

文章编号:1674-2974(2016)08-0128-07

基于局部色彩不变量的图像篡改检测方法*

谢伟^{1,2}, 万晓霞^{1,2†}, 叶松涛³, 王韬⁴

(1. 武汉大学 印刷与包装系, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 中国摄影文化产业研究中心, 湖北 武汉 430072;
3. 湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105; 4. 湖南大学 图像传媒技术研究中心, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对基于分块的图像区域复制篡改检测方法通常面临的图像特征提取计算量大、维度高、识别率低等问题,提出一种基于局部色彩不变量特征的图像区域复制篡改检测方法,将RGB彩色图像转换到对立色彩空间,通过分析和提取图像各通道上的局部密度分布特征,构建 $k-d$ 树进行相似分块特征匹配以实现图像区域复制篡改检测.提出的局部色彩不变量密度特征具有维度低、计算简单等特点.实验结果表明,本文方法与其他几种典型的基于分块的方法相比,具有较低的时间复杂度和较高的检测率,且对图像篡改区域的旋转、缩放攻击具有较好的鲁棒性,特别是当图像篡改区域进行大角度旋转时与其他几种方法相比具有明显优势.

关键词:色彩不变量;特征提取;区域复制;篡改检测;计算机取证

中图分类号:TP391

文献标识码:A

Image Copy-move Forgery Detection Based on Local Color Invariants

XIE Wei^{1,2}, WAN Xiao-xia^{1,2†}, YE Song-tao³, WANG Tao⁴

(1. School of Printing and Packaging, Wuhan Univ, Wuhan, Hubei 430072, China;
2. China Research Center for Photographic Culture Industry, Wuhan Univ, Wuhan, Hubei 430072, China;
3. College of Information Engineering, Xiangtan Univ, Xiangtan, Hunan 411105, China;
4. Image Media Technology Research Center, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Block-based copy-move image forgery detection methods usually have problems such as high-dimensional feature vector, high computational complexity and low detection rate. So, this paper proposed a new method for image copy-move forgery detection based on color invariants, which extracts density characteristics from each channel of opponent color space converted from RGB. The $k-d$ tree is constructed to speed up approximate nearest neighbors matching for tampering detection. The experiment results show that the proposed local color invariants feature with low-dimension and simple computation can represent the image block feature effectively. When compared with typical block-based methods, this method has some advantages, such as lower computational complexity, more accurate and robust to post-processing for forgery regions such as rotation and scaling.

* 收稿日期:2015-07-21

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB725302);国家自然科学基金资助项目(61275172), National Natural Science Foundation of China(61275172);交通部信息化重大专项(2013-364-548-200)

作者简介:谢伟(1985-),男,湖南新化人,武汉大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: wan@whu.edu.cn

Key words: color invariants; feature extraction; copy-move; forgery detection; computer forensics

随着图像处理技术的不断进步,使用图像处理软件对图像进行修复、润饰和增强甚至篡改操作也变得越来越容易.而在新闻摄影、司法取证与保险理赔等领域,如果图像进行了恶意篡改,将直接影响对案件的处理结果,造成严重的负面影响.对图像的篡改操作一般有区域复制、图像拼接、图像增强处理等,其中区域复制篡改是最为常见的一种篡改方式^[1].

图像区域复制篡改就是将数字图像中某一区域进行复制并粘贴到同一幅图像的另一区域,由于复制区域来源于同一图片,复制区域的噪声、色彩和纹理等属性与目标区域相似,使得篡改后的图像很难被检测和识别.现有图像区域复制篡改检测方法大多基于分块方式实现,通过对图像进行重叠分块处理后提取图像分块特征,然后使用字典排序或最近邻搜索方法对特征向量进行相似性匹配来实现对图像的篡改检测^[2].图像灰度纹理特征是图像篡改检测中较常使用的特征,如 Luo 等人^[3]提出的基于分块灰度特征的方法, Mahdian 等人^[4]基于模糊不变矩的方法等,此类方法特征提取计算较为简单,但对篡改区域的旋转、缩放等后期处理操作鲁棒性需进一步加强.此外,图像的频域特征一直是图像处理领域关注的热点,一些学者将图像频域特征应用于图像区域复制篡改检测研究中,取得了较好的成果,如基于 DCT 的方法^[5-6]、基于 DWT 的方法^[7-8]以及结合频域特征与主成分分析的方法^[9-10]等,然而图像频域特征提取通常计算量大、特征向量维度高,增加了图像篡改检测方法的计算时间开销.基于分块的篡改检测方法通常面临特征提取计算复杂、特征向量维度高、特征向量对图像特征描述准确性不够等问题,导致在检测速度、检测精度及鲁棒性等方面效果不够理想.

在提取图像篡改特征时,现有方法大多基于灰度图像进行处理,忽略了图像的色彩特征,然而色彩是人眼进行信息识别的重要特征,现有计算机视觉相关研究表明结合色彩与几何特征的图像特征描述方法与纯几何特征描述方法相比具有更好的识别效果^[11].为此,本文结合图像色彩特征进行分析,提出了一种基于局部色彩不变量特征的图像区域复制篡改检测方法,通过在不同色彩空间提取目标图像的局部色彩不变量密度特征对图像进行区域篡改检

测.实验结果表明,该方法提出的局部色彩不变量密度特征能够很好地表征图像,较以往典型的基于分块方法相比特征维度低,具有较低的时间复杂度和较高的检测率,并且对图像篡改区域的旋转、缩放攻击具有较好的鲁棒性.

1 图像色彩不变量描述

色彩是人眼进行信息识别的重要特征,色彩特征也是计算机视觉中常用的视觉特征.在成像过程中,图像的色彩往往受成像设备特性和环境光源的影响,我们采用公式(1)对角线模型^[11]来表示光照变化对成像结果的影响.

$$\begin{pmatrix} R^c \\ G^c \\ B^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

其中: (R^c, G^c, B^c) 为照明条件 c 变化后生成的图像色彩; (R, G, B) 为标准照明条件下生成的图像色彩; 系数 (a, b, c) 表示图像对比度的变化; (o_1, o_2, o_3) 表示图像的色彩偏移量.

在上述对角线模型中,光照变化会造成设备所获取的图像色彩变化,而图像所呈现的内容特征实际上没有改变.人眼的色彩视觉识别系统在环境光发生改变时具有颜色恒常性,为了描述图像色彩的本质特性,我们可以通过对 (R, G, B) 三通道数据进行色彩空间转换和计算提取图像的色彩不变量,排除光照造成对比度变化对图像色彩产生的影响.最简单的色彩不变量色品可以通过公式(2)计算得到,色品向量 (r, g, b) 对光照强度变化具有不变性^[11].

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R+G+B}, g = \frac{G}{R+G+B}, \\ b &= \frac{B}{R+G+B}. \end{aligned} \quad (2)$$

本文使用的另一种色彩不变量为对立色彩空间,通过将图像 (R, G, B) 三通道根据公式(3)进行线性变换得到.

$$\begin{aligned} (O_1, O_2, O_3) &= \\ & \left(\frac{R-G}{\sqrt{2}}, \frac{R+G-2B}{\sqrt{6}}, \frac{R+G+B}{\sqrt{3}} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

对立色彩空间中, O_3 代表图像的亮度信息; O_1, O_2 代表图像的色彩信息; 图像的色彩信息 O_1, O_2 对图像的灰度变化具有不变性^[11].

2 基于局部色彩不变量的图像篡改检测方法

本文提出的图像复制移动篡改检测方法基本流程如图1所示. 首先对图像进行预处理, 将源图像 (R, G, B) 三通道数据分别转换到色品和对立色彩空间进行描述, 然后对转换后的图像根据公式(5)按规则计算各个通道平面内各个像素点的局部色彩分布密度, 然后对图像进行重叠分块, 提取每个分块的色彩分布密度特征后构建 $k-d$ 树查找相似性特征, 以实现重复图像块的检测.

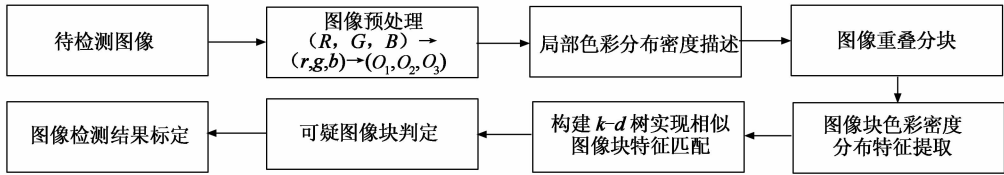


图1 基于局部色彩不变特性的图像区域复制篡改检测流程

Fig.1 The process procedure of copy-move forgery detection based on local color invariant feature

2.2 局部色彩不变量密度分布特征描述

源图像经过预处理后形成 (O_1, O_2, O_3) 三通道数据, 其中 O_1, O_2 为彩色分量, O_3 为亮度分量. 我们将对立色彩空间上的图像色彩分量看作二维平面上的概率分布, 为了增强图像 $f(x, y)$ 在邻域内的色彩不变量密度空间分布特征, 引入局部色彩不变量分布密度 $p_k(i, j)$ 来表征图像 $f(x, y)$ 在通道 k 上图像像素点 (i, j) 在 $n \times n$ 邻域内的色彩密度分布特性:

$$p_k(i, j) = \frac{1}{n^2} \sum_{x=i-n+2}^{i+n-2} \sum_{y=j-n+2}^{j+n-2} f_k(x, y). \quad (5)$$

2.3 局部色彩不变量密度分布特征提取

经过处理后的图像 $f(x, y)$ 每个像素点可以看作是在不同通道平面上的一种密度分布, 针对图像块的特征描述, 本文使用密度矩来表征图像在各个通道上的局部色彩不变量密度分布特征, 本文使用的两种中心矩分别为一阶中心矩局部色彩不变量密度均值 E 和二阶中心矩局部色彩不变量密度标准差 σ , 对于 $b \times b$ 大小的图像分块 B , 其计算方法分别为:

$$E_k = \frac{1}{b^2} \sum_{i=0}^{b-1} \sum_{j=0}^{b-1} p_k(i, j); \quad (6)$$

$$\sigma_k = \left(\frac{1}{b^2} \sum_{i=0}^{b-1} \sum_{j=0}^{b-1} (p_k(i, j) - E_k)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

2.1 图像预处理

根据本文第1节中的阐述, 与 (R, G, B) 三通道分量表示的图像色彩特征相比, 图像色彩的色品表示方法与对立色彩空间表示方法具有更好的稳定性. 首先根据公式(2)将图像 (R, G, B) 三通道数据转换成色品坐标, 转换后图像的 (R, G, B) 三通道分量数值便以表示色彩分量所占比值的 (r, g, b) 分量进行表示, 然后结合公式(3)将图像从 (r, g, b) 三通道转换到对立色彩空间 (O_1, O_2, O_3) 进行表示, 以便进行特征提取. 转换过程如式(4)所示:

$$(R, G, B) \rightarrow (r, g, b) \rightarrow (O_1, O_2, O_3). \quad (4)$$

式中: E_k 为图像分块 B 的第 k 通道的局部色彩不变量密度均值; σ_k 为图像分块 B 第 k 通道的局部色彩不变量密度标准差; $p_k(i, j)$ 为公式(5)计算得到的像素点 (i, j) 的局部色彩不变量分布密度.

源图像 $f(x, y)$ 经过色彩分布密度特征提取后, 每个图像块在第 k 通道均可提取 E_k 和 σ_k 2 个密度矩, 最终形成 6 维的色彩不变量分布密度特征向量:

$$\mathbf{V}_B = (E_{O_1}, E_{O_2}, E_{O_3}, \sigma_{O_1}, \sigma_{O_2}, \sigma_{O_3}). \quad (8)$$

大小为 $m \times n$ 图像进行重叠分块后共计得到 $N_B = (m - b + 1)(n - b + 1)$ 个图像分块, 每一个图像分块 B 均可提取特征向量 \mathbf{V}_B 描述图像特征.

2.4 图像分块相似性检测

对目标图像所有分块进行特征提取后共计得到 N_B 个特征向量, 如果使用穷举搜索的方法进行相似特征匹配, 则对每个分块均需要分析与其他所有分块之间的相似度, 这种方法计算开销大、效率极低. 为了提高相似特征向量的匹配速度, 我们构建 $k-d$ 树来实现图像分块特征向量之间的近似最近邻搜索. $k-d$ 树是一种对高维数据在 k 维空间中进行划分的数据结构, 采用分治思想将整个空间划分为多个部分, 以实现高维数据的最近邻搜索. 图像块特征向量之间的相似度距离 $d_{\text{mom}}(A, B)$ 计算方法为:

$$d_{\text{mom}}(A, B) = \sum_{i=0}^{r-1} \omega_{i1} |E_i^A - E_i^B| + \omega_{i2} |\sigma_i^A - \sigma_i^B|, \quad (9)$$

式中: i 为图像色彩通道索引; r 为色彩空间通道总数; E_i^A , E_i^B 分别为图像块 A, B 的色彩不变量密度均值; σ_i^A , σ_i^B 分别为图像块 A, B 的色彩不变量密度标准差; ω_i 为权重系数。

设定阈值 T , 当 $d_{\text{mom}}(A, B) \leq T$, 则 (A, B) 标记为可疑匹配块. 图像块 A, B 之间的位移向量以 \mathbf{v}_{AB} 表示, 在所有可疑块匹配块中, 排除邻域内 $\|\mathbf{v}_{AB}\| \leq t$ 的匹配块.

3 算法性能分析

本文提出的图像篡改检测方法计算性能主要受图像预处理、图像分块特征提取及图像块匹配 3 个方面影响. 对 $m \times n$ 大小的图像进行预处理的时间复杂度可简单计算为 $O(mn)$; 图像分块特征提取需要对所有 $N_B = (m - b + 1)(n - b + 1)$ 个重叠分块计算色彩不变量密度特征向量, 其计算复杂度为 $O(N_B)$; 图像块相似性匹配过程中, 对 N_B 个图像分块特征向量构建 $k-d$ 树的时间复杂度为 $O(N_B \log_2 N_B)$, 对 $k-d$ 树进行近似最近邻搜索的平均时间复杂度为 $O(\log_2 N_B)$. 综上所述, 该算法总体计算复杂度为 $O(mn \log_2 mn)$.

4 实验结果分析

为了验证基于色彩不变量特征的图像篡改检测方法的检测效果、鲁棒性及性能, 在 Christlein 等人^[12]建立的数据集上进行了相关对比实验, 该数据集包括 Benchmark Data 基准数据集及旋转缩放等拓展数据集, 其中基准数据集包含测试图片 96 张, 旋转缩放攻击拓展数据集测试图片共计 960 张. 本文实验在 Visual Studio 2010 上使用 C++ 编程实现, 实验所使用的图形工作站配置为: AMD Athlon X4 3.7 GHz CPU, DDR3 1600 Hz 8 G 内存. 在数据集 Benchmark Data^[12]上进行了普通篡改检测实验、篡改区域旋转攻击实验、篡改区域缩放攻击实验, 在此基础上与 5 种典型方法(DCT^[5], LUO^[3], BLUR^[4], PCA^[9], DCT-PCA^[10])进行了对比. 实验表明, 本文提出的图像复制移动篡改检测方法在

准确率、鲁棒性及性能上均有较好的表现.

4.1 评价方法

本文采用精确率(Precision)、召回率(Recall)及综合评价指标 F_1 来对算法进行评价, 其计算方法分别为:

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}},$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}, \quad (10)$$

$$F_1 = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}. \quad (11)$$

式中: TP 为算法正确检测到的篡改图片数量; FP 为被算法误检测为篡改图片的数量; FN 为算法未检测到的篡改图片数量. 综合评价指标 F_1 为 Precision 与 Recall 两项指标的调和平均数.

4.2 普通篡改检测实验

本实验采用的 Benchmark Data 基准数据集包含 48 张未经过任何篡改操作的原始图片和 48 张经过复制移动操作的篡改图片, 其中篡改区域除了进行平移复制操作和边缘模糊处理外没有进行任何其他处理, 篡改区域肉眼难以分辨. 我们采用本文提出的方法及以上提到的 5 种方法对基准数据集中的 96 张图片进行了对比检测实验, 表 1 为使用各种方法进行检测的准确率、召回率及 F_1 值实验结果对比.

表 1 普通篡改检测实验准确率、召回率、 F_1 值对比
Tab. 1 The experimental comparison for plain forgery detection %

| 方法 | Precision | Recall | F_1 |
|---------|-----------|--------|-------|
| 本文方法 | 88.00 | 91.67 | 89.80 |
| DCT | 69.23 | 93.75 | 79.65 |
| LUO | 73.33 | 91.67 | 81.48 |
| BLUR | 94.44 | 70.83 | 80.95 |
| PCA | 76.79 | 89.58 | 82.69 |
| DCT-PCA | 71.43 | 93.75 | 81.08 |

实验结果表明, 本文提出的图像局部色彩不变量密度分布特征能够很好地对图像块的局部特征进行描述, 对检测准确率和召回率进行综合权衡考虑时, 本文提出的基于色彩不变量密度分布特征的图像篡改检测方法具有较为理想的效果. 图 2 为本文方法进行图像区域复制篡改检测效果实例图片, 从检测结果可以看出, 本文所提出的方法对篡改区域具有较高的识别度.

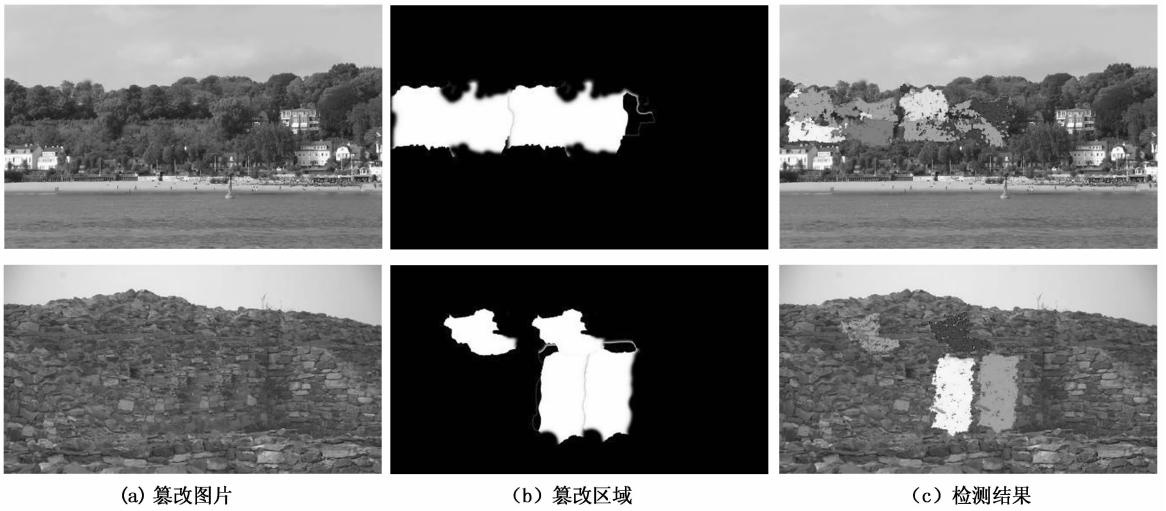


图2 本文方法图像常规篡改检测效果实例
Fig. 2 Examples of copy-move forgery detection using the proposed method

4.3 旋转攻击对比实验

在对图片进行篡改时为了使图片看起来更加真实自然,可能会对图像篡改区域进行轻微旋转等处理.为了分析本文所提出的方法对篡改区域旋转操作的鲁棒性,对篡改区域分别旋转 $2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 60^\circ$ 和 180° 的情况进行了对比实验.图3为本文与其他5种检测方法对篡改区域旋转攻击的对比实验结果,其中,横坐标表示旋转角度,纵坐标表示不同旋转角度下正确检测到的篡改区域面积与篡改区域无旋转处理情况下正确检测到的面积比值.从实验结果可以看出,各种方法均随着旋转角度的增大,检测率有所降低,本文提出的方法在对篡改区域进行大角度旋转处理后的图片较其他方法相比具有明

显优势.图4为使用本文算法对篡改区域进行不同程度旋转处理情况下进行篡改检测的图像实例.

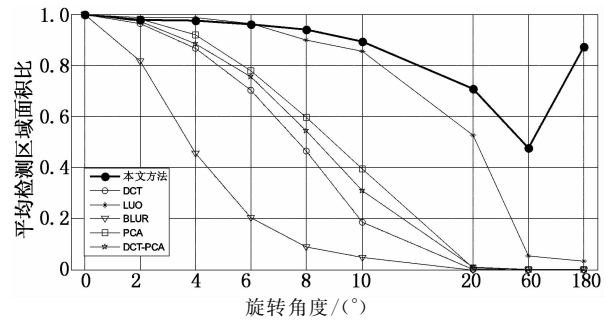


图3 本文与其他方法旋转攻击篡改检测实验结果对比
Fig. 3 The experimental results for rotation attacking

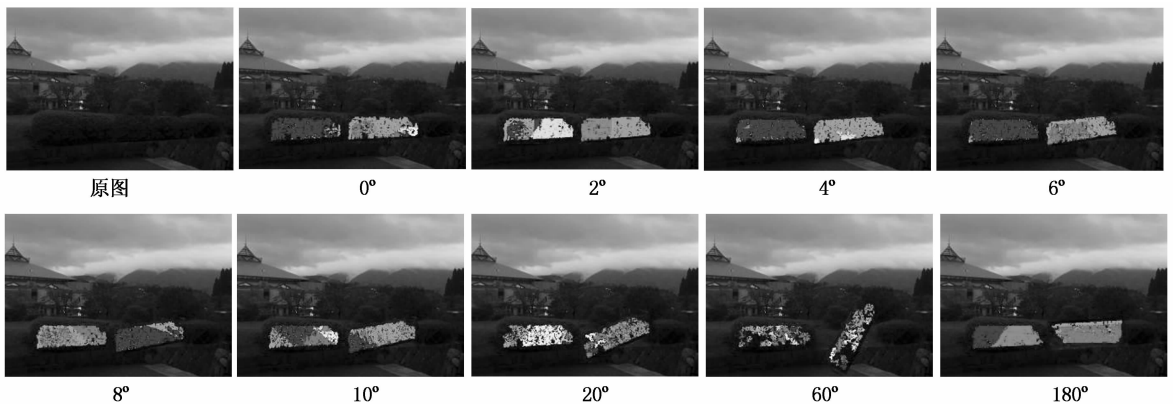


图4 本文方法旋转攻击篡改检测实例
Fig. 4 Examples of copy-rotation-move forgery detection using the proposed method

4.4 缩放攻击对比实验

在图像篡改后期处理中,除了可能对篡改区域进行轻微旋转操作外,还可能会对篡改区域进行几何形变,使图片篡改区域难以识别.本文通过对图像篡改区域分别进行 80%,91%,93%,95%,97%,99%,101%,103%,105%,107%,109%和 120%几何形变处理后,进行了篡改区域检测对比实验,以验证本文方法对篡改区域缩放攻击的鲁棒性.

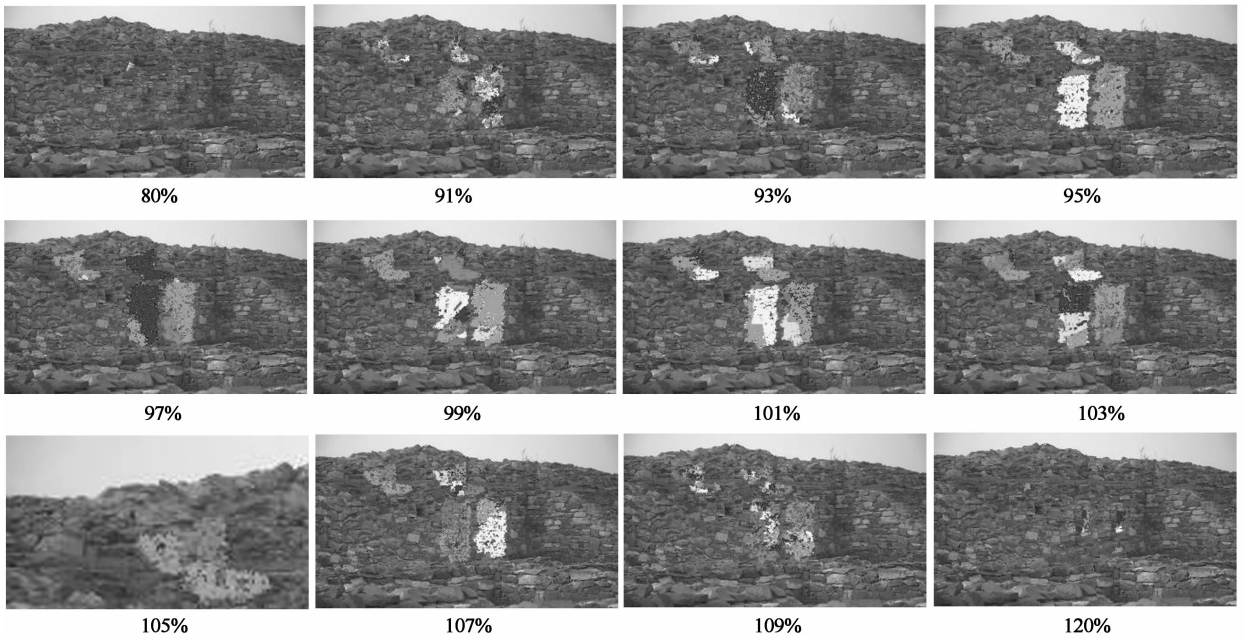


图 5 本文方法缩放攻击篡改检测实例

Fig. 5 Examples of copy-scaled-move forgery detection using the proposed method

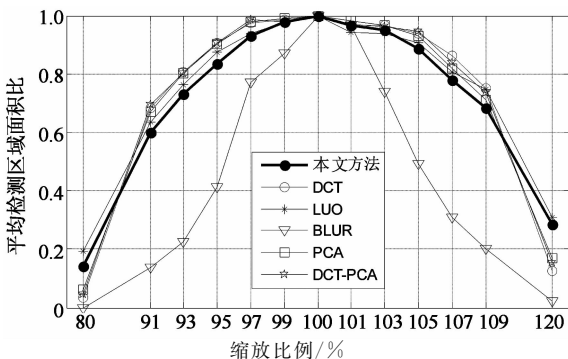


图 6 各种方法缩放攻击篡改检测结果对比

Fig. 6 The experimental results for scaling attacking

4.5 算法性能对比

本文从图像预处理、特征提取、特征匹配 3 个方面对比分析本文所提出的方法与其他 5 种典型方法在计算性能上的差异.对测试数据集中每张图像篡改检测处理的平均时间开销进行统计,图像预处理时间、特征向量提取时间、特征匹配处理时间、总体

图 5 为使用本文方法对篡改区域进行不同程度缩放处理后进行检测的图像检测实例.图 6 为篡改区域不同缩放比例下的篡改检测对比实验结果,其中横坐标表示缩放比例,纵坐标表示不同缩放比例下正确检测到的篡改区域面积与篡改区域无缩放处理情况下正确检测到的面积比值.实验结果表明,本文方法在小尺度缩放范围内(91%~109%)亦具有较好的鲁棒性.

处理时间分别记为 P, F, M, O .表 2 为本文提出方法与其他 5 种典型方法的平均处理时间开销情况.

表 2 各种算法时间开销对比
Tab. 2 Average computation times per image in seconds

| 方法 | P | F | M | O |
|---------|---------|----------|----------|----------|
| 本文方法 | 0.068 3 | 1.561 5 | 13.574 9 | 15.204 8 |
| DCT | 0.051 2 | 43.455 0 | 24.733 0 | 68.379 8 |
| LUO | 0.050 9 | 3.767 3 | 13.166 3 | 17.252 1 |
| BLUR | 0.082 8 | 53.360 3 | 12.840 1 | 66.465 2 |
| PCA | 0.050 7 | 68.894 7 | 13.726 8 | 82.798 2 |
| DCT-PCA | 0.111 8 | 37.855 1 | 14.528 4 | 52.649 9 |

在各种图像篡改检测方法中,图像特征提取方法及特征维度是算法检测速度的重要影响因素. DCT^[5], LUO^[3], BLUR^[4], DCT-PCA^[10]等方法的特征维度分别为 256, 7, 24, 64. 本文方法提取的图像块 6 维特征向量计算简单、维度较低,有利于降低

相似图像块特征向量匹配处理复杂度,通过构建 $k-d$ 树进行近似最近邻查找提高了特征向量的匹配效率.实验表明,本文提出的检测方法在图像特征提取、图像特征匹配及总体检测性能上与其他几种基于分块的检测方法相比具有较优的表现,与其他方法相比单张图片的平均检测速度较快.

5 结 论

基于分块的图像区域复制篡改检测方法通常面临图像特征提取计算量大、提取的特征向量维度高、特征向量对图像特征识别度不够等问题,导致图像篡改检测存在速度慢、检测精度低、鲁棒性差.色彩是人眼进行信息识别的重要特征,在计算机视觉中有着广泛应用,然而现有的基于分块的图像篡改检测方法大多是将彩色图像转换成灰度图像后,基于灰度图像进行特征提取.

本文提出一种基于局部色彩不变量密度特征的图像区域复制篡改检测方法,通过分析和提取图像的色彩不变量密度特征,对图像块进行区域复制篡改检测.实验结果表明,本文提出的局部色彩不变量密度特征能够很好地表征图像块,提取的特征向量具有维度低、计算简单等特点,对图像的区域复制篡改检测效果较为理想,与几种典型的基于分块的方法相比,具有较低的时间复杂度和较高的检测率,并且对图像篡改区域的旋转攻击及小尺度缩放攻击具有较好的鲁棒性,特别是对图像篡改区域进行大角度旋转时的检测效果与其他几种方法相比具有较明显优势.

参考文献

[1] BIRAJDAR G K, MANKAR V H. Digital image forgery detection using passive techniques: a survey[J]. Digital Investigation, 2013, 10(3): 226–245.

[2] WANDJI N N D, SUN Xin-ming, FAH K M. A survey of partition-based techniques for copy-move forgery detection[J].

The Scientific World Journal, 2014, 1(1): 1–13.

[3] LUO W, HUANG J, QIU G. Robust detection of region-duplication forgery in digital image[C]//Pattern Recognition, ICPR 2006, 18th International Conference on. New York: IEEE, 2006: 746–749.

[4] MAHDIAN B, SAIC S. Detection of copy-move forgery using a method based on blur moment invariants[J]. Forensic Science International, 2007, 171(2): 180–189.

[5] FRIDRICH A J, SOUKAL B D, LUKÁŠ A J. Detection of copy-move forgery in digital images[C]//Proceedings of Digital Forensic Research Workshop. Cleveland, USA: Springer, 2003: 1–10.

[6] MIRE A V, DHOK S B, MISTRY N J, *et al.* Factor histogram based forgery localization in double compressed JPEG images [J]. Procedia Computer Science, 2015, 54: 690–696.

[7] FATTAH S A, ULLAH M M I, AHMED M, *et al.* A scheme for copy-move forgery detection in digital images based on 2D-DWT[C]//Circuits and Systems (MWSCAS), 2014 IEEE 57th International Midwest Symposium on. New York: IEEE, 2014: 801–804.

[8] LIU F, FENG H. An efficient algorithm for image copy-move forgery detection based on DWT and SVD[J]. International Journal of Security and Its Applications, 2014, 8(5): 377–390.

[9] BASHAR M K, NODA K, OHNISHI N, *et al.* Exploring duplicated regions in natural images[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2010, 1: 1–40.

[10] SUNIL K, JAGAN D, SHAKTIDEV M. DCT-PCA based method for copy-move forgery detection[C]//ICT and Critical Infrastructure. Proceedings of the 48th Annual Convention of Computer Society of India-Vol II. New York: Springer International Publishing, 2014: 577–583.

[11] VAN DE SANDE K E A, GEVERS T, SNOEK C G M. Evaluating color descriptors for object and scene recognition[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2010, 32(9): 1582–1596.

[12] CHRISTLEIN V, RIESS C, JORDAN J, *et al.* An evaluation of popular copy-move forgery detection approaches[J]. Information Forensics and Security, IEEE Transactions on, 2012, 7(6): 1841–1854.