

一种分形彩色图像压缩编码方法*

焦华龙¹⁺, 陈刚^{1,2}

¹(浙江大学 计算机图象图形研究所, 浙江 杭州 310027)

²(宁波大学 数字技术与应用软件研究所, 浙江 宁波 315211)

A Color Image Fractal Compression Coding Method

JIAO Hua-Long¹⁺, CHEN Gang^{1,2}

¹(Institute of Computer Graphics and Imaging Processing, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

²(Institute of Digital Technology and Application Software, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

+ Corresponding author: Phn: 86-21-64325854 ext 814, Fax: 86-21-64325842, E-mail: hl_jiao@163.net

Received 2002-04-09; Accepted 2002-07-02

Jiao HL, Chen G. A color image fractal compression coding method. *Journal of Software*, 2003,14(4):864-868.

Abstract: In this paper, a color image fractal compression coding method is proposed by analyzing the correlation of r , g , b components of a color image and the remnant of layer information in quadtree scheme. It merges three-color components into one. Accordingly this method will reduce the matching blocks, which need to be saved and encoded by SFC (separated fractal coding) algorithm, into one and at one time the source data and layer information in quadtree scheme can sustain non-losses and high-proportion compression. Furthermore, by selecting different combinations, a series of coding methods that bear very close compression ratio and quality of decoded image are obtained. Moreover the coding speed of the luminosity method among them is faster than the other ones. Experimental results indicate that this approach excels SFC or standard JPEG and can be a good color image fractal compression algorithm.

Key words: color image fractal coding; quadtree structure

摘要: 在分析彩色图像色彩三分量 r, g, b 的相关性和分形二叉树编码层次信息冗余性的基础上,提出了一种分形彩色图像压缩编码方法.它将图像的3个独立的颜色分量按某种方式组合成1个来搜索匹配块,从而将需要存储和搜索的3个颜色分量匹配块(SFC方法)减少为1个,并且对二叉树层次信息进行压缩.此外,采用不同的组合,得到了几个图像压缩比和解码质量相近的编码方法,其中使用亮度分量的方法比使用其他方法速度更快.实验结果表明,它优于SFC方法及标准JPEG方法,不失为一种好的分形彩色图像压缩方法.

关键词: 分形彩色图像编码;二叉树结构

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

自20世纪80年代Barnsley等人提出图像的分形压缩^[1]以来,分形图像编码作为一种新的具有高压缩比潜在能力的图像编码方法,受到了广泛的关注.但是,其研究主要还是集中在灰度图像方面,对真彩色图像压缩算

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60202002 (国家自然科学基金)

第一作者简介: 焦华龙(1976—),男,安徽无为为人,硕士,主要研究领域为图像编码,图像检索,计算机图形学.

法的研究则相对较少^[2].与黑白图像相比,彩色图像的色彩部分是其特有的,并且与人眼的视觉特性关系非常紧密,因而对彩色图像的处理也应有独特的方法.显然,编码真彩色图像的一个最直接的方法就是将真彩色图像看成是3个独立的灰度图像进行单独编码的SFC(separated fractal coding)方法^[3].这种方法由于没有考虑彩色图像3个颜色分量之间的相关性,因而压缩比较低而且很费时.本文首先在分析灰度图像分形二叉树压缩编码^[2]方法中树结构层次信息的冗余性的基础上,提出了改进这种存储方式的压缩算法,并且给出了树结构层次信息的压缩比计算公式;之后,我们对由一幅真彩色图像分别抽出的三色分量所组成的灰度图进行统计比较,发现它们有很大的相似性,在此基础上,我们提出了将三色分量组合成一个特征量来搜索匹配块的分形彩色图像压缩方法.由于此方法需要存储和搜索的匹配块信息相当于与它同等大的灰度图像,因而编码所需要的计算量和所能达到的压缩比要比SFC方法有较为明显的提高,在恢复图像质量相近,且没有做Huffman编码或算术编码等无损压缩的情况下,压缩比也超过了标准JPEG方法.

1 二叉树层次信息的冗余性及其压缩存储

在分形压缩的二叉树方法当中,每一个 R 块需要记录以下6个参数:(1)找到的最佳匹配子块 D 的位置 (d_x, d_y) (子块左上角坐标);(2)对称和旋转变换的序号 n ;(3)灰度仿射变换系数 α 和 β ;(4)子块 R 的层次信息 l (一般是 32×32 到 4×4 四层,用2bit存储).以这6个参数作为 R 的码本,就可以从任意图像经过迭代恢复到原图像.

二叉树剖分是最常见的一种方案,基于初始的正方形剖分,一般要求 R 块大小为 $2^i \times 2^i$,剖分后得到4个 $2^{i-1} \times 2^{i-1}$ 的子块.由于这种方案比较简单,在计算量要求较高的分形编码中比较通用.事实上,在 R 块的6个参数当中的层次信息 l 有很多的冗余.以剖分从 32×32 到 4×4 四层为例,当有一个 R 块分到最小(4×4)时,紧跟它的3个块也一定是分到最小的块,这样,只需存储第1个 R 块层次信息即可,其他3块的层次信息属于冗余部分;在作了对最小块的层次信息的处理之后,同样地,次小块(8×8)的层次信息依然存在这种冗余,即当有一个 R 块分到次小时,紧跟它的3个存储的层次信息次小层或最小层信息(这里,一个最小层信息已经代表4个最小块,也相当于一个次小块),这样我们就可以用一个次小层信息加4个标志位(最小层用0,次小层用1)来表示;如此下去,直到最大块(32×32)为止.在解码阶段,用最后得到的块信息加上存储的所有标志位,就可以恢复整个二叉树.

在经过了上述无损的消除层次信息冗余的处理之后,对于原先用2bit表示的 R 块,最小块我们只用了约0.25bit,其他非最小块也只用了约1bit,起到了一定的压缩作用(从实验来看,对于 256×256 块,一般会压缩大约3倍).这里给出可以从压缩过程推导出来的层次信息压缩倍数的计算公式如下(剖分从 32×32 到 4×4):

$$C_R = \frac{128(n_1 + n_2 + n_3 + n_4)}{21n_1 + 84n_2 + 80n_3 + 64n_4}$$

其中 C_R 表示层次信息压缩倍数; n_i 表示图像分块中大小为 $2^{i+1} \times 2^{i+1}$ 的 R 块个数($i=1,2,3,4$).对于一般图像来说, n_1 较大,因而有较好的压缩效果.

推导过程如下:

(1) 没有压缩之前需要的空间为 $2(n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$ 个bit;

(2) 经过压缩后, 4×4 块占用标志信息空间为0个bit, 8×8 块占用标志信息空间为 $n_2 + n_1/4$ 个bit, 16×16 占用标志信息空间为 $n_3 + n_2/4 + n_1/16$ 个bit, 32×32 占用非标志信息空间为 $n_4 + n_3/4 + n_2/16 + n_1/64$ 个bit,总计为 $(21n_1 + 84n_2 + 80n_3 + 64n_4)/64$ 个bit;

(3) 将没有压缩之前所需空间除以压缩后所占空间,即可得到上述压缩倍数计算公式.

例如,对于如图1所示的二叉树剖分(设整个块大小是 32×32 的,块 4×4 到 32×32 在层次信息中分别用11,10,01,00表示),没有经过编码之前的表示为01 10 10 11 11 11 11 10 11 11 11 11 10 10 11 11 11 11 10 11 11 11 11 10 10,用了50个bit.经过一次处理之后变为01 10 10 11 10 11 10 10 11 10 10,经过两次处理后变为01 10 10 10及标志信息001010101010,再经过一次

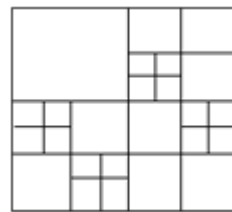


Fig.1 An example of quadtree partition structure
图1 二叉树剖分结构示例

编码后成为最终的 01 及标志信息 0 1 1 1 和 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 表示,由于最终的信息(非标志信息)只是 32×32 和 16×16 两种,故只要 1bit 表示即可(01 可用 1 来表示),也就是说,最后我们用了共 17bit,压缩倍数为 $50/17 \approx 3$. 解码时只需将编码过程反过来,就能恢复所有的层次信息.

2 编码方法

2.1 三色相关性

在将图像中每个像素的三色分量 r, g, b 各自单独抽取出来作为灰度图像在该点的灰度值的观察中,我们发现它们在结构上具有非常相似的地方,有差别的只是在不同的地方,其亮度有所不同(如图 2 所示).也就是说,当我们用分形方法进行图像编码时,如果有一个分量的 R 块和 D 块相似,那么另外两个分量的相同位置的 R 块和 D 块也非常相似,只是在亮度上有差别.



Fig.2 From left to right are gray images of picture Fruit composed by three-color components r, g, b respectively
图 2 从左到右分别是彩色水果图 Fruit 的 r, g, b 颜色分量组成的灰度图像

通过统计分析亮度 Y 及 r, g, b 颜色之间的相关性,我们得到了表 1 的结果.该表中的数据显示 r, g, b 之间确实存在着很大的相关性,证实了原先观察得出的结论,于是我们考虑利用这种相关性进行彩色图像编码.由于分形中有对像素的灰度进行匹配修正的仿射变换系数 α 和 β ,可以利用这个修正来弥补亮度的差别.在实验中发现下面的方法有不错的结果,即用 r, g, b 的线性组合得到的亮度 $Y(Y = 0.301r + 0.586g + 0.113b)$ 来搜索匹配 D 块,把该 D 块也分别作为 r, g, b 的匹配块,只是修改 3 个颜色分量中与亮度相关的信息 α 和 β ,这样就将 SFC 方法中的 3 色分量单独搜索、单独存储的过程简化为用一个 3 色分量的组合特征量来搜索和存储,这既缩减了匹配时间(变为原来的 1/3),又提高了压缩比(是原来的 2 倍多).从表 2 来看,当 Y 颜色分量的匹配误差小于给定的阈值时, r, g, b 颜色分量的匹配误差是可以接受的,实验得到的解码图像质量与 SFC 并没有太大的差别.这也说明了该方法的可行性.相关性系数的计算公式为

$$\rho_{xy} = \frac{E(xy) - E(x)E(y)}{\sqrt{D(x)}\sqrt{D(y)}}$$

其中 x, y 为两向量, $E(x), D(x)$ 分别为表示 x 的所有分量的平均值和方差.

Table 1 Percentages of correlation coefficient over 0.8 proportioned by every two-color components, which are obtained from 4×4 image segmentations of colorful picture Fruit

表 1 对彩色 Fruit 图像分割为 4×4 小块得到的各颜色分量两两之间相关性系数大于 0.8 所占百分数

	Y	r	g	b
Y	100	94.5	97.4	89.1
r	94.5	100	90.2	81.0
g	97.4	90.2	100	87.1
b	89.1	81.0	87.1	100

Table 2 Percentages of the corresponding matching errors against r, g, b which are obtained from searching the matching blocks (threshold is 5.0) by Y in picture Fruit

表 2 Fruit 图像用 Y 来搜索匹配块(阈值取为 5.0)所得 r, g, b 对应匹配误差所占百分数

Matching error	r	g	b
7.5	90.2	75.0	95.3
10.0	94.0	79.4	96.3

2.2 具体的编解码方法步骤

从图像三色相关性出发,我们形成了彩色图像的如下的编、解码方法.

方法 1.

(1) 对要编码的彩色图像 I 每一像素点的 r, g, b 进行组合(实验中取亮度分量 $Y=0.301r+0.586g+0.113b$),得到一幅灰度图 I' .

(2) 对灰度图 I' 进行传统的分形四叉树搜索,使 I' 中的每个 R 块找到相匹配的 D 块.

(3) 将编码彩色图像 I 的 r (红色)分量所组成的灰度图 I_r 中 R 块和 D 块匹配的位置对称旋转变换,树结构用 I' 中得到的来替代,只是将反映亮度的部分(即灰度仿射变换系数 α 和 β)用从 I_r 中计算得到的最佳匹配值重新计算进行修正; g, b 也作与 r 相同的处理.

$$\alpha = \frac{\sum_i (r_i - \bar{r})(d'_i - \bar{d}')}{\sum_i (d'_i - \bar{d}')^2}, \quad \beta = \bar{r} - \alpha \bar{d}'$$

其中 $R=(r_i)$ 是 I_r 中子块 R 像素灰度值组成的 n 维向量, $D'=(d'_i)$ 是 I_r 中 D 块经四邻域平均的与 R 等大的子块, \bar{r} 和 \bar{d}' 分别是 R 和 D' 的平均值.

(4) 对彩色图像 I 的每个 R 块,存储从 I' 得到的匹配 D 块位置,对称旋转变换及 r, g, b 分量的 6 个亮度修正值, R 块的四叉树层次信息用我们前面所提出的方法存储.

解码过程:先恢复 R 块的树结构,再分别对 r, g, b 分量用 IFS(迭代函数系)迭代得到 3 幅灰度图 I_r, I_g, I_b ,最后将它们合成为一幅彩色图.

此外,我们还对彩色图像求取 R 相匹配的 D 块尝试采用了其他方法.

方法 2. 将每一点的颜色值看作一个 3 维向量,定义两点 $P(r_p, g_p, b_p), Q(r_q, g_q, b_q)$ 的距离为

$$d(P, Q) = \sqrt{\omega_r (r_p - r_q)^2 + \omega_g (g_p - g_q)^2 + \omega_b (b_p - b_q)^2}$$

其中 $\omega_r, \omega_g, \omega_b$ 为每个分量的权重, $\omega_r > 0, \omega_g > 0, \omega_b > 0$ 且 $\omega_r + \omega_g + \omega_b = 1$ (在本文的实验中,取 $\omega_r = 0.1875, \omega_g = 0.675, \omega_b = 0.1875$). R 块与 D 块是否匹配,就看 R 与 D 每个对应点的距离的平方之和是否小于给定阈值,即下式是否满足.

$$\sum_i (d(r_i, d'_i))^2 < \Gamma$$

这里, $R=(r_i)$ 是子块 R 像素点组成的 n 维向量, $D'=(d'_i)$ 是 D 块经四邻域平均的与 R 等大的子块, Γ 是给定阈值.

方法 3. 与方法 1 相似,只是将颜色模型转换到 YUV 空间,再在 YUV 空间作彩色图像两点的距离定义,然后将对应点的距离的平方之和是否小于给定阈值作为 R 块和 D 块是否匹配的标准.

对于彩色图像质量衡量问题,由于颜色感知与人眼的视觉特征密切相关,对于不同的颜色以及颜色的不同变化方向,人眼的感知灵敏度是不一样的,因而颜色的度量是一个复杂的过程.这就使得彩色图像质量的评价比起灰度图像要困难得多.为了简单、客观起见,仍然采用 PSNR 作为彩色图像恢复质量的评价,但是我们将分别列出图像三色分量的 PSNR.

3 实验结果及分析

我们用本文的方法对随机抽取的 256×256 的 24 位真彩色图像进行了实验.在寻找块时,采用金字塔小波的加速算法^[4]来提高编码速度,在 PIII700 型微机上基本上能够在 2 秒之内完成对一幅图像的编码(在实验中,我们没有引入旋转对称变换,同时仿射变换 α 取为经验值 0.75).从实验的结果来看,本文提出的几种寻找匹配 D 块的方法所得到的解码图像质量和压缩比相近,仅就速度来看,方法 1 编码要好一些,大约是其他方法编码速度的 3 倍.与 SFC 相比(这里主要是指没有经过 Huffman 或算术等无损编码处理的 SFC 方法,因为我们的方法也没有经过这些处理),我们的方法在图像解码质量没有明显下降的情况下,编码速度及压缩比都有很大的提高.与标准 JPEG(编码时采用 JPEG 标准所提供的量化表,并使用经过优化的 Huffman 码表)相比,在图像解码质量相似甚至更高的情况下,该方法即使对系数没有进行其他无损编码,也有相对较高的压缩比.表 3 和图 3 分别给出了

各种方法比较的结果数据及解码图.其中图 3(a)是原始图像,图 3(b)是 JPEG 解码图像($C_R = 12.0$,PSNR 分别为 25.0(r),26.0(g),22.0(b)),图 3(c)是使用本文的方法 1 得到的解码图像($C_R = 14.2$,PSNR 分别为 24.9(r),25.3(g),21.4(b)).

Table 3 Compression ratio and PSNR of decoded image among several methods
表 3 各种方法图像压缩比及解码质量

Algorithms	Fruit		Dog	
	PSNR(db)	C_R	PSNR(db)	C_R
Method 1 in this paper	24.9(r)	14.2	25.4(r)	15.2
	25.3(g)			
	21.4(b)			
Method 2 in this paper	25.6(r)	13.1	25.3(r)	15.2
	25.3(g)			
	22.4(b)			
Method 3 in this paper	24.7(r)	13.6	24.4(r)	15.9
	25.1(g)			
	23.2(b)			
SFC	26.6(r)	8.1	25.0(b)	8.5
	25.5(g)			
	25.0(b)			
JPEG	25.0(r)	12.0	26.4(r)	12.5
	26.0(g)			
	22.0(b)			

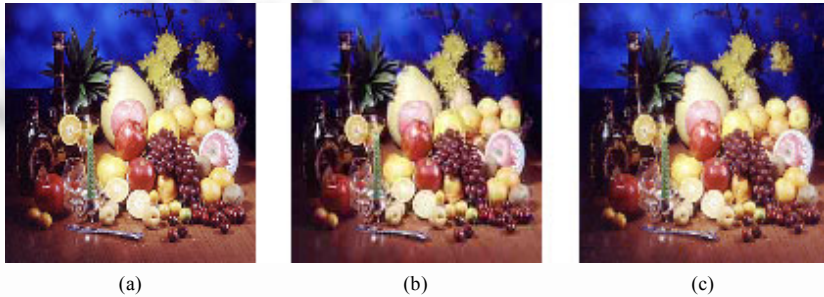


Fig.3 Comparison of the decoded images
图 3 解码图对比

References:

- [1] Jacquin AE. Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformations. IEEE Transactions on Image Processing, 1992,1(1):10~30.
- [2] Zhao HL, Liang Z, Somy NY. Fractal color image compression. In: Proceedings of the XIII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI 2000). 2000. 185~192. <http://www.computer.org/proceedings/sibgraphi/0878/08780185abs.htm>.
- [3] Moltedo L, Nappi M, Yitulano D, Vitulano S. Color image coding combining linear prediction and iterated function systems. Signal Processing, 1997,63(12):157~162.
- [4] Zhan D, Chen G, Jin YW. Fast fractal image encoding method based on pyramid wavelet transform. Acta Electronica Sinica, 1998,26(8):37~42 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [4] 张旦,陈刚,金以文.基于金字塔小波变换的快速分形图像编码.电子学报,1998,26(8):37~42.