



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院空天信息创新研究院
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2021
05
VOL.26

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



参与介质渲染 P961



第26卷第5期 (总第301期)

2021年5月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿, 均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版, 所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用, 所有内容, 未经许可, 不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院空天信息创新研究院

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 吴一戎

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑部

通信地址 北京市海淀区北四环西路19号

邮 编 100190

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-58887035

网 址 www.cjig.cn

广告发布登记号 京朝工商广登字20170218号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Aerospace Information Research Institute, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief Wu Yirong

Editor, Publisher Editorial Office of Journal of
Image and Graphics

Address No. 19, North 4th Ring Road West, Haidian District,
Beijing, P. R. China

Zip code 100190

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-58887035

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 60.00元



均匀参与介质的渲染方法研究(第0961页)



循环生成对抗网络的线稿图像自动提取(第1117页)



伪点云修正增强激光雷达数据(第1157页)

学者观点

均匀参与介质的渲染方法研究

王贝贝, 樊家辉 0961

布料仿真建模研究进展

靳雁霞, 张晋瑞, 贾瑶, 马博 0970

综述

中国图像工程:2020

章毓晋 0978

图像处理和编码

双阶段信息蒸馏的轻量级图像超分辨率网络

李明鸿, 常侃, 李恒鑫, 谭宇飞, 覃团发 0991

具有纹理感知能力的超像素分割方法

吴江, 刘春晓 1006

图像分析和识别

深度聚类注意力机制下的显著对象检测

陈庆文, 谢宏文, 查浩, 奚瑜, 张雪 1017

特征增强策略驱动的车标识别

贺敏雪, 余烨, 程茹秋 1030

医学图像处理

融合上下文和注意力的视盘视杯分割

刘洪普, 赵一浩, 侯向丹, 郭鸿湧, 丁梦园 1041

遥感图像处理

复杂背景下SAR近岸舰船检测

阮晨, 郭浩, 安居白 1058

对抗型长短期记忆网络的雷达回波外推算法

方巍, 庞林, 张飞鸿, 盛胜利 1067

混沌系统和DNA编码的并行遥感图像加密算法

周辉, 谢红薇, 张昊, 张慧婷 1081

激光雷达大会2020

图匹配算法激光扫描点云树干分割

徐姗姗 1095

多特征融合与残差优化的点云语义分割方法

杜静, 蔡国榕 1105

NCIG 2020

循环生成对抗网络的线稿图像自动提取

王素琴, 张加其, 石敏, 赵银君 1117

面向COVID-19疫情预测的图卷积神经网络时空数据学习

杨成意, 刘峰, 齐佳音, 段妍, 吕润倩, 肖子龙 1128

结合汉明码和图像矫正的彩色图像盲水印

刘得成, 苏庆堂, 袁子涵, 张雪婷 1138

密文域高嵌入率图像全方位可逆数据隐藏

周旭, 吴福虎, 陈志立, 任帅 1147

伪点云修正增强激光雷达数据

宋绪杰, 戴孙浩, 林春雨, 詹书涛, 赵耀 1157

前沿进展

中国遥感软件研制进展与发展方向——以像素专家PIE为例

刘东升, 廖通逵, 孙焕英, 任芳 1169

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Survey of rendering methods for homogeneous participating media(P0961)



Image extraction of cartoon line art based on cycle-consistent adversarial networks(P1117)



LiDAR data enhancement via pseudo-LiDAR point cloud correction(P1157)

Scholar View

Survey of rendering methods for homogeneous participating media

Wang Beibei, Fan Jiahui 0961

Progress of cloth simulation modeling

Jin Yanxia, Zhang Jinrui, Jia Yao, Ma Bo 0970

Review

Image engineering in China: 2020

Zhang Yujin 0978

Image Processing and Coding

Lightweight image super-resolution network via two-stage information distillation

Li Minghong, Chang Kan, Li Hengxin, Tan Yufei, Qin Tuanfa 0991

Superpixel segmentation with texture awareness

Wu Jiang, Liu Chunxiao 1006

Image Analysis and Recognition

Salient object detection based on deep clustering attention mechanism

Chen Qingwen, Xie Hongwen, Zha Hao, Xi Yu, Zhang Xue 1017

Vehicle logo recognition method based on feature enhancement

He Minxue, Yu Ye, Cheng Ruqiu 1030

Medical Image Processing

Optic disc and cup segmentation by combining context and attention

Liu Hongpu, Zhao Yihao, Hou Xiangdan, Guo Hongyong, Ding Mengyuan 1041

Remote Sensing Image Processing

SAR inshore ship detection algorithm in complex background

Ruan Chen, Guo Hao, An Jubai 1058

Radar echo extrapolation algorithm based on adversarial long short-term memory network

Fang Wei, Pang Lin, Zhang Feihong, Sheng Victor S 1067

Parallel remote sensing image encryption algorithm based on chaotic map and DNA encoding

Zhou Hui, Xie Hongwei, Zhang Hao, Zhang Huiting 1081

China LiDAR Conference 2020

Tree stem segmentation of laser scanning point clouds based on graph matching algorithm

Xu Shanshan 1095

Point cloud semantic segmentation method based on multi-feature fusion and residual optimization

Du Jing, Cai Guorong 1105

NCIG 2020

Image extraction of cartoon line art based on cycle-consistent adversarial networks

Wang Suqin, Zhang Jiaqi, Shi Min, Zhao Yinjun 1117

Spatiotemporal data learning of graph convolutional neural network for epidemic prediction of COVID-19

Yang Chengyi, Liu Feng, Qi Jiayin, Duan Yan, Lyu Runqian, Xiao Zilong 1128

Blind color image watermarking method combining Hamming code with image correction

Liu Decheng, Su Qingtang, Yuan Zihan, Zhang Xueting 1138

All bit planes reversible data hiding for images with high-embedding-rate in ciphertext field

Zhou Xu, Wu Fuhu, Chen Zhili, Ren Shuai 1147

LiDAR data enhancement via pseudo-LiDAR point cloud correction

Song Xujie, Dai Sunhao, Lin Chunyu, Zhan Shutao, Zhao Yao 1157

Frontier

Research progress and development direction of Chinese remote sensing software: taking PIE as an example

Liu Dongsheng, Liao Tongkui, Sun Huanying, Ren Fang 1169

中图法分类号: TP309.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2021)05-1138-09

论文引用格式: Liu D C, Su Q T, Yuan Z H and Zhang X T. 2021. Blind color image watermarking method combining Hamming code with image correction. Journal of Image and Graphics, 26(05): 1138-1146 (刘得成, 苏庆堂, 袁子涵, 张雪婷. 2021. 结合汉明码和图像矫正的彩色图像盲水印. 中国图象图形学报, 26(05): 1138-1146) [DOI: 10.11834/jig.200384]

结合汉明码和图像矫正的彩色图像盲水印

刘得成, 苏庆堂*, 袁子涵, 张雪婷

鲁东大学信息与电气工程学院, 烟台 264025

摘要: 目的 随着互联网技术的飞速发展, 彩色数字图像带来极大便利的同时, 也产生了一些篡改、剽窃等侵权行为; 同时, 几何处理对含水印载体的破坏使水印盲检测的难度增加, 因此, 本文提出一种基于汉明码和图像矫正的彩色图像盲水印方法, 旨在解决当前图像版权保护的难点问题。方法 嵌入水印时, 使用仿射变换加密彩色水印, 并将已加密的信息编为汉明码, 然后利用特征值分解计算出像素块的全部特征值, 并通过对特征值绝对值的和进行量化来完成水印的嵌入; 提取水印时, 利用图像的几何属性对多种几何攻击后的图像进行判断、矫正, 并借助量化技术提取水印。结果 基于彩色图像标准数据库, 将本文方法与 7 种相关方法进行了对比实验: 在不可见性方面, 与 LU 分解的水印方法相比, 本文算法峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 提高了 4 dB; 在常规攻击鲁棒性方面, 与 Schur 分解的最新方法相比, 本文算法平均归一化互相关 (normalized cross-correlation, NC) 的值稍有提高; 在几何攻击鲁棒性方面, 本文算法 NC 值具有一定的优势; 同时, 本文算法的水印容量达到了 0.25 bit/像素, 密钥空间达到了 2^{432} , 运行时间仅需 3 s 左右。结论 所提方法不仅具有较好的水印不可见性和较强的鲁棒性, 而且具有较大的水印容量、较高的安全性和实时性。

关键词: 彩色图像; 数字水印; 汉明码; 图像矫正; 特征值分解; 仿射变换

Blind color image watermarking method combining Hamming code with image correction

Liu Decheng, Su Qingtang*, Yuan Zihan, Zhang Xueting

School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: **Objective** With the rapid development of internet technology, color digital image, the carrier of large amounts of information, not only brings great convenience to people, but also brings some infringements such as tampering and plagiarism. Thus, digital watermarking technology was proposed in the last century. Digital watermarking technology can effectively protect copyrights. However, at present, most of the studies on copyright protection of color digital images use non-blind watermarking methods, while blind watermarking methods mainly focus on binary watermarking techniques and gray-scale watermarking ones, which are difficult to meet the needs of copyright protection of color digital images. In addition, in terms of the robustness of color digital image copyright protection methods, most methods can only resist traditional image

收稿日期: 2020-07-24; 修回日期: 2020-08-07; 预印本日期: 2020-08-14

* 通信作者: 苏庆堂 sdysqt@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61771231, 61772253, 61872170, 61873117); 山东省自然科学基金重点项目 (ZR2020KF023)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61771231, 61772253, 61872170, 61873117); Key Project of Shandong Natural Science Foundation (ZR2020KF023)

attacks, while the resistance to geometric attacks is very weak; that is, most algorithms cannot extract the watermark, or the effect of the extracted watermark is poor after some geometric attacks. At the same time, image geometric processing destroys the color watermarked carrier image, which complicates the blind detection of the color digital watermark image. Thus, a blind color image digital watermarking algorithm with a large watermark capacity, high concealment security, and strong robustness needs to be designed. This study proposes a blind color image watermarking method based on Hamming code and image correction, which can effectively solve the above-mentioned problems. **Method** This algorithm uses the eigenvalue decomposition to obtain all eigenvalues of the pixel block of the host image and quantizes the sum of the absolute values of the eigenvalues to complete the hiding and blind detection of color watermark information. To improve the robustness of the algorithm, the attacks on watermarked images are judged by analyzing the geometric information of the image before extracting the watermark, so as to obtain the attack type of the color watermarked image and correct and restore them accordingly. In detail, when embedding the color watermark, affine transform based on private keys is used to encrypt the color watermark information in order to improve the security of the watermarking algorithm. Each encrypted watermark pixel is converted into an 8-bit binary information bit, and then it is encoded into more robust Hamming codes with the help of Hamming coding theory. Then, eigenvalue decomposition is used to calculate all the eigenvalues of the pixel block in the color carrier image, and the sum of the absolute value of all eigenvalues is quantified to embed the color watermark information. When extracting the color watermark information, the geometric attributes of the color watermarked image are used to judge and correct the watermarked image after various geometric attacks. In the process of judgment, the vertexes of the effective image inside the attacked color watermarked image are first obtained, and then the side and corner information of the effective image is calculated. According to the side and corner information of the effective image, the attack type of the attacked color watermarked image can be obtained. In the process of correction, the parameters of image transformation can be obtained according to the side and corner information of the effective image. Finally, the attacked color watermarked image can be corrected according to the parameters of image transformation and the attack type of the attacked color watermarked image. The extraction process of watermark is the inverse process of watermark embedding process. All the eigenvalues of the pixel block in the color corrected watermarked image are calculated, and the color watermark information is extracted by the proposed quantitative technique. In the recovery process, the extracted watermark information is reconstructed after the processing of the inverse affine transform based on private keys and inverse Hamming coding. **Result** To accurately and effectively compare the performance of the algorithm, the experiments are compared with seven different methods based on the color standard image database. The simulation results show that the proposed algorithm has better performance in visual imperceptibility, robustness, algorithm security, efficiency, and embedding capacity than other methods. In detail, in terms of invisibility, the peak signal-to-noise ratio (PSNR) is 4 dB higher compared with the watermarking method using LU decomposition. In terms of the conventional robustness, the average normalized cross-correlation (NC) is slightly improved compared with the latest Schur decomposition method. In terms of geometric robustness, such as scaling, rotation, and shearing, the NC has certain advantages. At the same time, the extracted watermarks have good visual effect. In the aspect of watermark capacity, the watermark capacity is greatly improved (up to 0.25 bpp) compared with other anti-geometric attack methods. In terms of security, the watermarking algorithm has strong security; the key space of the proposed method reaches 2^{432} . In terms of algorithm efficiency, the running time is greatly improved, which only takes about 3, compared with some watermarking methods that resist geometric attacks. **Conclusion** Therefore, the experimental data show that the proposed method not only has better watermark invisibility and stronger robustness, but also has larger watermark capacity, higher security, and better real-time performance, which is suitable for the copyright protection of high-security large-capacity color digital images. Future work will focus on the reduction of time complexity of this watermarking algorithm and consider how to apply it in the copyright protection of color digital image in cloud storage.

Key words: color image; digital watermarking; Hamming code; image correction; eigenvalue decomposition; affine transform

0 引言

随着互联网技术的飞速发展,作为信息载体的视频、音频和图像逐渐走进人们的生活,对数字图像的歪曲、篡改和剽窃等侵权行为也随之而来,数字图像的版权保护问题(陈怡等,2019;袁源等,2019),尤其是彩色数字图像的版权保护问题(李蓉和李向阳,2017)引起广泛关注。

彩色图像因其信息量大、可视美观的特点受到青睐,数字水印标识也逐渐应用在彩色图像的版权保护上(Su等,2018,2020),而不同于二值和灰度图像(Singh和Bhatnagar,2018)。当前彩色数字水印技术中对鲁棒性的研究多集中在常规图像攻击上,而对几何攻击的研究较少,所以很多水印方法抗几何攻击的能力较弱。例如,Su等人(2018)提出了一种基于LU分解的彩色盲水印方法,该方法具有抵抗常规攻击的能力,但是无法抵抗旋转、平移等几何攻击。另外,当前抗几何攻击的水印方法多为二值水印方法(Tian等,2013;Ni等,2006;Guo等,2015;Li等,2008;Roy等,2018),该类方法虽然抗几何攻击的能力较强,但是其水印容量较小,无法满足当前彩色数字图像版权保护的实际需要。例如,Tian等人(2013)提出了一种基于局部daisy特征变换(local daisy feature transform, LDFT)的二值水印方法,该方法具有的峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)均大于40 dB并且能够抵抗较弱参数的旋转、剪切和缩放攻击,但是其嵌入的水印信息为二值序列,水印容量较小,实际应用的局限性较大。

基于上述讨论,为了保护彩色图像的版权,本文充分利用汉明码的纠错特性和特征值分解的特征提取特性,提出了一种基于汉明码和图像矫正的彩色图像盲水印方法。汉明码是一种既简单快捷又具有纠错能力的编码方法,广泛应用于计算机内存和通信领域。汉明码利用奇偶校验位的概念,通过在有效数据位后增加校验位,不仅可以验证数据是否有效,而且还能在单一错码的情况下指明出错位置并更正(蒋策等,2016);仿射变换是由一个非奇异线性变换和一个平移变换组成,可用于加密水印图像或对含水印图像进行扭曲攻击(Chen等,2013;Wang等,2018);特征值分解的本质是把方阵分解为一个缩放矩阵和一个特征向量矩阵,该变换没有

旋转或旋转角度为 0° ,其中,缩放矩阵为对角阵,对角线上的值即为矩阵的特征值,且由大到小排列(Hall等,2002),由于本文方法选择的像素块具有随机性,因此,对不满足条件的像素块进行了近似逆变换(广义逆矩阵代替逆矩阵)。该方法不仅能利用图像的几何属性矫正图像,而且能够鲁棒、安全地盲提取出彩色水印图像,可应用于大数据安全和云存储等场合。

1 水印方法

本文方法将广泛应用的汉明码理论和特征值分解理论迁移到彩色数字水印技术中;同时,使用基于私钥的仿射变换加密水印信息,有效提高了彩色水印方法的安全性。水印方法主要包含彩色水印嵌入和彩色水印提取两部分。

1.1 彩色水印嵌入

1.1.1 预处理

1)若彩色宿主图像的尺寸与方法要求不同时,则将其大小调整为 $M \times M \times 3$ 的3维彩色宿主图像 H ,然后将其进行降维处理,得到红、绿、蓝3个2维的分层宿主图像 H_p ,并将各层中的像素划分成大小为 $m \times m$ 的非重叠像素块。

2)若彩色水印图像的尺寸与方法要求不同时,则将其大小调整为 $N \times N \times 3$ 的3维彩色水印图像 W 并进行降维处理,得到红、绿、蓝3个2维的分层水印图像,随之对每层水印图像进行基于私钥 K_p 的仿射变换,得到加密后的分层水印图像 W_p ;然后,将各分层图像 W_p 中的每个十进制像素值转换为一个8位的二进制序列,并依次拼接为水印序列 w_p^b ;最后,将水印序列 w_p^b 的每4位编为7位的汉明纠错码,并依次拼接为水印纠错码序列 w_p^h 。

1.1.2 嵌入水印

1)在上述预处理过程之后,利用选块矩阵 S_E 从分层宿主图像 H_p 中选择大小为 $m \times m$ 的像素块 E_B ,其中,矩阵 S_E 由基于秘钥的伪随机函数 $randperm(\cdot)$ 生成, H_p 中的 $p=1, 2, 3$ 分别表示红、绿、蓝三层。

2)利用式(1)将 E_B 分解为酉矩阵 U 和对角矩阵 G ,其中, G 中的主对角元素 $G(i, i)$ 即为像素块 E_B 的第 i 个特征值, $i=1, 2, \dots, m, m$ 为宿主图像像

素块的大小

$$[U, G] = \text{eig}(E_B) \quad (1)$$

式中, $\text{eig}(\cdot)$ 为特征值分解函数。

3) 利用式(2)得到特征值绝对值的和

$$se = \sum_{i=1}^m \text{abs}(G(i, i)) \quad (2)$$

式中, $\text{abs}(\cdot)$ 为取绝对值函数

4) 依次从纠错码序列 w_p^h 中选取一位信息 w , 利用基于可变步长 T_p 的量化技术确定最佳边界值 Q , 并利用式(3)将特征值绝对值的和 se 进行修改, 得到修改后的特征值绝对值的和

$$se^* = se - \text{mod}(se, T_p) + Q \quad (3)$$

式中, $\text{mod}(\cdot)$ 为取余函数, T_p 为第 p 层的量化步长, $Q \in \{\alpha \times T_p, (1 + \alpha) \times T_p, (-\alpha) \times T_p, (1 - \alpha) \times T_p\}$, α 为量化系数。

5) 利用式(4)和(5)将增量 Δ_i 分配到对应的特征值上, 即

$$\Delta_i = \frac{(se^* - se) \times \text{abs}(G(i, i))}{se} \quad (4)$$

$$G^*(i, i) = [\text{abs}(G(i, i)) + \Delta_i] \times \text{sign}(G(i, i)) \quad (5)$$

式中 $\text{sign}(\cdot)$ 为取符号函数。

6) 利用式(6)对酉矩阵 U 和修改后的对角矩阵 G^* 进行逆特征值分解, 得到含水印的像素块 E_B^* , U^+ 为 U 的广义逆矩阵, 即

$$E_B^* = U \times G^* \times U^+ \quad (6)$$

7) 重复执行步骤1)~6), 直到信息嵌入完成为止, 此时就得到了含水印的分层宿主图像 H_p^* , 最后重组含水印的分层宿主图像 H_p^* , 得到含水印的彩色宿主图像 H^* 。

1.2 彩色水印提取

1) 首先获取图像有效边及其夹角等几何属性, 然后判断图像受攻击的类型并计算攻击时的参数, 最后根据参数进行相应的逆变换得到矫正图像。针对矫正后获得的大小为 $M \times M \times 3$ 的含水印宿主图像 I_C^* , 执行1.1.1节预处理过程中的步骤1), 得到分层的含水印宿主图像 $I_{C_p}^*$ 及其 $m \times m$ 的非重叠像素块, $p=1, 2, 3$ 分别表示红、绿、蓝3层, m 为像素块的大小。

2) 利用选块矩阵 S_E 从分层宿主图像 $I_{C_p}^*$ 中选择含水印像素块 E_B^* , 其中, 矩阵 S_E 由基于密钥的伪随机函数 $\text{randperm}(\cdot)$ 生成。

3) 利用式(7)将像素块 E_B^* 分解为酉矩阵 U^*

和对角矩阵 G^*

$$[U^*, G^*] = \text{eig}(E_B^*) \quad (7)$$

式中, 对角矩阵 G^* 中的元素 $G^*(i, i)$ 为像素块 E_B^* 的第 i 个特征值, $i=1, 2, \dots, m$ 。

4) 利用式(8)对含水印像素块的所有特征值进行计算, 得到特征值绝对值的和 se^*

$$se^* = \sum_{i=1}^m \text{abs}(G^*(i, i)) \quad (8)$$

5) 利用式(9)提取水印 w^* , 式中, $\text{mod}(\cdot)$ 为取余函数, T_p 为第 p 层的量化步长

$$w^* = \begin{cases} 0 & \text{mod}(se^*, T_p) > 0.5 \times T_p \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

6) 重复执行步骤2)~5), 直到水印信息均被提取为止, 此时, 所得的水印信息即为含水印的汉明纠错码序列 w_{hp}^* 。

7) 针对含水印的汉明纠错码序列 w_{hp}^* , 执行1.1.1节预处理过程中步骤2)的逆处理, 得到最终的提取水印 W^* 。

2 实验结果分析与比较

2.1 度量指标及数据集

2.1.1 度量指标

PSNR 用于度量含水印图像 (H^*) 和原始图像 (H) 的差异度 (Su, 2016), 定义为 (Liu 等, 2020)

$$PSNR_p = 10 \lg \left(\frac{M \times M \times 255^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |H^*(i, j) - H(i, j)|^2} \right) \quad (10)$$

归一化互相关 (normalized cross-correlation, NC) 常用于衡量提取水印的质量 (肖振久 等, 2017), 设原始水印图像 W 与提取水印图像 W^* 的大小均为 $N \times N$, 定义为 (肖振久 等, 2019)

$$NC = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N W(x, y) \times W^*(x, y)}{\sqrt{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N W(x, y)^2 \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N W^*(x, y)^2}} \quad (11)$$

2.1.2 数据集

为了评价本文算法的性能, 实验中选用了如图1所示的8幅大小为 $512 \times 512 \times 3$ 的彩色宿主图

像,这些图像均来自于标准数据库和相关论文(Uni-
versity of Granada 和 Computer Vision Group, 2020)。
除此之外,图 2 中 4 幅大小为 $32 \times 32 \times 3$ 的证明版
权的彩色图像被用作水印图像。本实验的运行环境
为 Windows 8.1 $\times$ 64 bit, Intel Core CPU @ 2.1GHz,
8 GB RAM, MATLAB 9.2.0.538062 (R2017a)。本
文方法中实验参数设置如下:彩色宿主图像的长度
(宽度) M 设置为 512,彩色水印图像的长度(宽度)
 N 设置为 32,仿射变换整数私钥 K_1 、 K_2 、 K_3 分别
设置为 6、7、8,分块大小 m 设置为 2,红、绿、蓝 3 层
的量化步长分别设置为 31.2、37.6 和 40;红、绿、蓝
3 个颜色通道的选块矩阵分别由 4 个整数密钥确
定,分别为(1, 120, 2, 120)、(3, 120, 4, 120)和
(5, 120, 6, 120)。



图 1 彩色宿主图像

Fig. 1 Color carrier image ((a) Lena; (b) Avion;
(c) Peppers; (d) TTU; (e) Baboon;
(f) Barbara; (g) Sailboat; (h) Aerial)



图 2 彩色水印图像

Fig. 2 Color watermark image ((a) watermark1;
(b) watermark2; (c) watermark3; (d) watermark4)

2.2 不可见性分析

水印不可见性对水印方法的性能有较大的影响,
如果含水印图像中的水印可见程度较大,那么图像
的质量很差,其应用价值也会降低。因此,水印的不
可见程度必须低于人眼视觉系统能够感知差异性的
最低限度,PSNR 大于 35 dB 且小于 48 dB 时代表含水印
图像的质量很好(Moosazadeh 和 Ekbatanifard, 2017)。

为了说明水印的不可见性,对数据集上的图像进
行了大量实验,部分实验数据如表 1 所示,所提方法

PSNR 均大于 40 dB,结果表明本文方法的含水印宿主
图像具有很好的质量,人眼无法感知水印的存在。

为了进一步呈现本文方法的不可见程度,在所
选数据集上进行了对比实验,其结果如表 2 所示,表
中的数据是在保证水印完全提取($NC = 1$)时得到
的。从表 2 中的数据可以得出,本文方法的 PSNR
均大于 40 dB,说明含水印图像的质量较高。另外,
本文方法的 PSNR 均值优于对比方法(Su 等, 2018,
2020),因此具有较好的不可见性,满足水印不可见
性的要求。

表 1 水印不可见性测试结果

Table 1 The test results of watermark invisibility

宿主图像	PSNR/dB			
	水印 1	水印 2	水印 3	水印 4
Lena	40.435 0	40.580 3	40.511 5	40.550 6
Avion	40.446 9	40.439 9	40.445 1	40.410 0
Peppers	40.652 7	40.565 5	40.581 1	40.577 1
TTU	40.449 0	40.466 3	40.418 1	40.482 5
Baboon	40.574 7	40.594 7	40.601 2	40.587 6
Barbara	40.461 3	40.444 0	40.417 8	40.429 7
Sailboat	40.413 0	40.411 6	40.416 3	40.431 0
Aerial	40.575 2	40.605 2	40.580 2	40.575 2

注:加粗字体表示最优结果。

表 2 不同方法的不可见性比较结果

Table 2 The comparison results of invisibility
between different methods

宿主图像	PSNR/dB		
	Su 等人(2018)	Su 等人(2020)	本文
Lena	35.803 1	40.474 7	40.435 0
Avion	38.316 0	38.597 0	40.446 9
Peppers	35.986 9	41.428 6	40.652 7
TTU	37.325 5	40.972 9	40.449 0
平均值	36.857 1	40.368 3	40.495 9

注:加粗字体表示最优结果。

2.3 鲁棒性分析

实验将图 1 (a) 作为彩色宿主图像,图 2 (a)
(b) 作为彩色水印图像,两种较先进的水印方法(Su
等, 2018, 2020) 作为对比方法。

2.3.1 常规攻击结果分析

常规攻击经常在图像的正常处理、存储和传输

的过程中降低图像的质量。因此,优秀的水印方法应具有抵抗这类攻击的能力。图3和图4给出了与对比方法比较结果,从图中可以得出,所提方法在抵抗 JPEG 压缩攻击(90)、椒盐噪声攻击(2%)和中值滤波攻击(3×3)时,NC 较大且优于对比方法(Su 等,2018,2020),提取水印的视觉质量较好,表明本文方法抗常规攻击的鲁棒性较强。

2.3.2 几何攻击结果分析

几何攻击是黑客或恶意攻击者损坏图像的一种手段,版权图像被几何攻击后,质量下降,其价值也会大大降低,会给版权所有者带来极大的损失。当前数字水印技术中对鲁棒性的研究主要集中在常规攻击上,而在几何攻击上的研究较少,很多水印方法抵抗几何攻击的能力较弱。图5给出了本文方法在多种几何攻击下的视觉效果图及其 NC,从提取的水印图像可以看出,本文方法的已矫正图像的 PSNR 在 30 dB 左右,其中,旋转攻击(5° 、 86°)的 PSNR 达到了

40 dB 以上,并且从旋转攻击图像中提取的水印也具有较大的 NC,说明本文方法抵抗旋转攻击的能力较强。但是本文方法的缺点是对图像进行缩小攻击时的鲁棒性较弱,主要原因是含水印图像受缩小攻击时将使原有数据丢失,而矫正过程又无法较好恢复信息。

图6中的数据表明(其中,⋯表示对应文献未给出 NC 值),本文方法在放大、旋转和剪切攻击后提取水印的视觉效果和 NC 均优于对比方法(Su 等,2018,2020)。NC 较大的原因是本文方法在矫正过程中采用了大量的优化处理(例如,判断攻击类型的优化、获取被攻击图像几何属性的优化、矫正图像时去除无效数据的优化等)。因此,本文方法抗几何攻击的鲁棒性较强。

2.4 安全性分析

基于私钥 K_p 的仿射变换常用于加密彩色水印图像,其中, $K_p = \{K_1, K_2, K_3\}$,各子密钥的密钥空间为 2^{84} ,因此 K_p 的密钥空间为 2^{252} ;另外,在选择

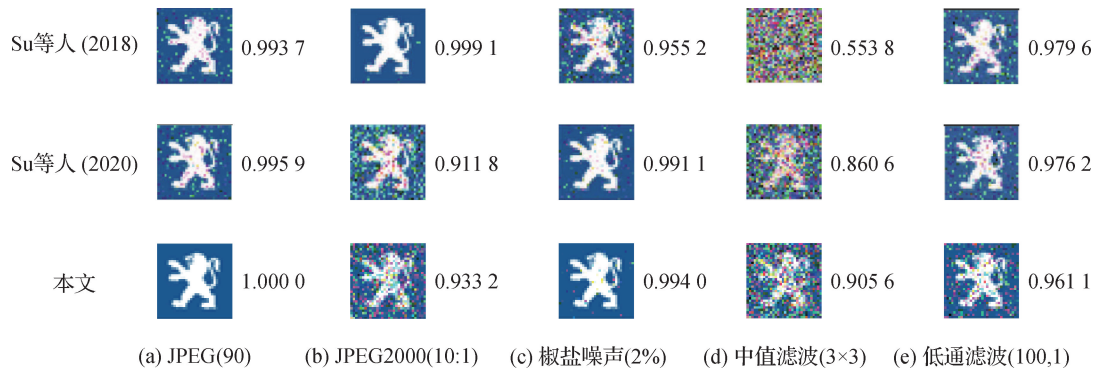


图3 不同方法在常规攻击下的提取水印 Watermark1 及其 NC

Fig.3 The extracted watermark Watermark1 and NC from different methods under common attacks ((a) JPEG (90); (b) JPEG2000 (10 : 1); (c) salt & pepper noise (2%); (d) median filtering(3×3); (e) low pass filtering (100, 1))

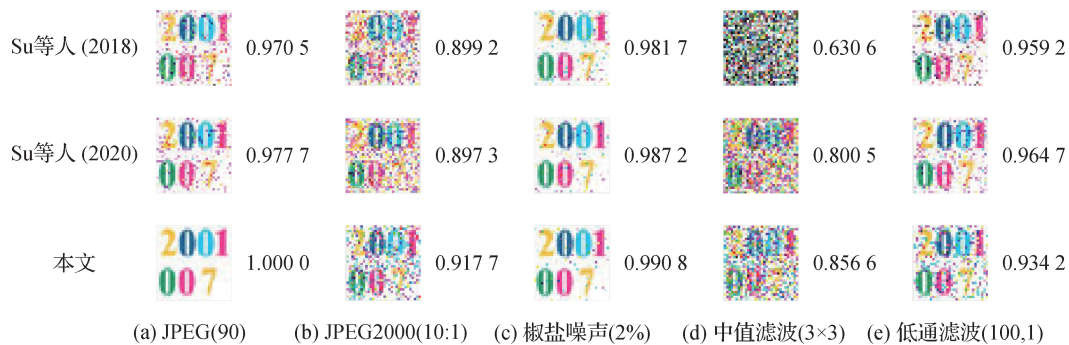


图4 不同方法在常规攻击下的提取水印 Watermark2 及其 NC

Fig.4 The extracted watermark Watermark2 and NC from different methods under common attacks ((a) JPEG (90); (b) JPEG2000 (10 : 1); (c) salt & pepper noise (2%); (d) median filtering(3×3); (e) low pass filtering (100, 1))

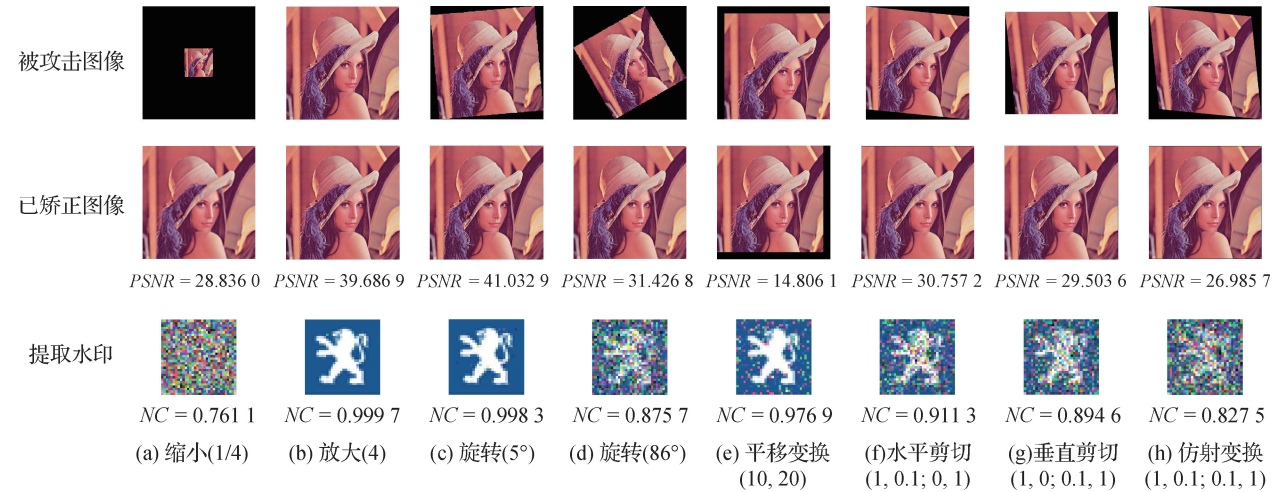


图5 多种几何攻击下的图像矫正结果

Fig. 5 The results of image correction and NC under various geometric attacks ((a) scaling (1/4); (b) scaling (4); (c) rotation (5°); (d) rotation (86°); (e) translation transformation (10, 20); (f) horizontal shearing (1, 0.1; 0, 1); (g) vertical shearing (1, 0; 0.1, 1); (h) affine transform (1, 0.1; 0.1, 1))

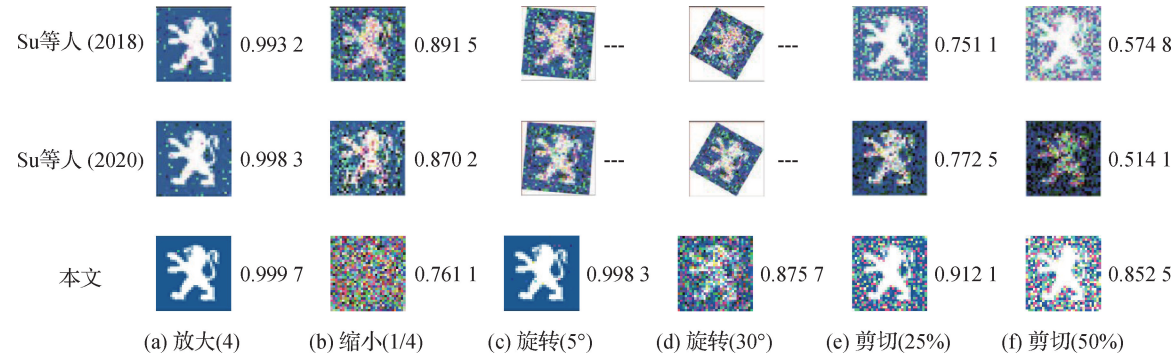


图6 不同方法在几何攻击下的实验结果及其 NC

Fig. 6 The experimental results and NC of different methods under geometric attacks ((a) scaling (4); (b) scaling (1/4); (c) rotation (5°); (d) rotation (30°); (e) cropping (25%); (f) cropping (50%))

像素块时,3 个颜色通道的选块矩阵分别由 4 个整数(2^{15})确定,因此选块矩阵的密钥空间为 2^{180} 。只有在两种密钥同时已知的情况下,水印图像才能正确提取,所以本文方法的密钥空间为 2^{432} ,大密钥空间保证了水印信息的安全性。

2.5 水印容量分析

水印容量是水印算法的重要性能之一,为此将本文方法与彩色水印方法(Su 等,2018,2020)以及二值水印方法(Tian 等,2013;Ni 等,2006;Guo 等,2015;Li 等,2008;Roy 等,2018)进行了水印容量比较。如表 3 所示,本文实际嵌入水印容量和最大嵌

入水印容量均高于其他方法,说明本文方法具有较大的水印容量。

2.6 运行时间分析

实验中方法的运行时间是多次实验的平均值,从表 4 中可以看出,与抗几何攻击的二值水印方法(Ni 等,2006;Guo 等,2015;Li 等,2008;Roy 等,2018)相比,该方法不仅运行时间短、效率高,而且具有抗剪切攻击、旋转攻击和缩放攻击的能力;与抗常规攻击、无矫正功能的彩色数字水印方法(Su 等,2018,2020)相比,虽然该方法运行时间较长,但是具有较强的抗几何攻击能力。

表3 不同方法的水印容量

Table 3 The watermark capacities of different methods

方法	最大嵌入 水印位/bit	真实嵌入 水印位/bit	宿主图像/像素	真实嵌入水印容量/ (bit/像素)	最大嵌入水印容量/ (bit/像素)
Su 等人(2018)	49 152	24 576	$3 \times 512 \times 512$	0.031 250	0.062 500
Su 等人(2020)	49 152	24 576	$3 \times 512 \times 512$	0.031 250	0.062 500
Tian 等人(2013)	128	32	512×512	0.000 122	0.000 488
Ni 等人(2006)	60	60	512×512	0.000 229	0.000 229
Guo 等人(2015)	4 096	4 096	512×512	0.015 625	0.015 625
Li 等人(2008)	96	32	512×512	0.000 122	0.000 366
Roy 等人(2018)	50 370	4 096	512×512	0.015 625	0.192 146
本文	196 608	43 008	$3 \times 512 \times 512$	0.054 688	0.250 000

注:加粗字体表示最优结果。

表4 不同方法的运行时间比较

Table 4 The comparison of running time between different methods

方法	剪切 (比例)	旋转 (角度)	缩放 (比例)	运行时间/s
Su 等人(2018)	是	否	是	1.08
Su 等人(2020)	是	否	是	2.04
Ni 等人(2006)	是	是	否	270.21
Guo 等人(2015)	是	是	是	720.00
Li 等人(2008)	否	是	是 (0.5 ~ 1.25)	63.01
Roy 等人(2018)	是	是	是 (>0.5)	67.01
本文	是 (0.125)	是 (4°)	是 (0.75)	3.15

注:加粗字体表示最优结果。

3 结 论

为了保护彩色数字图像的版权,提高数字水印技术的应用性,提出一种基于汉明码和图像矫正的彩色图像盲水印方法,借助仿射变换加密彩色水印,并利用汉明码理论将加密的水印信息编码;同时,可通过特征值分解获取像素块的全部特征值,然后借助量化技术将水印信息嵌入其中;另外,本文方法不仅能根据被攻击图像的几何属性矫正图像,还能盲提取彩色图像数字水印。实验结果表明,与基于常规攻击的水印方法相比,本文方法的水印不可见性和水印容量均有较大提高;与基于几何攻击的水印方法相比,本文方法不仅具有较强的抗几何攻击能力,而且具有较高的运行效率;同时,本文方法在安全性、水印容量以及实时性等方面均取得了较好性能。显著不足是无法较好地矫正缩小攻击的图像,

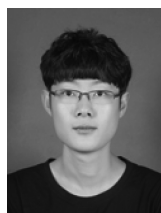
主要原因是不能较好地恢复缩小攻击过程中丢失的像素数据。本文方法参数均为大量实验所得,受图像数据集的影响较大。因此,后续研究会尝试自适应选择算法参数,从而为水印方法的实际应用创造条件。

参考文献 (References)

- Chen H, Du X P, Liu Z J and Yang C W. 2013. Color image encryption based on the affine transform and gyrator transform. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(6): 768-775 [DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.01.016]
- Chen Y, Li Z, Zhang J and Wang G M. 2019. Robust watermarking algorithm for diffusion weighted images. *Journal of Image and Graphics*, 24(9): 1434-1449 (陈怡, 李智, 张健, 王国美. 2019. 弥散加权图像的鲁棒水印算法研究. *中国图象图形学报*, 24(9): 1434-1449) [DOI: 10.11834/jig.180672]
- Guo J T, Zheng P J and Huang J W. 2015. Secure watermarking scheme against watermark attacks in the encrypted domain. *Journal of Visual*

- Communication and Image Representation, 30: 125-135 [DOI: 10.1016/j.jvcir.2015.03.009]
- Hall P, Marshall D and Martin R. 2002. Adding and subtracting eigenspaces with eigenvalue decomposition and singular value decomposition. *Image and Vision Computing*, 20(13/14): 1009-1016 [DOI: 10.1016/S0262-8856(02)00114-2]
- Jiang C, Peng J, Xiang L Y and Li F. 2016. Research on text reversible digital watermarking based on Hamming code. *Computer Engineering and Applications*, 52(11): 84-87, 118 (蒋策, 彭建, 向凌云, 李峰. 2016. 基于汉明码的文本可逆数字水印研究. *计算机工程与应用*, 52(11): 84-87, 118) [DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.1407-0116]
- Li J, Wang J, Ma W, Chen H and Peng J. 2008. Geometric attack resistant face watermarking using Zernike moments//*Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Communication Technology*. Hangzhou, China: IEEE: 753-756 [DOI: 10.1109/ICCT.2008.4716236]
- Li R and Li X Y. 2017. Pixel value ordering reversible data hiding algorithm based on image block selection. *Journal of Image and Graphics*, 22(12): 1664-1676 (李蓉, 李向阳. 2017. 图像分区选择的像素值排序可逆数据隐藏. *中国图象图形学报*, 22(12): 1664-1676) [DOI: 10.11834/jig.170101]
- Liu D C, Yuan Z H and Su Q T. 2020. A blind color image watermarking scheme with variable steps based on Schur decomposition. *Multimedia Tools and Applications*, 79(11-12): 7491-7513 [DOI: 10.1007/s11042-019-08423-1]
- Moosazadeh M and Ekbatanifard G. 2017. An improved robust image watermarking method using DCT and YCoCg-R color space. *Optik*, 140: 975-988 [DOI: 10.1016/j.ijleo.2017.05.011]
- Ni J Q, Zhang R Y, Huang J W, Wang C T and Li Q B. 2006. A rotation-invariant secure image watermarking algorithm incorporating steerable pyramid transform//*Proceedings of the 5th International Conference on Digital Watermarking*. Berlin, Germany: Springer: 446-460 [DOI: 10.1007/11922841_36]
- Roy R, Ahmed T and Changder S. 2018. Watermarking through image geometry change tracking. *Visual Informatics*, 2(2): 125-135 [DOI: 10.1016/j.visinf.2018.03.001]
- Singh S P and Bhatnagar G. 2018. A new robust watermarking system in integer DCT domain. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 53: 86-101 [DOI: 10.1016/j.jvcir.2018.03.006]
- Su Q T. 2016. Novel blind colour image watermarking technique using Hessenberg decomposition. *IET Image Processing*, 10(11): 817-829 [DOI: 10.1049/iet-ipr.2016.0048]
- Su Q T, Wang G, Zhang X F, Lyu G H and Chen B J. 2018. A new algorithm of blind color image watermarking based on LU decomposition. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 29(3): 1055-1074 [DOI: 10.1007/s11045-017-0487-7]
- Su Q T, Zhang X F and Wang G. 2020. An improved watermarking algorithm for color image using Schur decomposition. *Soft Computing*, 24(1): 445-460 [DOI: 10.1007/s00500-019-03924-5]
- Tian H W, Zhao Y, Ni R R, Qin L M and Li X L. 2013. LDFT-based watermarking resilient to local desynchronization attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 43(6): 2190-2201 [DOI: 10.1109/TCYB.2013.2245415]
- University of Granada, Computer Vision Group. 2020. CVG-UGR Image Database [DB/OL]. [2020-07-14]. <http://decsai.ugr.es/cvg/dbimagenes/c512.php>
- Wang H, Hu Y K, Yu L J and Sun W J. 2018. The research of blind watermarking based on zigzag and affine transformation//*Proceedings of the 37th Chinese Control Conference*. Wuhan, China: IEEE: 9250-9254 [DOI: 10.23919/ChiCC.2018.8484184]
- Xiao Z J, Jiang D, Zhang H, Tang X L and Chen H. 2019. Adaptive zero-watermarking algorithm based on boost normed singular value decomposition. *Journal of Image and Graphics*, 24(1): 1-12 (肖振久, 姜东, 张晗, 唐晓亮, 陈虹. 2019. 增强奇异值分解的自适应零水印. *中国图象图形学报*, 24(1): 1-12) [DOI: 10.11834/jig.180443]
- Xiao Z J, Zhang H, Chen H and Gao T. 2017. Zero-watermarking based on boost normed singular value decomposition and cellular neural network. *Journal of Image and Graphics*, 22(3): 288-296 (肖振久, 张晗, 陈虹, 高婷. 2017. 增强奇异值分解和细胞神经网络的零水印. *中国图象图形学报*, 22(3): 288-296) [DOI: 10.11834/jig.20170302]
- Yuan Y, He H J and Chen F. 2019. Reduction of the redundancy of adjacent bit planes for reversible data hiding in encrypted images. *Journal of Image and Graphics*, 24(1): 13-22 (袁源, 和红杰, 陈帆. 2019. 减少相邻位平面冗余度的加密图像可逆信息隐藏. *中国图象图形学报*, 24(1): 13-22) [DOI: 10.11834/jig.180305]

作者简介



刘得成, 1994年生, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为多媒体信号处理。
E-mail: imliudecheng@163.com



苏庆堂, 通信作者, 男, 教授, 主要研究方向为信息隐藏、信息安全和数字水印技术及其应用。
E-mail: sdytsqt@163.com

袁子涵, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理和信息安全。E-mail: imyuanzihan@163.com

张雪婷, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理和信息安全。E-mail: imzhangxueting@163.com