

基于四元数奇异值分解的视频质量评价方法

张富强¹, 李均利¹, 李 纲¹, 满家巨², 陈 刚^{1,3}

(1. 宁波大学信息科学与工程学院, 浙江宁波 315211; 2. 湖南师范大学数学与计算机科学学院, 湖南长沙 410083;
3. 东南大学计算机科学与工程学院, 江苏南京 210096)

摘 要: 准确的客观视频质量评价方法对于视频应用发展是至关重要的. 近年来, 图像质量评价方法已经比较成熟, 而视频质量评价方法与图像质量评价方法在性能上的差距仍然较大. 本文提出一种基于四元数奇异值分解的客观视频质量评价方法, 该方法将像素的亮度、色度、边缘能量和残差能量作为四元数的四个部分, 并用熵作为视觉感兴趣系数对块加权. 在视频质量专家组 (VQEG) 阶段 I FR-TV 视频测试库上的测试结果表明, 该方法与主观评价结果有很好的相关性.

关键词: 客观视频质量评价; 四元数; 奇异值分解; 视频质量专家组 (VQEG)

中图分类号: TP37 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 01-0219-05

Video Quality Assessment Based on Quaternion Singular Value Decomposition

ZHANG Fu-qiang¹, LI Jun-li¹, LI Gang¹, MAN Jia-ju², CHEN Gang^{1,3}

(1. College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;
2. College of Mathematics and Computer Science, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410083, China;
3. College of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Accurate objective quality metric is crucial for various video processing applications. Although the area of image quality assessment has attained maturity in recent years, video quality assessment still has a long way to go before it reaches the levels of success achieved by still image quality metrics. In the paper, we present a new approach to video quality assessment based on quaternion singular value decomposition (QSVD), which take the luminance, chrominance, edge energy and motion energy of each pixel as the four parts of a quaternion, and the entropy as the degree of visual interest of regions to weight each block. We demonstrate the performance of our algorithm by testing it on the Video Quality Expert Group (VQEG) Phase I FR-TV dataset, the results show that our method is competitive with state of the art quality assessment methods and has good correlation with perceived video quality.

Key words: objective video quality assessment; quaternion; singular value decomposition; VQEG

1 引言

随着压缩技术的迅猛发展, 图像和视频的视觉失真度量也变得越来越困难. 多数情况下, 压缩算法设计者只能依靠主观质量评价方法对压缩后的图像或者视频进行质量评价. 尽管主观评价方法的评价准确、可靠, 但是费时、花费大, 环境要求高, 可行性比较差. 这使得寻求简单易行的客观评价方法成了研究热点.

起初, 基于误差统计方法如 PSNR, MSE 吸引了研究者的关注, 这类方法统计失真视频和原始视频在每个像素上的误差, 物理意义清晰, 实现简单、快速, 所以也是

现今应用比较广泛的方法. 但是这类方法忽视了失真对一人一视频的最终接受者的视觉感知的影响, 结果与主观评价的相关性较差. 后来, 不少研究者投入了大量的精力对基于人的视觉系统 HVS (Human Visual System) 特征的客观质量评价方法进行研究. 这类方法都是模拟人类视觉对错误的感知特征来分析和量化错误信号. 比如 Watson 的数字视频质量 (DVQ)^[1] 评价方法是针对时空 DCT 信道的三维时域阈值模型. 应用时域 CSF (Contrast Sensitivity Function) 滤波, 在计算出信号误差后使用视觉阈值将结果标准化为 JND (Just Noticeable Difference) 单位, 最后对信号误差进行掩盖效应和数据汇集整理.

然而由于 HVS 系统的复杂性,人类对其认知十分有限,因此造成这些方法产生很多需要解决的问题,如超阈问题,计算复杂度大等,因此这些方法并没有被广泛应用.近年来,一些研究者提出基于人眼视觉假设的方法,该类方法对于人眼系统主要功能提出某种假设然后开展研究.Z. Wang 等认为:HVS 的视觉功能是提取视觉领域内的结构信息,并且 HVS 能高度适应这种目的^[2]. H. Sheikh 等提出了一种基于信息提取的算法 VIF (Visual Information Fidelity),该算法计算参考视频与失真视频之间的熵信息来评价视频的质量^[3].

彩色视频和彩色图像有逐渐取代灰度视频和图像的趋势.同时人类视觉能同时分辨的灰度最多不过 15-20 个等级,而人眼的视锥细胞对彩色的分辨力却相当敏锐,以至可以辨认出数以千计的不同颜色,因此彩色图像中的信息含量也大于灰度图像.而传统的灰度图像质量评价方法如 PSNR, MSE 在彩色视频评价中的应用完全忽视了色度信息.近年来提出的基于人眼视觉假设方法也主要针对亮度信息,即使扩展到色度信息,也只是对图像的色度层和亮度层分别做完全相同的质量评价运算,然后再加权合并各层图像评价结果作为彩色图像的评价,这样不但割裂了亮度和色度间的联系,而且相同运算需做多次,只是对象不同,比较繁琐.本文采用四元素的形式将人类视觉系统(HVS)比较敏感的亮度,色度,边缘能量和残差能量作为统一有机体,然后进行奇异值分解得到唯一的奇异值向量,这些奇异值代表视频的本质特性,通过计算失真视频和参考视频在本质特性上的差异来衡量视频质量.

2 奇异值分解和四元数介绍

2.1 奇异值分解(SVD)

奇异值分解是一种有效的代数特征提取方法.任意实数或复数矩阵 A 可以分解成三个矩阵的乘积 $A = USV^T$,其中 U 、 V 为正交矩阵,即 $U^T U = I$ 、 $V^T V = I$; S 为对角矩阵,即 $S = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_r)$, $s_i > 0 (i = 1, \dots, r)$, $r = \text{rank}(A)$, s_i 被称为 A 的奇异值(Singular Value), U 的列向量称为 A 的左奇异向量, V 的列向量称为 A 的右奇异向量,这就是奇异值分解(SVD),也可以写成:

$$A = \sum_{i=1}^r s_i U_i V_i^T \quad (1)$$

从线性代数的角度来看,一幅数字灰度图像可以看成是由对应位置像素的灰度值作为元素组成的实数矩阵即图像矩阵 A ,那么灰度图像(公式 1)也可以被认为是 r 个秩为 1 的特征图 $U_i V_i^T$ 以各自奇异值为权相加的总和.

2.2 四元数及其奇异值分解(QSVD)

四元数(Quaternions)是由威廉·卢云·哈密顿

(William Rowan Hamilton)^[4]发现的数学概念,也是最简单的超复数.它含有四个部分,其中一个为实数部分,三个为虚数部分.形如:

$$q = a + bi + cj + dk \quad (2)$$

其中 a 、 b 、 c 和 d 为实数, i 、 j 和 k 为虚数单位,并遵循以下规则: $i^2 = j^2 = k^2 = -1$, $i \cdot j = k$, $j \cdot k = i$, $k \cdot i = j$, $j \cdot i = -k$, $k \cdot j = -i$, $i \cdot k = -j$.更多关于四元数的信息可以在文献[4]中找到.

在文献[5]中把含有 R、G、B 三分量的彩色图像表示为像素为纯四元数(只有虚部)单分量的彩色图像. RGB 彩色图像转换为单分量图像方式如下:

$$S(x, y) = r(x, y)i + g(x, y)j + b(x, y)k \quad (3)$$

其中, $r(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 代表图像 $S(x, y)$ 在位置 (x, y) 的 R、G、B 分量.

3 基于四元数奇异值分解的视频质量评价方法

视频是一组相关图像按一定速率播放的序列,因此,客观图像质量评价方法可以扩展为客观视频质量评价方法,同时也应充分考虑视频与图像格式的不同以及人类视觉系统(HVS)特性.本文针对图像与视频在色彩空间和数据存储格式的不同,充分考虑人类视觉系统(HVS)对边缘和运动物体比较敏感,以及对亮度和色度敏感度不同等客观事实,提出基于四元数奇异值分解(QSVD)的视频质量客观评价方法,该方法由以下五步实现.

3.1 四元数构建

与彩色图像传统上采用 RGB 色彩空间不同, YCbCr 色彩空间和它的变形(YUV 色彩空间)已经被大部分视频格式如 H. 264, AVS, MPEG-4 等广泛使用.针对 RGB 色彩空间的四元数模型(公式 3)也就可以随之变形为适合 YCbCr 的模型:

$$S(x, y) = Y(x, y)i + Cb(x, y)j + Cr(x, y)k \quad (4)$$

色彩分量只是单个像素点的独立性质,但是视频各帧像素点还具备以下两个性质:在空间域上,像素点之间是互相依存的,相关性较高即空间相关性.同时,在时间域中,相邻帧的拍摄间隔较小,相关性也较高即时间相关性.因此,我们在四元数的构建中,不但包括了像素的独立性质亮度和色度,同时还分别将反应空间相关性的边缘能量和体现时间相关性的残差能量作为另外两个部分.

3.1.1 亮度和色度

如果采用 YCbCr 四元数模型(公式 5)表示彩色视频帧,每两个像素间必然共享相同色度信息,即冗余信息.同时,一个众所周知的客观事实是,人类视觉系统(HVS)对色度的敏感度低于亮度,这不仅是采样格式提

高亮度精度,降低色度精度的理论依据,也是视频质量评价方法赋予亮度和色度不同重要性的科学根据。

我们可以提出视频帧的复数表示模型(相当于四元数的两个虚部为0),即把每个像素具有的亮度分量用作复数的实部,其色度分量(Cb和Cr二者之一)为虚部。同采样理论相同,用不同的分辨率区别亮度和色度在视频评价中的重要性,即把亮度层作为实部,而两个色度层合为一层作为虚部,以此体现亮度分量的重要性比色度分量的重要性强。视频帧的复数模型如下:

$$S(x, y) = Y(x, y) + C(x, y)j \quad (5)$$

其中, $Y(x, y)$ 为图像 S 在位置 (x, y) 的亮度分量, $C(x, y)$ 为图像 S 在位置 (x, y) 的色度分量(Cb或者Cr)。

3.1.2 边缘能量(Edge Energy(E))

研究者发现人类视觉系统(HVS)对边缘以及边缘附近的失真比较敏感。文献[6]表明:图像中的轮廓信息即边缘和纹理信息更能代表图像的结构信息。因此,我们将边缘敏锐度即边缘能量作为图像清晰度的指标,并用作四元数的四部分(虚数部分)之一。

梯度不但是边缘检测最常见且简单有效的方法,而且梯度还可以很好地反映图像微小的细节反差和纹理特征变化。本文采用由一对 3×3 卷积内核

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 和 } \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

组成的 Sobel 算子计算梯度。

对于图像的每一像素 $P(x, y)$,我们通过 Sobel 算子计算它的“梯度信息向量”($G_x(x, y)$, $G_y(x, y)$),其中, $G_x(x, y)$ 和 $G_y(x, y)$ 分别为垂直边缘算子和水平边缘算子。定义像素点 $P(x, y)$ 的边缘能量 $E(x, y)$ 为:

$$E(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + (\alpha G_y(x, y))^2} \quad (6)$$

其中, α 为一常数。通常视频有两种采样方式:逐行采样和隔行采样,隔行采样的视频帧图像由两场(顶场和底场)合并而成,极易产生水平方向的边缘($G_x(x, y) = 0$),基于人眼对水平方向的边缘比对垂直方向的边缘敏感,我们用 α 来增加水平边缘的重要性。在本文实验中 α 设为 3。

3.1.3 残差能量(Residual Energy(R))

运动信息近年来已经成为视频质量评价方法必须考虑的因素,帧间残差即两帧对应像素点之间的差值是一种可以简单反映帧图像运动强度的有效办法,也可以反映时间相关性。一些采用帧间残差的文献如文献[7]都仅仅使用了亮度的差值,但对于彩色视频而言,亮度相同并不意味着颜色相同,也就是说仅用亮度差值并不能很好的反映彩色图像的运动强度,因此,针对彩色视频及其采样格式,定义了第 T 帧像素点 $P(x,$

$y)$ 相对于其前第 i 帧即第 $T - i$ 帧的残差能量 $R(x, y)$ 为:

$$R(x, y) = Y_T(x, y) + C_T(x, y) - Y_{T-i}(x, y) - C_{T-i}(x, y) \quad (7)$$

其中, i 为残差间隔。当残差间隔 i 为 1 时,我们研究发现如果不是场景切换,残差图像的绝大部分位置的残差能量为 0,对于两帧图像间的时间相关性反映不是很突出,于是我们设定残差间隔 i 为 3。

综合以上的分析和描述,我们构建了新的视频图像四元数模型,即用亮度作为四元数的实部,色度、边缘能量和残差能量分别为三个虚部,如下:

$$S(x, y) = Y(x, y) + C(x, y)i + E(x, y)j + \beta R(x, y)k \quad (8)$$

其中, β 为一常数,因为两帧间残差能量是差值,数值较小,而其他三部分都较大,所以设 β 为标度因子(scaling factor)。在本文实验中设置为 5,这个值是通过一小部分实验数据训练得到的。

为了计算简单,我们将失真和参考视频每帧都分成 8×8 的不重叠块,每个块看作一个四元数矩阵,其中矩阵每个元素对应一个用四元数表示的像素。

3.2 块度量

通过奇异值分解(SVD),每个四元数矩阵都得到一个奇异值向量,且向量的每个元素都是实数,因此我们利用原始和参考块的奇异值向量的欧氏距离(Euclidean Distance)来度量对应的块失真:

$$D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_j - \hat{s}_j)^2} \quad (9)$$

其中, s_j 和 \hat{s}_j 分别为参考和失真块对应的奇异值, n 为块的大小。

3.3 视觉感兴趣加权

HVS 研究表明,光敏感细胞在视网膜的中央凹分布较密,即人眼对投影在中央凹的图像分辨力最强。同时,视觉注意力机制和眼球运动研究也发现,人通常只关注图像的少数区域,即使时间足够多,人也是继续注视这些区域而不会以关注局部区域相同的分辨率浏览全图。这也就意味着图像中不同的块对图像总体质量的影响不同,不能等同视之。因此,需给每个块赋予不同的权重 w_i ,加权后的块 D_i 表示如下:

$$Q_i = w_i \cdot D_i \quad (10)$$

人眼视觉兴趣研究表明,人眼观察一幅图像时,只会对其中显著变化的区域发生兴趣并仔细观看,而忽略那些亮度均匀的平滑区域或空间频率相近的纹理区域。因此每个块的视觉感兴趣系数不同,对应着重要性的不同。在本文中,我们选取反映图像纹理变化的失真块的熵 \hat{e}_i 作为视觉感兴趣系数并用作权重 w_i 。

$$\hat{e}_i = - \sum_{j=0}^{L-1} p(z_{ij}) \log_2 p(z_{ij}) \quad (11)$$

$$w_i = \hat{e}_i \quad (12)$$

其中 $0 \leq z_{ij} \leq L-1$, L 为亮度等级, $p(z_{ij})$ 为等级 z_j 在块 i 的概率.

3.4 帧度量

如文献[8]中所述,我们对整帧图像的度量采用以下公式:

$$QSVD_f = \frac{\sum_{i=1}^{(H/n) \times (W/n)} |Q_i - Q_{mid}|}{(H/n) \times (W/n)} \quad (13)$$

其中, H 和 W 分别为视频帧的高和宽, Q_{mid} 为所有 Q_i 排序后的中间 Q_i .

3.5 视频度量

对于视频整体质量评价结果,本文采用所有帧评价结果的平均值,即:

$$QSVD = \frac{\sum_{f=1}^F QSVD_f}{F} \quad (14)$$

其中, F 为视频序列的总帧数.

4 实验结果

本文实验采用视频质量专家组 VQEG (Video Quality Experts Group) 阶段 I FR-TV 视频测试库^[9]中 170 个 (10 个参考和 160 个失真) 625 @ 50Hz 视频序列, YUV 采样格式为 4:2:2, 分辨率为 720×576 , 所有客观评价方法都只对 220 帧中的 200 帧 (略去前 10 帧和后 10 帧) 作评价, 同 VQEG 的客观实验处理一致. 不同的是, 我们的实验采用三次多项式回归, VQEG 采用的是 logistic 曲线回归.

图 1(a) ~ (i) 列出了我们所做不同评价模型实验的散点图. 一共包括 9 个实验, 分别为: (a) SSIM, (b) SVD (公式 10, 11, 14, 15 且 $w_i = 1$), (c) QSVD_RGB (公式 3, 10, 11, 14, 15 且 $w_i = 1$), (d) QSVD_YCbCr (公式 5, 10, 11, 14, 15 且 $w_i = 1$), (e) CSVD (公式 6, 10, 11, 14, 15 且 $w_i = 1$), (f) QSVD_E (公式 7, 9, 10, 11, 14, 15 且 $w_i = 1, R(x, y) = 0$), (g) QSVD_R (公式 8, 9, 10, 11, 14, 15 且 $w_i = 1, E(x, y) = 0$), (h) QSVD ($w_i = 1$) (公式 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15 且 $w_i = 1$), (i) QSVD ($w_i = \hat{e}_i$) (公式 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15), 其中, SSIM 和 SVD 仅使用了亮度层图像即亮度信息, SVD 方法把分块看作实数矩阵, 即每个实数元素对应一个像素点的亮度, 剩下的方法将分块看作复数矩阵 (CSVD) 或者

四元数矩阵 (QSVD).

根据散点图的收敛程度可直观地看出模型预测与主观分数的相关性. 由图 1 散点图观察到, (a) ~ (e) 中点在趋势线周围比较分散, 而剩下的四个模型, 点聚集在趋势线的附近, 收敛性较好, 也说明我们的模型有很好的相关性.

表 1 客观方法比较

Model	Pearson	Speaman	OR
P0 (PSNR)	0.786	0.810	0.678
P1 (CPqD)	0.750	0.754	0.650
P2 (Tektronix/Sarnoff)	0.765	0.753	0.656
P3 (NHK/Mitsubishi)	0.808	0.805	0.725
P4 (KDD)	0.634	0.658	0.703
P5 (EPFL)	0.700	0.718	0.611
P6 (TAPESTRIES)	0.282	0.227	0.844
P7 (NASA)	0.759	0.771	0.636
P8 (KPN/Swisscom CT)	0.865	0.866	0.578
P9 (NTIA)	0.787	0.785	0.711
SSIM	0.760	0.770	0.762
SVD	0.695	0.671	0.750
QSVD_RGB	0.715	0.699	0.750
QSVD_YCbCr	0.747	0.743	0.687
CSVD ($w_i = 1$)	0.769	0.765	0.700
QSVD_E ($w_i = 1, R(x, y) = 0$)	0.830	0.825	0.668
QSVD_R ($w_i = 1, E(x, y) = 0$)	0.817	0.820	0.634
QSVD ($w_i = 1$)	0.864	0.857	0.605
QSVD ($w_i = \hat{e}_i$)	0.869	0.868	0.570

表 1 给出了非线性回归后的不同客观评价方法预测值与主观评价结果 (DMOS) 的 Pearson 相关系数, Spearman 相关系数和离出率 OR. Pearson 和 Spearman 相关系数评估客观评价方法的准确性和单调性, 其值越大反映评价方法越好. 而 OR 作为评价模型一致性的测度, 值越小越好. P0 ~ P9 分别为 VQEG 在 2000 年测试的模型, 其结果也是官方结果, 可以在 [10] 中取得. 我们可以从表 1 中清楚发现, CSVD 明显好于 SVD, QSVD_RGB

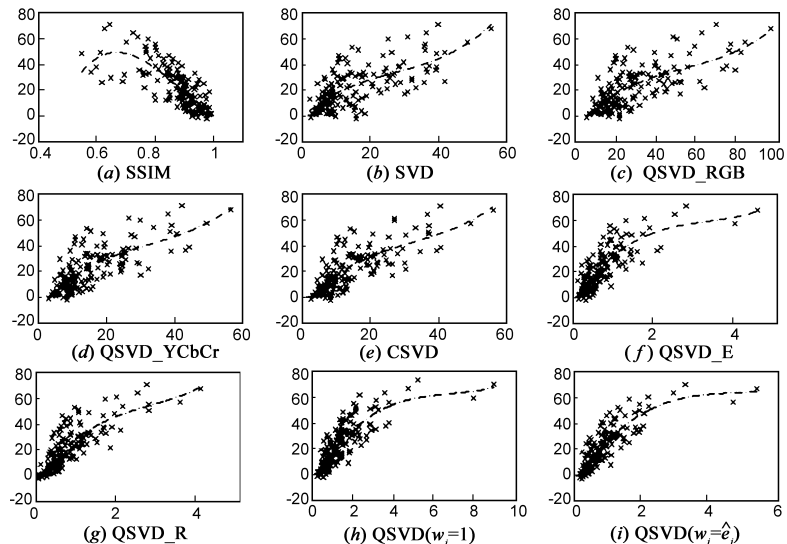


图1 不同评价模型的散点图 (包括VQEG 阶段 I 测试库中全部160个625@50失真测试序列). 纵坐标代表DMOS, 横坐标表示模型的评价结果 (客观评价值). 图中每个 (x) 点代表一个失真测试序列 (共160个), 曲线为三次多项式回归曲线

和 QSVD_YCbCr,说明我们采用亮度层比色度层要重要的思路在视频评价中是可行;QSVD_E 和 QSVD_R 结果表明,边缘能量 E 和残差能量 R 的引入极大地提升了模型的性能,明显好于 VQEG 测试的多数模型;QSVD ($w_i = 1$) 和 QSVD($w_i = \hat{e}_i$) 的比较说明,熵作为视觉兴趣系数是合适有效的.另外, QSVD($w_i = \hat{e}_i$) 已经与 P0 ~ P9 中最好的 P8 性能相近,明显优于其他模型.

5 结论

本文中,我们提出一种基于四元数奇异值分解(QSVD)的客观彩色视频质量评价方法.在视频专家组阶段 I FR-TV 测试库上的测试显示,该方法与主观评价结果有很好的相关性.该方法最大的特点是:充分考虑人眼视觉系统(HVS)对色度和亮度敏感度不同,对边缘和运动比较敏感、对图像不同区域关注度不同的特性,将亮度、色度、边缘能量和残差能量作为统一有机体,看作四元数的四个部分,用奇异值分解提取他们的特征从而获得视频的失真图谱,然后计算失真视频和参考视频失真图谱之间的差异得到视频质量评价值,通过在视频质量专家组(VQEG)阶段 I FR-TV 视频测试库上的实验证实,本文提出的视频评价方法与主观实验数据有很好的相关性.未来,在各帧评价结果合并成视频整体结果时,如何结合帧间信息和人眼视觉系统(HVS)特性将是我们研究的重点.

参考文献:

- [1] A B Watson, J Hu, J F McGowan. DVQ: A digital video quality metric based on human vision[J]. Journal of Electronic Imaging, 2001, 10(1): 20 - 29.
- [2] Z Wang, Z Bovik, et al. Image quality assessment from error measurement to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2004, 13(4): 600 - 612.
- [3] H R Sheikh, A C Bovik, G D Veciana. An information fidelity criterion for image quality assessment using natural scene statistics[J]. IEEE Transactions on Image Processing. 2005, 14(12): 2117 - 2128.
- [4] W R Hamilton. On quaternions[J]. Proceeding of the Royal Irish Academy, 1847. 3: 1 - 16.
- [5] 叶佳, 张建秋, 胡波. 客观评估彩色图像质量的超复数奇异值分解法[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 28 - 33.
Ye Jia, Zhang Jian-qi, Hu Bo. Hypercomplex singular value decomposition approach to objectively assessing color image

quality[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 28 - 33. (in Chinese)

- [6] 杨春玲, 陈冠豪, 谢胜利. 基于梯度信息的图像质量评判方法的研究[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1313 - 1317.
Yang Chun-lin, Chen Guan-hao, Xie Sheng-li. Gradient information based on image quality assessment[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(7): 1313 - 1317. (in Chinese)
- [7] 宋建新, 毕厚杰. 压缩视频感觉质量的计算[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 80 - 83.
Song Jian-xin, Bi Hou-jie. Perceptual quality metric for compressed video[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(7): 80 - 83. (in Chinese)
- [8] A Shnayderman, A Gusev, A M Eskicioglu. An SVD-based gray-scale image quality measure for local and global assessment[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(2): 422 - 429.
- [9] VQEG: The Video Quality Experts Group[OL], <http://www.vqeg.org/>.
- [10] A Webster, F Speranza. Final Report from The Video Quality Experts Group on The Validation of Objective Models of Video Quality Assessment 2000[OL]. <http://www.vqeg.org/>.

作者简介:



张富强 男, 1980年6月出生于山西屯留. 2002年毕业于华北科技学院计算机系, 2007年进入宁波大学信息科学与工程系攻读计算机应用技术专业硕士研究生, 并于2010年3月毕业.
E-mail: www.kevin.cn@gmail.com



李均利 男, 研究员、博士生导师、中国图象图形学会青年委员会委员、IEEE 会员. 1972年5月出生于黑龙江哈尔滨. 1993年、1996年和2002年分别在哈尔滨师范大学、哈尔滨工业大学和浙江大学获理学学士、理学硕士和理学博士学位. 现为宁波大学数字技术与应用软件研究所所长, 主要从事图像/视频质量评价、医学图像处理、进化计算等方面的研究工作.

E-mail: li.junli@vip.163.com

李纲 男, 副教授、宁波大学信息学院硕士生导师.

满家巨 男, 教授、湖南师范大学硕士生导师.

陈刚 男, 教授、博士生导师、中国图象图形学会理事、中国自动化学会系统仿真专业委员会副主任.