

一种结合感知与融合的视频质量评价新方法

王正友 胡国胜 吴海燕 李振兴

(江西财经大学信息管理学院, 南昌 330013; 江西财经大学智能信息处理研究所, 南昌 330013)

摘要 提出了一种结合人眼视觉特性(HVS)和信息融合的视频质量评价新方法。该方法是在结构相似(SSIM)方法基础之上,融合了人眼几个主要视觉特性,如对比敏感度、多通道、视觉掩盖、视觉非线性等。新方法具有SSIM算法简单、高效等特性,同时又满足人眼视觉特性,更好地反映了人的主观感受。通过VQEG Phase I测试数据集的实验结果证明,该方法在非线性回归后相关系数、斯皮尔曼相关系数、线外率等指标均优于传统的其他视频质量评价算法,有效地提高了视频质量评价的主观一致性。

关键词 HVS SSIM CSF 掩盖 视频质量评价 人眼视觉特性 结构相似算法 对比敏感度

中图分类号: TP391.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2009)10-2165-07

A New Approach to Video Quality Assessment Based on Human Perception and Fusion

WANG Zheng-you, HU Guo-sheng, WU Hai-yan, LI Zhen-xing

(School of Information Technology Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang 330013)

(Institute of Intelligent Information Processing, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang 330013)

Abstract The paper presents an new approach to video quality assessment based on human perception and fusion. In the proposed method, the SSIM values are calculated with the different weighted values fused visual characteristics including contrast sensitivity, multi-channel structure, visual masking and so on. The method has the same properties of simplicity and efficiency as that of the SSIM method. And it is more suitable for perceived characteristics due to fusing HVS. The experimental results show that the method can reflect people's subjective feelings in a better way and is better than other traditional methods in fitting M2 (correlation coefficient of Non-linear regression), M3 (spearman rank), M4 (outlier ratio) of VQEG Phase I MOS.

Keywords HVS, SSIM, CSF, mask, video quality assessment

1 引言

随着多媒体技术的发展,数字视频质量评价成为图像信息工程技术研究的热点之一。目前,常用的视频质量评价方法分为两类:主观评价和客观评价。主观评价就是以人作为图像的观察者,对图像的优劣做出主观评定。其中,影响较为重大的标准

有:国际无线电咨询委员会(CCIR)推荐的CCIR500五级质量评价标准^[1]、国际电讯联盟(ITU)推荐的ITU-R BT. 500-11主观质量评价标准^[2]以及2004年,中国审核通过的《彩色电视图像质量主观评价方法》(GB 7401-87)。其中后者(GB 7401-87)给出了电视图像主观质量的5级评分标准,并对伴音图像的质量评价进行了规定。上述主观视频质量评价方法虽然准确有效,但受不同观察者背景知识、观测

基金项目:国家自然科学基金项目(60665001,60963011,60963012);江西省教育厅重点科技项目(GJJ09021);江西省研究生创新专项奖金资助项目(YC08A071)

收稿日期:2009-06-30;**改回日期**:2009-07-24

第一作者简介:王正友(1972~),男,教授,硕士生导师。2002年于中国矿业大学获电力电子与电力传动博士学位。主要研究方向为数字视频图像质量评价、信息融合与数据挖掘等。E-mail:wangzhengyou@jxufe.edu.cn

动机、观测环境等因素影响,往往导致结果不准确。另外,整个评价过程耗时多、费用高,不具备可移植性。

客观评价就是利用一定的数学模型对影响视频质量的各种因素进行建模,最终由计算机根据该模型给出客观评分。客观评价根据对原始图像的依赖程度可以分为^[3]:全参考质量评价、无参考质量评价、弱参考质量评价。传统的客观评价方法主要有基于统计学理论的峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)等评价方法。这些方法将构成图像的像素点看成相互独立的个体,忽略了像素间的局部相关性;同时,这些方法忽略了人眼的视觉特性(HVS),最终将导致评价结果与主客观评价不一致,影响评价的准确性。

本文提出一种结合感知与融合的视频质量评价新方法,该方法通过简单建模,仿真了人眼的几个基本视觉特性,对比敏感度、多通道特性、视觉掩盖、视觉非线性等,并将其融合进入结构相似(SSIM)算法中,使得算法同时具备 SSIM 算法简单、快速的特点,又满足了人眼的视觉特性。实验结果表明,该算法较 SSIM 和传统客观评价方法具有更好的主客观一致性。

2 人眼视觉系统(HVS)

近年来,随着对人眼视觉特性(HVS)研究的不断深入,人们对客观质量评价方法的研究也由传统的误差统计方法转到考虑视觉感知特性的方法上来,基于人眼基本视觉特性的感知视频质量评价模型层出不穷。研究发现,人眼的许多视觉特性都与视频质量评价紧密相关^[4],目前,研究较多的几个 HVS 特性有对比敏感度、多通道结构、掩盖效应、视觉非线性定律等。由于 HVS 是一个非常复杂的系统,目前还无法准确仿真出 HVS 的视觉模型,只能通过一些简单的简化数学模型近似模拟人眼视觉特性。

2.1 对比敏感度(CSF)函数

对比敏感度又称为人眼视觉系统空间调制转移函数(modulate transform function),用来表示人眼视觉与对比度之间的关系。虽然不同实验所得的 CSF 函数形式各异,但基本上都认为 HVS 的对比度敏感性是空间频率的函数,且具有带通滤波器性质,其对高低频段敏感度下降。Mannos 等人通过大量实验

给出了一种常用的 CSF 函数表达式^[5-6]:

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

式中,空间频率 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ (周期/度); f_x, f_y 分别表示水平和垂直方向的空间频率,具体定义如下:

$$f_x = \sqrt{\frac{1}{M(N-1)} \sum_{m=1}^M \sum_{n=2}^N (f_{m,n} - f_{m,n-1})^2},$$

$$f_y = \sqrt{\frac{1}{(M-1)N} \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^N (f_{m,n} - f_{m-1,n})^2} \quad (2)$$

图 1 给出了归一化后的 CSF 函数响应曲线。图中横坐标为图像的空间频率,纵坐标为 CSF 函数值,由曲线特性可知视觉的对比度随空间频率呈现出带通特性。其中,在区间 $[0.025, 0.25]$ 中,对比度最为敏感,而在高频和低频两端对比度敏感性迅速下降。

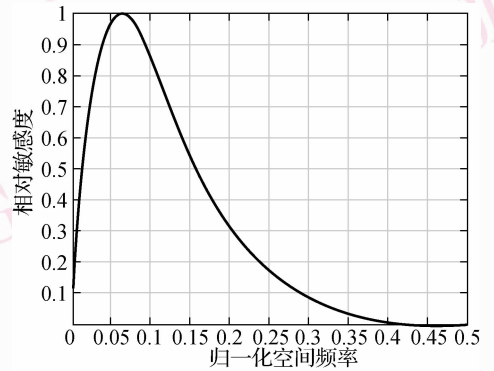


图 1 归一化的 CSF 曲线

Fig. 1 Contrast sensitivity function (CSF)

2.2 多通道特性

视觉皮层细胞对不同的视觉信息或激励如颜色、频率和方向等具有不同的敏感性。而目标识别、掩盖与自适应的研究认为,所有这些特征激励在人的视觉系统中,在不同通道进行处理,这是早期的多通道理论。而后进一步的理论得出,视觉机制的多通道之间并不是彼此孤立的,而是相互作用、判决与相互影响,以产生最佳视觉。对于静止灰度图像来说,图像的多通道特性可以由它的空间频率和方向性来表征,只要用足够多的适当的调谐部件,图像在视觉皮层的整个方向带和频率带都可以被完全覆盖,即可以完全模拟视觉系统的多通道^[7]。本文利用小波的多分辨率特性结合图像空间频率特性可以近似模拟出人眼的多通道结构,进而改进视频的质量评价模型。

2.3 视觉掩盖效应

掩盖效应^[8]是指当存在多个激励时,激励间的相互干扰导致视觉阈值发生变化的现象。人的视觉系统是一个多通道结构,把输入的图像分解成不同的感觉分量。每个感觉通道都有其自己的阈值(称之为视觉阈值)。视觉阈值的存在使低于阈值的损伤不被觉察;而掩盖的存在则使视觉阈值变化提升,从而能够容纳更多无法察觉的损伤。只要人眼察觉不出损伤,其造成的影响事实上也可以忽略不计。典型的掩盖效应主要有:对比掩盖、纹理掩盖、运动掩盖、切换掩盖等。

2.4 视觉非线性定理

对于感觉器官来说,刺激强度 I 产生 ΔI 的变化,而且这个变换刚刚能辨别出来,那么对应的感觉有下式成立

$$\Delta s = k \frac{\Delta I}{I} \quad (3)$$

两边积分:

$$S = k \log \frac{I}{I_0} \quad (4)$$

式(4)中 I_0 为绝对门限值,这个式子说明感觉量与刺激强度的对数成比例,该等式称为韦伯-费克纳法则,即视觉非线性定理。如图 2 所示,图 2(b) 是对图 2(a) 进行了以自然对数为底的客观亮度变换,在将亮度值放大 50 倍后的结果,它反映的是视觉皮层对图像初级处理的映像。

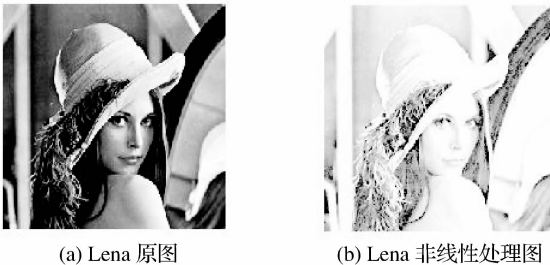


图 2 视觉非线性对比图

Fig. 2 Comparison after visual nonlinear transform

3 基于感知与融合的质量评价方法

3.1 结构相似(SSIM)算法

Wang 等提出了一种基于结构失真的视频质量评价方法^[9],该方法的评价依据是:HVS 高度适合于提取视觉场景中的结构信息,从而测量结构信息

的改变与感知图像质量的变化非常接近。因此,如果结构相似则认为前后图像质量变化不大,即质量损失不大。算法从参考图像和失真图像的亮度、对比度和结构相似性等三方面进行比较,构造出相应的模型,最后将 3 个模型综合成一个 SSIM 值。基本思想如下:

对于参考视频帧 $\mathbf{X} \{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 和失真视频帧 $\mathbf{Y} \{y_i | i = 1, 2, \dots, N\}$, 设 $l(x, y)$ 为亮度比较函数, $c(x, y)$ 为对比度比较函数, $s(x, y)$ 为结构相似性比较函数,则有:

$$\begin{aligned} l(x, y) &= \frac{2\mu_x\mu_y + c_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1} \\ c(x, y) &= \frac{2\sigma_x\sigma_y + c_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2} \\ s(x, y) &= \frac{\sigma_{xy} + c_3}{\sigma_x\sigma_y + c_3} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\mu_x = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ 和 $\mu_y = \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ 表示参考

帧和失真帧的平均亮度, $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$

和 $\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$ 为参考帧和失真帧的

标准差, $\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ 表示二者的

协方差, c_1, c_2, c_3 为很小的常数。

当 $(\mu_x^2 + \mu_y^2)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) \neq 0$ 时, \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 的结构相似量被定义为

$$\begin{aligned} S(x, y) &= l(x, y) \cdot c(x, y) \cdot s(x, y) \\ &= \frac{(2\mu_x\mu_y + c'_1)(2\sigma_{xy} + c'_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c'_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c'_2)} \end{aligned} \quad (6)$$

将 SSIM 算法应用于视频质量评价,则有每一帧的结构相似量为

$$SSIM_{ij} = W_Y SSIM_{ij}^Y + W_{C_b} SSIM_{ij}^{C_b} + W_{C_r} SSIM_{ij}^{C_r} \quad (7)$$

式中, Y, C_b, C_r 分别为每帧的亮度分量和两个色差分量; W 为对应分量的权系数,实验结果得出, $W_Y = 0.8, W_{C_b} = 0.1, W_{C_r} = 0.1$ 为较优权值。

整个视频的结构相似量为

$$Q_i = \frac{\sum_{j=1}^{R_s} w_{ij} SSIM_{ij}}{\sum_{j=1}^{R_s} w_{ij}} \quad (8)$$

式中, R_s 为每帧的分块数目。

3.2 基于感知与融合的视频质量评价方法

由于考虑了图像的空间结构信息,SSIM 算法比传统 PSNR 算法在主客观一致性方面有了较大提高。然而,该算法只是简单模拟了人的视觉场景的空间结构分布,HVS 的很多特性还不能从算法中得到充分体现,针对这些不足,本文提出了结合感知与融合的、改进 SSIM 视频质量评价方法,该方法利用了 HVS 的几个特性,如对比敏感度、多通道结构、掩盖效应、视觉非线性定律等,对 SSIM 算法进行改进,具体实施步骤如图 3 所示:

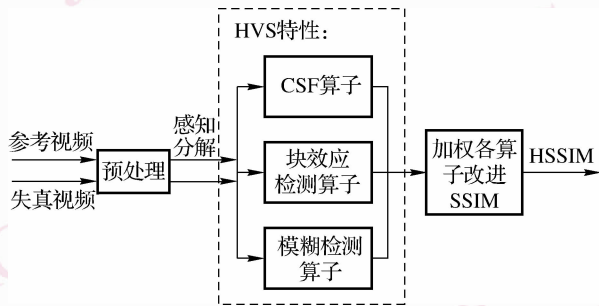


图 3 基于 HVS 的 SSIM 视频质量评价改进算法流程图

Fig. 3 HSSIM index flow which is an improved SSIM based on HVS

(1) SSIM 算法的修正。

由 3.1 得知,结构相似算法中, $l(x, y)$ 和 $c(x, y)$ 的取值范围为 $[0, 1]$, 而 $s(x, y)$ 的值域为 $[-1, 1]$, 这对于后续的各算子融合操作将产生一定影响。如图 4 所示,图 4(b) 为图 4(a) 的负对比图,从图像信息表达的角度看,图 4(b) 保留了图 4(a) 所有的结构信息,可以认为这两幅图像所表达的结构信息完全相同,不同的只是亮度和对比度信息。因此,可以对 SSIM 算法中的对比度分量 $s(x, y)$ 进行修正,具体定义如下:

$$s'(x, y) = \frac{|\sigma_{xy}| + c}{\sigma_x \sigma_y + c} \quad (9)$$

式中, c 为一个很小的常数。这样,就可以将 $s(x, y)$ 的值域调整为 $[0, 1]$, 进一步规范 SSIM 的值域。

(2) 多通道结构的仿真。

小波具有多分辨率特性,本文将小波分解应用于仿真 HVS 的多通道结构。在做评价前,需要先将参考视频和失真视频进行必要预处理,其中一个重要环节就是对每一视频帧分离出分量 Y, U, V 。然而,每帧分量 Y 是一张灰度图像,它的多通道特性



(a) 原图

(b) 负对比图

图 4 结构负相关的图像结构信息比较

Fig. 4 Comparison of the structural information of images

主要由空间频率和方向来表征,这一性质正好与小波的多分辨率特性非常相似,利用这种相关性,能够很好模拟出 HVS 的多通道结构。

(3) CSF 加权。

根据 2.1 得知,CSF 函数具有带通特性,利用小波的多分辨率性质,对小波分解后不同空间频率的小波系数进行加权,取相应频带的 CSF 峰值作为权值。将参考视频帧和失真视频帧分别进行小波分解,分别得到相应子带的 CSF 权值。图 5 给出了经过 3 级小波分解后的不同子带的权值分布。将第 1 级小波分解后的高频子带权值归一,其他各级子带权值与第 1 级高频子带权值相比,作为相应子带最终 CSF 权值。

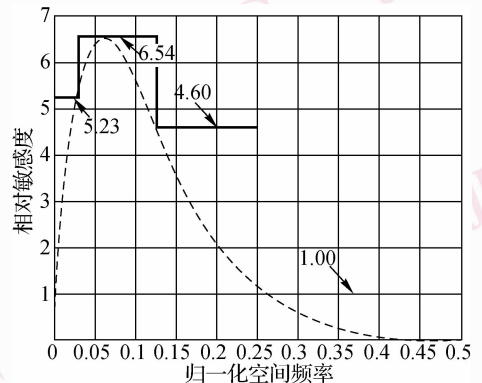


图 5 3 级小波分解后不同子带 CSF 权值

Fig. 5 The CSF weight of different subbands with 3-level wavelet decomposition

(4) 块效应检测。

2008 年初,Symmetricom 公司进行了一次有关视频质量市场调查,报告显示,在各类失真类型中,用户最为关注的相关指标包括:块效应,占 15%;视频噪声,占 11%;视频模糊,占 9%;视频颜色问题,

占 6%^[10]。由此可见,块效应的检测对于客观视频质量评价是相当必要的。为此,本文提出一种块效应检测算法,基本思想如下:

常见的几种视频编码方式中,如:MPEGX 和 H.26X 等,均采取的是 8×8 分块方式,于是本文算法中针对 8×8 块进行检测。如图 6 所示,分别对参考视频帧和失真视频帧做 8×8 分块,并且计算其水平和垂直的块边缘的平滑度,具体表达如下:

$$Hor_Smooth = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^7 abs(x_i - y_i) / N \quad (10)$$

$$Ver_Smooth = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=0}^7 abs(x_i - y_i) / M \quad (11)$$

整幅图像的平滑度可以表示为

$$Block_Smooth = w_h \times Hor_Smooth + w_v \times Ver_Smooth \quad (12)$$

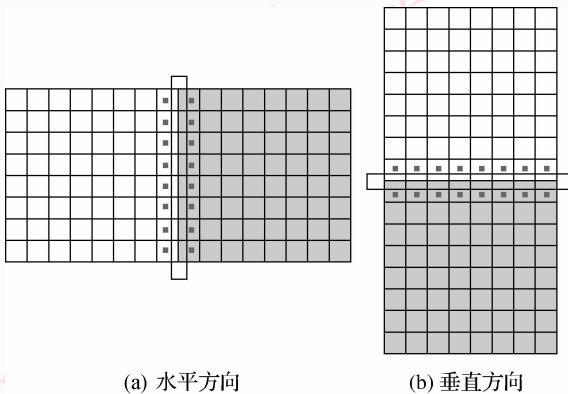
式中, $w_h + w_v = 1$, w_h 和 w_v 分别表示水平和垂直平滑度的权值,实验证实, $w_h = w_v = 0.5$ 为一个较为合理的值。

参考视频帧和失真视频帧之间的块效应检测权值定义如下:

$$w_{Block_smooth} = \begin{cases} 1 & |BS_1 - BS_2| < T \\ 1 - (BS_1 - BS_2)^2 / BS_1^2 & |BS_1 - BS_2| \geq T \end{cases} \quad (13)$$

其中, T 为平滑度阈值; BS 为图像的平滑度值。根据视觉掩盖特性,一般认为,对于运动速率较快的视频,对块的失真具有一定的掩盖效应。据此,对块平滑度权值做出以下调整:

$$w_{Block_Smooth} = \begin{cases} (1 - T_2) + w_{Block_Smooth} & v < T_1 \ \&\& w_{Block_Smooth} < T_2 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$



(a) 水平方向

(b) 垂直方向

图 6 块效应检测模板

Fig. 6 Difference detection between blocks

式中, v 表示该帧运动矢量, T_1 是一个运动速率阈值, T_2 为块平滑度阈值。

(5) 模糊检测。

SSIM 方法相对于 PSNR 方法更符合人类视觉系统的特性,能够更加客观地评价各种失真图像,但是对于严重模糊的失真图像,SSIM 评价的结果却很不合理。采用 Live Database Release 2^[11] 数据库下的 Gaussian_Blur 子库中的 Caps. bmp 进行实验。如图 7 所示,图 7(b) 是对参考图像进行亮度增强 40 后得到的失真图像;图 7(c) 是对参考图像进行 Gaussian 模糊后得到的失真图像。分别计算这两幅失真图像的 PSNR 和 SSIM 值,图 7(b) 中,PSNR = 15.77, SSIM = 0.944, HSSIM = 0.888;图 7(c) 中,PSNR = 26.65, SSIM = 0.951, HSSIM = 0.476。实验结果发现,与人的主观视觉评价结果有很大的偏差。针对该算法这一缺陷,本文提出一种基于模糊掩盖的 SSIM 算法改进。由文献[12]得知,图像的边缘、纹理、平坦区域对图像质量的影响是依次降低的,这三个区域像素的梯度值也存在依次降低的特点。因此,用梯度作为像素的权值能够更合理的反映图像的质量,本文算法中提出梯度加权思想对 SSIM 算法进行改进,具体改进如下:

对于图像每个像素 $f(i, j)$, 计算其 4 个方向的梯度:

$$\begin{aligned} grad_0(i, j) &= |f(i, j) - f(i, j + 1)| \\ grad_{90}(i, j) &= |f(i, j) - f(i + 1, j)| \\ grad_{180}(i, j) &= |f(i, j) - f(i, j - 1)| \\ grad_{270}(i, j) &= |f(i, j) - f(i - 1, j)| \end{aligned} \quad (15)$$

取 4 个方向的梯度均值:

$$grad_{mean}(i, j) = mean(grad_0, grad_{90}, grad_{180}, grad_{270}) \quad (16)$$

将每个图像块的平均梯度值作为该图像梯度加权值,对 SSIM 进行以下改进,具体表达如下:

$$GSSIM(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^s grad_{mean} \times SSIM(x, y)}{\sum_{i=1}^s grad_{mean}} \quad (17)$$

其中, s 为各子带抽样窗口数目。

基于掩盖的 SSIM 改进算法,能够更有效地提高 SSIM 在模糊检测上的准确性,使得评价价值更具有主客观一致性。如图 7 所示,改进后的算法的 HSSIM 值分别为:图 7(b) HSSIM = 0.888;图 7(c) HSSIM = 0.476,实验结果与主观评价相一致。



图 7 模糊失真下,HSSIM 与其他算法的比较

Fig.7 Visual comparison of blurred image with HSSIM and SSIM, PSNR

(6)信息融合。

根据 HVS 的几个基本特性,对 SSIM 进行算法更新,提出一种新的基于 HVS 的 SSIM 视频质量评价方法,该算法具备了 SSIM 的优势,同时又融合了视觉对比敏感度、多通道、模糊掩盖、块效应掩盖等基本特性,具体表达如下:

$$HSSIM = w_{cf} \times SSIM + w_{Block} \times SSIM + w_{blue} \times GSSIM \quad (18)$$

4 实验结果与分析

本文实验采取了 VQEG Phase I FR-TV 测试数据集上公共视频库进行实验(其中,525 线、625 线参考视频各 10 组;每个参考视频提供 16 个不同失真的失真视频,共计 320 个失真视频)。并且采用 VQEG Phase I 测试报告中提出的方法对模型进行量化测试。首先,根据一个逻辑函数对模型值和 VQEG 提供主观测试值(MOS)进行非线性拟合;然后,通过 3 个量化指标作为评价模型的依据^[13]:

- (1)客观评分和主观评分经过非线性回归分析后的相关系数;
- (2)客观评分和主观评分之间的斯皮尔曼相关系数;
- (3)经过非线性拟合预测后处于误差大于标准

差 2 倍的点的比例(outline-ratio)。

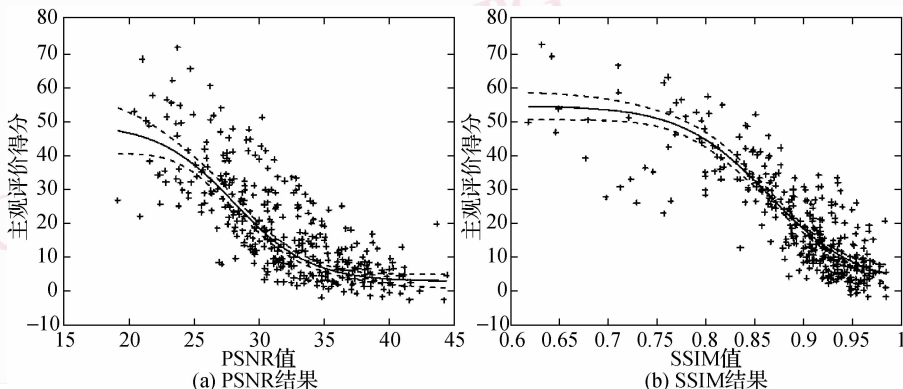
其中,指标(1)是用于检测模型预测的准确性;指标(2)用于检测模型预测的单调性;指标(3)用于检测模型预测的稳定性。各指标的具体描述在 VQEG Phase I 测试报告中提供了详细描述。表 1 给出了本文的改进算法与相关算法的比较情况:

表 1 HSSIM 算法在 VQEG Phase I 测试集上的实验结果

Tab.1 Performance comparison used HSSIM and other models on VQEG Phase I

模型	非线性回归后相关系数	斯皮尔曼相关系数	线外率(outline-ratio)
PSNR	0.779	0.786	0.678
KPN/Swisscom CT	0.827	0.803	0.578
SSIM	0.820	0.788	0.597
本文算法 HSSIM	0.861	0.857	0.588

图 8 分别给出了 PSNR 模型、KPN/Swisscom CT 模型、SSIM 模型和本文基于 HVS 的 SSIM 模型,在 VQEG Phase I 测试集上所有测试视频序列的主观评价得分(MOS)和客观评价得分对比的散点图。散点图显示,本文算法的结果要优于其他模型;另一方面,表 1 也表明本文提出的算法有效地提高了视频客观评价与主观评价的相关度。



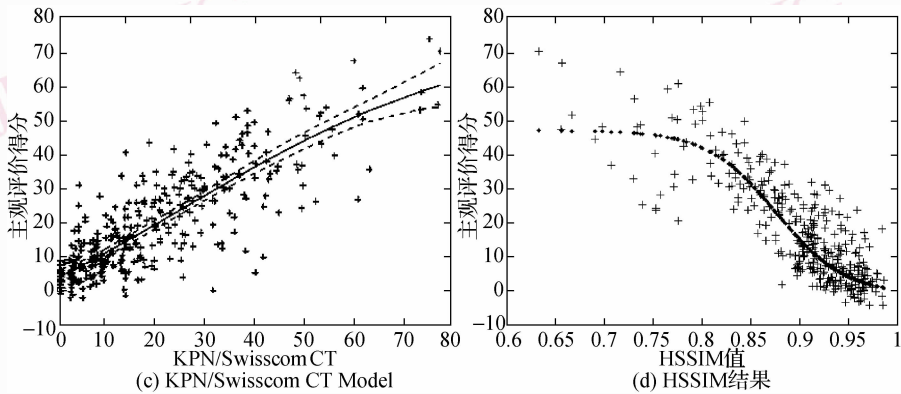


图 8 各种算法的结果散点图

Fig. 8 Scatterplot comparison of different models on VQEG Phase I test dataset

5 结 论

本文提出一种新的基于 HVS 的视频客观质量评价方法,有效地将人眼几个基本视觉特性融合进 SSIM 结构相似算法中,既保证 SSIM 算法简单、高效,又满足了人眼视觉特性。实验结果表明,该方法能较好地反映人的主观感受,效果优于传统的其他视频质量评价方法。

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;又因为随着视频媒体技术的不断完善和发展,多数情况下对视频媒体进行评价都是基于无参考视频基础之上,如何将 HVS 的特性应用于无参考视频质量评价,这将成为今后研究的趋势,有待于进一步研究。

参考文献 (References)

- Comes S, Macqb M. Human visual quality criterion[A]. In: Proceedings of SPIE[C], Lausanne, Switzerland, 1990, **1360**:2-13.
- ITU-R Rec. BT. 500-11, Methodology for the subjective assessment of the quality of television picture[S]. 2002.
- Wang Z, Sheikh H R, Bovik A C. Objective Video Quality Assessment, The Handbook of Video Databases: Design and Applications [M]. Austin, USA: CRC Press, 2003:1041-1078.
- Wandell B A. Foundations of Vision [M]. Sunderland, England: Sinauer Press, 1995: 1-10.
- 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.

- Wang Zheng-you, Huang Long-hua, Ye Xiao-qin, *et al.* A new image quality assessment method based on contrast sensitivity [A]. In: Proceedings of The 13th the National Conference on Image and Graphics[C], Nanjing, China, 2006:74-78. [王正友, 黄隆华, 叶小琴等. 基于对于比敏感度的图像结构失真测量[A]. 第十三届全国图象图形学学术会议 (NCIG2006) [C], 南京, 中国, 2006: 74-78.]
- Wei Chong-kui, Cheng Li-zhi. An image quality measure scheme in the perceptual field via masking[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, **9**(2):690-696. [魏崇奎, 成礼智. 一种基于掩盖效应的感知域图像质量评价方法 [J]. 中国图象图形学报, 2004, **9**(2): 690-696.]
- Wu H R, Rao K R. Digital video image quality and perceptual coding [M]. Michigan, USA: CRC Press, 2005: 23-25.
- Wang Z, Lu L G, Bovik A C. Video quality assessment based on structural distortion measurement [J]. Signal Processing: Image communication, 2004, **19**(2): 121-132.
- 2007 IPTV Video Quality Study [EB/OL]. <http://www.symmetric.com/industry-solutions/cable-operators/> [2009-06-10].
- LIVE Image Quality Assessment Database Release2 [EB/OL]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality> 2009-06-10.
- Li J L, Chen G, Chi Z R, *et al.* Image coding quality assessment using fuzzy integrals with a three-component image model [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2004, **12**(1):99-106.
- Lu Z K, Lin W S, Yang X K, *et al.* Modeling visual attention and motion effect for visual quqlity evaluation [A]. In: Proceedings of 2004 International Symposium on Intelligent Multimedia, Video and Speech Processing [C], Hong Kong, China, 2004:20-22.