

# 基于人类视觉特性的医学图象压缩模型

顾逵迤 高 见 鲍旭东

(东南大学生物科学与医学工程系, 南京 210096)

**摘 要** 结合人类视觉生理结构, 以对比度感知特性作为人类视觉系统(HVS)中的主要研究议题, 讨论了HVS模型中的设计要点, 并在小波变换的多分辨率分析的基础上将包含CSF特点的HVS应用在图象的内部去相关变换和量化过程中, 得到一个新的基于人类视觉特点的医学图象压缩模型. 通过对CT、MRI图象进行实验表明, 在相同的客观条件控制下, 该方法能够取得较好的主观视觉质量. 在视觉无损即保留几乎所有医学相关信息的条件下, 压缩率可以达到16:1, 一些应用场合可以达到80:1.

**关键词** 医学影像学(320·1140) 图象压缩 小波变换 人类视觉系统 主观质量评估 对比度敏感函数

**中图分类号**: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)10-1189-07

## A Model of Medical Image Compression Based on Human Vision System

GU Wei-yi, GAO Jian, BAO Xu-dong

(Department of Biology and Medical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract** With the promotion and application of digital imaging technology in the medical domain, the amount of medical images grows rapidly. However, the commonly used compression methods cannot acquire satisfying results. Recently, some researchers proposed human vision system (HVS) in the research of image compression. It can visually remove the information in most degree that human vision cannot preserve. In this paper, according to the existed and stated experiments and conclusions, the physical and anatomic structure of human vision is combined and the contrast sensitivity function (CSF) is introduced as the main research issue in HVS, and then the main designing points of HVS model are presented. On the basis of multi-resolution analyses of wavelet transform, the paper applies HVS including the CSF characteristics to the inner correlation-removed transform and quantization in image and proposes a new HVS-based medical image compression model. The experiments are done on the medical images including CT and MRI. The results show that under common objective conditions, the method used in the paper can achieve better subjective visual quality. The compression ratio can reach 16:1 if the visually lossless effect is required, i. e., almost all relevant medical information is reserved. In some occasions, the ratio even reaches 80:1.

**Keywords** Medical image, Image compression, Wavelet transform, Human vision system, Subjective quality evaluation, Contrast sensitivity function

## 0 引 言

医学成像技术和设备的出现与不断完善使得医学影像在现今的临床诊断中显得越来越重要, 同时也为医学影像的存取、管理、传输、处理及定量评价带来极大的便利. 然而, 医学影像的数量及增长速度十分惊人, 特别是IMCS(图象管理与通讯系统)/

PACS(图象存取与通讯系统)与Telemedicine(远程医疗技术)的出现, 使海量的数字医学影像在存储与传输上均构成了十分严重的问题. 为此, 数字医学影像的压缩方法得到广泛的研究.

由于医学图象本身的特点以及其特殊应用场合, 无损压缩方法使用较多. 但以信息论为基础的无损医学影像压缩技术已达到了性能的极限, 压缩比十分有限. 新近的工作也都只是从编码的角度寻求

某种条件假设下的优化,所以缺乏广泛的应用意义。

相关研究表明,人的视觉感知特点与统计意义上的信息分布并不一致,即有些视觉信息在通常的视觉过程中相对来说不那么重要,从感知的角度来讲可以认为是心理视觉的冗余。传统的编码技术局限于图象自身的统计特性和结构及对信源本身的压缩,而较少考虑压缩信源中对于观察者而言的心理冗余,也就是忽略了主观对象——人类视觉系统在观察图象时所表现出的特性及其内在的处理图象的机制。因此在新的图象压缩技术中,有学者提出了人类视觉系统的概念。它从视觉本能上最大限度地去除人类视觉所无法感知的信息,可以获得更高更理想的压缩效果,并且达到有损医学图象压缩所要求的“视觉无损”与“信息保持”的一致。

## 1 人类视觉特性的研究

### 1.1 生物的视觉通路

人类视觉是一个复杂的生理与心理过程<sup>[1]</sup>。由生理解剖学知,外界光线通过角膜、虹膜、晶状体聚焦在视网膜上。其上的感光细胞感受光刺激后发出神经脉冲信号,经过视交叉部分交换神经纤维后,形成视束,传递到视神经中枢的许多部位,其中包括脑的外膝状体或外膝状核(LGN)、四叠体上丘(SC)、顶盖前区(AP)和视皮层(VC)等,并最终形成视觉。

视觉受到大脑选择性注意机制的控制,其选择性与图象结构的特性有很大关系。人眼对变化平坦的区域和空间频率相似的纹理区域在视觉上很不敏感,所以相应的信息很容易被人忽视;而变化幅度较大,细节丰富的区域却容易引起人眼的注意。这种选择性使视觉只限定在有限的目标上,避免了过多精力的浪费,并在一定程度上起着信息压缩的作用。此外,人在观察图象时总是寻找某些比较明显的目标特征,而不是定量地分析图象中每个像素。特征找出以后人脑再对其进行分析并结合先验知识来完成对图象的理解过程。

### 1.2 人类视觉特性

视觉是人类最奇妙同时也是最难以描述的功能之一。人类视觉系统(HVS)从数学模型的角度模拟了视觉感知的三大特性:幅度非线性衰减、二维视觉空间调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)和视觉多通道及掩盖效应,它们是与图象质量相关的主要特性。

#### (1)对比度感知

根据对HVS的研究可知,人类视觉系统对不同时空分布特征的响应是不同的,通常人眼对高于一定频率的高频信息敏感程度低于相对较低频率的信息;而且方向不同,敏感程度也不一样,尤其对倾斜方向的刺激不太敏感。同时人眼在不同背景亮度和不同边缘变化程度的情况下对误差的敏感程度也不相同。

人眼能够感觉到的灰度的变化 $\Delta L$ 同给定的原有背景灰度 $L$ 之比在很大范围内为一常数 $K$ (韦伯常数),即Weber-Fechner定律。这种可觉察出来的最小变化量叫做差别感觉阈值,也称为最小感知差,即JND(Just Noticeable Difference)。实验证明,人类视觉在背景灰度很低和很高的时候有较弱的感知能力,而在中等灰度范围内有较高的敏感度,即JND的值较小。

实际的图象中,总是含有很多的边缘和形状等细节信息,因此,有必要从图象空间频率的特性上来讨论视觉对此的感知情况。这就涉及到HVS的一个重要的视觉性质即对比度敏感函数(CSF),或称为视觉系统的空间调制传递函数(MTF)。CSF描述了HVS中不同频率下的对比敏感度,由于其数据无法直接测定,实验中常采用心理物理学测定阈值的方法来确定CSF在不同频率时的数据,然后将实验得到的阈值取倒数来得到。不同实验所得的CSF虽略有不同,但函数形式基本一致。目前有很多种不同的对比度定义<sup>[2]</sup>,其中最基本的一种定义是针对明视度模型的。在这种对比度定义下,采用模型<sup>[4]</sup>

$$H(f) = 2.6(0.192 + 0.114f) \exp[-(0.114f)^{1.1}]$$

其中,空间频率 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ ,单位是周期/度(cpd), $f_x, f_y$ 分别是水平和垂直频率。二维空间的CSF曲面如图1所示。从图中可以看出明视度的敏感性曲线在中频区域表现出较为敏感的特性,随着频率的增加,敏感度曲线陡峭下降,在低频区域,敏感度也有所下降。从整体看CSF具有带通滤波器的性质,对较低和较高频率不是十分敏感。

#### (2)多通道结构

经研究发现,视觉皮层细胞的响应在频域内呈带通特性,并已得到了敏感度峰值的位置和响应带宽。由此可见,人的视觉特性能够将独立的视觉机制综合起来,故可针对各种视觉机制的敏感频带用一滤波器组来进行模拟。滤波器组将可见的视觉激励

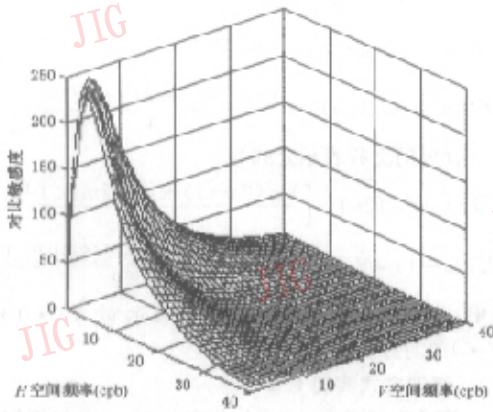


图 1 二维空间 CSF 曲面

分解为一组各个方向、空间频率和时间频率带宽均有限的子带信号,这种有限带宽信号即称为通道。在多数情况下,可将通道看成是彼此独立的,但一些研究者认为,通道之间也存在着相互作用。

### (3) 掩蔽效应

CSF 解释了对单一激励的感知情况。当几个激励同时存在时,激励间就会产生相互作用,一个激励的存在将导致另一激励测定阈值的改变,这种现象称为掩蔽效应。其原因被认为和人类视觉系统对于不同视觉通道的并行处理有关,这些通道根据频率和方向的不同而不同。例如对观察者的测试数据表明,背景信号对比度值越高,目标信号的可见阈值越高,这一点在目标和背景信号的频率成分、空间方向相近时更加明显。当前很多模型都是阐述如何合理地把不同通道上的信息复合在一起。仅考虑一个通道掩蔽效应的模型称为通道内模型,综合多个通道掩蔽效应的模型则称为多通道模型。由于通常只考虑在同一通道内包含两个激励时的情形,因此掩蔽效应可看作是一个非线性变换器。

## 2 小波变换和图象质量评估

近年来 JPEG、MPEG、零树、子带变换等图象压缩编码方案从以往的单纯注重码率转为现在的寻求压缩比、码率和图象质量之间的折衷。与此同时,图象压缩的主观质量评估方法也从以往物理学意义上的随机误差统计方法(如均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)和加权均方误差(WMSE)等)转向结合人视觉感知特性的误差统计方法。前者易于使

用和描述,一致性好,但是,在相同的误差测量下,这些评价结果和人类视觉的主观观察结果有很大的差别;而后者考虑了人的视觉感知特性,能有效地反映出图象在视觉感知上的失真,更利于图象压缩编码算法的设计与优化。

另一方面,医学图象由具有方向性的多分辨、多尺度的结构与纹理构成,与人类视觉系统(HVS)的信息处理过程一致。一般地,纹理与结构具有窄带性质,由突出的谱成分体现。由此,压缩应当尽可能地保存方向、分辨率、尺度的细节。为此可以合理地将图象分解为方向的集合,并将这些集合表达为足够精细的多分辨、多尺度来实现。在消除冗余后,重建的图象可以最大程度地保持原图象中对视觉有用的信息,可见小波变换是拟合 HVS 非常合适的数学工具。图象经过小波变换后所得到的子带与 HVS 特性十分吻合,在图象编码中利用人眼的这些效应,可以在主观感觉图象失真相同的条件下,允许更大的实际失真,再由 Shannon 率失真理论,可使得码率更低而图象的主观质量保持不变。

由于人类视觉系统的生理及心理的复杂性,目前没有也不可能得出比较精确、统一的解析表达式和较好的系统方案。根据对频率的敏感函数和对具有可变背景对比度的敏感函数来模拟人眼的视觉生理特性并构造相应的 HVS 模型,属于一种作用于变换系数的匹配视觉系统的方法。

## 3 基于 HVS 的图象压缩系统框架

### 3.1 采用 HVS 模型的空间变换

编码器和解码器的选择对于 HVS 系统的性能和效应有很大的影响<sup>[4]</sup>,因此需要对其进行权衡和调整以获得更好的结果。离散余弦变换(DCT)后数据分布较为简单,是一些二维平面上网格点数据。离散小波变换(DWT)后的各子带在相应空间分布和内容上非常相似,可以用树这一数据结构来描述。与 HVS 系统结合起来,DWT 较之 DCT 的优点在于:

首先,从心理物理学的研究来看,HVS 和一些感知通道有关,覆盖了一定的空间频率范围。从一个倍频程(Octave)到下一个倍频程,总和区是按照 2 倍的因子增加的。这种特性正好完全可以用二进小波的离散分解来实现。

其次,和 DCT 变换相比,小波分解后的子带同时保留了信号空间域和频率域上的信息。这一点是

非常有用的,因为掩蔽效应的实现必须建立在空间域分析的基础之上.而 DCT 只能获得纯频率信息,所以在 DCT 中,局部空间特征只有通过将图象划分为编子块后获得,空间信息限制在“块”的范围内.同时 DCT 还因分块处理、线性滤波等存在着方块效应 (Blocking Effect) 和振铃效应 (Ringing Effect),使编码效率受到限制.借助于小波变换后,图象信号可以被分解成一定数目具有不同空间分辨率、频率特性和方向特性的子图象信号,实现不同频带信号的同时处理,有效地克服 DCT 方法的固有缺陷.小波系数间的自相似性也使得小波变换能更好地匹配 HVS,所以 DWT 已成为当前波形编码方法和多分辨率、多码率传输方案的主要研究方向.

基于 DWT 变换的压缩技术及后期编码技术已出现了很多种,早期最有代表性的是 Shapiro 提出的用嵌入式的小波零树 (EZW) 来表示图象经过小波变换后小波系数间的关系. Said 提出的层次树分割集 (SPIHT) 算法使用若干个列表来描述小波系数内部的层次相关性. SPIHT 算法的基点是使均方误差 (MSE) 最小,然而 MSE 准则却无法准确衡量图象的主观质量.层次零树编码 (LZC) 是第一个使用基于内容的算术编码器来高效地对小波系数进行编码的方法.它最终发展成为带有优化截断的嵌入式块编码算法 (EBCOT) 并且使用在了 JPEG2000 标准中.

单纯地采用小波变换的编码不能很好地利用小波分解后的系数分布,而采用 HVS 模型尤其是 CSF 的特性之后,加入了人眼视觉对图象的感知特点,可以进一步得到更好的图象主观效果.在基于 DWT 的变换中, Lai 曾经给出了一个基于他自己创建的根据一个心理物理学实验所产生的 HVS 模型实现编解码<sup>[5]</sup>.但是他使用的是 Harr 小波,因此压缩的性能比较低. Nadenau 和 Reichel 也给出了一个采用 CSF 的新的编解码器<sup>[6,7]</sup>,和 Baseline JPEG 相比,其可以提高 23% 的视觉性能增益.

### 3.2 DWT 滤波器的选择

直接用小波的多分辨率分解来多级传输图象,在实现上比较简单,但是由于图象内容的多样性,不可能取得满意的效果.在该系统中使用两组小波变换的滤波器组方案,一种是不可逆的有损变换,属于基于浮点数的滤波方式,使用的是 Daubechies 9/7 对称滤波器组<sup>[8]</sup>;另一种是基于上移方式的 (5,3) 整型小波<sup>[9]</sup>,它是一种可逆变换.上移方式实现公式中

分析的上移表示如下

$$Y(2n+1) = X_{\text{ext}}(2n+1) - \left[ \frac{X_{\text{ext}}(2n) + X_{\text{ext}}(2n+2)}{2} \right]$$

$$Y(2n) = X_{\text{ext}}(2n) + \left[ \frac{Y(2n-1) + Y(2n+1) + 2}{4} \right]$$

合成的上移表示公式为

$$X(2n) = Y_{\text{ext}}(2n) - \left[ \frac{Y_{\text{ext}}(2n-1) + Y_{\text{ext}}(2n+1) + 2}{4} \right]$$

$$X(2n+1) = Y_{\text{ext}}(2n+1) + \left[ \frac{X(2n) + X(2n+2)}{2} \right]$$

其中,  $X_{\text{ext}}(\cdot)$  和  $Y_{\text{ext}}(\cdot)$  分别表示对  $X(\cdot)$  和  $Y(\cdot)$  的对称周期延拓.

### 3.3 滤波方式实现 CSF

在图象压缩中,归一化数字频率  $f_n$  常用周期/像素 (cpp) 表示,为了将其应用到 CSF 中,可以通过下面的关系将数字频率  $f_n$  转换为视觉激励信号的空间频率  $f$  表示

$$f = f_n \cdot f_s$$

$f$  同时由观测条件 (最大显示分辨率和观测距离) 和小波分解级数确定.如果显示分辨率为  $r$  pixels/m, 观测距离为  $v$  m, 则空间采样频率  $f_s$  可由下列公式给出

$$f_s = 2vr \tan\left(\frac{\pi}{180} \cdot \frac{1}{2}\right)$$

如果信号以 Nyquist 率采样,即  $f_n = 0.5$  cpp, 则信号的最大频率可表示为  $f_{\text{max}} = 0.5 f_s$  cpd.

通常所使用的实现 HVS 的方法是在子带内指定固定的由 CSF 得到的加权因子,但这种方法较为粗糙,不适合某些局部的信号特征.滤波方式在 FIR 滤波器的精度范围内能够更准确地匹配 CSF 的特性和形状.而且,在小波分解的多子带系数分布中可以有更好的方向适应性.

由于图象的二维小波变换实际中也可转换为对行和列的一维变换,所以以一维分解过程为例说明滤波法的实现过程.如图 2 所示.

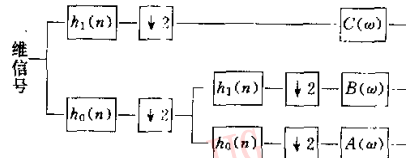


图 2 一维信号的小波滤波实现

首先,输入一维信号至分析滤波器的高通和低频滤波器中.经过高通滤波器  $h_1(n)$  和下采样过程后,将信号送至 CSF 函数的子部分  $C(\omega)$ ,而  $C(\omega)$

可以看作是一个高通滤波器函数. 同样, 经过第 1 级分解和下采样之后的子信号, 经过第 2 级的分解滤波和下采样, 也同样要作用于 CSF 函数的中频段  $B(\omega)$  和低频段  $A(\omega)$  部分.  $B(\omega)$  和  $A(\omega)$  分别具有带通和低音特性.

假设定义 CSF 特性曲线的函数为  $W(f)$ , 给定的空间频率为  $f$ , 它必须先适当经过尺度变换到相应的下采样之后的频率空间中, 令  $\omega_l$  为对应的  $l$  级分解的子带频率, 单位为弧度, 取值范围为  $[-\pi, \pi]$ . HVS 在该尺度下的滤波器传递函数为  $T_{bl}(\omega_l)$ , 可以得到

$$T_{bl}(\omega_l) = \begin{cases} W\left(\frac{|\omega_l|}{\pi} f_A(l)\right) \\ W\left(f_B(l) - \frac{|\omega_l|}{\pi} [f_B(l) - f_A(l)]\right) \\ W\left(\frac{|\omega_l|}{\pi} 2^{-l}\right) & b=L \\ W\left[\left(2 - \frac{|\omega_l|}{\pi}\right) 2^{-l}\right] & b=H \end{cases}$$

其中,  $f_A(l) = 2^{-l} f_{max}$ ,  $f_B(l) = 2f_A(l)$ , 都是划分子带区间的端点.  $T_{bl}(\omega_l)$  通过一个水平频率  $\omega_{hl}$  和垂直频率  $\omega_{vl}$  可以扩展成为二维通带传递函数  $T_{\Psi b}(\omega_{hl}\omega_{vl})$ .

$$T_{\Psi b}(\omega_{hl}\omega_{vl}) = \begin{cases} T_{Ll}(\omega_{hl}) \cdot T_{Ll}(\omega_{vl}) & \Psi = 0 \\ T_{Hl}(\omega_{hl}) \cdot T_{Ll}(\omega_{vl}) & \Psi = 1 \\ T_{Ll}(\omega_{hl}) \cdot T_{Hl}(\omega_{vl}) & \Psi = 2 \\ T_{Hl}(\omega_{hl}) \cdot T_{Hl}(\omega_{vl}) & \Psi = 3 \end{cases}$$

这里的  $\Psi$  代表子带的 4 个方向.

FIR 滤波器系数由  $T_{bl}(\omega_l)$  的 Fourier 级数展开得到, 由于其偶对称, 所以可近似表达成

$$T_{bl}(\omega_l) = d_0 + 2 \sum_{k=1}^L d_k \cos(k\omega_l)$$

其中,

$$d_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} T_{bl}(\omega_l) d\omega_l$$

$$d_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} T_{bl}(\omega_l) \cos(k\omega_l) d\omega_l$$

所以, HVS 滤波实现方式下长度为  $2L+1$  的 FIR 滤波器的冲击响应系数为  $[d_L, \dots, d_1, d_0, d_1, \dots, d_L]$ , 考虑到重建后的误差,  $L$  一般取 2~5 就足够了.

### 3.4 系数编码模型

在滤波法中应用小波变换作为前期的去相关变换方法. 在小波变换系数经过 HVS 中的 CSF 函数滤波之后, 系数的编码则使用了 JPEG2000 位面的编码模型<sup>[10]</sup>, 它实际上是一种改进的二进制的算术编码, 可以将压缩比提高 5%~8%.

在 JPEG2000 位面的编码中, 每一个位面通过扫描分为 3 个通带, 分别是 Significance 通带、Refinement 通带和 Cleanup 通带. 每一个通带对代码块(Code-Block)的扫描顺序都是一致的. 对于每一个通带, 通过扫描后的结果都是一系列的代码符号(Symbol), 这些代码符号使用一种基于上下文的自适应算术编码方法<sup>[11]</sup>.

## 4 实验结果和讨论

图 3 给出了对 Lena 图象的实验结果. 针对基于 DICOM 协议的完整序列图象中的单帧图象, 做了一些实验, 结果如图 4、图 5 所示. 实验结果表明, 在相同的客观条件控制下(如压缩比, 最大信噪比等)本文的方法能够取得较好的主观视觉质量. 对于 CT 和 MRI 两类医学图象, 当压缩比为 16:1 时, 重建图象没有视觉上的损失或者说保留了可信度达 99% 的重要的医学相关信息, 尽管有时以 80:1 压缩的图象在临床诊断应用上也能够接受. PSNR 与比特率的关系如图 6 所示.

需要指出的是, 虽然本文在压缩中采用了 HVS 模型, 但是由于人类视觉的很多特性还没有被了解



(a) 原图

(b) 比特率 1.5 bps  
(PSNR=40.78dB)

(c) 比特率 1.0 bps  
(PSNR=38.98dB)

(d) 比特率 0.5 bps  
(PSNR=36.04dB)

图 3 512×512×16M 的 Lena 图

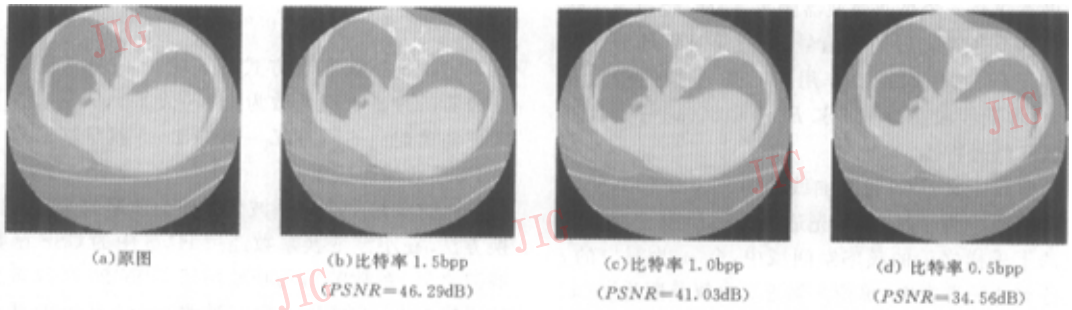


图4 256×256×16M的CT图

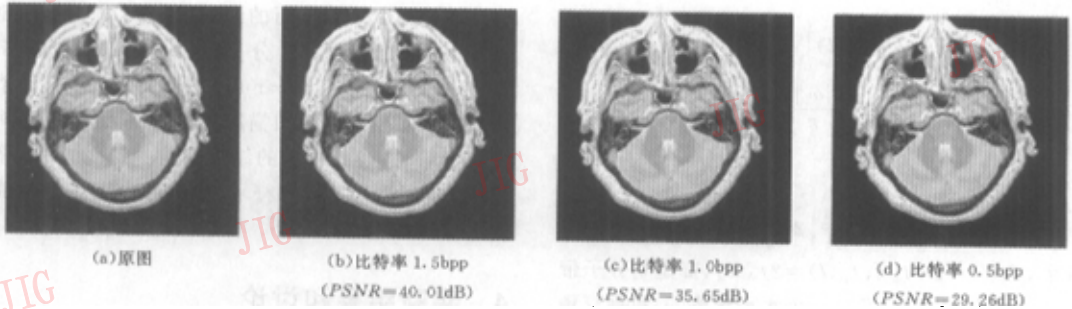


图5 256×256×16M的MRI图

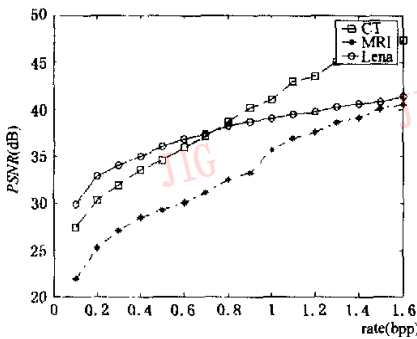


图6 峰值信噪比与比特率的关系图

清楚,完整地表达出和HVS模型对应的图象质量的主观评价模型还比较困难.所以仍然采用了常用的客观评价方法.传统的图象质量测定方法(诸如MSE,PSNR等),虽然易于使用和描述,但并不能完全和人类视觉特性相适应.在有些情况下这些评价结果和人类视觉的主观观察结果有较大的差别<sup>[12]</sup>.

### 5 结 语

在人和外界交流的过程中,所有的图象信息都

要通过视觉来感知、获取.因此,研究人眼的视觉特性,对图象处理有重要的理论和现实意义.

本文分析了人类视觉的特性要素,从而设计了一个HVS的医学压缩模型.侧重于对CSF函数的研究和认识,并且将之应用在了医学图象的渐进传输和压缩应用上.它匹配了人类视觉特性,可以在使用相同的比特率的条件下,达到更佳的主观视觉质量效果.

目前我们主要还是针对单帧医学图象来设计模型进行图象压缩的,希望将来能够在人类视觉特性基础上找出应用于医学图象序列联合压缩处理的一些方法.所以,挖掘人类视觉的时间效应、掩蔽效应是下一步工作的重点.

此外,本文讨论的图象都是医学图象中的灰度图象.只是根据不同的成像设备和对图象分辨率的要求不同而有不同的灰度级别.对医学成像领域中的脑功能图象、彩色超声图象等并未做讨论.因此研究色彩视觉特性及其在医学图象压缩中的应用也是今后的一个研究方向.

### 参 考 文 献

1 白净.生理系统的仿真与建模[M].北京:清华大学出版社,

- 1994.
- 2 Nadenau M J. Integration of Human Color Vision System model into high quality image compression [D]. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), 2000:21~32.
  - 3 Mannos J L, Sakrison D J. The Effects of a Visual Fidelity Criterion on the Encoding of Images [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(3): 525~536.
  - 4 高见. 第二代图像压缩理论的研究及其在医学图像领域中的应用[D]. 南京:东南大学生物医学工程系,2002.
  - 5 Lai Y K, Kuo C J. Wavelet image compression with optimized perceptual quality [A]. In: Conference on Applications of Digital Image Processing XXI, SPIE's Annual Meeting [C]. San Diego, CA, 1998(3460), 44~49.
  - 6 Nadenau M J and Reichel J. Compression of color images with wavelets under consideration of the HVS [A]. In: Proceeding of SPIE Human Vision and Electronic Imaging [C]. San Jose, CA, 1999; (3644): 24~29.
  - 7 Nadenau M J and Reichel J. Wavelet compression of color images with reference to the HVS [J]. Electronic Newsletters, 1999, 02(5): 6~10.
  - 8 Charilaos Christopoulos. The JPEG2000 Still Image Coding System: An Overview [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46(4): 1103~1127.
  - 9 Diego Santa Cruz, Touradj Ebrahimi. A study of JPEG2000 still image coding versus other standards [A]. In: Proceedings of the European Signal Processing Conference [C]. Tampere, Finland, 2000; 673~676.
  - 10 ISO/IEC FCD15444-1. Image Technology-JPEG2000 Image Coding System Part-1[S].
  - 11 ISO/IEC 14492-1. Lossy/Lossless Coding of Bi-level Images [S].
  - 12 Marmolin H. Subjective MSE measurements [J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1986, 16(3): 486~489.



**顾逵迤** 1977年生,1996年获东南大学生物医学工程系学士学位。现为东南大学生物医学工程系硕士研究生,研究方向为图象压缩、图象数据库、多媒体检索等。

**高见** 2002年获东南大学生物医学工程系硕士学位,研究方向为图象压缩与传输。



**鲍旭东** 1963年生,1986年获东南大学工学硕士学位,现为东南大学生物医学工程系副教授,硕士生导师。主要研究领域为放疗计划系统、图象识别与配准、医学图象分析等,主持完成或参加各类研究项目近20项。