

# 基于 Haar 小波变换高频特征的图像质量评价算法

吉国力 倪晓明

(厦门大学信息与科学技术学院自动化系 厦门 361005)

**摘要** 在分析人类视觉系统(HVS)特性的基础上,提出一种基于 Haar 小波变换高频特征的图像质量评价算法(CSSIM)。此方法首先将图像进行小波变换得到不同方向和不同频率的4个频带划分,在3个高频频带比较边缘结构信息上根据人类视觉系统特性,赋予3个频带比较结果相应视觉权重值,最终得到归一化的图像质量评价指标CSSIM。通过非线性回归拟合分析,证明了提出的算法(CSSIM)相对图像结构相似度评价算法(MSSIM)及其改进算法(MGSSIM)更符合人类的主观视觉感受。

**关键词** 结构相似性,小波变换,人类视觉系统

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A

## Image Quality Assessment Algorithm Based on High Frequency Band of Haar Wavelet Transform

Ji Guo-li NI Xiao-ming

(Department of Automation, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract** This paper proposed a image quality assessment algorithm based on wavelet transform. Here, both reference and test images were decomposed into four bands: LL, HL, LH and HH. The edge structure information similarity was obtained on other three bands, then we got a universal image quality assessment result(CSSIM) with weights based on the human property. The proposed metric performs better than MSSIM and MGSSIM by providing larger correlation coefficients and smaller errors after nonlinear regression fitting.

**Keywords** Structural similarity, Wavelet transform, HVS

## 1 引言

图像质量评价对于图像信息处理的意义重大。要对图像通信的某些环节进行合理评估,其研究已成为图像信息工程的基础技术之一。

人眼视觉系统(HVS)是图像处理的终端,目前合理的图像质量评价方法是基于主观评价的。在主观评价方法中,平均主观评价法(MOS),虽是一种能被广泛采用和令人信服的可靠方法,但非常耗时且需大量专业参与者,还受到许多条件制约,对图像质量改善不能给出评估意见和改进方法,因此在图像设计过程中无法被有效应用<sup>[1]</sup>。基于客观的图像质量评价方法弥补了主观评价方法的不足,可以广泛应用到图像处理中。但客观度量图像的关键是要能反映人眼主观感受的图像质量,较早的基于像素峰值信噪比 PSNR 和均方差 MSE 的指标仅仅适用于度量带有随机误差的图像质量。这两种度量方法虽然简单快速,但没结合主观的人眼视觉判断,常导致和主观测试结果背离。在过去的几十年中,许多研究者致力于寻求符合人眼视觉系统特性的图像质量评价模型,提出了一些基于视觉误差理论的算法,但其发展受到很大限制<sup>[1,2]</sup>。近年来,对人眼视觉系统的研究有了突破,提出了一种基于图像结构相似度的图像质量评价方法(MSSIM)及其改进算法(MGSSIM)<sup>[1,2]</sup>,实验证明这两种方法有明显的优越性。但仍

存在的主要问题是:在评价轻微噪声失真图像与模糊失真图像时,有时会出现与主观评价结果的不一致性。本文为了解决上述问题,结合小波变换与人类视觉系统的良好拟和特性,提出了一种与主观视觉感受更为一致的图像质量评价方法。仿真实验表明,本文提出的方法(CSSIM)较 MSSIM 和 MGSSIM 更能反映人眼主观视觉感受。

## 2 图像质量评价方法

基于结构失真进行图像质量客观评价的出发点是要有效模仿人眼提取视觉场景中结构信息的能力,评价结构信息与入眼主观感知非常接近。因此,采用结构相似可提供与人眼主观感知图像失真非常接近的一种客观评价。基于结构相似度图像质量评价方法(MSSIM)是从光照度、对比度和结构相似度3个方面对原图像和失真图像进行分析比较,其核心函数定义为<sup>[1]</sup>:

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (1)$$

其中,SSIM(x,y)为原图像块x与失真图像块y之间的相似性测量函数,用来度量失真图像的失真度;l(x,y)为亮度对比函数,c(x,y)为对比度对比函数,s(x,y)为结构对比函数; $\alpha, \beta, \gamma > 0$ 这3个参量是对亮度、对比度和结构信息进行权值调整;3个对比函数分别定义如下:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, C_1 = (K_1L)^2 \quad (2)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, C_2 = (K_2L)^2 \quad (3)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (4)$$

其中,  $\mu_x, \mu_y$  分别为图像块  $x$  和图像块  $y$  的亮度均值, 作为亮度估计;  $\sigma_x, \sigma_y$  分别为图像块  $x$  和图像块  $y$  的标准差;  $C_1, C_2, C_3$  是为了避免分母为零而引入的常数;  $L$  是像素值 (对于 8 比特灰度图像为 255) 的动态范围;  $K_1, K_2$  是一个远小于 1 的常数。对所有图像块的 SSIM 值取均值, 得到整幅原始图像  $X$  与失真图像  $Y$  的结构相似度, 定义为 MSSIM, 其值越大, 表明失真图像与原图像的相似度越高。

在文献[1]中, Zhou Wang 等人的实验表明 MSSIM 的图像质量评价结果优于 PSNR 的评价结果。Chen 等人[2]发现 MSSIM 对评价严重模糊图像存在结果与主观感受不一致, 并就此提出改进的 MGSSIM 算法, 但对于轻微噪声图像和高斯模糊图像的评价还存在与主观感受不一致现象。如图 1 所示, 这里给出了一组失真图像, 从图中可以看出图 1(b) 比图 1(c) 更接近原始图像, MSSIM 值分别等于 0.7728 和 0.8701, MGSSIM 值分别等于 0.4512, 0.4912。显然, 前两种方法评价并非十分精确。而本文提出的基于 Haar 小波变高频特征的图像质量评价方法 (CSSIM) 得到了较好的评价结果。



图 1 失真图像的 3 种算法评价结果比较

### 3 基于 Haar 小波变换高频特征的图像质量评价算法

在考虑人眼对图像结构具有高度敏感特性的同时, 为了解决上述问题, 本文结合小波变换与边缘检测特性, 提出一种和主观视觉感受更为一致的新的图像质量评价方法 CSSIM。其算法过程为:

(1) 分别对原图像和失真图像进行一级二维离散小波变换, 这里采用 Haar 小波分解后得到 4 个不同的频带: LL, LH, HL 和 HH, 而频带 HL, LH 和 HH 代表了图像水平, 垂直和对角线方向的边缘细节信息。

(2) 分别将原始图像和失真图像经小波变换后得到的高频频带 HH 矩阵取绝对值并划分为  $n \times n$  个重叠频带块, 计算下述边缘信息相似度对比等式:

$$S_{HH}(x', y') = \frac{2\sigma_{x'y'} + C_1}{\sigma_{x'}^2 + \sigma_{y'}^2 + C_1} \quad (5)$$

其中,  $S_{HH}(x', y')$  为原图像小波转换后高频 HH 频带块与失真图像小波转换后的对应高频 HH 频带块之间的相似性测量函数,  $\sigma_{x'y'}$  为高频频带块  $x'$  和  $y'$  的协方差,  $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}$  和  $C_1$  与文献[1]中的定义相同。同样对于高频 LH 和 HL 也进行与式 (5) 相同的运算。然后计算 3 个高频部分所有频带块值的均值, 分别定义为  $M_{HL}, M_{LH}$  和  $M_{HH}$ 。

(3) 通过初级视皮层细胞感受器实验测试结果得知<sup>[9,12]</sup>, HVS 由相邻的多个并列视觉通道构成。这些通道的空间频

率带宽约为一个倍频程。它们具有线性或正交相位、位移不变性、一致的频率响应, 对水平和竖直方向的刺激最敏感, 而向对角方向敏感性逐渐减弱。这一结构特征恰好与二维小波分解有很好的拟和性。

基于上述事实, 最终基于小波变换高频特征的图像质量评价算法 CSSIM 定义为:

$$CSSIM(X, Y) = \frac{0.23M_{HL} + 0.1M_{LH} + 0.01M_{HH}}{0.34} \quad (6)$$

### 4 仿真实验与结果分析

目前, 评价一个图像质量评价算法的优劣, 是通过选取 Logistics 函数对算法获得的客观评价价值与国际通用的人类主观视觉评分标准值 DMOS 的非线性拟合匹配度来进行评价, 匹配度越高代表该算法越好<sup>[11]</sup>。其中 DMOS 代表了人类视觉对于图像的主观视觉感受, DMOS 越小则代表图像质量越好。实验测试图像选用美国 TEXAS 大学图像和视频工程实验室提供的图像质量估计数据库 databaserelease2<sup>[10]</sup> 中的高斯模糊图像和高斯白噪声图像共 310 幅图像进行仿真试验, 过程中采用 Video Quality Experts Group (VQEG)<sup>[11]</sup> 的视频图像测试过程及评分标准。图 2 是 3 种算法对于高斯模糊图像和高斯白噪声图像混合的 DMOS 值散点的非线性拟和曲线图, 同样也体现了 CSSIM 的优越性。

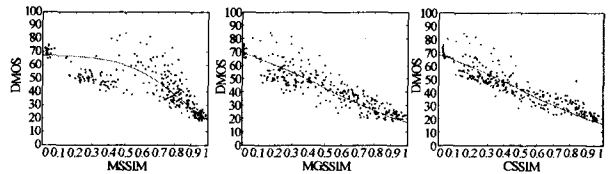


图 2 3 种算法对高斯模糊图像和噪声图像的 DMOS 值散点的非线性拟和曲线图

在进行非线性回归分析散点拟和之后, 同时对 SSIM, GSSIM 和 CSSIM 3 种客观图像质量评价算法的结果与 DMOS 值进行非线性回归拟和并进行数值分析。这里采用 VQEG 的 4 个评价标准: 非线性回归分析的相关性 (CC)、回归分析后的绝对误差均值 (MAE)、均方差的平方根 (RMS)、孤立点率 (OR), 其中, CC 值越大说明客观图像评价算法与主观视觉感受的一致性越好。而 MAE, RMS 和 OR 的值越小, 表示客观图像评价算法与主观视觉感受的一致性越好。

表 1 是对图 2 所示的非线性回归曲线拟和图进行分析的结果。从表中可以清楚地看到 CSSIM 的优越性。原因在于对图像进行小波变换, 符合人类视觉的心理感受, 另外, 小波变换还能反映出图像的边缘细节信息, 进一步符合了人眼对图像灰度跃变敏感的特性, 同时, 小波变换边缘信息提取对噪声不是十分敏感, 所以才能取得客观图像与主观评价的较高一致性。

表 1 针对噪声和模糊图像的 3 种算法评价结果一致性比较图

| 评价算法   | 非线性回归分析 |        |         |        |
|--------|---------|--------|---------|--------|
|        | CC      | MAE    | RMS     | OR     |
| MSSIM  | 0.8418  | 8.3287 | 10.1663 | 0.0233 |
| MGSSIM | 0.8880  | 6.6369 | 8.5237  | 0.0300 |
| CSSIM  | 0.9086  | 5.9785 | 7.7148  | 0.1000 |

**结束语** 图像质量评价是图像处理领域一项重要的基础性研究课题。本文提出了一种新的基于小波变换和人类视觉

系统特性的客观图像质量评价算法 CSSIM。该算法首先将原图像和失真图像分别进行小波变换,对得到的 3 个高频频带分别进行对应图像结构相似度的比较,根据人眼视觉特性赋予 3 个频带相似度测量结果相应的视觉权重值,最后构造一个归一化的失真图像质量评价标准 CSSIM。非线性回归拟合仿真实验表明,本文提出的算法(CSSIM)相对图像结构相似度评价算法(MSSIM)及其改进算法(MGSSIM)更符合人类的主观视觉感受。但在单一评价失真图像时,本文算法还需进一步研究。

## 参考文献

- [1] Wang Zhou, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image Quality Assessment: From Error Measurement to Structural Similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612
- [2] Chen Guan-hao, Yang Chun-ling, Xie Sheng-li. Gradient-Based Structural Similarity for Image Quality Assessment[C]// IEEE Proceedings of ICIP 2006. 2006: 2929-2932
- [3] Wang Zhou, Bovik A C. A universal image quality[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84
- [4] Taubman D, Marcellin M. JPEG 2000: image compression fundamentals, standards and practice[M]. Boston: Kluwer, 2002

- [5] Egiazarian K, Astola J, Ponomarenko N, et al. New full-reference quality metrics based on HVS[C]// CD-ROM Proceedings of the Second International Workshop on Video Processing and Quality Metrics. Scottsdale, USA, 2006: 4
- [6] Tong Hang-hang, Li Ming-jing, Zhang Hong-jiang, et al. Blur detection for digital images using wavelet transform[C]// IEEE Proceedings of ICME 2004. 2004: 17-20
- [7] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelet[J]. IEEE Transaction On Information Theory, 1992, 38(2): 617-643
- [8] 丁绪星, 朱日宏, 李建欣. 一种基于人眼视觉特征特性的图像质量评价[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(2): 190-194
- [9] 曹圣群, 黄普明, 鞠德. HVS 模型及其在静止图像压缩质量评价中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(4): 379-386
- [10] Sheikh H R, Wang Zhou, Cormack L, et al. Live image quality assessment database [OL]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>, 2005
- [11] Video Quality Experts Group (VQEG). Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment[R]. 2000. <http://vqeg.org/>
- [12] 马文波, 赵保军, 任宏亮, 等. 基于小波频带划分及 CSF 特性的图像质量评价方法[J]. 激光与红外, 2007, 37(7): 687-690

(上接第 257 页)

表 1 我国 CPI 预测(2008 年—2009 年)

| 年份         | 2006   | 2007   | 2008   | 2009   |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| 真值         | 101.5  | 104.8  |        |        |
| 预测值        | 103.75 | 103.11 | 104.91 | 104.88 |
| 相对误差绝对值(%) | 2.21   | 1.61   |        |        |

为了更准确地了解今年的 CPI 情况, 又通过整理后的季度数据对 2008 年一季度和二季度的 CPI 进行了预测。在 1000 次训练中第 134 次的平方误差均值最小, 按此次的权值和阈值, 得到如表 2 所列的预测。

表 2 我国 CPI 预测(2008 年一季度—2008 年二季度)

| 季度         | 2007 年三季度 | 2007 年四季度 | 2008 年一季度 | 2008 年二季度 |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 真值         | 106.1     | 106.6     |           |           |
| 预测值        | 106.42    | 106.46    | 106.36    | 106.53    |
| 相对误差绝对值(%) | 0.30      | 0.13      |           |           |

由于最近 CPI 上涨的主要因素是食品价格上涨, 因此对食品分类消费价格指数进行了预测。在 1000 次训练中第 150 次的平方误差均值最小, 按此次的权值和阈值, 得到如表 3 所列的预测。

表 3 我国食品分类消费价格指数预测(2008 年一季度—2008 年二季度)

| 季度         | 2007 年三季度 | 2007 年四季度 | 2008 年一季度 | 2008 年二季度 |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 真值         | 116.8     | 116.0     |           |           |
| 预测值        | 116.40    | 116.43    | 116.52    | 116.32    |
| 相对误差绝对值(%) | 0.35      | 0.37      |           |           |

**结束语** (1)采用 MATLAB 语言编写带有动量项和自适应学习率的 BP 网络程序, 所得 BP 网络结构是一个比较理想的优化过程, 揭示了我国 CPI 变动的内在规律性, 并以此预测出 2008 年和 2009 年我国 CPI 将分别为在 104.91 和 104.88 左右, 2008 年一季度和二季度 CPI 分别为 106.36 和 106.53, 表明目前我国 CPI 仍处于上升阶段。同时, 2008 年的 CPI 的

预测值为 104.91, 与温家宝总理在第十一届全国人民代表大会第一次会议政府工作报告中提到的把 2008 年 CPI 控制 104.8 以内非常接近。

(2)同时预测出 2008 年一季度和二季度食品分类消费价格指数将分别为 116.52 和 116.32 左右, 表明最近 CPI 上涨的主要因素仍然将是食品价格。最近两次(2004 与 2007)物价的较快上涨均来自于粮食的短期缺口, 粮食生产与基本农田的保护应引起高度重视; 同时, 针对居民通货膨胀预期较高, 应加强舆论引导, 坚决打击违法涨价的行为。

(3)从国家统计局公布的居民消费分类价格指数来看, 在 8 大类指数中除食品外, 其余的烟酒及用品、衣着、家庭设备用品及服务、医疗保健及个人用品、交通和通信、娱乐教育文化用品及服务、居住 7 大类指数非常平稳, 有些指数甚至略有下降(比如衣着、娱乐教育文化用品及服务), 因此 CPI 的持续上涨是结构性的、短期性的, 并非物价全面上涨。另外, CPI 是判定通货膨胀的一个重要指标, 但不是判断宏观经济的唯一指标。通货膨胀更重要的是看宏观经济当中总供给和总需求是否严重失衡, 而今年以来中国经济运行的实践告诉我们中国经济总供给总需求基本平衡的格局没有发生变化, 因此并没有进入到全面的通货膨胀。

## 参考文献

- [1] 王永翼, 涂健. 神经元网络控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 14-14
- [2] Hechi-Nielsen R. Theory of the back propagation neural network[J]. Proc of IJCNN, 1989(11): 593-603
- [3] Grossberg S A. Nonlinear neural network: Principles, machines and architectures[J]. Neural Networks, 1998(1): 15-57
- [4] 阎平凡, 张长水, 等. 人工神经网络与模拟进化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 17-24
- [5] 曹星平, 易东云. 基于神经网络的时间序列预测方法进展[J]. 电脑与信息技术, 1999(6): 1-3, 55