



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办：中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象学报 图形学报

2020
05
VOL.25

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



智能疫
“小珈”
助力



第25卷第5期（总第289期）

2020年5月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 顾行发

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

通信地址 北京市海淀区北四环西路19号

邮 编 100190

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-58887035

网 址 www.cjig.cn

广告发布登记号 京朝工商广登字20170218号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief Gu Xingfa

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics

Address No. 19, North 4th Ring Road West, Haidian District, Beijing, P. R. China

Zip code 100190

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-58887035

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 60.00元



多相图像分割Vese-Chan模型连续最大流方法(第0926页)



保持区域平滑的3维动画形状高效编辑(第1019页)



树形结构卷积神经网络优化的城区遥感图像语义分割(第1043页)

学者观点

多源空一谱遥感图像融合方法进展与挑战

肖亮, 刘鹏飞, 李恒 0851

综述

中国图像工程: 2019

章毓晋 0864

图像处理和编码

相同编码参数HEVC视频重压缩检测

潘鹏飞, 姚晔, 王慧 0879

密集连接卷积神经网络图像去模糊

吴迪, 赵洪田, 郑世宝 0890

密集网络图像哈希检索

王亚鸽, 康晓东, 郭军, 李博, 张华丽, 刘汉卿 0900

图像分析和识别

域自适应城市场景语义分割

张桂梅, 潘国峰, 刘建新 0913

多相图像分割Vese-Chan模型连续最大流方法

王洁, 潘振宽, 魏伟波, 徐子森 0926

结合注意力机制和多属性分类的行人再识别

郑鑫, 林兰, 叶茂, 王丽, 贺春林 0936

多分辨率特征注意力融合行人再识别

沈庆, 田畅, 王家宝, 焦珊珊, 杜麟 0946

全卷积网络电线识别方法

刘嘉玮, 李元祥, 龚政, 刘心刚, 周拥军 0956

双核压缩激活神经网络艺术图像分类

杨秀芹, 张华熊 0967

图像理解和计算机视觉

高效检测复杂场景的快速金字塔网络SPNet

李鑫泽, 张轩雄, 陈胜 0977

结合自底向上注意力机制和记忆网络的视觉问答模型

闫茹玉, 刘学亮 0993

统筹图像变换与缝合线生成的无参数影像拼接

高炯笠, 吴军, 刘祺昌, 徐刚 1007

计算机图形学

保持区域平滑的3维动画形状高效编辑

冼楚华, 杨煜, 黄俊贤, 李桂清 1019

医学图像处理

肌骨超声图像特征检测及拼接

颜焕欢, 张培镇, 王伊依, 李璇, 阳维, 王青 1032

遥感图像处理

树形结构卷积神经网络优化的城区遥感图像语义分割

胡伟, 高博川, 黄振航, 李瑞瑞 1043

融合累积变异比和集成超限学习机的高光谱图像分类

尹玉萍, 魏林, 刘万军 1053

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Continuous max-flow method for multiphase segmentation Vese-Chan model(P0926)



Efficient 3D animation shape manipulation with region smoothness preservation(P1019)



Semantic segmentation of urban remote sensing image based on optimized tree structure convolutional neural network (P1043)

Scholar View

Progress and challenges in the fusion of multisource spatial-spectral remote sensing images

Xiao Liang, Liu Pengfei, Li Heng 0851

Review

Image engineering in China: 2019

Zhang Yujin 0864

Image Processing and Coding

Detection of double compression for HEVC videos with the same coding parameters

Pan Pengfei, Yao Ye, Wang Hui 0879

Motion deblurring method based on DenseNets

Wu Di, Zhao Hongtian, Zheng Shibao 0890

Image Hash retrieval with DenseNet

Wang Yage, Kang Xiaodong, Guo Jun, Li bo, Zhang Huali, Liu Hanqing 0900

Image Analysis and Recognition

Domain adaptation for semantic segmentation based on adaption learning rate

Zhang Guimei, Pan Guofeng, Liu Jianxin 0913

Continuous max-flow method for multiphase segmentation Vese-Chan model

Wang Jie, Pan Zhenkuan, Wei Weibo, Xu Zisen 0926

Improving person re-identification by attention and multi-attributes

Zheng Xin, Lin Lan, Ye Mao, Wang Li, He Chunlin 0936

Multi-resolution feature attention fusion method for person re-identification

Shen Qing, Tian Chang, Wang Jiabao, Jiao Shanshan, Du Lin 0946

Power line recognition method via fully convolutional network

Liu Jiawei, Li Yuanxiang, Gong Zheng, Liu Xingang, Zhou Yongjun 0956

Art image classification with double kernel squeeze-and-excitation neural network

Yang Xiuqin, Zhang Huaxiong 0967

Image Understanding and Computer Vision

Snap Pyramid Network: Real-time complex scene detecting system

Li Xinze, Zhang Xuanxiong, Chen Sheng 0977

Visual question answering model based on bottom-up attention and memory network

Yan Ruyu, Liu Xueliang 0993

Stitching of parametric-free images based on coordinated image transformation and seam-line generation

Gao Jiongli, Wu Jun, Liu Qichang, Xu Gang 1007

Computer Graphics

Efficient 3D animation shape manipulation with region smoothness preservation

Xian Chuhua, Yang Yu, Huang Junxian, Li Guiqing 1019

Medical Image Processing

Feature detection algorithm of musculoskeletal ultrasound image and its application of image stitching

Yan Huanhuan, Zhang Peizhen, Wang Yinong, Li Xuan, Yang Wei, Wang Qing 1032

Remote Sensing Image Processing

Semantic segmentation of urban remote sensing image based on optimized tree structure convolutional neural network

Hu Wei, Gao Bochuan, Huang Zhenhang, Li Ruirui 1043

Ensemble extreme learning machine with cumulative variation quotient for hyperspectral image classification

Yin Yuping, Wei Lin, Liu Wanjun 1053

中图法分类号: TP309 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2020)05-0879-11

论文引用格式: Pan P F, Yao Y and Wang H. 2020. Detection of double compression for HEVC videos with the same coding parameters. Journal of Image and Graphics, 25(05):0879-0889 (潘鹏飞, 姚晔, 王慧. 2020. 相同编码参数 HEVC 视频重压缩检测. 中国图象图形学报, 25(05):0879-0889)
[DOI:10.11834/jig.190381]

相同编码参数 HEVC 视频重压缩检测

潘鹏飞, 姚晔, 王慧

杭州电子科技大学网络空间安全学院, 杭州 310018

摘要: 目的 视频重压缩是视频取证技术的重要辅助性手段。目前, 不同编码参数进行压缩的高效视频编码 (high efficiency video coding, HEVC) 视频重压缩检测已经取得较高的准确度, 而在前后采用相同编码参数压缩过程中, HEVC 视频重压缩操作的痕迹非常小, 检测难度大。为此, 提出了在相同编码参数下基于视频质量下降机制的视频重压缩检测算法。方法 在经过多次相同编码参数压缩后, 可以观察到视频的质量趋于不变, 利用视频质量下降程度可以区分单压缩视频和重压缩视频。本文提出 I 帧预测单元模式 (intra-coded picture prediction unit mode, IPUM) 和 P 帧预测单元模式 (predicted picture prediction unit mode, PPUM) 两类视频特征, 即分别从 I 帧和 P 帧中的亮度分量 (Y) 提取预测单元 (prediction unit, PU) 的模式。从待测视频中提取 IPUM 和 PPUM 特征, 将 HEVC 视频以相同的编码参数压缩 3 次, 每次提取上述特征。由于 I 帧、P 帧中不同尺寸的 PU 数量相差较大, 应选取数量较多的 PU 作为统计特征。统计平均每一 I 帧、P 帧在相同位置第 n 次压缩和第 $n + 1$ 次压缩不同的 PU 模式, 构成 6 维特征集送入支持向量机 (support vector machine, SVM) 进行分类。结果 本文方法在 CIF (common intermediate format) 数据集、720p 数据集、1080p 数据集的平均检测准确度分别为 95.45%、94.8%、95.53%。在不同的图像组 (group of pictures, GOP) 和帧删除的情况下均具有较好的表现。结论 本文方法利用在相同位置连续两次压缩不同的 PU 模式数来揭示视频质量下降的规律, 具有较高的准确度, 且在不同情况下均有较好表现。

关键词: 视频取证; 视频重压缩; 高效视频编码; 相同编码参数; 质量下降; 预测单元

Detection of double compression for HEVC videos with the same coding parameters

Pan Pengfei, Yao Ye, Wang Hui

School of Cyberspace, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Objective Multimedia forensics and copyright protection have become hot issues in the society. The widespread use of portable cameras, mobile phones, and surveillance cameras has led to an explosive growth in the amount of digital video data. Although people enjoy the convenience given by the popularity of digital multimedia, they also experience considerable security problems. Double compression for digital video file is a necessary procedure for malicious video content modification. The detection for double compression is also an important auxiliary measure for video content forensics. Content-tampered video inevitably undergo two or more re-compression operations. If the video test is judged to have undergone multiple re-compressions, it is more likely to undergo content tampering operation. At present, high efficiency video coding (HEVC) video double compression detection with different coding parameters achieves high accuracy. However, in the

收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2019-10-24; 预印本日期: 2019-10-31

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目 (17YJC870021)

Supported by: Humanities and Social Sciences Foundation of Ministry of Education of China (17YJC870021)

compression process with the same coding parameters, the trace of HEVC video double compression is very small and the detection is considerably more difficult. For most attackers, their concern is focused on the modification of video content. With the video stream containing the video parameter set and the image parameter set, the video editing software generally uses the same parameters for re-compression as default setting. This study proposes a detection algorithm for video double compression with the same coding parameters. The proposed algorithm is based on the video quality degradation mechanism. **Method** After multiple compression times with the same coding parameters, the video quality tends to be unchanged. The single compressed and double compressed videos can be distinguished by the degree of video quality degradation. Video coding is based on rate-distortion optimization to balance the bitrate and distortion to choose the optimal parameters for the encoder. When the video is compressed with the same coding parameters, the trace of video re-compression operations is extremely little because of the slight changes in division mode of the coding unit to the prediction unit (PU) and the little influence on the distribution of PU size type. Thus, the double compression with the same parameters is more difficult to detect. Given that the transform quantization coding process of each coding unit is independent, the quantization error and its distribution characteristics are independent, too. The discontinuous boundaries of adjacent blocks will affect the mode selection of intra-prediction. In the process of motion compensation prediction, the predicted values of adjacent blocks come from different positions of different images, which results in the numerical discontinuity of the predicted residual at the block boundary. It will affect the selection of motion vectors predicted between frames and reference pictures. This study proposes a detection algorithm based on two kinds of video features: the I frame PU mode (intra-coded picture prediction unit mode, IPUM) and the P frame PU mode (predicted picture prediction unit mode, PPUM). These video features are extracted from the luminance component (Y) in I frame and P frame, respectively. First, the IPUM and PPUM features are extracted from the tested HEVC videos. Then, the video is compressed three times with the same coding parameters. In this study, the above features are repetitively extracted for each compressing time. A larger number of PU should be selected as the statistical feature because the numbers of PU of different sizes in I frame and P frame are quite different. Finally, the average different PU modes of the n th compression and the $(n + 1)$ th compression of each I frame and P frame at the same position are counted to form a 6-dimensional feature set, which is sent to a support vector machine (SVM) for classification.

Result The experiment is composed of three resolution video sets: common intermediate format (CIF) (352×288 pixels), 720p (1280×720 pixels), and 1080p (1920×1080 pixels). To increase the number of video samples, each test sequence is clipped into smaller video clips. Each video clip contains 100 frames. If the video exceeds 1000 frames, only the first 1000 frames are considered to generate the samples in our experiments. Accordingly, a total of 132 CIF-video sequence segments, 87 720p-video sequence segments, and 98 1080p-video sequence segments are obtained. For each set, 4/5 positive samples and their corresponding negative samples are randomly selected as the training set, while the rest are used as the test set. The binary classification is applied by using the SVM classifier with radial basis function kernel. The optimized parameters, gamma and cost, are determined by using grid search with fivefold cross validation. The final detection accuracy values are collected by averaging the accuracy results from 30 repetitions of the experimental test, where the training and testing data are randomly selected for each time. Considering the computational complexity of the experiment, the repetition of re-compression for each experimental test is especially important. With the increase in the times of re-compression, the computational complexity of video encoding and decoding will increase linearly. However, the classification accuracy is not significantly improved. Thus, the repetition of re-compression is finally adjusted to three. The average detection accuracies for the different video test datasets, CIF, 720p, and 1080p, are 95.45%, 94.8%, and 95.53%, respectively. In addition, video compression is usually affected by coding parameters. Group of pictures (GOP) is the basic coding unit of video compression. The interval of GOP has a significant impact on video quality owing to the error propagation in the inter-coding process. In the CIF dataset, the detection accuracy of this method with different GOP reaches more than 90%. With the increase of GOP, the detection accuracy will decline slightly. The final experimental test is regarding frame deletion, which is a common operation of video tampering. In the CIF dataset, the detection accuracy of video re-compression with 10 consecutive deleted frames can maintain above 88%, which means the proposed method is robust to frame deletion. **Conclusion** In this study, the law of video quality degradation is revealed by the changed number of different PU modes in the same position of I frame and P frame. In sum, our proposed method clearly performs well in different test situations. The detection

accuracy of the proposed method can reach high rates of different GOP settings, video resolutions, and frame deletion rate.

Key words: video forensics; double video compression; high efficiency video coding (HEVC); the same coding parameters; quality degradation; prediction unit (PU)

0 引言

随着便捷式摄像机、移动手机、监控摄像机的广泛使用,视频数据量呈爆炸性增长,多媒体取证和版权保护成为社会热点问题。数字多媒体给人们带来便利的同时,也带来不少安全隐患,甚至导致严重的道德问题和法律后果。在视频剪辑和转换工具的帮助下,用户可以很方便地加工处理视频。视频经过解压缩、重压缩等处理重新发布,造成网络上存在大量内容相似的视频,不仅浪费网络空间资源,同时也让用户对视频是否为正版产生疑惑。由于视频剪辑软件的易操作性,使得视频遭到恶意修饰和篡改的可能性大大提高,导致视频的真实性和完整性无法得到保证(陈威兵等,2011)。例如在视频中恶意添加伪造虚假画面或在监控视频中删除犯罪画面,这无疑会影响司法公正,导致社会恐慌(杨锐等,2013)。

视频篡改通常是将压缩的视频解压到空间域多帧 YUV 格式的图片,然后对这些图片进行内容篡改操作,例如区域覆盖或替换、删除帧等,最后在相同或者不同的编码参数下进行重新压缩。视频的真实性检测是检测视频内容是否被篡改以及篡改类型和篡改位置(姚晔等,2018)。在上述检测过程中,视频重压缩是视频篡改的必要条件,经过篡改伪造的视频一定经历两次及两次以上的压缩(冯春晖等,2014)。如果待检测视频被判定为经过多次重压缩,则视频就很有可能经过篡改操作。高效视频编码(high efficiency video coding, HEVC)作为新一代的视频编码格式,2013 年正式通过 ITU-T 标准,2014 年由 ISO/IEC 颁布,支持各类规格的视频,从 CIF(common intermediate format)(352 × 288 像素)到 HD(high definition)1 080p(1 920 × 1 080 像素),直至超高清视频 UHD(ultra high definition)4 320p(7 680 × 4 320 像素)(Sullivan 等,2012)。大多数移动设备已经支持 HEVC 格式。由于 HEVC 适用于高清视频的编码,吸引了更多研究学者及各界人士的关注。

研究人员针对视频压缩标准进行重压缩检测,

例如 MPEG-2 (moving picture expert group-2)、MPEG-4 (moving picture expert group-4)、H. 264/AVC(advanced video coding)等(Xu 等,2013;He 等,2017;Zhang 等,2017)。只有少数几类研究讨论 HEVC 标准的不同编码参数重压缩检测。当量化参数(quantization parameter, QP)不同且当第 2 次量化参数小于第 1 次量化参数时,Huang 等人(2016)分析量化离散余弦变换系数的差异,提出基于量化离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)系数的共生矩阵算法。Li 等人(2019)结合量化 DCT 系数和变换单元(transform unit, TU)进行分类。当比特率不同且第 2 次码率大于第 1 次码率时,Li 等人(2017)提出结合量化 DCT 系数的共生矩阵和 I 帧预测单元(prediction unit, PU)两个特征的算法。Liang 等人(2018)分析 HEVC 预测单元 PU 在 P 帧的差异,提出基于 P 帧 PU 分布的算法甄别用高比特率处理冒充高质量的视频。

在图像组(group of pictures, GOP)不同时,Xu 等人(2017)提出了一种基于预测方式的预测单元序列(sequence of number of prediction unit of its prediction mode, SN-PUPM)的新方案,并估计首次压缩的 GOP 大小。此外,视频转码也是常用的操作。与 H. 264 相比,HEVC 将压缩率降低了一半。Costanzo 和 Barni(2016)观察到 H. 264 编码会影响 HEVC 编码 B 帧运动预测模式的决策,进而区分转码视频和估计首次压缩的 QP 的大小。然而在实际应用中,大多数编码器不常使用双向预测的 B 帧。Bian 等人(2019)结合 I 帧和 P 帧的 PU 的分布频率,组合为 30 维特征向量送入支持向量机(support vector machine, SVM)进行分类来区分 H. 264 转码为 HEVC 的视频。

大多数篡改者更关注对视频内容的修改,由于在视频流里包含视频参数集(video parameter set, VPS)和图像参数集(picture parameter set, PPS),一般视频剪辑软件默认使用相同参数进行重压缩。Jia 等人(2016)指出,相同参数重压缩操作会使 4 × 4 的 PU 数量明显改变,用相同的编码参数压缩视频,比较前后 4 × 4 的 PU 数量的差异可以区分单压缩视

频和重压缩视频。然而此算法受视频内容影响较大。Elrowayati 等人(2017)根据 PU 预测方式和量化变换系数的自相关性,对比 I 帧在相同位置 PU 变化,设置阈值分类。

Jiang 等人(2018)分析 MPEG 视频和 H. 264 视频多次重压缩的退化机制,利用视频质量下降程度区分单压缩视频和重压缩视频。Jiang 等人(2018)利用 I 帧、P 帧宏块差异进行 H. 264 视频重压缩检测。由于 HEVC 的编码框架大体和 H. 264 相同,应用混合编码来减少视频的空间和时间冗余。Jiang 等人(2019)将 I 帧不同尺寸 PU 类型作为特征处理,在高清视频上有较高的重压缩检测准确度。本文提出结合 I 帧 PU 模式(intra-coded picture prediction unit mode, IPUM)和 P 帧 PU 模式(predicted picture prediction unit mode, PPUM)的统计特征,从微观上展示质量下降程度,区分单压缩和重压缩 HEVC 视频。针对本文提出的方法,对不同视频分辨率及不同参数设置做了大量对比实验及分析,结果表明本文方法具有较好的准确度。

1 HEVC 编码结构

HEVC 采用基于块的编码方式,块的尺寸可以通过划分自适应改变大小。HEVC 将一帧编码图像划分为大小统一、相邻但不重叠的若干 $2N \times 2N$ 样点的编码树单元(coding tree unit, CTU)。CTU 可以按照四叉树结构分解为若干方形编码单元(coding unit, CU)。同一层次的 CU 必须是同一尺寸的 4 个方块,最多有 4 层分解,即 64×64 像素, 32×32 像素, 16×16 像素, 8×8 像素。

预测单元 PU 是 HEVC 进行预测运算的基本单

元,只能定义在不再划分的最底层的 CU 中,包括帧内预测和帧间预测两类。CU 中所有的 PU 为同一种预测方式,即在帧内预测和帧间预测中选择其一。如图 1 所示,一个编码单元 CU 可以划分为一个或多个预测单元 PU, CU 到 PU 仅允许一层划分。划分可以是对称的,也可以是不对称的。其中, L 、 R 、 U 、 D 分别代表左、右、上、下,不对称的划分是上下或者左右以 $1:3$ 或 $3:1$ 的方式进行划分。帧内预测只允许 $2N \times 2N$ 或者 $N \times N$ 方式,帧间预测可以在这 8 种方式中任意选择。

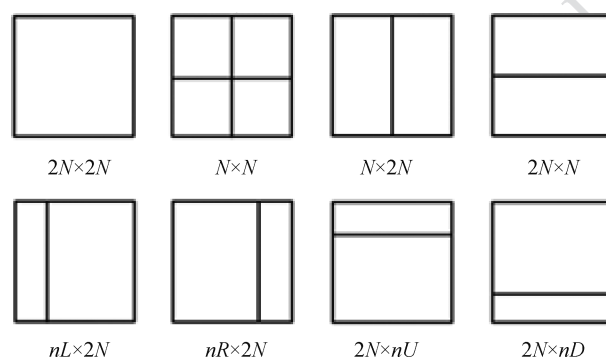


图 1 帧内预测和帧间预测 PU 的划分方式

Fig. 1 Partition of PU in intra and inter prediction

图 2 是 Akiyo 视频由 Gitl HEVC/H. 265 Analyzer (Li 和 Chao, 2016) 解码的 P 帧, 图片由粗线划分为若干个大小为 64×64 像素的 CTU。CTU 被细线递归划分为若干个 CU, 白色块 CU 为帧间预测, 绿色块 CU 为帧内预测。CU 到 PU 仅允许一次划分或者不划分, 标有星号的 CU 节点表示其到 PU 的一次划分, 虚线代表 PU 的划分方式。从图中可以看出, 纹理越复杂, 分区的 CU 尺寸越小, 例如 Akiyo 面部区域。复杂区域可以用更精细的编码单元和预测单元进行编码, 保证视频的质量。

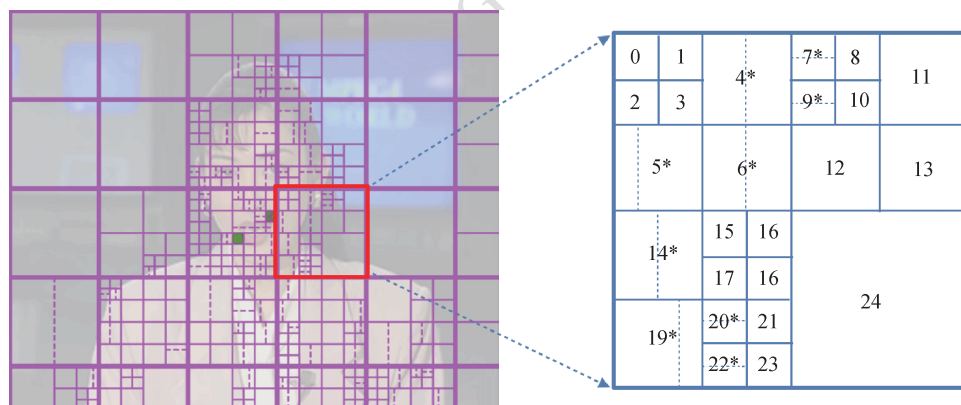


图 2 P 帧 CU 和 PU

Fig. 2 CU and PU in P frame

2 理论和方法

2.1 预测过程分析

视频预测的主要思想是通过预测来消除像素间的相关性。根据参考像素的不同,视频预测主要分为帧内预测和帧间预测两大类。帧内预测即利用当前图像内已编码像素生成预测值;帧间预测即利用当前图像之前已编码图像的重建像素生成预测值。视频编码是基于率失真优化来权衡码率与失真,为编码器选择最优参数。

HEVC 为亮度分量的 PU 提供了 35 种帧内预测模式,包括直流(direct current, DC)模式、平面(Planar)模式和 33 种角度模式(Lainema 等, 2012),如图 3 所示。

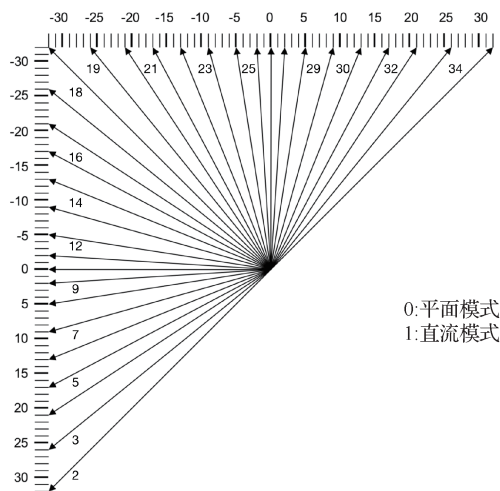


图3 HEVC 亮度分量帧内预测模式

Fig. 3 Intra prediction modes for luma samples in HEVC

DC 模式适用于大面积平坦区域,对当前块中的每个像素使用同一个预测值,即预测参考像素的平均值。Planar 模式适用于像素值缓慢变化区域,对当前块中的每个像素使用不同的预测值,在此过程中将用到水平和垂直方向的两个线性滤波器,并将二者的平均值作为当前块像素的预测值。33 种角度模式适应视频内容中不同方向的纹理。每个帧内 PU 都有 2 个参考像素集:水平参考像素行和垂直参考像素列。PU 的每个像素都沿着角度方向被投影到最近的参考线进行预测。

视频编码器通过最小化拉格朗日率失真(rate-distortion, RD)代价函数实现对每个 PU 块的帧内预

测模式的选定,其代价函数表示为

$$\min J, J = D(md) + \lambda_{md} R(md) \quad (1)$$

式中, md 代表帧内预测模式, $D(md)$ 、 $R(md)$ 分别表示采用不同帧内预测模式时的失真和比特数, λ_{md} 为拉格朗日因子。最优的帧内预测模式为率失真代价最小的模式。

帧间预测的 PU 需要在大量的运动模式下估算失真和比特数。在实际预测过程中,其代价函数简化为

$$\min J, J = DFD(mt) + \lambda_{mv} R_{mv}(mt) \quad (2)$$

式中, mt 代表运动模式, $DFD(mt)$ 为采用不同运动模式下运动补偿预测误差, $R_{mv}(mt)$ 为运动矢量相关信息(运动矢量、参考图像索引、参考队列索引)编码比特数, λ_{mv} 为拉格朗日因子。编码器选择最佳的运动模式,使代价函数达到最小值。

2.2 质量下降机制

由于量化操作使残差块的变换系数趋于近似整数,多次的重压操作使编码决策趋于最优,视频质量下降收敛。为了更好地显示多次以相同编码参数压缩视频后视频质量的变化情况,本文将 132 个 CIF 分辨率的 100 帧 YUV 序列 V_0 ,以量化参数 q 编码成 HEVC 格式的压缩视频 h_0 ,将 h_0 解码为 YUV 序列 V_1 ,然后使用相同的编码参数进行多次压缩与解压。最后获得 YUV 序列 $\{V_n | n = 1, 2, \dots, 7\}$ 。使用单压缩视频解码后的 YUV 序列 V_1 与 n 次压缩视频解码后的 YUV 序列 V_n 之间的峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)度量视频质量变化,表示为 $PSNR(V_1, V_n)$ 。仅考虑亮度 Y 分量,132 个 YUV 平均 PSNR 值如图 4 所示, QP 为量化参数,在连续重新压缩之后,视频的质量不断下降,且下降幅度趋于平缓。由此,根据质量下降的幅度可以区分单压缩视频和重压缩视频。

2.3 特征提取

当以相同量化参数重新编码时,CTU 根据率失真递归划分为 CU,在 CU 的基础上进行 PU 划分和预测。首次编码遗留的操作痕迹使 CTU 划分、PU 划分及预测大部分保留原先的方式。经过多次相同编码参数重压缩操作,PU 划分及预测方式趋于稳定,量化残差变换系数更接近整数,视频失真和码率达到平衡状态,视频的质量趋于不变。因此,根据在相同位置 n 次压缩和 $n + 1$ 次压缩状态不同的 PU 数,可以衡量视频变化的程度,进而区分单压缩视频

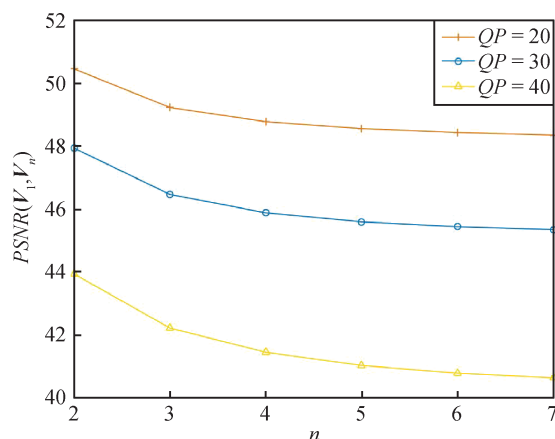


图4 连续使用相同编码参数压缩后视频质量的变化

Fig. 4 Variation of video quality after continuous recompressions with the same coding parameters

和重压缩视频。为了描述 PU 状态,本文提出 IPUM 和 PPUM 分别描述 I 帧、P 帧的 PU 状态。

在编码过程中,PU 的尺寸如表 1 所示。其中,帧内预测 PU 尺寸只有 5 种对称形式,而帧间预测 PU 尺寸包括所有对称和不对称形式共 25 种。

表 1 25 种 HEVC PU 尺寸

Table 1 List of twenty-five PU sizes in HEVC

类型	尺寸/像素	类型	尺寸/像素	类型	尺寸/像素
1	64 × 64	10	32 × 64	19	16 × 8
2	32 × 32	11	32 × 24	20	16 × 4
3	16 × 16	12	32 × 16	21	12 × 16
4	8 × 8	13	32 × 8	22	8 × 16
5	4 × 4	14	24 × 32	23	8 × 4
6	64 × 48	15	16 × 64	24	4 × 16
7	64 × 32	16	16 × 32	25	4 × 8
8	64 × 16	17	8 × 32		
9	48 × 64	18	16 × 12		

以相同的编码参数压缩视频,视频重压缩的操作痕迹小,基本不改变 CU 到 PU 的划分方式,即对 PU 尺寸类型的分布影响不大。由于各个编码块变换量化编码过程相互独立,各块引入的量化误差大小和分布特性相互独立,导致相邻边界不连续,将影响帧内预测的模式选择。此外,运动补偿预测过程中,相邻块的预测值来自不同图像的不同位置,这样导致预测残差在块边界产生数值不连续,将影响帧间预测的运动矢量和参考图片的选择。考虑到 I 帧、P 帧中不同尺寸的 PU 数量相差较大,应选取数量较多的 PU 作为统计特征。132 个单压缩视频中

平均每一 I 帧、P 帧里的不同尺寸的 PU 数量如图 5 和图 6 所示。在 I 帧中,只选取表 1 中尺寸类型为 3~5 的 PU,在 P 帧中,只选取尺寸类型为 1~5, 18~25 的 PU。

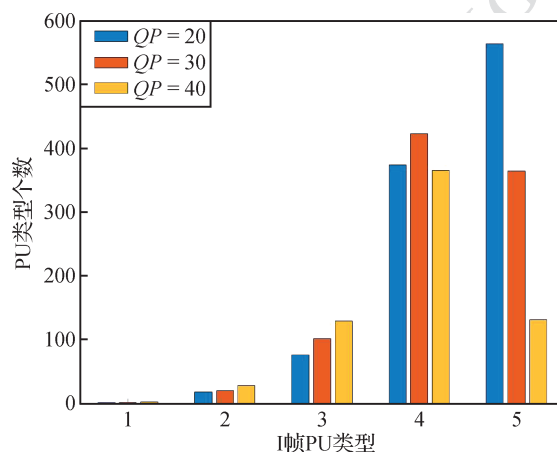


图 5 平均每一 I 帧的 PU 数量

Fig. 5 Number of PUs per I frame

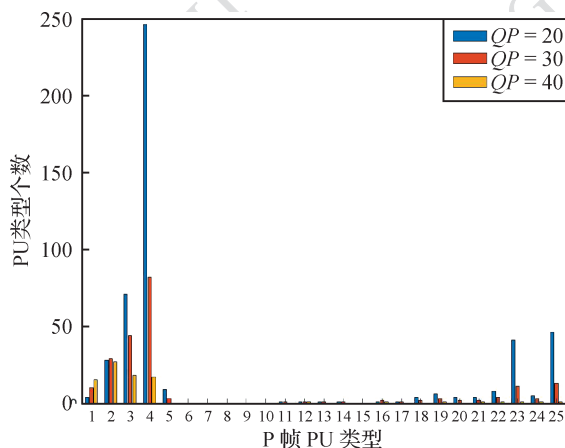


图 6 平均每一 P 帧的 PU 数量

Fig. 6 Number of PUs per P frame

I 帧 PU 只存在帧内预测的方式, I 帧 PU 模式 IPUM 定义为

$$IPUM(PU) = \{IPU_s, PU_m\} \quad (3)$$

$$\begin{cases} IPU_s \in \{s_3, s_4, s_5\} \\ PU_m \in \{m_1, m_2, \dots, m_{35}\} \end{cases}$$

式中, IPU_s 代表 I 帧 PU 的尺寸,有 3 种类型。 PU_m 是 PU 的帧内预测模式,共有 35 种。在 I 帧中,当且仅当 PU 尺寸、PU 帧内预测模式相同时,PU 才属于同一 PU 模式。

P 帧 PU 模式 PPUM 定义为

$$PPUM(PU) =$$

$$\begin{cases} \{PPU_s, PU_m\} & PU \text{ 为帧内模式 (Mode_Intra)} \\ \{PPU_s, MV\} & PU \text{ 为帧间模式 (Mode_Inter)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} PPU_s \in \{s_1, \dots, s_5, s_{18}, \dots, s_{25}\} \\ PU_m \in \{m_1, m_2, \dots, m_{35}\} \\ MV = \{(V_{ref}, V_x, V_y) \mid V_{ref}, V_x, V_y \in \mathbb{Z}\} \end{cases} \quad (4)$$

式中, PU_t 代表 P 帧 PU 的预测类型, 包括帧内模式 (Mode_Intra)、帧间模式 (Mode_Inter) 和跳过模式 (Mode_Skip)。跳过模式在 HM8.0 之后已不再使用。PPU_s 代表 P 帧 PU 的尺寸, 共有 13 种类型。MV 为运动参数, 包括参考索引 V_{ref} , 运动矢量 V_x 和 V_y 。在 P 帧中, 存在两种预测模式, 当 PU_t 为 Mode_Intra 时, 当且仅当 PU 尺寸、PU 帧内预测模式相同时, PU 才属于同一 PU 模式; 当 PU_t 为 Mode_Inter 时, 当且仅当 PU 尺寸、运动参数相同时才属于同一 PU 模式。

如果相同位置的 PU 在第 n 次压缩和 $n+1$ 次压缩具有相同的 PU 模式, 则该 PU 在第 n 次压缩被认为是稳定块, 否则, 该 PU 为变化块。在 P 帧中, CU 到 PU 存在不对称分割, 为避免重复计算, 只记录为左上 PU 的变化。例如, 当 CU 被分割为 12×16 像素和 4×16 像素的 PU, 仅对 12×16 像素的 PU 计数 1 次。在 n 次压缩和 $n+1$ 次压缩后, 平均每一 I 帧的变化块数量为

$$CI_n = \frac{1}{N_I} \sum_{t,x,y} M(PU_n^{(t,x,y)}, PU_{n+1}^{(t,x,y)}) \quad (5)$$

式中, N_I 表示 I 帧总数, $PU_n^{(t,x,y)}$ 表示位于第 t 帧 (x, y) 位置第 n 次压缩的预测块。

最终, 匹配函数定义为

$$M(PU_n, PU_{n+1}) = \begin{cases} 1 & IPUM(PU_n) \neq IPUM(PU_{n+1}) \\ 0 & IPUM(PU_n) = IPUM(PU_{n+1}) \end{cases} \quad (6)$$

同理, 平均每一 P 帧变化块数 CP_n 计算方式与式(5)和式(6)相似。其中, N_I 替换为 N_p , N_p 为 P 帧总数, 匹配函数中将 IPUM 替换为 PPUM 即可。

2.4 算法步骤

综上所述, 根据 I 帧和 P 帧的 PU 模式变化可以衡量视频质量下降的幅度, 进而区分单压缩和重压缩视频。本文提出的重压缩检测算法的具体步骤如下:

1) 将输入的 HEVC 视频解码为 YUV 序列 V_1 , 分别提取 I 帧、P 帧亮度 Y 分量的 PU_1 模式信息

IPUM, PPUM。

2) 使用相同编码参数将 V_n 重新压缩并解码为 YUV 序列 V_{n+1} , $n = 1, 2, \dots, K$ 分别提取 I 帧、P 帧亮度 Y 分量的 PU_{n+1} 模式信息 IPUM, PPUM。

3) 运用式(5)和式(6)计算平均每一 I 帧、P 帧 PU_n 和 PU_{n+1} 之间的变化数 CI_n 和 CP_n 。

4) 从 I 帧构造 K 维特征集 $f_{IPUM} = [CI_1, CI_2, \dots, CI_K]$, 同理, 从 P 帧构造 K 维特征集 $f_{PPUM} = [CP_1, CP_2, \dots, CP_K]$, 结合上述两部分, 构造最终特征集 $f_{COMB} = [f_{IPUM}, f_{PPUM}]$ 。

5) 将特征集 f_{COMB} 导入支持向量机库 (a library for support vector machines, LIBSVM) (Chang 和 Lin, 2011) 进行分类。

3 实验结果与分析

将本文方法与 Jia 等人 (2016)、Elrowayati 等人 (2017) 提出的算法分别进行比较。同时研究在不同 GOP、不同视频分辨率、帧删除等实际情况下的实验效果。

3.1 实验设置

实验主要包含 3 种不同分辨率的视频集: CIF, 720p 和 1080p。有关序列的更多详细信息可参考附录。为了增加视频样本数量, 每个测试序列剪成视频片段, 每个片段只包含 100 帧。若视频超过 1000 帧, 则只剪成 10 个片段。最后获得 132 个 CIF 视频序列片段, 87 个 720p 视频序列片段和 98 个 1080p 视频序列片段。由于部分视频像素格式不为 YUV420P, 使用 FFmpeg 修改为 YUV420p, 此过程不会引入视频 Y 分量误差。在编码期间, 视频编码软件 HM16.6 配置如表 2 所示, 经过一次编码得到的单压缩样本标记为正样本, 经过两次编码得到的重压缩视频标记为负样本。因此 CIF 数据集共有正负样本 264 个, 720p 数据集中正负样本共 174 个, 1080p 数据集中正负样本共 196 个。

比较连续两次相同编码参数 PU 模式, 将最终统计结果送入 LIBSVM 分类器中。对于每组数据样本集, 随机选择 4/5 的正样本和与之对应的负样本作为训练集, 剩余样本作为测试集。对于 LIBSVM 分类器, 选择径向基函数 (radial basis function, RBF) 作为核函数, 并且执行 5 倍交叉验证, 选择内核的最佳参数 (gamma 和 cost)。整个实验过程重复 30 次,

表 2 HM16.6 编码器的主要参数配置

Table 2 Main parameter configuration of HM16.6 encoder

编码参数	配置
配置文件 configuration files	encoder_lowdelay_P_main.cfg
帧率 FrameRate	25
编码帧数 FramesToBeEncoded	100
帧内周期 IntraPeriod	8
GOP 大小 GOPSize	4

每次根据下式计算重压缩检验的准确度,即

$$AR = (TPR + TNR) / 2 \quad (7)$$

式中, AR 表示检测准确度, $TPR = TP / (TP + FN)$, $TNR = TN / (TN + FP)$ 。 TP 、 FN 分别表示单压缩视频分类为单压缩、重压缩视频的样本数, TN 、 FP 分别表示重压缩视频分类为重压缩、单压缩视频的样本数。

3.2 K 的取值

实验需要对视频进行反复解压和重压缩操作,并且统计平均每一 I 帧和 P 帧的 PU 变化数量。考虑到实验的计算复杂性, K 的取值非常重要。如图 7 所示,在 CIF 数据集 QP 分别为 20、30、40 时, K 从 2 增加到 3 时,准确度均有提高。 K 为 3 时,实验准确度均达到很高的状态。考虑到随 K 的增加,视频反复编码解码的计算复杂度也会线性增加,但分类的准确度提高并不显著,因此,在后续实验中, K 的取值均为 3。

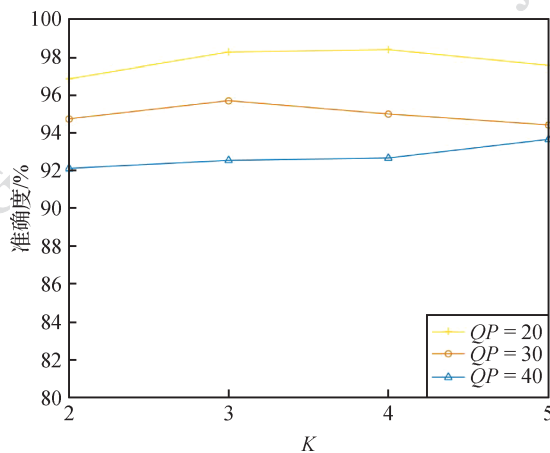


图 7 不同 K 取值的结果

Fig. 7 Results of different K values

3.3 不同特征集的结果

在 CIF 数据集中,特征集 f_{IPUM} 检测准确度高于

特征集 f_{PPUM} ,如图 8 所示,这是因为在视频编码中,时间冗余远大于空间冗余,以相同编码参数压缩视频进一步减少了 I 帧的空间冗余,因此 I 帧前后 IPUM 变化更大。除了在 $QP = 32, 34$ 时,特征集 f_{IPUM} 检测准确度略高于 f_{COMB} ,总体上结合两者的特征集能够提高准确度。在接下来的实验中,均使用 f_{COMB} 特征集。

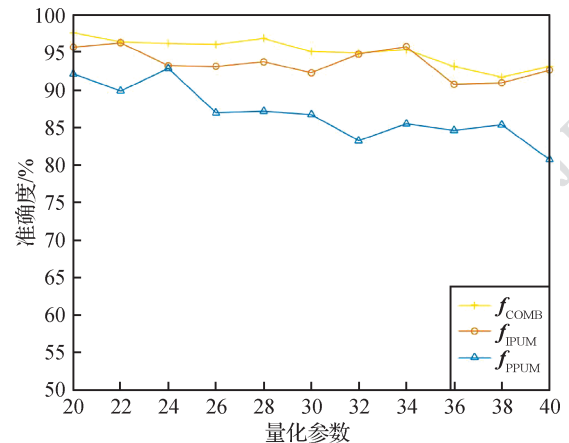


图 8 不同特征集的结果

Fig. 8 Results on different feature sets

3.4 各方法比较

表 3 是本文算法及比较算法的检测准确度。可以看出,本文算法明显优于 Jia 等人(2016)算法和 Elrowayati 等人(2017)算法。Jia 等人(2016)算法仅仅对比连续两次压缩 4×4 PU 数量的变化取阈值分类,在很大程度上受视频内容的影响。而比较在相同位置连续两次压缩的 PU 模式,是编码器在失真和码率权衡的结果。Elrowayati 等人(2017)算法根据 PU 预测方式和量化残差系数的自相关性,对比 I 帧在相同位置 PU 变化,设置阈值分类。 f_{COMB} 特征集不仅考虑到 P 帧的变化,还体现了视频质量下降收敛趋势。

3.5 不同 GOP 设置

视频压缩通常受许多编码参数影响,图像组(GOP)是视频压缩的基本编码单元。在 CIF 数据集设置 GOP 为 12, 16, 20, 24。

表 4 显示了不同 GOP 的检测准确度,随着 GOP 的增大,准确度有所降低,这是因为随着 GOP 的增加, I 帧的总数量也在减少。但本文算法总体性能表现比较稳定,只有在量化系数最大设置为 40 时准确率随 GOP 增加而下降到 90% 以下,但依然能维持在平均 87% 以上。

表 3 不同算法的检测准确度
Table 3 Detection accuracy of different algorithms

算法	量化参数											平均
	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	
Jia 等人(2016)	85.98	83.71	81.82	73.11	72.73	65.91	67.8	66.67	68.56	71.59	71.97	74.21
Elrowayati 等人(2017)	88.64	84.47	84.09	79.55	80.3	79.17	79.55	78.41	79.17	77.65	75.38	80.68
本文	98.27	95.9	97.12	97.18	97.44	95.64	94.74	94.87	93.59	92.82	92.44	95.45

注:加粗字体为每列最优值。

表 4 不同 GOP 的检测准确度
Table 4 Detection accuracy of different GOP

图像组	量化参数					/%
	24	28	32	36	40	
GOP12	95.58	95.13	95.45	93.21	90.06	
GOP16	96.41	97.56	99.36	91.22	90.90	
GOP20	94.36	95.77	92.37	91.54	90.64	
GOP24	94.68	95.38	95.71	92.69	87.24	

3.6 帧删除及不同分辨率

表 5 是帧删除及使用不同分辨率视频的实验结果。帧删除是视频篡改中最常见的操作,将 132 个 100 帧单压缩视频解码后的 YUV 序列随机删除连续的 10 帧,再使用相同的编码参数压缩为 90 帧重压缩视频。可以看出,总体平均准确率高于 88%,说明本文算法对帧删除具有一定的鲁棒性。准确度下降的原因主要在于视频删除连续的 10 帧,I 帧 P 帧都相应减少,帧间预测变化较大,难以收敛。

表 5 帧删除操作和 720p 和 1 080p 视频的检测准确度

Table 5 Detection accuracy of frame detection operation and 720p,1 080p videos

项目	量化参数					/%
	24	28	32	36	40	
帧删除	93.46	83.91	88.59	91.22	85.26	88.49
720p 视频	92.45	94.71	95.59	94.51	96.76	94.80
1 080p 视频	90.53	96.75	97.46	96.14	96.75	95.53

HEVC 旨在解决高清视频的编码效率问题。因此分别在 720p 和 1 080p 的分辨率视频上进行实验,可以看出,平均检测度分别高于 94% 和 95%,具

有较好的检测准确度。

4 结 论

本文分析了视频经过多次相同编码参数压缩后质量下降的规律。为了更直观地反映质量下降的变化趋势,利用视频特征 IPUM 和 PPUM 在相同位置连续两次的不同,提出了一种相同编码参数 HEVC 视频重压缩检测的有效方法。该方法体现了编码器考虑视频失真和码率做出的决策,不受视频内容的影响。实验结果表明,本文方法在各种分辨率视频上均具有较高的检测准确率。此外,在不同的 GOP 设置、帧删除攻击的情况下也具有较好表现。在未来的工作中,将分析 P 帧不同尺寸 PU 类型。因为在视频序列中 P 帧占比大,且 P 帧 PU 尺寸更为丰富。同时考虑将更多的新特征加入重压缩检测方法,例如,量化残差变换系数、TU 划分等,减少算法复杂度,从而增强方法的检测效率。

参考文献 (References)

Bian S, Li H L, Gu T J and Kot A C. 2019. Exposing video compression history by detecting transcoded HEVC videos from AVC coding. Symmetry, 11 (1): #67 [DOI: 10.3390/sym11010067]
Chang C C and Lin C J. 2011. LIBSVM: a library for support vector machines. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 2 (3): #27 [DOI: 10.1145/1961189.1961199]
Chen W B, Yang G B, Chen R C and Zhu N B. 2011. Digital video passive forensics for its authenticity and source. Journal on Communications, 32 (6): 177-183 (陈威兵, 杨高波, 陈日超, 朱宁波. 2011. 数字视频真实性和来源的被动取证. 通信学报, 32 (6): 177-183) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-436X.2011.06.024]
Costanzo A and Barni M. 2016. Detection of double AVC/HEVC encoding//Proceedings of the 24th European Signal Processing Confer-

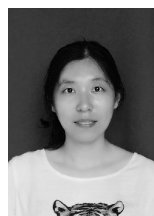
- ence. Budapest: IEEE; 2245-2249 [DOI: 10.1109/EUSIPCO.2016.7760648]
- Elrowayati A A, Abdullah M F L, Manaf A A and Alfagi A S. 2017. Tampering detection of double-compression with the same quantization parameter in HEVC video streams//Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering. Penang: IEEE; 174-179 [DOI: 10.1109/ICCSCE.2017.8284400]
- Feng C H, Xu Z Q, Zheng X H and Jiang L. 2014. Digital visual media forensics. Journal on Communications, 35(4): 155-165 (冯春晖, 徐正全, 郑兴辉, 蒋力. 2014. 数字可视媒体取证. 通信学报, 35(4): 155-165) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-436x.2014.04.018]
- He P S, Jiang X H, Sun T F and Wang S L. 2017. Detection of double compression in MPEG-4 videos based on block artifact measurement. Neurocomputing, 228: 84-96 [DOI: 10.1016/j.neucom.2016.09.084]
- Huang M L, Wang R D, Xu J, Xu D W and Li Q. 2016. Detection of double compression for HEVC videos based on the co-occurrence matrix of DCT coefficients//Proceedings of the 14th International Workshop on Digital Watermarking. Tokyo: Springer; 61-71 [DOI: 10.1007/978-3-319-31960-5_6]
- Jia R S, Li Z H, Zhang Z Z and Li D D. 2016. Double HEVC compression detection with the same QPs based on the PU numbers//Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Information Technology and Applications. Hangzhou: EDP Sciences; #02010 [DOI: 10.1051/itmconf/20160702010]
- Jiang X H, He P S, Sun T F, Xie F and Wang S L. 2018. Detection of double compression with the same coding parameters based on quality degradation mechanism analysis. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 13(1): 170-185 [DOI: 10.1109/TIFS.2017.2745687]
- Jiang X H, Xu Q, Sun T F, Li B and He P S. 2019. Detection of HEVC double compression with the same coding parameters based on analysis of intra coding quality degradation process. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 15: 250-263 [DOI: 10.1109/TIFS.2019.2918085]
- Lainema J, Bossen F, Han W J, Min J and Ugur K. 2012. Intra coding of the HEVC standard. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 22(12): 1792-1801 [DOI: 10.1109/TCSVT.2012.2221525]
- Li H and Chao H Y. Git HEVC/H.265 Analyzer[EB/OL]. (2016-12-09)[2019-05-18]. <https://github.com/lheric/GitHEVCAnalyzer>
- Li Q, Wang R D and Xu D W. 2019. Detection of double compression in HEVC videos based on TU size and quantised DCT coefficients. IET Information Security, 13(1): 1-6 [DOI: 10.1049/iet-ifs.2017.0555]
- Li Z H, Jia R S, Zhang Z Z, Liang X Y and Wang J W. 2017. Double HEVC compression detection with different bitrates based on co-occurrence matrix of PU types and DCT coefficients//Proceedings of the 4th Annual International Conference on Information Technology and Applications. Guangzhou: EDP Sciences; #01020 [DOI: 10.1051/itmconf/20171201020]
- Liang X Y, Li Z H, Yang Y Y, Zhang Z Z and Zhang Y. 2018. Detection of double compression for HEVC videos with fake bitrate. IEEE Access, 6: 53243-53253 [DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2869627]
- Sullivan G J, Ohm J R, Han W J and Wiegand T. 2012. Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 22(12): 1649-1668 [DOI: 10.1109/TCSVT.2012.2221191]
- Xu J Y, Su Y T and Liu Q Z. 2013. Detection of double MPEG-2 compression based on distributions of DCT coefficients. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 27(1): #1354001 [DOI: 10.1142/S0218001413540013]
- Xu Q Y, Sun T F, Jiang X H and Dong Y. 2017. HEVC double compression detection based on SN-PUPM feature//Proceedings of the 16th International Workshop on Digital Watermarking. Magdeburg: Springer; 3-17 [DOI: 10.1007/978-3-319-64185-0_1]
- Yang R, Luo W Q and Huang J W. 2013. Multimedia forensics. Science China: Information Science, 43(12): 1654-1672 (杨锐, 骆伟祺, 黄继武. 2013. 多媒体取证. 中国科学: 信息科学, 43(12): 1654-1672) [DOI: 10.1360/N112013-00059]
- Yao Y, Hu W T, Ren Y Z and Weng S W. 2018. Detection and localization of digital video regional tampering. Journal of Image and Graphics, 23(6): 779-791 (姚晔, 胡伟通, 任一支, 翁韶伟. 2018. 数字视频区域篡改的检测与定位. 中国图象图形学报, 23(6): 779-791) [DOI: 10.11834/jig.170453]
- Zhang Z Z, Hou J J, Zhang Y, Ye J Y and Shi Y Q. 2017. Detecting multiple H.264/AVC compressions with the same quantisation parameters. IET Information Security, 11(3): 152-158 [DOI: 10.1049/iet-ifs.2015.0361]

作者简介



潘鹏飞, 1994年生, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为视频取证。

E-mail: ppf171270009@hdu.edu.cn



王慧, 通信作者, 女, 博士研究生, 主要研究方向为多媒体内容认证及盲恢复、视频数字水印技术。

E-mail: h.wang@hdu.edu.cn

姚晔,男,副教授,主要研究方向为视频智能分析、多媒体信息安全。E-mail: yaoye@hdu.edu.cn

附录 (Appendix)

本文涉及的相关工具详列如下:

HEVC Test Model: https://hevc.lhi.fraunhofer.de/svn/svn_HEVCSoftware/

FFmpeg: <http://ffmpeg.org/download.html>

本文所有 YUV 序列均来自视频库: <https://media.xiph.org/video/derf/>

CIF 视频库 YUV 序列名称及帧数: akiyo 300, bowing 300, bridge_close 2001, bridge_far 2101, bus 150, city 300, coastguard 300, container 300, deadline 1374, flower 250, football (b) 260, foreman 300, galleon 360, hall_monitor 300, harbour 600, highway 2000, husky 250, ice 240, intros 360, mobile 300, mother_

daughter 300, news 300, pamphlet 300, paris 1065, sign_irene 540, silent 300, soccer 300, students 1007, tempete 260, vtc1nw 360, washdc 360, waterfall 260

720p 视频库 YUV 序列名称及帧数: ducks_take_off 500, FourPeople 600, in_to_tree 500, Johnny 600, KristenAndSara 600, mobcal 504, old_town_cross 500, park_joy 500, parkrun 504, shields 504, sintel_trailer 1253, stockholm 604, vidyo1 600, vidyo3 600, vidyo4 600

1080p 视频库 YUV 序列名称及帧数: aspen 570, blue_sky 217, controlled_burn 570, crowd_run 500, dinner 950, factory 1339, life 825, pedestrian_area 375, red_kayak 570, riverbed 250, rush_field_cuts 570, rush_hour 500, snow_mnt 570, speed_bag 570, station2 313, sunflower 500, touchdown_pass 570, tractor 690, west_wind_easy 570