

基于 PSNR 与 SSIM 联合的图像质量评价模型

佟雨兵 张其善 祁云平

(北京航空航天大学电子信息工程学院 202 教研室, 北京 100083)

摘要 峰值信噪比(PSNR)是常用的衡量信号失真的指标,但是 PSNR 不涉及信号自身内容的特征,对某些图像或视频序列进行质量评价时会与主观感知的质量产生较大的偏差。结构相似法(SSIM(structural similarity))是一种基于结构信息衡量原始信号与处理后信号之间相似程度的方法,计算简单、与主观质量评价关联性较强。为此提出将 PSNR 和 SSIM 联合起来建立图像质量评价模型,先利用聚类分析法根据 PSNR 值和 SSIM 输出值对样本图像进行规整聚类,然后对不同类别的图像运用不同的质量评价规则,评价规则由二元回归分析确定,待测图像通过支持向量机(support vector machines, SVM)分类器实现分类。实验结果表明,该模型的输出能有效地反映图像的主观质量。

关键词 聚类分析 质量评价 支持向量机 结构相似法(SSIM) 峰值信噪比(PSNR)

中图法分类号:TN91.21 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2006)12-1758-06

Image Quality Assessing by Combining PSNR with SSIM

TONG Yu-bing, ZHANG Qi-shan, QI Yun-ping

(Department of Electronic Information Engineering; Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract PSNR(peak signal noise ratio) is the common criterion used to assess the distortion of signal. But big error maybe generated with PSNR which does not involve the content of signal when used to assess image quality. SSIM(structural similarity) is used to evaluate the similarity between the source signal and the processed signal. SSIM is simple and well correlated with subject evaluation. This paper, PSNR and SSIM are combined to set up the image quality assessing model. Cluster analysis is used to make the samples data cluster into different kinds. Support Vector Machines Classifier is used to class any image into different kinds according to PSNR and SSIM. The quality of the image with different kinds is assessed with different strategy. The results from our test show the model output can reflect the image subjective quality effectively.

Keywords cluster analysis, quality assessing, support vector machines, SSIM(structural similarity), PSNR(peak signal noise ratio)

1 引言

目前绝大部分图像压缩算法都采用有损压缩方法去除视觉冗余信息,压缩后牺牲了信源的部分信息。经过图像压缩算法及压缩设备压缩后的图像质量直接反应了该算法和设备的性能,因此,图像质量评价成为一个值得关注的问题。同时,图像质量评价方法也可以应用于增强图像质量、提高图像编解码算法的容错性等方面。目前,国外一些专门机构和企业

如 VQEG(Video Quality Evaluation Group)^[1]、IBM^[2]、韩国 SK 电信集团^[3]等就图像与视频质量评价问题展开研究,国内,天津大学、北京大学等科研院所已经从事该领域研究并取得了部分成果^[3,4]。但总体来讲,目前图像与视频质量评价方法并不成熟,还有许多未知问题等待研究。

图像质量评价从方法上可以分为主观评价方法和客观评价方法,前者凭感知者主观感受评价对象的质量,后者依据模型给出的量化指标或参数衡量图像质量。目前的研究以后者为主,研究目标是使

得质量评价模型准确地反映人眼视觉感知的主观质量。除 PSNR 和 SSIM 方法外,多数图像质量评价基于人眼视觉系统 HVS(human visual system)的生理特征来建模型,如 Daly 的视觉差异预测 VDP(visible difference predictor)模型^[5]、Teo 和 Heeger 的矩阵模型^[6]、Watson 的 DCT 矩阵模型^[7]、Bradley 的小波域模型 WVDP^[8]等。HVS 是一个高度复杂、高度非线性的系统,且当前对 HVS 的认知仍然有限,故只能依据一定的假设前提进行。如一般假定原始图像质量是完美的且 Weber 定律和点扩散 PSF(point spread function)模型始终成立,假定 HVS 的多通道响应可以通过线性离散集合来模拟,假定通道分解是无损的或无损于视觉的,通道变换后信号仍然保持了质量评价的绝大部分信息。

峰值信噪比基于图像像素灰度值进行统计和平均计算,是常用的衡量信号失真的指标。尽管对部分图像或视频质量评价时可能与主观感知的质量产生较大的偏差,但 PSNR 对于多数图像质量评价仍是有效的;VQEG 已经评价了 10 种质量评价模型,最终没有确定出一种模型作为标准模型。主要原因是从统计的角度来讲,这些模型取得的结果与 PSNR 没有显著区别^[9]。因此,认为 PSNR 仍可以作为图像质量评价一个有意义的参考指标,而目前多数图像质量评价方法完全弃用了 PSNR。Wang 自 2002 年起提出并发展了一种基于结构失真的视频质量客观评价方法——SSIM,该方法对静态图像质量评价取得了较好的效果,颇具潜力^[10-11]。本文将 PSNR 和 SSIM 联合起来建立图像质量评价模型,按照 PSNR 值和 SSIM 输出值对数据库中的样本数据进行聚类分析,自动实现样本数据的集合划分,不同类别的图像采用不同的质量评价规则,聚类的结果作为支持向量机分类器的训练数据,而后由支持向量机 SVM(support vector machines)分类器实现对任一帧待评价图像的分类并给出对应的客观评价。采用美国德州大学 UTEXAS 媒体实验室的数据库进行了实验,实验结果证明,相比 PSNR 或 SSIM 衡量图像质量,该模型的输出能更有效地反映图像的主观质量。

2 PSNR 与 SSIM 图像质量评价分析

2.1 PSNR

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{\alpha_{\max}^2}{MSE} \right) \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [a(i, j) - \hat{a}(i, j)]^2 \quad (2)$$

式中, MSE(mean square error)为均方误差, $a(i, j)$ 和 $\hat{a}(i, j)$ 分别为原始图像与重建图像中对应的灰度值或色彩值, MN 为 $M \times N$ 图像的总像素数, $\alpha_{\max} = 2^l - 1$ l 为色彩深度即表示一个像素点占用的 2 进制位数,常取 $l = 8$ 。

PSNR 和 MSE 基于像素灰度值进行统计和平均计算,完全忽视了图像内容对人眼的影响,因而不能完全反映出图像的质量。图 1 中,信号 1 和信号 2 两个失真信号分别与原始信号进行均方差计算,其结果是相同的,但在人眼看来,信号 1 要比信号 2 更接近原始信号。

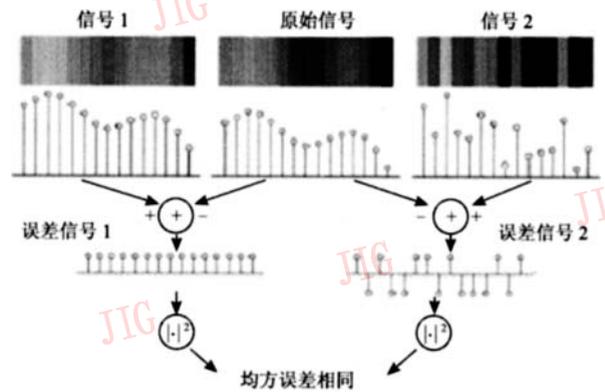


图 1 不同失真信号的均方误差计算

Fig. 1 MSE of different signals

2.2 基于结构失真的图像质量评价(SSIM)

基于结构失真进行视频质量客观评价的依据是 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。结构相似法提供了与感知图像失真非常接近的一种客观评价方法。假设原图像用图像空间中的向量来表示,则相对原图像的任何失真图像可表示为在原图像向量上添加失真向量,当这些失真图像向量的长度和原图像向量的长度相等时,可将它们定义在图像空间中以 MSE 的值为半径的球面上。SSIM 法的实现框图如图 2 所示,其中,信号 x, y 分别是原图像信号和失真图像信号。

结构相似法的核心函数定义为

$$S(x, y) = f(\mu(x, y), \sigma(x, y), \gamma(x, y)) \quad (3)$$

$S(x, y)$ 描述失真信号与原始信号之间相似性,作为失真度量 $\mu(x, y)$ 是亮度比较函数, $\sigma(x, y)$ 是对比

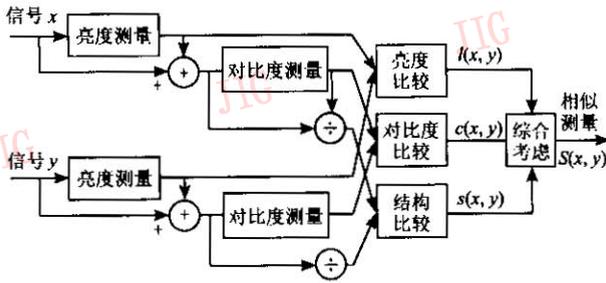


图 2 SSIM 实现框图

Fig. 2 The framework of SSIM

度比较函数 $l(x, y)$ 是结构比较函数, $f(\cdot)$ 是整合函数, 3 个函数相对独立^[14]。3 个比较函数定义如下:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, C_1 = (K_1L)^2 \quad (4)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, C_2 = (K_2L)^2 \quad (5)$$

$$s(x, y) = \frac{2\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (6)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad (7)$$

其中 L 为像素值的动态变化, $K_1, K_2 \ll 1$, μ_x, μ_y 是亮度均值作为亮度估计, σ_x, σ_y 是标准方差作为对比度估计, 结合式(3)、式(4)和式(5)定义信号 x 和 y 之间的 SSIM 指标为

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma \quad (8)$$

其中 $\alpha, \beta, \gamma > 0$, 这 3 个参量对亮度、对比度和结构信息进行权值调整。

根据 Wang 的实验结果, SSIM 能取得优于 PSNR 的质量评价结果。但 SSIM 并不能完全解决 PSNR 的问题, 对于 SSIM 方法, 同样有可能存在两个信号, 二者相对同一个原始信号具有相同的结构相似值, 但这两个信号的主观质量仍有所差别。另外, PSNR 或 SSIM 与主观评价的关联图中都存在一些“野点”, 这些点对应的 PSNR 或 SSIM 与主观评价价值相差较大。即对于“野点”可以通过 PSNR 或 SSIM 与归一化的主观评价价值之间的距离来定义, 该距离大于某一门限则可以将其定为“野点”。如能较好地校正这些“野点”, 调整其对应的客观评价价值, 则能提高质量评价模型输出与主观评价的关联。因此, 论文联合 PSNR 和 SSIM, 通过聚类方法使得图像样本集中并归为不同的类, 对不同类采用不同

评价策略以降低“野点”对质量评价模型的影响, 提高质量评价模型的性能。

3 采用聚类分析与 SVM 分类法建模

将 PSNR 与 SSIM 联合起来建立图像质量评价模型, 操作流程如图 3 所示。

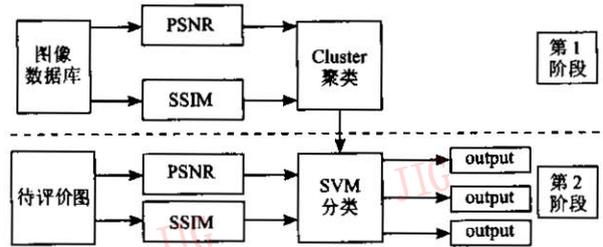


图 3 采用聚类分析与 SVM 分类的建模操作流程

Fig. 3 Image quality assessing with clustering and SVM classifying

整个流程可以分为两个阶段:

第 1 阶段: 利用图像数据库中的部分图像作样本, 计算其 PSNR 与 SSIM 输出值, 根据这两个指标对样本进行聚类分析, 聚类结果送入第 2 阶段, 作为 SVM 分类器的学习样本;

第 2 阶段: 根据聚类结果确定出 SVM 分类器; 对每一幅待评价图像给出其类别, 不同类图像采用不同的质量评价策略; 分类策略基于二元线性回归分析确定。

3.1 样本数据的聚类分析

聚类分析用于事先没有分类而将样本聚集归类的问题。采用系统聚类分析法, 先将一定数量的样本各自看成一类, 然后根据样本的亲疏程度, 将亲疏程度最高的两类进行合并, 考虑合并后的类与其他类之间的亲疏程度, 再进行合并, 重复直到将所有样本合并为一类。

样本数据间的亲疏程度采用距离来衡量, 文中实验部分分别采用欧氏距离和 Minkowski 距离进行距离计算, 实现类内距离最小。聚类时采用重心法实现, 重心法聚类的重心定义为某类样本的均值。即假设类 G_p 和 G_q 合并成 G_r 后, 它们的样本数目分别是 n_p, n_q 和 $n_r = n_p + n_q$, 则 G_r 与其他类 G_i 之间的距离为

$$D_{ir}^2 = \frac{n_p}{n_r} D_{ip}^2 + \frac{n_q}{n_r} D_{iq}^2 - \frac{n_p}{n_r} \frac{n_q}{n_r} D_{pq}^2 \quad (9)$$

D_{ip}, D_{iq}, D_{pq} 分别为 G_i, G_p 和 G_q 之间的距离。

3.2 SVM 分类器

为了解决模式识别中的两类线性不可分问题, Vapnik 引入了核函数理论, 将低维的输入空间数据通过非线性映射函数映射到高维特征空间, 把输入空间中线性不可分问题转化为特征空间中的线性可分问题, 这种非线性映射函数的内积称为核函数。基于核函数和训练样本集可以完全刻画出支持向量机。支持向量机可用于模式识别、密度函数估计、回归估计(函数逼近)等方面, 已经成为当前新的研究热点^[12, 13]。

概括地讲, 支持向量机就是先通过用内积函数定义的非线性变换将输入空间变换到一个高维空间, 在这个空间中求广义最优分类面 $f(x; w) = (\omega \cdot x) + b$, 使得两类样本的间隔最大。这等价于最小化 $\frac{1}{2} \|w\|^2$, 通过引入松弛变量及对偶原理, 得到回归函数

$$\begin{aligned} f(x; \alpha) &= (\omega \cdot x) + b \\ &= \sum_{i=1}^N (a_i^* - a_i) \chi(x_i \cdot x) + b \\ &= \sum_{i=1}^N (a_i^* - a_i) K(x, x_i) + b \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $K(\cdot, \cdot) = (x_i \cdot x)$, 称为核函数, b 是一个常数而且对于一般的容许的核函数(带有纯数值项), 该项可以省略; 系数 a, a^* 是最大化下列函数的参数,

$$\begin{aligned} \max W(\alpha, \alpha^*) &= \sum_{i=1}^N y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) - \varepsilon \sum_{i=1}^N (\alpha_i + \alpha_i^*) - \\ &\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) \chi (\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^N \alpha_i^* = \sum_{i=1}^N \alpha_i \\ 0 \leq \alpha_i^* \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1 \\ \alpha_i \cdot \alpha_i^* = 0 \end{cases}$$

这是一个二次规划问题(QP, quadratic problem), 能收敛到最优解^[16]。求解式(11)仅有部分系数非零, 非零系数对应的输入量 x_i 称为支持向量, 支持向量位于分类边界或分类面上。

SVM 分类是一种基于监督学习的方法, 其强大的分类能力保证了类间距离最大。将聚类分析的结果供给 SVM 分类器, 即将样本按照 PSNR 和 SSIM 指标聚类且按序重排后, 作为 SVM 分类器的训练数据, 通过训练获得 SVM 分类器模型。基于上述聚类分析和 SVM 分类器的属性, 使得样本数据的类内距

离最小、类间距离最大。

3.3 基于线性回归分析的不同分类策略的确定

回归分析用于确定变量之间的密切关系。线性回归假设因变量与自变量之间为线性关系, 用一定的线性回归模型来拟合因变量和自变量的数据, 并通过确定模型参数来得到回归方程。本文依据 PSNR 和 SSIM 将样本聚为 3 类集合, 通过二元回归分析对上文聚类分析后的各类样本集确定出不同的线性回归方程, 即

$$y_{\text{output}_i} = b_{0_i} + b_1 x_{\text{PSNR}_i} + b_2 x_{\text{SSIM}_i} + b_3 x_{\text{PSNR}_i}^2 + b_4 x_{\text{SSIM}_i}^2 + b_5 x_{\text{PSNR}_i} \cdot x_{\text{SSIM}_i}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

其中 i 为分类数目, 系数与常数利用最小二乘法确定。

4 仿真实验及结果分析

联合 PSNR 和 SSIM 建立图像质量评价模型, 利用美国 UTEXAS 大学的 Image Database 的数据进行仿真实验, 该库给出了参考图像、压缩后的图像以及压缩后图像即失真图像的主观打分值^[14]。主观评价对图像质量采用 5 级打分, 由 14 个观测者对同一幅图像给出评分, 去掉最大值和最小值后取平均值作为主观评价价值, 然后进行归一化处理作为标准的主观评价价值。采用聚类分析与 SVM 分类器对样本数据进行处理, 对不同类别的图像采用不同的质量评价策略。最后, 将模型输出结果与 PSNR 和 SSIM 方法进行比较。

聚类分析与 SVM 分类法建模及实验结果分析如下:

(1) 采用重心聚类法依据 PSNR 和 SSIM 将样本数据聚成 3 类, 聚类过程中采用 Minkowski 距离进行计算。

(2) 将聚类结果按序列重排, 作为 SVM 分类器的训练数据。实验中采用了 60 个样本数据进行 SVM 的训练。SVM 分类器的分类效果如图 4 所示。

SSIM 和 PSNR 是针对同一幅图像的两种不同的客观质量评价价值。SVM 分类器使得数据相对规则, 由支持向量确定出分类边界, 分类边界有效地实现任一图像数据的分类。

(3) 对 3 类分别计算二元回归方程。例如, 某一类的回归方程如下:

$$\begin{aligned} \text{class 3:} \\ \text{output3} &= -0.2888 + 6.8074x_{\text{PSNR}_3} - 2.4199x_{\text{SSIM}_3} + \\ &12.8039x_{\text{PSNR}_3}^2 - 20.0761x_{\text{SSIM}_3}^2 - \\ &1.5933(x_{\text{PSNR}_3} \cdot x_{\text{SSIM}_3}) \end{aligned} \quad (13)$$

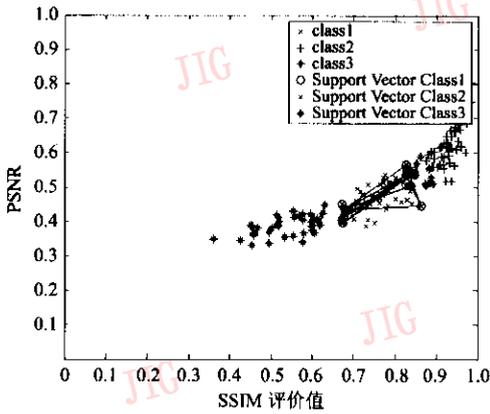


图 4 SVM 分类效果图
Fig. 4 SVM Classifying

(4) 选用部分数据作为测试数据得到模型输出

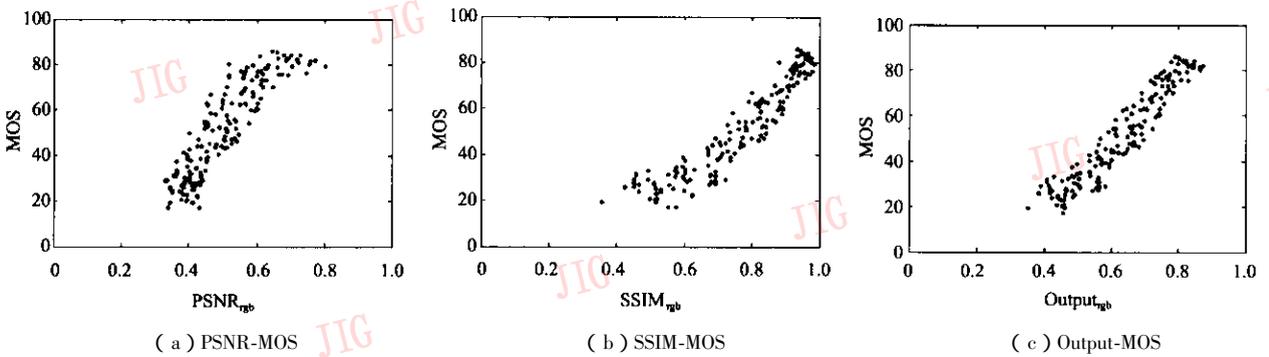


图 5 客观评价与主观评价 (MOS) 关联图

Fig. 5 The relationship between objective assessing and subjective assessin

表 1 模型评价指标

Tab. 1 Model index

	r_p	outlier ratio	rmse
PSNR	0.88	0.15	0.33
SSIM	0.91	0.27	0.50
Output	0.91	0	0.33

5 结 论

图像质量评价模型研究是图像处理领域的一项基础性的开放课题。基于 PSNR 和 SSIM 建立质量评价模型,建模过程中采用了聚类分析、线性回归及支持向量机分类等技术,利用相关的数据库数据对模型进行了检测,实验结果证明,该模型输出与主观

值与主观评价值的关联图,如图 5 所示。其中, MOS 为主观评价值。Output 为本文方法获得的模型输出值。比较图 (a)、(b)、(c) 可以看出,本文模型相比 PSNR 和 SSIM 方法,主客观质量评价关联图中的“野点”明显减少,回归方程有效校正了 PSNR 和 SSIM 法中的野点,提高了质量评价模型的性能。为量化评估质量评价模型的性能,根据 VQEG 推荐标准^[9],分别计算本文模型的相关指标 r_p , rmse 和 outlier ratio 并与 PSNR 和 SSIM 比较,如表 1 所示。

其中, rmse (root mean square error) 为均方根误差, r_p 表征了质量评价模型预测的准确性, outlier ratio 表征了模型预测质量的连续有效性。综合比较表中数据可以看出,相比 PSNR 与 SSIM 评价图像质量,本文质量评价模型能更有效地描述图像质量。

评价值关联性强,能有效地评价图像质量。

参考文献 (References)

- Final Report From the Video Quality Experts Group on the Validation of Objective Models of Video Quality Assessment [EB/OL]. <http://www.vqeg.org>, 2005-01-10.
- Wang Zhou, Lu Liang, Alan C Bovik. Video quality assessment using structural distortion measurement [A]. In: Proceeding of 2002 Internation Conference of Image Processing [C], Rochester, New York, 2002, 3: 65 ~ 68.
- Li Yan-li, Jin Dong-han, Jiao Bing-li. Serveral typical perceptual video quality assessment models [J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 13: 66 ~ 68. [李彦丽, 金东瀚, 焦秉立. 几种典型的感知视频质量评价模型 [J]. 计算机工程与应用, 2002, 13: 66 ~ 68.]
- Li Gui-ling, Wang Nan-nan, Zhang Qiang. Study of moving image quality evaluation base on MPEG-2 system [J]. Journal of Tianjin University, 2001, 34(5): 573 ~ 576.

- 5 Daly S. The Visible Difference Predictor : An Algorithm for the Assessment of Image Fidelity , Digital Images and Human Vision [M]. Massachusetts , USA :The MIT Press ,1993 :179 ~206.
- 6 Heeger D J , Teo T C. A model of perceptual image fidelity[A]. In : Proceeding of 1995 International Conference of Image Processing[C] , Washington DC ,1995 :343 ~345.
- 7 Watson A B , Solomon J A. Model of visual contrast gain control and pattern masking[J]. Journal of Optical Society of America ,1997 , **14**(9) :2379 ~2391.
- 8 C J van den , Branden Lambrecht , Costantini D M , *et al.* Quality assessment of motion rendition in video coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology ,1999 , **9**(8) :766 ~782.
- 9 Final Report From the Video Quality Experts Group on the Validation of the Objective Models of Video Quality Assessment[EB/OL]. <http://www.vqeg.org>. 2005-01-10.
- 10 Zhou Wang , Bovik A C , Simoncelli E P. Structural Approaches to Image Quality Assessment to Appear in Handbook of Image and Video Processing(Second Edition) [M]. New York , USA : Academic Press ,2005 :1 ~33.
- 11 Tong Yu-bing , Zhang Qi-shan , Hu Wei-wei , *et al.* Video quality assessment methods overview[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics ,2006 , **18**(5) :735 ~741. [佟雨兵 , 张其善 , 胡薇薇等 J]. 视频质量评价方法综述. 计算机辅助设计与图形学报,2006 , **18**(5) :735 ~741.]
- 12 Tong Yu-bing , CHANG Qing , ZHANG Qi-shan. Patterns of SVM used in digital watermarking [J]. Application Research of Computers ,2005 , **22**(3) :147 ~150. [佟雨兵 , 常青 , 张其善. SVM 在数字水印中的几种应用方式[J]. 计算机应用研究 ,2005 , **22**(3) :147 ~150.]
- 13 Vladimir N Vapnik. An overview of statistical learning theory[J]. IEEE Transactions on Neural Networks ,1999 , **10**(5) :988 ~999.
- 14 JPEG database release[DB/OL]. <http://live.ece.utexas.edu/index.htm> ,2005-04-10.