

doi: 10.3788/lop47.041002

图像质量评价的研究进展和若干问题的解决途径

赵文哲 秦世引

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要 针对当前图像质量评价的研究现状,对各种评价方法进行了比较分析和归纳总结。利用 U-Texas at Austin 的 LIVE 图片库中的样本对几种常用的客观评价方法进行了测试,利用该数据库中得到广泛认可的主观评价分数,能够衡量客观评价指标与主观评价的符合程度,从而对这些评价指标的单调性、准确性和一致性进行了辨析和阐释,指出了其适用性和局限性。并利用 VQEG 推荐的方法对论断给出了实例印证。进而根据发展趋势和应用需求,对图像质量评价方法在应用中所必须面对的一些问题和解决途径提出了初步的见解。

关键词 图像处理; 图像质量评价; 视觉感受; 人类视觉系统; 结构相似度; 峰值信噪比; 全参考评价; 无参考评价
中图分类号 TP751.1 OCIS 100.2960 100.2980 文献标识码 A

Image Quality Assessment and Some Solving Approaches to Current Issues

Zhao Wenzhe Qin Shiyin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract According to the current development trends in the image quality assessment, a series of assessment methodologies and their corresponding measures were comparatively analyzed in depth. Several conventional measures of performance indices are tested with samples from the image database of LIVE in U-Texas at Austin, based on which the monotonicity, veracity, and consistency of various index measures are discussed, expounded and commented by using the subjective scores in the database, so as to indicate their applicability and limitations. Thus the VQEG standard is employed to validate the correctness of the above results. Moreover, some important issues in engineering applications and possible solving approaches are proposed based on the current development trends and requirements of practical applications.

Key words image processing; image quality assessment; visual perception; human visual system; structural similarity; peak signal to noise ratio; full-reference; no-reference

1 引言

图像质量评价研究是图像处理研究领域中之至关重要的一个环节,在图像处理的各个方面,比如图像压缩、图像传输,以及图像去模糊等各种处理算法中,图像质量评价都起到了非常重要的作用^[1,2]。总的来说,图像质量评价的主要应用有以下 3 个方面^[3,4]: 1) 监控图像或视频获取系统,并自动调节,使其可以获取到最佳图片; 2) 作为图像系统的一种基准指标; 3) 作为一个反馈量来调节算法中的参数,使算法得以优化,从而获得最优性能。总之,质量评价在图像处理的各个领域都有着非常广泛的应用^[5~7],对图像质量

收稿日期: 2009-05-27; 收到修改稿日期: 2009-10-29

基金项目: 国家 863 计划(2006AA04Z207), 国际科技合作项目(2007DFA11530), 国家自然科学基金项目(60875072)和教育部博士点基金(20060006018)资助课题。

作者简介: 赵文哲(1979—), 女, 博士研究生, 主要从事图像处理与视频跟踪等方面的研究。E-mail: zwz@asee.buaa.edu.cn

导师简介: 秦世引(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理与模式识别、大规模复杂系统、多机器人混杂系统等方面的研究。E-mail: qsy@buaa.edu.cn (通信联系人)

评价的研究具有非常重要的实际意义。

图像质量评价方法按评价的主体来划分,可以分为主观评价方法和客观评价方法两大类^[8]。主观评价方法能够反映观察者对图像的感受,但是主观评价方法自身的问题制约了其应用。最初的客观评价方式是针对处理后的图像相对于标准图像其像素值的变化来衡量图像质量的,但是在研究中发现,处理后的图像与标准图像之间的像素差异有时并不能反映出人类的视觉感受,甚至所得到的结果与人类视觉感受相反。进而人们开始研究面向人类视觉特性的一些评价方法^[9],比如结构容量方法(SC),结构相似度方法(SSIM)^[10]等。所有的客观评价方法都分为无参考评价方法^[11]和有参考评价方法^[12]两种。其分类的原则即看计算过程是否需要标准图像作参考。目前有参考评价的方法和指标最多,应用也最为广泛。在众多客观评价指标下,对于该如何去评判某一个质量评价指标的应用效果,视频质量专家组(VQEG)给出了指导性原则^[13],这些原则可以从一定程度上衡量评价指标的应用效果。

本文从目前图像质量评价的各种常用指标入手,针对质量评价的瓶颈以及挑战性问题进行分析和比较,发现其中的规律,指出当前图像质量评价研究所面临的机遇和挑战性问题,使用 VQEG 提出的若干原则来验证本文的分析结果。

2 常规图像质量评价方法

常规的主观评价方法主要依靠人眼主观视觉效果来判断,常用的方法有均值意见评分法(MOS)和国际标准 CCIR500^[14]。在 MOS 标准下,为所有的评价者提供相同的图像观察条件,评价者根据自己的感受进行评分,最终根据多个评价结果得到该图像最终的 MOS 值 N_{MOS} 。为了使主观评价的分数具有无偏性,常采用某种数据处理方法对得到的结果进行简单处理。比如主观评分的无偏差均值意见评分(DMOS)法是让评价者对同一场景的一组图像(该组图像中含有一张标准图像)进行评判,得到每张图像的 N_{MOS} ,并以标准图像的 N_{MOS} 作为标准,用其他图像的 N_{MOS} 与标准图像的 N_{MOS} 进行相减,同时将得到的所有差值归一化到 0~100 之间,最终得到图像的 DMOS 值 N_{DMOS} 。标准图像的 N_{DMOS} 为 0,其他图像与标准图像偏差越大,其 N_{DMOS} 越大,图像质量也越差。主观评价方法的评价结果通常能够较好地反映图像的实际质量,但主观评价方法在实施过程中存在很多问题。比如评价过程消耗的时间长,主观分数受到观察者自身素质、情绪以及测试环境的影响而不稳定,评价所花费的费用较高、不易实现,处理过程不能实现自动化等。目前图像质量主观评价结果主要用来衡量各种客观评价指标与人类主观视觉的符合程度。比如 U-Texas at Austin 的 LIVE 图片库就是为这一目的而设计的,它的每张图片样本都采用标准主观评价方法获得其主观评价分数并将该分数标准化,从而得到每张图片所对应的 N_{DMOS} 。该数据库被广泛应用于图像质量评价的研究工作中。

客观的图像质量评价方法可分为无参考评价方法和有参考评价方法两类。有参考图像质量评价即计算过程需要观测图像与标准图像做对比,从而得出观测图像与标准图像之间的差异,该差异越大,说明观测图像的降质程度越大,图像质量也越差。但在实际应用中,往往找不到标准图像,比如一些在运动中拍摄的图像,往往带有各种噪声和运动模糊,在评价这些图像的质量时,不存在与之做对比的标准图像,因此在这种情况下需要开发无参考图像质量评价指标去衡量其图像质量。目前的常规客观评价方法已有数十种之多^[15~17]。这些方法中大部分都是着眼于处理后的图像与标准图像之间的像素值的变化,对于图像在经过处理后出现的降质,最直接的衡量方法是计算其像素值与标准图像之间的差异,这种思想在有参考图像质量评价方法中得到了较广泛的应用。比如,目前为止应用最广泛的指标是峰值信噪比(PSNR)和均方误差(MSE),即计算两幅图像之间的像素差异。在无参考的图像质量评价方法中,评价的过程仅依赖观测图像,在这种情况下考核图像质量的难度要远远超过有参考的评价方法。目前,无参考评价方法的

评价指标比较少,且已有指标往往只是针对某一特定的应用背景,不具有通用性。随着对各种指标研究的深入,发现在某些情况下上述指标的计算结果与人类视觉感受不符,甚至与人类视觉感受之间出现相反的结论,于是开始寻求各种办法^[18-21]来解决这样的问题。

结合人类视觉系统(HVS)的客观评价方法是将人类视觉特性与图像质量评价相结合^[22,23],但由于目前还未对人类视觉机制本身有清晰的认识,因此也限制了HVS模型的准确度。结构相似度(SSIM)是融入了人类视觉感受因素的客观图像质量评价指标之一,是针对人类视觉对图片的结构信息比较敏感的前提下提出的^[24],因此关注图像的结构失真度。SSIM模型在一定程度上能够反映出人类的视觉感受^[25]。

3 实验与结果分析

3.1 实验方法、数据及结果

为了分析目前客观的图像质量评价的效果,选择了几个典型指标进行计算,并对结果进行对比分析。选用的计算指标是:峰值信噪比,均方误差,结构相似度,信噪比(SNR),拉普拉斯和(LS),灰度差和(GDS),其中前3个指标是全参考评价方法,后3种指标是无参考评价方法。

均方误差是统计观测图像与标准图像像素差,可表示为

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

式中 $f(i, j)$, $\hat{f}(i, j)$ 分别为原图及其被污染之后的像素值。

峰值信噪比的计算公式为

$$N_{\text{PSNR}} = 10 \lg \frac{255^2}{N_{\text{MSE}}}, \quad (2)$$

结构相似度的计算公式为

$$N_{\text{SSIM}}(x, y) = f[l(x, y), c(x, y), s(x, y)], \quad (3)$$

式中 $l(x, y)$, $c(x, y)$, $s(x, y)$ 分别为亮度变化量、对比度变化量和结构变化量。 N_{MSE} , N_{PSNR} , N_{SSIM} 的计算过程需要标准图像作为比对,因此这3个指标是有参考图像质量评价指标。

为了评价无参考图像质量评价指标的性能,对3个无参考评价指标进行了实验。这3个指标计算过程中不需要标准图像信息,仅仅观测图像就能够计算出图像质量的结果,其中

$$N_{\text{SNR}} = 10 \lg \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_j} \right), \quad (4)$$

式中 σ_f , σ_j 分别为原始图和被污染图的方差。

在不存在标准图像的情况下,可以对 N_{SNR} 进行估值,这是一种无参考的质量评价方法。本文采用无参考的估值信噪比计算方法^[26]来计算 N_{SNR} ,使用图像局部方差的最大值和最小值之比作为图像信噪比的估计,并利用经验公式对其进行修正。图像局部方差的计算公式为

$$\sigma_{yL}^2(i, j) = \frac{1}{(2P+1)(2Q+1)} \sum_{k=-P}^P \sum_{l=-Q}^Q [y(i+k, j+l) - \mu_y(i, j)]^2, \quad (5)$$

式中 μ_y 为局部均值, P , Q 分别代表图像的宽和高。

拉普拉斯和的值 N_{LS} ^[27]的计算过程是对每一个像素在 3×3 的邻域内采用拉普拉斯算子得到8邻域微分

值,然后在图像范围内求和。一般图像越清晰,轮廓越鲜明,则每一像素附近的灰度值变化越大, N_{LS} 就越大。 LS 是无参考图像质量评价指标之一。 GDS ^[28]也是衡量图片清晰度的指标,是无参考图像质量评价指标之一。

为了衡量上述指标对图像质量评价的效果,使用来自于 The University of Texas at Austin 的 LIVE 图片库^[29]作为实验样本,图片库中的图像都是对标准图像做不同的处理后得到各种信噪比与效果均不相同的图像组,并利用 MOS 主观评价方法对每张图像进行主观质量评价。图 1 所示即使用标准图像 womanhat 做不同的处理后得到的一组图像。这组图像都是对同一个原始图像进行 3 类不同的处理后得到的图像,这 3 类处理方式分别是 JPEG 压缩处理、加入白噪声处理(wn)和模糊化处理(gblur),每张图像处理时所采用的参数不同,因此得到的处理效果也不尽相同。表 1 中第 3, 4 列分别是对 womanhat 组图中采用的具体处理方法以及参数的描述。图的位置采用两个数字表示,分别代表它的行和列。其中每张图所采用的处理方法以及使用每种图像质量评价指标所得到的计算结果见表 1。



图1 womanhat 组图

Fig.1 Womanhat images group

通过对计算结果及其对应图像进行分析和比较发现:对于采用不同的参数对同一幅图片进行 JPEG 压缩处理后得到的一组图像(在该组中的第 2 至第 7 张图片),除了指标 LS 失效,其他指标均能够与主观感受得到的评分标准达到一致;对于采用加入白噪声后得到的一组图片(在该组中的第 8 至第 12 张图片),指标 LS , GDS 失效,这两个指标无法判别出图像被白噪声污染的程度,其他的 4 个指标均能够判断出图像被白噪声污染的程度;对于采用高斯函数模糊化后得到的一组图片(在该组中的第 13 至第 17 张图片),指标 SNR 失效,无法判别出图像的模糊程度,其他指标均能够判断出图像的模糊程度。

表 1 womanhat 图像的各个指标计算结果
Table 1 Results of womanhat images group

Image position		Assessed image		Image quality assessment index						DMOS
Row	Column	Processing methods	Parameter	PSNR	MSE	SSIM	SNR	LS	GDS	N_{DMOS}
1	1	—	0							0
1	2	JPEG	0.3263	33.4518	29.6231	0.7624	53.7449	68.7616	47.3462	55.6745
1	3	JPEG	0.4531	34.5921	22.9376	0.8165	53.5222	68.9082	50.5015	44.3187
1	4	JPEG	0.601	35.6837	17.7953	0.8518	53.5900	68.8280	53.8623	37.1873
1	5	JPEG	0.1577	28.8974	89.3768	0.5382	54.7249	69.8735	47.2094	61.1951
1	6	JPEG	0.1623	28.9237	88.8709	0.5492	54.9100	69.8828	45.9267	62.6748
2	1	JPEG	1.4703	39.1004	8.1786	0.9295	49.6300	68.8901	68.0689	22.0493
2	2	wn	0.0391	32.0458	40.5977	0.6098	17.5900	68.8396	209.0716	37.3577
2	3	wn	0.0195	37.2007	12.3884	0.8456	24.5596	68.8405	106.4619	25.0127
2	4	wn	0.0938	28.8941	83.8833	0.2698	11.3000	68.9428	829.6837	45.1643
2	5	wn	1.0000	27.2292	123.0720	0.0122	4.0481	81.5862	1611.0000	67.5793
2	6	wn	0.1367	28.2648	96.9609	0.1684	9.1660	69.3648	1621.1000	48.9546
3	1	gblur	1.9375	34.6167	22.4602	0.7588	41.4600	68.6177	7.6917	46.8852
3	2	gblur	1.4791	35.4139	18.6943	0.8058	43.6700	68.6932	10.7195	36.8973
3	3	gblur	1.0208	36.8700	13.3610	0.8739	45.3900	68.7551	16.9032	27.7587
3	4	gblur	0.6771	39.6167	7.1039	0.9428	40.5900	68.7954	27.8954	23.1416
3	5	gblur	3.5416	33.2936	30.4748	0.6775	39.4300	68.3139	3.7109	59.4296

3.2 结果分析

从对比实验可以看出, 指标 PSNR, MSE 与 SSIM 在 3 种处理技术(JPEG 压缩, 白噪声, 模糊化) 的质量时就会发现, 指标 PSNR 的评价结果与主观视觉感受出现了个别不符合的情况, 指标 MSE, SSIM 的独立应用中均能够取得较好的效果; 指标 SNR 是适用于 JPEG 压缩和白噪声技术, 但更适合白噪声技术; 而指标 LS 与 GDS 只适用于高斯模糊技术。当使用这 6 个指标去评判 3 种技术处理后所有图像与主观的视觉感受出现了少部分不符合的情况, 指标 SNR, GDS, LS 与主观的视觉感受出现了较多不符合的情况。因此通过初步的主观判断可知, 某些质量评价指标, 当它们被应用到某一种图像处理技术处理后的图像时, 它们能够很好地反映出处理后图像质量的变化, 并且其计算结果能够较好地符合人类主观视觉感受。由不同处理方法得到的图像, 几乎所有的指标均出现了不同程度地与人类视觉感受不符合的现象, 说明这些指标已经无法与人类视觉感受达到一致的效果。

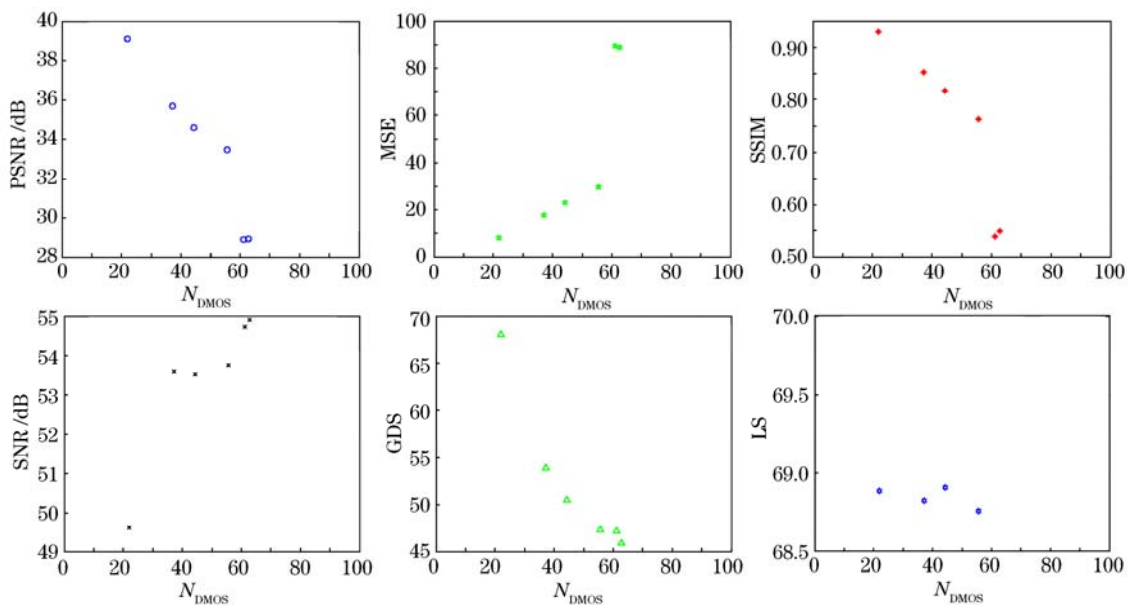


图 2 womanhat 图像经 JPEG 压缩后数据分析图
Fig.2 Data analysis of womanhat images group with JPEG compression

为了进一步分析质量评价指标的性能, 采用 VQEG 推荐方法进行了进一步的实验^[13]。首先对 womanhat 图像数据中采用 JPEG 压缩的数据进行分析, 以 N_{DMOS} 值作为 X 坐标, 以算得的指标值作为 Y 坐标, 绘制散点图, 如图 2 所示。发现除了指标 LS 外, 其他 5 个指标都能够与 N_{DMOS} 呈现单调的趋势, 说明在评价 JPEG 压缩的图像质量时, 指标 LS 失效, 其他 5 个指标均能够对压缩后的图片质量进行评价。

对 womanhat 图像数据中加入白噪声的数据进行分析, 如图 3 所示。发现除了指标 GDS, LS 外, 其他 4 个指标都能够与 N_{DMOS} 呈现单调的趋势。说明在评价含有白噪声的图像质量时, 指标 GDS, LS 失效, 其他 4 个指标均能够对含白噪声的图片进行质量评价。

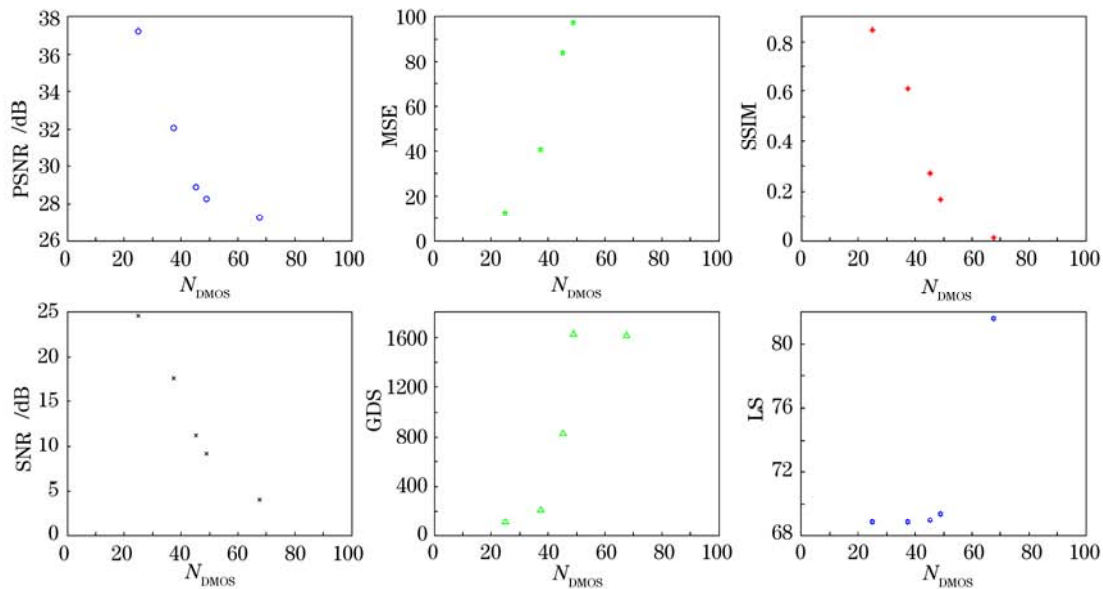


图 3 womanhat 图像经加入白噪声后数据分析图

Fig.3 Data analysis of womanhat images group with white noise

对 womanhat 图像数据中经过高斯函数模糊后的数据进行分析, 如图 4 所示。发现除了指标 SNR 外, 其他 5 个指标都能够与 N_{DMOS} 呈现单调的趋势, 说明在评价出现模糊的图像质量时, 指标 SNR 失效, 其他 5 个指标均能够对模糊的图像进行质量评价。

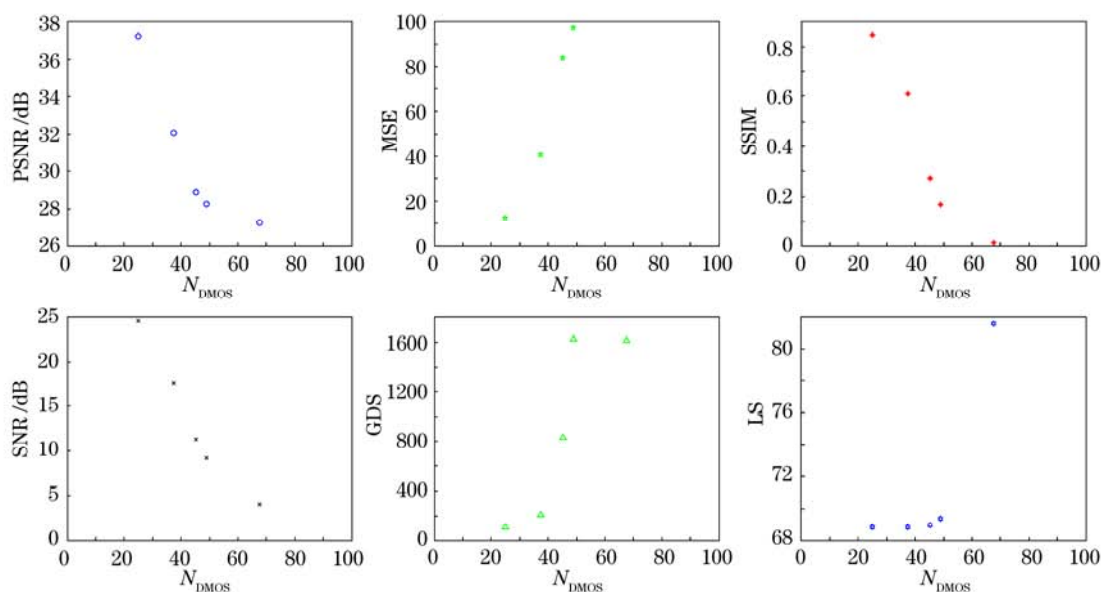


图 4 womanhat 图像经高斯函数模糊后数据分析图

Fig.4 Data analysis of womanhat images group with Gauss blur

除了散点图, VQEG 推荐了 3 个定量指标来分别衡量准确性、单调性和一致性。这 3 个定量指标的计算过程是: 利用曲线拟合的方法得到评价指标与 DMOS 之间的拟合曲线, 根据拟合曲线的参数与相应的指标值能够求得在该拟合曲线下的 N_{DMOSp} , 利用 N_{DMOS} 与 N_{DMOSp} 之间的 Pearson 相关系数来评价该指标的准确性, 利用 N_{DMOS} 与 N_{DMOSp} 之间的 Spearman 秩相关系数来评价该指标的单调性, 利用超出阈值的外部点占全部点的比率来衡量一致性。其中判断为外部点的标准是其 N_{DMOSp} 与 N_{DMOS} 的绝对差值大于 2 倍的 N_{DMOS} 的标准误差。为了得到更具有一般性的结论, 对 LIVE 图像库中所有的图像进行计算分析, 得到的散点图如图 5 所示, 具体计算结果见表 2。

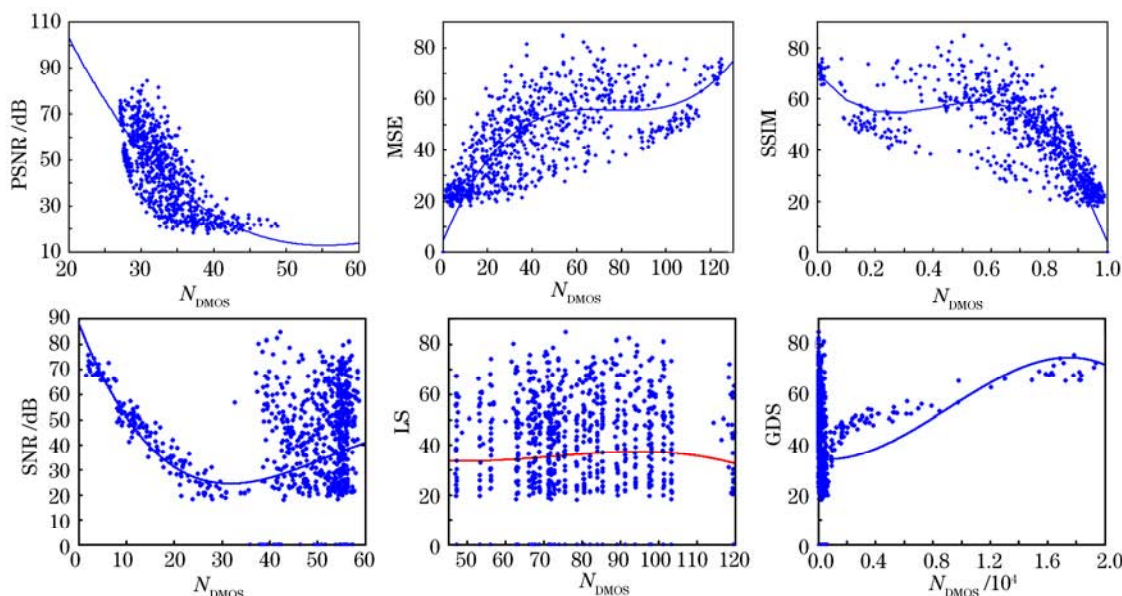


图 5 所有图像数据分析散点图
Fig.5 Data analysis of all images

表 2 准确性、单调性与一致性的计算结果
Table 2 Results of accuracy, monotonicity, and consistency

Performance	Image quality assessment index					
	PSNR	MSE	SSIM	SNR	LS	GDS
Accuracy	0.9091	0.8974	0.9282	0.3505	0.0604	0.2666
Monotonicity	0.8732	-1.0711	0.9159	0.2099	-0.0462	0.4294
Consistency	0.3086	0.3086	0.2597	0.3870	0.3870	0.3880

从实验结果可知, 3 个无参考评价指标 SNR, GDS, LS 散点图呈现杂乱的状态, 且其准确性、单调性与一致性均较差。有参考的 3 个评价指标 PSNR, MSE, SSIM 均具有较好的准确性, 但是指标 MSE 的单调性较差, 3 个指标的一致性均较差。

4 关键性问题和进一步的解决途径

理想的图像质量评价指标应该在 3 个方面具有良好的性能: 1) 与人类视觉感受具有较好的符合程度; 2) 评价指标具有通用性, 能够适用于多种图像处理技术; 3) 评价的结果具有单调性、准确性和一致性。通过对实验数据的分析发现, 在现有的客观评价方法中, 全参考的评价方法不仅能够对某种技术处理后的图像进行单独的评价, 而且也具有一定的通用性, 虽然在多种应用的质量评价中其准确性和一致性还不尽如人意, 但也能在一定程度上衡量用多种处理技术处理后的图像质量优劣。无参考的评价方法只能在某种既定的处理技术上得到较好的评价效果, 完全无法对多种处理技术处理后得到的图像质量进行评价。

在实际应用中, 图像质量评价方法和工具可以在各种图像处理技术中发挥重要作用, 质量评价的结果

可以作为衡量图像处理技术性能的量化指标, 通过进一步的反馈优化, 以强化图像处理技术的优化功能。根据当前的发展趋势和应用需求, 结合本文作者的研究心得, 对工程应用中必须面对的一些关键性的问题及其可能的解决途径进行简要的阐释。

1) 对于某种处理结果, 如果无法按照更为恰当的指标评价其处理质量时, 可以把峰值信噪比作为一种通用性的评价指标来运用。

2) 在能够取得参考图像的情况下, 使用全参考的图像质量评价方法, 其准确性要远远优于无参考的图像质量评价方法。

3) 在实际应用中, 可根据上述的 3 条标准选择评价方法和工具, 当某些指标难以确定时, 可通过分析比较进行优选, 力求选出最合适的指标。

4) 在现阶段, 人类主观视觉感受还很难通过客观计算的方法得以量化, 利用 MOS 方法是一种可行的获取图像主观评价结果的途径。

5) 在对某种图像处理结果进行质量评价时, 可以选用某一专门指标, 但专一指标往往只注重图像质量的某一方面。为了能够取得更加全面的评价效果, 建议选择几个指标进行综合评价, 根据其侧重面的不同, 采用不同的加权值在综合集成的基础上给出综合评判。

5 结 论

关于图像质量评价研究还是图像处理领域中一个正在发展中的分支方向, 面临的困难还很多。但作为提高图像处理前沿水平的重要方法和有力工具, 其在图像处理领域可以发挥无法取代的重要作用。在这种情况下, 如何更好地利用各种评价指标为图像处理服务是广大研究者普遍面临的问题。本文对质量评价的研究现状进行了综合的分析和总结, 提出目前质量评价研究所存在瓶颈和挑战性问题, 针对各种应用场合, 指出使用各种指标所要面对的问题, 并对可能的解决途径做了简要的阐释。

参 考 文 献

- 1 Zhou Wang, Alan C. Bovik, Ligan Lu. Why is image quality assessment so difficult?[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing(ICASSP'02). Orlando. 2002, 4: IV3313-IV3316
- 2 A. De Angelis, A. Moschitta, F. Russo *et al.*. Image quality assessment: an overview and some metrological considerations[C]. 2007 IEEE International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement, Sardinia, Trento, Italy, 2007. 47~52
- 3 Zhan Shuanghuan, Zhang Hongbin. Steganalysis based on image quality metrics[J]. *J. Beijing University of Technology*. 2006, 32(5): 473~476
詹双环, 张鸿宾. 基于图像质量评价量的信息隐藏盲检测[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(5): 473~476
- 4 Chulhee Lee, Sungdeuk Cho, Jihwan Choe *et al.*. Objective video quality assessment[J]. *Opt. Eng.*, 2006, 45(1): 017004
- 5 Wang Kongqiao, Jari A. Kangas. Quality assessment of digital images[J]. *Measurement and Control Technology*. 2000, 19(5): 14~16
汪孔桥, Jari A. Kangas. 数字图像的质量评价[J]. 测控技术, 2000, 19(5): 14~16
- 6 Wei Zhenggang, Yuan Jiehui, Cai Yuanlong. The history, status, and future of image quality evaluation[J]. *J. Image and Graphics*. 1998, 3(5): 386~389
魏政刚, 袁杰辉, 蔡元龙. 图像质量评价方法的历史、现状和未来[J]. 中国图象图形学报, 1998, 3(5): 386~389
- 7 Xu Lu'an. Research and Implement of Image Quality Evaluation Method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003
徐鲁安. 图像质量评价方法的研究与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2003
- 8 Huang Wenhui, Chen Renlei, Zhang Jiamou. Improvement and implementation of objective digital video quality measurement[J]. *J. Beijing University of Posts and Telecommunications*. 2005, 28(4): 87~90
黄文辉, 陈仁雷, 张家谋. 数字视频图像质量客观测量方法的改进与实现[J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(4): 87~90
- 9 Wu Wei. An image quality assessment method based on HVS[C]. 41st annual IEEE international carnahan conference on security technology, Ottawa. 2007. 320~324
- 10 Zhou Wang, Alan C. Bovik, H. R. Sheikh *et al.*. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE*

- Trans. On Image Processing*, 2004, **13**(4): 600~612
- 11 Zhou Wang, Hamid R. Sheikh, Alan C. Bovik. No-reference perceptual quality assessment of JPEG compressed images[C]. IEEE International Conference on Image Processing, Rochester, New York, USA, 2002, **1**: I-477~I-480
- 12 Ligang Lu, Zhou Wang, Alan C. Bovik *et al.*. Full-reference video quality assessment considering structural distortion and no-reference quality evaluation of MPEG video[C]. IEEE Int. Conf. Multimedia, Lausanne, Switzerland, 2002, **1**: 61~64
<http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg>
- 13 Method for the subjective assessment of the quality of television picture. CCIR Recommended 500.
- 14 B. Li, G. W. Meyer, R. V. Klassen. A comparison of two image quality models[C]. *SPIE*, 1998, **3299**: 98~109
- 15 Hamid Rahim Sheikh, Muhammad Farooq Sabir, Alan Conrad Bovik. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2006, **15**(11): 3441~3453
- 17 F. Bock, A. Steudel, H. Clausert *et al.*. A fuzzy rule-based system for the subjective quality evaluation of distorted images[C]. Proceedings of 6th International Conference on Image Processing and its applications, Dublin, 1997, **443**(2): 448~452
- 18 Irwan Prasetya Gunawan, Mohammed Ghanbari. Image quality assessment based on harmonics gain/loss information[C]. IEEE International Conference on Image Processing, Genoa, Italy, 2005. 429~439
- 19 Guangtao Zhai, Wenjun Zhang, Xiaokang Yang *et al.*. GES: a new image quality assessment metric based on energy features in Gabor transform domain[C]. 2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Greece, 2006. 1715~1719
- 20 Hamid Rahim Sheikh, Alan Conrad Bovik, Gustavo de Veciana. An information fidelity criterion for image quality assessment using natural scene statistics[J]. *IEEE Trans. Image Processing*. 2005, **14**(12): 2117~2129
- 21 Honghua Chang, Jianqi Zhang. New metrics for clutter affecting human target acquisition[J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic System*. 2006, **42**(1): 361~368
- 22 Zhou Wang, Eero P. Simoncelli. Stimulus synthesis for efficient evaluation and refinement of perceptual image quality metrics[C]. *SPIE*, 2004, **5292**(99):
- 23 Xuehui Wei, Junli Li, Gang Chen. An image quality estimation model based on HVS.[C]. IEEE TENCON2006, 2006, Hongkong
- 24 Zhou Wang, Eero P. Simoncelli, Alan C. Bovik. Multi-scale structural similarity for image quality assessment[C]. Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, 2002, **2**: 1398~1402
- 25 Zhou Wang, Ligang Lu, Alan C. Bovik. Video quality assessment using structural distortion measurement[C]. IEEE International Conference on Image Processing, Rochester, New York, USA, 2002, **3**: III-65~III-68
- 26 Zou Mouyan. Deconvolution and Signal Recovery[M]. National Defence and Industry Press, 2001. 187~188
邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 国防工业出版社, 2001. 187~188
- 27 Xie Fengying, Zhao Danpei. Visual C++ Digital Image Processing[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2008. 364~365
谢凤英, 赵丹培. Visual C++数字图像处理[M]. 电子工业出版社, 2008. 364~365
- 28 Sun Nongliang, Cao Maoyong. Study on clarity-evaluation-function of motion blurred image[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*. 2001, **22**(22): 204~206
孙农亮, 曹茂永. 运动模糊图像清晰度评价函数的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, **22**(22): 204~206
- 29 <http://live.ece.utexas.edu/>