

基于 BWT 和 FVQ 的极低比特率图像编码算法¹

王 磊 戚飞虎 赵雪春

(上海交通大学计算机系 上海 200030)

摘 要 该文提出了一种基于双正交小波变换 (BWT) 和模糊矢量量化 (FVQ) 的极低比特率图像编码算法。该算法通过构造符合图像小波变换系数特征的跨频带矢量, 充分利用了不同频带小波系数之间的相关性, 有效地提高了图像的编码效率和重构质量。该算法采用非线性插补矢量量化 (NLIVQ) 的思想, 从大维数矢量中提取小维数的特征矢量, 并提出了一种新的模糊矢量量化方法——渐进构造模糊聚类 (PCFC) 算法用于特征矢量的量化, 从而大大提高了矢量量化的速度和码书质量。实验结果证明, 该算法在比特率为 0.172bpp 的条件下仍能获得 PSNR>30dB 的高质量重构图像。

关键词 双正交小波变换, 矢量量化, 模糊聚类, 渐进构造, 非线性插补

中图分类号 TN919.8

1 引 言

由于小波变换在表示图像的灵活性及适应人类视觉特性等方面有着显著的优势, 因此它在图像处理领域中的应用日益广泛。从 80 年代末开始, 小波理论就被用于图像编码领域^[1]。由于矢量量化^[2]能够有效地利用矢量中各分量之间的四种关系 (即线性依赖性、非线性依赖性、概率密度和矢量的维数), 所以它能最大限度地去除数据之间的冗余度, 从而有效地压缩数据。因此, 为了提高图像小波变换编码的性能, 近年来提出了一些将小波变换与矢量量化相结合的编码方案^[3,4]。但这些方案存在以下缺陷: (1) 没有考虑不同子带之间, 尤其是不同尺度子带间的相关性。(2) 为了获得较低的比特率而忽略了图像的高频信息。(3) 对低频子带仍使用标量量化。因此这些方案还远未发挥出小波变换所提供的图像压缩的潜力。

为了进一步提高小波图像编码的性能, 就必须克服上述缺陷。首先要尽可能地充分利用小波系数之间的相关性, 依据小波系数本身的特征构造出更大维数的矢量。其次, 对大维数矢量所带来的计算量的指数增长必须进行有效的控制。因此, 如何构造一个符合图像小波变换特征的最优矢量量化器就成为问题的关键。

正是基于上述指导思想, 作者提出了一种新的矢量量化方案。该方案首先用双正交小波变换对图像进行三级分解, 得到十个子频带。然后根据不同频带系数之间的同构特征来构造跨频带矢量, 以最大限度地利用小波系数之间存在的相关性。最后再从跨频带矢量中提取特征矢量并对其进行非线性插补矢量量化 (NLIVQ), 有效地减少量化过程的计算量。

矢量量化的经典算法是基于 k-均值聚类的 LBG 算法^[5], 它实际上是 Lloyd-Max 标量量化算法在多维上的推广。但是, LBG 算法存在着许多不足之处, 严重影响了所生成码书的质量。例如: (1) 由于训练矢量之间存在着不同程度的重叠现象, 因此聚类的边界是模糊的, 而在传统的矢量量化过程中却没有考虑这种聚类的不确定性。(2) 最终生成的码书质量严重依赖于初始码书, 而初始码书往往是随机产生的。(3) 码书中可能存在空胞腔和非典型码字, 为了提高码书质量必须做后续处理。要克服以上缺陷, 一种很直观的思路就是用模糊

¹ 1998-12-04 收到, 1999-06-31 定稿

国家自然科学基金 (69772002) 资助项目

聚类的方法进行矢量量化。它不仅能够很好地处理矢量聚类的不确定性,而且能有效地消除算法性能对初始码书的依赖。已有文献讨论了基于模糊-c均值(FCM)聚类的模糊矢量量化方案,其量化性能明显优于 LBG 算法^[6]。但这种方法的收敛速度缓慢,计算开销很大。

针对上述问题,本文提出了一种新的模糊矢量量化算法——渐进构造模糊聚类(PCFC)算法。它不仅在所生成的码书质量上比 LBG 算法有很大提高,而且运算速度要比 FCM 算法快得多。

2 双正交小波系数的跨频带矢量构造

2.1 双正交小波变换(BWT) 相位的保持在图像的分解与重构中是非常重要的,对小波分解而言则要求在每一级分解中保持平滑图像(即低频图像)的相位。但是,对于正交小波变换来说不存在线性相位的 FIR 滤波器。为了克服这一缺点, Daubechies 等人通过放宽小波基的规范正交性要求而构造出了双正交小波基^[7]。双正交小波基是通过使用两组函数 $\phi_{i,j}$ 和 $\psi_{i,j}$ 与 $\tilde{\phi}_{i,j}$ 和 $\tilde{\psi}_{i,j}$ 来构造的。小波函数 $\psi_{i,j}$ 和 $\tilde{\psi}_{i,j}$ 本身不构成正交基,但它们一起构成 $L^2(R)$ 的对偶基,即有

$$\langle \psi_{i,j}, \tilde{\psi}_{m,n} \rangle = \delta_{i,m} \delta_{j,n}. \quad (1)$$

在用 Mallat 算法实现双正交小波变换时,仍然需要用到两组滤波器 h 和 g 与 $\tilde{h}$ 和 $\tilde{g}$ 。这两组滤波器必须满足下列条件:

$$g(n) = (-1)^n \tilde{h}(1-n), \quad \tilde{g}(n) = (-1)^n h(1-n), \quad (2)$$

$$\sum_k h_k h_{k+2n} = \delta_{0,n}. \quad (3)$$

双正交小波变换由于具有线性相位而被广泛应用到图像处理领域中。不同的双正交小波具有不同的重构精度和计算复杂度。作者通过大量实验比较,挑选出了一种性能最优的双正交小波用于本算法的实现中^[8]。

2.2 跨频带矢量构造 图像经小波变换后所得系数具有其特殊的性质,一个高性能的矢量量化器必须依照小波系数的这种特征来构造矢量。仔细观察图像的三级小波分解结果(见图1),不难发现在高频子带图像之间存在相当明显的同构特征。这种相似性不仅存在于同一尺度的频带之间而且存在于不同尺度的频带之间,事实上不同尺度对应频带之间的相关性是最强的。要想提高矢量量化的编码效率,就必须在构造矢量时充分利用这些相关性。而将子带图像中相应的同构像素放在同一矢量中进行量化,是一种直观有效的方法。由于高频子带的信息在提高图像重构质量上起着重要作用,因此可以考虑在矢量构造中将各种高频小波系数都包括进来,从而在编码过程中尽可能地保持图像的高频信息。另外,为了避免对低频图像的标量量化,可将高频小波系数和低频小波系数统一在一个矢量中。

根据上述指导思想,作者提出了一种跨频带矢量构造方法。按图2所示,双正交小波变换将图像分解为三层($m=1,2,3$)共十个子带的塔型结构,从这十个子带中的每层子图中取一个大小为 2^{3-m} 的系数块来构成 64 维矢量,以保证每个矢量在各个子图中占有相同比例的小波系数。这样构造出来的跨频带矢量能够充分利用小波系数的上述相关性,但同时也带来计算量过大的问题。为此,需要使用非线性插补矢量量化技术来降低计算复杂度。这种技术的实质在于用小维数的特征矢量代替大维数的原始矢量参与量化运算,在本算法中我们将每个 64 维矢量的前 16 个小波系数提取出来构成 16 维的特征矢量。

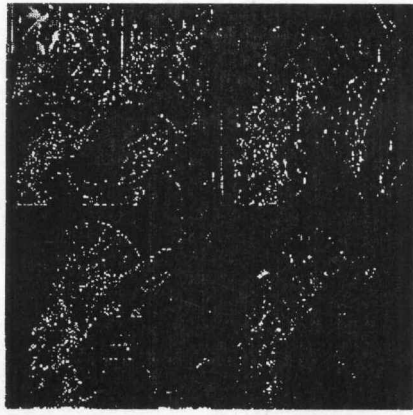


图 1 对高频信息增强后的三级小波分解结果

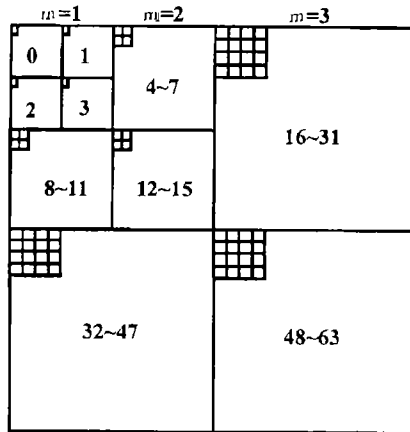


图 2 小波系数的跨频带矢量构造

上述矢量构造方法有以下几个优点: 首先, 不再需要比特分配过程, 这一过程往往会引起额外的计算开销; 其次, 各子带图像之间的相关性被尽可能地利用, 高频子图所含信息在极低比特率编码的条件下仍能得到保持; 最后, 维数大大减小的特征矢量使得 NLIVQ 能有效地减少计算时间。

2.3 非线性插补矢量量化 (NLIVQ) 数据压缩中希望矢量量化的矢量维数尽可能地大, 以便充分利用各元素之间的统计相关性。在本算法中我们构造了一个 64 维的矢量, 其目的就在于希望能够最大限度地去除小波系数之间的相关性。但矢量量化的计算复杂度是随矢量维数的增加呈指数增长的, 为此我们采用非线性插补矢量量化技术^[9]来有效地降低计算复杂度。

在非线性插补矢量量化中, 高维数矢量被映射成一个维数要低很多的特征矢量, 在编码时对特征矢量进行操作, 以此来大幅度降低计算复杂度。解码时则需根据特征矢量来恢复原始矢量, 这一恢复过程可看作是一个广义的插补过程。非线性插补矢量量化不同于传统矢量量化之处在于它在编码和解码时分别使用不同维数的码书。首先, n 维输入矢量 X 经过特征矢量提取成为一个 k 维矢量 Y 。编码器使用 k 维编码码书 C 对 Y 进行矢量量化, 输出索引值 I 。解码器用索引值 I 在 n 维解码码书 C^* 中查找, 直接输出 n 维的重构矢量 X^* 。这里的 C^* 和 C 是大小相同维数不同的两个码书。

3 模糊矢量量化

为了同时获得高于 LBG 的码书质量和低于 FCM 的计算量, 本文提出了一种渐进构造模糊聚类 (PCFC) 算法用于矢量量化。其步骤如下: (1) 给定码书大小 N , 一个训练序列 $\{x_i, i = 1, \dots, n\}$, 以及矢量间的距离阈值 T_1 和 T_2 , 且 $T_1 < T_2$ 。(2) 以训练序列的第一个矢量作为码书的第一个码字, 即有 $y_1 = x_1$, 置当前码书大小 $k = 1$ 。(3) 将后续的训练矢量 x_i 依次映射到一个最近相邻码字 y_j 中, 使得 $E = d(x_i, y_j)$ 最小, 直至整个训练序列结束。若 $E \leq T_1$, 则 x_i 属于聚类 S_j , 调整该聚类中心:

$$y_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_i, \quad x_i \in S_j. \quad (4)$$

若 $E \geq T_2$, 且当前码书大小 $k < N$, 则 x_i 作为新的码字放入码书中, $k = k + 1$. (4) 根据初始码书计算平均失真 D_{-1} , 设定失真阈值 $\varepsilon \geq 0$, 置迭代次数 $t = 0$. (5) 计算隶属度 μ_{ij} , 更新码书:

$$\mu_{ij} = \left[\sum_{k=1}^N [\|x_i - y_j\| / \|x_i - y_k\|]^{2/(m-1)} \right]^{-1}, \quad (5)$$

$$A_{t+1} = \{y_i | y_i = \sum_{k=1}^n \mu_{ki} x_k / \sum_{k=1}^n \mu_{ki}\}. \quad (6)$$

(6) 计算码书的平均失真, 若 $(D_{t-1} - D_t) / D_t \leq \varepsilon$, 则算法结束; 否则, $t = t + 1$, 转至 (5).

$$D_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \min_{y_j \in A_m} d(x_i, y_j). \quad (7)$$

PCFC 算法首先用渐进构造的方法得到一个相对精确的初始码书, 而不像 LBG 或 FCM 那样使用随机初始化码书. 这不仅大大减少了迭代次数, 而且有效地提高了最终生成码书的质量. 由于 PCFC 使用 (6) 式对码书进行更新, 因此在每次码书更新过程中, 它要比 FCM 算法少 $n \times N$ 次幂运算, 从而大大加快了计算速度. 因此 PCFC 具有超过 LBG 和 FCM 的性能.

4 实验结果和分析

为了检验本文提出的算法性能, 我们使用了 4 幅标准图像 (256×256 , 8bpp) 进行测试, 它们是: Lenna, Peppers, Airplane 和 Boats. 实验中所用的码书大小为 2048, 训练序列大小为 4096, 码书生成算法为 NLIVQ+PCFC.

实验结果表明 (见表 1), 本算法在未对量化结果进行熵编码的情况下, 对这 4 幅图像的编码效率就已经达到 0.172bpp, 所得重构图像的峰值信噪比均大于 30dB. 为了比较 PCFC 和 LBG 的性能, 在表 1 中还同时给出了由 NLIVQ+LBG 算法所生成码书的图像重构质量. 从中不难看出 PCFC 图像重构质量比 LBG 平均高出约 2.4dB.

表 1 图像编码 / 解码结果

测试图像	量化结果 (bpp)	PCFC 重构质量 (dB)	LBG 重构质量 (dB)
Lenna	0.172	32.9	30.3
Peppers	0.172	32.8	30.1
Airplane	0.172	30.7	28.6
Boats	0.172	30.4	28.3

5 结 论

本文从分析图像小波变换后的系数特征入手, 通过构造跨频带矢量、非线性插补矢量化和渐进构造模糊聚类码书生成, 设计了一个适合小波系数特征的快速矢量化器, 尽可能多地克服了传统小波图像编码中存在的缺点, 为极低比特率图像编码提供了一种思路.

尽管该算法还处于理论原型阶段, 但已表现出明显的性能优势. 由此可见, 对基于小波变换和矢量化的高性能图像编码是值得做更多深入研究的.

参 考 文 献

- [1] Mallet S G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Trans. on PAMI*, 1989, PAMI-11(7): 674-693.
- [2] Gray R M. Vector quantization. *IEEE ASSP Magazine*, 1984, 1(1): 4-29.
- [3] Antonini M, *et al.* Image coding using vector quantization in the wavelet transform domain. *ICASSP*, Albuquerque, USA: 1990, 2297-2300.
- [4] Antonini M, *et al.* Image coding using wavelet transform. *IEEE Trans. on IP*, 1992, IP-1(4): 205-220.
- [5] Linde Y, *et al.* An algorithm for vector quantizer design. *IEEE Trans. on COM*, 1980, COM-28(1): 84-95.
- [6] Karayiannis N B, *et al.* Fuzzy vector quantization algorithms and their application in image compression. *IEEE Trans. on IP*, 1995, IP-4(9): 1193-1201.
- [7] Cohen A, *et al.* Biorthogonal bases of compactly supported wavelets, AT&T Bell Lab, Tech. Rep., TM11217-900529-07, 1990
- [8] 王磊, 戚飞虎. 基于双正交小波的快速矢量量化算法, *上海交通大学学报*, 1998, 32(6): 4-8.
- [9] Gersho A. Optimal nonlinear interpolative vector quantization. *IEEE Trans. on COM*, 1990, COM-38(9): 1285-1287.

BWT AND FVQ BASED VERY LOW BIT RATE
IMAGE CODING ALGORITHM

Wang Lei Qi Feihu Zhao Xuechun

(Department of Computer, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract A biorthogonal wavelet transform (BWT) and fuzzy vector quantization (FVQ) based very low bit rate image coding algorithm is proposed. The correlation of the wavelet coefficients in different frequency bands is fully exploited through constructing the band-cross vector, so the high coding efficiency and reconstructed image quality are obtained simultaneously. In addition, a hybrid vector quantization (VQ) scheme is presented to improve the performance of VQ, which combines the non-linear interpolated vector quantization (NLIVQ) technique with a novel progressive constructive fuzzy clustering algorithm. Simulation results demonstrate that the reconstruction quality is higher than 30dB at a very low bit rate of 0.172bpp.

Key words Biorthogonal wavelet transform, Vector quantization, Fuzzy clustering, Progressive constructing, NLIVQ

王 磊: 男, 1970 年生, 博士生, 目前主要从事多媒体通信和柔性计算的研究.

戚飞虎: 男, 1939 年生, 教授, 目前主要从事多媒体通信和智能计算的研究.

赵雪春: 男, 1969 年生, 博士生, 目前主要从事多媒体通信和可变形模型的研究.