

基于小波矩的图像复制粘贴篡改检测^①

叶娇娇, 陈明志

(福州大学 数学与计算机科学学院, 福州 350108)

摘要: 图像的局部复制粘贴篡改技术, 是最常见的一种图像伪造方式, 对此提出一种基于小波矩的图像复制粘贴篡改检测算法. 首先通过变分水平集活动轮廓模型初步确定图像篡改的可疑区域; 然后对每一块可疑区域利用小波矩算法提取其小波矩特征; 接着利用余弦相关性测度判别可疑区域的相似性; 最后定位图像的篡改区域. 实验结果表明本算法能够有效提取可疑区域, 并进一步定位篡改区域. 此外, 算法对图像前景篡改区域的平移、旋转和缩放具有较强的鲁棒性.

关键词: 图像盲取证; 小波矩; 图像复制粘贴篡改; 活动轮廓模型; 余弦相关性测度

Detection of Image Copy-Move Tampering Based on Wavelet Moment

YE Jiao-Jiao, CHEN Ming-Zhi

(College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The regional copy-move tampering for a digital image is one of the most common forgery methods. This paper proposes a detection algorithm based on wavelet moment to detect the location of image copy-move tampering. Firstly, we tentatively figure out the suspicious tampered areas in an image by the active contour model based on variational level sets. Secondly, the wavelet moment algorithm is employed to extract wavelet moment features from all suspicious areas. Finally, the real tampered areas are located by using cosine correlation measure to judge the similarity of those suspicious tampered areas. The experiment demonstrates the effectiveness of above mentioned algorithm and its good robustness to the operations of translation, rotation and scale for foreground tampered areas.

Key words: blind image forensics; wavelet moment; image copy-move tampering; active contour model; cosine correlation measure

1 引言

随着图像编辑和处理工具(比如 Photoshop、Photo Impact 等)的迅速发展, 针对数字内容的篡改和伪造越来越多, 与之相对应的篡改和伪造检测问题已经成为非常重要的研究课题, 数字图像取证技术正是在此背景下产生的新的研究领域, 其目的是确定数字图像的完整性和真实性.

图像取证方法主要有主动取证和被动取证, 主动取证需要事先在图像中添加数字签名或水印技术, 其应用范围受到较大限制. 被动取证不需要事先给图像添加任何信息, 仅需要利用图像本身的特性实现认证, 因而这种技术受到越来越多的国内外学者的关注^[1-5].

数字图像伪造和篡改的方式多种多样^[6,7], 其中合成一般是复制粘贴操作, 从一张图像中复制部分区域粘贴到同一张的其它区域, 起到掩盖或去除图像中某些信息的作用, 另一种方式是从一张图像复制部分区域, 粘贴到不同图像, 起到伪造或掩盖某些信息的作用. 本文研究算法针对复制部分区域到同张图像进行取证.

近年来, 越来越多的学者从事对复制粘贴篡改检测技术的研究. 如: J. Fridrich^[2]等人提出了一种基于 DCT 量化系数的检测算法, 该方法主要采用量化 DCT 系数作为图像特征, 然后对提取的特征进行字典排序, 并引入图像块近似匹配, 检测出图像复制伪造区域. Popeseu 和 Farid^[3]等人采用主成分分析(Principal

① 基金项目:福建省自然科学基金(2011J01346);福州大学科研基金(022336)

收稿时间:2013-05-07;收到修改稿时间:2013-06-24

Component Analysis, PCA)方法,在一定程度上提高了匹配速度和检测效率. 国内, 骆伟祺^[8]等提出一种鲁棒的检测方法, 其中利用了“主转移向量”方法去除错误的相似块并得到篡改的区域. 魏为民^[9]等提出一种基于小波分解的自相关检测方法.

虽然上述算法针对图像复制粘贴篡改的检测取得了一些研究成果, 比如能够有效防御简单的复制粘贴、jpeg 压缩、高斯噪声攻击等, 但对于含有几何变换攻击如旋转缩放等失效. 本文利用小波矩算法对图像的平移、旋转和缩放保持不变性特点, 提出了一种基于小波矩的图像篡改检测方法. 该算法首先采用变分水平集活动轮廓算法提取可疑物体的轮廓, 然后对每一个可疑物体进行小波矩特征提取, 进而采用相似性匹配检测确定图像的复制粘贴区域.

2 小波矩和变分水平集活动轮廓模型

小波矩是由 Shen D 和 Horace H S^[10]提出的, 利用极坐标下小波变换的模值构造小波矩, 既反映了图像的全局信息, 又反映了图像的局域信息, 并且具有旋转、平移和缩放不变性, 小波矩算法主要应用于模式识别. 变分水平集活动轮廓模型^[11]是图像分割和边界提取的重要工具之一, 是基于曲线进化理论和水平集的思想.

2.1 基于小波矩的特征不变量

基于小波矩的不变量特征提取过程如图 1 所示.

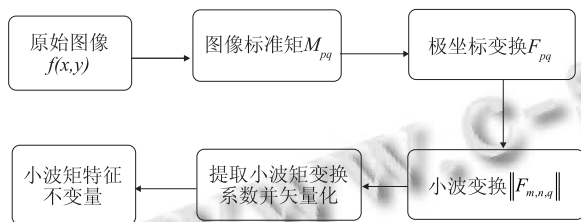


图 1 基于小波矩的不变量特征提取

设 $f(x, y)$ 为某一连续灰度图像函数, 则可定义图像的连续标准矩为:

$$M_{p,q} = \iint x^p y^q f(x, y) dx dy \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

由直角坐标和极坐标的转换关系: $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$, 可把式(1)从直角坐标系转换到极坐标系, 进而得到具有旋转不变性的矩特征表达式:

$$F_{pq} = \iint f(r, \theta) g_p(r) e^{jq\theta} r dr d\theta \quad (2)$$

其中 $g_p(r)$ 为变换核的径向分量, 而 $e^{jq\theta}$ 是变换核的角度分量.

设原图像为 $f(r, \theta)$, 旋转 α 角度后的图像为 $f(r, \theta + \alpha)$, 令 $\theta_1 = \theta + \alpha$,

则根据式

$$F_{pq} = \iint f(r, \theta) g_p(r) e^{jq\theta} r dr d\theta \quad (3)$$

旋转变换后的矩 F'_{pq} 为:

$$\begin{aligned} F'_{pq} &= \iint f(r, \theta + \alpha) g_p(r) e^{jq\theta} r dr d\theta \\ &= \iint f(r, \theta_1) g_p(r) e^{jq(\theta_1 - \alpha)} r dr d\theta_1 \\ &= \iint f(r, \theta_1) g_p(r) e^{jq\theta_1} r dr d\theta_1 e^{-jq\alpha} \\ &= F_{pq} e^{jq\alpha} \end{aligned} \quad (4)$$

由于 $\|F'_{pq}\| = \sqrt{(F'_{pq})(F'_{pq})^*} = \|F_{pq}\|$, 符号 * 表示共轭, 所以有 $\|F'_{pq}\| = \|F_{pq}\|$, 证明了图像的旋转不变性.

小波矩取小波函数作为 $g_p(r)$, 小波函数族

$$\psi_{a,b}(r) = a^{-1/2} \psi((r-b)/a) \quad (5)$$

其中 a 为扩张因子, b 为位移因子. 这里采取三次 B 样条函数作为母小波 $\psi(r)$, 即

$$\psi(r) = \frac{4a^{n+1}}{\sqrt{2\pi(n+1)}} \sigma_w \cos(2\pi f_0(2r-1)) \times \exp\left(-\frac{(2r-1)^2}{2\sigma_w^2(n+1)}\right) \quad (6)$$

其中, $n=3, a=0.697066, f_0=0.49177, \sigma_w=0.561145$. 由于图像的尺寸一般被归一化在 $r \leq 1$ 的范围内, 当 $a=0.5^m, b=0.5 * n * 0.5^m$ 时, 小波函数沿着轴向定义为 $\psi_{m,n}(r) = 2^{m/2} \psi(2^m r - 0.5n)$, 因此定义小波矩不变量为:

$$\|F_{m,n,q}\| = \left\| \int s_q(r) \psi_{m,n}(r) r dr \right\| \quad (7)$$

其中, $q = 0, 1, 2, \dots, m = 0, 1, 2, \dots, n = 0, 1, \dots, 2^{m+1}$,

$$s_q(r) = \int f(r, \theta) e^{jq\theta} d\theta \quad (8)$$

在小波矩变换的基础上, 原图像经过归一化后, 再提取小波矩特征, 最终可以得到矩特征值的平移、缩放和旋转不变性.

2.2 变分水平集活动轮廓模型

对任意的图像区域, 变分水平集模型为

$$\varepsilon(\phi) = \mu P(\phi) + \varepsilon_m(\phi) \quad (9)$$

其中 μ 是控制零水平集函数 ϕ 与符号距离函数的距离的参数, $P(\phi)$ 是罚项, 用来标量函数 ϕ 与符号距离函数的距离, $P(\phi)$ 的公式为:

$$P(\phi) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} (|\nabla \phi| - 1)^2 dx dy \quad (10)$$

$\varepsilon_m(\phi)$ 能够驱动零水平集函数 ϕ 向图像轮廓处移动。极小化函数 $\varepsilon(\phi)$ 的梯度流方程为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\partial \varepsilon}{\partial \phi} \quad (11)$$

外部能量 $\varepsilon_m(\phi)$ 能够驱动零水平集曲线移动, 同时, 由于罚项的作用, 可以保持演化函数 ϕ 近视为符号距离函数, 因此避免了重新初始化。

设图像 I, g 是边缘指标函数, 为

$$g = \frac{1}{1 + |\nabla G_\sigma * I|} \quad (12)$$

其中 G_σ 是高斯内核函数。外部能量函数定义为:

$$\varepsilon_{g,\lambda,v} = \lambda L_g(\phi) + v A_g(\phi) \quad (13)$$

其中 $\lambda > 0, v$ 是常量, $L_g(\phi)$ 和 $A_g(\phi)$ 被分别定义为

$$L_g(\phi) = \int_{\Omega} g \delta(\phi) |\nabla \phi| dx dy \quad (14)$$

$$A_g(\phi) = \int_{\Omega} g H(-\phi) dx dy \quad (15)$$

其中 δ 是 Dirac 函数, H 是 Heaviside 函数, Ω 是图像区域。 $L_g(\phi)$ 计算零水平集曲线 ϕ 的长度, $A_g(\phi)$ 用来加快曲线的演化速度。 $A_g(\phi)$ 的系数 v 可正可负, 当初始曲线在感兴趣物体的外部, 系数 v 为正, 使得曲线向内演化, 反之为负, 加快曲线向外扩张的速度。

极小化函数 ε , 可改写为:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \phi} = -\mu \left[\Delta \phi - \text{div} \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right] - \lambda \delta(\phi) \text{div} \left(g \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) - v g \delta(\phi) \quad (16)$$

其中 Δ 是拉普拉斯算子, 所以根据式(11)有:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \mu \left[\Delta \phi - \text{div} \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right] + \lambda \delta(\phi) \text{div} \left(g \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) + v g \delta(\phi) \quad (17)$$

3 相似性匹配检测

在图像相似性匹配检测中, 相似性度量包括两类: 差值测度和相关测度^[12]。差值测度采用图像所对应矢量之差的范数; 而相关测度则采用图像所对应矢量的夹角余弦, 基于余弦的相关性测度具有线性变换下的不变性, 在图像分析中其性能比差值测度更为优良, 因此本文采用相关测度做匹配检测。

设两个 n 维矢量分别为: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)'$ 则基于余弦的相关测度 $\rho(X, Y)$ 如式(18)所示。其中, ρ 越大表示二矢量越接近, 对应的图

像越相似, $0 \leq |\rho_{xy}| \leq 1, 1$ 表示两图像相同。

$$\rho(X, Y) = \frac{\left| \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (18)$$

4 基于小波矩的图像复制粘贴篡改检测算法

算法首先用变分水平集活动轮廓提取图片中可疑复制粘贴物体的轮廓, 然后利用小波矩算法提取各物体的小波矩特征, 形成特征矩阵, 再利用余弦相关性测度判别可疑区域的相似性, 定位复制粘贴篡改区域。

具体检测步骤描述如下:

Step1: 在待检测图像中提取可疑物体的轮廓。在待检测图像中确定可疑复制区域, 并采用变分水平集轮廓模型分割出可疑对象块, 与其他算法的分块计算相比, 活动轮廓提取能够降低计算量。

Step2: 小波矩特征提取。对每一个可疑对象块按照图 1 流程计算相应的小波矩特征, 所有的可疑对象块的矩特征组成了特征向量矩阵 X , 如式(19), X 的每一行对应一个可疑对象块的不变量特征向量, X 的行数是可疑对象块的个数 m 。

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Step3: 图像块相似性匹配检测。按照式(18)分析和计算式(19)矩阵 X 中所有行向量两两之间基于余弦的相关测度 $\rho(x_i, x_j), i, j = 1, 2, \dots, m$ 。

Step4: 确定复制篡改区域。在 Step3 图像块的相似性测度 $\rho(x_i, x_j)$ 结果的基础上, 按照预先设定的相似性测度阈值, 如果 $\rho_{ij} \geq \theta$, 则可确定两个向量所对应区域是潜在的复制粘贴篡改区域。

5 实验结果与分析

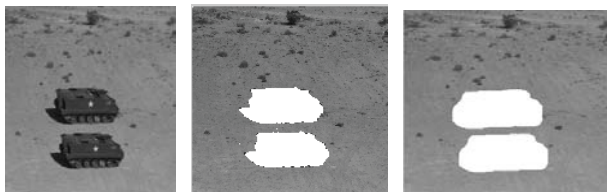
为选取合适的相似性阈值, 相似性阈值的选择直接影响到算法的检测效率, 是整个检测过程中至关重要的一步, 为此本文从图像库中选取不同场景的图片, 先对图像中的前景物体进行复制后, 采用不同的几何变换包括旋转、缩放等。为了增加阈值对图像攻击的鲁棒性: 如图像的重压缩、增加噪声等处理, 在移植另

一个区域时同样对前景目标进行后处理操作. 大量实验表明: 相似性的阈值选择为 0.975.

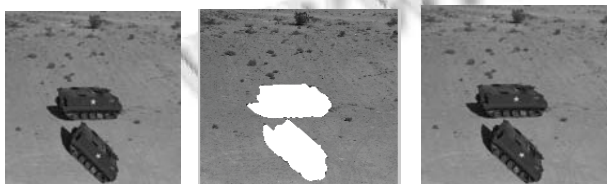
实验选取 Waterloo BragZon 标准图像库中的一幅 512×512 的坦克灰度图像作为检测目标, 并与 PCA 算法作比较, 实验测试的主要情况有: 1) 图像区域进行简单的复制粘贴篡改操作, 将原始图像中的坦克进行复制, 然后粘贴到图像附近区域如图 2, 如篡改图像-a、本文算法检测结果-a 和 PCA 算法检测结果-a; 2) 将原始图像中的坦克进行复制, 经过 45° 旋转, 然后粘贴到图像附近区域; 如篡改图像-b、本文算法检测结果-b 和 PCA 算法检测结果-b; 3) 将原始图像中的坦克进行复制, 经过 45° 旋转和 80% 的缩放, 然后粘贴到图像附近区域. 如篡改图像-c、本文算法检测结果-c 和 PCA 算法检测结果-c; 3) 将原始图像中的坦克进行复制, 经过 80° 旋转和 75% 的缩放, 然后粘贴到图像附近区域. 如篡改图像-d、本文算法检测结果-d 和 PCA 算法检测结果-d.



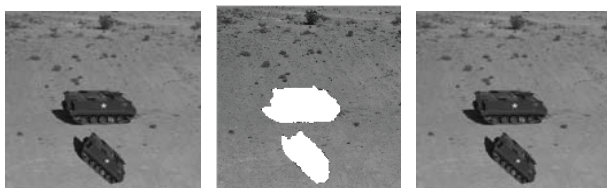
原始图像



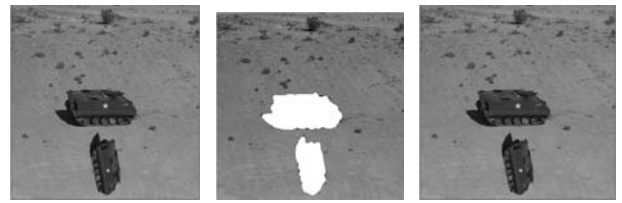
篡改图像-a 本文算法检测结果-a PCA 算法检测结果-a



篡改图像-b 本文算法检测结果-b PCA 算法检测结果-b



篡改图像-c 本文算法检测结果-c PCA 算法检测结果-c



篡改图像-d 本文算法检测结果-d PCA 算法检测结果-d
图 2 图像复制粘贴检测结果

表 1、表 2、表 3、表 4 分别为篡改图像-a、篡改图像-b、篡改图像-c 和篡改图像-d 的可疑区域小波矩相似性度量, 其中 A、B 是两辆坦克的标注.

表 1 (图-a)可疑区域小波矩相似性度量

	$\ F_{312}\ $	$\ F_{322}\ $	$\ F_{332}\ $	$\ F_{342}\ $	相似性
A	4931	2301	230	2	0.9986
B	5250	2799	251	3	

表 2 (图-b)可疑区域小波矩相似性度量

	$\ F_{312}\ $	$\ F_{322}\ $	$\ F_{332}\ $	$\ F_{342}\ $	相似性
A	4931	2301	230	2	0.9888
B	3891	2583	257	3	

表 3 (图-c)可疑区域小波矩相似性度量

	$\ F_{312}\ $	$\ F_{322}\ $	$\ F_{332}\ $	$\ F_{342}\ $	相似性
A	4931	2301	230	2	0.9849
B	3132	2184	305	3	

表 4 (图-d)可疑区域小波矩相似性度量

	$\ F_{312}\ $	$\ F_{322}\ $	$\ F_{332}\ $	$\ F_{342}\ $	相似性
A	4931	2301	230	2	0.9866
B	6329	1890	106	1	

以上实验结果表明, 本算法对图像前景篡改区域的平移、旋转和缩放具有较强的鲁棒性, 而且与 PCA 算法相比, PCA 算法仅仅考虑了复制区域的平移变换, 不能实现图像篡改区域旋转和缩放操作的检测, 而且现有的图像复制粘贴篡改检测算法^[3,4]也只考虑了篡改区域的平移变换.

6 结束语

本文利用小波矩算法对图像的平移、旋转和缩放

保持不变性特点,提出了一种基于小波矩的图像篡改检测方法.该方法首先采用变分水平集活动轮廓算法提取可疑物体的轮廓,然后对每一个可疑物体进行小波矩特征提取,进而采用相似性匹配检测确定图像的复制粘贴区域.实验结果表明,该算法对篡改区域的平移、旋转和缩放等操作具有较强的鲁棒性.但是本文算法只能针对前景物体的复制篡改具有检测性,不能检测图像的背景复制粘贴篡改,今后的任务是研究适用前景背景复制粘贴篡改算法,并且能够抵抗平移、旋转和缩放等几何变换攻击.

参考文献

- 1 Yu GJ, Lu CS, Liao HY. Mean quantization blind watermarking for image authentication. IEEE International Conference on Image Processing. Vancouver BC, Canada. 2000. 706-709.
- 2 Fridrich AJ, Soukal BD, Mukluks AJ. Detection of Copy-Move forgery in digital images. Proc. of Digital Forensic Research Workshop. 2003. 5-8.
- 3 Popescu AC, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting duplicated image region [Technical Report]. 2004-515. Hanover, Department of Computer Science, Dartmouth College. USA. 2004.
- 4 Christlein V. On rotation invariance Copy-Move forgery detection. Information Forensics and Security (WIFS). 2010. 1-6.
- 5 康晓兵,张二虎,陈亚军.下采样对数字图像伪造检测的影响分析.计算机工程,2012,38(16):215-218.
- 6 吴琼,李国辉,涂丹.面向真实性鉴别的数字图像盲取证被动取证技术综述.自动化学报,2008,34(12):1458-1466.
- 7 周琳娜,王东明.数字图像取证技术.北京:北京邮电大学出版社.2008.
- 8 骆伟祺,黄继武,邱国平.鲁棒的区域复制图像篡改检测技术.计算机学报,2007,30(11):1998-2006.
- 9 魏为民,唐振军.利用 JPEG 块效应不一致性的合成图像盲检测.中国图像图形学报,2009,14(11):2387-2390.
- 10 Shen D, Ip SH. Discriminative wavelet shape descriptors for recognition of 2-D patterns. Pattern Recognition, 1999 (32): 151-165.
- 11 Li CM, Xu CY, Gui CF, Martin D. Fox. level set evolution without reinitialization: A New Variational Formulation. Conference Publications. 2005. 430-436.
- 12 孙即样.图像分析.北京:科学出版社.2009.
- 13 子·激光,2012,23(6):1173-1180.
- 10 Rein S, Reisslein M. Low-memory wavelet transforms for wireless sensor networks: a tutorial. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011(13): 291-307.
- 11 Ma T, Shrestha P, Hempel M, Peng D, Sharif H. Low-complexity image coder/decoder with an approaching-entropy quad-tree search code for embedded computing platforms. 2011 18th IEEE International Conference on Image Processing. 2011. 297-300.

(上接第 116 页)

IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'05). 2005.3. 201-204

- 6 张军,成礼智,杨海滨,黄魁华.基于纹理的自适应提升小波变换图像压缩.计算机学报,2010,33(1): 184-191.
- 7 林娜,倪林,刘权.基于 ADL 小波变换的图像压缩算法.计算机工程,2011,37(21):199-201.
- 8 宋宇,王美玲,翟双.基于小波变换的图像压缩算法.长春工业大学学报(自然科学版),2011,32(6):558-561.
- 9 张德干,康学净,王京辉.一种新的图像压缩编码算法.光电