

# 利用 Harris 特征点和环形均值描述的图像区域复制篡改的被动取证

赵洁<sup>1,2</sup> 郭继昌<sup>1</sup>

(1. 天津大学电子信息工程学院, 天津, 300072; 2. 天津城建大学计算机与信息工程学院, 天津, 300384)

**摘要:** 提出一种利用 Harris 特征点和环形均值描述的图像区域复制篡改检测算法。首先对图像进行自适应维纳滤波, 并利用 Harris 算子提取图像的特征点, 然后通过对每个特征点的环形邻域进行均值描述生成特征向量矩阵, 并采用字典排序和阈值化处理进行相似性匹配, 从而确定候选匹配点, 最后利用 RANSAC 算法剔除错误的匹配点, 实现复制和篡改区域的标识定位。实验结果表明, 算法对于复制区域的旋转和翻转变换具有较强的鲁棒性, 并且可以有效抵抗常见的后处理攻击, 包括高斯模糊、加性高斯白噪声、JPEG 压缩以及它们的混合操作, 尤其能够抵抗非显著视觉结构的平坦区域和小区域的复制、粘贴、篡改操作。

**关键词:** 区域复制篡改; 图像篡改检测; 被动取证

**中图分类号:** TP391.41      **文献标志码:** A

## Passive Forensics for Region Duplication Image Forgery Using Harris Feature Points and Annular Average Representation

Zhao Jie<sup>1,2</sup>, Guo Jichang<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China; 2. School of Computer and Information Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin, 300384, China)

**Abstract:** A region duplication image forgery detection algorithm based on Harris feature points and annular average representation is proposed. Firstly, an adaptive Wiener filter is applied to the image, and then Harris operator is utilized to extract feature points in the image. Secondly, a feature vector matrix is constructed with average values of pixels to make a quantity description of annular neighborhood around each feature point, and lexicographical sorting and threshold processing are employed to implement similarity matching with the purpose of determining the candidate matching points. Finally, random sample consensus (RANSAC) algorithm is used to eliminate the erroneous matching points, and then the duplicated and tampered regions are located with identifiers. Experimental results show that the proposed algorithm is robust to rotation and flipping transformation of the copied region, and it can effectively resist common post-processing attacks such as Gaussian blurring, AWGN, JPEG compression and their mixed operations, especially the copy-move forgery with flat area of little visual structures and small area.

**Key words:** region duplication forgery; image forgery detection; passive forensics

## 引 言

随着数码相机和智能手机的广泛普及,人们似乎每天都会和数码照片打交道,然而这种数字信息可以很容易地被各种简单易学的图像编辑软件进行处理,导致网络上大量篡改图像的产生。这彻底颠覆了传统照片“眼见为实”的理念,并且图像的恶意篡改和伪造对科学研究、法律取证、保险索赔和媒体公信力等方面造成了很大的负面影响,因此针对图像篡改的取证研究具有十分重要的现实意义和实用价值。近年来,基于图像本身性质的被动取证技术由于不需要事先在图像中嵌入认证信息的独特优势,已经成为目前数字取证领域的研究热点之一。

在常见的图像篡改方式中,区域复制操作是使用最为广泛的篡改手段之一,它是指复制图像中的一部分区域,将其粘贴到同一幅图像中的另一个不相交的区域上。这样做无非两个目的:(1)增加图像中特定目标的数量;(2)隐藏图像中不愿被发觉的特定目标。由于同一幅图像有着一致的噪声、纹理和颜色等信息,同时篡改者为了使复制区域更好地融入整个图像中,造成逼真的效果或是更加有效地抵抗现有的检测算法,还经常将复制区域进行一些中间操作后再粘贴到图像中的特定区域,这些中间操作包括旋转、翻转和缩放等。同时,篡改者可能会在篡改操作完成后进行模糊、加噪、JPEG 压缩等后处理操作,使得篡改图像更难于被人眼和取证算法辨别。

近些年来,国内外学者针对图像区域复制的篡改方式提出了一些被动检测方法,主要可以归纳为两大类:(1)基于分块特征匹配的方法<sup>[1-9]</sup>;(2)基于特征点检测和特征匹配的方法<sup>[10-13]</sup>。Fridrich 等<sup>[1]</sup>首先提出利用图像分块的量化离散余弦变换(Discrete cosine transform, DCT)系数提取特征的检测方法;为了提高文献[1]方法的鲁棒性和检测效率,文献[6-8]分别提出了改进的基于 DCT 的特征匹配方法;Popescu 等<sup>[2]</sup>采用主成分分析(Principal component analysis, PCA)方法代替 DCT 对分块后子图像的特征向量进行降维表示;Luo 等<sup>[3]</sup>提取图像块像素域的 7 个鲁棒性特征来表征图像块,再采用主转移向量的方法去除错误的相似块来定位篡改区域;Kang 等<sup>[4]</sup>采用奇异值分解(Singular value decomposition, SVD)提取分块特征。然而,这些方法对于篡改图像中复制区域经过几何变换如旋转、缩放和翻转的情况无效。Bayram 等<sup>[5]</sup>对分块后的子图像进行 Fourier-Mellin 变换(Fourier-mellin transform, FMT),再用 FMT 的值投影形成一维特征向量,然而根据它们的实验结果,该方法仅能检测非常有限的旋转和缩放变换。何德龙等<sup>[9]</sup>首先将图像进行一次离散小波变换并取其低频部分进行重叠分块,然后类似于文献[3]统计各重叠块的 7 个统计值确定相似块,但该方法仅能检测 JPEG 压缩和高斯白噪声的后处理操作,对复制后的旋转和翻转操作无效。

与基于分块特征匹配的方法不同,基于特征点检测和特征匹配的方法通过首先检测图像中的特征点并对其进行特征描述,然后通过匹配算法定位复制粘贴区域。文献[10-12]利用 SIFT(Scale-invariant feature transform)对于旋转和缩放变换的鲁棒性进行篡改区域检测;Shivakumar 等<sup>[13]</sup>提出利用 SURF(Speeded up robust features)检测篡改区域。这些算法虽然具有一定的抵抗复制区域旋转和缩放变换的能力,但是存在严重的缺陷,即复制粘贴区域仅仅被有限的特征点稀疏地覆盖,如果复制区域具有非显著的视觉结构,则篡改区域可能被完全漏检<sup>[14]</sup>,同时根据作者的实验,基于特征点的方法对于高斯模糊后处理操作的鲁棒性不佳,并且对于复制区域经过翻转变换后再粘贴的情况无效。

针对现有算法的缺陷,本文提出一种基于特征点检测和特征匹配的篡改检测方法,利用 Harris 算子实现特征点的检测,通过对特征点的环形邻域进行均值描述生成特征向量矩阵,采用字典排序和阈值化处理确定候选匹配点,最后采用随机抽样一致性算法(Random sample consensus, RANSAC)剔除错误的匹配点,实现复制和篡改区域的标识。

## 1 Harris 特征点检测

Harris 算子是一种计算简单、应用广泛的角点检测算子,只使用灰度的一阶差分和滤波,可以定量地提取特征角点,同时 Harris 算子具有较高的稳定性和鲁棒性,能够在图像旋转、灰度变化、视点变换以及噪声干扰的情况下准确地检测特征点,具有较高的点重复率和较低的误检率。Harris 算子检测角点的基本思想<sup>[15]</sup>是:在图像中假想一个局部窗口,当窗口沿各个方向移动时,如果窗口内区域的灰度发生了较大的变化,则认为窗口内遇到了角点。

对于图像  $I(x, y)$ ,在点  $(x, y)$  处平移  $(\Delta x, \Delta y)$  后的自相似性可以通过自相关函数表示

$$c(x, y, \Delta x, \Delta y) = \sum_{(u, v) \in W(x, y)} w(u, v) (I(u, v) - I(u + \Delta x, v + \Delta y))^2 \quad (1)$$

式中:  $W(x, y)$  是以点  $(x, y)$  为中心的窗口,  $w(u, v)$  为高斯加权函数,其中  $u, v$  为  $W(x, y)$  窗口内的图像坐标。通过泰勒公式展开,自相关函数可以近似为二次项函数

$$c(x, y, \Delta x, \Delta y) \approx [\Delta x \Delta y] M(x, y) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $M(x, y) = \sum_{u, v} w(u, v) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}$ ,  $w(u, v) = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{2\sigma^2}\right)$  为高斯窗函数在  $(u, v)$  处的系数,  $I_x, I_y$  分别为图像在水平方向和垂直方向上的梯度。二次项函数本质上是一个椭圆函数,椭圆的扁率和尺寸由  $M(x, y)$  的特征值  $\lambda_1, \lambda_2$  决定。Harris 给出的角点判别方法并不需要计算具体的特征值,而是计算一个角点响应函数  $R$  来检测图像的角点。

$$R = \det(\mathbf{M}) - k \times \text{tr}^2(\mathbf{M}) \quad (3)$$

式中:  $\det(\mathbf{M})$  和  $\text{tr}(\mathbf{M})$  分别为矩阵  $\mathbf{M}$  的行列式和迹。 $k$  一般取  $0.04 \sim 0.06$ 。 $R$  表示像素点的 Harris 响应值,当某点响应值为邻域最大且大于一个阈值  $R_0$  时,确认该点为角点。为了避免参数  $k$  选取的随机性,提高算子的稳定性,本文采用了文献<sup>[16]</sup>中提出的角点响应函数来提取特征点,式中  $\epsilon$  为任意小的正数

$$R = \det(\mathbf{M}) / (\text{tr}(\mathbf{M}) + \epsilon) \quad (4)$$

在 Harris 特征点提取的过程中,阈值  $R_0$  的选择决定了提取的特征点数量。当  $R_0$  取值较大时,提取的特征点数量较少,多为特征明显的角点,而当  $R_0$  取值较小时,得到的特征点数量较多,分布更为密集。为了使算法能够检测到具有非显著视觉结构的平坦区域和面积较小区域的复制粘贴篡改操作,本文采用密集 Harris 特征点,即取阈值  $R_0 = 0$ ,这样可以得到数量更多的特征点,并且在图像中呈现近似均匀分布,这样更加有利于增强算法的鲁棒性。

## 2 特征点的描述

本文算法提取密集 Harris 角点作为图像的特征点,设  $p_i(x_i, y_i)$  为检测到的某一特征点,其中  $(x_i, y_i)$  为  $p_i$  在原始图像上的位置坐标。以  $p_i$  为中心取一个半径为  $r_{\max}$  的圆形区域作为待描述区域,然后将该圆形区域分割为以  $p_i$  为中心半径分别为  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  的同心圆,由此形成 5 个圆环区域记作  $Ring_1, Ring_2, \dots, Ring_5$ ,记录每个圆环区域内包含的像素点的灰度均值(对于彩色图像则计算亮度分量),组成特征向量  $\mathbf{V}_i = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$ 。本文算法中分别取  $r_1 = 2, r_2 = 5, r_3 = 8, r_4 = 11, r_5 = 13, r_{\max} = 15$ ,特征点邻域的环形均值描述如图 1 所示。式中  $v_i = \text{mean}(Ring_i), i = 1, 2, \dots, 5$ 。因此,特征向量  $\mathbf{V}_i = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$  描述了以特征点  $p_i$  为中心的 5 个同心圆环区域内的均值信息,即低频分量信息。

特征向量  $\mathbf{V}_i = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$  实质上描述了以特征点  $p_i$  为中心的 5 个同心圆环区域内的均值信息,包含了相应环形区域的低频直流信息。首先,由于同心环形区域具有中心对称性,因此特征向量对于区域复制后的旋转和翻转变换具有很好的鲁棒性;其次,对于加性高斯噪声,设加性高斯白噪声  $\epsilon$  均

值为 0, 方差为  $\sigma^2$ , 并且假设该噪声对于图像中的每个像素都是独立同分布的。记以  $p_i$  为中心同心圆环区域为  $Ring_i (i=1, 2, \dots, 5)$  且包含  $Num_i$  个像素点, 则加噪后可以得到

$$Ring_i^{AWGN} = Ring_i + \epsilon_{Ring_i} = (I + \epsilon)_{Ring_i} \quad (5)$$

式中  $I$  为图像中像素点的灰度值。

$$v_i^{AWGN} = \text{mean}(Ring_i^{AWGN}) = \frac{\sum (I + \epsilon)}{Num_i} = v_i + \epsilon_i^* \quad (6)$$

式中:  $\epsilon_i^* \approx \frac{\sum \epsilon}{Num_i}$ , 可以得到  $E(\epsilon_i^*) = 0, D(\epsilon_i^*) \approx \frac{\sigma^2}{Num_i}$ , 从而加性高斯白噪声 (Additive white Gaussian noise, AWGN) 加噪后与未处理前的特征相近, 即  $v_i^{AWGN} \approx v_i$ 。因此, 特征向量  $\mathbf{V}_i = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$  对于加性高斯白噪声的后处理操作具有较好的鲁棒性。最后, 由于高斯模糊操作和 JPEG 压缩操作本质上相当于一个低通滤波器, 虽然会丢弃图像的部分高频信息, 但是基本不会影响低频信息和直流分量, 因此所选特征对高斯模糊和 JPEG 压缩的后处理操作同样具有较好的鲁棒性。

假设检测到的密集 Harris 特征点数量为  $N_p$ , 可以得到图像  $I(x, y)$  的维数为  $N_p \times 5$  的特征矩阵  $\mathbf{V}$ , 其中  $\mathbf{V}_i (i=1, 2, \dots, N_p)$  为特征矩阵  $\mathbf{V}$  的第  $i$  行, 代表第  $i$  个特征点的特征向量,  $(x_i, y_i)$  为  $\mathbf{V}_i$  对应的 Harris 特征点的位置坐标值。

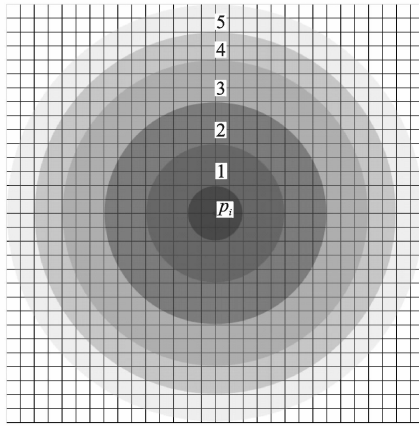


图 1 特征点邻域的环形均值描述

Fig. 1 Annular average representation of each feature point neighborhood

### 3 特征点的匹配

将特征矩阵  $\mathbf{V}$  进行字典排序得到排序后的特征矩阵  $\mathbf{V}_{\text{sorted}}$ , 维数为  $N_p \times 5$ , 此时描述相似特征点的特征向量会位于  $\mathbf{V}_{\text{sorted}}$  中的相邻位置。在文献[1-3]中均采用基于主转移向量的方法进行相似性匹配, 然而对于存在旋转和翻转变换的篡改图像, 复制与粘贴区域并不具有一致的方向性, 因此基于主转移向量的匹配方法均失效。本文通过计算  $\mathbf{V}_{\text{sorted}}$  中相邻两行  $\mathbf{V}_i$  和  $\mathbf{V}_{i+1}$  之间的欧式范数  $\|\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_{i+1}\|_2$  作为相似性测度。相似度阈值  $Sim$  和移动向量阈值  $Shif$  实现特征点的相似性匹配。相似度阈值  $Sim$  限定了特征矩阵  $\mathbf{V}_{\text{sorted}}$  中相邻两行特征向量的相似性程度, 只有当  $\|\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_{i+1}\|_2 < Sim$  时才认为相应的 2 个特征点为候选匹配特征点。  $Sim$  越大, 则检测到的误匹配点的数目会增加。移动向量阈值  $Shif$  决定了算法检测到的匹配点之间的最小距离, 只有当特征点之间的欧式距离大于  $Shif$  时才认为是候选的匹配特征点。由于自然图像中相邻像素点的灰度值具有较强的相关性, 因而  $Shif$  越小, 检测到的误匹配点的

数目会增加。对特征点进行初步相似性匹配后得到候选的匹配特征点集合,然而其中会存在错误匹配的情况,接下来采用 RANSAC<sup>[17]</sup> 剔除错误的匹配点,提高特征点匹配的正确率。这里 RANSAC 算法采用适合图像区域复制篡改的旋转尺度平移 RST 变换模型进行参数估计,选取迭代次数为 100,匹配特征点的卡方距离阈值为 0.99。

## 4 算法实现流程

本文提出的利用 Harris 特征点和环形均值描述的图像区域复制篡改检测算法属于基于特征点检测和特征匹配的一类方法,算法执行流程如图 2 所示。

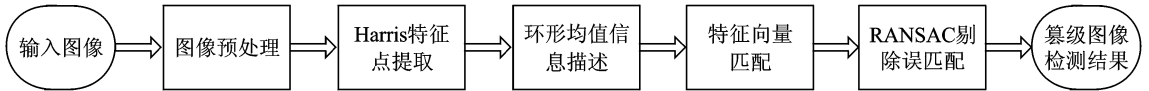


图 2 检测算法的实现流程图

Fig. 2 The flow diagram of the proposed detection method

(1) 图像预处理。假设输入图像为灰度图像,如果为 RGB 彩色图像,则采用标准转换公式提取亮度分量。然后采用基于像素局部邻域统计估计的自适应维纳滤波方法进行预处理,这样可以在有效滤除图像噪声的同时尽可能地保留图像边缘和其他高频成分。

(2) Harris 特征点提取。对滤波后的图像进行 Harris 特征点检测,本文算法采用密集 Harris 特征点,可以得到数量更多的特征点,并且在图像中呈现近似均匀分布,这样有利于增强算法的鲁棒性,尤其能够抵抗非显著视觉结构的平坦区域和面积较小区域的复制粘贴篡改操作。

(3) 对于提取的密集 Harris 特征点,分别计算其 5 个环形邻域内的均值信息对特征点进行鲁棒性描述,形成特征矩阵  $\mathbf{V}$ 。

(4) 对特征矩阵  $\mathbf{V}$  进行字典排序得到  $\mathbf{V}_{\text{sorted}}$ ,假设  $\mathbf{V}_{\text{sorted}}$  中相邻两行  $\mathbf{V}_i$  和  $\mathbf{V}_{i+1}$  对应的特征点的坐标位置为  $(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1})$ ,遍历  $\mathbf{V}_{\text{sorted}}$  计算,同时满足以下 2 个条件的候选匹配特征点集合。

$$\|\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_{i+1}\|_2 < Sim \text{ 且 } \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} > Shif \quad (7)$$

(5) 对候选匹配特征点集合采用 RANSAC 算法剔除错误的匹配点,并用线段连接所有的匹配特征点标识复制粘贴检测区域。

## 5 实验结果与分析

实验运行环境为 Intel Pentium 2.13 GHz, Matlab R2010b 平台。实验中的篡改图像均来自以下 2 个测试数据集,采用 Adobe Photoshop CS4 软件编辑处理而成。第 1 个数据集是 Kodak 公司为自由研究使用的 24 幅 PNG 真彩色图片,大小均为 768 像素  $\times$  512 像素<sup>[18]</sup>;第 2 个数据集是从互联网上收集的 50 幅分辨率较高的彩色图片,其中包括现有文献中使用的篡改图片,分辨率均不小于 768 像素  $\times$  512 像素。通过大量反复实验,本文算法采用的最佳参数设置为:  $Sim = 1.2, Shif = 30$ ,维纳滤波器的窗口大小为  $[5, 5]$ 。

### 5.1 有效性测试

首先应用本文算法对未经过后处理操作的区域复制篡改图像进行检测,检测结果如图 3 所示,第 1 列为原始图像,第 2 列为篡改图像,第 3 列为检测结果图像。从图 3 可以看出,复制区域均为非规则且有意义的目标对象,其中图 3(a)组篡改图像为隐藏特定目标的情况,图 3(b)组篡改图像为增加特定目标的情况,算法均可以准确地标识出复制和粘贴区域。

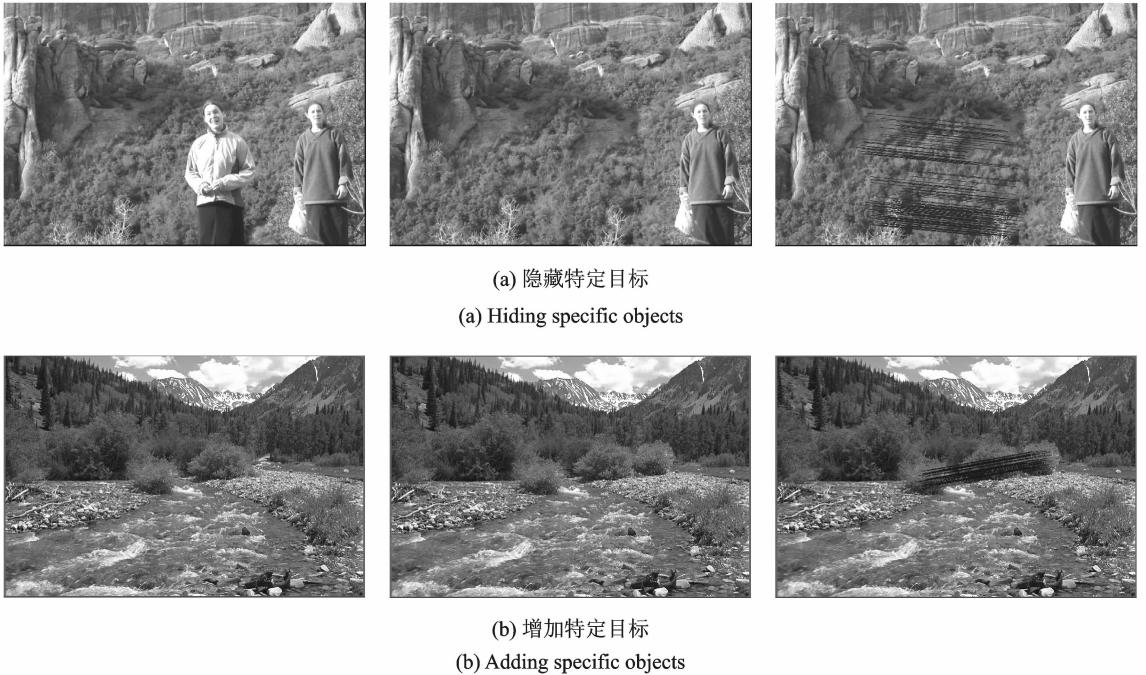


图3 未经后处理操作的篡改图像检测结果

Fig. 3 Detection results of image forgeries without any post-processing operations

为了进一步定量评估算法的有效性,从2个实验数据集中随机选择50幅彩色图像,通过在原始图像的随机位置复制1个正方形区域并粘贴到不相交区域的方式生成篡改图像。正方形复制区域分别选择60像素 $\times$ 60像素、80像素 $\times$ 80像素和100像素 $\times$ 100像素3种尺寸,并且将每种尺寸的复制区域随机地粘贴到4种不同相对位置的不相交区域上,由此总共生成600幅篡改图像。表1给出了未经过后处理操作的区域复制篡改图像的统计检测结果,可以看出算法对于3种不同尺寸的复制区域均实现了满意的检测结果。

表1 未经后处理操作的篡改图像的检测率

Table 1 Detection rate of image forgeries without any post-processing operations

复制正方形区域的尺寸/像素 $\times$ 像素	60 $\times$ 60	80 $\times$ 80	100 $\times$ 100
正确检测篡改图像的数目	199	200	200
正确检测篡改图像的比例/%	99.5	100	100

## 5.2 鲁棒性测试

本文算法对于旋转和翻转变换的篡改图像的部分检测结果如图4所示,可以看出算法在抵抗旋转攻击方面具有不错的效果,对于水平和垂直翻转攻击同样具有很好的鲁棒性。针对常见的后处理操作,测试算法对高斯模糊、高斯白噪声、JPEG压缩以及混合操作的鲁棒性,部分检测结果如图5所示。不难看出,算法对于施加上述后处理操作的篡改图像均能有效地检测出复制和粘贴区域,甚至当篡改图像质量很差的情况,如高斯模糊( $w=7, \sigma=5$ )/高斯噪声( $\text{SNR}=20$  dB)/JPEG压缩( $Q=50$ )时,算法仍然得到了正确可靠的检测结果。即使当篡改图像经历旋转/翻转变换加后处理的混合操作的情况下,算法同样获得了比较满意的检测结果,然而,现有文献均没有给出上述情况的实验结果。

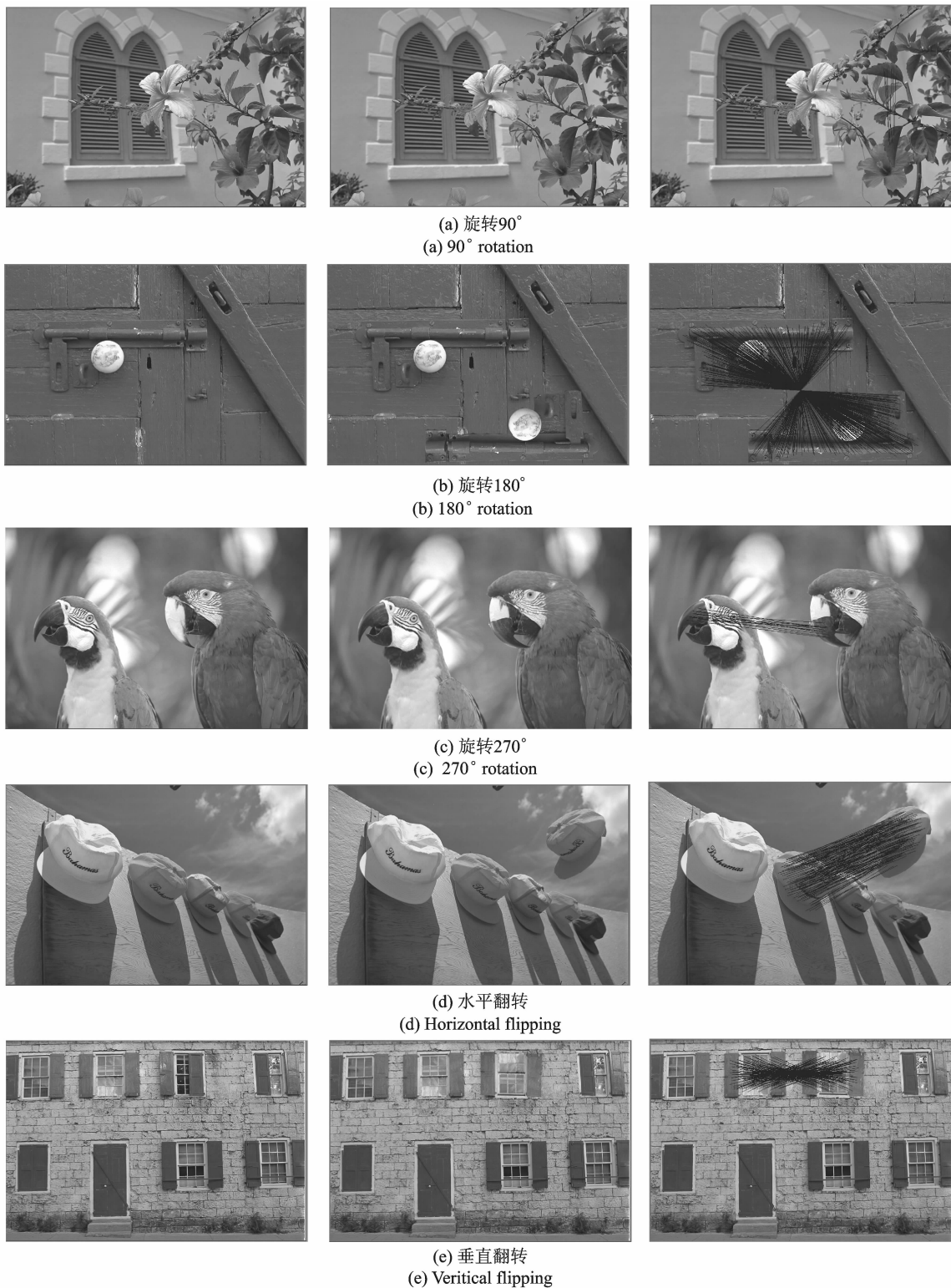


图4 具有旋转和翻转变换的篡改图像检测结果

Fig. 4 Detection results of image forgeries with rotation and flipping

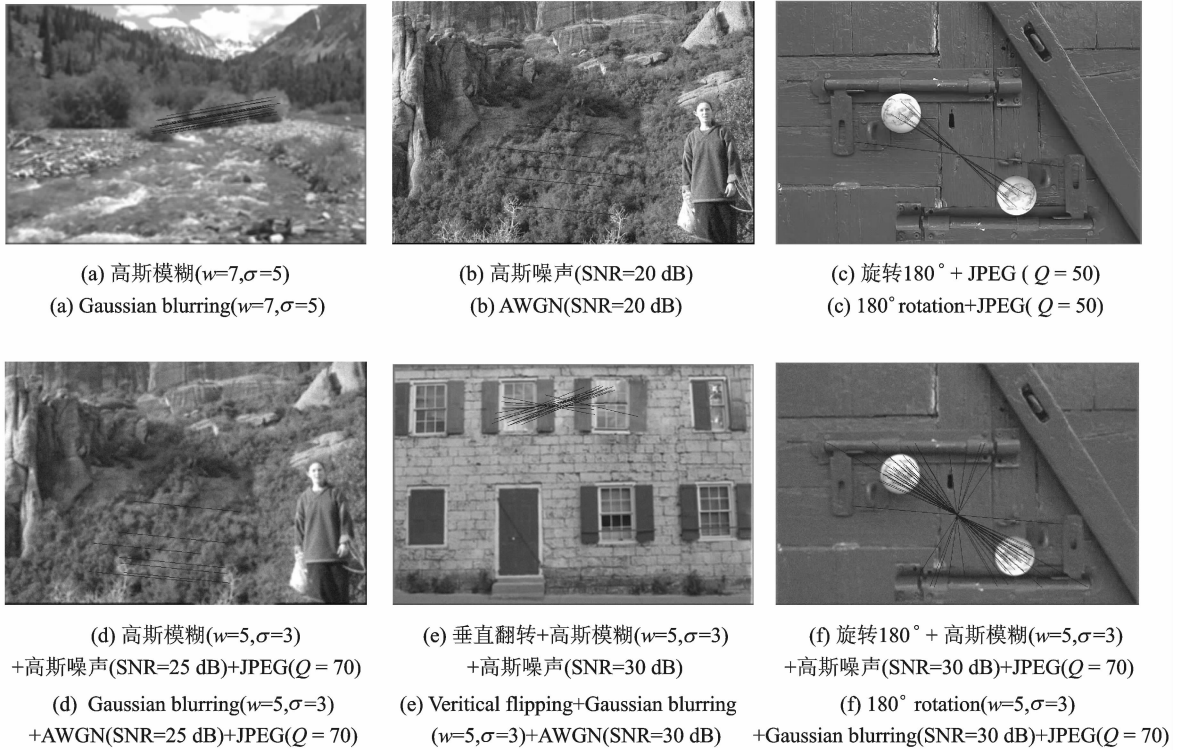


图 5 施加常见后处理操作的篡改图像检测结果

Fig. 5 Detection results of image forgeries with common post-processing operations

为了进一步定量评估算法对于常见后处理操作的鲁棒性,对实验中生成的 600 幅篡改图像中的 60 像素 $\times$ 60 像素和 80 像素 $\times$ 80 像素的两组,总计 400 幅篡改图像施加不同参数的后处理操作进行检测评估,包括高斯模糊、加性高斯白噪声和 JPEG 压缩,表 2-4 给出了算法相应的统计检测结果。可以看出,算法对于上述后处理操作具有较好的鲁棒性,正确检测率均在 84% 以上。从实验结果可以发现,算法的检测性能随着图像质量的下降而逐渐降低。这主要原因是,当图像质量下降很多时,Harris 特征点的精确提取会受到影响,并且特征点的相似性匹配会受到严重干扰,导致正确匹配的特征点数目很少甚至根本没有。然而这种质量很差的篡改图像在大多数实际应用的情况中根本不能接受,因此本文算法对于现实应用中的篡改图像具有比较满意的检测性能。

表 2 经过高斯模糊操作的篡改图像的检测率

Table 2 Detection rate of image forgeries with Gaussian blurring

复制正方形区域的尺寸/ 像素 $\times$ 像素	$w=3, \sigma=0.5$		$w=3, \sigma=1$		$w=5, \sigma=1$		$w=5, \sigma=3$	
	60 $\times$ 60	80 $\times$ 80	60 $\times$ 60	80 $\times$ 80	60 $\times$ 60	80 $\times$ 80	60 $\times$ 60	80 $\times$ 80
正确检测篡改图像的数目	197	200	196	194	190	193	185	189
正确检测篡改图像 的比例/%	98.5	100	98	97	95	96.5	92.5	94.5



表 3 经过高斯白噪声操作的篡改图像的检测率

Table 3 Detection rate of image forgeries with AWGN

复制正方形区域的尺寸/ 像素×像素	SNR=40 dB		SNR=35 dB		SNR=30 dB		SNR=25 dB	
	60×60	80×80	60×60	80×80	60×60	80×80	60×60	80×80
正确检测篡改图像的数目	192	195	186	189	181	184	172	173
正确检测篡改图像的 比例/%	96.0	97.5	93.0	94.5	90.5	92.0	86.0	86.5

表 4 经过 JPEG 压缩操作的篡改图像的检测率

Table 4 Detection rate of image forgeries with JPEG compression

复制正方形区域的尺寸/ 像素×像素	Q=90		Q=85		Q=80		Q=75	
	60×60	80×80	60×60	80×80	60×60	80×80	60×60	80×80
正确检测篡改图像的数目	189	193	188	189	175	180	168	171
正确检测篡改图像的 比例/%	94.5	96.5	94	94.5	87.5	90	84	85.5

### 5.3 检测性能比较分析

本文提出的区域复制篡改检测算法属于前述的第 2 大类—基于特征点检测和特征匹配的方法。文献[10-12]中提出了一种基于 SIFT 特征点和特征匹配的方法,对旋转和缩放的几何变换具有一定的鲁棒性,并且能够抵抗加性噪声、JPEG 压缩以及它们的混合操作。根据作者的实验,文献[10-12]算法对于高斯模糊的鲁棒性很差;对于复制区域面积较小的篡改图像无效<sup>[10]</sup>;并且当复制区域具有非显著的视觉结构时,篡改区域可能被完全漏检<sup>[10,14]</sup>,文献[11,12]算法对于翻转变换无效。

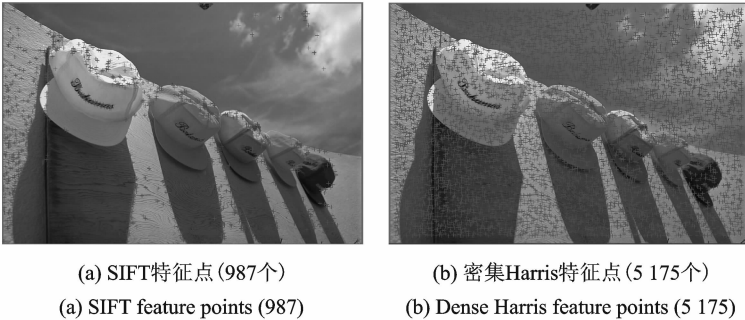


图 6 检测的特征点数量和分布情况比较

Fig. 6 Comparison of the number and distribution of different feature points

相比而言,如 4.2 节所述,本文算法对于图像的翻转变换具有很好的鲁棒性,而文献[11,12]算法对于翻转变换无效。本文算法可以有效地抵抗高斯模糊攻击,而文献[10-12]算法对于高斯模糊的鲁棒性很差,相应的文献中也没有给出相关实验的结果。本文算法采用密集 Harris 角点作为特征点,与 SIFT 特征点相比具有明显的优势,同一幅图像检测到的特征点数量和分布情况如图 6 所示,SIFT 算法检测到 987 个特征点,而本文算法检测到密集 Harris 特征点 5 175 个,数量相差很大。更重要的是,检测到的特征点的分布情况大相径庭,如图 6(a)所示,SIFT 特征点均集中在图像中具有显著变化的区域附近,而在非显著变化的平坦区域中几乎检测不到 SIFT 特征点。与此不同,图 6(b)表明本文采用的密集 Harris 特征点在图像中呈现近似均匀分布,因此本文算法可以成功地检测那些针对非显著视觉结构的平坦区域进行复制粘贴的篡改图像,而文献[10-12]算法由于缺乏可靠的特征点均检测不到相应的篡改

区域。具有非显著视觉结构的篡改图像检测实例如图 7 所示,复制区域为具有非显著视觉结构的平坦区域,从图 7(c)可以看出,本文算法对于这种情况仍然可以有效检测出复制粘贴区域,然而文献[10-12]算法对图 7(b)篡改图像均失效。不仅如此,如 5.2 节所述,本文算法对于旋转变换和翻转变换与常见后处理操作的混合操作仍然具有较好的鲁棒性,而文献[10-12]中均没有提及对这种混合后处理操作情况的检测结果。

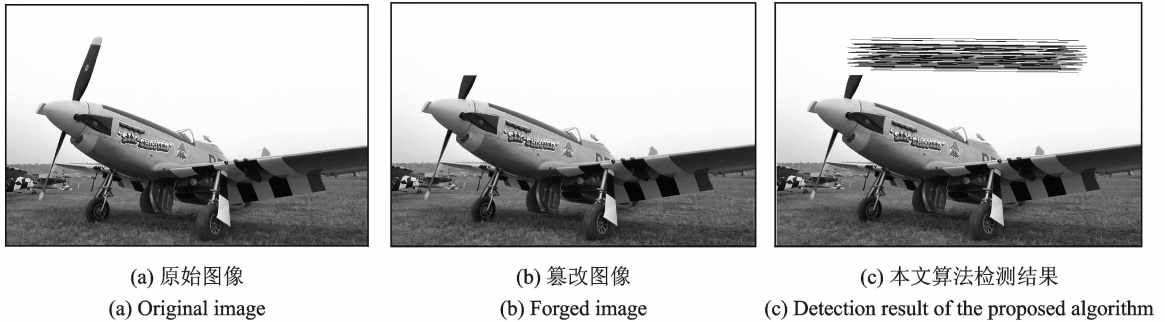


图 7 具有非显著视觉结构的篡改图像检测实例

Fig. 7 The detection example of image forgery with little visual structures

随机选取 30 幅成功检测的篡改图像记录算法平均的检测时间,实验环境为 Intel Pentium 2.13 GHz, Matlab R2010b 平台。算法的平均检测时间如表 5 所示,本文算法的检测时间远远小于文献[12]算法。文献[12]算法采用 SIFT 算法提取特征点,需要通过尺度空间极值点检测和特征点位置精确确定等步骤,计算量较大;而本文算法采用密集 Harris 算子提取特征点,计算复杂度低,并且通过计算图像空域中每个特征点邻域 5 个环形区域内像素的均值进行特征描述,不需要进行图像变换,执行效率高,并且特征向量的维数较低,从而缩短了特征向量的匹配时间。

表 5 本文算法与文献[12]算法比较

Table 5 Comparison of ref. [12] and proposed method

算法	特征点数量	匹配点数量	误匹配点数量	检测时间/s
文献[12]算法	1 769	33	1	85.13
本文算法	5 017	59	0	8.57

## 6 结束语

本文针对图像区域复制篡改方式,提出了一种基于 Harris 特征点和环形均值描述的篡改检测方法。该方法的主要特点有:(1)采用基于像素局部邻域统计估计的自适应维纳滤波方法对图像进行预处理,可以有效滤除图像噪声的同时尽可能地保留图像边缘和其他高频成分,增强了算法抵抗各种后处理操作以及混合操作的鲁棒性;(2)采用密集 Harris 角点作为特征点,与 SIFT 特征点相比具有明显的优势:特征点数量明显增加并且在图像中呈现近似均匀分布,可以有效检测针对非显著视觉结构的平坦区域和面积较小区域进行复制粘贴的篡改图像;(3)引入具有中心对称性的同心环形区域对特征点进行均值描述,使算法可以有效抵抗区域复制后的旋转和翻转变换攻击;(4)利用密集 Harris 角点作为特征点,计算复杂度较低,并且由于采用图像空域的环形均值信息对特征点进行描述,不需要进行图像变换,因此算法的执行效率较高。尽管本文算法具有上述出色的检测性能,然而对于复制区域经过缩放变换的情况失效,这是由于算法采用的密集 Harris 特征点本身不具备尺度不变性。对于缩放变换的鲁棒性

算法将是未来研究工作的一个重要方向。

### 参考文献:

- [1] Fridrich J, Soukalm D, Lukas J. Detection of copy-move forgery in digital images[C]//Digital Forensic Research Workshop. Cleveland: [s. n.], 2003,55-61.
- [2] Popescu A C, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting duplicated image regions[R]. Tech Rep TR2004-515, Dartmouth College, 2004.
- [3] Luo W, Huang J, Qiu G. Robust detection of region-duplication forgery in digital images[C]// International Conference on Pattern Recognition. Hong Kong, China: IEEE Press, 2006:746-749.
- [4] Kang X, Wei S. Identifying tampered regions using singular value decomposition in digital image forensics[C]//Proceedings of International Conference on Computer Science and Software Engineering. Wuhan, China: IEEE Press, 2008:926-930.
- [5] Bayram S, Sencar H T, Memon N. An efficient and robust method for detecting copy-move forgery[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. New York: IEEE Press, 2009.
- [6] Huang Y, Lu W, Sun W, et al. Improved DCT-based detection of copy-move forgery in images[J]. *Forensic Science International*, 2011,206(1-3):178-184.
- [7] Cao Y, Gao T, Fan L, et al. A robust detection algorithm for copy-move forgery in digital images[J]. *Forensic Science International*, 2012,214(1-3):33-43.
- [8] Zhao J, Guo J. Passive forensics for copy-move image forgery using a method based on DCT and SVD[J]. *Forensic Science International*, 2013,233(1-3):158-166.
- [9] 何德龙,倪林,吴巧玲. 同幅数字图像中 Copy-Move 型篡改的盲检测[J]. *数据采集与处理*, 2013,28(2):149-154.  
He Delong, Ni Lin, Wu Qiaoling. Passive-blind detection of copy-move forgery in one digital image[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013,28(2):149-154.
- [10] Pan X, Lyu S. Region duplication detection using image feature matching[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2010(5):857-867.
- [11] Amerini I, Ballan L, Caldelli R, et al. A SIFT-based forensic method for copy-move attack detection and transformation recovery[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2011(6):1099-1110.
- [12] Huang H, Guo W, Zhang Y. Detection of copy-move forgery in digital images using SIFT algorithm [C]//Proceedings of IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application. Wuhan, China: IEEE Press, 2008: 272-276.
- [13] Shivakumar B L, Baboo S. Detection of region duplication forgery in digital images using SURF[J]. *International Journal of Computer Science Issues*, 2011,8(4):199-205.
- [14] Christlein V, Riess C, Jordan J, et al. An evaluation of popular copy-move forgery detection approaches[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2012,7(6):1841-1854.
- [15] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]//Proc of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester: [s. n.], 1988:147-151.
- [16] Noble A. Descriptions of image surfaces[D]. Oxford: Oxford University, 1989:45.
- [17] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981,24(6):381-395.
- [18] Kodak Lossless. True color image suite[OB/EL]. <http://r0k.us/graphics/kodak/>,2013.

作者简介:赵洁(1984-),男,博士研究生,研究方向:数字图像取证、信息安全等,E-mail: zhaoj@tju.edu.cn;郭继昌(1966-),男,教授,博士生导师,研究方向:数字图像处理、滤波器理论及设计等。

