文章编号:1007-2780(2016)06-0584-11

一种结合人眼对比度感知特性的彩色图像压缩算法

姚军财*
(陕西理工大学 物理与电信工程学院,陕西 汉中 723000)

摘要:为了使图像压缩后的效果更加符合人眼感知特性,提出了一种结合人眼对比度敏感视觉特性的图像压缩算法。算法首先结合视觉特性和图像变换域频谱系数特征,提出一种图像的角频率的计算方法,并依据计算的角频率提出一种人眼觉察图像最小误差阈值的计算方法;然后以此阈值作为量化步长,提出一种图像变换域频谱系数的量化方法;最后采用霍夫曼编码算法进行编解码,实现图像的压缩。并对三幅彩色图像进行了仿真实验,结果表明:与 JPEG 技术相比,三幅彩色图和各分量图的平均压缩比、PSNR 和 SSIM 依次提高了 10.480 7%、6.987 9%和 2.649 4%。表明提出的结合人眼视觉特性的图像压缩算法是一种较好的、有实用价值的压缩算法。

关 键 词:图像压缩;人眼视觉特性;空间频率;结构相似度
中图分类号:TP391; TN919.81 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/YJYXS20163106.0584

Color image compression algorithm combining the human contrast perception characteristics

YAO Jun-cai*

(*School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong* 723000, *China*)

Abstract: In order to make the compressed images satisfy more with the human visual perception characteristics, a color image compression algorithm combined the human visual contrast sensitivity characteristics is proposed. Firstly, combining the characteristics of human visual contrast sensitivity and spectrum coefficients in transform domain of image, a method for calculating the angular frequencies of the images is proposed, and the calculating method of minimum error threshold of human eye detecting images is proposed according to the angular frequencies. Then taking the threshold as quantization step size, a method is proposed to quantize spectrum coefficients in transform domain of image. Finally Huffman coding algorithm is adopted to carry out encoding and decoding to realize image compression. And the simulation experiments for three color images is carried out . The results show that the average compression ratio, PSNR and SSIM of three color images and each component of the

收稿日期:2016-01-25;**修订日期**:2016-03-06.
基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61301237);陕西省科技新星计划项目(No. 2015KJXX-42);陕西省教育厅科研计划项目(No. 15JK1139)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61301237); Scientific and Technological New-star Plan of Shaanxi Province, China (No. 2015KJXX-42); Specialized Research Foundation of Shaanxi Province Education Department, China(No. 15JK1139)

* 通信联系人,E-mail:yjc4782@126.com

image are increased by 10.480 7%, 6.987 9% and 2.649 4% respectively, compared with the technology of JPEG. It indicates that the image compression algorithm combined the human visual characteristics is better and more practical.

Key words: image compression; human visual system characteristics; spatial frequency; structural similarity index measurement

1 引　　言

随着多媒体、信息技术和光学技术的快速发展,信息进入到人们生活中的每一角落,同时,海量信息存储、传输和处理等问题也接踵而至;目前虽然现代化信息技术发展迅猛,但信息容量问题仍是一个难题,信息压缩技术很难满足社会的需求,许多的技术需要更新、优化和改进,这方面的工作吸引了大量的科研工作者们。

目前,在图像信息压缩技术方面,国内外做了大量的研究,得出了许多较好的结果[1-6],提出了许多的国际标准,其中主要有 JPEG 和 JPEG2000 等技术。但是其研究成果目前普遍认为存在不足,主要表现为:(1)没有充分结合人眼视觉特性,导致解压后的图像质量得不到有效的保障;(2)部分结合人眼视觉特性的图像技术,只是利用了人眼的部分掩蔽效应,没有真正将反映人眼视觉特性的数学模型应用到图像处理过程中;(3)目前还没有一个较好的将人眼视觉特性数学模型应用到图像处理技术中的有效方法,以致在结合人眼感知特性的图像处理技术研究中难以深入[1-4, 6-8]。主要是因为结合人眼视觉特性的图像技术是一门综合光学、生物和信息技术的交叉学科,目前的此项研究一般只是从计算机图形图像学或光信息技术等某一方面做了探讨性的工作,结合多个方面的研究困难较大[9-11]。但是人眼是图像信息的最终接受者,图像处理的目的即是为了满足人眼观察的需要,则需要在图像处理时充分考虑人眼视觉特性[11-16]。基于此,本文结合目前比较典型的人眼亮度和色度对比度敏感视觉特性数学模型 CSF(Contrast Sensitivity Function:CSF),根据图像变换域频谱系数特征,提出了一种新的人眼感知图像最小误差阈值的计算方法,并以阈值为量化步长对变换域系数进行量化,从而提出了一种新的结合人眼感知特性的图像压缩算法,并进行了仿真实验,且与 JPEG 压缩算法进行了对比,计算其峰值信噪比 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio:PSNR)、结构相似度 SSIM(Structural Similarity Index Measurement System:SSIM)和压缩比等参数值,结果表明文中提出的压缩算法明显好于 JPEG 中的压缩效果,其能够在压缩比和压缩质量上更进一步的提高。

2 人眼对比度感知特性数学模型

人眼对目标的分辨主要基于目标的轮廓和亮度、色度的对比。在视觉研究中,一般采用人眼对观察目标的亮度和色度的对比敏感度程度(采用人眼对比度觉察阈值的倒数描述)与空间频率之间的函数关系来描述视觉系统的空间特性,其函数称之为人眼对比度敏感函数 CSF。经过前人大量的实验和研究,目前得出了较多的模型,结合图像处理的实际需要、模型计算的复杂度和反映人眼视觉特性的效果,文中采用了由 Movshon 等提出的三参数指数亮度模型,以及由 Mullen 等提出的对立色空间的色度模型。其表达式如式(1)和式(2)[16-17]。

$$csf_{\mathrm{lum}}(f_\theta)=75\cdot f_\theta^{0.2}\cdot \mathrm{e}^{-0.8f_\theta}, \tag{1}$$

$$csf_{\mathrm{color}}(f_\theta)=a_1\cdot \mathrm{e}^{b_1 f_\theta^{c_1}}+a_2\cdot \mathrm{e}^{b_2\cdot f_\theta^{c_2}}, \tag{2}$$

其中:f_θ为视觉上的空间频率,称之为角频率,单位周/度[11]。式中的参数如表 1 所示。

表 1　式(2)中各参数的值

Tab. 1　Parameter values in the equation (2)

Parameters	Red-Green	Blue-Yellow
a_1	109.141 3	7.032 845
b_1	−0.003 7	−0.000 4
c_1	3.424 36	4.258 205
a_2	93.597 11	40.690 950
b_2	−0.003 67	−0.103 909
c_2	2.167 71	1.648 658

3 基于人眼视觉特性的图像压缩算法

目前图像压缩技术一般分为变换、量化和编解码三个主要步骤，对于变换和编解码方法，国内外做了大量的研究，得出了较好的结果，但在量化上，目前主要采用默认量化表的量化方式，其存在一定的缺陷，而结合人眼视觉特性进行图像压缩主要是体现在量化上的改进，其关键是如何把视觉特性数学模型与图像变换域频谱系数建立联系，设置量化步长，从而实现更好的量化效果[7-10,15]。具体的量化压缩方案说明如下。

3.1 图像的角频率计算方法

在视觉研究领域中，观察目标的空间频率称之为角频率，记为 f_θ，其是指单位视角内目标光栅刺激的周期数，单位一般取“周/度”(cpd：cycle per degree)[11]。若观察目标是图像，则计算其角频率时需要知道观察视角 θ 和视角范围内刺激的周期数目 N。其具体的计算各说明如下。

在人眼视觉特性的研究领域中，观察目标可以等效为具有不同角频率的光栅，如图 1 所示，且拟合 CSF 模型的数据即是通过测量人眼对不同角频率光栅的敏感程度数据。根据角频率的定义，光栅的角频率的计算方法如式(3)所示；观察视角描述如图 1 所示，其计算公式如式(4)，式中 D 代表目标的线度，l 表示观察距离。

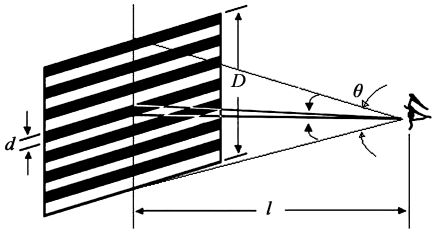


图 1 矩形亮度光栅和观察视角计算方法示意图

Fig. 1 Rectangular luminance grating and diagram of observation angle calculation method

$$f_\theta=\frac{N}{\theta}\ , \tag{3}$$

$$\theta=2\cdot\arctan\left(\frac{D}{2l}\cdot\frac{180}{\pi}\right)\ . \tag{4}$$

当人眼观察图像时，人眼类似于频谱滤波器，则相当于将图像作时频变换。当对图像进行离散余弦变换和反变换时发现，在图像变换域频谱中的两个亮度点，经反变换后形成了亮度光栅，且在原图大小的空域中，形成光栅的空间周期数目为频谱中的两个亮度点的坐标差值，演示效果如图 2 所示。在图像处理过程中，若将其中的一个点规定为坐标原点，另外一个点的坐标可为变换域频谱图中的任意一空间点坐标 (u,v)，则表明对于变换域频谱图中的任何一点，其本身代表了在原图大小的空间域中一个具有空间周期数目为 $N=(u^2+v^2)^{1/2}$ 的光栅，当人眼观察该点时，即可以看成是观察该光栅。则结合人眼视觉特性的测量过程，当人眼观察图像时，图像变换域中的每一点的角频率便可以依据此现象和规律计算出来。结合文中提出的压缩算法，则图像变换域中的每一点的角频率的具体计算方法为：首先对图像进行 8 pixels×8 pixels 大小的子块划分，再进行离散余弦变换(DCT)，变换后每一点的坐标即表示在 8×8 大小的分块上形成的刺激条纹的周期数，其值为 $N=(u^2+v^2)^{1/2}$，再依据视角的计算方法计算得出 θ，代入到公式(3)中即可计算出角频率。由于是采用显示器显示图像，图像和光栅的大小均采用像素描述，则式(3)可变形为式(5)。

$$f_\theta=\frac{N}{\theta}=\frac{1}{2}\frac{\pi}{180\arctan\left(\dfrac{n\cdot 2.54}{Kl}\right)}\sqrt{u^2+v^2}\ , \tag{5}$$

式中：K 表示显示器的分辨率，一般取 72 dpi；l 表示人眼观察显示屏显示图像距离，一般取 50 cm；n 表示以像素衡量的观测目标大小，方法中取为 8；u、v 分别代表变换域频谱图的空间坐标。

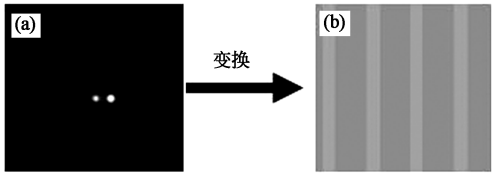


图 2 时频变换效果演示. (a) DCT 变换域中保留横坐标相差为 4 的两个点，(b)反变换后得到的正弦条纹图像

Fig. 2 Demonstration of time-frequency transforms. (a) Two drops saved in DCT field with the abscissa difference of 4. (b)Sine stripe image obtained by inverse DCT transform

3.2 色度对比度定义

亮度对比度的计算目前非常成熟，一般采用 Michelson 给出的定义式，如式(6)，但色度对比度的定义到目前为止还没有一个统一的表达式。

结合亮度对比度的定义规则和 Mullen 测量人眼色度对比度敏感实验中采用光谱定义色度对比度的方法,根据显示器显示彩色图像的光学特征和颜色空间的描述方法[16-17],本文提出了一种红绿和蓝黄对立色色度对比度的计算表达式,如式(7)和式(8)。其亮度和色度的对比描述如图 3 所示。

亮度对比度定义:

$$C_L=\frac{|L_1-L_2|}{\bar{L}},\bar{L}=\frac{L_1+L_2}{2}\text{或 }C_L=\frac{\Delta L}{L}. \tag{6}$$

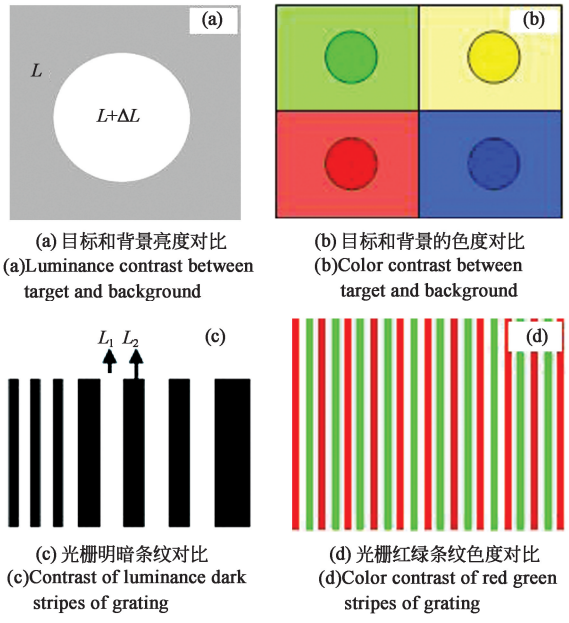
红绿对立色对比度定义:

$$C_{rg}=\frac{|a_1^*-a_2^*|}{\overline{a^*}}\quad \overline{a^*}=\frac{a_1^*+a_2^*}{2}. \tag{7}$$

蓝黄对立色对比度定义:

$$C_{yb}=\frac{|b_1^*-b_2^*|}{\overline{b^*}}\quad \overline{b^*}=\frac{b_1^*+b_2^*}{2}. \tag{8}$$

式中,L_1 和 L_2 分别表示两对比目标的亮度,取值范围为 0～100;a_1^*、a_2^* 和 b_1^*、b_2^* 表示其红绿和蓝黄色度值,取值范围为－120～120。



(a) 目标和背景亮度对比
(a)Luminance contrast between target and background

(b) 目标和背景的色度对比
(b)Color contrast between target and background

(c) 光栅明暗条纹对比
(c)Contrast of luminance dark stripes of grating

(d) 光栅红绿条纹色度对比
(d)Color contrast of red green stripes of grating

图 3　亮度和色度对比演示图

Fig. 3　Diagram of luminance and chrominance contrast

3.3　JND 阈值计算方法

目前结合视觉特性进行图像处理的方法一般是:在不影响观察效果的条件下,结合其数学模型 CSF 改变图像变换域或空间域的系数值,以实现处理的效果[7-10]。由此,必须知道当人眼观察图像时,图像每一像素点或频率下系数可容忍改变的最大误差范围,即人眼觉察图像最小误差阈值,又称 JND 阈值(Just Noticeable Difference:JND)[10,14]。

在视觉研究领域中,当人眼处于能分辨而又不能完全分辨的临界状态时,将观察目标的亮度差 ΔL 定义为可见度阈值[16-17],结合 JND 阈值的定义,则人眼观察图像时的可见度阈值即为 JND 阈值。具体的应用说明如下:图像中的任一关注点作为目标,其余为背景,如图 3 中的(a)图,当光强 L 增大时,人眼不能感觉其目标和背景的差异,若当 L 增加到 $L+\Delta L$ 以上时,人眼才能觉察到亮度发生了变化,则 ΔL 定义为该点像素或频率下的可见度阈值,亦即人眼觉察图像最小误差阈值。此时,称 $\Delta L/L$ 为人眼对比度觉察阈值(C),由于 $1/C$ 较好的描述了人眼的敏感程度,称其为人眼对比敏感度(灵敏度)[16-17]。

结合图像压缩的需要,计算 JND 阈值的方法为:对于亮度,首先对图像采用子块划分并做 DCT 变换,以变换域中的直流分量为背景亮度值,任一其它点作为目标,与之形成对比;再结合图像的角频率的计算方法和目标点的坐标,计算出目标点所对应的角频率,并代入到 CSF 模型中计算出该频率下的人眼对比度觉察阈值;最后利用对比度定义计算出每一点的人眼可见度阈值 ΔL,即 JND 阈值。同理,对于色度,JND 阈值计算方法一致。

3.4　压缩算法

压缩算法的总体思路是:首先是对图像进行子块划分并做 DCT 变换,再根据前面的方法计算出人眼觉察图像时每一频率下的 JND 阈值,以此阈值作为变换域频谱系数的量化步长进行有选择的量化,最后按照 JPEG 中的编解码方法进行编解码,从而实现图像压缩。压缩算法的流程图如图 4 所示。具体的算法描述为:

(1)将图像转换到与设备无关的颜色空间。结合颜色描述方法和 CSF 模型,本算法中将图像转换到 YCrCb 颜色空间;

(2)将图像进行亮度和色度分离,得到亮度、红绿和蓝黄 3 个分量的亮度图。对每个分量亮度图进行 8 pixels×8 pixels 大小子块划分,且分别对其进行 DCT 变换,并提取其变换后每一子块的直流分量和交流分量。

(3)选择合适的模板(矩阵)与交流分量做卷

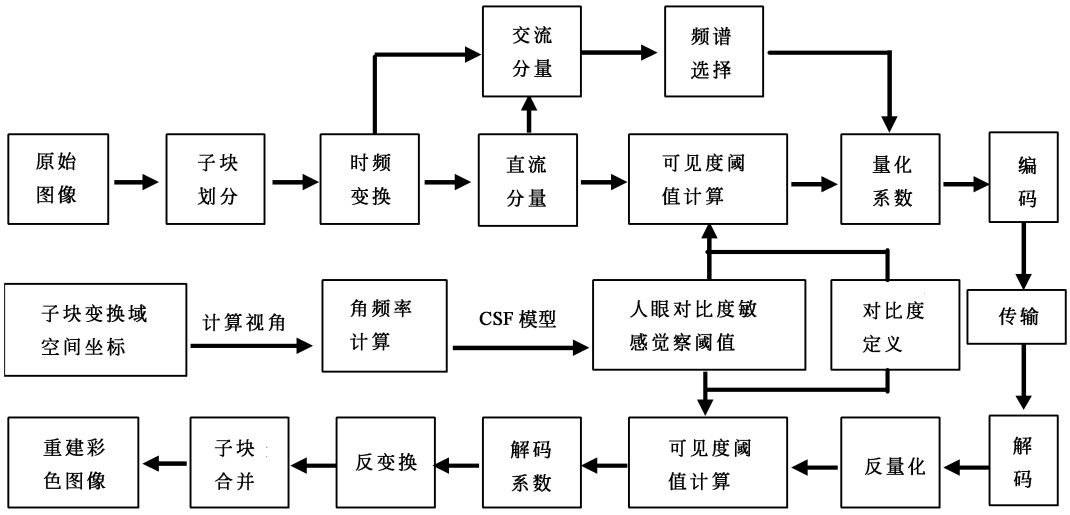


图 4 结合人眼视觉特性的彩色图像压缩算法流程图

Fig. 4 Flow chart of color image compression algorithm based on human visual system characteristics

积,用以选择变换域频谱图中的低频和部分中频分量,其余频谱系数均作置零处理,同时计算置零前各系数的平均值。

(4)结合提取的直流分量值,依据上面的计算方法分别计算出人眼觉察亮度、红绿和蓝黄分量图的最小觉察误差阈值(记为 JND_j),以此阈值作为量化步长量化低频和部分中频的交流分量频谱系数。量化方法为将频谱系数与量化步长做比值,然后再取整。

(5)将角频率为零时代入到 CSF 模型中,计算其人眼对比度敏感阈值,再代入到对比度定义中计算出其可见度阈值,则其为人眼觉察直流分量时的最小误差阈值,记为 JND_l,同样以此阈值作为直流分量的量化步长量化其系数。量化方法与第(4)步中的方法一致。

(6)对量化后的直流分量和交流分量频谱系数分别进行编码,编码的方法参照 JPEG 中的方法。

(7)参照 JPEG 中的方法,对码流实施解码,获得解压缩后每一 8 pixels×8 pixels 大小子块的系数矩阵,对于矩阵中为零的系数采用第(3)步中的平均值加以补偿。再对系数矩阵进行反变换和合并,重建彩色图像,并转换到 RGB 色空间中。

4 实验结果与讨论

4.1 实验结果

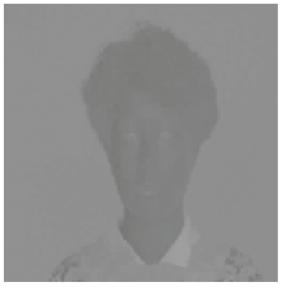
为了验证提出的压缩算法的有效性,采用经典的 Cara、Lena 和 Pepper 图为源图像进行编程仿真实验,三幅图像均来自于 Computer Vision Group, University of Granada (http://decsai.ugr.es/cvg/dbimagenes/)的 LIVE 数据库,大小为 512 pixels×512 pixels。同时对 3 幅图像采用 JEPG 进行压缩,其结果如图 5 和图 6 所示。



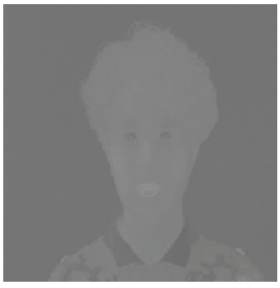
(a) 量化后重建的特征图像 (8×8)



(b)Y 分量解压缩后的图像



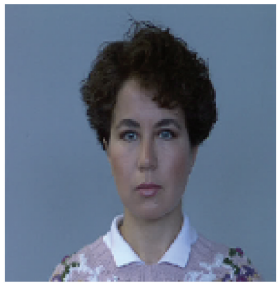
(c) Cb 分量解压缩后的图像



(d) Cr 分量解压缩后的图像



(e) 解压后重建的彩色图像 (YCC)



(f) 分解压后重建的彩色图像 (RGB)



(g) 量化后重建的特征图像 (8×8)



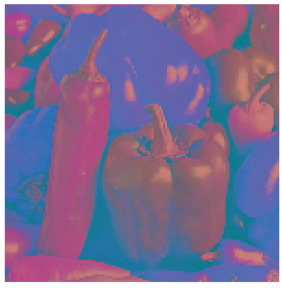
(h)Y 分量解压缩后的图像



(i) Cb 分量解压缩后的图像



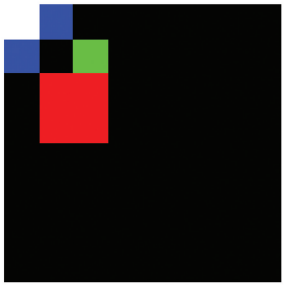
(j) Cr 分量解压缩后的图像



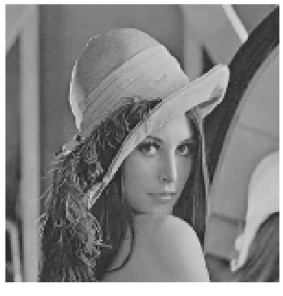
(k) 解压后重建的彩色图像 (YCC)



(l) 分解压后重建的彩色图像 (RGB)



(m) 量化后重建的特征图像 (8×8)



(n)Y 分量解压缩后的图像



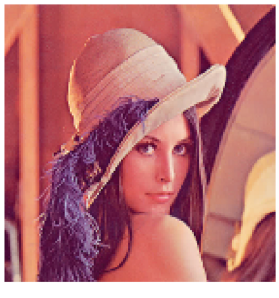
(o) Cb 分量解压缩后的图像



(p) Cr 分量解压缩后的图像



(q) 解压后重建的彩色图像 (YCC)



(r) 分解压后重建的彩色图像 (RGB)

图 5　结合人眼视觉特性模型的图像压缩实验结果

Fig. 5　Image compression results based on the model of human visual system characteristics



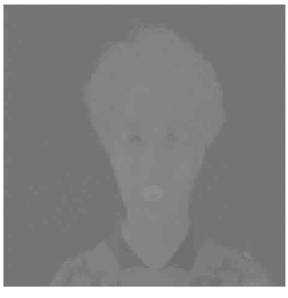
(a) 原始彩色图像



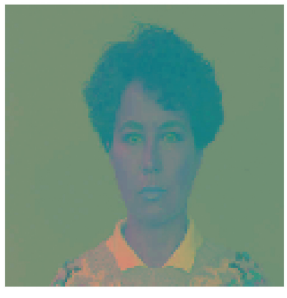
(b)Y 分量解压后图像



(c) Cb 分量解压后图像



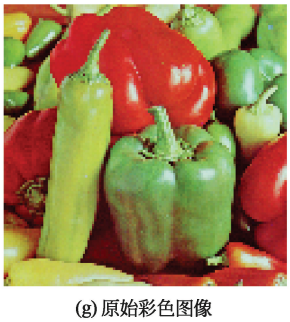
(d) Cr 分量解压后的图像



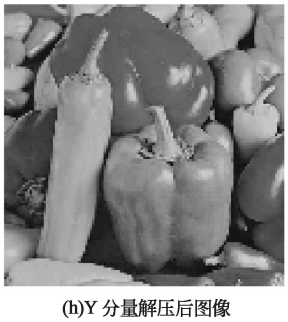
(e) 解压后重建的彩色图 (YCC)



(f) 解压后重建的彩色图 (RGB)



(g) 原始彩色图像



(h)Y 分量解压后图像



(i) Cb 分量解压后图像



(j) Cr 分量解压后的图像



(k) 解压后重建的彩色图 (YCC)



(l) 解压后重建的彩色图 (RGB)



(m) 原始彩色图像



(n)Y 分量解压后图像



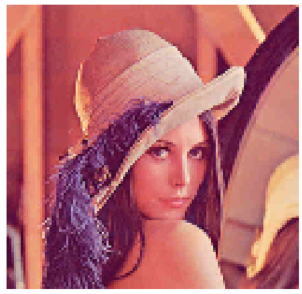
(o) Cb 分量解压后图像



(p) Cr 分量解压后的图像



(q) 解压后重建的彩色图 (YCC)



(r) 解压后重建的彩色图 (RGB)

图 6　采用 JPEG 技术压缩实验结果

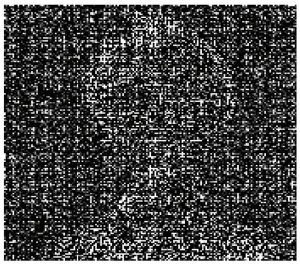
Fig. 6　Compression results using the JPEG

4.2　讨论

在图像压缩技术中,目前主要采用主观和客观两种评价压缩性能的方法。主观评价方法主要是根据人眼分辨,采用五级制评价其质量优劣,客观评价方法主要是计算压缩图像的压缩比、峰值信噪比(PSNR)和结构相似度归一化值(SSIM)等[11,14,18]。

4.2.1　主观评价

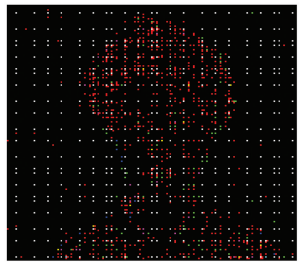
从主观上,人眼较难分辨图 5 和图 6 实验结果的差异。为了较好地从主观上感受图像数据量的减少,将图像变换域系数量化后(采用文章提出的量化方法)的每个子块进行合成,得到整幅图像的量化结果图,并对 3 个分量图均进行同样的操作,再将三分量图合成彩色图像。3 幅彩色图的实验结果如图 7。



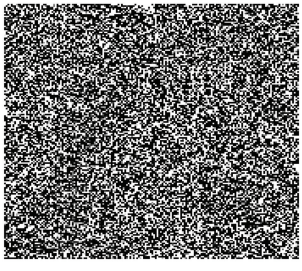
(a) Y 分量变换域系数末被量化的结果



(b)Y 分量变换域系数末被量化的结果



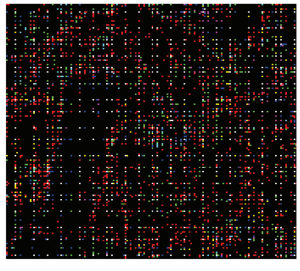
(c) 量化后重建的特征图像 (512×512)



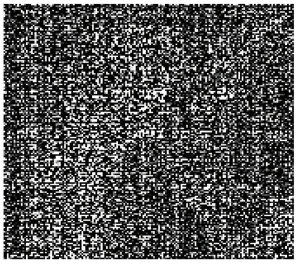
(d) Y 分量变换域系数末被量化的结果



(e)Y 分量变换域系数末被量化的结果



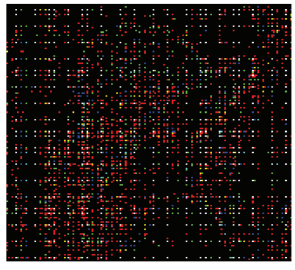
(f) 量化后重建的特征图像 (512×512)



(g) Y 分量变换域系数末被量化的结果



(h)Y 分量变换域系数末被量化的结果



(i) 量化后重建的特征图像 (512×512)

图 7　结合人眼视觉特性模型对三幅图像量化的实验结果

Fig. 7　Experimental results of three images being quantized based on the model of human visual system characteristics

从图 7 的量化结果上看，量化后的有效数据(亮点)明显减少，零值系数明显增多，则采用霍夫曼编码时平均码长必然会减小，则图像数据容量必将会减小。特别是在 Cara 图像中，表现更为明显。

4.2.2 客观评价

从客观上，为了更好地说明编码质量和压缩图像质量，计算了 3 幅彩色图像和各分量图的压缩比、PSNR 和 SSIM 值。分别记为 PSNR_Y、PSNR_Cr、PSNR_Cb、PSNR_YCC、PSNR_RGB 和 SSIM_Y、SSIM_Cr、SSIM_Cb、SSIM_YCC、SSIM_RGB。对于 PSNR，其值越大，表明两图像越相似，差异越小；考虑人眼视觉效果，一般当 PSNR 值超过 30 db 时，人眼几乎不能分辨其差异，表明效果较好。对于 SSIM，其归一化值越大，表明两图像越相似，差异越小。计算结果如表 2 和图 8、图 9。

表 2 三幅彩色图和各分量图的压缩比计算结果

Tab. 2 Calculation results of compression ratio for three color images and each component images

参数类别		Y 分量压缩比	Cr 分量压缩比	Cb 分量压缩比	彩色图像压缩比
Cara	CSF 压缩	41.449 3	121.092 1	141.944 8	75.842 3
	JPEG	36.071 4	110.453 9	108.660 8	67.341 7
Pepper	CSF 压缩	22.189 0	38.548 4	47.863 6	32.436 7
	JPEG	21.708 0	39.353 0	40.266 8	29.278 8
Lena	CSF 压缩	22.147 2	48.152 7	61.213 8	33.762 7
	JPEG	21.435 6	47.315 7	53.457 2	31.102 9

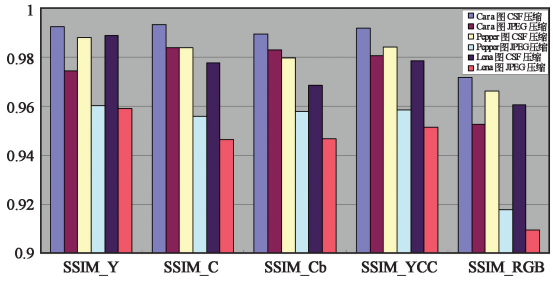


图 8 表 2 中各种压缩比下计算的 SSIM 值

Fig. 8 Calculated SSIM values under the compression ratio in Table 2

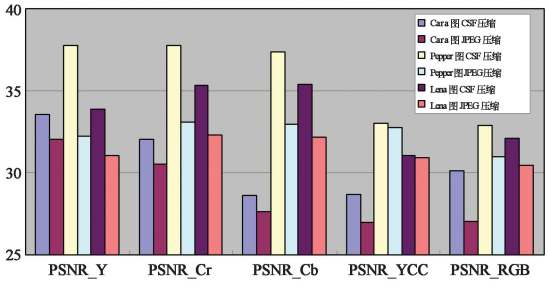


图 9 表 2 中各种压缩比下计算的 PSNR(db)值

Fig. 9 Calculated PSNR values under the compression ratio in Table 2

通过对比分析图 8、9 和表 2 中的结果可知：文中提出的图像压缩算法与 JPEG 技术相比，三分量图和彩色图的压缩比、PSNR 和 SSIM 值均有较大的提高，依次提高的幅度平均为：10.480 7%、6.987 9%和 2.649 4%。表明本文提出的结合人眼视觉特性的图像压缩算法，无论从编码质量上，还是从压缩图像质量上，均有一定程度的提高。

为了比较两种算法的复杂性，采用 MATLAB 编程分别对 3 幅图像进行压缩实验，测量两种算法的运行时间。3 幅彩色图像及其三分量经本文提出的算法和 JPEG 算法压缩运行的平均时间分别为 1.280 0，0.578 0，0.470 0，0.493 0 s 和 1.094 0，0.514 0，0.415 0，0.437 0 s。实验结果表明，两算法的运行时间比较接近，JPEG 算法稍快，则两算法的复杂度比较接近。

5 结 论

本文提出了一种基于人眼对比度敏感视觉特性的图像压缩算法，该算法在以下两个方面有所改进和突破：(1)结合人眼视觉特性模型和图像变换域频谱系数特征，提出了一种图像的角频率的计算方法，并依此计算得出了人眼觉察图像最小

误差阈值(JND 阈值);(2)提出了一种以 JND 阈值为量化步长的量化方法,并对图像变换域频谱系数进行了量化和编码压缩,且对 3 幅不同的彩色图像进行了仿真实验。实验结果表明:与 JPEG 技术相比,3 幅彩色图和各分量图的平均压缩比、PSNR 和 SSIM 依次提高了 10.4807%、6.9879%和 2.6494%。表明提出的结合人眼视觉特性的图像压缩算法是一种较好的、有实用价值的压缩方法。对于结合人眼视觉特性的图像压缩技术的研究,随着人眼视觉特性的不断深入,图像数据的量化方法和编码算法会得到不断更新、改进,图像压缩的效果会越来越适合于人眼观察的需要,从而更好地满足海量信息存储、传输和处理的需要。

参 考 文 献:

[1] 李昌国,郭科.应用自适应预测器排序的三阶预测高光谱图像无损压缩[J].光学 精密工程,2014,22(3):760-769.
LI C G, GUO K. Lossless compression of hyperspectral images using three-stage prediction based on adaptive predictor reordering [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(3): 760-769. (in Chinese)

[2] WATSON A B. Visual optimization of DCT quantization matrices for individual images [C]//*Proceedings of AIAA 9th Computing in Aerospace Conference*, San Diego, CA, U. S. A: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993: 286-291

[3] 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.

[4] BHATT A, ASHUTOSH D, BHATT K. Image compression algorithms under JPEG with lapped orthogonal transform and discrete cosine transformation [J]. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2013, 7(3): 6-10.

[5] 酉霞,陈菲,贾小林,等.字典学习中字典尺度对 DICOM 图像压缩的影响[J].液晶与显示,2015,30(6):1045-1051.
YOU X, CHEN F, JIA X L, *et al*. Effects of dictionary scale on dictionary learning for DICOM image compression [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(6): 1045-1051. (in Chinese)

[6] DOUAK F, BENZID R, BENOUDJIT N. Color image compression algorithm based on the DCT transform combined to an adaptive block scanning [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2011, 65(1): 16-26.

[7] WANG X, JIANG G Y, Zhou J M, *et al*. Visibility threshold of compressed stereoscopic image: effects of asymmetrical coding [J]. *Journal of Imaging Science*, 2013, 61(2): 172-182.

[8] LU Z K, LIN W, YANG X, *et al*. Modeling visual attention's modulatory after effects on visual sensitivity and quality evaluation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(11): 1928-1942.

[9] ERNAWAN F, ABU N A, SURYANA N. An optimal tchebichef moment quantization using psychovisual threshold for image compression [J]. *Advanced Science Letters*, 2014, 20(1): 70-74.

[10] ZHANG Y F, CAO H H, JIANG H X, *et al*. Visual distortion sensitivity modeling for spatially adaptive quantization in remote sensing image compression [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(4): 723-727.

[11] MARQUES O G E. 实用 MATLAB 图像和视频处理[M].章毓晋,译.北京:清华大学出版社,2013.
MARQUES O G E. *Pratical Image and Video Processing Using MATLAB* [M]. ZHANG Y J, Trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)

[12] 王宇庆,王索建.红外与可见光融合图像的质量评价[J].中国光学,2014,7(3):396-401.
WANG Y Q, WANG S J. Quality assessment method of IR and visible fusion image [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 396-401. (in Chinese)

[13] DAI W R, XIONG H K, WANG J, *et al*. Large discriminative structured set prediction modeling with max-margin Markov network for lossless image coding [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(2): 541-554.

[14] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al*. Image quality assessment: from error visibility to structural simi-

larity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.

[15] 卫沛锋,刘欣悦,林旭东,等.自适应光学系统校正后实际分辨率评价指标[J].中国光学,2014,7(4):672-678.
WEI P F, LIU X Y, LIN X D, *et al*. Evaluation index of the actual resolution after correction of adaptive optical system [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 672-678. (in Chinese)

[16] NADENAU M. Integration of human color vision models into high quality image compression [D]. Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000.

[17] 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(1): 381-400.

[18] WU J J, LIN W S, SHI G M. Image quality assessment with degradation on spatial structure [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, 21(4): 437-440.

作者简介:姚军财(1979—),男,汉族,湖北黄冈人,硕士,副教授,主要研究方向为颜色科学和图像技术。
E-mail: yjc4782@126.com