

基于结构相似度的彩色图像质量评价算法

朱欢, 陈永利, 王佳辉, 刘文霞, 胡光强, 王谦
(天津科技大学, 天津 300222)

摘要: **目的** 研究在 Matlab 中度量彩色图像之间结构相似度的评价算法, 用以评估彩色图像的质量。**方法** 以灰度图像的结构相似度评价模型(SSIM)为基础, 在 Matlab 中将以 RGB 色空间存储的彩色图像转换到亮度信息和色彩信息分别度量的 YUV 色彩空间中, 设计算法度量彩色图像之间的亮度比较值、对比度比较值和结构比较值, 综合三部分后可得彩色图像之间的结构相似度。**结果** 实验结果表明, 利用彩色结构相似度算法可以计算彩色图像与参考图像之间的相似度数, 用作质量评价, 且其评价结果与人类视觉感知评价(即主观评价)结果保持一致。**结论** 该方法可作为一种新型的彩色图像质量评价准则。

关键词: 图像质量评价; Matlab; 结构相似度

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)23-0165-06

Color Image Quality Assessment Algorithm Based on Structure Similarity

ZHU Huan, CHEN Yong-li, WANG Jia-hui, LIU Wen-xia, HU Guang-qiang, WANG Qian
(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The work aims to study the assessment algorithm of structural similarity between color images in the Matlab to evaluate the quality of color images. Based on the structural similarity index measurement (SSIM) of the grayscale image, in Matlab, the color images stored in RGB color space were converted into the YUV color space in which the brightness and color were measured respectively. Assessment algorithm was designed to measure values of the luminance comparison, the contrast comparison and the structure comparison. The structure similarity between color images could be acquired by integrating the three parts. The experimental results showed that this algorithm of color structural similarity could calculate the degree of similarity between color images and reference images and be used for quality evaluation. Moreover, the evaluation results are consistent with the evaluation of human visual perception (i.e. subjective evaluation). This method can be used as a new type of color image quality evaluation criteria.

KEY WORDS: image quality assessment; Matlab; structural similarity

近年来在图像质量客观评价领域有很多新算法、新理论提出, 最具代表性的评价方法主要分为 3 类^[1]: 度量单个图像的统计指标的评价方法, 这些统计指标包含标准差(SD)、均方误差(MSE)、信噪比(SNR)、峰值信噪比(PSNR)等; 测量评价图像

与标准参考图像之间关系的客观指标的评价方法, 客观指标包含信息熵(IE)、交互信息量(MI)等; 度量基于人类视觉系统的客观指标的评价方法, 这些客观指标一般有基于边缘信息的图像相似度、结构相似模型、基于对比度敏感函数的评价指标和视觉

收稿日期: 2016-05-25

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划 (201610057008)

作者简介: 朱欢 (1992—), 女, 湖北人, 天津科技大学硕士生, 主攻印刷复制技术及质量控制与评价。

通讯作者: 陈永利 (1978—), 男, 山东人, 博士, 天津科技大学教授、硕导, 主要研究方向为颜色、光学防伪、图像复制和图像处理。

信息保真度等。方法1依据图像的统计特性,方法2依据2幅图像对应像素点之间的误差,二者都没有考虑图像的整体结构,以及人眼对于图像信息的处理并不是逐点进行的这一特性,所以这2类评价方法的结果与人类主观感觉存在很大的差异,因而学术界普遍认可第3类评价方法,该方法的客观指标充分反映了人的视觉特性,因此其评价结果将能与人的主观感知保持高度的一致。

人眼是一个复杂的光学神经系统,在观察图像时,它响应外界光信号刺激形成视觉,视觉心理学认为人类视觉系统对于图像的信号感知是高度结构化的,即人眼对于图像信号的处理并不是逐点进行的,而是提取了图像背景中的结构信息。度量图像的结构相似性能够与人类的视觉感知达到高度一致,因此结构相似度是一种符合人眼视觉感知的客观评价方法^[2-3]。文中将参考灰度图像的结构相似度模型,完成彩色图像之间结构相似度的算法设计用以评价彩色图像质量。

1 结构相似度模型

Wang Zhou 和 Bovik 等^[4-5]在2002年首次提出了信息结构化的概念,认为图像是高度结构化的,构成图像的像素之间存在很强的相关性,视觉观察时,这些相互关系包含了图像的很多重要信息。如果忽视了这些,那么对图像质量的评价将会出现偏差。为了使图像的评价结果能够与人眼视觉的评价效果相适应,他们指出评价方法应对图像的结构差异进行度量。以此为基础,他们提出了图像的客观评价指标——结构相似度评价。

结构相似度模型对图像的评价分为亮度比较、对比度比较和结构相似性三部分^[6-12],将原始图像(X)与评价图像(Y)之间三类信息的比较结果进行乘积运算获得评价值,通过该结果对图像的质量进行评价。两图像结构相似度计算的原理见图1。

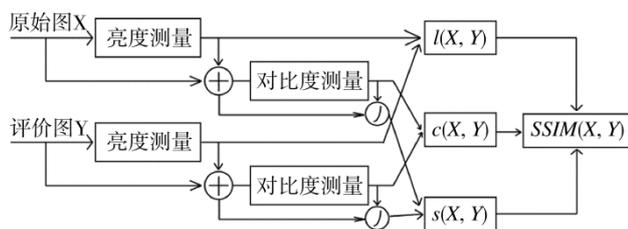


图1 结构相似度原理
Fig.1 Principle of structural similarity

原始图像(X)与评价图像(Y)的亮度对比函数 $l(X, Y)$ 定义为:

$$l(X, Y) = l(u_x, u_y) = \frac{2u_x u_y + C_1}{u_x^2 + u_y^2 + C_1} \quad (1)$$

式中: u_x, u_y 为两图像亮度信号的平均强度,定义见式(2)。设定常数 C_1 是为了避免 $u_x^2 + u_y^2$ 的值非常接近于0时所造成的不稳定性,通常令 $C_1 = (K_1 L)^2$ 。 L 为像素值的动态范围,8位的灰度图像 L 值一般为255; K_1 为一个远小于1的常数。

$$\begin{cases} u_x = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ u_y = \bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M y_j \end{cases} \quad (2)$$

使用标准差表示图像信号的对比度,因此对比度比较函数 $c(X, Y)$ 定义为关于标准差 δ_x 和 δ_y 的函数,与亮度对比函数具有相同的形式:

$$c(X, Y) = c(\delta_x, \delta_y) = \frac{2\delta_x \delta_y + C_2}{\delta_x^2 + \delta_y^2 + C_2} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \delta_x = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - u_x)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ \delta_y = \left[\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (y_j - u_y)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (4)$$

与亮度对比函数类似, C_2 为非负的常数。 $C_2 = (K_2 L)^2$, K_2 也是一个远小于1的常数。一般情况下取 $K_1 = 0.01, K_2 = 0.03$ 为经验值效果较好。

图像的结构相似性函数是由亮度对比函数和对比度比较函数归一化之后产生的,因此结构相似性函数 $s(X, Y)$ 定义为:

$$s(X, Y) = \frac{\delta_{xy} + C_3}{\delta_x \delta_y + C_3} \quad (5)$$

与进行亮度对比度函数和对比度比较计算时一样,在分母和分子中都引入了一个小的常数 C_3 , $C_3 = C_2/2$ 。式(5)中两图的协方差 δ_{xy} 定义为:

$$\delta_{xy} = \frac{1}{(N-1)(M-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (x_i - u_x)(y_j - u_y) \quad (6)$$

最后将亮度函数、对比度函数和结构相似度函数三部分联合起来得出了原始图像(X)与评价图像(Y)的整体结构相似度函数:

$$SSIM(X, Y) = [l(X, Y)]^\alpha [c(X, Y)]^\beta [s(X, Y)]^\gamma \quad (7)$$

式中： α, β 和 γ 分别为三者的权重，一般 $\alpha > 0, \beta > 0, \gamma > 0$ ，三者都设置为 1。则化简后结构相似度函数的具体计算方法为：

$$SSIM(X, Y) = \frac{(2u_x u_y + C_1)(2\delta_{xy} + C_2)}{(u_x^2 + u_y^2 + C_1)(\delta_x^2 + \delta_y^2 + C_2)} \quad (8)$$

2 彩色图像的结构相似度算法设计

在 Matlab 中对图像进行处理时，图像信息以矩阵的形式存储在计算机中。对于灰度图像而言，每个像素点都只有 1 个灰度值，所以图片信息仅为 1 个二维的矩阵，可直接按照定义设计算法来计算 2 幅灰度图像的结构相似度。对于彩色图像而言，每个像素点的颜色信息由 RGB 3 个基色分量组成。在数据存储时，彩色图像被存储为三维的矩阵，因此，2 幅彩色图像之间的结构相似度无法直接进行计算。通常为了获得彩色图像的结构相似度，需将彩色图像转换为灰度图像后再计算结构相似度数值^[13-19]，这种方法丢弃了彩色图像的颜色信息，计算结果也与视觉感知结果相去甚远。

按照灰度图像的结构相似模型，为了获得彩色图像之间的结构相似度，需要评价原始图像与评价图像之间的亮度相似度、对比度相似度和结构相似度。相较于灰度图像而言，彩色图像不仅要亮度信息作出评价，还需要对图像包含的色彩信息作出

比较。若能够将彩色图像的亮度信息和色度信息分离开来，分别比较与原稿的相似度，则可以获得彩色图像之间的相似度。文中提出将彩色图像的亮度信息和色度信息分离，分别计算结构相似度后平均即获得 2 幅彩色图像之间的结构相似度。

在 Matlab 中彩色图像的数据信息被存储为一个三维数组，在三维数组的不同页面上记录着图像的 R, G 和 B 3 个分量信息，通过 3 个页面上 R, G, B 的灰度值的不同比例，来描述不同的颜色，最终彩色图像被记录、存储下来。为了获得彩色图像之间的结构相似度，需要将彩色图像的亮度信息和色度信息分离，因此将以 RGB 颜色空间存储的彩色图像转换到亮度信号和色度信号分离的 YUV 颜色空间中。将图像的亮度信息存储在分量 Y 中，色度信息存储在 U 和 V 分量中，实现亮度信息和色度信息的分离。按照灰度图像结构相似度模型，计算彩色图像之间的亮度函数 SSIML、对比度函数 SSIMC 和结构相似度函数 SSIMS，最后取其平均值即为 2 幅彩色图像的整体结构相似度 $SSIM(X, Y)$ 。RGB 色空间和 YUV 色空间的三基色系数的相互转换关系如下^[6]：

$$\begin{cases} Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \\ U = 0.596R - 0.275G - 0.321B \\ V = 0.212R - 0.275G - 0.311B \end{cases}$$

该评价方法的算法流程见图 2。

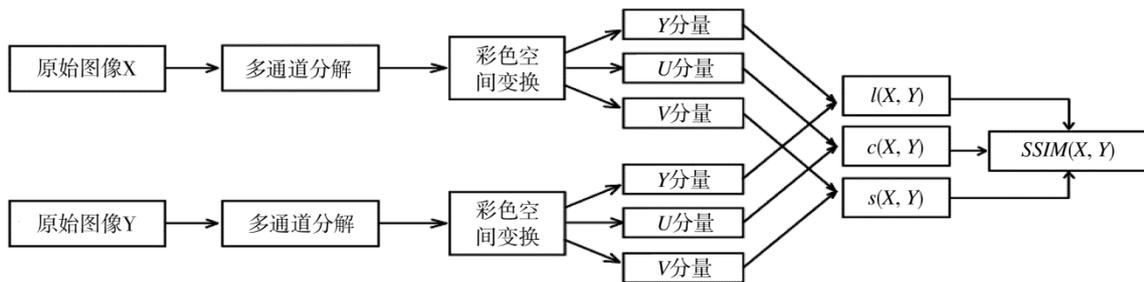


图 2 彩色图像结构相似度算法流程

Fig.2 Flow chart of color image structure similarity algorithm

与评价 2 幅灰度图像的质量类似，2 幅彩色图像的结构相似度 $SSIM(X, Y)$ 的取值介于 -1 与 1 之间，结果越大说明 2 幅图像在亮度、对比度以及结构上相似度越高。若比较的是复制图像与原图的结构相似度，则数值越大说明复制图像的质量越好。

3 实验与结果讨论

按照彩色图像结构相似度算法的流程图设计

程序，通过计算不同彩色图像与参考样张之间的亮度相似度 SSIML、对比度相似度 SSIMC 和结构相似度 SSIMS，以及最终的结构相似度 $SSIM(X, Y)$ 数值，来评价各实验样张的质量，并将其评价结果与人眼主观视觉的感知作对比。

实验样张为 6 幅经过不同方法降质处理的彩色图像。图 3a 为参考的原始图像，默认其质量最佳。各彩色样张与其相似度越高，则质量越好；图 3b—g 为经过不同的降质处理得到的彩色图像。图

3b—e 都是原始图像加入不同强度高斯模糊的结果，4 幅图像的模糊程度依次增加；图 3f 是原始图像经过曝光过度处理获得的图像，能发现图像的色彩出

现了严重的失真，但是图像的轮廓还能够辨别；图 3g 是原始图像经过均值滤波得到的模糊图像，从图像中获取不到原图像的任何信息。

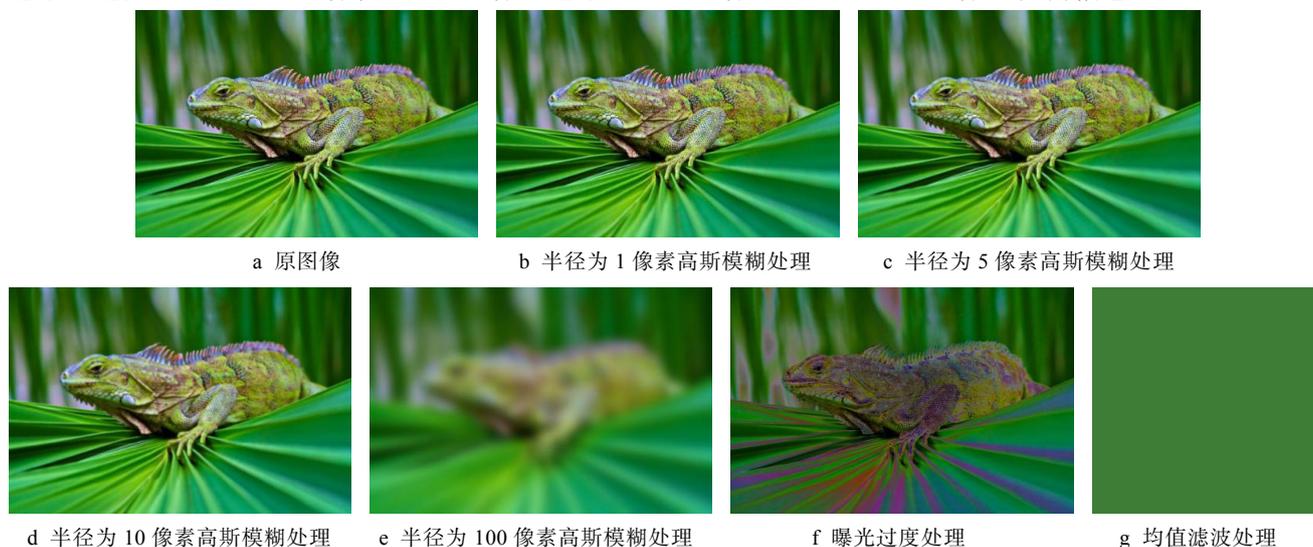


图 3 原图像和处理后图像的实验图样

Fig.3 The sample of experiment

利用设计的算法分别获得图 3 中 6 幅彩色图像与图 3 参考样张之间的结构相似度结果见表 1，其中数据的产生说明了图像结构相似度算法代码的可行性。图 3b—g 的 $SSIM(X,Y)$ 数据依次递减，表明与原图的近似程度越来越弱，即图 3b 与参考图像最接近，图像质量最好；图 3g 与原图近似程度最低，图像质量最差。

价分数。评价原则为样张颜色正确，阶调层次很明显，对原图的性能再现优秀记 5 分；颜色正确，阶调层次明显，再现原图的性能良好记 4 分；颜色比较正确，阶调、层次比较明显，再现原图的性能比较好记 3 分；颜色失真比较严重，阶调、层次比较模糊，再现原图的性能一般记 2 分；颜色失真严重，借调、层次模糊，再现原图的性能不好记 1 分。通过最终各图像分数的来判定图像质量的优劣，最终的评价结果见表 2。

表 1 评价结果

Tab.1 Assessment results

图样	SSIML	SSIMC	SSIMS	$SSIM(X,Y)$
图3b	0.5041	0.5828	0.9984	0.6951
图3c	0.5020	0.5820	0.9985	0.6941
图3d	0.4972	0.5789	0.9985	0.6916
图3e	0.4637	0.5577	0.9984	0.6733
图3f	0.4117	0.5038	0.9974	0.6377
图3g	0.3854	0.4594	0.9984	0.6144

为了验证利用结构相似度模型客观评价的结果与人眼视觉的一致性，实验选取了 15 名视力正常的观察者对图像质量进行主观评价，包含 8 名女生和 7 名男生。视力正常的观察者表示无色盲、色弱，视力或者矫正视力达到 1.0 及以上的人。观察者按照图像对实验样张和对原稿再现质量的评价指标，对实验图像从颜色饱和度、阶调、反差、细节以及清晰度 5 个方面进行了视觉评价并给予评

表 2 主观评价结果

Tab.2 Result for subjective evaluation

图样	颜色饱和度	阶调	反差	细节	清晰度	总计
图3b	4.503	4.752	4.655	4.770	4.853	23.533
图3c	4.246	4.601	4.452	4.753	4.850	22.902
图3d	4.054	4.610	4.421	4.655	4.753	22.493
图3e	3.033	3.524	2.826	2.014	2.215	13.612
图3f	2.152	1.652	3.825	2.701	2.510	12.84
图3g	2.515	0	0	0	3.615	6.13

从表 2 中数据可知，图 3b—d 在图像的阶调、层次、清晰度以及颜色上都与参考样张较为接近，认为其质量很好，在此其中图 3b 的颜色更加饱和，阶调也相较图 3c, d 更为丰富，所以其质量最佳，图 3c, d 稍逊之；图 3e, f 基本能够再现原图，图

3e 的清晰度以及反差都不理想, 但是良好地再现了原稿的颜色, 所以其质量稍次于前 3 幅图; 图 3f 基本再现了原稿的信息, 但是效果不佳, 仅能辨别原图像的轮廓; 图 3g 则仅能再现原稿的部分颜色, 原稿的阶调、细节等信息全部丢失, 所以其质量最差。

人眼视觉评价的结果与通过结构相似度算法评价的图像质量保持了高度一致, 说明提出的评价算法的可行性以及正确性。

4 结语

提出了一种基于结构相似度的彩色图像质量评价方法, 并在 Matlab 中完成了该算法的程序设计。通过该方法评价了经过不同降质处理的彩色图像的质量, 且评价结果能够与人眼视觉评价结果保持一致, 验证了该方法的可行性。说明了该方法可以作为彩色图像质量评价的一种新基准。

参考文献:

- [1] 张小利, 李雄飞, 李军. 融合图像质量评价指标的相关性分析及性能评估[J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 306—315.
ZHANG Xiao-Li, LI Xiong-Fei, LI Jun. Validation and Correlation Analysis of Metrics for Evaluating Performance of Image Fusion[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(2): 306—315.
- [2] 王宇庆, 刘维亚, 王勇. 一种基于局部方差和结构相似度的图像质量评价方法[J]. 光电子:激光, 2008, 19(11): 1546—1553.
WANG Yu-qing, LIU Wei-ya, WANG Yong. Image Quality Assessment Based on Local Variance and Structure Similarity[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2008, 19(11): 1546—1553.
- [3] 李连胜, 陈晚华. 基于 MATLAB 的数字图像质量评价[J]. 湖南科技学院学报, 2005, 26(5): 176—177.
LI Lian-sheng, CHEN Wan-hua. Appraising Digital Image's Quality on the Basis of MATLAB[J]. Journal of Hunan University of Science and Engineering, 2005, 6(5): 176—177.
- [4] WANG Zhou, BOVIK A C. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600—612.
- [5] WANG Zhou, BOVIK A C. A Universal Image Quality Index[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(2): 81—84.
- [6] 金明举. 基于结构相似度和对比度的彩色图像融合效果评价[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
JIN Ming-ju. The Fusion Effectiveness Assessment of Color Images Based on Structural Similarity and Contrast[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013.
- [7] 王勇, 王宇庆, 赵晓晖. 图像质量客观评价的复数矩阵结构相似度方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1118—1129.
WANG Yong, WANG Yu-qing, ZHAO Xiao-hui. Objective Image Quality Assessment Based on Complex Matrix Structure Similarity[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1118—1129.
- [8] 齐鸥, 黄应清, 蒋晓瑜. 基于色彩与结构相似性的伪彩色图像融合质量评价[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(10): 110—113.
QI Ou, HUANG Ying-qing, JIANG Xiao-yu. Quality Assessment of False Color Image Fusion Based on Colour and Structure Similarity[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(10): 110—113.
- [9] 潘岱, 李佩. 一种图像相似度匹配的算法[J]. 科技信息, 2012(17): 134.
PAN Dai, LI Pei. A Kind of Image Similarity Matching Algorithm[J]. Science and Technology Information, 2012(17): 134.
- [10] WANG Z, BOVIK A C, SIMONCELLI E P. Structural Approaches to Image Quality Assessment[J]. Handbook of Image and Video Processing, 2005, 3(23): 3—34.
- [11] 狄红卫, 刘显峰. 基于结构相似度的图像融合质量评价[J]. 光子学报, 2006, 35(5): 766—771.
DI Hong-wei, LIU Xian-feng. Image Quality Assessment Based on Structure Similarity[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5): 766—771.
- [12] 逢浩辰. 彩色图像融合客观评价指标研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
PANG Hao-chen. The Study of Objective Evaluation Metrics of Color Image Fusion[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [13] 汪军, 强俊. 面向应用的数字图像处理课程教学模式的研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2015, 32(5): 94—98.
WANG Jun, QIANG Jun. Research on Application oriented Teaching Model of Digital Image Processing Course[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University(Natural Science Edition), 2015, 32(5): 94—98.
- [14] 陈惠娟, 钱亚枫, 李勃, 等. 基于HVS和四元数的彩色图像质量评价方法[J]. 南京大学学报(自然科学

- 版), 2015, 51(2): 271—278.
- CHEN Hui-juan, QIAN Ya-feng, LI Bo, et al. Assessment Method for Color Image Quality Based on HVS and Quaternion[J]. Journal of Nanjing University (Natural sciences), 2015, 51(2): 271—278.
- [15] 黄泽财. 基于 HIPS 图像匹配算法的研究与实现[D]. 广东: 华南理工大学, 2012.
- HUANG Ze-chai. The Research and Implementation of HIPS Image Matching Algorithm[D]. Guangdong: South China University of Technology, 2012.
- [16] 田浩南, 李素梅. 基于边缘的 SSIM 图像质量客观评价方法[J]. 光子学报, 2013, 42(1): 110—114.
- TIAN Hao-nan, LI Su-mei. Objective Evaluation Method for Image Quality Based on Edge Structure Similarity[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(1): 110—114.
- [17] 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.
- [18] 姜中敏, 周颖梅. 基于多尺度结构相似度的印刷图像质量评价研究[J]. 包装工程, 2016, 37(9): 134—137.
- JIANG Zhong-min, ZHOU Ying-mei. Image Quality Assessment Based on Multi-scale Structural Similarity [J]. Packaging Engineering, 2016, 37(9): 134—137.
- [19] 梁东, 张雷洪, 杜晓萌. 基于感兴趣区域的图像质量评价算法研究[J]. 包装工程, 2016, 37(5): 161—166.
- LIANG Dong, ZHANG Lei-hong, DU Xiao-meng. Image Quality Assessment Algorithm Based on Region of Interest[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(5): 161—166.