

# 基于自适应分类的快速分形编码方法

刘明 叶正麟 陈作平

(西北工业大学理学院, 西安 710072)

**摘要** 编码时间过长是目前分形图像压缩存在的主要问题, 尽管对图像块进行分类是解决这一问题的一类重要方法, 然而诸多分类方法中仍普遍存在着编码速度与解码质量之间的矛盾。针对这一问题, 在给出衡量分类方法性能指标体系的基础上, 首先提出了一种自适应分类方法, 从而较好地解决了这一矛盾, 然后将该方法运用于质心分类上, 并结合满意匹配得到了一种快速的分形编码方法。实验表明, 与原来的均匀分类方法相比, 在取得相同压缩比的前提下, 该方法可进一步提高分形编码的速度和改善解码图像质量。

**关键词** 分形图像压缩 迭代函数系统 自适应分类

**中图分类号:** TN919.81 TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)01-0128-06

## A Fast Method for Fractal Coding Based on Adaptive Classification

LIU Ming, YE Zheng-lin, CHEN Zuo-ping

(School of Science of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** Long coding time is the main problem in fractal image compression at present, to which classification of image blocks is an important and efficient solution. However, there is an contradiction between coding speed and image quality in most classification methods. Aiming at the contradiction we first give out the guide lines of the performance for classification methods, hence propose a technique called "Adaptive Classification", which is then used in the classification by mass center combined with satisfied match, thus obtain a fast method for fractal coding. Experimental results indicate that at the same compression ratio, the proposed method improves the speed of fractal coding and the quality of decoded image, in contrast with the original uniform classification.

**Keywords** fractal image compression, iterated function system, adaptive classification

## 1 引言

分形图像压缩是近十几年发展起来的一种新的图像压缩方法。这种方法具有潜在的压缩比高、解码速度快和解码图像与分辨率无关等特点, 已成为了图像压缩领域的一个重要研究课题, 但它存在一个最主要问题, 即编码时间太长, 这主要是由于在编码中, 为找到每个值域块的最优匹配定义域块所需搜索量相当可观的缘故。由于编码时间长这一问题已成为了该方法走向高效能、实用化的最主要障碍,

因此如何加快分形编码的速度已成为了近些年来分形压缩的一个研究热点。在已有加速方法中, 将图像块进行分类是一类非常重要而有效的方法, 其基本思想是: 首先将所有定义域块按一定的分类准则(往往是图像块的一些纹理特征)分成若干类; 然后在编码时, 对每个待编码的值域块, 按照同一准则确定它所属的类, 而其最优匹配块只在同类或相邻类的定义域块中寻找。由于此时是局部搜索, 而非全局搜索, 从而减少了搜索量, 但由于其全局意义上的最优匹配定义域块可能无法找到, 故不可避免地会造成解码图像的质量有所下降, 当然, 这种下降的尺

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(10071060); 2004年西北工业大学毕业设计重点扶持项目(20041503)

**收稿日期:** 2004-12-06; **改回日期:** 2005-03-15

**第一作者简介:** 刘明(1981~), 男, 2004年获西北工业大学学士学位, 现为西北工业大学在读硕士研究生。主要研究领域为计算机图形学。E-mail: liuming1503@eyou.com

度与所选用的纹理特征有关,即如果所选用的纹理特征对值域块与定义域块间的相似性描述得越好,则所造成的解码图像质量损失也越小。

目前,已有不少学者根据图像块的不同纹理特征提出了不同分类方法,其中比较有代表性的方法是 Fisher 分类和 Hurtgen 分类,其中 Fisher 分类是将图像块(包括值域块和定义域块,下同)等分为左上、右上、左下和右下 4 个子块,并分别计算其灰度均值与均方差<sup>[1]</sup>,分类时,首先将图像块按其四分子块灰度均值的大小顺序(在 8 种反射-旋转变换下)分为 3 个主类,然后对每一个主类按灰度均方差的大小顺序分为 24 个副类,这样总共将图像块分成了 72 个类。Hurtgen 同样根据四分子块的灰度均值,为每一个图像块赋予一个特征向量  $C = (c_1, c_2, c_3, c_4)$ ,  $c_i$  对应于第  $i$  个子块<sup>[2]</sup>,当该子块的灰度均值大于图像块的总体均值时,则  $c_i$  取 1,否则取 0,这样按此特征向量就可将所有图像块分为 16 个类(实际上只可得到 15 个主类);进一步,对于每一个主类,同样可按其四分子块的灰度均方差大小顺序分为 24 个副类,这样即可将所有图像块划分为 360 个类。以上两种分类方法可看作是离散的分类,由于它们只能分为固定的类数,且类间连续性较差,即邻近类间的图像块纹理特征可能相差很大,其后果是:一旦某一值域块在其所属类中找不到满足匹配要求的定义域块,则无法将搜索扩大到其相邻的类中去继续搜索,因而其解码图像质量较差。解决上述问题的方法之一是使用连续而非离散的特征,并将与特征值对应的动态范围进行划分,以达到分类的目的,例如 Mario 以图像块的灰度质心到几何中心的连线与水平方向所成夹角为特征值(以下简称“质心”分类),首先将  $[0, 360]$  等分成(预先给定的)  $K_1$  个小区间,然后将特征值落在第  $i$  个小区间的图像块归为第  $i$  类<sup>[3]</sup>,进一步, Mario 又将原图像块方差化,然后由同样过程得到另一个特征值,并按此特征值将上面的每一类再分为  $K_2$  个副类,这样,就可将所有图像块分为  $K_1 K_2$  个类。在文献[4~6]中则采用了图像块的另一种连续的纹理特征——分形维数(称为“毯子”维数)来进行分类,其分类过程与质心分类相似,不过其动态范围变为了  $[2.0, 3.0]$ 。

理论上讲,用这些方法,每一值域块所需比较的定义域块的数目可减少到原来的  $1/n$ ,其中  $n$  等于分类的数目,这样它们最多可取得  $n$  倍的加速比,但实际上的加速比远小于这个值,其中最主要的原因

是各类图像块数目分布不均。据此,本文首先给出了“加速效率”和“准确率”的概念,它们分别用来衡量一种分类方法的加速效果和质量降低程度;然后在此基础上提出了一种自适应分类的方法,即先将图像块按某种连续特征进行分类,然后对那些含有较多块的类进一步划分为更小的类,如此递归地进行,直到每个类含有的图像块的数目小于给定的阈值或达到所需的类数为止。另外,为进一步加速编码过程,本文还用满意匹配来代替最优匹配,实验证明,这样所导致的图像质量降低很小。

## 2 分形图像压缩的基本模型

Jaquin 在迭代函数系统(iterated function system, IFS)的基础上,提出了局部迭代函数系统(partitioned iterated function system, PIFS)<sup>[7,8]</sup>,并据此第 1 个提出了全自动的基于分块的分形编码方法,它现已成为了分形图像压缩的基本模型,其基本过程如下:

对一幅待编码图像,先将其划分为互不重叠的等大小图像子块,称为值域块(range block),记为  $R$ ;然后将原图像划分为可以重叠的等大小的子块,其尺寸比值域块稍大(一般为 2 倍),称为定义域块(domain block),记为  $D$ 。所有这些定义域块就组成了定义域块库(domain pool)  $S_D$ ,它就构成了搜索空间。分形编码可描述为:对每一个值域块  $R$  求解如下的最优化问题

$$\min_{D \in S_D} \min_i d(R, f_{\tau_i} A(D)) \quad (1)$$

其中,  $A$  是某种抽样算子,其用于使  $D$  的尺寸缩小到与  $R$  相同;  $\tau_i, i = 1, 2, \dots, 8$  表示空间域上对图像进行的 8 种旋转-反射变换,即顺时针做  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  等 4 种旋转变换及沿水平中线、垂直中线、主对角线和副对角线等 4 种反射变换;  $f$  为灰度域上的仿射变换:  $f(D) = s \cdot D + o \cdot I$ ,其中  $I$  是与  $R$  同阶的全 1 矩阵,  $s$  称为对比度伸缩因子,其满足  $|s| < 1$ ,  $o$  称为亮度偏移因子;  $f_{\tau_i} A(D)$  表示先对  $D$  做抽样平均,然后进行 8 种旋转-反射变换,最后进行仿射变换。  $d(\cdot, \cdot)$  是某种距离函数,常取为如下的均方误差(mean-squared error, MSE)

$$d_{MSE} = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j} (r_{i,j} - s \hat{d}_{i,j} - o)^2 \quad (2)$$

其中,  $n$  是值域块的尺寸,  $R = (r_{i,j})_{n \times n}$  是值域块灰度矩阵,  $\hat{D} = (\hat{d}_{i,j})_{n \times n}$  是经过抽样和某种旋转-反射

变换之后的定义域块灰度矩阵。利用最小二乘法对式(2)进行求解,即可求得  $s$  和  $o$ 。式(2)也称为该值域块的拼贴误差或匹配误差。

对每一个值域块,它所对应的最优化问题式(1)的就解构成了这个值域块的编码参数,其中包括  $D$ (此时称其为该值域块的最优匹配块)的位置、 $\tau_i$  的代号和  $f$  的信息。这样所有值域块的编码参数就一起定义了一个 PIFS,然后对该 PIFS 的参数进行量化、熵编码并存储成文件,就完成了整幅图像的编码。

分形解码很简单,只要对上述得到的文件进行熵解码、逆量化先恢复出 PIFS,再用该 PIFS 对任意初始图像反复迭代即可。

求解式(1)的最原始方法是对  $S_D$  进行全局搜索。理论上讲,它能取得最好的解码质量,这是因为对每一个值域块,通过全局搜索虽能确保找到其最优匹配块,然而,这样的代价是巨大的:若定义域块  $D$  的个数为  $N_D$ ,则式(1)的时间复杂度为  $8 \times N_D$ 。由于  $N_D$  往往是非常庞大的,例如,在  $256 \times 256$  的 8 位灰度 Lena 图中,其所含的  $16 \times 16$  的定义域块数目最多可为  $241 \times 241 = 58\,081$ ,因此,对每一个  $8 \times 8$  子块,需要进行  $8 \times 58\,081 = 464\,648$  次式(2)的计算。如此巨大的搜索计算量是分形图像编码时间过长的根本原因,并已使编码速度成为了分形压缩在实际应用中的一个瓶颈。

### 3 基于自适应分类的快速分形编码方法

#### 3.1 分类方法的性能指标

为了评价各种分类方法的优劣,本文建立了一种衡量各种分类方法性能优劣的指标体系。分类方法的编码性能可从相对于全局搜索的质量降低程度和加速比两方面来衡量:前者描述了采用分类得到的最优匹配逼近全局搜索得到的最优匹配的程度,可用全局搜索得到的各值域块的平均拼贴误差与分类搜索得到的各值域块的平均拼贴误差之比来表示,可称之为该分类方法的“准确率”,根据拼贴定理,该比值愈大,解码图像质量相对于全局搜索的损失愈小;后者用于衡量该分类方法的加速效果,一方面,由于它与分类的数目有关,另一方面由于还与各类中所含图像块数目的不均匀程度有关,因此,一种合理的度量方法是引入如下的“加速效率”:

$$R = c \frac{K}{\sigma}$$

其中,  $K$  为分类数目,  $\sigma = \sum_{i=1}^K |n_i - \bar{n}|$  称为该分类方法的“不均匀度”,其中  $n_i (i = 1, 2, \dots, K)$  为各类的值域块数目,它满足  $\sum_{i=1}^K n_i = N, N$  为图像块总数,  $\bar{n}$  为各类值域块的平均数目,  $c$  为某个固定的常数,在实验中可取为 100。显然,在相同的  $K$  值下,  $\sigma$  值愈小,加速效果就愈明显。另外,需要注意的是,尤其准确率和加速效率和分类数目是相关的,一般来说,加速效率的提高或分类数目的增多往往是以牺牲准确率为代价的。

分类时,首先将上面提及的  $256 \times 256$  大小的 Lena 图像进行值域块为  $4 \times 4$  的均匀划分,然后取水平和垂直间隔均取为 4 时所构成的  $8 \times 8$  定义域块库(共 3 969 块),分别采用 Fisher、Hurtgen、质心及维数分类进行编码,其所得到的各项指标如表 1、表 2 和图 1 所示。由于此时所有值域块(除最右边一列和最左边一行外)都可看作是对应位置处定义域块的缩小版,因此其不均匀度分布和定义域块分布基本一样。

表 1 采用各种方法分类得到的性能指标(72 类)  
Tab. 1 Performance index gained by various methods(72 clusters)

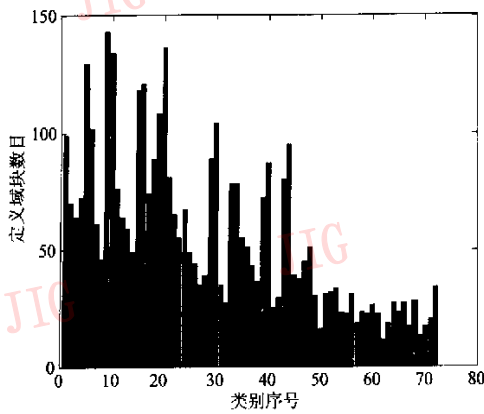
	Fisher 分类	维数分类(72 类)	质心分类(72 类)
准确率(%)	39.8	48.7	39.4
不均匀度	2 147.8	2 017	1 707.8
加速效率	3.35	3.57	4.22

表 2 采用各种方法分类得到的性能指标(360 类)  
Tab. 2 Performance index gained by various methods(360 clusters)

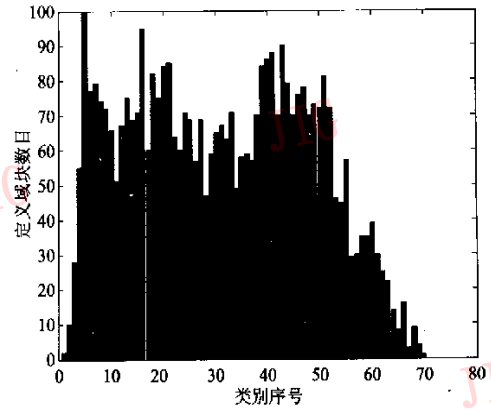
	Hurtgen 分类	维数分类(360 类)	质心分类(360 类)
准确率(%)	29.5	27.8	21.8
不均匀度	3 481.6	2 164.7	1 893.5
加速效率	10.34	16.63	19.01

#### 3.2 自适应分类

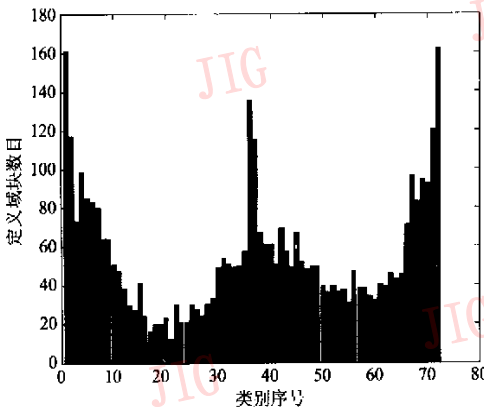
从 3.1 节的结果可看出,由于各种分类方法的不均匀度较大,这使得在给定分类数目的前提下,其加速效率不高,而解决这一问题的办法之一是将图



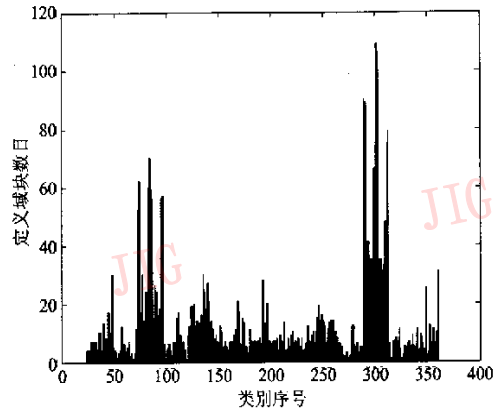
(a) Fisher 分类



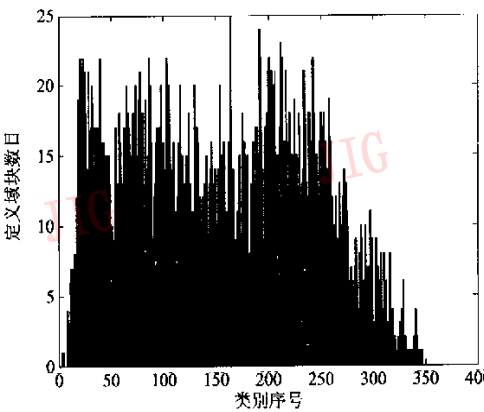
(b) 维数分类 (72)



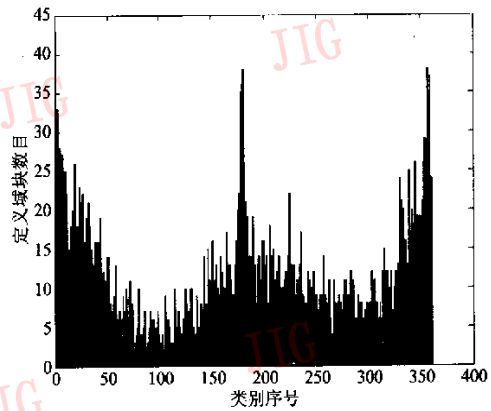
(c) 质心分类 (72)



(d) Hurtgen 分类



(e) 维数分类 (360)



(f) 质心分类 (360)

图 1 各种分类方法中各类所含图像块数目分布

Fig. 1 Distribution of image blocks number contained by various classification methods

像块划分为更多的类,其中对离散分类情形,由于只能得到固定数目的若干类,因此这一途径行不通;而对于连续分类,虽然可以改变分类的数目,但从表 1 和图 1 看到,当增加类数时,由于其不均匀度仍然较

高,再者,若划分的类太多,则势必影响准确率,从而影响解码图像质量,因此有没有一种既能降低不均匀度,又能保证较高准确率的分方法呢?答案是肯定的,事实上,对图像块进行如下的“自适应分

类”,就可以达到目的:

定义域块库的大小为  $N_D$ ,  $K_{max}$  为所要的最大分类数目,  $T$  为预先给定的均匀度阈值, 用于控制每个类中的图像块数目, 其满足  $K_{max} \cdot T \geq N_D$ 。用  $K$  记录当前的类别数目。初始时, 将用于分类的图像特征的动态范围  $[A, B]$  进行均匀划分, 设为  $K_0$  类, 其对应于将动态范围划分为  $K_0$  ( $K_0 \leq K_{max}$ ) 个小区间  $[a_i, a_{i+1}]$ ,  $i=0, \dots, K_0-1$ , 其中  $a_0=A, a_{K_0}=B$ , 令  $K=K_0$ 。接下来, 若  $K \leq K_{max}$ , 则将每一个块数超过阈值  $T$  的区间一分为二,  $K \leftarrow K+1$ , 如此递归地进行, 直到所有的区间所含图像块数目都小于等于  $T$  或当前类别数达到  $K_{max}$  为止。

由此可看到, 通过两个控制参数  $K_{max}$  和  $T$ , 就可实现对动态范围的非均匀划分, 同时也可见, 上述技巧对任一种连续分类都是适用的, 在后面的实验中就将它应用于质心分类中。

### 3.3 满意解代替最优解

为进一步加速编码过程, 可以用满意匹配来代替最优匹配, 即对每个子块, 在其对应的父块类中搜索其最优匹配块的过程中, 只要找到当前的匹配满足匹配要求 (即匹配误差小于某个给定的阈值, 当然该阈值应与子块的大小相适应) 即停止搜索。实验表明, 这种做法所引起的图像质量损失很小。

## 4 数值实验及结果分析

本文所有实验都使用标准的  $256 \times 256 \times 8$  的灰度测试图像 Lena, 实验硬件环境为 P4 2.6G/256RAM/VC++ .NET。评价指标有加速效率、准确率、平均比较次数、编码时间、解码图像质量 (峰值信噪比即 PSNR), 其中平均比较次数指的是每个值域块所比较的定义域块数目的平均值, 由于它只与所采用的分类方法有关, 而与硬件和软件均无关, 因此, 它比编码时间更能反映一种方法的加速效果。

为便于验证自适应分类的有效性, 本文使用相同的图像划分和相同的定义域块库以及相同的比特分配方案, 以保证所有的方法都有相同的压缩比。其中图像划分取为  $4 \times 4$  的均匀划分, 定义域块大小为  $8 \times 8$ , 相邻定义域块的水平和垂直间隔都取为 4, 在编码参数的比特量化中,  $s, o, \tau$  分别用 5、7、3bit 量化, 最优匹配块的位置用 12bit 量化, 这样在没有对编码结果作进一步熵编码的情况下, 压缩比为 4.74。

实验时, 首先用全局搜索法进行编码, 其编码时间为 131.84s, 平均比较次数为 3969, 解码图像峰值信噪比为 33.81dB; 然后将自适应分类技巧应用于质心分类中, 其采用的均匀度阈值  $T$  和对应的分类数目  $K$  如表 3 所示。

表 3 均匀度阈值与分类数目对应表  
Tab.3 Corresponding table of equality threshold and the number of classification

$T$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$K$	285	183	146	117	92	80	72	65	59	54	43

为了验证本文算法的效果, 还进行了对应类数的均匀分类和进行满意匹配的自适应分类实验, 其结果如图 2 所示。

由上面的实验结果可以看出:

(1) 相对于全局搜索方法, 本文方法质心分类极大地提高了分形编码的速度, 例如, 当均匀度阈值取为 120 时, 采用均匀分类, 其编码时间由原来的 131.84s 降低为 4.56s, 解码图像质量 (峰值信噪比) 只有  $33.81 - 32.32 = 1.49$ dB 的损失;

(2) 相对于均匀分类方法, 自适应分类在分类数目相同的情况下, 由于加速效率的提高, 使得编码时间、平均比较次数更少, 同时还可使准确率进一步提高, 进而使解码图像质量得到了改善, 例如, 同样对均匀度阈值取 120 时的情形, 自适应分类编码时间进一步减少到了 3.56s, 同时解码图像质量 (峰值信噪比) 提高了 0.07dB, 而当均匀度阈值取为 20 时, 相对于均匀分类, 自适应分类使编码时间减少了约 0.1s, 而解码图像峰值信噪比则提高了 0.27dB;

(3) 与最优匹配相比, 由于采用满意匹配能够在解码质量减少很小的基础上, 使平均比较次数显著减少, 从而可取得较大的加速比, 例如, 当均匀度阈值为 120 时, 相对于均匀分类和自适应分类, 基于满意匹配的自适应分类方法可将编码时间降低为 1.160s, 其分别是前两者的四分之一和二分之一, 而解码图像质量只有 0.68dB 和 0.71dB 的损失。

## 5 结论与展望

本文在对已有分类方法普遍存在的缺点进行有效分析的基础上, 提出了用于衡量某种具体分类方法编码性能的指标体系, 并据此对任意连续的图像

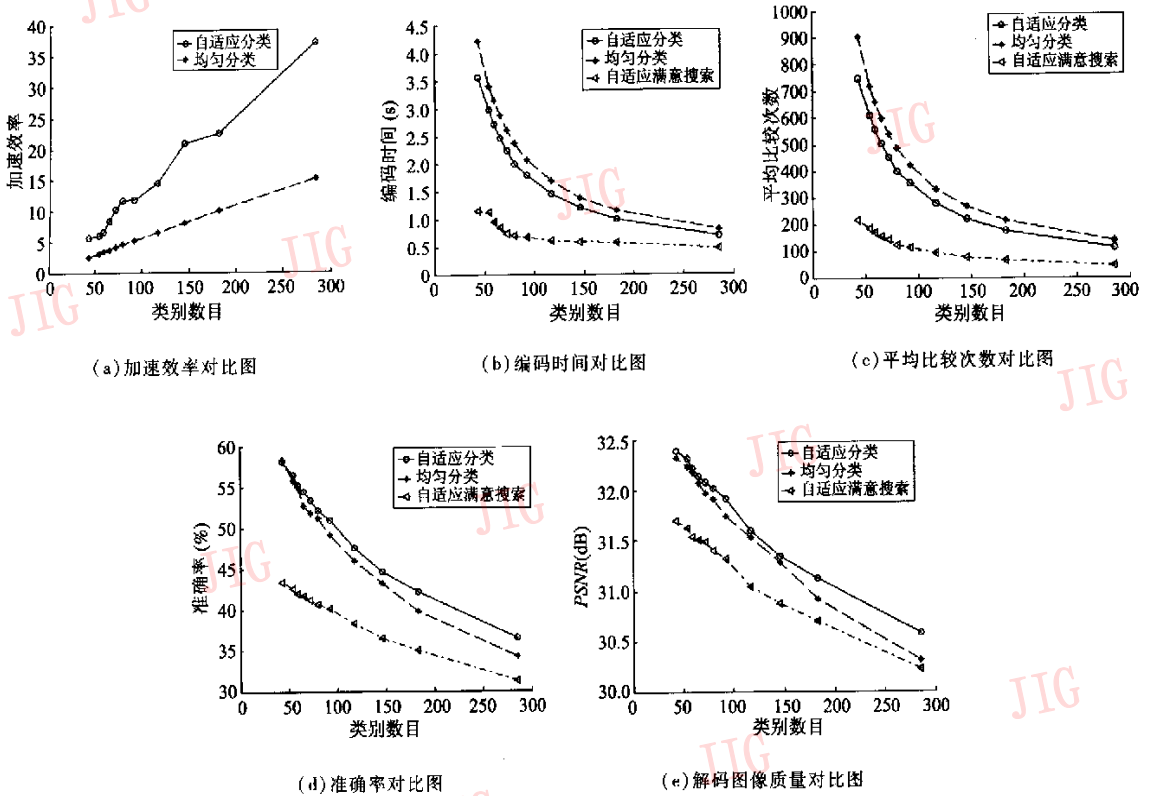


图 2 几种不同方法质心分类编码结果

Fig. 2 Coding result of mass center classification of several methods

特征提出了一种自适应分类技巧,同时结合满意搜索得到了一种快速的分形编码方法。实验证明,该编码方法相对于全局搜索方法,在相同压缩比和解码图像质量略有下降的基础上,能极大地提高编码速度;而相对于原来的连续特征的均匀分类编码,该方法也能进一步提高编码速度和改善解码图像质量。为了能在相同的压缩比下,对本文方法和原有方法的加速效果和解码图像质量进行比较,本文在进行图像编码时,还采用了均匀划分,这虽使得其压缩比不高,但是本文所提出的自适应分类方法可以应用到其他划分方式,如二叉树或矩形分割方法中去;另外,本文方法也可与其他的加速方法(如特征向量的方法)相结合,以进一步提高加速比。

参考文献 (References)

- 1 Fisher Y. Fractal image compression [J]. *Fractals*, 1994, 2(3): 57 ~ 59.
- 2 Hurtgen B, Stiler C. Fast hierarchical codebook search for fractal coding of still images [A]. In: *Proceedings of EOS/SPIE Visual Communications Picture Archiving and Communications System (PACS) Medical Applications '93* [C], Berlin, Germany 1993: 397 ~ 408.
- 3 Mario Polvere, Michele Nappi. Speed-up in fractal image coding: Comparison of methods [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(6): 1002 ~ 1009.
- 4 Conci Aura, Aquico Felipe R. Fractal image coding by multi-scale selection based on block complexity [J]. *Journal for Geometry and Graphics*, 1999, 3(1): 57 ~ 65.
- 5 ZHAO Yao, WANG Hong-xing, YUAN Bao-zong. A fast algorithm for attractor image coding [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2000, 22(2): 35 ~ 38. [赵耀, 王红星, 袁保宗. 一种吸引子图像编码的快速算法 [J]. *铁道学报*, 2000, 22(2): 35 ~ 38.]
- 6 LI Jie, FU Pin, LIU Jin-guo. Fractal image compression coding based on classification and clustering [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*. 2002, 14(4): 348 ~ 350. [李杰, 付萍, 刘金国. 基于复合分类的快速分形图像压缩编码 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2002, 14(4): 348 ~ 350.]
- 7 Jaquin A E. A novel fractal block-coding technique for digital images [A]. In: *Proceedings of IEEE International Conference Acoustics, Speech and Signal Processing* [C], Albuquerque, NM, USA, 1990, 4: 2225 ~ 2228.
- 8 Jaquin A E. Image Coding based on a fractal theory of related contractive image transformations [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1992, 1(1): 18 ~ 30.