

文章编号: 1001-0920(2001)0S-0692-05

# 基于非线性模型的混合分形图像编码方法

王永军, 刘纪红, 熊飞文, 徐孝仙

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 提出一个非线性模型, 将典型分形块编码的 8 种对称变换推广到 64 种, 并通过定义特征值的方法对域块选择以及几何变换方式选择进行加速。基于区块邻域匹配的快速匹配策略, 对匹配效果不佳的区块进行块截取编码, 对平滑块采用均值和三级二叉树编码, 使得综合压缩性能良好, 编码速度有较大提高。

**关键词:** 非线性模型; 分形块编码; 块截取编码; 邻域

**中图分类号:** TP 75      **文献标识码:** A

## Hybrid Fractal Image Coding Method Based on Nonlinear Model

WANG Yong-jun, LIU Ji-hong, XIONG Fei-wen, XU Xiao-xian

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** A nonlinear model is presented to generalize 8 kinds of symmetric transformations of classical fractal coding. The selection process of domain block and transformation way is speeded up by means of defining eigenvalues to 64 kinds. By adopting a rapid matching strategy based on matching in neighborhood of range block, non-matching blocks are coded by truncation coding, and smooth blocks are coded by average coding. Three-level quadtree coding scheme is used. The compression performance of this method is good, especially in coding time.

**Key words:** nonlinear model; fractal block coding; block truncation coding; neighborhood

## 1 引言

分形图像压缩以其潜在的高压缩比特性倍受广大图像编码工作者的重视, 并做了大量研究工作。但这些研究主要集中于自适应算法和搜索策略上, 对线性变换模型改进的研究则很少。经典的 8 种线性变换对小区块 ( $4 \times 4$ ) 是有效的, 但对大区块压缩编码则很不理想。本文提出一种非线性变换模型, 并导出 64 种非线性模型; 通过定义特征值的方法对域块选择以及几何变换方式选择进行加速; 基于区块邻

域匹配的快速匹配策略, 对匹配效果不佳的区块进行块截取编码, 对平滑块采用均值和三级二叉树编码, 改善了综合压缩性能, 提高了编码速度。

## 2 分形块编码

分形块编码的理论基础<sup>[1,2]</sup>是不动点定理、拼贴定理以及迭代函数系统。对于编码过程, 最重要的是迭代函数系统, 即压缩映射族。

二维灰度图像, 常常可表示成一个三元组  $(x, y,$

收稿日期: 2001-04-05; 修回日期: 2001-09-28

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目 (972194)

作者简介: 王永军 (1946—), 男, 辽宁丹东人, 教授, 从事数字信号处理和图像处理等研究; 刘纪红 (1969—), 女, 辽宁沈阳人, 讲师, 硕士, 从事图像处理和计算机视觉等研究。

$z$ ), 其中  $z = f(x, y)$  表示在笛卡尔坐标系中图像点  $(x, y)$  处的灰度值为  $z$ 。给定区块  $R_i$  和域块  $D_i$ , 对于要搜索的压缩映射  $w$ , 可采用如下表达式

$$w \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ 0 & 0 & e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ t \end{bmatrix}$$

实际上, 它是两个变换的合成:  $w = g \circ m$ , 其中

$$g \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \end{bmatrix} = sA \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \end{bmatrix}$$

为几何变换, 矩阵  $A$  常取文献[3]所示的 8 种对称变换,  $s$  常取  $0.5$ ,  $m(z) = ez + t$  为灰度变换, 灰度变换是一个线性变换, 通常采用最小方差准则来确定参数  $e$  和  $t$ 。一般情况下参数  $e$  取小数且绝对值小于 1, 256 色灰度级图像参数  $t$  取值为  $0 \sim 255$ 。

本文对典型的分形块编码方法进行了以下改进:

- 1) 提出一个非线性模型的连续及离散形式, 并据此将矩阵  $A$  对应的 8 种变换推广到 64 种。
- 2) 对区块进行分类处理, 共分为 3 类: 平滑块、匹配块和非匹配块。对区块进行编码时, 首先计算其均值和方差, 如果方差小于给定域值, 则认为是平滑块, 进行均值编码, 否则进行匹配。
- 3) 区块与域块的匹配为多阶匹配。区块分为三阶, 最大一阶区块为  $16 \times 16$ , 二阶区块为  $8 \times 8$ , 三阶区块为  $4 \times 4$ 。域块也分为三阶, 大小为对应的区块的 2 倍。一、二阶区块匹配时采用 64 种变换, 而三阶区块仍采用 8 种变换。
- 4) 对非匹配块进行块截取编码。如果三阶匹配处理仍找不到一个域块与区块匹配成功, 则对其进行块截取编码<sup>[4]</sup>。
- 5) 采用基于邻域的快速匹配策略。

### 3 非线性变换模型

分形块变换是一个方块等容变换。如果直接将方块绕中心旋转一定角度, 将导致图像发生扭曲。本文的非线性变换模型先将方块映射到单位圆上, 再旋转一定角度, 然后由单位圆映射回方块。

#### 3.1 连续模型

设  $Z$  表示整数集,  $C$  表示复数集, 定义以下复数子集:

$$\text{负复平面集: } C_- = \{z \mid z \in C, \text{Im } z < 0\};$$

$$\text{单位圆集: } D = \{z \mid |z| = 1\};$$

$$\text{单位正方形集: } SQ = \{z \mid |z| \leq 1, 0 \leq \text{Re } z \leq 1, 0 \leq \text{Im } z \leq 1\};$$

$$\text{旋转 45}^\circ \text{正方形集: } DSQ = \{z \mid |z| \leq 1, |\text{Re } z| + |\text{Im } z| \leq \alpha, \alpha > 0\}, \text{ 其对角线长度的一半为 } \alpha$$

Weierstrass  $\mathbf{A}$  函数是一个从单位正方形映射到负复平面的一一正规映射, 其定义如下

$$\mathbf{A}: SQ \rightarrow C_-, \quad \mathbf{A}(z) = \frac{1}{\sum_{k,l} z^{2k-2li} - 2li} \quad (1)$$

记  $z_0 = \mathbf{A}(0.5 + 0.5i) = -1.718797i$ ,  $\bar{z}_0$  为  $z_0$  的共轭。而函数

$$\omega: D \rightarrow D, \quad \omega(z) = e^{-\frac{(3\pi/4)i(z - z_0)}{z - \bar{z}_0}} \quad (2)$$

是从负复平面到单位圆上的一一正规映射。这样, 函数  $\mathbf{A}$  和函数  $\omega$  的合成便是从正方形到单位圆的一一正规映射。该映射可定义为

$$\varphi: SQ \rightarrow D, \quad \varphi = \omega \circ \mathbf{A} \quad (3)$$

由于函数  $\varphi$  是正规映射, 故具有保角特性。

下面考虑该映射的逆映射  $\varphi^{-1}: D \rightarrow SQ$ , 它可以通过如下构造得到。定义

$$\tau: D \rightarrow C, \quad \tau(z) = \frac{z}{\sqrt{1 - z^4}} = z + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{4k+1} \frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} z^{4k+1} \quad (4)$$

其中“!!”表示双阶乘, 记  $c_1 = \tau(1) = 1.30561$ 。

定义函数  $\Psi: D \rightarrow SQ$  为

$$\Psi(z) = \frac{e^{(\pi/4)i}}{c_1 \sqrt{2}} \tau(e^{-(\pi/4)i} z) + 0.5 + 0.5i \quad (5)$$

同样, 这个函数也是一一正规映射, 函数  $\Psi$  就是要寻找的逆映射  $\varphi^{-1}: D \rightarrow SQ$ 。

设  $\theta \in [0, 360)$  为任意一个角度, 定义顺时针旋转的函数  $r_\theta$  为

$$r_\theta: D \rightarrow D, \quad r_\theta(z) = e^{-(\theta/180)i} z \quad (6)$$

定义绕实轴  $X$  翻转后顺时针旋转的函数  $\bar{r}_\theta$  为

$$\bar{r}_\theta: D \rightarrow D, \quad \bar{r}_\theta(z) = e^{-(\theta/180)i} \bar{z} \quad (7)$$

于是, 一个正方形旋转  $\theta$  角度的函数  $\text{sq}r_\theta$  可定义为

$$\text{sq}r_\theta: SQ \rightarrow SQ, \quad \text{sq}r_\theta = \Psi \circ r_\theta \circ \varphi \quad (8)$$

同样, 正方形绕实轴  $X$  翻转后旋转  $\theta$  角度的函数  $\overline{\text{sq}r}_\theta$  可定义为

$$\overline{\text{sq}r}_\theta: SQ \rightarrow SQ, \quad \overline{\text{sq}r}_\theta = \Psi \circ \bar{r}_\theta \circ \varphi \quad (9)$$

从而可以得到一组改进的正方形等容变换集  $I$ 。该变换集由所有的函数  $\text{sq}r_\theta$  和  $\overline{\text{sq}r}_\theta$  组成。即  $I =$



$\{\text{sqre}, \text{sqre} | \theta \in [0, 360)\}$ 。显然, 线性模型的 8 种等容正规变换均包含在变换集  $I$  中。

### 3.2 离散模型

在实现时直接使用变换集  $I$  中的旋转函数, 耗费的时间很长。作者曾经做过试验, 直接使用变换集中的旋转函数将一个  $32 \times 32$  的方块旋转一个角度, 耗费的时间以小时计。这主要是因为式 (1) 和 (4) 的计算量极其巨大。图 1 给出了原图像以及旋转后的图像。

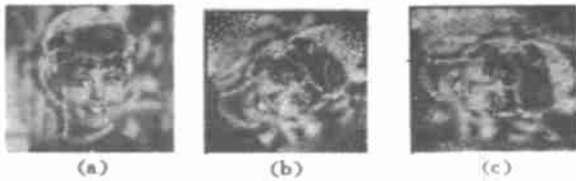


图 1 原图像及旋转后的图像

(a) 原图 (b) 旋转  $90^\circ$  (c) 旋转  $45^\circ$

假定要将一个  $m \times m$  的域块通过变换  $t \in I$  映射到一个  $n \times n$  ( $n < m$ ) 的区块上。变换  $t$  的离散等价物, 应该定义区块中每一个像素的灰度值。可以将域块的  $m^2$  个点根据变换  $t$  映射到另外  $m^2$  个点, 为区块中的每一个像素点在映射后得到的  $m^2$  个点寻找  $q$  个最近的邻居, 由这  $q$  个邻居对应的域块中的像素点的灰度值决定区块中该像素点的灰度值。这  $q$  个邻居对应的权重, 可根据它们到区块中该像素点的距离进行插值来产生。

该域块中像素点  $P$  的离散坐标为  $(x_p, y_p)$ ,  $0 \leq x_p, y_p \leq m - 1$ , 其灰度值为  $g_p$ , 对应的复坐标为  $z_p = x_p(m - 1) + (y_p / (m - 1))i$ , 对该像素点进行  $t$  变换后的复坐标为  $z_p' = t(z_p)$ 。

可以把  $(x_p, y_p, g_p, z_p')$  看成  $(x_p, y_p, g_p, z_p)$  经过变换  $t$  的结果。区块中任给一像素点  $R$ , 其离散坐标为  $(x_R, y_R)$ , 复坐标为  $z_R$ 。设  $P_1, P_2, \dots, P_q$  是  $m^2$  个域块像素点中经变换  $t$  后距区块中像素点  $R$  最近的  $q$  个邻居。定义

$$d_1 = |z_R - z_{p_1}'|, \dots, d_q = |z_R - z_{p_q}'| \quad (10)$$

分别为  $q$  个邻居经变换  $t$  后距区块中像素点  $R$  的距离。定义像素点  $R$  的灰度值  $g_R$  为

$$g_R = \begin{cases} g_{p_1}, & 1 \leq l \leq q, \quad d_l = 0 \\ \frac{\sum_{k=1}^q g_{p_k} d_k^{-2}}{\sum_{k=1}^q d_k^{-2}} = \sum_{k=1}^q g_{p_k} w_k \end{cases} \quad (11)$$

其中  $w_k = d_k^{-2} / \sum_{s=1}^q d_s^{-2}$  是域块中像素点  $P_k$  的权重。

于是, 可用如下映射列表来表示变换  $t$

$$(x_R, y_R, t, (x_{p_1}, y_{p_1}, g_{p_1}, w_1), \dots, (x_{p_q}, y_{p_q}, g_{p_q}, w_q))$$

该表也可能只包含一个邻居  $(x_{p_1}, y_{p_1}, g_{p_1}, w_1)$ , 如果  $d_1 = 0$ 。

有关映射列表的几个参数说明如下: 1)  $q$  一般选择最接近  $(m/n)^2$  的一个整数, 本文选定  $q = 4$ ; 2) 变换  $t$  的个数不是越多越好, 本文共使用 64 个变换,  $\text{sqre}$  和  $\overline{\text{sqre}}$  各有 32 个; 3) 本系统对一、二阶区块进行 64 种变换, 因而所有的变换共有 2 组。我们对所有变换都进行预编码, 编码结果存放在文件中, 系统运行时调入内存供编码和解码使用。这些变换也可称为变换知识。

## 4 编码加速机制

在典型的分形块编码中, 对 8 种线性变换依次进行尝试, 从中选取一个最佳变换。这种方法编码时间较长, 因此必须改进寻找最佳变换的方法。本文通过定义几个特征值的方法来筛选邻域中的域块以及变换方式, 最终达到加速编码的目的。

### 4.1 域块筛选

对每一个区块和域块都定义两个矩特征值  $M_1$  和  $M_2$ , 并根据  $M_1$  和  $M_2$  来剔除明显不可能与区块匹配的域块。为了消除区块和域块中的方向因素,  $M_1$  和  $M_2$  都定义在单位圆上。

设  $\bar{b}$  为一个正方形图像块, 它可以由函数  $b: SQ \rightarrow G$  完全定义, 其中  $G$  为灰度集。式 (3) 中的函数  $\Psi$  可以将这个方块映射成一个单位圆盘  $\bar{b}_D$ , 该单位圆盘可以由函数  $b_D: D \rightarrow G$  完全定义。对任意的  $z \in D$  都有  $b_D(z) = b(\Psi^{-1}(z)) = b(\Psi(z))$ 。

设  $z = x + yi$ , 那么图像块  $\bar{b}$  的均值和标准方差可以分别定义为

$$m(\bar{b}) = \frac{\int_D b_D(x, y) dx dy}{\int_D dx dy} \quad (12)$$

$$\text{dev}(\bar{b}) = \sqrt{\frac{\int_D (b_D(x, y) - m(\bar{b}))^2 dx dy}{\int_D dx dy}} \quad (13)$$

定义矩特征值  $M_1$  和  $M_2$  为

$$M_1(\bar{b}) = \frac{\int_D b_D(x, y) - m(\bar{b})}{\text{dev}(\bar{b})} (x^2 + y^2) dx dy \quad (14)$$

$$M_2(\bar{b}) = \frac{\int_D \frac{b\varphi(x,y) - m(\bar{b})}{\text{dev}(\bar{b})} (x^2 + y^2)^{(1/4)} dx dy}{\int_D dx dy} \quad (15)$$

从以上定义可以看出: 1) 矩特征值  $M_1$  强调边缘信息, 而矩特征值  $M_2$  则强调中心部分的信息。2) 矩特征值  $M_1$  和  $M_2$  在任何线性灰度变换以及单位圆到单位圆上的  $r_\theta$  和  $\bar{r}_\theta$  几何变换下都具有不变性。直接利用式(12) ~ (15) 计算  $M_1$  和  $M_2$ , 计算量很大, 根本不实用, 因而必须产生它们的离散等价物。基本思想是用有限项和来代替积分, 最终对式(12) ~ (15) 预编码。

设  $b_{xy}$  为  $n \times n$  图像块中像素点  $P_{xy}$  的灰度值,  $0 \leq x, y \leq n-1$ , 给定一个小正数  $\delta > 0$ , 定义集合  $N = \{z \mid z = k\delta + l\delta i, k, l \in \mathbb{Z}, |z| \leq 1\}$ ,  $S_N$  为集合  $N$  中的元素个数。又设  $P_{x_0 y_0}$  为图像块中像素点, 其变换到单位圆上的复坐标  $z_{x_0 y_0} = \mathcal{Q}x_0/(n-1) + (y_0/(n-1))i$ , 给定一个  $z \in N$ , 称  $z$  是  $P_{x_0 y_0}$  的一个邻居, 如果对所有的  $0 \leq x, y \leq n-1$ , 只有当  $x = x_0, y = y_0$  时  $|z - z_{x_0 y_0}|$  取最小值。记  $N_{xy} \subset N$  为像素点  $P_{xy}$  的邻居子集,  $S_{N_{xy}}$  为邻居子集  $N_{xy}$  中的元素个数。给图像块中像素点  $P_{xy}$  的邻居  $z$  都赋予一个灰度值, 这个灰度值就是  $P_{xy}$  的灰度值  $b_{xy}$ , 记作  $b\varphi(z) = b_{xy}$ 。将集合  $N$  中的所有元素都归属到某个像素点的邻居中, 就可以定义图像块  $\bar{b}$  的均值

$$m(\bar{b}) = \frac{1}{S_N} \sum_{z \in N} b\varphi(z) = \frac{1}{S_N} \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} S_{N_{xy}} b_{xy} = \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} h_{xy} b_{xy} \quad (16)$$

其中  $h_{xy} = S_{N_{xy}}/S_N$ 。显然, 对于  $n \times n$  大小的图像块而言, 只需保存这  $n^2$  个  $h_{xy}$  系数, 编码时便可以很容易地计算出同样大小的图像块的均值。同样, 可以对标准方差、矩特征值  $M_1$  和  $M_2$  离散化为

$$\text{dev}(\bar{b}) = \sqrt{\frac{\sum_{z \in N} (b\varphi(z) - m(\bar{b}))^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} (b_{xy} - m(\bar{b}))^2}{N}} = \sqrt{\sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} h_{xy} (b_{xy} - m(\bar{b}))^2} \quad (17)$$

$$M_1(\bar{b}) = \frac{1}{N} \sum_{z \in N} \frac{b\varphi(z) - m(\bar{b})}{\text{dev}(\bar{b})} |z|^2 = \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} h_{xy} \frac{b_{xy} - m(\bar{b})}{\text{dev}(\bar{b})} \quad (18)$$

$$M_2(\bar{b}) = \frac{1}{N} \sum_{z \in N} \frac{b\varphi(z) - m(\bar{b})}{\text{dev}(\bar{b})} |z|^{(1/4)} = \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} h_{xy} \frac{b_{xy} - m(\bar{b})}{\text{dev}(\bar{b})} \quad (19)$$

其中,  $h_{xy}' = \frac{1}{N} \sum_{z \in N_{xy}} |z|^2$ ,  $h_{xy}'' = \frac{1}{N} \sum_{z \in N_{xy}} |z|^{(1/2)}$ 。同样, 我们需保存系数  $h_{xy}'$  和  $h_{xy}''$ , 以便编码时能够很快完成特征值的计算。

有关参数  $\delta$  取值的选择很重要。如果  $\delta$  取值太大则计算精度不够, 影响域块的筛选; 如果  $\delta$  取值偏小, 则预编码的计算量会很大。本系统  $\delta$  取值为 0.005。

### 4.2 几何变换筛选

几何变换筛选的基本思想是, 为区块和域块定义一些特征值, 这些特征值必须紧随几何变换的变化。对任意方块  $\bar{b}$  和整数  $p, q$ , 定义方块  $\bar{b}$  的  $m_{pq}$  阶标准矩特征值为

$$m_{pq}(\bar{b}) = \frac{\int_D x^p y^q b\varphi(x,y) dx dy}{\int_D dx dy} \quad (20)$$

其离散等价物可利用 3.1 节方法得到。

现在来考察矢量  $(m_{10}, m_{01})$ , 该矢量给出的是方块  $\bar{b}$  的重心坐标, 但同时也给出了重心的方向。很容易看出, 重心矢量紧随着方块所使用的几何变换变化。线性灰度变换对重心矢量的大小没有影响, 如果线性灰度变换的比例因子是一个负数, 则重心矢量反向。线性灰度变换的比例因子的符号可以通过简单分类技术来预测。对域块和区块, 分别统计方块中像素灰度值大于平均值的个数  $H$  和小于平均值的个数  $L$ 。若  $H > L$ , 则归为“大部分像素大于平均值”类, 否则归为“大部分像素小于平均值”类。若域块和区块属于同一类, 则比例因子符号为正, 否则为负。这样便可以仅尝试两种变换, 一种是直接旋转域块来匹配区块的重心方向, 另一种是先沿  $X$  轴对称后再旋转域块来匹配区块的重心方向。

采用上述方法可从 64 种变换中筛选出 2 种变换进行尝试, 从而缩短编码时间。但矩特征值  $(m_{10}, m_{01})$  必须进行预编码, 否则不能缩短编码时间。

## 5 区块与域块的匹配

使用分形块编码方法进行图像压缩时, 计算量最大, 耗费时间最多的步骤是区块与域块的匹配过程。传统的分形块编码方法都有一个定义域块池, 每

次选取域块都从其中选取。定义域块池一般分布在整个图像上。这时定义域块池中域块的个数达到几千甚至上万个,因此不仅编码耗费时间长,而且编码所占用的比特数也多。

但是,我们注意到任何图像一般都具有近距自相似性,即域块与对应区块之间的中心距离越近,它们越相似。因此可以限定以区块为中心的一个较小区域内的域块为其对应的定义域块池。称这种对应每个区块都不相同的定义域块池为该区块的邻域。每个区块的邻域中共有 25 个域块,域块排列次序如图 2 所示,图中标号方块为域块的左上角方块的位置。本文算法就是按照这个次序由近及远地搜索匹配域块的。

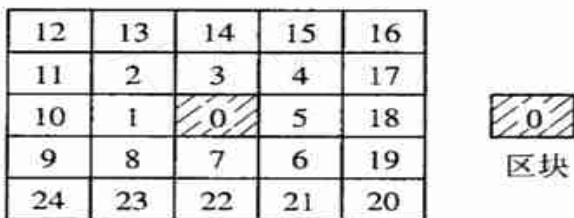


图 2 邻域中域块次序的定义

## 6 测试结果与分析

本文使用  $512 \times 512$  的标准测试图像Lenna(图

3)进行测试,图 4 给出了 3 幅不同质量的解码图像。本文使用的 3 项压缩指标为压缩率  $C_r$ , 峰值信噪比 PSNR 和编码时间  $T_c$ 。



图 3 测试图像Lenna 原图

本文算法与其它文献算法的对比结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,在图像压缩率以及解码图像质量相当的情况下,本文算法的编码时间比其它算法缩短了很多。

表 1 各种不同算法压缩性能的比较

算 法	压缩比	峰值信噪比/dB	编码时间/s
本文算法	10 20	30 46	90
Jacquin 算法 <sup>[5]</sup>	13 3	31.4	4 623
JPEG 算法 <sup>[6]</sup>	12 76	29.58	
文献[3] 算法	16 74	30 89	2 485
文献[5] 算法	13 34	31.38	1 883
文献[7] 算法	7.50	29.80	
文献[8] 算法	12 60	28 67	608
文献[9] 算法	9.64	30 48	900



图 4 测试图像Lenna 的三幅解码图像

(a)  $C_r = 7.50$ , PSNR = 31.30 dB,  $T_c = 125$  s (b)  $C_r = 10.20$ , PSNR = 30.46 dB,  $T_c = 90$  s (c)  $C_r = 12.30$ , PSNR = 29.67 dB,  $T_c = 90$  s

### 参考文献:

- [1] 高勇,徐宗本.分形图像压缩技术的数学基础[J].数学进展,1996,25(5):400-413
- [2] 曾文曲,刘世耀.分形几何——数学基础及其应用[M].沈阳:东北大学出版社,1991.
- [3] 房育栋,余英林.基于分形的混合图像压缩方法[J].信号处理,1996,12(3):201-208
- [4] 胡栋,朱秀昌.图像通信技术及应用[M].南京:东南大学出版社,1996
- [5] 皮明红,彭嘉雄.加速分形块编码[J].武汉:华中理工

大学学报,1997,25(7):13-14

- [6] 秦烽,吴征.分区IFS图像压缩编码[J].通信学报,1997,18(5):1-7.
- [7] 沈兰荪.图象编码与异步传输[M].北京:人民邮电出版社,1998
- [8] 印鉴,魏思兵.一种新的分形图像压缩方法[J].计算机研究与发展,1999,36(4):451-454
- [9] 谭兆信,吴怡敏.一种频域的图像编码方法[J].中山大学学报,1998,37(1):31-35