

低比特率混合域图像压缩编码算法研究

王向阳^{1),2)} 左珂可¹⁾

¹⁾(辽宁师范大学计算机与信息技术学院,大连 116029) ²⁾(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室,南京 210093)

摘要 为了更有效地进行图像压缩,提出了一种新的混合域低比特率图像压缩编码算法。该算法首先对原始图像进行小波分解,并对中高频小波子带进一步实施自适应方向分解;然后根据小波系数统计特性,优化处理最低频子带系数;再结合小波分解与方向分解的特点,构造了一种扩展的空间方向树结构;最后采用 SPIHT 编码思想完成图像的压缩。实验结果表明,该混合域图像编码方法是一种高效的图像压缩算法,不仅其压缩效果明显优于 SPIHT、WBCT 等图像压缩方案(特别是在低比特率下),而且具有比较强的通用性与适应性。

关键词 图像编码 Contourlet 优化最低频子带 扩展空间方向树

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)11-2000-06

A New Image Coding Algorithm Based on DWT and Contourlet

WANG Xiang-yang^{1),2)}, ZUO Ke-ke¹⁾

¹⁾(School of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029)

²⁾(State Key Laboratory for Novel Software Technology at Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract In this paper, a new image coding algorithm based on DWT and Contourlet is proposed. Firstly, the wavelet transform is applied to the original image, and the directional filter banks (DFB) are employed to middle and high frequency subbands; Then, the lowest frequency coefficients are optimized according to the wavelet coefficients statistical properties; Thirdly, the new extended spatial orientation tree are constructed; Finally, the encoding scheme is realized by the idea of SPIHT. The experimental results show that the presented image compression scheme performs better than that of the state-of-art image coders (SPIHT, WBCT), especially for low bit-rate and texture image.

Keywords image coding, Contourlet, optimizing LL subband, the extended spatial orientation tree

1 引言

近年来,小波变换理论及其实用研究在静态图像压缩领域取得了较大进展^[1-3],其成功主要归于:(1)采纳了计算量较小的可分离2维小波变换算法;(2)利用了小波变换多尺度本质所固有的“零树”结构特征。然而作为1维小波变换的分离扩展,2维小波变换虽能很好地分离出边缘处的间断点,却无法刻画轮廓曲线的平滑度,即小波变换在表示图像结构的直线/曲线的奇异性时不是最优的^[4]。此

外,可分离的2维小波变换也仅仅能够捕获有限的方向信息。可分离的2维小波变换的上述不足将导致进行图像低比特率压缩时,在图像边缘附近产生严重的“振铃”现象。

Do 和 Vetterli 于 2002 年提出的 Contourlet 变换是一种全新的高维信号奇异性分析工具。与小波变换相比,Contourlet 变换不仅具有良好的方向性和各向异性,而且能够高效率地捕获图像的几何结构,这使得研制开发新型的图像编码方案成为可能^[5,6]。Eslamihe 和 Belbachir 等以 Contourlet 变换为基础,相继提出了新型的 Contourlet 变换域图像压缩编码

基金项目:计算机软件新技术国家重点实验室开放基金项目(A200702);视觉与听觉信息处理国家重点实验室开放基金项目(0503);“图像处理与图像通信”江苏省重点实验室开放基金项目(ZK205014);江苏省计算机信息处理技术重点实验室开放课题基金项目(KJS0602)

收稿日期:2006-01-26; 改回日期:2006-06-29

第一作者简介:王向阳(1965~),男,教授。1995年于吉林大学获工学硕士学位。主要研究领域为多媒体信息处理技术、网络信息安全技术。E-mail: wxy37@126.com

方法 (the wavelet-based Contourlet transform, WBCT)^[7,8]等,但由于其未充分考虑 Contourlet 变换自身所存在的冗余问题,从而影响了压缩编码效果。

为了有效地解决小波变换难以准确捕获图像纹理特征与边缘特征以及 Contourlet 变换存在较大冗余等问题,本文提出了一种新的混合域低比特率图像压缩编码算法。该算法首先对原始图像进行小波分解,并对中高频小波子带进一步实施自适应方向分解;然后根据小波系数统计特性,优化处理最低频子带系数;再结合小波分解与方向分解特点,构造出扩展的空间方向树结构;最后采用 SPIHT(the set partitioning in hierarchical trees) 编码思想完成图像的压缩。

2 Contourlet 变换简介

Contourlet 变换是一种“真正”的 2 维图像稀疏表达方法,它不仅继承了小波变换的多分辨率时频分析特征,而且拥有良好的各向异性特征,因此它能用比小波变换更少的系数来表达光滑的曲线。Contourlet 变换是通过塔形方向滤波器组 (pyramidal directional filter banks, PDFB) 把图像分解成各个尺度上的带通方向子带,其主要由子带分解和方向变换两个步骤实现,即首先用 Laplacian (简称为 LP) 金

字塔分解对图像进行多尺度分解(图 1),以“捕获”奇异点;然后由方向滤波器组 (directional filter banks, DFB) 将分布在同方向上的奇异点合成为一个系数(图 2)。Contourlet 变换的最终结果是用类似线段的基结构来逼近原图像。Contourlet 变换是一种灵活的多分辨率、多方向性的变换,它允许每个尺度上有不同数目的方向。

(1) LP 分解

LP 分解是实现图像多分辨率分析的一种有效方式。每一层 LP 分解产生一个近似部分和一个细节部分。图 1 显示了 LP 分解与重构的过程,这里 H 和 G 分别被称为分解和合成滤波器, M 是采样矩阵。分解操作重复在近似部分执行,最后即可形成由第 n 层近似部分和 n 个细节部分所组成的金字塔式图像分解。

(2) 方向滤波器组

方向滤波器组的功能实现了如图 2(a) 所示的频带划分,它可利用 n 级树形结构的扇形滤波器组把整个频域划分成 $2n$ 个楔状区域。Bamberger 等在 1992 年首先提出了无冗余且能完全重构的方向滤波器组^[9];然后 Do 和 Vetterli 对其进行了重要改进^[5],即去除了图像的预调制环节,从而使分解与重构算法简单快速。

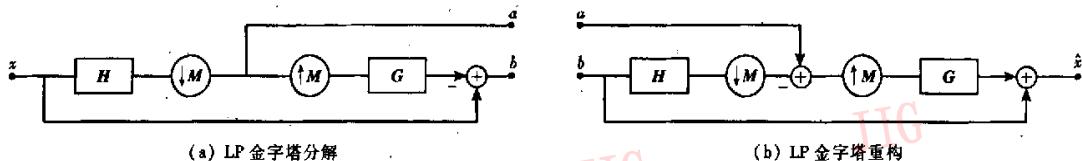
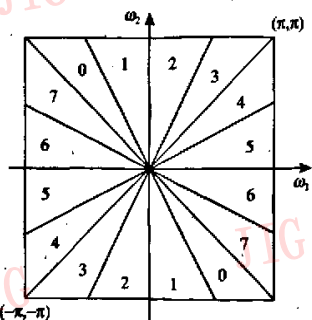
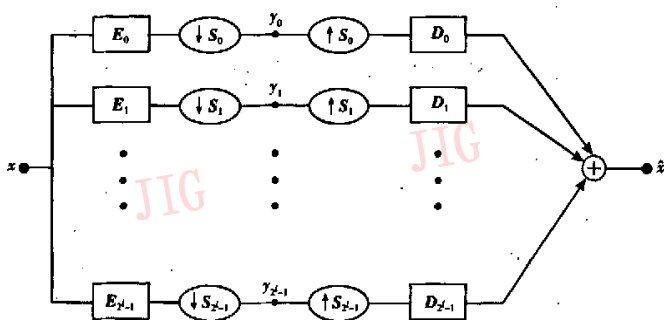


图 1 LP 金字塔分解与重构过程

Fig. 1 LP pyramidal decomposition and reconstruction



(a) DFB 的频带划分



(b) DFB 分解与重构的等效原理图

图 2 DFB 的频带划分及其等效原理图

Fig. 2 Directional filter bank frequency partitioning and the multichannel view of directional filter bank

(3) 金字塔方向滤波器

由于 LP 金字塔分解不具有方向性,而方向滤波器仅能对高频部分进行很好的分解,故只有将 LP 金字塔分解与方向滤波器充分结合,才能弥补各自的不足,也才能得到较好的图像表示。将 LP 金字塔分解与方向滤波器结合起来,即可实现高效的 Contourlet 变换。

显然与小波变换相比,Contourlet 变换不仅具有良好的方向性和各向异性,而且能够高效率地捕获图像的几何结构,即 Contourlet 变换在图像多尺度几何表示方面具有明显优势。但 Contourlet 变换本身也存在一些不足,其主要体现在如下几个方面:

(1) Contourlet 变换首先使用 LP 滤波器对原图像进行子带分解,然后使用方向滤波器组进行方向变换。由于 LP 分解和方向滤波器组均属于迭代滤波器,当滤波器的分解层数固定时,每个 Contourlet 系数需要进行 $O(1)$ 次运算,因此对于一个 $N \times N$ pixels 的图像,其运算量为 $O(N^2)$ 。由于 LP 分解和方向滤波器组都具有完备重构性,所以 Contourlet 也能够对 2 维信号实现完全重构,这是图像处理中的优良特性。但是,由于塔形方向滤波器组与 LP 分解一样,都具有 $4/3$ 的冗余度,因此最终的 Contourlet 变换也必然具有 $4/3$ 的冗余度,而这必然导致 Contourlet 系数的明显增多,从而不利于图像的压缩编码。

(2) Contourlet 变换方向分解时采用了扇形滤波器,而理论研究和实验结果表明,扇形滤波器并非进行方向分解的最好滤波器。

(3) 理论研究和实验结果表明,方向滤波器对低频分量的处理效果很不理想,但 Contourlet 变换对这个问题的考虑过于简单,其只是在最低频子带上未进行方向分解。

3 基于混合分解的图像编码方案

为了有效地解决小波变换难以准确捕获图像的纹理特征与边缘特征,而 Contourlet 变换又存在较大冗余等问题,本文提出了一种基于小波分解与方向分解的混合域图像压缩编码方案。其基本过程为首先对原始图像进行小波分解,同时对中高频小波子带进一步实施自适应方向分解;然后根据小波系数统计特性,优化处理最低频子带系数;再结合小波分解与方向分解的特点,构造扩展的空间方向树结构;最后采用 SPIHT 编码思想完成图像的压缩。

3.1 图像的小波分解与方向分解

在本文的编码方案中,采纳了原始图像混合分解策略,即首先对原始图像进行小波分解,然后对中高频小波子带进一步实施方向分解。其中,在第 1 分解阶段,用无冗余的小波分解替代 Contourlet 变换的 LP 分解,其目的在于克服 Contourlet 变换的 $4/3$ 冗余度问题。这一阶段是由分离的滤波器组来实现的;在第 2 分解阶段,则采用了与 Contourlet 变换相类似的方向分解策略,但进行方向分解的对象(即小波子带)有所不同。由多分辨率分析理论知,低频分量是原始图像的近似,原始图像的绝大部分能量集中于此。尽管方向滤波器组能实现图像的多方向分解,但其对低频分量的处理效果很不理想,即方向滤波器组本身并不是图像的有效分解方法。为了提高方向分解的工作效率,Contourlet 变换考虑了低频分量的特殊地位,但由于 Contourlet 变换仅仅采纳了对最低频子带不进行方向分解的简单策略,其改进效果并不明显。为此,本文结合大量实验结果,给出了如下自适应方向分解策略,即对原始图像进行 L 级小波分解以后,仅在除第 L 级和第 $L-1$ 级外的各级小波子带上进行方向分解,且最高分辨率上方向分解数为 2^{L-1} 。这一阶段是由不可分离的滤波器组来实现的。

另外,由交互信息分析理论知:用 pkva 滤波器^[10]取代扇形滤波器可以减少方向间的交互信息,即 pkva 滤波器在定位边缘方向上更加有效。为此,可在进行方向分解时,采用性能优良的 pkva 滤波器。

3.2 最低频子带的优化处理

由于最低频子带内存在许多大幅值系数,原始图像的绝大部分能量集中在最低频子带中,因此,能否对最低频子带内的这些大幅值系数进行有效编码,将在很大程度上影响图像的编码质量。可以预见,假若能够用较少的比特数来表示最低频子带内的大幅值系数,且解码时无任何能量损失的话,则必将在很大程度上节省码字,以提高图像的压缩质量。下面将结合小波系数的统计特性,采用缩小最低频子带系数幅值范围的方法进行优化处理。这样可以使得幅值范围更集中,从而使原来用较多比特位表示的大幅值可以用更少的比特位来表示,这样就节省了编码的码字,也提高了压缩效率。

缩小最低频子带系数幅值范围的具体步骤如下:

(1) 计算出最低频子带内小波系数 W 的最大值 W_{\max} 和最小值 W_{\min} ;

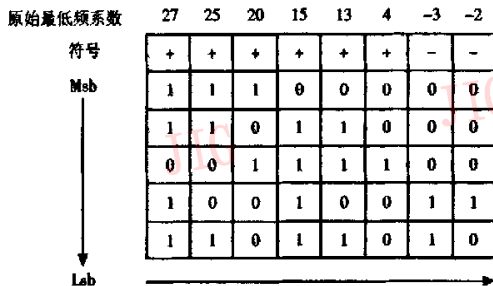
(2) 计算出其平均值 $\bar{W} = (W_{max} + W_{min})/2$;

(3) 将最低频子带内的小波系数都减去小波系数均值,以得到优化的最低频子带;

(4) 利用 SPIHT 编码策略单独编码优化后的最低频子带。

需要注意的是,编码过程需要输出小波系数均值 \bar{W} ,同时解码之后还要将复原的最低频子带系数加上 \bar{W} ,这样才不会引起能量的损失。

下面举例说明如何优化最低频子带,以节省码



字的过程。假设最低频子带内的小波系数为 {27, 25, 20, 15, 13, 4, -2, -3}, 则小波系数的最大值 W_{max} 为 27, 小波系数的最小值 W_{min} 为 -3, 小波系数的平均值 \bar{W} 为 12, 而优化处理后的最低频子带内的小波系数为 {15, 13, 8, 3, 1, -8, -14, -15}。根据“优先编码最重要小波系数的最重要位”的原则,对优化后最低频子带系数进行编码的顺序为 {15, -15, -14, 13, 8, -8, 3, 1}, 而优化前后最低频子带内小波系数的位平面编码方案如图 3 所示。

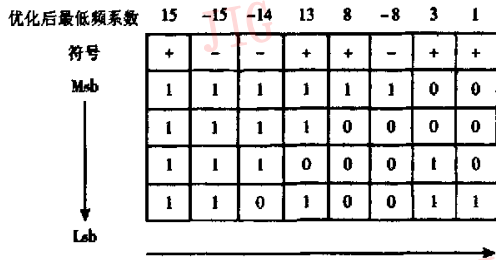


图 3 优化前后位平面编码的比较

Fig. 3 The bit-plane coding

从图 3 可以看出,经过优化处理,用于刻画表示最低频子带小波系数幅值的比特数已有所减少(由 5bits 改为 4bits)。其代价仅仅是需要用一个额外变量来记录小波系数均值 \bar{W} 。由于最低频子带的正系数幅值和负系数幅值是极其不对称的,故可以通过改变最低频子带系数幅值范围的方法来减少编码的比特率。考虑到优化处理过程已记录了小波系数均值,所以对最低频子带的优化处理并不会改变小波系数最大、最小值界限。编码时,把优化的最低频子带送入编码器;解码后,只需要将恢复的最低频子带系数加上小波系数均值即可。采用上述最低频子带优化策略,即可以用更少的比特来表示与原来相同的信息量,从而节省了码字(尤其是在低比特率下)。这样在相同的比特率时,就可以利用节省下来的码字来表达更多的信息,这必然会提高图像的复原质量。

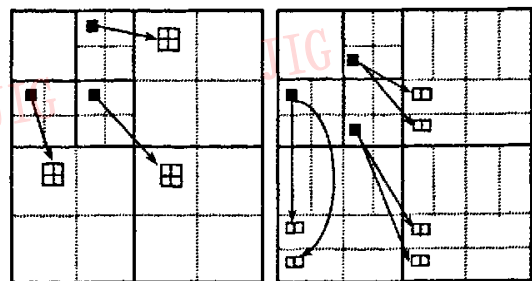
3.3 扩展空间方向树的构造

以嵌入零树小波(embedding zerotree wavelet, EZW)编码思想为基础,Said 和 Pearlman 于 1996 年提出了著名的层树分集编码方案^[2]。由于 SPIHT 编码方案采用了更为有效的空间方向树来表示小波系数的数据结构,因而使得编码复杂度得到进一步降低,且压缩效率更高。事实上,同样可以利用扩展的空间

方向树结构来组织 Contourlet 系数及混合域系数。

对于 Contourlet 变换来说,尽管 Contourlet 子带上的方向分解数目有所不同,但其系数之间普遍存在两种不同的父子关系(如图 4 所示)。如果父亲所处的两个尺度具有相同的方向分解数目,则父亲和儿子位于对应的方向子带上;如果儿子所处尺度的方向分解数目是父亲所处尺度的方向分解数目的 2 倍,则 4 个儿子位于两个相邻的方向子带上,这两个子带对应着父亲所处的方向子带。

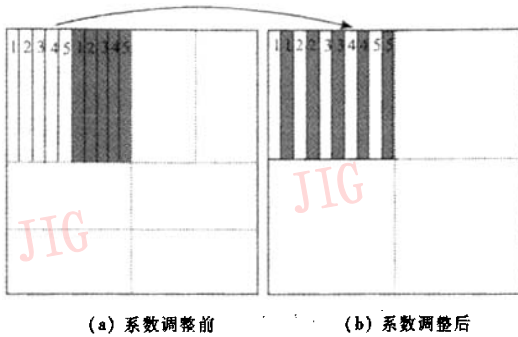
与 Contourlet 变换相类似,在本文所采用的混合变换域内,相应系数间也存在相同的父子依赖关系。但由于混合变换与小波变换的父子关系存在差异,



(a) 方向分解数目相同 (b) 方向分解数目不同

图 4 两种父子关系示意图

Fig. 4 Two kinds of parents-children relationship



(a) 系数调整前 (b) 系数调整后

图 5 调整混合分解系数位置的方法
Fig. 5. The coefficients adjusting

故在采用 SPIHT 编码思想进行压缩之前,需要依据混合分解特点,对空间方向树结构进行扩展,即对变换系数位置做部分调整,调整方法为:

- (1) 对属于第 1 种父子关系的变换系数,不需要重新调整位置;
- (2) 对属于第 2 种父子关系的变换系数,需按照如图 5 所示的方法进行调整。例如,假设混合分解后某一尺度上各高频子带的方向分解数目是 8,更粗尺度上的子带方向分解数目是 4,则需要通过交织每两个邻近水平方向子带各列和交织每两个邻近垂直方向子带各行的方法来将原来的 8 个方向子带合并成 4 个子带。

4 仿真实验与结论

为了验证本文图像压缩编码算法的高效性,以下在 Pentium 4/1.8GHz 计算机上,以 $512 \times 512 \times 8\text{bits}$ 的标准图像 Lena 和 Barbara 为例,进行了 5 级小波分解,并在最细尺度上进行了数目为 16 的方向分解(未经过熵编码)。表 1 和图 6 给出了本文方法与 SPIHT 方案^[2]、WBCT 算法^[4]的编码后的结果对比。实验中,小波分解重构采用了常见的双正交 9/7 小波滤波器,而方向分解重构则采用了 pkva 滤波器。

表 1 不同压缩编码算法的性能比较

Tab. 1 The coding results for three methods

比特率 (bpp)	峰值信噪比(dB)					
	Lena 标准图像			Barbara 标准图像		
	SPIHT 方法	WBCT 方法	本文 算法	SPIHT 方法	WBCT 方法	本文 算法
0.05	24.3819	24.2115	24.5305	21.5775	21.0394	21.7890
0.1	28.0982	27.2468	28.2034	23.2455	22.6195	23.6859
0.125	28.8365	28.5618	28.9138	23.7948	23.4672	24.2824
0.15	30.1970	29.0851	30.2103	24.2503	24.0691	24.8140
0.2	31.6139	30.1930	31.6849	25.4173	24.9873	25.6191
0.25	32.8459	31.0080	32.9125	26.3928	25.8642	26.6498



(a) SPIHT 算法重构图像 (b) WBCT 算法重构图像 (c) 本文算法重构图像

图 6 3 种压缩方案重构图像比较(标准图像 Barbara, 0.1bpp)

Fig. 6 Recovery images comparison of three methods

Contourlet 变换是一种全新的高维信号奇异性分析工具,其不仅具有良好的方向性和各向异性,而且能够高效率地捕获图像的几何结构,但 Contourlet 变换自身也存在较为严重的冗余问题。本文提出了一种基于小波分解与方向分解的混合域图像压缩方案,其不仅可有效解决小波变换难以准确捕获图像纹理特征与边缘特征问题,而且能够克服 Contourlet 变换的较大冗余度问题。仿真实验结果表明,本文提出的混合域图像编码方法是一种高效的图像压缩算法,其压缩效果明显优于 SPIHT、WBCT 等编码方案(特别是对于低比特率下的纹理图像压缩)。

参考文献 (References)

- 1 Karger Basel. Image and video compression: the principles behind the technology [J]. *Telemedicine and Teledermatology*, 2003, 32(1): 17 ~ 23.
- 2 Said A, Pearlman W A. 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(3): 243 ~ 250.
- 3 Park S I, Smith M J T, Mersereau R M. Improved structures of maximally image analysis [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(11): 1424 ~ 1431.
- 4 Starck J L, Candes E J, Donoho D L. The curvelet transform for image denoising[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(6): 670 ~ 684.
- 5 Do M N, Vetterli M. The contourlet transform; an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(12): 2091 ~ 2106.
- 6 Ni Wei, Guo Bao-long, Yang Liu. New advance of multiscale geometric analysis; Contourlet [J]. *Computer Science*, 2006, 33(2): 234 ~ 237. [倪伟, 郭宝龙, 杨镭. 图像多尺度几何分析新进展: Contourlet[J]. *计算机科学*, 2006, 33(2): 234 ~ 237.]
- 7 Eslami R, Radha H. On low bit-rate coding using the contourlet transform[A]. In: *Proceedings of Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers [C]*, Pacific Grove, CA, USA, 2003: 1524 ~ 1528.
- 8 Belbachir N, Göbel P. The Contourlet transform for image compression[A]. In: *Proceedings of 4th Conference on Physics in Signal and Image Processing [C]*, Toulouse, France, 2005: 251 ~ 256.
- 9 Bamberger R H, Smith M J T. A filter bank for the directional decomposition of images; Theory and design[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992, 40(4): 882 ~ 893.
- 10 Phoong S M, Kim C W, Vaidyanathan P P. A new class of two-channel biorthogonal filter banks and wavelet bases [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 43(3): 649 ~ 665.