

文章编号:1001-9081(2010)02-0337-04

## 基于像素分布与三角形分割的快速分形图像压缩算法

朱志良,赵玉丽,于海

(东北大学 软件学院,沈阳 110004)

(susansimon986@163.com)

**摘要:**为解决传统分形图像压缩算法中编码速度慢的问题,提出了一种基于像素分布和等腰直角三角形分割的快速分形图像压缩方法。利用离散质点系质心的唯一性以及质心位置不变的特点,实现了定义域块与值域块的匹配。对原始图像采用等腰直角三角形的划分方式,减少了定义域块的数量和搜索匹配块的运算次数,提高了编码效率。实验结果表明,该方法在保证图像解码质量的前提下,编码速度是传统分形图像压缩编码方法的3倍。

**关键词:**数字媒体;分形压缩;像素分布;质心;三角形分割

**中图分类号:** TN919.81; TP391.41 **文献标志码:** A

## Efficient fractal image compression based on pixels distribution and triangular segmentation

ZHU Zhi-liang, ZHAO Yu-li, YU Hai

(Software College, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

**Abstract:** The baseline fractal image compression algorithm requires a great deal of time to complete the encoding process. In order to solve this problem, an efficient fractal image compression based on pixels distribution and triangular segmentation was proposed in this paper. Exploiting the characteristics of centroid uniqueness and centroid position invariance in discrete particulate system, the matching between range blocks and domain blocks was implemented. In addition, dividing original image into isosceles right triangles segmentation could reduce the number of domain blocks, and raise the efficiency of fractal coding. Experimental results show that the proposed algorithm can produce reconstructed images with good quality and require one third time of the baseline encoding algorithm.

**Key words:** digital media; fractal compression; pixels distribution; centroid; triangular segmentation

### 0 引言

近年来,随着科学技术的飞速发展,电子信息领域的数字化已经得到了广泛的应用和普及,数字媒体技术作为电子信息领域的核心技术也得到了迅猛的发展。尤其是数字图像

的表示、记录、处理、存储、传输、显示、管理等各个环节的软硬件技术已经成为数字媒体研究中不可缺少的重要环节。在信息存储和传输过程中,数字化后的图像数据量是非常庞大的。大数据量的图像信息会给存储器的存储容量、通信干线信道的带宽以及计算机处理速度带来极大的压力,给数字媒体技术的应用和发展带来了巨大的困难。随着计算机技术的发展,单纯靠增加存储容量,提高信道带宽以及计算机的处理速度等方法虽然可以在一定程度上缓解这些问题,但是并不是长久之计。因此,数据压缩是必不可少的。

1988年,Barnsley<sup>[1]</sup>提出了一种利用全局仿射变换实现分形压缩的思想。在此基础上,1992年,Jacquin利用图像的局部相似性,提出应用局部迭代函数系统实现图像压缩的思想<sup>[2]</sup>。它基于图像划块的方式,应用局部的仿射变换代替Barnsley提出的全局仿射变换。

分形图像压缩编码的基本思想,就是寻找图像中不同区域之间在不同尺度下的相似性<sup>[3]</sup>。因此,分形图像编码的第一步是图像分割。对于一个给定大小为 $N \times N$ 的灰度图像 $P$ ,

首先将它划分成 $(N/L)^2$ 个大小为 $L \times L$ 的不重叠值域块 $R_1, R_2, \dots, R_m$ ,然后将原图像 $P$ 重新划分成 $(N-2L+1)^2$ 个大小为 $2L \times 2L$ 重叠的定义域块 $D_1, D_2, \dots, D_n$ 。编码的过程则是通过匹配运算为每个值域块寻找与它最佳匹配(即最相似)的定义域块,用得到的 $m$ 组描述值域块与定义域块映射关系的变量代表整个图像,即可以达到图像压缩的目的。

分形图像压缩编码与其他图像压缩编码方式相比,在保证高压比的同时只需要损失很小的图像解码质量,有巨大的应用前景。然而,分形压缩编码必须做多次相似性搜索以寻找与值域块最佳匹配的定义域块,与其他编码方式相比,分形压缩编码需要更多的编码时间,这点限制了这一方法的大量应用。

为克服这一缺点,人们提出了很多改进的编码方案。主要集中在以下几个方面。

Fisher<sup>[3]</sup>根据分块的均值和方差将定义域分成三大主类,每个主类又分成24个副类,因此整个定义域能够被分成72个副类。在编码时,值域块只需在与其类别相同的定义域块中搜索最佳匹配。这样做可以缩小搜索范围,减少搜索时间降低计算复杂度,从而提高分形压缩编码的效率。

Fisher<sup>[4]</sup>提出了一种自适应的四叉树方法。该方法可以根据误差的大小相应地改变值域块和定义域块的尺寸,利用不同尺寸的值域块和定义域块之间的相似性合理地选取仿射

收稿日期:2009-08-30;修回日期:2009-10-02。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872040);辽宁省自然科学基金资助项目(20082037);辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目。

作者简介:朱志良(1962-),男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,主要研究方向:复杂系统与网络、通信安全技术、数字信号与数字图像处理;赵玉丽(1985-),女,内蒙古赤峰人,博士研究生,主要研究方向:混沌、通信与信息系统;于海(1971-),男,辽宁沈阳人,博士,主要研究方向:混沌分形、混沌同步。

变换,提高了匹配效率。

在文献[5-7]中,提出了一种与传统图像分块方式不同的伪螺旋方式,将图像定义域块和值域块进行正六边形的分割,从而达到提高匹配速度、改善分形压缩图像质量的目的。此外,在不同的值域块和定义域块之间采用矩形的分割<sup>[4]</sup>、菱形的分割<sup>[8]</sup>、三角形的分割<sup>[9]</sup>等方法也被相继提出。虽然这些分割方法会增加计算的复杂度,但可以在一定程度上提高图像解码质量。

另外,近年来随着小波理论的发展,出现了众多将分形、小波和离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)结合的图像压缩方法<sup>[10-12]</sup>。这些方法利用了小波方法和DCT系数变换方法在图像压缩方面的优势,在保证图像解码质量的前提下,提高了编码效率。

尽管上述方法在加快编码速度和提高解码质量方面分别做出了改进,但是,无法在加快编码速度的同时提高解码质量或者在提高解码质量的同时兼顾编码速度。当前分形压缩编码的研究重点是如何在加快分形编码速度的前提下,提高图像的解码质量。

为此,本文将一种全新的图像分割和匹配方法引入到分形图像压缩编码中,以等腰直角三角形作为划分定义域块和值域块的基础,将离散质点系的物理学原理应用于搜索定义域块与值域块的最优匹配。这种方法与其他传统的分形图像压缩方法相比能够在保证分形图像解码质量的基础上,有效地缩短分形压缩编码的时间。

## 1 基于像素质量分布的分割与分形图像压缩

### 1.1 质点与质心的物理意义

质点是一个物理抽象<sup>[14]</sup>。物理学中,包含两个或两个以上质点的系统构成了一个质点系。质点系质量分布的平均位置被称为质心。对于同一个刚体或者相对位置不变的离散质点系,选择的坐标系不同,质心的坐标值不同,但是质心相对于刚体或者离散质点系的位置是确定不变的。

在如图1所示的直角坐标系中,由 $n$ 个质点组成的质点系,其质心位置可由式(1)确定<sup>[15]</sup>:

$$r_c = \frac{m_1 r_1 + m_2 r_2 + \cdots + m_i r_i + \cdots}{m_1 + m_2 + \cdots + m_i + \cdots} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i r_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1)$$

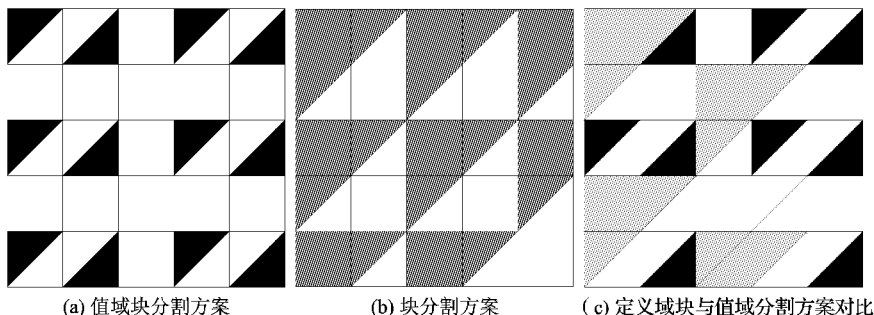


图2 基于三角形的图像值域块与定义域块分割方案

在图2(b)和(c)中,定义域块可以有重叠且不必覆盖整幅图像。它们可以在图像中以给定的水平步长和垂直步长从左到右、自上而下滑动一个 $2L \times 2L$ 窗口来生成。若设步长为 $\delta$ ,显然,相邻两块之间在水平方向(或垂直方向)上有 $(2L - \delta)$ 个像素是重叠的。

以上述分割为基础,三角形值域块与定义域块的匹配过程也需要经过收缩变换、等距变换和亮度偏移。

收缩变换是将定义域块经过欠采样<sup>[13]</sup>或者取平均值法

式中 $m_i$ 为第 $i$ 个质点的质量, $\sum_{i=1}^n m_i$ 为质点系内各质点的质点总和,即 $\sum_{i=1}^n m_i = m'$ , $r_c$ 为质点对原点的位置矢量。

在牛顿力学中,每个质点的质量是固定不变的。因此,一个质点系统的质量中心即质心的位置只决定于各个质点的空间分布。如果将图像看作由离散的像素点构成的质点系,每个像素点看作一个质点,像素点的灰阶值看作质点的质量,那么每个图像应该有自己唯一的质心<sup>[16]</sup>。同理,若将图像划分为 $(N/L)^2$ 个大小为 $L \times L$ 的不重叠值域块 $R_1, R_2, \dots, R_m$ ,则每个值域块都对应于不同的质心,且这个质心只与每个值域块中的像素分布相关。为此,可以将离散质点系质心位置的唯一性应用于分形图像压缩编码中,用以在不同的图像划分中找到与值域块最优匹配的定义域块。

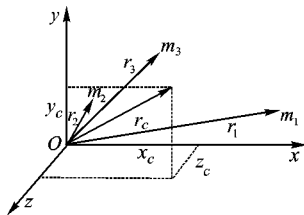


图1 离散质点系的质心

### 1.2 基于三角形的分形图像压缩方法

在传统的分形编码过程中,分形码是由分割信息与量化变换参数组成的。不同的分割方案占有的信息量是不同的,因此从压缩的观点来看,分割方案占有的信息量越少越好。但是,如果一个不规则分割带来了好的主客观编码质量,花费一些编码成本是值得的。因此,分割是影响分形图像编码性能的重要因素之一。

考虑到压缩比和编码质量之间的平衡,本文提出一种等腰直角三角形的图像分割方法用于分形图像压缩编码。如图2所示,在图像中将值域块和定义域块划分成等腰直角三角形,而不是传统的矩形。与矩形分割法相比,三角形分割法具有更大的灵活性,且这种分割有利于斜向边缘的逼近,可以更好地利用图像中的相似关系。

设图像中每个相邻的水平 and 垂直像素点间的距离为1,值域块 $R_1, R_2, \dots, R_m$ 的边长为 $L$ ,定义域块 $D_1, D_2, \dots, D_n$ 的边长为 $2L$ ,则 $R_1, R_2, \dots, R_m$ 可以互不重叠且覆盖整幅图像(见图2(a))。

转化成与值域块大小相等的定义域块 $DS_1, DS_2, \dots, DS_n$ 以便进行匹配运算,本文采用了取平均值的方法。

在等距变换中,与传统正方形所需要的8种等距变换不同的是,对等腰直角三角形的变换只需要2种:一种是其本身,另外一种沿着其直角顶点的中垂线映射。这样,大大减少了匹配运算的计算量和分形码本的数量,提高了匹配速度。

在编码过程中,应用上述的质心唯一性原理为每个值域块寻找最佳匹配的定义域块。若第 $l$ 个值域块 $R_l$ 的质心与收

缩变换、等距变换和亮度变换后的定义域块集合  $\{DC_n\}$  中某一块的质心相距越近,则说明两个匹配块的质心周围像素分布的一致性越大,那么该定义域块与  $R_i$  块的匹配程度越好。

假设边长为  $n$  的  $R$  块中各点像素值为  $a_{ij} (i \leq j, j = 1, 2, \dots, n)$ , 边长为  $2n$  的  $D$  块经收缩变换、等距变换等运算后生成边长为  $n$  的  $DC$  块,  $DC$  块各点像素值为  $b_{ij} (i \leq j, j = 1, 2, \dots, n)$ , 分别以  $a_{n1}$  和  $b_{n1}$  为原点建立直角坐标系 (如图3所示), 则  $R$  块与  $DS$  块质心间距离的平方为:

$$dis^2 = |DC_x - R_x|^2 + |DC_y - R_y|^2 =$$

$$\left| \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i [(sb_{ij} + h)r_{ijx}]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i (sb_{ij} + h)} - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i (a_{ij}r_{ijx})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i a_{ij}} \right|^2 +$$

$$\left| \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i [(sb_{ij} + h)r_{ijy}]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i (sb_{ij} + h)} - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i (a_{ij}r_{ijy})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i a_{ij}} \right|^2 \quad (2)$$

若使  $R$  块与  $D$  块达到最大限度的匹配,则需要满足  $R$  块的灰阶值之和与  $DC$  块灰阶值之和相等,即:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i (sb_{ij} + h) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i a_{ij} = 0 \quad (3)$$

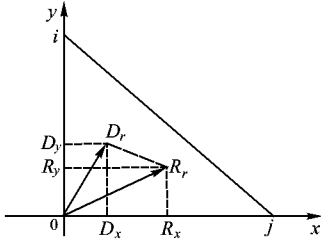


图3 基于质心思想的值域块与定义域块

为了找到与  $R$  块质心位置最接近的  $D$  块, 此处假设  $|DC_x - R_x| = 0$ , 于是得到齐次线性方程组。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i (sb_{ij} + h) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i a_{ij} = 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i [(sb_{ij} + h)r_{ijx}]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i (sb_{ij} + h)} - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i (a_{ij}r_{ijx})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i a_{ij}} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

根据齐次线性方程组(4)计算出压缩因子  $s$  的值和亮度偏移量  $h$ , 代入式(2)得到  $R$  块与  $DC$  块质心的垂直距离。对每个  $R$  块, 遍历所有的  $D$  块, 找到使垂直距离  $dis$  达到最小的  $D$  块, 记录  $D$  块的序号  $Index$ , 等距变换序号  $k$  以及相应的  $s$  值和  $h$  值, 分别对这四个值按照 16 bit、1 bit、5 bit、7 bit 量化, 得到  $R$  块的分形码, 完成分形压缩的编码过程。

解码过程与传统的分形图像压缩方法类似, 首先从文件中读得分形码; 然后以任意图像为初始图像, 根据编码过程中同样大小的值域块和定义域块对初始图像划分。对每个值域块找到与它匹配的定义域块, 对定义域块做收缩和等距变换, 设变换后的定义域块灰度值为  $b'_{ij} (i \leq j, j = 1, 2, \dots, n)$ , 根据  $s$  和  $h$  的值以及公式  $a_{ij} = s \times b'_{ij} + h$  得到解码后的  $R$  块。对解码过程进行多次迭代, 得到原图像的近似图像。

## 2 实验结果及分析

为验证上述方法的有效性, 我们在 Windows XP 操作平台上, 应用 Visual C 6.0 开发工具进行了试验测试。运行环境为 Pentium IV 3.06 GHz Processor, 512 MB RAM。原始图像选择 Lena 和 Plane, 分辨率为  $256 \times 256 \times 8$  bit。

图4和5分别为 Lena 和 Airplane 图像的原图以及不同迭代次数的解码图像。其中,  $R$  块的直角边边长为 2, (a) 图为原图, (b)、(c)、(d)、(e) 和 (f) 分别对应迭代 1 次、2 次、6 次、9 次和 10 次的解码图像。从图中可以看出, 随着迭代次数的增加, 解码图像的细节越来越清晰。最多经过 9 次迭代, 解码图像不再有明显的变化, PSNR 值趋于稳定, 得到与原始图像极其近似的图像。

分形压缩编码属于有损压缩。对有损压缩得到的解码图像质量评价可分为客观评价和主观评价。最常用的客观评价指标为峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)。

PSNR 值由下式定义<sup>[13,17-18]</sup>:

$$PSNR = 10 \log \frac{255^2}{N^{-2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{i,j} - \hat{x}_{i,j})^2} \quad (5)$$

其中:  $N$  是图像的大小,  $x_{i,j}$  和  $\hat{x}_{i,j}$  是原图像和重构图像在位置  $(i, j)$  处的像素值。

表1为 Jacquin 提出的基于正方形的分形图像压缩方法和本文提出的分形图像压缩方法经过 10 次迭代后的对比数据。

表1 Jacquin 的分形图像压缩方法与本文提出的压缩方法的对比

测试图像	方法名称	PSNR	编码时间/min	压缩比
Lena	Jacquin 的方法	33.20	48.08	4.128
	本文方法	32.24	17.93	1.938
Airplane	Jacquin 的方法	28.46	101.77	4.128
	本文方法	27.03	16.15	1.938

从表1可以看出, 与 Jacquin 的分形图像压缩方法相比, 本文提出的方法仅仅以 1dB 的图像质量为代价就能够减少 2/3 的编码时间, 在保证解码质量的前提下, 大大地提高了编码的速度。

假设图像有  $2^N \times 2^N$  个像素点, 应用正方形分割, 父块  $D$  有  $2^D \times 2^D$  个像素点, 每个子块  $R_i$  需要搜索的父块  $D_j$  数目为  $8 \times (2^N - 2^D + 1) \times (2^N - 2^D + 1)$ ; 应用三角形分割父块  $D$  的边长为  $D$ , 每个子块  $R_i$  需要搜索的父块  $D_j$  数目为  $2 \times (2^N - D + 1) \times (2^N - D + 1)$ 。本次实验过程中, Jacquin 方法的分块大小为  $4 \times 4$ , 即 16 个像素点, 本文提出方法的三角形分块边长为 2, 即 6 个像素点。因此, 虽然本文提出方法每个值域块的分形码占用空间较小, 但是针对整幅图像的分形码要比 Jacquin 方法的分形码占用更多的空间, 即本文提出方法的压缩比不及 Jacquin 方法的压缩比。考虑分形压缩的原理, 若将本文提出方法中的值域块的直角边边长增长到 4, 即 15 个像素点, 则可以得到近 4.2 的压缩比。这样, 解码后的图像质量将有所下降。若改进匹配算法, 则能够使图像的质量有一定的提高。

## 3 结语

本文提出了一种新的快速分形图像压缩编码方法。这种方法在保证解码后图像质量的前提下, 提高了分形图像压缩的编码效率。对于编码过程的改进包括两个方面:

1) 图像分割方面, 本文采用了基于等腰直角三角形的分割方法, 减少了定义域块与值域块相似性搜索的次数, 降低了计算的复杂度, 提高了编码的效率;

2) 搜索值域块与定义域块最优匹配的算法方面, 与以往根据最小平方误差搜索值域块与定义域块最优匹配的方法不同, 本文根据离散质点系质心位置具有唯一性的原理, 提出了基于质心位置的三角形匹配算法, 即将分割成三角形的图像块看成是一个离散质点系, 以图像的像素点为质点, 根据定义域块与值域块质心位置间的距离进行匹配, 提高了匹配的精度。

实验数据表明,本文提出的算法在解码质量和编码速度上有较大优势。但由于值域块较其他的分形压缩编码算法中的值域块小,造成在减少编码时间的同时,图像的压缩比有所降低。若提高值域块的覆盖范围同时改善值域块与定义域块的匹配方法,该方法的压缩比将有所提高。



图4 Lena 测试效果

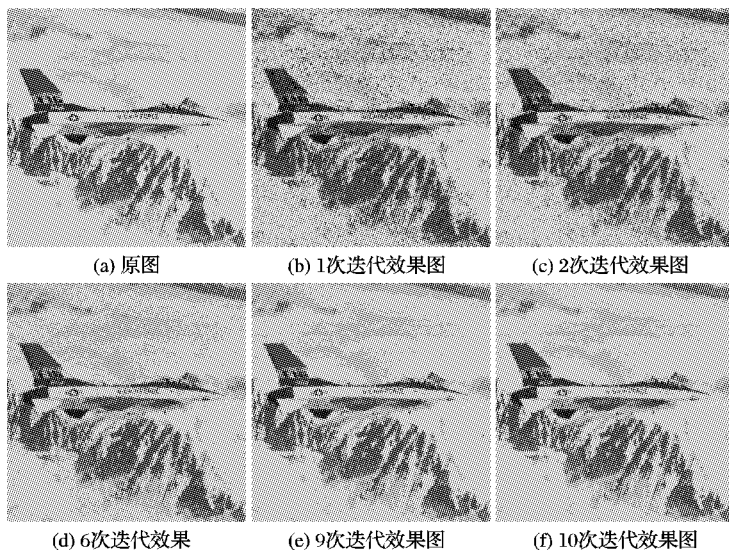


图5 Airplane 测试效果

#### 参考文献:

- [1] BARNESLEY M F. Fractal everywhere[M]. New York: Academic Press, 1988.
- [2] JACQUIN A E. Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 1(1): 18-30.
- [3] FISHER Y. Fractal image compression[J]. Fractals, 1994, 2(3): 321-329.
- [4] FISHER Y. Fractal image compression: Theory and application[M]. New York: Springer-Verlag, 1995.
- [5] WANG H, WANG M, HINTZ T, et al. Fractal image compression on a pseudo spiral architecture[C]// 2006 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. Darlinghurst: Australian Computer Society, 2006: 201-207.
- [6] THAKUR N V, KAKDE O G. Fractal color image compression on a pseudo spiral architecture[C]// IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. Bangkok: IEEE Computer Society, 2006: 228-233.
- [7] THAKUR N V, KAKDE O G. Color image compression on spiral architecture using optimized domain blocks in fractal coding[C]// ITNG'07: International Conference on Information Technology. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 234-242.
- [8] DAVOINE F, BERTIN E, CHASSERY J M. An adaptive partition for fractal image coding[J]. Fractals, 1997, 5(S1): 243-256.
- [9] DAVOINE F, ANTONINI M, CHASSERY J M, et al. Fractal image compression based on delaunay triangulation and vector quantization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(2): 338-346.
- [10] DAVIS G M. A wavelet-based analysis of fractal image compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(2): 141-154.
- [11] IANO Y, da SILVA F S, CRUZ A L M. A fast and efficient hybrid fractal-wavelet image coder[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(1): 98-105.
- [12] ZHOU Y, ZHANG C, ZHANG Z. An efficient fractal image coding algorithm using unified feature and DCT[J]. Chaos, Solitons and Fractal, 2009, 39(4): 1823-1830.
- [13] 陈守吉, 张立明. 分形与图像压缩[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1998.
- [14] PYTEL A, KIUSALAAS J. Engineering mechanics - Dynamics[M]. 2nd ed. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [15] THORNTON S T, MARION J B. Classical dynamics of particles and systems[M]. [S.l.]: Thomson Learning, 2005.
- [16] 雷蕾, 李言俊, 张科. 图像目标质心快速搜索算法[J]. 红外技术, 2007, 29(9): 548-551.
- [17] ZHOU Y, ZHANG C, ZHANG Z. Fast hybrid fractal image compression using an image feature and neural network[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 37(2): 623-631.
- [18] TSENG C C, HSIEH J G, JENG J H. Fractal image compression using visual-based particle swarm optimization[J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(8): 1154-1162.
- [19] YUAN W, LIN S X, ZHANG Y D. Optimum bit allocation and rate control for H. 264/AVC[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2006, 16(6): 705-715.
- [20] KIM W J, YI J W, KIM S D. A bit allocation method based on picture activity for still image coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(7): 974-977.
- [21] ZHOU YI-MIN, SUN YU, FENG ZHI-DAN, et al. New rate-complexity quantization modeling and efficient rate control for H. 264/AVC[C]// 2008 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 717-720.
- [22] ISO-IEC/JTC1/SC29/WG11/N0400 [S]. TestModel 5, 1993.
- [23] ITU-T/SG15 [S]. Video Codec TestModel Near-Team, TMN8. ITU Study Group 16, Video Coding Experts Groups Document Q15-A-59, Portland, USA, 1997.
- [24] CHANG T, ZHANG Y. A new rate control scheme using quadratic rate distortion model[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1997, CSVT-7(1): 287-311.
- [25] LI Z G, PAN F, LIM K P, et al. Adaptive basic unit layer rate control for JVT [S]. Pattaya: ISO/IEC and ITUT, 2003.

(上接第332页)

#### 参考文献:

- [1] ISO-IEC/JTC1/SC29/WG11/N0400 [S]. TestModel 5, 1993.
- [2] ITU-T/SG15 [S]. Video Codec TestModel Near-Team, TMN8. ITU Study Group 16, Video Coding Experts Groups Document Q15-A-59, Portland, USA, 1997.
- [3] CHANG T, ZHANG Y. A new rate control scheme using quadratic rate distortion model[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1997, CSVT-7(1): 287-311.
- [4] LI Z G, PAN F, LIM K P, et al. Adaptive basic unit layer rate control for JVT [S]. Pattaya: ISO/IEC and ITUT, 2003.
- [5] YUAN W, LIN S X, ZHANG Y D. Optimum bit allocation and rate control for H. 264/AVC[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2006, 16(6): 705-715.
- [6] KIM W J, YI J W, KIM S D. A bit allocation method based on picture activity for still image coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(7): 974-977.
- [7] ZHOU YI-MIN, SUN YU, FENG ZHI-DAN, et al. New rate-complexity quantization modeling and efficient rate control for H. 264/AVC[C]// 2008 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 717-720.