

# 小波树结构快速矢量量化编码方法

闫敬文

孙辉 张圣华

(长春邮电学院无线系, 长春 130012) (长春光机所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

**摘要** 提出了基于人眼视觉属性和应用小波树结构快速图象编码的矢量量化图象编码方法, 简称为树结构快速矢量量化编码。在分析此方法矢量量化特点之后, 设计产生码本的统计方法, 并提出了矢量量化编码的快速算法。该方法能有效地消除图象数据的空间相关性, 获得低传输位率。其最大优点是能够建立适合各种复杂图象数据的统计码本, 不必每次处理都要产生码本, 极大地提高了编码效率, 能应用于小波变换任何图象和信号数据压缩的情况。实验结果表明: 树结构快速矢量量化编码方法能获得 40 倍压缩比, 峰值信噪比为 36. 21dB, 综合性能指标优于其它方法, 有可能实现实时数据压缩。

**关键词** 小波变换, 数据压缩, 矢量量化

## 1 引言

小波分解之所以成为图象压缩编码中强有力的工具, 是因为其消除象素相关性的效率, 使能量集中于较少一些系数, 多尺度/多分辨的结构和允许对每个频带的统计性及人眼视觉属性进行匹配。而矢量量化提供把信号分解为能充分利用带内和带外剩余相关性的某种方式的码流。对小波变换的系数进行各种矢量量化编码方法<sup>[1]</sup>已进行过详细的讨论分析, 其中相同方向的互带矢量量化编码方法可能最适合小波系数树状分布特征<sup>[2]</sup>。矢量量化编码方法最大的缺点是须用训练方法产生码本, 并将每一矢量和码本中的矢量进行全搜索匹配, 使编码效率下降。自从矢量量化编码方法产生开始, 人们一直研究其快速算法, 并取得一些进展<sup>[3~5]</sup>, J. M. Shapiro 提出应用小波零树思想进行图象编码<sup>[6]</sup>, 后来又提出一种改进算法<sup>[7]</sup>。文献[6]中小波零树嵌入编码方法可极大地提高压缩比(CR), 并且有较高的峰值信噪比(PSNR)。该方法建立零树思想, 对各个分支进行预测, 提高了效率, 但对不同子带根据不同阈值进行多次扫描, 又使编码效率大为降低。文献[7]中对

小波零树嵌入编码方法进行了较大的改进, 进行一次扫描就可实现编码, 使得编码效率有所提高, 但须计算不同分支节点间的差和一个属性函数, 虽然提高了编码效率和速度, 又引入了一些冗余位, 是不可取的, 而且算法又过于复杂。本文提出基于人眼视觉属性和应用小波树结构快速图象编码的矢量量化图象编码方法, 简称为树结构快速矢量量化编码。该方法能有效地消除图象数据的空间相关性, 获得低传输位率。在分析此方法矢量量化特点之后, 设计产生码本的统计方法, 并提出了矢量量化编码的快速算法。本方法的最大优点是能够建立适合各种复杂图象数据的统计码本, 不必每次处理都要产生码本, 极大地提高编码效率, 能应用于小波变换任何图象和信号数据压缩的情况。

## 2 图象多分辨的小波分解

小波变换的目的是产生消除空间相关性的系数, 有利于实现压缩。如果能够做到彻底消除空间相关性, 那么变换后的系数是典型统计独立的高斯分布。实际上任何一种变换都不能完全消除空间相关性。多尺度分析(Multiresolution Analysis)在正交

小波基构造中起着重要的作用,也是信号分解与合成的 Mallat 算法的关键。双正交小波变换由 2 个相互正交的尺度函数定义的有限长镜像滤波器确定:

$$\varphi(x) = \sum_n h_n \varphi(2x - n),$$

$$\tilde{\varphi}(x) = \sum_n \tilde{h}_n \tilde{\varphi}(2x - n) \quad (1)$$

如果这 2 个滤波器的响应是有限冲激响应, 它的紧支小波定义为:

$$\psi(x) = \sum_n g_n \varphi(2x - n),$$

$$\tilde{\psi}(x) = \sum_n \tilde{g}_n \tilde{\varphi}(2x - n) \quad (2)$$

二进制小波变换为:

$$C_{m,n}(f) = \langle \psi_{m,n}, f \rangle = \int \psi_{m,n}(x) f(x) dx \quad (3)$$

其中  $\langle *, * \rangle$  表示内积运算,  $\psi_{m,n}$  是一个正交基, 满足

$$\Psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \Psi(2^{-m/2} t - n)$$

(m, n) 为任意正整数 (4)

对于任意固定的 m,  $\Psi_{m,n}(t)$  是正交的。

$$f = \sum C_{m,n}(f) \Psi_{m,n} = \int \Psi_{m,n}(x) f(x) dx \quad (5)$$

算法的实现都转换为式(3)的实现<sup>[8]</sup>:

$$C_{m,n}(f) = \sum_k g_{2n-k} a_{m-1,k}(f),$$

$$a_{m,n}(f) = \sum_k g_{2n-k} a_{m-1,k}(f) \quad (6)$$

这里  $g_l = (-1)^l h_{-l+1}$ ,  $h_n = 2^{1/2} \int \varphi(x-n) \varphi(2x) dx$ 。事实上  $C_{m,n}(f)$  是映射到  $V_m$  子空间的系数。如果 f 是离散的, 该算法可视为由低通滤波器 h 和高通滤波器 g 组成的子带编码算法。因为低通滤波器 h 和高通滤波器 g 与正交小波基对应, 所以由滤波器可得出精确的重建公式为:

$$a_{m-1,l}(f) = \sum_n [h_{2n-l} a_{m,n}(f) + g_{2n-l} C_{m,n}(f)] \quad (7)$$

过程如图 1 所示。

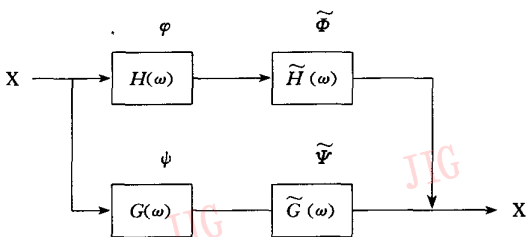


图 1 滤波器组结构和对应的小波

Fig. 1 Filter bank structure and corresponding wavelets

### 3 小波树的概念

人眼视觉属性是指人眼对高频分量不敏感, 而对低频分量反应很敏感。利用这一特点, 在压缩时应尽量降低低频分量的失真。在量化编码中码率分配时, 低频区码率相对高, 高频区码率相对低。小波变换可把图象分解成 4 个子图象: 对角方向的高频子图象, 水平方向的子图象, 垂直方向的子图象和低频子图象。按照人眼视觉属性和多尺度分辨要求的 2 级小波分解和矢量量化位率分配如图 2 所示。

Texture 8 bpp Scalar Quantion	2 bpp N=256 size 2×2(k=4) VQ	Horizontal orientation 0.5 bpp N=256 size 4×4(k=16) VQ
2 bpp N=256 size 2×2(k=4) VQ	0.5 bpp N=256 size 4×4(k=16) VQ	
Vertical orientation 0.5 bpp N=256 size 4×4(k=16) VQ		Diagonal 0 bpp

图 2 子图象最佳位率分配图

Fig. 2 Subimages optimal bit rate allocation diagram

根据 2 级小波分解的特点, 对每一谱段各子图象每象素位率分布如图所示。用 LBG 算法产生各尺度不同方向(水平, 垂直, 对角)子码本, 再进行矢量量化编码。多尺度利用人眼的视觉属性, 能够根据分辨率和方向选择分类编码, 从而获得最佳位率分配。根据人眼的视觉属性这一特点, 由 VQ 获得最佳位率分配如图 2 所示。对角高频区位率分配为 0bpp, 不对这一区域进行 VQ 编码; 水平和垂直及第二尺度分辨的对角区域位率分配 0.5bpp, 进行 256 码字长 4×4(k=16) 大小的 VQ 编码; 第二尺度分辨的水平垂直区域位率分配是 2bpp, 进行 256 码字长 2×2(k=4) 大小的 VQ 编码; 第二尺度分辨包含大量纹理信息的低频区域位率分配为 8 bpp, 不进行 VQ 编码, 而对其进行标量量化(SQ)编码, 这是普遍采用的小波量化编码方法。小波分解的不同分辨率或不同尺度和不同方向的系数有一定对应关系, 可以构成小波树, 图 3 所示为小波 3 次分解树结构。阴影部分低频区每一根节点分出水平, 垂直和对角 3 个节点。这 3 个节点再向各自方向生长出 4 个分支, 各分支再向各自方向生长出 4 个分支, 直到结束。按照各自方向生长出分支形成的树结构如图 3 (b) 所示, 每个树分支的节点数(1+4+16)为 21 个, 定

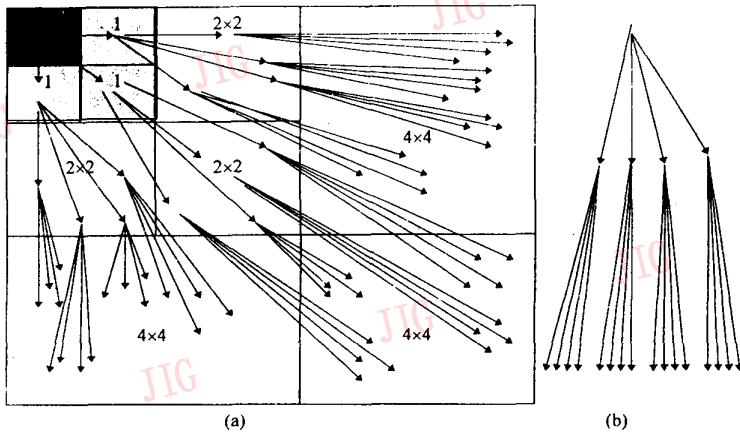


图 3 (a)小波变换系数的树结构 (b)任意方向小波树结构

Fig. 3 (a) The tree structure of wavelet transformation coefficients  
(b) Any orientation wavelet tree structure

义垂直和水平矢量量化为 21 维矢量。对角方向对应高频区,根据人眼视觉属性,高频区不进行处理,所以对角方向上矢量量化的维数(1+4)为 5。此矢量量化的最大优点是位率分配只在阴影区,其它区不需进行分配。深阴影区不进行矢量量化,进行标量化处理,位率分配是 8bpp。浅阴影区根据压缩比的要求不同而定,本文选择 2bpp。

## 4 树结构矢量量化编码的快速算法

矢量量化虽然是图象数据压缩的有效方法之一,但其最大的缺点是通过训练产生码本和根据距离搜索整个码本来获得最佳矢量匹配的大计算量,使得效率明显下降。后来有人提出了改进算法,使效率有所提高,如四交叉树和分类矢量量化算法等。但这些算法无法从根本上克服 VQ 的缺点。根据小波树的特点,本文提出了基于人眼视觉属性和 EZW 算法的树结构矢量量化快速编码算法,基本上克服了矢量量化的上述缺点,可以产生适合各种分布图象数据码本,大大提高了效率。

### 4.1 树结构快速矢量量化编码码本设计

传统矢量量化编码码本基本上全都是用 LBG 方法产生,它是建立在数据统计抽样基础之上的。这种方法产生的码本无法适合各种分布数据,每种分布必须建立相应的码本。而目前小波变换的 EZW 方法是连续标量化逼近,设定不同尺度阈值进行

预测零树和隔离零树,充分利用人眼视觉属性和不同尺度图象的空间-频率特性,是小波变换压缩编码划时代的变革。矢量量化是利用对应维数内的相关性的有效压缩编码方法,广泛应用于诸多压缩方法中。本文提出的方法就是利用人眼视觉属性的 EZW 算法和树结构矢量量化快速编码算法的优点,基本上克服矢量量化的上述缺点。

#### 4.1.1 树矢量维数的确定

当小波分解级数  $K \geq 2$  时(通常情况),根据人眼的视觉属性对不同尺度图象进行 2 的幂次步长的标量化。因为低频亮度子图象集中整幅图象的大部分能量,故对它进行 JPEG 压缩编码为宜,不作树矢量量化的根。

如图 4 所示 2 级小波分解的标量化后,水平和垂直方向小波树为 21 维,对角方向上为 5 维。水平和垂直方向和对角方向小波树矢量维数为  $(1+2^2+\dots+2^K)$  和  $(1+2^2+\dots+2^{K-1})$ 。

#### 4.1.2 树矢量码本设计

下面用一个例子说明本文提出的树结构快速矢量量化编码码本的产生过程。因为每个节点数据的大小决定矢量组合的数量,所以为减少码本的大小,根据人眼的视觉属性和小波空间-频率局部化特性,对小波分解的各子图象进行步长依次为 1, 2, 4, 8 标量化,使每个节点的数分布范围缩小,从而码本数量可以呈天文数字的下降,如图 4 所示。树矢量按各自维数进行矢量分割后,码本的产生时再按照 LBG 方法进行。对于通用压缩方法,可采用扩大训练集的范围,从而获得统计意义上的码本。因为小波树不同于树矢量量化的树,对于复杂度接近的图象,小波树很相似,其码本有一定的适用范围。正如自然界中的不同种类树结构相似一样。这样可对其进行分类得到若干类树结构。一旦码本形成,各种情况的分布数据都可以使用此码本,极大地节省每次均需训练的码本设计。本文是应用基础研究,采用的是 LBG 方法产生的码本,没有使用统计码本。统计码本应用是今后研究工作的一部分,尤其性能分析等。对生成的码本按根值大小进行排序,形成有序码本。

63	-34	-9	10	7	13	-12	7
-31	23	14	-13	3	4	6	-1
15	14	1	-12	5	-7	3	9
-9	-7	-14	8	4	-2	3	2
-5	9	-1	12	4	6	-2	2
3	0	-3	2	3	-2	0	4
2	-3	6	4	3	6	3	6
5	11	5	6	0	3	-4	4

(a)

63	-34	-5	5	2	3	-3	2
-31	12	7	-7	1	1	2	0
8	7	0	-3	1	-2	1	2
-5	-4	-4	2	1	0	1	0
-1	2	0	3	0	0	0	0
1	0	-1	0	0	0	0	0
0	-1	2	1	0	0	0	0
1	3	1	2	0	0	0	0

(b)

(a) 一个大小为  $8 \times 8$  图象 3 级小波变换的例子 (b) 一个大小为  $8 \times 8$  图象 3 级小波变换的标量量化

(a) Example of 3-scale wavelet transform of an  $8 \times 8$  image

(b) Scalarization of 3-scale wavelet transform of an  $8 \times 8$  image

图 4

Fig. 4

#### 4.2 小波树结构矢量量化编码快速算法

小波树结构矢量的构成如图 3 所示,每一根节点都对应 4 个分支,它是一个 21 维矢量。本文小波树结构矢量量化编码快速算法是建立在小波零树预测基础上,不需了解图象数据的分布。4.1 节中设计了码本是如何产生的,产生后的码本将根据要求进行排序。小波树结构矢量量化编码快速算法具体实现分以下步骤:

##### 4.2.1 小波零树建立

不同尺度小波系数构成小波树,如图 3 所示。首先确定低分辨尺度的门限值  $T$ ,它为最大小波系数的二分之一。其余各分辨尺度的门限值依次为上一分辨尺度的门限值的二分之一,按照水平和垂直及对角的方向各自树枝上的系数形成 3 个方向的小波树。如果树根节点系数小于其分辨尺度的门限值,那么它的分支节点系数绝大部分小于对应分辨尺度的门限值,这就是小波零的基本思想,也是本文快速算法的一个前题。具体细节请参考文献[6]。

##### 4.2.2 形成有序码本

根据产生的码本按照根节点值的大小进行排序,产生有序的码本。注意此码本有 5 和 21 维 2 种,根据要求而定是否采用 LBG 码本产生方法,或者是统计意义码本产生方法。简单情况采用前者,复杂情况应用后者。

##### 4.2.3 矢量匹配搜索区间的确定

以往矢量量化矢量匹配搜索区间为整个码本,这样会大大增加搜索时间,使编码效率降低。根据 4.2.2 和矢量根节点值的大小定位搜索区间。由 4.2.2 得知,一个矢量的最佳匹配矢量一定在码本内根值接近该矢量的区间上。假设某个矢量的根节点值为  $x$ ,那么其最佳匹配矢量一定在码本内根值在  $[x-\Delta x, x+\Delta x]$  区间上。这样只需在这个区间上进行搜索,就可以获得该矢量的最佳匹配矢量,避免搜索整个码本所造成的费时,使编码效率明显提高。码本搜索区间的大小可根据压缩系统的要求确定。同样压缩比时,为提高 PSNR,可选择较大的  $\Delta x$ 。反之则取较小的  $\Delta x$ 。

根据这一快速算法就可以快速实现矢量量化压缩编码,根据  $\Delta x$  的大小来自动调节搜索区间,实现在区域内的最佳匹配。同时避免对多个子图象不同位率分配而造成编码烦琐,大大提高了编码效率,这是此算法的突出优点。此算法在处理大复杂度图象时,因为有大量的隔离零树,在峰值信噪比 (PSNR) 指标上可能低于通用传统 VQ 方法。在此情况下,可适当增大  $\Delta x$  来提高 PSNR。将小波零树和隔离零树进行分类 VQ,是克服此算法的一个途径。

## 5 实验结果和结论

本文采用 Antonini 的双正交小波对  $512 \times 512$  的 Lena 测试图象进行 3 级小波分解,得到图 3 所示的 5 和 21 维矢量。用 LBG 方法产生本文的码本,水平和垂直方向上共有  $4K$  个 21 维矢量,对角方向上只有  $2K$  个 5 维矢量。图 5 是使用传统方法和本文方法的比较结果。实验结果表明:本文提出的方法在编码速度上比传统 VQ 和 JPEG 方法快 5~8 倍,PSNR 比传统 VQ 方法提高 2dB ( $\Delta x=20$ ),可以应用各种分布图象数据压缩,是小波变换各种矢量量化编码的较好方法之一。注意  $\Delta x$  取值大小与编码速度成反比,当  $\Delta x$  取值较大时,搜索范围可能是整个码本空间,此时与传统矢量量化编码方法搜索范围(整个码本空间)相同。

本文提出一种基于人眼视觉属性和标量矢量量化的树结构快速编码方法,即根据人眼视觉属性对各子图象进行标量化,再构成树结构矢量量化编码方法,极大地提高了效率。本方法与传统树结构矢量量化最大区别是采用小波树作为树结构矢量量化的

的树结构,充分利用人眼视觉属性和小波树多分辨率的空间—频率局部化特性。本文的结果是通过大量调试得到的,对大复杂度图象 PSNR 指标可能会大幅度下降,此时需扩大码本搜索区域。这是本方法需改进之处。



(a)

(b)

(c)

(a) 原始图象处理 (b) JPEG 编码重建的图象, PSNR=30.51, Rt=0.20 bpp

(c) WT+VQ 编码方法重建的图象, PSNR=36.21, Rt=0.19 bpp

(a)The original image (b) The reconstructed image of JPEG, PSNR=30.51, Rt=0.20 bpp

(c)The reconstructed image of WT+VQ method, PSNR=36.21, Rt=0.19 bpp

图 5 WT+VQ 和 JPEG 编码方法比较

Fig. 5 The comparison of WT+SQ method and JPEG

## 参考文献

- 1 Coman P C, Gray R M, Vetterli M. Vector Quantization of Image Subbands: A Survey, IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., SPIE 1995, ASSP-43 1~43.
- 2 Wang X, Panchanathan S. Wavelet transform coding using NIVQ. In Proceedings of Visual Communication and Image Processing'93 SPIE 1993, 2094: 999~1009.
- 3 Chang P F, Huang Y L. Subband finite-state vector quantization. In Proceedings of Visual Communication and Image Processing '94, SPIE, 1994, 2308: 177~188.
- 4 Conway J H, Sloane N J A. Fast quantizing and decoding algorithms for lattice quantizers and codes. IEEE Trans. Inform.

Theory, 1982, 28(3): 227~232.

- 5 Shoham Y, Gersho A. Efficient bit allocation for an arbitrary set of quantizers. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., 1988 ASSP-36(9): 1445-1453.
- 6 Shapiro J M. Embedded Image Coding Using Zerotrees of Wavelet Coefficients. IEEE Trans. on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445~3462.
- 7 Yongkyu Kim. Wavelet transform image compression using human visual characteristics and a tree structure with a height attribute. IEEE Optical Engineering, 1996, 1: 204~212.
- 8 Marc Antonini, Michel Barlaud. Image Coding Using Wavelet Transform. IEEE Trans. on image processing, 1992, 1(2): 205~220.



闫敬文,中国通信学会会员,中国业余无线电运动协会会员。1987年毕业于吉林工业大学电子工程系,获工学学士学位。1992年毕业于中国科学院长春地理所,获地图学与遥感理学硕士学位。现在长春邮电学院任教,于1994年在中国科学院长春光机所应用光学国家重点实验室攻读在职博士学位。主要研究领域:数字信号处理,小波变换理论和应用,数据压缩,已发表论文十多篇。

# A Fast VQ Coding Method of Wavelet Tree-Structure

Yan Jingwen

(Dept. of Communication Engineering, Changchun Institute of Posts & Telecommunication, Changchun 130012)

Sun Hui, Zhang Shenghua

(The State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Fine Mechanics & Optics, Changchun 130022)

**Abstract** A fast VQ image coding method based on humans visual attribution and applying wavelet tree-structure is proposed in this paper, naming tree-structure fast VQ coding. After the characteristics of VQ was analyzed, a statistic method generating a codebook was designed, and a fast VQ coding method was represented. This method can efficiently remove correlation in image data, obtaining a low transmission bit stream. The apparent advantage of the method is to establish statistics codebooks for various image data, and each treating need not generate codebooks with a high coding efficient achieved, while it can apply to any opportunity with wavelet transformation used in various image and signal data compression. The experimental results show: The fast VQ coding method proposed in this paper can achieve a compression ratio of 40 with a PSNR of 36. 21dB, while its total performance is superior to other methods, and a real-time compression using this method may be implemented.

**Keywords** Wavelet transformation, Data compression, Vector quantization.

(上接 904 页)

# Neural Network Competitive Learning Algorithms for Vector Quantization

Xu Yong, Chen Hexin\*, Dai Yisong\*

(Changchun Institute of Posts and Telecommunications Changchun, 130012)

(\* Jilin University of Technology, Changchun 130025)

**Abstract** Neural network competitive learning algorithms are widely used for vector quantization. In this paper, some typical competitive learning algorithms have been specially investigated and analyzed. A new competitive learning algorithm based on the neuron win probability is presented for vector quantization. Unlike the traditional competitive learning algorithms where only one neuron will win and learn at each competition, every neuron in the proposed probability-sensitive competitive learning algorithm (PSCL) will win to some extent, depending on its win probability and adjustment of distortion distance to the input vector. The new algorithm is shown to be efficient to overcome the problem of neuron underutilization.

**Keywords** Neural network, Competitive learning, Vector quantization, Neuron underutilization, Algorithm