基于 SSIM 的印刷图像质量评价研究

徐 敏[1]，郑元林[2]

(1. 上海理工大学，上海 200093；2. 西安理工大学，西安 710048)

摘要：利用心理物理学实验方法，对 10 幅 ISO 标准图像进行了印刷图像的视觉评价实验，分析了颜色、对比度、阶调等图像属性在图像评价中的权重，并分析了 MSE，PSNR 和 SSIM 模型在印刷图像评价时的性能。结果表明，结构相似度模型具有较好的性能，在印刷品质量评价中有较好的应用前景。

关键词：图像质量；结构相似度；视觉实验

中图分类号：TS801.3；TS801.9 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-3563(2012)05-0098-04

Research of Printed Image Quality Based on SSIM

XU Min[1]，*ZHENG Yuan-lin*[2]

(1. University of Shanghai for Science and Technology，Shanghai 200093，China；2. Xi'an University of Technology，Xi' an 710048，China)

Abstract：Visual experiments were carried out on 10 ISO images using psychophysics experiment method. Weight of image attributes，such as color，contrast，and tone，was analyzed. Three metrics，i. e. MSE，PSNR and structural similarity index (SSIM)，were analyzed. The result showed that SSIM is better than others when they are used to evaluate printed images.

Key words：image quality；SSIM；visual experiment

现代印刷中，图像的质量评价一般是借助印刷测控条、梯尺等工具，结合目视主观评价来确定图像质量。借助测控条等工具是比较简洁的测量方法，但不能直接反映图像的质量特征；而目视评价是主观质量评价方法，它充分地考虑了观察者对图像的理解效果，但是这种方法由于受到观察者知识背景、观测目的和环境等影响，具有很大的自由度，并且从工程的角度看来，这种方法过于费时费力，且难以用数学模型表达并加以应用[1]。所以，研究基于图像画面的印刷图像直接的客观评价方法是非常有意义的。

对于客观质量评价方法，目前人们最常用的指标是均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)，它们都是基于统计特性的客观图像质量评价方法。这 2 种方法比较直观、严格、简单，但是由于其都是基于逐像素点比较图像差别，没有考虑到人眼的视觉特征，因此它们只能近似地反映图像的主观视觉质量。

1 结构相似度

现代研究表明[2]：人类视觉系统的主要功能是从视觉区域提取图像的结构性信息，比较的是 2 幅图像的相似度，而不是差值，从而获得图像的相似结构映像，得到客观预测质量分析。因此，Zhou Wang 等人[2]提出了结构相似度(SSIM)的图像评价方法。SSIM 将图像分成亮度、对比度、结构，分别进行比较，然后加权乘积获得结构相似值，其原理见图 1。

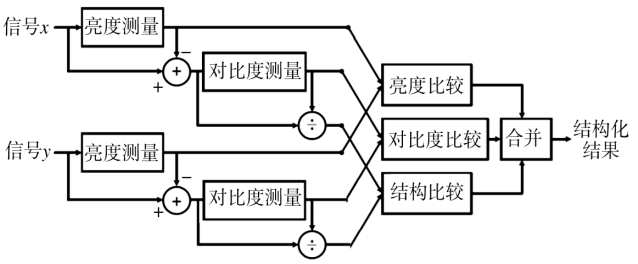

图 1 结构相似度(SSIM)原理

Fig. 1 Principle of structural similarity (SSIM)

收稿日期：2011-11-09

作者简介：徐敏(1977－)，女，山东人，硕士，上海理工大学讲师，主要从事印刷色彩及印刷图像质量的研究。

结构相似度定义为：

$$S(x,y)=f[l(x,y),c(x,y),s(x,y)]$$

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

$$c(x,y)=\frac{2\sigma_x\sigma_y+C_2}{\sigma_x^2+\sigma_y^2+C_2} \quad (1)$$

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

式中：μ 为图像的平均值；σ 为图像的标准差；下标 x，y 表示 x，y 两幅图像；C_1，C_2 和 C_3 为常数；$l(x,y)$，$c(x,y)$，$s(x,y)$分别表示亮度、对比度、结构信息。

2　实验研究

1）图像选择。由于 ISO 标准图像具有明显的特征，如色域广、亮调和暗调特征明显、记忆色、不同的饱和度、人物肤色等，因此，从 ISO 标准中选择了 10 幅标准图像作为图像原稿，缩略图见图 2，各图像的特征见表 1。

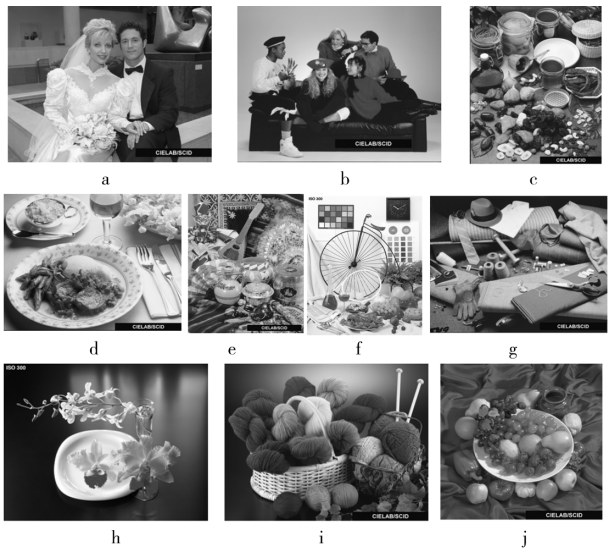

图 2　用于实验的标准图像缩略图

Fig. 2 Images used in the experiment

2）图像输出。用 HP RIP v2. 1. 1 软件在 HP Design Jet 10ps 设备上进行输出，承印材料为 70 g/m² 的胶版纸。

3）心理物理学评价。选择 10 位视觉正常的观察者(7 男 3 女，平均年龄 23 岁)进行视觉评价。观测条件按照《ISO 12646：2008 Graphic technology——Displays for colour proofing——Characteristics and viewing conditions》中软拷贝和硬拷贝质量比较的要求，电子原稿显示在 EIZO Color Edge CG224 显示器上，色温为 6 500 K，亮度 80 cd/m²。环境照明采用 5 200 K、显色性指数为 96 的光源照明，照度约为 1 500 lx。

表 1　实验选用的图像特征

Tab. 1 The characteristics of the experiment images selected from ISO standards

图像序号	特征
a	新娘穿着白色的婚纱，新郎穿着黑色的礼服。用于评估人物皮肤阶调和颜色的再现，特别是高光和暗调。
b	5 个人穿着彩色的衣服，坐在黑皮长沙发上。用于评估皮肤阶调和中性色前非常鲜艳的彩色物体的再现。
c	干果和盛满东西的容器。用于评估阶调和颜色再现，特别是灰成分替代的调整。
d	易于辨认的熟食和柔和的颜色。用于评估关键色调和事物的记忆色。
e	商品，包括金属物体。用于评估颜色复制，以及金属物体光泽的复制。
f	有玻璃器皿和银器的图像，用于评估高光色调和非彩色的复制特征。
g	纺织品的静物图像。用于评估一系列中性色和纺织品纹理(莫尔纹)的阶调复制。
h	有渐变背景的兰花图像，用于评估高光区域和暗调区域渐变色调复制效果。
i	不同颜色的毛线球。用于评估高彩度区域的细节复制。
j	一系列水果和蔬菜。草莓、桔子、柠檬、绿色葡萄、苹果、梨、西红柿和柿子椒的记忆色非常适合于颜色再现过程的自然性评估。

4）向观察者同时展示电子图像原稿和印刷稿，按照主观平均分数(MOS)评价的方法，把图像的各个属性，即颜色、阶调、清晰度、对比度、缺陷以及整体质量等 6 个方面[3]分为非常差、差、一般、好、非常好 5 个等级，分别用 1～5 分表示。观察者在观测完图像后，给出每一个印刷稿相对于原稿的质量(图 2b 的阶调质量为非常好，则记为 5 分)，结果见表 2。

5）印刷稿数字化。为了用模型计算图像质量，必须要将印刷图像重新数字化，在本研究中，用 HP ScanJet G4050 在 600 dpi 的分辨率下对印刷图像进行了扫描。在扫描前，对扫描仪进行了严格的色彩管理。

表 2 各图像视觉评价的结果

Tab. 2 Visual evaluation results of the 10 images

图像序号	颜色	阶调	清晰度	对比度	缺陷	整体
a	0.74	0.76	0.82	0.78	0.7	0.8
b	0.68	0.72	0.72	0.76	0.68	0.76
c	0.78	0.72	0.8	0.78	0.8	0.8
d	0.7	0.78	0.76	0.74	0.8	0.78
e	0.78	0.84	0.82	0.82	0.8	0.8
f	0.82	0.76	0.84	0.78	0.82	0.84
g	0.7	0.76	0.78	0.76	0.78	0.74
h	0.78	0.8	0.68	0.76	0.74	0.78
i	0.78	0.82	0.88	0.78	0.82	0.86
j	0.8	0.74	0.8	0.74	0.8	0.78

3 数据分析及处理

3.1 视觉结果分析

在视觉评价实验中，选择了从颜色、阶调、清晰度、对比度、缺陷以及整体质量 6 个方面进行评价，统计结果见图 3。

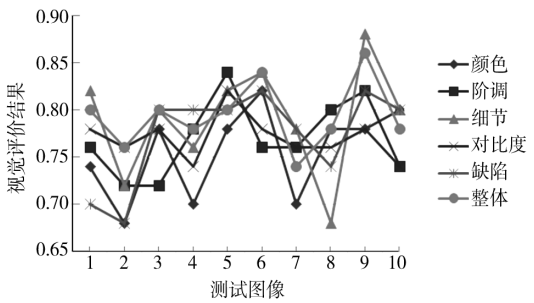

图 3 10 幅测试图像的视觉评价结果

Fig. 3 Visual evaluation results of the 10 images

对于 10 个图像各属性的目视评价结果，其标准差见表 3，结果表明，评价的各属性具有较好的一致性，其中，对比度在视觉上具有更好的一致性，在清晰度的认知上，各个观察者有一定的偏差。

表 3 视觉评价结果的标准差

Tab. 3 The standard deviation of the visual evaluation results

	颜色	阶调	清晰度	对比度	缺陷	整体
标准偏差	0.045	0.038	0.055	0.022	0.047	0.034

在实验中，分别从颜色、阶调、清晰度、对比度、缺陷以及整体质量等方面进行了视觉实验，因此，图像的质量方程为：

$$Q_{\text{all}} = \sum_{i=1}^{n} Q_i \omega_i \tag{2}$$

式中：Q_{all}为图像整体质量；Q_i 为图像第 i 个属性的质量；ω_i 为图像第 i 个属性的权重。

由表 2 的数据拟合可知：ω=(0.29，0.20，0.26，0.18，0.07)，即颜色、阶调、清晰度、对比度、缺陷在图像质量评价中的权重分别为 0.29，0.20，0.26，0.18，0.07。其中颜色占的比重最大，清晰度次之，缺陷的比重最小。这说明人在评价图像质量时，最注重的是颜色，然后依次是清晰度、阶调范围、对比度，最后是缺陷。缺陷的比重最小，这是由于在本实验中硬拷贝样张没有明显的质量缺陷，在视觉评价时没有引起观察者足够的关注。

3.2 模型计算

均方误差(MSE)是图像质量评价中常用的模型，即：

$$\text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \tag{3}$$

式中：I，K 为 2 幅图像；m，n 为图像的宽和高。MSE 是原图像与处理图像之间的均方误差。峰值信噪比(PSNR)也是一种评价图像的客观方法，即：

$$\text{PSNR} = 10\lg\left(\frac{\text{MAX}_I^2}{\text{MSE}}\right) = 20\lg\frac{\text{MAX}_I}{\text{MSE}} \tag{4}$$

峰值信噪比中的 MAX 是指 8 bits 表示法的最大值 255，PSNR 值越大，代表失真越少。结构相似度评价方法 SSIM 的计算模型[2]为：

$$\text{SSIM} = [l(x,y)]^{\alpha}[c(x,y)]^{\beta}[s(x,y)]^{\gamma} \tag{5}$$

其中，$l(x,y)$，$c(x,y)$，$s(x,y)$别表示了亮度、对比度、结构信息。

分别用均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)、结构相似度模型(SSIM)计算 10 个印刷图像的结构相似度系数，归一化后，计算结果见表 4。

表 4 模型计算结果

Fig. 4 Calculation results by MSE, PSNR and SSIM model

模型	图像									
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
MSE	0.69	0.36	0.72	1.00	0.55	0.52	0.76	0.88	0.26	0.47
PSNR	0.89	0.96	0.89	0.85	0.92	0.92	0.88	0.86	1.00	0.93
SSIM	0.95	0.90	0.91	0.99	0.93	1.00	0.94	0.87	0.85	0.89

用 Pearson 相关系数计算的图像视觉评价质量和 MSE，PSNR 以及 SSIM 模型之间的相关性分别为 −0.454 6，0.493 5 和 0.748 1，这说明 SSIM 模型的评价结果和视觉评价质量具有较好的一致性，其性能优于 MSE 和 PSNR。

4　结论

印刷图像的质量评价，由于算法模型、图像采集速度、采集条件、计算速度等方面的限制，还没有实现在线实时的图像质量检测。借鉴电子图像工业中的结构相似度方法，研究了印刷硬拷贝图像的质量评价方法，初步得出了在硬拷贝图像评价时各图像属性的权重，对比分析了 MSE，PSNR，SSIM 模型在印刷图像评价时的性能，结果表明，结构相似度模型（SSIM）具有较好的性能，希望能够对印刷品在线检测提供借鉴。

参考文献：

[1] 朱大龙，明军. 基于结构失真的图像质量评价方法的研究[J]. 计算机技术与发展，2006(3)：56－57.
ZHU Da-long，MING Jun. Research of Image Quality Assessment Based on Structural Distortion[J]. Computer Technology and Development，2006(3)：56－57.

[2] WANG Z，BOVIK A C，SHEIKH H R，et al. Image Quality Assessment：From Error Visibility to Structural Similarity[J]. Image Processing IEEE Transactions on，2004，13(4)：600－612.

[3] PEDERSEN Marius，ZHENG Yuan-lin，HARDEBERG Jon Yngve. Evaluation of Image Quality Metrics for Color Prints[C]. //17th Scandinavian Conference on Image Analysis，SCIA，Ystad，Sweden：Springer Verlag，2011：317－326.

[4] 赵海玉，谷吉海，迟广志，等. 基于图像处理的卷烟圆周检测方法研究[J]. 包装工程，2011，32(17)：52－55.
ZHAO Hai-yu，GU Ji-hai，CHI Guang-zhi，et al. Development of Cigarette Circumference Detection Method Based on Image Processing [J]. Packaging Engineering，2011，32(17)：52－55.

[5] 梁菊华. 网点形状对图像复制质量影响的实验研究[J]. 包装工程，2011，32(19)：108－110.
LIANG Ju-hua. Experimentation on Influences of Dot Shape on Image Quality [J]. Packaging Engineering，2011，32(19)：108－110.

[6] 王毅，李延雷，胡大勇. 图像 Inpainting 技术原理及在包装印刷图像处理中的应用[J]. 包装工程，2006，27(2)：102－104.
WANG Yi，LI Yan-lei，HU Da-yong. Theory of Image Inpainting and Its Application in Packaging and Printing [J]. Packaging Engineering，2006，27(2)：102－104.

[7] 姚军财. 基于人眼视觉特性的印刷图像压缩技术研究[J]. 包装工程，2011，32(5)：69－72.
YAO Jun-cai. Compression Technology of Printed Image Based on Human Vision Characteristics [J]. Packaging Engineering，2011，32(5)：69－72.

[8] 刘晓燕，于惠钧，张菲. 基于包装外观特征图像内容检索方法研究[J]. 包装工程，2010，31(5)：125－127.
LIU Xiao-yan，YU Hui-jun，ZHANG Fei. The Research of Content-based Character Image Retrieval Based on the Packaging External Appearance [J]. Packaging Engineering，2010，31(5)：125－127.

[9] 陈万军，陈亚军，何怡. 基于兴趣点特征匹配的印刷图像缺陷检测[J]. 包装工程，2007，28(3)：22－23.
CHEN Wan-jun，CHEN Ya-jun，HE Yi. Defect Detecting of Printing Matter Based on Interest Points Feature Matching [J]. Packaging Engineering，2007，28(3)：22－23.

[10] 黄惠芬. DWT 域中基于幻方置乱的稳健图像水印算法[J]. 包装工程，2010，31(19)：102－105.
HUANG Hui-fen. Robust Image Watermark Algorithm Based on Magic Square Scrambling in DWT Field [J]. Packaging Engineering，2010，31(19)：102－105.

（上接第 58 页）

LI Hou-min，XIONG Jian-min，ZHU Ruo-yan，et al. Experimental Research on Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard[J]. China Mechanical Engineering，2006，17(8)：147－148.

[8] 彭键林，尹志宏，宋俊杰. 基于 ANSYS 的蜂窝纸板静压特性研究[J]. 机械，2007，34(10)：31－33.
PENG Jian-lin，YIN Zhi-hong，SONG Jun-jie. Research on Static Compression Performance of Honeycomb Paperboard Based on ANSYS [J]. Machinery，2007，34(10)：31－33.

[9] 李鹏芳，张珏，卢朝晖，等. 蜂窝纸板静态压缩试验研究及其模拟分析[J]. 包装工程，2010，31(1)：34－41.
LI Peng-fang，ZHANG Jue，LU Zhao-hui，et al. Static Compression Test and Simulation Analysis of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Engineering，2010，31(1)：34－41.