基于多尺度结构相似度的印刷图像质量评价研究

姜中敏[1]，周颖梅[2]
（1. 上海理工大学，上海 200093；2. 上海出版印刷高等专科学校，上海 200093）

摘要：目的 为了简化印刷图像质量主观评价方法。**方法** 提出基于多尺度结构相似度的印刷图像质量评价研究，将多尺度结构相似度应用在印刷图像质量评价上。**结果** 实验仿真表明，多尺度结构相似度模型客观评价结果与主观评价结果的相关系数最高，为0.7698，表明两者是强相关关系。**结论** 提出的基于多尺度结构相似度的印刷图像质量评价方法，是印刷图像质量评价的一种有效的新方法。

关键词： 印刷图像；结构相似度；多尺度结构相似度；主观实验
中图分类号： TS801.3 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2016)09-0134-04

Image Quality Assessment Based on Multi-scale Structural Similarity

JIANG Zhong-min[1], *ZHOU Ying-mei*[2]
(1. Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Printing & Publishing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: This work was aimed to simply the objective evaluation method of printing image quality evaluation process. In this paper, a study on the quality evaluation of printing image based on multi scale structure similarity was proposed, and multi-scale structural similarity was applied to the quality evaluation of printed image. The simulation results showed that the correlation coefficient between the objective evaluation results and the subjective evaluation results of the multi-scale structural similarity model was the highest, and the value was 0.7698, showing strong correlation. The new method based on multi-scale structural similarity proposed in this paper was an effective method to evaluate the quality of printing images.

KEY WORDS: printing image; SSIM; multi-scale SSIM; subjective experiment

印刷图像质量评价一般分主观评价和客观评价[1]，而客观评价方法又分为借助印刷控制条、梯尺等工具测量方法和纯数学模型方法。主观评价方法能够真实反映观察者对印刷图像的理解，但是该方法受到观察者知识水平、观察环境的影响，操作起来耗时多、费用高，难以操作[2]；借助印刷控制条、梯尺等工具测量方法简单方便，但无法直接得到图像质量数据；纯数学模型客观评价方法能够用数学模型表达并加以利用[3]，量化评价印刷图像质量。目前比较常用的客观评价方法有均方差（MSE）和峰值信噪比（PSNR）[4]，这2种方法比较直观、简单，但是基于统计特性的印刷质量评价，可能与主观评价产生较大的偏差。Wang等人面向图像评价提出了结构相似度（SSIM）的概念[5]；钱方等首次将结构相似度应用于印刷图像质量评价，效果较好，但是单尺度结构相似度选取正确的尺度与显示分辨率、观察距离等条件相关，特定的设定才能得到较好的结果[6]。

多尺度结构相似度能够便捷地将不同分别率下的图像细节进行合并，降低观察条件对结果的影响。这里将多尺度结构相似度应用于印刷图像质量评价，以实现更加准确、便捷地对印刷图像进行客观质量评价。

收稿日期： 2015-08-27
作者简介： 姜中敏（1980—），男，满族，河北承德人，上海理工大学实验师，主要研究方向为数字印刷质量检测、图像处理和包装技术等。

1　结构相似度

基于结构失真的评价理论认为,人眼在接受图像信号时会自动提取其结构信息[7]。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。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,因此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。单尺度结构相似度系统见图1。

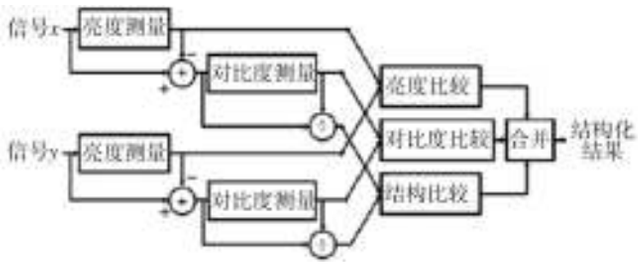

图1　单尺度结构相似度系统

Fig.1 Single-scale structural similarity system

单尺度结构相似度数学定义为[8]:

$$\mathrm{SSIM}(x,y)=[l(x,y)]^{\alpha}[c(x,y)]^{\beta}[s(x,y)]^{\gamma} \tag{1}$$

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

$$c(x,y)=\frac{2\sigma_x\sigma_y+C_2}{\sigma_x^2+\sigma_y^2+C_2} \tag{3}$$

$$s(x,y)=\frac{\sigma_{xy}+C_3}{\sigma_x\sigma_y+C_3} \tag{4}$$

其中:$x=\{x_i|i=1,2,\cdots,N\}$,$y=\{y_i|i=1,2,\cdots,N\}$;μ_x,σ_x^2,$\sigma_x\sigma_y$分别是x的平均数,方差,协方差;μ_y,σ_y^2分别是y的平均数,方差,α,β,γ表示3个成分的权重;$l(x,y)$,$c(x,y)$,$s(x,y)$分别表示亮度比较,对比度比较和结构比较;C_1,C_2,C_3是常数。

$$C_1=(K_1L)^2,C_2=(K_2L)^2,C_3=(C_2/2)^2 \tag{5}$$

式中:L是像素值动态范围,一般为255;$K_1\ll1$,$K_2\ll1$,是2个尺度系数。

2　多尺度结构相似度

图像细节感知力取决于图像信号的采样密度,图像平面与观察者的距离以及观察者本身视觉特性等多种因素。单尺度结构相似度方法可能仅适合特定情形,而多尺度结构相似度(MSSIM)就有更好的普适性。多尺度结构相似度系统见图2,其中L代表低通滤波,2↓表示基2下采样[9]。

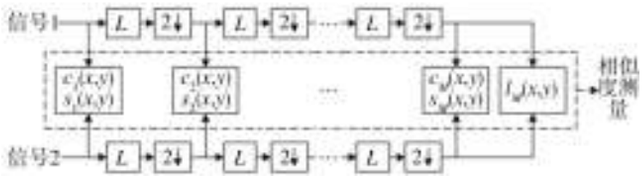

图2　多尺度结构相似度系统

Fig.2 Multi-scale structure similarity system

多尺度结构相似度的数学定义为:

$$\mathrm{MSSIM}(x,y)=[l_M(x,y)]^{\alpha M}\cdot\prod_{j=1}^{M}[c_j(x,y)]^{\beta j}[s_j(x,y)]^{\gamma j} \tag{6}$$

式中:指定原图像的尺度为1,最高尺度为M;j表示第j层尺度,其对比度比较和结构比较分别为$c_j(x,y)$,$s_j(x,y)$;亮度比较只在M尺度上计算,记作$l_M(x,y)$;αM,βj,γj表示权重,用于调整各成分之间的相关关系。

3　主观实验

1)图像选择。ISO标准测试图具有色域广、阶调特征明显、对比度高等特点,这些特点使得以符合ISO标准的测试图作为印刷原稿进行印刷,更适合主观评价。这里选取6幅标准图像进行实验,为了与文献[1]进行对比,其中部分图像相同。各实验图像特征如下:水果、蔬菜和餐巾展示的黄色、红色、绿色、白色、蓝紫色等,色彩丰富,考察输出设备色彩再现和色域,见图3a;墙壁、织物和桌布的浅色,考察输出设备再现的平滑性,车轮、球拍以及背面墙壁上的线条检查图像系统再现的影响,观察是否产生锯齿纹,考察套印精度,见图3b;用于检查高光和暗调的再现,玻璃杯和陶瓷器皿是高光部,玻璃杯在桌子上的倒影是暗调部,见图3c;白种人、黄种人、黑种人肤色特点的不同,考察不同肤色的再现,见图3d;主要考察点是人物肤色的再现,其次灰色背景考察灰平衡、色偏,毛衣和头发细微层次考察图像解像力,见图3e;考察重点是金属餐具和玻璃的光泽及其透明感,金属餐具边缘的尖锐程度考察图像解像力,均匀的灰色背景考察灰平衡,见图3f。

2)打印输出。印刷原稿在校正后的EPSON 7910喷墨打印机上输出,承印材料为80 g胶版纸,A3幅面输出。

3)主观实验。将印刷原稿的电子稿显示在亮度

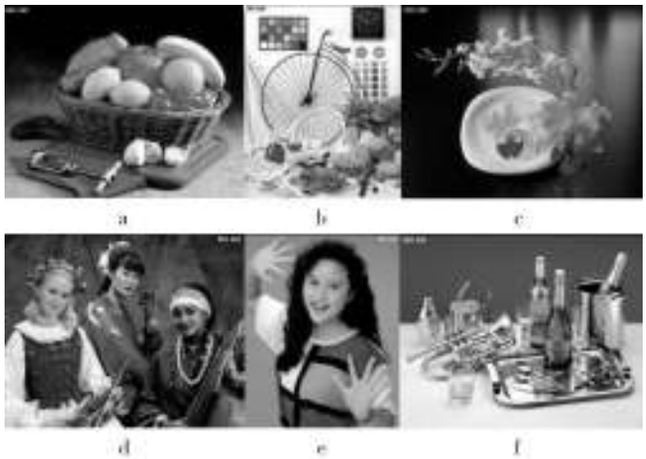

图3 实验用标准图缩略图

Fig.3 Thumbnails of standard graphs for experiment

为80 cd/m²，色温为6500 K的EIZO Color Edge CG224显示器上，将环境照明光源设定为5200 K，显色性指数为96，照明光源照度约为1500 lx。选取10位视觉正常的观察者（5男5女，平均年龄为24岁）进行主观实验。

4）实验评分。把图像的颜色、阶调、清晰度、对比度、缺陷以及整体质量这6个方面[10]按照主观平均数（MOS）评价方法分为非常好、好、一般、差、非常差5个等级，分别用1~5分表示。分别向10名观察者同时展示电子原稿和印刷稿，让其打分。为了方便主客观数据对比，对主观数据进行归一化结果见表1。

表1 主观评价结果

Tab.1 Subjective evaluation results

编号	颜色	阶调	清晰度	对比度	缺陷	整体
图3a	0.65	0.77	0.63	0.76	0.66	0.71
图3b	0.71	0.68	0.65	0.77	0.65	0.67
图3c	0.78	0.8	0.75	0.68	0.7	0.79
图3d	0.77	0.72	0.73	0.69	0.72	0.78
图3e	0.68	0.65	0.69	0.66	0.48	0.63
图3f	0.73	0.69	0.71	0.79	0.8	0.76

4 客观实验

图像质量客观评价方法大多数是基于数字图像的，将模型计算图像质量应用在印刷图像质量评价上，必须将喷墨打印机输出的印刷稿进行数字化操作。常用的印刷图像数字化方法是利用扫描仪对印刷稿进行扫描得到数字图像。文中实验用HP Scan Jet G4050在600 dpi的分辨率对印刷图像进行扫描。

峰值信噪比（PSNR）是客观衡量被测图像与原图像整体偏差的数值[11—14]，以单个像素为单位，计算峰值顶点信号与各信号均方误差的比值，对图像所有像素灰度偏差进行统计和平均，其计算公式如下：

$$\mathrm{PSNR}=10\lg\frac{D^2}{\frac{1}{MN}\sum_{M}\sum_{N}\left[f(m,n)-g(m,n)\right]^2} \tag{7}$$

其中，$f(m,n)-g(m,n)$是原图像与被测图像在(m,n)处的像素值之差；m和n表示像素数；D是指图像最大灰度级，峰值信噪比值越大，说明图像越相似，失真越少。

均方差（E_{ms}）也可以用于图像质量评价，其计算公式如下[15]：

$$E_{ms}=\frac{1}{mn}\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}\|I(i,j)-K(i,j)\|^2 \tag{8}$$

其中，m和n表示像素数；$I(i,j)-K(i,j)$是原图像与被测图像在(i,j)处的像素值之差。均方差值越小，说明图像越相似，图像失真越少。

结合前面的介绍的单尺度结果相似度（SSIM）和多尺度结构相似度（MSSIM）评价模型，客观评价结果见表2。

表2 客观评价结果

Tab.2 Objective evaluation results

编号	E_{ms}	PSNR	SSIM	MSSIM
图3a	0.0139	17.8543	0.8711	0.5867
图3b	0.0301	13.6499	0.6846	0.3500
图3c	0.0146	17.5449	0.8943	0.7500
图3d	0.0244	15.4362	0.7777	0.5747
图3e	0.0184	15.3965	0.7549	0.4927
图3f	0.0158	16.7763	0.8584	0.6443

用皮尔森相关系数（Pearson）计算的图像主观评价质量和MSE，PSNR，SSIM以及MSSIM模型客观评价质量之间的相关性。一般说来，相关系数绝对值为0.8~1.0表示极强相关，0.6~0.8表示强相关，0.4~0.6表示中等程度相关，0.2~0.4表示弱相关，0.0~0.2极弱相关或无相关。MSE，PSNR，SSIM，MSSIM模型主客观评价结果相关系数分别为-0.2767，0.5025，0.6346，0.7698。

5 结语

由相关系数可知，MSE客观评价模型与主观评价是负相关，并且是弱相关关系。PSNR，SSIM和MSSIM

模型与主观评价是正相关,而且SSIM和MSSIM的相关系数均处于0.6~0.8之间,说明结构相似度能够更好地、客观地评价印刷图像质量。MSSIM的相关系数为0.7698,比SSIM大0.1343,表明多尺度结构相似度比单尺度结构相似度更加准确和客观。

参考文献:

[1] 徐敏,郑元林. 基于SSIM的印刷图像质量评价研究[J]. 包装工程,2012,33(5):98—101.
XU Min, ZHENG Yuan-lin. Research of Printed Image Quality Based on SSIM[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5):98—101.

[2] 蒋刚毅,黄大江,王旭,等. 图像质量评价方法研究进展[J]. 电子与信息学报,2010,32(1):219—226.
JIANG Gang-yi, HUANG Da-jiang, WANG Xu, et al. Overview on Image Quality Assessment Methods[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(1): 219—226.

[3] 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.

[4] 佟雨兵,张其善,祁云平. 基于PSNR与SSIM联合的图像质量评价模型[J]. 中国图象图形学报,2006,11(12):1758—1763.
TONG Yu-bing, ZHANG Qi-shan, QI Yun-ping. Image Quality Assessing by Combining PSNR with SSIM[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(12):1758—1763.

[5] WANG Z, BOVIK A, SHEIKH H, et al. Image Quality Assessment: from Error Measurement to Structural Similarity[J]. Image Processing IEEE Trans, 2004, 13(4):600—612.

[6] 钱方,孙涛,郭劲,等. 基于小波变换的多尺度SSIM算法[J]. 液晶与显示,2015,30(2):317—325.
QIAN Fang, SUN Tao, GUO Jin, et al. Multi-scale SSIM Algorithm Based on Wavelet Transforms[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015, 30(2):317—325.

[7] HAN S H, KIM D, PARK H R. Structural Information-Based Image Quality Assessment Using LU Factorization[J]. IEEE Transactions on Consumer Eletronics, 2009, 55(1): 165—171.

[8] WANG Z, SIMONCELLI P E, BOVIK C A. Multi-scale Structural Similarity for Image Quality Assessment[C]// IEEE Asilomar Conference Signals, Systems and Computers, 2003:1—4.

[9] CONZALEZ C R, WOODS E R. Digital Image Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.

[10] PEDERSEN M, ZHENG Y L, HARDEBERG J Y. Evaluation of Image Quality Metrics for Color Prints[C]// 17th Scandinavian Conference on Image Analysis, Springer Verlag, 2011: 317—236.

[11] 刘长鑫,刘真,杨晟炜,等. PSNR在网目调数字图像质量评价中的应用研究[J]. 包装工程,2012,33(7):108—111.
LIU Chang-xin, LIU Zhen, YANG Sheng-wei, et al. Application Study of PSNR in Quality Evaluation of Digital Halftone Image[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7): 108—111.

[12] 张雷洪,唐波,李碧程,等. 基于DWT-SVD的强鲁棒全息水印算法研究[J]. 包装工程,2013,34(21):105—109.
ZHANG Lei-hong, TANG Bo, LI Bi-cheng, et al. Strong Robustness Holographic Watermarking Algorithm Based on DWT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(21): 105—109.

[13] 熊顺清,王玉红,周卫红. 一种基于尺度不变特征变换SIFT的图像水印算法[J]. 云南民族大学学报,2012,21(5):361—364.
XIONG Shun-qing, WANG Yu-hong, ZHOU Wei-hong. A New Anti: Geometric Attack Digital Watermarking Algorithm Based on SIFT Transform[J]. Journal of Yunnan University of Nationalities, 2012, 21(5):361—364.

[14] 廖琪男. 基于SIFT特征点匹配的水印图像几何校正算法[J]. 计算机应用研究,2011(6):2247—2249.
LIAO Qi-nan. New Watermarked Image Geometric Correction Algorithm Based on SIFT Feature Points Matching[J]. Application Research of Computers, 2011(6):2247—2249.

[15] 周中原,孙刘杰,王文举,等. 抗几何攻击的强鲁棒性全息水印研究[J]. 包装工程,2014,35(5):131—136.
ZHOU Zhong-yuan, SUN Liu-jie, WANG Wen-ju, et al. Holographic Digital Watermarking Algorithm against Geometric Attacks with Strong Robustness[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5):131—136.

(上接第107页)

IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2008, 3(1):16—28.

[13] LI C, LI B S, XIAO L M. A Watermarking Method Based on Hypercomplex Fourier Transform and Visual Attention[J]. Journal of Information & Computational Science, 2012(9): 4485—4492.

[14] WANG X Y, WANG C P, YANG H Y, et al. A Robust Blind Color Image Watermarking in Quaternion Fourier Transform Domain[J]. The Journal of Systems and Software, 2013, 86(2):255—277.

[15] CHENG C J, WANG W J, ZENG H Y, et al. A Fragile Watermarking Algorithm for Hologram Authentication[J]. Journal of Display Technology.2014, 10(4):263—271.