

# 基于颜色差分特性的图像篡改检测

卢燕飞, 牛佩佩, 周 骥

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘 要:** 由于自然场景中目标物体表面的反射特性, 以及图像采集过程中的 CFA 插值算法会使得图像三颜色分量之间具有相关性, 特别是颜色分量的高频信息之间有近似相等的关系. 拼接篡改操作会降低颜色高频分量的谱间相关性, 同时也会给图像带来额外的高频信息. 本文利用自然图像颜色通道高频分量之间的相关性, 分析颜色差分图像中高频信息的分布情况来检测是否有拼接篡改操作. 实验证明本文提取的高频特征分类效果较好, 能够检测出图像的拼接篡改边缘.

**关键词:** CFA 插值; 相关性; 高频; 颜色差分; 拼接

**中图分类号:** TN919.8; TP309.2      **文献标志码:** A

## Digital image forensics based on the color differential characteristics

LU Yanfei, NIU Peipei, ZHOU Ji

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Due to the reflective properties of the target object in natural scene and the CFA interpolation algorithm of imaging process, there is a high correlation among red, green and blue channels. Especially, high-frequency of three color components are approximately equal. Splicing process will reduce the correlation of three color channels and introduce some additional high frequency. In this paper, we present a new method that uses the inter-channel correlation to analyze the distribution of high-frequency in color difference image and detect the tampered regions. Experimental results show that the proposed method has a good performance, which can accurately locate the splicing edges in image forgery.

**Key words:** CFA interpolation; correlation; high-frequency; color difference; splicing

随着数字科技的发展, 数码相机已经代替胶片相机出现在人们的日常生活中, 随之而来的是各种图片编辑软件的出现, 使得一般的使用者能够通过多种方式轻易地编辑数字图像的内容, 给大众带来错误的信息. 这些图像编辑技术对图像的真实性提出了严峻的挑战. 由于主动进行数字图像篡改检测的方法需要预先在数字图像中嵌入预定的额外信息, 会增加成像系统的成本, 所以目前数字图像真实性检测方法的研究重点集中在被动检测技术上.

数字图像真实性被动检测技术在近几年来引起很多的学者关注, 如何实现对数字图像篡改的盲检测已成为当前数字图像真实性盲取证技术研究的重要课题. 由于数字成像系统的原因, 在数字图像中会留下很多独特的痕迹, 可以作为检测的内部特征对数字图像进行篡改检测. 哥伦比亚大学建立了标准数字图像库, 包括真实图像及拼接图像, Hsu<sup>[1]</sup>教授提出了利用数码相机响应函数(CRF)一致性的图像拼接篡改检测算法. 如果利用数码相机的模式噪声

收稿日期: 2013\_10\_14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61071143)

作者简介: 卢燕飞(1971—), 男, 江西樟树人, 高工. 研究方向为数字图像认证. email: yflu@bjtu.edu.cn.

来检测拼接区域<sup>[2]</sup> 需首先得到某种相机的参考相机模式噪声 需拥有大量的数字图像来做基础,使数字图像盲检测的工作量变得很大. Johnson<sup>[3]</sup> 利用不同图像中光照条件不一致性对图像进行检测,对图像提取闭合边界并分成若干个块,估计各个块的二维光源方向来检测伪造部分. W. Luo<sup>[4]</sup> 等人提出了基于拼接篡改会破坏图像内在的块效应特征矩阵 (BACM) 的对称特性的理论来对图像真实性进行盲检测. 以上这些方法是依赖于相机成像系统的固有特性和篡改后期处理痕迹来进行拼接检测的方法.

数字图像的 CFA 插值算法对图像像素间相关性,以及对图像颜色通道间相关性的影响可以看作是一种图像内在的特征,针对拼接篡改会破坏由 CFA 插值算法形成的这种内在特征来对拼接操作进行检测. H. Farid<sup>[5]</sup> 归纳了各种常用的 CFA 插值算法,然后通过 EM 算法得到概率分布图和插值系数  $\alpha$  来判别一幅图像使用了哪种插值算法. John S. Ho<sup>[6]</sup> 利用图像红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 三颜色间的相关性及颜色差分图像经过傅里叶变换后的方差特征,来对不同图像所使用的 CFA 插值算法进行检测分类. Y. Long<sup>[7]</sup> 用像素相关性的二阶模型并采用 BP 神经网络作为分类器,通过求解最小化问题对 CFA 插值系数进行估计. A. C. Gallagher<sup>[8]</sup> 发现线性和双三次插值会使二阶方差方程中存在周期性,将二阶变换得到的像素进行傅里叶变换就能计算出这

个周期,这个周期性就是由于 CFA 插值过程中算法的重复性引入的,因此这种方法在区分自然图像和计算机合成图像效果比较明显. 以上算法均可以实现经过拼接篡改后图像与真实图像的鉴别,但都不适用于拼接图像中拼接部分的准确定位.

基于 CFA 插值算法会使图像 R、G、B 三颜色分量间具有相关性,使得三颜色分量在高频部分体现出高度相似的特征,在真实边缘过渡区与拼接边缘过渡区在颜色差分图像中的表现有明显的不同,本文作者提出在不同的颜色差分图像中,估计差分边缘高频分量的特征来对图像进行篡改检测. 相关实验结果表明本文方法能够检测出图像的篡改边缘.

### 1 图像颜色分量中的边缘高频信息

数字图像成像过程如图 1 所示,图 1 中自然场景在通过光学镜头后会在传感器上得到相应的亮度值,由于目前的大多数数码相机只有一个电荷耦合元件 (CCD) 或互补氧化金属半导体 (CMOS),需要通过颜色滤波器阵列 (CFA) 来获取缺失的图像像素值,常用的 CFA 滤波器为 Bayer 色彩滤镜. Bayer 滤镜中对亮度分量绿色 (G) 的采样频率是对色度分量红色 (R)、蓝色 (B) 采样频率的两倍,原因是人眼对绿色比对红色、蓝色更敏感,因此采样后的绿色通道的频谱不易发生混叠,而使绿色通道的高频信息保留的比红色和蓝色更加完整.

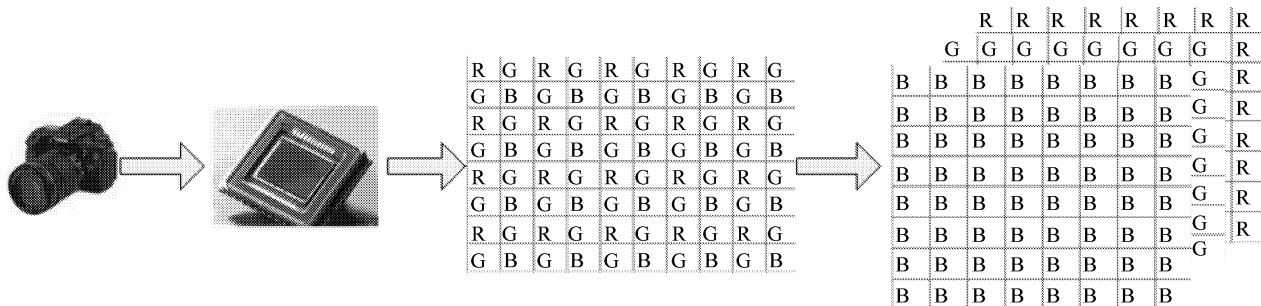


图 1 数字图像成像过程

Fig. 1 Process of digital image

#### 1.1 自然图像边缘高频信息

对于自然图像来讲,由于现实世界中物体表面的反射特性会引起自然图像 3 个颜色通道之间的依赖关系, R、G、B 三颜色通道之间有很高的相关性. 当不管用 R、G、B 中哪种颜色去代替另外一种颜色 (例如变成 RBB 图像),在显示得到的图像时都不会发生模糊失真的情况,表明 3 个色彩通道的像素值在图像每个区域的变化是同步的,在一个颜色向另一个颜色过渡时, R、G、B 三色的像素值也是同时从一个值向另一个值变化,可知自然图像三色彩通

道在边缘及纹理信息上是一致的<sup>[9]</sup>,也就是说自然图像三颜色通道之间有很高的相关性. Gunturk 等人在频域中也证明了这个结论<sup>[10]</sup>,利用由一个低频滤波器  $h_0 = [1/4 \ 1/2 \ 1/4]$  和一个高频滤波器  $h_1 = [1/4 \ -1/2 \ 1/4]$  构成的二维可分离滤波器将多幅图像的 3 个颜色通道分别分解为 4 个子带: 低频信息 (LL)、水平高频信息 (LH)、垂直高频信息 (HL) 及对角线高频子带 (HH),计算 R、G、B 通道对应子带之间的相关性,实验结果证明 3 个高频子带 (LH、HL、HH) 间的相关性均高于 0.9.

1) 成像过程中 CFA 插值算法对传感器上各颜色通道中缺失的颜色像素值进行插值估计, 最初的 CFA 插值算法有最邻近像素插值、双线性插值等非自适应插值算法, 以双线性插值算法为例, 双线性插值在 R、G、B 颜色通道上的采用的滤波器是不同的, 分别为  $h_R$ 、 $h_G$  和  $h_B$ , 通常采用的矩阵为

$$h_G = \begin{bmatrix} 0 & 1/4 & 0 \\ 1/4 & 1 & 1/4 \\ 0 & 1/4 & 0 \end{bmatrix},$$

$$h_R = h_B = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 & 1/4 \\ 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/4 & 1/2 & 1/4 \end{bmatrix}.$$

由图 2 看出采用双线性等非自适应插值算法进行插值后 R、G、B 颜色通道的 3 个高频子带与未经插值前的高频信息有很大的差异性, 尤其是红色和蓝色的高频信息被破坏的相对较严重, 而低频分量则变化很小, 可知虽然非自适应插值算法简单易实现, 但会破坏各颜色通道的高频信息, 在恢复图像边缘信息时会出现细节失真. 因此目前应用的一些 CFA 插值算法结合不同颜色通道具有相似的高频信息, 利用高频信息丰富的 G 通道的高频分量来恢复 R 和 B 通道的高频分量, 能够很好的恢复图像边缘的细节信息. 目前常用的 CFA 插值算法有自适应滤波器插值算法、恒色度的定向边缘算法等.

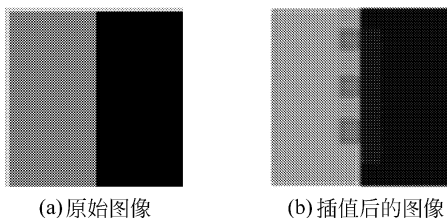


图 2 原始图像及双线性插值后的图像  
Fig. 2 Original image and interpolated results

2) 由以上可知由于 CFA 插值算法使自然图像三颜色通道间的高频信息具有很高的相关性, 其相关性平均值大于 0.98, 并且 3 种颜色间的差分图像是趋于平坦的, 则说明 R、G、B 颜色通道的高频分量不仅是高度相关并且是彼此近似相等的<sup>[11]</sup>. 由此可以得到

$$H^F - H^C = H_l^F + H_h^F - H_l^C - H_h^C \approx H_l^F - H_l^C \approx f_{LFF}(H^F - H^C) \quad (1)$$

式中:  $f_{LFF}$  表示一个低通滤波器;  $H$  表示颜色通道的数据信号,  $F$ 、 $C$  分别表示不同颜色通道;  $l$  和  $h$  分别表示颜色通道的低频和高频信息, 有  $H_l^F \approx H_h^C$ , 一般情况下, 式(1)中的  $C$  选择 G 颜色分量,  $F$  选择 R、B 颜色分量. 由式(1)得到颜色通道间的差分图像可

以等价于图像经过了一个低通滤波器, 相应的高频分量被过滤掉, 只剩下低频分量. 由式(1)可以很容易地看出不同颜色通道的颜色差分信号是一个低通、平缓信号, 差分信号平面在边缘处也比原颜色通道边缘处平缓, 减少了相应的高频分量, 如图 3 所示. 图 3(b) 中明显比图 3(a) 中少了边缘细节信息.

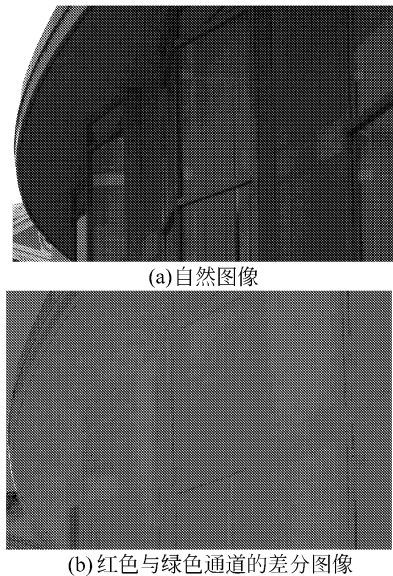


图 3 自然图像与红绿差分图像的对比  
Fig. 3 Contrast of original image and color difference image

自然图像真实边缘(图 4(a) 中横实线处)的红、绿颜色信号及两者的差分信号如图 4(b)、(c)、(d) 所示.

由成像系统原理可知, 数码图像中的目标边缘是有一个变化过渡区的, 且宽度至少是 1 个像素, 如图 4(b) 和图 4(c) 所示, 但对于相应的颜色差分图像(见图 4(d)) 中的目标边缘来说, 边缘的过渡区宽度变得更宽, 边缘像素值变化地更慢, 可知与自然图像三颜色通道相比, 颜色差分图像在图像边缘处减少了相应的高频信息, 边缘差分信号可视为 1 个平滑信号  $f(x, y) = f_{smooth}(x, y)$ , 其中  $(x, y)$  表示像素点坐标位置.

### 1.2 拼接边缘处的高频信息

对于拼接篡改操作, 本质上就是用一个像素矩阵将原图像中某个部分掩盖的操作, 一般将具有较清晰边缘的物体粘贴在原图像中, 由于拼接边缘不再受到数码图像成像过程和光学镜头等因素的影响, 拼接后的边缘在各颜色通道中是比较锐利的, 没有相应的边缘过渡区(这里先不考虑拼接图像后进行了相关的后处理操作, 如模糊操作, 对比度增强等) 如图 5 所示, 尽管边缘两侧的像素值在各自相邻区域内有一定的相关性, 但边缘两侧的像素值之

间是没有相关性的,R分量和B分量在此边缘处的高频信息不再是复制G分量的高频信息,相应的此

边缘的三颜色通道中高频信息间的相关性会降低,不再是近似相等的关系.

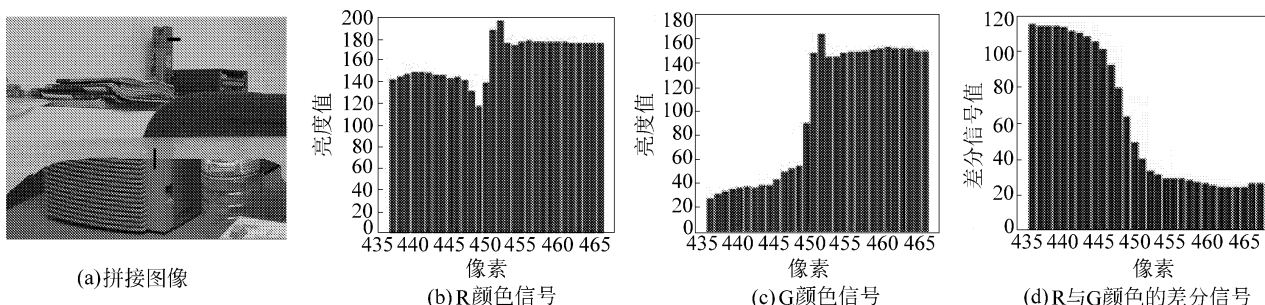


图4 自然边缘点(图(a)中横实线)上的R、G及两者的差分信号

Fig. 4 Red, green and red-green intensity along green dotted line of tampered image

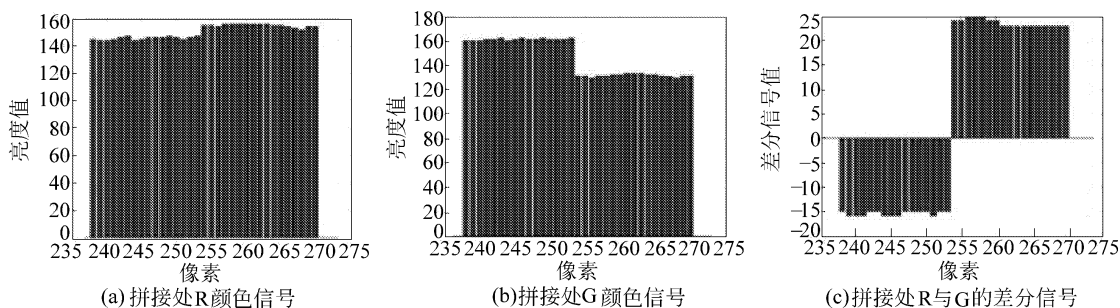


图5 拼接边缘点(图4(a)中竖实线)上的R、G及两者的差分信号

Fig. 5 Red, green and red-green intensity along red dotted line of tampered image

由上面的讨论及式(1)可知,拼接图像的颜色差分图像有(以红色和绿色的差分图像为例)

$$H^R - H^G = f_{LPF}(H^R - H^G) + H_h^R - H_h^G \quad (2)$$

式中的  $H_h^R - H_h^G$  对应拼接边缘处的高频分量,即  $H_h^R$  和  $H_h^G$  不再近似相等,拼接后的图像颜色通道间的高频分量在拼接边缘处的相关性会降低.

拼接图像中在拼接边缘处的三颜色高频通道相关性降低,但是在图像中非篡改区域和篡改区域内部(不包括拼接边缘)的边缘高频分量依旧是高度相关的,式(2)中相应的高频主要体现在拼接边缘上,拼接边缘破坏了颜色差分图像的整体平滑性,那么拼接边缘处的剖面像素信号  $f(x, y)$ ,可视为一个平滑信号  $f_{smooth}(x, y)$  和一个高频信号  $f_{sharp}(x, y)$  的叠加:  $f(x, y) = f_{smooth}(x, y) + f_{sharp}(x, y)$ . 前者对应差分图像中边缘处的平缓的低频信息,后者则表示差分图像中拼接边缘的相对高频分量,以上的信号对于边缘两侧的颜色值相差愈大愈明显. 因此对于一幅经过拼接篡改的图像,其颜色差分图像中在拼接边缘包含有相对较高的高频分量,因此可以提取差分图像高频分量的特征来检测差分图像高频信息的分布情况.

## 2 特征选取及算法流程

### 2.1 颜色高频信息特征选取

1) 针对颜色差分图像高频信息分布情况的分析,选取差分图像小波分解中边缘点一定邻域内高频信息的数据极差及高频数据进行过归一化后的离散系数、四分位数作为特征量. 极差(Range)是指在一定区域中最大值和最小值的差  $R_i = I_{max} - I_{min}$ ,  $I_{max}$  为一组数据的最大值,  $I_{min}$  为该组数据的最小值,体现了数据的变化范围. 离散系数(Coefficient of Variance)表示的是在不同水平(数据的平均值不同)下数据的离散程度,离散系数表示为

$$C_v = \sigma / E \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  为一组数据的标准差;  $E$  为该组数据的均值. 四分位数(Quartile)是将一组数据按从小到大顺序排序后,提取处在 25%、50%、75% 位置上的数据值  $Q = \{Q_{25\%}, Q_{50\%}, Q_{75\%}\}$ ,  $Q_{25\%}$  表示处在 1/4 位置上的数据值,其他类似,可以体现这组数据在各个部分的分布情况.

2) 相关系数表示两个随机变量之间线性关系的强度,本文采用标准互相关系数来度量三颜色通道高频分量之间的相关性,并以此作为衡量颜色高

频信息相关性的特征. 标准互相关系数为

$$\rho(I_1, I_2) = \frac{[\sum_{(n_1, n_2)} (I_1(n_1, n_2) - E_{I_1})(I_2(n_1, n_2) - E_{I_2})]}{\sqrt{[\sum_{(n_1, n_2)} (I_1(n_1, n_2) - E_{I_1})^2] \sqrt{[\sum_{(n_1, n_2)} (I_2(n_1, n_2) - E_{I_2})^2]}}} \quad (4)$$

式中:  $I_1, I_2$  为两个不同的矩阵,  $E_I = 1/M \times N \sum_{n_1=1}^M \sum_{n_2=1}^N I(n_1, n_2)$  为矩阵  $I$  的均值,  $M, N$  分别为矩阵

的行和列,  $1 \leq n_1 \leq M, 1 \leq n_2 \leq N$ , 相关性系数  $|\rho(I_1, I_2)| \leq 1$ ,  $\rho$  值越接近 1 表示两个矩阵的相关性就越强.

### 2.2 实验方案

本文提出了基于图像颜色通道间高频相关性及颜色差分图像高频信息特征的图像篡改检测方法, 具体的特征提取过程如图 6 所示.

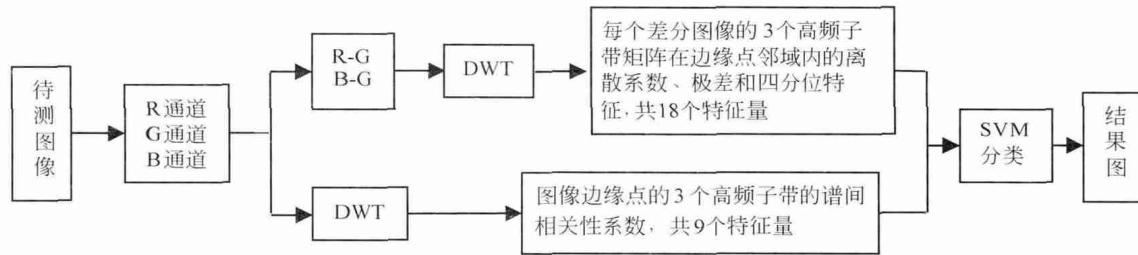


图 6 基于图像颜色通道相关性的特征提取方案

Fig. 6 Features extraction scheme based on color channel correlation

方案实现步骤如下:

1) 对各通道像素值进行小波变换. 将彩色图像转换为红、绿、蓝的 3 个单独的颜色通道, 对 3 通道分别进行一级二维离散小波变换 (DWT), 提取其中的水平高频子带、垂直高频子带和对角线高频子带  $\{LH, HL, HH\}$  共  $3 \times 3 = 9$  个小波子带图像, 表示为  $WT_m^X$ , 其中  $X \in \{R, G, B\}$  表示为不同的颜色通道,  $m \in \{LH, HL, HH\}$  表示不同方向的高频分量.

2) 对颜色差分图像进行小波变换. 计算红绿差分图像和蓝绿差分图像, 对两个差分图像分别进行小波域变换, 可以得到  $3 \times 2 = 6$  个高频子带, 表示为  $DIFWT_n^Y$ , 其中  $Y \in \{R\_G, B\_G\}$ ,  $R\_G$  表示的红绿差分图像,  $B\_G$  表示蓝绿差分图像,  $n \in \{LH, HL, HH\}$  表示不同方向上的高频分量.

3) 提取差分图像边缘. 对  $R\_G$  差分图像的低频分量 LL 进行 Canny 边缘检测, 提取边缘信息.

4) 提取边缘点邻域块的特征量. 在每一个边缘点  $b \times b$  邻域块内, 计算  $DIFWT_n^Y$  的数据极差及归一化后的离散系数、四分位数特征, 每个块有 3 个特征量, 共 18 个特征量, 同时计算邻域块内的小波子带图像  $WT_m^X$  之间的互相关系数  $\rho$ , 分别为  $\rho\{WT_m^R, WT_m^G\}$ ,  $\rho\{WT_m^R, WT_m^B\}$ ,  $\rho\{WT_m^B, WT_m^G\}$ , 产生  $3 \times 3 = 9$  个互相关系数, 因此每个块共有 27 个特征值.

5) 特征量分类. 利用 SVM 分类机对特征进行分类, 提取分类机判定为虚假边缘点的边缘点坐标, 将坐标放入异常点库  $\Omega$  中, 之后依次提取图像中目标

物体及背景中的边缘, 查看其中每一个边缘点坐标是否包含在异常边缘点库  $\Omega$  中, 计算包含在  $\Omega$  中的此边缘的边缘点个数与此边缘的边缘点总个数的比值  $r$ , 若  $r$  大于一定的阈值则判定此边缘是拼接边缘, 从而进行拼接定位.

实验过程中需注意的问题: 1) 在对边缘点取邻域时, 由于图像在图像边界产生较大的高频信息, 会在提取边缘点时出现错判影响检测准确率, 因此舍去距离图像边界较近的边缘点, 保留的边缘点坐标范围为  $M - b/2 > i > b/2, N - b/2 > j > b/2$ , 其中  $M, N$  分别为图像的宽度和高度,  $i, j$  分别为像素点的横、纵坐标, 本文中  $b$  的值取为 8. 2) 如果一条边缘中超过一定比率的边缘点均判为拼接边缘点, 则可以认为这条边缘是拼接边缘. 对于前文中提到的包含在异常边缘点库  $\Omega$  中的某条边缘的边缘点个数与此边缘的边缘点总个数的比值门限  $r$  的选取 (步骤 5) 中) 需要在大量实验的基础上选择合适的门限值, 经过实验后选择的门限值  $r$  为 0.8.

### 3 拼接检测

提取出图像边缘的特征量信息后利用 libsvm 分类机进行数据分类, 首先选择一个图像数据库对已知的图像边缘进行数据特征提取, 利用台湾大学林智仁副教授等开发的简单的、快速有效的数据分类软件包 libsvm 对已知的边缘数据进行分类训练及分类预测. 本文实验训练分类机所选择的数据库

图像中真实图像和拼接图像均来源于哥伦比亚大学多媒体实验室建立的自然图像和拼接图像数据库.

由于每幅图像中均有较为丰富的边缘数据信息,在选择训练图像样本时不需要选择太多的图像,选取具有清晰图像边缘的真实图像和具有拼接边缘的图像各20幅,选择其中的5000个真实边缘点和3000个拼接边缘点,对真实图像边缘数据和拼接边缘数据进行分类训练,选择的真实边缘点是清晰边缘上的像素点,尽量不选择具有明显色散的边缘,拼接边缘点的选取则没有限制.准确率表示测试边缘点被正确分类的概率,虚警率表示拼接边缘点被检测为真实边缘点的概率,实验结果证明本文方法具有较好的性能,在虚警率为0.07的情况下可以得到0.941的准确率.选取其他拼接图像对其边缘数据的特征量进行预测分类,实验结果得到了较高的分类准确率.检测图像中边缘点共有2047个,正确分类边缘点有2018个,达到了0.986的准确率.

在检测性能及算法复杂度方面,相比较于文献[1]中提出的方法其检测拼接图像的准确率为90%,说明本文的方法对拼接边缘具有较高的鉴别能力,并且文献[1]中的算法特征提取需要11min,而获得最佳的分类参数则需要5h.本文提出的算法复杂度低,所需时间及运算资源要远优于文献[1-3],说明本文提出的算法有较好的性能.

1) 利用本文方法对拍摄的图像进行拼接检测如图7所示,图像的格式为TIFF,因为此格式保留了完整的CFA插值后的原始数据,将两幅原始图像拼接在一起形成的篡改图像,从检测结果中可以很清晰地看到拼接边缘.

2) 为了验证本文提出的基于颜色差分特性的图像篡改检测算法的鲁棒性,针对篡改过的图像进行了缩放和压缩处理,再利用所述方法对处理后的图像进行检测得到的实验结果如图8所示.

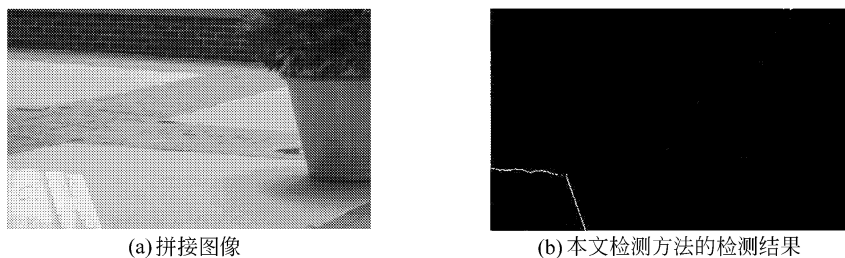
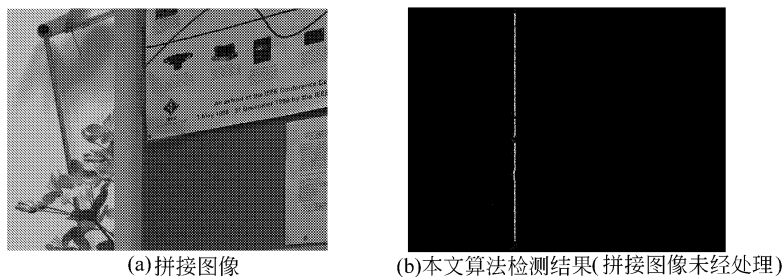


图7 拼接图像和本文检测方法的检测结果

Fig. 7 Tempered image and detection results of the proposed method



	放大(原图的150%)	缩小(原图的50%)	JPEG压缩(质量因子50)	加噪(方差数量级为10 <sup>-5</sup> )
检测结果				

(c) 拼接图像经过处理后的检测结果

图8 算法的鲁棒性检测结果

Fig. 8 Detection results of the method's robustness

缩放处理分别将图像缩小为原来的一半和扩大为原来的1.5倍,实验结果可知图像的放大和缩小对检测方法影响较小;JPEG压缩为有损压缩,会使

得图像具有一定的模糊度并引入一定的噪声,对于小质量因子的JPEG有损压缩不影响本文中方法对篡改区域的检测结果.由此可知,本文提出的检测方

法对图像缩放和压缩都具有一定的鲁棒性.

## 4 结论

1) 本文提出基于颜色差分特性的图像篡改检测技术, 依据的理论是自然场景中物体表面的反射特性及图像采集过程中采用的 CFA 插值算法使图像中颜色通道间具有很强的相关性, 尤其是颜色通道高频信息有近似相等的关系, 造成颜色差分平面上是平缓的, 而拼接操作会破坏颜色通道间的依赖关系, 会带来额外的高频信息, 同时也会破坏颜色差分图像的整体平滑性.

2) 伪造操作会降低颜色分量高频信息的相关性并在颜色差分图像中引入高频信息, 提取颜色高频分量相关性及颜色差分图像中的高频特征能够检测图像的真实性并定位拼接边缘.

3) 对图像提取多维的数据特征能够有效地提高定位图像篡改位置的精度, 本文算法提取图像颜色高频相关性及差分图像高频信息特征共 27 个特征量, 能够较准确的检测图像的真实性.

本文方法可以实现对多媒体数字图像的安全检测取证, 并对缩放操作、JPEG 压缩及加噪处理有一定的鲁棒性, 如何提取更为具有代表性的数据特征是进一步研究的重点.

### 参考文献(References):

- [1] Hsu Yu Feng, Chang Shih Fu. Camera response functions for image forensics: an automatic algorithm for splicing detection [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(4): 816 - 825.
- [2] Chen Mo, Fridrich Jessica, Goljan Miroslav, et al. Determining image origin and integrity using sensor noise [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2008, 3(1): 74 - 90.
- [3] Johnson M K, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting inconsistencies in lighting [C]//Proceeding of the 7th Workshop on Multimedia and Security, New York, 2005: 1 - 10.
- [4] LUO Weiqi, QU Zhenhua, HUANG Jiwu, et al. A novel method for detecting cropped and recompressed image block [C]//Proceeding of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Honolulu, HI, 2007: II217-II220.
- [5] Popescu A C, Farid H. Exposing digital forgeries in color filter array interpolated images [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3948 - 3959.
- [6] Ho J S, Au O C, Zhou Jiantao, et al. Inter-channel demosaicking traces for digital image forensics [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), Suntec City, 2010: 1475 - 1480.
- [7] LONG Yangjing, HUANG Yizhen. Image based source camera identification using demosaicking [C]// IEEE 8th Workshop on Multimedia Signal Processing, Victoria, BC, 2006: 419 - 424.
- [8] Gallagher A C. Detection of linear and cubic interpolation in JPEG compressed images [C]//Proceedings of the 2nd Canadian Conference on Computer and Robot Vision, 2005: 65 - 72.
- [9] 熊志勇, 蒋天发. 基于色彩分量相关性的彩色图像可擦除水印算法 [J]. 计算机应用研究, 2009, 26(4): 1598 - 1600.
- XIONG Zhiyong, JIANG Tianfa. Erasable watermark algorithm for color images based on correlation of color components [J]. Application Research of Computers, 2009, 26(4): 1598 - 1600. (in Chinese)
- [10] Gunturk B K, Altunbasak Y, Mersereau R M. Color plane interpolation using alternating projections [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(9): 997 - 1013.
- [11] Lian Naixiang, Zagorodnov V, Tan Yappeng. Edge-preserving Image denoising via optimal color space projection [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9): 2575 - 2587.