基于子块特征的快速分形图像压缩算法①

吴晓燕[1] 刘希玉[1] 徐 庆[2] (1.山东师范大学 管理与经济学院 山东 济南 250014;
2.山东师范大学 信息学院 山东 济南 250014)

摘 要： 针对分形图像压缩编码时间过长的缺点，提出一种改进算法，利用子块的相似特征，将基本分形图像压缩的全搜索过程，转化为相对差意义下的最近邻搜索，在搜索过程中只搜索与值域块相对差相近的码本块，减少了搜索范围。实验结果表明，该方法与基本分形图像压缩相比，在保证解码图像质量的同时，有效地加快了编码速度。

关键词： 分形 图像压缩 最近邻

Fast Fractal Image Coding Algorithm Based on Sub-Block Feature

WU Xiao-Yan[1], LIU Xi-Yu[1], XU Qing[2]
(1.College of Management and Economics, Shandong Normal University, Jinan 250014,China;
2.College of Information, Shandong Normal University, Jinan 250014,China)

Abstract: To reduce the long encoding time of fractal compression algorithm, this paper proposes an improved algorithm. It uses the similar characteristics of sub-block, and converts the basic fractal image coding's entire search into the nearest neighbor search of a relative difference defined in this paper, and to the only search of the domain blocks which have the same difference. This method can reduce the search space. Experimental results demonstrate that, compared with the basic fractal image coding, the proposed algorithm can speed up the encoding process with the gurantee of the image's quality.

Keywords: fractal; image compression; classification

1 引言

分形图像压缩是根据现实图像具有自相似性来实现图像压缩的一种有损编码方法。利用分形实现图像压缩的思想由 Barnsley 在 1988 年首次提出[1]，他通过运用迭代函数系统(Iterated Function System IFS)，对整体与局部具有很强自相似性质的图像进行编码，实现了很高的压缩比,但他并没有给出适用于所有图像的编码算法。为解决此编码方案的局限性，Jacquin 在 1990 年提出了基于局部迭代函数系统(Partitioned IFS)的分形块编码[2]，并给出了第一个由计算机自动完成的分形图像编码算法，实现了较高的压缩比，但编码时间过长限制了其实用性。此后，在专家和学者的不断探索下，分形图像编码以其潜在的高压缩比、解码图像分辨率无关等优点成为当前最有发展前途的编码之一。

近年来，许多专家和学者对分形图像压缩算法的编码时间和解码图像质量等方面进行了改进和研究，取得了一定的效果，但如何在保证图像解码质量的同时缩短编码时间仍是分形图像压缩中急需解决的问题。

① 基金项目:国家自然科学基金(60873058, 60743010);山东省自然科学基金重大项目(Z2007G03).
收稿时间:2009-04-23

2 基本分形图像编码算法

基本分形图像压缩过程描述如下[3]：设 μ_{orig} 为一幅待编码的大小为 $N\times N$ 的图像，由原图像分割出两类子块：Range 块(R 块)和 Domain 块(D 块)。Range 块由一系列互不重叠且覆盖原图像的大小为 $B\times B$ 的子块 $\{R_1,R_2\cdots,R_{N_r}\}$ 组成，其中 $N_r=\left(\frac{N}{B}\right)^2$，$N_r$ 为 R 块的总个数。Domain 块是将原图按步长 σ 划分为相互重叠且大小为 $X\times X$ 的子块 $D_1,D_2,\cdots,D_M$ 组成，一般令 $X=2B$，其中 M 为 D 块的总个数，$M=\left(\frac{N-2B}{\sigma}+1\right)$。为使 D 块收缩为与 R 块具有相同的大小，需要对 D 块进行收缩变换，有如下两种方式：4-邻域像素值平均和欠采样。4-邻域像素值平均是将 D 块内的像素点，划分为 2×2 大小互不重叠且覆盖 D 块的 $B\times B$ 个部分，对每个部分，即对 2×2 内的四个点像素值求和并求平均，得到一个新的像素值，将这个值作为 D 块收缩后的像素点的像素值，这样 D 块就收缩为与 R 块具有相同大小的码本块 $\hat{D}$；欠采样也是首先将 D 块分为 2×2 大小互不重叠且覆盖 D 块的 $B\times B$ 个部分，对每个部分只选择一个点的像素值作为 D 块收缩后的像素值，从而得到和 R 块具有相同大小的 $\hat{D}$ 块。为了提高图像的编码质量，在编码过程中还需对收缩后得到的 $\hat{D}$ 块进行八种等距变换 $t_k,k=1,\cdots,8$。为方便描述，用 $\hat{D}_{i,j}$ 表示在 $\hat{D}$ 块中位置为(i,j) 的点的像素值，八种等距变换描述如下[4]：

① 恒等变换：

$$\left(t_1\hat{D}\right)_{i,j}=\hat{D}_{i,j} \tag{1}$$

② 关于铅锤中轴 $(j=(B-1)/2)$ 的对称反射：

$$\left(t_2\hat{D}\right)_{i,j}=\hat{D}_{i,B-1-j} \tag{2}$$

③ 关于水平中轴 $(i=(B-1)/2)$ 的对称反射：

$$\left(t_3\hat{D}\right)_{i,j}=\hat{D}_{B-1-i,j} \tag{3}$$

④ 关于主对角线 $(i=j)$ 的对称反射：

$$\left(t_4\hat{D}\right)_{i,j}=\hat{D}_{j,i} \tag{4}$$

⑤ 关于次主对角线 $(i+j=B-1)$ 的对称反射：

$$\left(t_5\hat{D}\right)_{i,j}=\hat{D}_{B-1-j,B-1-i} \tag{5}$$

⑥ 关于块中心逆时针旋转 90°：

$$\left(t_6\hat{D}\right)_{i,j}=\hat{D}_{j,B-1-i} \tag{6}$$

⑦ 关于块中心逆时针旋转 180°：

$$\left(t_7\hat{D}\right)_{i,j}=\hat{D}_{B-1-i,B-1-j} \tag{7}$$

⑧ 关于块中心逆时针旋转 270°：

$$\left(t_8\hat{D}\right)_{i,j}=\hat{D}_{B-1-i,j} \tag{8}$$

对 M 个 D 块进行上述的收缩变换得到的所有子块的集合组成了码本池 Ω。在编码阶段，需要对每个 R_i 块 $(i=1,2,3,\cdots,N_r)$，在码本池 Ω 中搜索码本块 $\hat{D}_j$，$\hat{D}_j\in\Omega,j=1,2,3,\cdots M$，并对它进行八种等距变换 $t_k,k=1,\cdots,8$，将 $\hat{D}_j$ 扩大为八个子块，使得 R_i 与 $s\cdot t_k\left(\hat{D}_j\right)+g\cdot I$ 的 2-范数误差最小，其中 I 为亮度值均为 1 的 $B\times B$ 大小的常值块，s 和 g 为对比度和亮度调整因子。为寻找 R_i 的最佳匹配块，需对 R_i 求下面的极小化问题：

$$E\left(R_i,\hat{D}_j\right)=\min_j\left\{\min_{s,o\in\Omega}\left\|R_i-\left(s\cdot t_k\left(\hat{D}_j\right)+g\cdot I\right)\right\|\right\} \tag{9}$$

$E\left(R_i,\hat{D}_j\right)$ 为 R_i 和 $\hat{D}_j$ 的均方误差(Mean Square Error，MSE)。为了理论上保证解码迭代序列收敛，限制参数 s 满足约束 $|s|<1$。每个子块 R_i 求得的四元组 (k,j,s,g)，这个四元组组成了 μ_{orig} 的分形码。

解码过程相对简单，通过将分形码描述的压缩变换迭代作用于任意一个与原图像相同大小的图像来生成，Banach 不动点定理保证了解码序列的收敛性，拼贴定理则保证了其变换不动点图像是原图像的一个近似[5]。

3 编码算法的改进

为了解决编码时间过长的问题，很多学者进行了研究，其中比较典型的加快算法就是在码本块的形态特征意义下的邻域内搜索，缩减搜索的码本数[6]。本文对基本分形图像压缩的改进也是基于这种思想。

3.1 算法分析

本文的改进算法利用了自然图像跨尺度间的相似性，通过定义图像块相似的特征实现对码本块的分类，正是自然界的景物图像存在统计的或确定的自相似性使得分形压缩成为可能。本文对码本块 $\hat{D}$ 进行处理，将每个 $\hat{D}$ 块分为两个内部子块 P_1,P_2，P_1,P_2 在垂直方向上均分 $\hat{D}$，定义左右两个子块的差 $\Delta\hat{D}=\hat{D}_{p1}-\hat{D}_{p2}$，子块

的相对差为 $\varphi_{\hat{D}}=\frac{\Delta\hat{D}}{\|\hat{D}\|}$，其中 $\|\hat{D}\|$ 为 $\hat{D}$ 的二范数。C.K.Lee 等人由式(9)利用最小二乘法导出下式：

$$E(R,\hat{D})^2=\|R-\bar{r}\cdot I\|^2-s^2\|\hat{D}-\bar{d}\cdot I\|^2 \tag{10}$$

其中 $\bar{r}$ 和 $\bar{d}$ 为 R 块和 $\hat{D}$ 块的均值，在文献[6]中对公式(10)进一步分析，得出下面的公式：

$$R-\bar{r}\cdot I\approx s(\hat{D}-\bar{d}\cdot I) \tag{11}$$

由文献[6]分析得，若 $\hat{D}$ 是 R 块的最佳匹配，则它们去均值后仅相差一个常数倍。由前面的定义知 R 块由子块 P_1,P_2 组成，若 $\hat{D}$ 是 R 块的最佳匹配，则相应的子块也是 R 的子块的最佳匹配，即 R 块和 $\hat{D}$ 块的子块差也只相差一个常数倍 s，即：

$$\Delta R\approx s\Delta\hat{D} \tag{12}$$

因此可将内部子块差作为图像块相似的特征，本文对公式(12)进一步转化，对 s 的取值采用预设的方法，令 $s=\frac{\|R\|}{\|\hat{D}\|}$，若 $\|R\|>\|\hat{D}\|$，则令对 s 做截断处理，对给定的 s 值，式(12)可表示为：

$$\Delta R\approx\frac{\|R\|}{\|\hat{D}\|}\Delta\hat{D} \tag{13}$$

即：

$$\varphi_R\approx\varphi_{\hat{D}} \tag{14}$$

因此本文将 $|\phi_{\hat{D}}|$ 作为 R 块与 $\hat{D}$ 块匹配的依据。由公式(14)可知，如果 $\hat{D}$ 块是 R 块的最佳匹配块，则它们的相对差近似相等，这说明相对差接近是 $\hat{D}$ 块为 R 块最佳匹配块的必要条件，虽然反过来相对差接近并不能保证 $\hat{D}$ 是最佳匹配块，但是这个必要条件也足以保证在相对差接近的范围内可以找到最佳匹配块。因此，本文的编码过程，R 块只在相对差较近的码本块中进行搜索。

3.2 算法描述

基于上述分析，本文的算法在只在与 R 块的相对差接近的码本块中搜索，为了提高搜索速度，对 $\hat{D}$ 块按相对差大小进行升序排列，在排好序的 $\hat{D}$ 块池中采用二分搜索得到与 R 块相对差接近的邻域。

本文的算法具体描述如下：

① 设定 R 块和 $\hat{D}$ 块相对差的邻域 d。将原始图像分割成 $B\times B$ 大小的 R 块，并在原图像中按步长 σ 滑动获得 D 块池，对所有 D 采用四邻域像素平均获得码本池Ω。

② 对码本池中的码本块 $\hat{D}$ 进行预处理，每个码本块都均分为内部两个子块 P_1,P_2，并根据内部子块的相对差将码本块进行升序排列。

③ 在编码过程中，将每个 R 块分为两个子块并计算相对差，在码本池中用二分法搜索 R 块相对差的 d 邻域，在 d 邻域内对每个码本块预设对比度 s 为 R 块和 $\hat{D}$ 块的比值，量化截断处理，并计算 g 的值，选择与 R 块有最小误差 $E(R,\hat{D}_j)$ 的码本块 $\hat{D}_j$，对 $\hat{D}_j$ 进行 8 种等距变换，并计算误差 $E(R,t_k\hat{D}_j)$ 选出具有最小误差的变换 k，得到当前 R 块的分形码 (k,j,s,g)。

④ 输出分形码得到分形编码文件。

4 实验结果

采用基本分形压缩算法和本文的改进算法对 256×256 的 Lena 灰度图像进行编码。实验的运行平台为 WindowsXP(1.66G CPU/512M 内存)，用 c++在 vc6.0 环境下编写。在实验中，选取 R 块大小为 4×4，D 块为 8×8，步长 $\sigma=4$。用峰值信噪比和编码时间作为编码和解码的性能参考。峰值信噪比用如下公式计算：

$$PSNR=10\log_{10}\left(\frac{255^2}{1/N^2\sum_{i,j}\left(I_{i,j}-\hat{I}_{i,j}\right)^2}\right)(db) \tag{15}$$

其中 $I_{i,j}$ 和 $\hat{I}_{i,j}$ 分别是原图像的像素值和解码图像的像素值。

本文的算法依赖于相对差邻域 d 的取值，由相对差的公式可知相对差都小于 1，因此 d 的取值也远小于 1。d 的取值决定了块的搜索范围，d 的取值越小，每个块搜索的空间就越小，编码时间就越少，由于搜索范围的减少，可能会出现排除最佳匹配块的情况，因此信噪比有一定的下降。表 1 给出基本分形压缩算法和本文的改进算法的性能比较，图 1 给出了编解码图像。从表 1 可以看出本文的算法在峰值信噪比仅下降 0.1 即视觉豪无差别的情况下，编码速度比基本分形算法提高了十倍左右；在 d=0.05 时，峰值信噪比下降 0.21，编码速度提高了二十多倍；在 d=0.01 时，峰值信噪比下降 1.61，编码速度提高了六十倍左右。众所周知，峰值信噪比在 30 以上的图像，在视觉上并没有明显的差异，因此在实际应用中可以选择 d=0.05。从图 1 中可以看出在峰值信噪比下降 0.21

的情况下，图像视觉上并无明显变化。

表 1　实验结果

改进的算法		d=0.01	d=0.05	d=0.1	基本分形算法
Lena	PSNR(dB)	29.08	30.48	30.57	30.69
	时间(s)	0.51	1.30	2.27	34.9

(a) Lena256 原图

(b) 基本分形算法解码图

(c) 改进算法 d=0.01 解码图

(d) 改进算法 d=0.05 解码图

(e) 改进算法 d=0.1 解码图

图 1　基本分形算法和本文算法的解码图像

5 结语

针对基本分形图像压缩编码时间过长的问题，本文提出了一种基于子块特征的改进算法，通过搜索与块相对差相近的码本块来取代基本分形图像压缩中的全搜索过程，有效地减少了在搜索过程中对不必要码本块的匹配，缩小了被搜索码本块的范围，达到了节约编码时间的目的。实验表明，在保证图像编码质量的情况，本文算法的编码速度与基本分形图像压缩算法相比，编码速度提高了十倍以上。大量的实验结果证明，相对于基本分形压缩算法，本文的改进算法具有更好的性能和应用前景。

参考文献

1 Barnsley MF, Sloan AD. A better way to compress images. BYTE, 1988,(1):215－223.

2 Wang SS, Liao WK. Weighted fractal image coding. IEEE International Conference on Sys tems, Man and Cybernetics, 2007,7(10):1101－1105.

3 Jacquin AE. Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformations. IEEE Transactions on Image Processiong, 1992,1(1):18－30.

4 Jacquin AE. Fractal image coding:A review. Proc. IEEE, 1993,81(10):1451－1465.

5 何传江,李高平.分形图像编码的改进算法.计算机仿真, 2004,21(8):66－69.

6 何传江,刘维胜,申小娜.基于行列式的快速分形图像编码算法.中国图像图形学报, 2008,13(3):435－439.