

一种基于人眼感知特性的彩色图像压缩算法

申静

(陕西理工学院, 汉中 723000)

摘要: **目的** 研究结合人眼感知特性的彩色图像压缩技术。**方法** 结合人眼对比度敏感视觉特性及其数学模型, 基于彩色图像频谱特征, 提出一种适合于彩色图像的压缩算法方案, 并对图像进行3种压缩比的压缩仿真实验。**结果** 提出的压缩算法方案在完全不影响人眼观察的情况下压缩比可达15:1, 压缩比达到64.1538:1时, 解压缩图像仍能在一定的误差范围内达到较好的视觉效果, 且PSNR仍能达到30 dB以上。**结论** 提出的压缩算法方案在保证图像压缩质量的前提下能够实现较高的压缩比, 完全可以满足实际生活中彩色图像存储和传输的需要。

关键词: 图像压缩; 离散余弦变换; 人眼视觉特性; 颜色空间

中图分类号: TP391; O432.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)19-0093-05

A Colour Image Compression Algorithm Based on Human Perception Characteristics

SHEN Jing

(Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

ABSTRACT: Objective To study the color image compression technology based on human perception characteristics. **Methods** Combined with human visual characteristics and its mathematic model, based on the color image frequency spectrum characteristics, an image compression scheme was proposed to be suitable for color image, and the simulation experiments were carried out with three different compression ratios. **Results** In the color image compression scheme proposed, the compression ratio could reach 15:1 under the conditions of not affecting the human observation by comparison and analysis. When the compression ratio reached 64.1538:1, the decompressed image could still achieve a relatively good visual effect in a certain range of error, and the PSNR could reach more than 30 dB. **Conclusion** Experiment results showed that the proposed compression algorithm scheme could achieve relatively high compression ratios under the premise of image compression quality, which could completely meet the requirement of color image storage and transmission in real life.

KEY WORDS: image compression; discrete cosine transform; human visual characteristics; color space

随着多媒体技术和电信技术的迅速发展, 图像技术得到了空前的进步, 但图像庞大的信息量一直制约着图像技术的发展, 致使人们对图像信息的获取、显示、交换与处理等方面提出了越来越高的要求, 同时也受到了前所未有的关注。高压缩比和高压缩质量

的图像压缩技术一直以来是专家学者们探讨和研究的重点课题, 具有重要的理论研究意义和实际应用价值^[1-3]。

国内外专家学者对图像压缩技术做了大量的研究, 提出了较多的压缩算法, 但在结合人眼感知特性

收稿日期: 2014-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61301237); 陕西省教育厅专项科研基金项目(2013JK1195)

作者简介: 申静(1981—), 女, 山东微山人, 硕士, 陕西理工学院讲师, 主要研究方向为智能系统、图像技术。

进行图像压缩技术方面,仍需要做大量的工作和进一步的探讨,特别是人眼彩色视觉特性在图像技术中的应用方面^[4-8]。这主要是因为人眼视觉特性目前不完善,许多特性仍在探索中,视觉特性数学模型如何应用于图像技术中这些方面一直是图像、视觉等研究者们探索的重点和难点问题。人类接受到的信息75%以上来自眼睛,人眼视觉系统(HVS)是世界上最好的图像成像与信息处理系统,其许多特性是图像压缩技术的理论和实践研究基础。若在图像压缩技术中引入人眼视觉特性,量化时,在一定范围内引起的图像变换域频谱系数的量化误差不能为人眼所觉察。如果编码方案能够利用人眼视觉系统的一些特征,则完全可以实现高压缩比、高质量的图像压缩,而且能够满足传输回来的图像至少达到人眼能够较好地分辨^[7-15]。基于此,笔者结合人眼对比度敏感视觉特性及其数学模型,根据图像变换域频谱特征,尝试提出了一种彩色图像压缩算法方案,并进行仿真实验,实现3种压缩比的图像压缩,且进行了对比分析。

1 人眼对比度感知特性及其数学模型

视觉系统的对比度敏感特性是人类四大感知特性之一,其在光电成像技术、信息技术和智能控制等

领域得到了较好的应用。人眼对比度敏感函数(CSF)是通过实验测试和理论分析构建的一种反映视觉系统对比度敏感特性的函数关系模型,体现了人眼对比度敏感阈值与空间频率、亮度之间的数值关系。国内外许多信息专家、学者对其进行了大量的研究,到目前为止,根据不同的测量数据和理论分析方法获得了较多的CSF数学模型^[7-12],但CSF模型与真实的人眼视觉特性之间存在一定差异,不能很好地反映人眼视觉特性。由于色彩的复杂性和人的心理、生理等因素,人眼彩色视觉特性及其数学模型的研究比较少,目前还没有一个能较好地反映人眼彩色感知特性的CSF。结合当前的文献报道^[9],只有Mullen等人在同等观测条件下测量了人眼亮度和彩色对比度敏感视觉特性数据,且通过理论分析,得出了含有3个参数的对立色空间的CSF模型,其彩色和亮度视觉特性模型分别记为 CSF_{col} 和 CSF_{lum} ,见式(1)和式(2),式(1)中的参数见表1。根据目前视觉光学、颜色科学以及图像技术等领域的研究和应用结果,此CSF模型获得了较好的认同。为了在图像压缩技术中更好地应用人眼亮度和色度视觉特性,该压缩方案采用此2种模型进行设计。

$$CSF_{col}(f) = a_1 \cdot e^{b_1 f^c} + a_2 \cdot e^{b_2 : f^c} \quad (1)$$

$$CSF_{lum}(f) = 75 \cdot f^{0.2} \cdot e^{-0.8f} \quad (2)$$

表1 彩色模型式(1)中的3个参数的值

Tab.1 Values of the three parameters in the color model equation (1)

参数	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2
红-绿	109.1413	-0.0037	3.424 36	93.597 11	-0.003 67	2.167 71
蓝-黄	7.032 845	-0.0004	4.258 205	40.690 950	-0.103 909	1.648 658

2 离散余弦变换

离散余弦变换(DCT)是一种常用的时频分析变换,经DCT变换后,其优势有:在变换过程中能较好地去除信号的相关性;在频域上呈带状,与人眼空间感知特性相符,在图像技术中易于结合其应用;能量集中特性,变换后能量一般集中在低频和部分中频系数上,其值较大,而高频分量包含的信息量比较少,其系数往往为零或趋近于零。实验表明,人眼一般对具有高频的观察目标或其失真表现不太敏感,所以在图像压缩的量化环节中,通常直接将高频分量系数计为

零,如此量化后使得零值系数占相当大的比例。根据变换长度的编码思想,正好符合哈夫曼编码原理,同时也有效地增加了压缩比。记一幅图像为 $f(x,y)$,其DCT正逆变换见式(3)~(4)^[1]。

$$\text{正变换: } F(u,v) = \frac{2}{\sqrt{MN}} c(u)c(v) \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2N}(2x+1)u\right] \cos\left[\frac{\pi}{2M}(2y+1)v\right] \quad (3)$$

式中: $0 \leq u \leq M-1; 0 \leq v \leq N-1$ 。

$$\text{逆变换: } f(x,y) = \frac{2}{\sqrt{MN}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} c(u)c(v) F(u,v) \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2N}(2x+1)u\right] \cos\left[\frac{\pi}{2M}(2y+1)v\right] \quad (4)$$

式中: $0 \leq x \leq M-1; 0 \leq y \leq N-1$ 。

3 彩色图像压缩算法方案

在实际生活中,大部分图像是彩色图像。目前图像显示仪器主要有LCD, LED或CRT等显示器,且普通显示器一般采用RGB颜色空间来描述和处理色彩,但是,RGB颜色空间本身存在缺陷,是一种受显示仪器影响的色域空间。在使用时为了提高颜色显示精度,一般将其转换至不受仪器或设备影响的YCrCb。基于YCrCb色域的彩色图像编解码压缩方法的基本思路是:首先将图像转化到YCrCb色空间,再分解

为Y, C_r, C_b等3个基色分量相应的亮度图,并对其分别进行子块划分和DCT变换处理;再结合人眼彩色和亮度视觉特性及其数学模型CSF,分别量化处理Y, C_r, C_b等3个分量亮度图的DCT变换域频谱系数,对量化后的系数进行统计分析,依据零值系数分布特征和阈值关系,采用变长编码原理(哈夫曼算法)进行编码,得到彩色图像被压缩后的数据码流,实现彩色图像的压缩;最后根据以上过程的逆过程对其进行操作,实现解压,且按照YCrCb颜色空间的特点进行匹配和组合,重建出解压后的彩色图像,并转化到RGB色空间来显示。彩色数字图像压缩算法方案流程见图1,具体的各个步骤说明如下所述。

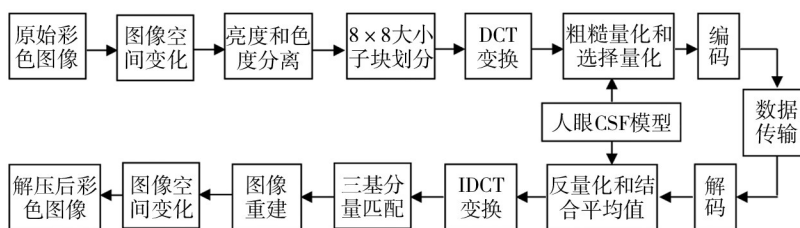


图1 图像压缩算法流程

Fig.1 Flow chart of the image compression algorithm

1) 选取一具有代表性的彩色图像作为研究对象,将其转化到YCrCb色空间(转化公式见式(5)),再分解成Y, C_r, C_b等3个基分量亮度图,且按照8 pixels × 8 pixels大小分别对其进行子块划分,同时对每一子块实施DCT变换。

$$\text{正变换: } \begin{cases} Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \\ C_r = (R - Y)/1.402 \\ C_b = (B - Y)/1.772 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{逆变换: } \begin{cases} R = Y + 1.402C_r \\ G = Y - 0.344C_b - 0.714C_r \\ B = Y + 1.772C_b \end{cases} \quad (6)$$

2) 根据变换域系数特征,结合人眼视觉特性模型(见式(1)~(2)),选取2个步骤来进行量化。图像DCT变换后,首先依据高频分量的系数特征进行粗糙量化,方法:由于人眼对高频观察目标或其失真非常不敏感,且高频分量包含较少的信息,使其系数往往趋近于0或为0,所以可以把变换域频谱系数中高频分量对应的系数直接置为0,并且计算出所有置零系数在置零前的平均值。没有置零的部分系数实行精量化,方法:依据图像变换域频谱图的频率和系数特征,

结合人眼视觉特性模型公式(1)~(2),计算各个频率的阈值,在阈值以下人眼不能觉察其失真,则量化时分析当前点周围的4领域,当领域内点之间的差值小于阈值时,则该点可用相同的字码表示,从而增加了短字码的概率,实现信息量的压缩。

3) 根据前面量化处理的零字符和短字码的概率统计分布特征,采用哈夫曼算法分别对三基分量亮度图实施编码,并进行匹配,从而获得压缩后的数据(码流)。

4) 图像压缩码流传输后,根据上述压缩算法的逆过程实施解码,并进行匹配和组合,重建得出解压缩后的彩色图像。在解码过程中,关键是反量化,这是因为量化是不可逆的,对于在量化过程中量化为0的系数,均采用其子块上所有该频率的系数平均值来代替,如此操作的益处是让量化过程中损失的信息能够用其均值来代替个点效果,从而较好地降低了解压所带来的信息损失,且所损失的信息一般不会降低图像的视觉效果和引起图像失真。对于反量化中领域内相同的灰度值,根据人眼视觉特性模型进行修改,对比效果和参数值来确定各点的灰度值。反量化后的

解码过程为:对数据进行DCT反变换,获得 Y, C_r, C_b 等3个基色分量的亮度图,将 Y, C_r, C_b 进行匹配,获得YCrCb色空间描述的图像,再转化为RGB色空间描述的图像(转化公式见式(6)),实现图像显示。

4 结果和讨论

4.1 结果

根据提出的压缩算法方案,实验选取陕西理工大学

校园网网页的彩色图像为对象,采用Matlab进行编程仿真实验,图像大小为128像素×128像素。为了对比压缩效果,采用3种不同压缩比进行压缩(见表2),实验结果见图2—3。其中,图2中的e,f和g分别为3种压缩比压缩后的解压缩图像,压缩比依次增大,从图2中主观来分辨,e,f和g图与原始图差异较小,不易区分。图3是彩色图像的三基色亮度图经过3种不同压缩比压缩后的压缩和解压缩仿真结果,图中的a,g,m分量图的压缩比依次增大。



图2 三色分离亮度图及3种不同的压缩比压缩后的解压缩图像

Fig.2 Tri-color luminance images and decompressed images with three compression ratios



图3 三基色亮度图经过3种不同压缩比压缩后的实验结果

Fig.3 Experiment results of tricolor luminance images compressed at three different compression ratios

4.2 讨论

在图像技术研究中,目前从2个方面来客观评价图像压缩技术,即编码质量和图像压缩质量。衡量编码质量一般采用5个参数来描述,即压缩比、图像信息的冗余度、图像的熵、压缩后的平均码子长度(简称平均码长)、和编码效率。评价方法为编码算法,平均码长越趋近于信息的熵,则编码质量越好。编码效率越

趋近于1越好,冗余度越趋近于0编码质量越好。评价图像压缩质量的参数一般采用峰值信噪比(PSNR),其计算表达式见式(7)^[1]。PSNR是目前使用最普遍、最广泛的评鉴画质的客观量测法,是从客观上评价解压缩图像与原始图像之间的偏差程度,其定量评价为:PSNR值越大,解压缩图像与原始图像之间的差异就越小,逼真程度就越高。大量实验结果表明,当PSNR>30 dB时,解压缩图像与原始图像之间的

表2 评价图像编码质量的5个参数值及衡量图像压缩质量的峰值信噪比值

Tab.2 Values of the five parameters for evaluating the encoding quality and the PSNR for measuring the compression quality of images

3种压缩比	基分量	基分量压缩比	图像的熵	平均码长	冗余度	编码效率	基分量的PSNR	彩色图像的压缩比
第1种压缩比	Y	1.6315	6.6942	6.7114	0.0032	0.9968	46.5040	2.4684
	C _r	1.2303	6.4961	6.5695	0.0116	0.9884	48.7817	
	C _b	1.2298	6.3218	6.4990	0.0233	0.9727	40.0360	
第2种压缩比	Y	2.9160	3.5103	3.7963	0.0538	0.9462	37.7343	15.2530
	C _r	2.2878	3.3108	3.5968	0.0732	0.9268	39.2138	
	C _b	2.2864	3.1590	3.4990	0.0972	0.9028	35.5373	
第3种压缩比	Y	4.5843	1.753	2.1221	0.1944	0.8056	33.2272	64.1538
	C _r	3.7699	1.6681	2.3221	0.2139	0.7861	42.3144	
	C _b	3.7121	1.6686	2.3221	0.2139	0.7861	32.4239	

偏差就非常小,人眼不容易将其分辨。为了对比分析彩色图像的压缩效果,采取3种压缩比对前面提出的压缩方案进行仿真实验,且计算5个定量评价图像压缩编码质量的参数和PSNR值,结果见表2。

PSNR=10 × lg
$$\frac{M \times N \times 255 \times 255}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - f'(i,j)]^2}$$
 (7)

结合表2中的计算数据,对比分析图2和图3的实验结果,表明主观上人眼无法区分压缩比为2.4684和15.2530的解压缩图像和原始图像之间的差异,客观上PSNR都超过了35 dB,表明压缩效果较好。当压缩比为64.1538时,虽然解压缩图像有一些失真,但在人眼的误差范围内,不影响观察效果,且其PSNR超过30 dB。对比3种压缩比的实验结果表明,文中图像压缩算法能够较好地实现压缩比达到15:1,甚至更高。从主观上看,3个基分量图被压缩后,在一定程度上均存在失真,主要是各个分量在分离时就表现了部分的失真,这是由DCT变换的自身特性决定的。由于人眼对颜色的敏感程度不同,使得在图像压缩时表现为主观上3种压缩比Y基色分量亮度图的压缩效果最好,Cb基分量的效果最差。从计算得出的5个编码质量的参数上看,当压缩比较高时(为64.1538时),3个基分量图的编码效率仍能达到0.7861以上,冗余度在0.2139以下,表明压缩编码质量在一定的误差范围内仍能达到较好的效果。

5 结语

结合彩色图像DCT变换频谱特征,提出了一种基

于人眼对比度敏感视觉特性及其CSF的、适合于彩色图像的压缩算法方案。该方案首先将图像转化到YCrCb色空间,再进行分解,获得了3个基色分量亮度图,并对其分别进行DCT变换处理;再结合人眼彩色和亮度视觉特性模型,量化处理3个分量亮度图DCT变换域频谱系数,并根据量化系数统计特征进行变长编码,获得码流;最后对数据实施逆运算进行解码,并按色空间的特点匹配、组合和重建,获得解压后的彩色图像,并转化到RGB色空间来显示。通过仿真实验,结果表明提出的彩色图像压缩算法完全可以实现压缩比达到15:1,甚至更高;压缩比达到64.1538:1时,图像部分失真,而PSNR仍能达到30 dB以上;从误差的角度上看,解压缩图像仍能在一定的误差范围内达到较好的视觉效果。综合实验结果表明,提出的压缩算法方案在保证图像压缩质量的前提下能够实现较高的压缩比,完全可以满足实际生活中彩色图像存储和传输的需要。当然,在基于人眼视觉特性的图像压缩技术中,由于视觉特性到目前为止还没有一个较好的、完整的特性模型,所以其图像技术仍需要进一步探索和研究。

参考文献:

[1] 郑莉,韩玄武. 基于图像复制清晰度视觉响应的研究[J]. 包装工程,2008,29(7):72—74.
ZHENG Li, HAN Xuan-wu. Research of Vision Response Based on Definition of Image Copy[J]. Packaging Engineering, 2008,29(7):72—74.
[2] BENOIT A, CAPLIER A, DURETTE B, et al. Using Human

(下转第124页)

- Temperature of Cylinders from the Outer Surface Temperature History[J]. Proceedings of the CSEE, 1994(4):8—11.
- [9] 张成义. 红外测温法确定圆柱内壁温度的误差分析和优化研究[J]. 激光与红外, 2007(7):656—658.
- ZHANG Cheng-yi. Quantitative Diagnosis and Optimization to Estimation Errors of Internal Temperature of a Hot Wire Embedded at the Center of a Cylinder Based on Infrared Temperature-Measuring[J]. Journal of Laser and Infrared, 2007(7):656—658.
- [10] 张有为. 采用共轭梯度法的管内壁温度导热反问题求解[J]. 工程热物理学报, 2009(7):1188—1190.
- ZHANG You-wei. Inverse Heat Conduction Problem of Deducing Inner Wall Temperature by Using Conjugate Gradient Method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009(7):1188—1190.
- [11] 张学学. 热工基础[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- ZHANG Xue-xue. Thermal Engineering Fundamentals[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [12] 杨世铭. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- YANG Shi-ming. Heat Transfer Theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [13] 李沪萍. 热工设备节能技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.
- LI Hu-ping. Energy-saving Technologies of Thermal Equipment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [14] SATORU I, KATS E, TSUNEHIK I. Development of High Thermal Efficiency Impinging Jet Nozzle for Hot Air Drying of Gravure Printing[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1998, 6(21):569—575.
- [15] 黄清明, 陈芳园, 许鹏, 等. 凹版印刷机干燥系统机型结构工艺参数节能减排设计[J]. 机械工程师, 2010(3):38—42.
- HUANG Qing-ming, CHEN Fang-yuan, XU Peng, et al. The Energy-saving & Emission Reduction Design of Mechanical Structure Parameters to Intaglio Press Drying System[J]. Mechanical Engineer, 2010(3):38—42.

(上接第 97 页)

- Visual System Modeling for Bio-inspired Low Level Image Processing[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(7):758—773.
- [3] CINTRA R J, BAYER F M. A DCT Approximation for Image Compression[J]. Signal Processing Letters, 2011, 18(10):579—582.
- [4] 申静. 基于人眼对比度敏感视觉特性的彩色图像水印技术研究[J]. 包装工程, 2014, 35(3):78—83.
- SHEN Jing. Color Image Watermark Technology Based on Contrast Sensitivity of Human Vision System[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3):78—83.
- [5] MITTAL A, MURALIDHAR G S, GHOSH J, et al. Blind Image Quality Assessment without Human Training Using Latent Quality Factors[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2012, 19(2):75—78.
- [6] ZHANG X. Lossy Compression and Iterative Reconstruction for Encrypted Image[J]. Information Forensics and Security, 2011, 6(1):53—58.
- [7] GRAHAM D J, REDIES C. Statistical Regularities in Art: Relations with Visual Coding and Perception[J]. Vision Research, 2010, 50(16):1503—1509.
- [8] BENOIT A, CAPLIER A, DURETTE B, et al. Using Human Visual System Modeling for Bio-inspired Low Level Image Processing[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(7):758—773.
- [9] MULLEN K T. The Contrast Sensitivity of Human Color Vision to Red-green and Blue-yellow Chromatic Gratings[J]. The Journal of Physiology, 1985, 359:381—400.
- [10] YAO Jun-cai. Measurements of Human Vision Contrast Sensitivity to Opposite Colors Using a Cathode Ray Tube Display[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(23):2425—2432.
- [11] AKG L C B, RUBIN D L, NAPEL S, et al. Content-based Image Retrieval in Radiology: Current Status and Future Directions[J]. Journal of Digital Imaging, 2011, 24(2):208—222.
- [12] LAI C C. An Improved SVD-based Watermarking Scheme Using Human Visual Characteristics[J]. Optics Communications, 2011, 284(4):938—944.
- [13] BREMOND R, TAREL J P, DUMONT E, et al. Vision Models for Image Quality Assessment: One is Not Enough[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(4):43—57.
- [14] 姚军财, 龚箭. CRT显示器颜色特性化模型与实验研究[J]. 包装工程, 2010, 31(21):99—102.
- YAO Jun-cai, GONG Jian. CRT Display Color Characterization Model and Experiment Research[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(21):99—102.
- [15] JAFARI R, ZIOU D, RASHIDI M M. Increasing Image Compression Rate Using Steganography[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(17):6918—6927.