

分形图像编码研究的进展

赵 耀¹,王红星²,袁保宗¹

(1. 北方交通大学信息所,北京 100044 2. 海军航空工程学院 403 教研室,烟台 264001)

摘 要: 分形图像编码是近几年发展起来的一种新的图像编码方法,目前对其研究较为广泛.本文介绍了分形图像压缩编码的数学原理、基本特性,着重介绍了当今这一领域的发展成果,比较了各种方案的优缺点,分析了目前编码方案所存在的缺点、原因及未来的发展方向.

关键词: 分形图像编码;图像编码;分形

中图分类号: TN919.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2000)04-095-07

Advances in Fractal Image Coding

ZHAO Yao¹,WANG Hong-xing²,YUAN Bao-zong¹

(1. Institute of Information Science, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China)

Abstract: Fractal image coding (FIC) is a new image coding method developed in recent years and has been studied extensively. In the paper, the mathematical principle and the specialties of FIC are introduced, the advances in FIC are presented, meanwhile, the advantages and disadvantages of various schemes are compared. Finally, the shortcomings of current coding scheme, its reasons and the future development of FIC are analyzed.

Key words: fractal image coding; image coding; fractal

1 引言

在家庭影院、VCD 等多媒体应用和可视电话、会议电视等现代通信中,如何有效减少所需的数据量和占用的频带是必须解决的重要问题.在这些应用场合中,图像占用的数据量最多,因此,如何用尽可能少的数据来尽可能不失真地表示图像已成为这些应用的关键,这就是图像压缩问题.

图像压缩已研究了几十年,提出了诸如 DPCM、DCT、VQ 等压缩方法,并已出台了基于 DCT 等技术的国际压缩标准,如 JPEG、MPEG、H.261 等.图像压缩已得到较为广泛的实际应用.然而,随着人们对这些传统编码方法的深入应用,也逐渐发现了这些方法的许多缺点:比如高压缩比时图像出现严重的方块效应、人眼视觉系统(Human Visual System,简称 HVS)的特性不易被引入到压缩算法中,等等.为克服传统压缩方法中的上述缺点,人们又在不断探索新的图像编码方法.经过十多年的发展,M. Kunt 等人认为,目前有三种方法属于第二代图像编码方法:基于分割(Segment-based)的压缩方案、基于模型(Model-based)的压缩方案及基于分形(Fractal-based)的压缩方案^[1].

分形图像压缩(Fractal image compression)一词是美国数学家 M. F. Barnsley 于 1987 年提出的^[2].次年,他和合作者 A. D. Sloan 发表了一篇题为“A Better Way to Compress Images”的文

章^[3].在此文中,他们将 Hutchinson^[4]于 1981 年提出的迭代函数系统(Iterated Function Systems,简称 IFS,此理论虽然是由 Hutchinson 提出的,但 IFS 一词是由 M. F. Barnsley 命名的)应用到图像压缩编码中,并获得了极好的压缩性能.这种压缩方法突破以往熵压缩编码的理论界限,新颖、有效,二人以此算法为基础申请了专利^[5],但这种方法的缺点是在图像分割时需要人机交互,对操作者有较高的要求,无法实用,此方案在当时并未引起太多的注意.

1990 年, M. F. Barnsley 的博士生 A. E. Jacquin 发表了一种基于方块划分的分形图像压缩方案^[6].在其方案中,首先将原始图像划分为固定大小的方块,然后对每一方块,通过仿射变换在原始图像的紧缩图像中寻找最相似的部分.这些操作都可以由计算机自动完成,它为分形图像编码的研究带来了一次质的飞跃.

分形图像编码是目前较有发展前途的图像编码方法之一,也是目前研究较为广泛的编码方法之一.对其研究已有近十年的历史,其间,人们发现了它所具有的许多优点:比如,它突破以往熵压缩编码的界限,在编码过程中,采用了类似描述的方法,而解码是通过迭代完成的,且具有分辨率无关(Resolution-independent)的解码特性等^[7].随着国内外研究的广泛深入,人们在赞叹其新颖的编码思路的同时,也发现了它的一些

缺点,因此,许多改进的编码方案不断出现.下面,将简要介绍分形图像编码的基本原理、基本性质,重点介绍目前分形编码研究的发展状况,指出目前压缩方案所存在的许多缺点及原因,并对分形编码研究的未来作了分析.

2 分形图像编码的基本原理与特性

分形图像编码技术有着较为深奥的数学基础,受篇幅所限,在此不能详细介绍,感兴趣的读者可参阅文[8].下面简单回顾一下分形编码的数学基础.

2.1 分形图像编码的数学基础

定义 1 (紧缩变换):令 $f: X \rightarrow X$ 为度量空间 (X, d) 上的变换,若存在一常数 $0 \leq s < 1$,使得 $d(f(x), f(y)) \leq s \cdot d(x, y)$, $\forall x, y \in X$,则称 f 为紧缩变换, s 称为紧缩因子.

定义 2 (仿射变换):一个变换 $\omega: R^2 \rightarrow R^2$ 具有如下形式:
 $\omega(x, y) = (ax + by + e, cx + dy + f)$. 其中, a, b, c, d, e, f 为实数,则称 ω 为(二维)仿射变换.

上式可写成矩阵形式,即:

$$\omega(x) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} = Ax + T \quad (1)$$

其中, $x = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$, $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$, $T = \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix}$.

二维仿射变换可以把二维空间中的一点映射为另一点,把二维空间中的一部分映射为另一部分.

仿射变换 ω 主要具备不变、尺度、对折、平移、旋转等特性,这些特性是由参数 a, b, c, d, e, f 决定的.

在分形图像编码中,经常用到的 3 维仿射变换,实际采用的简化形式为:

$$\omega \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \\ g \end{bmatrix} \quad (2)$$

在灰度图像中, (x, y) 是像素点的坐标, z 是该像素的灰度值.此仿射变换可看成是 (x, y) 平面上 2D 仿射变换与 z 方向上线性逼近的组合.

定义 3 (迭代函数系统):一个迭代函数系统 (IFS) 包括一个完备度量空间 (X, d) , 以及一系列定义于该空间的紧缩映射 $\omega_n: X \rightarrow X$, 紧缩因子分别为 $s_n, n = 1, 2, \dots, N$. 通常将 IFS 表示为 $\{X; \omega_n, n = 1, 2, \dots, N\}$, 收敛因子为 $s = \max\{s_n | n = 1, 2, \dots, N\}$.

定理 1:令 $\{X; \omega_n, n = 1, 2, \dots, N\}$ 为具有紧缩因子 s 的迭代函数系统,变换 $W: H(X) \rightarrow H(X)$ 定义为 $W(B) = \bigcup_{n=1}^N \omega_n(B)$, $\forall B \in H(X)$, 那么 W 是完备度量空间 $(H(X), h(d))$ 上的紧缩映射,且紧缩因子为 s , 即 $\forall B, C \in H(X)$, 有 $h(W(B), W(C)) \leq s \cdot h(B, C)$; 且具有唯一一个不动点 $A \in H(X)$, $A = W(A) = \bigcup_{n=1}^N \omega_n(A)$, 并且 A 可通过下式得到, $\forall B \in H(X)$, $A = \lim_{n \rightarrow \infty} W^n(B)$.

当然,这里的 ω_n 可为任意映射,在分形图像编码中, ω_n 为紧缩仿射变换.

定理 2 (拼贴定理):令 (X, d) 为一完备度量空间,令 $B \in$

$H(X)$ 给定 $\epsilon \geq 0$, 选择一个 IFS $\{X; \omega_n, n = 1, 2, \dots, N\}$, 具有紧缩因子 $s, 0 \leq s < 1$, 使 $h(B, \bigcup_{n=1}^N \omega_n(B)) \leq \epsilon$, 其中, $h(d)$ 为 Hausdorff 测度, 那么 $h(B, A) \leq \epsilon(1-s)$, 其中 A 是该 IFS 的吸引子, 同时对于所有 $B \in H(X)$, 存在以下关系 $h(B, A) \leq (1-s)^{-1} h(B, \bigcup_{n=1}^N \omega_n(B))$.

限于篇幅,定理 1 和 2 的证明略,感兴趣读者请参考文[8].定理 1 和拼贴定理是 Barnsley 分形图像编码方案的理论基础^[5].在 Barnsley 方案中,给定一图像 B , 其分形编码过程就是要构造一个迭代函数系统 $\{X; \omega_n, n = 1, 2, \dots, N\}$, 使

$$B = W(B) = \bigcup_{n=1}^N \omega_n(B) \quad (3)$$

存储或传输 W 的参数,实现对图像 B 的编码,一般来说,存储 W 的参数需要较少的数据量,因此能够获得较高的压缩.由压缩过程可知,图像 B 是紧缩变换 W 的不动点,根据定理 1,此不动点可用 W 对任意一幅图像不断迭代变换而得到,这就完成了分形解码的过程.当然,实际图像不一定能完全满足式(3),而根据拼贴定理, B 和 $\bigcup_{n=1}^N \omega_n(B)$ 越接近,则恢复图像 A 就越接近原始图像 B .

Barnsley 方案存在几个缺点:

(1) 图像分割需要人机交互实现,无法自动实现,对操作者有较高的专业要求;

(2) 分割的图像只能与整幅图像进行相似性比较,使比较的范围受到极大的限制,影响恢复图像的质量.

尽管 Barnsley 方案可以达到极高的压缩,但由于其存在上述这些致命缺点,在当时未能引起重视.直到 1990 年, Jacquin 在 Barnsley 研究的基础上,发展了 IFS 理论,提出了局部迭代函数系统 (Local Iterated Function Systems, 简称 LIFS), 将变换 ω_n 的定义域由原来的整个区域放宽为整个区域的某些子集.在此理论上,提出了一种基于方块划分的分形图像压缩方案,将 Barnsley 方案中的交互式分割变为固定大小的方块分割,变只能与整幅图像比较为可与图像的任意部分比较,使图像编码自动进行.

作为例子,下面简单介绍 Jacquin 的编码方案.

2.2 Jacquin 的分形图像压缩方案^[6]

第一步 对原始图像进行分块.

设 B_{orig} 是待编码的原始图像,将 B_{orig} 分成两种大小的子块,小块的大小为 $K \times K$, 称之为值域子块 (range blocks), 记为 R_1, R_2, \dots, R_N . 当 $i \neq j$ 时, $R_i \cap R_j = \phi$; 且 $R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_N = B_{orig}$. 大块的大小为 $L \times L$, 称之为定义域子块 (domain blocks), 记为 D_1, D_2, \dots, D_M . 定义域子块之间允许有部分重叠.一般情况下, $L > K$, 这主要是为了满足紧缩变换的要求.

第二步 寻找合适的 LIFS.

根据 LIFS 拼贴定理,要寻找这样一个 LIFS, 使 $\omega_i(D_j)$ 与 R_i 在 Hausdorff 测度下尽可能接近.因此分形图像压缩编码的关键是如何寻找合适的仿射变换 ω_i 及定义域子块 D_j , 满足

$$R_i \approx \omega_i(D_j) \quad (4)$$

我们知道,在灰度图像压缩时,通常使用的式(2)所示的

仿射变换, 仿射变换 ω_i 通常具有不变、尺度、对折、平移、旋转等特性, 这些特性主要由其系数决定的, 但在实际应用中, 直接获取、量化和存贮这些系数较为困难, 因此常用一个等价的组合变换来代替 ω_i :

$$\omega_i = G_i \circ \tau_i \circ \varphi_i \quad (5)$$

其中, φ_i 是 $x - y$ 平面上的紧缩变换, 将大小 $L \times L$ 的 D_j 映射成 $K \times K$ 大小的块; τ_i 为对折或旋转变换, 总共有 8 种可能; G_i 为灰度处理算子, 包含比例因子 p 和灰度补偿因子 g .

考虑式 (4) 和 (5), 对于 R_i 的编码就是寻找合适的 D_j, G_i, τ_i , 满足下式:

$$R_i \approx G_i \circ \tau_i \circ \varphi(D_j) \quad (6)$$

设 R_i 的第 i 个像素的值为 Z_i , 设 $\tau_i \circ \varphi(D_j)$ 的第 i 个像素值为 z_i , 则 R_i 的分形编码过程就是寻找合适的 D_j, G_i, τ_i 使下式最小

$$\text{Error} = \sum_{i=1}^{K \times K} (Z_i - pz_i - g)^2 \quad (7)$$

第三步 存储分形变换参数.

当最佳仿射变换 ω_i 及定义域子块 D_j 找到之后, 存储或

传输其参数, 完成该值域子块的编码.

待所有的值域子块都被编码之后, 也就完成了对原图像的分形编码. 对于第 i 个值域子块, 其最佳定义域子块和仿射变换的寻找过程如图 1 所示.

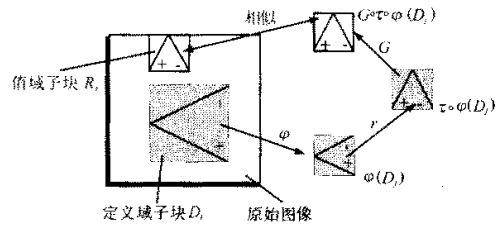


图 1 第 i 个值域子块的分形编码过程示意图

分形编码方法的解码较为简单. 由分形编码方法的数学原理可知, 在编码过程中所得到的 IFS 是紧缩的, 它的吸引子可以通过对任意初始图像的不断迭代变换而得到. 从严格的数学角度上讲, 这种迭代是无穷次的. 但在实际的数字图像的解码中, 由于分辨率的限制, 这种迭代只需有限次即可收敛. 一般情况下, 需 8 次迭代. 图 2 给出了一幅标准测试图像的解码迭代过程.



图 2 测试图像“小孩”的解码迭代图像(初始图像是一幅全黑的图像)

通过上面的分析, 分形图像编码具有以下几个特点:

(1) 分形编解码思路新颖, 利用了数学中的不动点理论 (fixed point theory), 也叫吸引子理论 (attractor theory), 因此, 又有许多的研究者称其为吸引子图像编码^[9~15], 在编码中, 试图用某一个函数来描述整幅图像, 与以往的正交变换编码有着本质的区别. 在解码时, 通过对任意初始图像的迭代变换而得到, 不管初始图像为何, 最后都要收敛到解码图像, 显示了数学的威力与神奇;

(2) 解码过程具有分辨率无关性 (Resolution-independent), 在分形编码时存储的是 IFS 参数, 它可以对任何分辨率的图像进行迭代变换而获得解码图像, 即解码的分辨率可以与原始图像不同. 利用本特性所得到的放大图像真实、自然, 不会引起采用双线性内插等传统方法来放大图像而引起较为严重的“锯齿效应”, 如图 3 所示.

(3) 分形编解码是不对称的过程, 在编码时, 对每一值域子块, 都要在所有的定义域子块中搜索, 非常耗时, 但解码时无须搜索, 而传统正交变换编解码是对称的过程.



图 3 (a) 以 4 倍于原始大小的解码图像“小孩”的一部分; (b) 原始图像采用双线性内插放大 4 倍的图像的一部分

3 分形图像编码的发展状况

A. E. Jacquin 提出的方案为分形压缩编码的研究注入了生机与活力, 分形编码成为目前编码研究的热点. Jacquin 的论

文也因此荣获 1992 年 IEEE 信号处理分会最佳论文的称号^[16]。目前,国际互连网上出现了数个分形编码的网点,比较著名的有:

美国 Fisher 研究组的网点,网址为: <http://inls.ucs.d.edu/y/Fractals/>;

英国 Monro 研究小组的网点,网址为: <http://dmsun4.bath.ac.uk/>;

德国 Saupe 研究小组的网点,网址为: <ftp://ftp.informatik.uni-freiburg.de/papers/fractal/>;

Brendt Wohlberg 的网点,网址为: <http://www.dip.ee.uct.ac.za/imageproc/compression/fractal/>;

加拿大滑铁卢大学的研究组,网址为: <http://links.uwaterloo.ca/>。

自 Jacquin 之后,分形图像编码引起了世界各国研究人员的广泛兴趣和关注,发表的论文逐年增多,从大量的文献来看,目前分形编码方案大致有三个发展方向:加快分形的编解码速度、提高分形的编码质量、基于分形的低码率视频编码。下面将分别介绍这三方面的发展。

3.1 发展方向之一 加快分形的编解码速度

编解码速度慢一直是分形编码实用化的最大障碍,下面分析 Jacquin 编码方案的计算复杂度。

对于一个 $C \times C$ 大小的图像,假设值域子块大小为 $K \times K$,定义域子块大小为 $2K \times 2K$,则该图像共有 C^2/K^2 个值域子块 ($C - 2K + 1$) 个定义域子块。在 Jacquin 方案中,一个值域子块和一个定义域子块之间相似性的计算量与 K^2 成正比,而对于每一个值域子块,要与所有的定义域子块进行相似性比较,因此对每一个值域子块,其编码计算量是与 $(C - 2K + 1) \cdot K^2$ 成线性关系的,所以,对一幅图像来说,其编码复杂度与 $(C - 2K + 1) \cdot K^2 \cdot C^2/K^2 = C^2 \cdot (C - 2K + 1)^2$ 成正比,考虑到 K 为常数,因此,分形图像编码的计算复杂度为 $O(C^4)$ 。

由此可见,分形编码非常耗时,采用 386 机器,其压缩时间一般以小时计算,因此,减少搜索、加快编解码速度一直是研究热点之一。

Jacquin 根据子块的复杂程度将其分成 4 类,对每个值域子块,仅在其同类的定义域子块中进行搜索^[6,16]。如果假设 4 类定义域子块的个数相同,则编码的时间减少为原来的 1/4; E. W. Jacobs、Y. Fisher 和 R. D. Bossr 根据图像块的灰度平均值将子块分成 3 大类,同时又根据图像块灰度的方差大小将每一类分成 24 小类,因此,在其方案中,共将定义域子块和值域子图像块灰度的方差大小将每一类分成 24 小类,因此,在其方案中,共将定义域子块和值域子块分成 72 类,另外还采用了四像限树分割方法(Quadtree partition),大大减少编码时间,利用 586PC 机压缩一幅 256×256 的图像仅需几秒钟,是目前最流行、最实用的压缩算法^[17]; D. Saupe 采用多维最近邻搜索方法(multi-dimensional nearest neighbor search)代替传统分形编码中序列的匹配过程,其搜索匹配时间按指数级增长,即 $O(C^2 \log C)$ ^[18,19]。B. E. Wohlberg 等以几何的观点看待编码匹配中的最小化问题,将复杂的匹配过程变为角度大小的比较过程,大大减少编码时间^[20]。他们还提出了一种 DCT 域的快

速匹配方案,将 DCT 域子块表示成规范形式使其具有尺度、偏移量及对折等操作不变性,然后借用文^[18]中的多维最近邻搜索方法进行匹配,减少编码时间^[21]。Deng Yuan Mu 和 Ke You An 将子块 DCT 变换后,根据 DCT 系数分成 10 类,而不同类之间的旋转或对折变换可通过查表而知,省略了这 8 次耗时的操作,使压缩时间提高 8 倍,信噪比仅有少许的损失^[22]。K. F. Loe 等将 Jacquin 方案中使用的分类器替换成模糊分类器,并使用遗传算法进行优化^[23],该算法比未分类的编码方法快 40% 左右。Behnam Bani-Eqbal 利用 Øien 等人提出的分形内积空间的概念,将传统分形编码的求最小均方误差的操作变为正交投影,再构造树状结构进行搜索,压缩速度提高 50 倍以上^[24]。C. K. Lee 和 W. K. Lee 通过对匹配块之间关系的研究发现,如果两子块的自身方差相差太远,则这两个子块不可能相似,由此可去除许多不必要的匹配过程,提高压缩速度 10 倍以上^[25]。Min Xue 等将传统编码方案中每一个值域子块匹配的串行操作转换为并行操作,计算复杂性从 $O(C^4)$ 变为 $O(C^2)$ ^[26]。英国 D. M. Monro 等提出一种不用搜索的编码方案,对值域子块,选择在其附近的一个较大的子块作为定义域子块,同时采用最小二乘法计算最佳仿射变换的参数,该方法大大加快编解码速度,使编解码几乎对称的过程^[27,28]。房育栋和余英林考虑到区域的相关性,在搜索最佳定义域子块时,优化搜索次序,先在值域子块最近的邻域内寻找,若找不到,再将搜索范围逐渐扩大直至满足预定误差,此举可减少搜索范围,缩短压缩时间^[29]。

分形解码图像是将编码过程构造的紧缩变换迭代应用于某一幅初始图像最后收敛而得到。由于解码过程没有耗时的搜索操作,速度较快,因此对解码快速算法的研究较少,但仍有部分研究人员涉足该研究领域。Geir Egil Øien 等人通过对编码过程算子的正交化处理,使得解码的迭代在有限的次数内收敛(少于常规值)^[30]。Z. Baharav 等利用在不同分辨率下的分形解码图像之间的关系,设计了一种金字塔式的解码方案,节省解码时间^[31]。Hyun-Soo Kang 等人也采用了类似的金字塔结构^[32]。

3.2 发展方向之二 提高分形编码质量

人们对分形解码图像的研究发现,与其它传统的压缩方法(如 DCT 等)相比,在低压缩比时,分形解码图像的质量较低。在文章^[6]中,对于 $256 \times 256 \times 6$ 的 Lena 图像,编码比特率为 0.68bpp,峰峰信噪比仅为 27.7dB。提高编码质量也是目前分形编码的重要方向之一。目前,提高分形编码质量的方法有三种:采用混合编码方案、改进分割方案及改进灰度逼近能力等。Jacquin 方案在采用较大值域子块时,图像细节部分匹配效果不佳,往往引起恢复图像质量不好;而传统的一些编码方法,在较低压缩比时,效果较好,因此,许多研究者就将分形与这些编码方法混合使用,扬长避短。

本文作者将 DCT 与分形联合^[33],用仿射变换粗略描述原始图像,而误差图像由 DCT 变换来完成,这种方法可有效提高恢复图像的细节质量。K. U. Barthel 等也对此方法作了尝试^[34]。分形与小波联合编码是目前分形研究的一个新的发展方向。Rinaldo 和 Calvagno 利用低频带的方块作为矢量码书来

量化高频子块^[35]. G. M. Davis 在其论文中^[36, 37]对分形和小波的关系进行了细致分析,发现 Jacquin 提出的方案是一种 Haar 小波子树量化方案,并将其方案推广到其它平滑的子波,从而收到了较好的压缩效果. Axel Van de Walle 也提出了类似的方案^[38].

Gharavi-Alkhasari 等人将方块变换、VQ 和分形联合起来^[39],在寻找相似定义域子块时,既可以象分形编码那样在较大子块中寻找又可以像 VQ 那样在相同大小的子块中寻找,因此该方案既利用了不同分辨率下的自相似性又利用了相同分辨率下的自相似性,从而提高编质量.

另一类提高编码质量的方法是对传统分割方法的改进.在 Jacquin 最初提出的方案中,采用固定大小的方块分割,由于受灰度线性逼近的限制,在采用较大的方块时,虽可以获得较高的压缩比,但图像质量较差,而采用较小的方块时,灰度的逼近较好,编码质量较高,但压缩比较低.另外,正方形方块在形状上也不利于倾斜边界的编码.因此,一些研究人员通过改进分割方案来改进图像质量.

Jacquin 首先意识到这一点,使用两次分割,首先对 8×8 大小的值域子块进行编码,然后对该子块的四个象限,分别计算逼近误差,如果超过预定门限,则对该小块再进行编码,该分割方法在一定程度上具有自适应性,在提高编码质量的同时,又避免压缩比下降太多^[16]. Y. Fisher 等人对上述方法继续推广,提出了四象限的划分方式,分割按多层进行,使分形压缩的质量和压缩速度有了较大的提高,是目前较为实用的压缩方法^[7]. Y. Fisher 还提出了一种三角形分割方案,在方块分割的基础上,沿两条对角线将其分成两个三角形,这种分割有利于倾斜边缘的逼近^[40]. Frank Davoine 等人提出了一种 De-launay 三角形分割方案,它除了具有 Fisher 三角形分割方案的优点外,其三角形的方向和大小是任意性的^[41]. Fisher 等人还提出了 H-V 分割方案^[7],该方案沿水平或垂直的边缘将一个长方形的值域子块分割成两个小的的长方形值域子块,以减少值域子块的复杂度,提高编码质量. Frank Davoine 等人还提出了三角形和四边形混合分割方案,它除了具有三角形分割的优点(有效去除方块效应)之外,还能通过将相邻三角块组合成四边形而有效减少编码块数,提高压缩比^[42]. 目前国内外研究者还提出了基于区域的分割方案^[43, 44],但这些方法都是在 Jacquin 方块划分的基础上,通过合并方块而形成的区域,不是任意形状和大小,因此,在相似性提取方面存在着一定的缺陷.

由拼贴定理可知,经仿射变换后的定义域子块与值域子块越接近,则恢复的图像质量越好.因此有一些作者尝试提高灰度的逼近能力来提高图像质量.在分形编码中,常用的仿射变换为式(2),其灰度值的逼近式为: $\omega(z) = pz + g$, 这是一个简单的线性逼近,逼近能力有限,因此本文作者将传统编码方案中简单的线性灰度逼近一般化,提出了一种新的仿射变换如式(8)所示:

$$\omega \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ 0 & 0 & \kappa(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可知,灰度的逼近变为 $\omega(z) = \kappa(z)$, $\kappa(z)$ 可以为任意形式,可以为二次以上的多项式,有效提高了编码效果,改进图像质量^[45]. 而 M. Gharavi-Alkhasari 和 T. S. Huang 用几个定义域子块的线性组合来逼近某一值域子块,提高逼近能力^[39].

3.3 发展方向之三:分形序列图像编码

在实际应用中,序列图像较静止图像有着更广阔的应用场合,而且由于时间维的引入,编码方法也有新的变化,因此,序列图像编码是图像编码的热点之一.由于分形图像编码在低码率压缩方面有独到之处,因此,分形编码又被广泛地应用到序列图像之中.

1994年,加拿大学者 Lazar 等人发表了一篇论文^[46],将 Jacquin 的分形编码从二维变换直接推广到三维,静止图像编码方案中的值域子块和定义域子块是 2-D 正方形,而 Lazar 方案中的值域子块和定义域子块是 3-D 长方体,其分割方案如下图所示.这样划分的编解码过程可以直接借用静止图像的分形编码方案,但是这样做没能充分利用帧间的相似性,压缩性能并不佳.

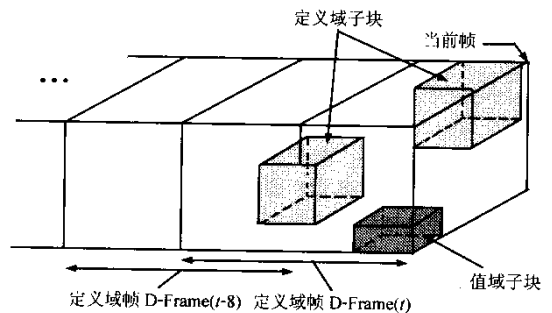


图 4 Lazar 方案中的值域子块的定义域子块

本文作者提出了基于扩展自相似性的序列图像编码方案,将静止图像利用的自相似性扩展到帧间^[47],对当前帧中每一值域子块,既可以在本帧中寻找相似的定义域子块,也可以在前一帧中寻找,减少逼近误差,提高图像质量.同时还将在文[45]所提的新仿射变换应用到序列图像编码中^[48]. 本文作者还提出了一种基于分形内插函数的序列图像编码方案,具体实现方法参见[49]. 该方案具有以下的一些特点:对几帧图像同时编码,编码速度较快,压缩比也自然非常高;同时对几幅图像解码,解码过程无须迭代.

Fisher 等人提出了自矢量量化(Self-VQ)的序列图像编码方案^[50],对于当前帧中的每一个值域子块,均在前一帧中寻找相似性定义域子块,与静止图像编码不同的是,定义域子块可以与值域子块大小相同.本编码方案的优点是解码无须迭代,可以近似实时完成.

Bernd Hürtgen 等人将分形编码用于低码率视频编码中^[51],他们首先将当前帧和前一帧相减,根据差值的大小将当前帧划分为背景和前景,仅对前景采用多层分割进行分形编码,对 CIF 格式的标准测试图像,编码速率为 64kbps 时仍图像质量较好.

J. A. Nicholls 和 D. M. Monro 利用他们提出的 Bath 分形变

换设计了自适应的分形视频编码器^[52,53],采用四象限树分割,在传输时,仅传输前后两帧插值较大的方块,由此可以控制传输速率,同时还可以控制四象限分割的深度来控制图像的质量,该方案利用 33MHz486i 对 160×128 的彩色图像可以实时编码,他们在文[54]中对这一方案进行了进一步的探讨,采用 RISC 处理器的软件编码器可以适用于 20Kbps 和 1.2Mbps 的带宽范围。

Chang-Su Kim 等人提出了一种利用圆型预测映射和非紧缩帧间映射的视频编码器^[53],从本质上讲,与 Fisher 在文[50]等提出的方案没有根本区别。D. M. Monro 和 Frank Dudbridge 也将分形变换用于序列图像的编码^[56],分形序列图像压缩编码是当今分形压缩编码的一个重要方向。

4 分形图像编码存在的缺点

A. E. Jacquin 的方案可使分形压缩自动进行,有力推动了图像编码的研究,但由前面的分析不难发现其存在以下缺点:

- 压缩比通常在十倍左右,远未达到 Barnsley 给出的压缩性能;
- 恢复图像中仍然有较为严重的方块效应;
- 在压缩时,运算量较大,压缩时间较长。

R. J. Clarke 和 Raittinen^[57]也对目前的分形编码方案提出了批评^[57,58]。

造成传统分形编码上述缺点的原因主要有:

- 没有考虑图像的内容和含义,只进行盲目的方块分割,从而导致较高压缩比时出现严重的方块效应;
- 人眼视觉系统(VHS)没有充分考虑。

5 结论

分形图像编码从提出到现在不过十年的时间,却有了长足的进步,编码时间从几小时变为几秒钟,压缩比从几倍到几十倍,在较高的压缩比时图像质量超过 DCT^[59],等等。同时应该看到,分形编码的潜力尚未完全挖掘,分形编码利用了自然图像所固有的自相似性,但传统方案在相似性提取方面存在着很大的缺陷,作者认为,如果还在 Jacquin 的编码方案上做一些小的改进,是不可能彻底改变上述缺点的,因此,应该在区域分割的基础上,再做 IFS 变换,即通过对数字图像的分析 and 理解后进行区域分割,区域形状不再局限于简单的方块,使分割区域与原始图像某些部分之间视觉意义下的相似度有所提高,使分形图像编码的压缩质量、压缩比、压缩时间有一个较大的提高。

赵 耀 1968 年生,博士、副教授,近年来在国内外发表论文近 30 篇,感兴趣领域包括:多媒体图像压缩编码,数字水印,计算机视觉,神经网络等。

王红星 1962 年生,海军航空工程学院电子工程系副教授,工学硕士,主要从事无线电通信及航空图像通信的研究,获得军队科技进步二、三等奖九项,发表论文 20 多篇,出版有《能信对抗技术》等专著。

袁保宗 教授、博士生导师,IEE Fellow,感兴趣领域包括:多媒体信息处理系统,计算机视觉,虚拟现实技术,图像处理,语音处理等。

参考文献

- [1] Luis Torres, M. Kunt. Video coding :the second generation approach. Kluwer academic publiser, 1996
- [2] M. F. Barnsley. Chaotic compression. Computer Graphics World, Nov., 1987
- [3] Barnsley M. F., Sloan A. D. . A better way to compress images. BYTE, Jan., 1988 215 ~ 223
- [4] J. E. Hutchinson. Fractals and self-similarity. Indiana Univ. Math. J., 1981 35 5
- [5] Barnsley M. F., Sloan A. D. . Method and apparatus for processing digital data. United States Patent # 5 065 447
- [6] A. E. Jacquin. A novel fractal block - coding technique for digital images. Proc. ICASSP, 1990 2225 ~ 2228
- [7] Y. Fisher. Fractal image compression :theory and application. Spring - Verlag New York, Inc., 1995
- [8] M. F. Barnsley and L. P. Hurd. Fractal image compression. AK Peters, Wellesley, MA, USA, 1993
- [9] S. Lepsøy. Attractor image compression - fast algorithms and comparisons to related techniques. PhD thesis, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, June 1993
- [10] S. Lepsøy and G. E. Øien. Fast attractor image encoding by adaptive codebook clustering. In Y. Fisher, editor, Fractal Image Compression : Theory and Application, Springer-Verlag, New York, NY, USA, 1995, chapter ~ 9 :177 ~ 197
- [11] M. Novak. Attractor coding of images. Proceedings PCS 93(International Picture Coding Symposium), Lausanne, Switzerland, March, 1993
- [12] M. Gharavi - Alkhansari and T. S. Huang. A system/graph theoretical analysis of attractor coders. Proceedings ICASSP - 97(IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing), Munich, Germany, April, 1997 A 2705 ~ 2708
- [13] F. Davoine and J. - M. Chassery. Adaptive deaunay triangulation for attractor image coding. Proceedings of the 12th International Conference on Pattern Recognition, Jerusalem, Israel, October, 1994 801 ~ 803
- [14] F. Dudbridge and Y. Fisher. Attractor optimization in fractal image encoding. Fractals in Engineering Conference, Arcachon, France, June,

- 1997
- [15] H. - L. Ho and W. - k. Cham. Attractor image coding using lapped partitioned iterated function systems. Proceedings ICASSP - 97(IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing), Munich ,Germany ,April ,1997 4 :2917 ~ 2920
- [16] A. E. Jacquin. Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformations. IEEE Trans. on Image Processing ,January, 1992 ,1(1) :18 ~ 30
- [17] E. W. Jacobs ,Y. Fisher and R. D. Boss. Image compression :A study of the transform method. Signal Processing ,1992 ,29 :251 - 263
- [18] D. Saupe. Breaking the time complexity of fractal image compression. Technical Report ~ 53 Institute für Informatik ,University of Freiburg , Freiburg ,Germany ,1994
- [19] D. Saupe. Accelerating fractal image compression by multi-dimensional nearest neighbor search. In J. A. Storer and M. Cohn ,editors ,Proceedings DCC '95(IEEE Data Compression Conference), Snowbird ,UT , USA ,March ,1995 :222 ~ 231
- [20] B. E. Wohlberg and G. de Jager. On the reduction of fractal image compression encoding time. 1994 IEEE South African Symposium on Communications and Signal Processing(COMSIG '94),University of Stellenbosch ,October ,1994 :158 ~ 161
- [21] B. E. Wohlberg and G. de Jager. Fast image domain fractal compression by DCT domain block matching. Electronics Letters ,May ,1995 ,31(11) :869 ~ 870
- [22] Deng Yuan Mu(邓圆木) ,Ke You An(柯有安). A fast fractal image coding scheme. Proceedings of 3rd international conference on signal processing ,Beijing ,1996 :1047 ~ 1050
- [23] K. F. Loe ,W. G. Gu ,K. H. Phua. Speed-up fractal image compression with a fuzzy classifier. Signal Processing :Image Communication ,1997 ,10 :303 ~ 311
- [24] Behnam Bani-Eqbal ,Enhancing the speed of fractal image compression. Optical Engineering ,June ,1995 ,34(6) :1705 ~ 1710
- [25] C. K. Lee and W. K. Lee. Fast fractal image block coding based on local variances. IEEE Trans. on Image Processing ,June 1998 ,6 :888 ~ 891
- [26] Min Xue ,etc. A massively parallel implementation of fractal image compression. Proc. of IEEE ICASSP ,1994
- [27] Monro and F. Dudbridge. Fractal block coding of images. Electronics Letters ,1992 ,28(11) :1053 ~ 1055
- [28] D. M. Monro. Class of fractal transforms. Electronics Letters ,1993 ,29(4) :362 ~ 363
- [29] 房育栋 ,余英林. 快速分形图像压缩编码. 电子学报 ,1996 ,24(1) :28 ~ 33
- [30] Geir Egil Øien ,Skjalg Lepsøy. Fractal-based image coding with fast decoder convergence. Signal Processing ,1994 ,40 :105 ~ 117
- [31] Z. Barahav ,D. Malah ,and E. Karnin. Hierarchical interpretation of fractal image coding and its application to fast decoding. Proceedings of the IEEE International Conference on Digital Signal Processing ,Nicosia ,Cyprus ,July ,1993 :190 ~ 195
- [32] H. -S. Kang and S. -D. Kim. Fractal decoding algorithm for fast convergence. Optical Engineering ,November ,1996 ,35(11) :3191 ~ 3198
- [33] Yao Zhao and Baozong Yuan. Image compression using fractals and discrete cosine transform. Electronics Letters ,1994 ,30(6) :474 ~ 475
- [34] K. U. Barthel ,etc. A new image coding technique unifying fractal and transform coding. Proc. of ICIP ,1994 :3
- [35] Alex Pentland and Bradley Horowitz. A practical approach to fractal-based image compression. Proc. Data Compression Conference ,Snowbird ,Utah ,James A. Storer and Martin Cohn ,Eds ,IEEE Computer Society ,Mar. ,1991 :176 ~ 185
- [36] G. M. Davis. A wavelet-based analysis of fractal image compression. IEEE Transactions on Image Processing ,February ,1988 ,7(2) :141 ~ 154
- [37] G. Davis. Image compression via adaptive self-quantization of wavelet subtrees. Proceedings ICASSP-96(IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing) ,Atlanta ,GA ,USA ,1996 :2359 ~ 2362
- [38] A. van de Walle. Merging fractal image compression and wavelet transform methods. Fractals ,April ,1997 ,5(Supplementary Issue) :3 ~ 15
- [39] M. Gharavi-Alkhansari and T. S. Huang. Fractal-based techniques for a generalized image coding method. Proc. of IEEE ICIP ,1994 :3
- [40] Y. Fisher. A discussion of fractal image compression. In H. -O. Peitgen ,H. Jürgens ,and D. Saupe ,editors ,Chaos and Fractals :New Frontiers of Science ,appendix A ,Springer-Verlag ,New York ,NY ,USA ,1992 :903 ~ 919
- [41] F. Davoine and J. -M. Chassery. Adaptive Delaunay triangulation for attractor image coding. In Proceedings of the 12th International Conference on Pattern Recognition ,Jerusalem ,Israel ,October ,1994 :801 ~ 803
- [42] F. Davoine ,J. Svensson ,and J. -M. Chassery. A mixed triangular and quadrilateral partition for fractal image coding. Proceedings ICIP-95 (IEEE International Conference on Image Processing) ,Washington ,D. C. ,USA ,October ,1995 ,III :284 ~ 287
- [43] 秦烽 ,吴征 ,周峰 ,姚庆栋. 分区 IFS 图像压缩编码. 通信学报 ,1997 ,18(5) :1 ~ 7
- [44] L. Thomas and F. Deravi. Region-based fractal image compression using heuristic search. IEEE Transactions on Image Processing ,June ,1995 ,4(6) :832 ~ 838
- [45] Yao Zhao ,Baozong Yuan. A New Affine Transformation :Its Theory and Application to Image Coding ,IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology ,June ,1998 ,8(3)
- [46] Lazar J. T. Bruton. Fractal block coding of digital video. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology ,June ,1994 ,4(3)
- [47] Yao Zhao ,Baozong Yuan. Sequence image compression using fractal technique. The International Conference on Signal Applications & Technology (ICSPAT-95) ,1995
- [48] 赵耀 ,袁保宗. 一种基于新仿射变换的分形序列图像编码方法. 电子学报 ,1997 ,25(7) :28 ~ 31
- [49] Hongxing Wang ,Yao Zhao ,Baozong Yuan. Very low bit rate video coding using fractal interpolation. The Forth International Conference on Signal Processing (ICSP-98) ,1998
- [50] Y. Fisher ,D. N. Rogovin ,and T. -P. J. Shen. Fractal (self-VQ) encoding of video sequences. In A. K. Katsaggelos ,editor ,Visual Communications and Image Processing '94 ,SPIE Proceedings ,Chicago ,IL , USA ,September ,1994 :2308 :1359 ~ 1370

- [51] B. Hürtgen and P. Büttgen. Fractal approach to low rate video coding. In B. G. Haskell and H. -M. Hang ,editors ,Visual Communications and Image Processing '93 ,SPIE Proceedings ,Boston ,MA ,USA ,November , 1993 ,2094 :120 ~ 131
- [52] Nicholls ,J. A. ,and Monro ,D. M. Adaptive fractal video. NATO ASI Conference on the Application of fractal technologies ,1995
- [53] Monro ,D. M. and Nicholls ,J. A. . Low bit rate colour fractal video , Proc. IEEE ICIP ,1995 ,3 :264 ~ 267
- [54] Nicholls ,J. A. and Monro ,D. M. . Scalable video by software. Proc. IEEE ICASSP ,1996 ,4 :2005 ~ 2008
- [55] Chang-Su Kim ,Rin-Chul Kim and Sang-Uk Lee. Fractal coding of video sequence using circular prediction mapping and noncontractive interframe mapping. IEEE Trans. on Image Processing ,April 1998 ,7 (4) :601 ~ 604
- [56] Monro and Frank Dudbridge. Rendering algorithms for deterministic fractals. IEEE Computer Graphics and Applications ,January ,1995 ,32 ~ 41
- [57] Roger. J. Clarke. Digital Compression of still images and video. Academic Press Limited ,1995
- [58] Raittinen ,H. ,Kaski ,K. . Critical review of fractal image compression , International Journal of Modern Physics C [Physics and Computers] , 1995 ,1 (1) :66 ~ 47
- [59] Y. Fisher ,T. P. Shen ,and D. Rogovin. Comparison of fractal methods with discrete cosine transform (DCT) and wavelets. In S. -S. Chen , editor ,Neural and Stochastic Methods in Image and Signal Processing III SPIE Proceedings ,San Diego ,CA ,USA ,July 1994 ,2304 :132 ~ 143

作者: 赵耀, 王红星, 袁保宗, ZHAO Yao, WANG Hong-xing, YUAN Bao-zong
作者单位: 赵耀, 袁保宗, ZHAO Yao, YUAN Bao-zong(北方交通大学信息所, 北京, 100044), 王红星, WANG Hong-xing(海军航空工程学院403教研室, 烟台, 264001)
刊名: 电子学报 ISTIC EI PKU
英文刊名: ACTA ELECTRONICA SINICA
年, 卷(期): 2000, 28(4)
被引用次数: 49次

参考文献(59条)

1. Y. Fisher [Fractal image compression: theory and application](#) 1995
2. A. E. Jacquin [A novel fractal block-coding technique for digital images](#)[外文会议] 1990
3. Y. Fisher; T. P. Shen; D. Rogovin [Comparison of fractal methods with discrete cosine transform \(DCT\) and wavelets](#) 1994
4. S. Lepsy [Attractor image compression - fast algorithms and comparisons to related techniques](#) 1993
5. M. F. Barnsley; L. P. Hurd [Fractal image compression](#) 1993
6. Min Xue [A massively parallel implementation of fractal image compression](#) 1994
7. C. K. Lee; W. K. Lee [Fast fractal image block coding based on local variances](#)[外文期刊] 1998
8. Yao Zhao; Baozong Yuan [Sequence image compression using fractal technique](#) 1995
9. Lazar, L. T. Bruton [Fractal block coding of digital video](#)[外文期刊] 1994(03)
10. Yao Zhao; Baozong Yuan [A New Affine Transformation: Its Theory and Application to Image Coding](#)[外文期刊] 1998(03)
11. L. Thomas; F. Deravi [Region-based fractal image compression using heuristic search](#)[外文期刊] 1995(06)
12. 秦烽; 吴征; 周峰; 姚庆栋 [分区IFS图像压缩编码](#) 1997(05)
13. F. Davoine; J. Svensson; J. -M. Chassery [A mixed triangular and quadrilateral partition for fractal image coding](#)[外文会议] 1995
14. F. Davoine; J. -M. Chassery [Adaptive Delaunay triangulation for attractor image coding](#)[外文会议] 1994
15. Barnsley M. F.; Sloan A. D [A better way to compress images](#) 1988
16. 房育栋; 余英林 [快速分形图像压缩编码](#)[期刊论文]-[电子学报](#) 1996(01)
17. D. M. Monro [Class of fractal transforms](#)[外文期刊] 1993(04)
18. F. Dudbridge [Fractal block coding of images](#)[外文期刊] 1992(11)
19. Raittinen, H.; Kaski, K [Critical review of fractal image compression](#) 1995(01)
20. Roger. J. Clarke [Digital Compression of still images and video](#) 1995
21. Frank Dudbridge [Rendering algorithms for deterministic fractals](#)[外文期刊] 1995
22. Chang-Su Kim; Rin-Chul Kim; Sang-Uk Lee [Fractal coding of video sequence using circular prediction mapping and noncontractive interframe mapping](#)[外文期刊] 1998(04)
23. Nicholls, J. A.; Monro, D. M [Scalable video by software](#) 1996
24. Monro, D. M.; Nicholls, J. A [Low bit rate colour fractal video, Proc](#) 1995
25. Nicholls, J. A.; Monro, D. M [Adaptive fractal video](#) 1995

26. [B. Hrtgen;P. Bttgen Fractal approach to low rate video coding](#) 1993
27. [Y. Fisher;D. N. Rogovin;T. -P. J. Shen. Fractal \(self-VQ\) encoding of video sequences](#) 1994
28. [Barnsley M. F.;Sloan A. D Method and apparatus for processing digital data](#)
29. [Hongxing Wang;Yao Zhao;Baozong Yuan Very low bit rate video coding using fractal interpolation](#)[外文会议] 1998
30. [赵耀;袁保宗 一种基于新仿射变换的分形序列图像编码方法](#) 1997(07)
31. [F. Dudbridge;Y. Fisher Attractor optimization in fractal image encoding](#) 1997
32. [F. Davoine;J. -M. Chassery Adaptive deaunay triangulation for attractor image coding](#) 1994
33. [M. Gharavi-Alkhansari;T. S. Huang A system/graph theoretical analysis of attractor coders](#)[外文会议] 1997
34. [M. Novak Attractor coding of images](#) 1993
35. [Y. Fisher A discussion of fractal image compression](#) 1992
36. [J. E. Hutchinson Fractals and self-similarity](#)[外文期刊] 1981
37. [M. Gharavi-Alkhansari;T. S. Huang Fractal-based techniques for a generalized image coding method](#)[外文会议] 1994
38. [A. van de Walle Merging fractal image compression and wavelet transform methods](#)[外文期刊] 1997
39. [G. Davis Image compression via adaptive self-quantization of wavelet subtrees](#)[外文会议] 1996
40. [G. M. Davis A wavelet-based analysis of fractal image compression](#)[外文期刊] 1988(02)
41. [Alex Pentland;Bradley Horowitz A practical approach to fractal-based image compression](#)[外文会议] 1991
42. [K. U. Barthel A new image coding technique unifying fractal and transform coding](#)[外文会议] 1994
43. [Yao Zhao;Baozong Yuan Image compression using fractals and discrete cosine transform](#)[外文期刊] 1994(06)
44. [H. -S. Kang;S. -D. Kim Fractal decoding algorithm for fast convergence](#)[外文期刊] 1996(11)
45. [Z. Barahav;D. Malah;E. Karnin Hierarchical interpretation of fractal image coding and its application to fast decoding](#) 1993
46. [Geir Egil ien;Skjalg Lepsy Fractal-based image coding with fast decoder convergence](#) 1994
47. [S. Lepsy;G. E. ien Fast attractor image encoding by adaptive codebook clustering](#) 1995
48. [Luis Torres;M. Kunt Video coding:the second generation approach](#) 1996
49. [Behnam Bani-Eqbal Enhancing the speed of fractal image compression](#)[外文期刊] 1995(06)
50. [K. F. Loe;W. G. Gu;K. H. Phua Speed-up fractal image compression with a fuzzy classifier](#) 1997
51. [邓圆木;柯有安 A fast fractal image coding scheme](#)[外文会议] 1996
52. [B. E. Wohlberg;G. de Jager Fast image domain fractal compression by DCT domain block matching](#)[外文期刊] 1995(11)
53. [B. E. Wohlberg;G. de Jager On the reduction of fractal image compression encoding time](#)[外文会议] 1994
54. [M. F. Barnsley Chaotic compression](#) 1987
55. [D. Saupe Accelerating fractal image compression by multi-dimensional nearest neighbor search](#)[外文会议]

56. [D.Saupe Breaking the time complexity of fractal image compression](#) 1994
57. [E. W. Jacobs;Y. Fisher;R. D. Boss Image compression:A study of the transform method](#)[外文期刊] 1992
58. [A. E. Jacquin Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformations](#)[外文期刊] 1992(01)
59. [H. -L. Ho;W. -k. Cham Attractor image coding using lapped partitioned iterated function systems](#)[外文会议] 1997

本文读者也读过(2条)

1. [王向阳, 杨红颖 基于人眼视觉特性的快速图像编码算法](#)[期刊论文]-[软件学报](#)2003, 14(11)
2. [基于图像块叉迹的快速分形图像编码算法](#)[期刊论文]-[计算机学报](#)2005, 28(10)

引证文献(52条)

1. [王强, 梁德群, 毕胜 基于相关信息特征最近邻搜索的快速分形图像编码](#)[期刊论文]-[小型微型计算机系统](#) 2011(6)
2. [王强, 梁德群, 毕胜 基于相关信息特征最近邻搜索的快速分形图像编码](#)[期刊论文]-[小型微型计算机系统](#) 2011(6)
3. [刘润杰, 申金媛, 穆维新 形式化开发非递归Koch曲线算法](#)[期刊论文]-[计算机科学](#) 2011(9)
4. [崔朝辉, 刘冀伟, 王志良, 曲波 分形图像编码算法的参数选择对算法性能的影响](#)[期刊论文]-[智能系统学报](#) 2010(3)
5. [唐悟甲, 吴晓红, 余艳梅, 罗代升 基于图像细节子块的分形编码压缩方法](#)[期刊论文]-[计算机工程](#) 2010(9)
6. [刘美琴, 赵耀 基于FGSE的快速分形图像编码算法及其多描述编码方案](#)[期刊论文]-[电子学报](#) 2010(3)
7. [赵建伟 基于值域块分类的分形编码](#)[期刊论文]-[计算机与现代化](#) 2009(9)
8. [吴静进, 罗小青 分形图像编码的研究](#)[期刊论文]-[科技广场](#) 2008(8)
9. [王大溪, 罗衡郴, 伍良启 基于分类的医学影像分形编码](#)[期刊论文]-[计算技术与自动化](#) 2007(4)
10. [张浩, 冯嘉礼 基于属性论方法的分形图像压缩](#)[期刊论文]-[现代计算机\(专业版\)](#) 2007(7)
11. [孟宪伟, 晏磊 图像压缩编码方法综述](#)[期刊论文]-[影像技术](#) 2007(1)
12. [冀曙光 基于分形理论的VDR雷达图像编码方法的研究](#)[学位论文]硕士 2007
13. [赵德平, 魏明, 史桂颖, 李鹏, 郑新录 Julia集与分形图像压缩编码的分析与改进](#)[期刊论文]-[沈阳建筑大学学报\(自然科学版\)](#) 2006(3)
14. [刘莹, 胡敏, 余桂英, 李小兵, 刘晓林 分形理论及其应用](#)[期刊论文]-[江西科学](#) 2006(2)
15. [陈红卫, 张焕春, 孙以雷 一种混合的四叉树分形图像编码](#)[期刊论文]-[现代电子技术](#) 2006(2)
16. [王凤兰 用于图像放大的插值方法的研究](#)[学位论文]硕士 2006
17. [廖洪波 管道泄漏检测定位系统中的数据压缩研究](#)[学位论文]硕士 2006
18. [黄娟娟 分形维数及其在图像编码和边缘检测中的应用](#)[学位论文]硕士 2006
19. [何奇, 韩国强, 张见威, 林少丹 一种基于图像纹理分析的分形和SPIHT混合编码](#)[期刊论文]-[中国图象图形学报](#) 2005(12)
20. [袁静, 冯前进, 陈武凡 基于模糊聚类优化的分形图像压缩快速算法](#)[期刊论文]-[计算机应用与软件](#) 2005(5)
21. [杨倩, 穆晓敏 分形图像编码的快速算法](#)[期刊论文]-[河南科学](#) 2005(3)
22. [姜东海, 王殊 分形编码技术在图像型火灾烟雾探测中的应用研究](#)[期刊论文]-[长沙通信职业技术学院学报](#) 2005(4)
23. [冯林, 李彦君, 邵刚, 王秀坤, 滕弘飞 利用人眼视觉系统理论实现DCT域快速分形编码](#)[期刊论文]-[计算机辅助设计与](#)

24. [王端芳](#) [基于小波系数特征结构分类的分形图像编码 \(FZBWCS\) 技术研究](#)[学位论文] 硕士 2005
25. [司徽东](#) [基于小波变换的分形压缩方法研究](#)[学位论文] 硕士 2005
26. [吴思源](#) [三维IFS分形插值算法研究及其在DEM生成中的应用](#)[学位论文] 博士 2005
27. [杨倩](#) [分形图像压缩编码的算法研究及DSP实现](#)[学位论文] 硕士 2005
28. [牛朝](#) [基于自适应分割的广义分形小波变换图像压缩技术](#)[学位论文] 硕士 2005
29. [李高平](#) [分形几何及其在图像压缩编码中的应用研究](#)[学位论文] 硕士 2005
30. [许晓曾](#) [分形图像压缩的快速算法研究](#)[学位论文] 硕士 2005
31. [杨静](#) [基于分形理论的图像压缩编码研究](#)[学位论文] 硕士 2005
32. [何传江](#), [蒋海军](#), [黄席樾](#) [快速分形图像编码的一种特征方法](#)[期刊论文]-[电子学报](#) 2004(11)
33. [王兴建](#), [曹俊兴](#), [李学民](#) [多尺度分形参数在裂缝检测中的应用研究](#)[期刊论文]-[物探化探计算技术](#) 2004(4)
34. [章金凤](#) [分形图像压缩编码及其改进措施的研究进展](#)[期刊论文]-[河南科技大学学报 \(自然科学版\)](#) 2004(6)
35. [练华](#), [宋宝瑞](#) [基于小波变换的分形图像编码](#)[期刊论文]-[上海交通大学学报](#) 2004(4)
36. [唐红梅](#), [王霞](#), [郑丽君](#) [分形图像压缩编码技术介绍](#)[期刊论文]-[计算机时代](#) 2004(4)
37. [梁斌](#), [袁静](#), [冯前进](#), [陈武凡](#) [基于模糊聚类优化的序列图像快速分形压缩](#)[期刊论文]-[第一军医大学学报](#) 2004(2)
38. [李爱涛](#) [分形图像压缩编码的研究](#)[学位论文] 硕士 2004
39. [蒋海军](#) [基于分形的图像压缩编码研究](#)[学位论文] 硕士 2004
40. [陈宏曙](#) [基于小波变换技术的图像压缩研究](#)[学位论文] 硕士 2004
41. [高广春](#) [第二代小波变换理论及其在信号和图像编码算法中的应用](#)[学位论文] 博士 2004
42. [袁静](#), [冯前进](#), [陈武凡](#), [杨丰](#) [基于小波分解的快速分形图像压缩算法](#)[期刊论文]-[中国图象图形学报A辑](#) 2003(4)
43. [李晓亮](#), [周国标](#) [基于域块预搜索的快速分形图像编码方法](#)[期刊论文]-[信号处理](#) 2003(2)
44. [王兴建](#), [曹俊兴](#), [李学民](#), [郑圻森](#) [基于分形理论的地震裂缝检测方法](#)[期刊论文]-[石油物探](#) 2003(2)
45. [黄伟](#), [龚沛曾](#) [图像压缩中的几种编码方法](#)[期刊论文]-[计算机应用研究](#) 2003(8)
46. [王兴建](#), [曹俊兴](#), [李学民](#) [分形理论在裂缝检测中的应用研究](#)[期刊论文]-[物探装备](#) 2002(3)
47. [孙保平](#), [徐立中](#), [张敏](#), [刘美林](#), [杨锦堂](#) [分形图像压缩编码研究](#)[期刊论文]-[仪器仪表学报](#) 2001(z1)
48. [罗强](#), [任庆利](#), [罗莉](#), [杨万海](#) [一种几何形状比例可变的分形图像压缩编码方法](#)[期刊论文]-[西安交通大学学报](#) 2001(8)
49. [王相海](#), [张福炎](#) [静态图像编码研究进展](#)[期刊论文]-[计算机研究与发展](#) 2001(11)
50. [王相海](#), [张福炎](#) [多媒体视频编码研究](#)[期刊论文]-[计算机科学](#) 2001(11)
51. [田逢春](#), [谭晓衡](#), [曾孝平](#), [陈修建](#) [细胞全能性与数据压缩](#)[期刊论文]-[重庆邮电学院学报\(自然科学版\)](#) 2001(z1)
52. [吕晓琪](#), [张晨羽](#) [基于分形编码的图像压缩技术](#)[期刊论文]-[包头钢铁学院学报](#) 2001(2)