

融合多特征的异源视频复制-粘贴篡改检测

李富贵^{1,2}, 黄添强^{1,2*}, 苏立超^{1,2}, 苏伟峰³

(1. 福建师范大学数学与计算机科学学院, 福建 福州 350007;

2. 福建省网络安全与密码技术重点实验室(福建师范大学), 福建 福州 350007;

3. 北京师范大学-香港浸会大学联合国际学院理工科技学部, 广东 珠海 519085)

摘要:相比传统的视频帧插入或帧删除以及视频双压缩等篡改方式,复制-粘贴篡改更能直接的改变视频内容。因此,本研究提出一种融合多特征的异源视频复制-粘贴篡改检测方法。对于经过帧内复制-粘贴篡改的视频,其视频帧内会引入一些尖锐的变化,比如线条、边缘和角点等,而二维相位一致性可以很好的检测出这些变化。同时,来自异源视频帧复制的区域块会使得帧内引入不同的模式噪声,可以利用模式噪声和二维相位一致性提取视频帧的特征,然后将特征融合进行SVM分类实验来检测篡改视频。实验表明该算法可以有效地检测异源复制-粘贴篡改的视频。

关键词:复制-粘贴篡改;复制-粘贴检测;模式噪声;二维相位一致性;SVM(support vector machine)

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A

Heterologous video copy-move forgery detection by fusing multiple features

LI Fu-gui^{1,2}, HUANG Tian-qiang^{1,2*}, SU Li-chao^{1,2}, SU Wei-feng³

(1. School of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Network Security and Cryptography (Fujian Normal University), Fuzhou 350007, China;

3. Department of Computer Science and Technology, BUN-HKBU United International College, Zhuhai 519085, China)

Abstract: Compared with the conventional methods of video forgeries, such as frame insertion, frame deletion and double compression, copy-move forgery might change the content of a video directly. Therefore, a new algorithm was proposed to detect video copy-move forgery by fusing multiple features. For an intra-frame copy-move tampered video, which may introduce a number of sharp transitions in frames such as lines, edges and corners. Phase congruency was known as a sensitive measure of these sharp transitions and hence was proposed as features for video forgery detection. Meanwhile, the duplicated blocks from the heterologous video could introduce different pattern noise. Therefore, the proposed algorithm could extract features of video frames from the pattern noise and 2-D phase congruency for video forgery detection, and then the merged multiple features were experimented with the support vector machine (SVM). Experimental results demonstrated that the proposed algorithm could detect video of intra-frame copy-move forgery effectively.

Key words: copy-move forgery; copy-move detection; pattern noise; 2-D phase congruency; support vector machine

收稿日期:2013-05-14 网络出版时间:2013-07-29 11:16

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/37.1391.T.20130729.1116.018.html>

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61070062, 61073017);福建省高校产学研合作科技重大资助项目(2012H6006);福建省高校服务海西建设重点资助项目(2008HX200941-4-5);福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划资助项目(JAH038)

作者简介:李富贵(1989-),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要研究方向为数据挖掘、视频篡改检测。E-mail:leaf304@163.com

* 通讯作者:黄添强(1971-),男,福建莆田人,教授,博士,主要研究方向为数据挖掘、视频篡改检测。E-mail:fjhtq@fjnu.edu.cn

0 引言

随着低价、便携、高质量的数码相机、摄像机和手机等各种数字多媒体设备的广泛普及,使得人们可以在任何时间、任何地点都能记录下生活中的视频。另外,像 Adobe Premiere Pro, Adobe After Effects 等各种视频编辑软件的出现,也使得人们可以轻易地对视频数据进行编辑处理,当大量被编辑和篡改过的视频出现在视频网站或者是用来作为法律证据的时候,将会给社会带来很大的负面影响。由于存在这些潜在的恶意行为,那么对于多媒体内容的权威性和完整性的验证就变得越来越困难。因此,对于数字多媒体内容的取证分析已经成为了一个很重要的研究课题^[1]。

在视频篡改检测的研究中, Weihong Wang 等人提出了二次压缩 MPEG 视频篡改检测^[2]和二次量化 MPEG 视频篡改检测^[3],文献[4]利用 MPEG 视频编码中出现的运动补偿边缘效应(motion compensated edge artifact, MCEA)来检测帧删除方式的篡改视频,秦运龙等人通过统计视频帧间预测的运动矢量来检测篡改视频^[5],黄添强等人则利用双向运动矢量进行视频帧的插入和删除篡改检测^[6],这些检测方法都是基于分析 MPEG 格式视频的编码原理,由于针对篡改视频格式的单一性,这些检测方法局限性很大。袁秀娟等人利用灰度共生矩阵提取视频帧的纹理特征来检测视频异源帧插入和帧替换篡改^[7],文献[8]通过分析 Mokey 软件对视频中物体进行删除后篡改视频中会引入修复痕迹,通过判断视频帧的累计差值图像和前景马赛克的一致性来检测具有鬼影(ghost shadow)现象的视频篡改。

除了视频帧的插入和删除篡改方式,复制-粘贴篡改也是一种常见的视频篡改手段,其大致可分为帧内篡改和帧间篡改,也可称为空间域篡改和时间域篡改。在帧内复制-粘贴篡改中,其实质和单幅图像的复制-粘贴篡改类似,包括将视频帧内的某一物体复制到该帧的其它位置或者复制到其它帧的某一位置以达到隐藏物体或者替换物体的篡改效果;而帧间复制-粘贴篡改则是用连续多帧替换视频中的多帧以达到让视频中的某些场景被替换的篡改效果。文献[9]利用时空相关性来检测复制-粘贴视频,即对于一个给定的视频,先将视频帧序列分为重叠的多个短子序列,并计算各个短子序列在时间域和空间域上的相关性矩阵,然后利用相关性矩阵来进行篡改检测,尽管该方法对于视频帧的复制

篡改检测效果很好,但是不能检测异源视频帧的复制-粘贴以及与视频本身纹理具有很高相关性的视频。文献[10]利用方向梯度直方图(histogram of oriented gradients, HOG)特征匹配和视频压缩特性检测视频时空域上的复制-粘贴篡改,通过提取视频帧中各块的 HOG 特征,用基于最近邻标准和阈值标准寻找某块的最佳匹配块来分别进行时间域和空间域上的篡改检测,由于 HOG 特征对图像几何的和光学的形变都能保持很好的不变性,所以对视频复制-粘贴篡改视频检测率较高,但由于 HOG 特征提取的维数较高导致算法的复杂性较高。

在视频篡改检测中还可以利用原始视频与篡改视频中视频帧的特征差异进行分类检测。文献[11]通过提取视频帧的运动残留信息,利用马尔可夫模型提取视频每帧的 324 维特征进行 SVM 分类,但其分类准确率仅为 87%,且由于特征维数较高计算复杂性较大。文献[12]利用物体轮廓的统计特征和周围区域特征,通过提取小规模篡改区域的非下采样轮廓系数的均值和方差以及 R、G、B 三个通道的平均梯度信息,利用视频帧图像提取的 5 维组合特征进行 SVM 分类,其分类准确率达 95%,但该方法的实验仅是针对静止视频。

本研究提出了一种利用模式噪声和视频帧相位一致性信息检测异源视频帧内复制-粘贴篡改的方法。相位一致性是将图像傅里叶分量相位最一致的点作为特征点,而对于经过视频帧内复制-粘贴篡改的视频,其视频帧内会引入线条、边缘和角点等特征,这些特征都可以使得相位一致性高的点出现,则可以利用相位一致性信息来提取视频帧的特征。同时,来自异源视频帧区域块的复制-粘贴会使得帧内引入不同的模式噪声。因此,可以利用模式噪声残留帧和二维相位一致性处理后帧图像统计特征来进行视频帧内的篡改检测。实验表明本研究提出的算法可以有效的检测异源帧内复制-粘贴篡改的视频。

1 篡改检测方法

视频篡改检测可以认为是一个二分类的模式识别问题,视频中的帧序列可以分为正常帧和篡改帧,正常帧即为原始拍摄的视频帧中未经过任何处理的帧序列,而篡改帧即为利用各种编辑软件对视频帧内进行复制-粘贴篡改的帧序列。在这部分将介绍基于三维块匹配去噪算法^[13](block matching and 3D filtering, BM3D)和二维相位一致性^[14]提取视频帧特征的方法。

1.1 模式噪声

传感器的感光面是由若干独立的光刻单元组成的,它能存储由光或电激励而产生的信号电荷,由于其对光感应的不均匀性和相机传感器制造工艺的非理想性,会使每个相机都产生系统噪声,称为模式噪声。对于一个给定的摄像机,传感器保留在视频每帧中的模式噪声几乎不变,即使是同一厂家的同一型号相机,在这一项上也一定会有细微的差异。因此,当视频帧内存在复制-粘贴篡改时,视频帧内可能会引入来自异源视频帧内的区域块,则视频帧内会有不同的模式噪声。相机的模式噪声已被用于视频篡改检测,文献[15-16]等都是利用 KIVANC MI-

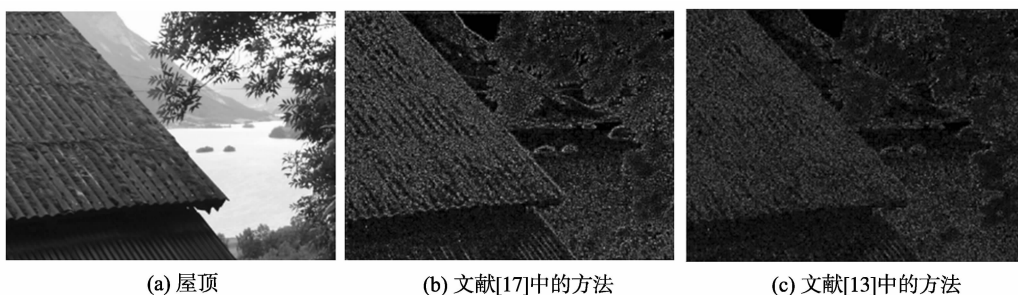


图1 不同去噪方法的去噪结果

Fig. 1 The denoising results of different kinds of denoising methods

图1(a)为添加非常弱的本地加性高斯噪声的屋顶图像;图1(b)为图像(a)与使用文献[17]中方法去噪后图像的绝对差值图像(放大16倍),差值图像表明残留的不仅只是白高斯噪声,而且包含了与图像结构相关的部分;图1(c)为图像(a)与使用文献[13]中方法去噪后图像的绝对差值图像(放大16倍),可以看出与图像纹理等相关部分都被移除。

因此,为了得到良好的视频帧去噪效果,本研究利用三维块匹配去噪算法(BM3D)来进行模式噪声残留帧序列的提取。利用该算法对视频帧图像进行去噪,其去噪的大致过程分为3个主要步骤:

(1) 把帧图像 I_1 分成一定大小的块,根据图像块之间的相似性,把具有相似结构的二维图像块组合在一起形成三维数组,简称为分组;

(2) 用联合滤波的方法对形成的三维数组进行三维变换;

(3) 通过逆变换得到组中所有图像块的估计,把这些估计值返回到原图像中,从而得到去噪后的图像 I_2 。

通过帧图像与其去噪后图像的差值,得到噪声残留帧图像 I_0 :

$$I_0 = I_1 - I_2. \quad (1)$$

1.2 二维相位一致性

当视频帧中存在帧内复制-粘贴篡改时,会使

HCAK M 等于 1999 年提出的图像去噪方法,该方法是基于小波去噪原理,但对于图像的纹理和平滑变化处理效果比较差。而对于利用模式噪声来进行视频篡改检测的方法,那么对视频帧去噪的好坏将直接影响到实验的效果。文献[18]利用相机的光感应不均匀噪声进行图像的篡改检测,对文献[17]和文献[13]中提出的图像去噪效果进行了分析和比较,结论表明,利用文献[13]中提出的三维块匹配去噪算法(BM3D)来进行图像去噪的效果优于文献[17]中提出的基于小波去噪的方法,其实验效果如图1所示。

得视频帧内产生边缘或者边界出现不一致的区域,而相位一致性可以很敏感的捕获由于这些篡改引起的边缘不一致的特征。

由 Morrone M C 等人首次提出的相位一致性在信号中 x 处的傅里叶级数展开表达式^[19]为

$$PC_1(x) = \max_{\phi(x) \in [-\pi, \pi]} \frac{\sum_n A_n \cos(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x))}{\sum_n A_n}, \quad (2)$$

其中, A_n 和 $\phi_n(x)$ 分别表示信号中 x 处第 n 项的振幅和相位角, $\bar{\phi}(x)$ 表示在 x 处的幅度加权平均相位角,假如相位一致性(PC)等于最大值1,那么所有的频谱分量都在相位中,正如图2中所示的阶跃边缘的情况,否则相位一致性的值将会在0和1之间。

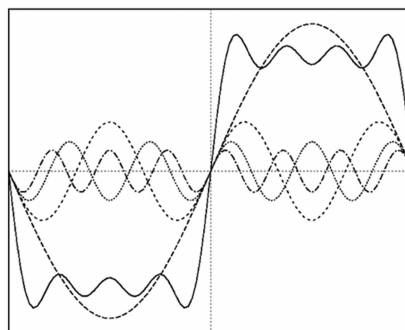


图2 方波的傅里叶级数展开

Fig. 2 Fourier series expansion of square wave

而 KOVESI P 等人将一维相位一致性延伸用来计算二维的相位一致性^[14]。对于计算给定图像的

二维相位一致性,首先将 log-Gabor 滤波器组与图像进行卷积,假设定义图像为 $I(x,y)$,在尺度 s 和方向 o 的偶对称滤波和奇对称滤波分别定义为 M_{so}^{even} 和 M_{so}^{odd} ,每个正交对过滤器的响应是一个矢量,定义为

$$[\text{even}_{so}(x,y), \text{odd}_{so}(x,y)] = [I(x,y) * M_{so}^{even}, I(x,y) * M_{so}^{odd}] \quad (3)$$

其中, $*$ 是卷积操作,由上式可以得到响应的幅度为

$$A_{so}(x,y) = \sqrt{\text{even}_{so}^2(x,y) + \text{odd}_{so}^2(x,y)} \quad (4)$$

相位为

$$\phi_{so}(x,y) = \arctan(\text{even}_{so}(x,y), \text{odd}_{so}(x,y)) \quad (5)$$

那么,二维的相位一致性可以这样来计算,

$$PC_2(x,y) = \frac{\sum_o \sum_s W_o(x,y) [A_{so}(x,y) \Delta\Phi_{so}(x,y) - T_o]}{\sum_o \sum_s A_{so}(x,y) + \varepsilon} \quad (6)$$

其中, $[\]$ 表示其中的计算结果为正时等于其本身,否则等于 0, $W_o(x,y)$ 表示频率展开的权重因子, ε 是小正数,为了避免分母为 0, T_o 表示噪声能量, $\Delta\Phi_{so}(x,y)$ 表示相位偏移函数,定义为

$$\Delta\Phi_{so}(x,y) = \cos(\phi_{so}(x,y) - \overline{\phi_0(x,y)}) - |\sin(\phi_{so}(x,y) - \overline{\phi_0(x,y)})| \quad (7)$$

尖锐的图像特征比如边缘和纹理通过二维相位一致性来表示,因此,通过二维相位一致性 (phase congruency, PC) 可以得到视频帧的特征。对视频帧序列进行二维相位一致性处理的效果如图 3 所示。图 3(a) 和图 3(c) 分别为原始视频帧和篡改视频帧;图 3(b) 和图 3(d) 分别为通过二维相位一致性处理后的视频帧效果,从图 3 中可以看出视频帧内物体的轮廓清晰的体现出来,因此,对于进行帧内复制-粘贴篡改后的视频帧,其帧内就会引入更多的边缘特征。

1.3 特征提取

图像的一阶统计特征可以用来刻画图像的特征,本研究通过提取去噪后残留帧图像和二维相位一致性处理后图像的一阶统计特征^[20]来作为区别视频中正常帧和篡改帧的特征。

设随机变量 I 表示图像的灰度级,那么一阶直方图 $P(I)$ 定义为

$$P(I) = \frac{N(I)}{M}, I=0,1,2,\dots,L-1, \quad (8)$$

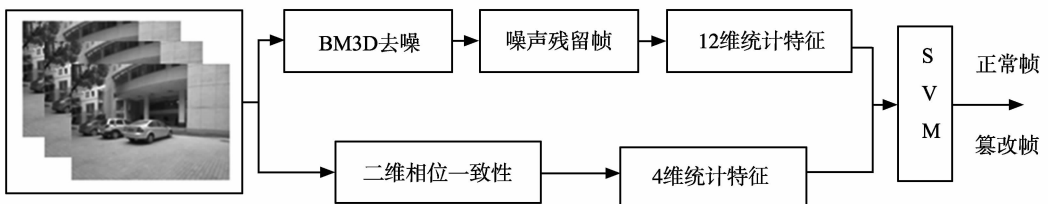


图4 检测流程图

Fig. 4 Flow chart of detection

其中, M 为图像像素总数, $N(I)$ 为灰度级为 I 的像素数, $I=0,1,2,\dots,L-1$, 为图像的灰度级。



(a) 原始视频帧

(b) 2D-PC处理后帧图像



(c) 篡改视频帧

(d) 2D-PC处理后帧图像

图3 二维相位一致性处理

Fig. 3 2D-phase congruency processing

根据 $P(I)$ 的定义,可以得到随机变量 I 的均值 m_1 和中心矩 μ_k 为

$$m_1 = E[I^1] = \sum_{I=0}^{L-1} I^1 P(I) \quad (9)$$

$$\mu_k = E[(I - E[I])^k] = \sum_{I=0}^{L-1} (I - m_1)^k P(I), k=2,3,4, \quad (10)$$

其中, μ_2, μ_3, μ_4 分别代表方差、偏度和峰度。方差是直方图相对于均值的分布,是灰度对比度的度量,可用来描述直方图的相对平滑程度,偏度反映的是直方图相对于均值的对称性,而峰度反映的是直方图的相对平坦性。所以,用帧图像的灰度一阶统计特征作为统计特征。利用 BM3D 算法对视频帧进行去噪处理,然后提取噪声残留视频帧中 R、G、B 三个颜色通道的一阶统计特征,即均值、方差、峰度和偏度,因此可以得到每个噪声残留视频帧中 R、G、B 三个颜色通道中的 12 维统计特征。接着,对原视频帧进行二维相位一致性处理,同样提取处理后帧图像的一阶统计特征,即可以得到 4 维一阶统计特征。

1.4 检测流程

检测流程如图 4 所示,其具体算法实现如下:

(1) 提取视频帧序列,即将视频转换成内容连续的一帧帧图像;

(2) 利用 BM3D 算法对所有帧序列进行去噪处理,获得噪声残留帧图像,再分别提取噪声残留帧图像中 R、G、B 三个颜色通道的各 4 维一阶统计特性;

(3) 对所有原始帧序列进行二维相位一致性处理,提取处理后帧序列的 4 维一阶统计特征;

(4) 融合上述获得的 16 维一阶统计特征;

(5) 利用 SVM 分类器进行分类,并进行视频篡改检测。

2 实验结果与分析

2.1 复制-粘贴篡改

选用型号分别为 CanonA95、Canon IXUS 220HS 和 SONY DSC-P10 的数码相机拍摄不同内容的视频序列进行实验,其中包含运动视频和静止视频。实验所用计算机配置为 2.4 GHz CPU 和 4 G RAM,篡改软件为 Adobe Premiere Pro CS4,运行环境为 Matlab2010b。部分实验视频序列如图 5 所示。

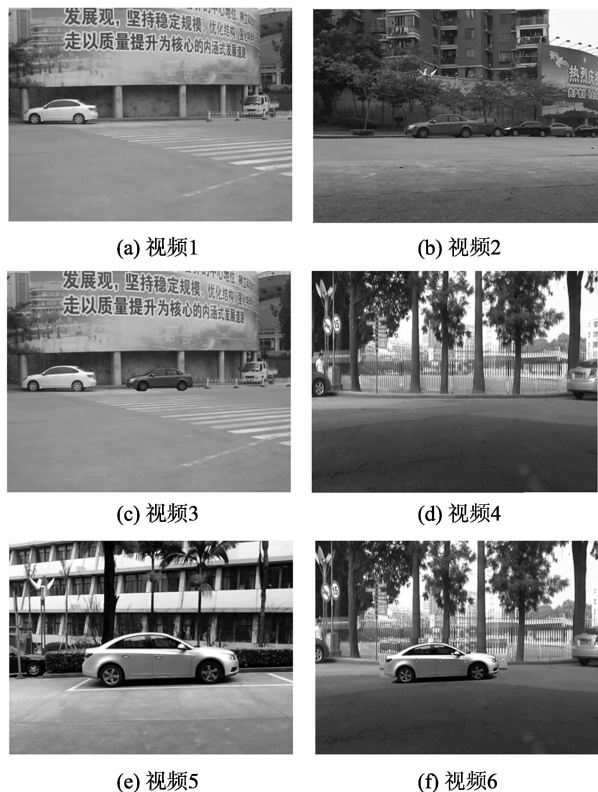


图5 实验视频序列

Fig.5 Test video sequences

图5中,视频1和4为相机 Canon IXUS 220HS 拍摄的原始视频,视频2和5则为相机 SONY DSC-P10 和 CanonA95 分别拍摄的视频,视频3和6则为

经过篡改得到的视频,其篡改表现为对视频1和4中分别复制一辆异源视频的小轿车到视频中,实验中其它视频的篡改方式与上述类似。

本研究利用支持向量机进行分类实验,其核函数选用径向基核函数(radial basis function, RBF):

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \gamma > 0, \quad (11)$$

利用交叉验证^[21]方法确定训练时对应的最佳参数 C 和 γ 。

假设实验中的原始正常视频帧为正类,而经过帧内复制-粘贴篡改的视频帧为负类。那么 TP (true positive) 则表示正常帧分为正类的数目, FN (false negative) 表示正常帧分为负类的数目, FP (false positive) 表示篡改帧分为正类的数目, TN (true negative) 表示篡改帧分为负类的数目。利用正确率、查准率和查全率来评估本研究提出的篡改检测方法。

$$1) \text{ 准确率 Accuracy} = \frac{\text{TN} + \text{TP}}{\text{TN} + \text{FP} + \text{TP} + \text{FN}}, \quad (12)$$

$$2) \text{ 查准率 Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}}, \quad (13)$$

$$3) \text{ 查全率 Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}. \quad (14)$$

实验数据为正常的原始视频5段,篡改的视频5段,视频分辨率均为 $640 * 480$,先将原始视频和篡改视频转换为帧序列,在从每段视频中各随机的抽取100帧进行实验,重复进行10次随机抽取实验。通过不同的特征得到的实验检测率如表1所示。12D特征表示通过 BM3D 算法去噪后噪声残留帧图像 R、G、B 三个彩色通道的各 4 维一阶统计特征,共计 12 维特征,4D 特征表示二维相位一致性处理后帧图像的 4 维一阶统计特征。

表1 不同特征的检测率

Table 1 Detection rate of different features			
特征集	查准率	查全率	准确率
12D	0.770 3	0.712 5	0.743 8
4D	0.756 1	0.775 0	0.807 5
12D + 4D	0.884 6	0.862 5	0.875 0

表1表明单独利用12D特征或者4D特征的检测准确率比融合特征后的检测率低,融合16维特征后其准确率达到87.5%。图6为融合16维特征后准确率为87.5%时的ROC曲线图(receiver operating characteristic curve),其中AUC(area under ROC curve)的值为0.9352。

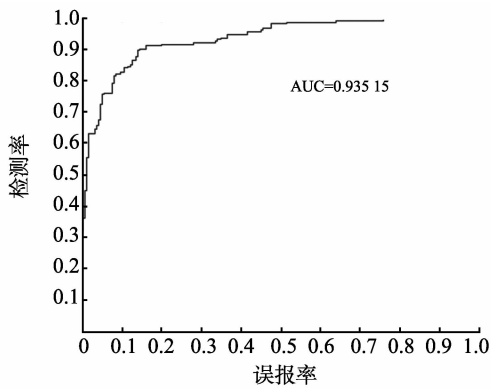


图6 融合特征后的 ROC 曲线图
Fig.6 ROC curve of features fusion



图7 视频抠像示例
Fig.7 Examples of video keying

表2 不同特征检测率

Table 2 Detection rate of different features

特征集	查准率	查全率	准确率
12D	0.928 6	0.866 7	0.900 0
4D	0.960 8	0.816 7	0.891 7
12D + 4D	0.903 2	0.933 3	0.916 7

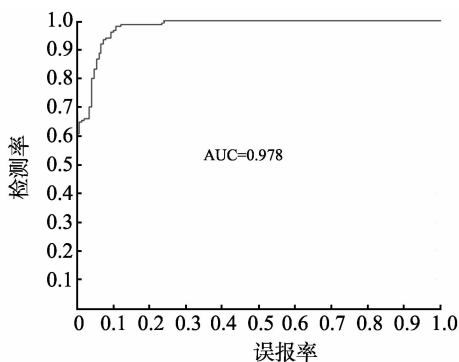


图8 融合特征后的 ROC 曲线图
Fig.8 ROC curve of features fusion

3 总结

由于视频异源帧内复制-粘贴篡改会使得视频中引入不同的模式噪声和一些新的边缘,利用这些特征,本研究提出了一种利用模式噪声和二维相位一致性提取视频帧特征进行篡改检测的算法。利用融合后的16维统计特征对视频中正常帧和篡改帧进行SVM实验,实验表明,该算法可以很好的检测

2.2 抠像合成篡改

针对蓝屏抠像的特点,其实质是进行异源视频帧内复制-粘贴篡改,本研究提出的算法也可以有效地检测出经过蓝屏抠像合成的篡改视频。实验合成的抠像视频如图7所示,按照2.1中描述的实验方案进行蓝屏抠像合成视频的检测。实验结果如表2所示,从表2中可以看出融合16维组合特征的检测准确率达到到了91.67%。图8为融合16维特征后准确率为91.67%时的ROC曲线图,其中AUC的值为97.8%。实验结果表明,该算法同样可以很好地对经过蓝屏抠像合成的视频进行检测。

异源复制-粘贴篡改的视频。然而,由于视频的多样性和内容的复杂性,实验过程中需要一定的训练样本支持,其次,对于比较小的区域块复制实验的效果也不是很好,这些问题将在以后的研究中改进。由于二维相位一致性在提取图像边缘的良好效果,下一步将可以利用该特性进行其他篡改类型的视频检测。

参考文献:

[1] MILANI S, FONTANI M, BESTAGINI P, et al. An overview on video forensics[J]. APSIPA Transactions on Signal and Information Processing, 2012, 1(1):1-18.

[2] WANG W, FARID H. Exposing digital forgeries in video by detecting double MPEG compression [C]//Proceedings of the 8th Workshop on Multimedia and Security. New York, USA:ACM, 2006;37-47.

[3] WANG W, FARID H. Exposing digital forgeries in video by detecting double quantization [C]//Proceedings of the 11th ACM workshop on Multimedia and Security. New York, USA: ACM, 2009;39-48.

[4] SU Y, ZHANG J, LIU J. Exposing digital video forgery by detecting motion-compensated edge artifact [C]//International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering. Wuhan, China: IEEE, 2009;1-4.

[5] 秦运龙,孙广玲,张新鹏.利用运动矢量进行视频篡改检测[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(增刊):227-233.

- QIN Yunlong, SUN Guangling, ZHANG Xinpeng. Exposing digital forgeries in video via motionvectors [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2009, 46(Suppl.):227-233.
- [6] 黄添强,陈智文. 基于双向运动矢量的数字视频篡改鉴定[J]. *山东大学学报:工学版*, 2011, 41(4):13-19.
HUANG Tianqiang, CHEN Zhiwen. Digital video forgeries detection based on bidirectional motion vectors [J]. *Journal of Shandong University: Engineering Science*, 2011, 41(4):13-19.
- [7] 袁秀娟,黄添强,陈智文,等. 基于纹理特征的数字视频篡改检测[J]. *计算机系统应用*, 2012, 21(6):91-95.
YUAN Xiujian, HUANG Tianqiang, CHEN Zhiwen, et al. Digital video forgeries detection based on textural features [J]. *Computer System & Applications*, 2012, 21(6):91-95.
- [8] JING Z, YUTING S, MINGYU Z. Exposing digital video forgery by ghost shadow artifact [C]//*Proceedings of the First ACM workshop on Multimedia in forensics*. Beijing, China: ACM, 2009:49-54.
- [9] WEIHONG W, HANY F. Exposing digital forgeries in video by detecting duplication [C]//*Proceedings of the 9th workshop on Multimedia and security*. Dallas, Texas, USA: ACM, 2007:35-42.
- [10] SUBRAMANYAM A V, EMMANUEL S. Video forgery detection using HOG features and compression properties [C]//*2012 IEEE 14th International Workshop on Multimedia Signal Processing*. Banff, Canada: IEEE, 2012:89-94.
- [11] KANCHERLA K, MUKKAMALA S. Novel blind video forgery detection using markov models on motion residue intelligent information and database systems[M]. Berlin Heidelberg:Springer, 2012:308-315.
- [12] CHEN R, DONG Q, REN H, et al. Video forgery detection based on non-subsampled contourlet transform and gradient information [J]. *Information Technology Journal*, 2012, 11(10):1456-1462.
- [13] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform domain collaborative filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8):2080-2095.
- [14] KOVESI P. Image features from phase congruency [J]. *Videre: Journal of Computer Vision Research*, 1999, 1(3):1-26.
- [15] CHIH-CHUNG H, TZU-YI H, LIN C-W, et al. Video forgery detection using correlation of noise residue [C]//*2008 IEEE 10th Workshop on Multimedia Signal Processing*. Queensland, Australia: IEEE, 2008:170-174.
- [16] 黄添强,吴铁浩,袁秀娟,等. 利用模式噪声聚类分析的视频非同源篡改检测[J]. *计算机科学与探索* 2011, 5(10):914-920.
HUANG Tianqiang, WU Tiehao, YUAN Xiujian, et al. Detecting video's authenticity based on video pattern noise clustering analysis [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2011, 5(10):914-920.
- [17] KIVANC MIHCAK M, KOZINTSEV I, RAMCHANDRAN K. Spatially adaptive statistical modeling of wavelet image coefficients and its application to denoising [C]//*International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Arizona, USA: IEEE, 1999:3253-3256.
- [18] CHERCHIA G, PARRILLI S, POGGI G, et al. On the influence of denoising in PRNU based forgery detection [C]//*Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Multimedia in Forensics, Security and Intelligence*. Firenze, Italy: ACM, 2010:117-122.
- [19] MORRONE M C, ROSS J, BURR D C, et al. Mach bands are phase dependent [J]. *Nature*, 1986, 324(6094):250-253.
- [20] HARALICK R M, SHANMUGAM K, DINSTEN I H. Textural features for image classification [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973, 3(6):610-621.
- [21] HSU C-W, CHANG C-C, LIN C-J. A practical guide to support vector classification [R]. Taipei: Department of Computer Science and Information Engineering, National Taiwan University, 2003:1-12.

(编辑:胡春霞)