

余弦与小波变换在图像压缩中的比较

李伶俐, 王福龙, 谭远强

(广东工业大学 应用数学学院, 广东 广州 510090)

摘要: 基于变换域编码中应用最广的是离散余弦变换 (DCT) 和小波变换 (DWT). 小波的迅速发展给传统 DCT 提出了严峻考验. DCT 算法有新发展: 内嵌法、策略性重组的引进使其具有类似小波的特性, 如 ESDCT 在对某些图像压缩还优于小波的 SPHT, 故 DCT 的优良特性使其在图像压缩中仍然有广阔的应用前景. 实际上, 变换域压缩的主要因素在于量化器与熵编码器, DCT 与 DWT 各有优势, 在应用中可根据不同需要进行合理的选择.

关键词: 变换域; 离散余弦变换; 小波变换

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2008)01-0024-04

1 基于变换域的图像压缩

图像压缩是指以较少的比特率有损或者无损地(指信息)表示原来的像素矩阵的技术, 也称图像编码, 基本分为空间域法和变换域法. 变换域法是指在图像亮度信号的某个变换域中进行处理, 变换后去掉像素之间的相关性且使能量集中, 有助于进一步压缩处理; 反变换生成的图像效果比直接在空域处理好. 虽然变换域法编码算法和硬件设备技术复杂, 且成本高, 但其抗信道误码的能力强且压缩比高, 因此得到广泛应用, 是图像压缩领域的主流.

基于变换域的编码原理如图 1. 原始图像经过某种变换得到变换系数, 变换对于图像信息总是无损的(如果不考虑计算机的有限字长效应). 变换系数经过量化, 输出量化区间的索引符号流. 量化操作是不可逆的, 因此会导致信息损失, 实际上如果不考虑信道噪声等的影响, 则所有的信息损失均发生在量化器. 量化得到的符号流再经熵编码得到更紧凑的比特流, 熵编码是一种以信息论为基础的无损压缩, 如 Huffman 编码、LZW 编码与算术编码.

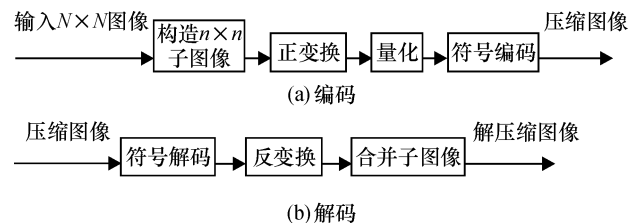


图 1 基于变换域的编码原理图

常采取的变换有 DFT、KLT、WHT、DCT、DWT

等. 考虑大小为 $N \times N$ 的图像 $f(x, y)$, 该图像的正向离散变换 $T(u, v)$ 表示为

$$T(u, v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) g(x, y, u, v),$$
$$u, v = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

给定 $T(u, v)$, $f(x, y)$ 可用离散反变换得到

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} T(u, v) h(x, y, u, v),$$
$$x, y = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

$g(x, y, u, v)$ 和 $h(x, y, u, v)$ 分别称为正向和逆向变换核函数^[1]. 不同变换方式本质在于变换核不同.

2 DCT 的发展

离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT) 1974 年由 Ahmed 和 Rao 提出, 比快速傅立叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 晚, 但其性能更接近于理想的 KL 变换, 并且由于 KLT 到目前为止没有发现有效的快速算法, 所以 DCT 在信号处理中得到了广泛应用. DCT 的快速算法是在继承完善 DFT 的基础上不断进步的. 如一个 8×8 图像块的 DCT (或逆 DCT) 按定义计算, 需要 1 024 次乘法和 896 次加法运算, 根据 DCT 的正交对称性, 使用蝶形算法可以大大减少加乘次数^[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, 因此能将原来进行正交变换占系统总时间的 30% 降为原来时间的 $1/5 \sim 1/3$.

2D DCT 是对称分离的, 可分解成行列方向的 2 次 1D DCT. 采用递归及下标映射法来设计 2D DCT 已比传统的行列法运算量大为减少. 国际编码标准

JPEG、MPEG 和 H. 261 等都采用了 DCT 技术, 一般 8×8 的 DCT 系数中, 只有约 10% 的数据为非零 (典型为 7~16 个). 在实际编码中, DCT 正以它的“信息集中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. 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截断 DCT, 也能重建满意的图像. 3D DCT 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 $x(m, n)$. 设 Q 为量化参数, 若满足 $\sum_{x=0}^7 \sum_{n=0}^7 \text{abs}(x(m, n)) < 16Q$ (Q 为量化参数), 即判断该块为全零的 DCT 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^[3].

总之, DCT 各种快速算法的进步大大促进了基于 DCT 编码的进展, 主要表现在对变换后的系数进行策略性重组及系数的高效应用上. 譬如 EZ DCT^[4]、层次嵌入式 EZH DCT^[5]、ES DCT^[6]、MR DCT 以及整型 DCT 等均强调变换方法的改进. 其中 EZH DCT、ES 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、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. 这些无疑丰富和发展了传统 DCT 的理论与实践, 使之有了更大的应用与发展空间.

3 DWT 的发展

小波^[7]是 20 世纪 80 年代中后期逐渐发展起来的一个数学分支, 并且愈来愈受到数学界及工程界的极大重视. 小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 用于图像编码的基本思想就是把图像进行多分辨分解, 分解成不同的空间、不同频率的子图像, 然后再对子图像进行系数编码. 根据 Mallat 提出的塔形分解算法, 图像经过 2 维小波变换后被分解成 4 个频带: 水平 (HL)、垂直 (LH)、对角线 (HH) 和低频 (LL), 低频部分还可以继续分解. 一副图像经过 3 级小波分解后形成了 10 个子带, 如图 2 所示. 小波变换后图像能量主要集中在低频部分, 而水平、垂直和对角线部分的能量较小, 具有明显的方向性.

小波系数具有良好的空间 - 频率局部化特

征^[8], 各子带的系数分布存在相似性, 此外, 随着尺度的递减, 小波系数的幅值也大体上呈减少的趋势, 即若上一级的小波系数小于某阈值, 则下一级同一方向上相同位置的小波系数也极可能小于该阈值, 这就易于形成零树结构适合零树编码. EZW^[9] 算法就是对 DWT 系数进行嵌入式零树编码, 而量化采取逐步逼近量化方式 (Successive Approximation Quantization, SAQ), 相当于按比特平面编码. 在 EZW 基础上, 发展了改进形式 SPHT^[10] 和 SPECK^[11]. 基于分层树集合分裂的 SPHT 算法, 比 EZW 获得了更有效的重要图像编码性能, 是内嵌小波编码算法的一个通用基准. Asad Islam 提出的 SPECK 算法则利用了子带内的重要系数聚集性并采用了简便有效的四叉树集合分割策略, 实现了一个低复杂度的内嵌编码器.

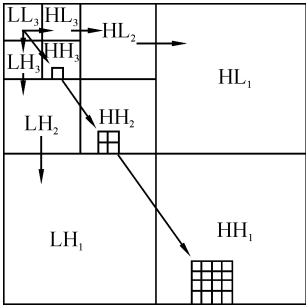


图 2 3 级小波分解

4 DCT 与 DWT 的比较

1) DCT 具有小波多分辨分解图像的特性

小波的发展对传统的 DCT 提出了严峻考验. 多分辨分解特性实质上源于人眼视觉特性, 按频率由低到高将图像划分各个不同频带, 即多频率分解. 对 DCT 后的系数进行策略性重组, 也能产生类似小波的此特性. 输入图像先分成若干 $N \times N$ ($N = 2^J$) 子块, 每个子块分别进行 DCT 变换. 块系数分布如图 3 所示, 对每个子块, 把这些 DCT 系数分成 L 级 $3L + 1$ 层类似小波分解的子带结构. 为了充分利用相邻 DCT 块的相关性, 对所有 DCT 块的相应频率系数集

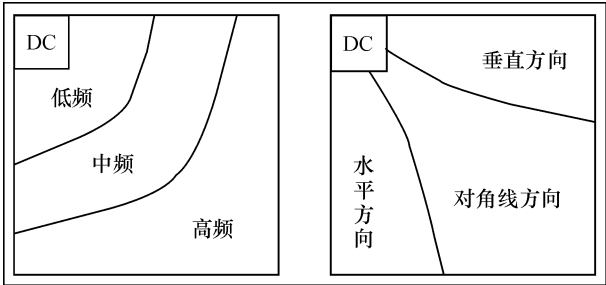


图 3 DCT 系数频带和方向信息

中起来,即将所有 DCT子块重组成一个新的分层子带结构.图 4所示为两块 4×4 系数重组成子带结构的示例,即所有的 DC系数构成最低频子带,相应子块的 AC系数构成同一个高频子带,如 EZH DCT 与 ES DCT采用的就是这种形式的分解.重组后系数扫描顺序见图 5

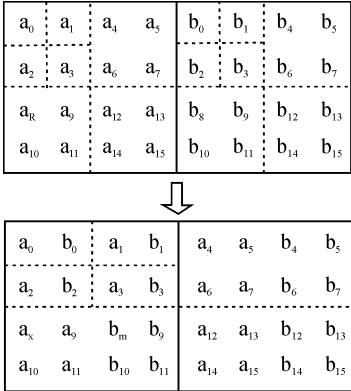


图 4 重组 DCT的子带结构

0	1	4	5	16	17	20	21
2	3	6	7	18	19	22	23
8	9	12	13	24	25	28	29
10	11	14	15	26	27	30	31
32	33	36	37	48	49	52	53
34	35	38	39	50	51	54	55
40	41	44	45	56	57	60	61
42	43	46	47	58	59	62	63

图 5 重组 DCT编码顺序

2) JPEG 与 JPEG 2000比较

JPEG 是目前应用最广泛的静止图象压缩标准,是先对图像块进行 DCT,再 ZigZag 扫描,依量化表量化后,最后作 0 行程编码 (AC 系数中存在许多连续 0)和 Huffman 编码. JPEG 2000 作为新一代压缩标准,则是用小波变换. JPEG 2000 在压缩性能上比 JPEG 好,特别是在甚低码率下压缩效果更显著,一些特殊特性的要求 (渐进传输和感兴趣区域编码等),就需 JPEG2000 派上用场.但 JPEG 2000 相对 JPEG 运算复杂得多,所以在一般应用中, JPEG 是不可替代的,因为 JPEG 2000 的算法复杂度不能满足这些领域的要求.而且通过门限和量化矩阵的优化,已经得到性能更好的优化 JPEG.

3) 实验

首先研制开发了一个图像处理平台,该平台由 Visual C++ 语言编制而成.其主要功能是先实施编

码过程:导入的是 $512\times 512\times 8\text{bit}$ 的 Barbara 和 Lena 图,将图像各进行余弦变换和小波变换.分别按优化 JPEG、EZ DCT、ES DCT 与 EZW、SPHT 进行处理,重建图像质量见表 1、表 2

表 1 重建 Barbara 图像的 PSNR 比较

码率 / bpp	优化 JPEG (8×8 块)	EZ DCT (8×8 块)	ES DCT (16×8 块)	EZW (3 级小波)	SPHT (3 级小波)
1.00	35.90	36.10	36.90	35.14	36.30
0.75	33.60	33.70	34.75	33.15	34.20
0.50	30.60	30.82	31.91	30.53	31.20
0.25	26.70	26.83	28.45	26.77	27.40

表 2 重建 Lena 图像的 PSNR 比较

码率 / bpp	优化 JPEG (8×8 块)	EZ DCT (8×8 块)	ES DCT (16×8 块)	EZW (3 级小波)	SPHT (3 级小波)
1.00	39.60	36.62	39.64	39.55	40.20
0.75	38.10	38.06	38.09	38.00	34.20
0.50	35.90	36.00	36.33	36.28	31.20
0.25	32.30	32.25	32.87	33.17	27.40

实验结论:

面对小波的挑战, DCT 的这些算法仍能产生高压缩效率和高峰值信噪比.小波并非总是占优,譬如 ESDCT 在压缩 Barbara 图时还优于 SPHT.总之,基于变换域压缩的核心问题:其一是如何对系数矩阵进行量化;其二是如何对量化结果进行编码.因此,编码的主要因素在于量化器与熵编码器,而非余弦变换与小波变换的差别.

5 结语

同为变换域编码,小波的迅速发展给传统 DCT 提出了严峻挑战.但 DCT 算法也有新发展,如嵌入式 的引入,策略性重组具有多分辨率特性,使得小波并非总是占优,在对某些图像压缩 DCT 比 DWT 更显优势.同时, DCT 本身之优良特性:在信息压缩能力和计算复杂性之间提供了很好平衡,使得 DCT 在图像编码领域中仍然有强劲的生命力和广阔的应用前景.这两种变换在应用中可根据不同需要进行合理的选择.

参考文献:

[1] Rafael C G, Richard E W. 数字图像处理 [M]. 阮秋琦,阮宇智等,译.北京:电子工业出版社,2003.
[2] Cho N I, Lee S U. Fast algorithm and implementation of 2DDCT [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, 38 (3): 297-305.

[3] 钟伟才, 刘静, 焦李成. H 263 中全零系数块预测的新方法 [J]. 中国图形图像学报, 2002 7A(12): 1271-1273

[4] X iang Z, Guleryuz O, Orchard M T. A DCT-based embedded imagecoder [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1996, 3 (11): 289-290

[5] 赵德斌, 张大鹏, 高文. 基于层次 DCT 变换的嵌入式图像编码方法 [J]. 软件学报, 2001 12 (9): 1287-1293

[6] 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

[7] A bert R, Francis J N. 小波与傅里叶分析基础 [M]. 芮国胜, 康健等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004

[8] 朱向军, 朱善安. 基于小波变换的嵌入式图像编码算法的综述 [J]. 信号处理, 2004, 20(1): 54-59

[9] 王冬梅, 王秀芳, 路敬样. 基于小波零树图像编码算法的改进 [J]. 计算机与数字工程, 2006 34(11): 41-43

[10] 邱自华, 陈宇拓, 韦冰, 等. 一种改进的 SPHT 图像编码方法 [J]. 计算机与数字工程, 2007 35(4): 122-125

[11] 徐蕾. SPECK 图像编码的改进算法 [J]. 信息技术, 2006 30(12): 80-83

A Comparison between Image Coding Methods Based on DCT and DWT

Li Ling-li Wang Fu-long Tan Yuan-qiang

(Faculty of Applied Mathematics, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract Coding based on transform domain is widely used in image compressing. But the rapid development of wavelet gives a stern test to traditional DCT. The DCT algorithm also has new advances after reorganizing coefficients or embedding. DCT's property is similar to wavelet's. With its own fine characteristics, DCT still holds broad application prospects in the image compression. In fact, the primary factor for the transform domain compression lies in the quantizer and the entropy encoder. DCT and DWT have their own advantages respectively. In the application, we can carry on a reasonable choice could be made according to different need.

Key words transform domain; discrete cosine transform (DCT); discrete wavelet transform (DWT)