

一种图象质量的感知测量方法

周建鹏 杨义先

(北京邮电大学信息工程系 145#, 北京 100088)

摘要 基于人的视觉特性提出了一种图象质量的感知测量方法。此方法考虑了人的视觉所具有的亮度屏蔽和空间频率屏蔽特性。实验表明用此测量方法对图象进行质量测量获得的结果与图象的直观质量相一致。

关键词 视觉屏蔽, 质量测量, 图象处理

1 引言

图象压缩是多媒体技术中的关键环节, 高压缩比和高图象质量是图象压缩的主观目标。高压缩比一定带来图象质量的损失, 如何评定压缩后重建图象的质量是人们所关心的问题。图象质量的评定有客观测量和主观评价两种方法。主观评价方法是观察者根据一些事先规定的评价尺度或自己的经验, 对被评价图象提出质量判断, 并给出质量分数, 对所有观察者给出的分数进行加权平均, 所得的结果为图象的主观判断。这种测量方法虽然较好地反映了图象的直观质量, 但是无法应用数学模型进行表达, 因而无法应用于图象的压缩编码算法中。现在广泛采用的客观测量方法是用图象的均方误差(MSE)来表示图象的质量好坏, 现在的很多编码方法都是基于MSE的最小值进行的。然而均方误差不能很好地反映图象的直观质量, 例如如果图象的灰度值都减去某一固定值, 即使图象的基底亮度变小, 这样获得的图象直观质量很好, 但是图象的MSE值却很大。因此寻找一个能和图象直观质量相匹配的客观测量方法对研究图象压缩编码方法非常重要。

利用人的视觉特性(HVS)对图象进行编码能够改变图象质量^[1]。这启示人们进行感知测量方法的研究, 现在研究也正是基于HVS模型进行的^[2~4]。文献[5]对14种图象质量测量方法进行比

较, 发现基于HVS模型的测量方法优于没有考虑人的视觉特性的测量方法。由于到现在为止还没有一个统一的HVS模型表达式, 因此现在的研究基本上都是开发HVS模型, 而且大部分都是在频域内进行的。现在的研究给出的图象质量测量方法的基本框架为: 首先对图象进行子带分解, 将图象分解成不同频带的频率成分, 然后对这些频率成分进行屏蔽。他们的理论根据是人的视觉系统呈现多频道性^[6]。这种做法的缺陷为: (1) 算法的复杂度高, 计算时间长, 因为图象的子带分解将增加算法的运算量。(2) 图象频域成分的变化不能真正反映时域象素的变化, 因为变换后的每一个系数是在给定区域内所有象素和滤波器相卷积的结果。这使得在变换域内进行的屏蔽不能很好地反映到时域中去, 也就不能很好地反映人的视觉特性。这就是基于变换域屏蔽的图象质量测量方法和直观质量测量存在较大偏离的原因。文献[5]中给出的最好算法是在DCT变换域进行的, 我们对此算法进行实验发现基于DCT变换域屏蔽的算法同样存在上述缺陷。本文根据人的视觉特性, 在时域内对象素误差进行屏蔽, 提出了一种图象质量的感知测量方法。实验表明此算法能较好地匹配图象的直观质量。

2 感知测量模型

图象的客观损失对人的视觉影响是由人的视觉

系统的灵敏度决定的。现代视觉生理学的研究表明人的视觉系统的灵敏度是由人的视觉细胞来决定的，产生亮度视觉效应的细胞是锥状细胞和杆状细胞。锥状细胞是在正常和较大亮度情况下工作，产生明视觉；杆状细胞是在低亮度情况下工作，产生暗视觉^[7]。人们常用图象对比度来表示图象中亮暗差异大小，相对对比度 C_R 定义为：

$$C_R = \frac{L_M - L}{L} = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

其中 L 为背景亮度， L_M 为图象亮度。人眼刚能分辨的亮度差异所对应的最小相对对比度数值称为图象的对比灵敏度，我们用 C_{min} 表示。图象的对比灵敏度大小与背景亮度 L 和环境亮度 L_0 有关。我们在此仅对背景亮度 L 等于环境亮度 L_0 的图象进行研究。当 $L=L_0$ 时，图象的对比灵敏度 C_{min} 与图象基底亮度 L 的关系为图 1^[7]。

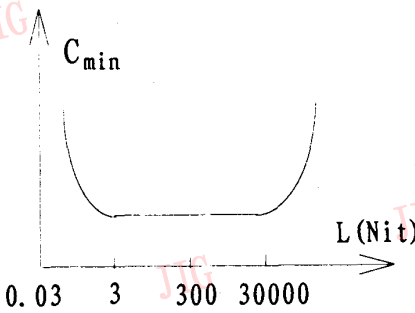


图 1 对比灵敏度与基底亮度的关系
Fig. 1 The relationship between contrast sensitivity and background luminance

由图 1 可知，在宽阔的常用背景亮度变化范围内，人眼的对比灵敏度为常数。当背景亮度 L 较强或较弱时，人眼的对比灵敏度增大，则人眼分辨亮度差异的能力下降。由对比灵敏度的定义可知，只有当 $\frac{\Delta L}{L} > C_{min}$ 时，人眼才能感觉出亮度的变化。定义均匀照度背景上光点面积为 A ，则 A, L, C_{min} 满足视觉锐度曲线方程：

$$ALC_{min}^2 = K \quad (2)$$

其中 K 为常数。由式(2)得：

$$C_{min} = \sqrt{\frac{K}{AL}} = \frac{K_1}{\sqrt{L}} \quad (3)$$

其中 K_1 为常数， L 为背景亮度。我们常用灰度级来表示象素的明暗度，象素的灰度级与亮度之间

的关系见图 2^[4]。

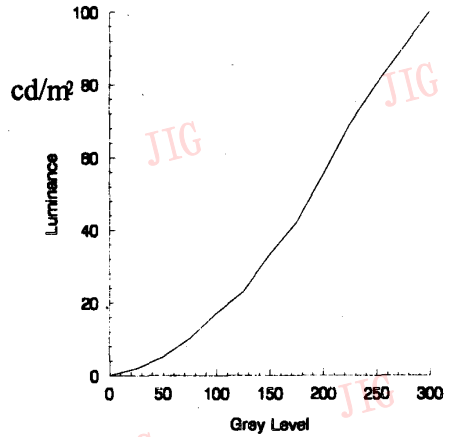


图 2 亮度与灰度级的对应关系
Fig. 2 The corresponding relationship between luminance and grey level

由图 2 可知，象素的灰度级与亮度之间存在者近正比关系。为了方便，我们在以后的计算中采用象素的灰度级表示象素的亮度。

影响人的视觉灵敏度的另一个重要因素是图象局部空间频率。现在的实验证明^[4]影响象素的误差可视度的因素是误差周围的局部区域环境，而不是整个图象的背景环境。对给定 $M \times N$ 的图象块，其中 M, N 分别表示图象块的长和宽。行频率 RF 定义为：

$$RF = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=1}^{N-1} [F(j, k) - F(j, k-1)]^2} \quad (4)$$

其中 $F(j, k)$ 为图象块在第 j 行第 k 列处的象素值，列频率 CF 定义为：

$$CF = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{j=1}^{M-1} [F(j, k) - F(j-1, k)]^2} \quad (5)$$

则图象块的空间频率 SP 定义为：

$$SP = \sqrt{RF^2 + CF^2} \quad (6)$$

空间频率表示图象块的活跃度。空间频率愈高，图象块的活跃度越大，人的视觉系统感觉误差的能力愈差，反之亦然。

现在讨论正常亮度范围内主观亮度与客观亮度之间的关系。我们把人眼等效成非线性放大器，其放大器的增益为 G ，假定 L 为客观亮度， S 为主观亮

度, ΔS 为人眼最小可感觉的主观亮度变化, 根据图 1 可知 ΔS 为常数 K , 则

$$\Delta S = G\Delta L_{\min} = K \quad (7)$$

取 $\Delta L_{\min}/L = f(L)$ 则

$$\Delta S = G\Delta L_{\min} = \frac{dS}{dL}\Delta L_{\min} = \frac{dS}{dL}Lf(L) = K \quad (8)$$

则

$$S = \int \frac{K}{Lf(L)}dL + C \quad (9)$$

由于 $f(L) = \Delta L_{\min}/L = \text{常数}$, 所以

$$S = K_2 \log L + K_0 \quad (10)$$

由式(10)可知, 主观亮度与客观亮度在正常亮度范围内呈现对数关系。

由以上分析, 我们可看出人的视觉系统对误差的屏蔽主要包括亮度屏蔽和空间屏蔽两部分。基于此, 我们对图象的误差测量采用以下步骤:

(1) 首先, 将测试图象和参考图象分割成 $n \times n$ 的图象块。

(2) 计算测试图象的每个图象块象素的均值, 我们用 $mean_i$ 表示第 i 图象块象素的均值, 令该图象块的基底亮度 L_i 等于 $mean_i$, 用下式计算该图象块的亮度灵敏度 C_{\min}^i :

$$C_{\min}^i = \frac{K_1}{\sqrt{L_i}} \quad (11)$$

(3) 利用式(6)计算参考图象每个图象块的空间频率。我们用 SP_i 表示第 i 个图象块的空间频率。

(4) 对测试图象的每个象素计算误差值。我们用 ΔX_{ij} 表示图象第 i 行第 j 列处象素的误差值, $\Delta X_{ij} = |F(i, j) - F^*(i, j)|$, 其中 $F(i, j), F^*(i, j)$ 分别表示参考图象和测试图象第 i 行第 j 列处的象素值。

(5) 对每个象素的误差值进行亮度屏蔽和空间屏蔽。假定象素 $F(i, j)$ 属于第 i 个图象块, 如果

$\frac{\Delta X_{ij}}{L_i} < C_{\min}^i$, 则忽略此象素误差值, 赋 ΔX_{ij} 等于 0; 否

则按下式计算该象素的感知误差 PE_{ij} :

$$PE_{ij} = f_1(\Delta X_{ij})f_2(SP_i) \quad (12)$$

其中 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 是非线性函数, 将在后面进行讨论。 $f_1(x)$ 完成将客观亮度误差转换成主观亮度误差, 为递增函数; $f_2(x)$ 完成视觉系统对误差进行空间频率的屏蔽, 为递减函数。

(6) 计算测试图象的感知误差。我们用图象所有象素的感知误差的均值来表示图象的感知误差, 具体计算为:

$$PE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} PE_{ij} \quad (13)$$

现在讨论 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 的具体构成形式。根据式(10), 我们有:

$$f_1(x) = K_2 \log(L + x) - K_2 \log L = K_2 \log\left(\frac{L+x}{L}\right) \quad (14)$$

其中 L 为参考图象的基底亮度, 我们用图象象素的均值来表示。由于对每个象素来说, 图象基底亮度都是一样的, 因此为了计算的简化, 我们取下式 $f_1(x)$ 为函数:

$$f_1(x) = K_2 \log(1 + x) \quad (15)$$

对于 $f_2(x)$, 根据人的视觉系统具有对数特性, 我们取:

$$f_2(x) = \frac{1}{1 + K_3 \log(1 + x)} \quad (16)$$

其中 K_3 是常数, 它表示人的视觉系统对空间频率的敏感度。当 K_3 增加时, 人的视觉对空间频率的敏感性降低, 反之亦然。我们从式(16)可看出当图象基底的空间频率为 0 时, $f_2(x) = 1$, 即不对空间频率进行屏蔽。

由以上可看出, 本算法对误差的屏蔽分为两步: 先进行亮度屏蔽, 然后进行空间频率屏蔽。在整个屏蔽过程中体现出人的视觉所具有的对数特性。图象感知误差的整个计算过程可由图 3 来表示

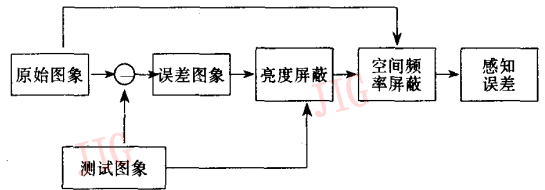


图 3 感知误差计算过程
Fig. 3 The procedure of computing perceptual image distortion

参数的选择: K_1 的值可根据整个图象的平均亮度来选择, 图象的平均亮度较大和较小时, K_1 的值可选择小一点; K_2 的大小决定感知误差值的大小, 但对同一图象误差的比较无影响, 可选择一个固定常数; K_3 的值可根据整个图象的活跃度来选择, 如果图象的活跃度较大, 那么可选择较大的 K_3 , 反之亦然。

3 模拟实验

在本节,我们将对两幅 $512 \times 512 \times 8\text{bits}$ 的 Lena 重建图象进行感知误差测试实验。图 4(a)~(c)分别为 Lena 原图象,峰值信噪比 $\text{PSNR} = 31.70\text{dB}$ 的重建图象, $\text{PSNR} = 31.42\text{dB}$ 的重建图象。由图 4 可看出,虽然图 4(b)的 PSNR 值大于图 4(c)的 PSNR 值,但是图 4(c)的直观质量优于图 4(b)。为了和其他误差测量算法进行比较,我们首先应用文献[5]中给出的最好测量算法 NMSE(HVS)对图象质量进行测试,结果为:图 4(b)的感知误差为 0.033 172,图 4(c)的感知误差为 0.034 468。由此可见,NMSE(HVS)算法仍然没有能很好地反映图象的直观质量。

现在利用我们给出的算法对图象进行质量测试。将图象分割成 8×8 的图象块,选择 $K_1=1, K_2=1, K_3=0.1$ 。测试结果为:图 4(b)的感知误差为 0.113 732,图 4(c)的感知误差为 0.112 840。由此可看出,我们的算法体现出了图象直观质量差别。同时,在实验中我们发现 K_1 的选择相当重要。当 K_1 很小时, C_{\min} 过小,亮度屏蔽作用过小,此时算法不能反映人的视觉系统的亮度响应特性; K_1 越大,亮度屏蔽作用越大, C_{\min} 越大,计算出的感知误差主要反映较高的误差作用;当 K_1 很大时, C_{\min} 过大,所有误差都将被屏蔽,此时也不能反映人的视觉特性。因



(b)



(c)



(a)

(a)原图象 (b)重建图象 $\text{PSNR} = 31.70\text{dB}$

(c)重建图象 $\text{PSNR} = 31.42\text{dB}$

(a)Original Lena image

(b)Reconstructed Lena image under $\text{PSNR} = 31.70\text{dB}$

(c)Reconstructed Lena image under $\text{PSNR} = 31.42\text{dB}$

图 4 原图象与重建图象

Fig. 4 Original and reconstructed Lena image

此, K_1 的大小应根据实验来确定,不同的图象具有不同的 K_1 值。我们应用 $K_1=1$ 对 5 幅 Lena 重建图象进行测试实验,结果表明算法能较好地反映图象的直观质量。

4 结论

本文从人的视觉特性出发,提出了一种图象质量的感知测量方法。此算法充分体现了人的视觉所具有的亮度屏蔽和空间频率屏蔽特性,同时还考虑了人的视觉系统呈现对数特性这一事实。实验结果表明应用此算法对图象进行质量测量,所得的感知误差能较好的反映图象的直观质量。

参考文献

1 Ngan K N et al. Hybrid Image Coding Scheme Incorporating Human Visual System Characteristics. *Optical Engineering*, 1991,

30(7):940~946.
 2 Teo P C, Heeger D J. Perceptual Image Distortion. The International Conference on Image processing, Austin, Texas, 1994, 2: 982~986.
 3 Westen et al. Perceptual Image Quality based on Multiple Channel HVS Model. ICASSP-95, Detroit, Michigan, USA, 2351~2354.
 4 Karunaseka S A et. al. A Distortion Measure for Blocking Artifacts in Image Based on Human Visual Sensitivity. *IEEE Trans. Image Processing*, 1995, 4(6):713~724.
 5 Eskicioglu A M, Fisher P S. Image Quality Measures and their Performance. *IEEE Trans. Comm.*, 1995, 43(12):2959~2965.
 6 Jayant N J et al. Signal Compression Based on Models of Human Perception. *Proceeding of the IEEE*, 1993, 81:1385~1422.
 7 唐传尧. 图象电子学基础, 北京: 电子工业出版社, 1995.



周建鹏, 1968年生, 1997年7月毕业于北京邮电大学信息工程系信号与信息处理专业, 获工学博士学位。现在邮电部电信科学技术研究院宽带业务研究中心工作, 已发表论文10余篇, 主要研究兴趣包括小波理论、神经网络、图象及语音处理、B-ISDN及ATM技术, 多媒体技术。

杨义先, 1961年生, 北京邮电大学信息安全中心主任, 教授, 博士生导师, 全国政协委员。主要研究领域包括现代密码学、计算机网络安全、信息处理、应用数学等, 已发表论文160余篇, 有5部专著。

A Perception Image Quality Measure Scheme

Zhou Jianpeng, Yang Yixian

(P. O. Box 145, Depart. of Information Engineering, Beijing Univ. of Posts and Telecomms, Beijing 100088)

Abstract A image quality measure scheme based on the Human Visual System Characteristics was proposed. Luminance masking and spatial frequency masking were considered in our scheme. Experimental results showed that the proposed measure scheme correlates better with perceptual image quality.

Keywords Visual masking, Quality measure, Image processing