

图像区域复制篡改快速鲁棒取证

王俊文¹ 刘光杰¹ 张湛¹ 戴跃伟¹ 王执铨¹

摘要 图像区域复制篡改就是将数字图像中一部分区域进行复制并粘贴到同一幅图像的另外一个区域, 是一种简单而又常见的图像篡改技术. 现有的算法大多对区域复制后处理的鲁棒性比较差, 并且时间复杂度高. 本文针对该篡改技术, 提出一种有效快速的检测与定位篡改区域算法. 该算法首先将图像进行高斯金字塔分解, 将低频图像进行块分解, 提取每块的 Hu 矩不变特征, 并将特征向量排序, 然后为每个特征向量搜索符合阈值的相似特征向量; 最后利用区域面积阈值去除错误的相似块, 并结合数学形态学定位篡改区域. 实验结果表明该算法不仅能有效地对抗如高斯白噪声、高斯模糊以及 JPEG 压缩这些后处理操作, 而且减少了块总数, 缩小了块匹配搜索空间, 提高了运算效率.

关键词 区域复制, 篡改取证, Hu 矩, 排序, 鲁棒性
中图分类号 TP391

Fast and Robust Forensics for Image Region-duplication Forgery

WANG Jun-Wen¹ LIU Guang-Jie¹ ZHANG Zhan¹ DAI Yue-Wei¹ WANG Zhi-Quan¹

Abstract Region duplication forgery, in which a part of a digital image is copied and then pasted to another portion of the same image, is one of the simple and common image forgery techniques. Most of the existing algorithms are not robust to the post region duplication image processing, and have high time complexity. In this paper, we describe an efficient and robust algorithm for detecting and localizing this type of malicious tampering. The image is first reduced in dimension by Gaussian pyramid, and the Hu moment is applied to the fixed sized overlapping blocks of low-frequency image. The eigenvectors are lexicographically sorted. Then, similar eigenvectors are matched by a certain threshold value. Finally, the area threshold value is proposed to remove the wrong similar blocks. The mathematical morphology operations are performed to locate the tampered part. Experimental results show that our method is robust and that it can not only successfully detect this type of tampering for images subject to various forms of post region duplication image processing, including noise contamination, blurring, and severe lossy compression, but also reduce the total number of blocks to narrow block-matching searching space, which can improve the method efficiency.

Key words Region duplication, forensics of tampering, Hu moment, sorting, robustness

高质量数码相机的普及和功能日益强大的图像处理软件的广泛应用, 使得人们不需要特殊的专业技术即可对数字图像进行非常逼真的篡改, 且篡改和伪造的效果很难通过人眼分辨. 伪造的数字图像可能成为事实证据用于法庭举证、新闻报道和学术论文发表等场合, 其所导致的误判、误报道和欺诈等问题会引发难以估量的损失. 因此, 数字图像的真实性和完整性鉴别是迫切需要的技术.

数字图像认证方法可分为三类: 一是基于脆弱数字水印的图像认证, 在图像中预先嵌入脆弱水

印, 当图像遭受篡改时, 水印受损部分将暴露篡改行为^[1]; 二是基于数字签名的图像认证, 利用图像内容生成长度很短的认证码、数字签名或视觉哈希^[2]. 上述两种方法可认为是主动方法, 第一种方法需要在图像中嵌入水印, 对载体图像感知性能有影响, 水印容易受到攻击, 并且无法保护大量未嵌入水印的图像; 第二种方法虽然没有改动图像, 但需预先产生辅助信息, 且签名容易被丢弃. 基于前面两种方法的局限性, 第三种方法即被动认证方法得到越来越多的关注, 该方法既不需要事先在图像中嵌入水印, 也不依赖辅助信息, 仅根据待认证的图像本身判断其是否经过篡改、合成和润饰等伪造处理. 实际应用中待认证图像往往既未被嵌入脆弱水印, 也没有辅助信息可以利用, 因此被动认证是更具现实性的图像认证方法; 另一方面, 也正是由于认证条件的苛刻, 使得被动认证成为更具挑战性的学术课题, 对数字取证、多媒体信息安全、刑侦、甄别虚假新闻等方面具有重要意义.

数字图像被动认证近几年来受到学者的广泛关注, 已经有一些初步的研究. Popescu 等提出了一些

收稿日期 2008-09-16 收修改稿日期 2009-01-15
Received September 16, 2008; in revised form January 15, 2009
国家自然科学基金 (60574082), 中国博士后科学基金 (20070421017), 江苏省自然科学基金 (BK2008403), 江苏省普通高校研究生科研创新计划 (CX09B_100Z), 南京理工大学优秀博士研究生培养基金资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60574082), Foundation of China Postdoctoral Science (20070421017), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2008403), Graduate Research and Innovation Project of Jiangsu Province (CX09B_100Z), and Excellent Doctoral Foundation of Nanjing University of Science and Technology
1. 南京理工大学自动化学院 南京 210094
1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.01488

统计特征来检测区域复制^[3]、彩色滤波插值图像^[4]、重采样^[5]、光源方向检测^[6]等算法。Fridrich 等提出检测“复制-粘贴”篡改检测^[7], 利用数码相机传感器固有的噪声对数据图像进行认证等^[8]。Ng 等建立了图像拼接库和计算机图形 (Computer graphics, CG) 库, 并提出了检测图像拼接, 区分 CG 和真实图像的算法^[9-10]。在国内, 数字被动认证技术刚刚开始, Luo 等对 JPEG 图像剪切重压缩进行检测^[11], 并提出了新的区域复制篡改检测方法^[12]; 魏为民等也提出了一类图像篡改的被动认证方法^[13]; 朱秀明、王波、Zhou 等在重采样和模糊取证方面取得一定的进展^[14-16]。总之, 被动认证仍处于初步阶段, 很多问题有待研究, 读者可参考吴琼、Luo 等对取证研究现状的综述^[17-18]。

区域复制图像篡改是在同一幅图像内的操作, 是一种简单而又常见的图像篡改技术, 通常造假者会在复制粘贴后对图像进行加噪声、压缩等后处理操作, 以使篡改图像很难辨识与检测。Fridrich 等在文献 [7] 中提出了量化 DCT 系数模糊匹配法; Popescu 等在文献 [3] 中提出了主成分分析法, 但其都有各自的缺陷, Fridrich 仅讨论了 JPEG 后处理的情况, Farid 算法在一定后处理, 如 JPEG 质量因子小于 50 的 JPEG 压缩, 添加高斯白噪声后信噪比 (Signal to noise ratio, SNR) 小于 24 dB 时, 算法出现较高的误判率。骆伟祺等在文献 [12] 中提出了区域复制篡改的一些合理假设, 得到一种新的区域复制篡改检测方法, 能有效对抗篡改后处理操作, 但该方法不能抵抗区域复制部分的旋转攻击, 同样检测的时间复杂度高, 并且只能对一处复制粘贴进行检测。

本文通过高斯金字塔分解提取低频部分进行块分解, 从而减少了块总数, 降低了时间复杂度, 通过分析图像 Hu 矩特征得到块的鲁棒特征向量, 对特征向量排序缩小了块匹配搜索范围, 利用判别阈值实现对多处篡改区域的定位。本文第 1 节中分析了区域复制篡改模型; 高斯金字塔分解、特征提取、排序以及阈值选择在第 2 节中给出, 并由此给出了检测算法; 第 3 节通过实验证明了算法的鲁棒性, 并比较了相关几种算法的时间复杂性; 第 4 节给出了全文的总结。

1 区域复制篡改模型

对图像内容的篡改, 一般都是针对图像中某个连通区域, 为了篡改的逼真, 该连通区域与篡改区域在空域上要保持一定的位移, 这样更难于察觉, 通常我们对图像进行区域复制篡改操作大致可分为两类: 前景篡改和背景篡改。为了实现有意义的篡改, 前景与背景两种篡改的区域都不会太小。骆伟祺等

提出了区域复制篡改模型^[12], 得到了一些合理的假设, 但模型只能针对一处篡改检测, 并且无法抵御旋转篡改, 因此本文对此进行修改, 得到一更实际的篡改模型, 有如下区域复制篡改假设:

1) 被复制的区域是一个连通的区域, 区域内部无空洞;

2) 可以有几处出现复制粘贴, 但每个被复制的区域只能粘贴到一次, 粘贴的区域可以根据需要进行几何旋转;

3) 篡改与被篡改区域空间上有一定的位移, 两者不能有重合的区域;

4) 被复制的区域应不会太小。

因此, 可以将区域复制篡改描述为: 假设移动向量阈值 $\Delta_{\text{opt}} = (\Delta_{\text{opt}x}, \Delta_{\text{opt}y})$, 区域面积阈值 S_{opt} , 在一幅问题图像 $f'(P)$ 中, 存在区域对 (P_i, P'_i) , $P_i, P'_i \subset P$, $i = 1, 2, \dots$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \forall (x_1, y_1) \in P_i, f'(x_1, y_1) = f(x_2, y_2) \\ & x_2 = x_1 + \Delta_{xi}, y_2 = y_1 + \Delta_{yi}, (x_2, y_2) \in P'_i \\ & |\Delta_i| \geq |\Delta_{\text{opt}}|, |P_i| = |P'_i| \geq S_{\text{opt}} \end{aligned} \quad (1)$$

以灰度图像为例, $f(x, y)$ 表示原始图像的灰度值, 则 P'_i 是被复制的区域, P_i 是被篡改的区域, 篡改后的问题图像 $f'(x, y)$ 可以表示为:

$$f'(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & (x, y) \notin P_i \\ f(x + \Delta_{xi}, y + \Delta_{yi}), & (x, y) \in P_i \end{cases} \quad (2)$$

区域复制图像篡改取证就是要判断一幅问题图像中是否存在上述模型中的区域对 (P_i, P'_i) , $i = 1, 2, \dots$, 并定位出区域。通常情况下, 一幅图像经过区域复制篡改后, 篡改者会对图像进行后续处理, 如加入噪声、进行 JPEG 压缩等, 以达到减弱篡改边缘效应的目的, 使得人眼从视觉上难以察觉。这样被复制的区域 P'_i 与被篡改的区域 P_i 的值就不是精确相等, 因此仅仅从像素值上进行比较, 取证将会失败, 需要寻找更鲁棒的特征来检测。

2 检测算法

本文提出的算法是基于块匹配的, 首先将待检测图像进行高斯金字塔分解, 提取低频 1/4 图像进行研究; 将低频图像分解成有重叠区域的小块, 提取每块的特征, 利用特征向量将块进行排序, 降低块匹配搜索空间; 然后利用匹配阈值得到相似块对, 最后通过移动向量阈值 Δ_{opt} 、区域面积阈值 S_{opt} 定位篡改区域。

2.1 高斯金字塔分解

基于块匹配的算法需要解决的关键问题就是时

间复杂度和如何提取特征的问题, 本文首先将图像进行高斯金字塔分解, 只考虑低频图像部分, 这样大大降低了块的个数, 同时低频对噪声不敏感, 也使得提取的特征的鲁棒性得到加强. 图像处理的金字塔算法将原始图像分解成许多不同空间分辨率的子图像. 高分辨率 (尺寸较大) 的子图像放在下层, 低分辨率 (尺寸较小) 的图像放在上层, 从而形成一个金字塔形状.

设原始图像为 G_0 , 将其作为高斯金字塔的第 0 层 (底层), 高斯塔的第 l 层的构造过程为: 将 $l-1$ 层图像和一个具有低通特性的窗口函数 $w(m, n)$ 进行卷积, 再将卷积的结果进行隔行隔列的降采样, 即

$$G_l = \sum_{m=2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n)G_{l-1}(2i + m, 2j + n) \quad 0 < l \leq N, 0 \leq i < C_l, 0 \leq j < R_l \quad (3)$$

其中, N 为高斯金字塔的分解层数, C_l 为第 l 层图像的列数, R_l 为第 l 层图像的行数, 窗口函数 $w(m, n)$ 也叫权函数或生成核, 其大小通常取 5×5 . 高斯金字塔的形成过程实施了系列的低通滤波, 所以随着分解层的不断增加, 分辨率逐渐降低, 效果示意如图 1 所示.

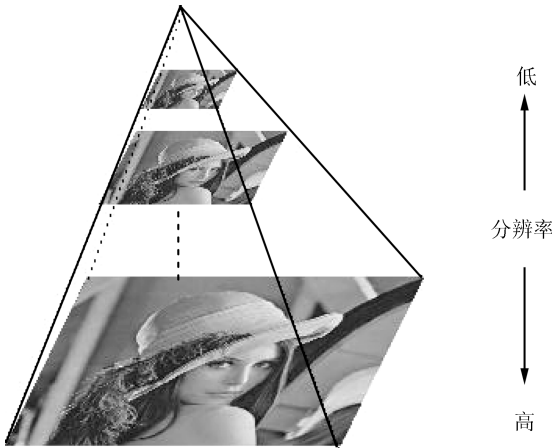


图 1 高斯金字塔分解

Fig. 1 Gaussian pyramid decomposition

2.2 Hu 矩特征提取

Hu 矩^[19] 特征主要表征了图像区域的几何特征, 又称为几何矩, 由于其具有旋转、平移、尺度等特性, 所以又称其为不变矩. 图像 $f(x, y)$ 的 $p+q$ 阶几何矩定义为

$$m_{pq} = \int \int x^p y^q f(x, y) dx dy, \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

离散状态下, $f(x, y)$ 的 $p+q$ 阶普通矩和中心矩的公式为

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^p y^q f(x, y) \quad (5)$$

$$u_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (x - x_0)^p (y - y_0)^q f(x, y) \quad (6)$$

其中, (x_0, y_0) 表示图像质心位置, 当图像发生变化时, m_{pq} 也发生变化, 而 u_{pq} 则具有平移不变性, 但对旋转依然敏感. 归一化中心矩: $y_{pq} = u_{pq}/u_{00}^r$, 式中, $r = (p + q + 2)/2, p + q = 2, 3, \dots$. 直接用普通矩或中心矩进行特征表示, 不能使得特征同时具有平移、旋转和比例不变性, 如果利用归一化中心矩, 则特征不仅具有平移、不变性, 而且还具有比例不变性. Hu 利用二阶和三阶中心矩构造了 7 个不变矩, 它们在连续图像条件下可保持平移、缩放和旋转不变. 在实验过程中, 我们选取 Lena 图像中 8 块 8×8 块 (110 : 117, 110 : 117), 将其分别旋转 90° 、求取镜像块、添加高斯噪声、进行高斯模糊和 JPEG 压缩等后处理操作. 计算原块, 重叠相邻块 (110 : 117, 111 : 118), 以及进行后处理操作的各个块的 7 个 Hu 矩如表 1 所示.

实验表明, 高阶矩对于图像几何形变、噪声等后处理因素较低阶矩更为敏感, 为了免受高频噪声干扰的影响, 加强所选特征的鲁棒性, 同时又避免计算高阶矩带来的高时间复杂度问题, 在本文中我们使用 4 维特征向量 $V(\phi_p | p = 1, 2, 3, 4)'$ 来描述低频 $1/4$ 图像各分块特征.

2.3 特征向量排序

设待检测的图像大小为 $X \times Y$, 通过第 2.1 节高斯金字塔分解 ($N = 1$), 低频部分大小为 $\lfloor X/2 \rfloor \times \lfloor Y/2 \rfloor$, 将其分解为 $b \times b$ 的小块, 相邻的小块之间只有一行或一列不相交, 共得到 $M = (\lfloor X/2 \rfloor - b + 1) \times (\lfloor Y/2 \rfloor - b + 1)$ 个图像块, 利用第 2.2 节所述方法, 提取每块的 4 维特征向量 $\mathbf{v}_i(\phi_p | p = 1, 2, 3, 4), i = 1, 2, \dots, M$, 将得到的向量按照列顺序进行存储, 得到矩阵 S , 大小为 $4 \times M$. 如果图像中存在区域复制篡改, 则被篡改与被复制部分对应的小块的特征向量应该比较接近, 为了缩小搜索范围, 我们将矩阵 S 中的所有列向量 \mathbf{v}_i , 按照其 ϕ_1 的值进行排序, 这样每个向量 \mathbf{v}_i 只需要在与它相邻的一定空间范围内寻找其符合阈值的相似块, 空间范围描述为 $[i - l, i + l]$.

2.4 阈值选择

在本文算法中, 我们定义相似度阈值 SIM_{opt} 、移动向量阈值 Δ_{opt} 和区域面积阈值 S_{opt} , 用这三个阈值来定位篡改区域.

1) 相似度阈值 SIM_{opt} . 为了衡量特征向量 \mathbf{v}_i

表 1 图像的 7 个 Hu 矩
Table 1 7 Hu moments of image

不变矩	原块	相邻块	镜像块	旋转块	高斯模糊块	添加噪声块	JPEG 压缩块
ϕ_1	7.2442	7.2505	7.2442	7.2442	7.1781	7.2442	7.2421
ϕ_2	20.8926	22.3073	20.8926	20.8926	21.5921	20.8907	20.8191
ϕ_3	29.8274	30.3906	29.8274	29.8274	30.2334	29.8211	29.5730
ϕ_4	31.3037	32.6264	31.3037	31.3037	31.3231	31.3087	31.7977
ϕ_5	62.5718	65.3573	62.5718	62.5718	63.1530	62.5870	64.1075
ϕ_6	41.8901	45.1048	41.8901	41.8901	42.2472	41.8840	42.4539
ϕ_7	62.1181	64.2650	62.0386	62.1181	62.2577	62.1181	62.5850

和 \mathbf{v}_j 之间的相似度, 我们定义

$$SIM = \sqrt{(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \otimes (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)} \quad (7)$$

其中, \otimes 表示内积. 在实验过程中, 首先随机选择 200 幅图像做区域复制篡改, 篡改块大小为 16×16 , 然后对篡改图像做不同的后处理操作, 包括添加高斯白噪声 (SNR 为 $10 \sim 40$ dB), 有损的 JPEG 压缩 (质量因子为 $40 \sim 90$), 高斯模糊 ($n_1 = n_2 = 5, \delta^2 = 1$) 对于每幅经过篡改后的图像进行高斯金字塔分解, 比较原始块所在区域与篡改块所在区域之间的变化, 利用定义的 SIM , 将上述各种情况下的相似度的平均值作为相似度阈值 SIM_{opt} .

2) 移动向量阈值 Δ_{opt} . 在块与块相似匹配过程中, 如果块与块之间存在重合区域, 则会使得对应的相似度高, 从而易造成高虚警概率, 如表 1 中原块与相邻重叠块一样, 为此提出了移动向量阈值 Δ_{opt} , 在实验过程中我们选取的块大小为 8×8 , 因此块移动向量阈值 $\Delta_{opt} > \sqrt{8 \times 8 + 8 \times 8}$.

3) 区域面积阈值 S_{opt} . 我们进行了大量的统计实验, 得出结论: 在自然图像 (除有大片平坦区域 (如蓝天或者纯白, 纯红等) 的图像外) 中存在相似大面积区域的可能性是很少的 (“大面积区域”^[12] 假定为不小于原始图像尺寸的 0.85%). 若我们检测到在一幅图像中存在大面积的相似区域, 则很有可能是被区域复制篡改过的. 如果图像中本来就有两个一样的物体, 虽然肉眼看上去没什么差别, 但是由于它们相对于拍摄光源的位置不同, 最后在形成的数字图像上两个物体也是有差异的. 另外, 它们的制作工艺本身就有误差, 因此想要达到定义的 “大面积区域” 相似的可能性很小. 在检测过程中, 由于图像可能受到未知的后处理操作, 我们检测到的块和原始的篡改块在形状上肯定有差异, 如果图像大小为 $X \times Y$, 则我们定义区域面积阈值 $S_{opt} > X \times Y \times \eta \times 0.85\%$, η 为受损系数.

经过上述分析, 在得到三个阈值后, 完整的检测算法可以描述为:

步骤 1. 设图像大小为 $X \times Y$, 经过高斯金字塔分解 ($N = 1$), 提取低频部分 G_1 , 大小为 $\lfloor X/2 \rfloor \times \lfloor Y/2 \rfloor$;

步骤 2. 将 G_1 分解为 $b \times b$ 的小块, 相邻的小块之间只有一行或一列不相交, 共得到 $M = (\lfloor X/2 \rfloor - b + 1) \times (\lfloor Y/2 \rfloor - b + 1)$ 个图像块;

步骤 3. 计算每块特征向量 \mathbf{v}_i ($\phi_p | p = 1, 2, 3, 4, i = 1, 2, \dots, M$, 按照 ϕ_1 的值将 \mathbf{v}_i 排序, 排序结束记录 \mathbf{v}_i 所对应块在 G_1 中的空间位置, 以每块的左上角元素的坐标来表示: (x_i, y_i) ;

步骤 4. 将 \mathbf{v}_i 与其相邻范围内 \mathbf{v}_j ($j \in [i-l, i+l]$, 但 $j \neq i$) 进行相似度计算, 检查是否存在 \mathbf{v}_j ,

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \arg \min_j (SIM < SIM_{opt}) \\ & \Delta = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > \Delta_{opt} \end{aligned} \quad (8)$$

若存在, 坐标 (x_i, y_i) 上所对应位置标记为 1, 若不存在则标记为 0;

步骤 5. 利用数学形态学的方法去掉一些满足条件的单独块, 使用区域填充的方法将满足条件的连通分量的 “空洞” 填补;

步骤 6. 上采样检测结果, 用区域面积阈值最终定位篡改区域.

3 仿真结果与实验对比分析

在实验中, 选取灰度图像 (RGB 图像可以转化为灰度图像), 图像大小为 400×400 , 块大小为 8×8 , 阈值 $SIM_{opt} = 0.35$, $\Delta_{opt} = 15$, $S_{opt} = 800$, $l = 25$.

3.1 鲁棒性实验

在实验过程中, 我们利用 Photoshop 对图 2 (a) 进行篡改, 篡改完成后得到篡改图像如图 2 (b) 所示, 在没有进行任何后续处理的情况下, 利用第 2 节所述方法得到检测结果如图 2 (c) 所示.

为了验证算法的鲁棒性, 我们分别对篡改后的图像进行后续处理, 添加不同程度的高斯噪声, 用不

同的质量因子对其进行 JPEG 压缩,用不同等级的模糊因子进行高斯模糊和混合处理,得到检测结果分别如图 3~5 所示.

从实验结果看,由于算法所采用的特征是在图像的低频中得到的,因此能很好地抵抗高频信号的干扰,并且所选特征是低阶几何不变矩,具有一定的鲁棒性.

在篡改过程中,为了追求一定的目的和达到所需的篡改要求,伪造者经常将篡改区域进行一定的几何形变,如图 6 (b)、图 7 (b) 和图 8 (b) 所示,粘贴区域分别进行了 180° 旋转、90° 旋转以及水平翻转.

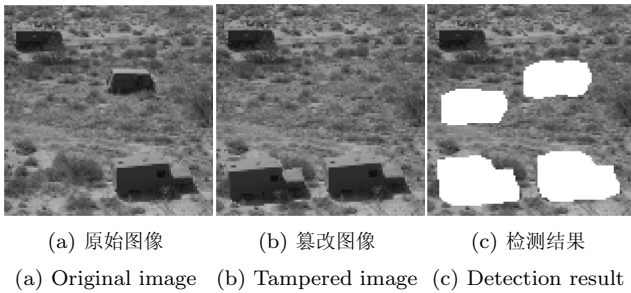


图 2 测试例子
Fig. 2 Test example

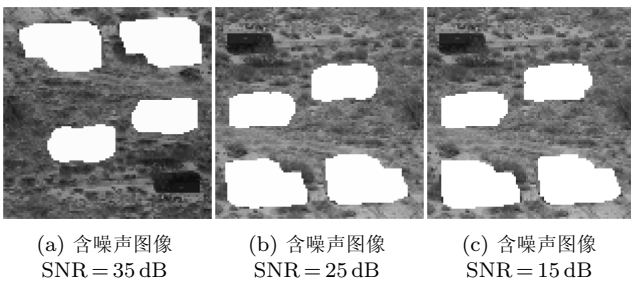


图 3 对图 2 (b) 添加不同强度的高斯噪声后的检测结果
Fig. 3 Detection results for adding the Gaussian noise to Fig. 2 (b) with different intensities

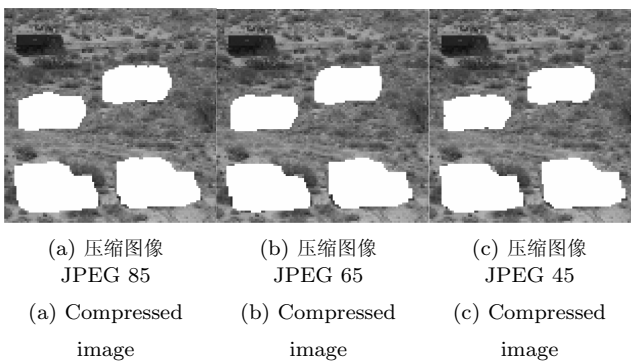


图 4 对图 2 (b) 进行不同质量因子 JPEG 压缩后的检测结果
Fig. 4 Detection results for compressing with different JPEG quality factors for Fig. 2 (b)

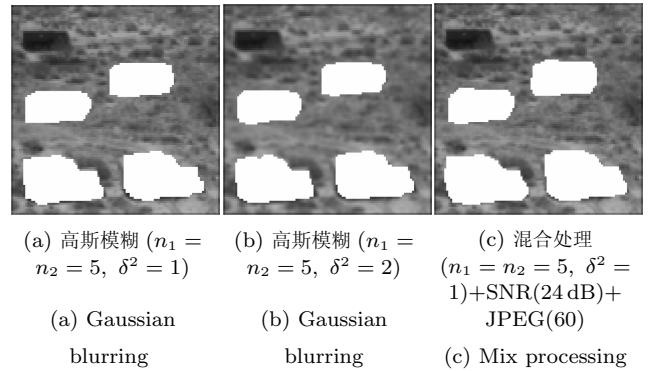


图 5 对图 2 (b) 进行高斯模糊和混合处理的检测结果
Fig. 5 Detection results for mix processing and adding the Gaussian noise to Fig. 2 (b)

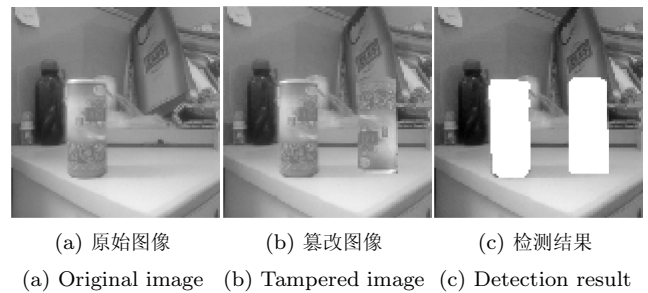


图 6 测试例子
Fig. 6 Test example

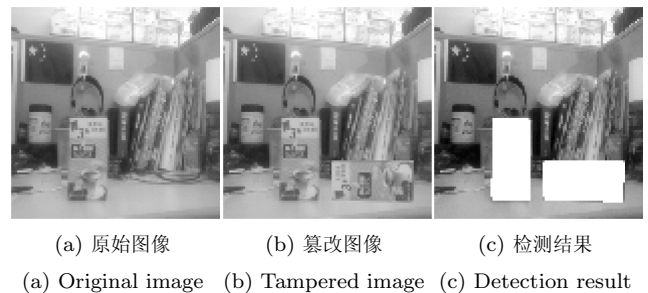


图 7 测试例子
Fig. 7 Test example

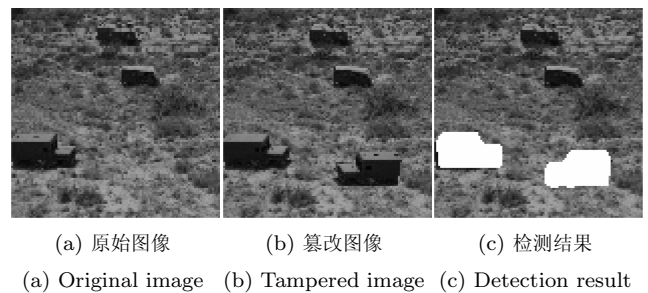


图 8 测试例子
Fig. 8 Test example

利用文中算法进行检测, 得到检测结果如图 6 (c)、图 7 (c) 和图 8 (c) 所示. 从检测结果看, 算法对篡改区域发生几何形变仍然有效, 并且检测效果良好.

为了更有效地说明算法的鲁棒性, 我们定义检测率 r 、错误率 w 分别为:

$$r = \frac{\sum_i (|P_i \cap D_i| + |P'_i \cap D'_i|)}{\sum_i (|P_i| + |P'_i|)} \quad (9)$$

$$w = \frac{\sum_i (|P_i \cup D_i| + |P'_i \cup D'_i|)}{\sum_i (|P_i| + |P'_i|)} - r \quad (10)$$

其中, P'_i 为被复制的区域, P_i 为被篡改的区域, D'_i 为检测出来被复制的区域, D_i 为检测出来被篡改的区域. 为了说明当图像遭受篡改而检测算法检测失效, 或者图像未经过篡改而检测算法却得到篡改结果这两种情况, 我们定义了第三个指标——误判率来衡量算法.

随机选取 200 幅图像 (大小均为 300×400) 进行测试, 对每一幅图像随机选取一个方块进行复制, 并把它粘贴到同一个图像中不相交的区域中, 然后对这些篡改后的图像进行不同的操作: 进行高斯模糊、添加高斯白噪声以及进行 JPEG 压缩. 在测试过程中选取方块的大小分别为图像大小的 0.853% (32×32), 1.92% (48×48), 3.413% (64×64), 5.333% (80×80). 最后统计它们在不同后处理操作下的检测率的均值、错误率的均值以及误判率.

表 2 给出了篡改图像经过高斯模糊 ($n_1 = n_2 = 5, \delta^2 = 1$) 后处理操作的检测结果. 图 9、图 10 以及表 3 给出篡改图像经过不同强度的噪声干扰后的检测率、错误率以及对应的误判率均值. 图 11、图 12 以及表 4 给出篡改图像经过不同质量因子 JPEG 压缩下的检测率、错误率以及对应的误判率均值.

表 2 高斯模糊检测结果

Table 2 Detection results for Gaussian blurring

篡改区域	检测率	错误率	误判率
32×32	0.9141	0.1087	0.09
48×48	0.9757	0.0462	0.01
64×64	0.9844	0.0313	0.00
80×80	0.9912	0.0181	0.00

从实验的结果可以看到, 在相同的后处理操作下, 随着篡改块尺寸的不断增大, 检测率递增; 在相同的尺寸下, 篡改块经过的后处理修改越小, 检测率也就越高. 从表 5 可以看出, 由于本文算法是在图像的 $1/4$ 低频空域上实现的, 因此当篡改块很小时, 算法的定位精度略比文献 [12] 算法低, 但随着块的增

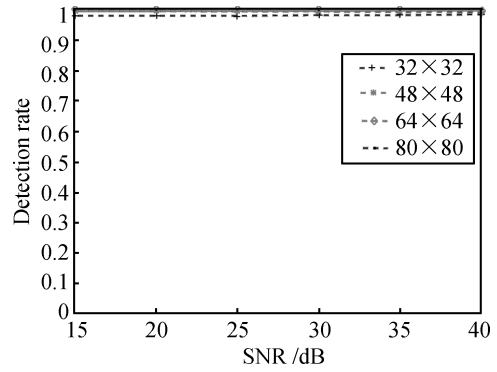


图 9 噪声 AWGN 下的检测率
Fig. 9 Detection rates for AWGN

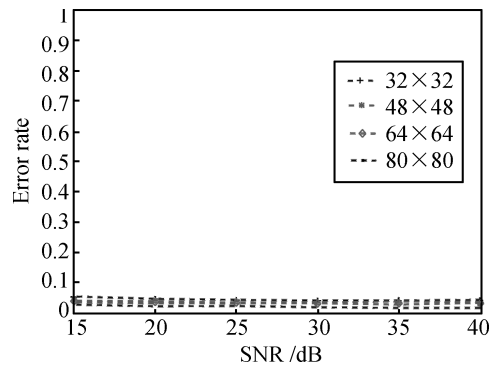


图 10 噪声 AWGN 下的错误率
Fig. 10 Error rates for AWGN

表 3 不同强度高斯噪声下的误判率

Table 3 False alarm rates for adding the Gaussian noise with different intensities

AWGN (dB)	误判率			
	32×32	48×48	64×64	80×80
15	0.18	0.03	0.01	0.00
20	0.14	0.02	0.00	0.00
25	0.06	0.01	0.00	0.00
30	0.04	0.00	0.00	0.00
35	0.04	0.00	0.00	0.00
40	0.04	0.00	0.00	0.00

表 4 不同质量因子 JPEG 压缩下的误判率

Table 4 False alarm rates for JPEG compression with different quality factors

JPEG	误判率			
	32×32	48×48	64×64	80×80
40	0.21	0.08	0.00	0.00
50	0.17	0.03	0.01	0.00
60	0.14	0.02	0.01	0.00
70	0.14	0.03	0.00	0.00
80	0.14	0.01	0.00	0.00
90	0.15	0.02	0.00	0.00

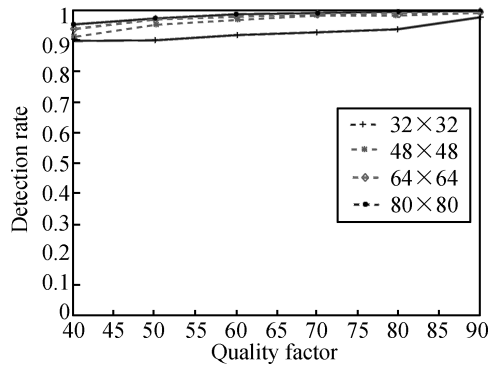


图 11 JPEG 压缩下的检测率

Fig. 11 Detection rates for JPEG compression

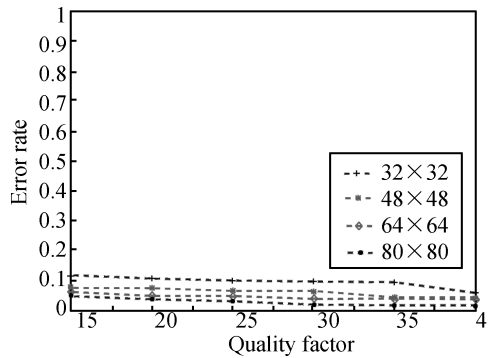


图 12 JPEG 压缩下的错误率

Fig. 12 Error rates for JPEG compression

表 5 混合后处理下的算法比较

Table 5 Comparison for mix processing

JPEG	本文算法			文献 [12] 算法		
	检测率	错误率	误判率	检测率	错误率	误判率
32 × 32	0.8896	0.1307	0.15	0.9042	0.1289	0.14
48 × 48	0.9395	0.0812	0.02	0.9331	0.0863	0.02
64 × 64	0.9603	0.0627	0.00	0.9544	0.0639	0.00
80 × 80	0.9717	0.0525	0.00	0.9539	0.0611	0.00

大, 本文算法在抵抗各种后处理操作时的鲁棒性要比文献 [12] 算法好, 在降低错误率的同时, 提高了算法的检测率.

3.2 时间复杂度对比分析

基于块匹配的算法一个很大的瓶颈是时间复杂度高, 本文针对此问题, 提出了高斯金字塔分解, 只在图像的低频分量提取特征, 并且不将块两两比较, 只需与排序后一定范围内的相邻块进行比较, 降低了时间复杂度. 以大小为 512×512 的灰度图像为例, 本文算法与其他几种算法的比较结果如表 6 所示. 从表 6 可以看出, 在图像与块大小相同的情况下, 本文算法所使用的块总数是其他三种算法的 $1/4$, 大大

降低了时间复杂度, 另外本文所提取的特征维数也少, 随着图像尺寸的增大, 时间复杂度的对比将更明显.

表 6 时间复杂度对比

Table 6 Comparison for time complexity

算法	特征提取	块总数	特征维数
文献 [3]	PCA	255 025	32
文献 [7]	DCT	255 025	64
文献 [12]	空域	247 009	5
本文	低频空域	62 001	4

4 结论

区域复制图像篡改是一种简单而又常见的图像篡改技术, 本文通过高斯金字塔分解减少了块总数, 降低了时间复杂度, 通过分析图像 Hu 矩特征得到块的鲁棒特征向量, 对特征向量排序缩小了块匹配搜索空间, 利用判别阈值实现对篡改区域的定位. 与其他算法相比, 本文的主要贡献有以下几点: 1) 针对篡改特点, 得到了一个更实际的篡改模型, 模型能够同时检测多处篡改, 并且能抵抗篡改区域的几何形变; 2) 文中采用小波金字塔分解和特征向量排序, 在降低块总数的情况下又避免了块与块两两比较, 大大降低了算法的时间复杂度与空间复杂度, 为算法的实时性奠定基础; 3) 经过实验分析比较, 选取了低阶几何不变矩来描述块特征, 使得算法在抵抗模糊、加噪、压缩等后处理操作时仍具有很高的检测率, 鲁棒性好. 当然算法也还存在需改进的地方, 在篡改很小的情况下, 如何进一步提高算法的检测率, 降低错误率与误判率将是我们下一步的工作. 另外, 区域复制图像篡改只是在一幅图像内操作的, 不同图像之间的篡改也将是我们今后研究的方向. 图像篡改的手段多种多样, 因此数字图像内容真实性的认证也将越来越受到人们的重视. 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满足实际的取证和鉴定的需要, 因此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.

References

- 1 Song Yu-Jie, Tan Tie-Niu. A brief review on fragile watermarking based image authentication. *Journal of Image and Graphics*, 2003, **8**(1): 1-7
(宋玉杰, 谭铁牛. 基于脆弱性数字水印的图像完整性验证研究. *中国图象图形学报*, 2003, **8**(1): 1-7)
- 2 Swaminathan A, Mao Y N, Wu M. Robust and secure image hashing. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2006, **1**(2): 215-230
- 3 Popescu A C, Farid H. Exposing Digital Forgeries by Detecting Duplicated Image Regions, Technical Report TR 2004-

- 515, Dartmouth College, USA, 2004
- 4 Popescu A C, Farid H. Exposing digital forgeries in color filter array interpolated images. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, **53**(10): 3948–3959
 - 5 Popescu A C, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting traces of re-sampling. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, **53**(2): 758–767
 - 6 Johnson M K, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting inconsistencies in lighting. In: *Proceedings of the 7th Workshop on Multimedia and Security*. New York, USA: ACM, 2005. 1–10
 - 7 Fridrich J, Soukal D, Lukas J. Detection of Copy-Move Forgery in Digital Images, Technical Report, Cleveland, USA, 2003
 - 8 Lukas J, Fridrich J, Goljan M. Detecting digital image forgeries using sensor pattern noise. In: *Proceedings of SPIE Security Steganography and Watermarking of Multimedia Contents*. San Jose, USA: SPIE, 2006. 362–373
 - 9 Ng T T, Chang S F, Hsu J, Xie L, Tsui M P. Physics-motivated features for distinguishing photographic images and computer graphics. In: *Proceedings of the 13th Annual ACM International Conference on Multimedia*. Singapore, Singapore: ACM, 2005. 239–248
 - 10 Ng T T, Chang S F. A model for image splicing. In: *Proceedings of International Conference on Image Processing*. Singapore, Singapore: IEEE, 2004. 1169–1172
 - 11 Luo W Q, Qu Z H, Huang J W, Qiu G P. A novel method for detecting cropped and recompressed image block. In: *Proceedings of IEEE Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Washington D. C., USA: IEEE, 2007. 217–220
 - 12 Luo Wei-Qi, Huang Ji-Wu, Qiu Guo-Ping. Robust detection of region-duplication forgery in digital image. *Chinese Journal of Computers*, 2007, **30**(11): 1998–2007
(骆伟祺, 黄继武, 丘国平. 鲁棒的区域复制图像篡改检测技术. *计算机学报*, 2007, **30**(11): 1998–2007)
 - 13 Wei Wei-Min, Wang Shuo-Zhong, Tang Zhen-Jun. Passive authentication of copy-move forgery in digital images. *Journal of Southeast University*, 2007, **37**(z): 58–61
(魏为民, 王朔中, 唐振军. 一类数字图像篡改的被动认证. *东南大学学报*, 2007, **37**(z): 58–61)
 - 14 Zhu Xiu-Ming, Xuan Guo-Rong, Yao Qiu-Ming, Tong Xue-Feng, Shi Yun-Qing. Re-sampling detection in digital forensics based on EM algorithm. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, **38**(z): 868–871
(朱秀明, 宣国荣, 姚秋明, 童学锋, 施云庆. 基于 EM 算法的数字取证中图像重采样检测. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, **38**(z): 868–871)
 - 15 Wang Bo, Sun Lu-Lu, Kong Xiang-Wei, You Xin-Gang. Image forensics technology using abnormality of local hue for blur detection. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34**(z): 2451–2454
(王波, 孙璐璐, 孔祥维, 尤新刚. 图像伪造中模糊操作的异常色调率取证技术. *电子学报*, 2006, **34**(z): 2451–2454)
 - 16 Zhou L N, Wang D M, Guo Y B, Zhang J F. Blur detection of digital forgery using mathematical morphology. In: *Proceedings of the 1st KES International Symposium*. Wroclaw, Poland: Springer, 2007. 990–998
 - 17 Wu Qiong, Li Guo-Hui, Tu Dan, Sun Shao-Jie. A survey of blind digital image forensics technology for authenticity detection. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(12): 1458–1466
(吴琼, 李国辉, 涂丹, 孙韶杰. 面向真实性鉴别的数字图像盲取证技术综述. *自动化学报*, 2008, **34**(12): 1458–1466)
 - 18 Luo W Q, Qu Z H, Pan F, Huang J W. A survey of passive technology for digital image forensics. *Frontiers of Computer Science in China*, 2007, **1**(2): 166–179
 - 19 Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariants. *IRE Transactions on Information Theory*, 1962, **8**(2): 179–187



王俊文 南京理工大学自动化学院博士研究生. 2006 年获南京理工大学自动化学院学士学位. 主要研究方向为数字取证和模式识别. 本文通信作者. E-mail: wang_junwen0556@yahoo.com.cn
(**WANG Jun-Wen** Ph.D. candidate at the School of Automation, Nanjing University of Science and Technology. He received his bachelor degree from Nanjing University of Science and Technology in 2006. His research interest covers digital forensics and pattern recognition. Corresponding author of this paper.)



刘光杰 讲师. 2006 年获南京理工大学博士学位. 主要研究方向为图像隐写和数字取证.
E-mail: guangj_liu@yahoo.com.cn
(**LIU Guang-Jie** Lecturer. He received his Ph.D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2006. His research interest covers image steganography and digital forensics.)



张湛 南京理工大学自动化学院博士研究生. 主要研究方向为图像隐写.
E-mail: zhang.zhan.08@gmail.com
(**ZHANG Zhan** Ph.D. candidate at the School of Automation, Nanjing University of Science and Technology. His main research interest is image steganography.)



戴跃伟 南京理工大学教授. 主要研究方向为数字水印和多媒体信息安全.
E-mail: daiywei@163.com
(**DAI Yue-Wei** Professor at Nanjing University of Science and Technology. His research interest covers digital watermarking and multimedia information security.)



王执铨 南京理工大学教授. 主要研究方向为容错控制和信息安全.
E-mail: wangzqwhz@yahoo.com.cn
(**WANG Zhi-Quan** Professor at Nanjing University of Science and Technology. His research interest covers fault-tolerance control and information security.)