

一种新的小波域彩色图像压缩编码算法

王向阳^{1,2)} 左珂可¹⁾ 杨红颖¹⁾

¹⁾(辽宁师范大学计算机与信息技术学院,大连 116029)

²⁾(计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学),南京 210093)

摘要 为了快速地进行彩色图像压缩,提出了一种基于视觉掩蔽与色彩相关的小波变换域彩色图像压缩编码算法。该算法首先在 RGB 空间内对原始图像的彩色分量进行小波变换,并结合视觉掩蔽特性对不同区域内的小波系数进行加权处理;然后将经过加权处理的小波系数转换到自定义的 Y'U'V'空间;最后依据色彩相关性来构造扩展零树结构,并利用改进的嵌入零树小波(EZW)方案在 Y'U'V'空间内对小波系数进行嵌入零树编码。仿真实验结果表明,该彩色图像编码方法是一种高效的图像压缩算法,其编解码时间较 CZW 算法、CEZW 算法缩短约 1/3 ~ 1/4。

关键词 彩色图像压缩 嵌入零树小波 视觉掩蔽 色彩相关

中图分类号: TN919.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)03-0430-05

A New Color Image Coding Scheme in DWT Domain

WANG Xiang-yang^{1,2)}, ZUO Ke-ke¹⁾, YANG Hong-ying¹⁾

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

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

Abstract In this paper, a new color image compression algorithm in DWT domain is proposed, in which the visual masking and the correlation between color components are utilized. Firstly, the discrete wavelet transform is performed on three different color components in RGB color space, and the wavelet coefficients are weighed based on the human visual masking. Then weighed wavelet coefficients are converted to user's defined Y'U'V' color space. Finally, the wavelet coefficients are progressively encoded in Y'U'V' color space by the extended zerotree structure and the improved EZW scheme. Experimental results show that the new color image compression scheme performs better than that of CEZW and CZW in the aspect of recovery image quality and coding/decoding time.

Keywords color image compression, embedded zerotree wavelet (EZW), visual masking, correlation between color components

1 引言

小波(wavelet)变换是 20 世纪 80 年代中期出现的新时频域信号分析工具。自 1989 年 Mallat 首次将小波变换引入图像处理以来,小波变换以其优异的时频局部能力及良好的去相关能力在图像压缩编

码领域得到了广泛应用,并取得了良好的效果^[1-5],其中,由 Shen 等提出的 CEZW (color embedded zerotree wavelet)算法^[5]及由 Saenz 等提出的 CZW (color zerotree wavelet)算法^[6]被认为是目前国际上比较优秀的彩色图像压缩方法,它们均以著名的嵌入零树小波(embedded zerotree wavelet,简记为 EZW)编码^[6]思想为基础,其不仅结构简单、无需任

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(A2004-05);辽宁省自然科学基金项目(20032100);图像处理与图像通信江苏省重点实验室开放基金项目(ZK205014)

收稿日期:2004-04-07;**改回日期:**2005-12-29

第一作者简介:王向阳(1965 ~),男,教授。1995 年获吉林大学硕士学位。主要研究方向为多媒体信息处理技术、网络信息安全技术。

E-mail: wxy37@263.net

何训练、支持多码率,而且具有较高的信噪比和较好的图像复原质量。然而,理论分析和实验结果表明,上述算法也存在一些不足,具体表现为:(1)未能结合人眼视觉掩蔽特性进行系数量化;(2)构造零树结构时,未能充分利用彩色分量之间的相关特性;(3)未单独处理最低频子带;(4)未能依据图像内容确定高频子带扫描次序。

本文提出了一种新的小波变换域彩色图像压缩编码方案,该方案能够通过小波系数加权、零树结构扩展、最低频子带单独编码、高频子带扫描次序自适应确定等措施来提高 CEZW 算法与 CZW 算法之工作效率。

2 小波系数加权

研究表明:由于人眼对于图像边缘区、平滑区、纹理区的敏感程度不同,即这3种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3种不同区域内图像信息所对应的小波系数赋予不同视觉权值的方法来保证优先传输视觉上的最重要系数,以便进一步提高复原图像的质量。

2.1 子带间小波系数加权

由小波变换理论知,一幅图像经过若干级小波分解后,可得到一系列不同方向(分辨率)的多种频带(子图像),而且小波子带按其重要性,其总体的排序为 $LL_k, HL_k, LH_k, HH_k, HL_{k-1}, LH_{k-1}, \dots, HL_1, LH_1, HH_1$ 。针对小波子带图像所呈现出的上述重要性分布特征,本文选用了 Desarte 等提出的子带间小波系数加权方案^[6],该方案旨在通过加权量化来减少以下加权量化噪声:

$$(P_N)_w = \sum_{n_1} \sum_{n_2} \frac{1}{N_{n_1} N_{n_2}} W_{n_1, n_2} \sigma_{n_1, n_2}^2$$

其中, $W_{n_1, n_2} = k \iint w(u, v) |F_{n_1, n_2}(u, v)|^2 du dv$, σ_{n_1, n_2}^2 是子带 (n_1, n_2) 量化误差的方差, N_{n_1}, N_{n_2} 是子带的下采样因子, $F_{n_1, n_2}(u, v)$ 是重构滤波器的传输函数, $w(u, v)$ 是加权曲线函数,即

$$w(u, v) = 15.32 \times \left(1 + \frac{u^2 + v^2}{3.952 \times \arctg(\text{in degree}) (1 + 2L)} \right)^{-1.5}$$

文献[6]已经证明,对于后续的熵编码,当量化步长正比于 $\sqrt{W_{n_1, n_2}}$ 时,可达到最优量化,并据此给出了不同子带间小波系数的视觉权值处理方案(如

表1所示)。

表1 各级子带小波系数的视觉权值
Tab. 1 The visual weigh for wavelet coefficients of various subbands

子带	视觉权值
LL_3	1.000
HL_3	0.738
LH_3	0.738
HH_3	0.596
HL_2	0.584
LH_2	0.584
HH_2	0.411
HL_1	0.355
LH_1	0.355
HH_1	0.230

2.2 高频子带内小波系数加权

全面引入人眼视觉掩蔽特性和对高频子带内小波系数赋予不同视觉权值需完成以下主要任务:

(1)将小波图像的高频子带划分成图像子块 $B_k (k=1, 2, \dots, S)$ 。其中,图像子块的大小分别为 $2 \times 2, 4 \times 4, 8 \times 8, \dots$, 依次类推。

(2)按照一定分类规则,将上述图像子块划分为边缘块、平滑块、纹理块3类。其分类过程为:

①计算每个图像子块 $B_k (k=1, 2, \dots, S)$ 的熵值和方差。其中,熵值较小的图像子块应该是平滑块,而熵值比较大的图像子块是纹理块或边缘块,而且纹理块对应的方差较小,边缘块对应的方差比较大;

②通过选取合适的熵阈值和方差阈值来求得相应的边缘块、平滑块和纹理块。

(3)确定边缘块、平滑块和纹理块内小波系数的不同视觉权值。为简化视觉权值选取过程,本文首先将图像划分为如下3类:

①纹理图像(如标准图像 Mandrill 等),其特点为图像中纹理块所占比例最大;

②边缘图像(如标准图像 Barbara 等),其特点为图像中边缘块所占比例最大;

③平滑图像(如标准图像 Lena 等),其特点为图像中平滑块所占比例最大。

然后结合实验,给出不同尺度下高频子带中边缘块、平滑块和纹理块内小波系数的不同视觉权值。

3 彩色空间转换与扩展零树构造

为进一步提高图像编解码速度,本文充分利用了彩色分量之间的相关特性来构造零树结构。

3.1 彩色空间转换

本文所定义的彩色空间转换公式(rgb 空间与 $Y'U'V'$ 空间)为

$$\begin{pmatrix} Y' \\ U' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{r^2 + g^2 + b^2} \\ |r| - Y'/\sqrt{3} \\ |b| - Y'/\sqrt{3} \end{pmatrix} \quad \text{及} \quad \begin{pmatrix} |r| \\ |g| \\ |b| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U' + Y'/\sqrt{3} \\ \sqrt{Y'^2 - r^2 - b^2} \\ V' + Y'/\sqrt{3} \end{pmatrix}$$

其中,彩色分量 Y' 表示 rgb 空间内的矢量长度,彩色分量 U' 和 V' 表示色差信号。

由此不难看出,对于 $Y'U'V'$ 彩色空间来说,其彩色分量之间存在如下相关特性: $Y' \geq U'$, $Y' \geq V'$, 即如果 $Y' = 0$, 则有 $U' = 0$ 和 $V' = 0$ 。彩色分量之间的这种相关特性为构造扩展零树结构、提高图像编解码速度打下了基础。

3.2 扩展零树结构

本文采纳了如图 1 所示的扩展零树结构。

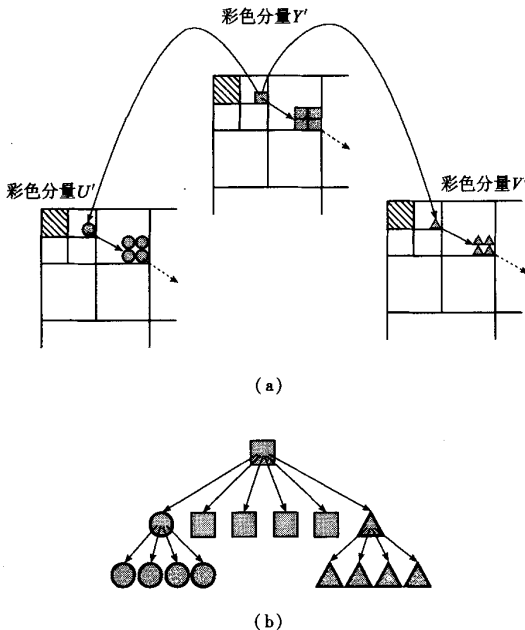


图 1 扩展零树结构示意图

Fig. 1 The expanded zerotree structure

显然,对以上扩展零树结构来说,算法可充分利用彩色分量之间的相关特性($Y' \geq U'$, $Y' \geq V'$)来进

行嵌入编码,即在对彩色分量 Y' 内小波系数进行嵌入编码时(主要是零树树根情况),编码算法可同时对彩色分量 U' 和 V' 内的相应小波系数进行编码,且只需搜索扫描彩色分量 Y' 内的所有后代(即图 1 中标识为“ \bullet ”的系数节点)即可,这必然大大提高图像的编码速度。

4 改进的嵌入零树小波编码策略

为了有效克服 CEZW、CZW 等彩色图像压缩算法的不足,本文提出以下两点改进措施:(1)对最低频子带系数直接进行 DPCM (differential pulse code modulation) 编码;(2)对高频子带带间进行“Z”字形扫描(即按照水平、垂直、对角顺序扫描),而子带内则依据视觉掩蔽特性进行自适应嵌入编码。

4.1 最低频子带的 DPCM 编码

本文选取了北京大学无线电系徐孟侠教授所提出的固定预测系数 2 维 DPCM 预测器。通过多幅测试图像的统计分析与其他常用经典预测器进行的主观对比实验可知,使用该 2 维 DPCM 预测器所得到的误差信号熵值最小,且复原图像的主观质量最优。

4.2 高频子带的自适应嵌入编码

为了进一步提高嵌入零树编码的扫描效率,本文以小波域视觉掩蔽特性为基础,引入了基于视觉块的高频子带系数自适应扫描策略^[7],即

(1)高频子带带间进行“Z”字形扫描(即按照水平、垂直、对角顺序扫描)。这种扫描顺序不仅符合同一分辨率内不同方向子带小波系数的重要性原则,而且满足了人的视觉特性;

(2)视觉块内部按照从上到下、从左到右的固定次序进行扫描;

(3)视觉块间按照依赖于视觉掩蔽特性的自适应次序进行扫描。

5 彩色图像压缩编码算法框架

基于视觉掩蔽与色彩相关的小波变换域彩色图像压缩编码过程如图 2 所示。

由图 2 可见,该彩色图像压缩编码方案主要包含以下 5 个部分:(1)在 RGB 空间内对原始图像的彩色分量进行小波变换(即转换到 rgb 空间);(2)结合人眼视觉掩蔽特性对小波系数进行加权处理;(3)对小波系数符号进行熵编码,并将经过加权处理的小波系

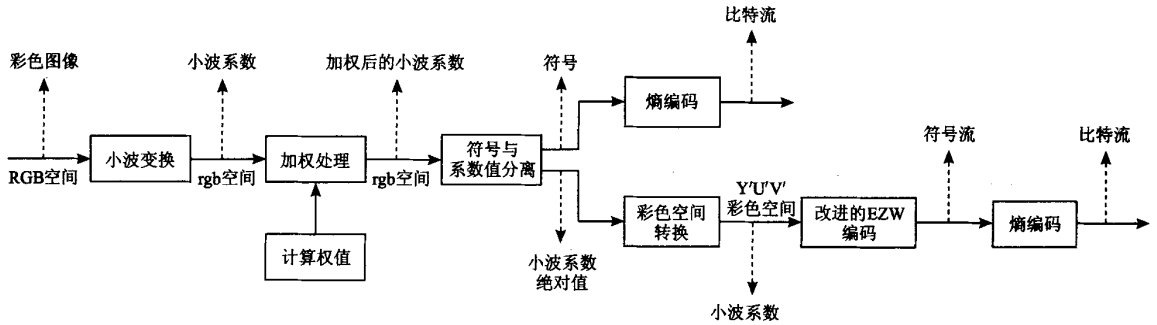


图 2 彩色图像编码算法流程图

Fig. 2 The flow chart of color image coding scheme

数(绝对值)转换到自定义的 Y'U'V 彩色空间;(4)在 Y'U'V 彩色空间内,依据色彩相关性构造扩展零树结构,并利用改进的 EZW 方案对小波系数进行嵌入编码;(5)对嵌入编码所生成的符号流进行熵编码。

6 实验结果与结论

为了验证本文彩色图像编码算法的高效性,在 Pentium III/450 计算机上,以 512 × 512 的 24 位真彩色标准图像 Lena、Barbara 为例,进行了 3 级小波分解与重构实验,并与 CEZW 算法、CZW 算法进行了比较,实验结果如表 2 ~ 表 3 和图版 I 图 1 所示。其中,小波分解与重构采用了常见的双正交 9/7 小波滤波器。

表 2 3 种算法的重构图像质量(峰值信噪比)

Tab. 2 The recovery image for different methods

单位: dB

比特率 (bpp)	Lena 标准图像			Barbara 标准图像		
	本文 算法	CZW 算法	CEZW 算法	本文 算法	CZW 算法	CEZW 算法
0.10	26.51	26.35	26.20	22.34	22.11	22.05
0.25	29.18	28.66	28.22	24.66	24.38	23.57
0.50	31.91	31.56	31.31	26.78	26.47	25.73
1.00	34.45	34.02	33.73	28.90	28.50	27.98
1.50	35.18	34.74	34.21	29.61	29.11	28.69

表 3 3 种算法的编解码时间比较

Tab. 3 The encoding/decoding time for different methods

比特率 (bpp)	Lena 标准图像						Barbara 标准图像					
	编码时间(s)			解码时间(s)			编码时间(s)			解码时间(s)		
	本文 算法	CZW 算法	CEZW 算法	本文 算法	CZW 算法	CEZW 算法	本文 算法	CZW 算法	CEZW 算法	本文 算法	CZW 算法	CEZW 算法
0.10	0.25	0.38	0.28	0.24	0.37	0.28	0.29	0.44	0.34	0.24	0.44	0.35
0.25	0.36	0.53	0.40	0.35	0.53	0.42	0.39	0.55	0.43	0.38	0.56	0.44
0.50	0.45	0.65	0.50	0.44	0.67	0.50	0.47	0.68	0.50	0.46	0.67	0.50
1.00	0.54	0.72	0.56	0.53	0.72	0.57	0.58	0.75	0.58	0.56	0.76	0.57
1.50	0.63	0.89	0.66	0.62	0.88	0.65	0.66	0.91	0.68	0.63	0.90	0.69

本文以嵌入零树编码思想为基础,提出了一种基于视觉掩蔽与色彩相关的彩色图像压缩方案。实验结果表明,本文提出的彩色图像编码方案不仅具

有较好的压缩效果,而且具有较强的通用性,故应用前景较为广阔。

参 考 文 献 (References)

- 1 Basel Karger. Image and Video Compression: The Principles behind the Technology [J]. *Telemedicine and Teledermatology*, 2003, **32**: 17 ~ 23.
- 2 Shapiro J M. Embedding image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, **41**(12): 3445 ~ 3462.
- 3 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.
- 4 Shen K. A study of real-time and rate scalable video and image compression [D]. School of Electrical and Computer Engineering, Purdue University, Hammond, Indiana, USA, December 1997.
- 5 Saenz M, Salama P, Shen K, *et al.* An evaluation of color embedded wavelet image compression techniques [A]. In: *Proceedings of the SPIE/IS&T Conference on Visual Communications and Image Processing (VCIP)* [C], San Jose, California, USA, 1999: 282 ~ 293.
- 6 Desarte P, Macq B. Singal-adapted multiresolution transform for image coding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, **IT-38**(2): 897 ~ 904.
- 7 WANG Xiang-yang, YANG Hong-ying. A novel embedded zerotree wavelet image coding based on visual masking [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003, **15**(11): 1393 ~ 1396. [王向阳, 杨红颖. 基于视觉掩蔽特性的 EZW 算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, **15**(11): 1393 ~ 1396.]

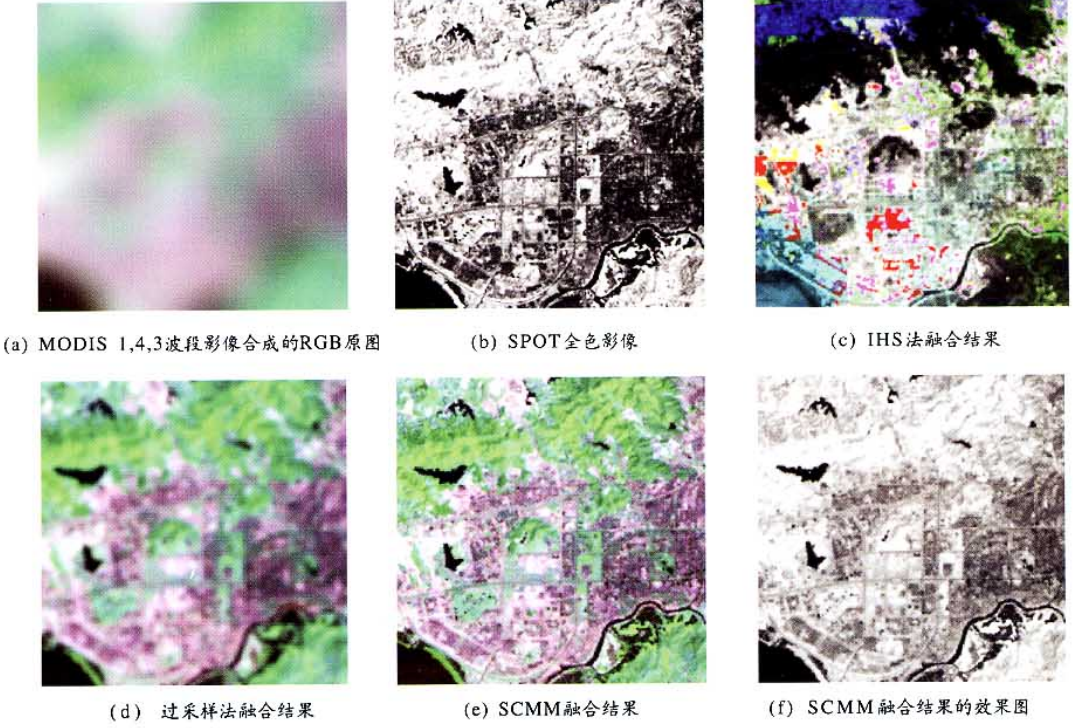


图1 几种融合方法融合效果比较
Fig.1 The comparison of the result images

王向阳等:一种新的小波域彩色图像压缩编码算法



图1 标准图像(Lena、Barbara)重构复原效果对照
Fig.1 The recovery image for standard test image(Lena、Barbara)