

文章编号:1006-2467(2019)03-0334-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.03.011

基于双编码参数模型的同量化参数双压缩检测算法

沈 婷, 孙钺锋, 蒋兴浩

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院; 信息内容分析技术国家工程实验室, 上海 200240)

摘 要: 基于 I 帧宏块帧内预测模式(IPMBM)和量化离散余弦变换(DCT)系数相结合的双编码参数模型, 本文提出了一种 H.264 相同量化参数双重压缩检测算法, 利用单次压缩和双次压缩视频编码参数具有不同收敛性的特点来设计分类特征. 首先将输入视频以相同量化参数压缩多次, 然后从视频的 I 帧中提取相应 IPMBM 和量化 DCT 系数, 统计两者在相邻两次压缩版本之间的变化数量, 以此作为分类特征进行提取, 最后采用支持向量机(SVM)来判别视频是否经历双重压缩. 实验结果表明, 该算法可正确有效地检测双重压缩.

关键词: 双压缩; 相同量化参数; 帧内预测模式; 离散余弦变换(DCT)系数

中图分类号: TP 391

文献标志码: A

Detection of Double Compression with the Same Quantization Parameter Based on Dual Encoding Parameter Model

SHEN Ting, SUN Tanfeng, JIANG Xinghao

(School of Electronic Information and Electrical Engineering; National Engineering Laboratory on Information Content Analysis Techniques, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A novel method was proposed to detect double H.264 compression with the same quantization parameter, based on the dual encoding parameter model composed of Intra Prediction MacroBlock Modes (IPMBM) and the quantized discrete cosine transform (DCT) coefficients of I frames. The method designed the classification feature based on the property that coding parameters of single compressed videos and double compressed videos have different convergencies. Firstly, the input video was recompressed repeatedly with the same quantization parameter. Then, the IPMBMs and the quantized DCT coefficients were extracted from I frames. The numbers of altered IPMBMs and quantized DCT coefficients between adjacent recompressions were used to calculate the classification feature. Finally, the extracted feature was fed to the trained support vector machine to detect double H.264 compression. Experimental results show that the proposed method can detect double H.264 compression correctly and efficiently.

Key words: double compression; same quantization parameter; intra prediction modes; discrete cosine transform (DCT) coefficients

近年来, 数字视频已经成为我们日常生活中获取信息的一种重要来源. 然而, 视频编辑软件的不断

进步使得用户可以轻易篡改数字视频, 导致数字视频的完整性与真实性难以得到保证. 进行视频篡改

收稿日期: 2017-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(61572320, 61572321)资助项目

作者简介: 沈 婷(1992-), 女, 江苏省常熟市人, 硕士生, 主要研究内容为视频双压缩检测.

通信作者: 孙钺锋, 男, 副研究员, 电话(Tel.): 021-34206657; E-mail: tfsun@sjtu.edu.cn.

时,操作者必须先解码原始视频,对其篡改后再进行二次编码,所以一段被篡改的视频肯定经历过重压缩过程.视频双压缩检测时若发现为单次压缩,可认为该段视频为原始视频,反之则怀疑该段视频被篡改过.因此在被动取证领域中,视频双压缩检测技术具有重要的研究意义和实用价值.

自 2006 年以来,越来越多的学者致力于视频双重压缩检测技术研究,并提出了许多相关算法. Xu 等^[1]提出利用视频中量化离散余弦变换(DCT)系数分布特征进行 MPEG-2 编码标准视频的双压缩检测. He 等^[2]提出自适应去块效应滤波器法, Jiang 等^[3]提出马尔科夫统计模型法,均能有效检测 MPEG-4 编码标准的双压缩视频. 针对 H. 264 双重压缩视频的检测算法, Liao 等^[4]提出利用 AC 系数分布带来变化的方法,以及 Su 等^[5]提出采用去块效应滤波器的方法. 然而,上述算法只能检测两次压缩过程采用不同量化参数(QP)的双压缩视频. 在实际应用场景中,篡改者可以从视频比特流中读取 QP 信息,在重压缩过程中使用相同值. 当使用相同 QP 对单次压缩视频再次压缩时,压缩前后两者之间的差别将变得极其微小,进而导致上述算法失效^[6]. 在图像重压缩检测领域,也存在类似问题,即两次压缩量化参数相同会导致重压缩痕迹十分微弱. Huang 等^[7]首次提出相同量化矩阵下 JPEG 图像的双压缩检测,发现随着压缩次数 n 的增加,第 n 次和第 $n+1$ 次压缩的图片中不同 JPEG 系数的数量呈递减趋势. Yang 等^[8]利用误差块的统计性差异来检测相同量化矩阵下单次和双次 JPEG 压缩; Chen 等^[9]受此启发,提出采用 P 帧中的宏块模式(MBM)来进行相同量化因子下 MPEG 视频双压缩检测. Zhang 等^[10]受文献[7]中统计特性规律启发,提出比差集(RDS)统计方法,用于统计相邻两次压缩视频版本间同一 I 帧量化 DCT 系数变化情况,来检测 H. 264 标准下相同 QP 的双压缩视频. 目前,针对 H. 264 相同 QP 双压缩检测的算法仍然较少,文献[10]的算法只考虑了量化 DCT 系数一种编码参数,其检测准确率会随着 QP 增大而明显下降.

针对以上问题,本文提出一种将 I 帧宏块帧内预测模式(IPMBM)与量化 DCT 系数相结合的双编码参数模型,用于检测相同 QP 的 H. 264 双压缩视频. 首先,引入 I 帧 IPMBM 的概念,该模式由宏块类型和预测模式两部分构成. 文献[9]发现,当使用相同量化因子多次压缩 MPEG 视频后,视频 P 帧 MBM 变化的宏块数量具有收敛性. 我们发现 H. 264 视频中 I 帧 IPMBM 在使用相同 QP 多次压缩

后的视频中其变化数量也有相同的收敛性. 采用相同 QP 对视频实施多次压缩后,提取相邻两次压缩版本之间帧内预测模式发生改变的宏块数量及量化 DCT 系数发生变化的数量,将两者组合为分类特征,然后利用支持向量机(SVM)来分类判断视频是否经历相同 QP 的双压缩. 本文的编码参数模型结合了两种不同的编码参数,取得了更为稳健的检测效果. 最终实验表明,本文算法检测的平均准确率优于文献[10]中算法,且在 QP 值较大的情况下仍能保持较高的检测准确率.

1 双压缩检测模型

1.1 双编码参数模型

本文首次提出一种新的双编码参数模型,包含两部分特征,分别为 I 帧 IPMBM 和 I 帧量化 DCT 系数,检测模型如图 1 所示. 由于 I 帧在编码过程中先后涉及帧内预测和 DCT 两部分,而重压缩过程中的预测块是基于它上方和左方相邻块重构获得,所以编码器会在计算每一种宏块类型和帧内预测模式的组合方式后选取一种最佳方式. 因此,即使是以相同 QP 值进行多次压缩时,也会导致当前块宏块类型和帧内预测模式发生变化,而量化 DCT 系数的变化则由预测过程以及进一步的量化(包括取整和截断)操作共同引起. 重压缩过程会导致上述两种参数同时发生变化,且两者具有相同的统计变化规律. 帧内预测模式和量化 DCT 系数属于两种不同的编码参数,将两者结合可提升对单双次压缩视频的辨别能力. 因此,本文提出将 IPMBM 和量化 DCT 系数两者相结合的双编码参数模型,并采用机器学习的框架,将得到的新特征输入到 SVM 中进行分类,可以同时达到提高准确率和增强稳健性的效果.

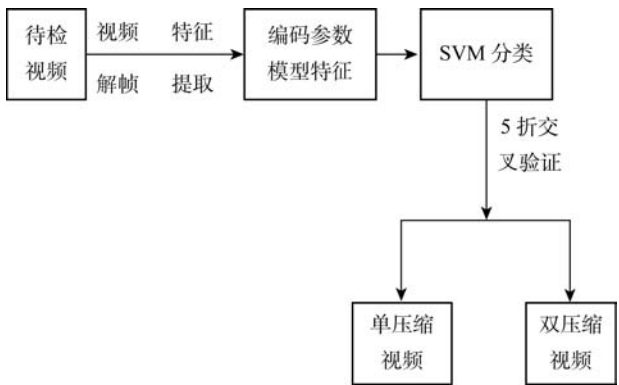


图 1 本文双压缩检测的通用模型

Fig. 1 The double compression detection model

1.2 I 帧 IPMBM 的统计特征

根据宏块分成子块的方式, H. 264 中 I 帧亮度宏块类型有 2 种基本类型, 分别是 $i_{16 \times 16}$ 和 $i_{4 \times 4}$, 相对应的帧内预测模式分别有 4 种和 9 种. 定义宏块类型和帧内预测模式两者组合为 I 帧宏块帧内预测模型, 即

$$\text{IPMBM}(M) = [M_{\text{type}} \quad M_{\text{pre}}] \quad (1)$$

若宏块类型和帧内预测模式两者均相同, 则认为这两宏块具有相同 IPMBM. 当对一段视频采用同一 QP 值重复压缩时, 如果经历了第 n 和 $n+1$ 次压缩后处于同一位置处的宏块具有相同 IPMBM, 则此宏块在第 $n+1$ 次压缩过程中处于稳定状态, 反之状态不稳定. 定义每帧 I 帧中所有不稳定宏块的平均数量如下:

$$S_n = \frac{1}{N} \sum I(M_n(i, x, y), M_{n+1}(i, x, y)) \quad (2)$$

式中: N 表示该段视频中 I 帧的数量; $M_n(i, x, y)$ 则表示经历 n 次压缩的视频中处于帧号 i 位置处 I 帧 (x, y) 处的宏块, 对应的指示函数为

$$I(M_1, M_2) = \begin{cases} 1, & \text{IPMBM}(M_1) \neq \text{IPMBM}(M_2) \\ 0, & \text{IPMBM}(M_1) = \text{IPMBM}(M_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中: M_1 和 M_2 为 2 个宏块. 为了解决不同分辨率的稳健性, 得到的 S_n 需要除以一帧中的宏块总数 N_T , 因此特征向量 F 中特征元素 F_n 的具体计算方法如下:

$$F_n = S_n / N_T \quad (4)$$

图 2 为从单次压缩的视频中提取的 F_n 的平均值, 其中横坐标为 F_n 中的元素编号, 即视频相同量化参数下经历的压缩次数 n ; 纵坐标为 F_n 中的元素平均值.

由图 2 可见: 随着 n 的增加, F_n 值严格单调递减, 因为稳定的块在下次压缩中将不再改变. 同时, F_1 值比较大 (当 $\text{QP} < 40$ 时, $F_1 > 0.5$), 这是因为对于一个宏块而言, IPMBM 有 $4 + 9^{16}$ 种可能情况 (1 个 $i_{16 \times 16}$ 宏块和 1 个 $i_{4 \times 4}$ 宏块分别对应 4 种和 9^{16} 种可能), 并且宏块的帧内预测模式受其本身像素点和相邻两个宏块像素点共同影响. 图中曲线后 3 点间连线的斜率比前 2 点间连线的斜率小很多, 下降趋势变缓是因为在多次压缩过程中, 像素和宏

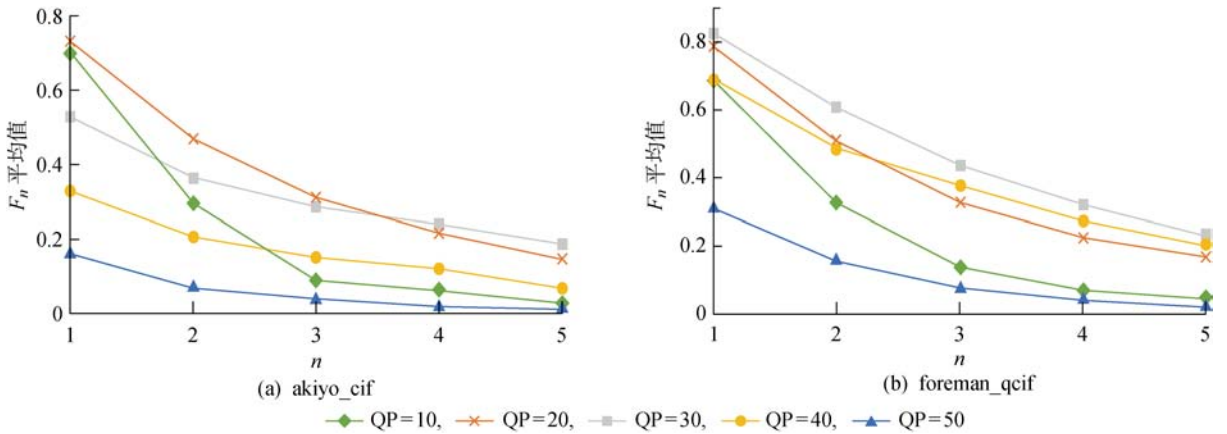


图 2 不同 QP 下 F_n ($n=1,2,3,4,5$) 平均值的特征曲线

Fig. 2 Characteristic curves of the average F_n ($n=1,2,3,4,5$) with different QPs

块帧内预测之间相互影响的趋势越来越稳定.

1.3 量化 DCT 系数的统计特征

对于一段给定的经过 n 次压缩的视频, 用 t_n^m 表示第 m 帧 I 帧在第 n 次压缩和第 $n+1$ 次压缩之间发生变化的量化 DCT 系数的个数, $m=1,2,\dots,N$, 其中 N 为视频中 I 帧的总数. 为了不受帧的大小影响, 采用比例值 d_n^m 来代替 t_n^m , 其中 $d_n^m = t_n^m / T_m$, T_m 表示第 m 帧 I 帧中量化 DCT 系数的总数, 且该值不会随着压缩次数而改变.

图 3 为从单次压缩的视频中统计得出的量化 DCT 系数的变化率, 横坐标代表压缩次数 n , 纵坐

标代表 I 帧中量化 DCT 系数的变化率.

由图 3 可见: 对于任何一个特定的 QP 值, 随着 n 增加, d_n^m 单调递减, 即 $d_n^m > d_{n+1}^m$ 总是成立; 其次, 从下降趋势来看, 前 2 点连线的斜率比最后 3 点间连线的斜率大很多, 即 d_1^m 与 d_2^m 之间的差值远大于 d_n^m 与 d_{n+1}^m ($n \geq 2$) 之间的差值. 后文采用的 RDS 即根据这条特性而定义.

在给定的视频中获取比差集

$$H = \left\{ h_m = \frac{t_1^m - t_2^m}{T_m} \right\} \quad (m = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

由于该集合的大小等于一段视频中 I 帧数目, 而 I

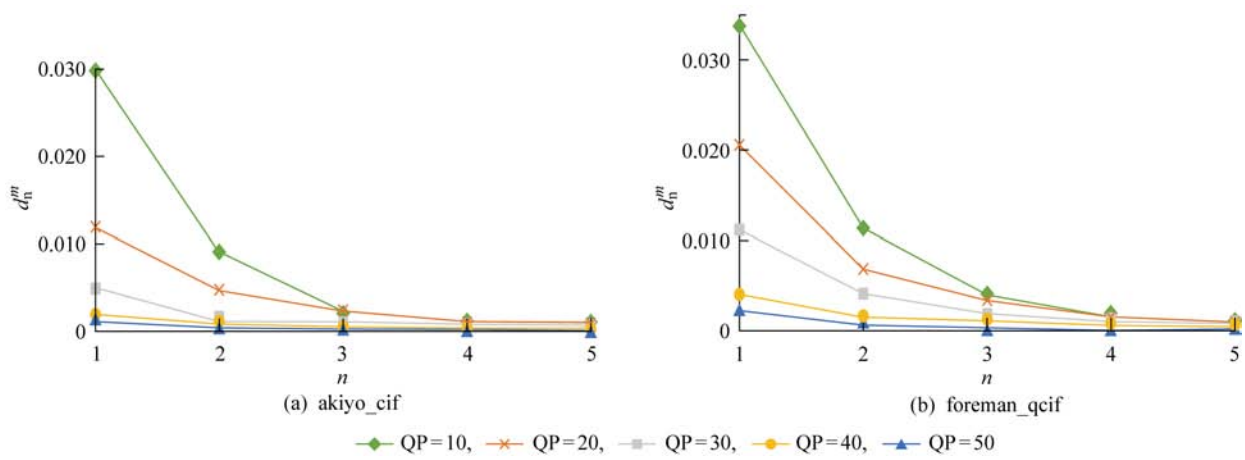


图 3 不同 QP 下 d_n^m 的特征曲线

Fig. 3 Characteristic curves of the d_n^m with different QPs

帧的数目是随着视频的大小而变化,因此采用一种方法来得到固定维数的特征,具体如下.

首先将集合 H 中的数据按升序排序,然后从集合中选取 3 个四分位置点处的值、第 1 个位置点的值以及集合 H 中所有元素的平均值,共 5 个数值组成 5 维特征.集合 H 按升序排序,故 3 个四分位置点的值可以反映出数值变化的趋势,四分位置点的计算方法如下:

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= [0.25(N+1)] \\ L_2 &= [0.50(N+1)] \\ L_3 &= [0.75(N+1)] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $[X]$ 表示对 X 采取四舍五入.因此四分位置点的值可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= H_{L_1} \\ Q_2 &= H_{L_2} \\ Q_3 &= H_{L_3} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: H_i 代表集合 H 中第 i 个元素的值; $\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$, 表示集合中所有元素的平均值. 最终 5 维

特征为 $\{H_1, Q_1, Q_2, Q_3, \bar{H}\}$.

2 双重压缩检测算法框架

提出一种基于 I 帧 IPMBM 和量化 DCT 系数两者相结合的统计特征,并且采用 SVM 进行分类,算法整体框架如图 4 所示.

算法详细流程共分为 3 个步骤,具体如下.

(1) 将输入的 H. 264 视频 V_1 解码成 YUV 文件 Y_1 , 并且在解码过程中提取 I 帧中各宏块的 IPMBM 和每帧 I 帧中的量化 DCT 系数,并保存为 IPMBM₁ 和 $C_1^m (m=1,2,\dots,N)$, 其中 k 是 I 帧的编号, N 是视频 V_1 中所有 I 帧数目.

(2) 用相同 QP 去重新编码之前得到的 YUV 文件 Y_n , 得到 H. 264 视频 V_{n+1} . 然后将视频 V_{n+1} 解码成 YUV 文件 Y_{n+1} , 并且提取出 I 帧中各宏块对应的 IPMBM 及量化 DCT 系数,并保存为 IPMBM_{n+1} 和 $C_{n+1}^m (m=1,2,\dots,N)$. 将步骤(2)重复 K 次, 提取出多次压缩后宏块 IPMBM_n 和 C_n^k , 根据式(2)统计出相邻两次压缩版本之间宏块模式发生了改变的宏块平均数量 S_n , 计算 C_n^m 和 C_{n+1}^m 之间不

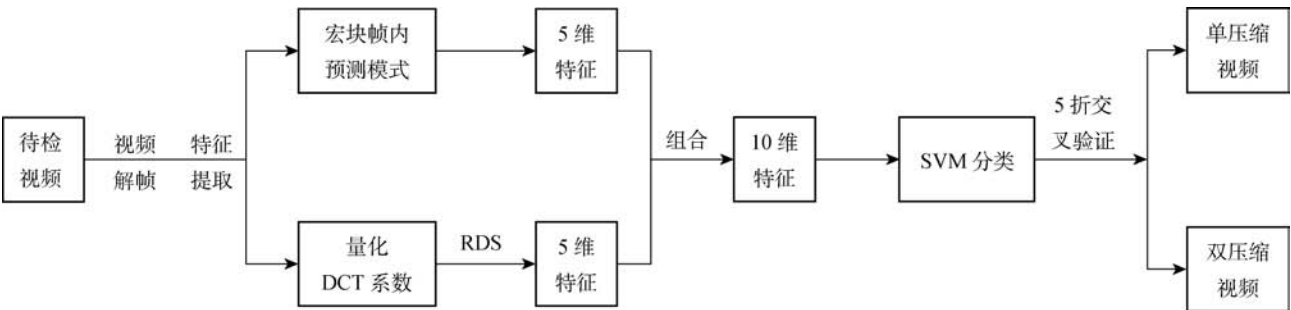


图 4 算法原理图

Fig. 4 Framework of the proposed algorithm

同数值的个数 t_n^m , 即相邻两次压缩过程中量化 DCT 系数数值发生改变的数量.

(3) 构造特征向量作为 SVM 的输入, 表达式为 $\mathbf{F} = [F_n \ F']$, $n = 1, 2, \dots, K$, 利用训练集训练得到对应的检测模型后, 便可进行相同 QP 下 H. 264 的

双压缩视频检测. 其中: F_n 由 IPMBM 特征统计得出, 可根据式(4)计算; F' 自 RDS 中根据式(6)和(7)得出的 5 维特征. 根据实验结果, 当 K 设定为 5 时可较好地平衡正确率和复杂度两者间关系. 算法具体流程如图 5 所示.

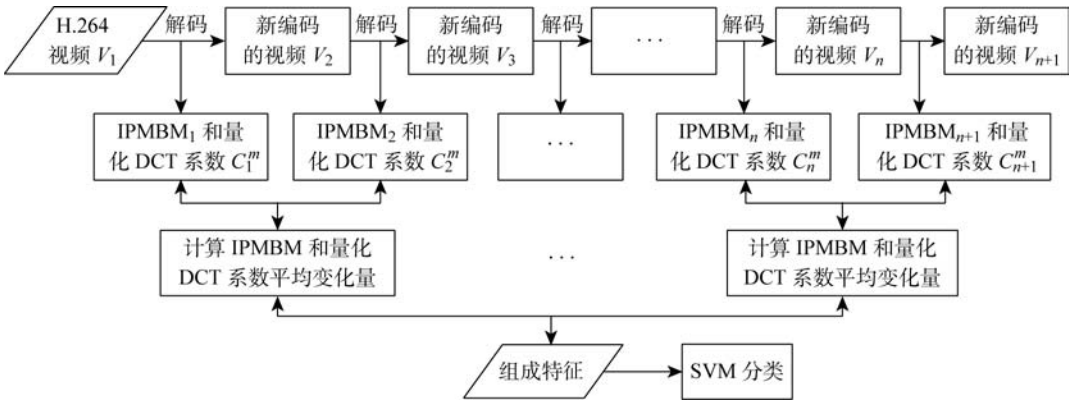


图 5 本文双重压缩检测算法细化流程图
Fig. 5 Scheme of the proposed double compression detection

3 实验与分析

3.1 视频样本库的建立

实验中视频样本为常用的 50 段原始 YUV 序列, 来自网站 Xiph. org Video Test Media. 为了增加样本数量, 在实验过程中将所有原始 YUV 序列进行分割, 以每 100 帧作为一段新的 YUV 序列, 对于不满 100 帧的部分直接舍弃, 如果原始 YUV 序列超过 1000 帧, 则只使用前面的 1000 帧, 最终生成 132 段通用影像传输格式(CIF)和 78 段标准化图像格式(QCIF)的新 YUV 序列. 在 H. 264 编码标准下以特定 QP 值对这些原始 YUV 序列编码, 得到的视频作为双压缩检测实验的负样本. 之后对所有负样本, 以同一 QP 值进行二次压缩编码, 作为相同 QP 值下实验的正样本. 实验过程中正负样本被随

机分配到训练集和测试集中, 但同一段原始 YUV 分割出来的若干段新 YUV 序列经编码得到的视频将随机同时分配到训练集或同时分配到测试集. 实验中采用 FFMPEG 编码器来压缩视频, 其中图像组(GOP)长度固定为 10, QP 取值为 1~51. 选用基于径向基函数(RBF)核的非线性 SVM 分类器进行分类, 通过 5 折交叉验证对超参数进行网格寻优. 其中惩罚参数 c 的变化范围为 $[2^{-20}, 2^{20}]$, RBF 核函数 g 的变化范围为 $[2^{-20}, 2^{20}]$. 每个 QP 值的最终实验准确率通过计算 30 次 5 折交叉验证结果的平均值得出. 实验中正负样本数量相等, 因此利用准确率来衡量算法的性能, 表达式为

$$AR = (TPR + TNR) / 2$$

其中: TPR 为真正类率; TNR 为负正类率. 表 1 为编码参数.

表 1 本文算法视频编码参数设置表
Tab. 1 Parameters for the encoding sequences

参数	单次压缩视频	双压缩视频
QP	1~51	1~51
GOP	10	10
视频数量(CIF)	51×132=6 732	51×132=6 732
视频数量(QCIF)	51×78=3 978	51×78=3 978
YUV 序列(CIF)	akiyo, bowing, bridge-close, bridge-far, bus, city, coastguard, container, deadline, flower, football, foreman, galleon, hall, harbour, highway, husky, ice, intros, mobile, mother-daughter, news, news-announcer, pamphlet, pairs, sigh-irene, silent, soccer, students, tempete, washdc, waterfall	
YUV 序列(QCIF)	akiyo, bridge-close, bridge-far, carphone, highway, coastguard, claire, container, foreman, grandma, hall, miss-america, mobile, mother-daughter, news, silent, suzie, salesman	

3.2 实验结果对比与分析

目前,H.264 视频相同量化参数双压缩检测算法很少,如 Zhang 等^[10]采用基于量化 DCT 系数构建的特征向量,并结合 SVM 分类器进行检测. IPMBM 为 Chen 等^[9]文中 MBM 在 H.264 视频中的推广模型,可用于检测同量化参数情况下的 H.264 双压缩视频.上述两种算法代表了同量化参数双压缩检测的两类经典思想,本文与这两种算法进行了对比.

图 6 为 QP=1~51 共 51 种情况下双压缩检测的准确率,每个 QP 都对应 210 段正样本和 210 段负样本.总体而言,本文算法的平均准确率为 90.01%,比 IPMBM 算法提高了 5%,比文献[10]中算法提高了 1.6%.

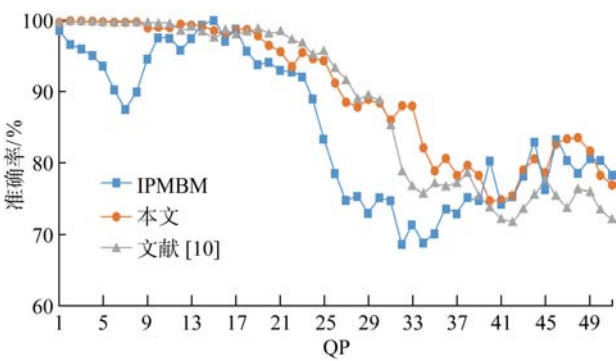


图 6 算法准确率对比

Fig. 6 Comparative results with the algorithms

由图 6 可见:在 $QP < 20$ 时,本文算法和文献[10]的准确率基本持平,而 IPMBM 算法较低;当 QP 为 $20 \sim 30$ 时,本文算法的准确率略低于文献[10],而 IPMBM 准确率较低,基本呈一个直线下

降的趋势,其原因可见图 2 中 IPMBM 部分的曲线, $QP=20$ 和 $QP=30$ 这两条曲线相邻两点之间连线的下降趋势区别较小,区分度不明显,因而导致组合后的特征检测准确率与文献[10]相比反而有所下降;当 $QP > 30$ 时,本文算法的准确率明显优于文献[10],说明本文方法对量化程度不敏感,即使当 $QP > 40$ 时,检测准确率仍能保持在 74.5% 以上.图 6 显示基于 IPMBM 部分的特征在 QP 值较大时能起到有效检测的效果.原因可从图 2 和 3 中看出,当 QP 较大时,文献[10]中采用的特征前 2 点对应的纵坐标值下降趋势明显变缓,区分度明显下降;而基于 IPMBM 的曲线图中前 2 点对应的纵坐标值仍保持较大的下降趋势,且第 1 个点的值远大于第 2 个点.

随着 QP 的增大,3 条曲线均呈一定的下降趋势,这是因为量化程度高会导致宏块和量化 DCT 系数更容易趋于稳定状态,这使特征中的每维数值更小,区分度也随之变小,因而判断准确率下降.同时可以看到当 $QP > 31$ 时,文献[10]中的算法准确率明显下降,而此时本文算法准确率下降比较缓慢,且保持一个较高的值.

IPMBM 部分特征选取维数需考虑到准确率和复杂度两者的平衡关系,因此针对本文算法 IPMBM 部分选取特征维数参数为 5(con5)的情况,设计了 2 个针对算法参数设定的对比实验,即维数分别为 4 和 6(即 con4 和 con6).表 2 列举了部分 QP 取值情况下 3 种设定不同参数值的实验的准确率,其中 con4 平均为 89.67%,con6 平均为 89.86%,而本文算法为 90.01%.由此可见,IPMBM 部分特征维数选取为 5 时性能更佳.

表 2 不同维数在部分 QP 值时的准确率

Tab. 2 Accuracy with some QPs

组别	准确率/%						
	QP=10	QP=15	QP=20	QP=25	QP=30	QP=35	QP=40
con4	99.07	98.38	95.69	94.28	87.93	79.10	74.13
con6	99.33	99.03	95.46	94.80	87.69	79.37	74.80
本文	99.23	98.96	96.70	94.41	88.32	78.83	74.47

4 结语

基于 I 帧 IPMBM 和量化 DCT 系数相结合的双编码参数模型,提出一种 H.264 同量化参数双压缩检测算法.利用 2 种不同编码参数的收敛性构建分类特征;在特征提取过程中,通过对视频采用相同

QP 值压缩多次,分别对相邻两次压缩版本之间 I 帧中 IPMBM 和量化 DCT 系数不同的个数进行统计并组成特征,最后将特征结合 SVM 分类器来判断视频是否经历过双压缩.实验证实,本文算法能有效检测视频是否经历双重压缩,准确率比现有算法有所提升,且对不同分辨率有较强的稳健性.不足之处

在于目前算法仅针对 H.264 编码标准,未考虑其他编码标准,且测试视频样本内容比较单一,因而下一步工作可考虑将该算法拓展到 HEVC 视频的双压缩检测并增加视频样本内容多样性。

参考文献:

- [1] XU J Y, SU Y T, LIU Q Z. Detection of double MPEG-2 compression based on distributions of DCT coefficients [J]. **International Journal of Pattern Recognition & Artificial Intelligence**, 2013, 27(1): 155-167.
- [2] HE P S, SUN T F, JIANG X H, *et al.* Double compression detection in MPEG-4 videos based on block artifact measurement with variation of prediction footprint [C]// **Advanced Intelligent Computing Theories and Applications**. Fuzhou: ICIC, 2015: 787-793.
- [3] JIANG X H, WANG W, SUN T F, *et al.* Detection of double compression in MPEG-4 videos based on Markov statistics [J]. **IEEE Signal Processing Letters**, 2013, 20(5): 447-450.
- [4] LIAO D D, YANG R, LIU H M, *et al.* Double H.264/AVC compression detection using quantized nonzero AC coefficients [J]. **Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering**, 2011, 7880(2): 78800Q.
- [5] SU P C, SUEI P L, CHANG M K, *et al.* Forensic and anti-forensic techniques for video shot editing in H.264/AVC [J]. **Journal of Visual Communication & Image Representation**, 2015, 29: 103-113.
- [6] 陈洁远, 蒋兴浩, 孙钺锋. 相同比特率的 MPEG 视频双压缩检测[J]. **信息安全与通信保密**, 2016, 2: 113-116.
- CHEN Jieyuan, JIANG Xinghao, SUN Tanfeng. Detection of double MPEG compression with same bitrate [J]. **Information Security and Communications Privacy**, 2016, 2: 113-116.
- [7] HUANG F J, HUANG J W, SHI Y Q. Detecting double JPEG compression with the same quantization matrix [J]. **IEEE Transactions on Information Forensics & Security**, 2010, 5(4): 848-856.
- [8] YANG J Q, XIE J, ZHU G P, *et al.* An effective method for detecting double JPEG compression with the same quantization matrix [J]. **IEEE Transactions on Information Forensics & Security**, 2014, 9(11): 1933-1942.
- [9] CHEN J Y, JIANG X H, SUN T F, *et al.* Detecting double MPEG compression with the same quantiser scale based on MBM feature [C]// **IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing**. Shanghai: IEEE, 2016: 2064-2068.
- [10] ZHANG Z Z, HOU J J, ZHANG Y, *et al.* Detecting multiple H.264/AVC compressions with the same quantization parameters [J]. **IET Information Security**, 2016, 11(3): 152-158.

(本文编辑:蒋霞)