

结合 DCT 补偿的分形图像编码

张爱华, 常康康

(南京邮电大学 理学院, 江苏 南京 210023)

摘要:分形编码是建立在分形迭代函数系统理论基础上的图像压缩方法, 压缩比高, 但编码时间长, 编码过程复杂度高。针对分形压缩方法存在的这些不足, 且保证在高压比下使得图像质量有明显改善, 文中结合离散余弦变换近似的分形图像压缩方法, 通过对灰度变换的调节, 找到最佳父块及映射, 使得均方误差小于容许误差, 以此完成编码过程, 从而达到提高图像质量和减少编码时间的目的。实验结果表明: 文中提出的方法在保证图像质量的前提下, 提高了分形编码速度且优于基本分形编码方法。

关键词:分形图像编码; 峰值信噪比; 迭代函数系统; 灰度变换

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2014)01-0061-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2014.01.016

Fractal Image Coding Combined with Discrete Cosine Transform Complement

ZHANG Ai-hua, CHANG Kang-kang

(College of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Fractal coding is a new image compression method based on fractal iterated function system. Although the method can achieve high compression, it will take long encoding time and the coding with high computational complexity. In view of these deficiencies for fractal compression method, and ensuring that under the high compression ratio make the image quality is obviously improved, combined with fractal image compression method based on discrete cosine transform approximation, by the regulation of gray-scale transformation, find the best father and mapping, make the mean square error is less than allowable error, to complete the coding process, so as to achieve the purpose of improving image quality and reducing the encoding time. Experimental results show that the presented approach improves the encoding speeds at the premise of guaranteeing the decoding image quality, and is better than the basic fractal coding method.

Key words: fractal image encoding; peak signal to noise ratio; iterated function system; gray transform

0 引言

分形是具有复杂几何图形且不规则的形状, 在其内部存在的自相似结构有无穷多个, 因而可用一些简单的规则通过随机迭代而得到。该思想在 20 世纪 80 年代被引入到图像的压缩编码中, 在对图像进行压缩时, 对于能近似为分形图像的图像, 若想用迭代函数的参数来表示, 则需要找到图像内部的自相似迭代函数的参数, 从而可进一步压缩图像的信息量, 解决图像压缩编码中的问题。

近年来, 分形理论在图像压缩中的应用十分广泛。Barnsley 率先提出用迭代函数系统 (IFS) 进行图像压

缩^[1-2], 这为图像压缩提供了一种新的思想, 但这种方法编码时间过长, 需要人机配合, 对操作的要求也高, 不具有普遍的适用性。随后, Jacquin 利用图像块之间的相似性, 提出了分块的迭代理论算法^[3]。在这种算法中, 首先将原始图形分割成互不重叠的子块 R_i , 然后搜索与其自相似的父块 D_j , 但通过 R 块找到合适的 D 块, 通常有以下几个过程: 首先通过几何收缩得到排列块大小; 其次是对八种仿射变换的反复应用; 最后通过进行收缩和亮度偏移后, 去寻找误差量最小的匹配块。但这种算法编码的复杂度很高。

文中基于正交变换编码中将图像编码变换到频率

收稿日期: 2013-04-02

修回日期: 2013-07-11

网络出版时间: 2013-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61070234); 南京邮电大学校科研基金 (NY210018)

作者简介: 张爱华 (1969-), 女, 山西广灵人, 副教授, 研究方向为非线性分析及拓扑动力系统; 常康康 (1986-), 男, 河南襄城人, 硕士研究生, 研究方向为非线性分析。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20131112.1634.015.html>

域^[4-6]的思想,在分形编码算法中寻找频率域中与 R 块最佳匹配的 D 块,因为在图像空间域中匹配的 R 块和 D 块在频率域上也应该是匹配的,鉴于此,文中在原有的算法中对原始图像进行灰度变换,从而达到提高图像质量和减少编码时间的目的。

1 分形图像的编码原理

1.1 分形在图像压缩中的应用

计算机技术的发展与分形理论是紧密联系的。其一,由于分形理论的应用使得计算机可视化技术得到快速发展,同时使得计算机在信息压缩以及存储的过程中发挥了重要作用;其二,分形研究与计算机技术的发展息息相关,计算机技术为分形研究提供了重要的工具。在自然界中,分形随处可见,从而为分形在许多应用领域的研究提供了客观基础。

分形概念由 Mandelbrot 创立以来,分形理论在数学、化学、物理学、计算机图形学、地球物理学、生物学以及图像处理等其他学科中得到广泛应用。同时分形的思想和方法在现代社会的生活与活动中也起到了很大的作用。具有统计自相似性的分形就是计算机图形学领域中研究的热门对象。利用这种统计分形的概念,其一,大量酷似自然景观的图形,可以通过一些简单规则建立的复杂模型产生;其二,一些简单规则在不同尺度上的重复作用(迭代)所产生的结果,可以由一个复杂的现象给出,从而在对其进行分析并且加以描述的基础上,将该模型十分逼真地模拟出来。

分形理论在图像压缩中有广泛应用。其中,最引人注目方法是由 Barnsley 提出的迭代函数系统,80 年代中期,Barnsley 用从数学上找到的理论根据,率先提出在图像压缩中用迭代函数系统(IFS)这种分形方法进行研究,为图像压缩提供了一种全新的方法。他的得意门生 Jacquin 在他的指导下,首次提出分块的迭代变换理论算法。这也是第一个对图像的分形压缩利用计算机进行的自动算法,对分形图像压缩方法在实际应用中起到了奠基的作用。总之,随着计算机算法的进一步完善和分形理论的深入研究,分形方法在工程实践中将发挥越来越大的作用。但是对分形理论的研究仍处于具体分析阶段,并没有统一的理论基础。相信随着科学的进一步发展,对它们的研究将会更深入。无论在理论上还是在造福人类的应用上,对这些问题进行广泛、深入和细致的研究都将有重大而深远的意义。

1.2 分形图像压缩的理论基础

设 (X, d) 是一个度量空间,拓扑由度量诱导, X 的非空紧子集的全体构成一个集合,记为 $H(X)$ 。

定义 1(压缩映射):度量空间 (X, d) 上的映射 T

称为压缩的,即存在一个正的常数 $\alpha < 1$,使 $d(Tx, Ty) \leq \alpha d(x, y)$, $\forall x, y \in X$,其中 α 称为映射 T 的压缩因子。

压缩映射在几何上的意思是说经 T 映射后,它们像之间的距离缩短了,且不超过 $d(x, y)$ 的 α 倍($\alpha < 1$)。满足 $Tx = x$ 的点 x 称为映射 T 的不动点。

定理 1(压缩映射原理):设 (X, d) 是一个完备度量空间, $T: X \rightarrow X$ 是压缩因子为 $\alpha \in [0, 1)$ 的压缩映射,则 T 存在唯一不动点 x' ,且

$$x' = \lim_{n \rightarrow \infty} T^n x = \lim_{n \rightarrow \infty} T(T^{n-1} x), \quad \forall x \in X$$

压缩映射定理保证了完备度量空间中的不动点是存在且唯一的。

定理 1(拼贴定理):设 (X, d) 为一完备度量空间,给定 $L \in H(X)$, $\varepsilon > 0$,如果存在一个压缩因子为 s ($0 \leq s < 1$) 的迭代函数系统 $\{X; w_n, n = 1, 2, \dots, N\}$,使得

$$h(L, \bigcup_{n=1}^N w_n(A)w_n(L)) \leq \varepsilon$$

则有

$$h(L, A) \leq \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$$

其中: $h(\cdot)$ 为 Hausdorff 距离, A 为该迭代函数系统的吸引子。

拼贴定理保证了变换的收敛性,在压缩因子不变时,对 w_n 进行微小的改变, $w_n(L)$ 和吸引子 A 的改变不大,即参数的微小变化只引起吸引子的微小变化。若设原图像为 L ,由拼贴定理可知,存在一组压缩仿射变换 w_n ,使 $\bigcup_{n=1}^N w_n(L)$ 与 L 充分地逼近,也即存在一组原图经过压缩仿射变换后的子图,使得拼接后的图与原图十分接近,因此可以近似地看作是原图像。

1.3 迭代函数系统

迭代函数系统是分形图像压缩编码技术的理论基础。将迭代函数系统的子映射定义域限制在图像的一个子块上称为局部迭代函数系统^[7]。对局部迭代函数系统进行分形编码,常用以下步骤:

(1)将原始图像分割成互不重叠且覆盖整个图像的子块,其子块大小为 $B \times B$ 。

(2)用大小为 $D \times D$ ($D = 2B, D, B$ 均为整数)的截取窗口在原图上分别沿水平方向和垂直方向移动以形成 D_j , $\{D_j\}$ 为搜索域。

(3)对每一个 R 块,在整个搜索域中寻找与 R_i 最佳匹配的 D_i ,从而得到与 R_i 对应的映射 w_i (称为分形码), w_i 具有如下形式:

$$w_i \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_i & b_i & 0 \\ c_i & d_i & 0 \\ 0 & 0 & s_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_i \\ f_i \\ o_i \end{bmatrix}$$

其中 s_i 为对比度收缩因子, o_i 为亮度偏移因子, 且有 $|s_i| \leq 1$, 根据拼贴定理, 可以从任意图像开始迭代, 收敛到接近原始图像。

2 分形与离散余弦变换相结合的图像压缩编码算法

由于 DCT 方法在高压缩比时方块效应明显, 同时在存储量比较高的图像信息压缩以及低码率的图像通信中^[8], DCT 方法存在图像压缩质量不高的缺点, 因此一些研究人员不断对此方法进行改进^[9-11]。

2.1 余弦变换的定义

以 $\{x(m)\}$ 表示 M 个其值有限的一维实数信号序列的集合, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 。它的一维 DCT 定义为

$$Y(k) = \sqrt{\frac{2}{M}} c(k) \sum_{m=0}^{M-1} x(m) \cos \frac{2m+1}{2M} k\pi$$

$$(k = 0, 1, \dots, M-1)$$

一维的余弦反变换 (IDCT) 定义为

$$x(m) = \sqrt{\frac{2}{M}} c(m) \sum_{k=0}^{M-1} Y(k) \cos \frac{2m+1}{2M} k\pi$$

其中

$$c(k), c(m) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{当 } k, m = 0 \text{ 时} \\ 1, & \text{当 } k, m = 1, 2, \dots, M-1 \text{ 时} \end{cases}$$

上式可以写成矩阵形式:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X}$$

其中 \mathbf{A} 为 DCT 变换矩阵:

$$\mathbf{A} = \left[\sqrt{\frac{2}{M}} \left(c(k) \cos \frac{(2m+1)k\pi}{2M} \right) \right]_{M \times M}$$

$$(k, m = 0, 1, \dots, M-1)$$

可以验证, DCT 矩阵 \mathbf{A} 是一个正交矩阵, 但不是 一个对称矩阵。

IDCT 的矩阵为

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^T \left[\sqrt{\frac{2}{M}} \left(c(k) \cos \frac{(2m+1)k\pi}{2M} \right) \right]_{M \times M}$$

$$(m, k = 0, 1, \dots, M-1)$$

它除了行和列的序号互换外, 与 \mathbf{A} 完全相同, 也可用矩阵形式表示:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{Y}$$

设图像 $\{x(m, n)\}$ 是一个具有 M 行, N 列的矩阵。为达到同时减弱或去除空间域的相关性的目的, 将图像从空间域变换到频率域。二维的 DCT 表达式为

$$Y(k, l) = \frac{2}{\sqrt{MN}} c(k) c(l) \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x(m, n)$$

$$\cos \frac{(2m+1)k\pi}{2M} \cos \frac{(2n+1)l\pi}{2N}$$

其中, $k = 0, 1, \dots, M-1; l = 0, 1, \dots, N-1$ 。而它的反变换为

$$x(m, n) = \frac{2}{\sqrt{MN}} c(k) c(l) \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} c(k) c(l) Y(k, l)$$

$$\cos \frac{(2m+1)k\pi}{2M} \cos \frac{(2n+1)l\pi}{2N}$$

其中, $m = 0, 1, \dots, M-1; n = 0, 1, \dots, N-1$ 。

上述两式都可以拆成两个一维的 DCT, 如先对“行”进行一维 DCT, 再对“列”进行一维 DCT, 当然也可用并行的 DCT。

对每个 $N \times N$ 的子块进行 DCT 之前, 先把图像划分为很多 $N \times N$ 的子块 (N 通常取 8)。设 $x(m, n)$ 是其中任意一个 $N \times N$ 的子块, 则子块的 DCT 为

$$Y(k, l) = \frac{1}{4} c(k) c(l) \sum_{m=0}^7 \sum_{n=0}^7 x(m, n)$$

$$\cos \frac{(2m+1)k\pi}{16} \cos \frac{(2n+1)l\pi}{16}$$

其中, $k = 0, 1, \dots, 7; l = 0, 1, \dots, 7$ 。

$$c(k), c(l) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{当 } k, l = 0 \text{ 时} \\ 1, & \text{当 } k, l \text{ 为其他} \end{cases}$$

经过上述变换后, 把每个块转变成具有 64 个 DCT 的系数, 然后对该系数进行量化处理 (系数用 $Y(k, l)$ 来表示, $Q(k, l)$ 用来表示量化步长), 则量化结果为:

$$Y_0(k, l) = \text{round} \left(\frac{Y(k, l)}{Q(k, l)} \right)$$

对上述函数进行四舍五入取整。其中 $Y_0(0, 0)$ 是量化后的直流系数, 对相邻的两个直流系数进行预测编码, 保存其差; 同时量化后的 63 个交流系数被转换成“Z”形序列, 采用熵编码进行处理。其中量化步长中存在一个调节因子, 并且其大小可控制压缩比的质量, 这是因为调节因子一旦发生改变, 则量化步长随之改变。在码流固定时, 调节因子将成为 DCT 编码的控制因子。其编码和解码的框图如图 1 所示。

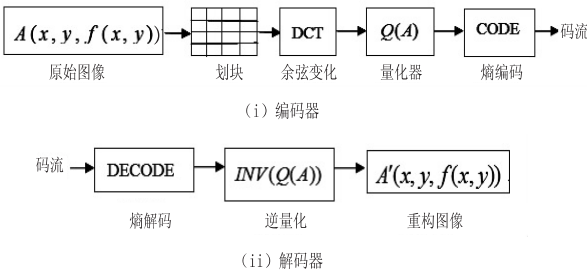


图 1 JPEG 标准的构成

2.2 结合 DCT 的分形编码

通常把原图像划分为由 8×8 像素组成的子块和 16×16 的父块, 再分别对它们进行 DCT, 用 $F_R(k, l)$ 和

$F_D(k,l)$ 表示。而 $F_R(k,l)$ 根据其交流系数分为简单子块和复杂子块。假设 T_N 为给定的阈值,则有

$$\begin{cases} |F_R(0,1)| + |F_R(1,0)| + |F_R(1,1)| = \\ < T_\omega, \text{ 当 } F_R \text{ 为简单子块} \\ \geq T_\omega, \text{ 当 } F_R \text{ 为复杂子块} \end{cases}$$

其中, $F_R(0,0)$ 是直流成分; $F_R(0,1)$ 、 $F_R(1,0)$ 、 $F_R(1,1)$ 是低频率的交流成分。通常的 DCT 块中,在频率的分布中低频成分的幅度较大,而高频成分幅度较小,因此,如果一个子块是平坦区,则比较低的频率的交流成分的幅度小。对于简单子块,此时只要保留 $F(0,0)$ 的成分,就保留了其主要信息量,对其只需存储几个比特信息;对于复杂的子块,通常采用分形自仿射变换

$$F_R^{K,L} \approx C_{K,L} \cdot L_{P(K,L)} \cdot A \cdot F_D^{\pi(K,L)} + h_{K,L} \cdot I$$

其中, $L_{P(K,L)}$ 为反射旋转因子; $C_{K,L}$ 为伸缩因子; A 为平均抽样因子; $h_{K,L}$ 为平移因子; I 为全 1 的 8×8 矩阵,其中子块左上角的位置是大写的字母 K,L 。那么其自仿射的误差为:

$$E = \sum_{l=0}^7 \sum_{k=0}^7 |F_R(k,l) - \tau(F_D(k,l))|^2$$

若 $E < \varepsilon$, 则可保留

$$E(k,l) = F_R(k,l) - \tau(F_D(k,l))$$

若误差 $E(k,l)$ 仍比较大,将继续对误差块 $E(k,l)$ 进行编码,得到其补偿误差值的无失真编码,以保证在分形解码时,恢复 DCT 系数的误差补偿。若误差 $E(k,l)$ 比较小,则分形编码已达到恢复 DCT 系数的目的。

对其解码时,对于 DCT 系数中的误差以及系数中还有补偿的误差也可作为补偿参加到分形编码中进行迭代^[12],从而达到改进图像质量的目的。采用 DCT 系数的分形编码的优点有:

- (1) 由于在频率域中,其形状都是低频端振幅大而高频端幅度小,因而在 DCT 系数中就比较容易找到其自相似性;
- (2) 经过研究人员的不断探索和改进,DCT 的速度比较快;
- (3) 在加入了补偿项后,图像压缩的质量得到改进。

3 DCT 补偿的图像压缩编码算法

通常情况下,为了寻找最佳仿射变换 D 块,每一个 R 块必须与所有可能的 D 块进行比较,这需要进行大量 DCT 计算,在此,对基本分形图像编码算法加以改进,具体算法如下:

(1) 把图像分成 32×32 的块,对 32×32 子块搜索相应的 64×64 的父块,经过变换合成:一是进行几何

收缩映射,使父块与子块具有相同的空间尺度;二是进行八种仿射变换,使父块与子块尽可能有相近的灰度分布;三是进行灰度变换。若找到最佳父块,则对此块的仿射变换系数进行编码,否则,将 32×32 的子块进行四叉树分割划为四个 16×16 子块,对每个子块进行编码。

(2) 对 16×16 子块搜索 32×32 的父块,找到一最佳父块及映射,若均方误差小于容许误差,则此编码完成,否则,将 16×16 的子块进行四叉树分割,划为 8×8 子块,对每个 8×8 子块用 DCT、游程编码和 Huffman 编码进行编码并保存。

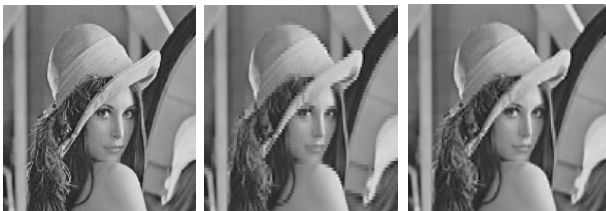
(3) 存储子块与其最佳匹配块之间的相对位置和灰度线性匹配参数,作为编码信息,解出 DCT 部分的编码得到误差数据,再对初始图像进行迭代,直到得到稳定图像。

4 实验结果

采用 512×512 的 Lena 灰度图像进行实验,把峰值信噪比 (PSNR) 作为图像重构质量的比较标准,其定义如下:

$$\text{PSNR} = 10 \log(255^2 / \text{MSE})$$

解码图像和实验结果分别如图 2 和表 1。



原始图像 基本分形图像 重构图像

图 2 不同算法下的解码图像

表 1 512×512 Lena 图像的实验数据

	基本分形方法	文中算法
PSNR/dB	26.46	30.15
Time/s	64	11

5 结束语

通过实验结果可以看出,在图像质量方面,文中方法优于基本分形方法;从主观方面分析,重构图像的质量和原始图像相比,还有待进一步改进;从编码时间来看,文中算法比基本分形方法所用时间要少。从综合性能比较,结合 DCT 补偿方法更接近实际应用,既能提高编码速度,又不会使图形质量 (PSNR) 明显下降。

参考文献:

[1] Barnsley M F. Fractal everywhere[M]. New York: Academic (下转第 68 页)

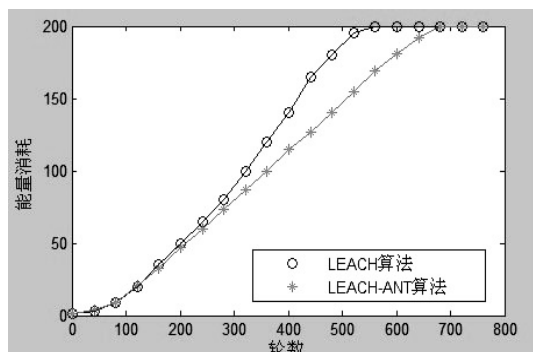


图 4 节点的平均能耗

4 结束语

由于无线传感器网络自身特有的性质,使得其应用过程中,能量消耗受到了一定的限制,成为制约传感器网络发展的一个关键性问题。针对无线传感器网络路由协议的设计要求,文中在 LEACH 算法的基础上,从节省能量和延长网络生命周期两个方面对 LEACH 算法进行了改进,提出了一种基于蚁群优化的无线传感网络路由算法。创新点在于成簇方式中成簇半径随着簇首距离 Sink 越远而越小以及通过蚁群算法指导 LEACH 中簇首节点间建立簇间路由,用剩余能量与路由长度确定遗留信息素。通过仿真表明改进算法可以有效延长节点的生存时间、减少能量消耗。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer networks, 2002, 38 (4): 393-422.
- [2] 孙利民, 李建中, 陈渝. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

- [3] 王殊, 阎毓杰, 胡富平, 等. 无线传感器网络的理论及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [4] 曹建玲, 任智. 无线传感器网络路由协议综述 [J]. PLC 技术应用 200 例, 2010(26): 3-5.
- [5] 胡钢, 谢冬梅, 吴元忠. 无线传感器网络路由协议 LEACH 的研究与改进 [J]. 传感技术学报, 2007, 20(6): 1391-1396.
- [6] 姜华, 郑春雷, 刘海涛. 无线传感网络中链路级能量有效策略的研究 [J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2738-2742.
- [7] Lindsey S, Raghavendra C, Sivalingam K M. Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics [J]. IEEE transactions on parallel and distributed systems, 2002, 13(9): 924-935.
- [8] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C] // Proceedings of the 33rd Hawaii international conference on system sciences. [s. l.]: IEEE Computer Society, 2000: 30-47.
- [9] 王国芳, 李腊元. 基于 LEACH 和 PEGASIS 的节能可靠路由协议研究 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(11): 115-118.
- [10] 张倬. 改进的 Ant 算法在 ZigBee 网络路由中的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [11] 马良, 项培军. 蚂蚁算法在组合优化中的应用 [J]. 管理科学学报, 2001, 4(2): 32-37.
- [12] Dorigo M, Maniezzo V, Colomni A. Ant system: Optimization by a colony cooperating agents [J]. IEEE transactions on systems, man and cybernetics-Part B, 1996, 26(1): 1-13.
- [13] 郝晓青. 基于蚁群优化的无线传感器网络路由算法 [J]. 电脑知识与技术, 2010(1): 34-36.
- [14] 郭春学, 肖丽. 基于蚁群算法的低能耗 LEACH 协议分析 [J]. 上海理工大学学报, 2010, 32(1): 99-102.

(上接第 64 页)

- [1] Press, 1988.
- [2] Barnsley M F, Sloan A D. A better way to compress images [J]. BYTE, 1988(1): 215-223.
- [3] Jacquin A E. Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformations [J]. IEEE transactions on image processing, 1992, 1(1): 18-30.
- [4] 高文. 多媒体数据压缩技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.
- [5] 姚敏. 数字图像处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] 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.
- [7] Davis G M. A wavelet-based analysis of fractal image compression [J]. IEEE trans on image processing, 1998, 7(2):

- 141-154.
- [8] 纪秀花. 适于低码率图像编码的 DCT 快速算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(10): 1355-1359.
- [9] 谢敏, 黄贤武, 李秋菁, 等. 一种快速 DCT 图像压缩算法的研究 [J]. 计算机应用研究, 2002(2): 150-152.
- [10] 丛爽, 蒲亚坤, 王军南. DCT 图像压缩方法的改进及其应用 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(18): 160-163.
- [11] 张爱华, 杨培, 盛飞, 等. 基于快速分形的 DCT 补偿图像压缩编码算法 [J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(5): 153-156.
- [12] 张爱华, 盛飞, 杨培, 等. 基于相似比的快速分形编码算法 [J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(11): 176-178.

结合DCT补偿的分形图像编码

作者：[张爱华](#)，[常康康](#)，[ZHANG Ai-hua](#)，[CHANG Kang-kang](#)

作者单位：[南京邮电大学 理学院, 江苏 南京, 210023](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

Computer Technology and Development

ISTIC

年，卷(期)：

2014(1)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201401016.aspx