

# 基于边缘自适应小波变换的低比特率 图像压缩算法

汪雪林 刘忠轩 彭思龙

(中国科学院自动化研究所 集成电路中心, 北京 100080)

**摘要** 常规的小波压缩算法在低比特率情况下将不可避免地在图像强边缘附近产生振铃效应。为此提出了一种基于边缘自适应小波变换的低比特率图像压缩算法。在编码端, 先检测出图像的强边缘并将其作为附加信息进行编码; 然后, 利用强边缘信息将图像沿行列方向分割成一些独立的数据段分别进行小波变换; 最后, 利用 EBCOT 算法对得到的小波系数进行编码。特别地, 从图像的成像机理出发, 提出了一种克服分段数据边界效应的新方法。实验结果表明, 这种边缘自适应小波变换即使在比特率极低的情况下也可以保持图像轮廓的清晰, 强边缘附近的振铃效应也得到有效的抑制。由于附加信息的存在, 压缩图像的 PSNR 值相比于常规方法通常会有所降低, 但图像的主观视觉质量却有明显的提高。

**关键词** 图像压缩 小波变换 边缘自适应 低比特率 各向异性扩散

**中图分类号:** TN919.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2005)02-0149-09

## Low Bit Rate Image Compression Based on Edge Adaptive Wavelet Transform

WANG Xue-lin, LIU Zhong-xuan, PENG Si-long

(National ASIC Design and Engineering Center, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** At low bit-rate, the images encoded by standard wavelet coders inevitably undergo the so-called ringing phenomena near sharp edges. A low bit rate image compression algorithm based on edge adaptive wavelet transform is proposed. At the encoder side, firstly the strong edges of an image are detected and encoded as additional information; Then the wavelet transform is carried out in such a way that no filtering over previously detected edges is performed; Finally, the wavelet coefficients are encoded by the well-known EBCOT algorithm. Especially, a new method to overcome the boundary effects in wavelet transform of segmented data is proposed. Compression examples show that the edge adaptive wavelet transform achieves good reproduction of sharp edges-even at very low bit-rate. Because of the additional information, the PSNR of the compressed images is typically slightly lower than that of standard coders, but the subjective vision impression is improved significantly.

**Keywords** image compression, wavelet transform, edge adaptive, low bit rates, anisotropic diffusion

## 1 引言

对于静止图像的小波压缩, 经过十几年的研究与发展, 已产生了一批颇具影响, 性能优良的实用算法。其中影响较大的算法有 EZW<sup>[1]</sup>, SPIHT<sup>[2]</sup>,

SPECK<sup>[3]</sup>, SFQ<sup>[4]</sup>, EBCOT<sup>[5]</sup>等。其中的 SPECK 和 EBCOT 算法, 因其多方面的优越性能(如分辨率和信噪比的可伸缩性, 码流随机访问, 感兴趣区域编码等)而成为新一代图像编码标准 JPEG2000<sup>[6,7]</sup>的核心算法。以上算法在压缩比不高的情况下, 可以达到较好的效果。但随着压缩比的进一步提高, 图像

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(60272042, 10171007)

**收稿日期:** 2003-10-08; **改回日期:** 2004-05-18

**第一作者简介:** 汪雪林(1976 ~ ), 男, 2004 年于中国科学院自动化研究所获模式识别与智能自动化系统专业博士学位。研究方向为小波分析与图像处理、模式识别、集成电路反向分析等。E-mail: xuelin.wang@mail.ia.ac.cn

强边缘处的振铃 (ringing) 和平滑区域的降晰 (blurring) 效应将变得越来越明显, 严重地影响了解压缩后图像的视觉效果。为了解决低比特率图像压缩中存在的上述问题, 不少学者进行了多方面的研究。

第 1 类可能的解决方案是将人类视觉系统 (HVS) 的计算模型嵌入到图像编码系统中。如果能够预测出图像数据中那些人眼真正可见的信息, 就可以利用已有的技术对这些信息进行更有效的编码。在实际应用当中, 广泛使用的质量评价准则如均方误差 (MSE)、峰值信噪比 (PSNR) 被基于 HVS 的质量准则所取代, 这样, 相对于 HVS 的视觉质量得到优化。由于人类视觉形成过程的复杂性, HVS 的各种模型基本上都是基于视觉心理、生理实验的观察数据而得到<sup>[8,9]</sup>。第 2 类可能途径是定义新的对图像边缘和各种方向的局部结构具有自适应变换能力的小波, 即所谓的几何小波 (geometrical wavelets), 做这方面工作的有 Wedgelets<sup>[10]</sup>, Brushlets<sup>[11]</sup>, Ridglets<sup>[12]</sup>, Bandlets<sup>[13]</sup> 以及 Edgeprints<sup>[14]</sup>。第 3 类可能途径是水平线 (level line) 方法<sup>[15]</sup>, 这种方法将图像看成轮廓和纹理残差的组合。在低比特率情况下, 可以保持图像轮廓的清晰, 随着码率的增加, 图像质量不断提高。第 4 类可能途径是基于图像分割的方法, 提取出图像闭合的轮廓和灰度起伏相对平坦的区域, 分别编码<sup>[16]</sup>。其中包括基于边缘的小波变换编码<sup>[17]</sup>和形状自适应的小波变换的图像编码方法<sup>[18]</sup>。第 5 类可能途径是利用比传统小波具有更大自由度的多小波 (multiwavelets) 的方法进行图像编码<sup>[19]</sup>。

以上几类方法是近年来的研究热点, 它们各有自己的优缺点, 目前尚无一种方法可以表现出明显优于其他方法的性能。虽然有人在传统的零树小波编码的改进方面做了不少工作, 但要在 JPEG2000 标准的基础上, 得到较大性能提高, 必须要有新的图像建模工具或框架出现。这一方面有赖于与小波理论有关的应用数学研究的深入, 另一方面有赖于计算机视觉的发展为新的图像描述框架提供有力的工具。值得注意的是, 以上各类方法并不是孤立发展的, 一个好的高性能的静止或动态图像编码系统必然是以上各类方法的有效结合, 这一点在基于对象的多媒体数据压缩标准 MPEG-4 中体现得非常明显。

受基于边缘的小波变换编码方法<sup>[17]</sup>和形状自

适应小波变换编码方法<sup>[18]</sup>的启发, 从图像的成像机理出发, 提出了一种基于边缘归一化的边缘自适应小波变换 (edge adaptive wavelet transform, EAWT) 编码方法, 以此来消除解码图像在强边缘附近的振铃效应。EAWT 的基本出发点是根据图像的强边缘信息将其分割成变化相对平缓的区域。如果图像含有纹理区域, 可以先将纹理区域分割出来。然后根据图像的纹理分割和主要边缘信息 (下面将这两者统称为边缘信息) 将图像逐行逐列分割成一些可以独立进行离散小波变换 (DWT) 的分段数据, 这样在强边缘附近产生的小波系数的幅值相比于常规方法将大大减小。很明显, EAWT 包含了基于对象的图像编码中提出的形状自适应小波变换 (SA-DWT) 的情形。本文算法与文献 [17] 中的方法有密切联系, 但在分段数据的边界处理上又有很大的不同, 从而避免了文献 [17] 中求解边界滤波器的优化问题, 大大提高了算法的运行效率。实验结果表明, 这一方法对分片光滑图像或人工合成图像具有很好的压缩效果。

## 2 边缘自适应小波变换

在边缘自适应小波变换<sup>[17]</sup>中, 图像在行列方向被分割成一系列可以独立进行小波变换的数据段, 从而避免了常规 DWT 在跨越图像强边缘时产生的大幅值高频系数。为了保证这种分解能够迭代进行下去, 必须对图像的边缘信息进行多尺度映射。为了避免分解后数据量的冗余并最大限度地利用图像数据之间的相关性, 边缘自适应小波变换必须满足以下两个条件: 分解前后数据量保持不变并满足理想重建条件; 边缘自适应小波变换与常规 DWT 的变换结果只应在图像边缘附近有所不同。

图像的边缘信息可以通过 Canny 算子<sup>[20]</sup>进行提取。由于 Canny 算子检测出来的边缘信息是基于像素的, 因此, 为了对图像数据进行行列方向的分段小波变换, 需要先将这些边缘信息转换成基于像素间的边缘, 这样就使得多尺度边缘的映射变得简单并具有唯一性。边缘的多尺度映射过程如图 1 所示。因为图像的边缘信息可以位于图像的任意位置, 因此必须考虑分段小波变换和边缘映射的各种可能情况。为了实现分段小波变换的理想重建, 必须对起始和终止于不同位置 (指奇偶位置) 的分段数据区别对待。

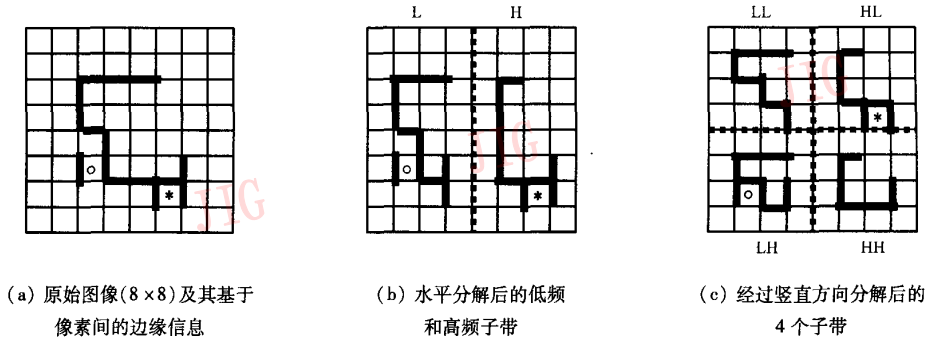


图1 EAWT和边缘信息多尺度映射示例  
(边缘在图中用黑色粗线条表示)

Fig. 1 An Example of EAWT and its corresponding map of multiscale edge information  
(The edge is represented with bold-black line)

以图1中的水平分解为例,将图像左上角的位置定为(0,0)。图1(a)的前两行不包含边缘,因此经分解后,它们均有4个高频和4个低频系数。第3行的第1段数据长度为2,分解后有高低频系数各1个。相应地,原始图像第3行中位于第2、3像素之间的边缘被映射至L和H子带第3行的第1、2像素之间。原始图像第5行的第1数据段的长度为3,并且起始位置为偶数,因此经分解后产生2个低频系数和1个高频系数。相应的边缘位置在L子带中被映射至第2、3像素之间,而在H子带中被映射至第1、2像素之间。第5行的第2数据段分解后将产生2个低频系数和3个高频系数。虽然第5行的两个数据段的长度均为奇数,但它们必须区别对待。按同样的方式对余下的3行进行分解就可以得到图1(b)所示的L和H子带。对图1(b)中的L和H子带经过同样方式的分解后就可以得到图1(c)所示的4个子带和相应的边缘映射信息。其中对LL子带可以迭代分解下去。

在以上分解过程中,图1(a)中标有圆圈和星号的两个像素必须特别对待。它们形成了一个单独的数据段,但又不能继续分解下去。标有圆圈的像素的处理很简单,因为它位于偶数位置,只需将它乘以分析滤波器的直流增益后,将它放置到相应的低频位置上即可(如图1(b)所示)。而标有星号的像素具有低频特性,但它位于高频位置。这意味着在图1(b)的H子带中,标有星号的像素将与其周围的其他系数具有完全不同的统计特性。如果在对H子带进行垂直方向的小波分解时,将其按普通的高频系数对待,则它(可能)的高能量必将影响竖直方

向邻近几个系数经小波变换后的系数幅值。为了避免这一问题,图1(b)中标有星号的像素将被标记为“孤立点”,对H子带的竖直方向分解将在孤立点前停止,越过孤立点后再重新开始。

重建阶段是以上分解过程的严格逆过程,亦即列方向的重建必须在行方向的重建之前进行,这是由于EAWT并不具有传统DWT的可分离性质造成的。

对于起始于任意位置任意长度的分段数据,利用正交或双正交小波滤波器进行分解,满足理想重建条件的分解策略在文献[18]中有详细描述。

### 3 成像系统模型及图像编码的预处理、后处理

由于成像系统物理条件的限制,观测到的图像 $g(m,n)$ 通常为理想图像 $f(m,n)$ 经过低通滤波后的降晰版本,他们之间的关系满足:

$$g(m,n) = h(m,n) * f(m,n) \quad (1)$$

其中, $h(m,n)$ 为2维降晰函数。图2示意了理想图像的某一行数据在降晰前后的情形,其中,虚线所示为降晰前的理想图像数据,实线所示为观测到的降晰图像数据。在边缘点A、B、C处,降晰前图像具有理想的阶跃边缘,而降晰后的数据在边缘点则过渡平缓。根据边缘自适应小波变换的准则,如果直接对观测图像的数据段OA、AB、BC、CD进行分段小波变换,由于这些分段数据在进行小波变换时需要对其边界进行对称扩展,所以在边缘点A、B、C附近必然会引入数值较大的高频系数,从而降低图像的编码效率。

解决这一问题的第1种方法是在边界处修改滤

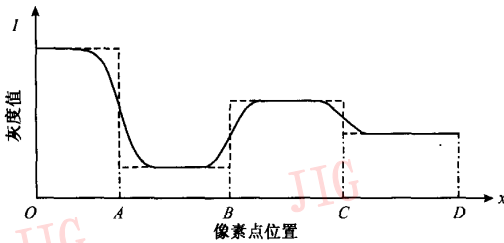


图2 理想图像某行数据在降晰前后的示意图  
(其中虚线所示为理想图像数据,实线所示为降晰后的观测数据)

Fig.2 Row of data from an ideal image before and after degradation

(The ideal data is represented with dashed line and the observed data after degradation is represented with real line)

波器,即边界滤波器的方法<sup>[17]</sup>,它能在一定程度上抑制图像边缘处量化噪声的放大问题,但需要对边界滤波器进行优化设计,这大大降低了算法的运行效率。第2种方法的基本出发点是:如果能从观测到的数据出发准确地估计出如图2虚线所示的理想图像数据,再对理想图像的分段数据  $OA, AB, BC, CD$  进行小波变换,那么,由于理想图像在边缘点  $A, B, C$  处的阶跃性质,则经过边缘自适应小波变换后,在  $A, B, C$  点附近不会产生幅值较大的高频系数,从而可以提高图像的编码效率。在解码端,重建理想图像后经过适当的后处理过程即可恢复出无失真或近似无失真的观测图像。基于这一思路,文献[21]从图像的成像机理出发,直接从观测图像估计成像过程的降晰函数  $h(m, n)$ ,然后利用逆滤波方法估计理想图像  $f(m, n)$ ,从而使得分段小波变换在边缘点附近产生的小波系数得以减小,从而有利于图像的编码压缩,并具有较高的运行效率。但这一方法要求降晰函数具有线性时不变性,而对于一般的成像过程这一要求显然难以满足。

为了叙述方便,将与观测边缘信号对应的理想阶跃信号称为它的归一化信号。对于2维图像,将边缘经过归一化处理的图像称为边缘归一化图像。

从上述第2种方法的思路出发,利用图像的各向异性扩散(anisotropic diffusion),在观测图像边缘局部区域进行后向扩散(backward diffusion)使图像边缘得到归一化,从而使得分段数据小波变换后的系数幅值大大减小。在解码端,重建边缘归一化图像后,在其边缘局部区域进行适当的前向扩散(forward diffusion)以平滑经过归一化处理的边缘,从而得到近似无失真的观测图像。实验结果表明该

方法对分片光滑图像具有很好的效果。

### 3.1 各向异性扩散及图像边缘的归一化和平滑

在文献[22]中,Perona和Malik率先将各向异性扩散方程引入到图像处理领域,取得了很好的效果。Perona和Malik将传统的各向同性扩散方程扩展为

$$\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}[\rho(\|\nabla I\|)\nabla I] \quad (2)$$

$$= \rho(\|\nabla I\|)\Delta I + \rho'(\|\nabla I\|) \frac{\nabla^2 I(\nabla I, \nabla I)}{\|\nabla I\|} \quad (3)$$

其中,  $\nabla^2 I(\nabla I, \nabla I) = I_{xx}I_x^2 + 2I_{xy}I_xI_y + I_{yy}I_y^2$ ,  $\|\nabla I\|$  是图像  $I$  的梯度幅值,  $\rho(\|\nabla I\|)$  为控制各向异性扩散强度的非负单调下降函数,文献[22]给出了函数  $\rho$  两种典型选择:

$$\rho(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{K}\right)^{1+\alpha}} \text{ 或 } \rho(s) = e^{-\left(\frac{s}{K}\right)^2} \quad (4)$$

其中,  $K$  和  $\alpha$  为控制函数曲线形状的参数。

在图像点  $(x, y)$  的局部邻域建立一新的正交坐标系  $(\xi, \eta)$ ,使得  $\eta$  轴平行于图像在  $(x, y)$  点的梯度而  $\xi$  轴与之垂直。显然

$$\xi = \frac{(-I_y, I_x)}{\|\nabla I\|} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{(I_x, I_y)}{\|\nabla I\|} = \frac{\nabla I}{\|\nabla I\|}$$

令

$$\hat{\rho}(s) = s\rho(s)$$

$$I_{\xi\xi} = \frac{I_{xx}I_x^2 - 2I_{xy}I_xI_y + I_{yy}I_y^2}{\|\nabla I\|^2}$$

$$I_{\eta\eta} = \frac{I_{xx}I_x^2 + 2I_{xy}I_xI_y + I_{yy}I_y^2}{\|\nabla I\|^2}$$

经推导<sup>[23]</sup>,式(3)可写为

$$\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = \rho(\|\nabla I\|)I_{\xi\xi} + \hat{\rho}'(\|\nabla I\|)I_{\eta\eta} \quad (6)$$

其中,  $I_{\xi\xi}, I_{\eta\eta}$  分别为垂直于  $\nabla I$  和平行于  $\nabla I$  的扩散项。由式(6)可以清楚地看出各向异性扩散的物理意义:由于  $\rho(s)$  恒为正,式(6)右边第1项表示沿图像边缘的扩散,而第2项表示垂直于图像边缘的扩散。若  $\hat{\rho}'(\|\nabla I\|) > 0$ ,则在边缘的法线与切线方向均为前向扩散,此时对边缘起平滑作用;若  $\hat{\rho}'(\|\nabla I\|) = 0$ ,则只在边缘的切线方向进行前向扩散,此时仅在边缘的切线方向进行平滑;若  $\hat{\rho}'(\|\nabla I\|) < 0$ ,则在边缘的切线方向进行前向扩散而在边缘的法线方向进行后向扩散,此时对图像边缘起增强和锐化作用。

根据偏微分方程理论<sup>[24]</sup>,图像的前向扩散过程等价于对图像做自适应平滑,对图像起降晰作用;而后向扩散等价于对图像边缘进行锐化。若将图像成像的降晰过程分解为一系列的前向扩散过程,则为了达到归一化图像边缘的目的,在进行边缘检测后,只需在图像边缘的局部区域进行后向扩散即可,即要求在图像边缘的局部区域满足 $\hat{\rho}'(\|\nabla I\|) < 0$ 。通过选择适当的参数 $K$ ,式(4)中给出的 $\rho(s)$ 均可满足以上

要求。图3所示为 $\rho(s) = e^{-\left(\frac{s}{K}\right)^2}$ 和相应的 $\hat{\rho}(s)$ 曲线。由图3(b)可以看出,当 $0 \leq \|\nabla I\| < K/\sqrt{2}$ 时,进行的是前向扩散;当 $\|\nabla I\| > K/\sqrt{2}$ 时,进行的是后向扩散。因此,在对图像进行预处理时,可以通过选择较小的 $K$ 来增强和归一化图像边缘;在解码端,重建归一化图像后,可以通过选择较大的 $K$ 来平滑经过归一化处理的边缘,从而达到较好的视觉效果。

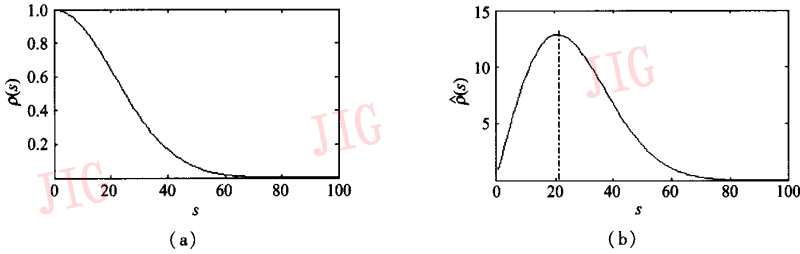


图3  $\rho(s) = e^{-\left(\frac{s}{K}\right)^2}$ 及相应的 $\hat{\rho}(s)$ 曲线(其中 $K=30$ )

Fig. 3  $\rho(s) = e^{-\left(\frac{s}{K}\right)^2}$  curve and its corresponding  $\hat{\rho}(s)$  curve ( $K=30$ )

需要指出的是,由于受图像数据离散化的影响,在后向扩散结束时,得到的锐化边缘相对于检测到的边缘可能会有微小的偏移(一般不会超过两个像素)。为了保证锐化边缘相对于检测边缘的理想阶跃性质,需要对锐化边缘附近的图像灰度值进行适当的调整。如图4所示的1维情况,在扩散结束后, $x=0$ 点左边两个像素的值用其左边第3个像素的值代替;而 $x=0$ 点右边两个像素的值用其右边第3个像素的值代替。2维情况与此类似,由于后向扩散过程使得图像数据沿边缘切线方向具有很好的连续性,因此锐化边缘数据的调整只需在行方向进行即可。经过这种锐化边缘数据的微调,得到的边缘锐化图像在边缘切线方向连续,而在边缘法线方向呈现理想阶跃性质,并且锐化边缘与检测的边缘位置严格一致,这些良好特性使得后续处理可以顺利进行。

### 3.2 图像边缘尺度的估计及强边缘的选取

在一幅图像中,反映灰度剧烈变化和图像结构的边缘携带了重要的信息,同时也是所有图像编码方法必须慎重处理的对象。用来刻画图像边缘的信息分为两部分,一部分是边缘的位置,即边缘曲线(edge curves);另一部分是图像在边缘处沿法线方向的变化趋势。前一部分信息可以通过边缘提取得到;后者可以通过一个简单的边缘模型来表示。

2维图像的边缘曲线在其法线方向具有简单的1维结构,如图4所示,而在边缘曲线的切线方向这种结构的变化很小。因此可以利用边缘曲线在法线方向的1维模型来对其进行比较精确的描述。对于中心位于零点的1维边缘 $s(x)$ ,可以将其近似为一理想阶跃信号与一高斯函数的卷积。如下式定义:

$$s(x) \equiv s(x; b, c, w) = h(x; b, c) * g(x; w) \quad (7)$$

其中,

$$h(x; b, c) = b + cU(x) \quad (8)$$

( $U(x)$ 为理想阶跃函数)

$$g(x; w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), (\sigma = w) \quad (9)$$

将式(7)中的 $w$ 称为边缘的局部尺度。

利用边缘自适应小波变换对图像进行变换,其目的是为了抑制图像边缘附近小波系数的幅值,从而消除解压缩后图像在强边缘附近的振铃效应。对于那些变化平缓强度较弱(即局部尺度大)的边缘,

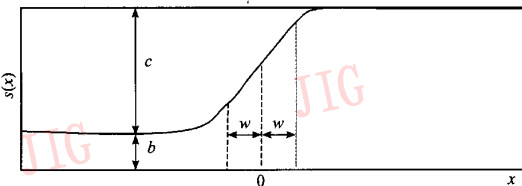


图4 1维边缘模型

(边缘的中点在 $x=0$ 处)

Fig. 4 One-dimensional edge model

(The position where  $x=0$  is the edge's center)

按常规方法压缩编码,在其附近并不会产生振铃现象。因此,为了提高编码效率,只需保留那些按常规方法编码后有可能引起振铃效应的强边缘。这就需要对图像边缘的局部尺度进行比较精确的估计,利用文献[25]中提出的方法,这一问题可以得到较好的解决。

在利用 Canny 边缘检测算子对信号  $s(x)$  进行边缘提取时,首先利用高斯函数的一阶导  $g'(x; \sigma_d)$  对其进行卷积。在不考虑噪声的情况下,此时的输出信号为

$$d(x; w, c, \sigma_1) = s(x; b, c, w) * g'(x; \sigma_d) \\ = c \cdot g(x; \sigma_1) \quad (10)$$

其中,  $\sigma_1 = \sqrt{w^2 + \sigma_d^2}$ , 通过检测以上输出的局部极大值点即可确定边缘点。

文献[25]利用式(10)的输出估计边缘的全部参数。 $d(x; w, c, \sigma_1)$ 的局部极大值点被确定为边缘点,但由于信号离散化过程的影响,这些边缘点可能并非信号在连续形式时的真正边缘位置。用“边缘点”表示从离散信号估计出的边缘在离散采样栅格上的位置,而用“边缘中心”表示相应连续信号对应的真正边缘位置。信号的边缘点可以从  $d(x; w, c, \sigma_1)$  估计出来。对连续信号  $s_0(x)$  进行单位间隔均匀采样,若检测出其边缘点位于  $x=0$ , 而其真正的边缘中心位于  $x=x_0$  ( $|x_0| < 0.5$ ), 亦即

$$s_0(x) = s(x - x_0; b, c, w) \quad (11)$$

则式(10)转化为

$$d(x; w, c, \sigma_1) = s_0(x) * g'(x; \sigma_d) \\ = c \cdot g(x - x_0; \sigma_1) \quad (12)$$

在  $x = -a, a$  点对式(12)进行采样,可得

$$d_1 \equiv d(0; c, w, \sigma_d) = \\ \frac{c}{\sqrt{2\pi(w^2 + \sigma_d^2)}} \cdot \exp\left(-\frac{x_0^2}{2(w^2 + \sigma_d^2)}\right) \quad (13)$$

$$d_2 \equiv d(a; c, w, \sigma_d) = \\ \frac{c}{\sqrt{2\pi(w^2 + \sigma_d^2)}} \cdot \exp\left(-\frac{(a - x_0)^2}{2(w^2 + \sigma_d^2)}\right) \quad (14)$$

$$d_3 \equiv d(-a; c, w, \sigma_d) = \\ \frac{c}{\sqrt{2\pi(w^2 + \sigma_d^2)}} \cdot \exp\left(-\frac{(-a - x_0)^2}{2(w^2 + \sigma_d^2)}\right) \quad (15)$$

式(13)~(15)中,可取  $a=1$  或  $2, \sigma_d=1.0 \sim 2.0$ , 由以上3式和式(8),可估计出边缘的模型参数  $c, w, b$  以及边缘中心的亚像素位置  $x_0$  如下:

$$w^2 = \frac{a^2}{\ln\left(\frac{d_1 d_1}{d_2 d_3}\right)} - \sigma_d^2 \quad (16)$$

$$x_0 = \frac{a \ln(d_2/d_3)}{2 \ln\left(\frac{d_1 d_1}{d_2 d_3}\right)} \quad (17)$$

$$c \approx d_1 \sqrt{\frac{2\pi a^2}{\ln\left(\frac{d_1 d_1}{d_2 d_3}\right)} \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^{1/(4a)}} \quad (18)$$

$$b = s_0(x_0) - \frac{c}{2} \quad (19)$$

在离散信号中,  $s_0(x_0)$  可由邻近两采样点通过线性插值得到。对于2维图像,其边缘模型及相关参数分析可以在边缘法线方向利用上述框架进行分析。另一种简单的近似方法是在行列方向分别进行局部尺度估计后再取两者极小值。每条边缘的局部尺度可以通过其上各点估计的局部尺度的平均值求取。

实验结果表明,在边缘局部尺度大于某一阈值  $w_c$  (通常为2.5)时,经低比特率压缩解码后(如压缩64倍以上),该边缘附近的振铃效应可忽略,这一结果与边缘的对比度关系不大。因此,在估计出所有边缘的局部尺度后,只需保留那些局部尺度小于  $w_c$  的边缘。

## 4 基于边缘自适应小波变换的图像编码系统

在对输入图像进行边缘归一化处理,将原始图像的压缩问题,转化为对其相应的归一化图像的压缩问题。而在解压缩时为了从归一化图像中恢复原始图像,还需要对重建的归一化图像做适当的后处理。而需要编码的信息,除了经 EAWT 变换后的小波系数外,还有图像强边缘及其局部尺度信息。

根据以上分析,给出基于 EAWT 的低比特率图像压缩算法的系统框图如图5所示。整个编码系统由图像预处理、图像的 EAWT 变换及图像边缘和系数编码3部分组成。

编码算法的步骤如下:

- (1) 利用 Canny 算子提取图像边缘;
- (2) 如果确定图像中含有较大面积的纹理区域,则对图像进行纹理分割(这一步是可选的,算法对纹理分割结果的准确性要求不高);
- (3) 计算各条边缘的局部尺度,并保留局部尺

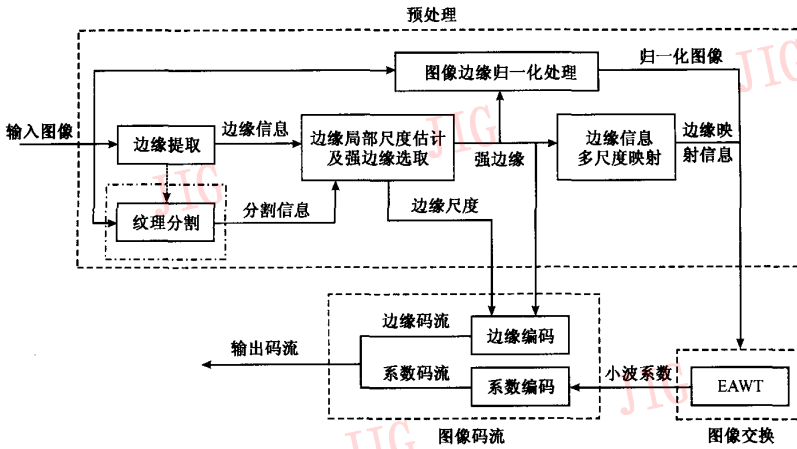


图 5 基于 EAWT 的低比特率图像压缩算法的系统框图

Fig. 5 The system framework for the low-bit image compression algorithm based on EAWT

度小于  $w_c$  的边缘作为图像的强边缘;

(4) 根据强边缘信息,利用 3.1 节的方法对输入图像边缘进行归一化处理;

(5) 利用第 2 节所述方法对强边缘信息进行多尺度映射,并以此指导图像在多个尺度上的 EAWT;

(6) 利用 EBCOT<sup>[5]</sup> 算法对步骤 5 中输出的小波系数进行编码,得到系数码流;

(7) 利用链码表示和算术编码器<sup>[26]</sup>对强边缘及其局部尺度信息进行编码,得到边缘辅助码流;

(8) 将步骤 6 和步骤 7 中得到的码流作为最终的码流输出。

解码算法是编码算法的逆过程,只是在重建边缘归一化图像后,还需通过前向扩散对重建图像的强边缘进行平滑处理。

在以上算法中,对图像强边缘进行归一化时,只在强边缘的局部区域进行后向扩散,扩散次数为 15 次左右。而在对解码的归一化图像进行平滑处理时,根据各边缘的强度,自适应地选择所需前向扩散次数。通过实验,其经验值为:当局部尺度小于等于 0.7 时,扩散次数为 1;大于 0.7 时,扩散次数为 2。对强边缘信息的编码,其目的是为了在解码端确定归一化图像的前向扩散次数,根据前面的经验数据,只需将检测出的强边缘按其局部尺度分为两类编码即可。

边缘自适应的小波分解策略可以与各种小波编码算法很好地结合起来。本文采用了新发布的 JPEG2000 标准<sup>[6,7]</sup>。如前所述,对小波系数的编码通过其中的 EBCOT 算法<sup>[5]</sup>进行,而按照 JPEG2000 第一部分所指定的文件结构,附加的图像强边缘及

其尺度信息可以很容易地在其中进行传输。将边缘码流嵌入到 JPEG2000 码流中的最简单方法是利用其“注释和扩展”标记 (comment and extension marks, CME 标记),这一标记可以用来对用户自定义的任何信息进行编码。关于 CME 标记,在文献 [6] 中有详细描述,图 6 给出了这一标记的结构。

CME	Lcme	Rcme	Custom Data
-----	------	------	-------------

图 6 JPEG2000 码流中的 CME 标记

Fig. 6 The CME-marker in the bitstream of JPEG2000

在 CME 标记后是一 16 位的整数 (Lcme),用来示意该扩展段的长度;接下来的是一 16 位的注册码 (Rcme),用来识别包含在该扩展段的用户数据 (Custom Data)。为了传输边缘码流只需在文件头中插入一个 CME 标记即可。

解码器通过以上 CME 标记的注册码识别并解码边缘码流,并以此指导边缘自适应小波重构和归一化图像的自适应平滑,从而得到解码图像。

## 5 实验结果分析

利用大小为 512 × 512 的 8 位 Lena 图像进行测试。算法实现在 JPEG2000 的测试代码 Jasper-1.500.3<sup>[27]</sup> 基础上进行,实验平台为 Visual C++ 6.0,图像的分解和重建采用双正交 9/7 滤波器,分解层数为 5。

实验结果如图 7 所示。其中图 7(a)为原始图像;图 7(b)为检测出的图像强边缘信息,对其进行算术编码,所需码率为 0.039bpp;图 7(c)和



图 7 Lena 图像的编码结果

Fig. 7 The coding results of Lena image

图 7(e)为基于边缘自适应小波变换的编码图像,其码率分别为 0.2bpp 和 0.125bpp(其中包含了边缘码率),相应的 PSNR 值分别为 27.14dB 和 25.39dB;图 7(d)和图 7(f)为 JPEG2000 的编码图像,其码率分别为 0.2bpp 和 0.125bpp,相应的 PSNR 值为 28.68dB 和 26.51dB。为了对比编码图像的细节,将图像的帽檐部分局部放大显示在各幅图像的右上角。

由实验结果可以看出,相比于 JPEG2000,本文算法所得编码图像虽然在 PSNR 值上有所下降,但其主观视觉效果明显优于前者,特别是在低比特率时,本文算法仍然可以保持图像轮廓和强边缘的清晰,而相应的 JPEG2000 的编码图像则在强边缘附近存在很强的振铃效应,严重影响了图像的主观视觉效果。

## 6 结论

基于边缘自适应小波变换的低比特率图像压缩

算法,首先通过各向异性后向扩散对图像强边缘进行归一化处理,然后利用强边缘信息指导图像的分段小波变换,最后分别对边缘和小波系数进行编码。实验结果表明,这种边缘自适应小波变换即使在比特率极低的情况下也可以保持图像轮廓的清晰,强边缘附近的振铃效应也得到了有效的抑制。由于附加边缘信息的存在,编码图像的 PSNR 值相比于常规方法通常会有所降低,但图像的主观视觉质量却有明显的提高。这种编码方法非常适合于图像数据库应用,其中的边缘码流可以在基于轮廓的图像检索和浏览中得到很好的利用。

## 参考文献 (Reference)

- Shapiro J. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12):3445~3462.
- Said A, Pearlman W A. A new fast and efficient image codec based on set partition in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on

- Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(6):243 ~ 250.
- 3 Pearlman W A, Islam A, Nagaraj N, *et al.* Efficient, low-complexity image coding with a set-partitioning embedded block coder [EB/OL], <http://www.cipr.rpi.edu/~pearlman/>, 2003-10.
  - 4 Xiong Z, Ramchandran K, Orchard M J. Space-frequency quantization for wavelet image coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(5):677 ~ 693.
  - 5 Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(7): 1158 ~ 1170.
  - 6 ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG1 N1646R. JPEG2000 Part I Final Committee Draft Version 1.0 [S].
  - 7 ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG1 N1851R. JPEG2000 Part II Committee Draft (Revised and Corrected) [S].
  - 8 Zeng Wenjun, Daly Scott, Lei Shawmin. An overview of the visual optimization tools in JPEG2000 [EB/OL], <http://citeseer.ist.psu.edu/zeng01overview.html>, 2001-10.
  - 9 Marcus Nadenau. Integration of human color vision models into high quality image compression [D]. Signal Processing Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, 2000.
  - 10 Wakin M, Romberg J, Choi H, *et al.* Rate-distortion optimized image compression using wedgelets [EB/OL], <http://citeseer.ist.psu.edu/wakin02ratedistortion.html>, 2002-09.
  - 11 Meyer F, Coifman R. Directional image compression with brushlets [EB/OL]. <http://citeseer.ist.psu.edu/meyer96directional.html>. 1996-06
  - 12 Do M N, Vetterli M. Orthogonal finite ridgelet transform for image compression [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing [C], Vancouver, BC, Canada, 2000:367 ~ 370.
  - 13 Pennec E L, Mallat S. Image compression with geometrical wavelets [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing [C], Vancouver, BC, Canada, 2000:661 ~ 664.
  - 14 Dragotti P L, Vetterli M. Footprints and edgeprints for image denoising and compression [EB/OL]. <http://citeseer.ist.psu.edu/dragotti01footprints.html>, 2001-05.
  - 15 Froment J. Image compression through level lines and wavelet packets [EB/OL], <http://www.math-info.univ-paris1.fr/prisme/public/abstractol.html>, 2001-04-07.
  - 16 Perks A, Bjerum S. Segmentation based coding of images [EB/OL], <http://citeseer.ist.psu.edu/38711.html>, 1995-07-06
  - 17 Mertins A. Image compression via edge-based wavelet transform [J]. Society of Photooptical Instrumentation Engineers, 1999, 6(6): 991 ~ 1000.
  - 18 Li Shipeng, Li Weiping. Shape adaptive discrete wavelet transforms for arbitrary shaped visual object coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2000, 10(5):725 ~ 743.
  - 19 Martin M B, Bell A E. New image compression techniques using multiwavelets and multiwavelet packets [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(4): 500 ~ 510.
  - 20 Canny J, A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6):679 ~ 698.
  - 21 Shih-Ta Hsiang, Highly scalable subband/wavelet image and video coding [D], Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 2002.
  - 22 Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7):629 ~ 639.
  - 23 Jiang Ming. Mathematical models in computer vision and image processing [EB/OL], <http://ct.radiology.uiowa.edu/~jiangm/courses/mm-cv-ip/vision.html>, 2001-07-19.
  - 24 Sapiro G. Geometric Partial Differential Equations and Image Analysis [M]. Cambridge University Press, New York, USA, 2000.
  - 25 Van Beck. Edge-based image representation and coding [D]. Delft University of Technology, The Netherlands, 1995.
  - 26 Carlsson S. Sketch based coding of gray level images [J]. Signal Processing, 1988, 15(1):57 ~ 83.
  - 27 Michal David Adams. Jasper Software, Version 1.500.3 [EB/OL], <http://www.ece.uvic.ca/~mdadams/jasper/>. 2000-03.