

具有边缘保持特性的嵌入式图像压缩算法

连静 王珂 曹丽丹

(吉林大学通信工程学院, 长春 130025)

摘要 针对小波变换图像压缩存在的边缘模糊问题,提出了边缘检测与压缩编码相结合的方案,首先利用小波变换的多尺度特性提取图像边缘,将其在高频子带内对应的小波系数乘上一个加权因子,然后利用本文提出的无表 SPIHT 算法进行编码。本文方案结构简单,无需链表,易于硬件实现,而且有效地克服了 Gibbs 效应,提高了恢复图像质量。

关键词 图像处理 边缘检测 小波变换 多尺度分析 SPIHT 零树

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)04-0592-05

Edge Preserving Embedded Image Compression Algorithm

LIAN Jing, WANG Ke, Cao Li-dan

(College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun 130025)

Abstract At low bit rate, images reconstructed from wavelet transform-based algorithms have blurred edges, which is called Gibbs effect. This effect hampers the recognition of objects in the image. This paper presents a new progressive image coder which employs edge detection to improve the visual appearance and possibility of recognizing the compressed images at very low bit rates. Edge information is enhanced before compression coding considering some certain weighting factors. Experimental results show that the new algorithm can yield highly recognizable images at very low bit rates.

Keywords image processing, edge detection, wavelet transform, multi-scale analysis, SPIHT, zerotree

1 引言

小波变换由于具有良好的时频局部化特性,因此特别适合于非平稳信号的分析与处理。自 20 世纪 80 年代 Mallat 提出小波变换的快速算法以来,小波变换被广泛地应用于图像处理的各个领域,并取得了良好的效果。

图像压缩技术是图像传输和存储中的重要技术。然而采用小波变换进行图像压缩时,当比特率较低时,重建图像的边缘较模糊,即存在所谓的 Gibbs 效应。针对这一问题,提出边缘检测与压缩编码相结合的方案,首先检测出图像边缘,在压缩编码过程中对变换后的边缘系数进行提升,即对其进行加权操作,以保证优先传输视觉上的最重要系数,从而减少 Gibbs 效应的影响,提高重建图像视觉质量。

2 零树算法的分析

基于小波变换的压缩算法一般着眼于利用其良好的空间-频率局部化特性和级间系数幅值分布的相似性。文献[1]提出的 EZW (embedded zerotree wavelet) 算法正是定义了 POS, NEG, IZ, ZTR 这 4 个零树符号来充分利用上述性质对幅值进行预测和编码,在阈值的意义下(即隐含的量化),用上一级的小波系数预测了下一级的小波系数。该算法通过使阈值按指数方式递减而实现了逐级量化,这样产生的比特流按照所对应的幅值大小分层次地进行排列,实现了对图像逐渐逼近的编码。

文献[2]给出了一个更为精细的 SPIHT (set partitioning in hierarchical trees) 算法。其核心思想是,任何基于比较的算法的执行路径都被分支点的比较

基金项目:韩国通信电子研究院合作基金资助项目(12003121192202)

收稿日期:2005-10-17; 改回日期:2006-03-22

第一作者简介:连静(1980~),女,吉林大学通信工程学院通信与信息系统专业博士研究生。主要研究方向为图像处理、图像压缩、图像分割。E-mail:lianjing80@126.com

结果隐含地定义了。尽管这两个算法形式不同,但实际差别却很小。后者最重要的改进是,在阈值测试时没有输出零树符号,而是输出1比特的测试函数值。实际上,这相当于在此时就已将零树符号进行了霍夫曼编码。这样做的好处是,既降低了比特率,又加快了算法的执行。另外,从算法中还可以分析得知,SPIHT算法的求精扫描与EZW算法的次扫描步骤相比,在执行中相对延迟了一步,而前者通过解码时对系数的补偿达到了与后者相同的系数重建精度。换句话说,要达到同样的压缩效果,SPIHT算法需要更少的比特数,从而提高了算法的性能。

文献[3]指出,零树结构实现了对小系数的死区效应,称为“零树量化”。除此以外,对大系数还可以进行一般的标量量化。这样,两种量化方式在率失真意义下就可以进行联合优化,这就是SFQ(space frequency quantization)算法。零树算法还有待进一步的发展^[4],算法性能的提高还可通过抑制噪声来达到^[5,6]。

然而,文献[3]承认,虽然SFQ算法的PSNR(峰值信噪比)与SPIHT和EZW算法相比均有很大的提高,但是主观视觉效果却没有明显的改进,其中最主要的问题是Gibbs效应仍然存在。因此,上述算法仍未能解决一般的基于小波变换的压缩算法存在的边缘模糊问题。鉴于此,本文提出具有边缘保持特性的嵌入式图像压缩算法。

3 图像的小波边缘检测方法

该方法事先确定图像边缘特征的空间位置,以便在图像编码时对边缘进行加强,避免边缘模糊,减少Gibbs效应的影响。虽然已有许多边缘检测方法,如采用各种梯度算子(Roberts 梯度算子^[7]、Sobel 梯度算子^[8]、拉普拉斯算子^[9]、Prewitt 梯度算子^[10]等等)的边缘检测方法^[11],但小波变换在不同尺度上具有“变焦”的功能,它是检测突变信号强有力的工具,采用小波边缘检测方法^[12-14]得到的检测结果明显优于其他边缘检测方法,加之压缩方面采用了小波压缩方法,故在边缘检测方面,采用小波边缘检测方法与之匹配,可以直接确定哪些小波系数对应图像的边缘特征,以保证优先传输视觉上的重要系数,从而减少Gibbs效应的影响,提高重构图像视觉质量。

3.1 小波边缘检测原理

根据图像小波边缘检测的理论^[12-14],可以适当

选择2维二进可分离小波,使得这样的小波可以看成是某一平滑函数 $\theta(x,y)$ 的偏导数:

$$\begin{aligned} \varphi_{2^j}^x &= \frac{\partial \theta_{2^j}(x,y)}{\partial x} \\ \varphi_{2^j}^y &= \frac{\partial \theta_{2^j}(x,y)}{\partial y} \end{aligned}$$

则图像 $f(x,y)$ 在尺度 2^j 下的小波变换可表示为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} W_{2^j}^x f(x,y) \\ W_{2^j}^y f(x,y) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f * \varphi_{2^j}^x(x,y) \\ f * \varphi_{2^j}^y(x,y) \end{bmatrix} \\ &= 2^j \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} f * \theta_{2^j}(x,y) \\ \frac{\partial}{\partial y} f * \theta_{2^j}(x,y) \end{bmatrix} \\ &= 2^j \nabla(f * \theta_{2^j})(x,y) \end{aligned} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,图像 $f(x,y)$ 经过平滑后,在 x 和 y 方向上的偏导数就是图像在行和列方向上的小波变换。因此,小波系数的局部极大值点可以刻画图像的突变点,即图像的边缘特征点。

3.2 实现方法

小波边缘检测具体的实现步骤如下:

(1) 对图像 $f(x,y)$ 先进行一次平滑预处理,其结果仍记为 $f(x,y)$;

(2) 记 $S_{2^0}f(x,y)=f(x,y)$,对 $S_{2^j}f(x,y)$ 的每一行进行小波变换(这时, y 是参数, x 是变量),得到: $W_{2^j}^x f=(S_{2^j}f)*G_j$; $S_{2^{j+1}}f=(S_{2^j}f)*H_j$ ($j=0,1,2,\dots$), j 表示尺度, G_j, H_j 表示小波变换所使用的离散滤波器。

(3) 找出 $W_{2^j}^x f$ 每行的零交叉点,并根据这些零交叉点求出相邻零交叉点间的极大值点,记这些极大值点为 $W_{2^j}^x f(x,y)$ 。

(4) 对图像的列方向重复上述第1、2、3的步骤,得到列方向上图像边缘特征点的候选边缘点,记为 $W_{2^j}^y f(x,y)$ 。

(5) 由于 $W_{2^j}^x f(x,y)$ 、 $W_{2^j}^y f(x,y)$ 其实就是图像在点 (x,y) 上的偏导数,因此,图像在点 (x,y) 上梯度的模和幅角为

$$M_{2^j} f(x,y) = \sqrt{|W_{2^j}^x f(x,y)|^2 + |W_{2^j}^y f(x,y)|^2} \quad (2)$$

$$A_{2^j} f(x,y) = \arctan \left[\frac{W_{2^j}^y f(x,y)}{W_{2^j}^x f(x,y)} \right] \quad (3)$$

(6) 沿着梯度的垂直方向,将 $M_{2^j} f(x,y)$ 和 $A_{2^j} f(x,y)$ 相邻的点串接成链,当链长超过一定阈值 T 时,链上小波系数的位置就是图像在该尺度上的边缘特征点。

3.3 小波边缘检测实验结果

对 Lena、Goldhill 和 Barbara 3 幅标准灰度图像

采用上述方法进行实验,图 1 为原始图像,图 2 为对图 1 进行小波边缘检测的实验结果。



(a) Lena 原图像



(b) Goldhill 原图像



(c) Barbara 原图像

图 1 原始图像

Fig.1 Original images



(a) 对 Lena 检测结果图



(b) 对 Goldhill 检测结果图



(c) 对 Barbara 检测结果图

图 2 实验结果图

Fig.2 Results of experiment

Lena 图像和 Goldhill 图像都是边缘类型比较复杂的自然图像,常规的边缘检测算子很难同时检测出所有类型的边缘。采用小波边缘检测方法,利用小波变换的多尺度特性(在小尺度提取边缘细节,在大尺度提取平滑的较长的边缘链),可以检测到细节丰富且边缘完整、连续的边缘图像。

4 改进的 SPIHT 算法

近年来,基于小波变换的零树编码算在图像压缩领域得到了广泛的关注和应用。其中,由 Said 和 Pearlman 提出的基于嵌入式编码思想的 SPIHT 算法^[2]由于具有结构简单,支持多码率等优良特性,被认为是目前国际上图像变换编码领域最先进的方法之一。SPIHT 算法以零树结构为基础,采用适当的集合分割排序策略,通过初始化、排序扫描、细化扫描和量化步长更新 4 个子过程完成嵌入式编码,获得了较高的信噪比和较好的复原图像质量。但理论分析表明,该算法存在以下不足:

(1) 算法采用优先扫描编码、其次量化编码的分离编码流程,将导致过多的比特用于位置信息而非重要系数的编码,从而降低了重构图像质量,尤其是在低比特率下。

(2) 算法在编码过程中需要附加 3 个集合链表存储编码信息,内存需求量大,难于硬件实现。

针对以上问题,本文提出一种新的零树编码算法,该算法改进了 SPIHT 压缩方案的编码流程,提高了重构图像质量,同时,算法采用 LZC 算法^[15,16]的标志位图思想,无需链表,降低了内存消耗,易于硬件实现。

算法具体编码过程如下:

(1) 初始化,输出

$$n = \lfloor \log_2(\max_{(i,j)} |C(i,j)|) \rfloor$$

清空状态矩阵 F_c 、 F_d ,并置 $F_d(0,0) = 1$ 。

(2) 对系数 $C(0,0)$ 单独编码

若 $F_c(0,0) = 1$,输出 $C(0,0)$ 的第 n 层比特位; 否则,输出 $S_n(C(0,0))$,若 $S_n(C(0,0)) = 1$,输

出 $C(0,0)$ 的符号位;并置 $F_c(0,0) = 1$ 。

(3) 扫描 F_D

若 $F_D(i, j) = 1$, 对每个 $(k, l) \in O(i, j)$;

① 若 $F_c(k, l) = 1$, 输出 $C(k, l)$ 的第 n 层比特位;否则,输出 $S_n(C(k, l))$, 若 $S_n(C(k, l)) = 1$, 输出 $C(k, l)$ 的符号位, 并置 $F_c(k, l) = 1$;

② 如果 $L(i, j) \neq \varphi$ 并且 $F_D(k, l) = 0$, 输出 $S_n(D(k, l))$, 如果 $S_n(D(k, l)) = 1$, 置 $F_D(k, l) = 1$ 。

(4) 量化步长更新, $n = n - 1$, 转步骤 2。

在上述编码算法中,只需要简单地把“输出”改为“输入”,就可以实现解码。由此可见,在同一时刻,解码器的两个标志位图与编码器的两个标志位图是相同的,也就是说解码器可以根据编码时的搜索路径恢复数据序列。

5 具有边缘保持特性图像编码算法

基于边缘检测和无表 SPIHT 算法的图像编码方案主要包含以下 3 个部分:

- (1) 对原始图像进行小波变换;
- (2) 将高频子带内边缘所对应的小波系数乘上加权因子;
- (3) 利用本文无表 SPIHT 算法进行压缩编码。

6 实验结果及分析

为了验证本文方案的有效性,对 Lena、Goldhill、Barbara 3 幅 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 标准灰度图像进行实验。表 1 给出了本文算法与 SPIHT 算法重构图像的 PSNR 值比较(无后续熵编码),从比较的结果可以看出本文算法能获得比 SPIHT 算法更好的重构图像质量。

表 1 本文算法与 SPIHT 算法重构图像的 PSNR 比较表
Tab. 1 PSNR of reconstructed images

单位: dB

Rate (bpp)	Lena		Goldhill		Barbara	
	SPIHT	本文算法	SPIHT	本文算法	SPIHT	本文算法
0.1	28.02	29.58	26.25	27.51	23.24	23.79
0.2	31.56	32.59	28.60	29.26	25.43	26.08
0.3	33.64	34.18	30.18	30.63	27.12	27.64
0.4	35.08	35.76	31.04	31.50	28.91	29.49
0.5	36.35	36.72	32.11	32.56	30.13	30.54
0.6	37.16	37.48	32.94	33.44	31.47	31.83
0.7	37.90	38.25	33.69	33.98	32.57	32.97
0.8	38.48	38.81	34.47	34.63	33.66	34.05
0.9	39.19	39.31	35.02	35.09	34.62	34.73
1.0	39.75	39.78	35.56	35.61	35.52	35.59

图 3 给出了 Lena、Goldhill、Barbara 3 幅标准图



(a) 本文算法重构图像



(b) SPIHT 算法重构图像

图 3 本文算法与 SPIHT 算法重构图像(0.1bpp)

Fig. 3 Reconstructed images(0.1bpp)

像在解码率为 0.1bpp 下本文算法与 SPIHT 算法重构图像直观图对比,从对比结果可以看到,采用本文算法图像边缘部分的主观视觉效果有明显的改善。实验结果充分说明了本文提出的方法能较好地克服 Gibbs 效应,获得较高的恢复图像质量。

7 结 论

针对小波变换图像压缩存在的边缘模糊问题,提出了一种边缘检测与零树编码相结合的压缩算法,该算法不仅结构简单,无需任何训练序列,支持多码率,而且有效地克服了 Gibbs 效应,获得了较高的恢复图像质量。

参考文献 (References)

- Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445 ~ 3462.
- Said A, Pearlman W. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on Circuits and System Video Technology, 1996, 6(3): 243 ~ 249.
- Xiong Z, Ramchandran K, Orchard M T. Space frequency quantization for wavelet image coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(5): 677 ~ 693.
- Creusere C D. A new method of robust image compression based on the embedded zero₂ tree wavelet algorithm [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(10): 1436 ~ 1442.
- Luo J, Chen C W, Parker K J, et al. A scene adaptive and signal adaptive quantization for subband image and video compression using wavelets [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 7(2): 343 ~ 357.
- Watson A B, Yang G Y, Solomon J A, et al. Visibility of wavelet quantization noise [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(8): 1164 ~ 1175.
- Roberts L G. Machine perception of three-dimension solids [A]. In: Optical and Electro-Optimal Information Processing [C], Cambridge, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology Press, 1965.
- Sobel L. Camera Models and Machine Perception [D]. Stanford, CA: Stanford University, 1970.
- Prewitt J. Object Enhancement and Extraction Picture Process [M]. New York: Picture Processing and Psychopictoric Press, 1970: 75 ~ 149.
- Marr D, Hildreth E. Theory of edge detection [A]. In: Proceedings of the Royal Society of London [C], London, 1980: 187 ~ 217.
- Castleman K R. Digital Image Processing [M]. USA, New Jersey: Prentice Hall, 1996: 359 ~ 360.
- Mallat S. Zero-crossing of a wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(4): 1019 ~ 1033.
- Mallat S, Hwang W. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 617 ~ 643.
- Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multiscale edge [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 710 ~ 732.
- Wen K L, Burgess N. Listless zerotree coding for color images [A]. In: Proceedings of the 32nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers [C], Pacific Grove, CA, USA, 1998: 231 ~ 235.
- Wen K L, Burgess N. Low memory color image zerotree coding [J]. Information Decision and Control, 1999, 11(2): 91 ~ 95.