

一种基于人眼视觉特性的图像质量评价

丁绪星 朱日宏 李建欣

(南京理工大学电光学院, 南京 210094)

摘要 图像质量评价的研究已成为图像信息工程的基础技术之一。由于图像的最终接受者是人,所以评价图像质量的关键在于其是否符合人类视觉系统特性。为了建立一种新的符合人眼视觉特性的图像质量评价方法,利用小波变换与人类视觉系统的多通道特性相匹配的特点,结合对比敏感度函数的带通特性,同时考虑计算的复杂性,给出了一种与人对图像质量评价保持良好一致的图像质量评价算法。实验结果表明,其评价结果与主观评价方法平均评价分数的相关系数达 0.95,而对应的客观评价方法峰值信噪比与平均评价分数的相关系数为 0.81。

关键词 图像质量评价 小波变换 人类视觉系统 对比敏感度函数

中图分类号: TN948.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)02-0190-05

A Criterion of Image Quality Assessment Based on Property of HVS

DING Xu-xing, ZHU Ri-hong, LI Jian-xin

(School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Sci&Tech, Nanjing 210094)

Abstract Research on image quality assessment is meaningful for image processing projects. Since human being is the final receiver of the image, the key point of the image assessment is that it should match the characteristics of HVS(human visual system). In this paper, a novel image quality assessment according with perceptual property of human eye is proposed. In this algorithm, wavelet transform is used because it matches well with the multi-channel model of HVS, bandpass property of CSF(contrast sensitivity function) is integrated with, and the complexity of the computation is considered. The simulation results show that the correlation coefficient between the algorithm and subjective MOS(mean opinion score) is 0.95, but the correlation coefficient obtained by the PSNR(Peak signal noise ratio) measure is 0.81.

Keywords image quality assessment, wavelet transform, human visual system, contrast sensitivity function

1 引言

各种完整图像处理过程对处理后图像的质量评价非常重要,它直接说明图像处理系统的优劣和算法的有效性。由于图像的最终接受者是人,所以在评价图像质量时应考虑人类视觉系统(HVS)特性。然而传统的客观图像质量评价方法,如均方误差(MSE)或峰值信噪比(PSNR)方法没有考虑人眼的感知特性,因此在许多情况下,它们的评价结果不能和人的评价相一致,如当峰值信噪比超过 30dB 时,人的视觉很难分辨出原始图像与重构图像的差异。至于通常使用的主观评价方法(MOS)和国际标准 CCIR-

500^[1]等,由于要求许多评估者参与且需按复杂程序和步骤进行,因此其耗时长、费用高,结果易受观察者、测试条件和环境的影响,稳定性、可移植性差。

由于 HVS 非常复杂,至今人们还未完全理解其所有特性,但在图像质量评价中哪怕引入最简单的 HVS 模型也会取得较好的效果^[2]。早在 20 世纪 70 年代末 80 年代初人们就试图将 HVS 模型应用于图像质量评价^[3~5],但由于当时的应用还不成熟,所以不能很好地反映人的视觉感知特性。近年来,随着对 HVS 研究的不断深入,客观图像质量评价方法的研究也由传统的误差统计方法发展到考虑视觉感知特性上来,基于人眼基本视觉特性的图像质量评价模型不断出现^[6~12]。这些评价模型都不同程度

地应用了 HVS 特性,取得了较好的效果,但大都计算复杂,未进行和主观评分相关性的测试。该文根据小波变换与 HVS 多通道特性相匹配的特点^[13],利用对比敏感度函数(CSF)^[14]的带通特性以简化 HVS 模型,将不同空间频带失真用 Minkowski 求和^[15]进行非线性合并,从而建立一种新的和人的视觉评价保持良好一致的图像质量评价方法。在图像小波压缩编码应用中,用本算法评价解压图像的质量,实验结果表明该算法具有客观、易计算及和人的视觉评价相一致的特点。

2 HVS 的基本模型

HVS 的许多特性都与图像质量的评价相关^[16],其中研究较多的、较有影响特性主要有对比敏感度、多通道结构、掩盖效应、视觉非线性定律(Weber, Fechner, Rolle)等。由于 HVS 非常复杂,目前还无法根据生理和心理特性得到精确的计算模型,根据近年来 HVS 的视觉实验研究成果给出的一种简化模型如图 1 所示。

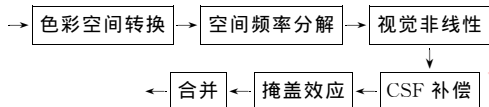


图 1 一种 HVS 的简化模型

在此模型中将 HVS 的活动简化成 6 个步骤:

(1) 将输入的图像(通常为 RGB)转换成另一色彩空间(如 YUV)的图像以预测色彩失真,同时亦减少了数据冗余;

(2) 将图像分解为一组有方向性的带通滤波器^[17],每个滤波器只对其中心频率附近一定区域内的空间频率和方向做出响应。通常非彩色图像的空间频率平面分解成 4~6 个频带和 4~8 个方向,而彩色图像具有较宽的方向带宽,一般只要 2~3 个方向带。小波分解的数据结构与此特性有惊人的相似,因而这里将作为分析工具;

(3) 表示人眼对亮度光强变化的响应是非线性的(Weber-Fechner 定理),可以用上一步空间频率分解的数据计算局部对比度,即可用小波系数的幅值来近似模拟此特性;

(4) 用来补偿由于空间频率过大或过小而降低的对比灵敏度,其计算模型用 CSF,CSF 的运用使人们对视觉系统的时空特性有了进一步的了解,深

化了对视觉的认识,它能较全面客观地评价视觉功能。Mannos 和 Sakrison 等人^[18]已通过大量的实验建立了 CSF

$$A(f) = 2.6(0.192 + 0.114f) \exp[-(0.114f)^{1.1}] \quad (1)$$

其中,空间频率 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ (周期/度), f_x, f_y 分别为水平、垂直方向的空间频率。将 f 归一化

$$f(\text{周期/度}) = f_N(\text{周期/像素}) \cdot f_s(\text{像素/度}) \quad (2)$$

其中, $f_N \in [0, 0.5]$ 为归一化的空间频率,对应的 CSF 特性曲线如图 2。

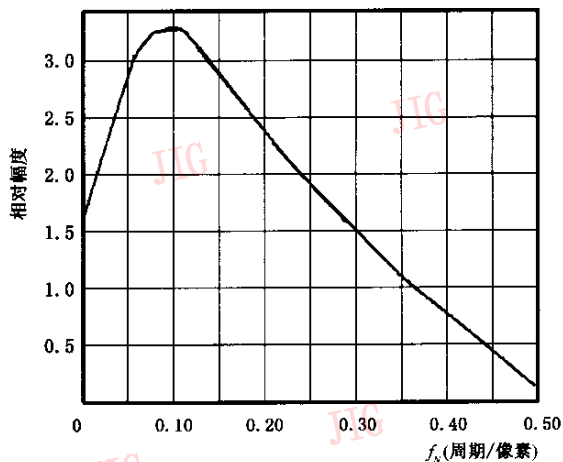


图 2 CSF 的归一化空间频率特性曲线

由图 2 可得,CSF 近似为一个带通滤波器,在 $f_N \in [0.03, 0.25]$ 处对比度最敏感,而在较低和较高空间频率处敏感度低;

(5) 掩盖效应^[19]反映了激励之间的相互作用,即一个原本可见的激励由于另一个激励的存在而变得不容易被察觉。在质量评价中,常把原始图像作为背景,考虑干扰或编码噪声被背景掩盖的程度,可使评价结果更有效。人类对图像信息的处理过程都是在初级视觉皮层或其之前发生的,而不同通道的信息会在脑部区域聚合;

(6) 将不同通道中的信息合并来模拟该过程,通常用的是一种非线性 Minkowski 合并^[15]。

3 评价算法

为了算法的简单有效,同时又能符合 HVS 的感知特性,建立如图 3 的图像质量评价系统。

其计算过程为:

(1) 将原图像和降质图像分别进行小波分解(这

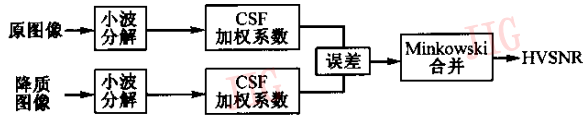


图 3 图像质量评价系统

里选用 D9/7 小波^[13], 分解的方向为 0°, 45°, 135°, 90°, 分解的级数为 5 级。

(2) 利用 CSF 的非线性带通特性, 对小波分解后不同空间频带的小波系数进行加权, 加权值为在相应频带内 CSF 曲线的平均值, 对于 5 级小波分解, 整个频带划分为 6 个, 根据 CSF 特性曲线对应取 6 个加权值。图 4 为带有加权值的 CSF 特性曲线, 图 5 为加权值和其相应的空间频带。

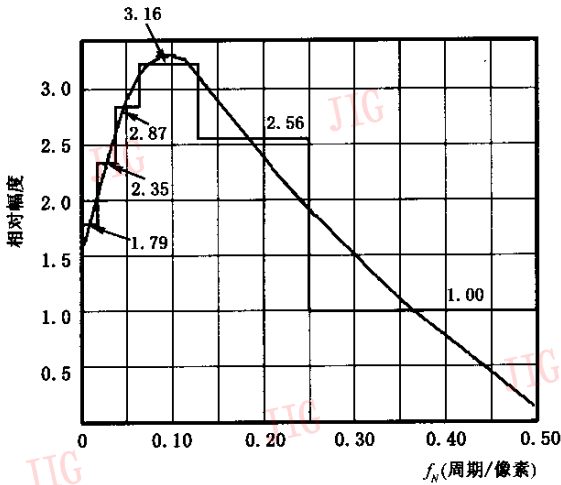


图 4 带有加权值的 CSF 特性曲线

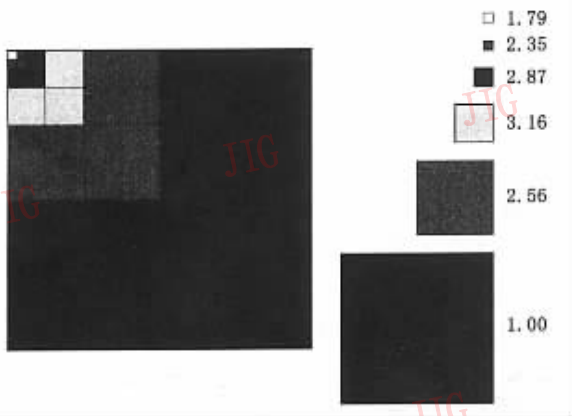


图 5 加权值及其相应的空间频带

(3) 计算原始图像和降质图像在每个加权频带的误差

$$e_n = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |f_{ij}^{(n)} - g_{ij}^{(n)}|^2 \quad (3)$$

式中, $n=1, 2, \dots, 6$; $\{f_{ij}^{(n)}\}, \{g_{ij}^{(n)}\}$ 分别为分解加权后第 n 个空间频带的原始图像数据和降质图像数据; 对应的图像大小为 $M \times N$ 。

(4) 将式 (3) 所得的 6 个频带的误差进行非线性合并, 这里采用 Minkowski 求和^[15]。

$$S = \left(\sum_{n=1}^6 |e_n|^\beta \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

β 为求和参数, 一般情况下 $\beta \in [2, 4]$ 。由人类视觉系统的实验, 其最佳值为 3.5^[20], 本文取 $\beta=4$ 。

(5) 类似峰值信噪比的定义, 设符合人类视觉系统特性的信噪比为

$$\text{HVSNR} = \left(10 \lg \frac{255^2}{S} \right) \text{dB} \quad (5)$$

4 实验结果

选用大小为 $512 \times 512 \times 8$ 的 Lena、camera、peppers、goldhill、girl、mandrill、mountain、boat、bird、barbara 等 10 幅图像作为测试图像。每幅图像均进行不同比特率的小波压缩编码, 对所得的解压缩图像用 MOS 方法和本文的算法进行质量评价, 实验结果如图 6 所示。为了更直观地比较 HVSNR 和 PSNR, 图 7 给出经小波压缩处理后的 Lena 图像及相应的 HVSNR 和 PSNR 的质量评价结果。计算 MOS 值和 HVSNR 值的相关系数^[21]如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

其中, m 为样本个数, $\{x_i\}, \{y_i\}$ 分别为 HVSNR 值

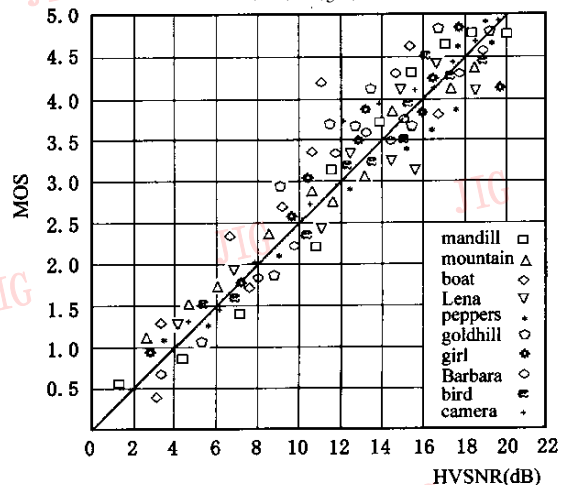


图 6 实验结果

和 MOS 值, $\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i, \bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i, R \in [0, 1],$
 $R = 1$ 时二者相关性最强, $R = 0$ 时二者正交。根据
 所得的实验数据求得 $R \approx 0.95$, 而对应的 PSNR 和
 MOS 的相关系数 $R \approx 0.81$ 。由图 7 可看出, 当图像

的 PSNR 值相差较大时(如图中的(a)与(b), (c)与
 (d)等), 人眼几乎无法分辨出质量的优劣, 而对应的
 HVSNR 的值相差甚微, 与人眼的视觉感知相匹配。
 因此可以说本文的图像质量评价算法和人眼对图像
 质量的评价相一致。



(a) $C_r=8, \text{PSNR}=39.58$
 $\text{HVSNR}=20.01$



(b) $C_r=9.9, \text{PSNR}=37.19$
 $\text{HVSNR}=19.96$



(c) $C_r=19.80, \text{PSNR}=34.39$
 $\text{HVSNR}=15.80$



(d) $C_r=29.7, \text{PSNR}=32.60$
 $\text{HVSNR}=15.98$



(e) $C_r=59.5, \text{PSNR}=30.41$
 $\text{HVSNR}=8.13$



(f) $C_r=64, \text{PSNR}=29.18$
 $\text{HVSNR}=8.16$



(g) $C_r=117.8, \text{PSNR}=27.14$
 $\text{HVSNR}=3.10$



(h) $C_r=128, \text{PSNR}=27.78$
 $\text{HVSNR}=3.10$

图 7 经小波压缩处理的 Lena 图像及质量评价结果(C_r 为压缩比)

5 结 论

本文提出的图像质量评价方法是基于 HVS 模型的一种新方法, 在与人的视觉感知质量评价保持一致性方面明显优于 PSNR、MSE 等传统方法, 能够满足静止图像处理(尤其是压缩编码)应用研究中
 对图像质量客观评价的要求。我们的实验还证明该
 算法亦适用于对静止彩色图像的质量评价, 将色彩
 空间转换为 YUV 空间, 因为人眼对色度分量 U、V
 不敏感, 所以只需对 Y 分量进行非线性加权; U、V
 分量无需加权, 即在整个空间频率范围内加权系数
 均取 1。

由于 HVS 异常复杂, 它涉及生物学、解剖学、
 生理学、心理学等多学科领域, 因此对其研究还在不
 断深入; 又因为图像处理和传输中的噪声和人为效
 应多种多样(如方块效应、蚊式噪声、模糊等), 很难
 用统一的通用算法模拟, 因此图像质量评价至今还

是一个未解决的问题, 是近年来的研究热点之一。图
 像质量评价模型将向视觉生理、心理的实验, HVS
 模型的简化及通用模型的推广等方向发展。在图像
 通信等某些应用中, 由于接收方无法获得原图作参
 考^[22], 因此图像质量评价在许多图像产品中如数码
 相机等的应用尤其重要, 况且实际上人对图像质量
 的评价并不需要参考图像, 这方面将成为今后的研
 究趋势。

参 考 文 献

- 1 CCIR. Method for the subjective assessment of the quality of television pictures recommendation 500-3 [A]. In: Recommendations and Reports of the CCIR[S], International Telecommunication Union, Geneva, 1986.
- 2 Eskicioglu A M, Fisher P S. Image quality measures and their performance[J]. IEEE Transactions on Communication, 1995, 43(12): 2959~2965.
- 3 Marmolin H. Subjective MSE measures[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1986, 16(3): 486~489.

- 4 Hall C F, Hall E L. A nonlinear model for the spatial characteristics of the human visual system [J]. IEEE Transactions Systems Manunication Cybernet, 1977, **7**: 161 ~ 170.
- 5 Crranrath D J. The role of human visual models in image processing[J]. Proceeding of IEEE, 1981, **69**(5): 552~561.
- 6 Daly S. The visible differences predictor: An algorithm for the assessment of image fidelity [A]. In: Proceedings of SPIE, Symposium on Model-based Vision[C], Boston, USA, 1992, **1616**: 2~15.
- 7 Lai Yung-kai, Jay Kuo C C. A harr wavelet approach to compressed image quality measurement [J]. Journal of Visual Communication and Image representation, 2000, **11**(1): 17~40.
- 8 Chin F Z C, Xydeas C S. Dual-mode image quality assessment metric [A]. In: IEEE Region 8 International Symposium on Video/Image Processing and Multimedia Communications[C], Zadar, Croatia, 2002, **6**: 137~140.
- 9 Naranjan Damer-venkata, Thomas D. Kitt, Wilsons, *et al.* Image quality assessment based on a degradation model [J]. IEEE Transactions. on Image Proceedings, 2000, **9**(4): 636 ~ 650.
- 10 Karunasekera S A, Kingsburg N G. A distortion measure for blocking artifacts in images based on human visual sensitivity [J]. IEEE Transactions on Image Proceesing, 1995, **4**(6): 713~724.
- 11 Fuhrman D R, Baro J A, Cox J R. Experimental evaluation of psychophysical distortion metrics for JPEG-coded images [J]. Journal of Electronic Imaging, 1996, **4**(4): 397~406.
- 12 Kitt T D, Evans B L, Bovik A C, *et al.* Digital halftoning as 2D delta-sigma modulation [A]. In: Proceedings IEEE Interntional Conference Image Proceeding[C], Washington DC, USA, 1997, **1**: 799~820.
- 13 Dauberschies I. Ten lectures on wavelets [A]. In: Society for Industrial and Applied Mathematics[C], Philadelphia, 1992: 3~17.
- 14 Peli E. Contrast in complex images [J]. Journal Optical Society American(A), 1990, **7**(8): 2032~2039.
- 15 Quik R F. A vector magnitude model of contrast detection [J]. Kybernetic, 1974, **16**(3): 65~67.
- 16 Wandell B A. Foundations of vision [M]. Sunderland, England: Sinauer Press, 1995: 1~10.
- 17 Daugman J G. Two-dimensional spectral analysis of cortical receptive field profiles [J]. Vision Research, 1980, **20**(10): 847~856.
- 18 Mannos J L, Sakrison D J. The effect of a visual fidelity criterion on the encoding of images [J]. IEEE Transactions on Inform Theory, 1974, **20**(2): 525~536.
- 19 Come S, Macq B. Human visual quality criterion [A]. In: SPIE Visual Communication and Image Processing [C], San Jose, USA, 1990, 1360: 2~7.
- 20 Watson A B. Summation of grating patches indicates many types of detectors at one retinal loction [J]. Vision Research, 1982, **22**(5): 17~25.
- 21 Kendall M G. Multivariate analysis [M]. London, U. K. : Griffin, 1975.
- 22 Xin Li. Blind image quality assessment [A]. In: IEEE International Conference of Image Processing [C], Rochester, New York, 2002, **1**: 449~452.



丁绪星 1971 年生, 现为南京理工大学通信与信息系统专业博士研究生。所从事的研究有图像压缩与传输、光纤通信技术、图像压缩算法的硬件设计与实现。



朱日宏 1964 年生, 教授, 博士生导师, 1991 年于南京理工大学光学获工程博士学位, 现任南京理工大学电光学院副院长。长期从事光学图像实时处理、光通信技术、光电检测技术的科研、教学工作。



李建欣 1977 年生, 现为南京理工大学光学工程专业博士研究生。主要研究方向为图像压缩与传输、视频信号处理。