

# 一种形态学小波域彩色图像压缩编码算法<sup>①</sup>

## A Color Image Coding Algorithm in Morphological DWT Domain

周源泉 李章维 徐 锦 (浙江工业大学 自动化系 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 提出了基于形态学的彩色图像压缩编码算法。该算法以数学形态学小波图像编码 (MRWD) 思想为基础, 通过建立可逆彩色空间变换、形成显著系数簇、删除含有 3 个点以下的小簇、游程编码显著系数等措施, 实现彩色图像的压缩编码。实验结果表明, 文中算法具有较好的压缩效果。

**关键词:** 彩色图像压缩 MRWD 算法 色彩相关

### 1 引言

小波(wavelet)变换是 20 世纪 80 年代出现的数学分析工具, 自 1988 年 Mallat 将多分辨率分析思想引入小波变换以来, 小波变换在图像压缩编码中得到广泛的应用。其中, 以经典嵌入式零树编码(EZW)思想<sup>[1]</sup>为基础的 CEZW 算法<sup>[2]</sup>和 CZW(color zero-tree wavelet)算法<sup>[3]</sup>被认为是比较优秀的彩色图像压缩算法。它们结构简单, 实现方便, 编码解码速度也较快, 同时可以根据需要精确控制编码比特率。然而, 实验表明上述算法也存在如下不足:

(1) 随着显著阈值的降低, 零树的预测效率随之降低。

(2) 对于纹理非常丰富的图像, 非显著区域非常琐碎, 零树的预测性能也会大大降低。

(3) 从 RGB 空间转化为 YUV 空间时采用浮点运算, 影响复原效果。

近年来, 一些研究人员提出了基于 EZW 的改进算法<sup>[4]</sup>, 克服了 CEZW 算法的部分缺陷, 同时也提高了编解码速度, 但也存在零树预测性能降低等缺陷。

针对以上算法的不足, 本文提出了一种新的彩色图像压缩改进算法。该算法以 MRWD 算法为基础, 首先进行彩色空间的无失真可逆转换(RGB 空间转化为 YUV 空间), 以减少彩色分量的相关性, 并利用形态膨胀算法形成显著系数簇, 为后继的显著簇图编码提供必要条件, 最后对显著系数簇进行改进游程编码, 提高压缩效果。

### 2 小波变换

小波变换的基本思想<sup>[5]</sup>是用一组持续时间很短的时域函数  $\{\psi_{m,n}(t)\}$  构成  $L^2(R)$  空间的一组基函数, 实现对  $L^2(R)$  空间中的时域信号  $f(t)$  的分解。

选定  $V_m$  和  $\varphi$ , 且  $\varphi_{0,n}$  是规范正交的,  $\{\psi_{m,n}; m, n \in Z\}$  也是规范正交的, 那么对于  $c^0 = (c_n^0)_{n \in Z} \in l^2(Z)$ , 则  $f$  可进行完备正交分解, 第  $j$  次递推过程如下:

$$P_{j-1}f = P_j f + Q_j f = \sum_k c_k^j \varphi_{j,k} + \sum_k d_k^j \psi_{j,k} \quad (1)$$

式中  $P_j f, Q_j f$  分别为近似信息和差别信息,  $c^j = Hc^{j-1}, d^j = Gd^{j-1}$ , 其中  $H$  和  $G$  为算子,  $(Ha)_k = \sum_n h(n-2k)a_n$ ,  $(Ga)_k = \sum_n g(n-2k)a_n$ , 而  $h(n)$  与  $g(n)$  由给定的多分辨率分析确定。这就是 Mallat 分解公式。

由于图像为二维信号, 因此图像的小波分解可以看作是分解滤波器先对图像的“行”进行分解, 然后再对“列”进行分解。设  $c^0 = (c_n^0)_{n \in Z} \in l^2(Z)$ , 定义  $H_r, G_r$  和  $H_c, G_c$  分别是  $H, G$  算子对行和列的作用, 则  $c^0$  可以分解成  $c^1$  和 3 个不同的对应于  $\psi^i (i=1,2,3)$  的细节  $d^{11}, d^{12}, d^{13}$ , 即

$$\begin{cases} c^1 = H_c H_r c^0 \\ d^{11} = G_c H_r c^0 \\ d^{12} = H_c G_r c^0 \\ d^{13} = G_c G_r c^0 \end{cases} \quad (2)$$

① 收稿时间:2008-09-24

重构过程为

$$c^0 = H_r^* H_c^* c^1 + H_r^* G_c^* d^{11} + G_r^* H_c^* d^{12} + G_r^* G_c^* d^{13} \quad (3)$$

其中  $H^*$ ,  $G^*$  分别为  $H$ ,  $G$  的对偶算子。此过程对任意  $j$  都成立。

由此可以看出, 二维图像信号经小波分解后应得到 4 个子图。

### 3 MRWD 算法

MRWD 算法<sup>[6]</sup>利用形态学中的条件膨胀算法对形状不规则的显著小波系数簇进行有效的精确描述, 包括结构元模板的选择和显著簇形成算法。

因为大量的小波系数是不显著的, 而少数的显著系数是成簇分布。因此通过条件膨胀算法, 可以使显著簇逐渐成型, 从而构成对子带内显著系数区域的一个有效的分割。

设  $\{C(x,y), x,y \in Z\}$  是图像的小波变换系数, 对于一个给定的显著阈值  $T$ , 在生成显著簇时, 表示显著系数图的二值化图像的定义为

$$A(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } C(x,y) \text{ 是显著系数} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

显著簇图的形成结果与所选取得形态结构元有关。经过比较, 一般选至的菱形结构元模板效果较好。如图 1 中的(a)和(c)。

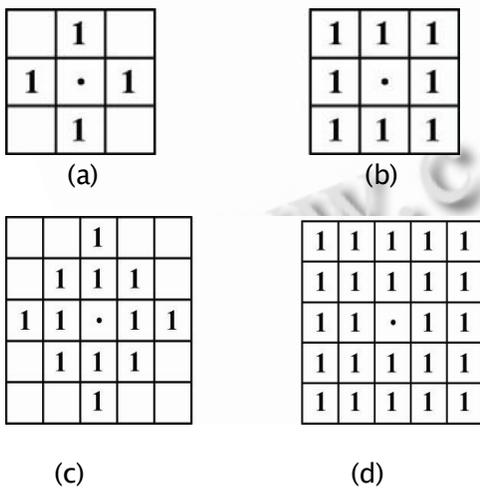


图 1 条件膨胀中使用的结构元

显著系数集成簇的过程称为“聚类”过程, 可用递归方法可以实现条件膨胀算法, 具体过程如下如图 2 所示:

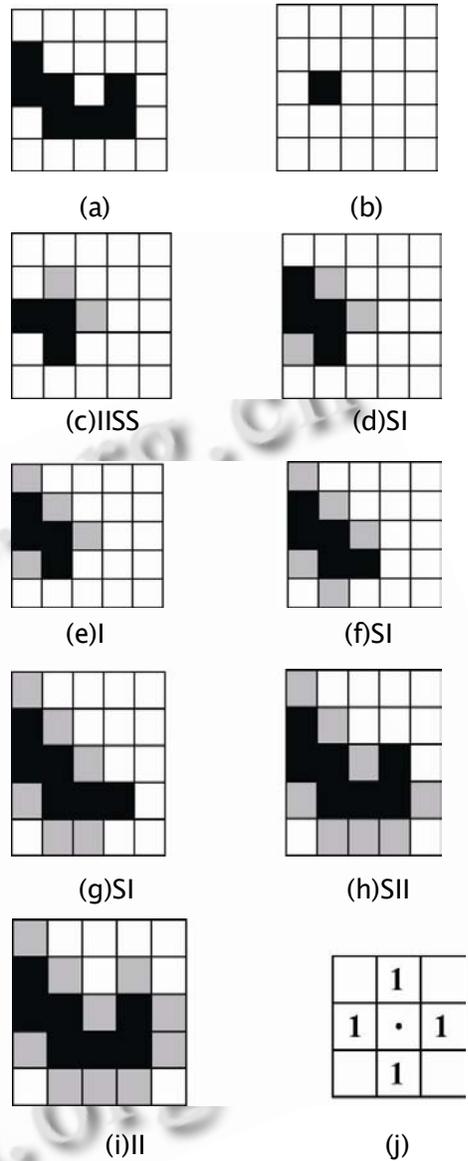


图 2 “聚类”过程

图中, 黑色方块表示显著系数所在的位置, 白色方块表示非显著系数所在的位置, 灰色方块表示显著簇生成过程中所产生的边界。条件膨胀采用图 1(a)所示的结构元, 扫描顺序为顺时针, 如图 2(j)所示。图 2(a)为原始的显著系数分布位置, 图 2(b)为种子位置; 图 2(c)~图 2(i)为条件膨胀算法过程。每个子图编号旁边标出的是当前步骤输出的形态编码符号, “S”表示显著系数, “I”表示非显著系数最后得到显著簇形成过程中输出的编码符号为“IISSIIISISII”。

### 4 彩色图像压缩改进算法

鉴于 CEZW 等算法的不足, 提出了改进彩色图像

的算法:去除了嵌入式零树编码,采用了 MRWD 算法,其小波编/解码过程如图 3 所示。源图像通过彩色空间转换再经过小波变换 DWT 和量化后,利用 MRWD 算法处理编码预处理、种子位置编码、显著簇图编码、系数符号编码,最后利用游程编码对系数幅度编码。

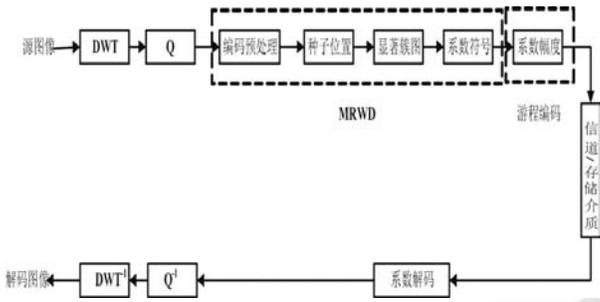


图 3 数学形态学彩色图像小波编/解码过程示意图

### 4.1 彩色空间转换

彩色图像压缩技术的技术基础是减少或消除彩色分量之间的相关性,达到去除彩色空间内部数据冗余,从而实现彩色图像压缩的目的。目前,以 CEZW 和 CZW 算法为代表的大部分彩色压缩技术均采用了 YUV 彩色空间思想,并取得了比较理想的压缩效果。然而它们在彩色空间转换时采用了如下转换公式:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.229 & 0.578 & 0.114 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (5)$$

尽管由以上公式实现的空间转换极大的降低了彩色分量的相关性,但是,由于公式(5)采用了浮点运算,使彩色空间转换为非可逆转换,影响图像复原的质量。为此,采用如下可逆形式的彩色空间变换公式:

$$Y = \left\lfloor \frac{R+2G+B}{4} \right\rfloor, G = Y - \left\lfloor \frac{U+V}{4} \right\rfloor \quad (6)$$

$$U = R - G, R = U + G \quad (7)$$

$$V = B - G, B = V + G \quad (8)$$

公式(6)(7)(8)未采用浮点运算,大大提高了彩色图像恢复的质量,且由彩色分量上的直方图统计结果可知:通过公式(6)(7)(8)转换的 YUV 空间中,图像的能量和细节都集中在 Y 分量上,约占 84%。这完全符合人眼视觉对 Y 分量的敏感度大于 U、V 分量的敏感度[4]。为此,可以略去部分 U、V 分量的高频子带。这样既不影响图像复原的质量,同时又提高了压缩编

码的效率和压缩的性能。

### 4.2 系数幅度的游程改进编码

由于 MRWD 算法对得到的显著系数直接编码,其压缩性能较差,而“种子位置”、“显著簇图”、“系数符号”、“系数幅度”中“系数幅度”所占的比重最大,同时,LL 子带占据图像的大部分能量,LL 子带系数幅度极高。因此,在对幅度进行编码时,宜采用位平面编码方式。

位平面编码方式从最高的位平面开始,一层一层地向下扫描所有系数在当前位平面的比特值。在高层位平面编码中,除 LL 子带区域以外,会出现大量的连零区域。这样的统计特性非常适合于游程编码。所以,在图 3 中利用游程编码将系数进行单独编码,提高压缩效果。

目前,系数编码一般使用自适应游程编码[6],此编码方式采用一组长短不同的游程组合去描述一个游程 L,而且这一组合规则是编码器和解码器双方约定好的,规则本身的信息不必传输,因此可以节省编码所需的码表。但是,对于探测失败就换较短游程继续探测,直到可用的游程长度减少到 0,就浪费了大量时间,增加了编码量。例如:当连 1 长度刚好为时,就必须进行失败的探测才能进行连 0 的探测。因此,提出如下改进算法:

每次都从最短的游程开始,如果成功,则用下一个较长的游程去探测,依次类推;如果探测失败,先判断下一个比特是否与上一个相同,相同则缩短游程继续探测,不同则换另一种游针进行探测,如图 4 所示。原始比特流为“11111111000000000000000000”

	原始比特流	1	11	1111	0	00	0000	00000000	000
自适应游程编码	0游针位置	0	.....	0	1	2	3	4	3 2 1 0
	0游针长度	1	.....	1	2	4	8	16	8 4 2 1
	1游针位置	0	1	23210	.....	.....	.....	.....	.....
	1游针长度	1	2	48421	.....	.....	.....	.....	.....
	编码输出	1	1	10000	1	1	1	1	0 0 0 1 1
改进游程编码	0游针位置	0	.....	0	1	2	3	4	3 2 1 0
	0游针长度	1	.....	1	2	4	8	16	8 4 2 1
	1游针位置	0	1	23	.....	.....	.....	.....	.....
	1游针长度	1	2	48	.....	.....	.....	.....	.....
	编码输出	1	1	10	1	1	1	1	0 0 0 1 1

图 4 自适应游程编码和改进游程编码

由图4的自适应游程编码输出和改进的游程编码输出可以看出改进的游程编码减少了编码比特。而实际图像的连1更长,这样就可以极大地减少编码比特,从而提高了压缩倍率。

## 5 实验结果与结论

为了验证本文算法的高效性,以  $512 \times 512$  的 24 位真彩色标准图像 Barbara 为例进行了 7 级小波分解,并与 CZW 和 CEZW 算法进行了比较,实验结果如表 1 所示:

表 1 三种编码重构图像效果(PSNR)比较

比特率 (bpp)	Barbara标准图像		
	本文算法	CZW算法	CEZW算法
0.10	23.43	22.11	22.05
0.20	24.76	23.48	23.52
0.50	28.58	26.49	25.68
0.75	31.27	29.25	28.94
1.00	33.19	31.64	31.21

本文以 MRWD 编码算法为基础,提出了一种基于小波域形态学的彩色图像的压缩算法。该算法具有以下特点:

①克服了 CWZ 算法和 CEZW 算法的缺陷,具有更好的恢复效果。

②解决了以 EZW 算法为基础随显著阈值降低,零树的预测效率随之降低的缺陷。

③对纹理丰富的彩色图像具有更好的解码效果,可广泛应用于指纹、虹膜以及遥感图像的压缩。

## 参考文献

- 1 Shapiro J M. Embedding image coding using zero-trees of wavelet coefficients. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993,41(12):3445 - 3462.
- 2 Saenz M, Salama P, Shen K, et al. An evaluation of color embedded wavelet image compression techniques. Proceedings of the SPIE/IS&T Conference on Visual Communications and Image Processing (VCIP). San Jose, California,USA, 1999: 282 - 293.
- 3 Shen K. A study of real-time and rate scalable video and image compression[Ph.D.Thesis]. West Lafayette: Purdue University, 1997.
- 4 王向阳,杨红颖.一种小波变换域彩色图像压缩编码方案.计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(8): 1829 - 1830.
- 5 刘文耀.小波图像编码专用 VLSI 设计.北京:电子工业出版社,2006: 40 - 63.
- 6 Servetto S, Ramchandran K, Orchard, MT. Wavelet based image coding based on a morphological representation of wavelet data. IEEE Transactions on Image Processing, 1999,8(9):1161 - 1174.