

基于复指数矩的模糊聚类分形编码研究

朱智林^{1,2}, 王永玉^{1,2}, 平子良³

(1 山东工商学院 信息与电子工程学院, 山东 烟台 264005;

2 山东省高校感知技术与控制重点实验室(山东工商学院)山东 烟台 264005;

3 北京邮电大学 世纪学院, 北京 100876)

摘 要: 在分形图像编码过程中, 搜索每个 R 块的最优匹配 D 块所需要计算量相当可观, 从而导致编码时间过长. 图像像素块的复指数矩具有平移、旋转、缩放等多畸变不变性, 这种多畸变不变性与图像的分形特性相契合, 并且可以利用快速傅里叶变换实现. 本文提出基于复指数矩和模糊聚类的快速分形编码方法, 根据 D 块的复指数矩不变量利用模糊聚类对 D 块进行分类, 进一步根据 R 块的复指数矩不变量寻找最优匹配的 D 块. 实验表明, 与其它方法相比, 该快速分形编码方法在保持解码图像质量不变的同时, 大大提高了分形编码的速度.

关键词: 分形图像编码; 复指数矩; 模糊聚类

中图分类号: TN919. 81

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2018)12—0129—04

A Fast-Fractal Image Coding Based on Complex Exponent Moments and Fuzzy Clustering

ZHU Zhi-lin^{1,2}, WANG Yong-yu^{1,2}, PING Zi-liang³

(1 School of Information and Electronic Engineering, Shandong Technology and Business University,

Yantai 264005, China; 2 Key Laboratory of Sensing Technology and Control,

Shandong Technology and Business University, Yantai 264005, China;

3 Century College of Post and Communication University of Beijing, Beijing 100876, China)

Abstract: Traditional fractal coding has been widely applied to the image compression due to the high compression ratio. But the encoding in fractal image compressions are very time-consuming, because a large numbers of sequential search through a list of domains are needed to find the best match for a given range block. The Complex Exponent Moments (CEMs) are shift, rotation, scale and intensity distorted-invariant. This invariance can be used to match fractal image, and 2-D Fast Fourier Transform (FFT) algorithm is easily used to calculate CEMs. An effective fractal image compression based on CEMs and fuzzy clustering is proposed in this paper. Firstly, domain blocks are categorized using fuzzy c-mean-clustering approach. Then range blocks are compared to find the best domain blocks based on the CEMs. It shows in experimental results that the encoding is speed up with better performance in contrast with other fractal algorithms.

Key words: fractal image compression; complex exponent moments(CEMs); fuzzy clustering

1 引言

分形编码压缩算法是 Jacquin 于 1992 年首次提出^[1]. 由于分形编码具有很高的压缩能力、解码速

度快、解码图像与分辨率无关等特点, 分形编码压缩成为目前最有发展前途的图像编码技术之一. 分形编码的缺点是计算量大、耗时多, 将分形编码应用于图像压缩的关键是提高编码计算速度. 编码中最耗

时的过程是搜索与每个 R 块最佳匹配的 D 块. 为解决此问题, 将图像块进行分类是一种有效的方法. 现有的代表性分类方法有 Fisher 分类、Hurtgen 分类、Mario 分类、模糊分类和 Kohonen 自组织特征映射分类等, 但这些方法都有不足之处. 文献[2]提出了基于 Krawtchouk 矩和模糊核聚类对 R 块和 D 块进行分类的算法, 不仅提高了解码质量, 而且减少了分形编码的时间.

本文将很好体现图像块主要特征的复指数矩 (Complex Exponent Moments, CEM) 作为图像块的特征描述量, 采用模糊聚类分析算法对 R 块和 D 块进行匹配分类. 将大大缩小匹配搜索的范围, 加速搜索匹配运算, 减少编码时间, 实现图像快速分形编码压缩.

2 复指数矩的定义及计算

图像矩的研究经历了一个很长的发展过程. M. K. Hu 1961 年提出用矩的概念描述图像^[3]. 后来, 人们提出了旋转矩、复数矩、勒让德矩、Zernike 矩等正交图像矩, 在这些图像矩中, Zernike 矩应用最为广泛^[4]. 1994 年盛云龙等提出了正交傅里叶-梅林 (OFMM) ^[5], 2003 年以后, 平子良等提出了切比雪夫-傅里叶矩、雅可比-傅里叶矩、圆谐-傅里叶矩等一系列正交多畸变不变图像矩, 这些图像矩的性能都超过了 Zernike 矩^[6], 并且证明上述一系列正交多畸变不变图像矩, 都是雅可比-傅里叶矩的一种特殊形式, 给出了这类正交图像矩的统一表达式^[7].

平子良等对圆谐-傅里叶矩深入研究后, 将径向圆谐函数和角向指数函数统一到傅里叶变换的复指数因子中, 构建了复指数矩 (Complex Exponent Moments, CEM) ^[8]. 复指数矩具有比例、旋转、平移、密度多畸变不变性, 采用为数不多的低阶复指数矩, 就可以恢复重建原图像, 具有很强的图像压缩和抗干扰能力, 文献[8]提出复指数矩算法, 其具体思想如下:

在极坐标系中定义图像函数 $f(r, \theta)$ 的圆谐-傅里叶矩为:

$$\varphi_{nm} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \theta) T_n(r) \exp(-jm\theta) r dr d\theta \quad (1)$$

式中, n 为非负数, m 为整数; r 的取值范围为 $0 \leq r \leq 1$; θ 的取值范围为 $0 \leq \theta \leq 2\pi$.

圆谐-傅里叶矩的径向基函数 $T_n(r)$ 由正交完备的三角函数系构成:

$$T_n(r) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{r}}, & n = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{r}} \sin(n+1)\pi r, & n \text{ 为奇数} \\ \sqrt{\frac{2}{r}} \cos n\pi r, & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (2)$$

在 $0 \leq r \leq 1$ 内, 径向基函数 $T_n(r)$ 是加权正交的:

$$\int_0^1 T_m(r) T_n(r) r dr = \delta_{mn} \quad (3)$$

按照欧拉公式, 径向基函数可转换为复指数函数集:

$$A_k(r) = \sqrt{\frac{2}{r}} \exp(j2k\pi r) \quad (4)$$

$T_n(r)$ 与 $A_k(r)$ 有如下关系:

$$\begin{cases} T_0(r) = \frac{1}{\sqrt{2}} A_0(r), & n = k = 0 \\ T_n(r) = \frac{1}{2j} (A_k(r) - A_{-k}(r)), & n = 2k-1, k = 1, 2, 3 \\ T_n(r) = \frac{1}{2} (A_k(r) + A_{-k}(r)), & n = 2k, k = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (5)$$

在极坐标系中图像函数 $f(r, \theta)$ 的圆谐-傅里叶矩可写为如下形式:

$$E_{km} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \theta) \sqrt{\frac{2}{r}} \exp(j2k\pi r - jm\theta) r dr d\theta \quad (6)$$

E_{km} 定义为复指数矩, 在单位圆内正交、完备, 原始图像可以由复指数矩重构.

式(6)为极坐标系下图像函数和基函数的积分形式, 若要得到直角坐标系下的复指数矩表达式, 可利用直角坐标和极坐标的转换, 根据:

$$x = r \cos \theta, y = r \sin \theta \quad (7)$$

$$r_{xy} = \sqrt{x^2 + y^2}, \theta_{xy} = \arctan \frac{y}{x} \quad (8)$$

可得复指数矩在直角坐标系下的表达式:

$$E_{km} = \frac{1}{4\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f_c(x, y) \sqrt{\frac{2}{r_{xy}}} \exp(-j2k\pi r_{xy}) \exp(-jm\theta_{xy}) dx dy \quad (9)$$

式(9)所给出的复指数矩可以离散化为下式:

$$E_{km} = \frac{1}{M^2} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{M-1} F_p(r_u, \theta_v) \sqrt{\frac{r_u}{2 \times M}} \exp(-j \frac{2\pi}{M} k u) \exp(-j \frac{2\pi}{M} m v) \quad (10)$$

式(10)可以通过快速傅里叶变换计算, 复指数

矩可以通过 2- 维快速傅里叶变换来计算,其计算复杂度低,速度快,在应用中具有极大的优势.

3 核模糊聚类

经典的聚类方法有传统的 C -均值方法和模糊 C -均值聚类方法.核聚类方法采用非线性变换 Φ 将 d 维矢量空间的矢量 x 映射到高维特征空间,使得映射后的样本具有更好的聚类形式^[9]. 设有非线性映射 $\Phi: \mathbb{R}^d \rightarrow H$ 将输入空间的样本映射到高维特征空间 H 中,那么输入空间的点积形式在特征空间就可用 Mercer 核来表示为 $K(x_i, x_j) = \langle \Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j) \rangle$. 事实上任一函数只要满足 Mercer 条件,就可用作 Mercer 核. 常用的满足 Mercer 条件的核函数有 Sigmoid 函数、多项式函数和径向基函数等. 本文中核函数选用下列径向基函数^[2]:

$$K(x, x_i) = \exp\{-\frac{(x - x_i)^2}{\sigma^2}\}$$

(11)

核函数模糊 C 均值聚类 (KFCM) 的目标函数为:

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n \mu_{ik}^m \| \Phi(x_k) - \Phi(p_i) \|^2$$

(12)

式中, μ_{ik} 表示第 k 个样本属于第 i 类的隶属度; p_i 为第 i 类的聚类中心.

KFCM 算法如下^[10]:

初始化:给定聚类类别数 $c, 2 \leq c \leq n, n$ 是数据个数,初始化聚类中心 $\mathbf{P}^{(0)}$, 设置迭代停止阈值 ϵ , 设置迭代计数器 $b = 0$;

步骤 1:采用下式计算或更新模糊划分矩阵 $\mathbf{U}^{(b)}$:

对于 $\forall i, k$, 如果 $\exists d_{ik}^{(b)} > 0$, 则有

$$\mu_{ik}^{(b)} = \left\{ \sum_{j=1}^c \left[\left(\frac{d_{jk}^{(b)}}{d_{ik}^{(b)}} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right] \right\}^{-1}$$

(13)

如果 $\exists i, r$, 使得 $d_{ir}^{(b)} = 0$, 则有

$$\mu_{ir}^{(b)} = 1, \text{ 且对 } j \neq r, \mu_{ij}^{(b)} = 0$$

(14)

步骤 2:采用下式更新聚类中心矩阵 $\mathbf{P}^{(b+1)}$

$$\mathbf{P}_i^{(b+1)} = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik}^{(b+1)})^m \cdot \mathbf{x}_k}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ik}^{(b+1)})^m}, i = 1, 2, \dots, c$$

(15)

步骤 3:如果 $\| \mathbf{P}^{(b)} - \mathbf{P}^{(b+1)} \| < \epsilon$, 则算法停止并输出模糊划分矩阵 $\mathbf{U}$ 和聚类中心 $\mathbf{P}$, 否则令 $b = b + 1$, 转向步骤 1.

4 基于复指数矩与模糊聚类的分形编码过程

首先采用模糊聚类对 D 块进行分类,然后在每一类中为每个 R 块寻找特征向量距离最短的 D 块.

特征向量距离采用下式计算:

$$d(Q_i^r, Q_j^d) = \sum |Q_i^r - Q_j^d|$$

(16)

本文方法如下:

- (1) 将图像划分为一系列 R 块与 D 块;

(2) 计算每个 R 块与 D 块的 4×4 个复指数矩;

(3) 通过模糊聚类算法对 D 块进行分类;

(4) 根据每一类 D 块的聚类中心,对每一个 R 块在相应的类中找到最匹配的 D 块,并记录下该 D 块的位置;

(5) 对每一个 R 块,根据其最优匹配的 D 块,计算灰度域上的仿射变换和旋转代码、伸缩因子和偏移因子,完成该 R 块的编码.

5 实验结果和分析

本文在 MATLAB2010 软件仿真环境下,将传统的分形编码、基于复指数矩的分形编码、复指数矩与模糊聚类相结合的分形编码进行分析比较. 采用标准的灰度图像 lena 图像 (512×512), 测试参数为编解码时间(s)和峰值信噪比 PSNR(db). 三种方法下的编码耗时及解码图像质量如表(1)所示.

由表(1)看出,复指数矩的编码耗时统计表相对于传统分形维数的方法来说,不仅编码耗时要短的多,通过 MATLAB 的软件仿真也不难发现整体的重建效果图像要优于传统的分形维数方法.

表 1 图像的编码耗时及解码图像质量对比表

分块		分形维数		复指数矩		复指数矩与模糊聚类	
R 块大小	D 块大小	编码耗时 /s	峰值信噪比 /dB	编码耗时 /s	峰值信噪比 /dB	编码耗时 /s	峰值信噪比 /dB
4×4	8×8	1304.90	39.02	9.35	38.37	7.26	38.85
	16×16	327.99	37.85	4.99	39.05	4.37	39.58
	32×32	82.16	35.07	4.24	36.05	4.52	36.55
	64×64	20.82	32.60	4.01	32.99	4.27	33.08
8×8	16×16	87.04	34.38	4.66	34.96	4.05	35.08
	32×32	22.25	32.50	2.27	33.18	2.39	33.8
	64×64	5.83	30.72	1.58	30.82	1.82	31.15
	128×128	1.78	28.30	1.45	28.59	1.77	28.58

复指数矩与模糊聚类相结合的编解码方法在 R 块选取 4×4 的大小, D 块选取 8×8 和 16×16 的大小,以及 R 块选取 8×8 的大小, D 块选取 16×16 的大小时,耗时相对于复指数矩的方法来说,编码耗时有所降低,重建图像质量也有所提高.

当 R 块选取小块的时候,整体的重建效果会相当不错的. 也就是当 R 块选取 4×4 的大小,而 D 块选取 8×8 、 16×16 和 32×32 时,恢复重建图像效果

都是很不错的,其中以 D 块选取 16×16 的大小时,图像效果最好.图 1 给出了 R 块选取 4×4 , D 块选取 16×16 时的测试图像.

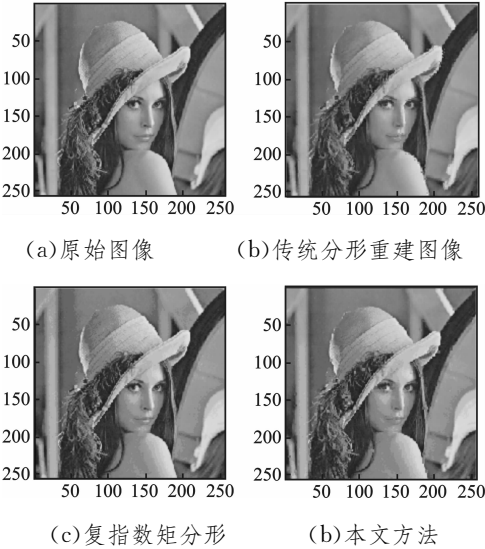


图 1 三种方法测试效果

6 结束语

本文提出了基于复指数矩和模糊聚类相结合的快速分形编码方法.首先根据 D 块的复指数矩不变量利用模糊聚类对 D 块进行分类,再根据 R 块的复指数矩不变量寻找最优匹配的 D 块.实验表明,在解码图像质量不变的同时,大大提高了分形编码的速度.在综合考虑编码时间、重建图像质量及算法复杂度情况下,本文所提出的分形编码算法将图像的复指数矩与其他分类方法相结合优化分形编码,是今后进一步研究的课题.

参考文献:

[1] A. E. Jacquin. Image coding based on a fractal theory of iterated contractive image transformations [J].

[5] 赵静远. 分组密码算法 SAFER,CAST-256 和 PRIDE 的分析[D]. 济南:山东大学, 2015.

[6] 贾平, 徐洪, 戚文峰. 轻量 S 盒密码性质研究[J]. 密码学报, 2015, 2(6): 497-504. [7] Y. Lee. A 45nm 1. 3Ghz 16. 7 Double-Precision GFLOPS/W RISC-V Processor with Vector Accelerators[C]. The 40th European Solid-State Circuits Conference, September 22 ~24, 2014:199-202.

[8] 郭怡惠,李森森,戴紫彬,张立朝. RISC 微处理器 S 盒替换指令扩展[J]. 微电子学与计算机, 2014 , 31 (5): 53-57.

IEEE Trans. Image Process. 1992, L(1):18-30.

[2] 吴一全, 郭建军, 孙子翼. 基于 Krawtchouk 矩不变量和核模糊聚类的快速分形编码[J]. 光电子. 激光, 2010,21(9):1412-1416.

[3] M. K. Hu. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants[J] IRE Transactions on Information Theory 1962, 8(2):179-187.

[4] M. R. Teague. Image Analysis via the General Theory of Moments [J]. J Opt Soc Am, 1980, 70 (8): 920-930.

[5] Y. Sheng and L. Shen. Orthogonal Fourier-Mellin moments for invariant pattern recognition[J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(6): 1748-1757.

[6] H. Ren,W. Wu,W. Bo,Y. Sheng,Z. Ping, Multidistortion-invariant image recognition with radial harmonic Fourier moments[J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis. , 2003, 20(4):631-637.

[7] Z. Ping,H Ren, J. Zou,Y. Sheng,W. Bo. Generic orthogonal moments: Jacobi-Fourier moments for invariant image description[J]. Journal of Optoelectronics Laser , 2007, 40(4):1245-1254.

[8] 姜永静. 指数矩及其在模式识别中的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.

[9] 张莉,周伟达,焦李成. 核聚类算法[J]. 计算机学报, 2002,25(6):587-591.

[10] 普运伟,金炜东,朱明等. 核模糊 C 均值算法的聚类有效性研究[J]. 计算机科学 ,2007 ,34(2):207-210.

作者简介:

朱智林 男,(1963-),博士,教授.研究方向为数字图像处理.

王永玉(通讯作者) 女,(1973-),博士,副教授.研究方向为图像处理. E-mail:yongyuwang@sina.com.

平子良 男,(1945-),硕士,教授.研究方向为数字图像处理.

(上接第 128 页)

[5] 赵静远. 分组密码算法 SAFER,CAST-256 和 PRIDE 的分析[D]. 济南:山东大学, 2015.

[6] 贾平, 徐洪, 戚文峰. 轻量 S 盒密码性质研究[J]. 密码学报, 2015, 2(6): 497-504. [7] Y. Lee. A 45nm 1. 3Ghz 16. 7 Double-Precision GFLOPS/W RISC-V Processor with Vector Accelerators[C]. The 40th European Solid-State Circuits Conference, September 22 ~24, 2014:199-202.

[8] 郭怡惠,李森森,戴紫彬,张立朝. RISC 微处理器 S 盒替换指令扩展[J]. 微电子学与计算机, 2014 , 31 (5): 53-57.

[9] 覃晓草,李树国. 一种 AES 算法中 S 盒和逆 S 盒替换的表达式方法[J]. 微电子学与计算机. 2015, 32(1): 112-115.

[10] 吴筱,郭培源,何多多. DES 和 SM4 算法的可重构研究 与实现[J]. 计算机应用研究. 2014, 31 (3): 853-856.

作者简介:

常忠祥 男,(1985-),讲师,博士.研究方向专用处理器设计. E-mail:changzhongxiang0@126.com.