

基于层次模型的重要性编码算法

周映虹^① 马争鸣^②

^①(广东工业大学信息工程学院 广州 510006)

^②(中山大学电子与通信工程系 广州 510275)

摘要: 该文提出了基于层次模型的重要性编码算法, 该算法在不改变 JPEG2000 上下文模型前提下按照重要系数的空间聚集区域进行层次邻域编码。实验结果表明: 新算法输出的码流的自相关性较 JEG2000 以及 Hilbert 曲线输出的码流的自相关性好; 新算法的平均码率较 JPEG2000 的条带扫描以及 Hilbert 曲线扫描的平均码率分别提高了 1.06%, 0.57%; 而且, 新算法的平均码率较 JPEG2000 的上下文量化优化算法获得的平均码率提高了 1.08%。

关键词: 图像编码; JPEG2000; 重要性编码; 条带扫描; Hilbert 曲线

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1497-04

A Significance Coding Algorithm Based on Layer Model

Zhou Ying-hong^① Ma Zheng-ming^②

^①(Information Engineer College, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

^②(Department of Electronic & Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A significance coding algorithm based on layer model is proposed. Without changing the context template of JPEG2000, the proposed scheme uses an explicit layer template to dynamically arrange the scan path of wavelet coefficients. Experimental results show that the proposed scheme provides better autocorrelation outputted bit stream than stripe scanning of JPEG2000 and Hilbert curve scan; and the proposed scheme improves over stripe scanning and Hilbert curve scanning in terms of average bit rates by 1.06% and 0.57%, respectively. Moreover, the proposed scheme achieves an improvement 1.08% over context quantization optimization algorithms based on JPEG2000 in terms of average bit rates.

Key words: Image coding; JPEG2000; Significance coding; Stripe scan; Hilbert curve

1 引言

嵌入式小波图像编码算法^[1,2]是目前图像压缩应用中的主流算法之一。这类算法在编码的过程中形成了重要性信息、符号信息以及精细信息等 3 种信息。其中对重要性信息进行编码(下文称为重要性编码)所产生的比特流占据了最终输出比特流的大部分码位。因此, 使用尽量少的码位来完成重要性编码对整个嵌入式小波图像编码器的压缩性能的提高是非常有利的。

原始图像经过小波变换后的二维数据的幅值之间仍残留着相关性^[3], 这使得众多研究者关注如何充分利用这些相关性来提高重要性编码的压缩效率: 文献[4-7]充分利用小波系数幅值的高阶统计特性, 使用上下文建模并对上下文进行优化量化, 取得了较好的压缩效果。然而, 这类算法训练过程很复杂, 编码时需要存储以及访问庞大的上下文索引表, 内存开销大。考虑到若图像的小波变换策略以及量化策略已定, 那么影响最终压缩比的关键因素在于后续的重组系数步骤以及熵编码步骤这两个步骤所采用的策略。而上下文量化

优化技术^[4-7]是从熵编码步骤来提高压缩比。本文的出发点是: 充分利用小波系数相关性, 从重组系数步骤来考虑通过简单有效的算法来获得比文献[7]更低的平均输出码率。

重要性编码的过程是首先对二维的小波系数进行扫描形成一维重要性信息序列, 然后再对一维重要性信息序列进行熵编码输出比特流。如何对二维小波系数进行扫描从而形成自相关性最好的比特流? 已有的扫描方式主要有两类: 分数维为 1 的线扫描方式和分数维为 2 的空间填充曲线扫描方式。JPEG2000^[2,8]使用条带扫描方式对小波系数进行扫描, 而条带扫描实际是一种线扫描方式。线扫描的分数维为 1, 大大割裂了二维小波图像的内在相关性。分数维为 2 的空间填充曲线^[9,10]如 Lebesgue 曲线, Sierpinski 曲线, Peano 曲线和 Hilbert 曲线等是近年来研究比较多的一类曲线。文献[11]证明 Hilbert 曲线是所有空间填充曲线中能够最好地保留空间点局部相关性的曲线。因此, 使用 Hilbert 曲线来代替条带扫描能更好地保留二维小波系数的相关性。但是, 条带曲线扫描和 Hilbert 曲线扫描都遵循固定的扫描模式, 都是图像无关的扫描方式。而小波系数的空间相关性不但依图像内容的不同而不同, 而且也依比特平面的不同而不同。显

然，条带曲线和 Hilbert 曲线都无力捕抓上述相关性。

本文提出一种基于层次模型的重要性编码算法。该算法的最大特点是按照已知的重要系数的聚集区域进行编码，而不是按照固定的曲线路径进行编码，从而最大程度地保留了重要系数的空间相关性。对比实验结果表明，与基于条带曲线或 Hilbert 曲线扫描方式相比，新算法输出的符号流自相关性最好；新算法获得的平均码率比文献[7]获得的平均码率更小。

2 基于层次模型的重要性编码算法

小波系数具有聚集特性^[3]：重要系数的邻域附近出现重要系数的可能性很大。为了充分利用小波系数的这种聚集特性，新算法采用了邻域相关的层次模型来指导整个扫描过程。

2.1 小波系数邻域相关的层次模型

根据 JPEG2000 的规定，一个小波系数 X 的邻域(上下文)由它的上下左右和4个对角线上紧邻的8个小波系数组成(见图 1)： $H_1, H_2, V_1, V_2, D_1, D_2, D_3, D_4$ 。通过互信息的分析可发现，这8个系数与其中心的相关程度各不相同。

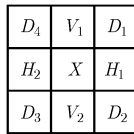


图1 JPEG2000 的上下文模型—8 邻域模型图

设 X, Y 均为小波系数， $|X|, |Y|$ 分别表示其幅值， $\text{msb}(|X|), \text{msb}(|Y|)$ 分别表示其幅值的最高比特平面位， N 表示所有小波系数幅值的最高比特平面位，则 $|X|$ 和 $|Y|$ 的互信息为

$$m(|X|, |Y|) = \sum_{i,j=0}^N P(\text{msb}(|X|) = i, \text{msb}(|Y|) = j) \cdot \log_2 \frac{P(\text{msb}(|X|) = i, \text{msb}(|Y|) = j)}{P(\text{msb}(|X|) = i)P(\text{msb}(|Y|) = j)} \quad (1)$$

使用 Lena(512×512)图像和 Barbara(512×512)图像经过 5 次 5-3 可逆整数小波分解后得到的小波系数作为样本，按照式(1)统计小波系数的幅值与其 8 个邻居的幅值之间的互信息，结果见表 1。

从表 1 可见，对于 LH 子带有

$$m(|X|, |H_1|), m(|X|, |H_2|) > m(|X|, |V_1|), m(|X|, |V_2|) > m(|X|, |D_1|), m(|X|, |D_2|), m(|X|, |D_3|), m(|X|, |D_4|) \quad (2)$$

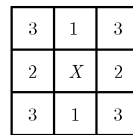
对于 HL 子带有

$$m(|X|, |V_1|), m(|X|, |V_2|) > m(|X|, |H_1|), m(|X|, |H_2|) > m(|X|, |D_1|), m(|X|, |D_2|), m(|X|, |D_3|), m(|X|, |D_4|) \quad (3)$$

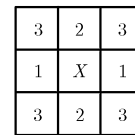
对于 HH 子带有

$$m(|X|, |H_1|), m(|X|, |H_2|), m(|X|, |V_1|), m(|X|, |V_2|) > m(|X|, |D_1|), m(|X|, |D_2|), m(|X|, |D_3|), m(|X|, |D_4|) \quad (4)$$

扫描时，相关性越强的邻域系数应尽可能扫描在一起，从而使得输出的一维序列尽可能自相关性强。据此，本文将 8 邻域模型划分成以下的层次模型如下(见图 2)：对于 LL 和 HH 子带，小波系数 X 的 8 个紧邻的小波系数分为两个层次：第 1 层次为： H_1, H_2, V_1, V_2 ，第 2 层次为： D_1, D_2, D_3, D_4 。对于 LH 子带，小波系数 X 的 8 个紧邻的小波系数分为 3 个层次：第 1 层次为： H_1, H_2 ，第 2 层次为： V_1, V_2 ，第 3 层次为： D_1, D_2, D_3, D_4 。对于 HL 子带，小波系数 X 的 8 个紧邻的小波系数分为 3 个层次：第 1 层次为： V_1, V_2 ，第 2 层次为： H_1, H_2 ，第 3 层次为： D_1, D_2, D_3, D_4 。新算法根据该层次模型来指导扫描。



(a) HL子带使用的模型



(b) LH子带使用的模型

图2

2.2 算法流程

由于 LL 子带的编码对最终码长的贡献可以忽略，因此以下的算法流程不考虑 LL 子带的编码，其它子带则按从粗尺度到细尺度，从 HL 子带到 LH 子带再到 HH 子带的顺序进行比特平面编码。最初编码时，初始化重要系数链表 LSC 为空表。每个子带从最高比特平面向低比特平面逐渐深入编码。每个比特平面编码步骤如下：

步骤1 若LSC非空，则执行基于第1层领域的重要性编码。对于从LSC中依次取出的每一个已知重要系数，检查其邻域标注为“1”的位置的系数，如果该邻域位置上的系数在上一个比特平面位确定为非重要且在当前比特平面仍未被编码，则对其重要性进行编码。如果该系数是新的第1类小

表1 小波系数 X 的幅值与其邻域小波系数的幅值之间的互信息

| | $m(X , H_1)$ | $m(X , H_2)$ | $m(X , V_1)$ | $m(X , V_2)$ | $m(X , D_1)$ | $m(X , D_2)$ | $m(X , D_3)$ | $m(X , D_4)$ |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| LH | 0.1877 | 0.1878 | 0.1790 | 0.1773 | 0.1542 | 0.1357 | 0.1526 | 0.1371 |
| HL | 0.2724 | 0.2733 | 0.3281 | 0.3272 | 0.2643 | 0.2456 | 0.2648 | 0.2465 |
| HH | 0.2044 | 0.2043 | 0.2083 | 0.2079 | 0.1910 | 0.1789 | 0.1905 | 0.1791 |

波系数, 则将其置入LSC末尾。这个过程可以用函数 $\text{Scan_Expand}(1)$ 来表示。

步骤2 分别执行第2层邻域以及第3层邻域的重要性编码, 即依次执行函数 $\text{Scan_Expand}(2)$, $\text{Scan_Expand}(3)$ 。当执行第2层邻域重要性编码时, 如果被编码的是一个刚被确认为第1类的小波系数, 则先对这个新加入LSC的成员执行第1层邻域编码, 直至没有新的第1类小波系数再出现, 然后返回继续执行第2层邻域重要性编码; 当执行第3层邻域重要性编码时, 如果被编码的是一个刚被确认为新的第1类小波系数, 先对该新加入LSC的成员执行第1层邻域编码, 直至没有新的第1类小波系数再出现, 然后对LSC中没有执行第2层邻域编码的新成员执行第2层邻域编码, 直至没有新的第1类小波系数再出现, 最后返回到当前第3层邻域编码继续执行余下的重要性编码。

步骤3 对于在当前比特平面位中仍没有被确定重要性的系数, 检测其重要性。按照从粗尺度到细尺度, 从HL子带到LH子带再到HH子带的扫描顺序来扫描每个子带, 每个子带里均按照Hilbert curve来扫描。一旦发现新的重要系数, 同样地, 对于新加入LSC的成员, 执行从第1层邻域到第3层邻域的编码, 直至没有新的第1类小波系数再出现, 然后返回于此继续执行余下的Hilbert curve扫描。由于每个子带的最高比特平面位开始编码时, 该子带的所有小波系数都假设为非重要, 因此每个子带的最高比特平面步骤1和步骤2轮空, 只执行步骤3。

步骤4 回到步骤1进行下一个比特平面重要性编码。

函数 Scan_Expand 流程:

Algorithm $\text{Scan_Expand}(\text{unsigned } i)$

- (1) for each entry X from LSC do
- (2) for the each neighbor w of X which marked with “ i ” (see Fig.2) do
- (3) if w has not been coded then
- (4) code significance of w
- (5) if w is a new significant sample then
- (6) put w to the end of LSC
- (7) for layer=1; layer < i ; layer++ do
- (8) $\text{Scan_Expand}(\text{layer})$;
- (9) endfor
- (10) endif
- (11) endif
- (12) endfor
- (13) move to the next entry X from LSC
- (14) endfor

3 实验结果

实验所采用的图像都进行了5级5-3可逆整数小波变换, 熵编码都采用相同的算术编码器^[12]。实验结果反应的是重要

性编码结果, 不考虑符号编码和精细编码, 也不考虑LL子带的比特平面编码。

对测试图像的小波系数的比特平面 2^3 , 2^4 , 2^5 , 2^6 分别采用条带扫描, Hilbert 曲线扫描以及新算法扫描。该实验以 house, coupe, tiffany, café, bike 和 woman 等6幅图像作为测试图像。因此每种扫描算法产生24个输出序列, 并根据式(5)统计出自相关函数值 $R(n)$ 。这里, $T=24$; $x_i(n)$ 是输出的第 i 个序列, M_i 是序列 i 的长度。图3是3种扫描算法的自相关函数值比较。从图3可以看见, 新算法输出符号流自相关程度最高。表2是3种扫描算法的重要性编码结果。为了便于比较, 这3种扫描算法都是采用JPEG2000中定义的上下文索引表^[8]来驱动算术编码。从表2可得, 新算法获得的平均码率(比特每像素)比JPEG2000的条带扫描以及Hilbert曲线扫描获得的平均码率分别提高了1.06%、0.57%。

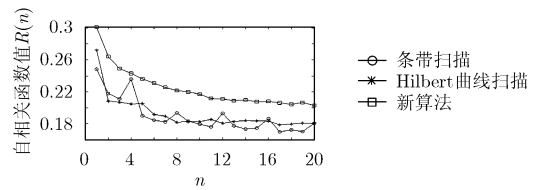


图3 JPEG2000的条带扫描、Hilbert曲线扫描以及新算法产生的重要性信息序列的自相关函数

表2 条带扫描、Hilbert曲线扫描以及新算法的重要性信息的编码结果(字节)以及平均码率

| 测试图像 | 条带扫描 | Hilbert曲线扫描 | 新算法 |
|--------------------------|---------|-------------|---------|
| House | 17146 | 17129 | 16993 |
| Coupe | 17148 | 17103 | 16971 |
| Tiffany | 69369 | 69079 | 68714 |
| Cafe | 1578311 | 1569646 | 1561194 |
| Bike | 1470467 | 1462057 | 1453322 |
| woman | 1453474 | 1437940 | 1434816 |
| 平均码率 (bits per pixel) | 2.1975 | 2.1866 | 2.1741 |

文献[7]是基于最小描述码长准则来对JPEG2000进行上下文初始化的优化以及上下文量化优化。文献[7]的训练过程非常复杂, 原始上下文状态的定义除了沿用JPEG2000的8邻域的256个原始上下文以外, 同时也包括进了8邻域的能量信息以及纹理类别信息, 可见其原始上下文个数远大于256, 而上下文量化优化后的上下文状态个数也比JPEG2000的9个状态多(文献[7]中平均码率最低的上下文状态个数是64), 因此这类算法在编码时需要存储以及访问庞大的上下文索引表。该算法获得的平均码率较JPEG2000获得的平均码率提高了0.36%^[7]。而本文算法无需进行训练; 其原始上下文状态定义仅沿用了JPEG2000的8邻域的256个原始上下

文以及采用 JPEG2000 定义的 9 个状态的上下文状态索引表来驱动算术编码。根据表 3, 本文提出的算法获得的平均码率较算法文献[7]获得的平均码率提高了 1.08%, 可见新算法的压缩性能要优于文献[7]。

表 3 文献[7]以及新算法的重要性信息的编码结果(字节)以及平均码率

| 测试图像 | 文献[7] | 新算法 |
|----------------------|--------|--------|
| baloon | 92724 | 92911 |
| barb | 114681 | 112146 |
| barb2 | 117816 | 114863 |
| board | 105181 | 104037 |
| boats | 110051 | 108247 |
| girl | 109199 | 108625 |
| gold | 116440 | 114721 |
| hotel | 116807 | 115627 |
| zelda | 106662 | 105738 |
| Lena | 71556 | 70655 |
| Baboon | 81827 | 79618 |
| Tools | 534640 | 547526 |
| 平均码率(bits per pixel) | 2.1757 | 2.1521 |

$$R(n) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \sum_{m=0}^{M_i-n-1} \left(x_i(m+n) - \frac{1}{M_i} \sum_{j=0}^{M_i-1} x_i(j) \right) \cdot \left(x_i^*(m) - \frac{1}{M_i} \sum_{j=0}^{M_i-1} x_i^*(j) \right), \quad n > 0 \quad (5)$$

4 结束语

基于上下文量化优化的算法通过建立高阶上下文模型以及对上下文空间进行优化分类来提高编码器的压缩性能, 这是从熵编码范畴来提高压缩性能。本文从重组系数的角度来考虑提高编码器的压缩性能, 提出了基于层次模型的重要性编码算法。新算法利用小波系数的聚集特性进行编码, 使得输出的符号与符号之间尽量自相关。实验结果表明, 新算法获得的平均码率比基于上下文量化优化算法获得的平均码率提高了 1.08%。

参考文献

[1] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of

wavelet coefficients [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3445-3462.

[2] Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(7): 1158-1170.

[3] Liu J and Moulin P. Information-theoretic analysis of interscale and intrascale dependencies between image wavelet coefficients[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2001, 10(11): 1647-1658.

[4] 伞兴, 蔡华, 吴秀清. 基于时、频域上下文模型的图像压缩算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2006, 27(8): 1556-1559.

San Xing, Cai Hua, and Wu Xiu-qing. Image coding based on spatial and frequency context model [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2006, 27(8): 1556-1559.

[5] Liu Zhen and Karam L J. Mutual information-based analysis of JPEG2000 contexts [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2005, 14 (4): 411-422.

[6] Forchhammer S, Wu Xiao lin, and Andersen J D. Lossless image data sequence compression using optimal context quantization [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2004, 13(4): 509-517.

[7] Krivoulets A, Wu Xiaolin, and Forchhammer S. On optimality of context modeling for bit-plane entropy coding in the JPEG2000 standard[C]. Proc. of Very Low Bitrate Video Coding, Madrid, Spain, 2003: 208-216.

[8] ISO/IEC 15444-1: Information Technology—JPEG 2000 Image Coding System—Part1: Core Coding System [S].

[9] Hans Sagan. Space-Filling Curves [M]. New York:Springer-Verlag. 1994, Chapter 9.

[10] Memon N, Neuhoff D, and Shende S. An analysis of some common scanning techniques for lossless image coding [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(11): 1837-1848.

[11] Gotsman C and Lindenbaum M. On the metric properties of discrete space-filling curves [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1996, 5(5): 794-797.

[12] Witten I, Neal R, and Cleary J. Arithmetic coding for data compression[J]. *Communications of the ACM*, 1987, 30(6): 520-540.

周映虹: 女, 1978 年生, 博士生, 研究方向为图像与视频压缩.

马争鸣: 男, 1957 年生, 教授, 研究方向为通信与信息系统.