

基于视觉特性的 Contourlet 域图像压缩编码算法^{*}

杨红颖¹ 金海波¹ 王向阳^{1,2}

(辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连 116029)¹

(南京邮电大学图像处理与图像通信重点实验室 南京 210003)²

摘要 为了有效克服小波变换难以准确捕获图像特征、而 Contourlet 变换存在冗余等不足,本文提出了一种基于视觉特性的 Contourlet 域图像压缩编码算法。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;然后根据人眼视觉特性(HVS),对变换系数进行加权处理;再结合小波分解与方向分解特点,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。实验结果表明,本文提出的 Contourlet 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(特别是低比特率下),而且具有比较强的通用性与适应性(SPIHT 与 WBCT 对于 Barbara 之类纹理图像压缩效果较差,然而本文算法的压缩效果却较理想)。

关键词 图像编码, Contourlet, 人眼视觉特性, 系数加权, SPIHT

A New Image Coding Using Contourlet Transform and Human Visual System

YANG Hong-Ying¹ JIN Hai-Bo¹ WANG Xiang-Yang^{1,2}

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

(Key Lab. of Image Processing and Image Communication, Nanjing University of Posts and Communications, Nanjing 210003)²

Abstract The wavelets cannot efficiently take advantage of the fact that the edges usually found in natural images are smooth curves, while the overall contourlet transform is redundant. A new image coding using contourlet transform and human visual system is proposed in this paper. Firstly, the wavelet transform is applied to original image, and the directional filter banks (DFB) are employed to middle and high frequency subbands. Then, the high frequency coefficients are weighed according to the human visual system. Thirdly, the new extended spatial orientation tree are constructed. Finally, the encoding scheme is realized by the idea of SPIHT. The experiment results show that the new image compression scheme performs better than that of the state-of-art image coders (SPIHT, WBCT) reported in the literature, especially for low bit-rate and texture image.

Keywords Image coding, Contourlet, Human visual system, Weighing the coefficients, SPIHT

1 引言

作为现代通信、介质存储、数据发行、多媒体计算机等技术的关键环节,图像压缩编码始终是信息处理技术研究中最为活跃的领域之一。目前,国内外研究图像压缩编码的主要方法是矢量量化、分形理论、神经网络和小波变换等。其中,基于小波(Wavelet)变换的图像编码技术已成为当今图像压缩领域的一个主要研究方向^[1-2],包括 EZW、SPIHT、EBCOT (EBCOT 算法是 JPEG2000 的基础)在内的许多著名图像编码算法都是以小波变换为基础的。应该说,对类似于图像扫描线的一维分段平滑信号,小波变换已经成为一种比较理想的信号分析处理工具,这是因为小波变换能够在一定程度上为一维分段平滑信号提供有效的最佳表示。但是,自然图像并非一维分段平滑扫描线的简单堆砌。相反,图像内物理对象的平滑边界常常使得平滑轮廓曲线处存在大量的间断点(即边缘),也就是说,自然图像通常含有携带大量重要视觉特征信息的内在几何结构。作为一维小波的分离扩展,二维小

波能够很好地分离出边缘处的间断点,但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/曲线奇异性时不是最优的^[3]。此外,可分离的二维小波也仅仅能够捕获有限的方向信息(方向信息是多维信号重要的、唯一的特征)。可分离二维小波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(特别是对于 Barbara 之类纹理图像)。

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,而且能够高效率捕获图像几何结构(将图像边缘信息捕获到不同尺度、不同频率的子带中),这使得研制开发新型图像编码方案成为可能^[4,5]。Eslamihe 和 Belbachir 等^[6,7]以 Contourlet 变换为基础,相继提出了 Contourlet 域图像压缩编码方法(WBCT 等),但因其未考虑 Contourlet 变换自身冗余及人眼视觉特性等问题,影响了压缩编码效果。

本文提出了一种基于视觉特性的 Contourlet 域图像压缩

^{*} 本文得到辽宁省自然科学基金(20032100)、视觉与听觉信息处理国家重点实验室(北京大学)开放基金(0503)、大连市科技基金(2006J23JH020)、信息安全国家重点实验室(中科院软件所)开放基金(03-06)、“图像处理与图像通信”江苏省重点实验室(南京邮电大学)开放基金(ZK205014)和江苏省计算机信息处理技术重点实验室(苏州大学)开放课题基金(KJS0602)资助。

编码算法,其不仅充分考虑了 Contourlet 变换的冗余问题,而且有效利用了人眼视觉特性。

2 Contourlet 变换简介

2002 年,由 Do 和 Vetterli 提出的 Contourlet 变换不仅具有多尺度、时频局域性的特点,而且还具有高度的方向性和各向异性。由于 Contourlet 提供了丰富的方向和形状集合,故其在捕获光滑轮廓和几何结构上更为有效。如图 1 所示,Contourlet 变换能够充分利用原函数的几何正则性,它的基的支撑区间表现为“长条形”,其可以用最少的系数来逼近奇异曲线。实际上,基的“长条形”支撑区间是方向性的一种体现,即这种基具有“各向异性(anisotropy)”。

Contourlet 变换是一种“真正”的二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,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(PDFB)把图像分解成各个尺度上的带通方向子带,主要由两个步骤实现:子带分解和方向变换。首先,用 Laplacian(LP)金字塔分解对图像进行多尺度分解,以“捕获”奇异点,然后由方向滤波器组(DFB)将分布在同方向上的奇异点合成为一个系数。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。图 2 给出了标准图像 Barbara 经过 Contourlet 变换的各个方向子带。

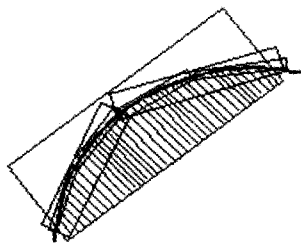


图 1 Contourlet 逼近曲线的过程

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,而且能够高效率捕获图像几何结构,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,主要体现在如下几个方面:

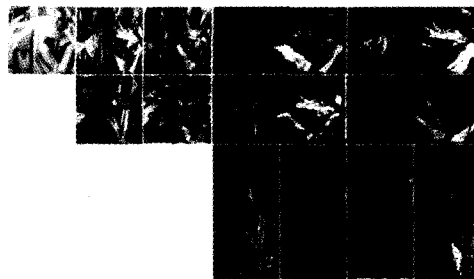


图 2 图像 Barbara 的 Contourlet 变换

- 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(DFB)进行方向变换。LP 分解和方向滤波器组(DFB)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 $N \times N$ 像素的图像,其运算量为 $O(N^2)$ 。由于 LP 分解和方向滤波器组(DFB)都具有完备重构性,所以 Contourlet 也能够对二维信号实现完全重构,这是图像处理中的优良特性。但是,塔形方向滤波器组(PDFB)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。

- Contourlet 变换进行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。

- 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,只是在最低频子带上未进行方向分解。

3 基于视觉特性的 Contourlet 域图像压缩编码方案

为了有效解决小波变换难以准确捕获图像特征、而 Contourlet 变换存在冗余等问题,本文提出了一种基于视觉特性的 Contourlet 域图像压缩编码算法。其基本工作原理为: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;然后根据人眼视觉特性(HVS),对变换系数进行加权处理;再结合小波分解与方向分解特点,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,如图 3 所示。

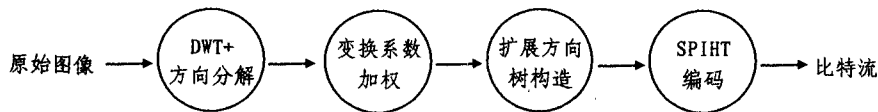


图 3 图像压缩编码方案框图

3.1 图像的小波变换与方向分解

在本文所提出的编码方案中,我们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,

在第一分解阶段,用无冗余的小波分解替代 Contourlet 变换的 LP 分解,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。

在第二分解阶段,我们采用了与 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(DFB)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(DFB)本身并不是图像的有效表示方法。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 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,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^[8,9]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,我们进行方向分解时采用了性能优良的 pkva 滤波器,其工作原理如图 4 所示。

图 5 给出了标准图像 Peppers 的混合分解结果(系数分布)。这里,我们进行 4 级小波分解,并选用 pkva 滤波器对第一、二级小波子带进行方向分解,同时最高分辨率上方向分解的数目为 8。不难看出,HL 子带的大多数系数都集中在垂直方向子带中(子带的上半部),而 LH 子带的大多数系数都集中在水平方向子带中(子带的下半部)。

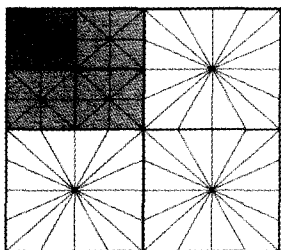


图 4 方面分解示意图

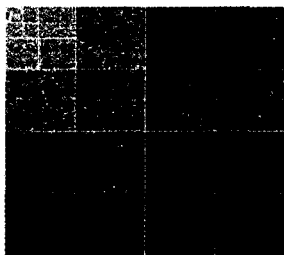


图 5 图像 Peppers 的混合分解结果

3.2 变换系数加权处理

研究表明:人眼对于图像边缘区、平滑区、纹理区的敏感程度有所不同。这意味着不同区域内图像信息的重要性(对于图像编码)存在差别,因此完全可以通过给不同区域内图像信息所对应的变换系数赋予不同视觉权值(敏感区内变换系数赋予大视觉权值)的方法,来保证优先传输视觉上的最重要系数,以便进一步提高图像复原质量。本文将全面引入人眼视觉掩蔽特性,对高频子带内变换系数赋予不同视觉权值,其工作步骤如下:

(1) 将变换域图像的高频子带划分成视觉块(即图像子块)。其中

对于未进行方向分解的第 L 级和第 $L-1$ 级高频子带(即 $HL_L, LH_L, HH_L, HL_{L-1}, LH_{L-1}$ 和 HH_{L-1} 子带),视觉块划分过程如图 6 所示。其中, $a_1 \sim a_{16}$ 是一图像子块, $b_1 \sim b_{64}$ 是一图像子块,其大小分别为 4×4 和 8×8 。

对于进行方向分解的第 n 级($n < L-1$)高频子带 HL_n, LH_n 和 HH_n ,视觉块划分过程如图 7 所示。其中,图 7(a)表示方向分解数为 4 的相邻尺度间视觉块对应关系, HL_n 子带的视觉块大小和 HL_{n-1} 子带经方向分解后的视觉块大小相同。图 7(b)表示方向分解数为 8 的相邻尺度间视觉块对应关系, HL_n 子带的视觉块大小是 HL_{n-1} 子带经方向分解后视觉块大小的 4 倍。

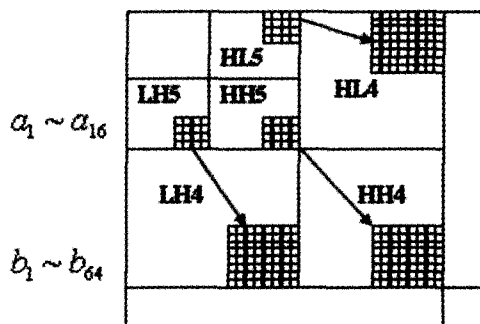


图 6 视觉块示意图(无方向分解)

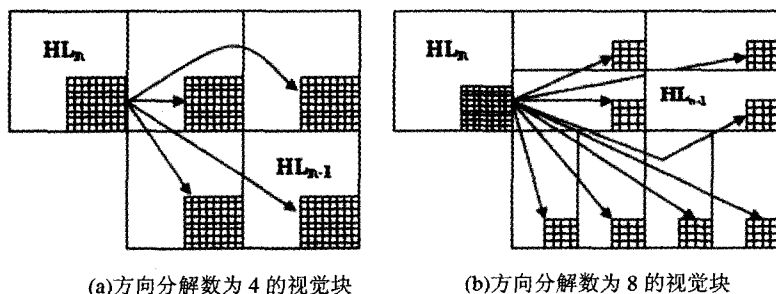


图 7 视觉块示意图(有方向分解)

可见,有方向分解的高频子带视觉块大小为:

$$2^{N+1-j} / (\log m + ((-1)^{\log m} - 1) / 2) \times 2^{N+1-j} / (\log m + ((-1)^{\log m} - 1) / 2)$$

其中, m 为高频子带的方向分解数, N 为分解的总尺度, j 表示第 j 尺度的分解。

(2) 对视觉块进行加权处理,参见图 8。首先计算出视觉块 B_m ($m=1, 2, \dots, p$, p 为视觉块数目)的视觉方差 $D(B_m)$

$$D(B_m) = \frac{1}{k^2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (X_m(i, j) - \bar{X}_m)^2$$

其中, $X_m(i, j)$ 表示视觉块 B_m 内变换系数, $\bar{X}_m = \frac{1}{k^2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k X_m(i, j)$, $k \times k$ 为视觉块大小。

然后根据视觉方差值,对视觉块 B_m 进行升序排序,以得到排序后的视觉块 B'_m ($m=1, 2, \dots, p$)。

接下来,将排序后视觉块序列 $(B'_1, B'_2, B'_3, \dots, B'_p)$ 划分成 M 组。其中,每组内含有 p/M 个视觉块。

最后,为第 k 组 ($k=1, 2, \dots, M$) 排序后视觉块分配权值因子 λ_k ($k=1, 2, \dots, M$), 并利用该权值因子对相应视觉块内

的变换系数做加权处理。

一般说来,我们可以采用如下3种权值因子选取策略:

- a) 采用指数函数形式。即 $\lambda_k = \lambda(k) = e^k (k=1, 2, \dots, M)$
- b) 采用幂函数形式。即 $\lambda_k = \lambda(k) = k^2 (k=1, 2, \dots, M)$

c) 采用等差数列式。即 $\lambda_{k+1} = \lambda_k + d (k=1, 2, \dots, M)$

考虑到前两种方法的权值因子 λ_k 会随着 k 的增大而成非线性增长,从而导致量化过程产生较大量化误差,故本文采用第三种权值因子选取方案,并取 $\lambda_1 = 1.0, d = 0.1$ 。

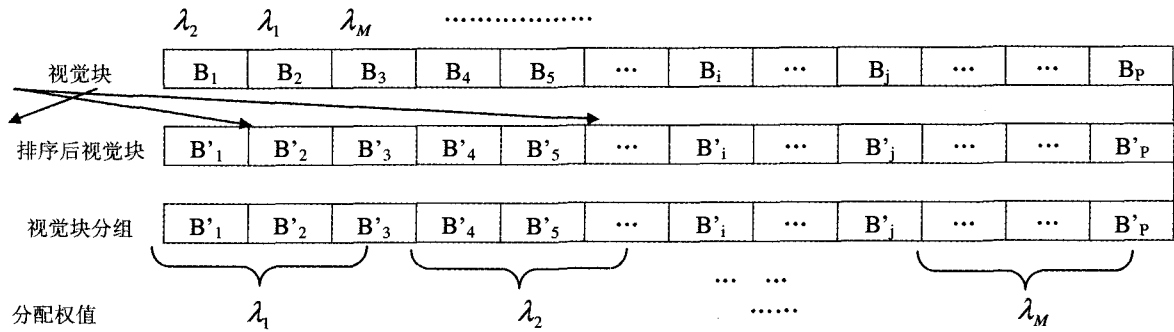


图8 视觉块的加权过程

3.3 扩展空间方向树的构造

由于 SPIHT 编码方案采用了更为有效的空间方向树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。

对于 Contourlet 变换来说,尽管 Contourlet 子带上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9所示。如果父子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二倍,则四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。

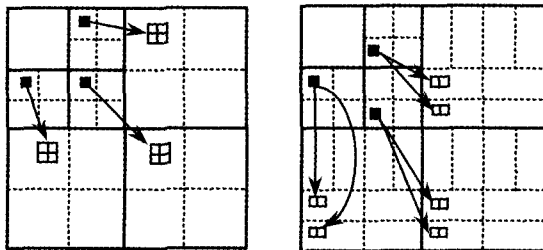


图9 两种父子关系示意图

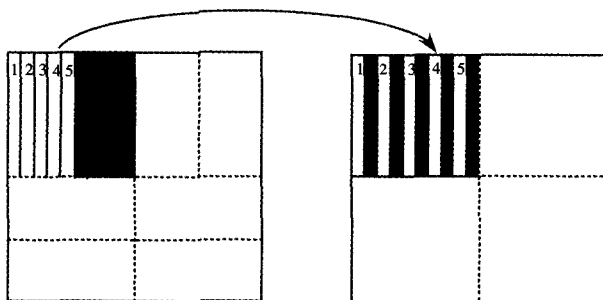


图10 调整混合分解系数位置的方法

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,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:

对属于第一种父子关系的变换系数,不需要重新调整位置;

对属于第二种父子关系的变换系数,需按照如图10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,交织每两个邻近垂直方向子带各行的方法,将原来的8个方向子带合并成4个子带。

4 实验结果

为了验证本文图像压缩编码算法的高效性,以下在 Pentium 4/2.93GHz 计算机上,以 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 的标准图像 Lena、Barbara 和 Peppers 为例,进行了5级小波分解,并在最细尺度上进行数目为4的方向分解(未经过熵编码)。表1、图11和图12给出了本文方法与 SPIHT 方案^[2]、WBCT 算法^[7]的对比结果。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,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(PSNR)

测试图像	比特率	峰值信噪比 PSNR (dB)		
		SPIHT 方案	WBCT 算法	本文算法
Lena	0.01	14.6781	17.7505	19.0391
	0.02	17.7118	20.5464	21.9058
	0.03	21.6019	22.5905	23.8283
	0.05	24.6452	24.7386	25.2445
	0.07	26.6919	26.3158	26.6983
	0.1	28.4731	27.5485	28.4656
Barbara	0.01	14.6900	16.9074	19.2749
	0.02	17.2153	18.9333	21.0987
	0.03	19.5986	20.3463	21.9037
	0.05	21.7613	21.8171	22.7818
	0.07	22.4704	22.4235	22.4701
	0.1	23.3874	23.6727	23.4191
Peppers	0.01	14.6535	17.4844	19.4556
	0.02	17.6219	19.9389	22.5720
	0.03	20.7258	22.0086	23.6517
	0.05	24.1800	24.2694	24.9927
	0.07	26.1381	25.6917	26.3421
	0.1	27.8181	27.0430	26.8069



图 11 三种压缩算法重构图像的比较(0.07bpp)

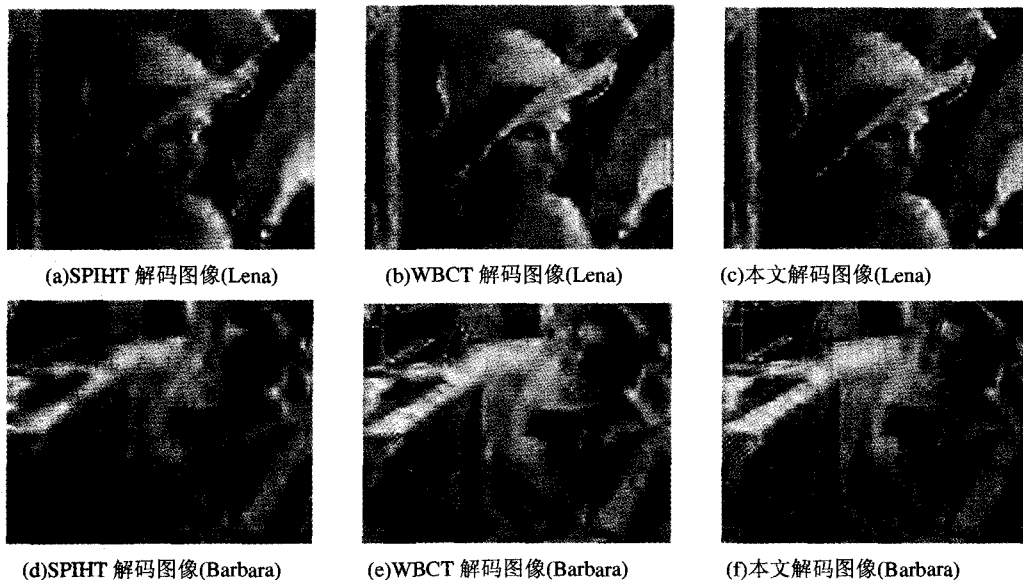


图 12 三种压缩算法重构图像的比较(0.03bpp)

结论 本文以 Contourlet 变换为基础,提出了一种新的数字图像压缩编码算法,其不仅克服了小波变换难以准确捕获图像特征之不足,而且有效解决了 Contourlet 变换的信息冗余问题,同时充分考虑了人眼视觉感知特性。仿真实验结果表明,本文提出的 Contourlet 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

- 1 Basel, Karger. Image and video compression; the principles behind the technology. Telemedicine and Teledermatology, 2003, 32: 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. IEEE Trans. on Image Processing, 2004, 13(11): 1424~1431
- 4 Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation. IEEE Trans. on Image Processing, 2005, 14(12): 2091~2106
- 5 倪伟, 郭宝龙, 等. 图像多尺度几何分析新进展: Contourlet. 计算机科学, 2006, 33(2): 234~237
- 6 Eslami R, Radha H. On low bit-rate coding using the contourlet transform. In: Proc. of Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, Nov. 2003. 524~1528
- 7 Belbachir N, Göbel P. The contourlet transform for image compression. In: Proc. of 4th Conference on Physics in Signal and Image Processing, Toulouse, France, January 2005. 251~256
- 8 Phoong S M, Kim C W, Vaidyanathan P P, Ansari R. A new class of two-channel biorthogonal filter banks and wavelet bases. IEEE Trans. On Signal Processing, 1995, 43(2): 649~665
- 9 Duncan D Y, Do M N. Directional multiscale modeling of images using the contourlet transform. In: IEEE Workshop on Statistical Signal Processing, 2003. 262~265