

包装印刷

一种基于特征相似性的印刷图像质量评价方法

曾台英, 邵雪, 汪祖辉
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 提出一种基于特征相似性的印刷图像质量评价方法, 解决客观评价印刷图像质量的方法忽略了人眼视觉的底层特征, 不能与主观评价达到很好一致性的问题。**方法** 采用能够提取视觉底层特征的特征相似性 FSIM 算法, 应用在印刷图像质量的客观评价中, 结合主观实验, 对印刷图像质量加以整体评价。**结果** FSIM 算法的质量评分范围在 0.9~1 之间, 在与主观评价的相关性分析上, 皮尔逊相关系数 (CC) 为 0.9490, 斯皮尔曼秩相关系数 (SROCC) 为 0.9940, 平均绝对值误差 (MAE) 为 0.0049, 相较于 MSE, PSNR, SSIM 和 MS-SSIM 算法表现出更好的预测稳定性、单调性和一致性。**结论** 实验结果表明, FSIM 算法与人眼主观质量评价有着更好的一致性, 更接近人类视觉系统, 能够有效地进行印刷图像质量评价。

关键词: 印刷图像质量; 人类视觉系统; 特征相似性; 主观评价

中图分类号: TS801.3; TS807 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)11-0153-05

A Method for Evaluating the Quality of Printed Image Based on Feature Similarity

ZENG Tai-ying, SHAO Xue, WANG Zu-hui

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The objective evaluation method of printing image quality has not achieved good agreement with the subjective evaluation, and the bottom layer of the human vision is ignored. The characteristic visual similarity algorithm FSIM, which could extract the low-level features of the human vision, was applied in objective evaluation of the quality of the printed image, and used to evaluate the overall quality of the printed image in combination with subjective experiments. The mass fraction of FSIM algorithm was in the range of 0.9~1, in the correlation analysis with subjective evaluation, the CC value was 0.9490, the SROCC value was 0.9940, and the MAE value was 0.0049. Compared to MSE, PSNR, SSIM and MS-SSIM algorithms, the performance of this algorithm was better in stability, monotonic function and consistency. Experimental results showed that FSIM algorithm had a better consistency with subjective quality evaluation of the human eye, which was closer to the human visual system, and could effectively evaluate the quality of the printed image.

KEY WORDS: printing image quality; human visual system; FSIM; subjective evaluation

印刷图像的质量评价, 是指用一定的数据和指标控制产品质量误差的允许范围和质量衰退, 保证图像复制的可重复性和质量稳定性, 是印刷工业领域中至关重要的一个环节^[1]。目前, 评价印刷图像

质量的方法主要有主观评价方法和客观评价方法两种。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^[2]。客观评价方法一般是借助印刷测控条、梯尺等工具,

收稿日期: 2015-10-28

基金项目: 新闻出版总署数字印刷工程研究中心数字传播重点实验室基金(10-00-309-000)

作者简介: 曾台英 (1978—), 女, 浙江人, 博士, 上海理工大学讲师、硕导, 主要研究方向为印刷质量检测与控制。

对印刷图像的各个质量环节作出定量的分析,结合复制的质量标准作出客观的评价^[3]。

现有的客观评价方法无法直接得到图像的质量数据,不能用准确的数学模型表达,应用在数字图像质量评价方面的客观评价方法,比如均方根误差和峰值信噪比^[4],数学模型简单,但结果有时与主观评价的一致性不好;徐敏等^[4]将结构相似度(SSIM)应用在印刷图像质量评价中,取得了一定的效果,但是,该指标仅考虑了图像的结构信息,忽略了图像的底层不变特征,最终导致评价结果与主观评价不太一致,影响了评价的准确性^[5]。

根据最近的视觉生理研究表明,人的视觉系统对于图像相位保持较高一致性的位置十分敏感,而相位一致性(Phase Consistency, PC)是对相位信息的一致性的度量标准^[6]。基于此,提出一种基于特征相似性(Feature Similarity Index, FSIM)^[5-7]的印刷图像质量评价方法,该方法利用相位一致性有效提取了图像的底层特征,即图像相位保持较高一致性的位置上的纹理结构特征,符合人类的视觉系统,与主观评价具有很好的一致性。

1 相位一致性

相位包含图像的纹理结构信息,相位一致性是将傅里叶函数中的相位最大值作为特征提取出来,可以作为测量图像局部结构的无量纲指标^[5]。相位一致性可获得更丰富的特征信息和精确的特征定位,具有对图像亮度的不变性,可以在相位一致性较高的位置提取视觉底层特征^[6]。

小波变换具有时频局部化的优点,信号 $f(x)$ 的相位一致性可以通过 Log Gabor 小波变换定义^[6-7]。假设一维小波的传递函数为:

$$G(w) = \exp \frac{-[\lg(w/w_0)]^2}{2[\lg(k/w_0)]^2} \quad (1)$$

通过高斯定向扩展函数,将一维滤波器在不同的方向 θ_j 上扩展到二维:

$$G(w, \theta_j) = \exp \frac{-[\lg(w/w_0)]^2}{2[\lg(k/w_0)]^2} \cdot \exp \left[-\frac{(\theta - \theta_j)^2}{2\sigma_\theta^2} \right] \quad (2)$$

式中: $\theta_j = j\pi/J$, $j = \{0, 1, \dots, J-1\}$, J 是方向数; σ_θ 为角度带宽; w_0 为中心频率。

$G(w)$ 与信号 $f(x)$ 的傅里叶变换的乘积经过做逆变换,得到实部偶对称滤波器响应 $e_n(x)$ 与虚

部奇对称滤波器响应 $o_n(x)$ 。对二维信号在方向 θ_j 和尺度 n 下进行滤波,得到在点 x 处的响应向量 $[e_{n,\theta_j}(x), o_{n,\theta_j}(x)]$, 则响应向量的幅值为:

$$A_{n,\theta_j}(x) = \sqrt{e_{n,\theta_j}(x)^2 + o_{n,\theta_j}(x)^2} \quad (3)$$

局部能量函数:

$$E_{n,\theta_j}(x) = \sqrt{F_{n,\theta_j}^2(x) + H_{n,\theta_j}^2(x)} \quad (4)$$

式中:

$$F_{n,\theta_j}(x) = \sum_n e_{n,\theta_j}(x) \quad (5)$$

$$H_{n,\theta_j}(x) = \sum_n o_{n,\theta_j}(x) \quad (6)$$

二维相位一致性在点 x 处定义为:

$$PC_{2D}(x) = \frac{\sum_j E_{\theta_j}(x)}{\sum_j \sum_n A_{n,\theta_j}(x) + \varepsilon} \quad (7)$$

经试验得出 $PC_{2D}(x)$ 是 0 到 1 之间的实数。

2 特征相似性质量评价模型

参考图像 $f_1(x)$ 和待测图像 $f_2(x)$ 的特征相似度可以定义为^[8]:

$$FSIM = \frac{\sum_{x \in \Omega} S_L(x) \cdot PC_m(x)}{\sum_{x \in \Omega} PC_m(x)} \quad (8)$$

$$S_{PC}(x) = \frac{2PC_1(x) \cdot PC_2(x) + T_1}{PC_1^2(x) + PC_2^2(x) + T_2} \quad (9)$$

$$S_G(x) = \frac{2G_1(x) \cdot G_2(x) + T_1}{G_1^2(x) + G_2^2(x) + T_2} \quad (10)$$

式中: Ω 表示整个空域, $S_L(x) = S_{PC}(x) \cdot S_G(x)$, $PC_m(x) = \max(PC_1(x), PC_2(x))$; $S_{PC}(x)$ 表示图像 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 的特征相似性, $S_G(x)$ 表示图像 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 的梯度相似性; PC 分别表示图像 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 的相位一致性信息, G 表示参考图像和待测图像的梯度幅值; 为了避免上述各式的分母为 0, 加入常量 T_1 和 T_2 , 实验中取 $T_1=0.85$, $T_2=200$ 。FSIM 的值越大, 参考图像和待测图像越相似, 待测图像的质量越高, 反之, 待测图像的质量越差。

3 实验结果分析

3.1 主观实验评价

1) 实验图像选择。实验选择 ISO 标准测试图

像中的 8 幅具有明显特征的图像作为参考图像，缩略图见图 1。

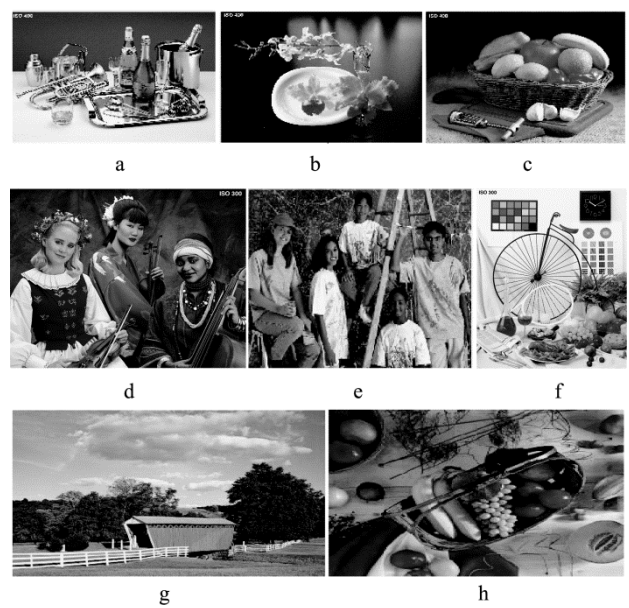


图 1 标准图像缩略图
Fig.1 Standard image thumbnails

各个图像的特征说明^[9-10]如下：图 1a 中的金属和玻璃用于考察光泽及其透明感，灰色背景考察灰平衡；图 1b 中玻璃杯和陶瓷器皿用于考察高光和暗调的再现和两者的质感，花考察颜色再现及颜色是否浑浊；图 1c 中水果和蔬菜、餐巾用于考察色彩再现，大蒜的亮调考察阶调再现性；图 1d 中为不同肤色的人，考察不同肤色的再现，背景考察灰平衡；图 1e 考察不同肤色的再现，人物穿的亮灰或中灰色 T 恤衫考察中性灰平衡；图 1f 中墙壁、织物和桌布的浅色考察了输出设备再现的平滑性；图 1f 中车轮、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；图 1g 中蓝天、白云、房屋、树木、栅栏考察自然图像的颜色再现；图 1h 中香蕉、苹果、葡萄等水果的记忆色，适合于颜色的再现过程的自然性评估。

2) 实验图像输出。采用 Epson Stylus Pro 7910 设备打印，承印材料为 170 g/m² 的顶级半光面相片纸。

3) 主观评价。选择 10 位视觉正常的印刷专业研究生作为该实验的观察者（6 男 4 女，平均年龄为 23 岁），在 EIZO Color Edge CG224 显示器上，亮度为 80 cd/m²，色温为 6500 K，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^[4]，向观察者同时展示参考图像和印刷图

像，对其进行主观质量打分。为了与文献[4]进行对比，采用文献[4]的主观平均分数（Mean Opinion Score，MOS）评价的方法，取人眼视觉更为敏感的颜色、阶调、清晰度、对比度、整体 5 类指标，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，给出每一个印刷图像相对于参考图像的质量评分，结果见表 1。

表 1 各图像的主观评价结果
Tab.1 Subjective evaluation results of images

序号	颜色	阶调	清晰度	对比度	整体
a	0.72	0.68	0.84	0.66	0.74
b	0.8	0.71	0.68	0.78	0.8
c	0.78	0.76	0.8	0.69	0.74
d	0.8	0.74	0.68	0.85	0.87
e	0.69	0.76	0.74	0.62	0.78
f	0.7	0.78	0.73	0.67	0.76
g	0.8	0.78	0.8	0.82	0.88
h	0.82	0.69	0.74	0.86	0.84

表 1 是对待测印刷图像主观质量评价实验结果，可以看出，8 幅图像的颜色分数值范围在 0.69~0.82 之间，阶调范围为 0.68~0.78，清晰度范围为 0.68~0.84，对比度范围为 0.62~0.86，整体范围在 0.74~0.88 之间。颜色、阶调、清晰度、对比度、整体等 5 个指标的标准差分别为 0.017, 0.013, 0.019, 0.031, 0.019。可以看出，人眼在观察图像的阶调和颜色上给出的分数波动不大，能够在视觉上表现出较好的一致性；在清晰度和对比度的认知上，由于观察者的心理和所受环境的影响，表现出一定的偏差。

3.2 客观实验评价

1) 首先对待测印刷图像进行数字化，采用经过严格的色彩管理的 HP Scan Jet G4050 扫描仪，在 600 dpi 分辨率下进行扫描。

2) 采用文献[4]的客观评价方法中的均方误差（MSE）、峰值信噪比（PSNR）和结构相似度（SSIM）质量模型、多尺度结构相似度（MS-SSIM）^[11-12]模型与提出的特征相似性（FSIM）质量模型，分别计算 8 幅待测印刷图像的质量，归一化后的结果见表 2。

表 2 是各质量模型计算得到的客观质量评价结果。由于结构相似度、多尺度结构相似度和特征相似性算法得到的值在 0 和 1 之间，分数越大，

待测图像相对于参考图像的质量越好,越接近于参考图像。从表 2 中可以看到,SSIM 算法的质量分数范围在 0.4~0.6 之间,MS-SSIM 算法的质量分数范围在 0.7~0.8 之间,FSIM 算法的质量分数范围在 0.9~1 之间,而 MSE 和 PSNR 算法得到的质量分数无法准确地评价印刷图像的质量。由此看出,采用 FSIM 算法可以更有效地评价待测印刷图像的质量。

表 2 模型评价结果
Tab.2 Model evaluation results

序号	MSE	PSNR	SSIM	MS-SSIM	FSIM
a	0.1503	0.1207	0.7181	0.7752	0.9006
b	0.0759	0.1326	0.7011	0.8527	0.936
c	0.0984	0.1281	0.661	0.7449	0.91
d	0.1457	0.1212	0.4803	0.8071	0.9415
e	0.1438	0.1215	0.4969	0.7509	0.9155
f	0.2114	0.1147	0.5951	0.7897	0.915
g	0.1046	0.127	0.6361	0.8659	0.9479
h	0.067	0.1341	0.6488	0.8612	0.9385

3) 将各个质量评价模型得到的客观评分和主观评价得分(MOS),通过皮尔逊相关系数(Pearson Product-moment Correlation Coefficient, CC)、斯皮尔曼秩相关系数(Spearman Rank Correlation Coefficient, SROCC)、平均绝对值误差(Mean Absolute Error, MAE)^[13-15]3个量化指标对评估算法的性能进行衡量。

客观评分和主观评分经过非线性回归分析后的相关系数(CC)值越大,说明评价预测的准确度越高;客观评分和主观评分之间的斯皮尔曼相关系数(SROCC),用于评价预测的单调性,值越大,单调性越好,图像的客观质量与主观视觉有着更好的一致性;平均绝对值误差(MAE)值越小,待测图像的质量越好^[5]。实验结果见表 3。

表 3 图像客观质量评价指标
Tab.3 Objective image quality evaluation indexes

	CC	SROCC	MAE
MSE	0.3349	0.3114	0.0410
PSNR	0.3127	0.3114	0.0417
SSIM	0.3526	0.4791	0.0461
MS-SSIM	0.7447	0.8383	0.0303
FSIM	0.9490	0.9940	0.0049

从表 3 可以看出,FSIM 算法的皮尔逊相关系数(CC)为 0.9490,相比 MS-SSIM 算法高出 27.4%,FSIM 算法相比 SSIM, MSE, PSNR 算法提高的百

分数更大,该指标有着较好的预测稳定性;斯皮尔曼秩相关系数(SROCC)为 0.9940,相比 MS-SSIM 算法高出 18.6%,而 MS-SSIM 算法相比 SSIM 算法高出 75%。可知,考虑视觉底层特征的 FSIM 对 SSIM 和 MS-SSIM 预测单调性有了明显提高;平均绝对值预测误差(MAE)为 0.0049,相比 MS-SSIM 算法减小了 83.8%,相比 SSIM 算法减小了 89.4%,因此 FSIM 的预测准确性优于另外 4 种模型。所提出的方法预测稳定性、单调性和一致性,相较于传统的 4 种方法都有明显提高,整体性能较好。

4 结语

在考虑了人眼视觉底层特征的基础上,采用特征相似性(FSIM)质量评估算法,对印刷图像质量进行评价。实验结果表明,算法与人眼主观质量评价有着更好的一致性,相较于传统质量评价方法(MSE)、(PSNR)以及 SSIM 和 MS-SSIM 算法更接近人类视觉系统,能够有效地进行印刷图像质量评价,对印刷图像质量评价有着实用意义。

参考文献:

- [1] 卢军. 印刷图像质量评价及控制方法[J]. 印刷质量与标准化, 2007(8):65—69.
LU Jun. Printing Image Quality Evaluation and Control Method[J]. Printing Quality and Standardization, 2007 (8):65—69.
- [2] 赵文哲, 秦世引. 图像质量评价的研究进展和若干问题的解决途径[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47 (4):1—9.
ZHAO Wen-zhe, QIN Shi-yin. Image Quality Assessment and Some Solving Approaches to Current Issues[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2010, 47 (4):1—9.
- [3] 王桂荣. 印刷品质量评价方法综述[J]. 印刷质量与标准化, 2012(3):37—38.
WANG Gui-rong. Evaluation Method of Printing Quality Summarize[J]. Printing Quality, 2012(3):37—38.
- [4] 徐敏, 郑元林. 基于 SSIM 的印刷图像质量评价研究[J]. 包装工程, 2004, 25(4):26—28.
XU Min, ZHENG Yuan-lin. Research of Printing Image Quality Based on SSIM[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(4):26—28.
- [5] 王正友, 李振兴, 林维斯, 等. 结合 HVS 和相似特征的图像质量评估方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 32(7):1606—1612.
WANG Zheng-you, LI Zhen-xing, LIN Wei-si, et al. Improved Image Quality Assessment Model Incorporating HVS and FSIM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 32(7):1606—1612.

- [6] 杨迪威, 余绍权. 利用相位一致性的图像质量评价方法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(2):16—20.
YANG Di-wei, YU Shao-quan. Image Quality Assessment Based on Phase Congruency[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(2):16—20.
- [7] 苗莹, 易三莉, 贺建峰, 等. 结合梯度信息的特征相似性图像质量评估[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(6):749—755.
MIAO Ying, YI San-li, HE Jian-feng, et al. Image Quality Assessment of Feature Similarity Combined with Gradient Information[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 51(2):16—20.
- [8] ZHANG L, ZHANG L, MOU X Q, et al. FSIM:A Feature Similarity Index for Image Quality Assessment[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2011, 20(8):2378—2386.
- [9] PEDERSEN M, ZHENG Yuan-lin, HARDEBERG J Y. Evaluation of Image Quality Metrics for Color Prints[C]// 17th Scandinavian Conference on Image Analysis, SCIA, Ystad, Sweden: Springer Verlag, 2011:317—236.
- [10] 梁巧萍, 智川, 杨保宏. 印刷品质量的主观评价[J]. 包装工程, 2009, 30(9):105—106.
LIANG Qiao-ping, ZHI Chuan, YANG Bao-hong. Subjective Assessment of Printing Quality[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(9):105—106.
- [11] WANG Z, SIMONCELLI E P, BOVIK A C. Multi-scale Structural Similarity for Image Quality Assment[C]// IEEE Asilomar Conf Singnals, 2003:1—4.
- [12] WANG Zhou, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image Quality Assessment: From Error Measurement to Structural Similarity[C]// IEEE Transactions on Image Processing, 2004.
- [13] 褚江, 陈强, 杨曦晨. 全参考图像质量评价综述[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(1):13—22.
CHU Jiang, CHEN Qiang, YANG Chen-xi. Overview of the Full Reference Image Quality Evaluation[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(1):13—22.
- [14] MOORTHY A K, SU C C, MITTAL A, et al. Subjective Evaluation of Stereoscopic Image Quality[J]. Signal Processing:Image Communication, 2013, 28(8):870 — 883.
- [15] 张桦, 夏一行, 周文晖. 基于注意转移机制的图像质量评价方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9):2056—2061.
ZHANG Hua, XIA Yi-xing, ZHOU Wen-hui. Attention Shift Mechanism Based Image Quality Assessment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 2056—2061.