

基于非负矩阵分解的图像复制粘贴伪造检测

赵中武, 焦丽鑫

(南京工业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 211816)

摘 要: 复制粘贴伪造是图像篡改的一种重要手段, 由此提出一种利用非负矩阵分解的检测算法来识别图像中存在的复制粘贴伪造. 该算法选取重叠分块后的图像子块作为基本比较单元, 对图像块进行离散小波变换, 提取低频近似分量, 利用非负矩阵分解对每个图像子块提取到的低频近似分量进行二次特征提取, 得到系数矩阵, 并进一步对其进行二值量化, 最后将量化后的系数矩阵作为图像块的特征表述, 利用 Jaccard 相似度衡量图像块间的相似度进行篡改检测, 得到复制粘贴伪造区域. 实验结果表明, 所提算法在减少运算量、降低复杂度的基础上, 可以高效地检测出图像中存在的复制粘贴伪造区域, 同时具有鲁棒性.

关键词: 非负矩阵分解; 复制粘贴伪造; Jaccard 相似度

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)06-0023-04

Copy-paste Forgery Detection Based on Non-negative Matrix Factorization

ZHAO Zhong-wu, JIAO Li-xin

(College of Computer Science & Technology, Nanjing TECH University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Copy-paste forgery is an important means of image tampering, an efficient and passive approach based on Non-negative matrix factorization is presented to detect the copy-paste forgery in the digital image. Firstly, image is segmented into overlapping blocks as the basic comparing unit, then DWT is applied to each sub-block and the low-frequency component is extracted. Non-negative matrix factorization of the low-frequency component is used to yield a reduced coefficient matrix which will be quantized subsequently as the features of sub-block. At last the detection is measured by the Jaccard similarity between each two sub-blocks. The experimental results show that the proposed algorithm is efficient and robust to the forgery detection of copy-paste image with less amount of computation and complexity.

Key words: non-negative matrix factorization; copy-paste forgery; Jaccard similarity

1 引言

随着计算机技术的迅速发展和图像编辑软件功能的日益强大, 图像编辑处理日趋简单化、平民化, 伪造图像的日益增多, 对个人隐私、社会安全以及国家稳定等均造成了一定的负面影响. 因此, 对于图像的真实性和可靠性的检测一直是计算机视觉领域的一个重要研究方向.

数字图像伪造检测^[1]是指在无任何先验知识的前提下, 对图像内容的完整性和真实性进行相应的

检测与鉴别. 当前技术条件下, 仍未有一种通用有效的检测方法可以适用于任意的图像伪造检测, 复制粘贴篡改是图像伪造的重要手段之一. 图像复制粘贴篡改是指用户根据自身需求, 将图像中部分区域进行复制并粘贴到当前图像内其他区域, 从而达到特定的编辑效果.

逐像素比较法原理简单、操作简便, 是图像伪造检测的一种常见的解决方案, 但巨大的运算量导致其很难被推广. Fridrich^[2]等人基于提取到的图像块 DCT 量化系数进行字典排序搜索相似图像块, 实现

图像的伪造区域检测,减少了运算量,对含有加性噪声和有损压缩的图像具有较好的检测效果. Popescu^[3]等人将图像块的主成分分量(Principal Component Analysis, PCA)作为图像块的特征表述,减少了特征空间的维数. LI^[4]等人的算法通过小波变换提取图像的低频子带分量, Mahdian^[5]提出了一种模糊不变矩的复制粘贴伪造检测算法,提取图像块的模糊不变矩特征,采用主成分分析进行特征维数约简,分析图像块间的相似度,搜索复制粘贴伪造区域,对经过模糊、加噪及压缩后的图像检测均具有稳健性. 文献^[6]提出了一种基于 Fourier-Mellin 变换旋转缩放不变特征的伪造检测算法,通过衡量相似位移进行图像块匹配,定位复制粘贴伪造区域.

为了更好地利用图像的细节特征增强图像块匹配的稳健性,提高伪造检测算法的鲁棒性,本文提出了一种基于非负矩阵分解^[7](Non-negative Matrix Factorization, NMF)的图像复制粘贴伪造检测算法.

2 基于非负矩阵分解的图像复制粘贴伪造检测方法

降低计算量和用合适准确的图像块特征表述图像,是复制粘贴伪造图像检测算法必须解决的两个问题. 本文方法预处理阶段先对图像块进行小波变换,在降低图像尺寸和空间维度的基础上有效减小算法运算量. 其次,为了提高图像块特征表述图像信息的精确性,本文方法将图像块进行非负矩阵分解后的低秩矩阵量化作为图像的特征表述,有效降低了特征空间的维数,减少了数据存储空间,而且确保了分解后数据分量的非负特性.

2.1 小波分解

单纯地对图像或图像块进行特征提取,获取到的特征向量维数较高. 主分量分析法和 DCT 量化系数字典排序算法是特征提取的一种常见分析手段,广泛应用于诸多领域中,但是对图像进行特征提取时运算量过大严重降低了它们实用性.

小波变换通过变换分析可以充分凸显问题某些方面的特点,并可以聚焦到信号的任意细节,二维离散小波变换实现了图像高频信息与低频信息的分离. 本文检测算法预处理阶段采用离散小波变换将待检测图像块进行分解,成功降低了图像块尺寸^[8],提高了检测效率.

图像经过离散小波变换处理后,会被分解为一个低频部分和三个高频部分,图像的主要特征信息聚集在低频部分. 由于图像低频子带分量的尺寸随小波分解层数的增加而减小,因此相对于直接处理原图像而言,对经过小波分解后的低频图像进行进一步检测效率更高,且能有效抓住图像的主要特征信息.

2.2 非负矩阵分解

非负矩阵分解是一种有效地数据特征提取手段,可提取数据中潜在的特征或结构,并保持数据的非负特性.

给定一个样本数据 $V_{n \times m}$, 其中 m 是样本数据个数, n 是每个样本数据特征维数, NMF 算法旨在寻找两个非负矩阵 $W_{n \times r}$ 和 $H_{r \times m}$, 使得 $V \approx WH$, 从而将样本数据矩阵分解成两个矩阵相乘, 其中 W 为基矩阵, H 为系数矩阵, r 为 NMF 算法的秩. 当 $(m+n)r \leq nm$ 时, 用分解得到的系数矩阵 H 替代原样本数据矩阵 $V_{n \times m}$, 即可实现对原样本数据矩阵降维.

为实现样本数据矩阵非负分解, 即寻找最佳的 W 和 H , 还需要构造一个合理的目标函数来度量样本数据矩阵分解前后的差异.

本文将图像块作为样本数据进行非负分解, 定义如下:

$$V_{n \times m} = W_{n \times r} H_{r \times m} \quad (1)$$

式中, m 为图像块的个数, n 为图像块特征向量的维数, 并采用欧氏距离度量样本数据分解前后的差异, 对应目标函数为

$$\min \sum_i^n \sum_j^m (V_{ij} - (WH)_{ij})^2 (W, H \geq 0) \quad (2)$$

其中, 式(2) 采用以下的乘性迭代规则进行求解:

$$\begin{aligned} H_{r,m} &\leftarrow H_{r,m} \frac{(W^T V)_{r,m}}{(W^T W H)_{r,m}} \\ W_{n,r} &\leftarrow W_{n,r} \frac{(V H^T)_{n,r}}{(W H H^T)_{n,r}} \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 相似度计算

经过复制粘贴伪造的图像, 粘贴区域与其对应的复制区域在内容上存在着相似性, 这种相似性也反映在图像块的特征表述上.

设待检测图像为 I , 尺寸为 $M \times N$, 将 I 分割成 s 个大小均为 $d \times d$ 的互相重叠的图像块: $B^{(k)}$ ($k = 1, 2, \dots, s$), 其中 $s = (M-d+1) \times (N-d+1)$. 对每一图像块依次进行 1 级小波分解, 图像的主要特征

信息聚集在低频部分,提取低频近似分量 $L^{(k)}$ 作为图像块 $B^{(k)}$ 的初级特征表述。

利用非负矩阵分解对 $L^{(k)}$ 进行二次特征提取,在非负条件约束下通过迭代优化求解基矩阵 W 和系数矩阵 H :

$$[W^{(k)}, H^{(k)}] = \text{NMF}(L^{(k)}, r, l) \quad (4)$$

式中, r 为矩阵 $L^{(k)}$ 分解后的秩, l 为迭代次数. 利用分解得到的系数矩阵 $H^{(k)}$ 代替 $L^{(k)}$, 可以有效地实现对 $L^{(k)}$ 矩阵的降维. 但是, 直接利用 $H^{(k)}$ 作为图像块的特征表述进行图像块匹配, 计算量仍然较大. 为进一步压缩数据, 本文对系数矩阵 $H^{(k)}$ 进行量化处理, 规则如下:

$$Q_{\alpha, \beta}^{(k)} = \begin{cases} 1, H_{\alpha, \beta}^{(k)} \geq \frac{1}{s} \sum_{\substack{1 \leq i < s \\ 0 \leq \alpha < d \\ 0 \leq \beta < d}} H_{\alpha+1, \beta}^{(i)} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中, α, β 分别表示矩阵的行和列. 将 $Q^{(k)}$ 矢量化得到 $P^{(k)}$, 作为图像块最终的特征表述。

Jaccard 相似度常用于二值型数据的相似度计算, Jaccard 值越大, 表明相似程度越高. 本文正是通过图像块特征表述间的 Jaccard 相似度来度量图像块间的相似程度, 对应的相似度公式为

$$\text{com}(P^{(i)}, P^{(j)}) = \frac{|P^{(i)} \cap P^{(j)}|}{|P^{(i)} \cup P^{(j)}|} = \frac{|P^{(i)} \cap P^{(j)}|}{|P^{(i)} \cap \bar{P}^{(j)}| + |\bar{P}^{(i)} \cap P^{(j)}| + |P^{(i)} \cap P^{(j)}|} \quad (6)$$

通过式(7)即可判断向量 $P^{(i)}, P^{(j)}$ 间的相似度. 若 $\text{com}(P^{(i)}, P^{(j)}) \geq t$ (t 为阈值), 则可以判定图像块 $B^{(i)}, B^{(j)}$ 是疑似复制粘贴伪造区域. 为了准确识别复制粘贴伪造区域, 提高检测可靠度, 匹配过程中疑似复制粘贴伪造区域 $B^{(i)}$ 与 $B^{(j)}$ 不能够相互重叠, 即两图像块之间的最短距离要大于图像块的边长 d .

3 本文检测算法流程

应用非负矩阵分解算法进行图像复制粘贴伪造检测主要包括以下 6 个步骤:

- (1) 对输入图像 I 进行重叠分块, 得到图像子块, 其中图像块大小为 $d \times d$, 总数为 s ;
- (2) 对图像块进行小波分解, 提取低频部分 $L^{(k)}$;
- (3) 对 $L^{(k)}$ 进行非负矩阵分解, 得到相应的系数矩阵 $H^{(k)}$;

(4) 对 $H^{(k)}$ 进行量化, 得到向量 $P^{(k)}$, 作为图像块的最终特征表述;

(5) 利用 $P^{(k)}$ 求取图像块间的 Jaccard 相似度, 结合图像块间最短距离, 判定两图像块区域是否为复制粘贴伪造;

(6) 将检测出的复制粘贴伪造图像块区域进行连通, 构成最终的复制粘贴伪造区域。

4 实验

实现硬件平台: 四核 i5 处理器、8 GB 内存。

软件环境: Matlab 2012a, 在其环境下实现了本文基于非负矩阵分解的图像复制粘贴伪造检测算法。

本文算法实验图像大小均为 256×256 , 涉及的相关参数取值如下: $r=5, d=8, l=200, t=0.85$. 图 1 是通过本文所提出的方法对存在复制粘贴篡改区域图像进行伪造性检测的 3 组实验结果, 每一行为一组实验, 从左往右三列依次为源图像、篡改图像和检测结果. 实验表明, 本文所提出的方法可以将篡改后图像中的复制粘贴区域进行准确定位, 复制粘贴区域边缘特征越突出, 检测准确率越高。

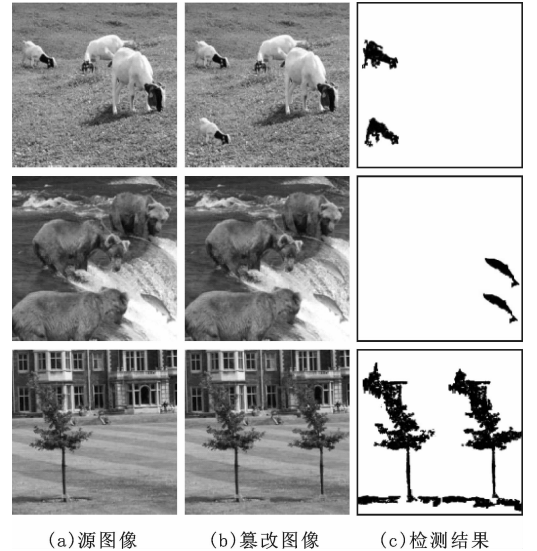


图 1 基于非负矩阵分解的图像复制粘贴伪造检测算法实验结果

在图 2 中, 将本文检测方法与文献[9]、文献[10]两种图像复制粘贴伪造检测方法的检测结果进行了对比. 每一行为一组数据. 从左到右依次为文献[9]方法检测结果、文献[10]方法检测结果和本文方法检测结果, 其中黑色框处的图像代表各种方法检

测后所定位出的复制粘贴伪造区域. 两组实验数据的源图像和篡改图像分别与图 1 中的第 1 和第 2 组数据相同. 从中可以看出, 当复制粘贴伪造区域较大且与背景对比突出时, 三种方法均可得到良好的检测结果, 如第 1 组数据所示; 当复制粘贴伪造区域较小且色彩与背景比较平衡时, 本文检测方法效果优于另外两种方法, 如第 2 组数据所示.

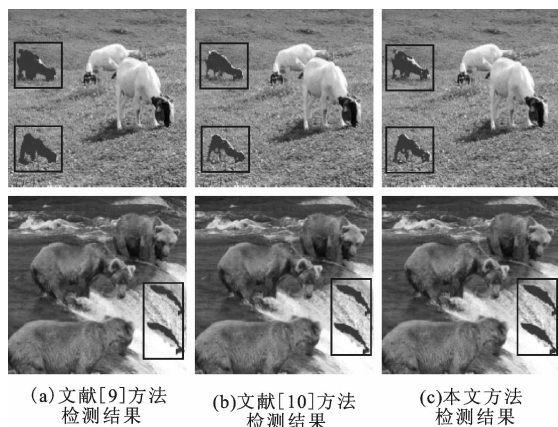


图 2 三种检测方法实验结果对比

5 结束语

为了有效检测图像内存在的复制粘贴篡改区域, 提出了一种基于非负矩阵分解的算法. 经小波变换所提取的图像块低频分量特征通过非负矩阵分解进行二次特征提取, 得到的系数矩阵量化后用于图像块间的相似度匹配. 该方法不仅降低了特征空间的维数, 压缩了图像的冗余信息, 提高了检测效率, 而且提取出的图像特征表述具有良好的旋转、平移以及缩放不变性. 本文方法也存在着一定的局限性, 当图像复制区域与粘贴区域存在重叠部分时, 如何进行相应检测是后期研究的重点与难点.

参考文献:

- [1] Mahdian B, Saic S. A bibliography on blind methods for identifying image forgery[J]. Signal Processing,

Image Communication, 2010, 25(6):389-399.

- [2] Fridrich J, Soukal D, Lukas J. Detecting of copy-move forgery in digital images[C]// Proc. Digital Forensic Research Workshop. Cleveland, OH, 2003.
- [3] Popescu A C, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting duplicated image regions[R]. Dartmouth College, Computer Science, TR2004-515, 2004.
- [4] Li G, Wu Q, Tu D, et al. A sorted neighborhood approach for detecting duplicated regions in image forgeries based on DWT and SVD[C]// Multimedia and Expo, 2007 IEEE International Conference on. China, Beijing, 2007:1750-1753.
- [5] Mahdian B, Saic S. Detection of copy-move forgery using a method based on blur moment invariants[J]. Forensic Science International, 2007, 171 (2/3): 180-189.
- [6] Li W, Yu N. Rotation robust detection of copy-move forgery[C]// Proc. IEEE International Conference on Image Processing ICIP' 10. China, Hongkong, 2010: 2113-2116.
- [7] Lee D D, Seung H S. Learning the parts of objects with non-negative matrix factorization[J]. Nature, 1999, 130(401): 788-791.
- [8] 岳芹. 基于 DWT 域数字水印的遥感图像机密信息隐藏[J]. 计算机与现代化, 2009, 24(8):150-151.
- [9] 张小祥, 周治平. 小波低频子带提取特征的图像复制篡改检测[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(10): 161-163.
- [10] 叶娇娇, 陈明志. 基于小波矩的图像复制粘贴篡改检测[J]. 计算机系统应用, 2013, 22(12):108-112.

作者简介:

赵中武 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为可信媒体认证、计算机图形学. E-mail: 811020161@qq.com.

焦丽鑫 女, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为数字图像处理.