基于与中间块比较的快速分形图像编码

裔传俊 徐 涛
(南京航空航天大学信息科学与技术学院, 南京 210016)

摘 要 针对基本分形图像编码算法时间过长的问题, 提出了一种基于与中间块比较的快速分形编码算法。该算法是对基于形态特征的快速分形图像编码算法的改进, 将形态特征意义下的最近邻匹配改进为与中间块的误差意义下的最近邻匹配, 并且在最近邻的邻域内进一步搜索最优匹配父块时, 对各父块进行 8种等距变换, 而不是在找到最优匹配父块后进行, 同时引进误差阈值来控制子块搜索的邻域范围。实验结果表明, 该算法编码速度大大提高, 并且在相近编码时间的前提下该算法的解码图像质量比基于形态特征的算法好。

关键词 分形 图像编码 图像压缩 中间块
中图法分类号: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2008)01-0053-05

Fast Fractal Image Encoding Based on Comparing with Preset Block

YI Chuan-jun, XU Tao
(*College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 210016)

Abstract In order to solve the problem of time consuming in the encoding process of the basic fractal algorithm, a faster method based on the comparison with a preset block is proposed, which is an improvement of the fast fractal image encoding algorithm based on shape feature: the nearest domain block to a range block is found in the sense of comparing with a preset block instead of shape feature. When searching for the best domain block in the vicinity of the nearest domain block, the eight isometric transformations are applied on every domain block instead of only on the best one. At the same time, an error threshold is used to control the search ing area around the nearest domain block. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm is much faster than the basic fractal algorithm and the quality of decoded image is better than the image processed by shape feature based algorithm in the premise of same encoding time.

Keywords fractal, image encoding, image compression, preset block

1 引 言

分形理论是 20世纪 70年代中期由美国科学家 Mandelbrot创立, 其研究对象是自然界非线性系统中不光滑和不规则的几何形体。1988年, Barnsley首先提出将分形理论应用于图像压缩, 但所提方法是一种交互式分形图像压缩方法, 不太实用。1989年 Jacquin提出了基于分形图像压缩的自动实现算法, 相对 Barnsley提出的方法更具实用性。

十几年来, 分形图像压缩算法以其新颖的思想、高压缩比、分辨率无关性和快速解码等优点得到国内外学者的广泛关注。但是编码时间过长成为该方法的一个瓶颈。基本分形算法编码时间长的主要原因是对所有父块进行了全局搜索, 搜索量相当大, 因此很多学者提出了基于局部搜索的快速分形编码算法。概括起来主要有两类[1]: 一类是将子块和父块进行分类[2,3], 将全局搜索转变为类内搜索, 从而在构造子块对应的分形码时, 只在同类的父块中搜索; 另一类是缩小父块的搜索范围, 将全局搜索缩小为邻域搜索, 在构造子块对应的分形码时, 可以在该子块邻域内搜索, 或者在某父块"邻域"内搜索[4,5]。此外, 许多学

收稿日期: 2006-07-11; 改回日期: 2006-09-04
第一作者简介: 裔传俊 (1981~), 女。南京航空航天大学计算机应用技术专业硕士研究生。主要研究方向为图像处理。E-mail: ycjl981@126.com

者对分形与其他方法(小波变换、DCT、矢量量化等)混合编码进行了研究,并取得了很好的效果。

基于局部搜索的方法相对于基本分形算法而言,是一种有损方法,以牺牲图像质量来换取编码时间的减少。文献[4]提出的基于形态特征的快速算法(简称形态算法)也是一种基于局部搜索的有损算法,它将子块匹配问题转化为形态特征意义下的最近邻匹配问题,接着在以最近邻为中心的 k邻域内进一步搜索最优匹配父块,待找到最优匹配父块后再进行8种等距变换,从而确定出使该子块与最优匹配父块误差最小的等距变换号,构成分形码。本文以形态算法为基础,提出了一种基于与中间块比较的快速分形编码算法,将形态特征意义下的最近邻匹配问题改进为与中间块的误差意义下的最近邻匹配问题,中间块的选取同文献[6]、[7],并且在以最近邻为中心的邻域内进一步搜索最优匹配父块时,引进误差阈值来控制子块搜索的邻域范围,同时在搜索时就对各父块进行 8种等距变换,而不是在找到最优匹配父块后进行。实验结果表明,与基本分形算法相比,该算法编码时间大大减少,同时在相近编码时间的前提下,该算法的客观图像质量(PSNR)和主观图像质量均比形态算法好。

2 基本分形图像编码算法

分形图像编码以迭代函数系统 IFS(iterated function system)和拼贴定理(the collage theorem)为理论基础,利用图像的自相似性达到压缩的目的。

在描述算法之前先定义度量块与块之间相似性的误差公式。设 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 均为 $r\times r$大小的块,则 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的误差为

$$\phi(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=\min_{1\leqslant k\leqslant 8}\min_{s,g\in\boldsymbol{R}}\{\|\boldsymbol{A}-(sT_k(\boldsymbol{B})+g\boldsymbol{I})\|\} \tag{1}$$

其中,T_k 是 Jacquin提出的 8种等距变换(旋转与反射)之一,$\boldsymbol{I}$ 是灰度值均为 1的大小为 $r\times r$ 的块,$\|\cdot\|$是 2维范数符号,s为比例因子,g 为灰度偏移量,s和 g 的求取可采用最小二乘法:

$$s=\frac{\langle \boldsymbol{A}-\bar{A}\boldsymbol{I},T_k(\boldsymbol{B})-\bar{B}\boldsymbol{I}\rangle}{\|T_k(\boldsymbol{B})-\bar{B}\boldsymbol{I}\|} \tag{2}$$

$$g=\bar{A}-s\bar{B} \tag{3}$$

其中,$\bar{A}$和 $\bar{B}$分别是 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 的均值,$\langle\cdot,\cdot\rangle$是矩阵内积符号。

基本分形图像编码算法描述如下:

(1) 将原图 $\boldsymbol{X}$ 分割成 m 个 $r\times r$大小的子块 $\{\boldsymbol{R}_1,\boldsymbol{R}_2,\cdots,\boldsymbol{R}_m\}$,满足 $\bigcup_{i=1}^{m}\boldsymbol{R}_i=\boldsymbol{X}$ 且 $R_i\cap\boldsymbol{R}_j=\varnothing$, $\forall i\neq j(i,j\in\{1,2,\cdots,m\})$。

(2) 将原图按步长 $step$ 分割成 n个可重叠的 $2r\times 2r$大小的父块 $\{\boldsymbol{D}_1,\boldsymbol{D}_2,\cdots,\boldsymbol{D}_n\}$,满足 $\bigcup_{i=1}^{n}\boldsymbol{D}_i\subseteq\boldsymbol{X}$,所有父块就构成了码本。

(3) 对每一个子块 $\boldsymbol{R}_i$,在码本中搜索最优匹配父块 $\boldsymbol{D}_j$,即搜索使 $\phi(\boldsymbol{R}_i,\varphi(\boldsymbol{D}_j))$最小的父块 $\boldsymbol{D}_j$,搜索时对父块进行 8种等距变换。其中,$\varphi(\boldsymbol{D}_j)$是对 $\boldsymbol{D}_j$ 进行空间压缩,一般指 4邻域平均。

(4) 记录分形码:记录使 $\phi(\boldsymbol{R}_i,\varphi(\boldsymbol{D}_j))$最小的 s、g、等距变换号 t_k 以及父块 $\boldsymbol{D}_j$ 的位置 (d_x,d_y),进而得到子块 $\boldsymbol{R}_i$ 的分形码 $(d_x,d_y,t_k,\hat{s},\hat{g})$。其中,$\hat{s}$和 $\hat{g}$ 是 s和 g 分别按 5bits、7bits量化截断后的结果。

图像解码是以一幅与原始图像相同大小的任意图像为初始解码图像,根据分形码,对每个子块,用其最优匹配父块的压缩映射去代替,所有子块进行一次代替后被视作为一次迭代,经 8次迭代后基本收敛。其中每次迭代使用的码本均由上一次迭代所获得的图像提供,首次迭代使用的码本由初始图像提供。

3 基于与中间块比较的快速算法

文献[4]提出的基于形态特征的快速算法,是将子块匹配问题转化为形态特征意义下的最近邻匹配问题。详细的算法描述参见文献[4]。本文提出的基于与中间块比较的快速分形图像编码算法是在形态算法的基础上引入以下 3种方案后得到的快速算法:

方案 1 在形态算法中,每一个需要搜索的子块最终搜索的码本数为 $2k+1$,由于子块在搜索过程中不进行 8种变换,而是在找到匹配父块后才进行,则此时子块搜索时的搜索量约为 $2k+1$。然而,倘在搜索父块时即对父块进行 8种等距变换,相当于码本数扩大了 8倍,即此时子块搜索时的搜索量约为 $(2k+1)\times 8$,显然这比匹配好父块后再进行 8种变换所花时间长,但得到的解码图像质量明显好于匹配好父块后再进行 8种变换的情况。因此本文在搜索时即对各父块进行 8种变换以提高图像质量,而通过选取较小的 k来解决由 8种变换带来的编码时间长的问题。

方案 2 在基本分形算法中,每一子块均与全

局最优父块匹配, 所以解码图像质量很好。而大多数改进的分形算法都是基于局部搜索, 不能保证每个子块最终的最优匹配父块就是全局最优父块, 因此解码图像质量较基本分形算法有所下降。形态算法得到的解码图像质量除了受何时进行 8种变换的影响外, 还受另外两个因素的影响: 一方面受 k的取值影响, k越大, 全局最优父块在 k-邻域中的可能性越大, 图像质量越好, 反之则越差; 另一方面受限于每一子块的形态意义上的最近邻是否就在其全局最优父块附近, 最近邻离最优父块越近, 最优父块在 k-邻域内的可能性越大, 图像质量越好, 反之则越差。如能找到其他意义下的最近邻比形态意义下的最近邻更接近全局最优父块, 那么全局最优父块在 k-邻域中的可能性更大, 图像质量就会更好。本文提出了与中间块比较的方案, 将子块匹配问题转化为与中间块的误差意义下的最近邻匹配问题。它基于这样的假设: 某子块与给定的中间块的相似度 (误差) 和某父块与此中间块的相似度 (误差)越接近, 则此子块与该父块成为匹配对的可能性越大。本文的实验结果已验证了其合理性。

方案 3　在形态算法中, 每一子块找到其最近邻后, 接着在以其最近邻为中心的 k-邻域内进一步搜索局部最优匹配父块。然而某些子块在比 k-邻域小得多的邻域范围内即可匹配到较优的父块, 而某些子块搜索完 k-邻域也得不到较好的匹配父块, 对于前者, 可以使其在小范围邻域内搜索, 以节约编码时间, 对于后者, 可以适当扩大搜索的邻域范围, 以提高图像质量。本文引进误差阈值来控制子块搜索的邻域范围, 使子块先在小范围邻域内搜索局部最优父块, 若得到的最小误差大于误差阈值, 就按给定步长扩大搜索的邻域范围 (不包括上次搜索过的父块)进一步搜索。然而某些子块即使进行全局搜索, 得到的最小误差也未必会小于误差阈值, 为了节约编码时间, 本文增加了对扩大邻域范围搜索的最大次数的限制。

综上, 本文快速算法的具体步骤归纳如下:

(1) 初始化: 设定分割父块时的步长 $step$、平滑性域值 τ、邻域数 k、误差阈值 E、邻域增加的步长 wk以及扩大邻域范围搜索的最大次数 L。

(2) 将原图 $\boldsymbol{X}$ 分割成互不重叠且覆盖原图的大小为 $r\times r$的子块 $\{\boldsymbol{R}_1, \boldsymbol{R}_2, \cdots, \boldsymbol{R}_m\}$。

(3) 计算大小为 $r\times r$的中间块 $\boldsymbol{B}$, m 为子块的个数, 则有

$$B(i, j)=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}R_k(i, j)\quad i, j\in\{1, 2, \cdots, r\}\tag{4}$$

(4) 将原图 $\boldsymbol{X}$ 按步长 $step$ 分割成相互可重叠的大小为 $2r\times 2r$的父块 $\{\boldsymbol{D}_1, \boldsymbol{D}_2, \cdots, \boldsymbol{D}_n\}$。

(5) 计算每个父块和中间块 $\boldsymbol{B}$ 的误差 $\phi(\varphi(\boldsymbol{D}_j), \boldsymbol{B})$, 并按升序存储在顺序表 List中。

(6) 对于所有子块 $\boldsymbol{R}_i$ $(i=1, 2, \cdots, m)$, 计算其标准差 σ_{R_i}:

①若 $\sigma_{R_i}<\tau$, $\boldsymbol{R}_i$ 为平滑块, 直接存储其均值 $\bar{R}_i$;

②若 $\sigma_{R_i}\geqslant\tau$, $\boldsymbol{R}_i$ 为非平滑块, 计算 $\phi(\boldsymbol{R}_i, \boldsymbol{B})$, 按二分法在顺序表 List中找与 $\phi(\boldsymbol{R}_i, \boldsymbol{B})$最接近的 $\phi(\varphi(\boldsymbol{D}_j), \boldsymbol{B})$所对应的父块 $\boldsymbol{D}_j$, 取以 $\boldsymbol{D}_j$ 为中心的 k-邻域构成新的码本。在新码本中搜索与 $\boldsymbol{R}_i$ 误差最小的父块, 记搜索到的最小误差为 err:

i　若 $err\leqslant E$, 则该子块匹配结束, 记录 $\boldsymbol{R}_i$ 的分形编码 $(d_x, d_y, t_k, \hat{s}, \hat{g})$;

ii　若 $err>E$, 则按步长 wk扩大邻域范围进一步搜索, 搜索时不包括上次搜索过的父块, 直至搜索到的最小误差小于误差阈值或者扩大邻域范围搜索的次数达到了最大次数 L。当扩大邻域范围搜索的次数达到了最大次数时, 若该子块仍未找到最小误差不大于误差阈值的最优匹配父块, 就以整个搜索过程中搜索到的最小误差值对应的父块作为最优匹配父块。记录 $\boldsymbol{R}_i$ 的分形编码 $(d_x, d_y, t_k, \hat{s}, \hat{g})$。

上述快速算法中, 在计算子块、父块与中间块的误差以及子块与父块的误差时均要考虑 8种等距变换。此外, 对 s和 g采用的量化截断方法同形态算法。

图像解码: 对于平滑块直接用存储的均值代替; 对于非平滑块, 解码方法同基本分形算法的解码方法。

4　实验结果与分析

实验环境为 Pentium4 CPU 3.00GHz, 256MB内存, 用 VC++ 6.0编程。选用 256×256×8bits的 Lena图像作为实验图像。

为了比较基本分形算法、形态算法、本文提出的基于与中间块比较的快速算法的性能, 对这 3种算法均进行了编码、解码实验。

初值设置: 设置子块大小为 4×4, 生成父块时的步长 $step$ 为 8, 扩大邻域范围搜索的最大次数 L 为 4, 平滑性域值 τ取 3。由于 τ越小, 图像质量越好, 但编码时间越长; τ越大, 编码时间越短, 但图像

质量越差, 特别是当 $\tau > 3$时, 解码图像会有明显的方块效应, 综合考虑, 这里 τ取 3。

本文快速算法是在形态算法的基础上引入 3种改进方案后得到的算法, 为了体现每一种改进方案的贡献, 本文给出了每一步改进后的实验结果, 实验数据如表 1所示。其中, 第 1行是文献[4]提出的形态算法的实验数据, 它由邻域数参数 k_1 控制; 第 2行是在形态算法基础上引入改进方案 1后的实验数据, 它由邻域数参数 k_2 控制; 第 3行是在形态算法基础上引入改进方案 1、2后的实验数据, 它由邻域数参数 k_3 控制; 第 4行是在形态算法基础上引入 3种改进方案后的实验数据, 即本文快速算法的实验数据, 它由邻域数参数 k_4、邻域增加的步长 wk 及误差阈值 E 控制。其中, k_1、k_2、k_3 和 k_4 均为整数, 且取值范围均为 $\left[1, \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor\right]$, 其中, n 为父块数。对于 256×256×8bits的图像, 当子块大小为 4×4, 步长 $step = 8$时, $n = \left\lfloor \frac{256-2\times 4}{8} + 1 \right\rfloor^2 = 1\,024$, 所以 k_1、k_2、k_3、$k_4 \in [1, 511]$。

表 1 各算法的实验数据

Tab. 1 The experimental data of the algorithms

	$k_1=17, k_2=5$ $k_3=5, k_4=1$ $wk=2, E=30$		$k_1=80, k_2=25$ $k_3=25, k_4=7$ $wk=15, E=30$		$k_1=250, k_2=77$ $k_3=75, k_4=22$ $wk=35, E=20$		$k_1=511, k_2=160$ $k_3=158, k_4=43$ $wk=43, E=10$		基本算法	
	Time (s)	PSNR (dB)	Time (s)	PSNR (dB)	Time (s)	PSNR (dB)	Time (s)	PSNR (dB)	Time (s)	PSNR (dB)
形态算法	0.27	28.27	1.05	30.30	3.19	31.33	6.61	31.68		
+改进方案 1	0.25	28.39	1.05	30.55	3.16	31.77	6.59	32.53		
+改进方案 1、2	0.26	29.84	1.06	31.57	3.13	32.47	6.53	32.89		
+3种改进方案 (本文快速算法)	0.25	30.38	1.04	31.98	3.11	32.70	6.52	32.99	36.12	33.24

表 1中各参数的选取原则是使各算法在编码时间上相近, 用来比较它们在相近编码时间情况下的客观图像质量(PSNR)和主观图像质量。实验数据表明, 每一次改进均使算法的 PSNR得到了提高, 即每一次改进对本文快速算法的性能都做出了贡献, 其中, 用与中间块的误差意义下的最近邻代替形态特征意义下的最近邻的方案贡献最大。此外, 从表 1中的数据还可以看出: 与基本分形算法相比, 虽然本文快速算法的图像质量有一定的下降, 但编码时间大大减少; 与形态算法相比, 在相近编码时间的前提下, 本文快速算法的 PSNR比形态算法高出 1.31~2.11dB。

图 1给出了基本分形算法和形态算法、本文快速算法取编码速度最快的第 1组参数 ($k_1=17$, $k_4=1$, $wk=2$, $E=30$)时的解码图像。从主观图像质量来看, 本文快速算法得到的解码图像质量比形态算

(a) 基本分形算法 (b) 形态算法 (c) 本文快速算法

图 1 解码图像

Fig. 1 Decoded images

法好, 而不如基本分形算法, 但此时该算法的编码时间比基本分形算法加快了 144.48倍, 在某些实时性要求较高、图像质量要求相对较低的场合, 该算法将会具有很好的应用前景。

5 结　论

本文提出了一种基于与中间块比较的快速分形图像编码算法, 将子块匹配问题转化为与中间块的误差意义下的最近邻匹配问题, 同时引进误差阈值来控制子块搜索的以最近邻为中心的邻域范围, 并且在搜索匹配父块时, 对各父块进行 8种等距变换。实验结果验证了本文快速算法的有效性: 与形态算法比较, 在具有相近编码时间的情况下, 本文快速算法的 PSNR更高, 而且主观图像质量也更好; 与基本分形算法比较, 尽管解码图像质量有一定的下降, 但编码速度大大提高。在某些实时性要求较高, 而对图像质量要求相对较低的场合, 该算法有较好的应用前景。

参考文献 (References)

1 Li Ming-sui, Ou Shan-hu, Zhang Heng. New evolvement in the research of the methods in fractal image compression[J]. Journal of Engineering Graphics, 2004, **25**(2): 143~152 [李明水, 欧珊瑚, 张珩. 分形图像压缩方法研究的新进展[J]. 工程图学学报, 2004, **25**(2): 143~152]

2 Jacquin A E. Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformations[J]. IEEE Transformations on Image Processing, 1992, **1**(1): 18~30.

3 Zumbakis T, Valantinas J. A new approach to improving fractal image compression times[A]. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis[C], Zagreb, Croatia, 2005: 468~473.

4 He Chuan-jiang, Yang Jing. Fast fractal image encoding based on shape feature[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, **10**(4): 410~414 [何传江, 杨静. 基于形态特征的快速分形图像编码[J]. 中国图象图形学报, 2005, **10**(4): 410~414]

5 He Chuan-jiang, Jiang Hai-jun, Huang Xi-yue. Fast fractal image encoding based on mean deviation-ordered[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, **9**(9): 1130~1134 [何传江, 蒋海军, 黄席樾. 基于平均偏差排序的快速分形图像编码[J]. 中国图象图形学报, 2004, **9**(9): 1130~1134]

6 Riccio D, Nappi M. Deferring range/domain comparisons in fractal image compression[A]. In: Proceedings of the 12th International Conference on Image Analysis and Processing[C], Mantua, Italy, 2003: 412~417.

7 Distasi R, Nappi M, Riccio D. A range/domain approximation error-based approach for fractal image compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, **15**(1): 89~97.