

基于彩色图像压缩的优化预处理算法

谢 凯^{1,2} 杨 胜¹ 余厚全² 杨 杰³

(湖南大学计算机与通信学院 长沙 410082)¹ (长江大学电子信息学院 荆州 434023)²

(上海交通大学图像处理与模式识别研究所 上海 200240)³

摘 要 提出了一种基于变换优化的彩色图像压缩预处理算法,该算法由变换组合优化、彩色分量加权、CSF 滤波 3 部分组成。实验结果表明,在非常大的压缩比率范围内,该算法的客观质量和主观质量都优于 JPEG2000 有损变换算法和 JPEG2000 无损压缩算法。

关键词 彩色图像压缩,小波变换,彩色对比敏感函数,人体视觉系统,变换优化

中图分类号 TP391 文献标识码 A

Transform Optimization Based on Color Image Compression

XIE Kai^{1,2} YANG Sheng¹ YU Hou-quan² YANG Jie³

(School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)¹

(School of Electronic Information, Yangtze River University, Jingzhou 434023, China)²

(Inst. of Image Processing & Pattern Recognition, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)³

Abstract A transform optimization based preprocessing algorithm was presented. The method integrates combination of transforms, color component weighting and CSF filtering. Experiment results showed that proposed algorithm outperforms JPEG2000 lossy and lossless algorithm in both objective and subjective quality in wide range of compression rate.

Keywords Color image compression, Wavelet transform, Color CSF, HVS, Transform optimization

1 引言

随着计算机技术的迅猛发展,图像压缩算法也已经有了几十年的历史,其中最近一次大突破就是 JPEG2000 图像压缩标准^[1-3]的确定。然而,几乎所有的压缩算法都致力于提高灰度图像的压缩效率,近两年来关于彩色图像压缩的研究才渐渐多了起来。在 JPEG2000 图像压缩标准中有两种针对彩色图线压缩的变换算法,它们分别针对有损压缩和无损压缩。JPEG2000 有损变换算法包括两种有损变换,不可逆颜色变换(ICT)和 CDF 9/7 小波变换;而 JPEG2000 无损变换算法由两种无损变换组成,分别是可逆颜色变换(RCT)和 5/3 小波变换。

本文研究 JPEG2000 变换阶段的两种算法后,提出了一种基于变换优化的彩色图像压缩预处理算法。实验结果表明相比 JPEG2000 有损变换算法和 JPEG2000 无损变换算法,本文提出的算法提高了重建图像的峰值信噪比(PSNR)1~2db,且保守估计,从 0.2BPP(bit per pixel,压缩率单位)到 6BPP 的范围内本文的算法都优于 JPEG2000 的两种变换算法。因此,本文提出的算法可以取代 JPEG2000 有损变换算法作为所有基于小波变换的彩色图像压缩的预处理算法。

2 基于变换优化的彩色图像压缩预处理算法

本文提出的算法的主要流程如图 1 所示。下面对算法的 3 个基本部分——讨论。

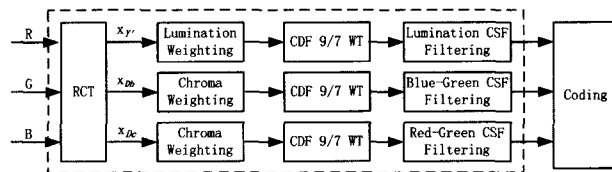


图 1 算法流程框图

2.1 变换组合的选取

JPEG2000, Part 1 包含有两种颜色变换和两种小波变换,它们是 RCT(Reversible Component Transform)、ICT(Irreversible Component Transform)、5/3 小波变换和 CDF 9/7 小波变换。其中 RCT 和 5/3 小波变换属于无损变换,ICT 和 CDF 9/7 小波变换属于有损变换。下面分别给出它们的定义(小波变换用提升算法的形式定义)。

RCT

$$\begin{cases} x_Y = \frac{x_R[n] + 2x_G[n] + x_B[n]}{4} \\ x_{Db} = x_B[n] - x_G[n] \\ x_{Gb} = x_R[n] - x_G[n] \end{cases} \quad (1)$$

到稿日期:2009-08-10 返修日期:2009-10-11 本文受高等学校博士学科点专项科研基金(20070532077),湖北省自然科学基金(2009CDB308),湖北省教育厅科研基金(Q20091211)资助。

谢 凯(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向为图像处理等,E-mail:kaixie2007@yahoo.com;杨 胜(1977—),男,副教授,主要研究方向为图像处理等;余厚全(1958—),男,教授,主要研究方向为图像处理与通信;杨 杰(1963—),男,教授,主要研究方向为图像处理和模式识别。

ICT

$$\begin{bmatrix} x_Y[n] \\ x_O[n] \\ x_G[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.5 \\ 0.5 & -0.419 & -0.081 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R[n] \\ x_G[n] \\ x_B[n] \end{bmatrix} \quad (2)$$

5/3 小波变换

$$\begin{cases} d[n] = d_0[n] - [\frac{1}{2}(s_0[n+1] + s_0[n])] \\ s[n] = s_0[n] + [\frac{1}{4}(d[n] + d[n-1]) + \frac{1}{2}] \end{cases} \quad (3)$$

CDF 9/7 小波变换

$$\begin{cases} d_1[n] = d_0[n] + [\frac{1}{128}(203(-s_0[n+1] - s_0[n])) + \frac{1}{2}] \\ s_1[n] = s_0[n] + [\frac{1}{4096}(217(-d_1[n] - d_1[n-1])) + \frac{1}{2}] \\ d[n] = d_1[n] + [\frac{1}{128}(113(s_1[n+1] + s_1[n])) + \frac{1}{2}] \\ s[n] = s_1[n] + [\frac{1}{4096}(1817(d[n] + d[n-1])) + \frac{1}{2}] \end{cases} \quad (4)$$

在 JPEG2000 中,有损变换算法全部由有损变换组成 (ICT 和 CDF 9/7 小波变换),无损变换算法全部由无损变换组成 (RCT 和 5/3 小波变换)。事实上,有损变换和无损变换的组合很有可能比两个有损变换的组合或者两个无损变换的组合效果更好。例如,如果在小于 4BPP 时,CDF 9/7 小波变换优于 5/3 小波变换,并且在大于 1BPP 时,RCT 优于 ICT,那么在不考虑颜色成分变换和小波变换相互作用的情况下,在 1~4BPP 的范围内,选用 RCT 和 CDF 9/7 小波变换的组合明显是最优的。

由于 JPEG2000 是多年图像压缩算法研究的结晶,它所采用的变换几乎都是在有损或无损变换中最有利于压缩的变换,因此我们通过测试 JPEG2000 规定变换的 4 种组合选取在不同压缩比率范围内效率最高的变换方案。最终的实验结果表明在几乎所有实用有损压缩的压缩比率范围内,RCT 和 CDF 9/7 小波变换的组合表现出了卓越的性能。图 2 示出了对彩色 Lena 图的测试结果,RCT 和 CDF 9/7 小波变换组合的优越性非常明显。

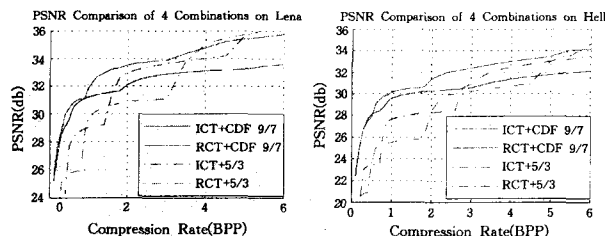


图 2 4 种变换组合 PSNR 曲线的比较

2.2 颜色分量加权

经过颜色分量变换后,各个颜色分量的方差已经发生了变化,也就是说图像信息被集中在一部分颜色分量上。显然,对那些含有更多信息的颜色分量分配更多的比特比平均分配比特效率更高,因此我们采用对颜色分量加权的办法实现 bit 的不平衡分配。

假设 Y' , D_b 和 D_r 分量的权值为 W_Y , W_{D_b} 和 W_{D_r} , 经过 RCT 变换和加权,各个颜色分量变得相互独立 (RCT 的作用) 且方差相等 (加权的作用)。那么根据变换矩阵和权值,RGB

颜色空间的协方差矩阵就可以根据式 (5) 计算出来。

$$D_{RGB} = ((BA)^{-1})^T D_{Y'D_bD_r} (BA)^{-1} \quad (5)$$

式中, A 为 RCT 的变换矩阵, B 为权值矩阵 (对角阵), $D_{Y'D_bD_r}$ 为经过 RCT 和加权后,各颜色分量的相关矩阵 (对角线元素相等的对角阵), D_{RGB} 为 RGB 空间上颜色分量的相关矩阵。

如果假设 RGB 颜色空间的各个颜色分量的方差都相等,即 D_{RGB} 对角线上元素相等,那么可以得到如下的权值关系。

$$W_Y = \sqrt{\frac{48}{11}} W_{D_b} = \sqrt{\frac{48}{11}} W_{D_r} \quad (6)$$

最终实际的权值取为 4, 2, 2。这里仅仅计算使用 RCT 变换的权值,使用 ICT 变换各分量的权值,也可以用同样的方法算出。另外,权值可以和变换矩阵整合到一起,进一步减小变换误差。

图 3 示出了加权算法和不加权算法的 PSNR 曲线的比较,从中可以明显看出,经过加权,重建图像的客观质量得到了明显的提高。其他标准测试图像的实验结果也显示了相似的结果。

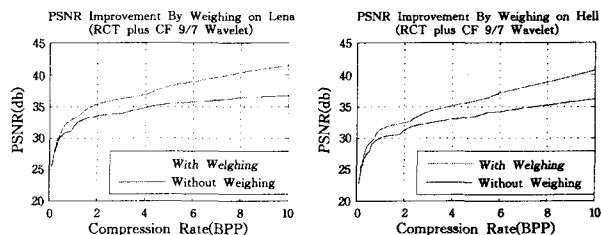


图 3 利用颜色分量加权提高重建图像的客观质量

2.3 CSF 滤波

研究表明 PSNR, MSE 等客观评价标准并不能完全真实地反映人眼观察重建图像的主观质量。本文尝试利用彩色对比度敏感函数 (Color CSF) 来提高编码效率,对于人眼比较敏感的小波系数多分配比特,对于人眼敏感度较低的小波系数少分配比特。在文献 [4] 中,分别在成分颜色空间 (Component Space)、 $YCbCr$ 颜色空间和 $L^*a^*b^*$ 颜色空间测量了彩色对比度敏感函数,本文利用 $YCbCr$ 颜色空间上的实验结果,其归一化表达式如下

$$S_L(f) = 0.997 f^2 \exp(-0.970 f^{0.781}) + 0.221 \exp(-0.800 f^{1.999}) \quad (7)$$

$$S_O(f) = \exp(-0.2041 f^{0.900}) \quad (8)$$

$$S_G(f) = \exp(-0.1521 f^{0.893}) \quad (9)$$

采用 $YCbCr$ 颜色空间上的实验结果的原因有两个,第一是因为同 $YCbCr$ 颜色空间一样,RCT 变换后的 3 个分量分别代表亮度、蓝色、红色;第二是因为,RCT 变换和 ICT 变换都是线性变换,误差更小。

利用文献 [5] 描述的方法,我们对 3 个颜色分量的 5 层小波分解设计了彩色对比度敏感函数滤波器族。然后利用这些滤波器对分别对各自颜色分量的小波系数进行滤波。通过这样的处理,重建图像的主观质量得到了很大的提高。

3 实验结果及分析

我们的实验采用 SPIHT 算法 [6] 为编码算法,由于提出的算法是一种预处理算法,任何一种基于小波变换的图像压缩算法都能得到类似的结果。

我们对一些标准压缩测试图像作了实验。首先,计算重

建图像的 PSNR 值,用于评估本文算法的性能。图 4 中比较了本文算法、JPEG2000 有损变换算法和 JPEG2000 无损变换算法的 PSNR 值曲线。从图中可以明显地看出,在非常广的压缩范围内,本文算法优于 JPEG2000 有损变换算法和 JPEG2000 无损变换算法 1~2db,也就是说本文算法能更多地提高重建图像的客观质量。在表 1、表 2 中,比较了本文算法、JPEG2000 有损算法和 JPEG2000 无损算法重建图片的 PSNR 值,定量地说明了本文提出算法的优越性。

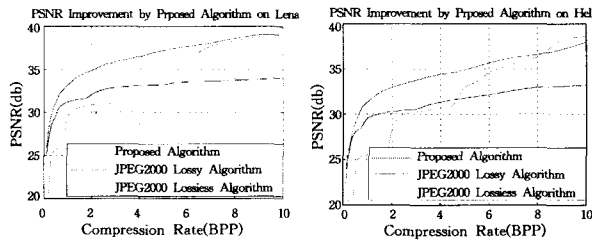


图 4 本文算法与 JPEG2000 有损算法和 JPEG2000 无损算法重建图像客观质量比较

由于客观质量评价标准并不能完全准确地反映主观质量,我们又采用了加权峰值信噪比(WPSNR)作为视觉质量评价标准并画出了包含 CSF 滤波和不包含 CSF 滤波的算法的 WPSNR 值的对比曲线(见图 5)。从图中可以看,视觉质量的提高非常明显。

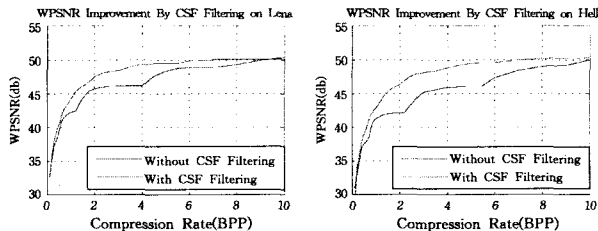


图 5 CSF 滤波对重建图像客观质量的提高

最后,在图 6 中比较了本文算法和 JPEG2000 有损变换算法,从图中可以发现,本文算法明显优于 JPEG2000 有损变换算法。

结束语 本文研究了彩色图像压缩中的预处理算法并提出了一种新的预处理算法。本文算法包含 3 个部分,其一是

RCT 和 CDF 9/7 小波变换的组合,其二是颜色分量加权,其三是颜色对比度敏感函数滤波。实验结果表明,相比 JPEG2000 有损变换算法和 JPEG2000 无损变换算法,本文方法极大地提高了基于小波变换的彩色图像压缩算法的客观质量和视觉质量。



图 6 本文算法与 JPEG2000 有损算法重建图像的比较,左图为本文算法,右图为 JPEG2000 有损算法(0.2BPP)

今后我们将继续研究如何将人类视觉系统(HVS)的其他特性,如掩盖效应等嵌入到彩色图像压缩中去,也将继续研究从变换的角度提高压缩重建图像的质量。

参考文献

- [1] Charrier M, Cruz D S, Larsson M. JPEG2000, the next millennium compression standard for still images[C]// Proc. of the IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 1999;131-132
- [2] Taubaman D S, Marcellin M W. JPEG2000 image compression fundamentals, standards and practice, Chinese Edition[Z]. 2004
- [3] ISO/IEC. JPEG 2000—lossless and lossy compression of continuous-tone and bi-level still images; part I minimum decoder[M]. ISO, ISO/IEC, 1999
- [4] Nadenau M J. Integration of human color vision models into high quality image compression[D]. 2000
- [5] Adams M D. Reversible integer-to-integer wavelet transforms for image compression; performance evaluation and analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(6): 1010-1024
- [6] Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees[J]. IEEE Transaction on Circuits and System for Video Technology, 1996, 6(3): 243-250
- [7] J. Information Processing Letters, 1996, 58(s): 11-15
- [8] Refanidis I, Vlahavas I. The MO-GRT system heuristic planning with multiple criteria [C]// Workshop on Planning and Scheduling with Multiple criteria. AIPS, 2002; 46-55
- [9] Refanidis I, Vlahavas I. Multiobjective heuristic state-space planning [J]. Artificial Intelligence, 2003, 145(1/2): 1-32
- [10] Korf R. Real-time heuristic search [J]. Artificial Intelligence, 1990, 42(2/3): 189-211
- [11] Bulitko V, Lee G. Learning in real-time search; a unifying framework [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2006, 25: 119-157
- [12] Koenig S, Likhachev M. Real-time adaptive A* [C]// Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), 2006; 281-288
- [13] Rayner D C, Davison K, Bulitko V, et al. Real-time heuristic search with a priority queue [C]// Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), 2007; 2372-2377
- [14] Bentley J L, Kung H T, Schkolnick M, et al. On the average number of maxima in a set of vectors and applications [J]. Journal of the ACM, 1978, 25(4): 536-543
- [15] Stewart B S, White C C. Multiobjective A* [J]. Journal of the ACM, 1991, 38(4): 775-814
- [16] Dasgupta P, Chakrabarti P P, De Sakar S C. Multiobjective heuristic search [M]. Vieweg; Braunschweig/Wiebaden, 1999
- [17] Mandow L, De la Cruz J L P. Multicriteria heuristic search [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 150(2): 253-280
- [18] Harikumar S, Kumar S. Iterative deepening multiobjective A*

参考文献

(上接第 239 页)

发式搜索在线地对问题进行求解,通过选取合理的局部空间能够在保证路径质量的同时减小工作量,避免过长的停留时间,快速地到达目标状态,很好地解决一系列多目标路径规划问题。

结束语 通过在线交替执行局部搜索过程、学习过程与移动过程,实时的路径规划方法在预先假设的环境下试探性地进行求解,移动的同时探测周围环境,尽早发现不一致的环境信息,尤其当环境中存在大量不确定的信息时,能够避免大量的重规划过程,从而提高问题求解的效率。