

# 基于最近邻搜索耦合近邻损耗聚类的图像伪造检测算法

史二颖<sup>1</sup>, 朱家群<sup>2</sup>, 杨长春<sup>2</sup>

(1.常州机电职业技术学院, 常州 213164; 2.常州大学, 常州 213164)

**摘要:** **目的** 为了解决当前图像伪造检测算法在对图像进行伪造检测时, 主要依靠全局搜索的方式来完成特征点匹配, 导致其检测效率较低, 且在对复杂伪造图像进行检测时, 易出现检测精度不高和检测错误的不足。**方法** 提出基于最近邻搜索耦合近邻损耗聚类的图像伪造检测算法。首先引入积分图像的方法, 对图像进行预处理, 借助 Hessian 矩阵行列式来提取特征点。利用特征点构建圆形区域, 通过求取圆形区域内 Haar 小波响应获取特征点的特征描述符。然后通过特征描述符建立 KD 树索引, 利用最近邻搜索方法代替 SURF 中全局搜索的方法, 对 SURF 进行改进, 完成特征点的匹配。最后, 利用特征点间的近邻关系求取近邻函数值, 通过近邻函数值对特征点进行聚类, 完成图像的伪造检测。**结果** 实验结果显示, 与当前图像伪造检测算法相比, 所提算法具有更高的检测效率以及更高的检测正确度。**结论** 所提算法具备较高的检测精度, 在印刷防伪与信息安全等领域具有较好的应用价值。

**关键词:** 图像伪造检测; 最近邻搜索; SURF 特征; KD 树; 特征聚类; Haar 小波响应

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)05-0185-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.035

## Image Forgery Detection Algorithm Based on Nearest Neighbor Search Coupling Neighbor Loss Clustering

SHI Er-ying<sup>1</sup>, ZHU Jia-qun<sup>2</sup>, YANG Chang-chun<sup>2</sup>

(1.Changzhou Vocational Institute of Mechatronic Technology, Changzhou 213164, China;

2.Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the problem that the current image forgery detection algorithm matches the feature points by mainly relying on the global search during the image forgery detection, thus leading to low detection efficiency; and to solve such deficiencies as low detection accuracy and detection error likely to occur during the detection of complex forgery image. An image forgery detection algorithm based on the nearest neighbor search coupling neighbor loss clustering was proposed. Firstly, the image was pre-processed by the method of integral image, and then the feature points were extracted by Hessian matrix determinant. The feature points were used to construct the circular region, and the feature descriptors of the feature points were obtained by calculating the Haar wavelet response in the circular region. Then, the KD tree index was established by the feature descriptor, and the nearest neighbor search method was used instead of the global search method in SURF to improve the SURF and complete the matching of feature points. Finally, the nearest neighbor function value was obtained with the nearest neighbor relation between the feature points, and then the feature points were clustered by the nearest neighbor function values, and the image forgery detection was completed. The experimental results showed that the proposed algorithm had higher detection efficiency and higher detection accuracy compared with the current image forgery detection algorithm. The proposed algorithm has high detection accuracy and good application value in the field of printing anti-counterfeiting and information security.

收稿日期: 2017-04-22

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20140159); 江苏省自然科学基金 (BK20135638)

作者简介: 史二颖 (1980—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为计算机图像、计算机应用、网络信息安全。

**KEY WORDS:** image forgery detection; nearest neighbor search; SURF feature; KD tree; feature clustering; Haar wavelet response

由于数字图像处理技术的不断发展,涌现出了较多的图像处理软件,通过这些软件,攻击者可以很容易地对图像内容进行篡改。这些篡改图像会给人们传递错误信息,给用户带来严重的信息安全隐患。如在医疗诊断中,如果拍摄图像被篡改,将会引起错误的诊断。在刑侦探测中,如果采集的图像被篡改,将会引起错误的侦探结果等<sup>[1-2]</sup>。由于被篡改的图像内容难以通过肉眼直接辨别,所以对图像伪造检测的方法进行研究就显得尤为重要。

为了实现对伪造图像进行快速、准确检测,诸多研究人员提出了一系列的图像伪造检测方法,如王浩明等<sup>[3]</sup>提出了基于 DCT 系数直方图差异的 JPEG 图像篡改检测的算法,通过明确质量因子与双压后图像 DCT 系数直方图统计特性的关系,并利用图像的质量压缩因子对图像分块完成图像篡改的检测,实验表明该方法对篡改图像具有一定的检测效果,但是该方法难以适应经过模糊等手段干扰的复杂伪造图像的检测。Hashmi 等<sup>[4]</sup>提出了基于 DWT 和 SIFT 特征的复制粘贴图像伪造检测方法,并通过实验表明了该方法能对伪造图像进行检测。由于 SIFT 提取的角点中具有伪角点,并且角点数量较多,导致该算法检测效率不高,检测正确度不理想。赵中武等<sup>[5]</sup>提出了基于非负矩阵分解的图像复制粘贴伪造检测,利用离散小波变化获取低频近似分量,然后利用非负矩阵分解对低频分量进行二次特征提取,通过 Jaccard 相似度对图像块间的相似度进行度量,完成图像篡改区域的检测,实验显示该方法对伪造图像的检测正确度较好。在复制区域与粘贴区域存在重叠时,该方法的就会存在错误检测的现象。如 Reza 等<sup>[6]</sup>提出了基于多分辨率局部二值模式的复制粘贴图像伪造检测算法,实验验证了该方法的有效性,但由于该方法中难以获取合适的阈值,导致算法的鲁棒性较差。对此,文中提出了基于最近邻搜索耦合近邻损耗聚类的图像伪造检测算法,以提高伪造内容的检测精度与效率。

## 1 文中图像伪造检测算法

文中图像伪造检测算法的过程见图 1。由图 1 可知,文中算法主要分为 4 个步骤:利用积分图像的方法完成图像的预处理,然后利用 Hessian 矩阵行列式完成特征点的提取,以提高算法的效率;通过求取 Haar 小波的响应值完成特征描述符的获取;利用基于 KD 树索引的最近邻搜索方法完成特征点的匹配,以降低算法的计算复杂度,提高算法的检测正确度;利用近邻损耗聚类完成特征点的聚类。

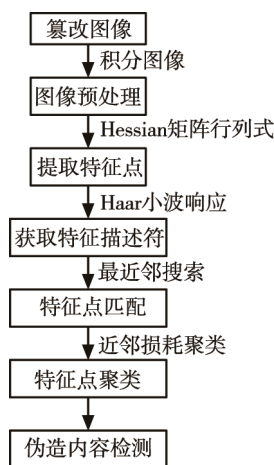


图 1 文中图像伪造检测算法过程  
Fig.1 The process of the proposed image forgery detection algorithm

### 1.1 图像预处理及特征点提取

#### 1.1.1 图像预处理

通过积分图像对源图像进行预处理,以提高算法的工作效率。对于源图像中任意一点  $(i, j)$ , 其与原点组成的矩形窗口内的积分图像表示该窗口中灰度值的总和<sup>[7]</sup>:

$$T'(i, j) = \sum_{i=0}^i \sum_{j=0}^j T(i, j) \quad (1)$$

式中:  $T'(i, j)$  为积分图像;  $T(i, j)$  为源图像。

对于图 2 中的矩形窗口 M 的灰度值总和  $T_M$  可通过其对应的顶点  $(A, B, C, D)$  来实现<sup>[8]</sup>:

$$T_M = D + A - (C + B) \quad (2)$$

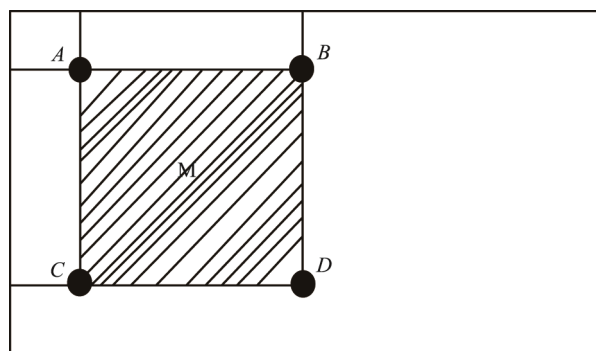


图 2 窗口灰度值求和  
Fig.2 The sum of window gray values

#### 1.1.2 提取特征点

利用 Hessian 矩阵行列式来提取源图像中的特征点。对于二阶可微函数  $f(x, y)$ , 其对应的 Hessian 矩阵为<sup>[9]</sup>:

$$H(f(x,y)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

与之对应的 Hessian 矩阵行列式为：

$$\det(H) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2 \quad (4)$$

该行列式表示 Hessian 矩阵特征值的乘积，若  $\det(H) < 0$ ，则判定点  $(x,y)$  为非特征点，反之则判定点  $(x,y)$  为特征点。将图像中点  $R(x,y)$  代入式 (3)，并用经过归一化处理的高斯滤波器对图像的二阶偏导进行计算，若利用  $L_{xx}(x,y,\sigma)$  表示图像中点  $(x,y)$  与高斯二阶偏导  $\frac{\partial^2 g(x,y,\sigma)}{\partial x^2}$  的卷积，则  $R(x,y)$  在尺度为  $\sigma$  处的 Hessian 矩阵为：

$$H(x,y,\sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x,y,\sigma) & L_{xy}(x,y,\sigma) \\ L_{xy}(x,y,\sigma) & L_{yy}(x,y,\sigma) \end{bmatrix} \quad (5)$$

在此，将采用盒式滤波器来近似代替二阶高斯滤波器，以提升算法的效率。一个尺度因子  $\sigma=1.2$ ，尺寸为  $9 \times 9$  的盒式滤波模板见图 3<sup>[10]</sup>。

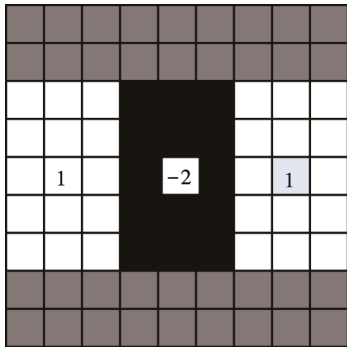


图 3 x 方向的盒式滤波模板

Fig.3 Box filter template in x direction

当尺度因子  $\sigma=1.2$  时，将盒式滤波器与图像卷积运算的结果记为  $D_{xx}$ 、 $D_{xy}$  以及  $D_{yy}$ ，为了减少用盒式滤波器近似二阶高斯滤波器而带来的误差，则有：

$$\frac{\|L_{xy}(1.2)\| \|D_{xx}(9)\|}{\|L_{xx}(1.2)\| \|D_{xy}(9)\|} = 0.912 \approx 0.9 \quad (6)$$

式中： $\|\cdot\|$  为范数。可得 Hessian 矩阵行列式为：

$$\det(H) = D_{xx} D_{yy} - (0.9 D_{xy})^2 \quad (7)$$

利用 Hessian 矩阵行列式可以得到各个尺度的极值点，通过这些极值点可获得一个  $3 \times 3 \times 3$  的局部区域，在该区域中将每个极值点与其邻近的 26 个点进行比较，若某个极值点的响应值比其邻近的 26 个点的响应值都大，则判定该极值点为特征点<sup>[11]</sup>。

## 1.2 获取特征点主方向及描述子向量

特征描述符的生成包括获取特征点的主方向以

及描述子向量。文中通过对 Haar 小波<sup>[12]</sup>进行计算来获取特征描述符。将尺度因子为  $\lambda$  的特征点作为圆心，以  $6\lambda$  为半径，构建一个圆形区域，采用以  $4\lambda$  为尺寸的 Haar 小波计算  $x, y$  方向上的 Haar 小波响应。并以圆心为原点，利用一个  $60^\circ$  的扇形区域旋转 1 周，计算旋转所包含区域的 Haar 小波响应向量和，再对所有向量和进行对比，选取最长的向量所对应的方向作为特征点主方向<sup>[13]</sup>。

沿主方向构造一个尺寸为  $20\lambda \times 20\lambda$  的矩形窗口，并将其均分为  $4 \times 4$  个子域，对每个子域分别计算主方向及其对应的垂直方向上的 Haar 小波响应，分别用  $d_x$  及  $d_y$  表示。然后对每个子域内的  $d_x, d_y$  以及  $|d_x|, |d_y|$  进行求和，可得  $\sum d_x, \sum d_y, \sum |d_x|, \sum |d_y|$ ，因此， $4 \times 4$  个子域共有 64 个向量，将这些向量进行归一化处理后便得到特征点对应的特征描述符<sup>[14]</sup>。

## 1.3 特征点匹配

在 SURF 方法中，采用的是对特征点进行全局搜索，利用最近邻和次近邻的比值方法完成特征点的匹配。该方法由于搜索数据较多，导致算法效率下降。对此，文中利用 KD 树索引，通过搜索 KD 树上与待匹配特征点距离最近的邻点，构建最近邻搜索法则，对 SURF 进行改进，完成特征点的匹配。最近邻搜索法则的过程为：首先，利用已知的数据集建立 KD 树<sup>[15-16]</sup>。然后从根节点递归的向下搜索直到叶子节点，遗漏的节点被添加进队列中，将队列中的节点进行比较选出当前维度上距离最小的点，继续搜索到叶子节点。最后从搜索到的  $N$  个最近邻点中，选取最近邻点与次近邻点分别与目标点做距离差值计算，若计算结果小于预定的阈值，则该最近邻点则被判为搜索结果；若  $N=0$  则表示没有搜索到最近邻点。将最近邻搜索法则用于特征点的匹配，其过程如下所述。首先，利用欧式距离  $D$  对特征点的相似性进行判定<sup>[17]</sup>：

$$D(K_1, K_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (t_{1i} - t_{2i})^2} \quad (8)$$

式中： $K_1$  和  $K_2$  分别为源图像上的 2 个特征点； $t_{1i}$  和  $t_{2i}$  分别为  $K_1$  和  $K_2$  对应的特征描述符中的第  $i$  个分量。根据相似性的判定结果构建 KD 树。然后，将搜索的最近邻目标点数设置为 2（即  $N=2$ ），接着将每个特征点分别设置为目标点，利用上述最近邻搜索法则搜索出最近邻点和次近邻点。最后，将搜索到的最近邻点和次近邻点做比值运算，若运算结果小于预定阈值  $T$ ，则判定该最近邻点与对应的特征点是一对匹配特征点。若没找到最近邻点和次近邻点或者找到的最近邻点与次近邻点的比值大于  $T$ ，则丢弃该特征点。

## 1.4 基于特征点聚类的伪造检测

为了进一步精确检测伪造内容，文中采用近邻损



耗聚类的方法对特征点进行聚类,通过特征点之间的距离关系计算特征点之间的损耗,以对特征点进行聚类,以准确检测伪造内容。具体过程如下所述。

1) 将每个特征点都视为一个类,若特征点  $p_i$  是特征点  $p_j$  的第  $L$  个近邻,则  $p_i$  相对  $p_j$  的近邻系数为  $L$ ,同理若  $p_j$  是  $p_i$  的第  $J$  个近邻,则  $p_j$  相对  $p_i$  的近邻系数为  $J$ ,则构造近邻损耗函数为:

$$S_{ij}=L+J-2 \quad (9)$$

再对所有特征点用近邻损耗函数进行计算,若所求

$$\xi = \begin{cases} -[(G_{\min} - H_{i\max}) + (G_{\min} - H_{j\max})] & G_{\min} > H_{i\max}, G_{\min} > H_{j\max} \\ G_{\min} + H_{i\max} & G_{\min} \leq H_{i\max}, G_{\min} > H_{j\max} \\ G_{\min} + H_{j\max} & G_{\min} > H_{i\max}, G_{\min} \leq H_{j\max} \\ G_{\min} + H_{j\max} + H_{i\max} & G_{\min} \leq H_{i\max}, G_{\min} \leq H_{j\max} \end{cases} \quad (11)$$

当  $\xi > 0$  时,表示 2 个类之间的最小近邻损耗值不大于对应的任一类中 2 点间的最大近邻损耗值,则说明这 2 个类可以被合并成一个聚类。反之,这 2 个类被视为 2 个聚类,其内容视为伪造。

## 2 实验仿真与分析

为了测试所提算法的检测精度,文中利用 Matlab 7.0 进行测试。实验硬件平台为: Intel I5, 3.2 GHz CPU, 500 GB 硬盘, 8 GB 内存。同时,为了体现所提技术的优势,将文献[18]和文献[19]中的伪造检测方法设立为对照组。实验中利用复制粘贴篡改的图像对算法的检测效果进行了测试,并且利用叠加了缩放和旋转篡改方法伪造的图像对算法进行了鲁棒性测试。

### 2.1 图像伪造检测测试

不同算法对复制粘贴篡改图像进行伪造检测的结果见图 4,不同算法叠加了旋转和缩放篡改方法的图像的检测效果见图 5。通过观察图 4 和图 5 可知,虽然文中算法和对照组算法对伪造图像的检测效果都还好,但是通过将图 4 和图 5 中不同算法的检测效果进行对比可见,文中图像伪造检测算法的检测结果(图 4e 和图 5e),比文献[18]中图像伪造检测算法的检测结果(图 4c 和图 5c)以及文献[19]中图像伪造检测算法的检测结果(图 4d 和图 5d)不仅具有更多的检测点,而且错误的检测点也最少。其中文献[19]中方法的检测结果漏检点最多,并且存在错误的检测点也是最多的。说明文中算法在对伪造图像进行检测时具有更高的检测精度以及检测正确度,同时也说明了文中算法较对照组具有更好的鲁棒性。其原因是文中算法采用了 Hessian 矩阵行列式来提取图像特征点,并利用 Haar 小波响应的方法获取特征描述符,使得算法具有更好的尺度以及旋转不变特性,从而提高了算法的检测精度,改善了算法的鲁棒性。

得的  $S_{ij}$  不为 0,则该对特征点被归为一类,否则不为一类。

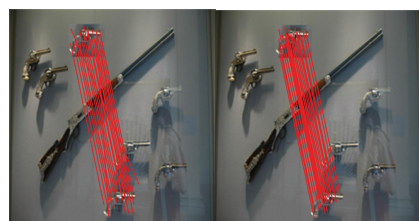
2) 求取类  $H_i$  和类  $H_j$  之间的最小近邻损耗函数值:

$$G_{\min} = \min_{i \neq j} S_{H_i, H_j}, i, j \in \{1, 2, 3 \dots z\} \quad (10)$$

式中:  $S_{H_i, H_j}$  为  $H_i$  和  $H_j$  之间的近邻损耗函数值;  $z$  为聚类的总数。设  $H_{i\max}$ ,  $H_{j\max}$  分别为类  $H_i$  和类  $H_j$  中 2 点间最大近邻损耗值,则  $H_i$  和  $H_j$  之间的类间损耗可通过式(11)的类间损耗函数进行度量。



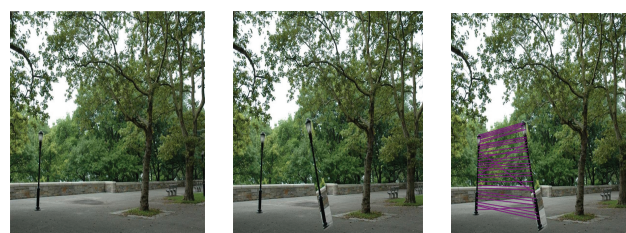
a 原图像 b 复制粘贴篡改图像 c 文献[18]算法



d 文献[19]算法 e 文中算法

图 4 复制粘贴篡改图像的检测效果

Fig.4 The detection effects of copy-paste tampered image



a 原图像 b 叠加缩放和旋转篡改图像 c 文献[18]算法



d 文献[19]算法 e 文中算法

图 5 叠加缩放和旋转篡改图像的检测效果

Fig.5 The detection effects of superposition scaling and rotation tampered image

## 2.2 检测效率与精度的量化测试

通过对不同算法的检测效率以及检测正确度进行测试, 来衡量不同算法的性能。测试对象见图6。



a 原图像



b 伪造图像

图6 算法性能测试对象

Fig.6 Test object of algorithm performance

利用文中算法、文献[18]、文献[19]这3种技术对其伪造内容进行检测, 记录其耗时可知, 文中算法的检测时间为4.13 s, 其检测效率最高。文献[18]、文献[19]这2种算法的检测时间分别为6.02、5.56 s, 二者的检测效率均要低于所提技术。同时, 不同算法的检测正确度是通过ROC曲线来体现的<sup>[20]</sup>, 见图7, 可知文中算法的检测正确度最高。根据上述实验结果可知, 文中算法具有较高的检测效率以及较高的检测正确度。因为文中采用了基于KD树索引的最近邻搜索法则对特征点进行匹配, 提高了特征点匹配的正确度与检测正确率, 而且降低了算法的计算复杂度。并采用了基于近邻损耗的聚类方法, 进一步改善了算法的检测正确度。文献[18]中采用了SIFT算法进行特征点的检测及生成特征描述符, 并通过欧氏距离度量完成了特征点的匹配, 由于SIFT检测的特征点冗余度较高, 而且生成的特征描述符维度较高, 导致算法的检测效率下降, 检测正确度降低。文献[19]中采用一级小波变换对图像进行降维处理, 通过分数阶傅里叶变换, 以及比较相邻块的特征矢量完成伪造检测。由于分数阶傅里叶变换计算复杂度较高, 导致算法效率不高, 而且通过比较相邻块特征矢量的方法进行伪造检测, 难以识别较小的伪造区域。

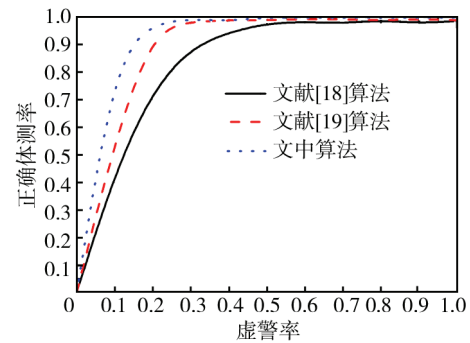


图7 不同算法的ROC曲线

Fig.7 ROC curves of different algorithms

## 3 结语

提出了基于最近邻搜索耦合近邻损耗聚类的图像伪造检测算法的研究, 此算法利用积分图像对待检测图像进行了预处理, 利用Hessian矩阵行列式提取了图像的特征点。然后, 利用求取Haar小波响应的方法获取了特征描述符, 通过建立KD树索引制定了最近邻搜索法则用于特征点的匹配。最后利用特征点的近邻关系, 构造了类间损耗度量函数, 用于特征点的聚类, 完成图像内容识别。测试数据显示, 与当前图像伪造检测算法相比, 所提算法具有更高的检测效率与检测正确度。

## 参考文献:

- [1] WANG Min-gu, DONG Wan. Identification Method for Digital Image Forgery and Filtering Region through Interpolation[J]. Forensic Sci, 2014, 59(5): 1372—1385.
- [2] ZHANG Jun, LUO Ting-jin, GAO Gui. Junction Point Detection Algorithm for SAR Image[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013, 52(2): 861—870.
- [3] 王浩明, 杨晓元. 一种基于DCT系数直方图差异的JPEG图像篡改检测[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(1):41—46.  
WANG Hao-ming, YANG Xiao-yuan. Detection Method for JPEG Image Based on the Difference of DCT Coefficient Histograms[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2014, 46(1): 41—46.
- [4] HASHMI M F, HAMBARDE A R. Copy Move Forgery Detection Using DWT and SIFT Features[J]. Intelligent Systems Design and Applications, 2013, 34(10): 188—193.
- [5] 赵中武, 焦丽鑫. 基于非负矩阵分解的图像复制粘贴伪造检测[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(6): 23—26.  
ZHAO Zhong-wu, JIAO Li-xin. Copy-paste Forgery Detection Based on Non-negative Matrix Factorization[J]. Microelectronics & Computer, 2016, 33(6): 23—26.

- 23—26.
- [6] REZA D, KHASHAYAR Y, SAEED M. Copy-move Forgery Detection Using Multiresolution Local Binary Patterns[J]. Forensic Science International, 2013, 231(1): 61—72.
- [7] 贾迪, 孟球, 孙劲光. 采用积分图块间距离检测图像边缘[J]. 中国图像图形学报, 2015, 20(10): 1322—1330.
- JIA Di, MENG Lu, SUN Jin-guang. Edge Detection Method of Block Distance Combining with Summed Area Table[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(10): 1322—1330.
- [8] MUHAMMAD H, SAHAR Q, GEORGE B. Evaluation of Image Forgery Detection Using Multi-Scale Weber Local Descriptors[J]. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 2015, 24(4): 257—264.
- [9] HENG Hao, TONG Qiao, TANG Zhen-jun. Detecting Copy-move Forgery Using Non-negative Matrix Factorization[J]. Proceedings of the 2011 Third International Conference on Multimedia Information Networking and Security, Washington, DC: IEEE Computer Society, 2011: 591—594.
- [10] MANU V T, MEHTRE B M. Detection of Copy-move Forgery in Images Using Segmentation and SURF[J]. Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems, 2016, 425(2): 645—654.
- [11] 张永宏, 阚希. 基于 SURF 的抗重复特征干扰图像配准方法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(3): 976—982.
- ZHANG Yong-hong, KAN Xi. Image Registration Method Based on SURF with Anti-interference of Repeated Features[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(3): 976—982.
- [12] YAN Wei-dong, SHE Hong-wei, YUAN Zhan-bin. Robust Registration of Remote Sensing Image Based on SURF and KCCA[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2014, 42(2): 291—299.
- [13] 王磊. Haar 整数频域变换耦合动态引力模型的加密算法[J]. 包装工程, 2016, 37(21): 182—191.
- WANG Lei. Haar Integer Frequency Domain Transform Coupled Dynamic Gravity Model Encryption Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(21): 182—191.
- [14] 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.
- [15] ROQUIER J B, ALVAREZ I, REUILLON R. A Kd-tree Algorithm to Discover the Boundary of a Black Box Hypervolume[J]. Annals of Mathematics & Artificial Intelligence, 2015, 75(3): 335—350.
- [16] WITA R, SUSZYNSKI. Cluster Segmentation of Thermal Image Sequences Using Kd-tree Structure[J]. International Journal of Thermophysics, 2014, 35(12): 2374—2387.
- [17] 杨洋, 项辉宇, 薛真. 模式图像的特征提取与配准方法[J]. 包装工程, 2017, 38(1): 185—190.
- YANG Yang, XIANG Hui-yu, XUE Zhen. Method for Feature Extraction and Registration of Pattern Images[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(1): 185—190.
- [18] SWAPNIL H, KUDKE A. Copy-move Attack Forgery Detection by Using SIFT[J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2013, 2(5): 221—224.
- [19] 杨仁青, 柏正尧, 尹立国. 基于分数傅里叶变换的数字图像复制-粘贴篡改检测算法[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 18—22.
- YANG Ren-qing, BAI Zheng-yao, YIN Li-guo. Detecting of Copy-move Forgery in Digital Images Using Fractional Fourier Transform[J]. Journal of Yunnan University(Natural Science Edition), 2016, 38(1): 18—22.
- [20] 李景富, 张飞. 凸优化耦合传感器模式噪声的图像伪造检测[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(5): 1678—1681.
- LI Jing-fu, ZHANG Fei. Study on Image Forgery Detection Algorithm Based on Convex Optimization Mechanism Coupled Sensor Pattern Noise[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(5): 1678—1681.