

联合 Harris 特征点与 Hu 不变矩的图像区域复制篡改盲取证

赵 洁^{1,2}

(1 天津城市建设学院 计算机与信息工程学院, 天津 300384; 2 天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072)

摘 要: 提出了一种将 Harris 特征点和 Hu 不变矩相结合的图像区域复制篡改检测方法. 首先采用 Harris 算子检测图像中的角点作为特征点, 然后以特征点为中心计算其邻域内 Hu 矩的前 4 维低阶矩形成特征向量, 最后记录相等位移矢量的发生频率并通过阈值化处理得到匹配的特征点, 从而标识复制粘贴区域. 仿真实验表明, 该算法不仅可以有效检测多区域复制粘贴篡改操作, 而且能够有效抵抗多种篡改后处理操作, 包括加性高斯白噪声, JPEG 压缩, 对比度、亮度和曝光度调整以及 JPEG 压缩和加噪的混合操作.

关键词: 图像篡改检测; 区域复制; Harris; Hu 矩

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)11-0015-03

Blind Forensics for Image Region-Duplication Forgery Using Harris Points and Hu Invariant Moments

ZHAO Jie^{1,2}

(1 School of Computer and Information Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China;

2 School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A detection method of image region-duplication forgery is proposed using Harris points and Hu invariant moments. First, Harris operator is applied to detect corners as feature points, then the former four dimensions of Hu moments are computed in the neighborhood of which as the center to constitute feature vector, and finally the occurrence frequency of position transfer vector is recorded to obtain matching interest points with thresholding processing, thus copy-move regions are marked. Experimental results show that the algorithm can not only detect multi-region copy-move manipulation effectively, but also be able to effectively resist various tampering post-processing operations, including additive white gaussian noise, JPEG compression, contrast, brightness and exposure adjustment and the hybrid operation of JPEG compression and noise addition.

Key words: detection of image forgery; region-duplication; Harris; Hu moments

1 引言

随着各种功能强大的图像编辑处理软件的广泛应用, 可以很容易地修改一幅数字图像而不留下明显的视觉痕迹, 因此针对图像篡改的取证研究具有十分重要的现实意义. 图像本身性质的盲取证技术由于不需要事先在图像中嵌入认证信息的独特优势近年来已经成为当今国内外数字取证研究的热点方向之一.

近年来, 国内外学者针对图像复制粘贴篡改进行了不少有益的探索. 现有的复制粘贴篡改检测算法主要分为两类: (1) 基于分块特征匹配的方法^[1-3]; (2) 基于特征点检测和特征匹配的方法^[4-6]. 基于特征点检测和特征匹配的方法, 计算复杂度低, 检测的特征点多, 而且提取的特征点在图像上并没有实际的物理特征即非视觉上的角点. Harris 角点检测算子具有旋转不变性, 并且对图像亮度和对比度变化不敏感, 广泛应用于各种图像匹配算

收稿日期: 2013-01-06; **修回日期:** 2013-03-16

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金计划项目(20120712); 天津城市建设学院教育教学改革与研究项目(JG-1220)

法中. 本文提出了一种将 Harris 特征点检测和 Hu 不变矩描述相结合的图像区域复制篡改检测方法.

2 检测算法

Harris 算子是一种计算简单、应用广泛的角点检测算子, 只使用灰度的一阶差分和滤波, 可以定量地提取特征角点并且提取的角点特征均匀, 由于计算过程用到图像的一阶导数, 故对存在灰度变化、视点变换和噪声干扰的图像也能稳定地提取角点, 因此本文算法采用 Harris 角点作为特征点.

2.1 Harris 算子

Harris 算子检测角点的基本思想^[7]是: 在图像中假想一个局部窗口, 当窗口沿各个方向移动时, 如果窗口内区域的灰度发生了较大的变化, 则认为窗口内遇到了角点. 对于图像 $I(x, y)$, 在点 (x, y) 处平移 $(\Delta x, \Delta y)$ 后的自相似性可以通过自相关函数表示:

$$c(x, y, \Delta x, \Delta y) = \sum_{(u, v) \in W(x, y)} w(u, v) (I(u, v) - I(u + \Delta x, v + \Delta y))^2 \quad (1)$$

式中, $W(x, y)$ 是以点 (x, y) 为中心的窗口, $w(u, v)$ 为高斯加权函数. 通过泰勒公式展开, 自相关函数可以近似为二次项函数:

$$c(x, y, \Delta x, \Delta y) \approx [\Delta x \ \Delta y] M(x, y) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $M(x, y) = \sum_{u, v} w(u, v) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}$, $w(u, v) = \exp(-\frac{u^2 + v^2}{2\sigma^2})$ 为高斯窗函数在 (u, v) 处的系数, I_x, I_y 分别为图像在水平方向和垂直方向上的梯度. 二次项函数本质上是一个椭圆函数, 椭圆的扁率和尺寸由 $M(x, y)$ 的特征值 λ_1, λ_2 决定. Harris 给出的角点判别方法并不需要计算具体的特征值, 而是计算一个角点响应函数 R 来检测图像的角点.

$$R = \det(M) - \alpha \text{trace}^2(M) \quad (3)$$

式中, $\det(M)$ 和 $\text{trace}(M)$ 分别为矩阵 M 的行列式和迹. α 为经验常数, 一般取 $0.04 \sim 0.06$. R 表示像素点的 Harris 响应值, 当某点响应值为邻域最大且大于一个阈值 R_0 时, 确认该点为角点.

2.2 以特征点为中心的图像区域 Hu 矩描述

Hu 不变矩是一种高度浓缩的图像几何特征, 具有平移、灰度、尺度和旋转不变性, 因此被广泛用于图像的模式识别、图像分类和目标识别等领域中.

一幅 $M \times N$ 的数字图像 $f(x, y)$ 的 $p+q$ 阶不变矩 m_{pq} 和中心矩 μ_{pq} 定义为

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^p y^q f(x, y) \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

$$\mu_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (x - x_0)^p (y - y_0)^q f(x, y) \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

式中, $x_0 = m_{10}/m_{00}, y_0 = m_{01}/m_{00}$. m_{00} 可以看作是图像的灰度质量, (x_0, y_0) 为图像灰度质心位置. 中心矩 μ_{pq} 反映的是图像的灰度相对于其灰度质心的分布情况. 当图像发生变化时, m_{pq} 随之发生变化, 而 μ_{pq} 则具有平移不变性, 但是对旋转依然敏感^[3]. 为了消除图像比例变化带来的影响, 定义归一化中心矩:

$$\eta_{pq} = \mu_{pq} / \mu_{00}^\gamma \quad \gamma = (p+q+2)/2 \quad p+q = 2, 3, \dots \quad (6)$$

Hu 利用二阶和三阶归一化中心矩构造了 7 个不变矩, 它们在图像平移、旋转和比例变化时保持不变. 实验表明, 高阶矩对于图像的几何形变、噪声等后处理因素较低阶矩更为敏感^[8]. 因此为了增强特征描述的鲁棒性, 同时又避免高阶矩计算带来的时间复杂度高的问题, 本文选取 4 维低阶矩描述特征点领域的图像信息.

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \eta_{20} + \eta_{02} \\ \varphi_2 &= (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \\ \varphi_3 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + 3(\eta_{21} - \eta_{03})^2 \\ \varphi_4 &= (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

本文算法采用 Harris 角点作为图像的特征点, 设 $p_i(x_i, y_i)$ 为 Harris 算子检测得到的某一特征点, 其中 (x_i, y_i) 为 p_i 在原始图像上的位置坐标. 以 p_i 为中心取一个 11×11 大小的图像区域作为待描述区域, 记录每个特征点邻域内 (对于彩色图像则计算亮度分量) 的 4 维低阶 Hu 矩组成特征向量 $V_i = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)$. 为了消除光照变换的影响, 对特征向量进行归一化运算, 即 $\frac{V_i}{\|V_i\|} \rightarrow V_i$. 假设图像检测到的 Harris 特征点数目为 N_p , 可以得到图像 $I(x, y)$ 的维数为 $N_p \times 4$ 的特征矩阵 V , 其中 V_i 代表特征矩阵 V 的一行, (x_i, y_i) 为 V_i 对应 Harris 特征点的坐标值.

2.3 相似性匹配

将特征矩阵 V 进行字典排序, 然后计算 V 中相邻两行对应的 Harris 特征点坐标值的位移矢量. 假

设 V 中相邻的两行对应的特征点位置为 (x_i, y_i) , (x_{i+1}, y_{i+1}) , 则对应的规范化位移矢量为

$$s = (s_1, s_2) = (|x_i - x_{i+1}|, |y_i - y_{i+1}|) \quad (8)$$

遍历字典排序后的特征矩阵 V 的每一行, 计算相邻两行的规范化位移矢量, 记录满足大于位移距离阈值 T_d 且相等的位移矢量的发生频率, 存储在频率计数器矩阵 C 中, 即将对应的计数器元素自增 1:

$$C(s_1, s_2) = C(s_1, s_2) + 1 \quad (9)$$

本文算法中进行相似性匹配时需要定义以下两个阈值: 位移频率阈值 T_f 和位移距离阈值 T_d . T_f 限定相等位移矢量的匹配点的发生频率, T_f 越小, 检测到的误匹配点数目会增加; T_d 限定特征矩阵 V 相邻两行的规范化位移矢量的大小, T_d 决定了算法检测到匹配点的最小距离. 由于自然图像中相邻像素点的灰度值具有较强的相关性, 因而 T_d 越小, 检测到的误匹配点数目也会增加. 若 $C(s_1, s_2) > T_f$, 则认为检测到相应的匹配特征点, 它们对应于图像中的复制粘贴区域, 并对这些匹配点用不同颜色的线段进行连接标识.

2.4 算法的执行流程

算法首先采用 Harris 算子检测图像的角点作为特征点, 然后分别计算每个特征点 11×11 邻域内前 4 维低阶矩形成特征向量, 最后通过统计特征点之间相等位移矢量的发生频率确定匹配的特征点, 从而实现复制粘贴区域的检测. 具体算法的执行流程如下:

(1) 假设待检测的原始图像是一幅 $M \times N$ 的灰度图像 (如果是彩色图像, 则应用标准公式: $I = 0.228R + 0.587G + 0.114B$ 转换为灰度图像), 应用 Harris 算子检测图像的角点作为特征点.

(2) 设 $p_i(x_i, y_i)$ 为 Harris 算子检测得到的某一特征点, 以 p_i 为中心取一个 11×11 像素大小的图像区域, 计算 p_i 该邻域内的前 4 维低阶 Hu 矩组成特征向量 $V_i = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)$.

(3) 遍历字典排序后的特征矩阵 F 的每一行, 计算相邻两行的规范化位移矢量 s , 统计满足 $s > T_d$ 且 s 相等的位移矢量的发生频率, 存储在频率计数器矩阵 C .

(4) 对于满足 $C(s_1, s_2) > T_f$ 的特征点则认为是一对匹配点, 用线段连接所有的匹配点.

3 仿真实验与结果分析

为了验证算法的正确性, 分别选择灰度图像和

彩色图像为检测对象, 实验中所用的篡改图像均利用 Photoshop CS4 处理得到. 测试参数为 $\alpha = 0.05$, $T_d = 16$, $T_f = 2$, 仿真环境为 Matlab R2010b.

对原始灰度图像图 1(a) 中的草地区域进行复制, 并粘贴到就近的图像区域, 实现对两辆卡车的隐藏如图 1(b) 所示, 在没有进行任何后处理的情况下, 本文算法得到的检测结果如图 1(c) 所示.

实验结果可以看出, 本文算法不仅可以实现多区域复制粘贴篡改检测, 而且对 JPEG 压缩, 高斯噪声, 亮度、对比度和曝光度调整以及 JPEG 压缩和加噪的混合操作具有较强的鲁棒性. 在基于特征点检测和特征匹配的图像复制粘贴篡改检测算法中, 特征点的描述向量的维数大小是影响特征点匹配速度的主要因素之一. 与文献[5-6]算法相比, 本文算法对特征点描述的特征维数只有 4 维, 在实现上述检测效果的同时有效降低了特征空间的维数, 减小了计算复杂度, 如表 1 所示.

表 1 特征点描述的特征维数比较

算法	图像特征点提取方法	特征点描述维数
文献[5]	SIFT	128
文献[6]	SURF	64
本文算法	Harris	4

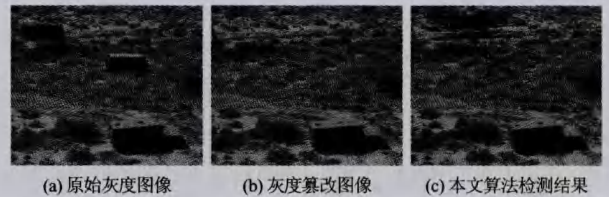


图 1 无后处理操作情况下本文算法的检测结果

4 结束语

本文提出了一种联合 Harris 特征点和 Hu 不变矩的篡改检测方法. 实验结果表明, 算法不仅能够有效检测多区域复制粘贴篡改操作, 并且能够有效抵抗高斯白噪声, JPEG 压缩, 对比度、亮度和曝光度调整以及 JPEG 压缩和加噪的混合操作. 本文算法也存在不足, 通过实验观察, Harris 算子对于高斯模糊的后处理操作比较敏感, 即高斯模糊会使 Harris 算子检测到的特征点数量大大减少, 从而影响算法的检测结果. 因此, 在保持盲取证算法检测性能的同时, 如何使算法对于各种篡改后处理操作具有更强的鲁棒性是我们今后研究的重点.

(下转第 22 页)

优于时分复用片上网络。但是由于空分复用把路由器的物理链路进行了分组,所以关键路径的延时要高于时分复用。相对于文献[6]中的采用了多路路由器,本文路由器的交叉开关的设计复杂度为 $O(N)$,这就降低了片上网络的面积和功耗。

7 结束语

本文以虚电路交换技术为基础,提出一种基于空分复用路由器的设计方案,该路由器的设计相比文献[6]中来说具有较低的功耗与面积,而且交叉开关的设计复杂度也非常小。

参考文献:

- [1] Srinivasan K, Chatha K, Konjevod G. Linear programming based techniques for synthesis of network on chip architectures[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2006, 14(4):407 - 420.
- [2] Zhou W B, Zhang Y, Mao Z G. An application specific NoC mapping for optimized delay [C]//DTIS 2006. Gammarth, Tunisia; IEEE, 2006:184-188.
- [3] Kim D, Kim M, Sobelman G E. CDMA-based network on chip architecture[C]//Proc of Circuits and Sys-

tems. Minnesota: University of Minnesota, 2004:137-140.

- [4] Kees Goossens, John Dielissen, Andrei Radulescu. A ethereal network on chip: concepts, architectures, and implementations[J]. IEEE Design and Test of Computers, 2005, 22(5):414-421.
- [5] Matteo Monchiero, Gianluca Palermo, Cristina Silvano, et al. Efficient synchronization for embedded on-chip multiprocessors[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2006, 14(10):1049-1062.
- [6] Anthony Leroy, Dragomir Mилоjevic, Diederik Verkest, et al. Concepts and implementation of spatial division multiplexing for guaranteed throughput in network on chip[J]. IEEE Transactions on Computers, 2008, 57(9):1182-1195.

作者简介:

周培园 男,(1987-),硕士研究生.研究方向为计算机系统结构。

施慧彬 男,(1965-),博士,副教授.研究方向为计算机系统结构、可重构计算、SoPC 设计、编译技术等。

杨定定 女,(1989-),硕士研究生.研究方向为计算机系统结构。

(上接第 17 页)

参考文献:

- [1] Fridrich J, Soukal D, Lukas J. Detection of copy-move forgery in digital images[C]//Proc. of Digital Forensic Research Workshop, IEEE Computer Society. Washington, 2003:55-61.
- [2] Cao Y, Gao T, Fan L, et al. A robust detection algorithm for region duplication in digital images [J]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 2011, 5(6):95-103.
- [3] Kang X, Wei S. Identifying tampered regions using singular value decomposition in digital image forensics [C]// Proc. of International Conference on Computer Science and Software Engineering, CSSE. Wuhan: Wuhan University, 2008(3):926-930.
- [4] Amerini I, Ballan L, Caldelli R. A SIFT-based forensic method for copy-move attack detection and transformation recovery[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 6(3): 1099-1110.
- [5] Huang H, Guo W, Zhang Y. Detection of copy-move forgery in digital images using sift algorithm[C]//

Proc. of Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, PACIIA. Wuhan, 2008(2):272-276.

- [6] Xu B, Wang J, Liu G, et al. Image copy-move forgery detection based on SURF[C]// Proc. of International Conference on Multimedia Information Networking and Security, MINES. Nanjing, 2010:889-892.
- [7] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]//Proc. of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester, 1988:147-151.
- [8] 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.

作者简介:



赵洁 男,(1984-),博士研究生,讲师.研究方向为数字取证与图像处理。