

基于 Benford 模型的自然图像与 计算机生成图像的鉴别

张震, 杨宇豪

(郑州大学 电气工程学院, 郑州 450001)

摘要: 针对目前自然图像和计算机生成图像的鉴别方法鉴定准确率不高的问题, 提出了一种基于 Benford 模型的自然图像与计算机生成图像的鉴别方法. 本算法利用 DCT 域 AC 系数首位有效数字的 Benford 曲线分布, 分别对图像的 RGB 三个色彩通道进行统计, 以 3 条概率分布曲线的重合程度作为鉴别取证的依据, 对 2 类图像进行正确分类. 实验结果表明, 该方法可有效地鉴别自然图像和计算机生成图像, 与已有算法相比具有更高的识别率, 鉴别准确率达 97.17%, 且计算量小、易于实现, 为图像取证、数字防伪鉴别等提供可靠的依据.

关键词: 自然图像; 计算机生成图像; Benford 模型; DCT 域 AC 系数

中图分类号: TP 391.41

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)06-0930-06

Distinguishing Computer Graphics From Natural Image Based on Benford Model

ZHANG Zhen¹, YANG Yu-hao¹

(Department of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: An improved method with a higher identifying accuracy rate is presented to identify natural images and computer graphics, and the new detection scheme of computer graphics and natural images is based on the Benford model. This algorithm separately calculates the three RGB color channels by probability distribution of the first significant digit of AC coefficient in discrete cosine transform (DCT) domain and correctly classifies the two types of images based on fitting degree of the three curves. Experimental results show that this method can effectively identify natural images and computer graphics. Compared with the existing algorithms, this algorithm has a higher recognition rate, which makes calculation less and easier to implement, and the identifying accuracy rate comes to 97.17%. This provides credible supports for some relative domains such as image forensics and digital anti-fake identification.

Key words: natural image; computer graphics; Benford model; AC coefficients in DCT domain

随着信息技术的快速发展, 数字图像在人们的日常生活应用得越来越广泛. 与胶片图像相比, 数字图像更易于创建、篡改, 一些计算机软件可轻易地制作出以假乱真的计算机图像, 以至于人眼很难将

其与传统的图像区分开来, 因此对于大量的数字图像如何鉴别其相应的来源便成了信息安全技术领域的一个重要课题.

目前, 关于鉴别自然图像与计算机生成图像来

收稿日期: 2012-03-08.

基金项目: 河南省重大科技攻关项目(092101210100).

作者简介: 张震(1966—), 男, 教授, 主要从事信号处理、模式识别、图像处理、信息安全方面的研究, E-mail: zhangzhen66@126.com.

源的研究成果较少,并且图像的鉴别正确率也较低。现有的算法基本采用特征提取-分类鉴别的机器学习思想,着重分析图像空间域和变换域上的统计特征^[1]。文献[2]提出了一种利用小波第一阶矩到高阶矩的统计特性对图像鉴别分类的方法,该方法通过正交镜像滤波器对图像进行分解,利用小波直方图的统计矩作为特征进行分类,不过算法对图像的鉴别正确率较低;文献[3]在借鉴文献[2]的基础上提出一种基于 HSV 颜色模型的鉴别方法来区分自然图像和计算机生成图像的方法,在 HSV 颜色空间中,通过对待测图像进行离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)、直方图计算、离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT),然后提取图像的统计矩特征进行图像分类鉴别;文献[4]利用自然图像与计算机生成图像不同的生成原理,通过检测图像的固有模式噪声来对待检图像进行鉴别分类,算法效果不明显;文献[5]描述了一种基于几何学的图像模型,提出了图像成像过程真实性和场景真实性的标准,从图像的局部斑点统计量、分形几何学等提取特征值,实现图像的鉴别分类;文献[6]利用多特征提取的方法实现图像的分类,该方法从变换域的高阶统计量和空间域的梯度能量中提取特征值,利用 AdaBoost 算法实现分类;文献[7]在文献[5]的基础之上提出了一种鉴别准确率更高的改进方法,在 HSV 色彩模型下,提取图像的统计矩特征和正弦滤波特征,进而对图像进行分类,此方法提高了自然图像与计算机生成图像的鉴别准确率;文献[8]提出一种基于二阶差分统计量的图像鉴别方法,在 HSV 颜色空间中提取图像二阶差分信号的统计量作为分类特征,实现 2 类图像的分类。

本文提出一种基于 Benford 模型的自然图像与计算机生成图像的鉴别方法,使用 Benford 模型作为统计依据,在大量实验的基础上,总结出自然图像和计算机生成图像的 DCT 域 AC 系数的首位有效数字的统计特性,并且构造特征量,创建自然图像和计算机生成图像的鉴别模型,根据 2 类图像差异的显著性水平来设定阈值对待检图像的来源作出真实性判决。实验结果显示,这种算法提高了自然图像与计算机生成图像的鉴别准确率。

1 算法原理

1.1 Benford 模型

Benford 法则被称为“首位数现象”(first-digit phenomena)^[9],该法则展现了数字统计中的一个内

在规律,并揭示了在样本空间足够大的情况下,每个样本数据首位有效数字的概率分布具有一定的稳定性。

美国物理学家 Frank Benford 收集了 20 229 个样本数据,其中包括人口、物理和化学常数、棒球统计表、半衰期放射性同位素、物理书中的答案、素数数字和斐波纳契数列数字等。经过研究后,得出这样一个结论:所有自然随机变量中数据首位有效数字的出现频率符合对数规律,即首位数字为 1 出现的频率并非 1/9,而是 30.1%,而以 2 为开头的数字在样本中出现的频率为 17.6%,其他数据依次减少,9 的出现频率最低,只有 4.6%^[10]。后续的研究人员发现:首位有效数字在数据样本中出现频率的规律为

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

在应用方面,账目审计中 Benford 定律被大量用到,最著名的就是 2001 年美国安然公司的假账案。而在数字图像处理方面,G. F. Pérez 等^[11]将 Benford 模型和傅里叶变换相结合对图像数字水印进行检测,Zhao 等^[12]将广义 Benford 定律应用在含有数字水印的图像中,检测图像的压缩质量因子;Wang 等^[13]分析了 Benford 模型的泛化能力,揭示了 Benford 定律在图像取证中的局限性;Qadir 等^[14]利用 Benford 模型统计离散余弦变换系数和 JPEG2000 压缩质量因子的分布情况,推断未知的 JPEG2000 压缩质量因子;随后 Qadir 等^[15]利用图像的眩光特征验证 Benford 定律,提高了篡改图像的检测率。

1.2 DCT 域 Benford 模型

离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)是一种实数域变换,其变换核为实数余弦函数^[16]。通过 DCT 变换可将图像空间上的信息变换到频域上,使图像在空域上所表现出的能量发散形式变换为频域能量相对集中的形式,以便对图像信息进行各种处理。在进行 DCT 变换时将图像分成若干个 8×8 小块,以提高 DCT 变换的速度和算法的鲁棒性。图像处理运用二维离散余弦变换,二维 DCT 变换的公式为

$$B_{pq} = a_p a_q \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} A_{mn} \cos \frac{\pi(2m+1)p}{2M} \cos \frac{\pi(2n+1)q}{2N} \quad (0 \leq p \leq M-1, 0 \leq q \leq N-1) \quad (2)$$

其中

$$a_p = \begin{cases} 1/\sqrt{M} & (p=0) \\ \sqrt{\frac{2}{M}} & (1 \leq p \leq M-1) \end{cases}$$

$$a_q = \begin{cases} 1/\sqrt{N} & (q=0) \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & (1 \leq q \leq N-1) \end{cases}$$

式中 A_{mn} 为 $M \times N$ 的数字图像矩阵. 当 $p=0, q=0$ 时, 得到的频率系数与余弦函数无关 ($\cos 0 = 1$), 完全就是图像抽样信号的均值, 也是最大的一个值, 称为 DCT 变换的直流 (DC) 系数, 其他的频率系数都由余弦函数参与得到, 所以被称为交流 (AC) 系数. 当对图像 8×8 分块 DCT 后, 会得到 1 个 DC 值和 63 个 AC 系数, 其中这 63 个频率系数则多半是一些接近于 0 的正负浮点数. 交流 (AC) 系数代表了图像中每块的纹理特征和像素值^[17], 是形成图像特征向量的关键要素. 因此, 本算法利用图像的离散余弦变换域中 AC 系数的首位数字的分布特性, 提取 AC 系数首位有效数字的分布熵来作为鉴别图像来源的特征参数.

在图像的数学统计模型研究方面, Fu 等^[18] 提出经过重压缩的 JPEG 图像, 其 DCT 系数首位有效数字符合广义 Benford 模型分布. 文献 [19] 根据模糊图像前后不同的 DCT 域交流系数的分布特性, 在高斯模糊取证方面取得了理想的效果. 本文在前人有关研究的基础上通过实验发现, 对自然图像与计算机生成图像的 DCT 域 AC 系数首位有效数字分布概率利用 Benford 模型进行统计, 统计结果表现出了类似的规律. 下面以自然图像与计算机生成图像为例来说明, 分别对图像 RGB 三个色彩通道的 DCT 域 AC 系数首位有效数字 (most significant digit, MSD) 进行概率分布统计并观察其变化规律. 图 1、2 和图 3、4 分别取自哥伦比亚大学真实图像和计算机生成图像数据库^[20].



图 1 自然图像
Fig. 1 Natural image



图 2 计算机生成图像
Fig. 2 Computer graphics

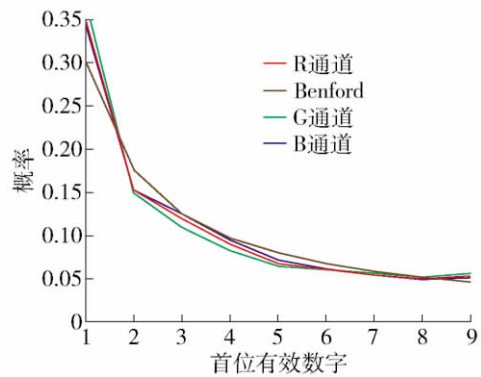


图 3 自然图像 MSD 概率分布曲线
Fig. 3 Probability distribution curve of natural image's MSD

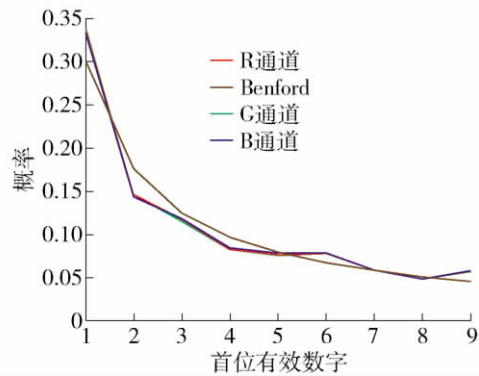


图 4 计算机生成图像 MSD 概率分布曲线
Fig. 4 Probability distribution curve of computer graphics MSD

从图 3 可看出, 自然图像 RGB 三个色彩通道的 DCT 域 AC 系数首位数字概率分布具有近似一致性, 与 Benford 曲线大致吻合, 但仍能看出有所差异, 其中 RGB 三个色彩通道的 MSD 概率分布曲线的平均绝对差分为 0.005 74. 通过图 4 可发现, 计算机生成图像 RGB 三个色彩通道的 MSD 概率分布曲线的平均绝对差分为 0.001 31, 由此可看出计算

机生成图像 3 条 DCT 域 AC 系数首位数字概率分布曲线的一致性变得更加强烈甚至达到了高度重合. 通过大量实验发现,自然图像 DCT 域 AC 系数的统计特性并非严格稳定. 不同自然图像之间的 RGB 三个色彩通道 DCT 域 AC 系数的 Benford 曲线分布具有近似一致性^[19],但是计算机生成图像的 3 条 Benford 曲线的拟合程度较自然图像变得更加强烈,接近重合. 利用这一特性对鉴别自然图像与计算机生成图像能达到令人满意的效果. 因此,本文提出了一种基于 Benford 模型的自然图像与计算机生成图像鉴别方法.

2 特征值的分析和选取

根据 1 中所述,计算机生成图像 RGB 三个色彩通道的 DCT 域 AC 系数首位数字概率分布相关性比自然图像 MSD 概率分布相关性更高. 为了判定 3 条概率分布曲线的拟合程度进而对自然图像与计算机生成图像进行有效的鉴别,这里选取平均绝对差分 AD(absolute difference)^[19]作为取证依据的参数,

平均绝对差分 AD 定义为

$$\overline{AD} = \frac{1}{27} \sum_{i=1}^9 \left(|P_{R_i} - P_{G_i}| + |P_{R_i} - P_{B_i}| + |P_{B_i} - P_{G_i}| \right) \quad (3)$$

式中: i 表示首位有效数字; R_i, G_i, B_i 分别表示 RGB 三个色彩通道下的 MSD _{i} ; $P_{R_i}, P_{G_i}, P_{B_i}$ 分别表示首位有效数字在 RGB 三个色彩通道下的概率. 算法流程如图 5 所示,算法步骤如下:

- 1) 对待测图像进行降维处理,然后对图像的 RGB 三个色彩通道分别进行 8×8 的不重复块离散余弦变换,得到 8×8 分块 DCT 系数矩阵;
- 2) 统计 3 个色彩通道的 DCT 域 AC 系数的首位有效数字的概率分布,得到 3 条概率分布曲线;
- 3) 对 3 条概率分布曲线进行平均绝对差分,若平均绝对差分值大于设定的阈值 T ,说明 3 条曲线的拟合程度不强,将待测图像判定为自然图像,否则判定为计算机生成图像.

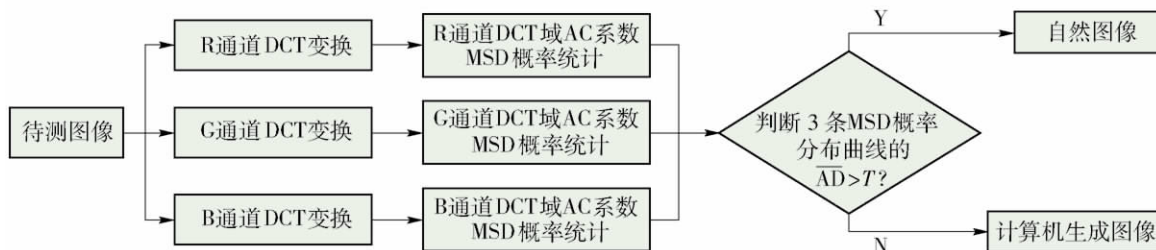


图 5 算法流程

Fig. 5 Flow chart of the algorithm

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

本实验在 Intel 酷睿 i5、CPU 2.4 GHz、Windows 7 的环境下利用 Matlab R2011b 进行实验,实验数据来源于哥伦比亚大学自然图像和计算机生成图像数据库,本文选用该库图像 200 幅,其中自然图像 100 幅,计算机生成图像 100 幅. 利用上述方法进行检测,为了便于观察,实验设计前 100 幅图像为计算机图像,后 100 幅图像为自然图像,分别对图像的 3 条概率分布曲线平均绝对差分后进行统计,实验结果如图 6 所示.

从图 6 可看出,自然图像与计算机生成图像 RGB 三个通道 DCT 域 AC 系数的 MSD 分布的重合程度明显不同,由于计算机生成图像的 3 条概率分布曲线的拟合程度较高,其平均绝对差分比自然图

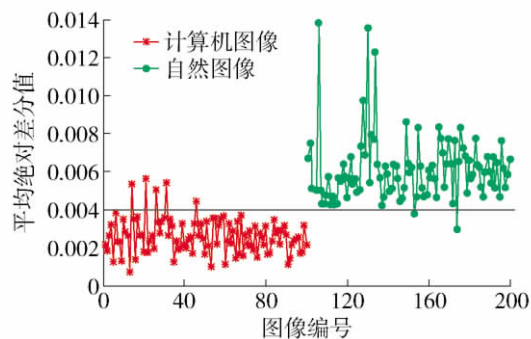


图 6 自然图像与计算机生成图像平均绝对差分概率分布

Fig. 6 Probably distribution of natural images and computer graphics absolute difference

像的概率分布曲线的平均绝对差分小很多,适当选取阈值可将自然图像与计算机生成图像加以有效鉴别. 通过对图 6 中均值 \overline{AD} 统计结果的分析,设定阈

值为 0.004, 图像鉴别正确率为 96.5%。检测效果相比于 [2 3 4 5 6 7 8] 的 84.97%、82.1%、90%、83.5%、71%、95.36%、92.8%, 图像鉴别率有了很大的提高。检测正确率的提高, 主要是依据 Benford 法则, 统计数据的首位有效数字分布概率符合对数规律, 人为的干预使得自然图像和计算机生成图像在相似性上的区别能更好地体现出来。

3.2 稳定性分析

为了验证所提算法的稳定性不随所选验证集的不同而具有较大波动, 利用上述方法以图像 RGB 三个色彩通道的 DCT 域 AC 系数首位有效数字分布概

率的平均绝对差分 \overline{AD} 作为特征量, 选取 5 种不同类型的相机拍摄的 500 幅自然图像, 并在哥伦比亚大学计算机生成图像数据库中随机选取 500 幅计算机生成图像进行鉴别试验。1 000 副图像测试库包含的图片格式为有 JPEG 和 BMP, 图片大小从 640×412 像素到 4032×3024 像素不等, 图片内容涵盖了风景、建筑、人物、室内、天空、植物和夜景等各个方面。测试库中的图像尽可能包括所有的场景, 从而避免了图像鉴别结果不会因为图片库中图像的种类不全面而造成鉴别率的不准确。利用阈值法进行判别图像的来源, 阈值设定为 0.004, 实验结果如表 1 所示。

表 1 图像来源鉴别结果
Table 1 Results of distinguishing images

图像	来源	数量	正确率/%
自然	Canon EOS 10D	100	97
	Sony DSC-W570	100	98
	Agfaphoto 7MDSC	100	100
	Nikon Coolpix S710	100	98
	Olympus Image Corp U1050sw	100	100
计算机生成	3DS MAX、Maya 等	500	90

从以上结果可分析得出, 该方法对于图像的来源能有效进行鉴别。并且本算法针对的是自然图像与计算机生成图像 DCT 域统计特性的不同, 鉴别准确度受相机的型号影响不大, 其平均正确率达 97.17%。实验表明 3 条概率分布曲线拟合程度与图像的平滑度密切相关, 由于计算机图像在渲染过程中, 为了去除混叠现象, 必须对图像函数进行滤波以去除高频成分, 再者对于自然图像拍摄过程中无法避免的种种噪声而言, 计算机图像的生成过程几乎是“无噪”的^[21], 计算机图像是对计算机生成的三维模型进行二维投影计算的结果, 没有环境带来的噪声, 也没有投影设备所引起的噪声, 因此计算机生成图像比自然图像的平滑度更高, 这样计算机生成图像的 3 个概率分布曲线的拟合程度才更强, 利用上述方法可有效地鉴别图像的来源。此外, 算法是基于 RGB 三个色彩通道上的分布特性, 在 3 个通道严重失衡的情况下鉴别效果不明显。

4 总结

1) 本文利用 Benford 模型作为统计依据, 总结出自然图像和计算机图像的 DCT 域 AC 系数首位有效数字的统计特性, 并根据 2 类图像差异的显著性水平来设定阈值对待检图像的来源作出真实性判定。这种算法提高了自然图像与计算机生成图像的

鉴别准确率。

2) 研究发现待测图像的 DCT 域 AC 系数首位有效数字的 3 条概率分布曲线拟合程度不但与其平滑度密切相关, 而且在图像的 RGB 三个色彩通道严重失衡的情况下, 曲线的拟合程度会变低。

3) 本算法的鉴别准确度与相机的型号关联度不大, 其鉴别正确率达 97.17%。本算法计算量小、易于实现、应用范围广, 与文献 [2-8] 中提到的方法相比, 理论依据充分, 数学模型清晰, 正确率更高, 因此, 本文所提出的基于 Benford 模型的自然图像与计算机生成图像鉴别方法具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 陈香苹, 李生红, 苏波, 等. 基于图像噪声分析的计算机生成图像检测算法 [J]. 光电子·激光, 2010, 21(2): 293-297.
CHEN Xiang-ping, LI Sheng-hong, SU Bo, et al. Identifying computer generated images based on analysis of image noise [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(2): 293-297. (in Chinese)
- [2] LYU S, FARID H. How realistic is photorealistic? [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(2): 845-850.
- [3] CHEN W, SHI Y Q, XUAN G. Identifying computer graphics using HSV color model and statistical moments of

- characteristic functions [C] // IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Beijing, July 2-5, 2007: 1123-1126.
- [4] DEHNIE S, SENCAR T H. Digital image forensics for identifying computer generated and digital camera images [C] // IEEE International Conference on Image Processing, Atlanta, October 8-11, 2006: 2313-2316.
- [5] NG T T, CHANG S F, HSU J, et al. Physics-motivated features for distinguishing photographic images and computer graphics [C] // Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Multimedia, Singapore, November 6-11, 2005: 239-248.
- [6] 王玉平, 李生红, 赵峰, 等. 基于 AdaBoost 的计算机生成图像检测算法 [J]. 计算机仿真, 2008, 21(2): 293-297.
WANG Yu-ping, LI Sheng-hong, ZHAO Feng, et al. Detection of photorealistic computer graphic based on adaboost [J]. Computer Simulation, 2008, 21(2): 293-297. (in Chinese)
- [7] 王学良, 李生红, 金波, 等. 一种用于计算机生成图像与自然图像鉴别的改进方法 [J]. 光电子·激光, 2010, 21(5): 783-785.
WANG Xue-liang, LI Sheng-hong, JIN Bo, et al. An improved method of identifying computer graphics and photographic images [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(5): 783-785. (in Chinese)
- [8] 李文祥, 张涛, 郑二功, 等. 基于二阶差分统计量的自然图像与计算机图形的鉴别 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(9): 195-200.
LI Wen-xiang, ZHANG Tao, ZHENG Er-gong, et al. Discrimination between natural images and photo realistic computer graphics using second-order difference statistics [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(9): 195-200. (in Chinese)
- [9] 狄为, 施鹏仙. 基于 Benford 定律的会计舞弊发现研究 [J]. 会计之友, 2010(9): 73-75.
DI Wei, SHI Peng-xian. The research of accounting frauds based on benford model [J]. Friends of Accounting, 2010(9): 73-75. (in Chinese)
- [10] 许涤龙, 金瑛. 基于 Benford 法则的 M_2 统计数据准确性研究 [J]. 统计与信息论坛, 2010, 25(8): 20-24.
XU Di-long, JIN Ying. Research on accuracy of M_2 data based on benford's law [J]. Statistics & Information Forum, 2010, 25(8): 20-24. (in Chinese)
- [11] PÉREZ G F, HEILEMAN G, ABDALLAH C T. A generalization of benford's law and its application to images [C] // IEEE International Conference on Image Processing, San Antonio, September 16-October 19, 2007: 405-408
- [12] ZHAO X, HO A T, SHI Y Q. Image forensics using generalised benford's law for accurate detection of unknown JPEG compression in watermarked images [C] // 16th International Conference on Digital Signal Processing, Santorini, Greece, July 5-7, 2009: 1-8.
- [13] WANG J W, CHA B H, CHO S H, et al. Understanding benford's law and its vulnerability in image forensics [C] // In Proceedings of ICME, New York, June 28-July 3, 2009: 1568-1571.
- [14] QADIR G, ZHAO X, HO A T, et al. Estimating JPEG2000 compression for image forensics using benford's law [C] // Proceedings of SPIE, Brussels, April 12-15, 2010: 77230J-1-77230J-10.
- [15] QADIR G, ZHAO X, HO A T, et al. Image forensic of glare feature for improving image retrieval using benford's law [C] // IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Rio de Janeiro, May 15-18, 2011: 2661-2664.
- [16] 王丽娜, 郭迟, 李鹏. 信息隐藏技术实验教程 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 80-100.
- [17] 赵珊, 赵倩. 基于 DCT 系数的 JPEG 图像检索算法 [J]. 计算机工程, 2010, 36(19): 190-192.
ZHAO Shan, ZHAO Qian. JPEG image retrieval algorithm based on DCT coefficient [J]. Computer Engineering, 2010, 36(19): 190-192. (in Chinese)
- [18] FU D, SHI Y Q, SU Q. A generalized benford's law for JPEG coefficients and its applications in image forensics [C] // SPIE Electronic Imaging, San Jose, January 28-February 1, 2007: 1L1-1L11.
- [19] 周琳娜, 王东明. 数字图像取证技术 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2008: 18-181.
- [20] Columbia DVMM Research Lab. Columbia photographic images and photorealistic computer graphics dataset [DB/OL]. [2012-02-10]. http://www.ee.columbia.edu/ln/dvmm/downloads/PIM_PRCG_dataset/.
- [21] 于洋. 数码照片和计算机生成图像的图像源鉴别 [D]. 大连: 大连理工大学电子信息与电气工程学部, 2007.
YU Yang. Classification for computer graphic images and natural photographs [D]. Dalian: Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)

(责任编辑 吕小红)