

自动化与智能化技术

颜色空间对打印图像水印性能影响研究

侯云耀, 王彩印*, 余英, 孙玉婷
(大连工业大学, 辽宁 大连 116034)

摘要: **目的** 打印图像在数模/模数转换过程中, 主要涉及到 RGB、CIELAB 和 CMYK 3 个颜色空间。本文基于 DCT 域水印算法, 在不同颜色空间嵌入水印图像, 研究并分析颜色空间对打印图像水印性能的影响。**方法** 选取暗调、饱和色、风景、亮调、人物、中性灰 6 类图像分为低中高 3 个复杂度分别在 RGB、LAB、CMYK 颜色空间下的各个分量图像中进行透明性、鲁棒性评价。**结果** 经透明性分析, RGB 空间 B 通道、Lab 空间 b 通道和 CMYK 空间 M 通道嵌入水印透明性更好;鲁棒性分析可知, 亮调图像在 RGB 空间抗非几何攻击能力较差, 各类型低复杂度图像在 LAB 空间抗攻击性能差, 所有图像在 CMYK 前三通道的抗攻击性能优于 K 通道, 抗打印攻击能力上暗调图像抗此攻击性能差, 所有图像在 LAB 空间抗打印攻击性能最好, 其中 L 通道最好。**结论** 本文系统研究了颜色空间对打印图像水印性能的影响。结果显示, 颜色空间对不同类型和不同复杂度的图像水印性能具有不同程度的影响。完善了数字水印技术在打印图像应用中的理论体系, 同时将为彩色图像数字水印技术的工业化应用和优化提供一定的指导和借鉴。

关键词: 颜色空间; 打印图像; 数字水印; 几何攻击

中图分类号: TB482; TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)23-0148-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.23.018

Effect of Color Space on Watermarking Performance of Printed Images

HOU Yun-yao, WANG Cai-yin*, YU Ying, SUN Yu-ting

(Dalian Polytechnic University, Liaoning Dalian 116034, China)

ABSTRACT: In digital-to-analog/analog-to-digital conversion, printed images mainly involve three color spaces: RGB, CIELAB and CMYK. The work aims to embed watermarking images in different color spaces based on the DCT-domain watermarking algorithm. Six types of images including dark tone, saturated tone, landscape, bright tone and human figure and neutral grey were selected to evaluate the transparency and robustness in each component image in RGB, LAB and CMYK color spaces with three complexity levels respectively. According to the transparency analysis, the transparency of watermark embedded in Lab space b channel, RGB space B channel and CMYK space M channel was better. According to the robustness analysis, images in bright tone had poor resistance to non-geometric attacks in the RGB space. The anti-attack performance of all images in the first three channels of CMYK was better than that in K channel. The anti-attack performance of all images in dark tone was poor in anti-print attack capability. The anti-print performance of all images in the LAB space was the best, among which that in L channel was the best. In this work, the effect of color spaces on the watermarking performance of printed images is systematically studied. The results show that color spaces have different

收稿日期: 2023-04-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (61802041); 辽宁省教育厅基本科研项目 (LJKMZ20220883); 辽宁省教育厅基本科研项目 (LJKQZ2021120)

*通信作者

effects on watermarking performance of image of different types and complexity. It improves the theoretical system of digital watermarking technology in the application of printed images, and will provide some guidance and reference for the industrial application and optimization of color image digital watermarking technology.

KEY WORDS: color space; printed image; digital watermarking; geometry attack

随着互联网和智能终端的普及, 数字图像信息的获取、交换和传输变得异常简单。由于数字信息包含的内容丰富, 数字图像信息已广泛用于通信和信息传递中。然而, 这种方便性也带来了一些问题, 例如一些个人或组织可能会在未经授权的情况下恶意复制和传播有版权保护的文件。为解决这个问题, 数字水印技术在多个领域被用作一种解决方案^[1-3]。

但是多数的数字水印算法都基于单个颜色空间来研究符合人眼视觉的通道, 如马聪珑等^[4]采用 DWT 域算法, 将水印图像嵌入到宿主图像 C、M、Y 或 K 通道的 DWT 域进行实验。魏代海等^[5]对载体图像进行 RGB 三通道分解, 水印单通图像进行加密, 将水印嵌入到载体图像低频经奇异值分解后的对角矩阵中。包新月等^[6]提出相异的色彩空间使用的场景是迥异的, 通过系统设计实现数字图像处理阶段常用的色彩空间的转换, 实现了 RGB、HIS 色调空间的转换。张菁等^[7]提出基于颜色空间转换的颜色复原算法是保持颜色信息一致性的关键技术, 提出的颜色复原方案达到降低 23% 的色差的目的, 以实现颜色的精确复原。但在颜色空间转换时会造成数据丢失的误差不可避免, 因此本文将研究在打印过程中所涉及的 RGB、CIELAB 和 CMYK 3 个颜色空间对打印图像水印性能的影响。

1 相关技术背景

1.1 水印基本模型

水印算法多种多样, 空间域水印算法和频率域水印算法^[8-9]都有大量的研究, 但数字水印还都有一个相似的模型, 即通过相应的水印嵌入规则将具有唯一性的版权标识嵌入到数字图像中, 以达到信息隐藏的目的。当需要时通过水印提取算法将版权表示提取出来。

嵌入水印的基本模型如下^[10]:

$$I_w = I + \beta w \quad (1)$$

式中: I_w 为含有水印的图像; I 为原始载体图像; β 为水印图像; w 为缩放因子控制嵌入水印的强度。

1.2 颜色空间特征

1.2.1 RGB 颜色空间

RGB 颜色空间是一种色彩模型, 通过将颜色表示为红、绿、蓝三颜色的混合比例来产生不同的颜色。

它被广泛应用于电子设备和图像处理领域中, 可以表示 16 777 216 种颜色, 也被称为“真彩色”, 是运用广泛的色彩系统之一。

1.2.2 CMYK 颜色空间

CMYK 颜色空间是一种颜色模型, 其基于颜色叠加原理而建立, 主要应用于印刷领域, 也称作印刷色彩模式。该模型由 4 种颜色组成: 青色 (Cyan)、品红色 (Magenta)、黄色 (Yellow) 和黑色 (Key)^[11]。在实际应用中, 由于青色、洋红色和黄色叠加难以形成真正的黑色, 往往只能形成暗灰或褐色。因此, 黑色 (K) 被引入以补充 CMY 三原色无法形成的纯黑色。

1.2.3 CIELAB 颜色空间

CIELAB 色度学系统是根据 CIE 在 1931 年制定的一种国际标准来测定颜色的系统。该模型由亮度分量 L 以及与颜色的色调和饱和度相关的 2 个分量 a 和 b 组成^[12]。其中, 颜色分量 a 代表从深绿色到红色的颜色变化, 颜色分量 b 代表从亮蓝色到黄色的颜色变化。CIELAB 色度学系统能够精确地描述颜色之间的差异, 并且与设备无关, 便于与其他颜色空间进行转换, 因此在图像处理、颜色管理和校正等领域中被广泛应用。

1.3 图像质量评价描述

1.3.1 透明性

数字载体在嵌入水印后会在视觉上产生影响, 而用于衡量这种影响的一个评测标准就是透明性。透明性用于评价载体图像在嵌入水印后产生影响的不可感知程度。多数研究中对于含水印图像和原图像之间的透明性, 通常通过结构相似度 (Structural Similarity Index Metric, SSIM)、峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 来进行评价。

其中 SSIM 是一种衡量 2 幅图像相似度的指标, 给定 2 个图像 x 、 y , 2 张图像的结构相似性可按照式 (2) 求出^[13]。

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (2)$$

式中: σ_x^2 为 x 的方差; σ_y^2 为 y 的方差; μ_x 为 x 的平均值, μ_y 为 y 的平均值; σ_{xy} 为 x 和 y 的协方差。 c_1c_2 为用来维持稳定的常数, 避免分母为 0 带来的系统错误。

该指数从图像组成的角度, 将结构信息定义为独立于亮度和对比度的属性, 反映场景中物体结构的特征, 并将图像建模为亮度、对比度和结构 3 个不同因素的组合。在计算结构相似度指数时, 亮度的估计值为图像的平均灰度值, 对比度的估计值为图像的标准差, 而结构的相似度程度则通过协方差来度量。当 2 张图像完全一致时, 结构相似度指数的值等于 1。

2 个图像的 PSNR 数值 (P_{PSNR}) 可通过计算信号最大数值和噪声数值的比值来评估^[14], 见式 (3) ~ (4)。

$$\sigma_{\text{MSE}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I_{(i,j)} - K_{(i,j)}\|^2 \quad (3)$$

$$P_{\text{PSNR}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I_{\text{max}}^2}{\sigma_{\text{MSE}}} \right) \quad (4)$$

式中: $I_{(i,j)}$ 和 $K_{(i,j)}$ 分别为原始图像和嵌入水印后的图像; m 、 n 为图像的像素值。通常情况下, PSNR 值用于评估含水印图像的透明性, 水印嵌入前后峰值信噪比低于 30 dB, 说明水印的不可感知性比较差的图像质量差, 相反如果水印嵌入前后峰值信噪比高于 30 dB, 肉眼很难看出水印嵌入前后的差别, 说明水印的透明性较好。

1.3.2 鲁棒性

图像水印的鲁棒性是指嵌入水印后的图像对于

各种攻击后, 依然能够提取出可用水印信息的能力, 对这种能力通常采用归一化误差 (Normalized Cross-Correlation, σ_{NC}), 即 NC 值来进行定性描述^[15], 见式 (5)。

$$\sigma_{\text{NC}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=M} \sum_{j=1}^{j=M} W_{(i,j)} W'_{(i,j)}}{\sum_{i=1}^{i=M} W_{(i,j)}^2} \quad (5)$$

式中: $W_{(i,j)}$ 和 $W'_{(i,j)}$ 分别为原始水印信息和提取的水印信息。NC 值为 0~1, NC 值越接近 1, 两图像越相似, 代表提取的水印信息质量越高。NC 值达到 0.85 以上, 即鲁棒性较好。因此本文同样选择以上指标来评价图像的鲁棒性和透明性。

2 实验内容

2.1 实验条件

本文旨在研究不同的颜色空间对水印嵌入的影响, 因此对暗调、饱和色、风景、亮调、人物和中性灰 6 类^[11,16]共 340 张图片进行测试, 示例如图 1 所示, 每种类型的图像按照复杂度低中高分类排序, 并进行实验分析, 载体图像 1 024 像素×1 024 像素, 分辨率为 300 dpi, 水印图像为 128 像素×128 像素的二值图像, 如图 2 所示。



图 1 载体图像示例
Fig.1 Carrier image example



图 2 水印图像
Fig.2 Watermarking image

实验设备: 电脑, 联想小新 16P; 打印机: Epson Stylus Photo R330; 扫描仪: 惠普 M437n 软件: MATLAB R2021b、Adobe Photoshop 2020。

2.2 水印算法

实验采用基于离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT) 的频率域数字水印算法。首先对水印进行预处理, 将载体图像 1 024×1 024 分成 128×128 个 8×8 的小块, 水印图像也是 128×128, 对应每个 8×8 的小块的像素点行 DCT 变换。根据 JPEG 量化表引入预设系数差 K 作为水印强度, 通过比较 DCT 系数的大小嵌入水印信息。通过比较嵌入时选取量值相同位置的 2 个量值的大小, 提取出水印信息。将提取出的一维排序重新排列成二维水印, 即可将水印信息提取出来。在本次实验中, 预设系数差 K 值为 60, 在打印实验中预设系数差 K 值为 70, 旨在保证透明性和鲁棒性的均衡^[17-18]。

2.3 实验流程

为了研究不同颜色空间的影响, 将上述图片分别转换为 RGB、CMYK、CIELAB 3 种颜色空间, 该方案在几何、非几何和打印等各种攻击下进行了测试,

在相同的颜色空间中, 分别选择不同的颜色通道 RGB (红、绿和蓝)、CMYK (青色、洋红、黄色、黑色)、LAB (明度、红绿、黄蓝) 进行水印嵌入, 再通过不同的攻击方式对嵌入水印的图像进行攻击, 通过实验数据的对比, 分析各个颜色空间对不同类型的图像的鲁棒性与透明性影响。实验流程如图 3 所示

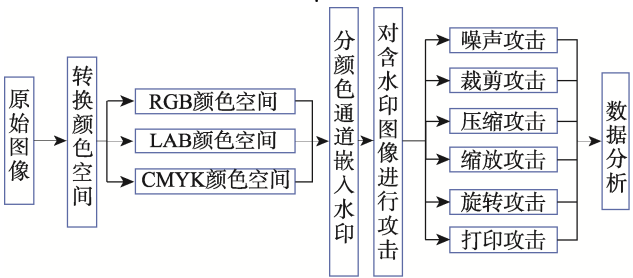


图 3 实验流程
Fig.3 Experimental flow chart

3 结果与分析

3.1 水印透明性性能分析

3.1.1 载体图像的 PSNR 值分析

本文采用 PSNR 对单通道进行评价, 可以更好地检测出某个通道中的失真情况, 从而更准确地评价该通道的质量以获得更精确的评价结果。在各个情况下对实验图像进行水印嵌入, 并进行 PSNR 值分析, 如图 4 所示。

在 RGB 颜色空间中, 每个类型的图像嵌入水印后的 PSNR 均值高于 30 dB, 显示出良好的图像透明性。特别地, 在 B 通道中, 嵌入的水印导致较小的图像噪声, 并与原始图像最接近, 这进一步证明了 B 通道的嵌入透明性较好。图 4a 显示 3 个通道之间的差值约为 0.01, 而平均 PSNR 值分别为 32.331、32.343 和 32.344 dB。其中, 中性灰图像的 RGB 的比例相同, 因此实验数值相同。图 5 提供了直观的视觉评价结果, 验证了 B 通道嵌入后图像的噪声更小且不易察觉。

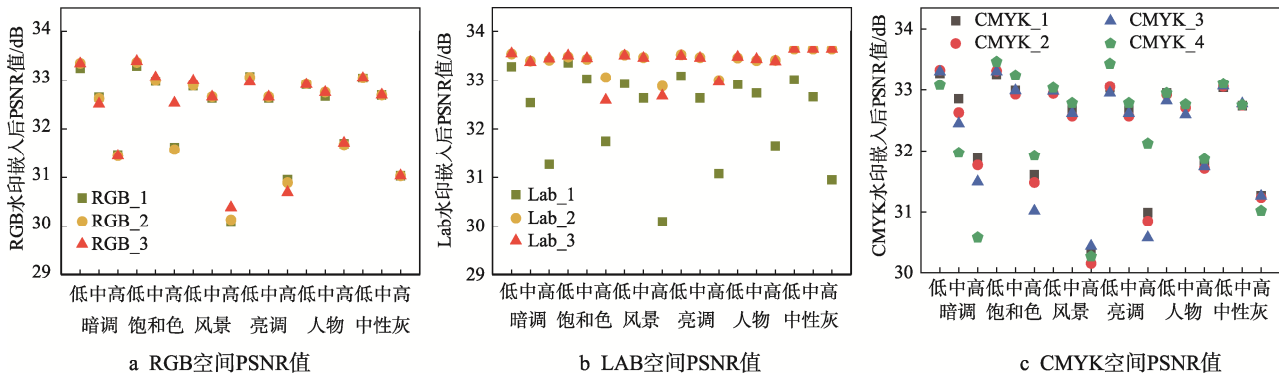


图 4 不同空间载体图像的 PSNR 值
Fig.4 PSNR values of carrier images in different spaces

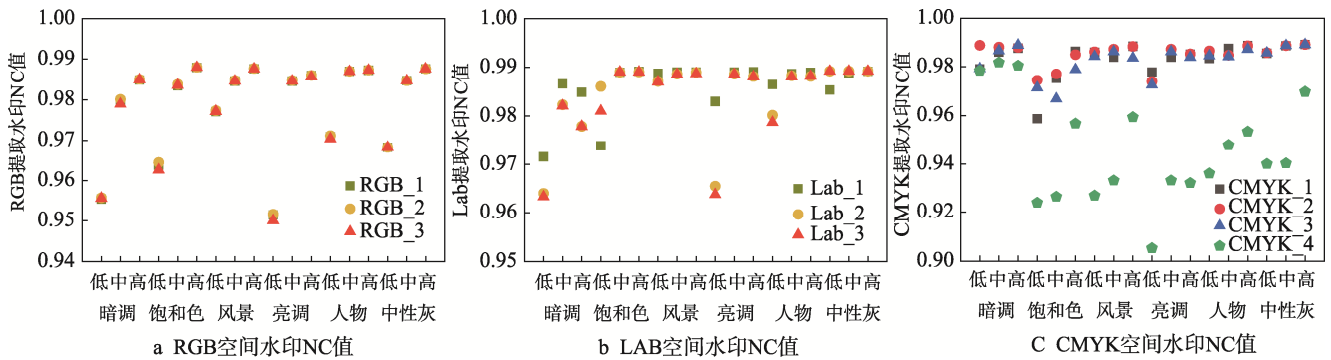


图 7 未受攻击提取水印的 NC 值

Fig.7 NC value of watermark extracted without attack

于其他通道。根据图 7a 的展示, 暗调低复杂度图像的 NC 均值达到了 0.978, 表明其鲁棒性优秀。根据图 7b 可知, 风景类图像在 LAB 颜色空间的 3 个通道中表现出稳定且较高的均值 (0.986)。然而, 暗调类型图像在 LAB 颜色空间下进行水印嵌入时的鲁棒性波动较大, 效果较差。另外, 图 7c 显示只有暗调类型图像在 CMYK 颜色空间的 K 通道下效果较好, 除此之外各类型图像在 CMYK 颜色空间的 K 通道性能

较差, 提取水印后, NC 值浮动较大, 均值为 0.944 5。因此, 除暗调类型图像在进行 CMYK 颜色空间的实验时, 可以优先考虑前 3 个通道。

3.2.2 抗几何/非几何攻击鲁棒性性能分析

分别对不同颜色空间下的图像进行了几何 (剪切、旋转、缩放)、非几何 (高斯噪声、椒盐噪声、JPEG 压缩) 等攻击并提取。部分实验结果如图 8 所示。

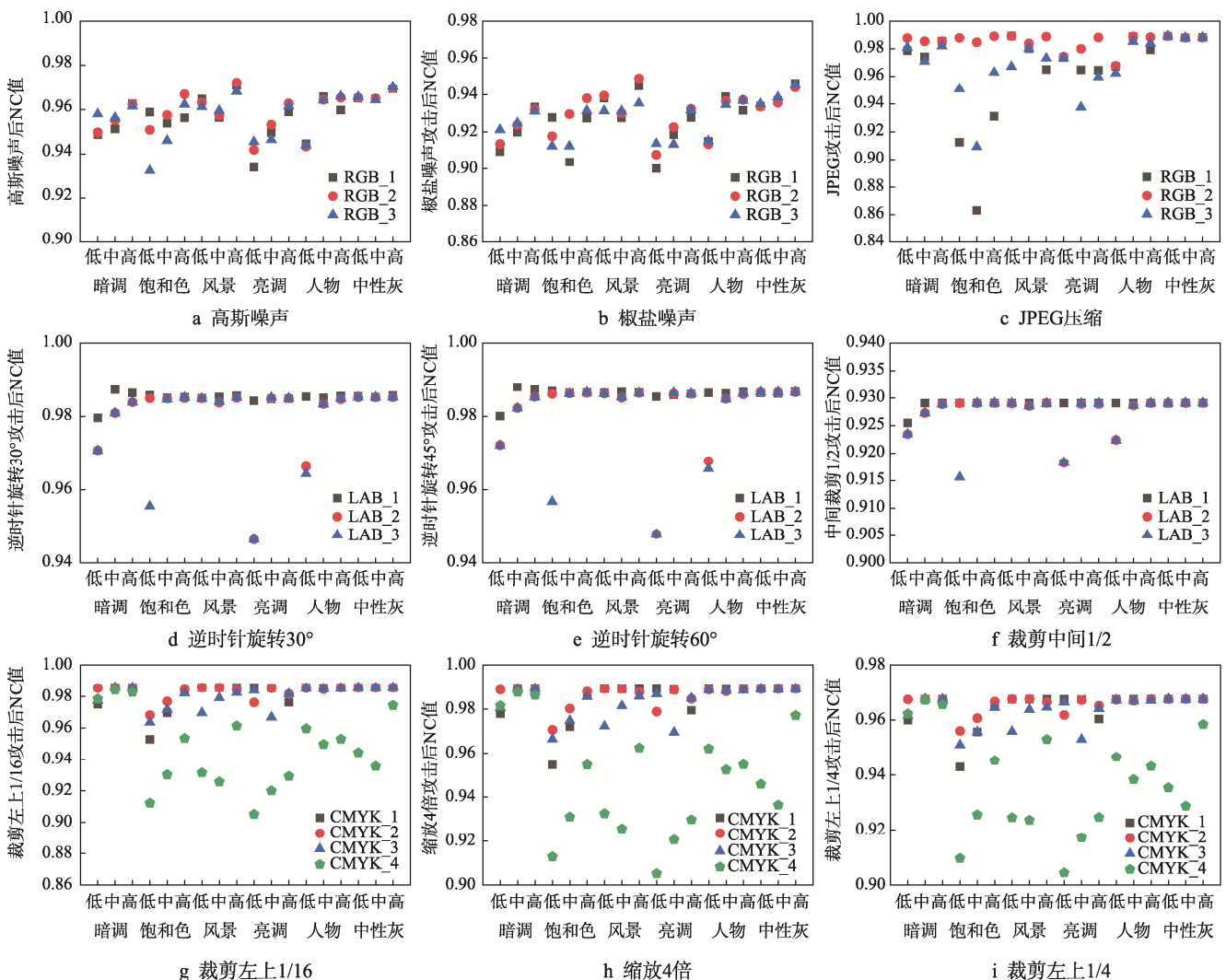


图 8 各颜色空间的部分攻击测试

Fig.8 Some attack tests of each color space

图 8a~c 为 RGB 颜色空间下图像进行的噪声攻击和 JPEG 压缩攻击结果,图 8d~f 为 Lab 颜色空间下图像进行的旋转和裁剪攻击测试结果,图 8a~c 为 CMYK 颜色空间下图像进行的裁剪和缩放测试结果。

根据实验结果显示,在 RGB 颜色空间中,各种类型的图像在受到裁剪、旋转、缩放等几何攻击后都展现出较强的抗攻击能力。实验结果表明,暗调、饱和色、风景和中性灰类型的图像在 NC 值方面均能达到 0.98 以上。亮调图像在受到噪声攻击时的对抗能力相对较弱,但仍然能够达到 0.90 以上的水平,使得水印能够被清晰提取。JPEG 压缩攻击如图 8c 所示,饱和色类型的图像在 R 和 B 通道的水印嵌入中表现出较差的对抗能力,但仍然保持 NC 值高于 0.85 的鲁棒性要求。与之相比,饱和色图像在 G 通道的嵌入效果较好。因此,在实际应用中,对于饱和色图像,可以优先考虑在 RGB 颜色空间的 G 通道进行实验。

在 Lab 颜色空间中,各类型图像对几何攻击展现出较强的鲁棒性,NC 值均在 0.91 以上。饱和色、亮调和人物类型图像中的低复杂度图像在 b 通道的嵌入方面相对较弱,但仍保持 NC 值大于 0.91,水印仍然清晰可见。受到方差为 0.01 的高斯噪声攻击和噪声密度为 0.05 的椒盐噪声攻击后,暗调低复杂度图像的效果较差,NC 均值为 0.87,但仍能提取出清晰的水印。在 JPEG 压缩攻击后,暗调低复杂度类型图像在 a 通道的嵌入效果较其他通道差,而亮调低复杂度图像在 a 和 b 通道嵌入的鲁棒性比 L 通道的弱。然而,所有图像的 NC 值都达到了 0.90 以上,表现出良好的鲁棒性。

在 CMYK 颜色空间中,各类型图像在任意通道下展现出较强的对抗攻击能力。饱和色、风景、亮调、人物和中性灰类型的图像在受到几何攻击后提取的水印信息质量最佳,NC 值可达 0.934。在受到方差为 0.01 的高斯噪声攻击和噪声密度为 0.05 的椒盐噪声攻击时,各类型图像在前 3 个通道嵌入水印时表现出良好性能,NC 值超过 0.85。除了暗调类型图像,在受到 JPEG 压缩等攻击时,其他类型图像在 K 通道中嵌入水印时鲁棒性浮动较大。虽然可以提取出水印信息,但是水印质量并不理想。

3.2.3 抗打印扫描鲁棒性性能分析

对所有颜色空间的图像进行打印扫描实验并进行鲁棒性分析,实验情况如图 9 所示。

在打印扫描实验中,随着不同颜色空间下的图像复杂度的提高,能够明显提高水印的提取质量,暗调图像抗打印攻击能力差。根据图 9a 实验结果可知,在 RGB 颜色空间中,除了暗调图像外,其他类型的图像在水印提取时表现良好,NC 均值为 0.88。图 9b 实验结果显示,Lab 颜色空间的提取 NC 均值为 0.87,除了暗调低复杂度图像外,均超过了 0.85,说明提取效果良好。图 9c 实验结果表明,与其他测试不同,在进行打印实验中,在 CMYK 颜色空间的 K 通道嵌入水印可以提取出更优质的水印,因此在 CMYK 颜色空间打印实验时可优先考虑 K 通道。

3 个颜色空间的打印过程中,Lab 颜色空间的抗打印扫描性能优秀且稳定优于其余 2 个颜色空间,L 通道面对打印扫描攻击具有更好的鲁棒性。

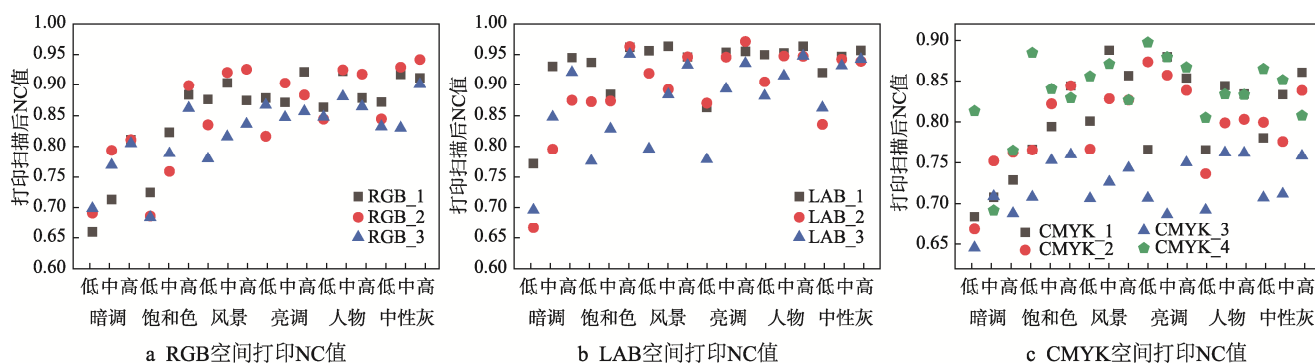


图 9 打印实验提取水印 NC 值
Fig.9 NC value of watermark extracted in printing test

4 结语

本文通过在不同颜色空间中的实验得出以下结论:在 RGB 颜色空间中,所有类型图像均展现出优秀的水印性能,特别是 B 通道的图像嵌入后噪声较小,具有优秀的透明性。在面对几何、非几何攻击时,亮调图像在受到噪声攻击时的抵抗攻击能力要弱于其他类型的图像。在 CIELAB 颜色空间中,b 通道各

种类型的图像在嵌入水印后透明性良好且稳定,与原图更接近、更具有透明性。暗调、亮调和饱和色类型的低复杂度图像,在此颜色空间的 b 通道中受到各种攻击的情况下的抗攻击能力弱于更高复杂度的图像。在 CMYK 颜色空间中,所有类型图像都有出色的水印性能,M 通道较其他通道透明性更优,在进行几何、非几何攻击下 K 通道嵌入的鲁棒性较弱,但在此空间中进行打印实验时,K 通道嵌入的图像具有良好的抗打印扫描攻击性能。相比 CMYK 颜色空

间, CIELAB 和 RGB 颜色空间对打印过程具有更好的鲁棒性。在进行风景、饱和色和亮调类型图像实验时, 优先考虑 RGB 和 CIELAB 颜色空间; 而在进行暗调、人物和中性灰类型图像实验时, 优先考虑 RGB 和 CMYK 颜色空间的前 3 个通道。

参考文献:

- [1] RAY A, ROY S. Recent Trends in Image Watermarking Techniques for Copyright Protection: a Survey[J]. International Journal of Multimedia Information Retrieval, 2020, 9(4): 249-270.
- [2] CHEN Lan-xiang, BAI Wu-tong, YAO Zhi-qiang. A Secure and Privacy-Preserving Watermark Based Medical Image Sharing Method[J]. Chinese Journal of Electronics, 2020, 29(5): 819-825.
- [3] 王彩印, 孔祥维, 李超. 面向保真印刷的 CMYK 图像鲁棒水印方法[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(3): 529-536.
WANG Cai-yin, KONG Xiang-wei, LI Chao. Robust Watermarking Applying to CMYK Printed Image for Fidelity Printing[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(3): 529-536.
- [4] 马聰珑, 张雯, 王柳. 加网参数与水印抗印刷攻击性能研究[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 269-274.
MA Cong-long, ZHANG Wen, WANG Liu. Screening Frequency and Watermarking Performance Against Printing Attack[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 269-274.
- [5] 魏代海, 王晓红, 刘玄玄. 一种强鲁棒性的彩色图像数字水印技术[J]. 包装工程, 2016, 37(9): 124-128.
WEI Dai-hai, WANG Xiao-hong, LIU Xuan-xuan. A Color Image Digital Watermarking with Strong Robustness[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(9): 124-128.
- [6] 包新月, 俞磊. 计算机数字图像处理常用颜色空间及转换[J]. 电子技术与软件工程, 2021, 201(7): 122-123.
BAO Xin-yue, YU Lei. Computer Digital Image Processing Commonly Color Space and Conversion[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2021, 201(7): 122-123.
- [7] 张菁, 杨应平, 章金敏. 基于颜色空间转换的颜色复原方法研究[J]. 包装工程, 2015, 36(13): 130-134.
ZHANG Jing, YANG Ying-ping, ZHANG Jin-min. Colour Recovery Method Based on Color Space Transformation[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(13): 130-134.
- [8] NAZARI M, MEHRABIAN M. A Novel Chaotic IWT-LSB Blind Watermarking Approach with Flexible Capacity for Secure Transmission of Authenticated Medical Images[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(7): 10615-10655.
- [9] CHOPRA A, GUPTA S, DHALL S. Analysis of Frequency Domain Watermarking Techniques in Presence of Geometric and Simple Attacks[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(1/2): 501-554.
- [10] 孙圣和, 陆哲明. 数字水印处理技术[J]. 电子学报, 2000, 28(8): 85-90.
SUN Sheng-he, LU Zhe-ming. Digital Watermarking Techniques[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(8): 85-90.
- [11] 王彩印. 面向保真印刷的彩色图像鲁棒水印方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
WANG Cai-yin. Research on Robust Watermarking Method of Color Image for Fidelity Printing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [12] 常亮, 王玲. 一种颜色分量选取方案在彩色图像数字水印中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(3): 255-257.
CHANG Jing, WANG Ling. The Application of a Colour Component Selection Scheme in colour-Image Digital Watermarking[J]. Computer Applications and Software, 2009, 26(3): 255-257.
- [13] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [14] HSIEH M S, TSENG D C, HUANG Y H. Hiding Digital Watermarks Using Multiresolution Wavelet Transform[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2001, 48(5): 875-882.
- [15] 陈青, 伍东升. 基于 SIFT 变换和 DWT-SVD 的自适应图像水印算法[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 254-259.
CHEN Qing, WU Dong-sheng. Adaptive Image Watermarking Algorithm Based on SIFT Transform and DWT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 254-259.
- [16] 刘迅廷. GATF 数字测试版的构成及功能[J]. 印刷质量与标准化, 2011, 163(12): 36-42.
LIU Xun-ting. Composition and Functions of GATF Digital Prototype Testing[J]. Printing Quality and Standardization, 2011, 163(12): 36-42.
- [17] 余英, 乔月, 王彩印, 等. 基于色度学系统和热转印技术的纺织品图像数字水印技术[J]. 数字印刷, 2022(1): 44-52.
YU Ying, QIAO Yue, WANG Cai-yin, et al. Digital Watermarking of Textile Image Based on Colorimetric System and Thermal Transfer Printing Technology[J]. Digital Printing, 2022(1): 44-52.
- [18] ALSHAIKH M, ALZAQEBAH M, JAWARNEH S. Robust Watermarking Based on MODIFIED PIGEON ALGORITHM in DCT Domain[J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, 82(2): 3033-3053.