

保密类别_____

编 号_____201611143017_____

毕 业 论 文

基于 VPF 的视频重压缩检测算法仿真与评测

学 院	计算机与网络空间安全学院
专 业	软件工程（移动互联网方向）
班 级	2016 软件工程（移动互联网方向）
姓 名	杨丽晴
指导教师	曹刚

中 国 传 媒 大 学

2020 年 5 月 6 日

摘 要

随着数字视频处理技术的发展,大量操作简易的视频编辑软件已被广泛使用,愈演愈烈的数字视频恶意篡改行为使视频的完整性和真实性受到了极大威胁。数字视频取证是应对该威胁的一类有效技术,视频篡改检测是其中开展较早、应用较广的一个技术分支。本文针对数字视频篡改过程中常采用的重压缩操作,深入分析和探究其盲检测问题,重压缩检测结果不仅可作为判断视频是否被篡改的间接依据,而且为后续篡改定位、篡改类型鉴别、篡改历史恢复提供基础支撑。具体地,我们选取一种基于VPF的视频重压缩检测典型算法为对象,在深入理解其原理和方法的基础上,通过系统的仿真评测和实验分析开展验证性探索研究。仿真评测结果表明,该算法能有效利用帧编码宏块类型变化异常的特征实现不包含B帧的数字视频重压缩检测,并且推测出第一次压缩的GOP大小。

关键词: 数字视频取证, 视频篡改检测, 重压缩检测, 宏块类型, VPF

ABSTRACT

With the development of digital video processing technology, a large number of easy-to-use video editing software has been widely used. The increasing malicious tampering behavior of digital video makes the integrity and authenticity of video greatly threatened. Digital video forensics is a kind of effective technology to deal with the threat. Video tamper detection is one of the earlier and more widely used technology branches. In this paper, the blind detection of digital video tampering is analyzed and explored. The results of the detection can not only be used as an indirect basis to judge whether the video has been tampered, but also provide basic support for the following tamper location, tamper type identification and tamper history recovery. Specifically, we select a typical algorithm of video re-compression detection based on VPF (Variation of Prediction Footprint) as the object, and carry out the verification research through the system simulation evaluation and experimental analysis. The simulation results show that the algorithm can effectively use the characteristics of abnormal macroblock type changes in frame coding to realize the detection of digital video re compression without B frame, and predict the GOP size of the first compression.

Keywords: Digital Video Forensics, Video Tampering Detection, Double Compression Detection, Macroblock Type, VPF

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
一、 绪 论.....	1
(一) 课题研究的背景和意义.....	1
(二) 本课题研究的热点及发展现状.....	2
(三) 论文结构安排.....	3
二、 相关基础理论.....	4
(一) 数字视频相关概念.....	4
(二) 视频重压缩模型.....	5
三、 基于 VPF 的视频重压缩检测.....	7
(一) 重压缩前后宏块数目变化规律分析.....	7
1. 未发生预期帧变化.....	7
2. 发生预期帧变化.....	8
(二) 视频重压缩检测算法框架.....	9
(三) 算法详细步骤描述.....	9
1. 统计宏块数量.....	10
2. 定位异常帧.....	11
3. 分析周期性.....	11
4. 估计 GOP 大小.....	12
四、 实验结果及分析.....	13
(一) 实验环境.....	13
(二) 算法相关参数设置.....	13
(三) 测试数据集.....	14
1. 获取原始 YUV 序列.....	14
2. 控制压缩参数生成测试视频.....	15
(四) 评测指标.....	16
(五) 评测结果及分析.....	16
1. 基于 VPF 的视频重压缩原理验证.....	16

2. 压缩参数对算法性能的影响分析.....	19
五、 总结.....	22
(一) 本文工作总结.....	22
(二) 未来改进方向.....	22
参考文献.....	23
后记.....	24

一、绪论

（一）课题研究的背景和意义

随着计算机视频处理技术的发展，软件市场上基本涵括了各类功能完善的视频编辑软件，常见的有爱剪辑、会声会影、EDIUS 以及 Adobe Premiere 等，其中前三种相较而言操作简易，在不需过多专业知识的前提下，用户也可以操作软件完成视频的重新编辑。另一方面，随着 AI 技术在视频编辑领域的迅猛发展，此前一款名为“ZAO”的 AI 换头软件也进入了公众视角，只需要在此 APP 里上传一张自己的正脸照片，利用软件可随意将自己的脸代入提供的经典视频片段的人物形象中，效果非常逼真。

视频编辑软件近乎无门槛的广泛使用，于正面极大地丰富了人们的生活，于负面却也助推了恶意篡改视频行为的出现。篡改行为使得原始视频的完整性和安全性受到了威胁，在某些特定的场景下，如司法取证、监控系统中，视频作为多媒体证据的公信力也受到了损害^[1]。

下面举例描述两起视频造假事件：1）2007 年 6 月的一个早晨，捷克共和国在早间新闻栏目“全景”中突然插播了一段原子弹在当地一个村庄爆炸的新闻，随即引发了民众恐慌^[2]。然而事实上，这则新闻是由一群激进分子将原子弹爆炸的蘑菇云视频片段通过复制粘贴的手段加入到原始的视频中所形成的假视频。2）今年的美国时间 2 月 4 日晚，美国首脑特朗普在国会发表了他上任后的第三次年度国情咨文演讲。2 月 5 日，特朗普在其社交媒体账户上转发了一个大约 5 分钟的视频^[3]。该视频显示，在特朗普开始演讲前，众议院议长佩洛西试图与特朗普握手但被其忽视，之后佩洛西在特朗普发表演讲时当众撕毁了国情咨文讲稿，见图 1-1。而实际情况是，佩洛西撕毁国情咨文讲稿的时间是在特朗普演讲结束后。视频制作者篡改了佩洛西撕毁国情咨文讲稿的时间点，意图引发政治矛盾。

数字视频取证技术是当前多媒体信息安全领域的一个前沿课题，从技术手段可以将其分为主动取证和被动取证两种^[4]。主动取证是指在视频中加入一些可验证的函数，如数字水印和数字签名等；而被动取证是指在不利用视频附加信息、只依赖视频固有特性的条件下，实现对视频的来源、压缩历史、内容的真实性的分析和取证。目前视频取证研究方向有三大类，它们分别是：视频的来源取证、真实视频和计算机合成的虚拟视频区分取证、视频篡改取证。

在数字视频取证技术中，视频篡改检测取证研究开展最早，实际应用价值也最为重大。视频篡改检测是指通过提取和分析篡改行为对媒体数据遗留的非正常痕迹以及统计变量的改变，来进行视频篡改行为的取证^[5]。



图 1-1 佩洛西在特朗普演讲时当众撕毁国情咨文讲稿

（二） 本课题研究的热点及发展现状

本文研究的视频重压缩检测作为视频篡改被动取证研究的一个重要分支，其理论基础如下：由于视频篡改操作发生在非编码层，故视频二次压缩编码是不可避免的一步，第一次压缩编码在采集期间执行，第二次压缩编码在篡改之后执行，即经过篡改操作的视频一定对应着多次压缩过程，因此视频重压缩（二次压缩）检测可以作为鉴别数字视频是否被处理的基本方法。同时以此为基础，可以开展篡改点定位、篡改类型判定、推测篡改前参数帮助还原篡改轨迹等工作。

根据第一次编码和第二次编码的 GOP 结构是否相同，可分为 GOP 结构对齐和 GOP 结构错位两种检测方法^[6]。

GOP 结构对齐的视频重压缩检测算法可分为四类：基于 DCT 系数分布的方法、基于首位数字模型的方法、基于马尔科夫模型的方法和其他方法。

GOP 结构错位的视频重压缩检测算法可分为三类：基于预测残差的方法、基于宏块类型变化的方法和基于块效应的方法。目前视频重压缩检测领域有以下代表性成果：

1) Wang W 和 Farid H 通过分析量化 DCT 系数在经过重压缩后的变化，提出了一个量化 DCT 系数分布模型^[7]。根据 I 帧有无二次 JPEG 压缩的迹象来判断是否经过双重 MPEG 编码，并根据傅里叶变换特性进行帧删除检测。

2) 熊潇等利用整个帧序列的预测残差在篡改后会呈现周期性变化这一特点，进行重压缩以及帧删除、插入检测^[8]。

3) Vazquez-padin D 等人通过提取视频帧中各类型宏块数量，判断是否存在 I 帧重编码为 P 帧时特殊的宏块变化特征来进行视频重压缩检测，再利用周期性估计第一次压缩的 GOP 大小^[9]。但该算法只能处理包含 I 帧和 P 帧的视频。

4) Gironi A 等人基于上述研究，进一步提出了视频同时包含 I、P、B 帧的重压缩检测思路^[10]，但在处理该类包含 B 帧的视频时算法的检测效果表现得不够良好，局限性很大。

（三） 论文结构安排

本文的结构安排如下：

第一章：绪论。介绍了视频重压缩检测技术产生的背景以及研究意义，介绍了本课题研究的热点以及发展现状，明确了本课题的研究价值。

第二章：相关基础理论介绍。首先，介绍了本文中出现的数字视频取证技术领域相关的特殊名词。然后，介绍了一个视频重压缩模型，以帮助读者对本课题有更清晰的理解。

第三章：基于 VPF(Variation of Prediction Footprint)的视频重压缩检测。对本文主要研究和实现的基于 VPF 的视频重压缩检测技术进行了详细介绍。依次从算法原理、算法思想以及算法流程三个层面开展本章内容。

第四章：实验结果及分析。该部分依次说明了实验环境、相关参数设置、测试数据集、评测指标、测试结果。

第五章：总结。对本次毕业论文的研究内容以及工作完成情况进行总结，同时找出当前研究工作的局限性，提出可改进的方向。

二、 相关基础理论

（一） 数字视频相关概念

1) 帧

视频是由一组在时间上连续的静止的画面组成的，这些静止的画面被称为帧。帧的类型有以下三种：

① I 帧

帧内编码图像帧(Intra-coded picture)，I 帧表示关键帧，可以理解为这一帧画面的完整保留，解码时只需要本帧数据就可以完成（因为包含完整画面）。

② P 帧

前向预测编码图像帧(Predictive-coded picture)。P 帧表示的是这一帧跟之前的一个关键帧或 P 帧的差别，解码时需要用之前缓存的画面叠加上本帧定义的差别，生成最终画面。

③ B 帧

双向预测编码图像帧(Bidirectionally predicted picture)。B 帧是双向差别帧，也就是 B 帧记录的是本帧与前后帧的差别，换言之，要解码 B 帧，不仅要取得之前的缓存画面，还要解码之后的画面，通过前后画面的与本帧数据的叠加取得最终的画面。

2) GOP

GOP (Group of Pictures)是一组连续的画面，由一张 I 帧和数张 B / P 帧组成。I 帧通常是每个 GOP 的第一个帧。从一个 I 帧开始，到下一个 I 帧的前一帧结束为一个 GOP，GOP 大小为其中包含帧的数目。如图 2-1 所示，是一个连续的帧序列，红色块代表 I 帧，灰色块代表 B 帧，黄色块代表 P 帧，第 1-12 帧组成一个 GOP 单位。

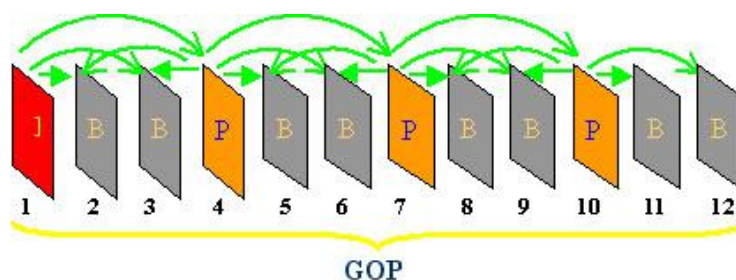


图 2-1 GOP 结构图。1-12 为帧序号，I、P、B 分别表示帧类型为 I 帧、P 帧、B 帧。

3) YUV 序列

与 RGB 类似，YUV 也是一种颜色编码方法，主要用于电视系统以及模拟视频领域。YUV，分为三个分量，“Y”表示明亮度(Luminance 或 Luma)，也就是灰度值；而“U”

和“V”表示的则是色度(Chrominance 或 Chroma)，作用是描述影像色彩及饱和度，用于指定像素的颜色。一组用 YUV 格式编码的在时间上连续的视频帧即为 YUV 序列。

4) 宏块

一个编码图像首先要划分成多个块(4x4 像素)才能进行处理，宏块(Macro Block)由整数个块组成，通常宏块大小为 16x16 个像素。宏块类型主要有以下三种：

① I 宏块

即 I-MB，帧内参考宏块，只能利用当前片中已解码的像素作为参考进行帧内预测。

② P 宏块

即 P-MB，帧间参考宏块，可以利用前面已解码的图像作为参考图像进行帧内预测。

③ B 宏块

即 B-MB，跳跃宏块，则是利用前后向的已解码的图像作为参考图形进行帧内预测。值得一提的是，跳跃是指一个宏块完全不用编码，而只需要在码流中标明其为 SKIP 宏块，它既无运动矢量残差，也不编码量化残差，在解码时只需利用运动矢量得到像素预测值，像素重构值即为像素预测值^[11]。

另外，值得注意的是，三种帧类型所包含的宏块种类是不同的。I 帧不需要参考其他任何帧，因此只包含有 I 宏块，而 P 帧和 B 帧中包含有 I 宏块、P 宏块和 B 宏块。

5) 帧篡改类型

帧篡改操作类型可分为帧间篡改和帧内篡改两种：

① 帧间篡改

帧间篡改是指：视频中一个（组）帧被完全删除、复制或替代。可采取的技术手段有：帧删除、帧插入和帧复制。

② 帧内篡改

帧内篡改是指：攻击者通过引入或移除对象改变单个帧的内容。篡改的常见形式是对帧内运动物体进行篡改，例如对视频中某个在连续多帧中存在的运动物体进行复制-粘贴操作，添加到视频的另一段连续区域，或者从视频中移除帧内某运动目标。

（二） 视频重压缩模型

当一段已经历过压缩的数字视频第二次经历压缩时，我们称之为重压缩，第二次压缩后生成的视频称之为重压缩视频。图 2-2 所示为典型的视频的双重压缩模型^[6]，主要包括以下四个步骤：

步骤一：将原始的 YUV 序列（即视频源数据）送入编码器中进行压缩，得到只经过一次压缩的原始视频 V_0 。

步骤二：使用对应的解码器对原始视频 V_0 进行解码，得到一个重建的 YUV 序列。

步骤三：对重建 YUV 序列进行帧删除、帧插入、帧复制、帧内像素修改等篡改

操作，得到篡改后的 YUV 序列。

步骤四：将篡改后的 YUV 序列送入编码器中进行压缩，得到经过双重压缩的篡改视频 V_d 。

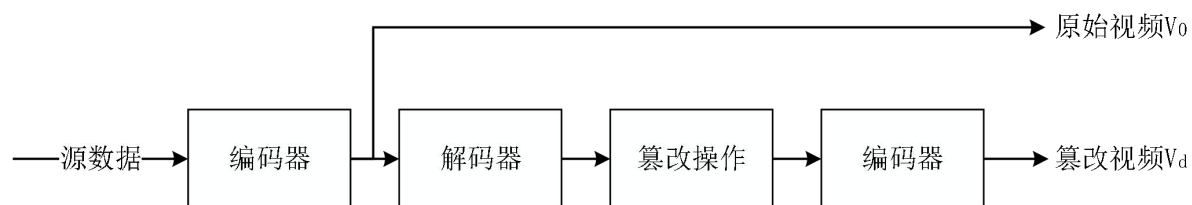


图 2-2 视频的双重压缩模型

三、 基于 VPF 的视频重压缩检测

(一) 重压缩前后宏块数目变化规律分析

对于一段未篡改的单次压缩视频，由于相邻帧具有相似性，帧的各类宏块数目的变化相对比较平稳。然而，视频重压缩却往往导致 GOP 结构的变化，当 GOP 大小改变时，一些帧的编码类型会发生改变。例如，有的 I 帧会被二次编码为 P 帧。在本文中将该类帧变化标记为期待观察到的帧变化。下面将对比“未发生预期帧变化”和“发生了预期帧变化”两种情况下连续三帧的宏块数目变化，总结重压缩前后宏块数目变化规律。

1. 未发生预期帧变化

设置第一次压缩时 GOP 大小 (G_1)=45，第二次压缩时 GOP 大小 (G_2)=50。

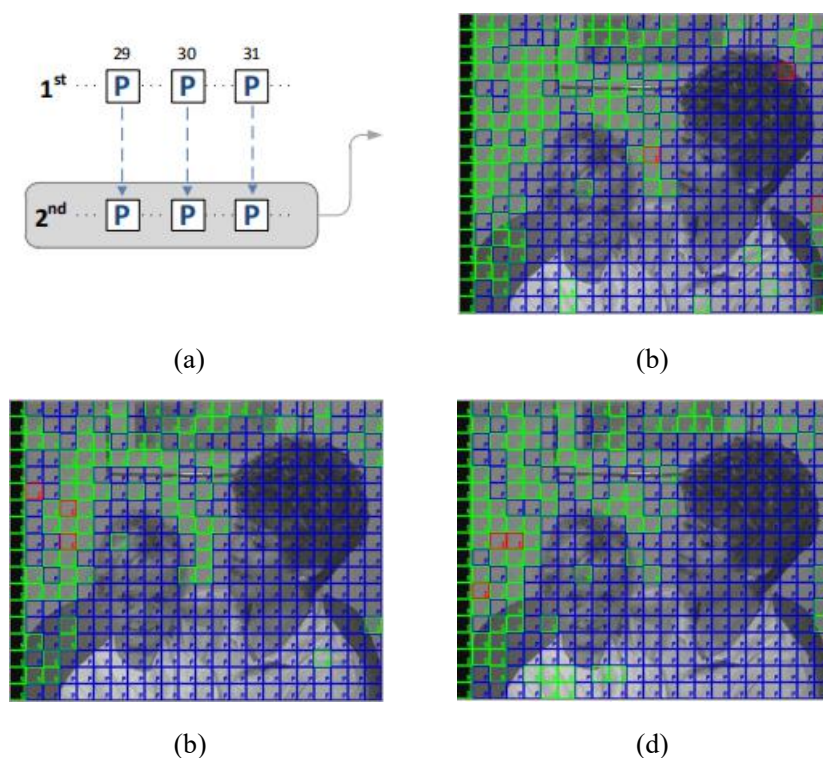


图 3-1 第 30 帧两次压缩帧类型不变。(a): $G_1=45$, $G_2=50$, (b)、(c)、(d)分别展示了第二次压缩后第 29、30、31 帧中各类型宏块数目。

参考图 3-1(a)，第 29、30、31 帧经过一次压缩和二次压缩后帧类型均为 P 帧，此时选取的三帧并未发生帧类型的改变。图 3-1(b)、图 3-1(c)和图 3-1(d)分别展示了第二次压缩后第 29、30、31 帧中各类型宏块数目，一个小方格代表一个宏块，其中红色方

格表示 I-MB, 蓝色方格表示 P-MB, 绿色方格表示 S-MB。

观察对比图 3-1(b)、图 3-1(c)和图 3-1(d), 可以发现三幅图中各个颜色的方块数量基本保持不变, 即此连续三帧的各类型宏块数目基本保持不变。

2. 发生预期帧变化

设置第一次压缩时 GOP 大小 (G_1)=30, 第二次压缩时 GOP 大小 (G_2)=50。

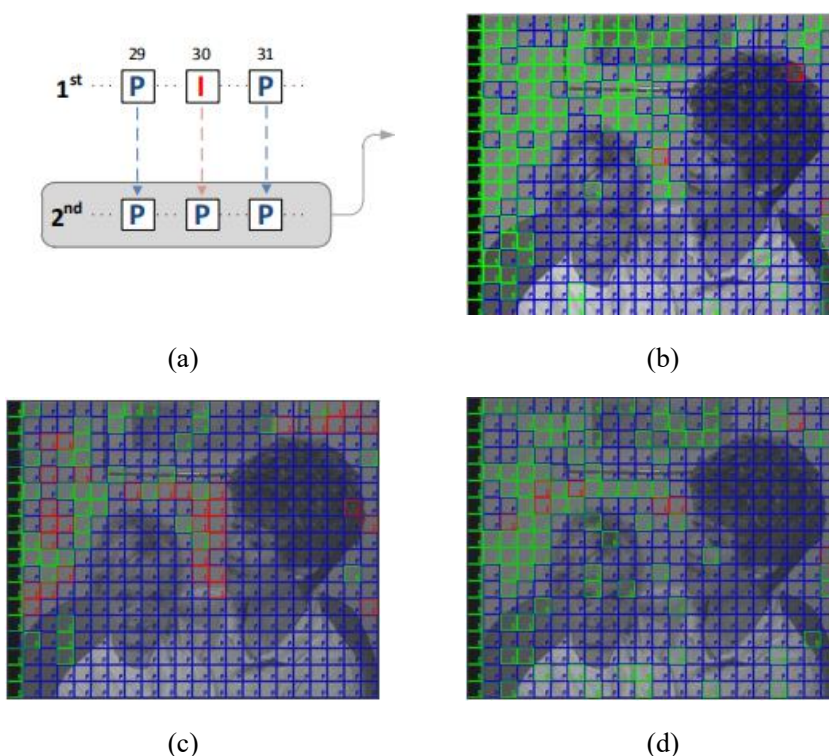


图 3-2 第 30 帧两次压缩帧类型改变。(a): $G_1=30$, $G_2=50$, (b)、(c)、(d)分别展示了第二次压缩后第 29、30、31 帧中各类型宏块数目。

参考图 3-2(a), 在此情况下视频第 29、31 帧第一次压缩后为 P 帧, 第二次压缩后也均为 P 帧, 而此时选取的三帧中第 30 帧发生了帧类型的改变: 第一次压缩后为 I 帧, 第二次压缩后为 P 帧。观察对比图 3-2(b)、图 3-2(c), 可以发现后者红色区域增多, 绿色区域减少了。观察对比图 3-2(c)、图 3-2(d), 发现后者红色区域减少, 绿色区域增多了。观察对比图 3-2(b)、图 3-2(d), 可以发现两图中各个颜色的方块数量基本相同。即与第 29、31 帧相比, 第 30 帧 I-MB 数量显著增加, S-MB 数量显著减少。

分析第 30 帧, 第一次编码为 I 帧, 第二次编码为 P 帧, 帧的内容没有改变, 但其两次处于不同的 GOP 中。由于编码 I 帧和 P 帧的量化矩阵和质量因子不同, 在平坦的区域, 会有更多使用帧内编码的宏块来代替使用帧间编码和跳跃编码的宏块, 在静态区域, 会有更多使用帧间编码的宏块来代替使用跳跃编码的宏块。

总而言之, 当发生 I 到 P 的帧类型改变时, 在均质区域中, 部分 P-MB 和 S-MB

转换为 I-MB，在静态区域，部分 S-MB 转换为 P-MB。总体表现为 I-MB 数量显著增加，同时 S-MB 数量显著减少。

（二）视频重压缩检测算法框架

对于一个重压缩视频，当两次压缩所选定的 GOP 参数不互成倍数关系时，压缩过程中一定会发生 I 帧被重新编码为 P 帧的情况，并且这种帧类型改变伴随着特殊的宏块数目变化特征，即：该帧与其前后帧相比，I-MB 数量均增加，S-MB 数量均减少，在该帧处会出现 I-MB 数量的极大值和 S-MB 数量的极小值。我们将其描述为期待观察到的宏块数目变化特征，对应地将经过重压缩且第一次编码类型为 I 帧、第二次编码类型为 P 帧的帧描述为期待观察到的帧。

基于此，我们假定待检测视频分为两大类：只经过一次压缩的视频和经过两次压缩的视频（且两次压缩所选定的 GOP 参数大小不互成倍数关系）。

首先，对待检测视频逐帧进行各类宏块数目提取，并将得到的结果记录进相应的函数中。当在某帧处发生了期待观察到的宏块数目变化特征时，视为定位到了疑似第一次编码类型为 I 帧、第二次编码类型为 P 帧的帧，在本文中将其定义为异常帧。

此时还需要进行更复杂的函数变换以将异常帧和期待观察到的帧区分开来。在本算法中，构造了一个关键函数，当输入的待检测视频的帧序列中存在期待观察到的帧时，刻画出来的关键函数会表现出周期性特征，进一步可得出结论：该待检测视频是经过两次压缩的；反之，不会表现出周期性，此时待检测视频是只经过一次压缩的。

另外，在观察到了周期性的情况下，可以结合关键函数经过更多的运算估计出第一次压缩的 GOP 参数取值，帮助还原篡改轨迹，最终模拟生成原始视频。

根据以上原理阐述，再结合相关文献^[9]的描述，总结了基于 VPF 的视频重压缩检测算法流程，见图 3-3。

第一步：从待检测视频中提取所有帧的各类宏块数目，生成宏块数目函数，同时消除函数干扰峰值。第二步：若观察到某一帧对比其前后帧的宏块数目变化趋势与发生 I 到 P 的帧类型改变时宏块变化特征吻合，立即定位该异常帧，并生成异常帧集合。第三步：分析所构造的关键函数的周期性，如果没有检测到周期性，可以判定视频只经过一次压缩；反之，可判定视频经过重压缩。第四步：基于步骤三的分析，对已经检测到的重压缩视频进一步求解其第一次压缩的 GOP 大小。

（三）算法详细步骤描述

首先定义如下函数以及变量：

- 1) $x(n)$: 帧序列函数，其中自变量 $n=0, 1, \dots, N-1$ (N 表示视频总帧数)。
- 2) $i(n)$: 第 n 个帧中 I-MB 的数量。
- 3) $s(n)$: 第 n 个帧中 S-MB 的数量。

- 4) G_1 : 待求的第一次压缩的 GOP 大小。
 5) G_2 : 已知的第二次压缩的 GOP 大小。

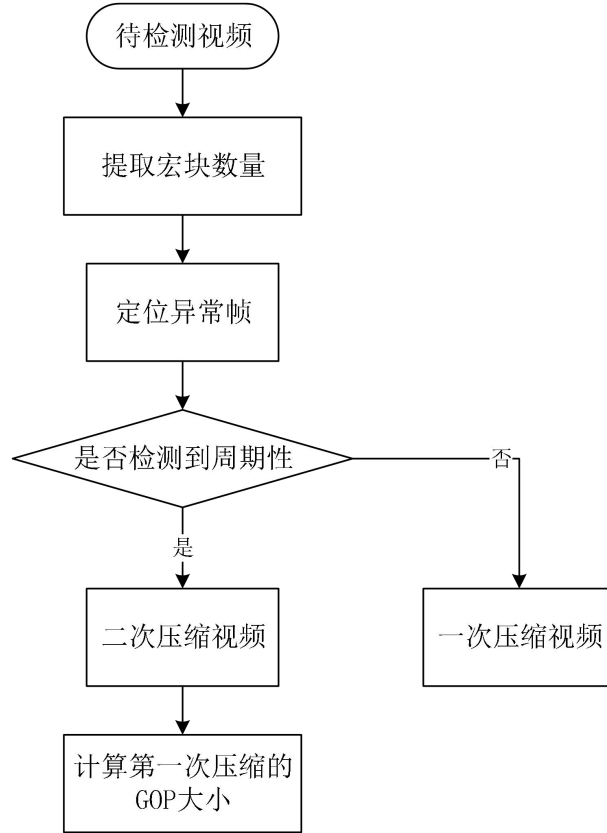


图 3-3 基于 VPF 的视频重压缩检测算法流程图

下面分步骤对基于 VPF 的视频重压缩检测算法的四个关键步骤进行详细描述。

1. 统计宏块数量

首先, 分别读取每一帧的宏块信息, 并将第 n 个帧中 I-MB 的数量保存至函数 $i(n)$ 中, 将第 n 个帧中 S-MB 的数量保存至函数 $s(n)$ 中。

我们期待观察到的现象为: 存在某一帧, 其与前后帧相比, I-MB 数量均增加, S-MB 数量均减少, 即在此帧处出现 I-MB 数量的极大值和 S-MB 数量的极小值, 对应的 $i(n)$ 和 $s(n)$ 函数在该 n 取值下出现峰值。此时该帧满足重编码中 I 到 P 的帧类型改变伴随的宏块变化特征, 该帧可能是被重编码为 P 帧的 I 帧。我们将这种 $i(n)$ 和 $s(n)$ 函数同时出现峰值的帧定义为异常帧。

但考虑到当某帧编码类型为 I 帧时, 由于 I 帧中只含有 I-MB 宏块, 此时不可避免地会出现 $i(n)$ 函数的峰值, 导致有可能将某帧错判断为异常帧。为了去除上述情况的干扰, 需要消除所有 I 帧处的 $i(n)$ 函数峰值, 可以通过以下函数变换实现。

用某 I 帧的前一帧 $i(n)$ 值和后一帧 $i(n)$ 值两个数的平均值来代替该 I 帧处的 $i(n)$ 函数值, 以消除峰值。已知在帧序列中, 所有 I 帧的索引可以用 $k \times G_2$ (其中 $k=0, 1, \dots$,

$\lfloor N/G_2 \rfloor$) 表示, 因此可一次性将上述变换应用到所有 I 帧中, 得到新的消除了干扰峰值的 $i(n)$ 函数, 为后续提取 $i(n)$ 和 $s(n)$ 函数同时出现峰值对应的 n , 定位异常帧, 生成异常帧集合步骤打下基础。见公式 3-1:

$$i(k \times G_2) = [i(k \times G_2 + 1) + i(k \times G_2 - 1)] \div 2 \quad (3-1)$$

其中, $k=0, 1, \dots, \lfloor N/G_2 \rfloor$ 。

2. 定位异常帧

此时再去定位新的消除了干扰峰值的 $i(n)$ 函数和 $s(n)$ 函数中同时出现峰值对应的帧。用集合 P 表示 $i(n)$ 和 $s(n)$ 中同时出现峰值的异常帧集合。见公式 3-2:

$$P = \{n \in \{0, 1, \dots, N-1\} : i(n-1) < i(n) \wedge i(n) > i(n+1) \wedge s(n-1) > s(n) \wedge s(n) < s(n+1)\} \quad (3-2)$$

定义 $E(n)$, 用来测量某帧处的峰值强度。见公式 3-3:

$$E(n) = [i(n) - i(n-1)][s(n) - s(n-1)] + [i(n+1) - i(n)][s(n+1) - s(n)] \quad (3-3)$$

定义 $v(n)$, 见公式 3-4:

$$v(n) = \begin{cases} E(n), & n \in P. \\ 0, & n \notin p. \end{cases} \quad (3-4)$$

若在当前帧处同时出现 $i(n)$ 和 $s(n)$ 函数的峰值, 该帧为异常帧, 此时 $v(n)=E(n)$; 否则 $v(n)=0$ 。

3. 分析周期性

1) 确定一组候选的 GOP 值

定义集合 C , 用来存放 GOP 的所有可能取值, 其中 GCD 函数表示取 n_1 、 n_2 的最大公约数。见公式 3-5:

$$C = \{c \in \{2, 3, \dots, N\} : \exists n_1, n_2 \in P, GCD(n_1, n_2) = c\} \quad (3-5)$$

2) 从集合 C 中选定一个 GOP 值作为待计算的 G_1

由于 $v(n)$ 的函数曲线会在当帧的场景突然变化或帧内出现纹理强烈的区域时出现偏差, 此时 $v(n)$ 曲线可能包含一些噪声成分, 或者缺少一些预期峰值。因此需要进行以下函数变换消除偏差干扰。

定义 $\phi(c)$, 用于衡量不同 c 值的有效性, 减少噪声峰值。见公式 3-9:

$$\phi(c) = \sum_{i=kc} v(i), i \in P, k \in [0, \lfloor N/c \rfloor] \quad (3-6)$$

$$\phi_2(c) = \sum_{i=kc} \beta, i \notin P, k \in [0, \lfloor N/c \rfloor] \quad (3-7)$$

其中， β 作为判断缺少预期峰值的惩罚因子，可以取 $\beta = 0.1 \times \max_n \{v(n)\}$ ，即 $v(n)$ 取到最大值时对应 n 取值的 0.1 倍。

$$\phi_3(c) = \max_{z \in [1, c-1]} \left\{ \sum_{k=0}^{\lfloor N/z \rfloor} v(kz) \right\} \quad (3-8)$$

$$\phi(c) = \phi_1(c) - \phi_2(c) - \phi_3(c) \quad (3-9)$$

定义 $C(x)$ ，见公式 3-10：

$$C(x) = \begin{cases} 1, & \max_{c \in C} \phi(c) > T_\phi \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-10)$$

其中， T_ϕ 表示自己事先设定的一个阈值。在公式 3-10 中，把集合 C 中的所有 c 值代入函数 $\phi(c)$ ，记 $\phi(c)$ 可取到的最大值为 Max ，当 Max 超过所设定的阈值 T_ϕ 时， $C(x)$ 记为 1，代表视频是二次压缩，检测到了重压缩现象，判断为重压缩视频；否则 $C(x)$ 记为 0，代表视频是一次压缩，判断为单压缩视频。

4. 估计 GOP 大小

在经过上述步骤后，可对已经检测到的重压缩视频进一步求解其第一次压缩的 GOP 大小。计算 G_1 ，见公式 3-11：

$$G_1 = \arg \max_{c \in C} \phi(c) \quad (3-11)$$

将集合 C 中的所有 c 值代入函数 $\phi(c)$ 中，函数 $\phi(c)$ 取到最大值时对应的 c 值即为所求的第一次压缩的 GOP 大小。

四、实验结果及分析

（一）实验环境

1) 实验环境介绍

① 硬件

电脑配置：Windows10，64 位操作系统、基于 x64 的处理器，内存 8G，处理器：intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU @2.30GHz 2.40GHz。

② 软件

编程软件：MATLAB R2017b；

其他软件：ffmpeg.exe、ffprobe.exe、x264.exe。这三个可执行文件是需要自行编译源码得到，下文将会对编译方法进行简要描述。

2) 实验环境搭建

① 编译 ffmpeg-3.0.1 源码得到 ffmpeg.exe、ffprobe.exe。

FFmpeg 是一套可以用来记录、转换数字音频、视频，并能将其转化为流的开源计算机程序^[12]。它包括了目前领先的音/视频编码库 libavcodec 等。FFmpeg 是在 Linux 下开发出来的，但它可以在包括 Windows 在内的大多数操作系统中编译。

本次实验通过 msys2+mingw64 工具完成 windows 下 ffmpeg 的编译。此编译过程很关键，若在 ffmpeg/bin 目录下会生成了 ffmpeg.exe、ffprobe.exe、ffplay.exe，代表编译成功。

② 编译 x264-snapshot-20160424-2245 源码得到 x264.exe。

③ 给 MATLAB 配置 exe 文件。

将编译得到的 ffmpeg.exe、ffprobe.exe、x264.exe 文件存放至同一个文件夹中，将该文件夹路径赋值给 MATLAB 项目，使 MATLAB 程序能调用上述三个 exe 文件完成视频的编解码以及宏块信息获取工作。

（二）算法相关参数设置

在本实验中，影响 VPF 算法效率的参数有：编码算法、GOP 大小、码率控制模式、量化参数。

1) 编码算法(Compression algorithm)

编码算法取值={MPEG-2, MPEG-4, H.264}。

① MPEG-2 生成文件的后缀名为".mpeg"；

② MPEG-4 生成文件的后缀名为".mp4"；

③ H.264 生成文件的后缀名为".h264"。

2) GOP 大小 (GOP 结构)

第一次压缩的 GOP 取值={14,30}, 第二次压缩的 GOP 取值={9,25,120}。

当 GOP 结构改变时, 在不同的压缩过程中, 相同帧会被编码成不同的帧类型。

3) 码率控制方式(Bitrate control)

码率控制方式取值={VBR, CBR, CRF}。

① VBR(Variable Bit Rate), 可变码率。与 CBR 相对应。量化参数符号为 Q;

② CBR(Constants Bit Rate), 恒定码率。以恒定码率 (比特率) 方式进行编码。

量化参数符号为 R;

③ CRF(Constant Rate Factor), 恒定质量因子。是 x264 下压制视频的一种恒定量化值的编码方式, 码率不恒定。量化参数符号为 C。

4) 量化参数

在视频编码中, 有一个模块是码率控制, 即通过选择一系列编码参数, 使得视频编码后的码率满足所要求的速率限制, 并且使编码失真尽可能小。码率控制分为两个步骤, 一个是码率分配, 二是确定量化参数。即先确定码率控制方式, 再确定量化参数, 最终输出目标码率。

码率取值受码率控制模式、编码算法控制。在本实验中, 第一次压缩和第二次压缩所选择的码率控制方式组合仅以下四种: VBR-VBR, VBR-CRF, CRF-CRF, CBR-CBR。

① 第一次编码, 码率控制模式=VBR, 编码算法=H.264, Q 取值={20,26,32,42};

② 第一次编码, 码率控制模式=VBR, 编码算法=MPEG-4, Q 取值={2,5,10,20};

③ 第一次编码, 码率控制模式=CRF, 编码算法任意, C 取值={10,18,26};

④ 第一次编码, 码率控制模式=CBR, 编码算法任意, R 取值={100,500,900};

⑤ 第二次编码, 码率控制模式=VBR, 编码算法=H.264, Q 取值={10,27,31,38};

⑥ 第二次编码, 码率控制模式=VBR, 编码算法=MPEG-4, Q 取值={1,6,9,18};

⑦ 第二次编码, 码率控制模式=CRF, 编码算法任意, C 取值={5,15,30};

⑧ 第二次编码, 码率控制模式=CBR, 编码算法任意, R 取值={100,500,900}。

5) 实验相关参数设置汇总

综上所述, 本次实验相关的参数设置情况见表 4-1 和表 4-2。

(三) 测试数据集

1. 获取原始 YUV 序列

本次实验选取了开放的 YUV 序列库^[13]中的 10 个具有 CIF 分辨率的未经过任何处理的 YUV 序列。以其中的 Akiyo_cif.yuv 为例, 见表 4-3, 分辨率为 720x486 像素, 总帧数为 300, 视频帧率为 60fps, 是由固定的摄像机拍摄的视频。

表 4-1 本实验相关参数取值情况

VPF 算法相关参数及取值		
	第一次压缩	第二次压缩
编码算法	H.264, MPEG-4, MPEG-2	H.264, MPEG-4, MPEG-2
GOP 大小	14,30	9,25,120
码率控制模式	VBR	VBR
	VBR	CRF
	CRF	CRF
	CBR	CBR

表 4-2 不同码率控制模式、编码算法下量化参数取值

码率控制模式	编码算法	量化参数	第一次压缩取值	第二次压缩取值
VBR	H.264	Q	20,26,32,42	10,27,31,38
	MPEG-4		2,5,10,20	1,6,9,18
CRF	H.264, MPEG-4, MPEG-2	C	10,18,26	5,15,30
CBR	H.264, MPEG-4, MPEG-2	R	100,500,900	100,500,900

表 4-3 部分 YUV 序列关键信息

YUV 序列名称	Y 数据	UV 数据	帧率	帧数	色度抽样方式
Akiyo	720x486	360x486	60	300	4:2:2 YUV
News	720x486	360x486	60	300	4:2:2 YUV
Coastguard	720x480	360x480	60	300	4:2:2 YUV

2. 控制压缩参数生成测试视频

先任选取其中一个 YUV 序列，进行以下操作。

第一、对 YUV 序列进行第一次压缩，用来模拟未篡改视频。

第二、对上述 YUV 序列进行第二次压缩，用来模拟篡改视频。

由于实验中主要考虑了码率控制模式与编码算法对 VPF 检测效果的影响，因此对视频进行压缩时，设置以下参数组合。如下第一次压缩码率控制模式-第二次压缩码率控制模式共有四种：

1) VBR-VBR

此时对采用的编码算法无限制，第一、二次压缩取值={MPEG-2, MPEG-4, H.264}。可生成 $3 \times 3 = 9$ 个两次压缩视频，3 个一次压缩视频。

2) VBR-CRF

此时对第二次压缩的编码算法有限制，第一次压缩取值={MPEG-2, MPEG-4, H.264}，第二次压缩取值={H.264}。可生成 $3 \times 1 = 3$ 个两次压缩视频，3 个一次压缩视频。

3) CRF-CRF

此时对第一、二次压缩的编码算法均有限制，第一、二次压缩取值={H.264}。可生成 1x1=1 个两次压缩视频，1 个一次压缩视频。

4) CBR-CBR

此时对采用的编码算法无限制，第一、二次压缩取值={MPEG-2, MPEG-4, H.264}。可生成 3x3=9 个两次压缩视频，3 个一次压缩视频。

由于该部分已编程由程序完成，只需输入 YUV 序列的名称，即可一次性生成一次压缩视频 3+3+1+3=10 个，二次压缩视频 9+3+1+9=22 个。

对选取的 10 个 YUV 序列依次完成上述压缩，可得篡改视频（正样本）量为 100 个，未篡改视频（负样本）量为 220 个。

（四）评测指标

为了评估基于 VPF 的视频重压缩检测算法性能，其中包括重压缩检测准确率和 G_1 命中率，本实验中以检测准确率和推测命中率为主要评价指标。

检测准确率公式如下：

$$Acc = \frac{TP + TN}{P + N} \times 100\% \quad (4-1)$$

其中， Acc 表示准确率， TP 表示被判断为篡改视频的正样本数量， TN 表示被判断为未篡改视频的负样本数量， P 表示正样本的总数量， N 表示负样本的总数量。

推测命中率公式如下：

$$TPR = \frac{TP}{TP + TN} \times 100\% \quad (4-2)$$

其中， TPR 表示命中率， TP 表示被判断为篡改视频的正样本数量， TN 表示被判断为未篡改视频的负样本数量。

（五）评测结果及分析

1. 基于 VPF 的视频重压缩原理验证

在一个视频的重压缩过程中，第一次压缩的 $GOP=14$ ，第二次压缩的 $GOP=9$ 。此时依次选取该视频两次压缩前后的第 1-45 帧展示其帧排序，如表 4-4、4-5、4-6 所示。

表 4-4 两次压缩前后第 1-15 帧帧类型序列

两次压缩帧类型排序（1-15 帧）															
帧序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
第一次压缩	I	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	I
第二次压缩	I	P	P	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P	P

表 4-5 两次压缩前后第 16-30 帧帧类型序列

两次压缩帧类型排序（16-30 帧）															
帧序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
第一次压缩	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	I	P
第二次压缩	P	P	P	I	P	P	P	P	P	P	P	P	I	P	P

表 4-6 两次压缩前后第 31-45 帧帧类型序列

两次压缩帧类型排序（31-45 帧）															
帧序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
第一次压缩	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	I	P	P
第二次压缩	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P	P	P	P	P

可以看到，在第 15 帧、第 29 帧和第 43 帧，均发生第一次为 I 帧，第二次为 P 帧的帧类型改变。根据 VPF 原理介绍，当 I 帧被重编码为 P 帧时，会发生如下宏块变化特征：该 P 帧相较其前后帧，I-MB 数量增加，同时 S-MB 数量减少。下面展示该类 P 帧与其前后帧的各类宏块数目变化。看是否与描述相符。

（1）第 14/15/16 帧宏块信息

如下图 4-1(a)、4-1(b)、4-1(c)是第一次压缩后第 14/15/16 帧宏块信息，图 4-1(d)、4-1(e)、4-1(f)是第二次压缩后第 14/15/16 帧宏块信息。其中黄色方块代表 P-MB，紫色方块代表 S-MB，蓝色方块代表 I-MB。

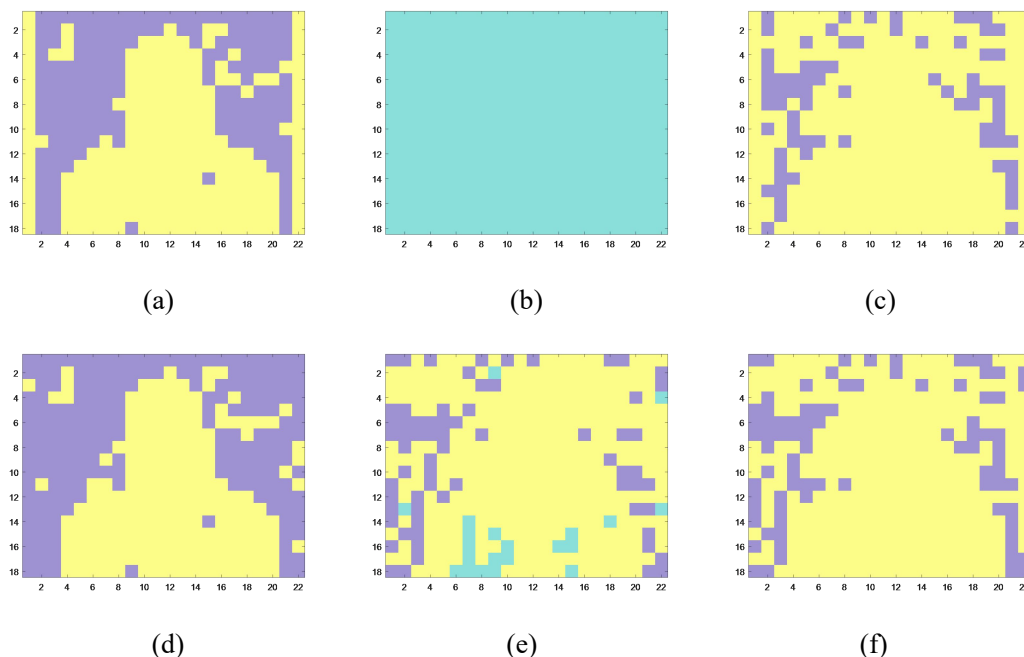


图 4-1 两次压缩第 14/15/16 帧宏块信息。(a)-(c)、(d)-(f)依次为该三帧第一、二次压缩后宏块情况。

其中黄色方块代表 P-MB，紫色方块代表 S-MB，蓝色方块代表 I-MB。

可以看到, 4-1(e)相比 4-1(d), 蓝色区域增多, 紫色区域减少, 而 4-1(f)与 4-1(e)相比, 蓝色区域减少, 紫色区域增多。即第 15 帧与其前后帧相比, I-MB 数量增加, 同时 S-MB 数量减少。

符合算法描述。

(2) 第 28/29/30 帧宏块信息

如下图 4-2, 可以看到, 4-2(d)只含有蓝色区域, 由于该帧为 I 帧, I 帧中只有 I-MB, 此时 4-2(e)与 4-2(d)相比, 不会观察到期待现象。

不符合算法描述。

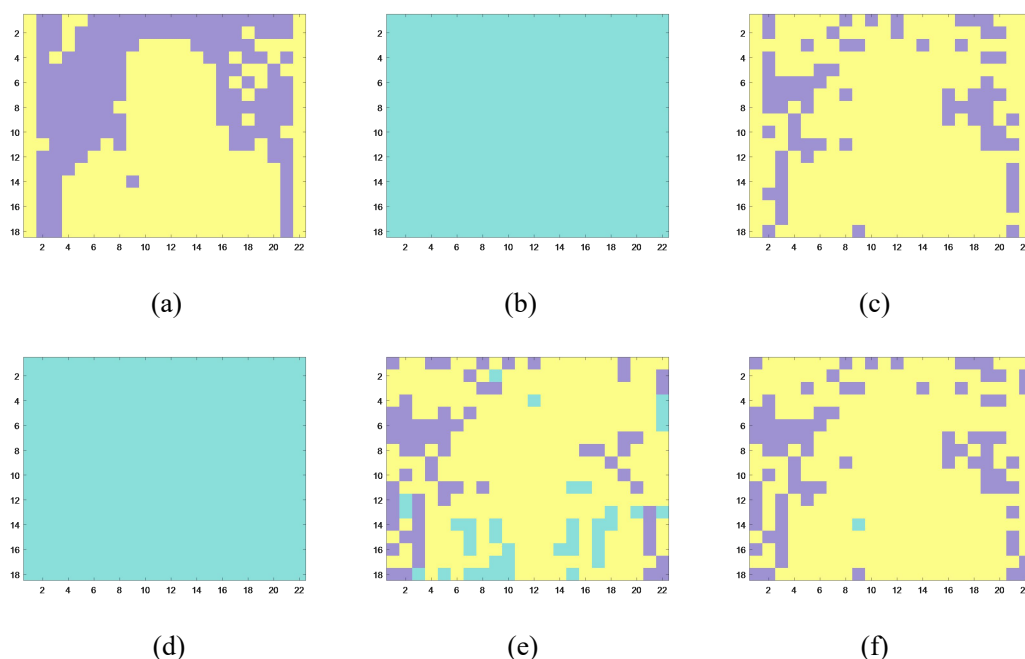


图 4-2 两次压缩第 28/29/30 帧宏块信息。(a)-(c)、(d)-(f)依次为该三帧第一、二次压缩后宏块情况。

其中黄色方块代表 P-MB, 紫色方块代表 S-MB, 蓝色方块代表 I-MB。

(3) 第 42/43/44 帧宏块信息

如下图 4-3, 可以看到, 4-3(e)相比 4-3(d), 蓝色区域增多, 紫色区域减少, 而 4-3(f)与 4-3(e)相比, 蓝色区域减少, 紫色区域增多。即第 43 帧与其前后帧相比, I-MB 数量增加, 同时 S-MB 数量减少。

符合算法描述。

实验发现, VPF 算法的原理表述不够准确, 原表述为: 当发生 I 到 P 的帧类型改变时, 宏块变化特征表现为 I-MB 数量增加, 同时 S-MB 数量减少。符合事实的表述应当为: 当发生 I 到 P 的帧类型改变, 且该 P 帧的前后帧同时为 P 帧时, 宏块变化特征表现为 I-MB 数量增加, 同时 S-MB 数量减少。

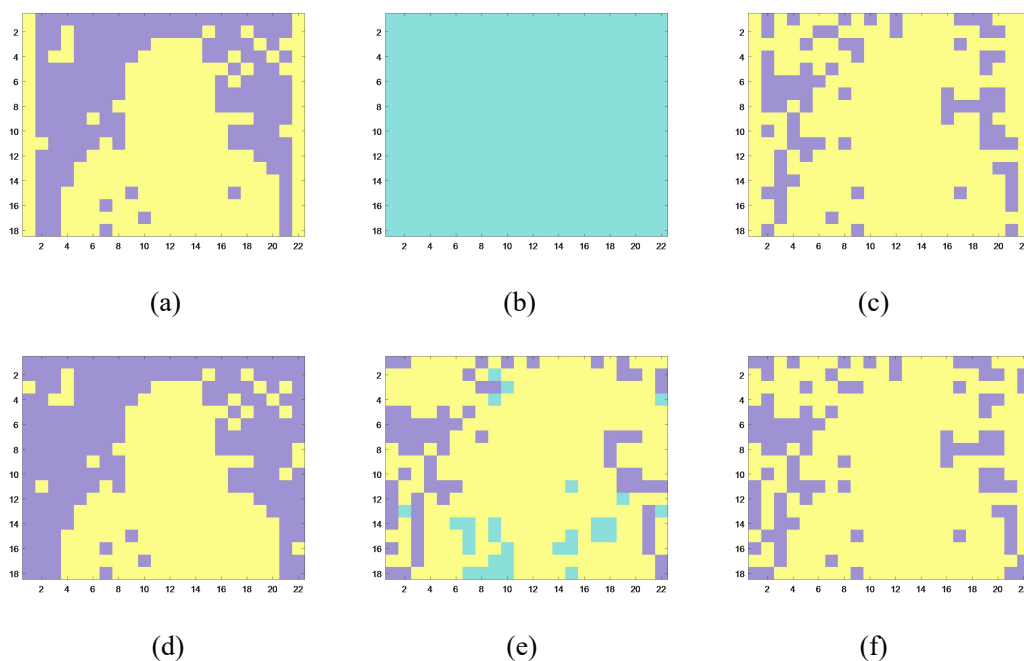


图 4-3 两次压缩第 42/43/44 帧宏块信息。(a)-(c)、(d)-(f)依次为该三帧第一、二次压缩后宏块情况。其中黄色方块代表 P-MB，紫色方块代表 S-MB，蓝色方块代表 I-MB。

2. 压缩参数对算法性能的影响分析

让程序读取实验对象库，输出结果。再将结果与已知数据进行比较，看是否正确识别出了二次压缩视频，是否正确估计了 G_1 值。此处选取了 G_1 命中率（正确估计 G_1 值的概率）作为评价指标，分析 VPF 技术在何种码率控制模式和编码算法下具有较高的性能。

根据测试数据集中的对象的实验结果制成了下表 4-7，利用控制变量法依次来分析两种参数对 G_1 命中率的影响。

表 4-7 G_1 命中率与码率控制模式、编码算法的关系（“/”表示未进行实验）

G1 命中率与码率控制模式、编码算法的关系					
CODE1	CODE2	VBR-VBR	VBR-CRF	CRF-CRF	CBR-CBR
H.264	H.264	80.5	92.4	71.6	91.8
H.264	MPEG-4	56.8	/	/	51.4
H.264	MPEG-2	53.8	/	/	47.6
MPEG-4	H.264	81.4	90.4	/	96.5
MPEG-4	MPEG-4	66.7	/	/	65.2
MPEG-4	MPEG-2	63.6	/	/	55.7
MPEG-2	H.264	71.7	84.1	/	97.3
MPEG-2	MPEG-4	60.4	/	/	66.8
MPEG-2	MPEG-2	62.6	/	/	65.1

(1) 编码算法

选定任一组码率控制模式对作为观察对象，此处选择 VBR-VBR 或者 CBR-CBR，逐行比较命中率，在此种参数限制下，表中用蓝色标记的行所选定的编码算法相比较来说具有更优的表现，在其他参数组合的命中率刚接近甚至不到 60%的情况下，其命中率表现出了断层式的增长。

观察标蓝的编码算法组合，即 H.264-H.264, MPEG-4-H.264, MPEG-2-H.264,发现其具有共同点：第二次编码算法均为 H.264。然而又由于将 H.264 作为第一次编码算法的参数组合表现并不好。

综合可以推出结论：基于 VPF 的视频重压缩检测算法对第二次编码算法为 H.264 的视频相较第二次使用其他编码算法的视频具有更优的检测效果。

(2) 码率控制模式

首先观察 G_1 命中率与码率控制模式的关系。可以看到在控制第一次和第二次编码算法相同的情况下，逐列比较命中率，CBR-CBR 的表现是最优的。所有组合方式求得的最大命中率也出现在 {CBR-CBR, MPEG-2-H.264}。因此可以对四种参数组合的性能高低进行排序：CBR-CBR>VBR-CRF>VBR-VBR>CRF-CRF。

(3) 量化参数

下面在最优码率控制模式组合的基础上，继续分析量化参数取值对算法性能的影响。实验结果如下表 4-8：可以观察到在 R_1 一定时， R_2 越大，算法表现越优异；在 R_2 一定时， R_1 越大，算法表现越普通。所以在这组数据中， R_1 的最优取值=100， R_2 = 900。

表 4-8 在 CBR-CBR 码率控制模式下， G_1 命中率与量化参数的关系

G1 命中率与量化参数的关系 (CBR-CBR)		
R1	R2	命中率 (%)
100	100	99.6
100	500	100
100	900	100
500	100	88.9
500	500	99.8
500	900	100
900	100	73.8
900	500	96.1
900	900	98.6

对该部分实验分析做出总结，即基于 VPF 的视频重压缩检测算法在以下参数设置下具有更优的性能表现：

- 1) 使用 H.264 作为第二次编码算法的视频相较使用其他编码算法进行第二次编

码的视频具有更优的检测效果。

2) CBR-CBR 为最优码率控制模式组合，即对第一次和第二次压缩均采用 CBR 码率控制模式的视频，算法具有更优的检测效果。

3) 在采用 CBR-CBR 作为两次压缩的码率控制模式的基础上，进一步得到第一次压缩量化参数 R1 和第二次压缩量化参数 R2 的较优取值，R1 在较低值、R2 在较高值时具有更优的检测效果。在本实验中求到 R1=100， R2=900。

五、 总结

（一）本文工作总结

首先，本文对基于 VPF 的视频重压缩检测算法的原理、算法思想、算法流程进行了详细的描述，帮助理解该算法。

然后，完成了算法的编写，进行实验并验证得到了该算法在何种参数设置下具有更优的性能表现：即该算法处理哪一类篡改视频时具有更高的检测效率。现对实验结论总结如下：

1) 符合事实的 VPF 算法原理表述应当为：当发生 I 到 P 的帧类型改变，且该 P 帧的前后帧同时为 P 帧时，宏块变化特征表现为 I-MB 数量增加，同时 S-MB 数量减少。

2) 使用 H.264 作为第二次编码算法的视频相较使用其他编码算法进行第二次编码的视频具有更优的检测效果。

3) CBR-CBR 为最优码率控制模式组合，即对第一次和第二次压缩均采用 CBR 码率控制模式的视频，算法具有更优的检测效果。

4) 在采用 CBR-CBR 作为两次压缩的码率控制模式的基础上，进一步得到第一次压缩量化参数 R1 和第二次压缩量化参数 R2 的较优取值，实验表明，R1 取较低值、R2 取较高值时具有更优的检测效果。

（二）未来改进方向

1) 处理两次压缩的 GOP 大小互成倍数关系的视频

由于 VPF 算法是以如下原理为前提：在一个重压缩视频中，当两次压缩所选定的 GOP 参数大小不互成倍数关系时，压缩过程中一定会发生 I 帧被重新编码为 P 帧的情况。再利用这种帧类型改变伴随着的特殊的宏块数目变化特征去开展接下来的工作。因此也意味着 VPF 算法只能检测两次压缩的 GOP 参数大小不互成倍数关系的篡改视频，即对第一次压缩与第二次压缩采用互成倍数 GOP 大小的篡改视频不具有良好的检测效果。

2) 处理包含 B 帧的视频

经过非整数个 GOP 的篡改行为，当 I 帧被二次压缩成 B 帧时，会出现更复杂的宏块类型以及宏块数量异常变化。当前算法还不能处理视频中包含 B 帧的情况，在实验中是通过控制编码的配置文件生成不包含 B 帧的视频，而正常生成的视频一般含有 I 帧、P 帧、B 帧三种帧，改进后的 VPF 算法会具有更加大的实际使用意义。

参考文献

- [1] 段成阁, 倪萍娅, 张国臣等. 浅析监控视频鉴定[J]. 刑事技术, 2012(04): 42-44.
- [2] 黄冰洋. 视频帧编辑篡改检测研究[D]. 天津大学, 2016.
- [3] News[EB/OL]. <https://www.cnbeta.com/articles/tech/940959.htm>.
- [4] 李倩. 数字视频取证关键技术研究[D]. 宁波大学, 2017.
- [5] 陈若寒. 数据取证中视频篡改技术的研究[J]. 电子制作, 2017(22): 61-62.
- [6] 谢丰, 蒋兴浩, 孙铨锋. 视频双压缩检测技术综述[J]. 通信技术, 2017, 50(03): 393-399.
- [7] Wang W, Farid H. Exposing Digital Forgeries in Video by Detecting Double MPEG Compression[C]. Proc. of the 8th ACM workshop on Multimedia and Security, 2006: 37-47.
- [8] 熊潇, 黄征, 徐彻等. 基于预测残差检测的数字视频篡改鉴定[J]. 信息安全与通信保密, 2008(12): 128-130.
- [9] Vazquez-Padin D, Fontani M, Bianchi T, et al. Detection of Video Double Encoding with GOP Size Estimation[C]. Proc. of IEEE International Workshop on Information Forensics and Security, 2012: 151-156.
- [10] Gironi A, Fontani M, Bianchi T, et al. A Video Forensic Technique for Detecting Frame Deletion and Insertion[C]. Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2014: 6226-6230.
- [11] 孙铨锋, 蒋兴浩, 张伟等. 基于宏块类型变化特征的视频帧间篡改检测方法[P]. 上海市: CN105554509B, 2019-01-25.
- [12] FFmpeg[EB/OL]. <http://ffmpeg.org/>.
- [13] Derf's Collection[EB/OL]. <https://media.xiph.org/video/derf/>.

后记

时光荏苒，如白驹过隙，回首收到大学通知书时的喜悦仿佛还在昨天，不知不觉却走到了四年大学生活的结尾。我谨以此篇致谢向这段时光表示感谢。

首先，特别感谢我的毕业论文指导老师曹刚。在毕业设计以及毕业论文撰写过程中，老师给予了我很多的指导和莫大的帮助，在此谨向曹刚老师表达衷心的感谢。我大学期间没有上过曹刚老师的课程，在论文选题时，我几乎一眼看中了曹刚老师的这个选题，进而了解了老师的一些履历，知道他一直在从事相关领域的研究并且有所建树，抱着和老师学习的心态最终选择了这个选题。接触下来，老师身上孜孜不倦的进取精神、对待学术严谨而负责任的态度、踏实的作风令学生深深折服。我还记得老师的一句话：“你们都是特别好的学生，都可以把这个事情做得很好。”曹刚老师总是像大家长一样包容我们的不足，督促我们进步，给予我们很多的支持。师生一场，唯愿今后老师在自己的领域拥有喜人的成就。

其次，非常感谢我的班主任洪志国老师，由于自己本科期间没有学习太多关于数字视频基础的课程，第一反应没敢选现在的论文选题，是洪老师给了我特别多的鼓励，借给我相关课程的书籍补基础，由于疫情原因现在那两本书还躺在我宿舍的书桌上，只待局势明朗的时候回到学校，向老师还书并道一声感谢。

再者，想感谢我大学遇到的一些挚友们，真实而率性的周敏，浪漫且优秀的张海茵，想不出形容词但特别好的洪博弈，超级有领导力的张佳琪，超级幸运这四年有 619 的陪伴，如果可以，我希望以后的每一个 6 月 19 日我们还可以一起纪念，如果可以，我希望和周瑟夫做一辈子的好朋友。还有在新传时报面试我，又恰巧是我后来加入的科技协会社长的张舜尧师哥，考研时期每见一次面都给我很多动力的严润芝师姐，去年送别他们，今年轮到我离开校园了，至此再说一声感谢，感谢遇见。

然后，要感谢为我辛苦付出的我的爸爸和妈妈，以及在我求学过程中给予帮助我的舅舅，舅妈，外公和外婆。终于是长到了理解大人并且可以为他们分担的年纪，以后，换我保护他们。

最后，感谢学校四年的栽培，感谢理工学部计算机与网络空间安全学院所有老师的辛勤付出，在这里我收获了知识，朋友和成长，这四年求学生涯是我人生路上一笔宝贵的财富。虽有遗憾，却也没有虚度时光，一步一步迈得坚实而有力。这四年母校给了我作为中传学子的骄傲，希望来日我也能成为母校的骄傲。

岁月如歌，乘风起航。