

基于快速对称小波变换的 高效模糊指纹图象压缩方法*

倪林 张长水 荣钢 边肇祺

(清华大学自动化系 北京 100084)

摘要 自动指纹识别系统 AFIS(automated fingerprint identification system)要求对支持该系统的数据库中的指纹图象数据进行压缩,以提高系统实用性,其恢复图象要求有很高的保真度,以避免丢失细节.同时,在实用系统中,还需要有较快的图象恢复时间.本文总结一种基于对称小波变换的高效模糊指纹图象压缩方法,通过对称快速小波变换,选择适当的分解方式,采用自适应标量量化,加上改进的熵编码,实现高速、高保真的要求.同时,设计一种码率控制策略,有效地控制压缩量.实验结果表明:本文的压缩方法能表现出很好的性能.

关键词 双正交小波,快速对称小波变换,自适应标量量化,熵编码,码率控制.

支持自动指纹识别系统 AFIS(automated fingerprint identification system)的指纹图象数据库要存储大量的指纹图象(若一枚指纹以 $512 \times 512, 256$ 灰级的黑白图象存储,则一个人的指纹就需要有 2.5Mbyte 的存储空间).为提高系统的实用性,需要对其中的指纹图象进行压缩,并要求恢复出的图象不丢失用于识别的细节特征,特别是对模糊指纹图象有更高的保真度要求;另外,实用系统还要求图象的恢复时间较快.本文利用快速对称小波变换 FSWT(fast symmetric wavelet transform)算法,将图象信号作对称扩展,再进行周期延拓,并根据所用滤波器的对称性,提高运算效率,通过适当的分解方式,将图象空域信息转换为频域信息,用频域特征实现自适应量化策略,从而对变换系数进行适当的比特分配,最后用改进的熵编码实现图象数据的压缩.为进一步提高压缩方法的实用性,我们采用二级反馈控制比特分配策略,以达到预期的压缩量.实验结果表明,这种编码压缩方法,对某些模糊指纹图象,能以很快的速度进行 20 倍的压缩,并且,通过人的观察,很难发现恢复图象和原始图象的区别.整个编码过程如图 1 所示.

1 快速对称小波变换(FSWT)

S. Mallat^[1]在多分辨率分析理论基础上,建立了小波变换的快速算法,该算法用一对正

* 作者倪林,1967年生,博士,主要研究领域为小波变换,图象压缩,指纹图象压缩、处理、识别,HDTV的信号处理.张长水,1965年生,副教授,主要研究领域为人工智能,模式识别,图象处理,神经网络.荣钢,1945年生,高级工程师,主要研究领域为图象处理,计算机应用.边肇祺,1933年生,教授,主要研究领域为模式识别,图象处理.

本文通讯联系人:倪林,北京 100084,清华大学自动化系

本文 1995-03-03 收到修改稿

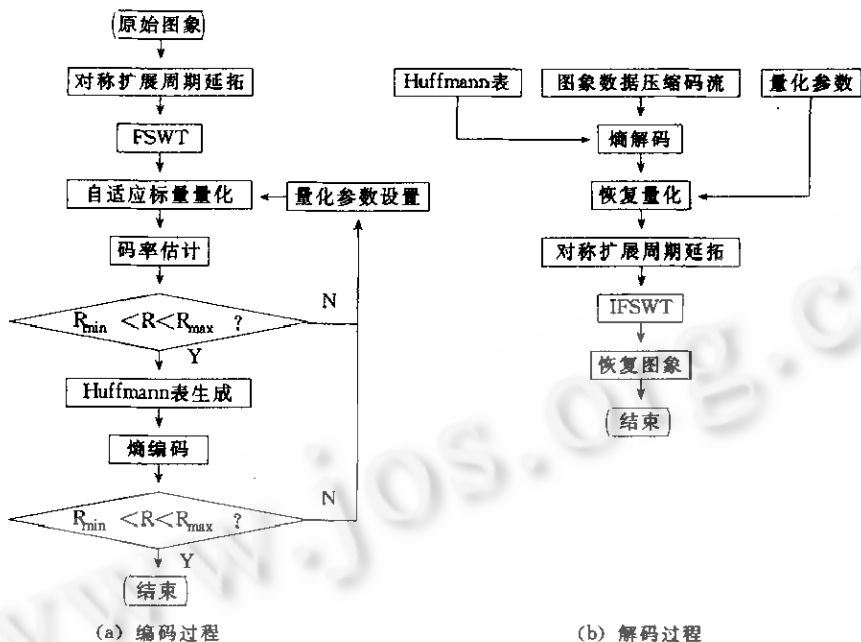


图1 编、解码系统框图

交镜像滤波器实现.

$$s_n^{i+1} = \sum_k s_k^i h_{k-2n} \tag{1}$$

$$d_n^{i+1} = \sum_k s_k^i g_{k-2n} \tag{2}$$

$$s_n^i = \sum_k s_k^{i+1} h_{n-2k} + \sum_k d_k^{i+1} g_{n-2k} \tag{3}$$

式中 h 和 g 分别为低通和高通滤波器的冲激响应, S^0 为一维原始信号序列, S^i 和 $d^i (i > 0)$ 分别为尺度 i 下的平均分量 and 差值分量, (1)和(2)式是分解运算, (3)式是合成运算.

如果所选小波基是正交的, 则有 $\langle h_k, h_{k-2n} \rangle = \delta_n$

$$\langle g_k, g_{k-2n} \rangle = \delta_n$$

$$\langle h_k, g_{k-2n} \rangle = 0$$

用上述滤波器对图象作正交小波变换, 能有效地去除图象信号间的相关性, 但由于 h 和 g 是实的 FIR 滤波器, 因而不可能在正交的同时还保持线性相位^[2], 这一缺点会给注重细节的模糊指纹图象的重建带来不良的影响. 如果所选小波是双正交的 (Biorthogonal), 则可能使相应的 FIR 滤波器保持线性相位, 证明见文献[3]. 这种双正交小波变换, 仍可由(1)、(2)、(3)式的滤波方法实现, 只是合成滤波器有所改变, 若分别以 \tilde{h} 和 \tilde{g} 表示相应的合成滤波器, 则(3)式变为

$$s_n^i = \sum_k s_k^{i+1} \tilde{h}_{n-2k} + \sum_k d_k^{i+1} \tilde{g}_{n-2k} \tag{4}$$

所谓的双正交在滤波器关系上表现为 $\langle \tilde{g}_k, g_{k-2n} \rangle = \delta_n$

$$\langle \tilde{h}_k, h_{k-2n} \rangle = \delta_n$$

$$\langle \tilde{h}_k, g_{k-2n} \rangle = 0$$

$$\langle \tilde{g}_k, h_{k-2n} \rangle = 0$$

相应地, h 和 g 对应的尺度函数 $\varnothing(x)$, 小波函数 $\Psi(x)$ 以及 \tilde{h} 和 \tilde{g} 对应的尺度函数 $\tilde{\varnothing}(x)$, 小波函数 $\tilde{\Psi}(x)$ 具有如下关系

$$\begin{aligned} \langle \tilde{\varnothing}(x-l), \varnothing(x-k) \rangle &= \delta_{lk} \\ \langle \tilde{\Psi}(x-l), \Psi(x-k) \rangle &= \delta_{lk} \\ \langle \tilde{\varnothing}(x-l), \Psi(x-k) \rangle &= 0 \\ \langle \tilde{\Psi}(x-l), \varnothing(x-k) \rangle &= 0 \end{aligned}$$

双正交小波滤波器常常是对称的, 在小波变换中为解决边缘效应问题, 又常常对信号进行对称扩展, 因而称其为对称小波变换. 我们选用如图 2 所示的尺度函数和小波函数, 它显然有别于 Daubechies 的正交小波^[4], 双正交小波对应的分解滤波器系数如表 1 所示.^[5]

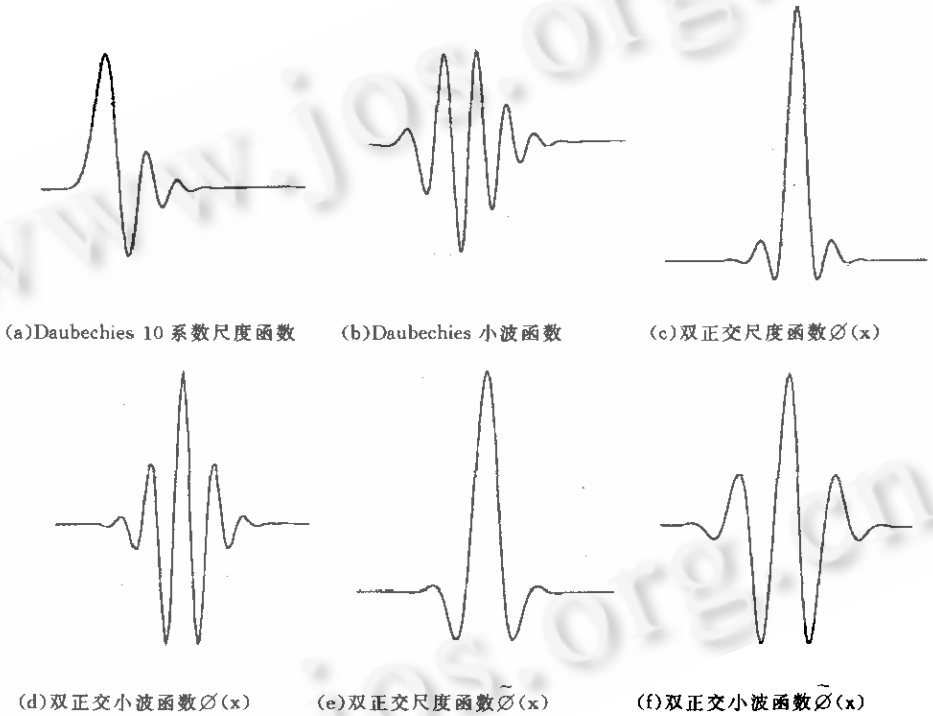


图 2 尺度函数和小波函数

表 1 分解滤波器系数

$$\begin{aligned} h(0) &= -5\sqrt{2}X_1(48|X_2|^2 - 16R(X_2) + 3)/32 \\ h(\pm 1) &= -5\sqrt{2}X_1(8|X_2|^2 - R(X_2))/8 \\ h(\pm 2) &= -5\sqrt{2}X_1(4|X_2|^2 + 4R(X_2) - 1)/16 \\ h(\pm 3) &= -5\sqrt{2}X_1(R(X_2))/8 \\ h(\pm 4) &= -5\sqrt{2}X_1/64 \\ g(-1) &= \sqrt{2}(6X_1 - 1)/16X_1 \\ g(-2, 0) &= -\sqrt{2}(16X_1 - 1)/64X_1 \\ g(-3, 1) &= \sqrt{2}(2X_1 + 1)/32X_1 \\ g(-4, 2) &= -\sqrt{2}/64X_1 \end{aligned}$$

其中 $R(\)$ 为取实部.

$$X_1 = A + B - 1/6$$

$$X_2 = -(A + B)/2 - 1/6 + i \sqrt{3}(A - B)/2$$

$$A = \left(\frac{-14 \sqrt{15} + 63}{1080 \sqrt{15}} \right)^{1/3}$$

$$B = \left(\frac{-14 \sqrt{15} - 63}{1080 \sqrt{15}} \right)^{1/3}$$

相应的合成滤波器经过对分解滤波器作调制和延迟后得到

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

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

由于所选滤波器系数为奇数个,而图象的尺寸是偶数,因此在变换时对信号作如图 3 所示形式的对称扩展和周期延拓,这样当 $n < 0$ 和 $n > N-1$ 时, $x(n) \neq 0$. 为提高运算效率,用(1)、(2)、(4)式对图象作对称小波变换时,使 n 的值始终从 0 开始,用(1)、(2)式对图 3(b)的信号分解,直至取得 $N/2$ (N 为偶数)个值时结束;用(4)式对图 3(c)、(d)的信号合成,直至取得 $2N$ 个值时结束,从而形成一般小波变换的塔式数据结构. 由于我们使用了对称滤波器,因而滤波过程中的乘法运算可相应地减少 $(M-1)/2M$ (M 为奇数)或 $\frac{1}{2}$ (M 为偶数),其中 M 为滤波器的系数个数.

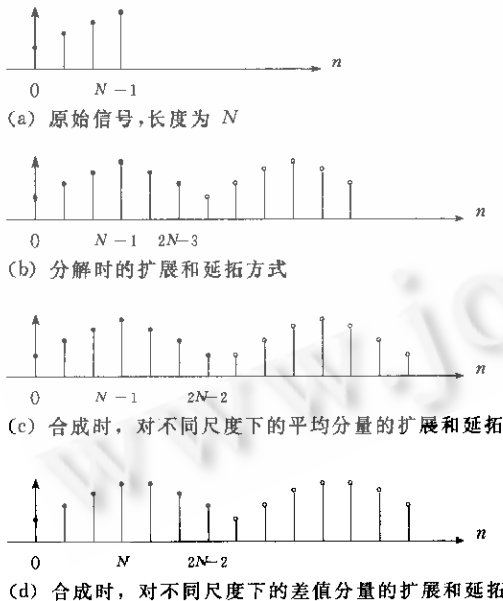


图3 对称小波变换中,信号的对称扩展和周期延拓

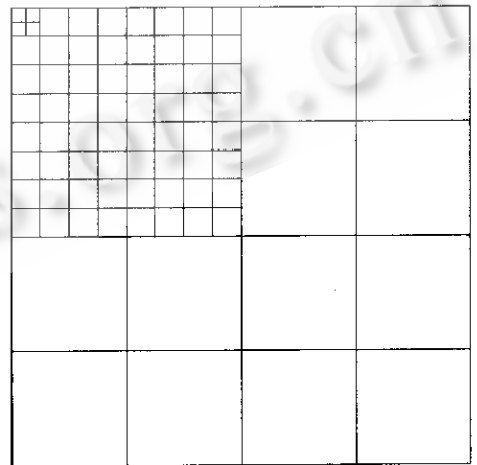


图4 对称小波变换对图象的自适应分解方式

二维小波变换是通过对数据陈列的行和列分别进行一维变换实现的. 我们对指纹图象作如图 4 的方式分解,这是一种小波包的自适应分解方式^[5,6],使图象不同的频谱区域具有不同的频率分辨率,下节将会看到这种分解方式有利于频带自适应标量量化的实现.

2 自适应标量化

在图 4 的各高频子带中,由于没有低频分量,因而均值都接近于 0,我们用子带中的方差表示子带中的能量.如果用小波包的方法对图象作等带宽分解,则频率分辨率越高,子带中的空域信息就越少,而频带能量分布所包含的信息会越多,此时,用子带中的能量就可越准确地拟合图象频谱.为了更好地利用频率信息,我们希望在能量高的图象频谱区域能具有较高的频率分辨率,以使基于频域特征的量化策略对图象内容具有较强的自适应性.

基于频域特征的量化策略可表示为

$$I_k = f(\sigma_k^2, C_k) \tag{5}$$

其中 C_k 和 I_k 分别为 k 子带内的变换数据阵列和量化数据阵列, σ_k^2 为 k 子带内变换数据的方差. σ_k^2 值大则表示 k 子带的能量多,我们采用细量化,反之则采用粗量化.在实际量化中还设定阈值 T_σ ,如果 $\sigma_k^2 < T_\sigma$,则认为 k 子带的的数据对图象重建意义不大,而对其清零.

3 熵编码

量化后的系数呈近似的广义高斯分布^[7],对其进行熵编码能有效地压缩码率.在编码时,只对上述分布的某个方差内的系数进行熵编码,对该方差外的系数,直接将其值记录在压缩码流中.另外,由于量化后的数据中,零的个数很多,我们将不同游程长度的零系数作为一个独立符号进行编码.

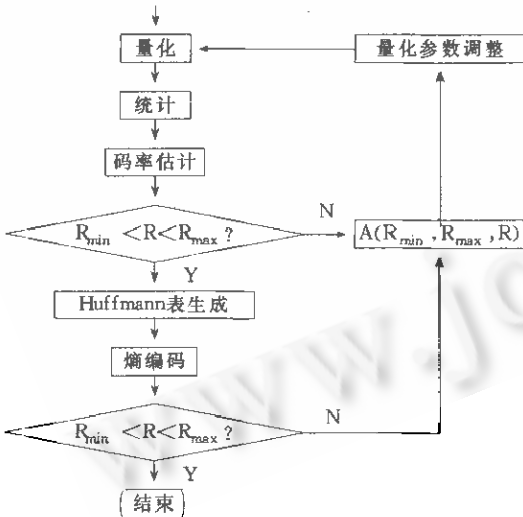


图5 码率控制

AFIS 要求压缩数据能有一个大致的 byte 数,在编码时,我们设计一个带有二级反馈的码率控制器来控制压缩量.经过编码后的数据包括量化参数、Huffmann 表以及压缩后的图象数据,用以存储量化参数的数据量是固定的,而用以记录 Huffmann 表的数据量变化不大,需要控制的是图象数据的压缩量,图象数据的压缩量关键取决于量化环节,改变量化参数,就可以调整最终的压缩量.我们所用的码率控制方法如图 5 所示,其中 $[R_{min}, R_{max}]$ 为所要求的码率.图 5 中首先用熵值估计码率,并将其作为第 1 级控制.但在编码时,所确定的方差以外的符号越多,这种估计就越不准确,为确保码率落在所希望的范围中,我们以

最终编码结果进行第 2 级控制.

对某一类指纹图象(如现场或档案图),选定适当的初始量化参数,往往能一次性达到所要求的码率.如果直接记录的系数较少,此时,用熵值估计码率比较准确,则可减少二级控制运行的次数,从而节省重复生成 Huffmann 表及编码的时间.另外,函数 $A()$ 输出的调节量适当,也会加快系统运行的时间.

我们通过估计待编码符号的平均比特率来计算图象数据的大致压缩量. 设有 N 个待编码符号, 第 i 个符号个数为 n_i , 则第 i 个符号的概率可近似表达为

$$P_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^N n_j}$$

则用熵编码所能取得的每个符号的平均比特数为

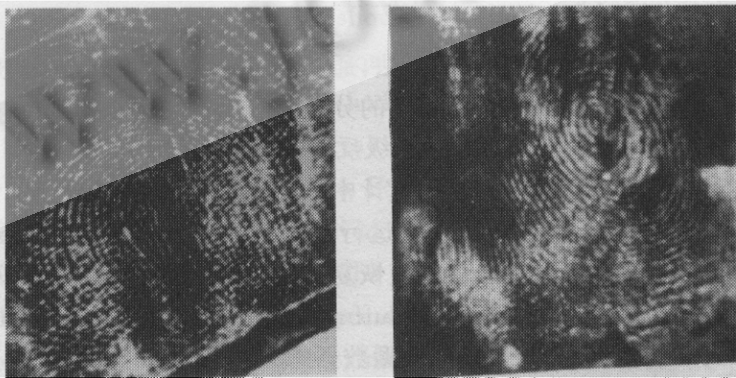
$$b_e = - \sum_{i=1}^N P_i \log_2 P_i = - \frac{1}{\sum_{j=1}^N n_j} \sum_{i=1}^N n_i \log_2 \frac{n_i}{\sum_{j=1}^N n_j}$$

由熵编码得到的总比特数 $B_e = b_e \sum_{i=1}^N n_i$

设量化参数的比特数为 B_q , Huffman 表大约为 B_h 比特, 方差外的符号占 B_c 比特, 则估计出的压缩数据大小为 $B = (B_e + B_q + B_h + B_c) / 8$ byte

4 实验结果

用上述编码方法对 $512 \times 512, 256$ 灰级的现场指纹图象进行编码, 因图象的内容不同, 则编码结果会产生较大的差别. 这种编码方法对图象的频率特性很敏感, 图象的对比度大, 则需要较大的量化等级才能取得预期的压缩量. 图 6(a) 的图象较图 6(b) 的对比度大, 因而, 用相同的量化参数, 对图 6(b) 压缩, 能取得较好的效果. 在实际应用中, 为保证指纹图象中的细节不受影响, 我们将压缩图象的码率保持在 20k byte 左右, 从图 6 中可看出, 此时, 很难找到恢复图象和原始图象间的区别. 另外, 为满足实际应用的要求, 加快程序运行时间, 除了作快速对称小波变换(FSWT)外, 还采用了熵值估计以及其它程序结构的优化方法, 如考虑量化恢复后, 数据陈列中零的个数很多, 从而在逆快速对称小波变换(IFSWT)中减少卷积次数, 并在恢复量化时, 排除对零值元素的运算等. 在 indigo 工作站上运行该系统, 对 512×512 的灰度图象编码, 编码过程约需 10s, 而解码过程只需 3s 左右, 解码时间的快慢对系统影响较大, 这也正是我们在程序设计中刻意追求的.



(a) 原始图象 1

(b) 原始图象 2



R=0.565bpp PSNR=32.934dB

(c) (a)的恢复图象



R=0.175bpp PSNR=24.643dB

(d) (a)的恢复图象



R=0.638bpp PSNR=41.529dB

(e) (b)的恢复图象



R=0.395bpp PSNR=38.190dB

(f) (b)的恢复图象

图6

5 结论

基于快速对称小波变换的图象压缩方法,通过对图象信号的对称扩展和周期延拓,解决变换中的边缘效应问题,在变换中选择适当的分解方式,以提高基于频率特征的量化策略对图象内容的自适应性.在编码过程中,用二级反馈来控制压缩码率,最后用 Huffman 码对量化数据作逼近熵值的码率压缩.在程序设计中,利用滤波器的对称性以及图象数据的典型特征等,通过程序结构的优化,来减少程序运行时间.实验结果表明,上述编码方法,能快速地以预期的码率压缩模糊指纹图象,并能使恢复图象基本保留原图象中的所有特征信息.

编码过程的时间开销较大部分用于 Huffman 表的生成,而在压缩码流中,Huffman 表要占多于 1k byte 的数据量,如果能从典型数据中,先生成 Huffman 表,并将某类指纹图象固定下来,则能进一步提高该编码系统的效率.

参考文献

1 Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition; the wavelet representation. IEEE Trans. on PAMI,

- 1989, **11**(7):674~693.
- 2 Vetterli M, Heley C. Wavelets and filter banks: theory and design. *IEEE Trans. on SP*, 1992, **40**(9):2207~2232.
 - 3 Cohen A, Daubechies I, Feauveau J C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets. *Commun. on Pure Appl. Math.*, 1992, **45**(5):485~560.
 - 4 Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets *commun. Pure Appl. Math.*, 1988, **XLI**:909~996.
 - 5 Gray—scale fingerprint image compression specification. FBI, U. S. A, Feb. 1993.
 - 6 Wickerhauser M V. Lectures on wavelet packet algorithms. 小波国际讨论会, 武汉, 1992.
 - 7 Antonini M *et al.* Image coding using wavelet transform. *IEEE Trans. on IP*, 1992, **1**(2):205~220.
 - 8 Vaidyanathan P P. Multirate digital filters, filter banks, polyphase networks and applications: a tutorial. *Proc. IEEE*, Jan. 1990, **78**:56~93.
 - 9 Oppenheim A V, Schafer R W. Digital signal processing. Englewood Cliffs, NJ; Prentice—Hall, 1975.
 - 10 Rioul O, Duhamel P. Fast algorithms for discrete and continuous wavelet transforms. *IEEE Trans. on IT*, 1992, **38**(2):569~586.
 - 11 孟庆生. 信息论. 西安:西安交通大学出版社, 1989.
 - 12 姚庆栋, 毕厚杰, 王兆华等. 图象编码基础. 北京:人民邮电出版社, 1984.

A HIGH—PERFORMANCE COMPRESSION METHOD FOR LATENT FINGERPRINT IMAGES BASED ON THE FAST SYMMETRIC WAVELET TRANSFORM

Ni Lin Zhang Changshui Rong Gang Bian Zhaoqi

(Department of Automation Tsinghua University Beijing 100084)

Abstract It is usually required that fingerprint images in the database of an AFIS(automated fingerprint identification system) should be compressed to improve its practical performance and also that the restored images should have high fidelity to avoid loss of minuetia while the time consumed in the restoration is required short enough. This paper proposes a high—performance compression method for the latent fingerprint images based on the FSWT(fast symmetric wavelet transform) which meet the requirement of high speed and high fidelity by simultaneously using the FSWT, the proper decomposition style, the adaptive scalar quantization and the improved entropy coding method. Meanwhile a bit rate control strategy is designed to control the compression ratio effectively. The experimental results show that the proposed compression method has high performance.

Key words Biorthogonal wavelet, fast symmetric wavelet transform, adaptive scalar quantization, entropy encoding, bit rate control.