

基于多元线性回归的图像质量评价方法

韦学辉¹⁾ 李均利²⁾ 陈刚^{1,2)}

¹⁾(浙江大学数学系,杭州 310027) ²⁾(宁波大学信息科学与工程学院,宁波 315211)

摘要 通过回顾图像质量评价的发展过程,对现有的各种图像质量评价方法进行分类。针对各种失真图像如压缩图像、噪声图像等,比较一些有代表性的评价方法的预测值与主观评价分数之间的 Pearson 相关系数和 Spearman 相关系数。结果发现不同评价方法对不同失真的反映灵敏度是不同的,即使是同一种方法在不同相关系数上的表现也不一致。采用多元线性回归分析对选定的图像质量评价方法进行拟合,综合不同方法的优点,提出了一种基于多元线性回归分析的图像质量评价方法。该方法对各种类型和各种程度的失真的灵敏度都比较好,性能也比较稳定。将新方法与选定的各种具有代表性的图像质量评价方法进行比较,实验结果表明,新方法在各个方面都具有较好的鲁棒性。

关键词 图像质量评价 相关系数 线性回归分析 人眼视觉系统

中图法分类号:TN919.81 TN949.61 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-8961(2008)11-2123-09

Image Quality Estimation Based on Multi-linear Analysis

WEI Xue-hui¹⁾, LI Jun-li²⁾, CHEN Gang^{1,2)}

¹⁾(Department of Mathematics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

²⁾(School of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211)

Abstract We describe the development of the objective quality estimation. For some typical methods, we classified them into several groups. Spearman correlation coefficient and Pearson correlation coefficient of given image quality methods of different kind of distortion such as compression, noise and so on are analyzed. It turns out that different methods have different simulations to different distorted images. After that multi-linear regression analysis is used to integrate the advantages of different methods and then we get a new image quality estimation which can simulate smartly all kind of distortions. In our experiment, by analyzing the correlation coefficient we prove that our new quality estimation is robust.

Keywords image quality estimation, correlation coefficient, linear regression analysis, human visual system

1 引言

图像质量评价方法是用来评估编码等图像处理技术的。图像质量评价方法一般分为两类:主观质量评价方法和客观质量评价方法^[1~3]。主观质量评价方法,如主观平均意见分数法(mean opinion of

score, MOS),是一种被广泛采用和令人信服的质量评价方法。但这种方法非常耗费时间,需要大量的参与者,同时得到的评价结果受到许多条件的制约。目前应用最广泛的客观质量评价指标是测量参考图像和失真图像之间偏差的传统图像质量评价指标^[4~6],例如被普遍采用的信噪比(signal to noise ratio, SNR)和峰值信噪比(peak signal to noise ratio,

基金项目:国家自然科学基金项目(60672072);浙江省自然科学基金项目(Y106505)

收稿日期:2006-12-12; **改回日期**:2007-05-31

第一作者简介:韦学辉(1981~),女,浙江大学数学系应用数学博士研究生。主要研究方向为多媒体技术、图像质量评价与视频质量评价。E-mail:icero sew@163.com

PSNR)。这些质量评价指标虽然应用广泛,但存在很多不足^[4]。信噪比、峰值信噪比等传统质量评价指标给出的只是数学和物理意义上的数值,与图像的感知质量之间没有必然联系。为弥补传统质量评价指标的不足,研究者又提出了大量新的客观质量评价指标。这类评价指标结合图像本身的一些特征,例如基于相关性的 Czekonowski 相关系数^[5]、质量指标^[6]以及基于图像边缘的 Pratt Edge 检测指标^[7]。然而这类质量评价方法的评价指标大多只考虑了图像本身的特征却忽略了人的主观感受。近年来,基于人眼视觉系统(human visual system, HVS)特征的图像质量评价指标逐渐成为人们研究的重点^[8~12]。在离散余弦变化域中应用视觉灵敏度函数(contrast sensitive function, CSF)^[13]来模拟 HVS 评价图像质量,如 HVS 绝对范数^[14],HVS L2 范数^[15]等。在小波域中应用 CSF 对图像进行质量评价也是人们研究的热点,如基于掩盖效应的感知域图像质量评价方法^[16]和基于人眼视觉特征的图像质量评价方法^[17]等。基于 HVS 的图像质量评价方法能够模拟人眼的某些特征来评价图像,因此,与人的主观质量评价之间有很好的一致性。另外,在图像质量评价方面也做了一些研究,例如基于图像三构件模型、模糊积分和重要性度量基础上的图像编码质量评价方法^[18,19]等。

度量客观质量评价方法的优劣是通过与主观质量评价方法的比较来判断的^[20~22]。常用的方法是,对特意构造的一系列失真图像用客观图像质量评价方法给出预测,将预测结果同主观质量分数相比较,考察它们之间的相关性^[23~25]。本文也采用这种方法对各种质量评价方法进行比较。

2 试验方法与失真图像

2.1 试验中用到的客观质量评价指标

试验中用到的客观质量评价指标如表 1 所示。按照原理的不同分为 6 类,表达式记作 E_i ,详细信息参见附录。

- (1)A 类,基于像素点灰度值差异的图像质量评价指标,如绝对平均误差等,记作 $X_1 \sim X_5$ 。
- (2)B 类,基于信噪比的图像质量评价指标如 SNR 和 PSNR 等,记作 $X_6 \sim X_8$ 。
- (3)C 类,基于相关性的图像质量评价指标如 Czekonowski 相关系数^[5]、质量指标^[6]等,记作 $X_9 \sim X_{12}$ 。

- (4)D 类,基于边缘的图像质量评价指标,选用改进 Pratt Edge 检测方法^[7]。改进指的是在检测时不只考虑对应边缘点灰度值的差异,还考虑了它们位置信息的差别,记作 X_{13} 。
- (5)E 类,基于频域处理的图像质量评价指标,对图像做快速傅里叶变换之后,通过频谱、相位等信息的差异来评价图像。试验中选取 5 种作代表,记作 $X_{14} \sim X_{19}$ 。
- (6)F 类,基于人眼视觉系统的评价指标,选取用 CSF 来测量图像质量的评价方法,如 HVS 绝对值范数和 HVS L2 范数,记作 $X_{20} \sim X_{21}$ 。

表 1 质量评价方法列表
Tab.1 List of quality methods

	符号	名称	附录公式
(1)A 类	X_1	均方根误差	E_1
	X_2	平均绝对误差	E_2
	X_3	修正最大范数	E_3
	X_4	多分辨率误差	E_4
	X_5	均方差	E_5
(2)B 类	X_6	均方信噪比	E_6
	X_7	信噪比	E_7
	X_8	峰值信噪比	E_8
(3)C 类	X_9	标准互相关	E_9
	X_{10}	图像保真度	E_{10}
	X_{11}	Czekonowski 相关	E_{11}
	X_{12}	质量指标	E_{12}
(4)D 类	X_{13}	Pratt 边缘测量	E_{13}
	X_{14}	频谱能量误差	E_{14}
	X_{15}	频谱相位误差	E_{15}
	X_{16}	加权频谱误差	E_{16}
	X_{17}	分块频谱能量误差	E_{17}
(5)E 类	X_{18}	分块频谱能量误差	E_{18}
	X_{19}	分块加权频谱误差	E_{19}
(6)F 类	X_{20}	HVS 绝对值范数	E_{20}
	X_{21}	HVS L2 范数	E_{21}

2.2 试验中用到的图像

本文以 CCIR500 的一个绝对分类尺度为基础确立客观评价价值和 MOS 值间的关系^[19]。图像的 MOS 值 Y 用下面的质量评价方法获得,在一定的实验条件下,假设第 i 个人对第 k 幅图像给出的分数记作 $A(i,k)$,那么第 k 幅图像最终的 MOS 值为: $Y_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A(i,k)$,

其中 n 为观察者的个数。

本文采用 8 幅参考图像(如图 1 所示),每幅图像采用 JPEG、小波和分形编码等压缩方法获得 15 幅具有不同压缩系数的图像,同时每幅参考图像又

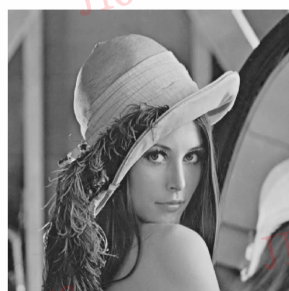
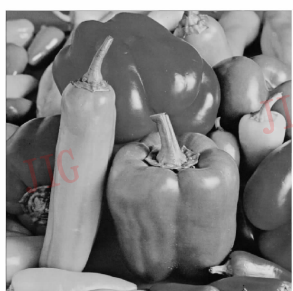
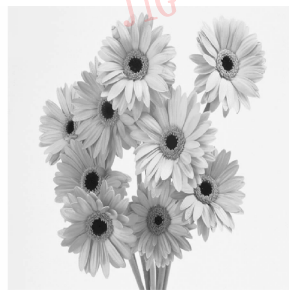
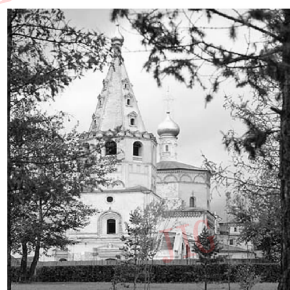


图 1 标准图片

Fig. 1 Standard pictures

3 相关性分析

3.1 分析方法

通常在考察客观质量评价指标与主观质量评价指标之间的相关性时采用的是 Pearson 相关系数。这是一种相对简单的相关性度量法,其表达式为

$$R_{X,Y} = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

N 表示测量图像的数目,实验中 $N = 280$; $\bar{X}$ 与 $\bar{Y}$ 分别表示客观质量评价指标向量样本组 X 以及 MDS 向量样本组 Y 的均值。Pearson 相关系数是区间 $[-1, 1]$ 上的值,绝对值越接近 1 表明样本组之间的相关性越好。

实验中,还考虑另外一种相关系数——Spearman 等级相关系数。这种相关系数主要测量两组顺序配对样本的次序相关性。之所以考虑等级相关系数,是因为主观质量评价方法(MOS)给出的评价价值 Y 采用了等级的形式。Spearman 等级相关系数也是

通过加上不同程度的不同噪声,如高斯噪声、椒盐噪声等,获得 15 幅具有不同强度系数的几类噪声图像,然后经过锐化、模糊等处理方法得到失真图像 5 幅。

VQEG(video quality expert group)使用的衡量视频的客观质量评价指标能否很好反映主观质量评价指标的标准之一^[26]。Spearman 等级相关系数的计算公式如下:

$$\theta = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (2)$$

式中, $d_i = R_{X_i} - R_{Y_i}$, R_{X_i} 和 R_{Y_i} 分别表示 X_i 和 Y_i 在各自向量样本中的名次。Spearman 相关系数也是区间 $[-1, 1]$ 上的一个值,同 Pearson 相关系数一样,绝对值越接近 1,表明对应样本组间的相关性越好。

3.2 实验结果

对本文提到的 21 种选定的代表性客观质量评价指标和 MOS 值之间的关系用 Pearson 相关系数和 Spearman 等级相关系数进行分析,数据如表 2 所示。

判断一种客观评价指标是否与主观评价指标具有很好的相关性,主要观察它与主观评价价值之间的 Pearson 相关系数和 Spearman 等级相关系数的绝对值是否接近于 1。由图 2、图 3、图 4 可以得出:

(1)对于压缩造成的失真:各种质量评价方法的

评价值 X_7 , X_3 以及 X_8 与主观质量评价价值之间的 Pearson 相关系数比较高,分别为 0.869 989,0.84 807 以及 0.839 493;但是各种质量评价方法的评价值 X_{21} , X_{20} 和 X_4 与主观评价价值之间的 Spearman 相关系数比较高,分别是 0.957 09,0.955 32 和0.915 99。

(2)对于噪声造成的失真: X_8 , X_7 以及 X_1 与主观质量评价价值之间的 Pearson 相关系数比较高,分别是 0.919 775,0.906 193 以及 0.903 75;但是 X_8 , X_1

和 X_5 与主观评价价值之间的 Spearman 相关系数比较高,绝对值都是 0.93 499。

(3)如果将噪声、压缩以及其他方面的失真综合考虑: X_7 , X_8 以及 X_1 与主观质量评价价值之间的 Pearson 相关系数比较高,分别是 0.783 104, 0.781 987和 0.696 39;但是 X_{21} , X_{20} 及 X_4 与主观质量评价价值之间的 Spearman 相关系数比较高,分别是 0.848 33,0.844 23 和 0.807 08。

表 2 相关数据分析 (#表示不显著)
Tab.2 Data correlations analysis (# means not significant)

质量评价指标	压缩失真		噪声失真		综合失真	
	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman
X_1	-0.762 29	-0.860 69	-0.903 75	-0.934 99	-0.696 39	-0.793 14
X_2	-0.745 38	-0.846 37	-0.688 03	-0.691 44	-0.588 04	-0.667 32
X_3	-0.848 07	-0.900 08	-0.462 81	-0.499 28	-0.554 13	-0.694 95
X_4	-0.630 91	-0.915 99	-0.429 57	-0.794 31	-0.418 35	-0.807 08
X_5	-0.596 78	-0.860 69	-0.791 08	-0.934 99	-0.575 39	-0.793 14
X_6	0.546 948	0.782 82	0.688 231	0.923 326	0.550 642	0.773 751
X_7	0.869 989	0.862 622	0.906 193	0.920 859	0.783 104	0.794 904
X_8	0.839 493	0.860 693	0.919 775	0.934 99	0.781 987	0.793 136
X_9	0.137 124#	-0.14 069#	0.439 345	0.598 847	0.185 733	0.215 589
X_{10}	-0.279 3#	-0.05 988#	0.048 741#	0.166 002#	0.001 324#	0.042 486#
X_{11}	-0.697 93	-0.703 72	-0.659 6	-0.682 29	-0.579 99	-0.638 82
X_{12}	-0.034 4#	0.6091 93	0.066 998#	0.732 509	0.032 471#	0.608 654
X_{13}	-0.438 83	-0.441 93	-0.201 53	0.003 273#	-0.262 46	-0.187 39
X_{14}	-0.751 7	-0.752 82	-0.529 17	-0.741 19	-0.484 24	-0.724 59
X_{15}	-0.455 88	-0.578	-0.371 22	-0.534 62	-0.421 65	-0.533 78
X_{16}	-0.790 24	-0.759 84	-0.846 55	-0.890 1	-0.637 57	-0.744 29
X_{17}	-0.782 05	-0.753 62	-0.849 22	-0.889 09	-0.641 63	-0.74 12
X_{18}	-0.427 58	-0.572 5	-0.343 98	-0.528 92	-0.401 02	-0.528 68
X_{19}	-0.737 18	-0.708 92	-0.840 92	-0.871 26	-0.652 23	-0.730 74
X_{20}	-0.644 08	-0.955 32	-0.739 6	-0.869 12	-0.571 16	-0.844 23
X_{21}	-0.683 45	-0.957 09	-0.770 01	-0.893 52	-0.602 06	-0.848 33

从上面的结果来看,客观质量评价指标 X_7 以及 X_8 的 Pearson 相关系数和 Spearman 等级相关系数不论是对压缩失真、噪声失真还是综合失真都是比较高的。这里 X_7 为信噪比、 X_8 为峰值信噪比,这是常用的衡量图像质量的指标。它们对各类失真图像的评价能力都高于其他的质量评价指标。质量评价指标 X_{20} 、 X_{21} 的 Spearman 等级相关系数比较高,这是因为两种方法的评价指标是基于人眼视觉系统特征

的,体现了感知质量的特点。

从表中还可以看出,不同的方法对不同类型的失真如压缩失真、噪声失真等的敏感度是不同的。而且这些质量评价指标针对各种失真的 Pearson 相关系数和 Spearman 等级相关系数并不一致。由此说明,这些质量评价指标不能很好地预测图像质量。而各种质量评价指标又具有各自的优点,有一定的适用范围。因此,希望能够寻求一种新的图像质量

评价指标,这种新质量评价指标具有上述质量评价指标的优点,能最佳拟合出图像的感知质量。于是根据各种质量方法的评价值对主观评价值做出的贡献,提出用多元线性回归对上述质量评价指标进行分析。

4 基于多元线性回归分析的图像质量评价方法

4.1 多元线性回归的思想

采用多元线性回归分析中逐步回归法,其思想^[28]是:考虑主观质量评价方法——MOS 的值向量,记作 Y ,对已知的一组客观质量评价方法的评价值 $(X_1, X_2, \cdots, X_{21})$ 进行线性回归时,从变量 $X_1, X_2, \cdots, X_{21}$ 中,逐步地选出对已知解释变差的贡献(即偏解释变差)最大的变量进入回归方程,其中, X_j 为客观质量评价方法 j 对所有的实验图像(实验中为 280 幅)的质量预测值向量。而对偏解释变差贡献大小的判别是依据相应的 F 统计量 F_j 的值。 F_j 的值 f_j 最大的 X_j 先进入方程;而最后一个进入方程的自变量 X_i 也要满足: f_i 的显著性概率 p , 不大于已选定的显著性水平 α 。

4.2 实验结果及分析

实验中,用 280 组数据来拟合主观质量评价方法的 MOS 值。拟合程度不同,选用的自变量个数也不同,逐步线性回归分析法给出了多组结果。自变量的个数越多,拟合出来的结果就越接近主观评价方法的 MOS 值。实验中,综合考虑拟合方法的计算复杂度和预测的精确度,最终选用 3 个变量来拟合主观质量评价方法的 MOS 值。

表 3 测试结果
Tab.3 Results of the test

	模型	系数
1	常数	2.914
	X_7	0.783
2	常数	2.914
	X_7	0.877
	X_{21}	-0.322
3	常数	2.914
	X_7	0.853
	X_{21}	-0.314
	X_{13}	-0.180

表 3 是选取 3 个变量时逐步线性回归法的结果,也是最终获得的图像质量评价指标——MLRE (multi-linear regression based estimation),其表达式为: $Y = 2.914 + 0.853X_7 - 0.314X_{21} - 0.180X_{13}$ 。用拟合出来的函数对实验图像进行测试,考察函数对压缩失真、噪声失真以及其他失真的预测,计算预测得到的评价分数与主观评价方法的 MOS 值之间的 Pearson 相关系数和 spearman 等级相关系数并与前面质量评价方法的预测值进行比较分析。MLRE 的相关系数在各种失真上的表现值如表 4 所示。

表 4 MLRE 的相关数据分析
Tab.4 Data Correlations Analysis of MLRE

失真类型	Pearson 相关系数	Spearman 相关系数
压缩失真	-0.879	-0.910
噪声失真	-0.901	-0.916
综合失真	-0.878	-0.890

用图 2、图 3、图 4 来描述各种代表性质量评价方法的质量评价指标以及 MLRE 在两种相关系数上的表现。在图 2~图 4 中,MLRE 被记作 X_{22} 。对图 2、图 3、图 4 中的数据进行比较发现:

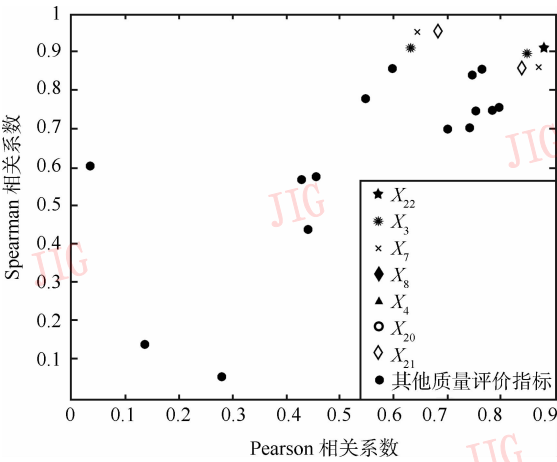


图 2 各种质量评价指标对压缩失真的表现
Fig.2 Correlations analysis over compression effect

(1)对压缩引起的失真:新质量评价指标与 MOS 值之间的 Pearson 相关系数是 0.879,与其他评价指标相比较是最高的。针对压缩带来的失真,与其他质量评价指标相比,新评价指标与 MOS 值之间具有更好的 Pearson 相关性。而此时新质量评价指标与 MOS 值之间的 Spearman 相关系数超过了 0.9,也就是说在等级相关方面,新质量评价指标也取得

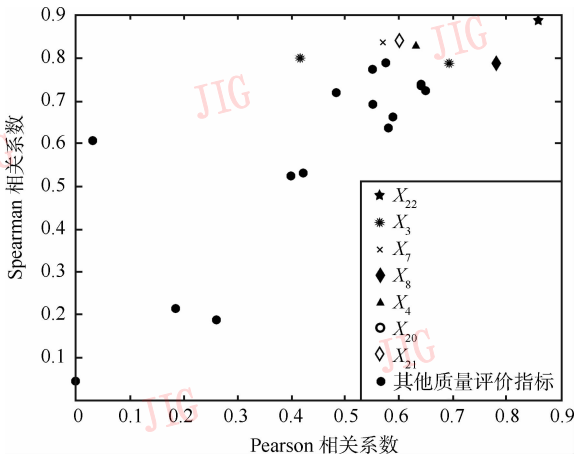


图 3 各种质量评价指标对噪声失真的表现

Fig. 3 Correlations analysis over noising effect

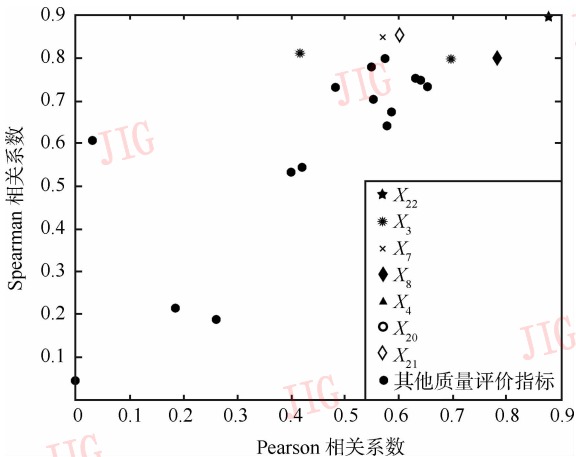


图 4 各种质量评价指标对综合失真的表现

Fig. 4 Correlations analysis over integration effect

了很好的结果。

(2)对噪声引起的失真:新质量评价指标与 MOS 值之间的 Pearson 相关系数是 0.901,与其他质量评价指标相比较也是最高的。针对噪声失真,与其他评价指标相比新质量评价指标与 MOS 值之间具有更好的 Pearson 相关性。而此时新质量评价指标与 MOS 值之间的 Spearman 相关系数超过了 0.910。在等级相关方面,新质量指标指标也取得了很好的结果。

(3)对综合失真:新质量评价指标与 MOS 值之间的 Pearson 相关系数是 0.878,与其他质量评价指标相比较是最高的。对综合失真,各种质量评价指标相比较新质量评价指标与 MOS 值之间具有更好的 Pearson 相关性。而此时新质量评价指标与 MOS 值之间的 Spearman 相关系数达到了 0.890,与其他

质量评价指标相比较也是最高的,因此在等级相关方面,新方法与 MOS 值之间具有最好的 Spearman 相关性。

5 结 论

现有的各种图像质量评价指标对不同类型的失真,敏感度是不一样的。而它们对图像质量的评价结果与主观评价在 Pearson 相关系数和 Spearman 相关系数上也不能保持一致性。例如有的评价方法对噪声失真反应比较灵敏,并且评价结果与主观分数之间的 Pearson 相关系数和 Spearman 相关系数有很好的 consistency,但是,在针对其他类型的失真时就不具备这种性质。某些质量评价指标能够取得很好的 Pearson 相关系数,但是在 Spearman 相关系数上的表现却一般,而有的质量评价指标的表现却恰恰相反。总而言之,已有的客观图像质量评价指标不能够很好地保持与主观评价指标之间的一致性。通过多元线性回归获得的新质量评价指标 MLRE,针对各种失真类型以及在不同相关系数上的表现,都能够单调地连续地并且准确的反映图像的主观评价分数,具有鲁棒性。特别是在图像失真类型不明确的情况下,能够更精确地评价图像质量。

通过多元线性回归分析得到的图像质量评价模型之所以与主观评价之间具有很好的一致性,是因为它与人眼在观察图像的过程中所感受到的视觉刺激类似。观察者在观察一幅图像时,首先对观察者的眼睛产生刺激的是图像的亮度信息。图像的亮暗程度是首先映现在观测者眼前的刺激信息。其次就是图像的各个频率对人眼造成的刺激,简单地说就是一幅图像变化的复杂度。不同的频率信息对人眼视觉系统会产生不同的刺激,通常用 CSF 来描述这方面的信息。最后观察者会对两幅图像进行刻意的比较,进行比较的主要是图像的细节信息。而边缘在图像的细节信息中相对而言是比较重要的,观察者也会在这方面给予更多的关注。通过多元线性回归分析得到的结果信息与观察过程中人眼接收的刺激信息相同。也就是说多元线性回归分析得到的评价在一定程度上模拟了人眼观察和评价图像的过程,因此能够取得较好的效果。

附录:各种评价指标的介绍

$f(x, y)$ 与 $\hat{f}(x, y)$ 分别代表参考图像和失真图像像素的灰度值, M 、 N 表示图像的长度和宽度。

(1) 基于像素点灰度差异的质量评价指标

X_1 : 均方根误差 (Root Mean Square Error) 为

$$E_1 = \left[\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\hat{f}(x, y) - f(x, y)]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

X_2 : 平均绝对值误差 (Mean Absolute Error) 为

$$E_2 = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\hat{f}(x, y) - f(x, y)]$$

X_3 : 修正最大范数 (Modified Infinity Norm^[15]) 为

$$E_3 = \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\max_{x, y} |\hat{f}(x, y) - f(x, y)|)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

X_4 : 多分辨率误差 (Multi-Resolution Error) 为

$$E_4 = \sum_{r=1}^R d_r^k, \text{ 式中, } d_r = \frac{1}{2^r} \frac{1}{2^{2r-2}} \sum_{x, y=1}^{2^{r-1}} |g_{x, y} - \hat{g}_{x, y}|,$$

r 表示将图像的长和宽 r 等分, $g_{x, y}$ 和 $\hat{g}_{x, y}$ 分别表示像素 (x, y) 所在区域内的平均灰度值。

X_5 : 均方差 (Mean Square Error) 为

$$E_5 = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\hat{f}(x, y) - f(x, y)]^2$$

(2) 基于信噪比的质量评价指标

X_6 : 均方信噪比 (Mean square Signal-to-Noise Ratio) 为

$$E_6 = \frac{1}{MN} \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \hat{f}(x, y)^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\hat{f}(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2}$$

X_7 : 信噪比 (Signal-to-Noise Ratio) 为

$$E_7 = 10 \lg \left(\frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\hat{f}(x, y) - f(x, y)]^2} \right)$$

式中,

$$\bar{f}(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)$$

X_8 : 峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio) 为

$$E_8 = 10 \lg \left(\frac{f_{\max}^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\hat{f}(x, y) - f(x, y)]^2} \right)$$

其中, $f_{\max}$ 表示像素的最大值, 在 8 位灰度图像中

为 255。

(3) 基于相关性的质量评价指标

X_9 : 标准互相关 (Normalized Cross Correlation)

为

$$E_9 = \frac{1}{MN} \left(\frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \hat{f}(x, y)^2} \right)$$

X_{10} : 图像保真度 (Image Fidelity) 为

$$E_{10} = \frac{1}{MN} \left(\frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \hat{f}(x, y)}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)^2} \right)$$

X_{11} : Czekonowski 相关 (Czekonowski Correlation)

为

$$E_{11} = \frac{1}{MN} \left(1 - \frac{2 \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \min[f(x, y), \hat{f}(x, y)]}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) + \hat{f}(x, y)]} \right)$$

X_{12} : 质量指标 (Quality Index) 为

$$E_{12} = \frac{4 \sigma_{ff} \bar{f}(x, y) \bar{\hat{f}}(x, y)}{(\sigma_f^2 + \sigma_{\hat{f}}^2)(\bar{f}^2 + \bar{\hat{f}}^2)}$$

式中,

$$\bar{f}(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)$$

$$\bar{\hat{f}}(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \hat{f}(x, y)$$

$$\sigma_{ff}^2 = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2$$

$$\sigma_{\hat{f}}^2 = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\hat{f}(x, y) - \bar{\hat{f}}(x, y)]^2$$

$$\sigma_{ff} = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f(x, y) - \bar{f}(x, y))(\hat{f}(x, y) - \bar{\hat{f}}(x, y))$$

(4) 基于边缘的质量评价指标

X_{13} : Pratt 边缘测量 (Pratt Edge Measurement) 为

$$E_{13} = \frac{1}{\max(n_d, n_i)} \sum_{i=1}^{n_d} \frac{1}{1 + d_i}$$

式中, n_d , n_i 分别表示从参考图和失真图像中检测到的边缘像素的个数。 d_i 表示参考图像上的第 i 个边缘像素与失真图像对应边缘像素的距离, 这里的距离是指相对位置变化和像素灰度值变化的最小值。

(5) 基于频域处理的质量评价指标

X_{14} : 频谱能量误差 (Spectral Magnitude Error) 为

$$E_{14} = \frac{1}{MN} \sum_{\mu=0}^{M-1} \sum_{\nu=0}^{N-1} [\hat{M}(\mu, \nu) - M(\mu, \nu)]^2$$

其中, $M(\mu, \nu)$ 和 $\hat{M}(\mu, \nu)$ 分别表示快速傅里叶变换后参考图像和失真图像的频谱。

X_{15} : 频谱相位误差 (Spectral Phase Error) 为

$$E_{15} = \frac{1}{MN} \sum_{\mu=0}^{M-1} \sum_{\nu=0}^{N-1} [\hat{\phi}(\mu, \nu) - \phi(\mu, \nu)]^2$$

式中, $\phi(\mu, \nu)$ 和 $\hat{\phi}(\mu, \nu)$ 分别表示快速傅里叶变换后参考图像和失真图像的相位。

X_{16} : 加权频谱误差 (Weighted Spectral Error) 为

$E_{16} = \lambda E_{14} + (1 - \lambda) E_{15}$, 式中 λ 是给定的权值。

X_{17} : 分块频谱能量误差 (Block Spectral Magnitude Error): 首先将图像分为若干小块, 对每一小块的图像做快速傅里叶变换后求出每一小块的 X_{14} , 对每一小块的值进行排序后选出其中的中间值作为评价的标准。设第 l 块的 X_{14} 记作 E_{14}^l , 则有

$$E_{17} = \text{median}_l E_{14}^l$$

X_{18} : 分块频谱相位误差 (Block Spectral Phase Error): 首先将图像分为若干小块, 对每一小块的图像做快速傅里叶变换后, 对每一小块求出对应的 X_{15} , 对每一小块的值进行排序后选出其中的中间值作为评价的标准。设第 l 块的 X_{15} 记作 E_{15}^l , 则有

$$E_{18} = \text{median}_l E_{15}^l$$

X_{19} : 分块加权频谱误差 (Block Weighted Spectral Error): 首先将图像分为若干小块, 对每一小块的图像做快速傅里叶变换后, 求出每一小块对应的 X_{16} , 对每一小块的值进行排序后选出其中的中间值最为评价的标准。设第 l 块的 X_{16} 记作 E_{16}^l , 则有

$$E_{19} = \text{median}_l E_{16}^l$$

(6) 基于人眼视觉系统的质量评价指标

给定如下视觉灵敏度函数 (CSF):

$$H(\rho) = \begin{cases} 0.05e^{\rho^{0.554}} & \rho < 7 \\ e^{-9[\lg \rho - \lg 9]^2 \cdot 3} & \rho \geq 7 \end{cases}$$

式中, $\rho = (\mu^2 + \nu^2)^{\frac{1}{2}}$, μ 与 ν 是指频域上的水平与垂直频率。在图像的离散余弦变换之后应用视觉灵敏度函数, 最后进行反离散余弦变换。

应用视觉灵敏度函数的质量评价指标有

X_{20} : HVS 绝对值范数 (HVS Absolute Norm) 为

$$E_{20} = \frac{1}{MN} \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |U\{f(x, y)\} - U\{\hat{f}(x, y)\}|}{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |U\{f(x, y)\}|}$$

X_{21} : HVS L2 范数 (HVS L2 Norm) 为

$$E_{21} = \left(\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |U\{f(x, y)\} - U\{\hat{f}(x, y)\}|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

参考文献 (References)

- Lewis N W, Allnatt J A. Subjective quality of television pictures with multiple impairments [J]. Electron Letters, 1965, 1(7): 187 ~ 188.
- Jones B L, Turner J A. Subjective assessment of cable impairments on television picture quality [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1992, 38(4): 850 ~ 861.
- ITU BT 500210, Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures [S].
- Daly S. The visible differences predictor: An algorithm for the assessment of image fidelity [A]. In: proceedings of Digital Images and Human Vision [C], Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1993: 179 ~ 205.
- Andreouts D, Plataniotis K N, Venetsanopoulos A N. Distance measures for color image retrieval [A]. In: proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, Chicago, Illinois, USA, 1998: 770 ~ 774.
- Wang Zhang, Book Alan C. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81 ~ 84.
- Pratt W K. Digital Image Processing [M], New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1978.
- Miyahara M, Kotani K, Algazi V R. Objective picture quality scale (PQS) for image coding [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(9): 213 ~ 226.
- Nill N B, Bouzas B H. Objective image quality measure derived from digital image power spectra [J]. Optical Engineering, 1992, 31(4): 813 ~ 825.
- Franti P. Blockwise distortion measure for statistical and structural errors in digital images [J]. Signal Processing: Image Communication, 1998, 13(2): 89 ~ 98.
- Winkler S. A perceptual distortion metric for digital color images [A]. In: Proceedings of 5th International Conference on Image Processing [C], Chicago, Illinois, USA, 1998: 399 ~ 403.
- Frese T, Bouman C A, Allebach J P. Methodology for designing image similarity metrics based on human visual system models [A]. In: proceedings of SPIE / IS&T Conference on Human Vision and Electronic Imaging [C], San Jose, California, USA: 1997: 472 ~ 483.
- Nill N B. A visual model weighted cosine transform for image compression and quality assessment [J]. IEEE Transactions on

- Communications, 1985, **33**(6): 551 ~ 557.
- 14 Eskicioglu A M, Fisher P S. Image quality measures and their performance [J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, **43**(12): 2959 ~ 2965.
- 15 Aveibas I, Sankur B. Statistical analysis of image quality measures [A]. In: Proceedings of European Signal Processing Conference on EUSIPCO-2000 [C], Tampere, Finland, 2000: 2181 ~ 2184.
- 16 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): 195 ~ 200. [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): 195 ~ 200.]
- 17 Ding Xu-xing, Zhu Ri-hong, LI Jian-xin. A criterion of image quality assessment based on property of HVS [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, **9**(2): 190 ~ 194. [丁绪星, 朱日宏. 一种基于人眼视觉特性的图像质量评价 [J]. 中国图象图形学报, 2004, **9**(2): 190 ~ 194.]
- 18 Li Jun-li, Chi Zhe-ru, Chen Gang, *et al.* Image coding quality assessment using fuzzy integrals with three-component image model [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2004, **12**(8): 99 ~ 106.
- 19 Li Jun-li, Chen Gang, Chi Zheru, *et al.* A three-step objective image quality assessment method [A]. In: Proceedings of the International Conference on Virtual Reality and its Application in Industry [C], Hangzhou, China, 2002: 526 ~ 531.
- 20 Perlmutter S M. Image quality in lossy compressed digital mammograms [J]. Signal Process, 1997, **59**(2): 189 ~ 210.
- 21 Lambrecht C B. Special issue on image and video quality metrics [J]. Signal Process, 1998, **70**(3): 153 ~ 297.
- 22 Lehmann T, Sovakar A, Schmitt W, *et al.* A comparison of similarity measures for digital subtraction radiography [J]. Computers in Biology and Medicine, 1997, **27**(2): 151 ~ 167.
- 23 Kanugo T, Haralick R M. A methodology for quantitative performance evolution of detection algorithms [J]. IEEE Transactions on Image Process, 1995, **4**(12): 1667 ~ 1673.
- 24 Matrik R, Petrou M, Kittler J. Error-sensitivity assessment of vision algorithms [J]. IEEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing, 1998, **145**(2): 124 ~ 130.
- 25 Halford C E, Krapels K A, Driggers R G, *et al.* Developing operational performance metrics using image comparison metrics and the concept of degradation space [J]. Optical Engineering, 1999, **38**(5): 836 ~ 844.
- 26 Ann Marie Rohaly, Philip Corriveau, *et al.* Video Quality Experts Group: current results and future directions [EB/OL]. <http://www.crc.ca/vqeg/>, 2002.
- 27 Ma Qing-guo. Statistics for Business [M]. Beijing: Science Publishing House, 2002: 267 ~ 276. [马庆国. 管理统计 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 267 ~ 276.]