

基于零树小波与分形图像编码算法的 JPEG2000*

武汉华中科技大学计算机科学与技术学院(430074) 张 剑 余胜生

摘 要: 提出了一种基于零树小波和分形图像的小波图像压缩算法,讨论了基于零树小波图像压缩的编码算法机理及 JPEG2000 静态图像压缩算法,对 JPEG2000 与 JPEG 效果图像的测试实验结果进行了比较。

关键词: 零树小波 图像压缩 分形图像

零树小波及分形编码是近年来编码研究的热点。它比传统图像压缩比高,压缩速度快,数学建模清晰。近几年在各种图像压缩技术中,EZW(嵌入式零树小波)编码和 SPIHT(等级树分割)编码是比较新的技术之一。本文将介绍如何在 EZW 编码的基础上进行小波计算,并将 EZW 与 SPIHT 编码方法有效地结合在一个系统中,实现一种零树小波与分形图像编码相结合的编码算法。

1 零树小波编码算法

1.1 小波变换的基本思想

小波变换方法的基本思想是:将图像进行多分辨率分解,分成不同空间、频率的子图像,然后再对子图像进行系数编码,采用小波变换来去相关,利用小波变换的自相关性预测重要信息的尺度位置并采用自适应算法编码进行无损数据压缩。小波系数变换编码是小波分析方法研究的核心。传统的小波变换算法所使用的 9/7 阶浮点滤波器在第 1 层分解时,每个象素就需要 16 次浮点乘法和 14 次浮点加法。这些复杂的运算大大降低了小波变换的速度,是实际应用中极需解决的问题。另一方面,图像经小波变换后,各子带之间有明显的相关性。这些特点恰好能够较好地零树结构利用。

小波变换是一种非平稳信号的分析方法,其实质就是将信号向一系列小波基上进行投影。

设 $\Psi \in L^2 \cap L^1$ 且 $\Psi(0)=0$,则按如下方式生成的函数族 $\{\Psi_{a,b}\}$: $\Psi_{a,b}(t)=|a|^{-1/2}\Psi(t-b)/a, b \in \mathbb{R}, a \in \mathbb{R}, a \neq 0$ 。其中 a 为伸缩因子, b 为平移因子, $\Psi_{a,b}(t)$ 称分析小波或连续小波, Ψ 称基本小波或母小波。

设 Ψ 是基本小波, $\{\Psi_{a,b}\}$ 是按上式给出的连续小波,

对 $f \in L^2$, 信号 f 的连续小波变换 $W_f(a,b)$ 定义为:

$$W_f(a,b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \Psi(t-b)/a dt$$

在实际中主要应用离散小波,取 $a=a_0^m, b=nb_0a_0^m, (m, n \in \mathbb{Z}, a_0 > 1, b_0 > 0)$, 有 $f = \sum C_{m,n}(f) \Psi_{m,n}$, 其中, $\Psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \Psi(a_0^{-m}t - nb_0)$, 当 $a_0=2, b_0=1$ 时可以选择特定的 Ψ , 得到

正交基 $\Psi_{m,n}$, 从而有 $C_{m,n}(f) = \langle f, \Psi_{m,n} \rangle = \int f(x) \Psi_{m,n}(x) dx$ 。

1.2 EZW 算法

由于 EZW 算法的比特流中的位是按其重要性顺序生成的,不要求预先存储点格式码率,也不要求图像源的任何预先知识,因此允许译码者可在比特流的任意一点停止译码,仍能确切产生同样的图像。这减少了对主表的编码花费,提高了小波系数主表的压缩,从而定义了新的数据结构——零树。

EZW 算法由小波系数的零树符号编码与算术编码过程组成。为了使这 2 个过程融合得更好,进一步提高算法的压缩性能,本文提出 SPIHT 算法。与 EZW 相比,SPIHT 在阈值测试时没有输出零树符号,而是输出 1 比特的测试函数值。这样既降低了比特率又加快了算法的执行,克服了 EZW 算法的不足之处。在每次近似量化重复 EZW 算法时,要在每个子带中扫描与当前门限有关的所有小波系数,产生某些冗余并存在于一些高频子带中。为此,对其编码进行改进,即利用有效的扫描和比特分布表,在此编码中子带根据它是否含有关于门限的重要系数,分为重要子带和非重要子带,从而只扫描重要子带中的系

* 本课题得到国家“八六三”高技术研究发展计划(863-317-01-10-99)和国防科技预研项目(15-8-4)“评估多媒体数据存取与交换方法的研究”(15.8.4)资助。

数,以获得算法高效的编码,即 SPIHT 编码。

2 分形编码压缩算法

2.1 分形基础理论描述

定义 1: 设 D 为欧氏空间 $E^{(n)}$ 上的一个闭集, $k(D)$ 为 D 上的紧致集族, Ψ_j 是从 $k(D)$ 到 D 上的集合变换。若满足条件: $0 < \lambda_j < 1$, 存在一个最小的 λ_j , 使得对任给 $x \in k(D)$ 都有 $|\Psi_j(x)| = \lambda_j |x|$ 成立。

若满足 $0 < \lambda = \sup\{\lambda_j\} < 1$, 存在收缩率 λ , 则把集合变换 $\Psi(x) = Y \Psi_j(x)$, 任给 $x \in k(D)$ 称为 D 上的分形变换。

定义 2: 设 ϕ 是从欧氏空间 $E^{(n)}$ 到 $E^{(n)}$ 的点映射, 存在实常数 $\lambda (0 < \lambda < 1)$, 使得任给 $x, y \in E^{(n)}$ 都有 $d(\phi(x), \phi(y)) \leq \lambda d(x, y)$, 其中 d 为欧氏距离。则称 ϕ 为压缩映射, 称 λ 为 ϕ 的压缩比。

如果 $E^{(n)}$ 上的压缩映射族 $\Psi = \{\phi_j, 1 \leq j \leq N\}$, ϕ_j 的压缩比为 $\lambda_j, 0 < \lambda = \sup\{\lambda_j\} < 1$, 而且对应每 1 个 ϕ_j 都有 1 个伴随概率 $p_j, 0 < p_j < 1, \sum_{j=1}^N p_j = 1$, 则称 ϕ 为压缩型迭代函数系统或分形仿射变换组, 记为 $(E^{(n)}, \phi, p)$, λ 称为该系统的压缩比。

在实际应用中, 直接构造分形变换 Ψ 非常困难。因此一般采用分形仿射的方法来构造, 即 $\Psi(Xorg) = \bigcup_{1 \leq j \leq N} \Psi_j(D_j)$, 其中, N 为紧缩分形仿射变换的个数, $D_j \in Xorg, Xorg$ 为原图像。则称 $\Psi_j (0 \leq j \leq N)$ 为原图像的 $Xorg$ 分形压缩数据。

2.2 分形压缩算法编码

基于分形变换的图像编码是在分形理论的基础上发展起来的模型编码技术。其编码算法实现的主要过程如下。

(1) 假设待编码的图像被分割成 $K \times K$ 个互不重叠的小块, 即值块(Rangeblock), 简称 R 块。同时将图像分割成可以相互重叠多一些的块, 即重叠块(Domain)简称 D 块。所有分类块的组合就是原图像, 而所有重叠块的组合, 恰好是寻找仿射压缩变换图像块的“源”。每个值块 R 可相应寻找 1 个域块 D , 使得 $R = S \times D + O$ 。在分形编码中, 为获得最佳的 S, O 和 D , 必须在码表的所有块中进行搜索。对每个码表中的块 D , 必须确定其最佳系数 S 和 O , 可以用最小二乘法来获得系 S 和 O 。假设 2 个块 R 和 D 分别有 n 个像素 r_1, \dots, r_n 和 d_1, \dots, d_n , 须使 $M = \sum_{i=1}^n (S \times d_i + O - r_i)$ 达到最小化, 其最佳系数 S 和 O 可通过最小二乘法求得。

(2) 为了加快编码速度, 实现在具有相同区域性质块间进行匹配搜索的过程, 必须按照 Bfaskar Ramamurtyi 的分类原则, 对分割后的 R 块和 D 块进行分类。

(3) 对分类后相同区域的每个 R 块 R_j 寻找可以匹配的 D 块 D_j , 使得 D_j 通过仿射函数 Ψ_j 可以近似于 R_j 。这样就可以找到一组仿射变换组 $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_N$, 即分割迭代系统。只要该系统的变换是收缩的, 且比原系统简单,

就可以实现分形压缩。

综上所述, 基本分形压缩算法主要是对图像分割后 R 块和 D 块进行搜索匹配的过程。这种算法的特点是压缩率高(比经典编码高 1~2 个数量级), 运算速度与提高图像分辨率的关系不大。但由此带来的问题是压缩时的计算量大, 编码压缩时间很长。

2.3 分形压缩算法解码

上述压缩编码算法的输出码由迭代函数系统组成的压缩算子 T 描述。由压缩算子的不动点原理可知 T 有惟一的不动点吸引子。该吸引子便是要重建图像的逼近图像。其解码过程如下: 给定任意图像 g_0 , 用 T 作用得到 Tg_0 。当用 T 去作用原始图像 f , 得到拼贴 Tf , 其误差 $Tf - f$ 为拼贴误差, 由图像分区的所有值块上的平方误差 $E(R, D)$ 之和来确定, 并可以计算相应的均方误差和峰值信噪比(PSNR)。由于 T 是一个压缩算子, 可以通过迭代方法来得到其吸引子 g , 即 $g = \lim_{n \rightarrow \infty} T^n g_0$, 满足 $Tg = g$, 也即迭代序列 $\{T^n g_0\}$ 收敛到 g 。拼贴定理保证了吸引子与原图像之间的误差可由 $1/(1 - S_0)$ 与拼贴误差之乘积来控制, S_0 是算子 T 的压缩因子, $|S_0| < 1$ 。当然此条件是充分的, 而非必要的。

3 零树小波与分形图像编码的结合

目前分形编码多数还是采用仿射计算技术, 只不过其失真类型表现为整体的随机现象。为此本文通过定义方向性零树的概率, 将零树小波编码与分形图像编码相结合, 产生一种新的小波图像编码方法。其原理是根据图像内容和编码误差进行小波树自适应分割, 然后将小波零树编码和小波分形图像编码相结合而进行混合编码。由于小波变换把图像分解为不同空间频带上的子图像, 而且不同层对应的子图像结构之间存在着很大的相似性。分形压缩算法主要是利用图像空间结构信息进行压缩, 在同分辨率不同方向子带图像中, 具有相同空间位置的小波系数之间尚存在较强的相关性。利用上述不同层子图本身的相似性和同方向不同分辨率子图之间的相似性特点, 以求获得更高的压缩比。这样, 就可以在小波变换后的高层子图像内进行基本分形压缩。此外, 图像分割后的分类 R 块域和其相应的重叠 D 块域内的图像块数目大大减少, 所以用于匹配的寻找时间也就相应大幅度减少, 从而达到缩短编码压缩时间的目的。通常的分形图像编码采用基于方块的匹配搜索, 所以恢复图像存在方块效应, 影响视觉质量。而零树小波编码算法中没有利用小波多分辨率图像之间的相似性, 所以可将分形和零树小波结合起来编码。其过程中利用小波交换的分辨率分析特性, 在多分辨率相关的基础上, 对分形匹配搜索域进行自适应调整, 使编码时间大大加快, 解决了混合编码中存在编码时间长的问题, 但压缩比和信噪比稍有减少。

4 JPEG2000图像压缩算法

JPEG 的图像压缩算法主要采用离散余弦转换 (DCT) 运算法则,虽然它是一种较好的压缩方法,但在高压缩比情况下很难获得较好的高质量恢复图像。这是由于该算法是以丢弃频率信息来达到压缩的目的,因此图像的压缩率越高,频率信息被丢弃就越多。在极端情况下,JPEG 图像只保留了反映图像外貌的基本信息,精细的图像细节都损失了。显然在希望获得高压缩比时,JPEG 并不是理想的压缩方法。基于 JPEG 这一不足,本文改用以零树小波与分形图像相结合的解析编码方式,实现 JPEG2000 图像压缩算法。该方法能在预测过程中根据编码误差自动调整小波树的尺寸,从而有效地利用小波树间和不同小波频带之间的相似性,达到最佳的压缩效果。目前,根据不同尺度小波系数结构上的相似性对图像进行压缩,利用小波变换系数的相关性,结合无失真的自适应算术编码,有效地对小波分解后图像的高频子带数据进行压缩,取得较好的效果。

5 JPEG2000与JPEG效果图像的仿真实验

源文件图片是 PSD 格式,文件大小为 94.4KB,分别用 JPEG Preview v0.0088 和 JPEG2000(基于零树小波编码与分形图像编码结合的仿真平台)软件对其进行压缩。在相同实验环境以及高压缩率(90%)下测试可以看出:JPEG2000 图像马赛克小了很多,图像质量比 JPEG 清晰。

6 总结

基于零树小波编码与分形图像编码相结合,主要是将图像转换为一系列不同频率的像素信号,通过自身的分析统计,除去不影响视觉效果频率分量,选取具有代表性的像素,进而压缩数据。其主要目的是将图像的频率成分抽取出来。这种算法比 DCT 算法压缩比更高,消除了 DCT 的马赛克效应,这是在零树小波与分形图像编码相结合下实现的 JPEG2000 静态图像压缩与传统 JPEG 最大的不同。所产生的 JPEG2000 具有如下优点。

(1) JPEG2000 比 JPEG 具有更高的压缩(低比特速率)比,其压缩率比 JPEG 高约 30%。

(2) 同时支持有损压缩和无损压缩,而 JPEG 只能支持

有损压缩(无损压缩对保存一些重要图片十分有用)。

(3) 能实现渐进传输,这是 JPEG2000 的一个极其重要的特征,相当于 GIF 格式图片的“渐现”特性,即先传输图像的轮廓,然后逐步传输数据,不断提高图像质量,让图像由朦胧到清晰地显示,不必与现在的 JPEG 图像一样,由上到下慢慢显示。

(4) 支持所谓“感兴趣区域”特性(本文不讨论)。用户可以任意指定图片上感兴趣区域的压缩质量,还可以选择指定的部分先解压缩,这样就可以很方便地突出重点了。

参考文献

- 1 Shapiro J M. Embedded Image Coding Using Zero Trees of Wavelet Coefficients. IEEE Trans Signal Processing, 1998; 41(12)
- 2 张宗念. 基于方向性零数小波的分形图像编码. 电子学报, 1999; 22(5)
- 3 Taubman D. High Performance Scalable Image Compression with EBCOT. IEEE Trans Image Processing, 2000; 9(7)
- 4 张剑. 零树小波与分形图像编码算法相结合实现 JPEG2000 压缩. 佛山科技学院学报, 2003; 21(2)

(收稿日期: 2003-07-21)