效果好的算子首推 9×9 Canny 算子, 但其运算量过于庞大, 不宜实时操作。

2.2 本文的码率预分配算法

考虑到 JPEG2000 就是以小波变换的 EBCOT 算法为核心的, 其编码的一大特点就是在小波域对码块完全独立编码, 码块率失真计算也是完全独立的, 因此, 可以在小波域对各个码块的熵进行独立估计, 最后将其累加代表整个图像的熵估计, 使图像熵估计与压缩算法相匹配, 以提高码率预分配的准确度, 从而提高重建图像的质量。可以将码块熵估计累加是因为如果小波变换是正交的, 均方误差测度和熵估计测度, 都是满足加性的。根据以上分析, 本文提出一种在小波域中的基于码块有效比特平面进行独立的熵估计的 JPEG2000 压缩码率预分配算法, 算法具体描述如下:

假如某图像小波分解后某一子带的系数为 $x_{ij}, i = 0, 1, \dots, N-1, j = 0, 1, \dots, M-1$, 图像的分辨率为 $N \times M$, 如果图像压缩过程中用一个步长为 Δ_l 的量化器进行量化, 其中 $l = 0, 1, \dots, L-1$, L 为小波变换后的子带类型数, 经过量化后的码块存在一定的零比特平面, 设码块零比特平面数为 $z_b, b = 0, 1, \dots, B-1$, B 为图像的码块个数, 则要进行块编码的有效数据:

$$x_{ij}^{bp} = \frac{x_{ij}}{\Delta_l 2^{z_b}} \quad (1)$$

独立计算由系数 x_{ij}^{bp} 组成的各个码块的熵估计值, 可以选择

上节所述算法, 但考虑到算法复杂度和熵估计的准确性, 本文采用预测性能优于绝大多数预测模型的基于 JPEG-LS 预测算法, 其预测模板^[9]如图 1(a)所示:

预测公式为

$$\hat{x}_{i+1,j+1}^{bp} = \begin{cases} \min(x_{ij+1}^{bp}, x_{i+1,j}^{bp}), & x_{ij}^{bp} \geq \max(x_{ij+1}^{bp}, x_{i+1,j}^{bp}) \\ \max(x_{ij+1}^{bp}, x_{i+1,j}^{bp}), & x_{ij}^{bp} \leq \min(x_{ij+1}^{bp}, x_{i+1,j}^{bp}) \\ x_{ij+1}^{bp} + x_{i+1,j}^{bp} - x_{ij}^{bp}, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

基于预测模板的预测熵可定义为对图像加一个预测模板, 然后用预测值与原像素值进行差值, 最后用这个差值进行信息含量的计算。如果预测的像素为码块的第 1 行或第 1 列, 则分别用图 1(b), 1(c)的预测模板, 预测值为前一个像素点的值。此时码块的预测熵为

$$H_b = \sum_{i \in b} \sum_{j \in b} |x_{ij}^{bp} - x_{ij}^{bp}| \quad (3)$$

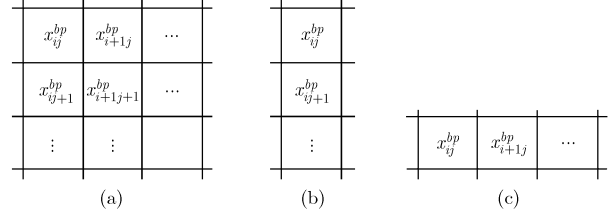


图 1 预测模板的选择

则整幅图像的估计熵为

$$H = \sum_{b < B} H_b \quad (4)$$

令 W_b 为各个码块预分配权值, 则:

$$W_b = \frac{H_b}{\sum_{b < B} H_b}, \quad \sum_{b < B} W_b = 1 \quad (5)$$

那么各个码块预分配的字节数即为 $C_b = R_{\max} \times W_b$, 其中 R_{\max} 为原始图像的压缩字节数。然后每个码块按 C_b 进行 EBCOT 编码即可。算法在实现过程中, 当原始图像输入存储器后, 需对图像先进行小波变换和量化, 但这一过程是不论有没有预分配算法都必须进行的, 故本文算法对压缩编码过程并无影响, 只需增加少量的缓存即可, 算法运算量低, 易于硬件实现。由以上分析, 本文提出了基于码率预分配和反馈控制(RPFC)的自适应率控制算法, 算法的系统框图如图 2 所示。

本文提出的算法具体描述如下:

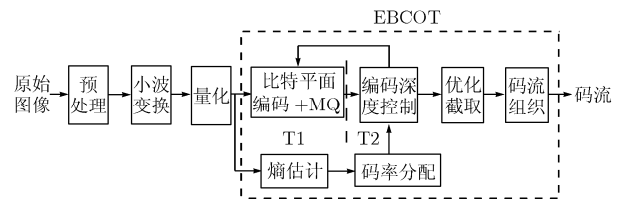


图 2 本文算法的系统框图

步骤1 初始化, 经过小波变换和量化后, 估计每个码块的熵 H_b , 计算整幅图像的估计熵 H 以及每个码块分配编码码字数 C_b , 设置每个码块的深度控制系数 $d_b = 0$ 。

步骤2 熵编码, 按 JPEG2000 标准的块扫描顺序, 对所有码块进行 T1 编码。

(1)对于码块 B_i , 首先编码 B_i 未曾编码的通道, 将所得码流和该 pass 的 ΔD_i^k 和 ΔR_i^k 放入存储器中, 根据

$$R_i = \sum_k \Delta R_i^k \quad (6)$$

计算累计码流, 然后 k 加 1, 并继续(2)。

(2)编码深度控制, 即

(a)判断深度控制系数 d_i 是否为 1, 如果 $d_i = 1$, 说明已经加深了 1 个 pass 编码深度, 跳到(c), 否则继续(b);

(b)判断码块的累加编码码流是否大于码块的目标码流, 即如果 $R_i \leq C_i$ 返回(1), 否则令 $d_i = d_i + 1$; 返回(1);

(c)转下一码块编码, 如果所有码块都已经编码完毕, 则跳到步骤 3。

步骤3 根据已得到 ΔD_i^k 和 ΔR_i^k , 在已编码 Pass 的范围内, 剔除每个码块的奇异点, 计算出每个码块中相邻候选截取点之间率失真斜率, 最后按率失真优化截取点算法查找 λ , 完成码流截取。

步骤4 按 JPEG2000 标准的码流组织算法, 完成码流组织和打包, 输出最终码流。

算法中引入了编码深度控制系数 d , 其作用是控制增加编码深度, 在上述算法中 d 的门限设为 1, 即码块 B_i 所得的压缩码流的码率已经大于目标码率, 编码深度控制单元通知 T1 编码器再增加一个 Pass 进行编码。引入编码深度控制系数的作用是扩大最终码流的选择范围, 尽量减少个别率失真斜率大于最终 λ 的 pass 未被编码从而影响截取效果。当然编码深度控制系数 d 的门限值越大, 本文算法的恢复图像的质量与标准算法越相近, 但综合考虑, 本文选择 d 的门限值为 1。

3 实验结果及其分析

实验采用了 4 幅经典测试图像进行对比: “Lena” (512 × 512), “Barbara” (512 × 512), “Field” (1024 × 1024), “Bridge” (2048 × 2048), 均采用 4 级小波变换, 码块大小为 64 × 64。本文算法和文献[9]的 MEPRD 算法分别与 PCRD 算法进行了比较, 比较方法采用以下 3 个方面:

(1)图像的 PSNR, 用两种优化算法(RPFC 与 MEPRD)与 JPEG2000 标准算法 PCRD 算法来恢复图像的 PSNR 的差值 ΔPSNR 做比较。

(2)算法的计算量, 用 T1 编码器编码的编码通道个数来衡量(本文码块熵估计算法只包含一个比较运算和差值运算, 相比编码通道运算量少, 因此用一个编码通道来代替衡量), 用两种优化方法与 JPEG2000 标准算法压缩图像计算量减少的百分比来表示, 其定义如下:

$$\text{计算量减少率} = \frac{\text{Pass数}_{\text{PCRD}} - \text{Pass数}_{\text{optical}}}{\text{Pass数}_{\text{PCRD}}} \quad (7)$$

(3)算法的存储量, 用 T1 编码中存储的码流字节数和相关信息(编码通道的 ΔD_i^k 、 ΔR_i^k 和 S_i^k , 以及本文算法的码块熵)字节数来衡量, 也用两种优化方法与 JPEG2000 标准算法压缩图像存储量减少的百分比表示。

表 1 列举了在不同码率条件和不同图像下, 本文方法 RPFC 和 MEPRD 算法对与 JPEG2000 中所采用的 PCRD 算法的比较测试结果。可以看出, 随着码率的增加, 本文算法的计算量减少率和存储量减少率要比 MEPRD 算法高很多, 特别是在码率为 2bpp 下, 本文算法的计算量减少率比 MEPRD 算法提高了 0.19~0.218, 存储量减少率提高了 0.27~0.317。在低码率下本文算法与 MEPRD 算法相比, 恢复图像的 PSNR 要低 0.32~0.1dB, 而随着码率的增加, 恢复图像的 PSNR 基本上与 MEPRD 算法一致。

为了便于比较, 图 3 显示了各种方法在不同码率时, 4 幅图像的平均 PSNR 差值。可以看出, 本文算法在低码率下, 平均 PSNR 差值最低为 0.213dB, 而随着码率的增加, 本文算法基本上等于 PCRD 标准算法的性能, 因此本文算法的图像质量损失是非常少的。图 4(a)和 4(b)分别显示了表 1 中 Barbara 和 Field 图像, 在不同码率下, 两种方法的计算量减少率比较。可以看出, 随着码率的增加, MEPRD 算法的计算量减少率大幅度降低, 编码冗余大大增加, 而本文算法有效地控制了 EBCOT 的计算量。在存储量减少率方面, MEPRD 算法的存储量减少率同样大幅度降低, 如图 5 所示。可见, 在比较的 3 个方面, 本文提出的算法均能达到较好的性能, 相比之下, MEPRD 算法虽然图像质量最好, 但是计算量和存储使用量较大, 而且随着码率的增加, 编码冗余越大。

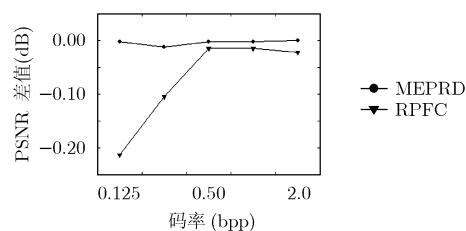


图3 两种方法在不同码率下平均 PSNR 差值比较

4 结束语

本文提出一种基于码率预分配和反馈控制的自适应率控制算法, 该算法以码块预测的熵值为依据, 进行不完全的比特平面编码, 而且本算法可根据引入编码深度控制系数和目标码率自适应地反馈控制编码深度。与标准算法相比, 在保持图像质量的前提下, 有效地减少了编码器计算量和存储量, 提高了编码效率。与其他算法相比, 在相近或更小的计算量和存储量下本文算法比文献[6]具有更好的恢复图像质

表 1 两种方法的测试结果比较

| | 码率(bpp) | Δ PSNR (dB) | MEPRD 计算 量减少率 | 存储量减少率 | Δ PSNR (dB) | RPFC 计算量 减少率 | 存储量减少率 |
|---------|---------|--------------------|------------------|--------|--------------------|-----------------|--------|
| Barbara | 2.0 | 0 | 0.241 | 0.315 | 0 | 0.436 | 0.610 |
| | 1.0 | 0 | 0.437 | 0.577 | 0 | 0.555 | 0.753 |
| | 0.5 | 0 | 0.579 | 0.743 | 0 | 0.655 | 0.838 |
| | 0.25 | -0.02 | 0.693 | 0.851 | -0.10 | 0.724 | 0.891 |
| | 0.125 | -0.01 | 0.755 | 0.907 | -0.17 | 0.776 | 0.923 |
| Lena | 2.0 | 0 | 0.214 | 0.284 | -0.04 | 0.400 | 0.555 |
| | 1.0 | -0.01 | 0.384 | 0.539 | -0.03 | 0.485 | 0.696 |
| | 0.5 | 0 | 0.537 | 0.738 | 0 | 0.580 | 0.810 |
| | 0.25 | -0.01 | 0.670 | 0.861 | -0.13 | 0.657 | 0.881 |
| | 0.125 | 0 | 0.777 | 0.926 | -0.32 | 0.727 | 0.926 |
| Field | 2.0 | 0 | 0.311 | 0.363 | -0.05 | 0.529 | 0.650 |
| | 1.0 | 0 | 0.513 | 0.598 | -0.02 | 0.620 | 0.752 |
| | 0.5 | 0 | 0.671 | 0.769 | -0.03 | 0.690 | 0.833 |
| | 0.25 | -0.01 | 0.791 | 0.874 | -0.14 | 0.749 | 0.897 |
| | 0.125 | 0 | 0.856 | 0.928 | -0.21 | 0.799 | 0.925 |
| Bridge | 2.0 | 0 | 0.326 | 0.370 | 0 | 0.525 | 0.643 |
| | 1.0 | 0 | 0.528 | 0.608 | -0.01 | 0.637 | 0.773 |
| | 0.5 | -0.01 | 0.673 | 0.764 | -0.03 | 0.706 | 0.852 |
| | 0.25 | -0.01 | 0.784 | 0.867 | -0.04 | 0.754 | 0.899 |
| | 0.125 | 0 | 0.867 | 0.932 | -0.15 | 0.803 | 0.930 |

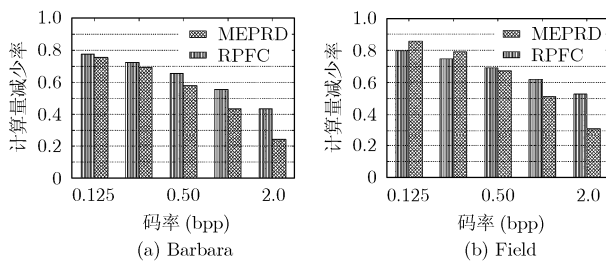


图 4 两种算法的计算量减少率比较

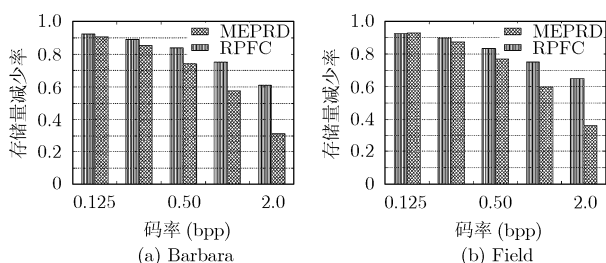


图 5 两种方法的存储量减少率比较

量, 与 MEPRD 算法相比本文算法在计算量减少率和存储量减少率上都有明显提高。实验结果表明本文算法具有广泛的应用价值, 效果可以满足绝大多数场合应用要求, 而且本文

算法复杂度低, 易于硬件实现。

参考文献

- [1] JPEG 2000 Part I Final Committee Draft Version 1.0. ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1646R, March 2000.
- [2] Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(7): 1158-1170.
- [3] Lian C J, Chen K F, and Chen H H, *et al.* Analysis and architecture design of block-coding engine for EBCOT in JPEG2000 [J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(3): 219-230.
- [4] Yeung Y M and Au O C. Efficient rate control for JPEG2000 image coding [J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2005, 15(3): 335-344.
- [5] 吴宗泽, 郑南宁, 黄宇等. 基于编码通道数的 JPEG2000 压缩率控制算法[J]. *西安交通大学学报*, 2004, 38(12): 1216-1219.
Wu Zong-ze, Zheng Nan-ning, and Huang Yu, *et al.* New compression ratio pre-dispensation algorithm for multi-tiles images in JPEG2000 [J]. *Journal of Xi'an JiaoTong University*, 2004, 38(12): 1216-1219.

- [6] 吴宗泽, 郑南宁, 黄宇等. JPEG2000 实时截断码率控制新算法及其 VLSI 结构设计[J]. 电子学报, 2005, 33(8): 1457-1460. Wu Zhong-ze, Zheng Nan-ning, Huang Yu, *et al.* New rate control algorithm truncating real time for JPEG2000 and its VLSI architecture design [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(8): 1457-1460.
- [7] 庄怀宇, 李云松, 吴成柯等. 基于重要性权值的自适应率控制算法[J]. 电子学报, 2005, 33(10): 1863-1866. Zhuang H Y, Li Y S, Wu C K, *et al.* An adaptive rate control algorithm based on significant priority [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(10): 1863-1866.
- [8] Kim T, Kim H M, and Tsai P S, *et al.* Memory efficient progressive rate-distortion algorithm for JPEG2000 [J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2005, 15(1): 181-187.
- [9] ISO/ IEC 14495-1-1998, Information Technology Lossless and Near-Lossless Compression of Continuous Tone Still Images Baseline.
- 孔繁镕: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为图像压缩编码.
- 李云松: 男, 1974 年生, 副教授, 研究方向为静态图像压缩编码与图像处理等方面的研究工作.
- 王柯俨: 女, 1980 年生, 博士生, 研究方向为图像压缩编码.
- 庄怀宇: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为图像、视频编码及其硬件实现.