

文章编号 1004-924X(2009)07-1686-08

基于小波变换和 Zernike 矩的图像 区域复制篡改鲁棒取证

王俊文, 刘光杰, 张 湛, 戴跃伟, 王执铨
(南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要:针对现有的图像区域复制篡改检测算法其后处理的鲁棒性较差,且时间复杂度高的问题,提出了一种有效的检测与定位篡改区域算法。该算法通过对图像进行小波分解,将低频图像进行块分解,提取每块的 Zernike 矩特征,并将特征向量排序;然后,为每个特征向量搜索阈值符合的相似特征向量;最后,利用区域面积阈值去除错误的相似块对,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常规的后处理操作,而且只在 1/4 图像上搜索块空间,提高了运算效率。本方法可用于面向图像内容的真实性鲁棒取证。

关键词:区域复制; Zernike 矩; 排序; 鲁棒性; 篡改检测

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Robust forensics for image regional duplication and forgery based on DWT and Zernike moment

WANG Jun-wen, LIU Guang-jie, ZHANG-Zhan, DAI Yue-wei, WANG Zhi-quan

(School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Most of the existing detection algorithms for testing the region duplication and forgery are not robust in the post region duplication image process, and have high time complexities. In this paper, an efficient and robust algorithm is presented for detecting and localizing this type of malicious forgery. After reducing the image dimension by Discrete Wavelet Transform(DWT), the Zernike moment is applied to the fixed sized overlapping blocks of a low-frequency image in the wavelet sub-band, and the eigenvectors are lexicographically sorted. Then, similar eigenvectors are matched by a certain threshold. Finally, the area threshold is proposed to remove the wrong similar blocks, and the mathematical morphology operations are performed to localize the forgery part. Experimental results show that proposed method is robust and not only can successfully detect this type of forgery for images subjected to post region duplication processing in various forms, but also can search block spaces in only the 1/4 image, which improves the calculation efficiency of algorithm. The method suits to the robust forensics for image contents.

Key words: region duplication; Zernike moment; sorting; robustness; forgery detection

收稿日期: 2008-08-26; 修订日期: 2008-10-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60574082); 江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2008403); 中国博士后基金资助项目(No. 20070421017); 南京理工大学优秀博士研究生培养基金资助项目

1 引言

目前,人们经常利用各种图像处理软件对数字图像进行非常逼真的篡改,但如果这些伪造的数字图像成为事实证据用于司法举证、新闻报道等场合,其所导致的误判、误报道和欺诈等问题将会引发难以估量的损失。因此,数字图像的真实性及完整性鉴别是一项迫切需要的技术。

常见的数字图像认证方法有基于脆弱数字水印的图像认证法^[1]以及基于数字签名的图像认证法^[2],这两种方法都可认为是主动方法。水印方法需要在图像中嵌入水印,对载体图像感知性能有影响;签名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,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就可以判断其是否经过篡改、合成、润饰等伪造处理。

数字图像被动认证近几年来受到学者的广泛关注,已经有了一些初步的研究。国外的 Farid^[3-6],Fridrich^[7-8],Ng 和 Chang 等人^[9-10]曾对图像源认证以及内容认证等方面进行检测。在国内,数字被动认证技术刚刚开始,黄继武等人就对 JPEG 图像剪切重压缩进行了检测^[11],并提出了新的区域复制篡改检测方法^[12];王朔中等人也提出了一类图像篡改的被动认证方法^[13];宣国荣等在重采样取证方面做出了研究^[14];孔祥维、周琳娜等在模糊取证方面取得一定的进展^[15-16]。总之,被动认证仍处于初步阶段,很多问题还有待研究,读者可参考黄继武等人对取证研究现状的综述^[1]。

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 等人在文献^[7]中提出了量化 DCT 系数模糊匹配法;Farid 等人在文献^[3]中提出了主成分分析法;但 Fridrich 仅讨论了 JPEG 后处理的情况,而 Farid 算法在一定后处理(如 JPEG 质量 < 50 的 JPEG 压缩添加高斯白噪声后 SNR < 24 db)时,算法会出现较高的误判率。骆伟祺、黄继

武在文献^[12]中提出了区域复制篡改的一些合理的假设,得到了一种新的区域复制篡改检测方法,能有效地对抗篡改后处理操作,但检测时间复杂度高,并且只能对一处复制、粘贴进行检测。

本文通过小波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,并通过分析图像 Zernike 矩特征得到块的鲁棒特征向量,对特征向量进行排序,从而缩小了块匹配搜索范围,利用判别阈值实现了对多处篡改区域的定位。

2 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,这样便于更难察觉。骆伟祺等人提出了区域复制篡改模型^[12],得到了一些合理的假设,本文针对此模型进行优化,得到了如下的区域复制篡改假设,可以用来检测图像中多处出现的复制、粘贴现象:

- (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一次;
- (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) 被复制的区域应不是太小。

因此可以将区域复制篡改描述为:假设移动向量阈值 $\Delta_{opt} = (\Delta_{optx}, \Delta_{opty})$,区域面积阈值为 S_{opt} ,在一幅问题图像 $f'(R)$ 中, \exists 区域对 (R_i, R_i') , $R_i, R_i' \subset R, i = 1, 2, \dots$.

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

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

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

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 (R_i, R_i') ,

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 R_i' 与被篡改的区域 R_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。

3 检测算法

3.1 小波域分解

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,本文首先将图像进行小波分解,只考虑低频部分,这样大大降低了块的个数,同时低频对噪声不敏感,也使得提取特征的鲁棒性得以加强。将图像进行一次小波分解如图 1 所示。

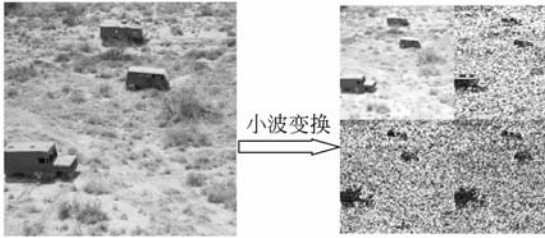


图 1 图像小波变换

Fig. 1 Image wavelet transformation

3.2 Zernike 矩特征提取

Zernike 矩的定义基于 Zernike 多项式^[17]。Zernike 多项式是单位圆 ($x^2 + y^2 \leq 1$) 上的一系列正交完备的多项式集。假设这些多项式定义为: $\{V_{nm}(x, y)\}$,

$$V_{nm}(x, y) = V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho) \exp(jm\theta), \quad (3)$$

上式中, n 是非负整数, m 是整数且满足: $n - |m|$ 是非负偶数。 (ρ, θ) 是点 (x, y) 的极坐标, $R_{nm}(\rho)$ 是 ρ 的函数, 且满足:

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s [(n-s)!] \rho^{n-2s}}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!}, \quad (4)$$

注意有: $R_{n,-m}(\rho) = R_{nm}(\rho)$ 。这些多项式互相正交, 因此满足下式:

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} [V_{nm}^*(x, y)] V_{pq}(x, y) dx dy = \frac{n+1}{\pi} \delta_{np} \delta_{mq}, \quad (5)$$

$$\text{其中, } \delta_{ab} = \begin{cases} 1, & a=b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}.$$

Zernike 矩是图像在这些正交基函数上的投影。对于数字图像 $f(x, y)$ 而言, 它的 n 阶 m 重 Zernike 矩定义为:

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x, y) [V_{nm}(x, y)]^*, x^2 + y^2 \leq 1. \quad (6)$$

在计算图像的 Zernike 矩时, 坐标原点取图像的中心, 并且将像素点的坐标映射到单位圆内。落在单位圆外的像素忽略不计。注意有: $A_{n,m}^* = A_{n,-m}$ 。

根据 Zernike 矩的正交完备性, 如果知道图像 $f(x, y)$ 所有的矩, 就可以重新构造出图像 $f(x, y)$ 。重构公式为:

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{n=0}^{N_{\max}} \sum_m A_{nm} V_{nm}(\rho, \theta), \quad (7)$$

其中, $\hat{f}(x, y)$ 是重构后的图像, N_{\max} 是矩的最大阶次。显然, 当 $N_{\max} \rightarrow \infty$ 时, 有 $\hat{f}(x, y) \rightarrow f(x, y)$ 。从重构过程可以看出: 低阶矩主要反映了图像的轮廓信息, 而高阶矩则反映了图像的高频细节部分。为了避免计算高阶矩带来的高时间复杂度问题, 本文进行了矩特征降维, 使用 3 维特征向量 $\mathbf{V}(A_{m,n} | m=n, m=1, 2, 3)$ 来描述低频 1/4 图像各分块特征。

3.3 特征向量排序

设待检测的图像大小为 $X \times Y$, 通过 3.1 节所述一次小波分解, 低频部分大小为 $[X/2] \times [Y/2]$, 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 $T = ([X/2] - b + 1) \times ([Y/2] - b + 1)$ 个图像块。利用 3.2 节所述方法, 提取每块的 3 维特征向量 $\mathbf{V}_i(A_{m,n} | m=n, m=1, 2, 3)$, $i=1, 2, \dots, T$, 将得到的向量按照列顺序进行存储, 得到矩阵 \mathbf{S} , 大小为 $3 \times T$ 。如果图像中存在区域复制篡改, 则被篡改与被复制部分所对应小块的特征向量应该比较接近。为了缩小搜索范围, 可以将矩阵 \mathbf{S} 中的所有列向量 \mathbf{V}_i , 按照其 $A_{1,1}$ 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阈值符合的相似块, 空间范围描述为 $[i-l, i+l]$ 。

3.4 阈值选择

本文算法定义了相似度阈值 SIM_{opt} , 移动向量阈值 Δ_{opt} , 区域面积阈值 S_{opt} 3 个阈值来定位篡改区域。

相似度阈值 SIM_{opt} : 为了衡量特征向量 V_i, V_j 之间的相似度, 定义为

$$SIM = \sqrt{(V_i - V_j) \otimes (V_i - V_j)}, \quad (8)$$

其中 \otimes 表示求内积。

在实验过程中, 可先随机选择 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), 有损坏性的 JPEG 压缩 (质量因子为 $40 \sim 90$)。对于每幅经过篡改后的图像, 比较原始块与篡改块对应小波低频域 (8×8) 之间的变化, 利用定义的 SIM, 将上述各种情况下的平均值作为相似度阈值 SIM_{opt} 。

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, 为此提出了移动向量阈值 Δ_{opt} 。在实验过程中所选取的块大小为 8×8 , 因此块移动向量阈值 $\Delta_{opt} > \sqrt{8 \times 8 + 8 \times 8}$ 。

区域面积阈值 S_{opt} : 在自然图像中, 除了大片平坦区域 (如蓝天, 白云等), 存在相似 (包括颜色, 形状, 纹理等) 大面积区域的可能性是很少的。若检测到一幅图像中存在大面积的相似区域, 则很可能是被区域复制篡改过的。在文 [12] 中指出大面积区域不小于原始图像尺寸的 0.85% , 在检测过程中, 检测到的块与原始的篡改块在形状上肯定有差异, 因此可定义区域面积阈值 $S_{opt} \geq [X/2] \times [Y/2] \times 0.85\% \times \eta$, η 为受损系数。

经过上面的分析可以得到 3 个阈值, 这里完整地描述检测算法为:

(1) 设图像大小为 $X \times Y$, 经过小波分解, 提取低频部分 LL_1 , 大小为 $[X/2] \times [Y/2]$;

(2) 将 LL_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 $T = ([X/2] - b + 1) \times ([Y/2] - b + 1)$ 个图像块;

(3) 计算每块特征向量 $V_i (A_{m,n} | m = n, m = 1, 2, 3), i = 1, 2, \dots, T$ 。按照 $A_{1,1}$ 的值将 V_i 排序, 排序结束后记录 V_i 所对应块在 LL_1 中的空间位置, 以每块的左上角元素的坐标 (x_i, y_i) 来表示;

(4) 将 V_i 与其相邻范围内 $V_j (j \in [i-l, i+l])$ 但 $j \neq i$ 进行相似度计算, 看是否存在 V_j ,

$$s. t. \arg \min_j (SIM < SIM_{opt})$$

$$\Delta = \sqrt{(x_i - x_j) \times (x_i - x_j) + (y_i - y_j) \times (y_i - y_j)} > \Delta_{opt} \quad (9)$$

若存在, 记录其 Δ 值, 不存在则计为 0;

(5) 统计每块所对应的 Δ 值, 绘制直方图, 将满足 $h(\Delta) > 2(\sqrt{S_{opt}} - b + 1)^2$ 且 $\Delta \neq 0$ 的 Δ 所对应块的像素值置零, 利用数学形态学的方法去掉一些满足条件的单独块, 并进行区域填充;

(6) 小波逆变换, 定位显示篡改区域。

4 仿真结果与实验对比分析

实验中所选取的图像为灰度图像 (RGB 图像可以转化为灰度图像, 也可以分 3 个通道单独检测), 测试图像大小 512×512 , 块大小为 8×8 , 选取阈值 $SIM_{opt} = 0.36, \Delta_{opt} = 15, S_{opt} = 400, l = 25$ 。

4.1 鲁棒性实验

在试验过程中, 利用 Photoshop 对图 2(a) 进行了篡改, 篡改完成后得到篡改图像如图 2(b), 在没有进行任何后续处理的情况下利用第 3 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, 本文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, 并用不同的质量因子对其进行 JPEG 压缩, 得到的检测结果分别如图 3、4 所示。

从实验结果看, 本文算法对高斯噪声具有很强的鲁棒性, 在 SNR 为 15 dB 时仍然有非常高的检测率, 这主要是因为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斯噪声这种高频信号的干扰。同样当用不同的压缩因子对篡改图像进行后续 JPEG 压缩后, 利用本文算法能较准确地得到检测结果。为了更有效地说明算法的鲁棒性, 这里定义检测率 r , 错误率 w , 且有

$$r = \frac{\sum_i (|R_i \cap D_i| + |R_i' \cap D_i'|)}{\sum_i (|R_i| + |R_i'|)}, \quad (10)$$

$$w = \frac{\sum_i (|R_i \cup D_i| + |R_i' \cup D_i'|)}{\sum_i (|R_i| + |R_i'|)} - r. \quad (11)$$



(a) 原始图像
(a) Original image



(b) 篡改图像
(b) Forgery image

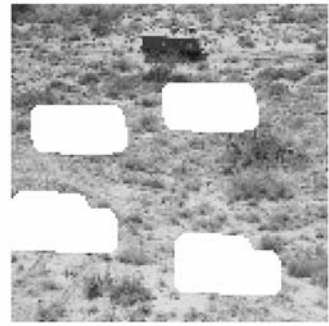


(c) 无后处理检测图
(c) Detection result without post image processing

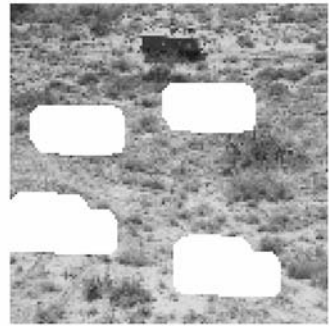
图 2 测试例子
Fig. 2 Test examples

其中 R_i' 是被复制的区域, R_i 是被篡改的区域, D_i 是检测出被复制的区域, D_i' 是检测出被篡改的区域。

随机选取 200 幅大小均为 512×512 的图像进行测试。对每一幅图像随机选取一个方块进行



(a) SNR=35db



(b) SNR=25db



(c) SNR=15db

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 after adding Gaussian noise to Fig 2 (b) with different intensities

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,添加高斯白噪声或进行 JPEG 压缩。测试过程中所选取方块的大小分别为图像大小的 1% (52×52), 2% (72×72), 3% (87×87), 4% (103×103), 最后统计它们在不同后处理操作下的检测率均值以及错误率均值,分别如图 5、6、7、8 所示。



(a) JPEG 85



(b) JPEG 65



(c) JPEG 45

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 after compression with different JPEG qualities for Fig. 2 (b)

从以上实验结果可以看到,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。当篡改图像(篡改块大小为 52×52)添加高斯白噪声(SNR 为 15 dB)或进行了质量因子为 45 的 JPEG 压缩后,检测效果仍然比较好,可见该算法具有较好的鲁棒性。

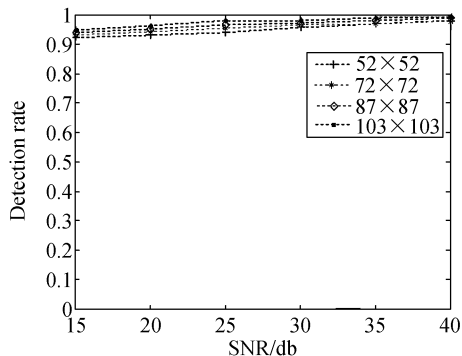


图 5 噪声 AWGN 下的检测率

Fig. 5 Detection rate under noise AWGN condition

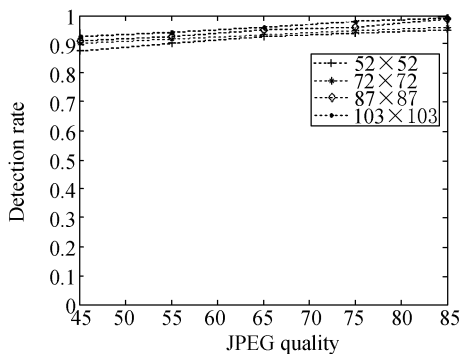


图 6 JPEG 压缩下的检测率

Fig. 6 Detection rate under JPEG compression

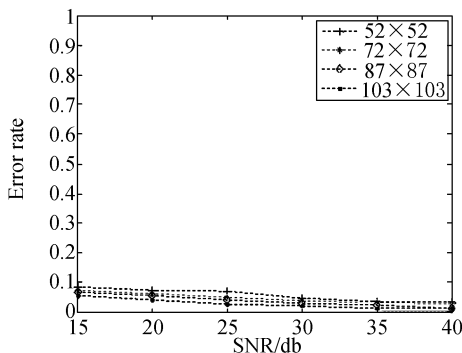


图 7 噪声 AWGN 下的错误率

Fig. 7 Error rate under noise AWGN condition

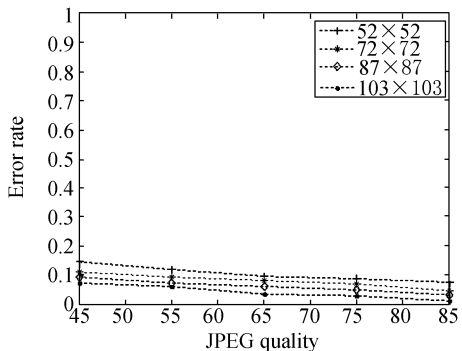


图 8 JPEG 压缩下的错误率

Fig. 8 Error rate under JPEG compression

4.2 字典式排序复杂度对比分析

本文针对时间复杂度问题采用了小波分解,只在低频图像提取特征,并且不必对块进行两两比较,只需将排序后一定范围内的相邻块进行比较,大大降低了时间复杂度。本文算法与其他几种算法的比较结果如表 1 所示,以灰度图像为例,大小为 512×512 。从表 1 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它 3 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比较少。随着图像尺寸的增大,时间复杂度的对比将更明显。

表 1 时间复杂度对比

Tab. 1 Comparison of 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
本文算法	DWT 低频	62 001	3

参考文献:

- [1] LUO W Q, QU Z H, PAN F, *et al.*. A survey of passive technology for digital image forensics[J]. *Front. Comput. Sci. China.*, 2007,1(2):166-179.
- [2] 赵玉鑫,刘光杰,戴跃伟,等.一种新的视觉 Hash 算法[J]. *光学精密工程*, 2008,16(3):551-557.
- [3] ZHAO Y X, LIU G J, DAI Y W, *et al.*. A novel perceptual image Hash algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(3):551-557. (in Chinese)
- [4] POPESCU A, FARID H. Exposing Digital Forgeries by Detecting Duplicated Image Regions [R]. Dartmouth College, USA, TR2004-515, 2004.
- [5] POPESCU A, FARID H. Exposing digital forgeries in color filter array interpolated images [J]. *IEEE Trans. Signal Processing.*, 2005,53(10):3948-3959.
- [6] POPESCU A, FARID H. Exposing digital forgeries by detecting traces of Re-sampling [J]. *IEEE Trans. Signal Processing.*, 2005,53(2):758-767.
- [7] JOHNSON M, FARID H. Exposing digital forgeries by detecting inconsistencies in lighting[C]. *Proceedings of ACM Multimedia Security Workshop, New York*, 2005:1-9.
- [8] FRIDRICH J, SOUKAL D, LUKAS J. Detection

5 结 论

针对区域复制图像篡改是一种简单而又常见的图像篡改技术,本文提出了一种检测与定位篡改区域的算法。通过小波分解得到 $1/4$ 低频区域,减少块总数,降低时间复杂度;通过分析图像 Zernike 矩特征得到块的鲁棒特征向量,对特征向量进行排序从而缩小块匹配搜索空间;最后,利用判别阈值实现了对篡改区域的定位。从实验结果看,该算法在降低时间复杂度的同时能够有效地对抗篡改后处理操作。实验中,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将是今后的研究方向。

- [9] of Copy-Move Forgery in Digital Images[R]. *Proceedings of Digital Forensic Research Workshop, Cleveland*, 2003.
- [10] LUKAS J, FRIDRICH J, GOLJAN M. Detecting digital image forgeries using sensor pattern noise [J]. *SPIE*, 2006, VIII6072(1):362-372.
- [11] NG T T, CHANG S F, HSU J, *et al.*. Physics-motivated features for distinguishing photographic images and computer graphics[C]. *Proceedings of the ACM Multimedia, Singapore*, 2005:239-248.
- [12] NG T T, CHANG S F. A model for image splitting [C]. *Proceedings of ICIP, Singapore*, 2004:1169-1172.
- [13] LUO W Q, QU Z H, HUANG J W, *et al.*. A novel method for detecting cropped and recompressed image block[C]. *Proceedings of IEEE Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2007:217-220.
- [14] 骆伟祺,黄继武,丘国平.鲁棒的区域复制图像篡改检测技术[J]. *计算机学报*, 2007,30(11):1998-2007.
- [15] LUO W Q, HUANG J W, QIU G P. Robust detection of region-duplication forgery in digital image[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007,30(11):1998-2007. (in Chinese)

- [13] 魏为民,王朔中,唐振军,等.一类数字图像篡改的被动认证[J].东南大学学报,2007,37(A):58-61. WEI W M, WANG SH ZH, TANG ZH J, *et al.*. Passive authentication of Copy-move forgery in digital images[J]. *Journal of Southeast University*, 2007,37(A):58-61. (in Chinese)
- [14] 朱秀明,宣国荣,姚秋明,等.基于EM算法的数字取证中图像重采样检测[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(A):868-871. ZHU X M, XUAN G R, YAO Q M, *et al.*. Resampling detection in digital forensics based on EM algorithm [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006,38(A):868-871. (in Chinese)
- [15] 王波,孙璐璐,孔祥维,等.图像伪造中模糊操作的异常色调率取证技术[J].电子学报,2006,34

(12A):2451-2454.

- WANG B, SUN L L, KONG X W, *et al.*. Image forensics technology using abnormality of local hue for blur detection[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2006,34(12A):2451-2454. (in Chinese)
- [16] ZHOU L N, WANG D M, GUO Y B, *et al.*. Blur detection of digital forgery using mathematical morphology[J]. *Lecture notes in computer science*, 2007:990-998.
- [17] 亓波,陈洪斌,刘顺发. Zernike 多项式波面拟合的回归分析方法[J].光学精密工程,2007,15(3):396-400. QI B, CHEN H B, LIU SH F. A novel perceptual image Hash algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(3):396-400. (in Chinese)

作者简介:



王俊文(1984—),男,安徽安庆人,博士研究生,2006年于南京理工大学获得学士学位,主要从事信息安全、数字取证等方面的研究。E-mail: wang_junwen0556@yahoo.com.cn



刘光杰(1980—)男,江苏徐州人,博士后,讲师,于2002年、2006年在南京理工大学分别获得学士、博士学位,研究方向为隐写分析、数字图像认证等。E-mail: Guangj_liu@yahoo.com.cn



张湛(1974—),男,重庆人,博士研究生,1998年于沈阳工业学院获得学士学位,2006年于贵州大学获得硕士学位,主要从事信息安全、隐写等方面的研究。E-mail: Zhang. Zhan. 08@gmail.com



戴跃伟(1962—),男,江苏镇江人,教授,博士生导师,于1984年、1987年、2002年在南京理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究领域为多媒体信息安全、数字水印等。E-mail: daiyuewei@163.com



王执铨(1939—)男,湖北武汉人,教授,博士生导师,1962年获得学士学位,主要研究领域为容错控制、多媒体信息安全等。E-mail: wangzqwhz@yahoo.com.cn