

基于半色调技术的印前图像篡改检测方法*

谢伟^{1,2}, 万晓霞^{1,2}, 叶松涛³, 金国念¹

¹(武汉大学 印刷与包装系, 湖北 武汉 430072)

²(中国摄影文化产业研究中心(武汉大学), 湖北 武汉 430072)

³(湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105)

通讯作者: 万晓霞, E-mail: wan@whu.edu.cn



摘要: 印前图像特指图像数字排版经编辑确认后的数字印刷样张, 其以栅格处理器分色后的加网二进制形式存储。数字样张一经确认, 其来源的合法性便不受怀疑。但是, 从印刷的整体流程来看, 数字样张的存储、传输过程中仍有较大的篡改风险。现有的复制移动篡改检测算法存在特征维度高、计算开销大或检测率较低等问题, 而且不适用于分色后的二进制样张。提出了一种基于半色调图像网点密度特征的 Copy-Move 篡改检测方法, 该方法对分色处理后的 CMYK 目标图像进行半色调二值量化处理, 采用滑动分块的方法对目标图像进行分块, 通过提取图像块 CMYK 这 4 个通道的局部网点密度特征对图像块进行篡改检测。实验结果表明, 该方法在图像篡改检测上与以往方法相比具有较低的时间复杂度和较高的检测率, 并且对图像篡改区域的旋转攻击、小尺度缩放攻击等具有较好的鲁棒性。

关键词: 复制移动; 篡改检测; 半色调; 数字图像取证

中图法分类号: TP391

中文引用格式: 谢伟, 万晓霞, 叶松涛, 金国念. 基于半色调技术的印前图像篡改检测方法. 软件学报, 2017, 28(7): 1835-1846. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5067.htm>

英文引用格式: Xie W, Wan XX, Ye ST, Jin GN. Copy-Move forgery detection for pre-printing image using digital halftoning technology. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017, 28(7): 1835-1846 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/5067.htm>

Copy-Move Forgery Detection for Pre-Printing Image Using Digital Halftoning Technology

XIE Wei^{1,2}, WAN Xiao-Xia^{1,2}, YE Song-Tao³, JIN Guo-Nian¹

¹(School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

²(China Research Center for Photographic Culture Industry (Wuhan University), Wuhan 430072, China)

³(The College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: Pre-Printing image is referred to as digital print proof validated by copy-editor. This type of image is stored in binary screened form after being processed by raster image processor (RIP). It has indubitable legitimacy once the digital print proof is finalized. Looking at the overall printing flow, however, pre-printing images are still at the risk of malicious tampering in the storage and transmission process. Most of existing copy-move forgery detection methods employing high dimensional feature vector have high computational complexity, thus are not applicable to color separated binary screened proofs. In this paper, a new approach for copy-move forgery detection is proposed based on digital halftoning technology. The original image is binarized via digital halftoning technique in CMYK color space, which is similar to raster image processor. Then the halftone image is tiled to overlapping blocks, and the local screen density features of halftone overlapping blocks in CMYK channels are extracted for copy-move forgery detection. Experimental results

* 基金项目: 国家自然科学基金(61275172); 国家重点基础研究发展计划(973)(2012CB725302); 湖南省教育厅一般项目(15C1324)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61275172); National Grand Fundamental Research 973 Program of China (2012CB725302); Foundation of Hu'nan Educational Committee (15C1324)

收稿时间: 2015-07-21; 修改时间: 2015-11-15, 2015-12-22, 2016-03-18; 采用时间: 2016-04-01; jos 在线出版时间: 2016-04-20

CNKI 网络优先出版: 2016-04-19 15:39:03, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20160419.1539.005.html>

demonstrate that the proposed method is able to detect copy-move forgery regions precisely, and it is robust to rotation and small scale zooming attacks to forgery regions.

Key words: copy-move; forgery detection; halftoning; digital image forensics

虽然随着手机、平板等移动终端的迅速普及,信息传播的媒介已经部分由纸质媒体分流到数字媒体,但是,艺术品鉴赏、社会老龄化、上网成本等多种因素都将使纸质媒体在未来较长一段时间内成为信息传播的主力军.因此,确保纸质媒体所传播信息的真实性具有重要的社会价值和意义.特别是纸质媒体上所印刷的图片,由于其信息含量丰富,如何确保印刷图片源的真实和可信显得尤为重要.

但是,近年来,数字图像处理工具(如:Photoshop)的不断进步,使得对图片进行篡改的技术成本和门槛在不断降低.据资料显示,美国新出版的彩色照片中约有 10%是经过修改和后期处理操作的照片^[1].而国内对照片印刷物伪造的情况也层出不穷,如“华南虎”“广场鸽”等照片伪造事件,在社会上产生了极大的负面影响.鉴于此,图像篡改检测不仅在新闻出版和文化传播方面具有重要的应用价值,而且也受到了学术界的广泛关注.

现有的图像篡改检测方法可分为主动检测技术和被动检测(盲检测)技术两类^[1].主动检测技术主要基于数字水印与数字签名技术,需要对源图像嵌入验证信息,这样会改变源图像的原始信息,且在许多情况下无法获取原始图像,需要在没有任何其他附加信息的情况下对目标图像的真实性进行鉴定,因此主动检测方法在实际应用场合中不具备很好的可实施性.被动检测技术是通过图像自身携带的信息进行分析处理而实现图像篡改检测的一种技术,其主要优点是不需要向被检测图像嵌入任何数据,因此在不破坏原始图像的情况下便可实现对目标图像的真实性检测判断.

然而,已有的关于图像篡改检测的工作往往用来解决网络中传播的数字图像媒体是否发生篡改,这些方案的共性是在 RGB 三色通道即可完成篡改图片的特征提取.但是,随着出版社印刷设备的网络化,印前图像源被恶意篡改的风险与日俱增.本文中印前图像特指在图像数字排版由编辑确认后产生的数字印刷样张.这种数字样张往往以栅格处理器分色后的加网二进制形式存储.一般来说,数字样张一经确认,其来源的合法性便不受怀疑.但是,从印刷的流程来看,数字样张的存储、传输过程中仍有许多人为因素存在.而且这种篡改更不易被察觉和怀疑,往往需要等大量印刷产品制成后才会显现,造成无法挽回的经济损失和社会负面影响.如果将传统的篡改检测方法应用到印前图像的检测过程中却会产生如下问题:首先,印刷设备中存储的数字图片格式往往需要使用 CMYK 进行分色,产生色彩偏移,传统的 RGB 域所提取的特征将失效;其次,印前数字图片在打印时使用了半色调技术,其像素域的基数不再是 8bit 或 24bit 的连续整数,而是 0 或者 1 的二值化数据;最后,如何在一个二值化的像素域中提取可有效抵抗缩放、旋转攻击的特征尚鲜见文献涉及.

综上所述,在整个印刷流程中,对印前图像进行篡改检测需要涉及多学科领域的知识交叉,也鲜有相关工作可以遵循.为此,本文提出了一种新的基于半色调技术的印前图像篡改检测方法,该方法使用半色调算法模拟印前图像处理流程中栅格图像处理器对分色处理后的 CMYK 目标图像的二值量化处理,然后采用滑动分块的方法对目标图像进行分块,通过提取图像块 CMYK 这 4 个通道的局部网点密度特征对图像块进行篡改检测.实验结果表明,相比于针对传统数字格式图片的篡改检测,该方法在对印前图像的篡改检测中不仅具有接近甚至较高的检测率,同时还有较低的时间复杂度,并且能够很好地抵抗图像篡改区域的旋转、小尺度缩放及 JPEG 压缩等攻击.

本文第 1 节介绍相关研究工作.第 2 节介绍基于半色调技术的印前图像复制移动篡改检测方法.第 3 节对该方法计算复杂度进行分析.第 4 节为实验结果分析及结论.

1 相关工作

传统的图像篡改检测主要分为主动和被动两种方式.主动检测技术主要基于数字水印与数字签名技术,需要对源图像嵌入验证信息,由于该技术可能会影响到图像印刷质量,其在文化产品印刷领域往往很难被采用^[1].

被动检测技术则是通过对图像自身携带的信息进行分析处理而实现图像篡改检测的一种技术.复制移动是一种最为常见的简单、有效的图像篡改方式,也是被动检测技术所主要解决的问题.“复制移动”主要是将同一

图像的某个区域复制到另一区域以隐藏或复制图像的某些细节信息,从同一张图像复制的信息往往具有相同的统计特性,人眼难以识别篡改特征.然而,为了篡改图像更为真实,复制区域一般会进行相应的处理操作,如旋转、变形、模糊等,以去除明显的篡改痕迹.

针对图像的复制移动篡改检测,不少学者进行了卓有成效的研究工作.现有研究成果中大部分图像复制粘贴篡改检测方法可分为基于分块(block-based)的检测方法和基于关键点(keypoint-based)的检测方法两大类.基于分块的图像 Copy-Move 篡改检测方法通过对图像进行重叠分块处理,然后从大量分块中提取特征向量对图像块进行表征,最后通过字典排序或最近邻搜索方法查找相似块来实现图像的篡改检测.Fridrich 等^[2]人最先提出了一种基于离散余弦变换(DCT)的图像复制移动篡改检测方法,该方法将图像进行重叠分块后,对每个分块进行离散余弦变换处理以提取图像特征,然后采用字典排序的方法以降低图像块之间特征匹配的计算复杂度.Popescu 等人^[3]提出了一种使用主成分分析(PCA)代替离散余弦变换对图像块进行特征降维提取的图像篡改检测方法.Kang 等人^[4]提出了对图像分块进行奇异值分解(SVD)以获取降维特征的图像篡改检测方法,实验结果表明,该方法对噪声失真具有鲁棒性.Wang 等人^[5]结合离散小波变换(DWT)和离散余弦变换(DCT)提出了一种对图像 JPEG 压缩和附加噪声具有鲁棒性的图像复制粘贴篡改检测方法.Myna 等人^[6]提出了一种结合对数极坐标及小波变换的方法来检测和定位图像复制移动篡改区域的方法,该方法将小波变换后的图像块进行降维处理并映射至对数极坐标系,使用相位相关法作为图像块之间的相似度标准,并以穷举搜索的方式查找相似块.Ardizzone 等人^[7]研究了一种使用标准纹理描述符来检测图像复制区域的方法,该方法使用从图像分块中提取 5 种标准纹理描述符对图像特性进行表征,实验结果表明,统计纹理描述符与其他纹理描述符相比具有较好的检测精度和较快的速度.Liu 等人^[8]提出了一种使用 Hu 不变矩的复制移动篡改检测方法,该方法从圆形分块中提取 Hu 不变矩特征,实验结果表明,该方法对旋转、模糊、JPEG 压缩等攻击具有鲁棒性.Ryu 等人^[9]设计了一种检测图像复制-旋转-移动的篡改检测算法,该算法使用 Zernike 矩作为图像块特征,能够抵抗图像噪声、模糊、旋转等攻击.为了增强算法对图像篡改区域大尺度缩放与旋转攻击的鲁棒性,Wu 等人先后提出基于对数极坐标傅里叶变换(LPFT)的复制移动篡改检测方法^[10]及基于对数极坐标分数傅里叶变换(LPFFT)的检测方法^[11].Davarzani 等人^[12]提出了一种基于多分辨率局部二值模式(multiresolution local binary patterns)的图像复制粘贴篡改检测方法,该方法利用不同分辨率局部二值模式对图像块进行特征提取,结合字典排序及 $k-d$ 树的方法提高检测效率,该方法具有较高的检测率,同时对旋转、缩放、JPEG 压缩、模糊等攻击具有鲁棒性.AISawadi 等人^[13]也提出了一种结合局部二值模式与邻域聚类方法的图像篡改检测算法.Cozzolino 等人^[14]提出了一种基于 PatchMatch 算法的图像复制粘贴篡改快速检测方法,该方法对图像篡改区域的旋转与缩放攻击具有较好的鲁棒性.此外,Li 等人在文献[15]中提出了一种新的基于图像分割的篡改检测方法,该方法通过将图像分割成独立的语义分块,结合基于关键点提取的方法,避免大量非相似分块之间的对比,以提高检测效率,实现图像的复制粘贴篡改检测.

基于关键点的图像复制粘贴篡改检测方法通常是对图像进行整体扫描,以找到图像中的关键点(如高熵点),然后通过对这些关键点进行特征提取和分析,找到具有相同特征属性的关键点来实现图像相似区域的检测.如利用尺度不变特征变换(SIFT)^[16-18]和快速鲁棒特征(SURF)^[19]从图像提取可区分的局部特征,通过匹配关键点描述符来代替块匹配的方法,实现图像的复制区域检测,这类方法对旋转、变形等操作具有鲁棒性.此外,Chen 等人^[20]提出了一种新的基于 Harris 角点提取的图像篡改检测方法,该方法对图像几何变换具有鲁棒性.基于关键点的检测方法,由于只需对提取的关键点进行匹配处理,与基于分块的检测方法相比具有检测速度快的优点,但是,由于关键点的稀疏性,在缺少纹理特征的复制区域,存在无法正确检测的问题,导致检测率降低.

目前已有的关于图像篡改检测的工作往往用来解决网络中传播的数字图像媒体间是否发生篡改这一问题,如何对印前图像进行篡改检测需要探索一条新的技术路线.

2 基于半色调技术的印前图像篡改检测

在图像印刷过程中,为了模拟连续调图像的视觉效果,一般通过半色调网点的大小或频率的改变来模拟图

像明暗的变化.半色调图像在视觉上与源图像相似,很好地保留了图像的内容特征.本文恰恰利用了图片半色调处理后的视觉不变特性,在图像印前处理过程中,通过提取图像的点密度特征实现图像复制移动篡改检测,其基本思想如下:首先将源图像进行CMYK分色处理,然后通过栅格图像处理器对CMYK图像进行半色调二值化处理,得到CMYK四通道的半色调图像,进而计算CMYK各个通道平面内各个像素点的局部点密度,然后对图像进行重叠分块,提取每个分块的点密度矩特征后对图像分块进行相似性匹配,以找到重复的图像块.图1为基于半色调技术的印前图像复制移动篡改检测基本流程.

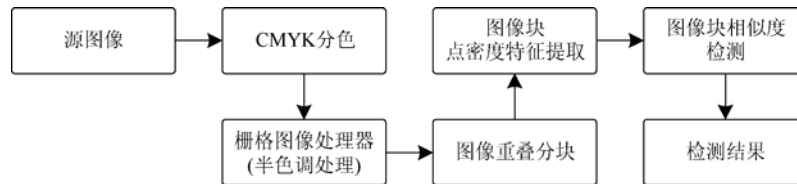


Fig.1 The process of pre-printing image copy-move forgery detection

图1 印前图像复制移动篡改检测流程

2.1 算法流程

基于半色调技术的印前图像篡改检测算法(pre-printing image forgery detection method using digital halftoning technology).

S1: 源图像 CMYK 分色;

S2: 使用栅格图像处理器对图像 CMYK 四通道分别进行半色调二值化处理;

S3: 计算 CMYK 各通道平面内像素点的局部点密度 $p_{ij} = \frac{1}{9} \sum_{x=i-1}^{i+1} \sum_{y=j-1}^{j+1} f(x, y)$;

S4: 对 S3 中得到的 $M \times N$ 大小的图像进行重叠分块,分块大小为 $B=b \times b$;

S5: 对 S4 中得到的 $N_B=(M-b+1)(N-b+1)$ 个图像分块,根据公式(5)~公式(8)提取图像分块的点密度矩特征向量 V_B ;

S6: 对提取到的 N_B 个图像分块点密度特征 V_B 构建 $k-d$ Tree,采用近似最近邻搜索方法对分块进行相似度匹配,特征向量之间的相似度 $d(A, B)$ 计算方法见公式(9);

S7: 两个图像块 A 、 B 之间的相似度记为 $d(A, B)$,对 $d(A, B) > T$ (T 为阈值)的图像块标记为复制区域.

2.2 图像数字半色调二值化方法

在图像印前处理过程中,栅格图像处理器的主要作用是根据输出设备特性将图像转换为可直接控制输出设备的栅格化二值图像,即对图像进行半色调加网处理.栅格图像处理器将连续调图像转换成二值图像,使量化

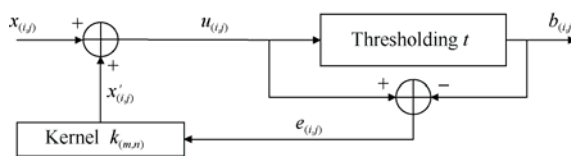


Fig.2 Halftone method based on error diffusion

图2 误差扩散算法处理流程

后的二值图像在视觉效果上与原图像相似,生成的半色调图像很好地保留了图像的内容特征.常见的数字半色调方法可以分为有序抖动算法、误差扩散算法、迭代法这3类^[21].其中,误差扩散算法因能较好地权衡图像质量和计算复杂度之间的关系,在实际应用中被广泛使用,本文采用误差扩散算法模拟栅格图像处理器对图像进行二值化处理.

图2为误差扩散算法的处理流程.当对连续调图像进行逐行半色调处理时,前面处理的误差被传递至当前处理的像素点. $x(i, j)$ 为当前处理的像素点, $x'(i, j)$ 为邻域已处理像素传递的误差总和, $b(i, j)$ 表示像素点 (i, j) 的二值量化结果, $u(i, j)$ 为添加扩散误差之后的像素灰度值.

$$u_{(i,j)} = x_{(i,j)} + x'_{(i,j)}, e_{(i,j)} = u_{(i,j)} - b_{(i,j)} \quad (1)$$

$$x'_{(i,j)} = \sum_{m=0}^1 \sum_{n=-1}^1 e_{(i+m,j+n)} \times k_{(m,n)} \quad (2)$$

$$b_{(i,j)} = \begin{cases} 0, & \text{if } u_{(i,j)} < t \\ 1, & \text{if } u_{(i,j)} \geq t \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)中 t 为阈值,通常设置为 $t=0.5$.图 2 中, $k_{(m,n)}$ 为误差扩散滤波器,不同的误差扩散滤波器可以生成不同质量的半色调图像.如图 3 所示,图 3(b)为 Lena 连续调图像(如图 3(a)所示)经过半色调二值量化处理之后的半色调图像.

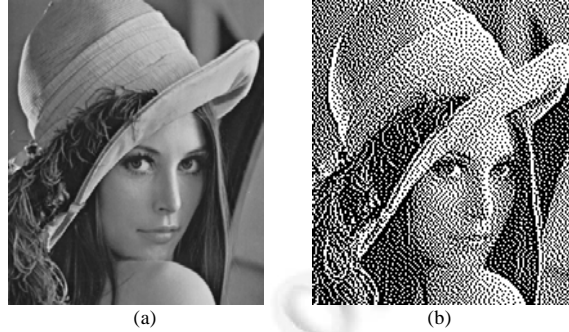


Fig.3 Halftone image of Lena generated by error diffusion
图 3 基于误差扩散的半色调 Lena 图像

经过栅格图像处理器处理后生成的半色调二值化图像具有以下特征:(1) 较好地保留了原始图像的重要内容特征,如边缘信息、纹理特征等;(2) 二值量化后的半色调图像大大降低了图像的阶调信息,便于数据处理;(3) 生成的半色调图像中便于提取图像的点密度特征,该特征属于统计特征量,对篡改区域的后处理操作具有一定的鲁棒性;(4) 图像二值量化处理降低了图像后续计算处理的复杂度.

2.3 二值图像局部点密度计算方法

在印前图像处理中一般采用半色调技术将连续调图像转换成半色调图像,然后采用不同的墨点密度来表征和再现不同的图像阶调.本文中栅格图像处理器将源图像加网生成半色调图像后,采用公式(4)逐像素地来计算像素点 (i,j) 的局部点密度 p_{ij} .

$$p_{ij} = \frac{1}{n^2} \sum_{x=i-n+2}^{i+n-2} \sum_{y=j-n+2}^{j+n-2} b(x,y) \quad (4)$$

当取 $n=3$ 时,对于 3×3 大小的邻域内计算像素点的局部点密度值计算过程如图 4 所示.

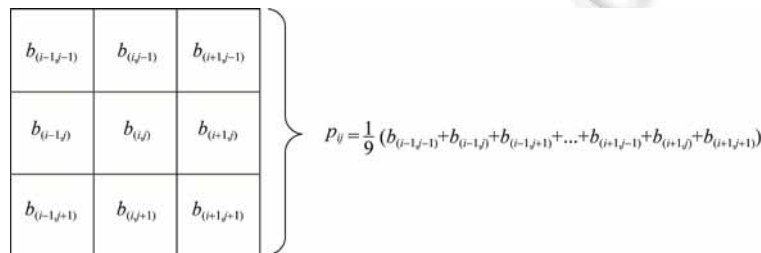


Fig.4 Computing method of local dot density when $n=3$
图 4 $n=3$ 时局部点密度计算过程

2.4 图像块点密度矩特征提取

在半色调图像中,图像的亮度及色彩分布可以看作是一种概率分布,而概率分布可以使用矩来进行特征测量和描述.因此,针对图像块的特征描述,本文提出了密度矩的概念用于表征半色调图像在各个通道上的点密度

分布特征,以实现半色调图像的点密度特征来描述不同的图像块之间的区别.

本文采用两种中心矩来描述图像块各通道的点密度特征分布,分别为一阶中心矩点密度均值(mean)和二阶中心矩点密度标准差(variance),对于 $b \times b$ 大小的图像分块 B ,其计算方法如下.

一阶中心矩——点密度均值:

$$E_k = \frac{1}{b^2} \sum_{i=0}^{b-1} \sum_{j=0}^{b-1} p_{ij} \quad (5)$$

其中, E_k 表示图像分块 B 的第 k 个通道的点密度均值, p_{ij} 为公式(4)计算得到的像素点 (i, j) 的局部点密度.

二阶中心矩——点密度标准差:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{b^2} \sum_{i=0}^{b-1} \sum_{j=0}^{b-1} (p_{ij} - E_k)^2} \quad (6)$$

对于每个图像块 CMYK 这 4 个通道,每个通道都对应 E_k , σ_k 两个点密度矩,组成一个 8 维的点密度特征向量,以矩阵方式表示如下:

$$M_B = \begin{bmatrix} E_i^C & \sigma_i^C \\ E_i^M & \sigma_i^M \\ E_i^Y & \sigma_i^Y \\ E_i^K & \sigma_i^K \end{bmatrix} \quad (7)$$

这样,对于每一个半色调图像块 B ,都对应一个点密度特征矩阵 M_B .

2.5 可疑图像块的快速匹配方法

进行特征提取后每个图像块均可用 8 维特征矩阵进行描述,如果使用穷举搜索方法在 N 个特征矩阵中进行相似特征匹配,其匹配复杂度为 N^2 .而印刷图像所使用的分辨率一般远远超出网络图像,在海量的图像分块中进行特征匹配,显然会引起巨大的计算开销.因此,为了降低相似图像分块匹配的计算复杂度,本文对图像块特征构建 k - d 树来实现可疑图像块的快速匹配.记每一个图像分块 B 均对应一个特征矩阵 M_B 用于描述该分块特征,将特征 M_B 改写成行向量形式.

$$V_B = (E_i^C, E_i^M, E_i^Y, E_i^K, \sigma_i^C, \sigma_i^M, \sigma_i^Y, \sigma_i^K) \quad (8)$$

对提取的 N_B 个特征向量构建 k - d 树^[22],对提取的特征向量在 8 维空间中进行划分.采用分治思想将整个空间划分为多个部分,以实现高维数据的快速搜索.图像块 A 、 B 提取的特征向量之间的相似度距离 $d(A, B)$ 计算方法如下.

$$d(A, B) = \sum_{i=1}^r w_{i1} |E_i^A - E_i^B| + w_{i2} |\sigma_i^A - \sigma_i^B| \quad (9)$$

其中, i 表示图像块当前的通道索引(如 CMYK 空间: $C=1, M=2, Y=3, K=4$); r 表示颜色空间的通道总数(CMYK 颜色空间通道数为 4); E_i^A, E_i^B 表示 A, B 图像块第 i 个通道的点密度均值; σ_i^A, σ_i^B 表示 A, B 图像块第 i 个通道的点密度标准差; w_i 为权重系数,计算距离时用于控制不同色彩通道及点密度均值与点密度标准差所占权重.

设定阈值 T ,若 $d(A, B) > T$,则 (A, B) 标记为可疑匹配块.图像块 A, B 之间的位移向量以 $\overline{v_{AB}}$ 表示,在所有可疑匹配块中,排除邻域内 $\|\overline{v_{AB}}\| > t$ 的匹配块,其中,阈值 t 用于排除邻域内的重叠块,表示可标记为篡改区域的图像块与源图像块之间的最小距离,阈值 t 的选取应结合分块大小 b 进行考虑.

3 算法性能分析

本文提出的印前图像复制移动篡改检测方法的计算性能主要受图像半色调二值量化处理、图像分块特征提取及图像块匹配 3 个方面的影响.

栅格图像处理器在对图像进行半色调的二值量化处理过程中,由于是对整幅图像进行二值量化处理,量化过程逐像素一次性完成,算法的后续处理步骤不再涉及半色调处理,因此,对 $M \times N$ 大小的图像进行半色调二值量化处理的时间复杂度可简单计算为 $O(MN)$.

在图像分块特征提取过程中,对 $M \times N$ 大小的图像进行重叠分块,共得到 $N_B=(M-b+1)(N-b+1)$ 个分块,对于单通道二值图像 E_k, σ_k 密度矩特征的计算复杂度为 $O(N_B \times b^2)$,因此,对于 CMYK 四通道二值图像的总计算复杂度为 $O(N_B \times b^2 \times 8)$.

在图像块匹配过程中,对 N_B 个图像分块特征向量构建 $k-d$ 树的时间复杂度为 $O(N_B \times \log_2 N_B)$,对 $k-d$ 树进行近似最近邻搜索的平均时间复杂度为 $O(\log_2 N_B)$.

综上所述,该算法总体计算复杂度为

$$O(MN) + O(N_B \times b^2 \times 8) + O(N_B \times \log_2 N_B) + O(\log_2 N_B) \approx O(MN \log_2 MN).$$

4 实验结果分析

为了验证本文提出的图像篡改检测方法的检测效果、鲁棒性及性能,我们在 Christlein 等人^[20]建立的数据集 Benchmark Data 上进行了相关对比实验.本文实验在 Visual Studio 2010 上使用 C++ 编程实现,实验所使用的图形工作站配置为 AMD Athlon X4 3.7GHz CPU,DDR3 1600HZ 8G 内存.以下分别为本实验采用的评价方法与相关实验结果.

4.1 评价方法

本文采用精确率(precision)、召回率(recall)及综合评价指标 F1-Measure 来对算法进行评价,精确率 Precision 与召回率 Recall 的计算方式如下:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, Recall = \frac{TP}{TP + FN} \tag{10}$$

$$F1\text{-measure} = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \tag{11}$$

其中,TP 为算法正确检测到的篡改图片数量;FP 为被算法误检测为篡改图片的数量;FN 为算法未检测到的篡改图片数量.F1-Measure 综合了 Precision 与 Recall 两项指标,是两项指标的调和平均数.

4.2 实验结果

本文根据印前栅格图像处理器处理流程,将数据集 Benchmark Data^[23]中的图像进行了一对一复制常规篡改检测实验、旋转攻击实验、缩放(几何形变)攻击实验、高斯噪声与 JPEG 压缩鲁棒性实验,在此基础上与 5 种典型方法(DCT^[2]、PCA^[3]、Zernike Moments^[9]、SIFT^[16]、MLBP^[12])进行了对比,实验结果表明,本文提出的图像复制移动篡改检测方法在准确率、鲁棒性及性能上均有较好的表现.实验具体情况如下.

(1) 常规检测实验

本实验采用的 Benchmark Data 基准数据集包含 48 张未经过任何篡改操作的原始图片和 48 张经过复制移动操作的篡改图片,其中,篡改区域除了进行平移复制操作和边缘模糊处理外没有进行任何其他处理,篡改区域肉眼很难分辨.我们采用本文提出的方法及以上提到的 5 种典型方法对基准数据集中的 96 张图片进行对比测试,实验结果见表 1.

Table 1 The experimental result comparison between proposed method and other five typical methods (%)

表 1 本文方法与 5 种典型图像篡改检测方法实验结果对比(%)

Method	Precision	Recall	F1
本文方法	84.62	91.67	88.01
DCT	69.23	93.75	79.65
PCA	76.79	89.58	82.69
ZERNIKE	81.82	93.75	87.38
MLBP	88.24	93.75	90.91
SIFT	88.37	79.17	83.52

结合表 1 及后文表 2 实验结果进行分析,本文提出的半色调图像点密度矩能够很好地对图像块的局部特征进行描述,基于半色调图像点密度矩特征的图像篡改检测方法对复制移动篡改检测具有较好的效果,基于

MLBP 的方法在检测效果上与其他方法相比有更好的表现,但是该方法在时间开销上与本文方法及其他方法相比存在较大差距.图 5 所示为使用本文方法进行图像复制移动篡改检测的实例图片,从检测结果可以看出,本文所提出的方法对篡改区域具有较高的识别度.

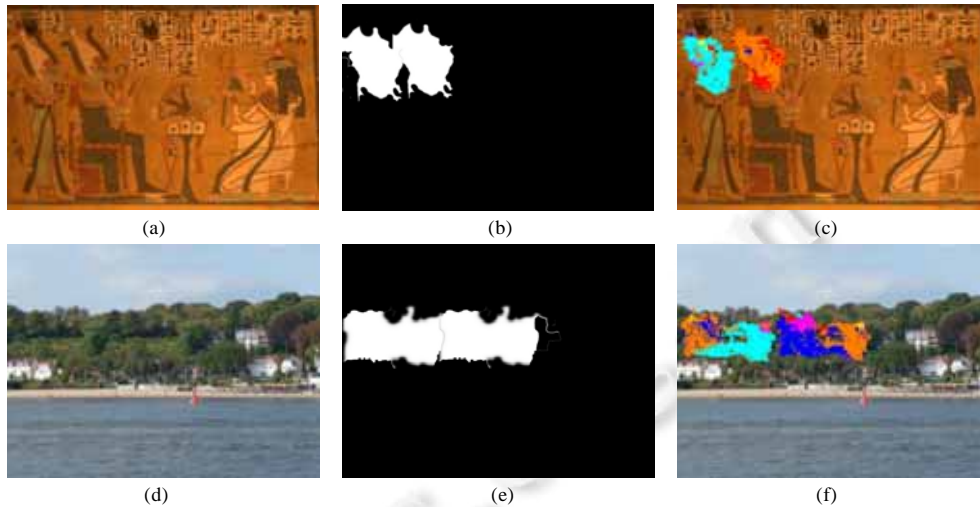


Fig.5 Example test cases for proposed copy-move forgery detection method

图 5 基于半色调点密度矩特征的图像复制移动篡改检测实例

(2) 旋转攻击实验与缩放攻击实验

在图像篡改过程中,篡改者往往会对图像篡改区域进行旋转、缩放等附加处理,保证篡改图片看起来更加真实.为了验证方法对旋转、缩放攻击的鲁棒性,我们在 Benchmark Data 的拓展数据集上进行了相应测试.在旋转攻击测试中,对 Benchmark Data 基准数据集中的 48 张图片的篡改区域分别进行 2° 、 4° 、 6° 、 8° 、 10° 、 20° 、 60° 、 180° 旋转后使用本文方法进行检测.图 6 所示为旋转攻击测试结果示例.

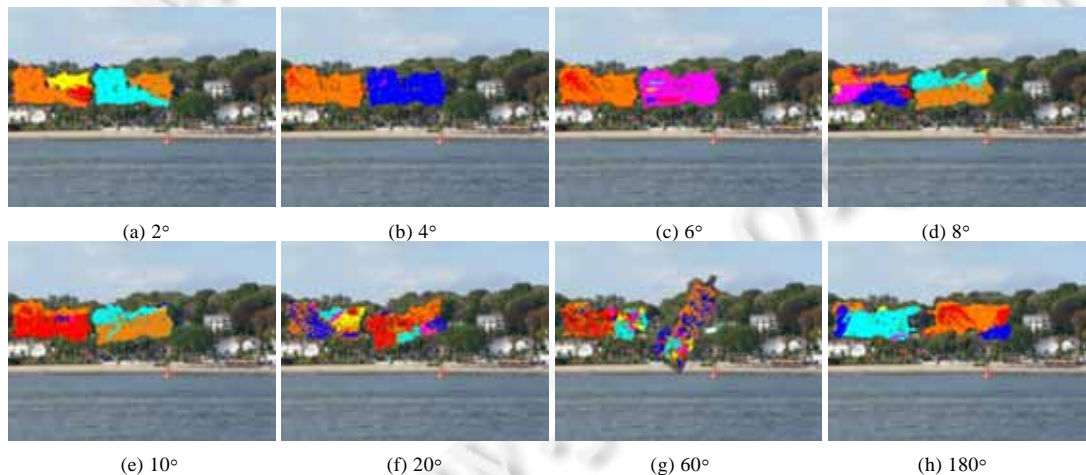


Fig.6 Example test cases for rotation attack

图 6 旋转攻击测试示例

如图 7 所示,当图像篡改区域进行旋转时,会因旋转造成小部分像素超出分块区域而对点密度特征计算造成影响,但该部分像素面积远远小于重叠部分的像素面积,对特征计算的影响基本上可以忽略.从图 6 所示的实验结果可以看出,篡改区域在 10° 以内的小角度旋转攻击对检测效果基本上没有任何影响,进行 60° 的大角度旋转,对检测到的篡改区域有轻微影响但不影响对篡改结果的判断,特别是在 180° 大角度旋转情况下,检测效果与

篡改区域没有进行旋转的情况基本相同,实验结果与理论相符,因此本文提出的基于半色调图像点密度矩特征的图像篡改检测方法对旋转攻击具有较好的鲁棒性.

在缩放攻击拓展数据集中,图像篡改区域分别进行了 80%~120% 不同程度的缩放处理,缩放处理因子分别为 80%、91%、93%、95%、97%、99%、101%、103%、105%、107%、109%、120%.当进行不同尺度的放大或缩小时,篡改区域会进行不同程度的降采样或插值处理,而提取的点密度矩特征属于各通道统计特征,小尺度缩放攻击不会造成大面积信息丢失,因而不会对该特征量提取造成太大的影响.从图 8 中实验结果可以看出,对尺度在 91%~109% 范围内的小尺度缩放攻击,基本上不影响对检测结果的判断,而对 80%、120% 的大尺度缩放攻击对检测效果有较大影响,实验结果表明,本文提出图像篡改检测方法能够较好地应对图像篡改区域缩放因子在 91%~109% 内的小尺度缩放攻击,随着篡改区域缩放比例增大检测效果有所降低.由于大尺度的图像缩放会造成缩放区域的明显失真,使用肉眼便较为容易察觉,所以在实际应用场合中,图像篡改区域一般不会进行太大尺度的缩放处理.

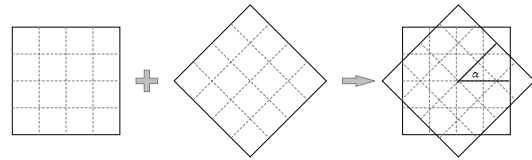


Fig.7 The impact of rotation attack in feature extraction

图 7 旋转攻击对特征提取的影响图示

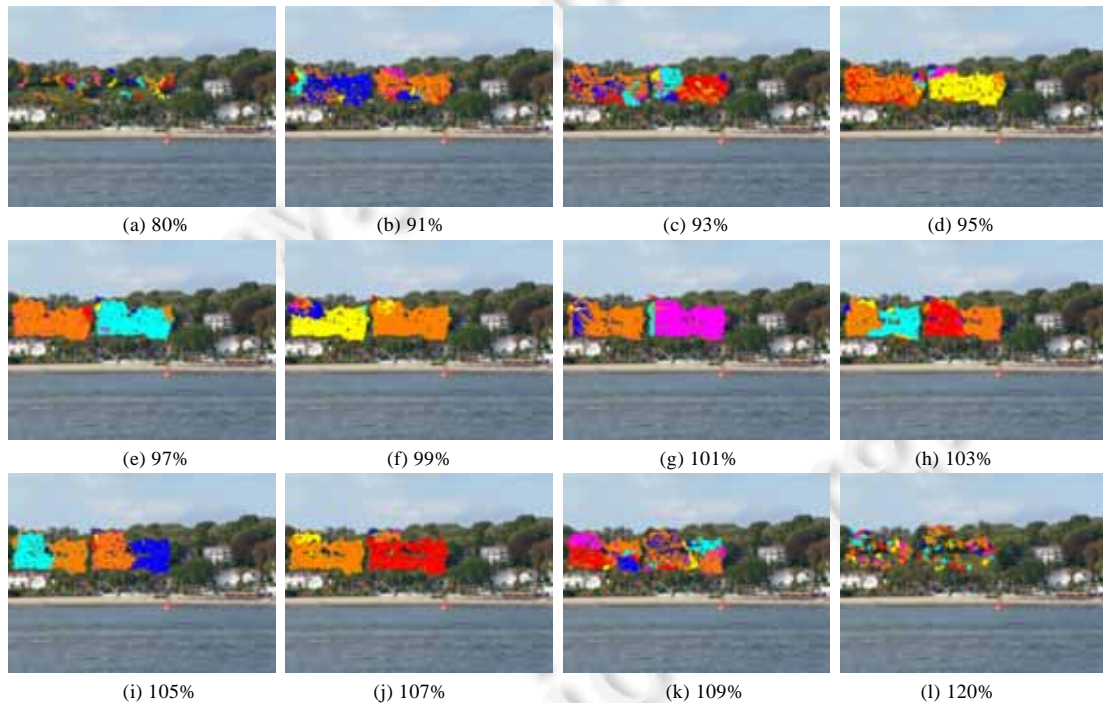


Fig.8 Example test cases for scale attack

图 8 缩放攻击篡改检测效果

(3) 高斯噪声与 JPEG 压缩鲁棒性实验

为了使篡改区域不易被察觉,对篡改图片进行加噪及 JPEG 压缩处理也是较为常见的处理手段.在高斯噪声鲁棒性测试中,篡改区域被添加标准差分别为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 的高斯 0 均值噪声.当标准差达到 0.10 时,篡改区域产生有明显可见的噪点.图 9 为高斯噪声鲁棒性测试示例,从左至右标准差依次为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 的检测结果.

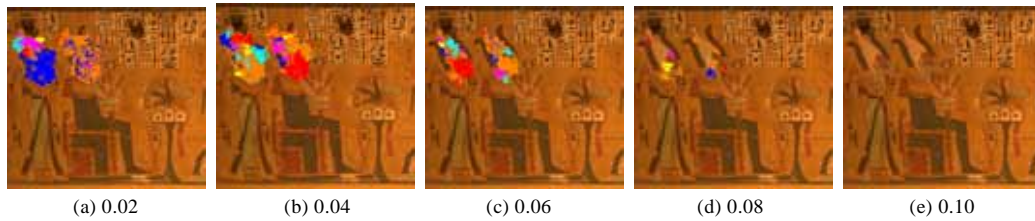


Fig.9 Example for robustness test to Gaussian noise

图 9 高斯噪声鲁棒性测试

由图 9 所示的实验结果可以看出,当高斯噪声标准差的增大对检测效果有较为明显的影响,标准差越大,能检测到的有效区域越小,这是因为对篡改区域添加高斯噪声会对该区域各通道的统计特征造成一定影响,但在较小范围内(如标准差小于 0.06)对图像块的特征提取影响较小,因而不影响对实验结果的判断,在当高斯噪声标准差大于 0.8 时,篡改区域会有明显的噪声痕迹,故在该情况下,本文方法与人眼视觉判定存在一定的互补关系.实验结果表明,本文方法对轻度噪声攻击具有一定的鲁棒性.

对图片进行 JPEG 压缩处理通常会影响到图像的整体质量,造成图像篡改痕迹更加难以分辨,在 JPEG 压缩鲁棒性实验中,篡改图片经过不同质量因子 JPEG 压缩处理,质量因子取值范围为[100,20],当质量因子较低时会产生明显的 JPEG 压缩痕迹.从图 10 所示的 JPEG 压缩鲁棒性实验结果可以看出,较高质量情况下的 JPEG 压缩对本文检测方法影响较小,使用中等以上质量因子对图像进行 JPEG 压缩对图像检测结果的判断影响不大,当质量因子较小时(如图 10(h)所示),天空等大面积平滑区域会出现误报情况,这是因为,平滑区域在进行 JPEG 压缩时会导致细节信息的丢失,引起不同区域提取的特征差异减小,而在实际应用中,一般不会让图像产生过于严重的 JPEG 压缩失真.从实验结果可以看出,本文方法对高质量因子的 JPEG 压缩具有鲁棒性.

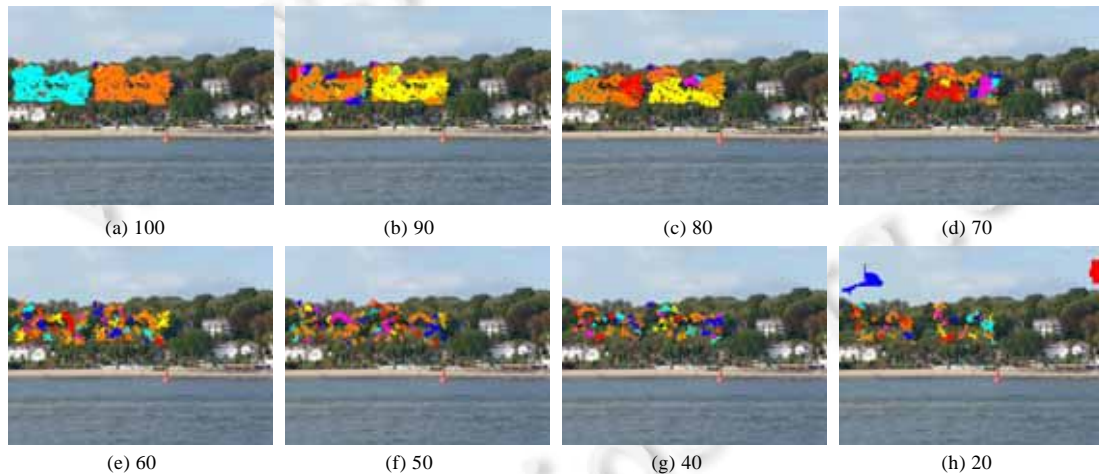


Fig.10 Example for robustness test to JPEG-compression

图 10 JPEG 压缩鲁棒性测试

4.3 算法性能对比

目前常见的图像复制移动篡改检测方法性能主要受图像预处理、图像特征提取、图像特征匹配 3 个方面的影响.本文从这 3 个方面对比分析本文所提出的方法与常见的 5 种典型方法在计算性能上的差异.对基准数据集中每张图像篡改检测处理的平均时间开销进行统计,图像预处理时间开销记为 P -Time,图像特征向量提取时间开销记为 F -Time,图像特征匹配时间开销记为 M -Time,总体处理时间记为 O -Time.表 2 为本文提出方法与其他 5 种典型方法的平均处理时间开销对比情况.

Table 2 The comparison of average computation times per image in seconds

表 2 本文方法与 5 种典型图像篡改检测方法实验结果对比(单位:秒)

Method	<i>P</i> -Time	<i>F</i> -Time	<i>M</i> -Time	<i>O</i> -Time
本文方法	0.096 5	1.590 0	13.590 7	15.458 5
DCT	0.051 2	43.455 0	24.733 0	68.379 8
PCA	0.050 7	68.894 7	13.726 8	82.798 2
ZERNIKE	0.051 6	1.984 6	15.868 4	18.019 2
MLBP	0.051 0	35.173 4	197.607 2	232.831 6
SIFT	0.143 5	0.190 3	0.199 3	0.978 7

图像特征提取及特征匹配是影响基于分块的图像复制粘贴篡改检测方法计算时间开销的主要因素,而提取的图像块特征向量维度也直接影响了后续的图像特征匹配效率。在本文对比的 4 种基于分块的检测方法中,基于 DCT 的方法通过对图像块进行离散余弦变换后提取变换系数组成 256 维特征向量,而在频域进行特征提取并对高维度特征进行相似度匹配均需要较高的时间开销;基于 PCA 的方法在进行相似分块特征匹配前对图像块进行了 PCA 降维处理,减少了进行特征匹配所需要的时间开销,但增加了图像块特征提取时间;基于 ZERNIKE 矩的方法提取的特征,两种方法相比明显节约了计算时间;而基于 MLBP 的方法需要使用多种向量为 12 维,与前 LBP 描述符进行特征提取,如分别使用 $LBP_{8,1}^{u2}$ 、 $LBP_{12,2}^{u2}$ 、 $LBP_{16,2}^{iu2}$ 提取图像特征分别形成 59、135、18 特征向量矩阵,然后基于字典排序与 k - d 树进行后续的相似块匹配处理,由于需要处理多个高维度特征向量矩阵,增加了算法的时间复杂度。本文使用从 CMYK 各通道提取的局部网点密度特征形成 8 维特征向量,与以上几种方法相比,具有较低的特征维度,从而可以节省进行相似分块匹配的时间开销。实验结果表明,在综合考虑检测率与检测性能的前提下,本文提出的检测方法在图像特征提取、图像特征匹配及总体检测性能上与其他基于分块的检测方法(DCT、PCA、ZERNIKE、MLBP)相比具有相对较优的表现,由于基于关键点(SIFT)的检测方法只对图像的高熵点进行查找,在性能上要优于基于分块的检测方法,但是,由于关键点的稀疏性导致基于关键点的方法与基于分块的方法相比具有较低的查全率。

5 结 论

目前鲜有文献针对印前图像的复制粘贴篡改检测进行研究,因此,本文提出了一种提取半色调图像点密度特征来对印前图像进行复制移动篡改检测的方法,首先对目标图像进行 CMYK 分色,然后由印前栅格图像处理对图像进行半色调加网处理,通过提取 CMYK 各个通道的局部网点密度特征来对图像分块进行表征,构建 k - d 树来实现图像的篡改检测。该方法提取的特征向量计算简便,所提取的特征向量具有维度低、旋转不变性等特点。实验结果表明,该方法对图像复制粘贴篡改检测具有较好的检测效果,并对复制区域旋转攻击具有很好的鲁棒性,同时对复制区域的小尺度缩放攻击、JPEG 压缩攻击等亦具有较好的鲁棒性,在时间复杂度上明显优于其他基于分块的图像复制移动篡改检测方法。

References:

- [1] Birajdar GK, Mankar VH. Digital image forgery detection using passive techniques: A survey. *Digital Investigation*, 2013,10(3): 226–245. [doi: 10.1016/j.diin.2013.04.007]
- [2] Fridrich AJ, Soukal BD, Lukáš AJ. Detection of copy-move forgery in digital images. In: *Proc. of the Digital Forensic Research Workshop*. Cleveland: DFRWS, 2003.
- [3] Popescu AC, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting duplicated image regions. Technical Report, TR2004-515, Department of Computer Science, Dartmouth College, 2004.
- [4] Kang XB, Wei SM. Identifying tampered regions using singular value decomposition in digital image forensics. In: *Proc. of the 2008 Int'l Conf. on IEEE Computer Science and Software Engineering*. IEEE, 2008,3:926–930. [doi: 10.1109/CSSE.2008.876]
- [5] Wang XF, Zhang XN, Li Z, Wang SP. A DWT-DCT based passive forensics method for copy-move attacks. In: *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on IEEE Multimedia Information Networking and Security (MINES)*. IEEE, 2011. 304–308. [doi: 10.1109/MINES.2011.98]
- [6] Myrna AN, Venkateshmurthy MG, Patil CG. Detection of region duplication forgery in digital images using wavelets and log-polar mapping. In: *Proc. of the 2007 Int'l Conf. on IEEE Computational Intelligence and Multimedia Applications*. IEEE, 2007,3:371–377. [doi: 10.1109/ICCIMA.2007.271]

- [7] Ardizzone E, Bruno A, Mazzola G. Copy-Move forgery detection via texture description. In: Proc. of the 2nd ACM Workshop on Multimedia in Forensics, Security and Intelligence. ACM, 2010. 59–64. [doi: 10.1145/1877972.1877990]
- [8] Liu GJ, Wang JW, Lian SG, Wang ZQ. A passive image authentication scheme for detecting region-duplication forgery with rotation. Journal of Network and Computer Applications, 2011,34(5):1557–1565. [doi: 10.1016/j.jnca.2010.09.001]
- [9] Ryu SJ, Lee MJ, Lee HK. Detection of copy-rotate-move forgery using Zernike moments. In: Proc. of the Information Hiding. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 51–65. [doi: 10.1007/978-3-642-16435-4_5]
- [10] Wu Q, Wang S, Zhang X. Detection of image region-duplication with rotation and scaling tolerance. In: Computational Collective Intelligence, Technologies and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 100–108. [doi: 10.1007/978-3-642-16693-8_11]
- [11] Wu Q, Wang S, Zhang X. Log-Polar based scheme for revealing duplicated regions in digital images. Signal Processing Letters, 2011,18(10):559–562. [doi: 10.1109/LSP.2011.2163507]
- [12] Davarzani R, Yaghmaie K, Mozaffari S, Meysam T. Copy-Move forgery detection using multiresolution local binary patterns. Forensic Science Int'l, 2013,231(1):61–72. [doi: 10.1016/j.forsciint.2013.04.023]
- [13] AlSawadi M, Muhammad G, Hussain M, Bebis G. Copy-Move image forgery detection using local binary pattern and neighborhood clustering. In: Proc. of the Modelling Symp. (EMS), 2013 European. IEEE, 2013. 249–254. [doi: 10.1109/EMS.2013.43]
- [14] Cozzolino D, Poggi G, Verdoliva L. Copy-Move forgery detection based on patchmatch. In: Proc. of the 2014 IEEE Int'l Conf. on Image Processing (ICIP). IEEE, 2014. 5312–5316. [doi: 10.1109/ICIP.2014.7026075]
- [15] Li J, Li XL, Yang B, Sun XM. Segmentation-Based image copy-move forgery detection scheme. IEEE Trans. on Information Forensics and Security, 2015,10(3):507–518. [doi: 10.1109/TIFS.2014.2381872]
- [16] Amerini I, Ballan L, Caldelli R, Bimbo AD. A sift-based forensic method for copy-move attack detection and transformation recovery. IEEE Trans. on Information Forensics and Security, 2011,6(3):1099–1110. [doi: 10.1109/TIFS.2011.2129512]
- [17] Amerini I, Ballan L, Caldelli R, Bimbo AD, Tongo LD, Serra G. Copy-Move forgery detection and localization by means of robust clustering with J-linkage. Signal Processing: Image Communication, 2013,28(6):659–669. [doi: 10.1016/j.image.2013.03.006]
- [18] Costanzo A, Amerini I, Caldelli R, Barni M. Forensic analysis of SIFT keypoint removal and injection. IEEE Trans. on Information Forensics and Security, 2014,9(9):1450–1464. [doi: 10.1109/TIFS.2014.2337654]
- [19] Shivakumar BL, Baboo LDSS. Detection of region duplication forgery in digital images using SURF. IJCSI Int'l Journal of Computer Science Issues, 2011,8(4):199–205.
- [20] Chen LK, Lu W, Ni JQ, Sun W, Huang JW. Region duplication detection based on Harris corner points and step sector statistics. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013,24(3):244–254. [doi: 10.1016/j.jvcir.2013.01.008]
- [21] Shi L. Research on digital halftoning technique [MS. Thesis]. Xi'an: Xidian University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [22] Silpa-Anan C, Hartley R. Optimised KD-trees for fast image descriptor matching. In: Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2008. IEEE, 2008. 1–8. [doi: 10.1109/CVPR.2008.4587638]
- [23] Christlein V, Riess C, Jordan J, Riess C, Angelopoulou E. An evaluation of popular copy-move forgery detection approaches. IEEE Trans. on Information Forensics and Security, 2012,7(6):1841–1854. [doi: 10.1109/TIFS.2012.2218597]

附中文参考文献:

- [21] 史琳. 数字半色调技术研究[硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.



谢伟(1985 -),男,湖南新化人,博士,主要研究领域为数字图像处理,图像取证,图像传播工程.



叶松涛(1983 -),男,博士,讲师,主要研究领域为数字图像传输,车联网,计算广告学.



万晓霞(1973 -),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为颜色科学与技术,数字资产管理.



金国念(1973 -),男,讲师,主要研究领域为图像处理,数字取证.