

离散小波变换图像压缩技术综述^{*}

A Survey of Image Compression Techniques Based on Discrete Wavelet Transform

杨小帆 黄向生 何中市 朱庆生 陈蜀宇

(重庆大学计算机学院 重庆400044)

Abstract Discrete wavelet transforms (DWTs, for short) have been adopted as the standard transformations in image compression because of their excellent decorrelating properties. The present paper provides a survey of the application of DWT to image compression. First the basic ideas behind DWT and multiresolution analysis as well as their relationship with image subband coding are exposed. Then some spectacular achievements in the history of DWT based image compression techniques are listed. Finally the advantages of DWT over discrete cosine transform (DCT) are illuminated.

Keywords Image compression, Discrete wavelet transform, Multiresolution analysis, Subband coding, Discrete cosine transform

1. 引言

自从1984年“小波”这一概念诞生以来,小波及多分辨分析理论和应用得到了迅猛发展。特别是在图像压缩领域,由于离散小波及多分辨分析与子带编码的天然联系,以及离散小波变换本身具有的良好去相关特性,使之逐渐成为图像压缩中的主流变换。例如:在最新推出的JPEG2000静态图像压缩国际标准中,已采纳离散小波变换作为标准的像素去相关变换。在最新的MPEG4视频图像压缩国际标准中,也大力推荐采用离散小波变换。

本文的目的是对离散小波变换在图像压缩中的应用进行综述。首先揭示了离散小波变换和多分辨分析的基本思想及其与图像子带编码的关系。然后部分列举了历史上基于离散小波变换的图像压缩技术的重要进展。最后阐明了离散小波变换与离散余弦变换相比较的优点。

2. 小波变换、多分辨分析与图像子带分解

图像编码一般是由顺序的三个步骤组成:(1)去除原图像像素的空间冗余性(简称去相关变换);(2)变换系数建模和量化;(3)量化符号熵编码。如图1所示。

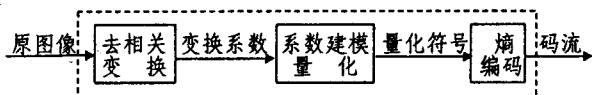


图1 图像编码的基本步骤

经典的离散余弦变换(DCT)曾经被作为图像压缩中的标准去相关变换。但是,DCT是将信号分解成周期性的谐波成分,而自然信号(语音和图像)往往不具有周期性,在进行谐波分解时其系数必然很分散,因此去相关性较差,不利于压缩。离散小波变换(DWT)具有自然信号的时频(空频)局域性特点,因此小波系数往往比较集中,具有良好的去相关特性,有利于压缩。正因为如此,DWT已逐渐成为图像压缩中的标准去相关变换。

多分辨分析的提出为将DWT实际应用于图像压缩起到了决定性的推动作用,其基本思想是将原始信号分解为各种频率的子带信号分别进行处理。用DWT和多分辨分析进行图像去相关是通过多次向下采样和对采样图像进行高通/低通滤波来实现的。图2给出了用一级和三级DWT进行图像子带分解的一个例子。

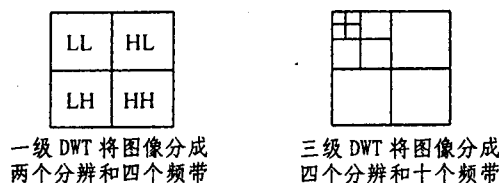


图2 小波变换将原图像分成分辨和子带示意图

人类对于图像压缩技术的追求是无止境的。不断更新的技术对DWT的去相关特性提出了越来越高的要求,而新型DWT的提出又能大力推动图像压缩技术向前发展。DWT和图像压缩技术就是在这样的互动状况下共同进步。下面就让我们共同来回顾DWT和图像压缩技术的互动发展历程中发生的重要事件。

- 1988年, Daubechies^[1]提出了正交紧支撑小波基的一般构造方法,为用小波解决实际问题提供了强有力的工具。
- 1989年, Mallat^[2]提出了信号的多分辨分解理论,为将DWT用于图像压缩奠定了基础。
- 1989年, Barlaud, Mathieu 和 Antonini^[3]首次成功地将小波变换成功地应用于图像编码。
- 1990年, Daubechies^[4]阐明了用小波变换进行信号分析的基本原理。
- 1992年, Cohen, Daubechies 和 Feauveau^[5]提出了双正交紧支撑小波基的一般构造方法,由此构造了众多的新型小波。
- 1992年, Coifman 和 Wickerhauser^[6]提出了根据图像的熵值自适应地选择最佳小波基的小波包方法。

^{*} 本文工作得到国家自然科学基金项目(批准号:60073047)、重庆市科委攻关项目(合同编号:6068)和重庆大学引进人才启动基金项目的支持。杨小帆 教授,博士,黄向生 硕士生,何中市 副教授,博士,朱庆生 院长,教授,陈蜀宇 教授,博士。

•1992年, Vetterli 和 Herley^[7]提出了用线性相位 FIR 滤波器设计小波的一般方法。

•1993年, Shapiro^[8]提出对小波系数建立零树模型, 以及采用渐进量化方式构造嵌入式比特流, 从而实现了图像传输比特率的完全控制和图像从有损到无损的渐进传输。这一工作对小波变换图像编码的研究起到了极大的推动作用。

•1996年, Said 和 Pearlman^[9]通过对 Shapiro 零树模型的深入分析, 提出了更一般的小波系数量化模型—SPIHT 模型。Said 和 Pearlman^[10]还提出了一类基于预测的整数小波变换—S + P 变换。将 S + P 变换和 SPIHT 模型相结合, 能取得明显优于零树模型的图像压缩性能。

•1996—1998年, Sweldens^[11,12]提出完全在时域构造具有特定性质小波的提升法, 从而使小波的构造变得简单、可控。

•1997—1998年, Calderbank, Daubechies, Sweldens 和 Yao^[13,14]用提升法构造了若干可逆整数小波变换, 并将其用于无损图像压缩。

•1997—1998年, Xiong, Ramchandran 和 Orchard^[15,16]将小波基的选择和量化器的选择组成一个最优化问题来求解。

•1999年, Strela, Heller, Strang, Topiwala 和 Heil^[17]将多小波应用于图像压缩。

•2000年, Heijmans 和 Goutsias^[18]提出了形态小波的系统理论, 为构造非线性多分辨率信号分解提供了数学工具。

•2001年10月, 最新的 JPEG2000 静态图像编码国际标准终于形成^[19,20]。在 JPEG2000 中采用 DWT 作为标准的去相关变换, 并允许用户自己定义 DWT, 这必将进一步激发国际上对 DWT 的研究热情。

3. 离散小波变换图像压缩方案的优点

DWT 在图像压缩中所起的作用与 DCT 相似, 都是试图在进行量化和熵编码之前尽可能地降低像素的空间冗余信息(去除相关性), 从而提高图像压缩比。但是, 两者在具体方法上有很大区别, 这主要表现在如下两个方面:

•DCT 的基函数是周期性的余弦函数; 而 DWT 的基函数是快速衰减的非周期函数。

•可以用完美重建的双通道滤波器组来实现 DWT, 将原图像分解为多个分辨(子带); 而 DCT 则无法用双通道滤波器组来实现。

与 DCT 相比, DWT 具有下列优点:

•DWT 能根据图像特点自适应地选择小波基, 从而提高压缩比。而 DCT 则不具有自适应性。

•DWT 可以在 $O(N)$ 时间内在原图像与其多分辨表示之间进行切换, 其中 N 表示原图像的像素个数。而 DCT 则需要 $O(N \times \log_2 N)$ 时间在原图像与其 DCT 域表示之间进行切换。

•可以充分利用 DWT 系数之间的空间相关性对系数建模, 进一步提高压缩比。

•可以对 DWT 生成的子带灵活地进行处理。例如: 可以对子带进行更细的划分; 可以对不同子带采用不同量化方案和熵编码方案; 还可以任意改变各个系数块的传输次序, 按照特殊要求实现图像从有损到无损的渐进传输。

正是由于 DWT 的上述优点, 使之成为 JPEG2000 和 MPEG4 的标准去相关变换。

结束语 本文对离散小波变换图像压缩技术进行了综

述, 其目的是让读者大致了解小波变换和图像压缩技术的互动发展历程, 并对用离散小波变换进行图像压缩的优点有一些了解。小波有着悠久的历史渊源(调和分析)以及坚实的理论基础(小波及多分辨率分析理论), 其在图像压缩中的潜力还很大, 远未充分挖掘出来, 值得我们去进行深入的探索。

参考文献

- 1 Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Comm. Pure Appl. Math.*, 1988, 41: 909~996
- 2 Mallat S. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1989, 11: 674~693
- 3 Barlaud M, Maethieu P, Antonini M. Wavelet transform image coding using vector quantization. In: *Proc. 6th Workshop MDSP*, 1989
- 4 Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1990, 36: 961~1005
- 5 Cohen A, Daubechies I, Feauveau J. Bi-orthogonal bases of compactly supported wavelets. *Comm. Pure Appl. Math.*, 1992, 45: 485~560
- 6 Coifman R, Wickerhauser M. Entropy-based algorithms for best basis selection. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1992, 38: 713~718
- 7 Vetterli M, Herley C. Wavelets and filter banks: theory and design. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1992, 40(9): 2207~2232
- 8 Shapiro J. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1993, 41(2): 3445~3462
- 9 Said A, Pearlman W. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Trans. Circuit Systems for Video Tech.*, 1996, 6(3): 243~250
- 10 Said A, Pearlman W. An image multiresolution representation for lossless and lossy compression. *IEEE Trans. Image Processing*, 1996, 6(9): 1303~1310
- 11 Sweldens W. The lifting scheme: a custom-design construction of biorthogonal wavelets. *Appl. Comput. Harmon. Anal.*, 1996, 3: 186~200
- 12 Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets. *SIAM J. Math. Anal.*, 1998, 29: 511~546
- 13 Calderbank A, Daubechies I, Sweldens W, Yao B. Lossless image compression using integer to integer wavelet transforms. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing*, 1997, 1: 596~599
- 14 Calderbank A, Daubechies I, Sweldens W, Yao B. Wavelet transforms that map integers to integers. *Appl. Comput. Harmon. Anal.*, 1998, 5(3): 332~369
- 15 Xiong Z, Ramchandran K, Orchard M. Space-frequency quantization for wavelet image coding. *IEEE Trans. Image Processing*, 1997, 6(5): 677~693
- 16 Xiong Z, Ramchandran K, Orchard M. Wavelet packet image coding using space-frequency quantization. *IEEE Trans. Image Processing*, 1998, 7(6): 892~898
- 17 Strela V, Heller P, Strang G, Topiwala P, Heil C. The application of multiwavelet filter banks to image processing. *IEEE Trans. Image Processing*, 1999, 8(4): 548~563
- 18 Heijmans H, Goutsias J. Nonlinear multiresolution signal decomposition schemes—part II: morphological wavelets. *IEEE Trans. Image Processing*, 2000, 9: 1897~1912
- 19 Boliek M, et al. JPEG2000 Part I Final Committee Draft Version 1.0. ISO/IEC JTC1/SC29 WG1, Mar. 2000
- 20 Marcellin M, Gormish M, Bilgin A, Boliek M. An overview of JPEG-2000. submission to *IEEE Trans. Image Processing*
- 21 Pennebaker W, Mitchell J. JPEG Still Image Data Compression Standard. Van Nostrand Reinhold, New York, 1993