

图像伪造中模糊操作的异常色调率取证技术

王 波, 孙璐璐, 孔祥维, 尤新刚

(大连理工大学信息安全研究中心, 辽宁大连 116024)

摘要: 数字图像取证技术是对图像的完整性和真实性进行鉴别. 通过分析由成像系统形成的局部色彩相关性, 利用成像系统和模糊操作在数字图像局部色彩属性的差异, 定义数字图像异常色调集和异常色调率的概念, 提出了一种基于异常色调率的数字图像取证技术. 实验表明, 该方法能够有效地检测出对数码相机拍摄图像进行模糊操作的痕迹, 并能够对经过模糊操作的图像局部进行准确判断.

关键词: 图像取证; 模糊操作; 色彩属性; 异常色调率

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12A-2451-04

Image Forensics Technology Using Abnormity of Local Hue for Blur Detection

WANG Bo, SUN Lu-lu, KONG Xiang-wei, YOU Xin-gang

(Information Security Research Center of Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Digital image forensics aims to distinguish the forgeries from the authentic images. In order to detect blurring which can reveal the trace of tampering, we analyze the local color correlation and consistency caused by image acquisition devices. We find that blurring can distort the intrinsic local color correlation and consistency of legitimate images. Therefore, we define the abnormity of local color property as rate of abnormal hue, of which we then develop a forensics method to detect blurring. Experimental results show that this method can detect possible blurring in images acquired from digital cameras and locate the possible tampering regions with a relative high accurate rate in detection and location.

Key words: image forensics; blur; color property; rate of abnormal hue

1 引言

伪造照片的技术与照相技术有着几乎相同的历史, 随着近年来高清晰度数码相机的普及以及功能强大、操作简单的图像处理软件的广泛应用, 越来越多的人开始对拍摄的数码照片进行处理和修饰, 以达到润饰照片、增强视觉效果的目的. 最著名的 Adobe 公司的 Photoshop 图像处理软件, 其在线注册用户 2004 年已经达到五百多万, 被誉为最专业、最普及的图像处理软件. 与此同时, 一些别有用心的人也利用这类图像处理软件, 对数字图像进行篡改、伪造, 以达到攻击政治对手、恶意制造虚假新闻等不可告人的目的. 据报道, 2004 年美国总统竞选活动中, 在网上广泛流传着一张民主党候选人约翰·克里跟一位反越战女明星在集会上同台出现的图像, 引发的政治联想不言而喻. 虽然这张照片后来被证实是两张照片巧妙拼接在一起的产物, 但是其对约翰·克里政治命运的影响无法估量. 另一个著名的例子则是美国海军陆战队一等兵特德·博顿瑞尔克斯的“硬纸板事件”. 在伊拉克服役的特德曾与一位当地小男孩合影留念, 当时他让男孩拿着一张硬纸板并写上“Welcome Marines (欢迎海军陆战队)”以示友好. 然而不久

网络上就充斥着这个照片的各种版本, 而每个版本中硬纸板上的文字意思截然不同. 美国五角大楼迫于舆论的压力不得不对退役后的特德进行调查, 但是历时一年多也未能得到一个明确的结论.

类似事件所反映出的现实是, 目前由数字图像引发的风波和纠纷越来越频繁, 以数字图像作为有效司法证据的呼声也越来越高, 然而数字图像的完整性和真实性鉴别在技术上尚不成熟. 这样的矛盾给司法机关的取证、鉴定工作带来了很大的难度. 数字图像取证技术正是在这样的背景下应运而生, 目的在于通过主动或者被动的手段, 对数字图像的完整性和真实性进行鉴别^[1], 以保证执法机构证据链的完整和电子证据的真实.

Hany Farid^[2] 和 Popescu^[3] 将常见的图像篡改和伪造分为六大类, 即合成图像、变体图像、润饰图像、增强图像、计算机生成图像以及绘画图像. 其中合成图像是指由两幅以上的数字图像, 通过剪切各自的一部分合并生成的图像. 为了消除在拼接边缘产生的视觉上的畸变, 大多数合成图像都会采用模糊、淡化、渐变等操作进行处理. H. Farid^[4] 和 T-Tsong^[5,6] 以及 Jessica Fridrich^[7] 等人分别提出了针对简单图像拼接的数字

图像取证算法,但是这些算法都无法对拼接后进行过处理(如润饰操作等)的数字图像进行检测.本文利用模糊操作对数字图像色彩空间属性的影响,通过定义和量化数字图像的异常色调率来对数字图像进行取证.实验证明,该算法能够有效地检测和定位出在数字图像中使用模糊操作的痕迹.

2 模糊操作对色彩属性的影响

以 24 比特真彩色 BMP 图像为例,本文用下式表示一幅数字图像 I .

$$I = f(R, G, B) = f(\{r; r \in R\}, \{g; g \in G\}, \{b; b \in B\}) \quad (1)$$

其中, R, G, B 分别代表图像空域 RGB 色彩模型的三个通道值, f 表示映射函数.在数字图像的成像过程当中,大部分数码相机的成像传感器在一个像素点上只能获取 RGB 当中一种颜色,而其他颜色则是通过滤色阵列插值所得^[8].因此,数码相机直接拍摄的图像,在空域具有色彩局部一致性.除此之外,在数码相机形成 JPEG 图像的过程当中,有损压缩在一定程度上增强了这种局部一致性^[9].本文用式(2)来描述这个成像过程.

$$I = J\{f(k(\{r', g', b'\}, \{r', g', b'\}, \{r', g', b'\}))\} \\ r', g', b'; r' \in |r - r'| < \hat{\delta} \quad g' \in |g - g'| < \hat{\delta} \quad b' \in |b - b'| < \hat{\delta} \quad (2)$$

其中, J 表示 JPEG 压缩的系统函数, k 表示滤色阵列函数, $\hat{\delta}$ 代表滤色阵列邻域大小, r', g', b' 分别表示像素的 r, g, b 邻域值.

模糊操作是一种最常见的图像处理.图 1 和图 2 显示了对一幅数码相机拍摄的自然图像进行局部模糊处理后效果的对比.可以直观地看出,模糊操作最重要的作用是将明显的边缘淡化甚至消除,其基本原理是对图像的局部邻近像素值进行低通滤波.

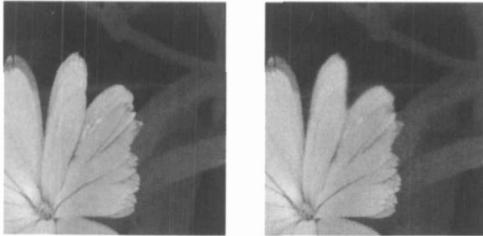


图 1 左图为一幅由 Kodak DC290 数码相机拍摄的原始数字图像,右图为经过模糊处理后的数字图像,黄花的上部边缘经过了模糊处理

在 Photoshop 软件当中,用户可以选择不同的模糊半径和强度对图像进行操作.本文用式(3)来描述模糊操作对图像的影响.

$$I' = f \left(l \left[\begin{array}{l} \{r; r \in |r - \bar{r}| < \delta\}, \\ \{g; g \in |g - \bar{g}| < \delta\}, \\ \{b; b \in |b - \bar{b}| < \delta\} \end{array} \right] \right) \quad (3)$$

其中, l 表示滤波器函数, δ 表示模糊邻域大小, $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ 分别表示像素的 r, g, b 的邻域值.对比式(2)和式(3),可见两式对图像的色彩空间属性产生了不同的影响.在数码相机的成像过程中,以 R 通道为例,指定像素点的 R, G 和 B 邻域响应滤色阵列函数 k 获得该像素点的 R 色彩分量信息, G 和 B

通道亦然.通过滤色阵列函数 k , RGB 色彩空间的三个分量在邻域半径为 δ 的局部建立了联系,三个色彩分量具有较强的相关性.而模糊操作与滤色阵列函数不同,其对 RGB 色彩空间三个通道的操作通常是相对独立的.即便是经过精心设计的模糊算法,同时利用三个颜色分量的邻域获取中心像素的色彩,也难以保证线性等量修改中心像素的三个颜色分量.这种对于色彩通道相对独立和非线性均匀的修改方式,会严重破坏数码相机所拍摄的原始图像在色彩属性上所具有的相关性.另一方面,数码相机直接拍摄的自然图像,通常经历了 JPEG 压缩,即响应了 JPEG 系统函数 $J(\cdot)$.由于 JPEG 系统对数字图像的亮度和色彩信息采用了非均匀的压缩比率,对色彩信息的高压缩比率(即低采样率和高量化系数矩阵)使得色彩信息在局部的一致性和相关性更为明显.

因此,我们得到模糊操作对图像色彩属性的影响的两个定性分析结果:

(1) 成像系统使图像色彩在局部具有相关性,模糊操作破坏了这种相关性;

(2) JPEG 压缩增强了图像色彩的局部一致性,模糊操作破坏了这种一致性.

3 利用异常色调率检测模糊的算法

数字图像最常用的色彩模型有 RGB 颜色模型以及 HSI 颜色模型等^[9].RGB 色彩模型由于采用了面向硬件设备的加色合成法而被广泛地应用.而 HSI 色彩模型则根据人类视觉系统的感知特性,将图像分为色调(Hue)、饱和度(Saturation)和密度(Intensity)三个基本特征量.密度信息与图像的色彩无关,仅与成像的亮度相关,而色调和饱和度则与人类感知色彩的方式紧密相连.

我们在 HSI 色彩空间的色调域 H 中提取反映自然图像色调的局部一致性和相关性的特征——异常色调值集合 H_{abn}^M 和异常色调率 η_{abn} 并利用它们对图像中可能存在的模糊操作进行检测^[10].

设一幅 $m \times n$ 图像 I , 所有像素的色调值在色调域 H 中的集合为 $H = \{h_{i,j} | 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n\}$, 对于某一像素色调值 $h_{i,j}$ 设 $H_{i,j}^8$ 表示以 $h_{i,j}$ 为中心的 8×8 邻域内像素色调值集合(不包括中心像素), $\Delta h_{i,j}$ 和 $\Delta h_{i,j}$ 分别表示 $h_{i,j}$ 与其 8×8 邻域内像素色调差值的最大值和最小值,即:

$$\begin{cases} \Delta h_{i,j} = \max\{|h_{i,j} - h_{i',j'}|\} \\ \Delta h_{i,j} = \min\{|h_{i,j} - h_{i',j'}|\} \end{cases}, h_{i',j'} \in H_{i,j}^8 \quad (4)$$

设图像 I 的异常色调值集合 $H_{abn}^M = \{h_{abn1}, h_{abn2}, \dots, h_{abnM}\}$ 是 H 的一个子集,其中 M 表示集合 H_{abn}^M 的势.我们按如下方式定义图像 I 对应的异常色调值集合 H_{abn}^M .

定义 1 异常色调值集合 H_{abn}^M .

(1) $H_{abn}^0 = \emptyset$, 即 H_{abn}^M 初始为空集;

(2) 按行扫描集合 H 中的元素 $h_{i,j}$. 设已得 $H_{abn}^k = \{h_{abn1}, h_{abn2}, \dots, h_{abnk}\}$, 则当且仅当某色调值 $h_{i,j}$ 满足式(5)右边的条件时,令 $h_{abn(k+1)} = h_{i,j}$ 即

$$h_{abn(k+1)} = h_{i,j} \Leftrightarrow \begin{cases} 0 < \Delta h_{i,j} \leq \Delta h_{i,j} \leq \tau_0 \\ \forall h_{abnm} \in H_{abnr}^k \mid \Delta h_{i,j} - \Delta h_{abnm} \neq 0 \\ 0 \leq m \leq k \end{cases} \quad (5)$$

$h_{i,j}$ 为第 $k+1$ 个异常色调值, 从而得

$$H_{abn}^{k+1} = \{h_{abn1}, h_{abn2}, \dots, h_{abnk}, h_{abn(k+1)}\} \quad (6)$$

(3) 扫描 H 中的所有元素 $h_{i,j}$, 得到图像 I 对应的异常色调值集合 H_{abn}^M .

从定义 1 中可见, 异常色调是指在图像的 8×8 邻域中单独出现, 并与邻域内像素色调差的最大值不超过某一范围的色调值. 异常色调值集合 H_{abn}^M 的势, 即异常色调值的总数 M 反映了一幅图像的色调值在局部邻域范围内的相关性和一致性程度. 定义 1 中的阈值 τ_0 排除了图像本身在剧烈边缘处的色调突变对异常色调值计算的影响, 本文根据大量实验, 采用经验阈值 $\tau_0 = 0.05$. 而要求异常色调值在集合 H_{abn}^M 中单独出现, 可以排除相邻颜色由于成像器件噪声和 JPEG 压缩形成的个别色调畸变.

定义 2 已知一幅 $m \times n$ 图像 I 中的所有色调值的集合 H 及异常色调值集合 H_{abnr}^M , 则异常色调率 η_{abn} 为

$$\eta_{abn} = \frac{|H_{abnr}^M|}{|H|} = \frac{M}{m \times n} \times 100\% \quad (7)$$

其中 $| \cdot |$ 表示集的势.

从式(7)中, 我们可以看出, 异常色调率 η_{abn} 即指异常色调值的总数占图像像素总数的百分比, 它表示了一幅图像的全局异常色调率. 存在模糊操作的图像的全局异常色调率通常为正常图像的十倍以上, 有的可高达几十倍.

在实际检测中, 为了对一幅图像中可能存在的模糊操作进行定位, 我们首先对待测图像进行分块, 然后计算每个图像块的局部异常色调率 η_{abn_local} . 将局部异常色调率 η_{abn_local} 高于某一阈值的像素块视为可能经过模糊操作的可疑像素块. 由于一些自然图像的场景范围广, 图像中会存在由于焦距不准而造成的自然模糊的图像块. 为了区分自然模糊和人为模糊, 计算所有可疑像素块的异常色调率集合 $\{\eta_{abn_local} \mid \eta_{abn_local} > \tau_1\}$ 中元素的相对标准差 $\sigma_{relative}$.

$$\sigma_{relative} = \frac{\sigma_{abn}}{m_{abn}} \quad (8)$$

其中 m_{abn} 和 σ_{abn} 分别为可疑像素块异常色调率集合中元素的均值和均方差. τ_1 是判断某一图像块是否可疑的异常色调率取值的门限. 通常, 由于模糊处理大大地破坏了数码相机拍摄所得图像的色调相关性和一致性, 因此, 存在模糊操作的图像块的异常色调率会发生剧烈的突变, 其突变比例大多在十倍以上, 甚至可达几十倍. τ_1 门限主要根据实际中应用大量已知样本进行实验, 在虚警率和漏警率方面找到一个最优的权衡点获得.

实验发现, 对于自然模糊的像素块, 其局部异常色调率的相对标准差 $\sigma_{relative}$ 往往低于人为模糊的像素块的对值. 也就是说, 自然模糊会较人为模糊表现得更加均匀.

综上所述, 用本文算法对图像中可能存在的模糊操作进行检测的具体步骤如下:

(1) 将图像 I 分成 N 个 $m_1 \times n_1$ 的像素块 $I_i, i = 1, \dots, N$, 分别利用式(5)与式(7), 计算各个图像块 I_i 的异常色调值集合 H_{abn}^M 和色调异常率 η_{abni} ; 通过下式得到可疑图像块的异常色调率集合 $\{\eta_{abn_local} \mid \eta_{abn_local} > \tau_1\}$;

(2) 根据式(8)计算所有可疑图像块的色调异常率的相对标准差 $\sigma_{relative}$; 利用门限 τ_2 进行判决, 判决如式(9)所示. 其中的 τ_2 与 τ_1 一样, 是在大量已知样本中通过实验测定的.

$$\begin{cases} \sigma_{relative} \geq \tau_2 & \text{可疑像素块为人为模糊} \\ \sigma_{relative} < \tau_2 & \text{可疑像素块为自然模糊} \end{cases} \quad (9)$$

(3) 将判定为经过人为模糊操作的图像块做出标记, 输出检测结果.

4 实验结果与分析

我们对提出的算法进行了实验验证. 实验所采用的原始图像为 Kodak DC290 和 Nikon E5700 数码相机拍摄的 JPEG 图像, 模糊工具采用了 Photoshop CS8.0.1, 模糊主直径从 30 ~ 100 不等. 除了对原始图像和正常模糊处理的图像进行检测之外, 我们还对拼接后进行模糊处理的伪造篡改图像进行了检测, 结果如表 1 所示.

表 1 测试结果

| 图像类型 | 图像数目 | 检测正确数 | 检测错误数 | 正确率 (%) |
|-----------------|------|-------|-------|---------|
| KodakDC290 原始图像 | 117 | 111 | 6 | 94.9 |
| KodakDC290 模糊图像 | 47 | 45 | 2 | 95.7 |
| KodakDC290 合成图像 | 13 | 12 | 1 | 92.3 |
| NikonE5700 原始图像 | 119 | 97 | 22 | 81.5 |
| NikonE5700 合成图像 | 7 | 6 | 1 | 85.7 |



图 2 左图为某一测试样本, 图中的白衣男子为伪造部分; 右图为测试样本的检测结果

图 2 左图是测试集中的一幅合成图像, 图中的白衣男子为合成部分, 为了使伪造图像逼真可信, 对合成部分进行了适度的模糊操作. 图 2 右图是应用本文算法对左图进行检测的结果. 算法将认为可疑的图像块用白色标出. 可以看出, 本文算法能够较为准确地对模糊的图像进行检测和一定精度的局部定位.

5 总结和展望

本文详细分析和探讨了模糊操作对数码相机拍摄图像的色彩属性影响, 讨论了模糊操作对成像过程形成的局部色彩相关性和一致性的破坏, 提出了一种利用局部异常色调率对模糊操作进行检测和定位的方法. 实验表明, 该方法对正常的局部模糊操作图像以及通过拼接和模糊制作的篡改图像, 具

有准确的检测和定位能力。

随着伪造者的伪造技术的日益提高,单一的取证技术将无法实际满足取证和鉴定的需要。未来可靠的取证技术需要依靠多角度,全方位的对多种取证算法的综合运用。

参考文献:

- [1] Lyu Siwei. Natural Image Statistics for Digital Image Forensics [D] . USA: Department of Computer Science, Dartmouth College, 2005.
- [2] Hany Farid. Creating and Detecting Doctored and Virtual Images; Implications to the Child Pornography Prevention Act [R] . USA: Department of Computer Science, Dartmouth College, 2004.
- [3] Alin C. Popescu, Hany Farid. Statistical tools for digital forensics[A] . 6th International Workshop on Information Hiding, LNCS vol. 3200[C] . New York ; Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2004. 128- 147.
- [4] Alin C Popescu, Hany Farid. Exposing Digital Forensics by Detecting Duplicated Image Regions [R] . USA: Department of Computer Science, Dartmouth College, 2004.
- [5] Tian-Tsong NG, Shih-Fu Chang. Blind Detection of Photomontage Using Higher Order Statistics[DB/ OL] . <http://www.ee.columbia.edu/dvmm/>, Jan, 2004.
- [6] Tian-Tsong NG, Shih-Fu Chang. A model for image splicing [A] . IEEE Conference Proceedings on Image Processing[C] . New York; IEEE Press, 2004. 1169-1172.
- [7] Fridrich J, Soukal D, Lukáš J. Detection of Copy-move Forgery in Digital Images[DB/ OL] . <http://www.ws.binghamton.edu/fridrich/publications.html>, 2004.
- [8] 徐之海, 李奇. 现代成像系统[M] . 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [9] 章毓晋. 图象工程上册: 图象处理和分析[M] . 北京: 清华

大学出版社, 1999. 19- 21.

- [10] 刘文锋. 基于图像连续性的数字图像取证技术研究[D] . 大连: 大连理工大学, 2005.

作者简介:



王 波 男, 1981 年 10 月出生于四川省自贡市, 现为大连理工大学博士研究生. 从事图像取证方面的研究工作.
E-mail: dlut.wangbo@gmail.com



孙璐璐 女, 1981 年 3 月出生于山东省烟台市, 现为大连理工大学硕士研究生. 从事图像取证方面的研究工作.
E-mail: lulu.sun@gmail.com

孔祥维 女, 1963 年 4 月出生于湖北省, 现为大连理工大学电信学院教授, 博士生导师, IEEE 信号处理和通信分会会员, 中国电子学会通信分会、多媒体信息安全专委会副主任, 中国图像图形学会学术委员会委员及理事, 中国图像图形学会东北分会副秘书长, 长期从事多媒体信息处理、多媒体信息安全以及模式识别的研究工作.

E-mail: kongxw@dlut.edu.cn

尤新刚 男, 1963 年 7 月出生, 现为大连理工大学电信学院兼职教授, 国家信息安全测评认证管理委员会研究员, 中国电子学会通信学会高级会员, 通信学会分会委员, 信息隐藏专家委员会主任委员, 中国计算机学会理事, 长期从事多媒体通信及信息安全的研究.

E-mail: youxg@dlut.edu.cn