

图像质量评价方法研究进展

蒋刚毅^{①②} 黄大江^① 王旭^① 郁梅^{①②}

^①(宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211)

^②(计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学) 南京 210093)

摘要: 图像质量评价是图像处理领域的研究热点。该文综合论述了图像质量的主观和客观评价方法,重点阐述了单视点图像质量的客观评价方法。对目前比较常用的峰值信噪比和均方误差全参考评价算法进行了分析并指出其存在的问题。然后,对基于误差敏感度和基于结构相似度的评价算法进行了论述和分析,并对质降和无参考评价方法进行了综述。根据视点的个数,图像质量评价可分为对传统单视点图像和立体图像的评价。该文还对立体图像质量评价算法进行了分析讨论。最后,就图像质量评价算法的进一步发展提出了若干技术与研究方向的展望。

关键词: 图像质量评价; 人类视觉系统; 结构相似度; 立体图像质量评价

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0219-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00091

Overview on Image Quality Assessment Methods

Jiang Gang-yi^{①②} Huang Da-jiang^① Wang Xu^① Yu Mei^{①②}

^①(Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

^②(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Image Quality Assessment (IQA) is a hot research area in the field of image processing. In this paper, objective and subjective IQA methods are reviewed, and more attention is paid to the former. PSNR and MSE, which are commonly used to assess the quality, are analyzed in detail and their defects are given. The models based on error sensitivity and structure distortion of images are two critical methods in IQA, and the survey presents their key techniques and challenge problems. The reduced reference and no reference methods are also presented in this survey. Based on the number of view, IQA are classified into two major categories, namely, monoscopic image IQA and stereoscopic image IQA. This survey also makes an introduction of the stereoscopic image IQA. Finally, the survey lists several perspective sub-fields and topics in IQA progress.

Key words: Image quality assessment; Human Visual System(HVS); Structural similarity; 3D image quality assessment

1 引言

图像质量是比较各种图像处理算法性能优劣以及优化系统参数的重要指标,因此在图像采集、编码压缩、网络传输等领域建立有效的图像质量评价机制具有重要的意义。近些年来,随着图像处理技术的发展,该领域的研究已吸引了研究人员的广泛关注,国内外已有许多科研机构和商业公司投身其中^[1],如美国泰克公司研制的图像质量分析仪已经被广泛地应用。另外,像 IBM, 韩国 SK 电信集团等就图像视频质量评价问题也展开了深入研究^[2]。同时,图像质量评价算法层出不穷,典型的模型有基于人类视觉系统(Human Vision System, HVS)的图

像质量评价模型^[3,4],基于结构相似度(Structural Similarity Image Measurement, SSIM)的评价模型^[5]等。最近 JVT(Joint Video Team)已将 SSIM 算法作为图像质量评价指标引入到视频编码标准 H.264 的校验模型中。国内也已经有许多机构从事该领域的研究,并取得了相关成果。但总体来讲,还有许多未知问题有待探究。

图像质量评价从方法上可分为主观评价方法和客观评价方法,前者凭借实验人员的主观感知来评价对象的质量;后者依据模型给出的量化指标,模拟人类视觉系统感知机制衡量图像质量。主观质量评价是凭感知者主观感受来评价被测试图像的质量,通常采用连续双激励质量度量法,即对观测者连续给出原始图像和处理过的失真图像,由观测者根据主观感知给出打分值。ITU-T 已发布了相关标准 BT-510,对主观质量评价过程中的测试图像、人

2009-01-19 收到, 2009-11-05 改回

国家自然科学基金(60872094, 60832003), 教育部新世纪优秀人才计划(Nect-06-0537)和教育部博士点基金(200816460003)资助课题

通信作者: 蒋刚毅 jianggangyi@126.com

员、观测距离以及实验环境等做了详细规定^[6]。目前,有学者就主观质量评价体系的组成环节进行改进研究^[7,8]。Richardson 通过在主观评价过程中引入测试者反馈信息加快主观质量评价过程^[9]。主观质量评价方法需针对多个测试图像进行多次重复实验,耗时多、费用高,难以操作。

相对于主观质量评价,客观质量评价具有操作简单、成本低、易于解析和嵌入实现等优点,已经成为图像质量评价的研究重点;实际图像应用中也注重主观评价方法与客观评价方法的结合,即利用主观评价结果对客观质量评价模型中的参数进行校正。本文主要讨论客观评价方法,重点对单视点图像质量评价过程中用到的多种方法进行了总结和评论,并对近年来新出现的立体图像质量评价算法进行了论述。最后对该领域的发展进行了展望。

2 单视点图像质量评价方法

单视点的客观图像质量评价方法通过建立数学模型,进行相关后得到量化指标或参数来衡量图像质量。根据是否具备原始参考图像,它可以分成全参考、质降参考和无参考 3 类方法。其中全参考图像质量评价方法研究时间最长、发展较为成熟。

2.1 全参考图像质量评价方法

全参考图像质量评价方法需要参考原始图像,经过几十年的发展,已形成较完整的理论体系和成熟的评价框架。待评价图像信号的质量可以通过与原始图像信号相比之后获得的误差信号来进行质量分析。图像质量的下降与误差信号的强弱相关。基于此,最简单的质量评价算法就是均方差(Mean Squared Error, MSE)和峰值信噪比(Peak Signal-Noise Ratio, PSNR)。MSE 和 PSNR 计算复杂度小,易于实现,已在图像处理领域中广泛应用。但它们给出的数值,与图像的感知质量之间没有必然联系,存在明显不足^[10]。

由此,人们基于 HVS,提出了相关图像质量评价方法^[3,4]。根据对 HVS 模型描述的侧重点不同,这里将图像质量评价模型归结为基于误差灵敏度评价算法和基于结构相似度评价算法两类。

(1)基于误差灵敏度的图像质量评价 HVS 模型的主要特性包括视觉非线性、多通道、对比敏感度带通、掩盖效应、多通道间不同激励的相互作用以及视觉心理特征。其中非线性、多通道、对比敏感度带通和掩盖效应特性研究较多,已有相应的计算模型。而多通道间不同激励的相互作用和视觉心理特征还无法根据生理特性得到精确的计算模型。Ismail 采用 Kohonen 自组织映射方法以直观的形式

表现出各种特征之间的相似或者互补关系,可用于设计新的评价算法时参考^[11]。汪孔桥等结合人眼感兴趣区域理论对峰值信噪比进行修正,根据感兴趣区域的划分,赋予对应的加权值来进行图像评价^[12],其思路在一定程度得到认同。Makoto 等将图像失真类型归结为亮度差异、空间频率失真、结构上的干扰和随机误差,通过设计特征来统计各类失真的程度,再用主分量分析对特征进行选择,并通过样本集的训练以获得各特征的权重^[13]。王楠楠将图像结构分为噪声层、纹理层和目标层,每层采用 MSE 和 PSNR 准则,并结合人眼视觉感知进行加权,确定图像质量^[14]。上述算法均在 PSNR 等传统评价算法的基础上,利用 HVS 特征对其进行加权校正,以提高评价算法的性能。但各特征因素的加权权重,往往由经验获得,缺乏有效视觉感知模型的支撑。如其中的感兴趣区域划分算法是否与 HVS 特性相吻合,仍需要考证。大部分算法在考虑特征的权重时,一般是确定目标函数,以使客观模型输出值与主观数据之间的相关性达到最大的权重系数为最优。这种方法仅能令客观模型在数值上与被训练主观数据集尽可能一致,但并不具有一般性。

基于误差灵敏度分析的质量评价算法可用图 1 来描述,各个算法不同之处在于侧重点和处理方式上区别。Tan 建立了“感知模拟器”模拟人眼时域的平滑效应和掩蔽效应,分析了人眼的不对称评价方式,即相对图像质量从差到好变更,人眼更易于发现从好到差的图像质量变化^[15]。韦学辉利用主观评价实验提取出感知亮度、频率以及边缘等 3 类信息,构造 HVS 对这些信息的响应函数,拟合成为相应的图像质量评价模型^[16];它从数据训练的角度出发,寻找各特征权重的最优解,但模型性易受主观数据集影响。Winkle 对色彩变换后的通道应用质量评价矩阵,利用 IIR 滤波器对参考和测试图像进行滤波;并将其分解成 5 个子带和 4 个方向,各通道按 CSF(Contrast Sensitivity Function)值进行加权^[17]。马苗提出通过小波域系数之间的灰色关联度进行图像质量评价^[18]。这些算法主要对 HVS 的底层特征进行数学建模,来仿真 HVS 特性以进行客观图像质量评价。HVS 是一个高度复杂和非线性的系统,当前

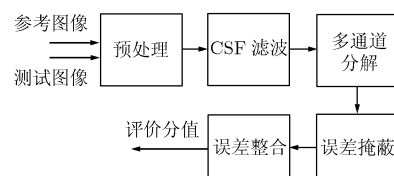


图 1 基于 HVS 的图像质量评价框架

对其认知仍然有限。以上各方法都基于一定的假设前提,取得了一定的效果,但也存在一些问题:

(a)基于 HVS 特征的方法一般认为原始图像质量是完美的,且 Weber 定律和点扩散函数(Point Spread Function, PSF)模型始终成立。

(b)一般假定 HVS 的多通道响应可以通过线性离散集合来模拟。

(c)一般假定通道分解是无损或无损于视觉的,变换后仍保持了质量评价的绝大部分信息。

(d)一般认为通道分解剔除了图像间的关联,通道变换的作用可以通过掩蔽模型来模拟。

(e)HVS 的评价值可以通过测试误差的非线性组合来模拟,但目前大多采用线性加权组合。

前 3 条假设从 HVS 的特点以及实际操作来说,相对比较合理。实验表明自然图像经过通道分解后,相同位置上的特征基本上相同或者相似;即各通道之间实际上存在较高的相关性,这与上述(d)点假设相矛盾。另外,以误差的统计量来表征图像质量方法,无论其如何加权组合,最后仍可能存在两幅图像失真类型完全不一样、但误差相同的现象。故上述(e)点假设也是不合适的。

(2)基于结构相似度的图像质量评价 自然图像具有特定的结构,像素间有很强的从属关系,这些从属关系反映了视觉场景中的结构信息^[19]。由此,Wang 等人提出了基于结构失真的图像质量评价方法,称为结构相似 (SSIM)方法^[20],如图 2 所示。该方法认为光照对于物体结构是独立的,而光照改变主要来源于亮度和对比度;所以它将亮度和对比度从图像的结构信息中分离出来,并结合结构信息对图像质量进行评价。该类方法在某种程度上绕开了自然图像内容的复杂性及多通道去相关问题,直接评价图像信号的结构相似性。其算法实现复杂度较低,应用性较强。

遵循 HVS 高度适合于提取视觉场景中的结构信息这一特性,黄大江等利用模糊相似度算法对图像质量进行评价,并利用结构相似度特征因子对评价结果进行修正,获得较好的评价结果^[21]。叶盛楠等提出将图像中的结构信息分离出来给予较大的权

重并用 SSIM 估计局部失真的方法^[22]。王涛等根据图像内容将其分成边缘、纹理和平滑区域,对每个区域利用模糊积分融入结构相似性的数量信息,利用图像结构信息相似性及其在位置和数量上的融合信息来评价图像质量^[23]。这些算法在 SSIM 的基础上,考虑局部区域的特性,可以提高质量评价模型与主观感知之间的一致性。

基于误差灵敏度的评价方法是一种自下而上的方法,它先模拟 HVS 各部分的功能,再将其组合来实现整个 HVS;而 SSIM 评价方法则试图从整体上直接模拟 HVS 抽取对象结构的人类视觉功能。基于误差灵敏度的方法通过人为模拟 HVS 对误差敏感度进行量化,评价过程易于解析;但是其算法过于繁杂,不易嵌入具体的系统当中。SSIM 评价方法通过测量图像结构信息的改变来反映图像质量的失真情况,在算法上明显简化;但同时也屏蔽掉了 HVS 的其它生理特征,评价过程不易于解析^[24]。基于误差灵敏度的评价方法是从生理解剖学的角度出发,而 SSIM 评价方法更着重于视觉心理学。两类方法从不同角度对质量客观评价进行了分析,具有不同的特色。将 SSIM 和基于误差灵敏度的评价方法中采用的 HVS 特征加权评价联合起来进行研究,将是图像质量评价领域今后的一个发展方向^[25,26]。

2.2 质降参考和无参考图像评价方法

质降参考评价方法只需提取部分原始图像数据用于评价,而无参考方法则无需原始图像即可对测试图像质量进行评价。相对于全参考评价方法,这两种方法灵活性强,适用范围广泛,更具研究价值。

根据特征参数传输方式的不同,质降参考评价方法可分为两类。一类是通过无失真信道向客户端发送特征参数,需要额外的带宽开销,其应用性易受到制约。另一类为基于嵌入数字水印的传输方法,以携带的水印信息作为图像质量评价的依据^[27,28],它先提取图像特征作为水印信息嵌入原始图像;然后,图像经过一个失真过程到达解码端,解码器从失真图像中解码出隐藏的特征信息,再与由失真图像提取的特征进行比较,获得最终的质量评价分值。当水印信息不能正确解码时,也表示网络传输环境极差。从应用的角度来说,该类方法更具潜力。

质降参考图像评价方法的核心在于如何选取有效的特征参数来表征原始图像。Wolf 提出了基于空间域和时域活动特征的质降参考评价模型^[29],通过对图像标准差做一系列的加权运算,提取出图像在空间和时间上的特征;并引入多种边界增强滤波器,获得图像在不同方向上的边界特征。Carnec 对图像进行子带分解,对每个子带作 CSF 滤波,提取其特

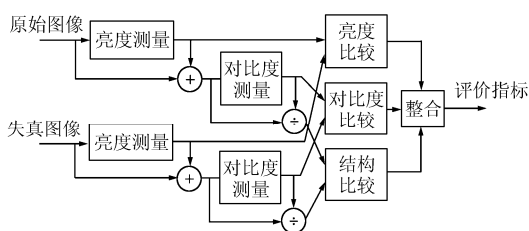


图 2 结构相似法(SSIM)方法框图

征^[30]。此外,图像多尺度几何分析可以有效地反映图像的纹理特性。Wang 提出了一种基于小波域的质降参考模型,根据小波子带系数的分布密度函数服从广义高斯模型这一特性来提取特征参数^[31]。王旭等人提出了一种基于 Contourlet 变换的质降参考模型,该模型通过 Contourlet 变换将图像分解为多个高频方向子带,来提取图像纹理细节特征^[32]。这些方法的共同点在于将特征参数提取与 HVS 特征相结合,在考虑 HVS 的多通道、掩盖效应以及 CSF 滤波基础上,把图像的对比度、空间频域特性等作为特征参数。如何平衡特征参数的有效性与带宽的额外开支之间的矛盾,是设计质降参考评价模型时需要重点考虑的问题。对于 HVS 系统而言,当看到某个典型的画面时,只有很少量的视觉神经元被激活。有效的特征参数应能够模拟和反映 HVS 系统的这一特性。图像的稀疏分解的相关研究着重于寻找图像特征的稀疏表示方法,与人类视觉特性相吻合。多尺度几何分析是图像的稀疏分解的一个有效手段,在设计质降参考模型时,可以借鉴多尺度几何分析研究的理论成果。

相对于全参考和质降参考评价方法,无参考评价方法的研究仍处于起步阶段。其研究大多是针对特定失真类型进行评价,且主要集中在块效应和模糊等编码失真上。模糊失真的评价主要体现在如何量化高频系数的丢失程度,文献[33]利用失真图像在某些特征频率上的峰值和能量从高频到低频的转移来衡量其失真程度。文献[34]针对图像在不同尺度上的小波系数的衰减规律,提出了 JPEG2000 编码失真评价算法。块效应是指压缩图像在分块的边缘处产生不连续现象。针对块效应的无参考评价主要是根据压缩图像块边界上梯度值变化的剧烈程度作为特征量,来衡量块效应失真程度^[35]。Liu 等先提取出水平和垂直分量的块效应特征量,再利用 HVS 模型对块效应特征量进行滤波,获得尽可能接近于主观视觉感知的评价分值^[36]。

由于基于特定失真类型的无参考评价方法只局限于某些具体的失真上。因此,部分学者将目标转移到基于数据训练的无参考评价方法上,该类方法无需分析失真的原因,而是将训练得到的数据直接作为图像质量评价的标准^[37,38]。它可应用于所有失真图像,使用范围广泛;但需要进行复杂的数据训练,且评价结果易受图像内容以及训练策略的影响。

无论是哪类无参考评价模型,模型的准确性都难以比拟全参考模型。一方面是由于缺乏图像的先验知识;另一方面也是由于图像质量的定义模糊造成的。例如一幅发生几何偏移失真的图像,如果有

原始图像作为参照,其失真可以明显地察觉。但忽略原始图像的相关信息,单纯从人眼感知的角度去考虑,则图像的质量可以认为不变。为此,在设计质量评价模型时,需要更多关注视觉心理学的相关研究,并可借鉴盲信号处理领域的研究方法,提高模型的精确度。

总之,全参考、质降参考和无参考等 3 类图像质量评价模型都有其独特的研究价值。全参考评价模型本质上是构造一个映射,使得失真对图像信息的改变可以映射为某一量化后的主观感知质量值。从研究工具的角度来说,全参考评价模型更适合作为一个评价指标,来综合衡量各种图像处理算法的性能。假设我们需要为某一特定的任务选择最为合适的图像处理系统,那么客观质量评价方法可以帮助我们评估哪一种系统或者算法可以提供最佳质量的图像。无参考评价方法本质上更侧重于反映用户的主观质量偏好。质降参考评价方法作为全参考和无参考方法的折衷,可以嵌入到图像处理系统,达到优化算法和参数设定的目的。例如,在网络视频传输系统中,客观质量评价方法可以帮助优化编码端的滤波过程和码率分配算法的设计,以及解码端后处理算法的设计。

目前,关于图像质量评价模型的设计和研发,仍主要集中在灰度图像上。对于彩色图像,一般采用对 3 个分量先分别度量再进行加权的方法。加权系数的确定,彩色空间的选取,也是在模型设计时需要考虑的问题。

3 立体图像质量评价研究进展

立体图像技术能提供深度信息来增强图像的立体感、临场感,是下一代数字媒体技术的发展方向。近年来,关于立体图像评价方法研究也逐渐开展,2000 年国际电信联盟发布了 3DTV 的主观实验测试标准^[39]。相比于平面图像,立体图像的应用尚未普及,对于立体图像质量的定义也未完全明确。至今为止,立体图像质量评价的代表性工作仍集中于主观立体质量感知领域。Tam 主要研究了立体视频编码和传输环节中所采纳的技术与主观感知质量之间的关系^[40]。他研究了左右两视点间在不同压缩率和不同空间分辨率对立体图像质量的影响^[41],结果表明,立体图像的质量主要取决于质量较高的那个视点图像的质量;这意味着可以在保持主观质量较好的视点码率不变的情况下,适当降低另一个视点图像的编码码率,而维持立体图像的主观质量不变。Ijsselsteijn 等研究了相机参数变化对立体图像质量的影响,对 3DTV 系统数据采集的相机参数优化有

指导意义^[42]。此外, 他还针对非对称和对称 JPEG 算法, 以及相机间距对立体图像主观质量感知的影响进行了实验^[43], 其结果为客观模型的建立提供了实验基础。以上工作从不同的角度分析了影响立体图像的因素, 但尚未从根本上解决立体图像质量评价问题。这一方面是由于人们对人类视觉系统所知甚少, 另一方面也因为影响立体图像主观感知的因素众多, 而已有的探索性感知实验只针对一些比较显著的因素进行分析。

由于不能将传统平面图像质量评价方法简单地移植到立体图像评价中, 研究人员也提出了相应的立体图像质量评价客观模型。Boev^[44]等人提出了如图 3 所示的立体图像质量评价模型, 它将立体图像质量分成立体深度感评价和左右视点合成图像 (cyclopean image) 质量评价两方面。该模型结合了 HVS 处理立体图像时的生理过程, 其思路值得借鉴。其存在的问题在于, 如何合成 cyclopean image 以及该合成方法是否合理仍值得商榷。Horta^[45]等人通过量化左右两视点的边缘区域和平滑区域的失真以及左视点纹理区域的失真, 然后利用 logistic 函数拟合来预测立体图像的质量; 该模型基于统计特征, 其评价结果易受图像内容的影响, 不具一般性。Benoit^[46]等人结合深度信息的评价, 将平面图像质量评价算法迁移至立体图像中, 建立了一个立体图像客观评价模型的框架。但不过模型输出值与主观感知的一致性仍有待提高。因此, 有必要加强对立体图像主观感知过程的研究。

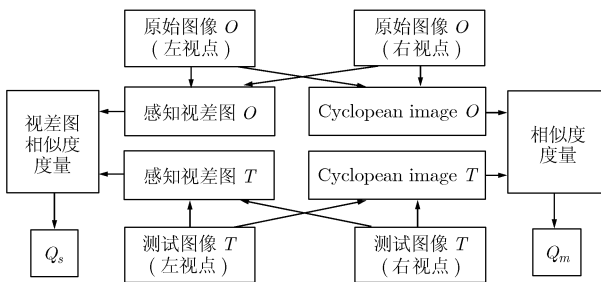


图 3 3D 图像客观质量评价模型

立体图像的质量评价不但要考虑左右两视点的质量失真情况, 而且还要具体考虑立体感知, 以及观察者视觉疲劳等各个方面的因素, 所以建立一个全面完整的评价系统显得非常困难。Tam^[47]尝试通过分析不同失真类型下立体图像质量的变化情况去指导立体图像评价系统的建立。图 4 为该实验对块效应和模糊失真的测试结果。图中纵坐标代表图像的主观质量等级, 0 级质量最好, 15 级最差, 图中方框内的 L 和 R 分别给出了左右视点图像的主观质

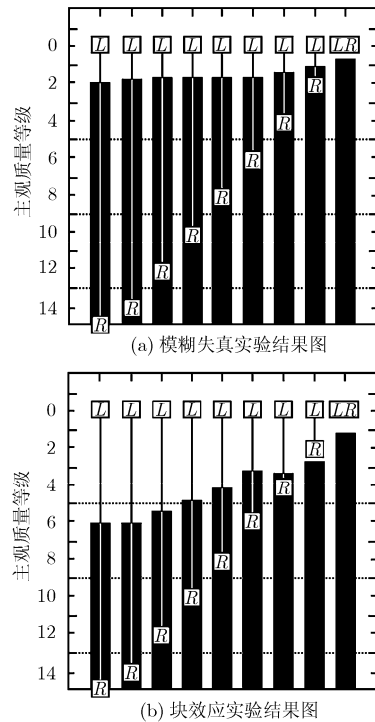


图 4 Tam 关于模糊失真和块效应对于立体图像质量的结果^[47]

量, 而黑色柱状图则标记了在特定的左右视点质量下感知到的立体图像质量。从结果可以看出, 对于块效应, 立体图像的整体质量评价分值大约是左右通道评价分值的平均值。而模糊失真对立体图像整体质量的影响, 并不是简单的左右各通道评价分值的求和平均, 其整体质量主要取决于质量较好的那个视点。因此对于压缩编码的 3DTV 系统(其失真主要表现为块效应和模糊), 可以通过评价左右通道的质量来代替立体图像的质量。

王旭等人设计了立体图像主观质量感知实验并建立了立体图像质量测试数据库^[48], 该数据库考虑了模糊失真、JPEG 压缩失真、JPEG2000 压缩失真、高斯白噪声等具有代表性的失真类型。其意义一方面在于为客观模型的设计提供了主观感知数据集; 另一方面, 研究了多种失真类型的参数对立体图像感知质量的影响。图 5 为针对该立体图像数据库的主观质量分析的实验结果。从结果中可以看出, 高斯白噪声对主观感知质量的影响是与内容无关的。关于 JPEG2000 压缩, 由对应的曲线图可以看出, 0.1 bpp 是一个拐点。高于这个码率时, 图像压缩所造成的立体感知质量损失很小, 在不可察觉的范围之内。但当码率低于这个临界值时, 主观感知质量会随着码率的减小而降低。

立体图像质量评价目前仍处于萌芽阶段, 但立体图像处理中需要考虑到两个通道之间的相互影响。使得在设计相应的立体图像算法时需要考虑的

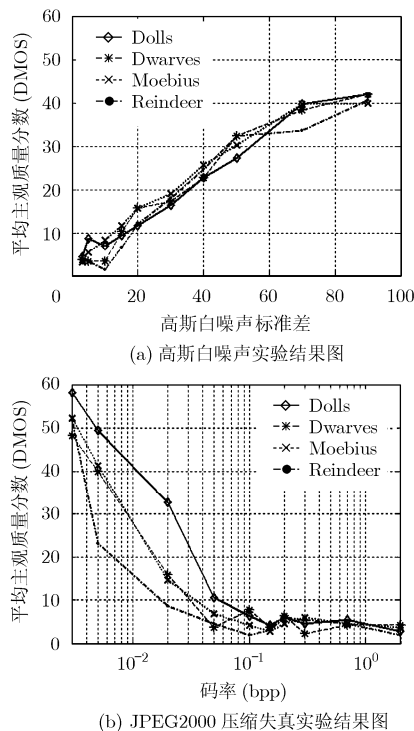


图5 王旭等人工作中的主观实验结果^[48]

质量问题更加复杂,不仅要考虑到主观感知质量,还需要考虑到深度感知质量等其它单视点图像质量评价未曾遇到的质量因素。所以,立体图像客观质量评价模型的评价指标应是一个多维指标,可以反映各种因素,例如对深度感知的评价,立体视觉疲劳的评价等。

4 图像质量评价方法展望

客观质量评价方法已经成为当前图像质量评价研究的热点。基于HVS生理特征的方法和基于结构失真的方法从不同角度对这一问题进行了分析,二者具有不同的特色。根据上文对图像质量评价方法的分析,该领域仍有以下问题值得深入研究和探索:

(1)联合SSIM与HVS特征评价方法。结构失真算法可以作为基于HVS特征的评价方法的补充,例如可以利用前者计算结构失真,而后者可以确定某程度的失真可否被人眼觉察。

(2)建立多指标的图像质量评价模型。由单一指标衡量各种图像的客观质量往往只能反映图像的整体质量,不能反映其局部失真信息。故多层次、多指标组合将是图像质量评价建模的一个发展方向。

(3)如何降低图像质量评价模型对参考图像的依赖程度。无参考评价方法正引起众多研究者的关注,相关的研究成果也不断增多,成为未来该领域的一个发展趋势。

(4)随着图像处理技术的发展,立体图像技术能

提供深度信息来增强图像立体感。如何有效地评价3D图像质量将是一个研究热点和难点。通过设计主观质量评价实验,了解影响立体图像质量的主要因素,并将各因素通过数学建模综合起来形成可靠的客观质量评价模型是今后的一个研究方向。

图像质量评价是图像视频处理的关键环节。随着图像质量评价算法的不断成熟,将有更多的软件和硬件产品投入实用,评价算法的研究具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] VQEG. Final report from VQEG on the validation of objective models of video quality assessment[OL].(2000-3-15). [Http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/projects/frtv_phaseII/downloads/VQEGII_Final_Report.pdf](http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/projects/frtv_phaseII/downloads/VQEGII_Final_Report.pdf).
- [2] Wang Z, Liang L, and Alan C B. Video quality assessment using structural distortion measurement[C]. International Conference on Image Processing, Rochester, NY, USA, 2002, 3: 65-68.
- [3] Yu Z, Wu H R, and Winkler S, *et al.* Vision-model-based impairment metric to evaluate blocking artifact in digital video[J]. *Proceeding of the IEEE*, 2002, 90(1): 154-169.
- [4] Nill N B and Bouzas B H. Objective image quality measure derived from digital image power spectra[J]. *IEEE Signal Processing Letter*, 2002, 9(3): 388-392.
- [5] Wang Z, Alan C B, and Hamid R S. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [6] ITU-R Recommendation BT.500-10. Methodology for the subjective assessment of the quality of the television pictures[S], 2000.
- [7] Baroncint V. New tendencies in subjective video quality evaluation[J]. *IEICE Transactions on Fundamentals*, 2006, 89(11): 2933-2937.
- [8] Hoffmann H, Itagaki T, and Wood D, *et al.* A novel method for subjective picture quality assessment and further studies of HDTV formats[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2008, 54(1): 1-13.
- [9] Richardson I E. Fast subjective video quality measurement with user feedback[J]. *IEE Electronics Letters*, 2004, 40(13): 799-800.
- [10] Russo F, De Angelis A, and Carbone P. A vector approach to quality assessment of color images[C]. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Victoria, BC, Canada, 2008: 814-818.
- [11] Avciab I, Sankar B, and Saygood K. Statistical evaluation of image quality measures[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2002, 11(2): 206-223.
- [12] 汪孔桥, 沈兰荪, 刑昕. 一种基于视觉兴趣性的图像质量评价

- 方法[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(4): 300-303.
- Wang Kong-qiao, Shen Lan-sun, and Xing Xin. A quality assessment method of image based on visual interests[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000, 5(4): 300-303.
- [13] Miyahara M, Kotani K, and Algazi V R. Objective picture quality scale (PQS) for image coding[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1998, 46(9): 1215-1226.
- [14] 王楠楠, 李桂苓. 符合人眼视觉特性的视频质量评价模型[J]. 中国图象图形学报, 2001, 16(6): 523-527.
- Wang Nan-nan and Li Gui-ling. Video quality evaluation models based on human visual properties[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2001, 16(6): 523-527.
- [15] Tan K T, Ghanbari M, and Pearson D E. An objective measurement tool for MPEG video quality[J]. *Signal Processing*, 1998, 70(3): 279-294.
- [16] 韦学辉, 李均利, 陈刚. 一种图像感知质量模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(12): 1540-1545.
- Wei Xue-hui, Li Jun-li, and Chen Gang. A perception based image quality assessment model[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(12): 1540-1545.
- [17] Winkler S. A perceptual distortion metric for digital color video[C]. Proceedings SPIE Human Vision and Electronic Imaging IV, San Jose, USA, Jan. 1999, 3644: 175-184.
- [18] 马苗, 郝重阳. 基于灰色关联分析的图像保真度准则[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(7): 976-983.
- Ma Miao and Hao Chong-yang. Image fidelity criterion based on grey relational analysis[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(7): 976-983.
- [19] 朱里, 李乔亮, 张婷等. 基于结构相似性的图像质量评价方法[J]. 光电工程, 2007, 34(11): 108-113.
- Zhu Li, Li Qiao-liang, and Zhang Ting, *et al.* Metric of image quality based on structural similarity[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(11): 108-113.
- [20] Wang Z and Alan C. Structural approached to image quality assessment[M]. In Handbook of Image and Video Processing, Academic Press, 2005: 1-33.
- [21] 黄大江, 郁梅, 杨铀, 蒋刚毅. 基于相似度的立体图像对中右视点图像质量评价方法[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1693-1697.
- Huang Da-jiang, Yu Mei, Yang You, and Jiang Gang-yi. Right view image evaluation method for stereoscopic image pair based similarity measure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1693-1697.
- [22] 叶盛楠, 苏开娜, 肖创柏等. 基于结构信息提取的图像质量评价[J]. 电子学报, 2008, 36(5): 856-860.
- Ye Sheng-nan, Su Kai-na, and Xiao Chuang-bai, *et al.* Image quality assessment based on structural information extraction[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(5): 856-860.
- [23] 王涛, 高新波, 张都应. 一种基于内容的图像质量评价测度[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(6): 1002-1007.
- Wang Tao, Gao Xin-bo, and Zhang Du-ying. An objective content-based image quality assessment metric[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(6): 1002-1007.
- [24] 杨婉, 吴乐华, 范晔等. 数字图像客观质量评价方法研究[J]. 通信技术, 2008, 41(7): 244-246.
- Yang Wan, Wu Le-hua, and Fan Ye, *et al.* Study on objective digital image quality assessment methods[J]. *Communications Technology*, 2008, 41(7): 244-246.
- [25] Yang B, Lei L, and J Yang L. HVS-based structural image quality assessment model[C]. Proceeding of the 7th world congress on Intelligent Control and Automation, Chongqin, China, June 25-27, 2008: 8497-8500.
- [26] Wang B, Wang Z B, and Liao Y P, *et al.* HVS-based structural image quality assessment[C]. Proceeding of ICSP, China, 2008: 1194-1197.
- [27] Mohammad H K, Shabnam S, and Alireza N A, *et al.* Reduced reference watermark-based image transmission quality metric[C]. Proc. ISCCSP, Malta, 2008: 526-531.
- [28] Wang Z, Wu G, and Sheikh H R, *et al.* Quality-aware images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(6): 1680-1689.
- [29] Wolf S and Pinson M H. Spatial-temporal distortion metrics for in-service quality monitoring of any digital video system[C]. Proc. SPIE. Boston, MA, USA, 1999, 3845: 266-277.
- [30] Carnec M, Le Callet P, and Barba D. New perceptual quality assessment method with reduced reference for compressed images[C]. In Proceedings of SPIE, Lugano, 2003: 1582-1593.
- [31] Wang Z and Simonecli E P. Reduced-reference image quality assessment using a wavelet-domain natural image statistic model[C]. Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging - Human Vision and Electronic Imaging X, San Jose, CA, 2005: 149-159.
- [32] 蒋刚毅, 王旭, 杨铀, 郁梅. 基于 Contourlet 变换的质降参考图像质量评价模型[J]. 光电子激光(录用), 2009.
- Jiang Gang-yi, Wang Xu, Yang You, and Yu Mei. Contourlet-based reduced-reference image quality assessment metric[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, accepted, 2009.
- [33] Wang Z, Bovik A C, and Evans B L. Blind measurement of blocking artifacts in images[C]. IEEE International Conference on Image Processing, Vancouver, BC, Canada, 2000, 3: 981-984.
- [34] Sheikh H R, Bovik A C, and Cormack L. No-reference quality assessment using natural scene statistics: JPEG2000[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(11): 1918-1927.
- [35] Muijs R and Kirenko I. A no-reference blocking artifact measure for adaptive video processing[C]. EUSIPCO2005, 2005.
- [36] Liu H T and Heynderickx I. A no-reference perceptual

- blockiness metric[C]. Proc. ICASSP, 2008: 865-868.
- [37] Suresh S, Venkatesh Babu R, and Kim H J. No-reference image quality assessment using modified extreme learning machine classifier[J]. *Applied Soft Computing*, 2008. (Article in Press) doi:10.1016/j.asoc.2008.07.005
- [38] Venkatesh Babu R, Suresh S, and Perkis A. No-reference JPEG image quality assessment using GAP-RBF[J]. *Signal Processing*, 2007, 87(6): 1493-1503.
- [39] ITU, Recommendation BT.1438. Subjective Assessment of Stereoscopic Television Pictures[S], 2000.
- [40] Stelmach L B and Tam W J. Stereoscopic image coding: Effect of disparate image-quality in left- and right eye views[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 1998, 14(1-2): 111-117.
- [41] Stelmach L, Tam W J, and Meegan D, *et al.* Stereo image quality: effects of mixed spatial-temporal resolution[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2000, 10(2): 188-193.
- [42] IJsselsteijn W, De Ridder H, and Vliegen J. Subjective evaluation of stereoscopic images: Effects of camera parameters and display duration[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2000, 10(2): 225-233.
- [43] Seuntiëns P, Meesters L, and IJsselsteijn W. Perceived quality of compressed stereoscopic images: Effects of symmetric and asymmetric JPEG coding and camera separation[J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2007, 3(2): 95-109.
- [44] Boev A, Gotchev A, and Egiazarian K. Towards compound stereo-video quality metric: A specific encoder-based framework[C]. IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation, Denver, CO, 2006: 218-222.
- [45] Horita Y, Kawai Y, and Minami Y, *et al.* Quality evaluation model of coded stereoscopic color image[C]. Proceedings of SPIE, Perth, Aust, 2000, 4067: 389-398.
- [46] Benoit A, Callet P L, and Campisi P, *et al.* Quality assessment of stereoscopic image[J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2008, (2008): 1-13.
- [47] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 and ITU-T SG16 Q.6. Image and depth quality of asymmetrically coded stereoscopic video for 3D-TV, W094, 23rd Meeting, San Jose, California, USA, Apr., 2007.
- [48] Wang X, Yu M, Yang Y, and Jiang G. Research on subjective stereoscopic image quality assessment[C]. Proc. SPIE Vol. 7255, no.725509, San Jose, California, USA, Jan., 2009.
- 蒋刚毅: 男, 1964 年生, 教授, 主要研究方向为多媒体信息通信、图像处理与视频编码。
- 黄大江: 男, 1983 年生, 研究生, 研究方向为多媒体信息通信、图像压缩、图像质量评价。
- 王 旭: 男, 1986 年生, 研究生, 研究方向为多媒体信息通信、图像压缩、图像质量评价。
- 郁 梅: 女, 1968 年生, 教授, 主要研究方向为多媒体信号处理、视频压缩与通信。