

相机模式噪声特征的数字图像来源认证方法

郭晓鸣¹, 王波¹, 孔祥维¹, 周琳娜²

(1. 大连理工大学信息安全中心, 辽宁 大连 116024;

2. 北京电子技术应用研究所, 北京 100091)

摘要: 本文通过对数码相机成像系统的综合考虑, 将数字图像来源认证技术从三个角度进行了分析, 并提出了一种基于相机模式噪声特征的数字图像来源认证方法。算法提取了模式噪声在空域和变换域的共 338 维特征, 使用支持向量机进行分类判决。实验结果表明, 本文算法不受同品牌相机分类正确率低的限制, 对现有样本的数字图像来源平均分类正确率达到了 97.695%; 对不同品牌 4 部相机的平均分类正确率达到 98.87%; 对相同品牌相机 (3 种品牌 7 部相机) 的平均分类正确率高达 98.69%; 优于现有的相机来源认证算法。

关键词: 数字图像来源认证; 模式噪声; 特征; 支持向量机

中图分类号: TP391

文献标识码: A

Source Camera Identification Based on Image Pattern Noise Features

GUO Xiao-ming¹, WANG Bo¹, KONG Xiang-wei¹, ZHOU Lin-na²

(1. Information Security Research Center, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024;

2. Beijing Institute of Electronic Technology and Application, Beijing 100091)

Abstract: Based on the general consideration of imaging pipeline in digital camera, we analyze the source camera identification technology from three different aspects, then propose a new source camera identification method based on image pattern noise features. We extract 338 features from space and transform domain, then using support vector machine as classifier to identify source cameras. Experiment results demonstrate that our algorithm is also applicable to the classification of the same brand camera, the average accuracy of our method for the existing image samples reaches 97.695%, for 4 cameras of different brand it reaches 98.87%, and for cameras of the same brand (7 cameras of three brands) it reaches 98.69%, higher than the existing methods.

Key words: source camera identification; pattern noise; features,svm

每一幅由数码相机拍摄的图像都会留下一些不同于其他图像的特征。从特征产生的根源上, 通常可以把这些特征分为两大类: 基于数码相机成像系统的和基于场景内容的。由于场景内容是不固定的, 那么大部分考察数字图像来源的方法都是从相机的内部结构和成像过程入手的, 即通过分析数码相机成像系统及图像采集过程来提取特征。

已有的文献针对成像系统构成的特点提出了一些数字图像来源认证算法, 文献[1]通过对每幅图像提取颜色、质量、小波三个方面的特征进行分类判决, 文献[2][3]考虑到 CFA 插值核和插值算法是因相机而异的, 通过提取可以代表图像像素值之间相关结构不同的特征或估计差值系数来实现分类; 然而由于有些相同品牌相机的内部操作算法和 CFA 插值算法相同或者相似, 导致上述方法在区分相机个体上存在着局限性, 当相同品牌的相机增多时判别正确率明显下降; 文献[4]中, Kai San Choi 等人提出利用镜头径向失真的统计特征对数字图像的来源进行鉴别, 该方法在估计相机镜头失真系数上要利用到图像中的直线信息, 针对含有太短直线或者太少直线的图像样本该方法失效; 文献[5]中, Jessica

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划基金项目 (2008AA01Z418); 国家自然科学基金 (60971095)。

作者简介: 郭晓鸣 (1987-), 女, 辽宁省新民市人, 硕士研究生, 主要研究领域为数字图像取证。

通讯作者: 孔祥维, E-mail: kongxw@dlut.edu.cn

Fridrich 等人通过对待检测图像模式噪声与相机参考噪声模式之间的相关性与阈值进行比较来鉴别其来源，该方法要求图片的分辨率大小一致或所取块的位置严格同步对应。

尽管现有的来源认证方法存在着一定的成效，但却存在着不同方面的局限性。因此，需要研究限制较少的一般情况下可以可靠区分不同相机个体拍摄的图像的数字图像来源认证方法。为解决现有方法针对相同品牌相机鉴别准确率低以及对图像同步性要求高的问题，本文提出了一种基于相机模式噪声特征的数字图像来源认证方法，实验结果表明了该算法的有效性，同时也体现了该方法在区分相同品牌相机个体上的优越性。

本文在第一节中通过对相机成像系统的综合考虑，将数字图像来源认证技术从三个角度进行了分析，给出了思考本文算法的出发点；第二节介绍了模式噪声及其特征的提取方法；第三节列出了算法针对现有样本的实验结果及分析对比情况；第四节是本文的结论和展望。

1 对数码相机系统的分析

目前大多数的消费级数码相机采用的是单 CCD 多芯片方式^[6]，通过考虑其器件和内部操作算法，典型的单 CCD 多芯片数码相机系统构成及数字图像生成过程如图 1 所示：

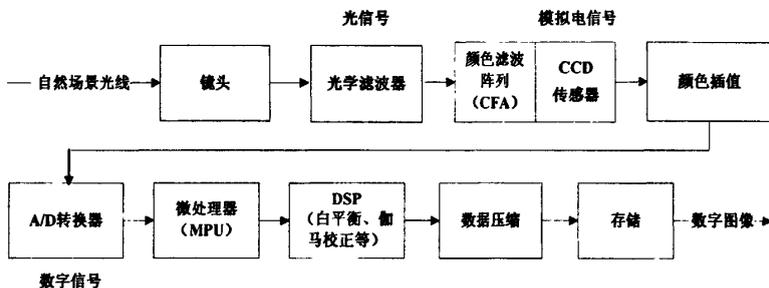


图 1 数码相机的系统构成及数字图像生成过程

如图 1 所示，当按下相机快门时，自然场景的光线通过镜头和光学滤波器聚集到感光元件传感器上，传感器每个像素点通过不同颜色滤色片获得相应颜色的图像数据，再利用 CFA (Color Filter Array，彩色滤镜阵列) 插值算法计算得到 R、G、B 三个通道完整的颜色信息，然后经过 A/D 转换器将模拟信号转换为数字信号，通过 MPU (微处理器) 读出传感器的数据信息^[7]，进行一系列的 DSP (白平衡、伽马校正等) 过程后，对数字信号进行压缩和相应的处理后再转换成特定的图像格式 (通常为 JPEG 格式)，最后，以文件的形式存储在存储器中。

从图 1 中可以看出，数码相机成像系统是由固定的元器件和一些基本的图像处理流程组成的。元器件主要包括：镜头、传感器、A/D 转换器、MPU；图像处理流程包括：CFA 插值、伽马校正、白平衡等。不同的元器件和处理算法必然会给拍摄的图像引入不同的特性，同时，数码照片大都包含可扩展头文件信息 (Extended File Information, EXIF)。因此，基于对数码相机及现有图像盲取证算法的综合考虑，本文从以下三个角度分析了数字图像来源的盲取证技术：

- (1) 基于 EXIF 的数字图像来源盲取证方法；
- (2) 针对相机系统图像操作算法的数字图像来源盲取证方法；
- (3) 针对相机内部元器件的数字图像来源盲取证方法。

由于相机的 EXIF 信息是可以改动的，因此在司法取证中，第一类方法得到的结论只能作为参考信息而不能作为直接的证据；同时，由于相同品牌或者相同型号相机内部的图像操作算法可能相同或者相似，通过盲提取相机内部图像操作算法可能会产生的特征来鉴别相机个体在某些情况下存在着局限性；基于以上分析，对于不同的相机个体而言，只有其内部的固有元器件是具有唯一性的，和相机个体之间有着一一对应关系，因此，通过元器件提取特征在相机来源认证方法上存在着一定的优越性。

在相机系统内部的四个主要器件：镜头、传感器、A/D转换器、MPU中，A/D转换器是针对已经形成的图像数据进行模拟信号到数字信号的转换，只是数值上的计算过程，MPU也仅仅是读出传感器的数据信息，它们都不会对像素值分布引入独特的特性，因此本文以会直接影响图像像素值及其特性的镜头和传感器作为出发点，利用二者会引入的模式噪声提取与图像内容无关的特征。

2 基于模式噪声的特征提取

为了有效的区分数字图像来源的相机个体，本文首先通过降噪算法估计出可以代表不同相机个体的模式噪声，然后对模式噪声进行特征提取，并从理论上分析了特征的有效性，采用支持向量机进行分类，构建了一个基于相机模式噪声特征的数字图像来源认证系统，算法流程图如图2所示。

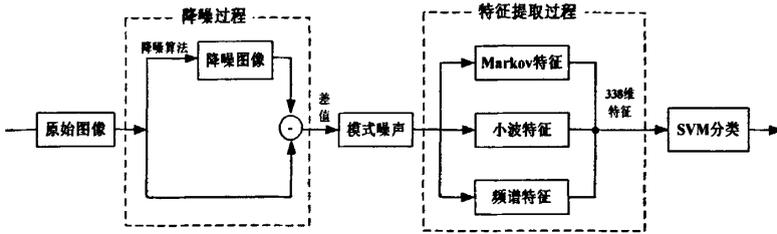


图2 算法流程图

2.1 模式噪声及其提取

相同型号的相机镜头的物理特性是相似的^[8]，但是它们的灰尘污点是不同的，这种光学系统的灰尘会在成像过程中引入模式噪声^[9]；同时，相机传感器以及内部电路存在非理想性，在成像过程中也必然会产生模式噪声；这种噪声是因相机个体而异的，与相机个体有着——对应关系，因此，每个相机的模式噪声必然有着不同的统计特性。

对于一幅给定图片采用小波域降噪求差值的方法^[5]估计其模式噪声。首先，估计图像局部的方差值，然后在小波域利用维纳滤波器降噪后重建无噪图像，再对原始图像和无噪图像做差得到模式噪声的估计值，具体过程如下：

(1) 给定图像 I ，计算其四级小波分解（本文采用 DB8 小波基），得到每级小波分解的水平细节分量 $h(i, j)$ 、垂直细节分量 $v(i, j)$ 及对角细节分量 $d(i, j)$ 。

(2) 对每个子带小波系数四个不同尺度的 $W \times W$ 邻域 N ， $W \in \{3, 5, 7, 9\}$ ，利用 MAP 估计来计算其原始无噪图像的方差：

$$\hat{\sigma}_w^2(i, j) = \max(0, \frac{1}{W^2} \sum_{(i, j) \in N} h^2(i, j) - \sigma_0^2), (i, j) \in J, \quad (1)$$

然后，选择四个方差中的最小值最为最后的估计结果：

$$\hat{\sigma}^2(i, j) = \min(\hat{\sigma}_3^2(i, j), \hat{\sigma}_5^2(i, j), \hat{\sigma}_7^2(i, j), \hat{\sigma}_9^2(i, j)), (i, j) \in J, \quad (2)$$

(3) 利用维纳滤波器得到降噪后的小波系数：

$$h_{den}(i, j) = h(i, j) \frac{\hat{\sigma}^2(i, j)}{\hat{\sigma}^2(i, j) + \sigma_0^2}, \quad (3)$$

对于 $v(i, j)$ 和 $d(i, j)$ ， $(i, j) \in J$ 都采用同样的方法进行计算。

(4) 对每级小波系数都重复上述 (1) — (3) 步，最后对降噪后的小波系数利用小波反变换重建降噪后的图像 I_n 。

(5) 最后，得到模式噪声的估计值 PN ：

$$PN = I - I_r, \tag{4}$$

2.2 基于模式噪声的特征提取

Jessica Fridrich 通过对模式噪声求相关性的方法^[5]进行数字图像来源认证, 该方法要求待测图像模式噪声与参考模式噪声之间的每个像素点一一对应(即所有参与计算的相机图像尺寸都相同)从而才能计算相关系数, 上述严格的同步性要求在实际应用中存在着很大的局限性. 为了克服其存在的问题, 本文在得到模式噪声的估计值 PN 后, 分别从空域、频域和小波域进行考虑, 从中提取出具有代表性的特征来表现不同相机模式噪声统计特性的不同. 包括: 324 维 markov 特征、2 维频谱特征、12 维小波特征(共 338 维), 下面将对其进行理论上的介绍和分析.

2.2.1 马尔可夫链

Markov 过程在理论上和实际问题中有着广泛的应用. Markov 链^[10]定义如下: 设随机序列 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots\}$ 满足如下条件:

(1) 对于每一个 $n(n = 0, 1, 2, \dots)$, $X(n)$ 取整数或它的子集(记为 I);

(2) 对于任意 $r + 1$ 个非负整数 $n_1, n_2, \dots, n_r, m(0 \leq n_1 < n_2 < \dots < n_r < m)$ 和任意正整数 k , 以及状态 $i_1, i_2, \dots, i_r, I, j$ 属于 I , 有

$$\begin{aligned} P\{X(m+k) = j \mid X(n_1) = i_1, X(n_2) = i_2, \dots, X(n_r) = i_r, X(m) = i\} \\ = P\{X(m+k) = j \mid X(m) = i\}, \end{aligned} \tag{5}$$

则称随机序列 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots\}$ 为马尔可夫链, 条件概率 $p_{ij}(m, m+k) = P\{X(m+k) = j \mid X(m) = i\}$ 称为马尔可夫链 $\{X(n), n = 0, 1, 2, \dots\}$ 在 m 时刻从状态 i 到状态 j 的 k 步转移概率, 当转移步数 $k = 1$ 时, $p_{ij}(1)$ 称为一步转移概率. 如果马尔可夫链具有有限状态空间 $I = \{1, 2, \dots, N\}$, 则以一步转移概率 p_{ij} 为元素可以构成一个 N 阶矩阵, 记为 P ,

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \dots & P_{NN} \end{bmatrix} \tag{6}$$

2.2.2 特征提取

一步马尔可夫状态转移概率矩阵 P 中的概率值 p_{ij} , 在随机过程中可以表示从状态 i 到状态 j 的一步转移概率, 将其应用在模式噪声中可以通过统计模式噪声数值之间不同方向的转移概率表示各点相邻像素分布的统计情况. 由于同一相机拍摄图片的模式噪声在空域的统计分布上有着很大的相似性, 因此一步 markov 状态转移概率可以作为区分不同相机个体拍摄图像的有效特征. 图 3 用一个 8×8 的小块直观的表示了相邻模式噪声值 i 与 j 之间四个方向的转移情况(其中 i, j 分别为相邻模式噪声值), p_{hij} 表示整个图像相邻模式噪声值 i 与 j 之间在水平方向上有着如图 3 水平方向分布的转移概率值

$$p_{hij} = \frac{\sum_{m=1}^r \sum_{n=1}^{c-1} \delta(PN(m, n) = i, PN(m, n+1) = j)}{\sum_{m=1}^{row} \sum_{n=1}^{col-1} \delta(PN(m, n) = i)}, i, j \in (-4, -3, \dots, 3, 4) \tag{7}$$

$$\delta(x = i, y = j) = \begin{cases} 1, & x = i \text{ and } y = j \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{8}$$

其中, r 和 c 分别表示图像的行数和列数. 同理, $p_{vij}, p_{dij}, p_{mij}$ 分别表示整个图像中模式噪声在垂直、

对角、次对角方向的转移概率。由于状态转移矩阵的阶数取决于模式噪声中不同值的数量，不同的值越多，阶数越大，计算量也越大。图4给出了4部相机10幅图像模式噪声均值取整后的直方图，通过观察直方图发现，每个相机的模式噪声值大部分都分布在零左右很小的范围内（-4到+4之间）。因此，为了降低运算量，本文通过设定阈值将模式噪声的值限定在-4到+4范围内，对于大于4的值我们将其置为4，小于-4的值我们将其置为-4，这样在每个方向上都可以得到一个 $(2*4+1)*(2*4+1)=81$ 维的状态转移概率矩阵，则在水平、垂直、对角和次对角方向一共可以得到324维markov特征来表示模式噪声值在空域的分布状态。

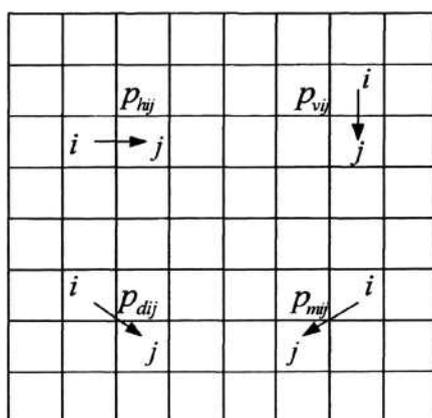


图3 模式噪声值之间的马尔可夫状态转移概率表示

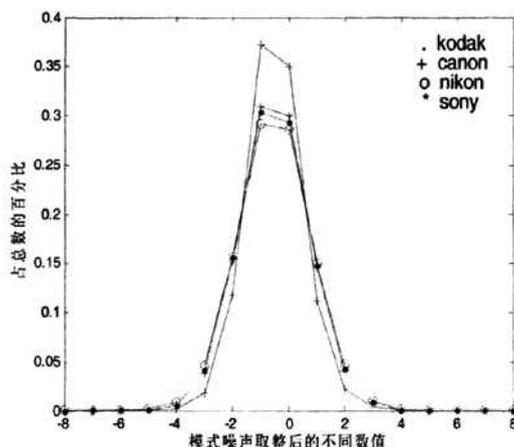


图4 模式噪声均值的直方图

在提取了模式噪声空域的markov特征后，观察不同相机模式噪声在频域和小波域的特点，发现不同相机的模式噪声在频域和小波域有着不同的特性，提取了如表1所示的14维特征。由于对图像降噪求差值后估计得到的模式噪声可能会保留图像内容中的细节信息，在通过对所得差值进行小波变换再针对其高频的分量提取特征，这样在一定程度上降低了图像内容对模式噪声的影响，实验结果也表明了该特征的有效性。

表1 14维频域和小波域特征

频谱特征	小波特征
频谱最大值点	水平细节分量的均值、方差、偏度、奇异值（4维）
频谱最小值点	垂直细节分量的均值、方差、偏度、奇异值（4维）
（2维）	对角细节分量的均值、方差、偏度、奇异值（4维）

3 实验结果及分析

3.1 实验样本及参数设置

为了评价本文算法的性能，在本次实验中采用了8部相机拍摄的各300幅图像（共 $300*8=2400$ 幅），相机参数及图像样本的参数如表2，为了更符合实际情况的应用，所选择的每种相机拍摄图片的内容都尽量丰富，包括：风景、建筑、人物等。每台相机选择150幅（共 $150*8=1200$ 幅）图像作为支持向量机交叉较验的训练样本，训练得到分类器的参数，然后用剩下的150幅（共 $150*8=1200$ 幅）图像作为测试样本。

表 2 相机参数及图像参数

相机品牌及型号	传感器类型	有效像素	图像分辨率	图像格式
Kadok DC290	不确定尺寸	215 万	1440*960	TIFF
Nikon E5700	2/3-inch CCD	500 万	1024*768	JPEG
Nikon E5900	1/1.8-inch CCD	510 万	2592*1944	JPEG
Sony DSC-F828	2/3-inch CCD	799 万	2048*1536	JPEG
Sony DSC-T100	1/2.5-inch CCD	810 万	2048*1536	JPEG
Sony DSLR-A550	Exmor CMOS	1420 万	4592*3056	JPEG
Canon EOS 450D	CMOS	1220 万	4272*2848	JPEG
Canon PowerShot Pro1	2/3-inch CCD	400 万	1024*768	JPEG

由于图像数据在经过 CFA 插值算法之后, R、G、B 三个通道之间的像素值有着很大的相关性, 为了减少计算量, 本文仅针对一个通道(R 通道)的模式噪声提取特征。在实验中降噪算法中的参数 σ_0 选取的值为 5。因为 Sony DSLR-A550 和 Canon EOS450D 两部相机其图像分辨率较高, 为了减少运算量本文将图像裁剪为 1024*768 大小进行实验, 增大图像尺寸会进一步增加判决正确率。

3.2 实验结果及对比

为了验证基于相机元器件来源认证方法针对相机个体的可靠性与稳定性, 本文在实验中 5 次随机选择训练样本进行实验, 分别针对 4 种品牌 8 部相机、4 部不同品牌的相机和 3 种相同品牌的 7 部相机进行了测试, 计算出了 5 次实验求平均的结果作为最后的分类正确率, 并与 Kharrazi 的方法^[1]和 Fridrich 的方法^[5]进行了对比, 实验结果如表 3、4、5 所示。

表 3 8 部相机分类正确率对比

	Kharrazi 的方法	Fridrich 的方法	本文方法
Kadok DC290	99.07%	98.6%	99.47%
Nikon E5700	89.6%	92.6%	97.47%
Nikon E5900	91.2%	94.6%	95.73%
Sony DSC-F828	84.13%	89.8%	98%
Sony DSC-T100	86.7%	95.2%	97.33%
Sony DSLR-A550	92.27%	97.6%	98.93%
Canon EOS 450D	92.27%	96.8%	97.73%
Canon PowerShot Pro1	89.6%	96.8%	97.33%
平均正确率	90.605%	95.25%	97.695%

表 4 4 部不同品牌相机分类结果比较

	分类准确率				平均准确率
	Kadok DC290	Nikon E5700	Canon Pro1	Sony DSC-F828	
Kharrazi 方	99.33%	97.73%	98.93%	98.27%	98.565%
本文方法	99.47%	97.6%	98.53%	99.87%	98.87%

表 5 同品牌相机分类结果比较

	Sony 相机			Nikon 相机		Canon 相机		同品牌之间平均正确率
	F828	T100	A550	E5700	E5900	Pro1	450D	
Kharrazi 方法	85.07%	86.8%	93.07%	90.13%	92%	90.27%	92.93%	90.325%
本文方法	98%	98%	99.6%	99.2%	99.47%	98.13%	98.27%	98.69%

其中, Kharrazi 的算法采用其提出的 34 维特征进行实验; Fridrich 的方法针对 R 通道提取并训练参考模式噪声, 为适应其算法的同步性要求, 所有图像所取块大小为 1024*768, 实验中用 100 幅训练参考模式噪声, 100 幅训练阈值 (取虚警率为 3%), 100 幅用于测试。

从表 3、表 4 和表 5 实验结果的数据可以看出, 本文的算法对来自四个品牌的 8 部相机平均分类正确率达到 97.695%, 对 4 部不同品牌相机的平均分类正确率达到 98.87%, 对 3 个相同品牌的 7 部相机平均分类正确率高达 98.69%。从实验结果对比的数据中可以看出本文方法针对相机个体的分类具有稳定性, 算法不会因相机品牌相同而失效, 从而验证了这种基于相机固有元器件特征算法的有效性和可靠性。同时本文方法在保证正确率的基础上改善了文献[5]的算法对图片同步性要求的不足, 解除了其方法在实际应用中的限制。

4 结论与展望

本文在分析数码相机成像系统的基础之上, 考虑了数字图像不同特征的产生根源, 从三个角度讨论了数字图像盲取证技术, 给出了一条清晰的研究思路, 并提出了一种基于模式噪声特征的数字图像来源认证方法, 以支持向量机作为分类器, 验证了该方法在针对相机个体判别数字图像来源上的优越性能。

在未来的研究工作中, 将把利用更好的降噪方法提取出不受图像内容影响的模式噪声作为研究的重点; 同时, 进一步研究能够代表相机个体特性的特征, 从而构建一个突破现有技术水平的更有效的数字图像来源认证系统。

参考文献

- [1] Kharrazi M, Sencar H T, Memon N. Blind Source Camera Identification. Proc. ICIP'04, Singapore, 2004:709-712.
- [2] S Bayram, H T Sencar, N Memon, et. al. Source camera identification based on CFA interpolation. In: Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing, ICIP2005. Genova, Italy: IEEE Press, 2005, III-69-72.
- [3] A.Swanminathan, M.Wu, K.J.R. Liu. Non-intrusive forensic analysis of visual sensors using output images[A]. Proceeding of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing[C], France, 2006.
- [4] Choi K S, Lam E Y, Wong K Y. Source camera identification using footprints from lens aberration. Digital Photography II, 2006, 6069 of Proc. SPIE:155-162.
- [5] J.Lukas, J.Fridrich, and M.Goljan. Digital Camera Identification from Sensor Pattern Noise. IEEE Transactions on Information Security and Forensics, vol. 1(2), pp. 205-214, June 2006.
- [6] 刘远航, 刘文开. 数码相机原理简论. 照相机, 2002 年第 05 期.
- [7] 侯雨石, 陈永飞等. 数码相机原理与系统设计研究. 光学技术, 2002.
- [8] Thomas Gloe, Karsten Borowka and Antje Winkler. Efficient estimation and large-scale evaluation of lateral chromatic aberration for digital image forensics. Proc. SPIE, Vol. 7541, 754107 (2010).
- [9] N. Khanna, A. K. Mikkilineni, A. F. Martone, G. N. Ali, G. T.-C. Chiu, J. P. Allebach, and E. J. Delp. A survey of forensic characterization methods for physical devices. Digital Investigation, vol. 3, pp. 17-28, 2006.
- [10] 李忠范, 高文森. 《数理统计与随机过程》. 吉林大学出版社, 2000 年 10 月第 1 版.