

文章编号: 1001- 2486(2009) 05- 0054- 04

基于快速方向重叠变换的图像压缩*

陈波, 成礼智, 王红霞

(国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 传统二维 DCT 无法稀疏表示除水平或垂直方向外的边缘, 而具有强方向表示能力的方向预测离散余弦变换(DPDCT) 计算复杂度过高。针对这些问题, 快速方向重叠变换(FDLT) 沿给定的方向模式进行变换, 避免了 DPDCT 中的插值运算, 并进一步集中分散在变换块间的能量, 可以快速、稀疏地表示图像中各向异性边缘信息。此外, FDLT 通过设计块边界提升, 保证了算法完全重构。实验表明, FDLT 计算复杂度不超过 DCT 的 2 倍。采用同样的编码方法, 基于 FDLT 的压缩图像与基于 DCT 的压缩图像相比, 峰值信噪比可提高 0.5 dB 以上, 而且图像边缘细节更加清晰、完整。

关键词: 图像压缩; 方向变换; 离散余弦变换; 重叠变换

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Fast Directional Lapped Transform Based Image Compression

CHEN Bo¹, CHENG Li-zhi¹, WANG Hong-xia¹

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Traditional discrete cosine transform (DCT) can only sparsely represent the horizontal and vertical edges in images, and the computation complexity of directional prediction DCT (DPDCT), which is of ability to represent more directions, is much higher. To overcome these shortcomings, the fast directional lapped transforms (FDLT) is proposed, in which the transform is performed on the pre-defined direction mode and the energy in edges lying across blocks is compacted further. In Comparison with DPDCT, FDLT needs no interpolation. So FDLT can sparsely represent the anisotropic edges in images much faster. Furthermore, special lifting algorithm is designed to ensure the perfect reconstruction. The computation of FDLT is no more than 2 times of DCT's. Coding with the same set partition method, PSNR of images compressed with FDLT is 0.5dB higher than that with DCT. FDLT based compression also achieves clearer edges and details in the reconstructed images.

Key words: image compression; directional transform; discrete cosine transform(DCT); lapped transform

可高效稀疏表示图像中各向异性边缘的方向预测变换技术(DPT, Directional Prediction Transform) 是近来图像压缩领域的研究热点。图像压缩中常用的离散余弦变换(DCT) 与离散小波变换(DWT) 均有对应的 DPT 算法^[1-2]。DPT 利用 DCT 或 DWT 可提升分解的性质^[3-5], 通过方向提升^[1] 来提高整个变换的方向表示能力。与 DWT(2 带滤波器) 不同, DCT(N 点 DCT 为 N 带滤波器) 的提升步骤^[4] 中需要预测与更新的系数不一定相邻, 当变换块方向与相邻块方向不一致时, 多个提升运算需要同时更新同一系数, 若采用传统提升算法, 则变换无法完全重构。现有方向预测 DCT^[2] (DPDCT) 通过插值获取非整数采样点(像素点) 的值, 来实现沿任意方向的变换。若插值核长度为 L , 则 DPDCT 的计算量约为 DCT 的 L 倍(块方向选择过程中还需进行多次 DPDCT), 过高的计算复杂度限制了 DPDCT 的实际应用。此外, 由于 DPDCT 本质上仍为独立块变换, 高倍压缩后图像中仍存在块效应。

针对 DPDCT 的缺点, 本文提出了快速方向重叠变换(FDLT, Fast Directional Lapped Transform) 并将其应用于图像压缩。该变换基于双正交重叠变换^[6] (LBT, Lapped Biorthogonal Transform), 采用频域重叠模式^[7], 在 DCT 后对相邻的 DCT 系数块进行块间滤波, 在进一步集中分散在块间的能量的同时, 有效抑制了块效应, 也可提升分解。FDLT 还借鉴 H. 264 视频压缩标准^[8] 中的帧内预测方法, 可避免方向变换中

* 收稿日期: 2009- 02- 16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10601068), 国防科技大学校基金资助项目(0806)

作者简介: 陈波(1981-), 男, 博士生。

的插值运算, 实验表明, 其计算量接近 DCT。

1 快速方向 DCT

1.1 方向预测

方向预测变换的本质是将传统的对图像行、列进行的变换拓展到与图像边缘平行的“方向线”上。以 DPDCT 为例, 如图 1 所示, 实线为 2 维 DCT 列变换的方向, 虚线为 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm \arctan \frac{1}{2}$ 对应的方向线。DPDCT 列变换时首先确定方向, 然后对选定方向线与图像行的交点(图 1 中中线上的圆圈或方格)进行 DCT。实际图像边缘方向可以为任意角度, 但由于图像分辨率有限以及方向信息占用存储空间等限制, DPDCT 对边缘方向进行了离散(图 1 所示的列变换中仅包括 5 种不同的方向)。在变换过程中, 离散方向上非采样点(非原图像像素, 如图 1 中 A、B 点)的幅度信息通过插值得到, 文献[2]采用 8 点 sinc 插值, 使得 DPDCT 的计算量增长到 DCT 的 8 倍以上。

注意到计算量增加是由插值引起的, 若方向线上点均为图像中已有的采样点, 则可以避免这一问题。因此, 本文采用了类似 H. 264 压缩标准帧内压缩中的预测模式^[9], 在列变换过程中, 沿事先选定的若干方向模式中定义的方向线进行 DCT, 方向线与图像行的交点均为图像采样点。列变换(变换块大小为 8)中使用的 5 种方向模式如图 2 所示, 从 -45° (模式(a)) 逐步过渡到 45° (模式(e))。

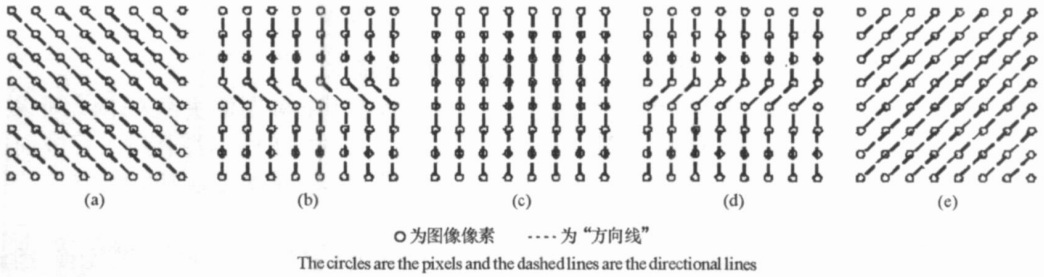


图 2 列变换中的 5 种方向模式
Fig. 2 The directional modes in the line transform

1.2 块边界的提升结构

与 DPDCT 中的方向线相比, 图 2 中定义的方向模式可以避免插值运算, 但模式(a)、(b)、(c)、(d)、(e)中均存在长度小于 8 的方向线, DPDCT 中采用的传统等长 DCT 在这里不再适用。注意到, 造成方向线长度不等的根本原因在于 DCT 变换是分块进行的, 且相邻块间变换过程完全独立, 从而使得跨块边界的方向线被截断, 如果采用相邻块内像素来补充较短的方向线则可以解决该问题(如图 3 所示)。与独立块变换相比, 这样做的好处还在于能够利用边缘方向相近的相邻块间的相关性, 充分集中块边界处沿边缘方向的能量, 进一步减小相邻变换块间的方向性冗余。但是我们发现, 若相邻变换块的方向模式不相同, 则变换过程中存在单个像素点被多条方向线占用的情况(如图 3 中多边形框中黑色实心圆被 4 条方向线占用), 因此需要重新设计块边界 DCT, 以保证变换可完全重构。

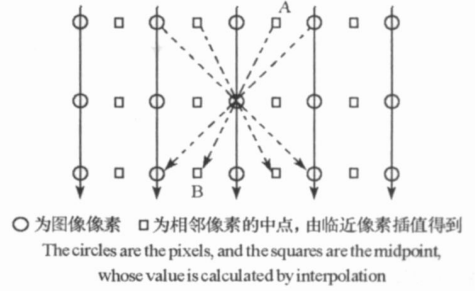


图 1 方向线示意图
Fig. 1 An example of directional lines

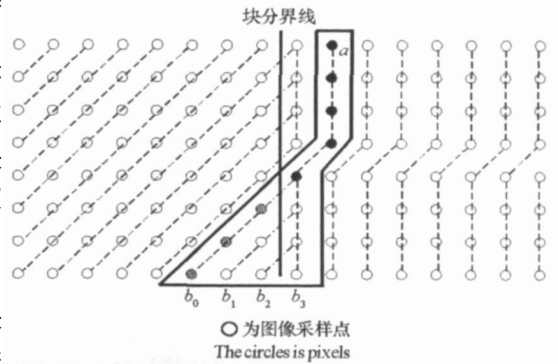


图 3 方向线示意图
Fig. 3 An example of directional lines

基于 DCT 可提升分解的性质,设计块边界 DCT 算法,只要考虑任意一个提升变换过程即可,相应的块边界提升变换分为预测(提升)与更新(对偶提升)两步,不失一般性,考虑提升系数为 1 的情况:

$$\text{预测: } b_i^1 = b_i - a, i = 0, \dots, 3 \quad \text{更新: } a^1 = a + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^3 w_i b_i^1 \quad (1)$$

其中输入为 a, b_i , 输出为 a^1, b_i^1, w_i 为归一化系数。逆变换过程为

$$a = a^1 - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^3 w_i b_i^1 \quad b_i = a + b_i^1, i = 0, \dots, 3 \quad (2)$$

显然此过程可完全重构。

在对图像进行方向变换过程中我们发现,上述块边界提升仅适用于相邻变换块方向接近的情况,当相邻块方向模式差别较大,如变换块方向模式为(a),相邻块模式为(c)、(d)、(e)时,与 DCT 相比,变换系数的稀疏性一般不能得到有效改善。此时,块变换仍独立进行。若块内方向线到达块边界时长度小于 8,则沿块边界取像素点补足,保证变换等长。当用于补足长度的块边界像素点被多条方向线占用时,采用块边界提升即可。

2 FDLT 与编码

第 1 节已经给出了快速方向 DCT 的实现方案。而频域 LBT 可以分解为 DCT 与 DCT 系数块间变换两个步骤,其中块间变换具有与 DCT 相似的变换结构,因此,将上述快速方向预测变换方法进一步引入到 LBT 中,给出了快速方向重叠变换(FDLT),算法流程为:

记 $B_{M \times N}$ 为待变换的图像块矩阵, D_{kl} 为图像块 B_{kl} 对应的方向模式。

(1) 对第 k ($k = 0, \dots, M-1$) 行图像块 $B_k = [B_{k0} \dots B_{k(N-1)}]$ 依次执行以下步骤:

(1.1) 若 $D_{k(l-1)} = D_{kl} = D_{k(l+1)}$, 则沿方向线进行 DCT;

(1.2) 若 $D_{k(l-1)} \neq D_{kl}$ 或 $D_{kl} \neq D_{k(l+1)}$, 则沿方向线进行块边界 DCT。

(2) 对第 k ($k = 0, \dots, M-2$) 行方向 DCT 系数块 C_k 进行块间滤波。

根据上述块边界处理方案,这里得到的图像块的方向变换仅与其相邻图像块相关,因此可采用文献[2]中的动态规划方法选择最优方向模式,这里不再赘述。在二维 FDLT 中,对图像列、行分别进行变换,行、列变换过程类似。需要说明的是,由于模式(a)、(e)互为转置,若首先进行列变换,则行变换时方向模式仅包括模式(b)、(c)、(d)的转置。

FDLT 系数的编码分为系数编码与方向信息编码两部分。FDLT 本质上为分块多带变换,因此本文采用作者针对多带块变换提出的量化集合分裂方法^[6],实现了对 FDLT 系数的高效快速编码。在块方向信息编码过程中,首先使用临近块方向进行差分预测,然后对预测残差进行算术编码。

3 实验结果

分别将量化集合分裂方法应用于 DCT 与 FDLT,以峰值信噪比(PSNR,单位: dB)作为衡量指标,对标准灰度图像进行压缩测试,压缩结果如图 4 所示。为了利于快速实现,这里均采用二进变换。

从图 4 可以看出,基于二进 FDLT 与基于二进 DCT 的压缩方法相比,重构图像的 PSNR 提高约 0.5~1dB。而文献[2]中给出的基于 DPDCT 的压缩方法信噪比最低,主要原因在于本文中采用的量化集合分裂方法编码效率远优于 JPEG 标准编码方法。

从解压后图像(图 5,为了显示清晰,仅截取了图像中有代表性的部分,并进行放大)可以看到,基于二进 FDLT 的压缩方法主观质量更好,无块效应,且更多地保持了原图中与背景较为接近的细条纹,有效地减少了失真。

考虑到 FDLT 中的方向模式需根据图像自适应选择,计算量与具体图像有关,难以给出精确的运算量估计,这里通过统计大量标准测试图像的变换时间来进行比较。测试环境为 Pentium 4 2.93GHz CPU, Windows XP(SP2) 操作系统,测试使用图像的大小为 512、1024、2048,结果见表 1。本文提出的二进 FDLT 所需平均时间与图像大小呈近似线性关系,均不超过 DCT 所需时间的 2 倍(文献[2]中 DPDCT 为 DCT 的 8 倍)。

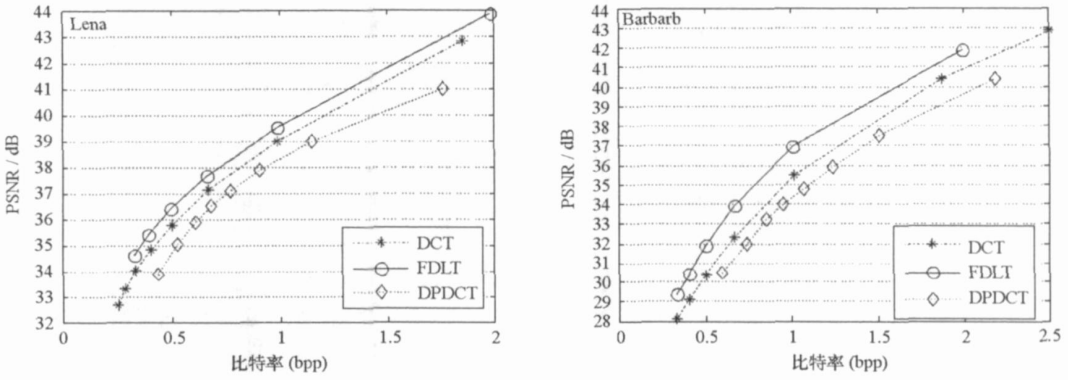


图 4 FDLT 与 DCT 压缩图像峰值信噪比(PSNR)

Fig. 4 The PSNR of images compressed by FDLT and DCT

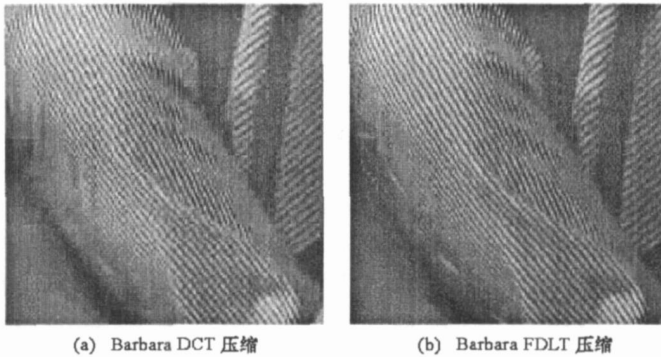


图 5 压缩图像局部放大(压缩比 16:1)

Fig. 5 The magnified parts of the compressed images(compressed ratio: 16:1)

4 结论

与 DWT 相比, DCT 及其改进变换的优势在于计算复杂度低, 存储开销小, 例如正在制定中的针对下一代便携数码成像设备的 JPEG XR 压缩标准^[10], 采用的就是类 DCT 变换。本文提出的 FDLT 继承了 DCT 计算复杂度低的优点, 同时方向表示能力更强, 可以快速稀疏地表示图像中各向异性边缘。实验结果显示, 与 DCT 以及 DPDCT 相比, FDLT 压缩图像质量均有较明显提高。由于其变换系数与 DCT 系数性质相近, FDLT 可方便地应用于现有图像与视频压缩标准中。

表 1 FDLT 与 DCT 运算时间

Tab. 1 The times taken by DCT and FDLT

图像大小	平均变换时间(单位: s)	
	DCT	本文方法
512× 512	0. 006547	0. 011893
1024× 1024	0. 030160	0. 058726
2048× 2048	0. 131870	0. 261325

参考文献:

- [1] Ding W P, Wu F, Wu X L, et al. Adaptive Directional Lifting-based Wavelet Transform for Image Coding [J]. IEEE Trans. Image Processing, 2007, 16(2): 416- 427.
- [2] Xu H, Xu J H, Wu F. Lifting-based Directional DCT-like Transform for Image Coding [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(10): 1325- 1335.
- [3] Sweldens W. The Lifting Scheme: A Custom-design Construction of Biorthogonal Wavelets [R]. Technical Report, 1994: 7, Industrial Mathematics Initiative, Dept. Mathematics, Univ. South Carolina, Columbia, 1994.
- [4] Liang J, Tran T D. Fast Multiplierless Approximations of the DCT with the Lifting Scheme [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2001, 49(12): 3032- 3044.
- [5] 闫宇松, 石青云. 可逆的 DCT 整型变换与无失真图像压缩 [J]. 软件学报, 2000, 11(5): 620- 627.
- [6] Chen B, Cheng L Z, Wang H X. LBT Based Low Complexity Image Compression Method [C] // Proceedings-International Conference on Pattern Recognition, Hong Kong, China, 2006, 1: 941- 944.
- [7] 罗武胜, 王继东. 双正交重叠变换系数基于上下文的算术编码算法 [J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(2): 28- 34.
- [8] Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services [S]. ITU-T Rec. H. 264 ISO/IEC 14496- 10 (AVC), Mar. 2005.
- [9] Zeng B, Fu J J. Directional Discrete Cosine Transforms-a New Framework for Image Coding [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(3): 305- 313.
- [10] JPEG 2000 Digital Cinema Successes and Proposed Standardization of JPEG XR [Z]. <http://www.jpeg.org/newsrel19.html>