

基于相似块线性旋转变换的分形图象编码方法

何佳 刘政凯 俞能海

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 合肥 230027)

摘要 针对 Jacquin 分形编码算法中选取的相似块数目较少, 从而与图象块匹配的效率不高的缺点, 提出了通过线性旋转变换来扩充相似块数目, 以进行最佳匹配的分形编码方法。与通常方法不同, 为了充分发掘图象自身的相似性, 该方法首先在图象中的多个方向上选取相似块, 然后通过对称变换和线性旋转变换生成新的相似块集来进行编码。当旋转方向数取 4 时, 就可以将 Jacquin 提出的 Isometries 变换归结为该方法的一种特例。通过调整旋转方向的方向的数目, 能有效地改善 Isometries 变换相似块数目不足的缺点, 并得到了较优的压缩结果。另外, 针对线性旋转变换还提出了基于查找表的加速算法, 从而显著减少了编码时间。

关键词 分形图象编码 线性旋转变换 Isometries 变换 图象块 相似块

中图分类号: TN919.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2001)07-0657-05

A Fractal Image Coding Method Based on the Linear Rotation Transforms of Domain Blocks

HE Jia, LIU Zheng-kai, YU Neng-hai

(Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract Because the number of domain blocks is not sufficient in the Jacquin's fractal image coding method, the matching between domain blocks and range blocks is not very effective. To improve the matching efficiency, this paper puts forward a new fractal image coding method, which increases the number of domain blocks through linear rotation transforms and gets the optimal matching. Unlike in the ordinary methods, in order to exploit fully the self-similarity in the image, this method chooses domain blocks from multiple directions in the image, then generates new sets of domain blocks through a symmetric transform and linear rotation transforms. The Isometries transforms proposed by Jacquin can be viewed as a special case of this method when the rotation direction number is fixed to 4. This method modifies the number of rotation directions, thus amends for the inadequacy of domain blocks in the Isometries transforms, and gets a better compression result. An acceleration algorithm based on a lookup table is also established for the linear rotation transforms, which effectively shortens the encoding time.

Keywords Fractal image coding, Linear rotation transforms, Isometries transforms, Range block, Domain block

0 引言

分形图象编码是图象编码的一个崭新的研究领域, 1988年, Barnsley 首先提出了以迭代函数系统 IFS (Iterated Function System) 对图象进行编码的思想^[1]; 其后, Jacquin 又以局部 IFS 映射的思想实现了基于块的自动分形图象编码系统^[2], 从此, 分形编码就受到了广泛的关注与研究。

在分形编码中, 设 I 是灰度取值 $[0, g]$ 的图象, 则 $I \subset R^3$ 。编码时, 首先将图象划分为不重叠的子块 R_i , 若 $R_i \cap R_j = \emptyset, i \neq j, \cup R_i = I$, 则称 $R_i (i=1, \dots, u)$ 为图象块 (Range Block); 若设 D_j 是图象的一个子块, 则称 $D_j (j=1, \dots, v)$ 为相似块 (Domain Block)。

设: $F_j = \{f: D_j \rightarrow R^3; f \text{ 是仿射变换}\}$

记第 j 个相似块 D_j 到第 i 个图象块 R_i 的仿射变换为 $f_{ij}, f_{ij} \in F_j$, 且 f_{ij} 需满足

$$d(R, f_{i,j}(D_k)) \leq d(R, f(D_j)) \quad \forall f \in F, \forall j$$

其中, d 表示图象块与相似块经过仿射变换后的距离。

则分形编码的目的是寻找 $f_{i,k}(D_k)$, 使得 $f_{i,k}(D_k)$ 满足:

$$d(R, f_{i,k}(D_k)) = \min\{d(R, f_{i,j}(D_j))\} \quad \forall j$$

而仿射变换 f 可以写成如下一个矩阵变换

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ w \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

虽然对于矩阵的每个元素, 可以采取不同的编码方法, 但如何高效地对矩阵元素进行编码, 则是一个值得研究的问题。

1 基于相似块 Isometries 变换的分形编码方法

如今, 对分形图象编码的改进, 多数均集中在自适应的编码算法与搜索算法上, 很少涉及 Jacquin 提出的线性变换模型。分形图象编码在搜寻图象块与相似块之间相似性的过程中, 要进行两种仿射变换, 其中一种是相似块的 Geometric 变换, 在这种变换中, 一般取相似块的尺寸为图象块尺寸的两倍, 即, $m = 2n$, 其中, m 是相似块尺寸, n 是图象块尺寸; 另一种是 Massic 变换, 在此变换中 Jacquin 提出了基于方块的 8 种 Isometries 变换。相似块需在进行这两种仿射变换后, 再与图象块进行匹配。一般分形编码方法的变换都是以这 8 种 Isometries 变换为基础, 仅在别的方面进行改进。

Isometries 变换定义如下:

设变换前图象中, 坐标 (i, j) 处的灰度值为 $\mu(i, j)$, 第 k 种变换后, (i, j) 处的灰度值为 $\mu(i, j)_k$, 其中, $k = 0, 1, \dots, 7$, 则:

$$\begin{aligned} \mu(i, j)_0 &= \mu(i, j) \\ \mu(i, j)_1 &= \mu(i, B - 1 - j) \\ \mu(i, j)_2 &= \mu(B - 1 - i, j) \\ \mu(i, j)_3 &= \mu(j, i) \\ \mu(i, j)_4 &= \mu(B - 1 - j, B - 1 - j) \\ \mu(i, j)_5 &= \mu(j, B - 1 - i) \\ \mu(i, j)_6 &= \mu(B - 1 - i, B - 1 - j) \\ \mu(i, j)_7 &= \mu(B - 1 - j, i) \end{aligned}$$

虽然这种局限于方块区域内部的变换, 具有形式简单、编码方便的特点, 但是, 由于它局限于水平

与垂直两个方向的匹配, 因而不能充分发掘图象自身的相似性。如图 1 中的图形 A 与图形 B, 若直接使用 Isometries 变换, 则无法使两图形匹配; 如果将 B 逆时针旋转一定角度, 则可以匹配。

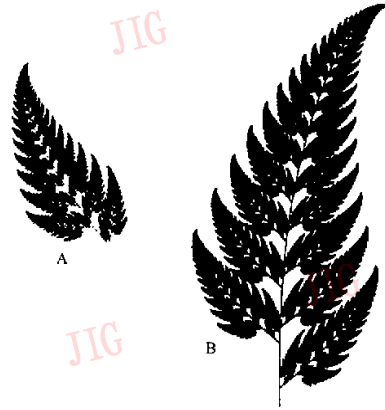


图 1 图形 A 与 B 的旋转相似性

也有人提出对相似块先进行旋转再匹配的方法, 如 Popescu 等人就提出以非线性旋转变换来扩充相似块数目的方法^[3], 以提高匹配效率, 并且得出结论, 这种变换压缩比基本不变, 图象主观质量有所提高, 但由于这种方法局限于在方块内进行非线性变换, 因而较为麻烦, 不易实现, 因此, 本文采用线性旋转变换的方法来扩充相似块数目。

2 基于相似块线性旋转变换的分形编码方法

图 2 是线性旋转变换中图象块与相似块的关系示意图。编码前图象先被分割成互不重叠的图象块, 图 2(a)中的方块代表待编码的图象块, 尺寸是 n , 其

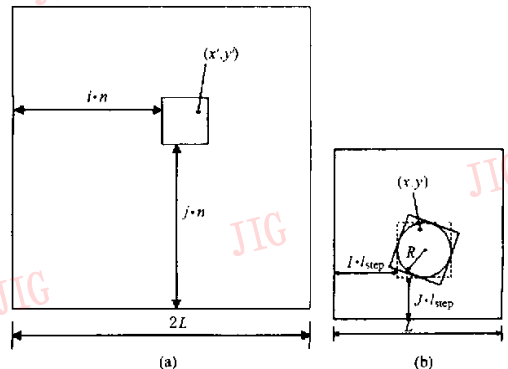


图 2 图象块与相似块关系示意图

位置是第 i 列、第 j 行的图象块,因此图象块起始位置横坐标是 $i \cdot n$,纵坐标是 $j \cdot n$. 图象块中的 (x', y') 是待编码的像素. 图 2(b) 经过图 2(a) 抽样获得, 尺寸为图 2(a) 的一半, 其中的虚线方块是 Jacquin 的方法中进行 Isometries 变换的相似块, 因为与本文中相似块概念有区别, 为叙述方便, 暂称为参考块. 其位置是第 I 列、第 J 行的参考块, 选取的参考块步长是 l_{step} , 因此参考块的起始位置横坐标是 $I \cdot l_{step}$, 纵坐标是 $J \cdot l_{step}$, 图 2(b) 中的相似块(实线)与参考块具有共同的内接圆, 半径为 R , 相似块顺时针旋转 θ 角度后与参考块重合. 编码时, 相似块中的 (x, y) 先经过 θ 角度的旋转变换(此时与参考块重合), 再经过平移变换与图象块的 (x', y') 进行匹配和后续运算. 同时, 为了扩大相似块的数量, 相似块经过旋转变换与参考块重合后, 还可以先经过一个关于对角线的斜对称变换, 然后再进行平移变换与图象块进行匹配.

变换前后的 (x', y') 与 (x, y) 的关系式可以写成式(1)所示的矩阵形式, 而且根据图 2 给出的图象块与相似块的关系, 经过推导, 即可获得式(2)至(7)所示的各个参数, 其中, $p=0$ 时不进行斜对称变换; 而 $p=1$ 时则进行斜对称变换. 结合式(1), p, θ, I, J, s, o 就是需要记录的分形编码参数.

$$a = (1 - p)\cos\theta - p\sin\theta \quad (2)$$

$$b = (1 - p)\sin\theta + p\cos\theta \quad (3)$$

$$c = p\cos\theta - (1 - p)\sin\theta \quad (4)$$

$$d = p\sin\theta + (1 - p)\cos\theta \quad (5)$$

$$e = R + i \cdot n - (I \cdot l_{step} + R)[(1 - p)\cos\theta - p\sin\theta] - (J \cdot l_{step} + R)[(1 - p)\sin\theta + p\cos\theta] \quad (6)$$

$$w = R + j \cdot n - (I \cdot l_{step} + R)[p\cos\theta - (1 - p)\sin\theta] - (J \cdot l_{step} + R)[p\sin\theta + (1 - p)\cos\theta] \quad (7)$$

编码时, p 占 1bit; s 是 Jacquin 方法中的亮度变换因子, 占 2bit; o 是亮度偏移量, 占 6bit; θ 表明相似块的旋转方向, 例如 8 个旋转方向时 θ 占 3bit; I, J 表明相似块的位置, 分配的比特数需根据选取的子块尺寸、步长、图象尺寸来确定.

由于实际数字图象各点只能取离散坐标值, 而由以上关系可知, 若要保证 (x', y') 是整数, 则 (x, y) 一般不为整数. 采用以下方法即可得到灰度值:

如果图 3 正方形 4 个角代表相邻的 4 个像素, (x, y) 落在中间, 而 S_0, S_1, S_2, S_3 是相应 4 个矩形的面积, 则点 (x, y) 的灰度值 $G[x, y]$ 为

$$G[x, y] = S_3G[x_0, y_0] + S_2G[x_1, y_1] +$$

$$S_1G[x_2, y_2] + S_0G[x_3, y_3] \quad (8)$$

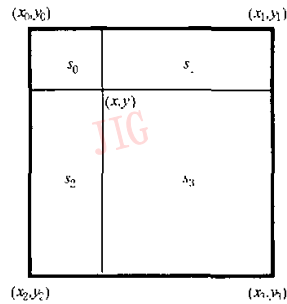


图 3 变换后的 (x, y) 的位置

但该灰度值尚需根据不同的情况确定, 当相似块的位置在图象边界处时, 则旋转前的 (x, y) 可能落在图象之外, 此时灰度值可取参考块的均值.

Jacquin 参考了矢量编码中的方法^[3], 将图象块分为 Shade, Midrange, Edge 3 类, 但在实践中发现图象块集中在 Shade 和 Edge^[5] 两类, 因此在编码中仅考虑 Shade 和 Edge 两种分类.

当线性旋转变换取 4 个方向时, 实际上就是 Jacquin 的 8 种 Isometries 变换, 因此可以认为 Isometries 变换实际上是本文提出的线性旋转变换的特例. 虽然分形图象编码具有压缩比高、解码快的优点, 但编码时间过长却不容忽视. 由于用线性旋转变换替代 Isometries 变换后, 变换中的整数运算变成了三角函数运算, 搜索的相似块数目也随着旋转方向的增加而成比例增加, 因此编码时间显著增长.

编码过程中, 在对每一个图象块进行匹配时, 需先对每一个相似块进行 Geometric 变换和 Massic 变换, 然后再进行匹配. 由于在这个过程中存在大量的重复计算, 因此提出了一种预先将相似块制表的加速算法. 仔细分析编码过程, 发现线性旋转变换中有较多的三角函数因子, 这将耗费大量的计算时间, 而 Massic 变换的其余部分的运算则仅是与一个常数因子相乘再与一个常数相加, 其耗费的时间较少, 所以采取仅将相似块进行 Geometric 变换和线性旋转变换后的中间结果预制成查找表的方法, 而 Massic 变换的其余部分则在编码过程中计算, 以此在计算时间与内存空间之间取得最佳平衡. 为简单起见, 仅对于图象块尺寸不变的情况进行说明. 具体实现中, 先预制如下一个 6 维数组作为查找表

$$\text{LookUpTable}[0..u-1][0..v-1][0..fai-1][0..1][0..n-1][0..n-1]$$

其中,由左向右第1、2维用于确定相似块的参考块在图中的横向和纵向位置,而 u 、 v 的大小与子块的尺寸、步长、图象的尺寸相关;第3维用于确定相似块旋转角度的编号, fai 是旋转角度数,一般取4、8、16、32等值;第4维用于确定相似块是否做关于对角线的斜对称变换;第5、6维用于确定相似块每一个点的位置, n 是相似块的尺寸,因为此时已经对相似块进行了抽样,所以尺寸是 $m/2$,即 n ,其一般取4、8、16等值。编码时,首先记录供比较的每一个数组元素的灰度值,并预制成查找表,然后直接从此表中取出某一相似块经过线性旋转变换之后的运算结果,再进行后续的变换及比较。这样就避免了重复计算含有三角函数的运算,也就可以显著提高编码速度。

对于 256×256 的8bit灰度图象,取8个旋转方向,图象块尺寸取 8×8 ,相似块(经过抽样)尺寸取 8×8 ,步长取8时,查找表的大小为256kB。虽然所耗内存较大,但随着存储器成本的不断降低,以存储空间换取编码时间的方法将逐渐可以接受。对于图象块尺寸可变的情况,则对每一种图象块尺寸均预制一个6维数组作为查找表。

3 实验结果及分析

采用 256×256 的8bit Lena灰度图象进行比较实验。编码时采用自适应四叉树的方法,图象块尺寸取 4×4 、 8×8 、 16×16 、 32×32 共4级。

图4显示了四叉树取不同分裂门限时的编码结果。实线、黑点、星号、加号分别是取4个(即Isometries变换)、8个、16个和32个旋转方向的编码结果。

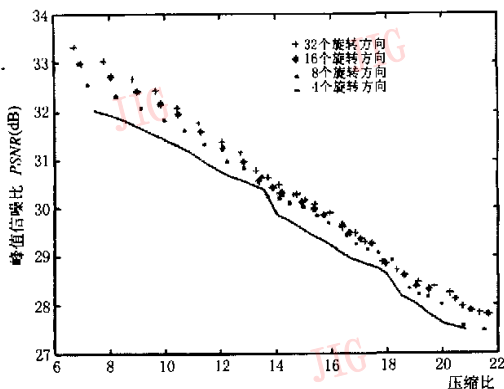


图4 不同旋转方向数的编码结果

Jacobs也采用了自适应四叉树的方法进行分形编码^[6],与本文的方法有较强的可比性。将线性旋转变换(旋转方向数取32,两种不同的分裂门限)与Jacobs的编码结果进行了比较,比较结果见表1。

表1 线性旋转变换与Jacobs的编码结果

分裂门限		峰值信噪比(dB)	压缩比
A	Jacobs	31.53	9.97
	线性旋转变换	32.08	10.45
B	Jacobs	30.58	11.85
	线性旋转变换	31.39	12.06

编码时,取8个旋转方向,当四叉树分裂门限取一定值时,查找表加速作用的比较结果见表2(源代码没有针对运算时间进行特别优化)。

表2 查找表的作用比较

	线性旋转变换	线性旋转变换 (使用查找表)
峰值信噪比(dB)	31.83	31.83
压缩比	9.99	9.99
时间(s)	62.084	3.566

观察图4可以发现,当旋转方向数增加时,一般压缩效果均会得到改善,当旋转方向大于4个时,在相同压缩比情况下,一般峰值信噪能比将提高0.3dB左右,当压缩比较低时,峰值信噪比可提高0.5至0.8dB。

另外,线性旋转变换还可以通过调整编码时的旋转方向数来得到较好的压缩效果,在旋转方向数取32时,本文得到了优于Jacobs的结果(表1)。

编码时间过长是分形编码不容忽视的缺点,因此本文编码时采用将相似块预制成查找表的方法,来去除搜索最佳匹配相似块过程中的部分冗余运算,在压缩效果不变的前提下使编码时间显著减少(表2)。

4 结论

本文提出了一种通过线性旋转变换来扩充相似块数目,以用于进行图象最佳匹配的分形编码方法。由于该方法可以将Jacquin提出的Isometries变换归结为取4个旋转方向时的一种特例,因此具有较强的灵活性,而且通过相似块的扩充(旋转角度可以取 $2\pi/8, 2\pi/16, 2\pi/32$ 弧度等不同单位步长)还可以有效地改善Isometries变换码本不足的缺点,以增

加匹配成功的可能性,从而得到较优的压缩结果.另外,本文还针对线性旋转变换提出了基于查找表的加速算法,从实际运算情况看,该算法可以显著减少编码时间.

参考文献

- 1 Barnsley M F. Fractal Everywhere. New York: Academic Press. 1988.
- 2 Jacquin A E. Fractal image coding: A review. Proceedings of the IEEE. 1993,81(10):1451~1465.
- 3 Popescu, Dimca, Hong Yan. A nonlinear model for fractal image coding. IEEE Transactions On Image Processing, 1997, 6(3): 373~382.
- 4 Jacques Vaisey, Allen Gersho. Image compression with variable block size segmentation. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992,40(8):2040~2060.
- 5 何爱军,马争鸣.快速分形图象编码.中国图象图形学报,1999,4(9):719~724.
- 6 Jacobs E W, Fisher Y, Boss R D. Image compression: A study of the iterated transform method. Signal Process, 1992,29(3): 251~263.



何佳 1997年获中国科学技术大学电子工程与信息科学系学士学位,现为该系信号与信息处理专业博士研究生,目前主要研究方向为图象压缩、分形几何及小波分析.



刘政凯 中国科学技术大学教授,博士生导师.主要从事遥感图象处理、人工神经网络及模式识别方面的研究.已发表论文60余篇,出版专著6本.



俞能海 1992年获清华大学电子工程系工学硕士学位.现为中国科技大学副教授,在职博士研究生.目前主要研究方向为图象处理与模式识别、遥感与地理信息系统的一体化技术.已发表学术论文近20篇.