

基于改进 SIFT 算法的图像复制粘贴篡改检测

李昆仑 孙 硕

(河北大学电子信息工程学院 保定 071000)

摘 要 复制粘贴是一种常见的图像篡改方式,也是最隐蔽的图像篡改手段之一。SIFT 是一种常用的匹配算法,同时也是一种较为有效的复制粘贴图像篡改检测方法。目前基于 SIFT 的图像篡改检测方法中,存在着匹配精度差及时间复杂度高等问题。为了克服这些问题,对 SIFT 算法进行了改进:针对阈值增大造成精确性差的问题,采用拟合优化的方法确定阈值,对 SIFT 算法中提取特征点的方法进行了改进;针对 SIFT 算法特征匹配阶段时间复杂度高的问题,采用基于 K-D 树的 BBF 搜索算法进行最近邻查询以实现特征点的快速匹配,对 SIFT 算法中的特征匹配进行了改进。实验结果验证了该算法的有效性。

关键词 复制_粘贴篡改,拟合,SIFT 算法,BBF 搜索算法

中图法分类号 TP391 文献标识码 A

Image Copy-Paste Tampering Detection Based on Improved SIFT Algorithm

LI Kun-lun SUN Shuo

(College of Electronic and Information Engineering, Hebei University, Baoding 071000, China)

Abstract Copy-paste is a technique widely used in image tampering, and it is one of the most covert tampering means. SIFT is a kind of common matching algorithm, it is also a more effective test method for the copy-paste tampering images. But it has the problems of poor matching accuracy, high time-complexity and so on. In order to overcome the problems, some improvements were made in this paper. The threshold value is determined by the method of fitting optimization to solve the problem of accuracy when the threshold is increased, and methods of extracting the feature points by SIFT algorithm are improved. The BBF search algorithm based on K-D tree is adopted to achieve the fast matching of the nearest neighbor query, and the feature matching is improved in SIFT algorithm, so the problem of high time complexity goes easy. The experimental results show that the proposed algorithms are effective.

Keywords Copy and paste forgery, Fitting method, SIFT algorithm, BBF search algorithm

1 引言

随着图像处理技术的快速发展,图像处理软件的功能越来越强大,即使普通人也能够很轻易地对图像内容进行篡改,这使得图像的真实性受到很大挑战。图像篡改检测的目的是检测图像的真实性和来源。迄今为止,国内外针对图像篡改认证的方法主要分为两类,即主动图像篡改检测方法和被动图像篡改检测方法。图像篡改手段多种多样,其中图像的复制粘贴是最常见、最隐蔽的篡改手段之一,该方法可以分为同幅图像和异幅图像之间的复制粘贴篡改两大类^[1-3]。

近年来,许多学者对复制粘贴篡改检测进行了研究。其中, J. Fridrich 提出采用穷举搜索法,该方法易于实现,但缺陷是运算量大。为了减少运算量,他还提出了一种改进算法,先对图像分块,再对各分块的 DCT 量化系数进行字典排序,把对图像像素的点操作转化为块操作^[4]。Luo 和 Huang 等提出从被分割成小方块的图像中提取图像块的特征向量,然后

比较各小块间的相似性,以此为依据检测出篡改区域^[5]。王俊文等提出采用图像金字塔低频分块的 H_u 矩不变特征向量来检测图像复制伪造区域^[6]。虽然图像的复制粘贴篡改检测取得了一定的进展,但是还存在着一些问题需要解决。

一般情况下,为了使复制粘贴的篡改图像更加逼真,通常会伴有一系列的后处理操作,如模糊、润饰、加噪、压缩、修复,而且可能有时还需要适当的旋转、缩放、亮度与对比度调整等操作,从而使图像达到更好的视觉效果,使人眼难以分辨出篡改区域。对复制粘贴篡改图像进行检测时, SIFT 算法是一种较为有效的复制粘贴图像篡改检测方法,在处理图像之间发生平移、旋转、仿射变换情况下的匹配问题上具有良好的检测效果^[7],但也存在着匹配精度差及时间复杂度高等问题。因此,本文对 SIFT 算法进行改进,引入拟合优化的方法确定最佳阈值,这样既保留了较多的特征点又避免引入噪声,从而提高匹配精度;再采用基于改进的 K-D 树 BBF 搜索算法进行特征点的快速匹配,缩短匹配时间,降低时间复杂度。

本文受国家科技支撑计划项目(2013BAK07B04),河北省自然科学基金项目(F2013201170),河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2014008)资助。

李昆仑(1962—),男,博士,教授,主要研究方向为通信与信息系统、智能信息处理、模式识别等, E-mail: likunlun@hbu.edu.cn; 孙 硕(1990—),男,硕士生,主要研究方向为图像处理、通信与信息系统等, E-mail: sunshuo-66@163.com。

2 图像复制粘贴篡改操作及特点

图像内容篡改中复制粘贴操作分为同幅图像和异幅图像之间的复制粘贴篡改两大类,这两类复制粘贴篡改手段各有其特点。

同幅图像复制粘贴篡改指的是图像中的部分区域覆盖同幅图像中的其它区域。由于同一幅图像的亮度、色彩的变化不大,其复制粘贴操作篡改的拼接边缘区域不明显,在篡改操作后可以不用再进行后处理,图1为同幅图像复制粘贴的示意图。

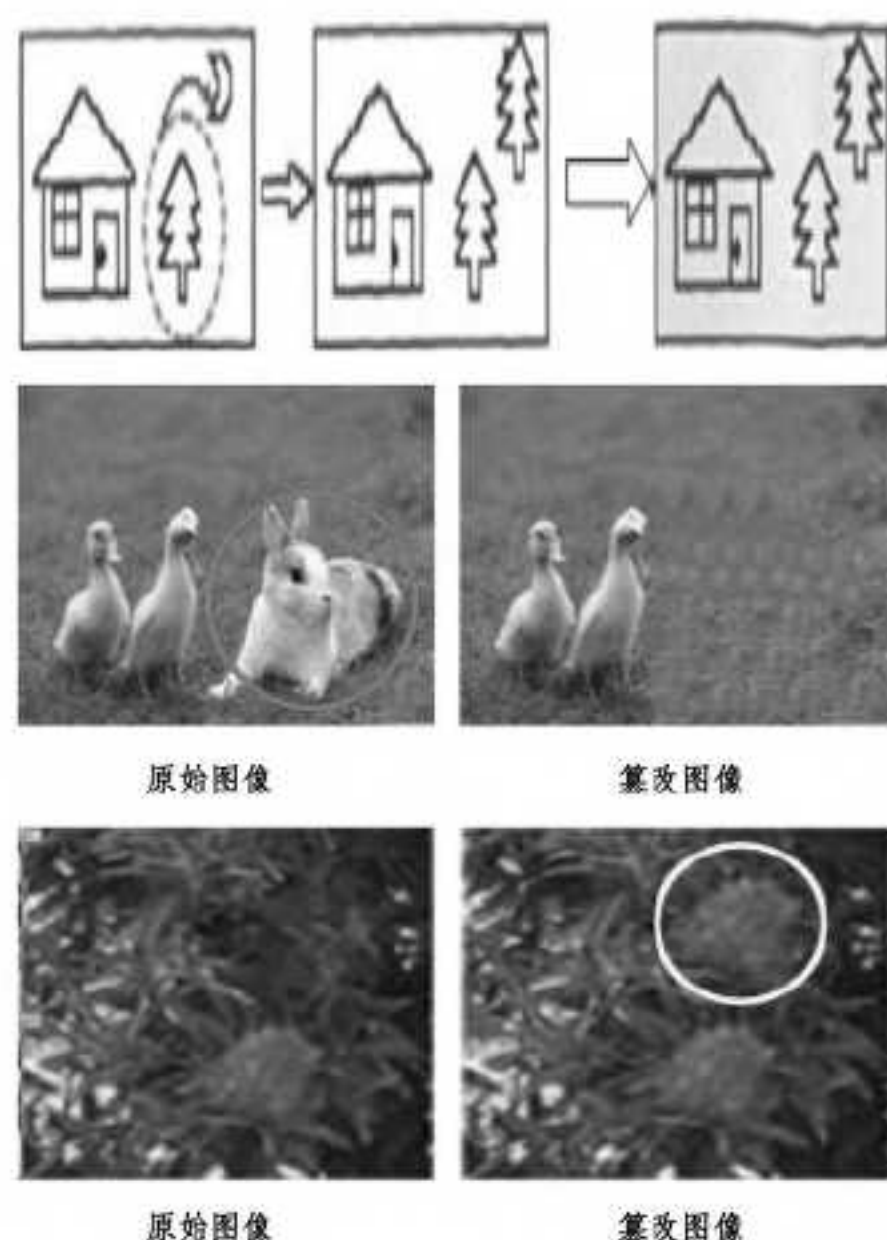


图1 同幅图像的复制粘贴篡改示意图

异幅图像复制粘贴篡改是将两张或多张图像中的人或物体拼接到一起,以达到伪装成同一个人或物体的目的。相比同幅图像复制粘贴,由于不同照片的亮度、色彩可能会有较大差别,其复制粘贴的拼接边缘大多比较明显,因此在进行该类操作后,为了抹去拼接边缘的痕迹,会进行边缘模糊等润饰操作,图2为异幅图像复制粘贴篡改示意图。

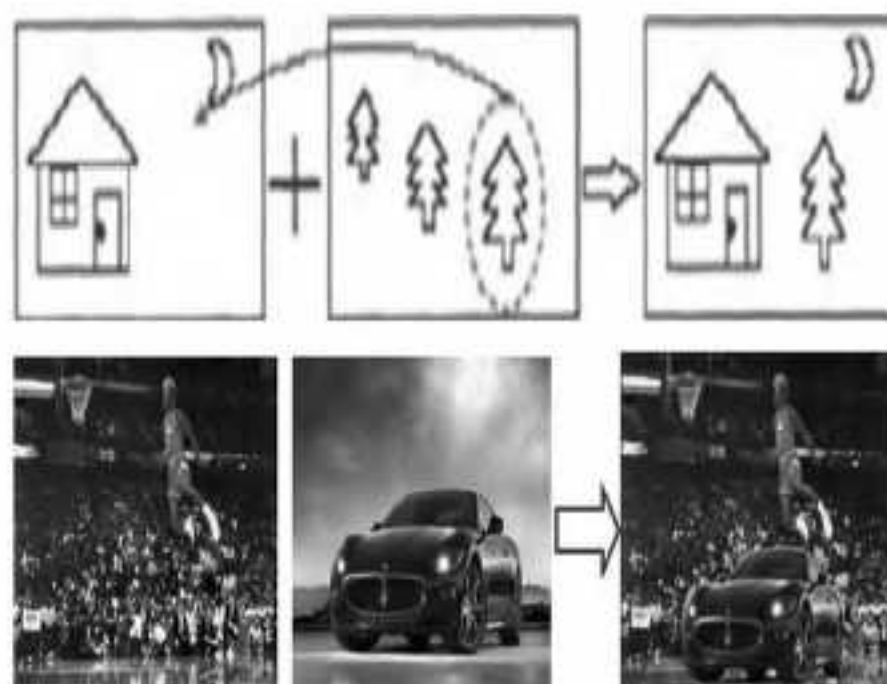


图2 异幅图像复制粘贴篡改示意图

在上述两类复制粘贴篡改中,为了适应图像中的不同分辨率及不同拼接角度,篡改者可能会对篡改区域采用缩放、旋转等处理后再进行复制粘贴操作,很多图像篡改不是单一的复制粘贴操作,而是多种篡改方式组合的结果。因此,需要研究对图像旋转、缩放、模糊、噪声等处理操作具有鲁棒性的复制粘贴篡改检测。接下来本文研究了基于SIFT算法的图像复制粘贴篡改检测,并对其做了进一步改进。

3 SIFT 算法介绍

SIFT最早由David Lowe于2004年提出,是一种检测局部特征的算法,可以处理图像之间发生平移、旋转、仿射变换情况下的匹配问题,具有良好的不变性^[8]。SIFT算法的本质是从图像中提取SIFT关键点的过程,它以图像的尺度空间理论为基础,在尺度空间中寻找极值点,确定特征点的位置,剔除一些低对比度的点以及边缘响应点,并提取旋转不变特征描述符。SIFT算法主要包括以下4个步骤。

3.1 尺度空间极值点检测

尺度空间理论最早于1962年由Iijima提出,尺度空间的建立主要是通过不断变化参数实现原始图像的尺度变换,得到同一幅图像的多分辨率图像。一幅图像的尺度空间定义为:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (1)$$

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-m/2)^2 + (y-n/2)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

其中, $I(x, y)$ 是原始图像, σ 是尺度因子, $L(x, y, \sigma)$ 是Gaussian图像, $G(x, y, \sigma)$ 是高斯函数, $*$ 是卷积运算。为了在尺度空间中有效地检测稳定的关键点,将相邻两尺度空间函数相减构造DOG金字塔模型。DOG算子的计算公式如下:

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{aligned} \quad (3)$$

在检测尺度空间极值时,如果一个点在DOG金字塔本层的8邻域点和上下相邻尺度对应的 9×2 个点,共 $8 + 9 \times 2 = 26$ 个相邻像素点中是最大或最小值,则把该点作为候选关键点。

3.2 极值点的精确定位

由于DOG值对噪声和边缘敏感,这里要剔除低对比度点和边缘点。通过对DOG函数的二阶泰勒展开式求导得到极值点和极值 $D(x)$,将 $|D(x)| < 0.03$ 的特征点去掉,消除低对比度的特征点,同时利用极值点处Hessian矩阵的性质去除边缘点,以增强匹配稳定性、提高抗噪声能力。

3.3 关键点大小和方向的确定

利用关键点邻域像素的梯度方向分布特性为每个关键点指定方向参数,使算子具备旋转不变性,利用下面公式求得每一个关键点的模值和方向:

$$\begin{aligned} m(x, y) &= \\ &= \sqrt{[L(x+1, y) - L(x-1, y)]^2 + [L(x, y+1) - L(x, y-1)]^2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right] \quad (5)$$

在完成关键点的计算后,用直方图来统计邻域内像素的梯度幅值和方向。直方图的角度范围在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间,分为36个柱。其中直方图中最大值为关键点主方向,最大值的0.8倍为辅方向,通过主方向和辅方向一起保证特征点旋转不变。

3.4 关键点处提取特征描述符

首先,将坐标轴旋转为关键点的方向,以确保旋转不变性。其次,以关键点为中心取 16×16 的邻域作为采样窗口,分割成16个 4×4 的子块,然后在每个子块上计算8个方向的梯度直方图,绘制每个梯度方向的累加值,该直方图的横轴表示梯度方向,纵轴表示加权梯度模值 m_1, m_1 可表示为:

$$m_1 = w_1 m(x, y) = G(x, y, \frac{1}{2}\sigma) m(x, y) \quad (6)$$

其中,选取高斯函数 $G(x, y, \frac{1}{2}\sigma)$ 为加权函数 w_1 。梯度方向直方图统计公式如下:

$$h_{r(l,m)}(k) = \sum_{x,y \in r(l,m)} M(x,y) (1 - |\theta(x,y) - c_k| / \Delta_k) \quad (7)$$

其中, c_k 为方向柱的中心, Δ_k 为方向柱的宽度, (x, y) 为子块 $r(l, m)$ 像素点的坐标。

每个关键点共 $4 \times 4 = 16$ 个描述子,每个描述子有 8 个方向向量特征,特征描述子由所有子块的梯度方向直方图构成:

$$u = (h_{r(1,1)}, \dots, h_{r(1,m)}, \dots, h_{r(4,4)}) \quad (8)$$

所以,一个关键点可以形成 $16 \times 8 = 128$ 维的 SIFT 特征向量。此时 SIFT 特征向量已经去除了尺度变化、旋转等几何变形因素的影响,再继续将特征向量的长度归一化,则可进一步去除光照变化的影响。

4 基于改进 SIFT 算法的图像复制粘贴篡改检测

4.1 SIFT 算法的改进

对于图像篡改检测而言,希望可以确定尽量多的、比较精确的特征点,进而对特征点进行匹配。当特征点对数量较少时,可能会造成参数拟合误差较大。此外,仅仅用 Euclid 距离作为匹配度量仍然不能保证精确的匹配点对,误匹配点对仍然存在,可能存在一个特征点对应多个特征点的情况,这些问题都直接影响检测的结果。针对上述问题,本文根据图像篡改检测的实际需要,对 SIFT 算法中的特征点提取和特征匹配两个环节进行了改进。

1) 当对特征点检测时,随着阈值的减小,提取的特征点会逐渐增多,但当阈值太小时,就会引入噪声,如何选择合适的阈值是算法的一个关键步骤。采用人为方式通过反复实验进行对比,可得出较好的阈值,但这不是一个可取的方法。以第 5 节中 532×800 像素的图 11(a) 为例,对不同的对比度阈值的检测结果进行对比,统计这些离散的点并进行拟合,得到变化的曲线,结果如图 3 所示。

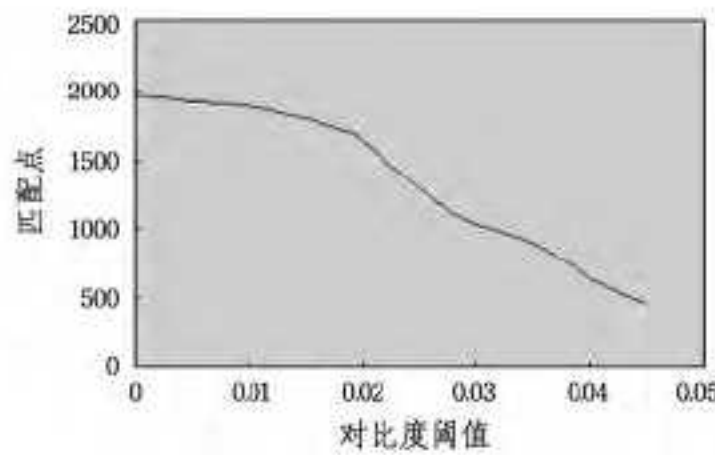


图 3 阈值和匹配点的关系

通过观察曲线的变化可以发现,当阈值增大到某一个数值时,匹配点数量减少的速度会明显加快,此时将曲线从某一个点处用两条直线 y_1 和 y_2 分成上段和下段两部分,然后不断调整这两条直线,使得拟合曲线上段部分的点到直线 y_1 和下段部分的点到直线 y_2 的距离平方和最小,得到两条直线:

$$y_1 = -\frac{332}{0.04}x_1 + 1972$$

$$y_2 = -\frac{2120}{0.045}x_2 + 2600$$

这两条直线相交可以确定一点(见图 4),将交点的横坐标作为所需要的对比度阈值,这样既保留了较多的特征点,又可以避免引入外界干扰。针对本实验,选取的对比度阈值是 0.0162,其能取得相对较好的结果,这种选择可以有效地解决设置阈值的问题。

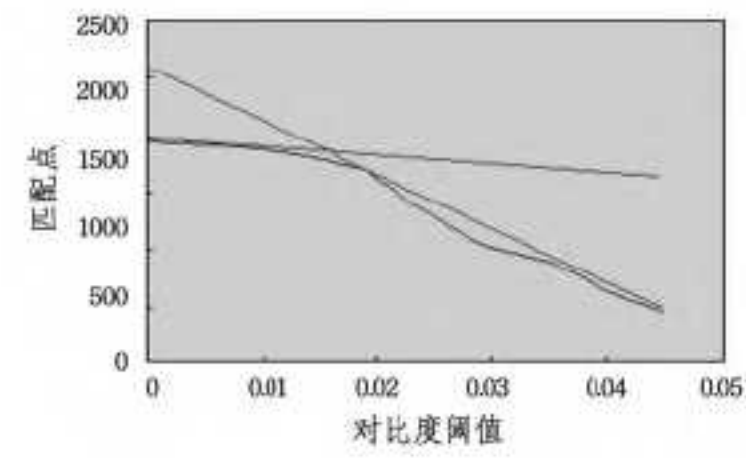


图 4 调整直线选择阈值

2) 特征点匹配可归结为一个通过距离函数在高维空间上的相似性的判定问题,通过研究发现 K-D 树算法对于高维数据,搜索效率会下降,耗时长,所以在生成特征描述向量时,考虑到匹配时的时间代价,本文采用改进的 K-D 树 BBF 搜索算法实现特征点的快速匹配。

首先采用常用的归一化欧氏距离的方法计算特征向量间的相似性距离,两个 SIFT 关键点描述子 $x(x_1, x_2, \dots, x_{128})$ 和 $y(y_1, y_2, \dots, y_{128})$ 之间的欧氏距离定义为:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^{128} (x_i - y_i)^2} \quad (9)$$

当两个关键点对应的特征描述子之间的欧氏距离最小时,这两个关键点就是近邻特征点,称为一对匹配点。根据相似性距离创建 K-D 树特征,然后采用 BBF 算法来进行匹配点对的查找,即利用优先级队列,针对某查询点,搜索整个 K-D 树,记录队列中 K-D 树的树节点和根节点,离查询点的距离决定它们的优先级,然后再从队列中提取优先级最高的节点,从根节点开始扫描到叶子节点,重复以上步骤直到优先级队列为空或超出时间限制,BBF 通过优先队列可以随时中断搜索,算法将返回的最好结果作为近似的最近邻,从而将 K-D 树扩展到高维空间上。至此,用 BBF 算法在篡改图像的每个特征点和原始图像的每个特征点中寻找与其特征向量最近邻和次近邻的两个点,当向量的最近邻 D_{i1} 与次近邻 D_{i2} 的比值小于阈值 T_i 时,认为关键点与最近邻点相匹配。

$$\frac{D_{i1}}{D_{i2}} < T_i, T_i \in (0, 1) \quad (10)$$

综上所述,采用 Euclid 距离和拟合直线优化系数的方法选择 SIFT 算法的最佳阈值,然后通过 BBF 搜索算法来获取 SIFT 算法的最佳匹配。上述过程可简单归纳为图 5 示出的框图。

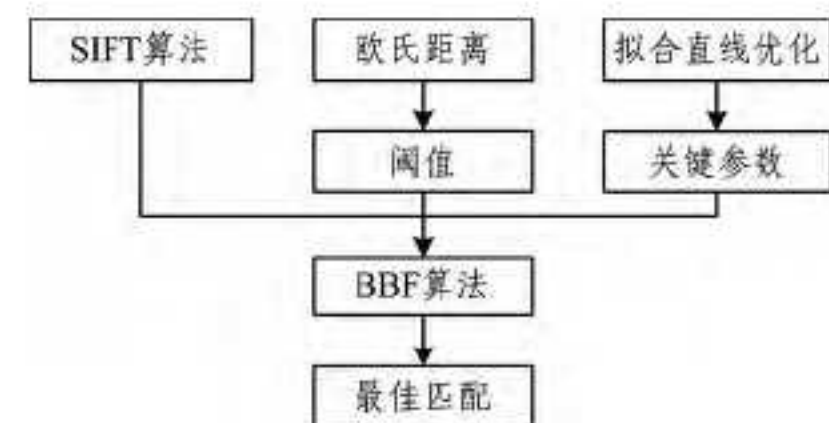


图 5 算法结构框图

4.2 基于改进 SIFT 算法的图像复制粘贴篡改检测

对图像复制粘贴篡改进行检测时,首先在特征提取阶段采用拟合优化的方法确定阈值提取特征点,接下来在特征匹配阶段,采用 BBF 算法进行特征点的快速匹配,该方法不但降低了误匹配率,而且缩短了匹配时间。本文算法步骤如下:

- (1) 读取待检测图像,如果是彩色图像,那么应用标准公式: $I = 0.228R + 0.587G + 0.114B$ 转换为灰度图像;
- (2) 通过实验统计出一组不同阈值对应的匹配点,将得到的离散点坐标优化处理后,构建出函数图像,做两条直线,通

过拟合优化的方法调整这两条直线,使得曲线上的点到两条直线的距离和最小,取两直线交点作为本文算法的最佳阈值;

(3) 利用改进的 SIFT 算法提取图像的特征点,生成特征点的描述子;

(4) 对于一个特征向量集 k , 将其划分成 k_1 和 k_2 两个向量集进行 BBF 搜索, 一个用于建树, 另一个子集中的每个向量用 BBF 搜索算法在已建立的树中搜索最近邻和次近邻向量, 用相同的方法分别划分 k_1 和 k_2 , 重复此过程, 直到 k 中的每个向量都和其它向量匹配过为止;

(5) 得到所有的匹配点对。

本文算法的框图如图 6 所示。



图 6 本文算法框图

5 实验结果与分析

在实际应用中, 最重要的是将图像中的篡改部分检测出来, 然而把篡改区域和原始区域正确标记出来的能力也是很重要的。为此, 本文设计并实施了一组单独的检测实验。



图 7 原始图像

5.1 平移情况

一幅经过简单的复制平移后的图像如图 8(a) 所示, 左边道路上的白色车被复制, 然后粘贴到图像中右边道路的位置上。图 8(b) 是篡改图像的检测结果。

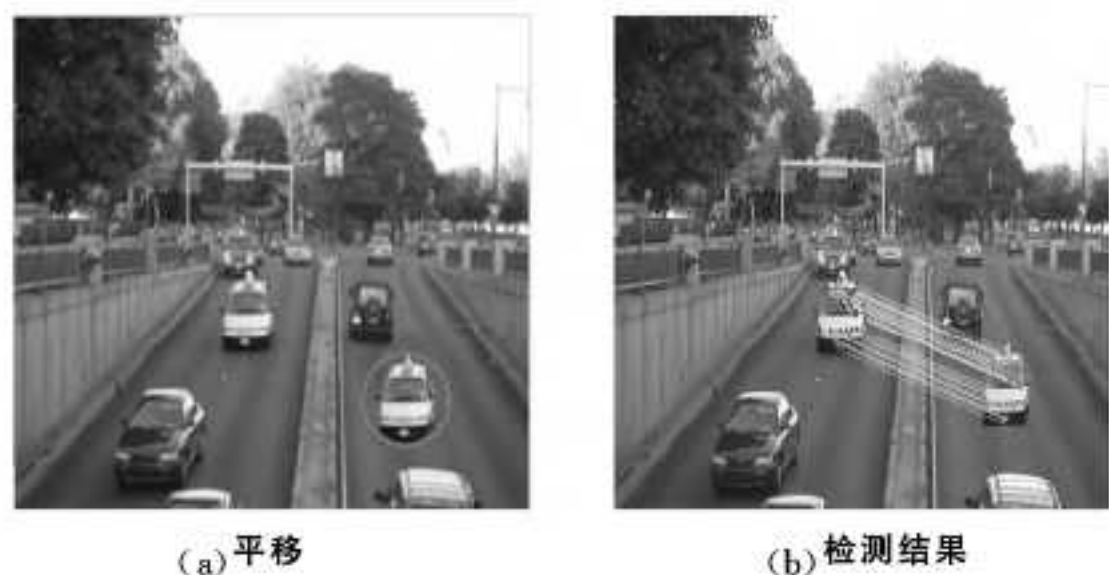


图 8

5.2 缩放情况

建立一个缩放情况的检测, 复制区域被稍微放大或者缩小, 如图 9(a) 所示将左边道路上的白色车尺度放大一倍, 然后复制粘贴到右边道路上, 即对原图进行了“复制_缩放_粘贴”篡改。图 9(b) 是检测结果。用线连接起来的区域即为复制粘贴篡改的区域。

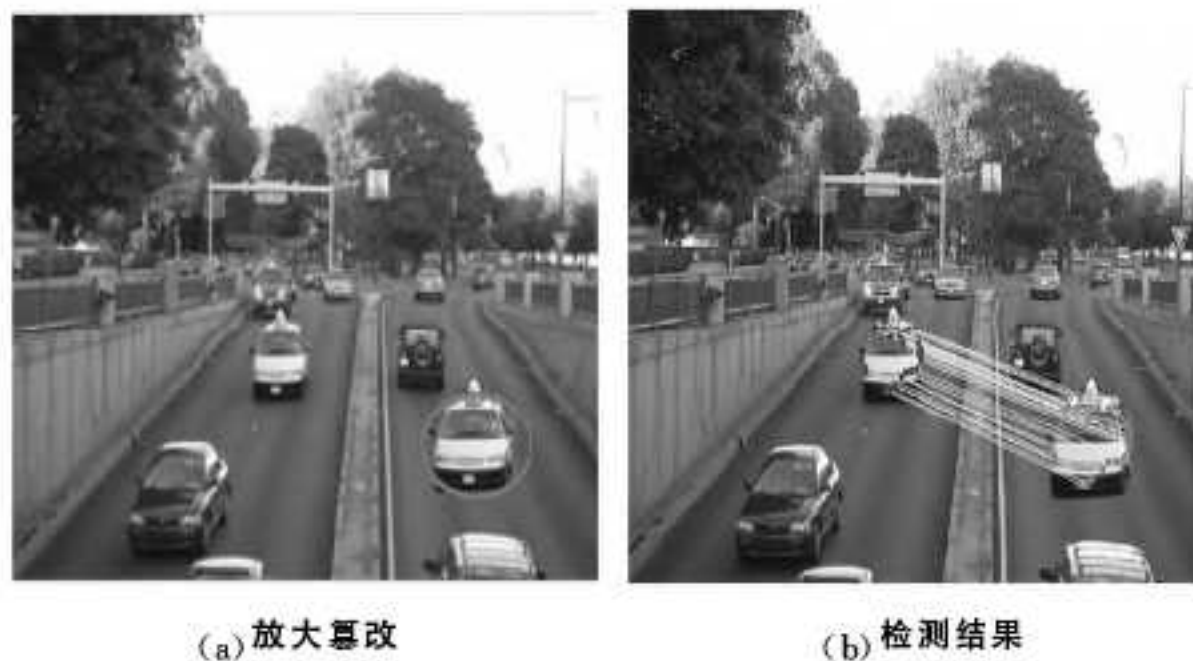


图 9

5.3 旋转情况

建立一个旋转情况的检测, 在将复制区域粘贴之前先将其旋转 30° 。如果对图中左边道路的白色车“复制_旋转_粘贴”, 得到图 10(a)。由于 SIFT 提取的特征不会因为旋转而改变, 因此篡改部分同样能被检测出来。图 10(b) 是篡改图像的检测结果。



图 10

5.4 增加被复制粘贴篡改的区域

图 11(a) 是复制原图的某几个区域, 进行多次粘贴后得到的篡改图像的检测结果, 测试所需时间较长。图 11(b) 是篡改图像的检测结果。由于匹配点增多, 算法进行计算的时间同样也增加了。



图 11

表₁是检测所花费的时间比较,表₂是匹配率的对比结果。

表₁ 各类检测的时间对比(s)

图像	平移	放大一倍	旋转 30°	组合
SIFT 算法 所用时间	23.87	24.57	23.54	36.64
本文算法 所用时间	9.54	10.11	9.46	18.44

表₂ 组合情况下匹配率的对比

算法	匹配对	误匹配	误匹配率(%) (误匹配/匹配对)
SIFT 算法	753	99	13.15
本文算法	1838	52	2.83

实验结果表明,本文算法可以有效检测出图像是否经过了复制粘贴篡改,如果图像在复制粘贴篡改过程中还进行了旋转或缩放,即“复制_旋转_粘贴”、“复制_缩放_粘贴”或者“复制_旋转+缩放_粘贴”等操作,本文算法同样有效。采用本文提出的改进 SIFT 算法的实验结果如图 8(b)、图 9(b)、图 10(b)及图 11(b)所示,从图中可以看出,每个特征点有特征点与其对应,将检测出来的特征点用直线连线标记,如果图像经过复制粘贴篡改,那么所标记的直线将集中于某两个区域之间。

从表₁可以看出,本文算法检测的时间明显小于 SIFT 算法所用时间,说明本文算法在平移、旋转、缩放以及组合情况下的检测速度要明显优于 SIFT 算法。此外,从表₂可以看出,本文算法和 SIFT 算法对同一图像进行检测时,本文算法得到的匹配数和匹配正确率要明显高于 SIFT 算法,说明本文算法在匹配性能上优于 SIFT 算法,本文算法明显改善了检测效果。

结束语 本文将图像匹配技术中的 SIFT 方法进行改进后应用于图像的复制粘贴篡改检测,先用 SIFT 算法提取具有尺度不变性的特征点,再用 BBF 最近邻搜索算法找到所有可能的特征匹配点,确定复制粘贴篡改区域,从而有效地检测出各种基本的图像篡改操作及其组合。实验结果表明,本文算法对复制粘贴及各种后处理篡改操作(如旋转、缩放等),无论在时间还是精度上都具有很好的检测效果。

(上接第 174 页)

[5] Qin Yao, Lu Hu-chuan, Xu Yi-qun, et al. Saliency detection via cellular automata[C]//IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015:110-119

[6] Hadizadeh H, Bajic I V. Saliency-aware video compression[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2014, 23(1):19-33

[7] Zhang Y, Jang G Y, Yu M, et al. Depth perceptual region-of-interest based multiview video coding[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2010, 21(5):498-512

[8] Chen Z, Guillemot C. Perceptually-friendly H. 264/AVC video

参考文献

[1] Kuo T Y, Lo Y C, Huang S N. Image forgery detection for region duplication tampering[C]//2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo(ICME). 2013:1-6

[2] Redi J A, Taktak W, Dugelay J L. Digital image Forensics: a booklet for beginners[J]. Multimedia Tools and Applications, 2011, 51(1):133-162

[3] 周琳娜, 王东明, 郭云彪. 基于数字图像边缘特性的形态学滤波取证技术[J]. 电子学报, 2008, 36(6):1047-1051

[4] Fridrich J, Soukal D, Lukas J. Detection of Copy-Move Forgery in Digital Images[R]. Technical Report, Cleveland, USA, 2003: 272-276

[5] 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

[6] 王俊文, 刘光杰, 张湛, 等. 图像区域复制篡改快速鲁棒取证[J]. 自动化学报, 2009, 35(12):1488-1495

[7] Li Kun-lun, Li He-xin, Yang Bo, et al. Detection of Image Forgery Based on Improved PCA-SIFT[J]. Computer Engineering and Networking, 2014, 277:679-686

[8] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110

[9] Liu Bo, Pun Chi-man. A SIFT and local features based integrated method for copy-move attack detection in digital Image[C]//2013 IEEE International Conference on Information and Automation(ICIA). 2013:865-869

[10] Zhang Ju, Ruan Qiu-qi, Jin Yi. Combined SIFT and bi-coherence features to detect image forgery[C]//2014 12th International Conference on Signal Processing(ICSP). IEEE, 2014:1859-1863

[11] Zhao W L, Ngo C W. Flip-invariant SIFT for copy and object detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(3):980-991

[12] Chihaoui T, Bourouis S, Hamrouni K. Copy-move image forgery detection based on SIFT descriptors and SVD-matching[C]//2014 1st International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP). IEEE, 2014:125-129

[13] Jayshri C, Antara B. Revealing image forgery through image manipulation detection[C]//2015 Global Conference on Communication Technologies (GCCT). IEEE, 2015:723-727

coding based on foveated just-noticeable-distortion model[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(6):806-819

[9] 罗雷, 蒋荣欣, 田翔, 等. 融合颜色与运动信息的视频显著性滤波器[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(2):81-85

[10] ISO/IEC MPEG&ITU-T VCEG, Draft Reference Software for MVC[S]. Doc. JVT-AE207, London, UK, 2009

[11] Song H, Kuo C J. A region-based H. 263+ codec and its rate control for low VBR video[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2004, 6(3):489-500