

# 基于小波高阶统计量的数字图像来源取证方法

王志红<sup>1</sup>, 黄惠芬<sup>1,2</sup>

(1.山东英才学院, 济南 250104; 2.山东大学, 济南 250100)

**摘要:** **目的** 为了识别图像来源于相机还是其他电子设备, 提出一种基于小波高阶统计量的图像来源取证方法。**方法** 利用生成途径对图像性质的影响和数理统计方法, 通过对比不同来源的数字图像的生成途径对它们各自性质的影响, 从图像的多尺度分析角度, 研究不同来源的图像在变换域所呈现的独有特性, 提取数字图像小波域的高阶统计特征, 以此判断图像的来源。**结果** 实验结果表明, 针对计算机软件、数码相机和扫描仪这3类图像的平均测试正确率达到了97.9%。**结论** 该方法在确定图像来源上有较高的效率和准确率。

**关键词:** 高阶统计; 特征提取; 小波; 识别

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)17-0179-04

## Forensic Method of Digital Image Source Based on Wavelet Higher-order Statistics

WANG Zhi-hong<sup>1</sup>, HUANG Hui-fen<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Yingcai University, Jinan 250104, China; 2. Shandong University, Jinan 250100, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose an image source forensic method based on the wavelet higher-order statistics, in order to identify whether the image is from a camera or other electronic devices. Based on the influence of the generation path on the image properties and the mathematical statistics, and by comparing the influence of the generation path of the digital images from different sources on their respective property, the unique properties of images from different sources in transform domain were studied from the perspective of multi-scale analysis of the image. The high-order statistical characteristics of the wavelet domain in the digital image were extracted to determine the source of the image. The experimental results showed that the average test accuracy rate was up to 97.9% for the three kinds of images from the computer software, digital cameras and scanners. The proposed method has higher efficiency and accuracy in determining the source of the image.

**KEY WORDS:** high-order statistics; extraction of characteristics; wavelet; recognition

随着图像编辑和处理工具的普及和迅速发展, 修改图像内容也变得相对容易, 这也导致了新闻、司法等各个领域的数字图像正面临着被随意篡改和伪造的威胁。不真实数字图像的频繁出现冲击着的视觉效果, 负面影响不断增多, 最终会让人失去对图像的信任。

数字图像来源广泛。数码相机、打印机、扫描仪、图像生成软件等各种数字设备都能生成数字图像, 当人们看到一幅图像时, 往往希望知道这幅图像是否来

源于相机、甚至相机的品牌, 或者想知道这幅图像是否是原始图像, 这都迫切需要对于数字图像的真实性和原始性进行取证。随着计算机图像技术和计算机硬件的发展, 计算机软件、扫描仪、手机等都能得到和数码相机拍摄的图像相差无几的照片, 因此, 为了保证图像的真实性和原始性, 对图像进行来源识别是图像取证中的重要环节之一, 识别图像是否来源于相机还是其他电子设备这个问题亟待解决。

针对数字图像取证技术的研究, 近年已有大量算

收稿日期: 2016-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(61402271); 山东省自然科学基金(ZR2015JL023); 山东省自然科学基金(ZR2016FM34); 山东省重点研发项目(2015GGX101012); 山东省重点研发项目(2016GGX101037)

作者简介: 王志红(1978—), 女, 硕士, 山东英才学院副教授, 主要研究方向为图像篡改取证、图像隐写。

法被提出并被应用,从图像“从何而来”、“是否被篡改”、“篡改位置确定”、“篡改过程”等多方面展开了数字图像取证研究<sup>[1-2]</sup>。文中研究图像从何而来问题。在图像从何而来方面, Li<sup>[3]</sup>提出一种抑制场景噪声同时增强残余噪声的方法实现相机来源取证。Khanna等<sup>[4]</sup>也利用噪声进行图像来源鉴别。Farid等<sup>[5]</sup>对相机拍摄的和计算机获取的人脸图像进行了取证鉴别。Lanh等<sup>[6]</sup>提出利用图像质量特征和高阶统计特征对图像来源进行分类。Lyu等<sup>[7]</sup>对摄影图像和计算机生成图像进行分类时采用基于金字塔分解的自然图像统计模型的方法。利用图像特征的变化进行数码图像和计算机生成图像识别的文献也很多,如Chang等<sup>[8]</sup>利用CFA插值的周期性改变进行图像分类判别,王晓峰等<sup>[9]</sup>、彭飞等<sup>[10]</sup>、王学良等<sup>[11]</sup>利用图像的纹理特征变化和直方图特性的改变进行图像分类,以及Orozco等<sup>[12]</sup>利用图像的颜色特征和质量特征变化进行数码图像和计算机生成图像的分类。

从已有研究成果可知,研究图像来源取证的文献不是很多,且已经有的研究大部分集中在图像的噪声、纹理特征来进行图像来源识别,而利用高阶特征的较少,小波特征高阶特征的优势是可进行多分辨率分析。文中利用小波分解提取数字图像小波域的高阶统计特征,使用支持向量机作为分类器对图像来源进行分类,针对数码相机、计算机软件和扫描仪这3种常用设备进行图像来源取证。图像篡改是个复杂的工作,文中仅考虑单一设备来源,对给定的图像进行分类,判定出图像属于这3类图像的哪一类。

## 1 小波高阶特征提取

### 1.1 小波变换

小波变换<sup>[13-14]</sup>作为一种强有力的信号分析工具,与傅里叶变换、Gabor变换相比较,小波变换是一个时间和频率的局域变换,因而能有效地从信号中提取信息,通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度分析,即可以分析信号的概貌,又可以分析信号的细节。时域表示为:

$$W_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad a > 0 \quad (1)$$

式中:  $f(t)$  为信号;  $\tau$  为位移因子;  $a$  为尺度因子或伸缩因子(表示与频率相关的伸缩);  $\psi^*(t)$  为小波的基函数。

将时间信号转换到频域,对应的频域表示见式(2),其中  $F(\omega)$  为信号的傅里叶变换,其他变量为式(1)中所定义。

$$W_x(a, \tau) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \psi^*(a\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

数字图像是离散的二维信号,对图像进行二维离散小波变换,并对图像频域分解后提取特征。

### 1.2 特征提取方法

小波分解可以利用低通和高通滤波器沿着图像轴把图像分解为细节、垂直、水平和对角分量,通过对数字图像进行小波分解将图像的频域分解为多级和多个方向。文中利用小波分解得到每一级( $i=1, 2, 3$ )、每一个方向的分量系数的均值、方差、偏斜和峰度,并由这些统计量组成图像统计特征。

以水平方向为例,用  $H_k(i, j)$  表示水平方向上的分量,  $m$  和  $n$  表示分量的行数和列数,以此来表示均值  $\mu$ , 方差  $\sigma$ , 偏斜度  $s$  及峰值  $u$  计算公式分别为:

$$\mu = \frac{1}{n \times m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n H_k(i, j) \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1}{n \times m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (H_k(i, j) - \mu)^2 \quad (4)$$

$$s = \frac{\frac{1}{n \times m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (H_k(i, j) - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (5)$$

$$u = \frac{\frac{1}{n \times m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (H_k(i, j) - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (6)$$

每一级分解水平方向上这些统计量能得到36维特征,这些统计数据表现了图像小波系数基本的统计分布。其他3个分解方向的统计特征与水平方向的计算方法相同。这样就得到了三级分解的特征数量为108维,以此特征作为程序输入的第1组特征。

### 1.3 线性预测误差统计特征提取

为了进一步提取小波分解各分解级和各分解方向之间的系数相关性,引入小波分解系数的线性预测误差统计特征。对于一幅真彩色图像,第  $i$  级、 $c$  颜色通道的垂直、水平和对角分量分别由  $V_i^c(x, y)$ ,  $H_i^c(x, y)$  和  $D_i^c(x, y)$  表示,分解见图1。如按照此方法分解,图像 lena 分解示意图2。

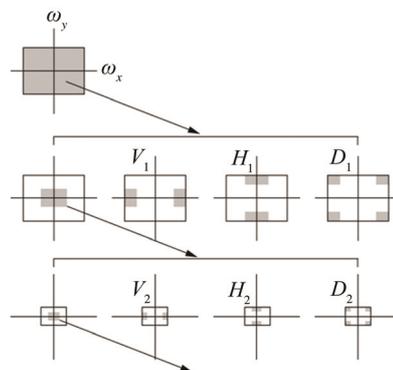


图1 图像多方向分解

Fig.1 Multi-directional decomposition of the image

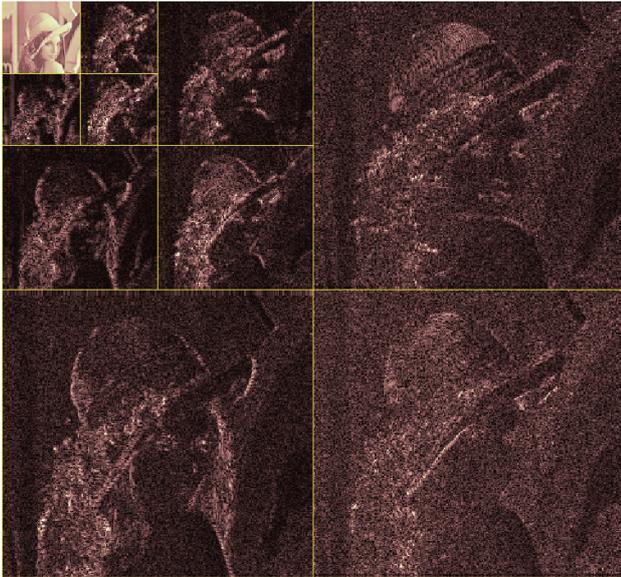


图 2 lena 图的 3 级小波分解系数幅值

Fig.2 Three level wavelet decomposition coefficient amplitude of the lena graph

以图像 G 通道的垂直分量为例，该分解系数可以用与其相邻的分解级、分解方向、颜色通道以及同一分解级同一分解方向的相邻位置的分解系数的一种线性关系进行预测：

$$\begin{aligned}
 |V_i^g(x, y)| = & \omega_1 |V_i^g(x-1, y)| + \omega_2 |V_i^g(x+1, y)| + \\
 & \omega_3 |V_i^g(x, y-1)| + \omega_4 |V_i^g(x, y+1)| + \\
 & \omega_5 |V_{i+1}^g(x/2, y/2)| + \omega_6 |V_i^g(x, y)| + \\
 & \omega_7 |D_{i+1}^g(x/2, y/2)| + \omega_8 |V_i^r(x, y)| + \\
 & \omega_9 |V_i^b(x, y)|
 \end{aligned} \tag{7}$$

上述线性关系也可以通过矩阵形式更简单地表示出来： $\bar{v}$  为  $V_i^g(x, y)$  的列向量； $Q$  为幅值； $\bar{\omega}$  为权重， $\bar{\omega} = \{\omega_1, \omega_2 \dots \omega_9\}$ ，均方差函数表示见式(8)。

$$E(\bar{\omega}) = (\bar{v} - Q\bar{\omega})^2 \tag{8}$$

为了使均方误差函数最小，对式(8)取导数得到并使结果为 0 得： $\bar{\omega} = (Q^T Q)^{-1} Q^T \bar{v}$ ，以此得到小波分解系数幅值的线性预测数值。计算分解系数的真实数值与预测数值的 log 误差  $\bar{p} = \log(\bar{v}) - \log(|Q\bar{\omega}|)$ ，最后计算这个线性预测 log 误差的均值、方差、偏斜和峰度。同理计算垂直分量的其他 2 个颜色通道的上述统计特征，以及水平和对角分量的 3 个颜色通道、3 个分解级的上述统计特征，这样就得到第 2 组分类识别特征为 108 维。将 1.2 节得到的三级分解的第 1 组 108 维特征和 1.3 节得到的 2 个颜色通道的 108 维特征组合，最终得到 216 维用于图像来源认证的图像小波高阶统计特征。

#### 1.4 训练分类模型构建

鉴于支持向量机(SVM)<sup>[15]</sup>在处理少量样本问题、非线性问题及高维模式识别问题上的优势，文中在分

类上使用支持向量机对图像进行分类。文中在提取图像统计特征值后，把 1.1 节和 1.2 节提取的图像的特征作为分类模型的输入源进行分类判断，利用普遍使用的支持向量机工具包，假设  $x_i(i=1,2\dots N)$  是训练集合  $X$  中的特征向量。这些向量来自于 1.1 节和 1.2 节中提取的特征，并且假设这 2 类是线性可分的，以此来设计判决函数。分类过程见图 3。

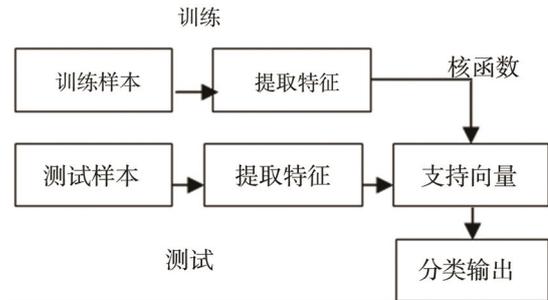


图 3 分类过程

Fig.3 Classification process

文中构造的判决函数初步可以表示为：

$$f(x) = \text{sgn} \left( \sum_{i=1}^N \lambda_i y_i x_i^T x_i + \omega_0 \right) \tag{9}$$

式中： $\text{sgn}()$  为符号函数；参数  $N$  个特征向量就是所谓的“支持向量”，输入 1.1 节中特征时， $y_i$  取值为 +1，输入 1.2 节中特征时， $y_i$  取值为 -1； $\lambda_i$  为拉格朗日乘子； $x$  为输入向量； $\omega_0$  为偏移量。输入支持向量的特征数据需要进行预处理，在实验中把特征数据规一化到 [0,1] 之间，以实现把所有量进行正确分类。

支持向量机工具包有 C-SVC 和 V-SVC，在文中算法中选择 C-SVC，非线性的径向基函数(RBF)作为核函数。RBF 核函数定义为：

$$K(x_i, x) = \exp(-\gamma \|x_i - x\|^2) \tag{10}$$

当 2 类数据在当前空间不是线性可分时，SVM 通过核函数  $K(x_i, x)$  把特征空间映射到更高维的空间，这里映射函数  $K(x_i, x)$  满足 Mercer 定理。这样最终的判决函数可以表示为：

$$f(x) = \text{sgn} \left( \sum_{i=1}^N \lambda_i y_i K(x_i, x) + \omega_0 \right) \tag{11}$$

最佳参数  $(C, \gamma)$  可以通过网格搜索得到。参数  $C$  的范围为  $\{2^{-5}, 2^{-4} \dots 2^5\}$ ，参数  $\gamma$  的范围为  $\{2^{-5}, 2^{-4} \dots 2^5\}$ ，这样就完成了对分类器的设计。

## 2 实验结果和分析

依据文中算法训练参数选取  $C$  值为  $2^4$ ， $\gamma$  值为  $2^{-5}$ 。为了验证算法的准确率，实验选择了数码相机拍摄的 300 幅原始照片，计算机图形软件生成的 300 幅图像，图像从 [www.3ddart.org](http://www.3ddart.org) 等图像网站上下载，

用高清晰扫描仪 HPC7710A 扫描得到的 300 幅图像, 共 900 幅图像对文中算法进行训练, 又另外选了同样来源的 900 幅图像作为样本图像进行测试。实验环境为 VC 环境下开发的程序。实验方法如下所述。

1) 程序首先对训练集的图像进行小波变换, 得到图像小波分解各级各方向的系数, 从而提取小波高阶统计特征, 把得到的图像特征写入文件。

2) 选择已经保存的训练样本的特征文件, 对样本进行来源分类识别, 获得图像的来源。对文中所准备的图像进行测验后, 实验数据分类结果见表 1。

表 1 识别结果  
Tab.1 Recognition results

图像类别	被识别为 数码相机	被识别为软 件生成图像	被识别为 扫描图像	识别正确 率/%
300幅数码相机照片	296	2	2	98.7
300幅计算机软件生成的图像	8	287	5	95.7
300幅扫描图像	0	2	298	99.3

从实验结果可以看出, 3 类图像的平均测试正确率达到了 97.9%, 其中对于扫描图像的分类效果最好, 达到了 99.3%。对于计算机生成图像的分类效果在三者中较低, 但是也达到了 95.7%。除了算法本身的原因之外, 对于图像样本的选择也可能影响实验结果。自然图像和扫描图像的选择较为集中, 而计算机生成图像的选择较为广泛。文中的数字图像来源认证系统基本满足了来源认证检测的要求, 针对数量较少的样本, 具有较好的识别度和鉴别率。

### 3 结语

针对数字图像来源取证, 提出利用图像的小波高阶统计特征来实现图像来源取证算法, 实验结果表明, 针对常用的 3 种图像来源的图像识别准确率达到 90%以上。由于特征提取、样本选择的准确度直接影响分类的准确率和可靠性, 这将是文中后续工作中重点要解决的问题, 同时要进一步研究图像来源认证的新算法。

#### 参考文献:

- [1] SENCAR H T, MEMON N. Overview of State-of-the-art in Digital Image Forensics[C]// Proc of WSPC World Scientific Press, 2008.
- [2] KHANNA N, MIKKILINENI A K, MARTONE A F, et al. A Survey of Forensic Characterization Methods for Physical Devices[J]. Digital Investigation, 2006, 3:

17—28.

- [3] LI C S. Source Camera Identification Using Enhanced Sensor Pattern Noise[J]. IEEE Trans on Information Forensics and Security, 2010, 5(2): 280—287.
- [4] KHANNA N, CHIU G T C, ALLEBACH J P, et al. Forensic Techniques for Classifying Scanner, Computer Generated and Digital Camera Images[C]// Proc of the IEEE Int Conf on Acoustics, Speech and Processing Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 1653—1656.
- [5] FARID H, BRAVO M J. Perceptual Discrimination of Computer Generated and Photographic Faces[J]. Digital Investigation, 2012, 8(3/4): 226—235.
- [6] LANH T V, EMMANUEL S, KANKANHALLI M S. Identifying Source Cell Phone Using Chromatic Aberation[C]// Proc of IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2007: 883—886.
- [7] LYU S, FARID H. How Realistic Is Photorealistic?[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(2): 845—850.
- [8] CHANG T Y, TAI S C, LIN G S. A Passive Multipurpose Scheme Based on Periodicity Analysis of CFA Artifacts for Image Forensics[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25 (6): 1289—1298.
- [9] WANG Xiao-feng, LIU Yong, XU Bing-chao, et al. A Statistical Feature Based Approach to Distinguish PR-CG from Photographs[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2014, 128(11): 84—93.
- [10] PENG Fei, LI Jiao-ting, LONG Min. Identification of Natural Images and Computer-generated Graphics Based on Statistical and Textural Features[J]. Journal of Forensic Sciences, 2015, 60(2): 435—443.
- [11] 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.
- [12] WANG Xue-liang, LI Sheng-hong, JIN bo, et al. A Method for Improving the Image and Nature of Computer-generated Image Identification[J]. Optoelectronics Laser, 2010, 21(5): 783—785.
- [13] OROZCO A L S, CORRIPIO J R, VILLALBA L J G, et al. Image Source Acquisition Identification of Mobile Devices Based on the Use of Features[J]. Multimedia Tools and Application, 2016, 75(12): 7087—7111.
- [14] ROHIT A, LAL S M, NIDHIKA B. An Algorithm for Image Compression Using 2D Wavelet Transform[J]. International Journal of Engineering Science & Technology, 2011, 3(4): 2758—2764.
- [15] KALE V U, KHALSA N N. Performance Evaluation of Various Wavelets for Image Compression of Natural and Artificial Images[J]. International Journal of Computer Science & Communication, 2010, 1(1): 179—184.
- [16] 王小莹, 易尧华. 基于 SVM 的模糊图像识别[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 179—183.
- [17] WANG Xiao-ying, YI Yao-hua. SVM-based Recognition of Blurred Image[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(13): 179—183.