

基于 DCT 编码的新进展

鲁业频¹⁾ 李凤亭²⁾ 朱仁义¹⁾ 陈兆龙¹⁾

¹⁾(巢湖学院物理系, 安徽巢湖 238000) ²⁾(清华大学图象图形研究所, 北京 100084)

摘要 目前, DCT 编码在 JPEG、MPEG、H. 26x 等编码标准中有着广泛的应用, 但随着 Shapiro 关于小波的嵌入式零树小波编码以及 Said 等人提出的集合分裂等级树编码的成功应用, 使图像及视频信号的压缩编码提高到了新阶段, 这虽然对传统的 DCT 编码提出了挑战, 然而, Xiong 等人利用嵌入式 DCT 块变换之间直流系数(DC)的高度相关性也能获得较高的编码性能, 因为对 DCT 后的系数进行重组, 同样具有小波多分辨率图像的特性。此外, 基于形状自适应 DCT、区域支撑 DCT 以及形态 DCT 的提出, 还有利用 DCT 系数实现信息隐藏、图像大小调整、模式识别等等, 都将 DCT 功能与性能推向更高层次, 使得基于常规的 DCT 编码有了更大的应用与发展空间。为使人们对 DCT 编码现状有一概略了解, 在对该技术进行深入分析与研究的基础上, 对该技术作了概略介绍, 并对 DCT 编码发展进行了展望。

关键词 图像处理 离散余弦变换 DCT 系数 视觉特性 数字水印 图像大小调整

中图法分类号: TN919.81 TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)01-0001-10

New Advances Based on the DCT Transforming Coding

LU Ye-ping¹⁾, LI Feng-ting²⁾, ZHU Ren-yi¹⁾, CHEN Zhao-long¹⁾

¹⁾(Dept. of Physics, Chaohu College, Chaohu Anhui 238000)

²⁾(The Institute of Image and Graphics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract DCT (Discrete Cosine Transform) transforming coding has been widely used coding-standards such as JPEG, MPEG and H. 26x exclusive of JPEG2000 at present. The compressing codings for image/video signals have been advanced to a new stage since the EZW (Embedded Zerotree Wavelet) had been introduced by Shapiro and the SPIHT (Set partition in hierarchical trees) applied by Said et al, which are a competitive challenge against the conventional DCT's coding. However, DCT's coefficients have a similar multiresolutional attributes after reorganization its datum like wavelet transforming. There are many excellent performances in the based-DCT such as arbitrarily shaped DCT, region support DCT and morphological representation of DCT coefficients are proposed. Digital watermarking, image resizing and pattern cognition can be done through utilizing DCT's coefficients, and so on. The capability and performance of the DCT have further been promoted to a higher phase. For instance, object-based coding for DCT is a promising technique for next-generation coding. Besides, the experiments show that MR-DCT (Morphological representation of DCT) is among the state-of-the-art DCT-based image coders reported in the literature. What mentioned above have been studied and analyzed deeply in this paper. Hereby, the future development of DCT is also conjectured.

Keywords Discrete cosine transform (DCT), DCT coefficients, Human visual system (HVS), Digital watermarking, Image resizing

1 引言

离散余弦变换(DCT)是1974年由Ahmed和Rao提出的。DCT的提出虽然比FFT(Fast Fourier

Transform)晚,但由于其性能更接近于理想的KL变换,所以在信号处理中得到广泛应用。DCT的快速算法在继承完善的DFT(Discrete Fourier Transformation)基础上,自身也在不断进步,如一个 8×8 图像块的DCT(或逆DCT)按定义计算,需

要 1024 次乘和 896 次加法运算,再加上运用 DCT 的正交性、对称性,包括采用一些碟形算法等,其加乘次数已近极限^[1,2]。由于目前集成电路技术实现一次加、乘运算的时间几乎相等,因此能将原来的进行正交变换需要占系统总时间的 30% 以上降为原来时间的 1/5~1/3。

常规的 2D DCT 都是由可分离的 1D DCT 组成,表 1 根据文献[3~7]总结出 1×8 输入信号的计算量。采用递归 2D DCT 以及下标映射法来设计 2D DCT 已经比用传统的行列法运算量大为减少,特别是当 2D DCT 用于图像或视频编码系统中时,就是根据信号的自然属性和视觉特性 HVS 先将 DCT 后的系数按 Zigzag 扫描,然后进行只取前若干个较大的低频系数作为特征分量,并用零代替后面高频系数的截断 DCT,实际编码中,DCT 正是以它的“提取特征成分的能力和运算速度之间的最佳平衡”来显示出其应用优越性的。3D DCT 以及在利用彩色图像中的 RGB 分量上全部信息的同时进行变换压缩,则不仅可以有效地去除彩色图像中的各种冗余信息,还可在 3D DCT 压缩编码中实现信息隐藏^[8,9];另外,实际传输的甚低码率,如在 H. 263 中,且图像(块)间平缓区域占多数,则可通过快速运动补偿(减小时间冗余)来得到帧间(帧内直接 DCT)的 8×8 预测误差图像块 $x(m, n)$,若满足

$\sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 \text{abs}(x(m, n)) < 16Q$ (Q 为量化参数),即判断该块为零的 DCT 系数,由于这样可以避免计算该 DCT 块的所有频率系数,因而提高了实时应

用的能力^[10],其典型的代表如 Yu 等就在预先判断量化后的 DCT 系数全为零方面作了系统的研究^[11]。总之,DCT 各种快速算法的进步有力地促进了基于 DCT 编码的进展,主要表现在基于区域的 DCT 方法上和对变换后的系数进行策略性重组及其系数的高效应用上,譬如层次嵌入式 EZH-DCT (Embedded Zerotree based on Hierarchical DCT)、区域支撑 RS-DCT (Region Support DCT)、形态 MR-DCT (Morphological Representation of DCT) 以及整型 DCT 等均强调变换方法的改进,其中 EZH-DCT 与 MR-DCT 是利用 DCT 系数的重组来得到类似小波多分辨率图像特性,另外,还有利用 DCT 域系数的分布特性及 HVS 特性来实现信息隐藏(如数字水印)、内容检测、块虚像检测与消除,以及 DCT 域图像大小的调整,等等。这些无疑丰富发展了传统 DCT 的理论与实践,使之有了更大的应用与发展空间,本文就此作了广泛的研究与分析。

表 1 1×8 DCT 的计算量比较

	Wang	Loeffler	Chen	Suehiro	Vetterli
乘法	11	11	16	12	12
加法	29	29	26	29	29

2 DCT 的意义及其与 DWT 的比较

2.1 DCT 的实践意义

DCT 是酉变换的一种,其变换前后的信号熵和能量不变,且在时域(或空域)中的 n 维信号 X ,其变换核可分离的正、逆 DCT 分别定义如下:

$$F(u_1, \dots, u_n) = \sqrt{\frac{2^n}{N_1 \dots N_n}} c(u_1) \dots c(u_n) \sum_{t_1=0}^{N_1-1} \dots \sum_{t_n=0}^{N_n-1} X(t_1, \dots, t_n) \cos \frac{(2t_1+1)u_1\pi}{2N_1} \dots \cos \frac{(2t_n+1)u_n\pi}{2N_n} \quad (1)$$

$$X(t_1, \dots, t_n) = \sqrt{\frac{2^n}{N_1 \dots N_n}} c(u_1) \dots c(u_n) \sum_{u_1=0}^{N_1-1} \dots \sum_{u_n=0}^{N_n-1} F(u_1, \dots, u_n) \cos \frac{(2t_1+1)u_1\pi}{2N_1} \dots \cos \frac{(2t_n+1)u_n\pi}{2N_n} \quad (2)$$

其中, $c(0) = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 其他 $c(\cdot)$ 为 1; $N_1, \dots, N_n$ 为相应维的大小。通常大小为 $N \times N$ 像素的 2 维图像,其 DCT 的各行(列)基矢量均是归一正交的(为了保证变换前后熵或范数相等)。由于图像信号的统计特性接近一阶马氏链,因此 DCT 基矢量与之非常匹配,且不仅 DCT 基矢量的设计在多数情况下符合 HVS 特性,而且编解码电路简单。综合 DCT 编解码性能及解相关性等方面因素,它仅次于理想的 KLT,所以 DCT 在众多变换(离散傅氏变换、斜变

换、Haar 变换、KL 变换、沃尔什变换和 DCT 等)中脱颖而出。经过 DCT 后的系数主要值集中在左上角低频区域,其中 $F(0,0)$ 直流值最大。由于变换后系数矩阵右下角绝大多数高频系数趋向于零,因此为结合 HVS 特性,采用(有死区的)量化、Zigzag 扫描,截断 DCT 的变长压缩编码创造了条件,更重要的是为数字化图像/视音频信号的压缩找到了切实可行的方法。尽管带限的频率域模型存在频谱的截断误差,但由于其求解精度和抗噪声能力较好,因而有助于问题更加精确的描述和求解,这也正是频

率方法研究的意义所在。

2.2 与 DWT 变换的比较

20 世纪 80 年代出现的小波变换编码,特别是 20 世纪 90 年代 Shapiro 的 EZW 以及 Said 等人关于 SPIHT 的成功应用,对传统的 DCT 编码提出了最严峻的挑战^[12,13],然而,Xiong 等人就基于离散小波变换(DWT)与 DCT 编码的性能作了系统深入的比较,表 2 列出了文献[14]和文献[15]算法编码重建图像的比较结果。通过对表 2 中数据的分析容易得出这样一个结论:在率失真方面,压缩效率(比特

率)并不正比于视觉质量(峰值信噪比)的降低。也就是说,DCT 仍然能产生高压缩效率和高峰值信噪比,因此 DCT 仍是未来图像/视频压缩编码中不可缺少的主要工具之一。借助于小波变换来压缩图像,其编码质量并非任何情况下均占优,譬如“采用内嵌 DCT 子带编码算法”对某些图像进行压缩时还优于 SPIHT^[16],且多数 DCT 的计算较小波变换简单,例如,时域信号的卷积对应于 DCT 频域的直接乘积,而小波变换则无此计算之简单性。

表 2 典型图像(Lena 和 Barb)DCT 与 DWT 编码恢复图像的 PSNR 比较 单位:dB

比特率 (bpp)	压缩编码算法							
	JPEG		Improved-JPEG		EZ-DCT		SPIHT	
	Lena	Barb	Lena	Barb	Lena	Barb	Lena	Barb
0.25	31.60	25.20	32.30	26.70	32.25	26.83	34.11	27.58
0.50	34.90	28.30	35.90	30.60	36.00	30.82	37.21	31.39
0.75	36.60	31.00	38.10	33.60	38.06	33.70	39.04	34.25
1.00	37.90	33.10	39.60	35.90	39.62	36.10	40.40	36.41

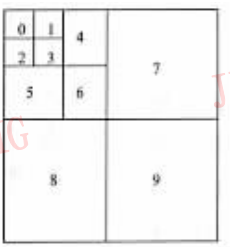
3 DCT 具有小波多分辨率图像分解之特性^[17,18]

研究表明,有多种方法能使 DCT 产生类似于小波的多分辨率图像分解特性。常规的 2D DCT 通过系数重组就可得到一种多分辨率的图像,即可先将一幅图像分成 $N \times N$ 块($N=2^L$),然后变换到 DCT 域中的每个块,其可被看成是尺度为 L 的具有 $3L+1$ 子带分解的系数树。若对所有 DCT 块的相同频率子带

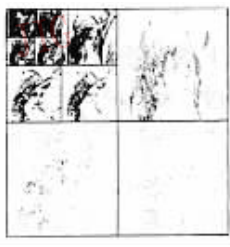
进行分组,并把它们放到对应位置上,则 $N=8$ 时,3 层 10 子带 DCT 系数重组如图 1 所示。图 1(b)中 0 代表子带 0 组(由所有 DCT 直流系数组成), $\dots$,9 代表子带 9 组(即所有对角子带分量),其重组后的 DCT 系数可以进一步利用 DCT 编码器来获得更优的编码性能。在基于层式 DCT 的嵌入式(EZH-DCT)编码中^[17],采用的就是这种形式的分解,结果比 EZ-DCT 编码更令人满意(如表 3 所示)。事实上,将各个分块 DCT 后的系数,按其原来空间位置排列,即得到基本的多分辨率图像。



(a) 8×8 块的 DCT 系数



(b) 与 DCT 系数相对应的 3 层子带形式



(c) 重组 8×8 DCT 系数后的多分辨率图像

图 1 DCT 系数的多分辨率分解

表 3 几种压缩编码算法重建图像 PSNR 比较 单位:dB

比特率 (bpp)	压缩编码算法			
	MR-DCT		EZH-DCT	EZ-DCT
	Lena	Barb	Lena	Lena
0.25	32.55	26.84	32.40	32.27
0.50	35.99	30.61	36.60	35.98
0.75	38.07	33.59	38.10	38.04
1.00	39.49	35.89	39.60	39.60

层式 DCT 是另一种多分辨率分解形式,即先将原始图像经过 2D DCT 后的系数块均分为 4 个块,再把具有相同频带的子块按原来的空间位置组合成同频带子带,即得到 LL_1 、 LH_1 、 HL_1 和 HH_1 ,接着对低频 LL_1 子带作逆 DCT,然后将得到的图像作为第 2 层输入图像,并重复上述过程,直至低频 LL_n 仅含直流系数为止,即得到类似小波变换的多分辨率图像。小波零树编码是根据同一类子带不同层系

数的自相似性,通过引入零树概念来获得高的压缩比和良好的重构图像质量。在此不难得出,层式 DCT 编码较 EZ-DCT 具有更高重构图像质量的原因是:(1) 经过系数块重组后,由于本层输入图像因 DCT 分块而产生的边界有一半落入更高一层输入图像的 DCT 分块内,于是原来由这些边界产生的方块效应被消除;(2) 与小波变换类似,其图像层数越高,对应的分辨率越低;(3) 分层子带变换(即将原信号按高、中、低频分成若干频带)中,由于高分辨率频带与低分辨率频带之间存在着相似性,因而可由低分辨率频带近似高分辨率频带,进而得到比原图像分辨率更高的图像。因为相同方向的细节子图在不同的分辨率下是相似的,即高分辨率下的边沿特性可以看作是图像在小尺度下的边沿特性,而低分辨率下的边沿特性可以看作是图像在大尺度下的边沿特性,也就是不同尺度下的图像存在着相似,这一点可与小波多分辨率分析相对应。可进一步推断,如已知图(1)中 0 和 3 个方向上的细节子图 1、2、3,则可以恢复出更高分辨率的图像等。

DCT 的多分辨率图像分解,为适应网络图像信号的可分级传输、内容检索等提供了条件。从人类视觉特性对图像进行由粗到细的理解过程看,用于图像压缩编码的任何变换应该具有多分辨率特性,像小波、分形、子带和 DCT 等,而不具有此特性的变换则一般不能直接应用,其生命力不强。

4 基于区域的 DCT 编码进展^[19~26]

4.1 DCT 编码进展

因为传统的块 DCT 变换、量化和编码方法具有不太高的压缩比和块虚像,所以此方法应改进,其中块虚像产生是由于对低频系数的量化而导致的相邻块之间的强度不连续,而振铃现象则是由于粗量化而丢弃高频系数所致,尤其是在低比特率时更为严重。消除块虚像可采用的后处理技术较多,但目前也有采用速度更快的直接在 DCT 域中进行检测和消除块虚像技术的趋向,其特点是当一个 DCT 系数由拉普拉斯概率函数模型化时,减小块虚像可以对 DC 系数和 AC 系数进行修正或重新计算(DC 系数尤为重要)。文献[27]提出,在由每个 DCT 块所形成的大小为原图像 1/64 的 DC 图像中,首先采用 Sobel 梯度算子把原图像所有边缘块划分成 3 类,然后采用不同的类处理方法进行处理。这样才能在

尽可能多地保留原图像完整性的同时,减小块虚像。

目前基于块 DCT 编码的方法已经得到很大改进,其表现在改进变换手段上和对变换信号的修正上,譬如 Sikora 提出的形状自适应 SA (Shape Adaptive)-DCT,其特点是由具有自适应的变换阶和位移操作的 1D DCT 组成,为提高帧间编码效率, Kaup 提出归一化的 SA-DCT;为平滑区域边界的棱角, Kaup 又提出通过一个对边界进行简单的滤波来提高编码效率的低通外插 LPE (Low Pass Extrapolation)-DCT,并将填零 DCT 用于帧间编码中;为进一步提高帧内编码效率, Kauff 等人在 SA-DCT 基础上,又提出 Δ SA-DCT,即通过引入一个 DC 系数分离过程,将其用到归一化的 SA-DCT 中,以完善 SA-DCT。除了上述改进变换手段外,还有一种修正信号适应于 DCT,譬如 DCT 块内的外像素用外插值(特殊时,用块内平均值)的填充 RF (Region Filling)-DCT,等等,且这种基于 DCT 编码的改进尚无止尽的迹象。由于最近提出的注重区域编码的区域支撑 RS-DCT^[26]综合了自适应变换和外插法的优点,因此 RS-DCT 为基于 DCT 的区域编码,进一步拓展了新的研究与应用空间。

4.2 RS-DCT 编码^[26]

RS-DCT 克服了常规的 2D DCT 具有较小紧支撑的不足,其编码关键步骤是约束 DCT 基的支撑区域、调节约束区域的基矢量和以迭代方式选择最优系数组。通常一个块大小为 $N \times N$ 像素,其 2D DCT 有一个 $N \times N$ 像素的矩形支撑区域,一个块的 $N \times N$ 个像素经变换后可获得一组代表 DC 系数到最高频率的 $N \times N$ 个系数。如果目标区域内的像素数为 M (小于 $N \times N$),且对于 RS-DCT 为匹配目标区域,则其支撑区域或基矢量的维数从 $N \times N$ 减到 M 。由于此时 DCT 基矢量因受到约束而失去正交性,因此解决这一问题方法应从常规的 2D 解码简单性考虑,即导出 RS-DCT 基的尺度基,其目的是:(1) 为了提高 RS-DCT 后低频系数的聚集度,并对尺度基的主要分量引入频率加权;(2) 鉴于 RS-DCT 基的“范数”不统一,为在重构每个像素时,有相同的误差功率,以获得理想的率失真性能,因此在编码器的量化前应乘以系数 $M^{1/2}/N$,接收端乘以系数 $N^{1/2}/M$ ($N \times N = M$ 时为普通 DCT),以实现从空域到频域的功率增益补偿(变换的功率增益取决于支撑区域内的像素数 M)。

4.3 若干改进的 DCT 编码比较

RF-DCT、RS-DCT 与常规的 2D DCT 在频率分析能力上相差不大,且因 RS-DCT 有功率补偿,故在计算量上略高于 RF-DCT。SA-DCT 在系数位置与空间频率之间,因位移操作而失去清晰的关系,这既影响到 2D 相关性,也降低了编码性能,特别是在低比特率上。RS-DCT 在高比特率上,比 SA-DCT 能提供更多的非零系数,因为 RS-DCT 可提供多于 M 个系数,而 SA-DCT 系数的个数则从不超过 M ,而且 LPE-DCT 的主要不足是区域边界上的不连续。尽管没有外插,但由于 RS-DCT 是分析目标区域,并自然地扩展到每个频率分量上,因此这个区域适当大,就越能体现出相关性,编码性能也越优越。RS-DCT 较 SA-DCT 编码性能优越,特别是当分块数增大时更为明显。RF-DCT、SA-DCT 和 LPE-DCT 等改进的 DCT 编码,已在 MPEG-4 中有验证模型 (VM)^[28]。上述各改进方法的共同点是在接收端与传统 2D DCT 解码兼容,其中自适应变换法是以稍高的计算量换取较高的率失真性能和编码效率,而外插法解码则更为简单。可见,为了获得较高的压缩比和 $PSNR$,对传统的 DCT 编码的改进是必须的,其改进的思路除变换的块数不局限于 8×8 块以外,多种算法的统一将是未来的研究课题和发展方向,譬如 DCT 与分形的结合,以及利用分形图像间的相似性与 DCT 结合 (仅用图像块与相似块在 DCT 域中少数几个低频系数进行匹配比较) 来进一步提高压缩比和 $PSNR$,文献^[29,30]在此方面作了可行性探索。此外,还有 DCT 与小波的结合, DCT 与形态学的结合, DCT 与奇异值分解 (SVD) 的结合等,其中结合 SVD 的图像压缩编码性能明显高于普通的 DCT 编码性能,但相应复杂性也有所提高^[31]。

5 基于 DCT 的形态学^[18,32,33]

用集合论语言描述的数学形态学,最初是由 Salembier 等人成功应用于序列图像编码^[32]以及由 Servetto 等人应用于小波变换领域里^[33],即通过将小波变换后的数据用形态表示,以获得最佳的压缩性能。由于形态学应用于图像处理不仅可以利用其有效的“膨胀”来扩大本质图像 (由重要系数构成),用“腐蚀”来收缩图像,而且还可以利用其“开运算”来平滑图像的轮廓,以削弱狭窄的部分和去掉细的

突出,以及利用“闭运算”来融合窄的缺口和细长的弯口,还可去掉小洞,填补轮廓上的缝隙,因此数学形态学在图像处理中正日益得到重视。从描述物体的几何结构模式中提取的结构元素,在物体分割时,可用于平滑物体外部边缘的毛刺和填补内部的小洞,而在有效运动区域检测时,则用于连接小运动块和滤除无效运动块,且与输入图像内容中的物体大小无关,这些毛刺小洞以及小运动块的尺寸在 5×5 像素左右,所以结构元素一般取 5×5 像素大小的圆形。最近提出的“用于图像压缩的 DCT 系数形态编码”,简称 MR-DCT^[18],就是通过形态膨胀来实现重要系数的高效“捕获”,即编码器一开始以光栅扫描顺序来扫描各 DCT 子带,直到检测到重要系数,然后编码发送一个副信息 (即位置信息) 以及系数值给解码器,并在当前的位置上实施膨胀操作,一旦编码器得到额外系数,即检测这些新系数;如果发现新的重要系数,则递归地对每个新系数进行膨胀操作,否则转向不重要系数的光栅扫描,直至整个子带扫描结束。

MR-DCT 显著特征是借助于 DCT 系数值隐含地对形态集的形状信息进行编码,这不仅避免了直接应用较高速率的形状信息描述符,而且体现出实际可操作性。MR-DCT 主要分为如下两步: (1) 分块图像经 DCT 后的系数重组,这一步与第 2 节中的系数重组相同,以便于实施形态膨胀操作; (2) 重组后的 DCT 系数,在各子带内有相当大一部分系数是无关紧要的,或重要的都更加聚类,而不规则形状重要系数的聚类,即通过形态运算来表达每个子带,以提供一个高效的 (自适应算术) 编码方式。此外,也可通过常规的膨胀操作逐步地构造各个聚类,以产生子带内重要区域的有效分割。实验证明,MR-DCT 在对标准图像 Lena 以 0.25bpp 压缩时,其重建图像的峰值信噪比较 JPEG、STQ 和 EZ-DCT 压缩编码重建图像的峰值信噪比分别超出 1.0dB、1.0dB 和 0.3dB。

表 3 列出了文献^[15,17,18]的 MR-DCT、EZH-DCT、EZ-DCT 等算法的压缩编码性能比较。由表 3、表 2 可见,用 MR-DCT 与 EZH-DCT 算法编码后重建图像的峰值信噪比相近,略优于 EZ-DCT 算法的编码性能,且具有类似于小波的多分辨率特性,并与现存的编解码器兼容。与表 2 比较,MR-DCT 编码重建后的 Lena 和 Barb 图像的峰值信噪比分别高出 JPEG 标准的峰值信噪比 1.0~1.6dB

和 1.6~2.8dB。就是说,MR-DCT 在压缩比和峰值信噪比方面均具有较高的性能,同时 MR-DCT 还适于不规则形状或纹理复杂的图像编码,值得关注。

6 DCT 域系数应用的进展^[9,34~42]

6.1 水印问题

对于大小为 $N \times N$ 块的宿主图像经 DCT 后,首先以 JPEG 的 Zigzag 的排列方式,将其变换后的系数重新排成 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{N \times N}\}$,然后在系数的低频区域取出第 $L+1$ 至 $L+M$ 的系数 $Y_L = \{y_{L+1}, y_{L+2}, \dots, y_{L+M}\}$,并将水印信号 W 对 Y_L 的幅度进行如下的非线性调制

$$\hat{y}_i = \begin{cases} y_i & i \leq L \quad \text{或} \quad i > L+M \\ y_i + \lambda y_i^2 W & L < i \leq L+M \quad \text{和} \quad \lambda > 0 \end{cases} \quad (3)$$

最后将 DCT 域的低频系数进行平方后,再与水印作调制运算,这样频率系数较大的分量就可以叠加更多的水印分量,而对于系数较小的中低频分量则可少加水印。其中 λ 值的大小是权衡视觉透明性与水印顽健性之间的重要参数。经过修改后的系数序列 $\hat{Y} = \{\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_{N \times N}\}$ 先以 Zigzag 逆形式重组,再进行 $N \times N$ 逆 DCT,即得到嵌有数字水印的图像 $\hat{I}$ 。一般可采用不依赖于原宿主图像的“假设检验”原理来检测水印。在闭环 DCT 域中,可自适应地嵌入水印强度 λ 值,并可按照类似式(3)的非线性调制,通过修改 RGB 每个基色信道 DCT 的中低频系数来得到较 2D 水印更好的多信道彩色水印,且结合 HVS 特征还可以嵌入更强的水印信号,即多维 DCT 域水印具有更优的视觉透明性与水印顽健性。JPEG2000 是基于小波多分辨率分解技术来嵌入数字水印的,但根据前面介绍的 DCT 多分辨率思想,在 DCT 域中同样可以实现。所有这些都标志着基于 DCT 的数字水印技术日渐成熟。

众所周知,数字水印是信息隐藏的重要分支,它利用了人眼视觉特性 HVS 的纹理阈值掩膜效应,随着 Internet 技术的飞速发展,其将在多媒体数字产品的版权保护中起到越来越重要的作用。最早提出的基于分块 DCT 的数字水印算法是在 1995 年^[34]。此外,以确认多媒体数据的来源是否被篡改的多媒体认证,可用基于 DCT 的压缩脆弱水印算法来实现。较水印技术更强调安全性与保密性的一种图像伪装技术,在 DCT 系数域中,可通过改变 DCT 的中频系数来实现,同样具有抗 JPEG 压缩编

码破坏的能力。以 DCT 为基础的多媒体数据压缩系统上的错误隐藏,其特点是使与图像块直接相邻的区域都不在同一子图像中,采用这种方法创建的子图像在单一数据错误时,由于丢失像素的所有相邻块都是有效的,并没有损坏,因此使得利用相邻区域来重建出错区域的近似恢复图像成为可能。这种基于 DCT 的错误隐藏算法可用于多媒体系统,以便在客户端来近似重建出错图像^[38]。

类似地,如果只对 DCT 后占总能量 60% 以上的直流系数进行加密处理,而对交流系数及其他辅助信息不作处理,那么就可实现原图像不能正常显示的频域加密,这无疑是能做到的。鉴于此,DCT 不仅实现了图像压缩编码,而且利用其系数还能实现信息隐藏等功能。由于 DCT 实现了质的飞跃,因此 1995 年 MPEG-2 刚刚成为国际标准,基于区域形状的自适应 SA-DCT 编码就于同年提出,笔者认为此时 DCT 编码进入了第 2 代。

6.2 基于内容的图像检测问题^[40~42]

由于在 JPEG、MPEG、H. 261/263 等标准中都采用 DCT,而目前大多数的图像检索技术均属于非压缩图像数据,因此基于 DCT 压缩域的图像检索研究具有特别重要的意义。直接在 DCT 域进行图像检索的方法,可以降低检索的时间复杂度,因为它既可用 DCT 域的各个滤波通道的方差和均值作为图像的匹配特性,也可用 DCT 前几个交流系数的方差作为检索特征,如可根据 DCT 域的区域能量方向性进行纹理图像的分类和进行图像字符的提取^[42];还有将整个图像分成非重叠的 k 个窗口(共 $2k$ 个窗口),再根据每个窗口对中 DCT 系数的相似性组成特征矢量来进行图像检索,其中典型的是 Podilchuk 等人提出的,首先对 DCT 域的频率系数间的相关性进行矢量量化,然后利用矢量量化(逼近率失真下界)的索引技术来进行人脸识别的技术,结果令人满意^[40]。

DCT 域高频系数用于字符检测^[41,42]。汉字、英文等字符基本上是以横向、竖向和斜向的线条组合为特征符号,而在 DCT 域中,除了直流分量外,其水平频率、垂直频率及对角频率分别与图像的竖向纹理、水平纹理及对角纹理相对应。进行这种字符检测的实际操作是将图像经 8×8 像素块的 DCT 后,再分别计算出各水平和垂直子块的频率变化能量值 E_h, E_v ,并根据各自的阈值进行初选,凡满足阈值以上的竖向纹理和水平纹理区域被选出,再通过设定

候选字符区的平均斜向能量及其阈值来进一步把真正的字符区选出,最后采用形态滤波法去除噪声点后,即可定出清晰的字符。

7 在 DCT 域中调整图像大小^[43~45]

7.1 关于缩放理论

在视频领域,根据实际需要调整图像大小,以及进行平移或旋转等(特技)操作有着重要的实际意义,比如在 Internet 上或监控系统中,可根据小图像(数据量小)的兴趣决定是否下载大图像。因为 T_{DCT} 是正交矩阵,故对矩阵乘、加,有其分配性: $T_{\text{DCT}}(AB) = T_{\text{DCT}}(A)T_{\text{DCT}}(B)$, $T_{\text{DCT}}(A+B) = T_{\text{DCT}}(A) + T_{\text{DCT}}(B)$,逆 DCT 同样存在上述性质。通过对 DCT 块实行上述代数操作,可实现像素加与像素乘,由于输出图像的像素值位置发生变化,或输出图像的像素值由输入图像的对应像素附近值决定,其共同点均是要穿过原来的块结构,因此可通过改变块内各子块的位置来解决像素移动,如块内重排,可通过重取样法来解决像素值发生变化。若在 DCT 压缩域中运用矩阵性质,则有

$$T_{\text{DCT}}(B) = \sum_{i,j} T_{\text{DCT}}(V_i) T_{\text{DCT}}(B_{i,j}) T_{\text{DCT}}(H_j) \quad (4)$$

其中, $B = \sum_{i,j} B_{i,j}$, $B_{i,j}$ 为原图像的相邻块, H_j 、 V_i 分别为水平和垂直抽取的转移矩阵或内插矩阵,式(4)在此不作证明,例如将垂直和水平抽取的矩阵作用到量化数据块可按照式(4)实现缩放操作,当 $i, j=1, 2$ 时,可用垂直、水平抽取转移矩阵来对压缩数据块进行重取样,以完成 $1/2 \times 1/2$ 比例缩小操作,并可得到新块(8×8 像素块) B 。图 2 就是一个 DCT 域图像缩小过程图。

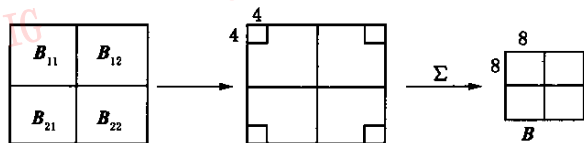


图 2 $1/2 \times 1/2$ 比例缩小图像过程示意图

如图 2 所示,利用 V_i 和 H_j 左、右乘像素块,可以对像素块进行重取样,使系数在 4 个块的 4 个角上,再将 4 个块的系数相加,即得一个完整的像素块。在 DCT 域内,可通过合成数据处理来进行图像缩放,事实上,缩放需要的空域滤波,其实质是卷积,其对应的频域即是乘积,即在 DCT 域中直接实现图像大小调

整具有不降低质量、计算简单和缩短处理时间等优点,这是小波变换等所不及的,尽管它在理论上也可以借助于 Mallat 多分辨率分解来实现图像的缩放。

7.2 关于图像平分和加倍

直接使用矩阵加与乘能够实现一个块(一组块)到所产生图像中的一组块(或一个块)的 DCT 系数转变,进而可实现图像平分或加倍。文献[43,44]以 JPEG 标准的 DCT 压缩形式在进行平分或加倍图像操作时,其算法的基本思想是从 8×8 像素块的空域里,首先通过 4×4 低频项系数来获得一个 4×4 像素的缩小图像,接着在空域里,将该图像再次通过 8×8 像素块 DCT 编码压缩来实现输入一个基于 DCT 8×8 像素块的编码图像,最后输出一个基于 DCT 8×8 像素块编码下采样的平分图像。至于图像加倍则首先将编码的 DCT 图像变换到空域中,再应用 4 点 DCT 来计算每个 4×4 像素块的 DCT 系数,然后将这些 4×4 DCT 系数直接作为 8×8 像素块的低频系数,即在空域中应用一个 8 点逆 DCT 将这些系数转变为一个 8×8 像素块图像,最后在空域上再将其压缩成一个基于 DCT 编码的 8×8 像素块,即输出一个空域上采样的加倍图像。文献[45]在压缩域中运用子带 DCT,通过低通截断近似算法来调整图像大小,并且在空域中,通过应用一个 16 点逆 DCT 来直接将压缩图像的 DCT 系数转变为一个 16×16 像素块的图像。用改进算法构造图像时的性能无论是子带近似,还是截断近似都比已公布的算法性能优越,而且能运用到彩色图像的大小调整上。

本文认为在成像机制上,空间域方法,其低空间分辨率数字图像中的每个像元是由较高空间分辨率图像的若干离散像元加权混合而得;而频率域成像针对的则是连续的理想图像,且对于成像过程的描述会更加精确。在 DCT 域中可实现图像大小调整也说明了这一点。

8 整型 DCT 编码的进展^[46~48]

如今人们关于第 2 代编码有多种看法,一是从内容上强调人眼视觉特性的充分利用,并试图用物体的纹理和形状结构或轮廓等特征信息来描述对象的编码方法;另一就是从变换编码的手段上,希望在减少图像失真的同时,便于计算机数据处理,譬如整型 DCT、整型小波变换等。至于前者,其基本思想是

首先按照实际景物的形状将图像分割成语义区域,即非固定方块,然后对每个区域的轮廓形状、运动参数和纹理分别进行编码,这样将不仅可消除方块效应和振铃现象,还可望比基于块的编码获得更高的压缩比和主观图像质量;至于整型 DCT 则首先通过计算基于 DCT 浮点变换的整数可逆变换矩阵分解来得到分解整数可逆变换矩阵,然后再利用得到的分解矩阵依次对图像样本进行变换,最后将变换得到的系数用多种高效编码方法进行编码^[46,47]。1999 年后发展起来的二进制 DCT 则利用提升结构消去了乘法,只用移位和加法来实现变换编码,这样既能实现灵活的正交变换,又能达到无损压缩。采用仅有移位和加法操作提升步长的双正交 DCT,其编码速度与 DCT 相比有很大提高,如今双正交 DCT 已经应用于 H. 263 视频压缩编码中,最新的 H. 264 标准使用的基于 4×4 像素块的变换就类似于 DCT 的整数变换^[48],而且不存在逆变换时因取舍而产生的误差。

9 DCT 研究展望

30 年来的 DCT 编码的改进与发展,无疑为 DCT 在数字图像的压缩编码、检索、模式识别、水印、加密和视频特技等领域的应用奠定了广泛而雄厚的基础和不可替代性。但展望未来,DCT 必须进行如下改进:

(1) 数学上的发展。应用中应突破传统的 2 维,向 3 维甚至更多维方向发展,且面向区域的,特别是面向区域的立体彩色视频编码将是图像编码的未来,因为这对医疗、宇航等科学特别有意义。分块数除了 8×8 以外,还可以是其他各种形式,而且维长度是 2 的幂的 DCT 快速算法可以借鉴已有的 1×8 成果。至于 3 维有多种情况:RGB 彩色图像 $f(x, y, z)$, z 代表 R、G、B 彩色分量,其 $8 \times 8 \times 3$ 像素的分块,即块阵列 3D DCT 表示 $F(u, v, w)$ 尚待研究,其中 $0 \leq u, v \leq 7, 0 \leq w \leq 2$ 。由于 3D 彩色 DCT 是 2D DCT 灰度图像方法的延伸,将 R、G、B 3 帧作为一个整体同时变换时,能极大地去除彼此间的相关性,而当 z 表示时间变量时,即把大小为 8×8 像素块的若干帧(如 8 帧)图像划分为一变换组,此时的水平、垂直和时间方向上的 3D DCT 系数则为 $8 \times 8 \times 8$ 个,所以 3D DCT 比传统的 2D DCT 去相关能力强是显然的。另外,当 $f(x, y, z)$ 增加一个时间变量 t

时,则构成 $f(x, y, z, t)$ 的 4D DCT,若其四维分别表示的是图像宽度、高度、彩色图像的 3 帧(Y, U, V 或 R, G, B),以及视频序列的连续 3 帧,则连续 3 帧划分为“四维块”时,每块大小为 $4 \times 4 \times 3 \times 3$ 像素,其所有多维 DCT 正、反变换基本算法可参照式(1)、式(2)。

(2) 适于网络传输的多维 DCT。水平、垂直和时间方向上的 3D-DCT 时,适于网络带宽变化的图像分层传输之概念是清晰的。其 $8 \times 8 \times 8$ 变换系数将子带的概念引入到 3D DCT 的变换中,如图 3 所示(任意 3D DCT 有此类似的图),为适应网络带宽变化的需要,图像的分层传输是必须的,而 DCT 则结合并利用子带编码的诸多优点(略)来实现图像的分层传输,其不仅质量高,而且简单易行。尽管 MPEG-2(类/级)及 H. 263 标准也有分层传输机制,但 MPEG-4 低增强层更注重多媒体、网络(异构特性)传输与应用,其特点是 MPEG-4 标准为精细可分级性(FGS)视频编码提供了完全可分级的高增强层码流,由于它可以在任何地点截断,因此具有基本层极强的网络带宽适应能力,MPEG-4 中的 FGS 相对于 DCT 的主要特征是:基本层是使用基于分块运动补偿和 DCT 的编码方式来达到网络传输的最低要求;增强层是使用位平面编码技术对 DCT 残差进行编码来覆盖网络带宽的变化范围,而 DCT 系数的比特平面编码实现简单、性能优,则决定了 MPEG-4 基于内容或对象的可分级性编码是它的核心。另外,在基本层或低增强层上也可以嵌入隐藏信息或具有内容检索等功能;当在有优先权的网络(如 ATM 网络)上传输而遇到拥塞时,则会丢弃高增强层。

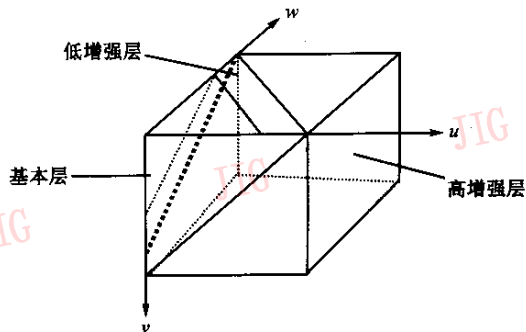


图3 3D-DCT 系数划分的立体图

(3) 尚待解决的问题和路线。由于面向区域的 DCT 正交归一基选取不便,因此非 2 的幂长度的

DCT 的快速算法需进一步研究,且与其他先进的变换编码结合的机制还不健全。客观上说,多维 DCT 编解码硬件(尤其是实时多维的)远没有 2D DCT 成熟。解决途径之一是结合 HVS 特性,根据内容自适应地确定截断 DCT。另外,必须完善与其他先进变换编码算法的结合,因为目前任何一种变换编码算法,都不是尽善尽美的,如小波变换存在小波基选择(尤其是构造离散正交基)困难及其计算复杂,而且高压缩比(50 以上)时,还存在 Gibbs 效应等有待解决的问题;分形编码同样存在“值域子块在所有定义域子块中搜寻最近似块”时的大量匹配运算问题,当有许多重复(迭代)运算而非常耗时,由于其分块难以兼顾图像内容和 HVS 特性,等等,因此将 DCT 与小波变换(或子带、或分形、或形态)结合起来,则会起到双赢效果,比如先进行一级小波变换,然后将其低频分量再进行 DCT,由于这样既利用了小波的局部化非平稳信号、多分辨率分解图像的特性,又利用了 DCT 编码的简单性,因此可望获得高性能的编码质量。

关于如何彻底消除块效应和提高图像还原质量,重要的是减少接收端的误码,除了本文中提到的方法外,还可以在 DCT 域修正系数的同时,结合后处理技术;也可以在编码时,保留一些像块之间相关性的额外信息。至于 3D 立体 DCT,其纵序方向可以采用重叠的匹配块,而每块则可采用多重矢量法来消除块虚像^[49];此外,为了提高接收端的抗误码接收能力,可采用 DCT 结合信道编码(如 RS 或 Turbo 编码等)的联合编码方法,这是一个非常值得研究的课题,比如,① 对每个 DCT 系数的每个比特进行同样的调制/编码,即进行等保护;② 对每个指定系数的每个比特进行同样的调制/编码,但对不同系数调制/编码允许不同;③ 对每个系数的每个比特采用不同的调制/编码。

参 考 文 献

- 1 Cho N I, Lee S U. Fast algorithm and implementation of 2D DCT[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, **38** (3):297~305.
- 2 Huang Y M, Wu J L. A refined fast 2D discrete cosine transform algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, **47**(3):904~907.
- 3 Loeffler C, Ligtenberg A, Moschytz G. Practical fast 1D DCT algorithms with 11 multiplications [A]. In: Proceedings International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], University of Tokyo, Japan, 1989, **2**:988~991.
- 4 Wang Z. Fast algorithms for the discrete W-transform and for the discrete fourier transform [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1984, **32**(4):803~816.
- 5 Chen W A. A fast computational algorithm for the discrete cosine transform[J]. IEEE Transactions Communications, 1977, **25**(9):1004~1011.
- 6 Vetterli M. Simple FFT and DCT algorithms with reduced number of operations[J]. IEEE Signal Processing, 1984, **6**(4):267~278.
- 7 Suehiro N. Fast algorithms for the DFT and other sinusoidal transform [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1986, **34**(3):642~644.
- 8 桑爱军,陈贺新.基于 3D DCT 的彩色图象压缩编码[J].中国图象图形学报,2002, **7A**(12):1271~1273.
- 9 张力,韦岗.一种 DCT 域的闭环数字水印技术[J].通信学报,2002, **23**(4):1~9.
- 10 钟伟才,刘静,焦李成. H. 263 中全零系数块预测的新方法[J]. 电子与信息学报,2003, **25**(4):573~576.
- 11 Zhou X, Yu Z H, Yu S Y. Method for detecting all-zero DCT coefficients ahead of discrete cosine transformation and quantization[J]. Electronics Letters, 1998, **34**(19):1021~1023.
- 12 Shapiro. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients[J]. IEEE Transactions Signal Processing, 1993, **41** (12):3445~3463.
- 13 Said A, Pearlman W. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, **6**(6):243~250.
- 14 Xiong Z, Orchard M, Guleryuz O. A DCT-based embedded image coder[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1996, **3**(11):289~290.
- 15 Xiong Z, Orchard R K. A comparative study of DCT and wavelet-based image coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1999, **9**(8):692~695.
- 16 陈军,吴成柯.基于 DCT 变换的内嵌静止图象压缩算法[J].电子学报,2002, **30**(10):1570~1573.
- 17 赵德斌,张大鹏,高文.基于层次 DCT 变换的嵌入式图象编码方法[J].软件学报,2001, **12**(9):1287~1293.
- 18 Zhao Debin, Gao Wen, Y K Chan. Morphological representation of DCT coefficients for image compression [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, **12**(9):819~822.
- 19 Sikora T, Makai B. Shape-adaptive DCT for generic encoding of video[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1995, **5**(2):59~62.
- 20 Itoh N, Katata H, Kusao H. A method of DCT for arbitrary shape[A]. In: Proceedings International Symposium on Circuit and Systems[C], Evanston, New York, USA, 1995:77~78.
- 21 Sikora T, Bauer S, Makai B. Efficiency of shape-adaptive transforms for coding of arbitrarily shaped image segments[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1995, **5**(4):254~258.
- 22 Kaup A. Object based texture coding of moving video in MPEG-4 [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1999, **9**(2):5~15.
- 23 Kauff P, Schueuer K. A shape adaptive DCT coding with block

based DC separation and Δ DC-correction[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1998, **8**(6):237~242.

24 Kimura J. A consideration on picture coding using a block truncation [A]. In: Proceedings International Symposium on Circuit and Systems[C], Evanston, New York, USA, 1995:39~40.

25 Sikora T, Makai B. Shape-adaptive DCT for generic encoding of video[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1995, **5**(2):59~62.

26 Shishikui Y, Sakaida S. Region support DCT (RS-DCT) for coding of arbitrarily shaped texture[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, **12**(5):320~330.

27 Triantafyllidis G A, Tzovaras D, Strintzis M G. Blocking artifact detection and reduction an compressed data [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, **12**(10):877~889.

28 Sikora T. The MPEG-4 video standard verification model[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1997, **7**(1):19~31.

29 何佳, 刘政凯. 基于 DCT 变换的快速分形编码方法[J]. 电子学报, 2001, **29**(6):748~750.

30 冯永超, 谢立宏, 贺贵明. DCT 域中的快速分形编码[J]. 计算机工程, 2002, **28**(4):173~174.

31 Dapena A, Ahalt S. A Hybrid DCT-SVD image coding algorithm[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, **12**(2):114~121.

32 Salembier P, Pardas M. Hierarchical morphological segmentation for image sequence coding[J]. IEEE Transactions Image Processing, 1994, **3**(9):639~651.

33 Servetto S, Ramchandran K, Orchard M. Image coding based on a morphological representation of wavelet data [J]. IEEE Transactions Image Processing, 1999, **8**(9):1161~1174.

34 Zhao J, Koch E. Embedding robust labels into images for copyright protection[A]. In: Proceedings of the Know Right's 95 Conference on Intellectual Property Rights and New Technologies[C], Vienna, Austria, 1995:241~251.

35 Barni M, Bartolini F, Piva A. Multichannel watermarking of color images[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, **12**(3):142~155.

36 程卫东, 黄继武, 刘红梅. 一种基于 3D-DCT 的彩色图象隐藏算法[J]. 自动化学报, 2003, **29**(2):258~265.

37 夏光升, 陈明奇. 基于 DCT 变换的图象伪装技术[J]. 电子与信息学报, 2001, **38**(12):1316~1320.

38 周敬利, 邢俊浩, 余胜生. 基于 DCT 的错误隐藏算法的两种分块策略[J]. 计算机工程与应用, 2002, **23**(13):99~102.

39 吴冬升, 吴乐南. 基于重组 DCT 系数子带能量直方图的图象检索[J]. 信号处理, 2002, **18**(4):353~357.

40 Podilchuk C, Zhang X. Face recognition using DCT-based feature vectors [A]. In: Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C], Atlanta Georgia, USA, 1996:2144~2147.

41 黄祥林, 沈兰荪. 基于 DCT 压缩域的图象字符定位[J]. 中国图象图形学报, 2002, **7A**(1):22~26.

42 黄祥林, 沈兰荪. 基于 DCT 压缩域的图象检索方法[J]. 电子学

报, 2002, **30**(12):1786~1789.

43 Martucci S. Image resizing in the DCT domain [A]. In: Proceedings IEEE International Conference Image Processing, Berlin, Germany, 1995, vol. II :244~247.

44 Dugad R, Ahuja N. A fast scheme for image size change in the compressed domain [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, **11**(4):461~474.

45 Mukherjee J, Mitra S K. Image resizing in the compressed domain using subband DCT[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, **12**(7):620~627.

46 Chen Y J. Integer discrete cosine transform(Integer DCT)[A]. In: Invited paper, The second International Conference. Information Communication and Signal Processing [C], Singapore, 1999.

47 韦长江, 郝鹏威, 石青云. 基于整型 DCT 变换的图象编码研究[J]. 中国图象图形学报, 2002, **7A**(3):287~291.

48 ITU Recommendation. Advanced Video Coding [S]. H. 264/ISO/IEC 1496-10. Final Committee Draft, Document Joint Video Team-022, Columbia University, NY, USA, 2002-12-09.

49 Luo Yan, Zhang Zhaoyang, An Ping. Stereo video coding based on frame estimation and interpolation [J]. IEEE Transactions Broadcasting, 2003, **49**(1):14~21.



鲁业频 1962 年生, 现为巢湖学院物理系副教授, 1986 年毕业于安徽大学无线电工程系, 合肥工业大学研究生班毕业, 清华大学访问学者。主要研究领域是数字电视、视频信号的压缩编解码等。



李凤亭 1946 年生, 清华大学电子工程系教授, 1970 年毕业于清华大学电子工程系, 并留校从事通信及图像系统研究工作。目前重要从事视频编码(863 计划)、信号处理及网络多媒体通信技术与系统方面的教研工作。



朱仁义 1958 年生, 巢湖学院物理系主任, 总支书记, 高级实验师。1980 年毕业于巢湖师范专科学校, 1986 年南京大学访问学者。主要研究方向为物理学教育、数字电视及其应用、计算机仿真等。



陈兆龙 1963 年生, 巢湖学院教务处副处长, 教授, 1986 年获合肥工业大学无线电工程系学士学位。主要研究领域为电子电路、数字图像处理等。发表论文 10 余篇。