

# 基于欧氏比的快速分形编码算法

张爱华,何雨虹,张 璟

(南京邮电大学 理学院,江苏 南京 210046)

**摘 要:**分形编解码的时间过长,主要是因为编码过程中的搜索码本块的最佳匹配块占据了大量时间。如果能用某种方式,尽量缩短搜索码本块最佳匹配块的时间,那么分形编解码的时间就能大大缩短。文中提出了一种基于欧氏比的分形编码算法并给出了可行性分析。该算法将全局搜索最佳匹配块的算法转变为相对意义下的邻域搜索最佳匹配块的算法,即只搜索与 R 块的欧氏比相差较近的码本块,从而大大减少了搜索最佳匹配块所占用的时间,进而缩短了分形编解码的时间。用 MATLAB 对文中算法进行代码仿真,仿真效果用主观上观察图像的清晰度、图像编解码前后的信噪比和编解码的时间来评价。实验结果表明:该算法在尽量保证图像质量的前提下,使得分形编解码的时间大大缩短。

**关键词:**分形;分形图像编码;矢量叉乘向量;欧氏比

**中图分类号:**TN919.81

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2016)02-0061-05

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2016.02.014

## A Fast Fractal Image Coding Algorithm Based on Euclidean Ratio

ZHANG Ai-hua, HE Yu-hong, ZHANG Jing

(College of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications,  
Nanjing 210046, China)

**Abstract:** Searching for the best matching block in coding processing occupies a lot of time, which is the main reason for the time of fractal encoding and decoding being too long. If one way is applied to shorten the time of searching the best matching block, the time of fractal encoding and decoding could be sharply decreased. A fractal image coding algorithm based on Euclidean ratio was proposed and the feasibility analysis was given. The algorithm transforms the global searching to the neighborhood searching, which means that only need to search the code block whose Euclidean ratio closes to R block', the time of searching for the best matching block could be greatly reduced, thus shortening the time of fractal encoding and decoding. Code simulation was conducted for this algorithm by MATLAB. The indicators include image clarity, PSNR before and after encoding and decoding, and the time for encoding and decoding. The experimental results show the algorithm have been improved in terms of encoding time on the premise of guaranteeing the image quality.

**Key words:** fractal; fractal image coding; vector cross product of vectors; Euclidean ratio

## 0 引 言

随着科学技术的发展,图像压缩引起了人们广泛的兴趣。同时,“分形”概念为复杂的自然景物的描述提供了一种有力的数学工具,之后,分形几何理论被应用在图像编码<sup>[1]</sup>,进而产生了比较新颖的图像编码方法—分形图像编码算法<sup>[2-4]</sup>。而分形图像编码的高压缩比、多分辨率以及较好的重构图像质量等特点,使得它的编码算法研究十分活跃。目前,分形图像编码研究还不是很成熟<sup>[5-6]</sup>,很多问题有待进一步探索。而这些研究的目的是为了改善以下几个方面:压缩比、编解码速度、重构图像质量。而固有的编码耗时

制了分形编码的发展。

近年来,许多专家和学者在分形图像编解码时间和重构图像质量等方面做了大量的研究<sup>[7-11]</sup>,也获得了一些成果,但是在保证一定图像质量的前提下缩短编解码时间仍然是研究的一个重要问题。而分形图像的编码中,从海量码本中搜索每个 R 块的最佳匹配码块占去了分形图像编码的大部分时间。目前在匹配方面,主要分为对图像子块进行分类和建立子块特征,前者将全局搜索转化为类内搜索来缩短编解码时间,后者是在子块特征的基础上将全局搜索转化为局部搜索来缩短编解码时间。而这种将全局搜索转化为局部搜

收稿日期:2015-03-30

修回日期:2015-09-04

网络出版时间:2016-01-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目(11471114,61372125);南京邮电大学攀登计划一项(NY210018)

作者简介:张爱华(1969-),女,教授,博士,研究方向为非线性分析及其应用。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160126.1521.072.html>

索(类内搜索)其实有时并不能准确地、全面地反映子块与父块间的适配程度,但是文中算法研究发现,在一定的误差范围内,局部搜索是可以代替全局搜索的。如果能按照这种方式将不太可能匹配的  $R$  块排除,那么编码时间将会大大减小。这是大多数快速分形图像编码算法的基本思想。

基于这种想法,文中定义了图像子块的一种新特征—欧氏比,将“MSE 意义上的最佳匹配”转化到“图像欧氏比特特征空间的领域搜索”,大大减少搜索空间,加快编码速度<sup>[12-13]</sup>。此外,分析并给出了该特征与匹配误差之间的关系,基于这一关系提出了一种快速分形图像编码算法。

## 1 基本分形方法简介

### 1.1 图像分割

假定待编码图像  $F$  是  $N \times N$  灰度图像,像素灰度值按照 8 比特量化(即把灰度值分为 256 级)。在应用中,  $N$  一般为 2 的方幂,例如 256, 512 等。采用固定方块分割的方法,把图像  $I$  分割成一系列大小固定的  $B \times B$  像素子块  $R_i$  (它们互不重叠且能够覆盖整幅图像),也就是说:

$$I = \bigcup_{i=1}^{N_r} R_i, R_i \cap R_j = \emptyset (i \neq j), i, j = 1, 2, \dots, N_r$$

在分形编码中,这种子块称为 Range 块(以下简称  $R$  块),应用中尺寸一般为  $4 \times 4, 8 \times 8, 16 \times 16$  等,文中取  $R$  块为  $8 \times 8$ 。在由  $R$  块组成的子块中,通常按行序逐块编码,即把  $R$  块排列成:

$$R_{11}, R_{12}, \dots, R_{21}, R_{22}, \dots, R_{n1}, R_{n2}, \dots (n = N/B)$$

此外,由原来的图像按照滑窗步长  $\sigma$  划分为相互重叠的大小为  $X \times X$  的子块  $D_i (i = 1, 2, \dots, N_d)$ 。这里  $N_d = (\frac{N-X}{\sigma} + 1)^2$  为  $D$  块的总个数,一般令  $X = 2B$ , 这时  $D$  块的面积是  $R$  块的 4 倍。

### 1.2 码本构成

对于每个  $D$  码块  $D_j (j = 1, 2, \dots, N_d)$ , 采用四邻域平均像素值或欠采样的方法(见图 1), 得到  $B \times B$  像素块  $\bar{D}_j$ , 用  $S$  表示这种变换(空域收缩算子), 即  $S(D_j) = \bar{D}_j$ 。例如按像素表达, 四邻域平均像值为:

$$\bar{d}_{k,l} = (d_{2k,2l} + d_{2k+1,2l} + d_{2k,2l+1} + d_{2k+1,2l+1}) / 4$$



(a) 像素值平均

(b) 欠采样

图1 收缩  $D$  块的构造

其中,  $d_{k,l}, \bar{d}_{k,l}$  分别是  $D_j$  和  $\bar{D}_j$  在像素点  $(k, l)$  的灰度值。

这种收缩子块的全体就构成“虚拟码本”, 记这个码本为  $\Omega$ , 即

$$\Omega = \{S(D_j) : j = 1, 2, \dots, N_d\}$$

以下为记号简单, 将仍用  $D$  表示码本  $\Omega$  中的子块, 再对  $D$  块设定一个标准差阈值, 进一步确定容许码本。此外, 为了提高编码的质量还需对  $\bar{D}$  进行八种等距变换  $t_k (k = 1, 2, \dots, 8)$ , 它们分别可按像素形式表达为<sup>[14]</sup>:

$$(1) \text{ 恒等变换: } (t_0 D)_{i,j} = D_{i,j};$$

$$(2) \text{ 关于铅垂中轴 } (j = B - 1/2) \text{ 对称的反射:}$$

$$(t_1 D)_{i,j} = D_{i,B-1-j};$$

$$(3) \text{ 关于水平中轴 } (i = B - 1/2) \text{ 对称的反射:}$$

$$(t_2 D)_{i,j} = D_{B-1-i,j};$$

$$(4) \text{ 关于主对角线 } (i = j) \text{ 对称的反射: } (t_3 D)_{i,j} =$$

$$D_{j,i};$$

$$(5) \text{ 关于次主对角线 } (i + j = B - 1) \text{ 对称的反射:}$$

$$(t_4 D)_{i,j} = D_{B-1-j,B-1-i};$$

$$(6) \text{ 关于 } D \text{ 块的中心逆时针旋转 } 90^\circ: (t_5 D)_{i,j} =$$

$$D_{j,B-1-i};$$

$$(7) \text{ 关于 } D \text{ 块的中心逆时针旋转 } 180^\circ: (t_6 D)_{i,j} =$$

$$D_{B-1-i,B-1-j};$$

$$(8) \text{ 关于 } D \text{ 块的中心逆时针旋转 } 270^\circ: (t_7 D)_{i,j} =$$

$$D_{B-1-i,j} \circ$$

对于上述  $\bar{D}$  进行八种变换后就可以拿来作为码本池  $\Omega$  了。

### 1.3 编码匹配阶段

编码时, 对每个  $R_i (i = 1, 2, \dots, N_r)$ , 在码本池  $\Omega$  中搜索  $D_j$ , 使得  $s \cdot D_j + o \cdot I$  与  $R_i$  充分相近, 这里的  $|s| < 1$ 。其中,  $s$  与  $o$  是实数,  $I$  是亮度为 1 的尺寸为  $B \times B$  的常数块。即, 求出满足使下列误差最小的  $D_j$  块。

$$E(R, D) =$$

$$\min_j \{ \min_{s, o \in R, |s| < 1} \| R_i - (s \cdot D_j + o \cdot I) \| \}$$

然后记下  $D$  块位置, 变换的类型以及  $s$  和  $o$  的值。

### 1.4 解码阶段

分形解码较为简单, 重构的图像是分形码描述的压缩变换  $T$  的近似的不动点图像, 可以按照分形码提供的分割信息对任何初始图像进行迭代来生成。不动点定理可保证迭代的收敛性, 而拼贴定理则可保证压缩变换  $T$  的不动点就是原图像的近似<sup>[15-16]</sup>。

## 2 算法理论依据

首先给出一个比较简单的结果: 给定  $R, D \in$

$\mathbb{R}^{n \times n}$ , 以及最小值的问题:

$$E(R, D) = \min_{s, o \in \mathbb{R}} \|R - sD - oI\|$$

显然,  $\|R - sD - oI\|^2$  是关于  $s$  和  $o$  的二次多项式, 分别对  $s$  和  $o$  求偏导, 并令导数值为零, 解关于  $s$  和  $o$  的一个线性方程组, 解其得:

$$s \equiv \frac{\langle R - \bar{R}I, D - \bar{D}I \rangle}{\|D - \bar{D}I\|^2}, o = \bar{R} - s\bar{D}$$

其中,  $\langle, \rangle$  表示欧氏内积;  $\bar{R}, \bar{D}$  分别表示  $R, D$  的灰度平均值。

在分形编码中, 每个  $R$  块是由它的最佳匹配块  $D \in \Omega$  的灰度变换来近似得到的, 即

$$R \approx s \cdot D + o \cdot I$$

下面定义了图像子块的一种新的特征, 给出该特征与匹配误差之间的关系。然后, 基于这种关系提出一种快速分形图像编码算法<sup>[17-19]</sup>。

将每一图像子块  $R$  与  $D$  均分为四个部分 (见图2), 求出各部分的灰度均值, 根据它们的空间位置, 令其对角线两元素之差组成矢量叉乘向量:

$$d = \begin{bmatrix} D_1 - D_4 \\ D_2 - D_3 \end{bmatrix}, r = \begin{bmatrix} R_1 - R_4 \\ R_2 - R_3 \end{bmatrix}$$

由上述方法分别求得子块  $R$  与父块  $D$  的子块矢量叉乘向量  $r, d$ 。

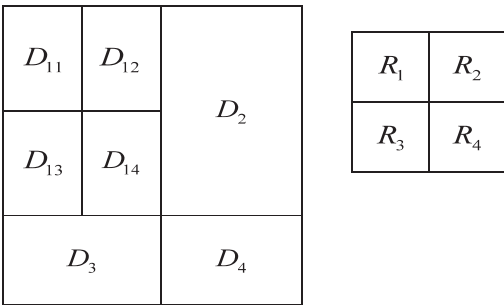


图2  $D$  块 (左) 和  $R$  块 (右)

定义: 设子块  $R = (r)$ , 记

$$C(R) = \frac{d(r, \bar{r})}{\|\bar{r}\|}$$

其中,  $d(r, \bar{r})$  是  $r, \bar{r}$  的欧氏距离,  $\bar{r}$  是对  $R$  块均分成的四个子块的四个矢量叉乘向量的平均向量。

特征  $C(R)$  是通过子块叉乘向量的欧氏距离定义的, 故把它称为欧氏距离比率特征, 简称为欧氏比。

下面给出特征  $C(R)$  的可行性分析。

$$R \approx s \cdot D + o \cdot I$$

$$R_{in} = s \cdot D_{jn} + o \cdot I (n = 1, 2, 3, 4)$$

$$r = s \cdot d$$

$$r_i = s \cdot d_i$$

$$\bar{r} = (r_1 + r_2 + r_3 + r_4)/4$$

$$\bar{d} = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4)/4$$

$$\bar{r} = s \cdot \bar{d}$$

显然有

$$\frac{d(r, \bar{r})}{\|\bar{r}\|} \approx \frac{d(s \cdot d, s \cdot \bar{d})}{\|s \cdot \bar{d}\|} = \frac{d(d, \bar{d})}{\|\bar{d}\|}$$

因此得

$$C(R) \approx C(D)$$

注: 为减少运算, 式中  $\bar{d}$  平均换成  $d_i$  同样可行。

### 3 算法分析与实现

#### 3.1 算法分析

如果码本  $D$  匹配子块  $R$ , 则有  $C(R) \approx C(D)$  成立。因此, 子块  $R$  的最佳匹配块  $D$  在欧氏比意义下一定是  $R$  的邻近。应该指出  $C(R) \approx C(D)$  是子块匹配的一个必要条件, 而非充分条件, 从而子块  $R$  在欧氏比意义下的最近邻码块  $D$  并不能保证是子块  $R$  在最小均方误差意义下的最佳匹配块。尽管如此, 上面的分析表明, 子块  $R$  的最佳匹配块在欧氏比下距离码本块  $D$  也不能太远。基于这个分析, 把码本  $\Omega$  中的  $D$  块按欧氏比的大小进行升序排列, 然后对其使用二分法搜索, 在码本  $\Omega$  中对在欧氏比意义下与输入子块  $R$  最接近的码本  $D$  的  $k$  邻域内再进行匹配搜索。而对于标准差较小的平滑区域的子块  $R$ , 无需再搜索其匹配块, 用其均值  $\bar{R}$  近似即可。另外, 解码图像质量依赖于对不满足约束的对比值因子  $s$  作截断处理的数目。显然这个数目越少, 解码图像质量越高。为此, 对  $s$  的表达式进行一些分析,  $s$  的表达式和柯西-施瓦茨不等式为:

$$s = \langle R - \bar{R} \cdot I, D - \bar{D} \cdot I \rangle / \|D - \bar{D} \cdot I\|^2$$

$$|s| \leq \frac{\|R - \bar{R}I\| \cdot \|D - \bar{D}I\|}{\|D - \bar{D}I\|^2} = \sigma_R / \sigma_D$$

由该式得, 对于给定子块  $R, D$  的标准差越大,  $s$  的绝对值越小,  $s$  满足  $|s| < 1$  的可能性越大, 需作截断处理的可能性越小, 从而提高了解码图像质量。为此设定阈值  $\eta > 0$ , 定义容许码本  $\Omega_\eta = \{D \in \Omega \mid \sigma_D \geq \eta\}$ , 将子块的匹配搜索限制在容许的码本中进行。

显然, 这种做法不仅提高了重构图像质量, 还能通过减少码块的数目来加快编码的速度。

为了降低邻域搜索较小时, 局部的搜索匹配子块代替全局的匹配块而引起图像质量下降这一缺点, 应注意以下几点<sup>[20]</sup>:

(1) 设定阈值  $t$ , 这一点可以保证在与  $R$  块欧氏比

相差最小的  $D_m$  块的  $t$  邻域内寻找最佳匹配的码块  $D$ 。

(2) 设定一个误差阈值  $H$ , 来保证这种误差不至太大, 从而使得解码图像质量得以保证。

首先要在预设  $N(D_m, t)$  (初始邻域) 内搜索局部的匹配块, 若最小误差小于误差的阈值  $H$ , 则局部匹配块就作为最佳匹配块。否则, 按照步长  $L$  来扩大邻域的搜索范围<sup>[21]</sup>, 继续进行搜索, 直到搜索邻域扩大为整个码本为止。本节算法也采用这种搜索方案。

3.2 算法的实现

基于 3.1 的分析, 算法的具体步骤如下:

Step1: 图像的分割与码本的构成。把图像分割成不重叠的  $B \times B$  块 ( $R$  块, 记为  $R$ ), 同时, 以纵横方向步长均为  $x$  像素生成尺寸为  $2B \times 2B$  的  $D$  块池。对于每个  $D$  块, 采用 4-邻域像素值平均得到  $B \times B$  块, 这样的子块集合构成码本  $\Omega$ 。

Step2: 参数的初始化。设定  $R$  子块的标准差阈值为  $y_1$ , 码块标准差阈值为  $\eta$ , 误差阈值为  $H$ , 初始邻域半径为  $t$ , 扩域步长为  $L$ 。

Step3: 定义容许码本与赋值。定义容许码本为  $\Omega_\eta = \{D \in \Omega | \sigma_D \geq \eta\}$ , 并按欧氏比  $C(D)$  大小进行升序排列。

Step4: 对于子块  $R$ :

(1) 若  $\sigma_R < y_1$ , 则可直接用  $\bar{R}$  替代  $R$ ;

(2) 若  $\sigma_R \geq y_1$ , 对于每个  $R$  子块, 计算出  $C(R)$ , 并用二分法在上述排好序的容许码本中搜索与  $C(R)$  相差的最小的  $D$  块, 并记为  $D_m$ 。

Step5: 搜索最佳的匹配块。

(1) 设定误差阈值为  $H$ 。

(2) 设置临时变量为  $t$ , 并初始化  $t = k$ 。

(3) 在  $D_m$  的  $t$  邻域内搜索最佳匹配块  $D$ , 若  $E(R, D) < E$  或  $N(D_m, t)$  为容许码本, 则取使  $E(R, D)$  取得最小值的  $D$  块为子块  $R$  的最佳匹配块。

(4) 否则, 令  $t = t + L$ , 转步骤(3)。

Step6: 记录  $R$  的最佳匹配块  $D$  的位置,  $s$  和  $o$  的值以及变换类型。

Step7: 对于其余子块  $R$ , 重复步骤 4~6。

4 实验仿真结果

在实验中<sup>[22]</sup>, 用 MATLAB7.0 作为实验平台, 选用  $512 * 512$  大小的 Lena 图像进行实验, 实验结果用峰值信噪比 (PSNR) 和编码的时间来表示。  $t$  为搜索邻域半径, 并取  $D$  块标准差阈值  $\eta$  为 1 225,  $R$  块标准差阈值  $y_1$  为 1, 实验结果见图 3~5 (图中  $t = 3$ )。

分形图像压缩改进主要集中在缩短编解码时间、提高解码图像质量这两个方面。而文中算法自定义一

种子块匹配特征, 旨在保证一定解码图像质量的前提下尽量缩短编解码时间。下面, 以相对梯度特征来作为最新颖的特征匹配算法的一个代表, 将文中算法的欧氏比  $C(R)$  换成相对梯度特征, 其他量基本不变来进行代码仿真, 并输出其编解码的时间以及信噪比。



图 3 原图



图 4 实验结果图



图 5 相对梯度特征算法实验结果图

表 1 给出了文中算法与基本分形算法以及相对梯度算法效果的比较。其中, 以  $t$  表示编解码的时间, 以信噪比表示重构图像质量。

表 1 文中算法与基本分形算法对比结果  
(测试图像: Lena)

迭代 次数	邻域 参数	文中算法		基本分形算法		相对梯度算法	
		PSNR /dB	Time /s	PSNR /dB	Time /s	PSNR /dB	Time /s
1	1	38.46	7.10			42.68	15.60
	3	36.54	27.99	23.64	342.45	38.36	64.21
	5	36.21	64.98			36.14	134.29
5	1	47.97	7.66			46.84	16.2
	3	51.19	29.30	55.87	355.07	50.84	57.32
	5	52.29	65.46			51.87	109.83
10	1	47.97	8.13			46.83	14.66
	3	51.19	29.89	56.04	365.98	50.85	60.86
	5	52.29	66.64			51.94	117.14

分析实验结果可得, 主观上, 基于欧氏比的快速分形编码算法的重构图像质量基本不变; 客观上, 主要从两个角度来看: 其一, 编解码时间。以此来衡量基于欧氏比特征的分形编解码的速度, 而文中算法的编解码时间和基本分形编码以及子块特征编码中比较新颖的相对梯度算法比较, 结果显示, 编解码时间缩短的更加明显; 其二, 重构图像的信噪比。以此来衡量重构图像



的质量,通过对比,文中算法的信噪比基本没变,从而在尽量保证一定信噪比的前提下,编解码时间可以大大减少。

## 5 结束语

由于基本分形编码时间过长,文中提出了一个基于欧氏比的改进方法来寻找最佳匹配块,以缩小码本块搜索的范围,提高编解码的速度。引进了参数  $t$ ,  $\eta$  和  $y_1$ ,在尽量保证图像质量不变的条件下,缩短编解码的时间。实验结果表明,文中算法相对基本分形的算法应用前景更加广阔。

此外,文中算法还存在许多不足之处,比如信噪比基本没有改善等,这些问题都是今后需继续研究改善的,也是今后研究的重点。而为了在缩短编解码时间时,尽量改善图形质量,笔者将尝试将文中的子块特征与其他能够较好描述图像纹理细节及其他一些特征的量(如:分形维数、小波、DCT变换等)相结合来编写分形算法,以此来改善重构图像的质量。而目前也有大量专家在这种混合编码方向进行了研究,同时也取得了不少成果。从这些成果来看,一些混合编码对分形图像编码的编解码时间和重构图像的质量上都有所改善,故预计将文中算法与其他子块特征结合进行混合编码能够取得预期的效果,这也是之后研究与探索的重点。

## 参考文献:

- [1] Wohlberg B, de Jager G. A review of the fractal image coding literature[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8 (12): 1716–1729.
- [2] Fisher Y. Fractal image compress: theory and application [M]. New York: Spring-Verlag, 1995.
- [3] Shi Yipen, Gu Wei, Zhang Liming. Some new methods to fractal image compression [J]. Communication in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 1997, 13(2): 80–85.
- [4] Zhao Yao, Yuan Baozong. Image compression using fractals and discrete cosine transform[J]. Electronics Letters, 1994, 30 (6): 474–475.
- [5] 田 岩, 彭复员. 数字图像处理与分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
- [6] 刘忠艳, 周 波, 车向前. 一种高效的图像匹配算法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(4): 45–47.
- [7] Yamaguchi H. Efficient encoding of colored pictures in R. G. B components [J]. IEEE Transactions on Communications, 1984, 32(11): 1201–1209.
- [8] Lai C M, Lam K M, Siu W C. A fast fractal image coding based on kick-out and zero contrast conditions [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12 (11): 1398–1403.
- [9] Popescu D C, Dimca A, Yan H. A nonlinear model for fractal image coding [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6 (3): 372–382.
- [10] He C, Yang S X, Huang X. Variance-based accelerating scheme for fractal image encoding [J]. IEEE Electronics Letters, 2004, 40(2): 115–116.
- [11] Jacquin A E. A novel fractal block-coding technique for digital image [C]//Proceedings of IEEE international conference on ASSP. [s. l.]: IEEE, 1990.
- [12] 陈衍仪. 图像压缩的分形理论和方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [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] 李高平. 分形图像压缩编码[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
- [15] Beaumont J M. Image data compression using fractal techniques [J]. British Telecom Tech Journal, 1991, 9(4): 93–109.
- [16] Barnsley M F, Hurd L P. Fractal image compression [M]. Wellesley: AK Peters, 1992.
- [17] Polvere M, Nappi M. Speedup in fractal image coding: comparison of methods [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(6): 1002–1009.
- [18] Melnikov G, Katsaggelos A K. A non uniform segmentation optimal hybrid fractal/DCT image compression algorithm [C]//Proc of IEEE international conference on acoustics, speech & signal processing. [s. l.]: IEEE, 1998: 2573–2576.
- [19] Truong Trieu-Kien, Jeng Jyh-Horng, Reed I S. A fast encoding algorithm for fractal image compression using the DCT inner product [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(4): 529–534.
- [20] 庄振静. 分形图像压缩的两个快速编码算法[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [21] Jacobs E W, Fisher Y, Boss R D. Image compression: a study of the iterated transform method [J]. Signal Processing, 1992, 29(3): 251–263.
- [22] 杨 帆, 王志陶, 张 华. 精通图像处理经典算法[M]. MATLAB版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.

基于欧氏比的快速分形编码算法

作者：[张爱华](#)，[何雨虹](#)，[张璟](#)，[ZHANG Ai-hua](#)，[HE Yu-hong](#)，[ZHANG Jing](#)  
作者单位：[南京邮电大学 理学院, 江苏 南京, 210046](#)  
刊名：[计算机技术与发展](#)[ISTIC](#)  
英文刊名：  
年，卷(期)：2016 (2)

引用本文格式：[张爱华](#), [何雨虹](#), [张璟](#), [ZHANG Ai-hua](#), [HE Yu-hong](#), [ZHANG Jing](#) [基于欧氏比的快速分形编码算法](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2016 (2)