

基于空-频域印刷混合失真无参考质量评价

麻祥才¹, 肖颖¹, 钱志伟¹, 邹来涛², 王晓红², 韩双红³, 卢辉², 丁桂芝³

(1.上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093; 2.上海理工大学, 上海 200093;

3.上海市印刷行业协会, 上海 200093)

摘要: **目的** 为了解决数字印刷模糊混合失真图像质量评价算法与人眼视觉主观评价一致性较低的问题。**方法** 基于 SSEQ 算法思想在空间域和频率域中提取混合失真图像的信息熵、亮度方差、频域熵以及高频系数奇异值改变量关键特征, 利用支持向量机训练构建印刷模糊混合失真图像的无参考评价模型。**结果** 客观验证了 25 幅图像, 算法客观计算得分与主观评价得分的 SROCC 系数为 0.94, PLCC 系数为 0.93, 主客观一致性较高。**结论** 所提算法与人眼视觉感知具有很好的主观一致性, 可以用于图像等印刷品的质量客观评价。

关键词: 数字印刷图像; 混合失真; 无参考图像质量评价

中图分类号: TS807 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)09-0224-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.035

No-reference Quality Assessment Method of Printing Multiply Distort Image Based on Spatial Frequency Domain

MA Xiang-cai¹, XIAO Ying¹, QIAN Zhi-wei¹, ZOU Lai-tao², WANG Xiao-hong²,
HAN Shuang-hong³, LU Hui², DING Gui-zhi³

(1.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China; 2.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3.Shanghai Printing Trade Association, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem that the blurred image of digital printing multiply distorted quality assessment algorithm has low consistency with the subjective evaluation of human perception. Key characteristics including entropy, brightness variance, frequency entropy and the high frequency coefficient singular value change were extracted from distorted image in spatial and frequency domain based on the idea of SSEQ algorithm to establish the no-reference image quality assessment method with support vector machine in this paper. 25 images were verified objectively and the SROCC coefficient and PLCC coefficient of the objective calculation score and the subjective evaluation score of the algorithm were 0.94 and 0.93 respectively, with high subjective and objective consistency. The algorithm is in good subjective consistency with the ocular perception and suited for the printed image quality assessment.

KEY WORDS: digital printing image; multiply distort; no-reference image quality assessment

数字印刷是以数字文件形式控制数字印刷机, 将呈色剂转移到承印物上的一种新型印刷技术。数字印刷系统主要由数字印前系统和数字印刷机构成。在互

联网时代背景下, 图像在传输过程中具有一定的失真, 失真类型主要为模糊失真。由于数字印刷过程是非线性印刷, 在数字印前系统需对数字彩色图像阶调

收稿日期: 2018-06-17

基金项目: 上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“晨光计划”(18CGB09); “柔版印刷绿色制版与标准化实验室”招标课题(ZBKT201809)

作者简介: 麻祥才(1991—), 男, 硕士, 上海出版印刷高等专科学校助教, 主要研究方向为色彩理论再现与控制 and 数字图像处理。

进行调整处理,造成图像阶调并级。由于承印物表面特性造成网点扩大,引起图像灰度差值变化减少和高低密度交界两侧宽度变小,导致图像清晰度下降,因此产生模糊失真。由于墨水等影响,在数字印刷成像过程中产生噪声、压缩及色偏等数字印刷图像失真。数字印刷图像质量评价方法主要分为主观图像质量和客观质量评价方法。其中,主观数字印刷图像质量方法根据实验人员主观经验对数字印刷图像进行评价,但容易受周围环境、观察背景等影响;客观数字印刷图像质量评价方法分为用梯尺、测控条测量法以及用数学模型模拟人眼视觉系统对数字印刷图像质量好坏做出定量分析^[1]。梯尺、测控条测量法虽然简单,但在数字印刷中往往会由于印刷幅面和工艺的影响,不太方便直接采集得到;数学模型中无参考数字印刷图像质量评价方法由于不需要原图信息,在数字印刷领域逐渐得到了广泛应用。

目前,数字印刷图像的质量评价方法多针对单一失真类型,数字图像会因为数字印刷流程中产生模糊失真和印刷失真,因此,对数字印刷品通过图像进行无参考的质量评价具有较强的实际应用价值。关于图像混合失真的无参考质量评价方法大多针对数字图像原稿而不是数字印刷图像。2015 年 Fengying Xie 等^[2]基于模糊神经网络的混合失真无参考皮肤镜图像的质量评价模型,该方法主要适用于皮肤镜图像评价。2016 年 Qiaohong Li 等^[3]提出一种基于图像结构退化的无参考混合失真图像质量评价方法,但该方法在 LIVEMD 图库中测试,鲁棒性较差。2017 年王晓红等^[4]提出一种基于空-频域图像特征的混合失真无参考图像质量评价方法,该方法适应于数字图像混合

失真的无参考图像质量评价,在印刷模糊图像混合失真的测试结果与主观评分的一致性仍需进一步提高。

为了实现对数字印刷模糊混合失真图像的质量评价,文中提出了一种基于空-频域印刷混合失真的无参考图像质量评价方法,建立包括不同类型图像特征的高分率的图像库,进行数字印刷后主观打分实验,获取用于后续训练和测试无参考图像质量评价模型的 MOS 值。通过提取混合失真图像信息熵、亮度方差、频域熵以及高频系数奇异值改变量关键特征,借助支持向量机(SVM)机器学习训练建立模型,并对模型进行性能测试及不同算法的评价结果比较。

1 印刷混合失真图像 MOS 集的建立

1.1 图像的选择

常用图像质量评价的数据库有 TID2008, TID2013, LIVE 数据库等,这几种数据库包含不同失真类型和不同失真等级的不同图像,以及对应的主观评价 MOS 值。数据库中的图像分辨率为 72 dpi 适合在显示设备上质量评价,不适合输出印刷模糊的图像质量评价。文中在研究 TID2008, TID2013, LIVE 数据库对某一失真类型建库原则的基础上,选用常用于印刷测试文件和数字印刷输出包含人物、动物、风景,房子等不同类型分辨率为 300 dpi 的 25 幅图片,失真分为 5 个等级共 175 幅图像,数字印刷后进行主观评价实验。这些图像在色相、明度、饱和度、纹理结构、平滑区域具有各自的特点。实验部分图像和数字印刷后不同混合失真等级的图像分别见图 1 和图 2。



图 1 实验部分图像
Fig.1 Experimental image



图 2 不同混合失真图像

Fig.2 Different multiply distortion images

1.2 实验过程

实验在背景墙为 N7 实验室中进行,采用双目同时观察法,左侧显示器是原始图像,右侧看样台是印刷出来的失真图,通过比对获取图像的 MOS 值。灯箱背景色为中性灰,灯箱照明光源为符合 CIE 标准 D50 均匀光源,显示器为艺卓 CG246,显示器色温为 5000 K,实验观察者和显示器的观察距离为 60 cm,主观实验示意图 3。

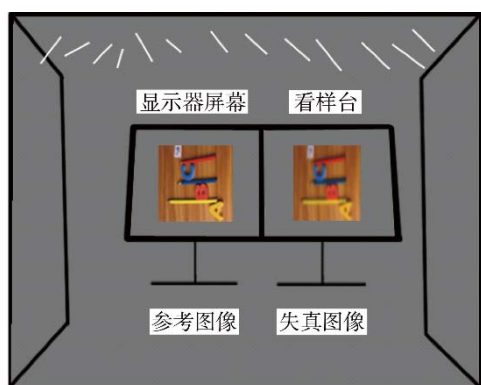


图 3 主观观察示意

Fig.3 Subjective observation condition

1.3 印刷混合失真图像 MOS 值变化规律

观察者经 Munsell Hue Test 进行色感测试,选取 27 名颜色视觉感知正常的观察者 (14 男, 13 女), 根据失真图像与参考图像的接近程度, 每一位观察后打分 (0~7 分), 分数越高表示图像质量越好, 反之图像质量越差。根据均方根差法^[5]剔除错误数据后对每

一幅图像取平均值作为主观得分, 部分印刷模糊图像 5 种失真等级的主观得分见图 4。

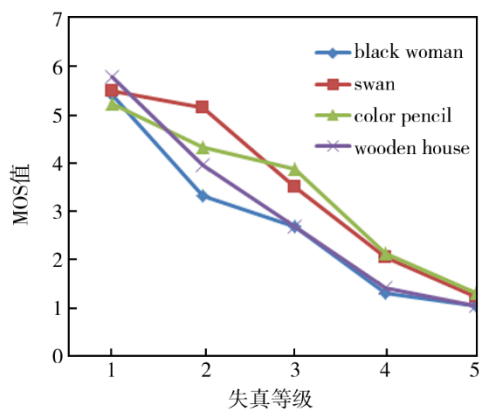


图 4 模糊图像 5 等失真等级主观 MOS 值

Fig.4 Subjective MOS value of blurred image with 5-level distortion

从图 4 可以看出, 印刷模糊后的模糊图像随着失真等级变大, 总体趋势上主观 MOS 值越小。相同失真等级的印刷模糊图像, 由于视觉感兴趣区域大小不同导致主观 MOS 值仍有一定的差距。

2 印刷混合失真图像的无参考质量评价算法

2.1 空-频域混合失真图像特征

SSEQ 算法^[6]是一种基于空间域和频率域的无参考质量评价算法, 通过提取失真图像分块处理, 通过

DCT 变换计算失真图像频率熵值和空间域熵值,对失真图像进行一次下采样,得到 12 维失真图像特征值,输入到支持向量机 SVM 中进行回归,得出失真图像的质量评价结果,算法框架见图 5。

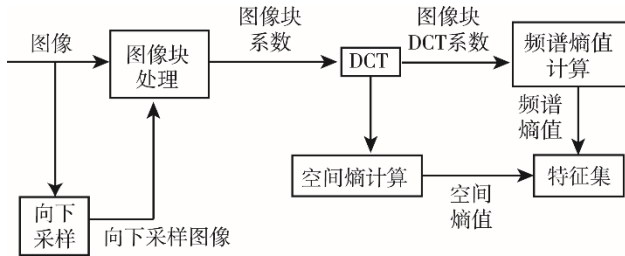


图 5 SSEQ 算法框架
Fig.5 SSEQ algorithm framework

通过实验研究无参考质量 SSEQ 算法在评价单一失真类型图像的主客观一致性比较高,但对混合失真图像评价的主客观一致性系数需进一步提高。基于 SSEQ 算法的思想,文中从空间和频率域提取混合失真图像信息熵的基础上,针对模糊失真使图像纹理、边缘等高频区域受到的攻击比较严重的问题,通过添加高频系数奇异值改变量进行评价;针对印刷失真中压缩会使图像的对比度下降的问题,通过添加亮度方差特征提高主客观一致性系数。

2.1.1 信息熵

信息熵^[7-8]用来描述图像信息量的大小,可以反映图像像素之间的依赖程度。文中将图划分为 64 大小块,计算每一分块图像信息熵后取均值。分块图像空间域信息熵计算公式见式 (1),混合失真图像信息熵变化见图 6。

$$E = -\sum p(x) \log_2 p(x) \quad (1)$$

式中: E 为信息熵; $p(x)$ 为相对频率; x 为图像像素值。

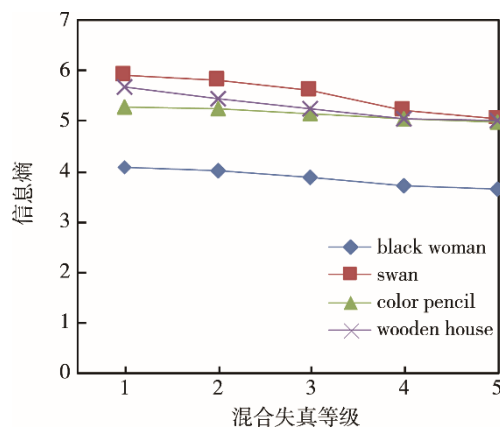


图 6 混合失真图像信息熵变化
Fig.6 Entropy change of multiply distorted image

从图 6 可以看出,混合失真图像随着失真程度的增加,图像信息熵在减少。信息熵表示图像整体阶调

集中程度, Black woman 图像整体偏向暗调类型的图像,图像阶调范围比较集中,信息熵相对较小,其他 3 幅图像偏向中亮调类型的图像,阶调范围相对大,因此 Black woman 的信息熵较其他 3 幅图像较小。信息熵呈现趋势状变化,这说明信息熵可以用来评价印刷模糊混合失真图像的一个特征。

2.1.2 亮度方差

亮度方差^[9]体现图像对比度等属性,当图像进行模糊印刷时图像像素点差异性会发生改变进而使图像的对比度发生变化。亮度方差的计算见式 (2),混合失真图像的方差变化见图 7。

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

式中: S^2 为方差; S 为标准差; x_i 为像素点的灰度值; $\bar{x}$ 为像素点灰度平均值; n 为像素点总数目。

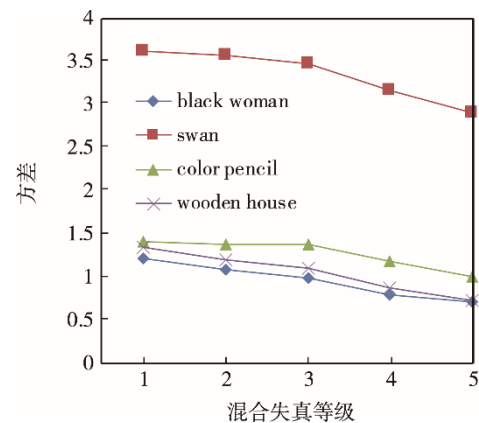


图 7 混合失真图像方差变化
Fig.7 Variance change of multiply distorted image

从图 7 可以看出,混合失真图像随着失真程度的增加,图像方差在减少。Swan 图像偏向中亮调类型的图像,但图像背景包含部分暗调区域,阶调范围较大,所以对比度相对较大。color pencil 和 wooden house 图像属于中亮调类型的区域,阶调范围比较 Swan 图像阶调范围小,但大于原调为主的 Black woman 图像的阶调范围,所以 Black woman 图像亮度方差较其他 3 幅图像较小。亮度方差呈现趋势状变化,这说明信息熵可以用来评价印刷模糊混合失真图像的一个特征。

2.1.3 频域熵

频域熵^[10]是用来描述频域空间来描述图像信息量的大小,将混合失真图像 64×64 分块并进行下采样后离散小波变换得到频域熵,频域熵的计算见式 (3—4),混合失真图像频域熵变化见图 8。

$$p(i, j) = \frac{C(i, j)^2}{-\sum_i \sum_j C(i, j)^2} \quad (3)$$

$$E_f = -\sum_i \sum_j p(i, j) \log_2 p(i, j) \quad (4)$$

式中： E_f 为频域熵； C 为小波频率系数矩阵； p 为相对频率。

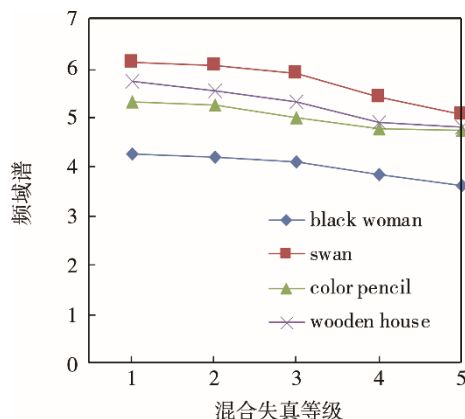


图8 混合失真图像频域熵变化

Fig.8 Frequency energy change of multiply distorted image

从图8可以看出,混合失真图像随着失真程度的增加,图像频域熵在减少。频域熵代表频域中信息的集中程度。Black woman 图像相比较其他3幅图像有更多的细节高频部分即高频部分比较集中,所以频域熵相对较小。图像频域熵呈现趋势状变化,这说明频域熵可以用来评价印刷模糊混合失真图像的一个特征。

2.1.4 高频系数奇异值改变量

图像在印刷过程中经过颜色空间转换分色加网等操作,这个过程相当对图像低通滤波攻击,使图像高频分量受损^[11]。奇异值改变量^[12]常用在图像质量评价领域,但需要参考图像。文中将得到的混合失真图像低通滤波处理来模拟印刷失真,对混合失真图像与低通滤波后进行离散小波变换,计算图像高频系数的奇异值改变量,作为无参考图像评价的一个特征。混合失真图像高频系数奇异值改变量见图9。

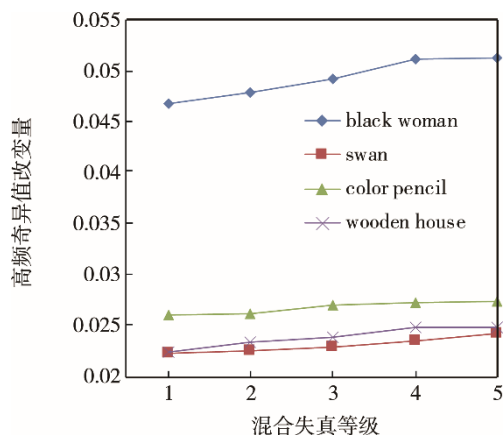


图9 混合失真图像高频系数奇异值改变量

Fig.9 High frequency coefficient singular change of multiply distorted image

从图9可以看出,混合失真图像随着失真程度的增加,图像高频系数奇异值改变量在增加。Black

woman 图像的头发、轮廓代表图像的高频部分,Swan 图像的纹理结构代表图像的高频部分,color pencil 图像的背景部分以及边缘结构代表图像的高频部分,wooden house 图像的房子轮廓代表图像的高频部分。Black woman 图像较其他3幅图像包含更多头发、人物轮廓细节等高频部分,所以高频奇异值改变量比其他3幅图像大。图像高频系数奇异值改变量呈现趋势状变化,这说明高频系数奇异值改变量可以用来评价印刷模糊混合失真图像的一个特征。

2.2 算法训练过程

支持向量机^[13] (Support Vector Machine, SVM) 是在基于统计学习理论基础上,提出的一种监督机器学习方法,通常用来进行模式识别、分类以及回归分析。SVM 算法的思路就是在多维空间建立一个模型,使空间内相似并需要加以区分的2类数据能够最大程度的分类,以便于在两者之间建立起映射函数。相较于其他基于机器学习的分类方法,SVM 建立在小样本学习和统计学习理论的基础上,具有更好的稳定性和泛化性。

随机选取实验图像库125幅图像作为训练样本,提取混合失真的图像的信息熵(3维特征)、亮度方差、频域熵(2维特征)以及高频系数奇异值改变量。将7维特征数据进行归一化处理作为SVM的输入端,主观MOS值作为输出端,通过输入端和输出端训练印刷模糊混合失真图像无参考评价SVM模型的惩罚因子 c 和核函数 g 的参数,混合失真图像评价模型训练流程见图10。

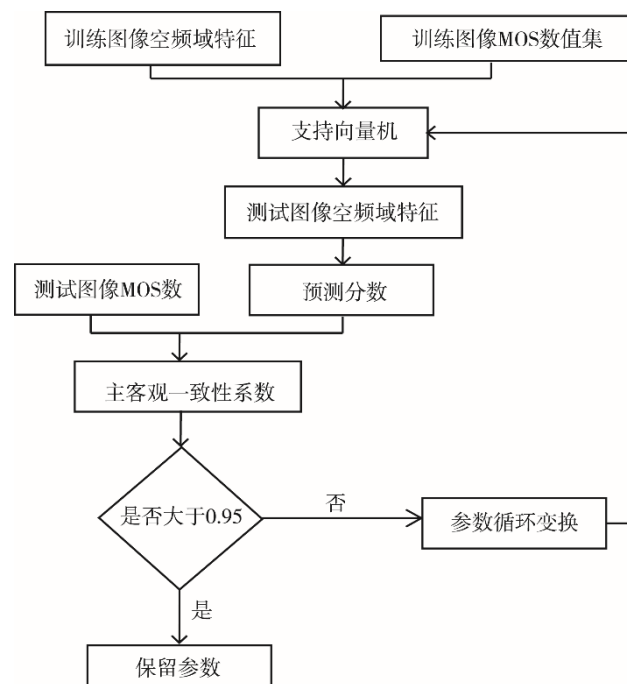


图10 混合失真图像评价模型训练流程

Fig.10 Training chart of multiply distorted image assessment model

3 算法评价及结果比较

3.1 算法评价指标

图像质量评价主观评分与模型评分一致性的参数主要有斯皮尔曼秩相关系数 (S_{ROCC})，皮尔森线性相关系数 (P_{LCC})。 S_{ROCC} 系数表示数据预测单调性； P_{LCC} 系数表示数据的线性相关性。系数绝对值越接近 1，说明算法越有效， S_{ROCC} 和 P_{LCC} 系数计算方法见式 (5) 和见式 (6)。

$$S_{ROCC} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N(N^2 - 1)}$$

(5)

式中： X_i ， Y_i 为第 i 幅图像在主观评价评分和客观评分； N 为图像的数目。

$$P_{LCC} = \frac{\sum_i (S_i - \bar{S})(S_{pi} - \bar{S}_p)}{\sqrt{\sum_i (S_i - \bar{S})^2 (S_{pi} - \bar{S}_p)^2}}$$

(6)

式中： S_i 为主观评价得分； S_{pi} 为算法客观计算得分； $\bar{S}$ 为主观得分的平均值； $\bar{S}_p$ 为算法客观计算得分的平均值。

3.2 算法测试

通过验证不同图像特征类型且与训练图像无交叉的 25 幅印刷模糊混合失真图像，利用文中训练好的模型对验证图像进行分类评价，测试图像和分类评价结果见表 1 和图 11。

表 1 算法分类评价结果
Tab.1 Result of algorithm classification assessment

测试图像	混合失真等级	分类评价结果
white man	1	5.39
	2	5.09
	3	4.49
	4	2.69
	5	2.55
vegetable & fruit	1	5.75
	2	5.45
	3	4.84
	4	3.30
	5	2.93
blue bench	1	5.32
	2	4.97
	3	4.10
	4	2.47
	5	1.84
colored umbrella	1	5.83
	2	5.26
	3	4.46
	4	2.57
	5	1.80

从表 1 可以看出，文中提出算法的分类评价结果与图像失真类型的一致性较好，说明文中算法可以用来数字印刷混合失真图像的无参考质量评价。



图 11 部分测试图像
Fig.11 Test image

3.3 算法比较

通过计算不同算法的主客观一致性系数,比较算法评价性能。利用 SSEQ 算法、文献[14]算法、文献[4]算法以及文中所提出的算法对 25 幅验证图像进行评价。根据算法评价结果与主观 MOS 值,计算主客观一致性系数并比较,不同算法的评价结果与主客观一致性系数见表 2。

表 2 不同算法分类评价与主客观一致性比较结果
Tab.2 Assessment of different algorithm classifications and comparison of subjective and objective consistence

算法	S_{ROCC}	P_{LCC}
SSEQ	0.43	0.45
文献[14]	0.21	0.12
文献[4]	0.90	0.89
文中算法	0.94	0.93

从表 2 可以看出,文中提出算法的 S_{ROCC} 系数为 0.94、 P_{LCC} 系数为 0.93,主客观一致性系数均优于其他算法。SSEQ 算法提取 12 维特征数据,文献[14]提取 36 维特征数据,文献[4]提取 13 维特征数据,文中算法只需提取 7 维特征数据,进一步说明文中提出的算法可以用于数字印刷混合失真类型的图像质量评价。

4 结语

针对混合失真的数字印刷模糊图像,文中通过提取图像信息熵、方差、频域熵以及高频系数奇异值改变量,利用支持向量机对印刷模糊混合失真的图像进行无参考质量评价,算法得分与人眼主观评价一致性高,可以取代传统的全参考和半参考主观印刷品对比评价,说明文中算法针对数字印刷品质量评价具有广泛的应用价值。另外,该算法和方法还可以用来进行单一失真的模糊原稿图像评价以及其他失真类型的图像质量评价。

参考文献:

- [1] GOYAL P, ALLEBACH III J P. Print Quality Assessment for Stochastic Clustered-dot Halftones Using Compactness Measures[C]// IEEE International Conference on Image Processing, IEEE, 2016: 3792—3796.
- [2] XIE F Y, LU Y, BOVIK A, et al. Application-driven No-reference Quality Assessment for Dermoscopy Images with Multiple Distortions[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2015, 63(6): 1248—1256.
- [3] LI Q, LIN W, FANG Y. No-reference Quality Assessment for Multiply-distorted Images in Gradient Domain[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(4): 541—545.
- [4] 王晓红, 王禹琛, 肖颖, 等. 无参考混合失真图像质量评价方法[J]. 包装工程, 2017, 38(19): 199—205.
WANG Xiao-hong, WANG Yu-chen, XIAO Ying, et al. No-reference Quality Assessment Method for Multiply Distorted Images[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19): 199—205.
- [5] CHIESI M, BATTISTA P, FIBBI L, et al. Spatio-temporal Fusion of NDVI Data for Simulating Soil Water Content in Heterogeneous Mediterranean Areas[J]. European Journal of Remote Sensing, 2019, 52(1): 88—95.
- [6] ANNABEL H, KATHARINA V, BJÖRN M, et al. Psychological and Interactional Characteristics of Patients with Somatoform Disorders: Validation of the Somatic Symptoms Experiences Questionnaire (SSEQ) in a Clinical Psychosomatic Population[J]. Journal of Psychosomatic Research, 2015, 78(6): 553—562.
- [7] LIU Li-xiong, LIU Bao, HUANG Hua, et al. No-reference Image Quality Assessment Based on Spatial and Spectral Entropies[J]. Signal Processing: Image Communication, 2014, 29(8): 856—863.
- [8] KIM Y H, PARK K H, KIM J H. Shadow Detection Using Chromaticity and Entropy in Colour Image[J]. International Journal of Information Technology & Management, 2018, 17(1/2): 44.
- [9] LI Z, LEI Z, XU Y, et al. Level Set Method for Image Segmentation Based on Local Variance and Improved Intensity Inhomogeneity Model[J]. Iet Image Processing, 2017, 10(12): 1007—1016.
- [10] LIU L, LIU B, HUANG H, et al. No-reference Image Quality Assessment Based on Spatial And Spectral Entropies[J]. Signal Processing Image Communication, 2014, 29(8): 856—863.
- [11] 程景敏. 基于 Contourlet 变换的抗模糊印刷扫描数字水印算法研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2011.
CHENG Jing-min. Research on Anti-print-scan Digital Watermarking Algorithm Based on Contourlet Transform[D]. Shenyang: Liaoning University, 2011.
- [12] SANG Q B, LIANG D L, Wu X J, et al. No-reference Quality Assessment Algorithm for Blur and Noise Images Using Support Vector Regression[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(3): 595—601.
- [13] WEN Y, LI Y, ZHANG X, et al. A Weighted Full-reference Image Quality Assessment Based on Visual Saliency[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2017, 43: 119—126.
- [14] 邵雪, 曾台英, 汪祖辉. 一种基于 NIQE 的印刷图像无参考质量评价方法[J]. 包装学报, 2016, 8(4): 35—39.
SHAO Xue, ZENG Tai-ying, WANG Zu-hui. No-Reference Quality Assessment Method for Printed Image Based on NIQE[J]. Packaging Journal, 2016, 8(4): 35—39.