

# 基于极坐标正弦变换的Copy-move篡改检测

马杰\* 钟斌斌 焦亚男

(河北工业大学电子信息工程学院 天津 300401)

**摘要:** 该文使用极坐标正弦变换(PST)特征对图像进行Copy-move篡改检测, 将待检测图像转换成灰度图并进行PST特征提取, 并采用改进的快速近似最近邻搜索算法PatchMatch对特征描述符进行匹配, 以克服匹配全局描述符带来的处理时间较长的缺点。实验分析表明, 该文所提方法不仅对图像的线性Copy-move篡改和旋转干扰篡改有很好的效果, 而且对噪声和JPEG压缩干扰篡改也具有一定的鲁棒性。最后对综合干扰篡改实验测试发现, 在综合篡改幅度较小的情况下, 准确率可以达到98.0%。

**关键词:** 图像检测; 图像篡改; 极坐标正弦变换; PatchMatch

中图分类号: TN911.73; TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)05-1172-07

DOI: 10.11999/JEIT190481

## Copy-move Forgeries Detection Based on Polar Sine Transform

MA Jie ZHONG Binbin JIAO Yanan

(School of Electronic & Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Polar Sine Transform (PST) is used to detect Copy-move forgeries in the paper, and the image to be detected is transformed into gray scale image and feature extraction is carried out by PST. Improved PatchMatch, a fast approximate nearest neighbor search algorithm, is used to match feature descriptors to overcome the problem of long time consuming caused by matching global descriptors. Experiments show that the proposed method is not only effective for linear Copy-move forgeries and rotation interference forgeries, but also robust to noise and JPEG compression interference forgeries. Finally, the experimental results of synthetic interference forgeries show that the accuracy can reach 98.0% when the synthetic forgeries range is small.

**Key words:** Image detection; Image forgery; Polar Sine Transform (PST); PatchMatch

### 1 引言

图像的Copy-move篡改是指复制图像的一个区域, 粘贴在同一图像的另一区域用于隐藏或者改变原图像信息的操作, 在这个过程中, 可以对复制区域进行添加噪声、JPEG压缩、尺度缩放和旋转等, 以达到人眼无法分辨真伪的效果。为了确定数字图像的完整性和真实性, 许多文献对Copy-move篡改进行了讨论和研究<sup>[1]</sup>, 提出了许多效果显著的检测方法, 例如经典的SIFT<sup>[2]</sup>或SURF<sup>[3]</sup>稀疏图像描述符; 在文献<sup>[4,5]</sup>中, 列举了从基于简单的像素特征匹配到更复杂的基于光照等物理检测的大量方法; 文献<sup>[6]</sup>提出一种基于Zernike矩增强匹配的Copy-move篡改检测方法, 实验结果显示, 对添加噪声、JPEG压缩和旋转具有较好的抵抗性; 闫旭等人<sup>[7]</sup>提出以图像子带编码为基础, 采用Hu不变矩和Zernike矩的不变量对篡改图像进行检测的方法, 该算法对图像的旋转、平移攻击具有更优质的鲁棒

性; 文献<sup>[8]</sup>提出一种既能检测单个图像的Copy-move篡改, 又能够检测多个Copy-move篡改区域的匹配方法; Muhammad等人<sup>[9]</sup>基于DyWT的检测算法, 对模糊、加噪、JPEG压缩有较好的鲁棒性, 但无法抵抗旋转干扰。针对现有Copy-move篡改检测算法对图像篡改旋转干扰的检测效果差、检测速度较慢的问题, 根据PST对图像的平移和旋转保持不变的性质, 本文提出了一种基于PST特征的图像篡改检测方法, 不仅对旋转干扰有很好的效果, 而且对综合干扰也有一定的鲁棒性。为了验证以上方法的可实现性, 通过以下3个阶段检测Christlein等人在文献<sup>[10]</sup>中提供的篡改图像:

- (1) 在待检测图像上计算PST和PST-P描述符, 可以很好地表示待测图像的局部状态;
- (2) 通过匹配特征描述符, 找出图像的相似区域;
- (3) 用后期处理来细化检测并减少误差。

### 2 特征描述符PST及PST-P

图像 $f(x, y)$ 定义在连续空间上,  $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ ; 在极坐标中表示为 $f(\rho, \theta)$ , 其中 $\rho \in [0, 1]$ ,  $\theta \in [0, 2\pi]$ 。

极性谐波变换(Polar Harmonic Transform, PHT)<sup>[11]</sup>是一种2维正交矩法, 可以通过将图像投影到正交内核上获得定义在单位圆上的PHT, 即 $F_f(n, m)$

$$F_f(n, m) = C \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(\rho, \theta) K_{n,m}^*(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \quad (1)$$

其中,  $n$ 为阶数,  $n = 1, 2, \dots, \infty$ ,  $m$ 为角度依赖项,  $|m| = 0, 1, \dots, \infty$ ,  $C$ 为常数,  $K_{n,m}^*(\rho, \theta)$ 是正交核函数 $K_{n,m}(\rho, \theta)$ 的共轭,  $K_{n,m}(\rho, \theta)$ 被定义为

$$K_{n,m}(\rho, \theta) = R_{n,m}(\rho, \theta) e^{jm\theta} \quad (2)$$

核函数由径向分量 $R_{n,m}(\rho, \theta)$ 和角向分量 $e^{jm\theta}$ 组成, 由于其正交性, 可以满足以下条件

$$\begin{aligned} & \int_0^{2\pi} \int_0^1 K_{n,m}(\rho, \theta) K_{n',m'}^*(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \\ & = \delta_{nn'} \delta_{mm'} = \begin{cases} 1, & k = k' \\ 0, & k \neq k' \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

根据所用核函数的类型, 将PHT定义为极性复指数变换(Polar Complex Exponential Transform, PECT)<sup>[11]</sup>、极性余弦变换(Polar Cosine Transform, PCT)和PST等3种不同的形式。文献[9]表明, 密集描述符在很大程度上优于稀疏描述符, 本文选择密集的描述符作为图像的特征描述符, 其径向分量为

$$R_n(\rho) = \sin(\pi n \rho^2) \quad (4)$$

由式(1)、式(2)和式(4)可得PST

$$F_f(n, m) = C \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(\rho, \theta) [\sin(\pi n \rho^2) e^{jm\theta}]^* \rho d\rho d\theta \quad (5)$$

在计算PST时, 取 $n = 1, 2, 3, 4$ ,  $|m| = 0, 1, 2, 3$ ,  $C = 2/\pi$ 。虽然式(5)定义在连续图像上, 但是对于一幅定义在空间 $W$ 上 $N \times M$ 的数字图像 $f_d(x, y)$ , 其PST可以被近似的表示为

$$\begin{aligned} F_{f_d}(n, m) &= \frac{4}{\pi N M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f_d(x, y) \\ & \quad \left[ \sin(\pi n \rho^2(x, y)) e^{jm\theta(x, y)} \right]^*, \\ & \quad \begin{cases} \rho(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta(x, y) = \pm \arctan(y/x) \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

假设 $f_d^R(x, y)$ 是图像 $f_d(x, y)$ 顺时针旋转 $\alpha$ 度获得的图像, 则在这两个图像上计算的PST具有以下关联

$$F_{f_d^R}(n, m) = F_{f_d}(n, m) e^{-j\alpha} \quad (7)$$

$$|F_{f_d^R}(n, m)| = |F_{f_d}(n, m)| \quad (8)$$

由式(8)可知, 图像旋转对PST的大小没有影响, 这是PST一个非常重要的性质, 即旋转不变

性。为了保证PST的旋转不变性, 必须在有效的可用数据上进行计算, 并且在离散网格上采样。一个简单的解决方案是在笛卡尔坐标上对一个 $18 \times 18$ 的图像块 $w$ 重新采样, 由式(6)扩展得

$$\begin{aligned} F'_{f_d}(n, m) &= \frac{4}{18^2 \pi} \sum_{x=0}^{17} \sum_{y=0}^{17} f_d(x, y) \\ & \quad \cdot \left[ \sin(\pi n \rho^2(x, y)) e^{jm\theta(x, y)} \right]^* \end{aligned} \quad (9)$$

进一步地, 可以在极坐标上对图像块 $w$ 进行重新采样, 并计算得PST-P

$$\begin{aligned} F''_{f_d}(n, m) &= \frac{2}{\pi^2} \sum_{\rho=0}^1 \sum_{\theta=0}^{2\pi} f_d(x(\rho, \theta), y(\rho, \theta)) \\ & \quad \cdot \left[ \sin(\pi n \rho^2) e^{jm\theta} \right]^* \rho \end{aligned} \quad (10)$$

通过式(9)和式(10)可以分别获取待测图像的PST与PST-P描述符。

### 3 匹配算法

图像匹配是指通过一定的匹配算法在两幅或多幅图像的内容、特征、结构、纹理及灰度等的对应关系中, 寻求相似性和一致性的过程。迄今为止, 研究人员已经提出了多种图像匹配算法, 其中PatchMatch算法<sup>[12]</sup>是一种基于内容特征的具备匹配速度快和精度高等优点的匹配方法。

#### 3.1 PatchMatch

PatchMatch匹配算法最早由文献[13]提出, 核心是利用自然图像中普遍存在的局部相似性来计算两幅图像中图像块的对应关系, 即近似最近邻域(Approximate Nearest Neighbor Field, ANNF)。PatchMatch的主要思想是首先找到两幅图像中最相似的区域, 计算并且传播它们的偏移, 然后迭代地更新整个邻域。如图1所示, 图1(a)是原图, 将图中的塔区域复制一份粘贴到图1(b)右侧塔所在位置形成一幅篡改图像, 图1(c)中线条代表良好的偏移。PatchMatch算法由随机初始化和迭代更新两部分组成, 在迭代更新中, 有两个阶段: 传播和随机搜索。

设 $\mathbf{F}_f(p)$ 是图像 $f(x, y)$ 的像素 $p(p \in \Omega, \Omega$ 是规则矩形网格)的特征向量,  $d(\mathbf{F}_f(p), \mathbf{F}_f(p+r))$ 是像素 $p$ 与 $p' = p+r$ 的特征向量之间的距离, 计算图像的偏移量 $o(p)$



(a) 原图 (b) 篡改图像 (c) 偏移映射

图1 图像篡改与偏移映射

$$o(p) = \arg \min d(\mathbf{F}_f(p), \mathbf{F}_f(p+r)) \quad (11)$$

其中,  $p+r \in \Omega, r \neq 0$ 。如存在符合式(11)的变量  $r$ , 则像素  $p'$  是像素  $p$  的ANNF。

为了获得图像的ANNF, 首先要随机初始化偏移  $o(p)$

$$o(p) = \arg d(\mathbf{F}_f(p), \mathbf{F}_f(p+R)) \quad (12)$$

其中,  $R$  是一个不为零的2维随机值, 使像素  $p$  可以与图像  $f(x, y)$  上的其他像素联系起来。大多数初始随机偏移都是无用的, 也有一定的概率出现一些最佳或接近最佳距离的初始值, 使得一些像素匹配到自己的ANNF, 对于全局像素来说, 这是极少的一部分。为了得到数量更多、质量更好的ANNF, 在随机初始化之后, 还要执行一个迭代更新过程: 按照从上到下、从左到右的顺序来扫描检查当前的偏移, 将好的偏移向右向下传播。如图2(a)所示, 在奇数次迭代中, 选择以  $o(p^u)$ ,  $o(p^l)$  作为候选偏移。给像素  $p^u, p^l, p$  分别赋予一个随机偏移量, 偏移后的对应像素为  $p_1^u, p_1^l$  及  $p_1$ 。假如像素  $p^l$  对应的  $o(p^l)$  值最佳, 把  $o(p^l)$  传播给  $p^u$  和  $p$ , 接下来以像素  $p$  为中心点, 传播这个偏移, 如图2(b)。

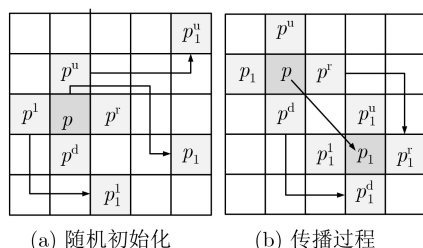


图2 PatchMatch算法

传播过程是快速收敛的, 为了避免偏移量陷入一个局部的、非最佳偏移的陷阱, 完成一次传播的同时, 执行一次随机搜索是非常有必要的。至此, PatchMatch的一次迭代才算完成。另外, 在偶数次迭代中, 使用  $o(p^r)$  和  $o(p^d)$  作为候选偏移量, 以反向扫描顺序检查, 从而向上和向左传播信息。

### 3.2 改进PatchMatch以适合于PST

原始的PatchMatch算法无法有效正确匹配旋转不变描述符, 鉴于这个原因, PatchMatch算法的作者Barnes对PatchMatch算法在文献[14]中提出了一系列改进, 与Cozzolino等人[15]提出的修改相结合, 最终可以有效地应用于旋转不变描述符的正确匹配。使用文献[16]提供的方法, 证明了改进后的匹配算法同样具有良好的收敛性。

本文使用的PatchMatch算法主要对传播阶段进行了改进, 3.1节中PatchMatch算法的传播阶段有  $o(p^u)$ ,  $o(p^l)$  两个候选偏移量, 改进后匹配算法的传播阶段有8个候选偏移量, 如图3所示。

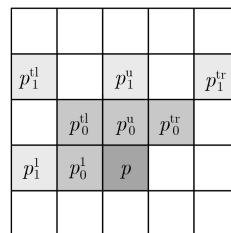


图3 改进后的传播

结合文献[14,15]以及文献[17]中对PatchMatch算法的改进可知, 对0阶偏移即  $o(p)$ ,  $o(p_0^u)$ ,  $o(p_0^l)$ ,  $o(p_0^r)$  以及  $o(p_0^d)$  保持不变, 对1阶偏移进行换算

$$O(p_1^x) = 2o(p_0^x) - o(p_1^x), x \in \{1,tl,ur\} \quad (13)$$

最终像素  $p$  的候选偏移集为  $\{o(p), o(p_0^u), o(p_0^l), o(p_0^r), o(p_0^d), O(p_1^l), O(p_1^t), O(p_1^u), O(p_1^r)\}$ , 以上偏移在每次PatchMatch迭代中, 都会执行8个不同类型的传播, 然后通过随机搜索完成一次迭代更新。最后经过几次迭代就可以得到经过旋转的图像像素  $p$  的ANNF。

## 4 去除误匹配及后期处理

由于噪声、JPEG压缩、几何变形以及光照等影响, 在匹配过程中会产生一些错误的匹配, 如图4所示, 图4(b)是经过特征描述符匹配之后的结果, 除了两座塔被检测为相似区域外, 还有大大小小的其他匹配区域。为了减少误差以便获得更高的准确率, 在图像检测的匹配阶段完成后, 还需对检测结果进行后期处理来细化检测。



图4 PatchMatch算法匹配

首先, 根据文献[15]和文献[17]后期处理的中值滤波和拟合误差滤波对图4(b)初步进行去除误匹配处理, 再对其结果采用最大类间方差法进行二值化, 得到图5(b)。

观察图5(b)可知, 还存在少量随机匹配错误, 采用连通区域删除法和形态学运算将其去除:

(1) 对图5(b)中的各连通区域进行标记, 计算各连通区域的面积;

(2) 设置一个阈值, 找到连通区域面积大于这个阈值的区域索引, 获取指定连通区域。

图5(c)为处理滤波后的检测图。最后, 应用形态侵蚀和形态扩张处理得到最终的图像篡改检测图, 如图5(d)所示。

### 5 实验结果及其分析

针对图像篡改的检测，按照待测图像输入、对RGB图像进行灰度处理、PCT-P\PST\PST-P特征提取、PatchMatch特征匹配、去除误匹配以及后期处理6个步骤来实验，Copy-move篡改检测流程图如图6所示。

对于Copy-move篡改检测准确率的度量一般在图像级和像素级上展开。图像级准确率是指给定一定数量的包括篡改图和非篡改图在内的图像集，计算准确检测出图片数量的占比。另外一种像素级准确率，当一个待检测图像被检测完成之后，可能会出现4种结果：

- (1) 真阳性(TP)：图像的篡改区域检测到的篡改像素数量；
- (2) 假阳性(FP)：图像的篡改区域未检测到的篡改像素数量；
- (3) 真阴性(TN)：图像的未篡改区域检测到的未篡改像素数量；
- (4) 假阴性(FN)：图像的未篡改区域检测到的篡改像素数量。

为了综合评估图像检测系统的像素级准确率，定义参数Ac为检测标准

$$Ac = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (14)$$

本节先对经过旋转干扰的Copy-move篡改图像进行了检测实验，其次检验本文方法对添加噪声和JPEG压缩处理图像的抵抗性，最后初步对同时经过旋转、JPEG压缩和尺度放大等综合干扰下的图像进行检测实验。

图7展示了一个简单的未添加任何干扰的图像篡改检测示例，验证该方法在最简单情况下的检测质量和对伪造区域的准确估计。本节进行了大量的带有旋转干扰的检测实验，如图8所示，通过对篡改区域旋转60°干扰的检测实验表明，不管是PST特征还是PST-P特征，检测是非常有效的。除了验证该方法对旋转干扰的效果外，还测试了图像篡改在其他一些经典干扰下的鲁棒性；图9(a)对篡改区域添加了均值为0，方差为0.10的高斯噪声；在图10(b)中，给篡改区域进行了质量因子为20的JPEG压缩处理。然而，为了让人难以分辨篡改图像的真伪，在对图像的实际伪造篡改时，是几种干

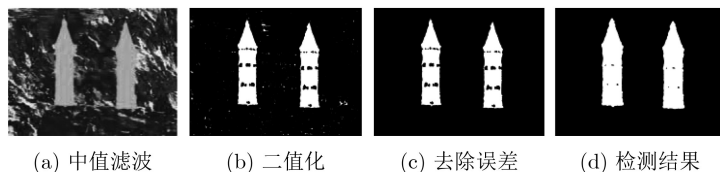


图5 后期处理

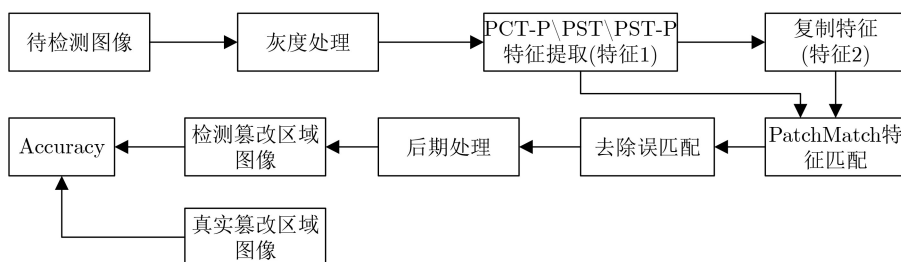


图6 篡改检测流程图

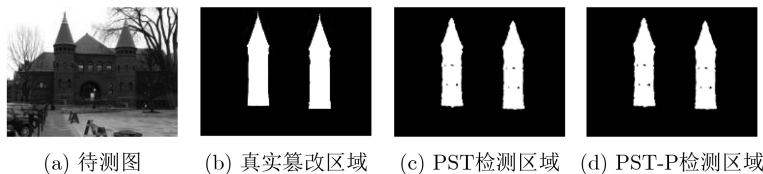


图7 篡改检测

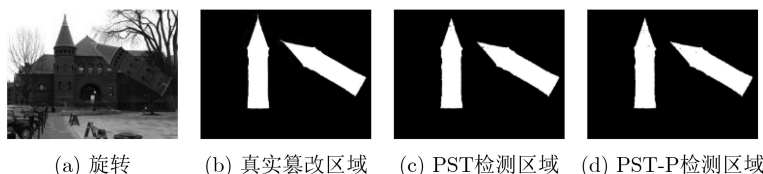


图8 旋转检测

扰的综合处理,例如:对篡改区域进行 $20^\circ$ 旋转、质量因子为60的JPEG压缩以及1.2倍放大等综合处理,如图11(b),检测这种篡改会更加具有挑战性。

通过对图7—图11中PST和PST-P的实验结果分析对比可知,PST-P抵抗干扰的能力比PST强一些。为了更加清楚直观地了解PST和PST-P对几项

干扰的抵抗力,在不同的篡改尺度上进行了准确率的测试。此外,为了对比文中方法的优劣性,对Cozzolino等人在文献[15]中提出的极性余弦变换在极坐标中的采样(PCT-P)方法也做了干扰测试,如图12所示。

图12是改进的PatchMatch算法迭代8次后分别

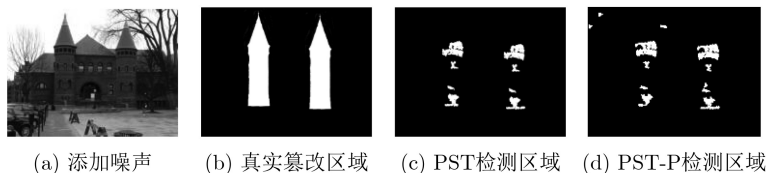


图9 添加噪声检测



图10 JPEG压缩检测



图11 综合篡改检测

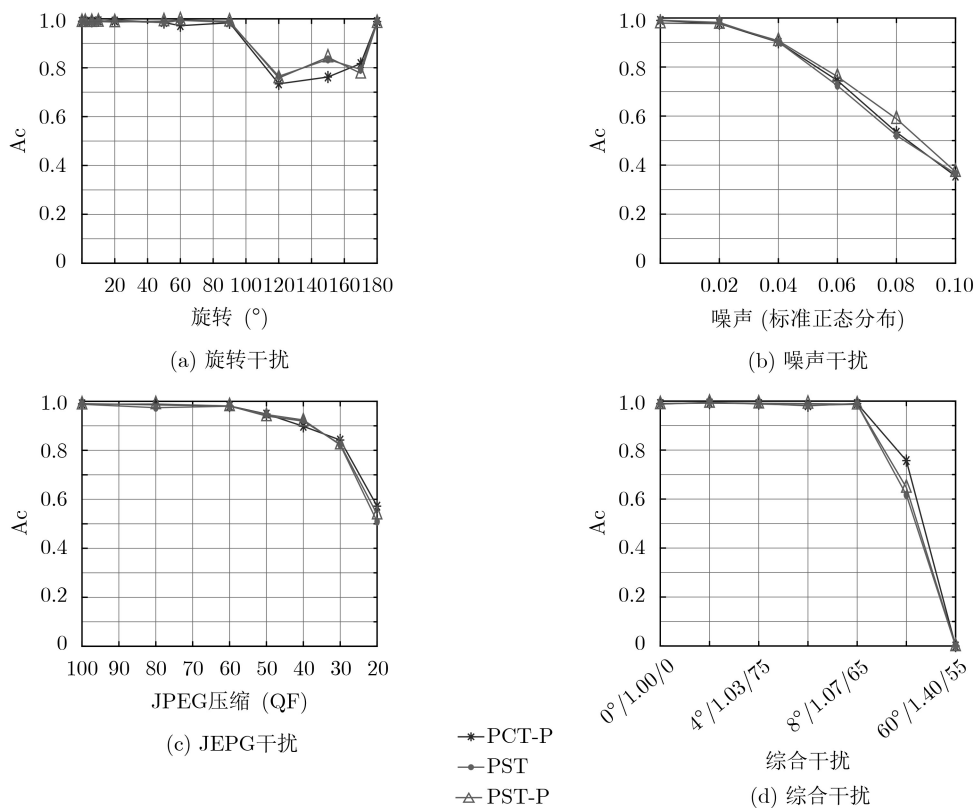


图12 3种算法在不同干扰下的准确率

在单项干扰和综合干扰下计算平均准确率的曲线图。由图中的数据可知, 所有特征用文中的方法在简单的线性Copy-move篡改中检测的准确率都非常高。除了对线性Copy-move篡改图像检测外, 着重对具有旋转篡改的图像进行了大量测试, 发现几种特征在旋转角度为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 区间中的准确率是比较平稳的, 而且Ac测量值分布在0.984~0.992之间, 在区间 $[90^{\circ}, 180^{\circ}]$ 上的测量出现了不同程度的衰减, PST和PST-P抵抗衰减的能力稍微好一些。具有噪声和JPEG压缩干扰的特征, 性能以类似的方式退化衰减, 对PST-P来说, 可以观察到一些微小的差异, 在噪声篡改的准确率检测中具有良好的表现, 在JPEG压缩质量因子较小的情况下稍微差一些。最后, 本文对综合干扰篡改的图像进行了准确性测试, 由图12的综合检测可以直观的了解, 不管是PST-P还是PCT-P, 在综合篡改幅度小的情况下, 检测的准确率很可观, 保持在0.980以上, 但是随着篡改幅度的增加, 准确率以极快的速度衰减到0。

## 6 结束语

图像处理技术的高速发展使图像的篡改伪造变得异常简单方便, 检测分辨这些篡改非常具有难度。针对现有Copy-move篡改检测算法对图像篡改旋转干扰的检测效果差、检测速度较慢的问题, 本文提出一种基于PST的图像篡改检测方法, 不仅对线性Copy-move篡改和旋转干扰篡改都有较好的效果, 而且对噪声和JPEG压缩干扰的篡改也具有一定的抵抗力。在实际的Copy-move篡改中, 为了篡改后的图像更真实和难以分辨, 往往是几种干扰综合在一起对图像进行处理。在综合篡改幅度较小的情况下, 本文所提方法能够快速准确地检测到图像篡改区域, 尽管如此, 将来对综合篡改检测还需要进一步的探索研究。

## 参考文献

- [1] AL-QERSHI O M and KHOO B E. Passive detection of copy-move forgery in digital images: State-of-the-art[J]. *Forensic Science International*, 2013, 231(1/3): 284–295. doi: [10.1016/j.forsciint.2013.05.027](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.05.027).
- [2] ZHOU Xinmin, WANG Kaiyuan, and FU Jian. A method of SIFT simplifying and matching algorithm improvement[C]. *IEEE 2016 International Conference on Industrial Informatics - Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII)*, Wuhan, China, 2016: 73–77. doi: [10.1109/ICIICII.2016.0029](https://doi.org/10.1109/ICIICII.2016.0029).
- [3] AHSAN A M and MOHAMAD D B. Machine learning technique for object detection based on SURF feature[J]. *International Journal of Computational Vision and Robotics*, 2017, 7(1/2): 6–19. doi: [10.1504/IJCVR.2017.081232](https://doi.org/10.1504/IJCVR.2017.081232).
- [4] FARID H. Image forgery detection[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 26(2): 16–25. doi: [10.1109/MSP.2008.931079](https://doi.org/10.1109/MSP.2008.931079).
- [5] PIVA A. An overview on image forensics[J]. *ISRN Signal Processing*, 2013, 2013: 496701.
- [6] AL-QERSHI O M and KHOO B E. Enhanced matching method for copy-move forgery detection by means of Zernike moments[C]. *The 13th International Workshop on Digital-Forensics and Watermarking*, Taipei, China, 2014: 485–497. doi: [10.1007/978-3-319-19321-2\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19321-2_37).
- [7] 闫旭, 姜威, 袁晔. 基于改进Hu不变矩的图像篡改检测算法[J]. *光学技术*, 2018, 44(2): 171–176. doi: [10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2018.02.008](https://doi.org/10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2018.02.008).  
YAN Xu, JIANG Wei, and BEN Xianye. Image tamper detection algorithm based on improved Hu invariant moments[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(2): 171–176. doi: [10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2018.02.008](https://doi.org/10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2018.02.008).
- [8] 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(3): 1099–1110. doi: [10.1109/TIFS.2011.2129512](https://doi.org/10.1109/TIFS.2011.2129512).
- [9] MUHAMMAD G, HUSSAIN M, KHAWAJI K, et al. Blind copy move image forgery detection using dyadic undecimated wavelet transform[C]. *The 17th IEEE International Conference on Digital Signal Processing*, Corfu, Greece, 2011. doi: [10.1109/ICDSP.2011.6004974](https://doi.org/10.1109/ICDSP.2011.6004974).
- [10] 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. doi: [10.1109/TIFS.2012.2218597](https://doi.org/10.1109/TIFS.2012.2218597).
- [11] YAP P T, JIANG Xudong, and KOT A C. Two-dimensional polar harmonic transforms for invariant image representation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(7): 1259–1270. doi: [10.1109/TPAMI.2009.119](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.119).
- [12] 李扬, 吴敏渊, 颜佳. 基于改进PatchMatch的自相似性图像超分辨率算法[J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(4): 1231–1235. doi: [10.3969/j.issn.1001-3695.2018.04.058](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2018.04.058).  
LI Yang, WU Minyuan, and YAN Jia. Self-similarity based image super-resolution algorithm using optimized PatchMatch[J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(4): 1231–1235. doi: [10.3969/j.issn.1001-3695.2018.04.058](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2018.04.058).
- [13] BARNES C, SHECHTMAN E, FINKELSTEIN A, et al. PatchMatch: A randomized correspondence algorithm for structural image editing[J]. *ACM Transactions on Graphics*,

- 2009, 28(3): No. 24. doi: [10.1145/1531326.1531330](https://doi.org/10.1145/1531326.1531330).
- [14] BARNES C, SHECHTMAN E, GOLDMAN D B, *et al.* The generalized PatchMatch correspondence algorithm[C]. The 11th European Conference on Computer Vision–ECCV 2010, Heraklion, Greece, 2010: 29–43. doi: [10.1007/978-3-642-15558-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-15558-1_3).
- [15] COZZOLINO D, POGGI G, and VERDOLIVA L. Efficient dense-field Copy-move forgery detection[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2015, 10(11): 2284–2297. doi: [10.1109/TIFS.2015.2455334](https://doi.org/10.1109/TIFS.2015.2455334).
- [16] EHRET T and ARIAS P. On the convergence of PatchMatch and its variants[C]. 2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Salt Lake City, USA, 2018: 1121–1129. doi: [10.1109/CVPR.2018.00123](https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00123).
- [17] EHRET T. Automatic detection of internal copy-move forgeries in images[J]. *Image Processing on Line*, 2018(8): 167–191. doi: [10.5201/ipol.2018.213](https://doi.org/10.5201/ipol.2018.213).

马 杰: 男, 1978年生, 教授, 研究方向为图像处理与模式识别.

钟斌斌: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为数字图像处理.

焦亚男: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为数字图像处理.