

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2013 2
Vol.18 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013 年 2 月 第 18 卷 第 2 期(总第 202 期)

目次

计算机视觉前沿论坛

- 计算机视觉——探索行为理解,认知内心世界 徐光祐,刘允才,章毓晋(131)
- 跨学科前沿与应用的交汇点:日常活动理解 徐光祐,陶霖密,邸慧军(132)
- 时空行为理解 章毓晋(141)
- 视觉机制研究对机器视觉的启发示例 李雄,刘允才(152)
- 视点无关的行为识别综述 冯家更,肖俊(157)

图像处理和编码

- 基于演化算法的卷曲 DCT 图像压缩 李康顺,韦蕴珊,张文生(169)
- 基于欧氏距离图的图像边缘检测 张闯,王婷婷,孙冬娇,葛益娴,常建华(176)
- 基于暗原色先验模型的快速去雾算法 张冰冰,戴声奎,孙万源(184)

图像分析和识别

- Gabor 特征集结合判别式字典学习的稀疏表示图像识别 胡正平,徐波,白洋(189)
- 半监督 k 近邻分类方法 陈日新,朱明早(195)
- 最小距离鉴别投影及其在人脸识别中的应用 黄璞,唐振民(201)
- 图像 LSB 匹配隐藏的预分类检测模型 曹卫权,韩杰思,王宏霞(207)
- 具有旋转鲁棒性的纹理谱描述子 陈刚,陈晓云(214)

计算机图形学

- 利用形体特征的铅笔素描画生成 莫晓斐,丁友东(219)

医学图像处理

- 统计相似度特征的医学图像分割 郭艳蓉,蒋建国,郝世杰,詹曙,李鸿(225)

遥感图像处理

- 结合遗传算法和蚁群算法的高光谱图像波段选择 王立国,魏芳洁(235)
- 相似度自适应样本块的高分辨 SAR 图像阴影修复 赵昊,张弓(243)

- 第八届国际数字地球会议征稿通知 封 3

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 2 February 2013

Contents

Forum: Forefront of Computer Vision

Confluence of interdisciplinary frontiers and real-world application: understanding activities of daily living

..... Xu Guangyou, Tao Linmi, Di Huijun(132)

Understanding spatial-temporal behaviors Zhang Yujin(141)

The motivation of visual mechanisms to machine vision: examples Li Xiong, Liu Yuncai(152)

View-invariant action recognition: a survey Feng Jiageng, Xiao jun(157)

Image Processing and Coding

Warped DCT image compression based on an evolutionary algorithm Li Kangshun, Wei Yunshan, Zhang Wensheng(169)

Image edge detection based on the Euclidean distance graph

..... Zhang Chuang, Wang Tingting, Sun Dongjiao, Ge Yixian, Chang Jianhua(176)

Fast image haze-removal algorithm based on the prior dark-channel

..... Zhang Bingbing, Dai Shengkui, Sun Wanyuan(184)

Image Analysis and Recognition

Sparse representation for image recognition based on Gabor feature set and discriminative dictionary learning

..... Hu Zhengping, Xu Bo, Bai Yang(189)

Semi-supervised k -nearest neighbor classification method Chen Rixing, Zhu Minghan(195)

Minimum-distance discriminant projection and its application to face recognition Huang Pu, Tang Zhenmin(201)

Using pre-classification to attack LSB matching Cao Wei-quan, Han Jiesi, Wang Hongxia(207)

Robust rotation-invariant texture spectrum descriptor Chen Gang, Chen Xiaoyun(214)

Computer Graphics

Pencil sketch generation with shape features Mo Xiaofei, Ding Youdong(219)

Medical Image Processing

Medical image segmentation based on statistical similarity feature

..... Guo Yanrong, Jiang Jianguo, Hao Shijie, Zhan Shu, Li Hong(225)

Remote Sensing Image Processing

Band selection for hyperspectral imagery based on combination of genetic algorithm and ant colony algorithm

..... Wang Liguang, Wei Fangjie(235)

Adaptive shadow inpainting from high-resolution SAR image based on exemplar's similarity Zhao Hao, Zhang Gong(243)

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)02-207-07

论文引用格式: 曹卫权, 韩杰思, 王宏霞. 图像 LSB 匹配隐藏的预分类检测模型[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(2): 207-213.

图像 LSB 匹配隐藏的预分类检测模型

曹卫权¹, 韩杰思¹, 王宏霞²

1. 西南电子电信技术研究所, 成都 610041; 2. 西南交通大学, 成都 610031

摘要: 当前针对图像 LSB 匹配隐藏的各种检测方法跨数据集测试性能不佳, 其检测效果对于 JPEG 压缩的和未压缩的图像往往差别很大。对两类图像的颜色空间分布进行了分析, 利用量化的 DCT 交流系数的最高有效位重压缩后不再服从广义 Benford 定律的现象, 查明图像的压缩历史, 进而根据图像的通道数以及是否被压缩分别采取不同算法或相同算法的不同参数集合进行检测。实验结果表明, 基于该检测模型能够有效提升算法的跨数据集检测能力, 增强隐藏检测算法的实用性。

关键词: 信息隐藏; 隐写分析; LSB 匹配; 预分类; Benford 定律

Using pre-classification to attack LSB matching

Cao Wei-quan¹, Han Jie-si¹, Wang Hong-xia²

1. Institute of Southwest Electron. & Telecom. Techniques, Chengdu 610041, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: Most steganalysis methods for image LSB matching suffer from a drop in the performance when applied to different image databases, especially for JPEG-compressed and uncompressed covers, which is also the main restriction to prevent steganalysis from practical usage. In this paper, we specify, the JPEG compression of a bitmap by taking advantage of the quantized DCT alternating coefficients, which no longer obey the Benford's law very well. Then variations of steganalysis methods and parameter sets are exploited according to the number of channels and whether the image has been compressed before. The algorithms' performances get a great boost by the proposed working mode.

Key words: Information hiding; Steganalysis; LSB matching; Pre-classification; Benford's Law

0 引言

对于图像空域隐藏, 常见的方法有 LSB 替换和 LSB 匹配。前者用待嵌入的信息比特流替换图像像素的 LSB (least significant bit), 由于它对图像的改动非常小, 且隐藏容量大, 因而早期被认为是一种优秀的信息隐藏方法。但后期的研究表明, 由于 LSB 替换隐藏在替换方式上存在奇偶不对称性, 特别容易被一些基于统计的方法攻击。RS 算法、SPA 算法、

WS 算法、TAP 算法等均能有效检测低嵌入率的 LSB 替换隐藏, 并对嵌入率做出有效估计。

Ker 于 2004 年正式提出 LSB 匹配算法, 该方法用选择性地对图像像素执行 ± 1 操作代替了用信息比特流直接替换图像的 LSB, 即

$$p_s = \begin{cases} p_c + 1 & b \neq \text{LSB}(p_c) \text{ 且 } (\kappa > 0 \text{ 或 } p_c = 0) \\ p_c - 1 & b \neq \text{LSB}(p_c) \text{ 且 } (\kappa < 0 \text{ 或 } p_c = 255) \\ p_c & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2012-05-08; 修回日期: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61170226); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWJTU11CX047)

第一作者简介: 曹卫权(1989—), 男, 现为西南电子电信技术研究所硕士研究生, 主要研究方向为图像信息隐藏。

E-mail: caoweiquan 322@126.com

式中, p_c 表示载体图像的一个像素, p_s 表示载密图像的对应像素, κ 表示一个正负等概的独立同分布序列。尽管 LSB 匹配与 LSB 替换在实现方法上仅存在很小的差异, 但由于该隐藏方式消除了奇偶不对称性, 导致其检测难度大大增加, 针对 LSB 替换的绝大多数算法均对 LSB 匹配隐藏完全无效。

文献 [1] 利用图像直方图特征函数 (HCF), 在嵌入信息后向 0 收缩的特性实现了对 LSB 匹配的检测, Ker 指出文献 [1] 的方法对彩色图像更为有效, 对于灰度图尤其是未压缩的灰度图的检测性能较差, 据此提出一种标定方法, 并引入 2 阶直方图的方法^[2], 检测性能有所提高。Zhang 等人提出利用图像灰度直方图的局部极值点在隐写后变得平滑的特征作为检测依据^[3], 并强调该方法对于具有高频噪声的载体效果较其他方法好。文献 [4] 利用图像像素差分直方图偏离指数分布模型的程度这一维特征作为检测依据, 算法原理明确, 适用于检测压缩图像的 LSB 匹配隐藏。Westfeld 指出彩色图像的邻居颜色个数的分布是信息隐藏前后的敏感特征, 能够有效检测低嵌入率的 LSB 匹配隐藏^[5]。Ker 发现利用邻居颜色个数的最大值作为特征, 能够有效检测嵌入率低至 1% 的 LSB 匹配隐藏。文献 [6] 用 Markov 模型描述灰度图像的差分直方图在空域的转移概率, 以 Markov 矩阵作为特征向量, 利用支持向量机^[7] (SVM) 进行分类, 对于未压缩过的灰度图像达到了目前最好的检测效果。

不同算法均有不同的适用范围: Westfeld 的方法仅适用于压缩过的彩色图像; 文献 [1, 4] 的方法对于未压缩的灰度图像性能也不佳; SPAM 方法对于未压缩的图像检测性能较好, 但对于压缩过的图像在低嵌入率下相对于其他算法并无优势。另一方面, 上述各种算法跨数据集检测时性能都有明显的下降, 以至于难以实用, 若在检测前先对待测图像进行分类, 针对压缩图像和未压缩图像利用不同的算法进行检测则可以达到好的检测效果。

充分利用不同算法的适用条件, 通过预分类使不同的算法工作在其性能最佳的条件下充分发挥其优势, 使整体的检测性能得到明显提升。事实上该思想广泛适用于科学研究与工程实践的各个领域。

1 基于预分类模型的隐藏信息检测

1.1 压缩图像与未压缩图像

定义未压缩图像是指从互补氧化物半导体 (CMOS)、电荷耦合元件 (CCD) 等感光设备得到的原始数据直接存储的图像, 而压缩图像是原始数据经过 JPEG 压缩后又解压得到的图像。在本文中均保存为 BMP、PNG 等无损格式。这两类图像的统计特性存在根本的区别, 如果能够将其分别处理将使检测性能得到很大提升。

用 RGB 分别表示像素点的红色、绿色和蓝色分量, Westfeld 在文献 [5] 中定义当且仅当两个像素 (r_1, g_1, b_1) 和 (r_2, g_2, b_2) 满足 $|r_1 - r_2| \leq 1$ & $|g_1 - g_2| \leq 1$ & $|b_1 - b_2| \leq 1$ 时, 则称这两个像素互为邻居颜色。按照这种定义, 每个像素点的邻居颜色个数最多为 26 个。

Westfeld 指出压缩图像的颜色值在 RGB 空间的分布非常稀疏, 各颜色值的邻居颜色个数的均值一般为 4 或 5, 而经过 LSB 匹配隐藏后该均值可达到 9。Ker 指出利用邻居颜色个数的最大值能够有效检测嵌入率低至 1% 的 LSB 匹配隐藏。Westfeld 认为这种颜色稀疏性主要是由于 JPEG 压缩过程中的 DCT 变换、量化压缩所引起^[5], 事实上这个结论有失严谨。下文的推导说明上述颜色空间的稀疏性完全是由 JPEG 压缩过程中引入的颜色空间转换所致, 与 DCT 变换及 DCT 系数的量化操作无关。JPEG 压缩过程中最常用的颜色空间转换方法为 RGB $\leftrightarrow$ YUV 转换, 其转换过程为

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.1687 & 0.3313 & 0.5 \\ 0.5 & -0.4187 & -0.0813 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} + b \quad (2)$$

逆转换过程为

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1.402 \\ 1 & -0.344 & -0.714 \\ 1 & 1.772 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ U - 128 \\ V - 128 \end{pmatrix} \quad (3)$$

定义颜色空间的体积为所有可能的颜色点的凸包在对应的颜色空间的体积大小, 则 RGB 全颜色空间体积为 $256 \times 256 \times 256 = 1.6 \times 10^7$ 。对应 YUV 转换后全颜色空间体积为

$$V_{YUV} = \det(A) V_{RGB} = 0.236 V_{RGB} \quad (4)$$

进行 YUV 逆转换之后,颜色空间的体积应当保持为 V_{RGB} ,然而考虑到数据在 YUV 空间的存储为离散值,因而逆转换后 RGB 空间可能出现的颜色值的个数不可能超过 V_{YUV} 。经过颜色空间转换的 RGB 颜色空间就会呈现稀疏特性。

JPEG 压缩过程中的 DCT 变换和量化过程引入的误差只会影响到颜色空间的边界附近,对这部分进行简单处理即可完全消除其影响。引入一幅全颜色图像,此图像大小为 4096×4096 ,包含全部的 256^3 个 RGB 颜色值。将这幅图像的每一个像素值按照式(2)转换到 YUV 空间,然后按照式(3)转换回 RGB 空间。通过查看转换后图像在 RGB 颜色空间的邻居颜色个数,可验证彩色压缩图像最大邻居颜色个数为 9。任何其他图像颜色值个数不会超过 256^3 ,因此其最大邻居颜色个数不超过 9。

基于颜色空间进行分析,仅仅改动图像的一个像素,便有超过 $1 - \frac{9}{26} \approx 65\%$ 的概率被成功检测。对于一幅 400×400 的图像,嵌入率为 0.01% 则有约 8 个像素被修改,因而漏检率约为 $0.35^8 \approx 0.02\%$,可见算法的漏检率极低,若仅用于彩色压缩图像,将是一种极其灵敏、鲁棒的方法。

若是图像为采集卡直接输出的未压缩图像,则上述稀疏性便不存在。另外,若对图像进行重采样,邻域插值操作引入的舍入误差也会破坏这种稀疏性,从而也不能采用颜色空间分析进行检测。同时,若图像为灰度图,则自然无法采用颜色空间进行分析。

目前针对灰度图像和未压缩彩色图像,可以采用 HCF、WAM、ALE、SPAM 等方法进行检测,但它们针对彩色压缩图像的检测灵敏度不够高。同时,文献[6]指出,这些方法在多个数据集上进行联合检测时,性能会明显下降。据此,提出了预分类模型用于改善这一状况。

1.2 预分类模型

由分析可知,图像的压缩历史是影响图像统计特性的重要因素,对压缩与未压缩图像分别处理可以期望提升检测算法的检测率,同时显著降低检测算法的虚警。

为了解决当前检测算法存在的适用范围有限的问题,充分发挥算法的优势,引入图 1 所示的模型。采用这种模型,尽可能保证后端算法工作在其最适用的条件下,最大程度上发挥它的优势,从而提高整

体检测性能。

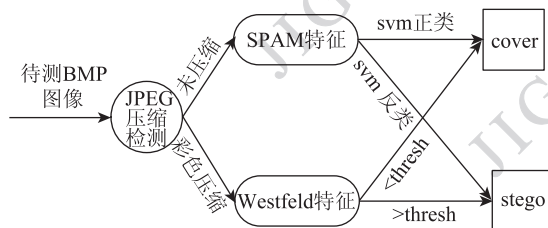


图1 预分类检测模型示意图

Fig. 1 Pre-classification model

模型前端通过检测位图图像是否经过 JPEG 压缩进行预分类,模型后端把经过分类的图像分别送达不同的检测器或相同检测器的不同参数集进行检测。具体来讲,预分类模块提取待检测图像的 Benford 特征^[8],并分类判断图像是否经过压缩;后端检测模块对彩色压缩图像利用 Westfeld 的方法进行检测,对于灰度压缩以及未压缩图像均采用 SPAM 算法^[6]提取高维特征,并用 SVM 进行分类。

采用上述模型得到图像的鉴定结果分别具有不同的可信度:若一幅图像的检测结果是由 Westfeld 特征给出,则其可信性非常高,主要的错误率是由前端的 JPEG 压缩检测引入;若一幅图像的检测结果是由 SPAM 特征给出,则其可信性相对较低,相对而言前端的 JPEG 压缩检测引入的错误率亦可以忽略。

1.3 模型训练

引入的预分类模型有两组参数需要训练:JPEG 压缩检测的分类参数与利用 SPAM 特征进行隐藏检测的分类参数。

JPEG 压缩检测部分也提取了多维算法,并同样采用 SVM 进行分类。需要指出的是,本文的 JPEG 压缩检测特征维数仅为 9,相比于 SPAM 特征高达 600 的维数显得微不足道,其训练时间也几乎可以忽略。

与文献[6]对多个数据集采集特征并进行联合训练不同,仅对未压缩图像提取 SPAM 特征。由于支持向量机的训练时间复杂度大致与样本个数的平方成正比,因而本文算法的训练速度大约比原始的 SPAM 算法快 4 倍。第 3 节的实验表明,本文算法不仅训练复杂度小,同时性能超出 SPAM 算法。

2 算法实现

2.1 检测方法组合

Westfeld 在颜色空间进行分析的算法针对低嵌

入率下的 LSB 匹配隐藏的检测能力是其他方法所不具备的,但其缺点是只适用于压缩彩色图像,在 UCID 图库上的测试结果如图 2 所示。尽管 West-

feld 算法适用范围有限,但其针对压缩图像的检测效果是无与伦比的,在本文方案中选择使用该方法对压缩彩色图像进行检测。

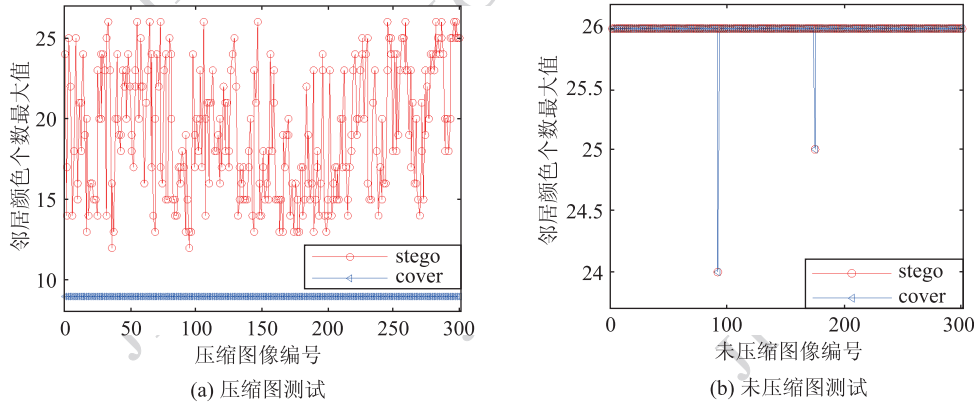


图 2 以两种类型的载体隐藏,使用 Westfeld 算法的检测结果,嵌入率 0.01 bit/pixel

Fig. 2 Use Westeld's algorithm to detect two sets of cover types, embedding ratio is 0.01 bit/pixel

文献 [6] 提出 SPAM 算法,对大量灰度未压缩图像进行了实验,取得了很好的效果。Pevny 也指出该方法可容易地移植到彩色图像检测中,但针对压缩图像,该方法却未涉及。针对 SPAM 算法的特点,本文方案中选择它来对未压缩图像进行检测。

2.2 预分类特征选择

文献[8-10]介绍了 3 种 JPEG 压缩检测算法,3 种算法分别基于 Benford 定律、图像 DCT 系数的分布(Fridrich^[9])、JPEG 压缩产生的分块效应(Fan^[10])对图像是否经过 JPEG 压缩做出检测。为了选取最为合适的前端预分类算法,对这 3 种算法的检测性能做了简单测试。其中 Benford, Fridrich 分别提取了 9 维和 144 维的特征,因此采用软边界的 SVM 进行训练分类,核函数为高斯核 $k(x, y) = e^{-\gamma \|x - y\|^2}$,训练、测试集各占实验用图像的 50%; Fan 仅提取了一个特征量 K ,采用最大后验概率的方法进行分类。实验在图库 UCID 上进行,该图库包含 1 338 幅未压缩图像,在隐藏信息检测领域被广泛使用。对 UCID 图库分别采用不同质量因子进行 JPEG 压缩,

然后分别用上述 3 种算法进行检测, JPEG 压缩检测的正确率如表 1 所示。

另外一个重要的问题是图像压缩检测算法应当对 LSB 匹配等空域隐写操作不敏感,表 2 描述了这一情形下各算法对 JPEG 压缩的分辨能力。表 2 使用的测试图像分为 4 类:压缩和未压缩图像,以及这两类图像的 LSB 匹配满嵌图像。LSB 满嵌的压缩图像仍应检测为压缩图像,未压缩图像亦然。

表 1 3 种 JPEG 压缩检测算法的预分类正确率对比

Table 1 Three algorithms' performance to detect JPEG compression

检测方法	/%			
	$Q = 70$	$Q = 80$	$Q = 90$	$Q = 99$
Benford ^[8]	100	99.78	99.85	99.85
Fridrich ^[9]	100	100	99.63	58.67
Fan ^[10]	99.95	99.90	99.55	90.67

表 2 嵌入信息后 3 种算法的预分类正确率对比

Table 2 Three algorithms' performance with embedding operation considered

检测方法	/%				
	$Q = 70$	$Q = 80$	$Q = 90$	$Q = 99$	70-99 联合
Benford ^[8]	100	99.78	100	96.19	97.89
Fridrich ^[9]	100	100	99.70	62.03	84.87
Fan ^[10]	99.72	99.31	97.23	52.09	79.96

对比表2中3种算法在压缩质量因子较小时均有可靠的检测性能,但文献[8]的算法对质量因子最为鲁棒,即使质量因子很大(>95)时仍能够有效检测,而后两种算法在质量因子变大时性能有所下降。另外,文献[8]的算法只采用了9维特征,在3种算法中居中,综合算法的鲁棒性和效率,最终选取基于 Benford 定律的文献[8]算法用于系统前端预分类。

Benford 定律是数论中的一个重要经验定律,也被称为首位定律,用于描述自然产生的数字的最高十进制位的统计特性。文献[8]采用推广后的 Benford 定律(式(5))描述未压缩图像经过单次 JPEG 压缩后的分块 DCT 交流系数。

$$p(x) = N \lg \left(1 + \frac{1}{s + x^q} \right), x = 1, 2, \dots, 9 \quad (5)$$

式中, $p(x)$ 表示 DCT 系数中最高位为 x 的概率, N 为归一化参数, s 和 q 为形状校正因子。

相比于之前的 Laplace 分布、广义高斯分布等模型,Benford 定律对 DCT 交流系数的描述更加粗糙,但对图像内容也更不敏感。文献[8]指出上述 DCT 系数经过二次 JPEG 压缩后,不再服从 Benford 定律。因而可以对待测图像进行 JPEG 压缩后检测重压缩来确定其是否已经进行过一次 JPEG 压缩。

文献[8]计算待检测图像压缩后的 DCT 系数的首位分布直方图,将其归一化构成9维特征,采用 SVM 进行分类。事实上,也可以计算该直方图对式(2)的拟合误差,以此作为单维特征进行分类,也可以有较好的分类效果,如图3所示。考虑到文献[8]给出的特征仅为9维,无论是训练还是分类都很高效,因此本文方案采用 SVM 进行预分类。

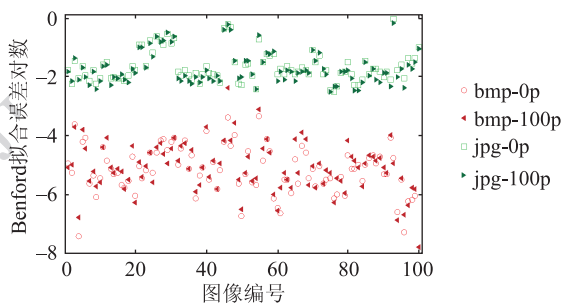


图3 压缩和未压缩图像的 Benford 拟合误差对比

Fig. 3 The Benford's fitting error on compressed & uncompressed cover types

图3中,“bmp-0p”表示未压缩样本;“bmp-100p”表示未压缩样本经过满嵌入操作;“jpg-0p”表

示压缩样本;“jpg-100p”表示压缩样本经过满嵌入操作。

3 实验结果与分析

实验使用的图像数据库如下:

NRCS_{ori}即 NRCS 原始图库,由2254幅未压缩过的扫描图像组成,其分辨率为 2100×1500 ;

NRCS_{jpg3}由 NRCS_{ori}经过质量因子为80的 JPEG 压缩生成;

NRCS_{jpg1}由 NRCS_{jpg3}中取出一个通道生成的灰度图像;

UCID 由1338幅未压缩过的图像组成,分辨率为 512×384 ;

PRCG 为利用3维软件生成的101个虚拟场景,为JPG格式;

GT 即 GroundTruth 图像库,由963幅JPG图像构成,分辨率为 756×504 。

上述各图库除 PRCG 外均为图像隐藏信息检测研究者广泛使用的测试图库,实验测试的规模为 $(2254 \times 3 + 1338 + 101 + 963) \times 6 = 54984$,且实验在不同分辨率、图像内容、图像类型的数据库上进行,这既能够有效说明算法的鲁棒性,又能在一定程度上反映算法跨数据集工作时的性能。

文献[6]指出 SPAM 算法的性能超出之前的 WAM、ALE 等算法,因此将本检测模型的检测结果与 SPAM 算法的结果进行比较,分别考察嵌入率为1%、5%、25%时多数据库联合检测的情形,如表3所示。表3列出了 SPAM 算法与本文算法在上述几种数据集上联合训练后进行检测的正确率,“增益”一栏表示本文算法的正确率相比于 SPAM 算法的提升。

实验结果表明,本文提出的检测模型对于未压缩图像能够保持 SPAM 算法的性能,对于彩色压缩图像在低嵌入率下相比于 SPAM 算法有极大的性能提升(4%~49%)。

在 LSB 匹配隐藏的不同嵌入率下,对比了基于预分类模型在上述联合数据集上的 ROC 曲线与基于 SPAM 算法的 ROC 曲线,如图4所示。由于两种算法均采用 SVM 进行分类,因此 ROC 曲线通过平移 SVM 的分类面得到。考虑到 Westfield 算法对于未压缩图像完全失效,同时该算法对于彩色压缩图像则应当采用恒定的阈值,因而并未考察其 ROC 曲线。

表 3 本文算法与 SPAM 算法的多数据库联合检测^[6]性能对比
Table 3 Performance of SPAM and our algorithm with JOINT^[6] test

嵌入率/%	方法	NRCS _{ori}	NRCS _{jpg3}	NRCS _{jpg1}	UCID	PRCG	GT
1	SPAM	46.18	70.32	70.32	39.39	57.84	53.01
	本文算法	46.14	100	70.32	39.54	88.24	92.72
	增益	-0.04	+29.68	0	+0.15	+31.60	+49.71
5	SPAM	61.40	93.97	93.97	50.67	86.27	73.80
	本文算法	61.36	100	93.97	50.52	100	98.13
	增益	-0.04	+6.03	0	-0.15	+13.73	+24.37
25	SPAM	84.47	99.07	99.07	71.30	96.08	94.39
	本文算法	84.21	100	99.07	71.08	100	98.23
	增益	-0.26	+0.93	0	-0.22	+3.92	+3.84

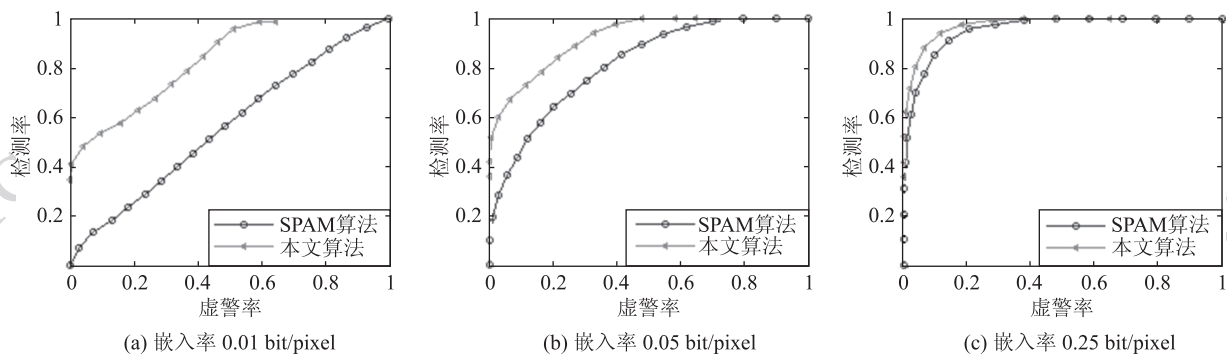


图 4 不同嵌入率下 SPAM 算法与本文算法的 ROC 曲线比较(联合检测^[6])

Fig. 4 The ROC curve of SPAM and our algorithm under different embedding ratios (with JOINT^[6] test)

由以上曲线可以看出,本文算法在多数据集联合检测 LSB 匹配时性能比 SPAM 算法好。尤其在嵌入率较低的 (< 0.05 bit/pixel) 情况下,SPAM 算法基本失效,而本文算法还保持不错的分辨能力。

预分类模块的性能对本检测模型的整体检测效果有重要的影响。分析发现,算法检测 NRCS_{ori} 和 UCID 等图库时出现的性能下降的情况主要是由于部分原始未压缩图像交由 Westfeld 算法处理引起的。这是因为 Westfeld 算法对未压缩图像完全不具有检测能力,若前端预分类模块划分错误则会导致 Westfeld 算法给出不可靠的检测结果,称之为预分类模型引入的系统误差。同时考虑 SPAM 算法对两种类型的图像均具备一定的检测能力,因此预分类模块的漏检与虚警产生的后果不同,应该赋予不同的风险值。如何调整预分类模块的分类平面,使本检测模型的整体性能更稳定还有待研究。

另外,网络上大量的无损格式图像中彩色压缩图像占据很大比例,如果全部采用“相对可靠”的

SPAM 等高维特征算法,不仅效率低下而且效果也不够好,因此提出的检测模型有很强的实用价值。

4 结 论

针对图像空域的 LSB 匹配隐藏算法,提出了基于预分类的检测模型。该检测模型前端对图像载体是否经过压缩进行了区分,后端采用不同的检测算法分别进行检测。该检测模型成功融合了 Westfeld 方法和 SPAM 算法,并充分发挥了二者的优势,能够更好地处理跨数据集测试时算法性能下降的问题。给出了一个开放的框架,可以考虑引入更多的分类方式并加入更加合理的后端处理算法,使整体性能最佳。

引入的预分类检测模型不仅适用于 LSB 匹配隐藏,也可用于其他隐藏方式的检测,如基于重压缩进行预分类的 DCT 域隐藏检测等。需要根据不同隐藏方式的特点,对分类检测模型进行合理地移植。

另一方面,除图像的压缩历史外,图像的分辨率、纹理、拍摄光照、内容、采集设备类型等均可能对用于检测的各种特征产生影响,通过甄别并引入更多的对隐藏操作鲁棒的特征用于预分类可以期望得到更好的检测效果和适应能力,这也将是今后的研究内容。

参考文献 (References)

- [1] Harmsen J, Pearlman W. Steganalysis of additive noise modelable information hiding [C] // Proceedings of SPIE. Bellingham, WA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2003, 5020: 131-142.
- [2] Ker A D. Steganalysis of LSB matching in grayscale images [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(6): 441-444.
- [3] Zhang J, Cox I J, Doërr G. Steganalysis for LSB matching in images with high-frequency noise [C] // Proceedings of IEEE the 9th Workshop on Multimedia Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE, 2007, 385-388.
- [4] Zhang T, Li W X, Zhang Y, et al. Steganalysis of LSB matching based on statistical modeling of pixel difference distributions [J]. Information Sciences, 2010, 180(23): 4685-4694.
- [5] Westfield A. Detecting low embedding rates [C] // Information Hiding. London, UK: Springer Verlag, 2002, 2578: 324-339.
- [6] Pevny T, Bas P, Fridrich J. Steganalysis by subtractive pixel adjacency matrix [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(2): 215-224.
- [7] Chang C, Lin C. LIBSVM: a library of support vector machine [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011, 2(3): 209-234.
- [8] Fu D, Shi Y Q, Su W. A generalized Benford's law for JPEG coefficients and its applications in image forensics [C] // Proceedings of SPIE. Bellingham, WA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2007, 6505: 1-11.
- [9] Pevny T, Fridrich J. Detection of double-compression in JPEG images for applications in steganography [J]. IEEE Transactions on Information Security and Forensics, 2008, 3(2): 91-110.
- [10] Fan Z G, Queiroz R L de. Identification of bitmap compression history: JPEG detection and quantizer estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(2): 230-235.