

基于熵编码的立体视频加密与信息隐藏算法

高巍^{①②} 蒋刚毅^{*①} 郁梅^① 骆挺^{①②}

^①(宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211)

^②(宁波大学科学技术学院 宁波 315211)

摘要: 针对立体视频的安全性, 该文提出一种基于熵编码的立体视频加密与信息隐藏算法。首先, 结合立体视频编码结构, 分析误差漂移的物理机制, 并根据立体视觉掩蔽效应, 确定左右视点的加密帧和隐秘信息待嵌入帧。其次, 在基于上下文自适应二进制算术编码(CABAC)的熵编码中, 通过等长码字替换技术, 实现立体视频的加密和信息隐藏。实验结果表明, 视频码流经加密与信息隐藏之后格式兼容、比特率不变, 视频感知质量无明显下降, 在计算复杂度和码率增加率上有显著优势。

关键词: 立体视频编码; 分层次B帧预测; 隐秘域信息隐藏; 熵编码

中图分类号: TN911.73; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)09-2158-08

DOI: 10.11999/JEIT190345

A Steganography Algorithm in Encrypted Stereoscopic Video Based on Entropy Coding

GAO Wei^{①②} JIANG Gangyi^① YU Mei^① LUO Ting^{①②}

^①(Faculty of Information Sciences and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

^②(College of Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: For security of stereoscopic video, a video encryption and information hiding algorithm based on entropy coding is proposed. Firstly, with the analysis of Multi-view Video Coding (MVC), the physical mechanism of error drift is investigated. By applying the stereoscopic masking effect, the frames to be encrypted and the frames to be embedded are determined. Secondly, by using a Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding (CABAC) bin-string substitution technique, the encryption and data hiding of stereoscopic video are implemented. Experimental implementation reveals that the video stream has the format compatibility and the bit-rate remains unchanged after encryption and data hiding. The video quality degradation is negligible. The algorithm has significant advantages in computational complexity and rate increase.

Key words: Stereoscopic video; Hierarchical B Picture (HBP); Data hiding in encrypted domain; Entropy coding

1 引言

视频显示技术已从2D发展到3D立体^[1], 在为用户提供沉浸式视觉感知的同时, 也产生了立体视频内容的安全性、真实性及知识产权保护等新问题。如何提供针对3维视频的信息隐藏解决方案^[2], 成为促进立体视频技术应用而需要解决的难题。另一方面, 随着移动互联网和云存储的快速发展, 为

满足数据安全和隐私保护的需要, 敏感视频数据在完成压缩编码之后会以加密方式存储和分发。而数据管理员, 如云服务提供商, 则出于篡改检测、所有权声明或版权管理目的, 需要将一些附加消息, 如标记、认证数据或所有者身份信息等嵌入到加密视频中, 这被称为加密域的信息隐藏^[3]。由于加密数据不同于原始数据, 也给传统的信息隐藏方法增加了难度。

本文研究的是立体视频的加密域信息隐藏。目前国内外立体视频的加密域信息隐藏相关研究还比较缺乏, 已有的研究主要集中在单纯的信息隐藏领域。如Song等人^[4]提出在3D多视点编码(Multi-View Coding, MVC)结构的B4帧中, 利用运动矢量残差

收稿日期: 2019-05-16; 改回日期: 2020-03-20; 网络出版: 2020-07-01

*通信作者: 蒋刚毅 jianggangyi@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671258, 61871247, 61931022, 61971247)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671258, 61871247, 61931022, 61971247)

(Motion Vector Difference, MVD)或非零量化变换系数(Quantized Transform Coefficients, QTC)^[5]来隐藏秘密数据。但由于B4帧存在大量不携带参数的SKIP宏块,因此算法实际可嵌入容量偏小。Li等人^[6]提出了利用矩阵编码与无数据量扩大秘密共享技术的立体视频水印方法。王静^[7]提出了3D-HEVC帧间信息隐藏算法,利用立体显著模型调制量化参数(Quantization Parameter, QP)来嵌入隐秘信息。Shafai等人^[8]提出了针对3D视频的混合水印算法,分别嵌入在小波变换域和余弦变换域中。这3个算法^[6-8]或需要事先记录视点间参考信息,或需要重编码,均不适合有实时性要求的场合,比如视频广播,IP-TV和数字影音。Zhao等人^[9]提出了针对立体视频的新颖3维直方图移位算法,算法具有优越的有效载荷失真性能,但没有探讨立体编码中的帧间失真漂移问题。

本文结合立体视频编码标准,提出一种基于上下文自适应二进制算术编码(Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding, CABAC)的立体视频加密与信息隐藏算法。利用了分层次B帧预测(Hierarchical B Picture, HBP)的编码结构特点,并根据双视点的立体掩蔽效应,通过熵编码的等长

码字替换技术,实现立体视频的加密和信息隐藏。在不影响立体视频感知质量的前提下,维持了立体视频码流的比特率,而隐藏信息可以选择在加密域或者解密域提取,以适用不同的应用场合。

2 基于CABAC熵编码的立体视频加密与信息隐藏算法

本文提出的算法框架如图1,图2所示。图1中,在对H.264或HEVC标准编码的立体视频码流进行熵解码之后,通过操作运动矢量残差(MVD)和非零变换系数(QTC)的符号位,实现视频加密。而后对采用指数哥伦布编码的MVD后缀部分,应用二进制串码字等长替换方法,实现信息隐藏。加密和信息隐藏都在CABAC旁路编码模式下完成,视频管理者可以直接在加密的视频中嵌入认证或标记信息,即便未被授权查看原始视频内容。这将解决视频内容安全和隐私保护相冲突的问题。图2所示为嵌入信息的提取,可根据应用场景不同选择在加密域或解密域中进行,为隐藏的逆过程。

2.1 立体编码结构的分析与嵌入帧的选择

图3所示为基于分层次B帧预测(Hierarchical B Picture, HBP)的立体视频编码结构,被纳入MPEG

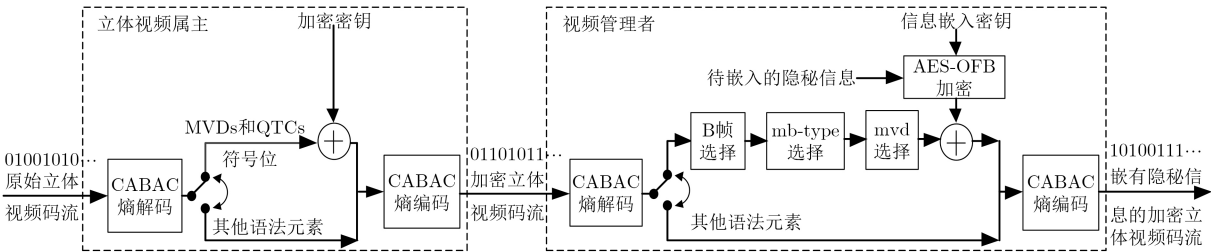


图1 基于CABAC熵编码的立体视频加密与信息隐藏算法框图

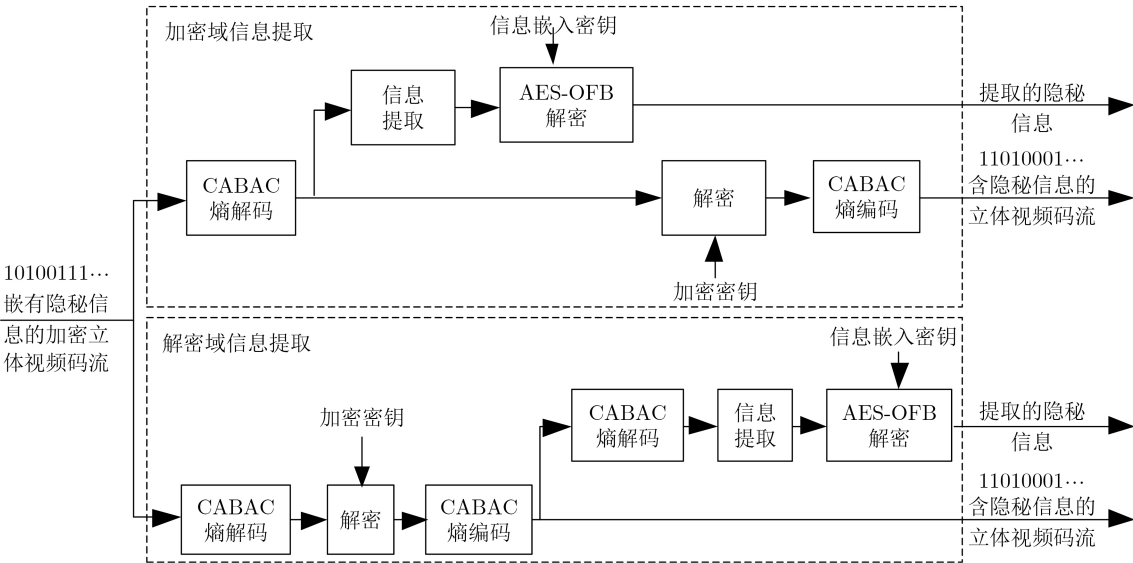


图2 立体视频加密域或解密域中的信息提取框图

的编码标准草案。箭头的方向表示编码帧所对应的参考帧。I表示帧内预测编码帧，P帧为单向帧间/视点间预测的编码帧，I/P帧(白/灰色)组成了图像组(Group Of Pictures, GOP)的关键帧，GOP中的其余帧为B帧编码方式。B帧采用双向预测，在HBP预测结构中B帧参考比其自身层数低的B帧。从该图中可知，立体视频编码在保证时域压缩的同时引入了视点间预测，因此比起单视点视频编码进一步提高了压缩效率。

由于H.264/HEVC视频编码标准在编码过程中使用了预测过程来提升编码效率，这使得在压缩域中的微小改变将造成误差漂移，并且会不断传播和累加起来，从而引起明显的视频失真。文献[6]提出了针对HBP预测结构的误差漂移级数概念。如图3所示，数字0~3分别表示对应的漂移级数。级数值越大，漂移程度越低。B4帧因不被其他编码帧参考，故不在漂移级数之列，可作为信息隐藏的首选嵌入空间。左视点的B3帧，因其被右视点参考的比例较低，且漂移级数靠后，也可作为信息隐藏嵌入域。而右视点B3帧，虽会影响右视点B4帧的参考，但人类视觉系统特性的研究表明^[10]，双通道的合成视觉质量由其中质量好的通道决定，这被称为立体掩蔽效应。而采用左右通道不对称的信息隐藏嵌入方式，可利用立体掩蔽效应进一步挖掘立体感知冗余，从而获得更好的信息隐藏性能。综合上述因素，本文算法选择左视点B3帧与右视点的B3和B4帧作为隐秘信息的嵌入域。

2.2 CABAC熵编码下的加密与信息隐藏

H.264/AVC标准的熵编码可采用基于上下文的自适应二进制算术编码(CABAC)，而高效视频编码(HEVC)标准的熵编码唯一采用CABAC技术。CABAC熵编码过程分为语法元素二进制化，以及二进制比特流(bins)算术编码两个步骤。其中算术编码又分为基于上下文模型的常规算术编码和采用近似等概率模型的旁路算术编码。

2.2.1 CABAC熵编码下的视频加密

在CABAC熵编码中，使用旁路编码模式的语

法元素包括DCT变换后非零量化系数QTC的符号位，以及帧间预测时运动矢量残差MVD的符号位。改变这两者的符号位可对解码端的视频重建产生明显的感知扰乱效应，但对码流结构不产生任何影响。为保护视频纹理信息和运动信息，本文算法将同时加密QTC和MVD的符号位。

2.2.2 CABAC熵编码下的信息隐藏

由于信息隐藏应用于已加密的视频中，数据嵌入不应影响已加密的QTC和MVD符号位。本算法选取运动矢量残差MVD的二值化串(bins)作为信息隐藏域。

(1) MVD的选取：MVD绝对值(幅值)的二值化采用的是UEGK(Unary/Kth order Exp-Golomb)二值化方案。生成的序列由前缀和后缀两部分串接而成，即

$$y(x) = f_c(f_{TU}(\min(U_{\text{coff}}, \text{abs}(x))) + f_{\text{EGK}}(x - U_{\text{coff}})) \quad (1)$$

式中 $y(x)$ 表示语法元素 x 的UEGK二值化序列，它含经截断码TU二进制化得到前缀部分和经 k 阶指数哥仑布编码(EGK)得到的后缀部分。式中 U_{coff} 为UEGK的截断值， $f_c(\cdot)$ 函数实现前缀和后缀部分的串接。对于给定的变量 t ， k 阶指数哥仑布编码计算如式(2)所示，它包括经一元码转换函数 $f_u(\cdot)$ 得到的前缀部分，和经二进制转换函数 $f_b(\cdot)$ 得到的后缀部分。

$$\left. \begin{aligned} l(t) &= \lfloor \log_2(t/2^k + 1) \rfloor \\ f_{\text{EGK}}(t) &= f_c \left(f_u(l(t)) + f_b \left(t + 2^k(1 - 2^{l(t)}) \right) \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

MVD幅值使用截断值为9，阶数为3的UEG3二值化方案。表1显示了MVD幅值对应的二值化串(bins)。当 $|MVD| \geq 9$ 时，每两个相邻的二进制串可以形成长度相同的匹配对。而 $|MVD| \geq 9$ 时，其基于EG3编码的后缀部分采用旁路编码模式。

同时，MVD幅值的前缀采用常规编码模式，即需要计算上下文索引(ctxIdx)以选择上下文模型。而ctxIdx值受制于上下文索引增量ctxIdxInc，对于 $|MVD|$ 二值化串的第1个比特位，ctxIdxInc推导如式(3)

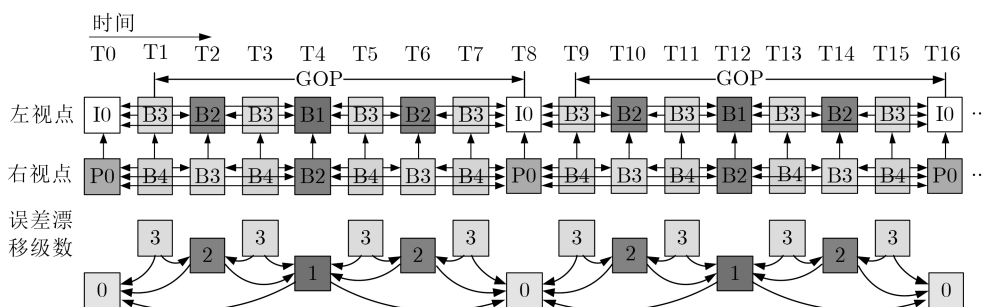


图 3 立体视频编码中的HBP预测结构和误差漂移级数

$$\text{ctxIdxInc} = \left\{ \begin{array}{l} 0, e(A, B, \text{cmp}) < 3 \\ 1, 3 \leq e(A, B, \text{cmp}) \leq 32 \\ 2, e(A, B, \text{cmp}) > 32 \end{array} \right\}$$

$$\text{with}(A, B, \text{cmp}) = |\text{mvd}(A, \text{cmp})| + |\text{mvd}(B, \text{cmp})| \quad (3)$$

式中 A 和 B 是当前块左侧和上方的邻块, $|\text{mvd}(A, \text{cmp})|$ 和 $|\text{mvd}(B, \text{cmp})|$ 表示方向 $\text{cmp} \in \{\text{水平}, \text{垂直}\}$ 的MVD分量的绝对值。根据式(3), 大于32的 $|\text{MVD}|$ 值改变, 因 $\text{ctxIdxInc} \equiv 2$, 而不影响后续块 $|\text{MVD}|$ 的前缀部分上下文模型。为此, 根据表1将 $|\text{MVD}| > 32$ 的二进制串分成空间C0和C1, 如表2所示。通过C0和C1中的二进制串互为替换可实现数据的嵌入。

假设要嵌入的信息为使用密钥加密之后的二进制序列 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_i\}$, $m_i \in [0, 1]$, 如果当前MVD幅值属于空间C0或C1, 则可通过二进制串替换嵌入 m_i 信息

$$|\text{mvd}|_e = \begin{cases} |\text{mvd}|, & m_i == 0 \& |\text{mvd}| \in \text{C0} \\ |\text{mvd}|_p, & m_i == 1 \& |\text{mvd}| \in \text{C0} \\ |\text{mvd}|, & m_i == 1 \& |\text{mvd}| \in \text{C1} \\ |\text{mvd}|_p, & m_i == 0 \& |\text{mvd}| \in \text{C1} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $|\text{mvd}|_e$ 为嵌入隐秘信息之后的二进制串, $|\text{mvd}|_p$ 是与当前 $|\text{mvd}|$ 配对的二进制串。相同长度

表1 CABAC下MVD幅值的UEG3二值化串

abs(MVD)	Bin-string	
	TU prefix	EG3 suffix
0	0	
⋮	⋮	
8	111111110	
9	111111111	0000
10	111111111	0001
⋮	⋮	⋮
17	111111111	100000
18	111111111	100001
⋮	⋮	⋮
33	111111111	11000000
34	111111111	11000001
⋮	⋮	⋮

表2 MVD幅值的二进制串对

C0		C1	
abs(MVD)	EG3	abs(MVD)	EG3
33	110 00000	34	110 00001
35	110 00010	36	110 00011
⋮	⋮	⋮	⋮

的二进制串替换, 维持了网络抽象层单元的长度不变。

(2)宏块分割的选择: H.264和HEVC帧间运动估计时都支持编码单元多分割预测模式, 以H.264为例, 每个 16×16 的宏块可以被划分成4种尺寸的分割块, 即 16×16 , 16×8 , 8×16 和 8×8 。为分析数据嵌入在不同的宏块分割中对视频质量的影响, 通过实验分别统计了 16×16 , 16×8 和 8×16 , 8×8 分割情况下修改 $|\text{MVD}|$ 造成的视觉质量衰减程度, 如图4所示。

为排除帧间漂移的干扰, 实验选用单视点的IBPBI编码结构, 视频质量评价指标选用峰值信噪比PSNR, 图4中 ΔPSNR_e 定义为

$$\Delta \text{PSNR}_e = \frac{\text{PSNR}_{\text{H.264}} - \text{PSNR}_e}{C_e} \quad (5)$$

这里 C_e 代表数据嵌入容量, 单位bit。从图中可知, 16×16 的分割相比其它两种情况, PSNR衰减幅度更大, 这是因为首先, MVD的修改如果作用在越大的分割尺寸上, 该分割重建之后产生的视觉失真范围也越大。其次, H.264采用运动矢量预测技术, 用邻近已编码块来预测出当前编码块的MV来进一步降低传输码率。越大的分割尺寸, 其被临近宏块/子宏块作为参考块的可能性也越大。

综合嵌入容量和视觉失真的权衡, 本文算法在左视点的B3帧和右视点的B4帧, 选择所有4种子宏块分割进行数据嵌入, 而在帧间漂移影响较大的右视点B3帧中, 数据嵌入域排除了 16×16 分割。

2.3 算法提出

本文提出一种在加密的立体视频中的信息隐藏算法, 其中为提高数据嵌入的安全性, 可采用输出反馈模式 (OFB) 的AES加密对隐秘信息先行预处理。

2.3.1 视频加密

在基于HBP预测结构的立体视频编码中, 每一个GOP内编码顺序为IPIPBBBB..., 其中I帧和P帧是后续B帧编码的基础, 加密算法将作用于所有视频帧中。具体步骤如下:

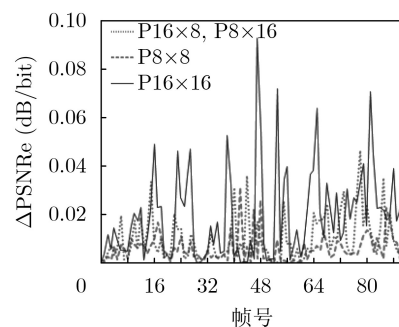


图4 不同子宏块的数据嵌入对B帧视频质量影响(Akko&Kayo)

步骤1 利用加密密钥生成二值伪随机序列 $R=\{r_1, r_2, \dots, r_i\}, r_i \in [0, 1]$ 。

步骤2 通过熵解码, 获得原始立体视频码流的二进制串。

步骤3 将非零QTC符号位 S_{QTC_i} 和非零MVD符号位 S_{MVD_i} 的二进制串进行比特异或运算, 得到加密后的 S'_{QTC_i} 和 S'_{MVD_i}

$$\left. \begin{aligned} S'_{QTC_i} &= S_{QTC_i} \oplus r_i \\ S'_{MVD_i} &= S_{MVD_i} \oplus r_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

步骤4 将修改的二进制串进行熵编码。

步骤5 重复步骤3—步骤5, 直至视频码流结束, 获得加密域的立体视频。

2.3.2 数据嵌入

在已加密的立体视频码流中, 根据2.2.2节选择嵌入域。步骤如下:

步骤1 利用嵌入密钥对隐秘信息进行AES-OFB模式加密处理, 得到待嵌入的二进制序列 $M=\{m_1, m_2, \dots, m_i\}, m_i \in [0, 1]$ 。

步骤2 通过熵解码, 获得加密的立体视频码流的二进制串。

步骤3 在一个GOP内, 如果视点为0, 选择B3帧。如果视点为1, 选择B3帧和B4帧, 并排除B3帧中 16×16 分割。然后, 对于其中 $|MVD| > 32$, 依据式(4), 依据待嵌入的隐秘信息 m_i 值, 对 $|MVD|$ 作二进制串替换。

步骤4 将替换过的二进制串进行熵编码。

步骤5 重复步骤2—步骤4, 直至数据嵌入完毕, 得到了含有隐秘信息的加密域立体视频。

2.3.3 数据提取

数据提取根据不同的应用场景, 也可分为加密域提取和解密域提取两种独立的情况。

(1) 加密域的数据提取: 为保护隐私, 某一级别的视频管理员可能仅拥有数据嵌入密钥并且必须在加密域中提取数据以跟踪视频来源。在这种情况下, 加密视频被直接用来提取数据, 步骤如下:

步骤1 通过熵解码, 获得含隐秘信息的加密立体视频码流的二进制串。

步骤2 同数据嵌入步骤3, 步骤4的筛选条件, 识别对应B帧中大于32的 $|MVD|$, 则有

$$m_i = \begin{cases} 1, & |MVD| \in C1 \\ 0, & |MVD| \in C0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, m_i 是提取的隐秘信息, 其可以根据嵌入密钥进一步解密来提取原始隐藏信息。

(2) 解密域的数据提取: 在另一类场景下^[11], 拥有加密密钥的授权用户需使用加密密钥对接收的视频先进行解密。而仍然包含隐秘信息的解密视频, 则可进一步提取数据用于跟踪视频来源, 其步骤如下:

步骤1 采用与加密步骤3相同的步骤, 利用异或运算的可逆性, 对接受的视频码流进行解密, 恢复原始 S_{QTC_i} 和 S_{MVD_i} , 获得解密的含隐秘信息的立体视频码流;

步骤2 解码域的数据提取, 操作过程和加密域的数据提取相同, 具体步骤不再赘述。

3 实验结果及分析

本文提出的算法在H.264/AVC的参考软件JM18.5上进行仿真, 实验中所用立体测试序列如图5所示。分辨率为 640×480 , 帧率为30 fps, 具有不同的场景和运动, 以代表实际应用中的各种情况。编码的帧结构如图3所示, 实验编码12个GOP, 共96帧。JM软件的编码配置参数: Intra周期为8, IDR周期为16, QP(I,P,B)为(18,18,20), 其余为默认值。

3.1 视频加密

实验通过间隔修改QTC和MVD符号位的方式, 观察视频加密算法对视频的视觉扰乱效果, 由于左右视点效果差别不大, 图6仅选取了左视点来观察加密后的主观效果。从图6可知, 加密后的视频具有较明显的不可辨识性。其中QTC的加密对静态纹理背景扰乱效果较好, 而MVD的加密对动态物体的扰乱更明显。

图7列出了5个不同的测试序列在加密前后的PSNR变化, PSNR值越小, 表示视频质量衰减越大。加密前后, PSNR从40 dB以上大幅度下降到10 dB左右, 一定程度上反映了显著的视觉扰乱效果。

3.2 信息隐藏

在立体视频可嵌入域中, 间隔修改MVD幅值的二进制串, 观察在最大数据嵌入容量下算法对立



图5 测试序列快照 (左视点第1帧)

体编码性能的影响; 具体考察视频质量评价、数据嵌入容量和比特率变化等指标。

(1) 视觉质量评价: 实验统计了各个立体视频序列数据嵌入前后的PSNR变化, 限于篇幅, 本文列出了5个测试序列中PSNR衰减最大的Akko&Kayo序列, 如图8所示。嵌入前后左视点PSNR没有明显的下降, 而右视点则有了一定程度的衰减, 96帧平均PSNR衰减为0.4352 dB, 局部最大达到1.3 dB。这是因为左视点仅在B3帧上嵌入隐秘信息, 而右视点嵌入在B3和B4帧。并且B4帧同时受帧间和视点间失真漂移的影响, 重建的图像存在更大失真的概率。

根据Wang等人^[12]研究得出的立体掩蔽效应, 对于立体图像, 当右视点的PSNR值比左视点低2 dB, 且左视点图像PSNR值在32 dB以上时, 相比较左右视点质量相同的立体图像, 主观感知上无明显差别。本算法尽可能维持了左视点的保真度。同时, 在图8中对比左右视点, 会发现右视点重建帧即便在极端情况下, PSNR的下降也没有超过2 dB, 因此方案的数据嵌入并没有实际造成立体视频感知质量的下降。

为评估信息隐藏算法的性能, 除了PSNR, 还引入结构相似度(Structural SIMilarity, SSIM)^[13]和视频质量度量(Video Quality Measurement techniques, VQM)^[14]两个客观评价指标。实验结果如表3所示。

从表3中可知, 测试序列在嵌入数据之后SSIM值仍维持在0.95之上, 而VQM值在数据嵌入前后的变化也较小, 可见嵌入信息对视频质量影响不大。而从人眼实际视觉观察来看, 隐藏信息的视频帧和原始视频帧也几乎无差别, 这确保了信息隐藏的透明度。

(2) 数据可嵌入容量: 实验分别统计了各个立体测试视频序列的可嵌入隐秘信息容量, 并用嵌入比特数表示。12个GOP的总嵌入容量可见表3, 图9所示为各序列的嵌入容量对比。其嵌入容量的差异是由测试序列不同画面内容所决定。背景变化较快的视频片段, 相比较背景变化缓慢的视频片段, 可产生更多符合数据嵌入条件的MVD。由于本算法是在视频压缩域嵌入数据, 受视频编码高压缩率的约束, 数据可嵌入空间小, 因此和传统的信息隐藏方案相比, 本算法可嵌入容量不占优势, 但考虑

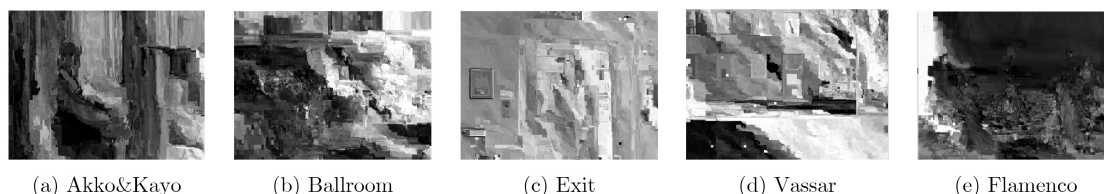


图6 加密的视频帧快照(左视点第10帧)

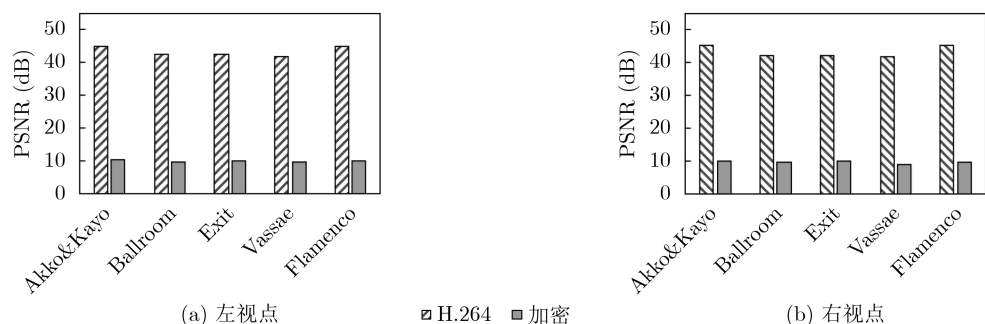


图7 各个测试序列加密前后PSNR变化

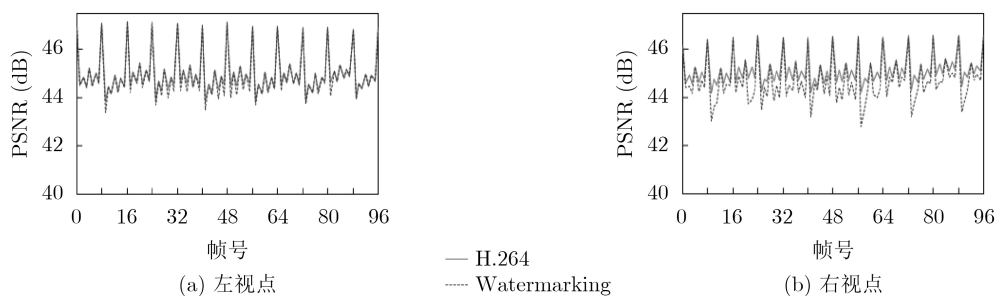


图8 解密后含隐秘信息的立体视频与原始立体视频编码PSNR对比(Akko&Kayo)

表 3 各立体测试序列数据嵌入前后视频质量评价指标

序列	视点	嵌入容量(bit)	PSNR		SSIM		VQM	
			标准编码	本文算法	标准编码	本文算法	标准编码	本文算法
Akko&Kayo	0	1555	44.98	44.90	0.9879	0.9879	0.5179	0.5357
	1	3241	45.13	44.67	0.9884	0.9881	0.5262	0.6221
Ballroom	0	3534	42.33	42.27	0.9805	0.9805	0.7553	0.7862
	1	5777	42.07	41.86	0.9793	0.9790	0.7567	0.8594
Exit	0	620	42.36	42.36	0.9673	0.9673	0.8138	0.8146
	1	2136	42.26	42.20	0.9663	0.9661	0.8264	0.8660
Vassar	0	492	41.89	41.88	0.9657	0.9657	0.7802	0.7865
	1	1087	41.82	41.77	0.9644	0.9643	0.7910	0.8273
Flamenco	0	1300	44.87	44.86	0.9871	0.9871	0.5892	0.5953
	1	4905	45.41	45.10	0.9882	0.9881	0.5458	0.5937

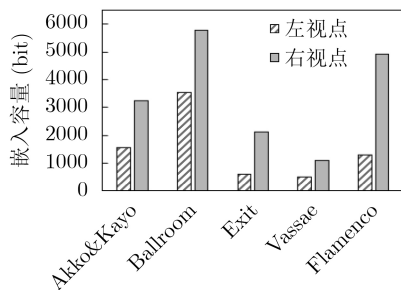


图 9 各立体测试序列可嵌入数据容量

到实际应用中,不同于图像,视频具有连续多帧播放的特点,因此事实上视频的可嵌入容量一般都大于可满足的水平。

(3) 比特率变化:为评价信息隐藏算法对码率产生的影响,引入比特率变化率(BIR),定义为

$$\text{BIR} = \frac{\text{BR}_e - \text{BR}_o}{\text{BR}_o} \times 100\% \quad (8)$$

其中, BR_o 与 BR_e 分别表示数据嵌入前后的视频流比特率。本算法如2.2.节所述,无论是加密还是数据嵌入,视频的比特率都保持不变。

3.3 算法比较

针对前述的几个立体测试序列,分别选取了文献[4]和文献[9]算法作对比实验。表4给出了3个算法

的性能对比数据。表4中PSNR由统计两个视点所有帧的平均值得到,总体上3个算法的PSNR都比较接近。图10中统计了每个算法相比H.264/AVC编码的视频质量衰减值 ΔPSNR 。文献[9]算法选取了其文中所提的 B_4 -interMB方案,并嵌入同本文算法相同的数据容量作对比。从图10中观察,其 ΔPSNR 较小。而文献[4]满足其可嵌入条件的容量少,因此 ΔPSNR 也比本文方法低。但从图10可知,本算法与另两者算法差别仍在可接受的范围。

各算法的最大可嵌入数据容量如图11所示。其中,文献[4]容量最低。需要说明的是,文献[9]虽然具有比其他算法更高的嵌入容量,但当嵌入容量超过1000 bit时,PSNR已经低于38 dB,出现明显的视觉质量下降。图12所示为各算法比特率变化率BIR。本算法保持码率不变,另外两个算法改变的语法元素值,都将影响熵编码时上下文,从而增加码流比特率。其中文献[9]的BIR最大。

4 结论

本文提出了一种基于熵编码CABAC的立体视频加密与信息隐藏算法。采用本算法可实现在不影响视频机密性的前提下对视频进行后期管理和版权标注。隐藏信息的提取可选择在加密域或解密域中

表 4 本文方法与文献[4]和文献[9]的性能对比

序列	PSNR(dB)			数据可嵌入容量(bit GOP)			BIR($\times 10^{-5}$)		
	文献[4]	文献[9]	本文	文献[4]	文献[9]	本文	文献[4]	文献[9]	本文
Akko&Kayo	44.903	45.012	44.788	122	1341	400	13.468	56.146	0.000
Ballroom	42.105	42.116	42.067	136	1700	776	12.831	71.329	0.000
Exit	42.282	42.243	42.280	114	1556	230	13.694	59.004	0.000
Vassar	41.832	41.788	41.826	96	1802	132	18.244	59.786	0.000
Flamenco	45.017	45.024	44.982	154	1211	517	17.344	51.969	0.000
Crowd	42.885	42.983	42.743	133	1693	425	17.682	59.682	0.000

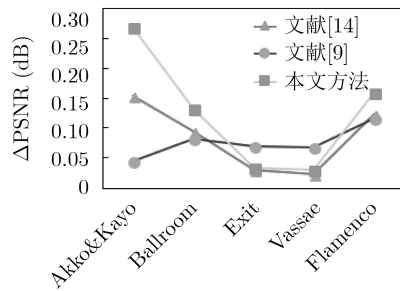


图10 本文方法与文献[4]和文献[9]的ΔPSNR比较

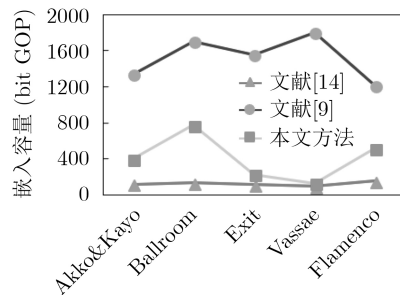


图11 最大可嵌入数据容量对比(bit GOP)

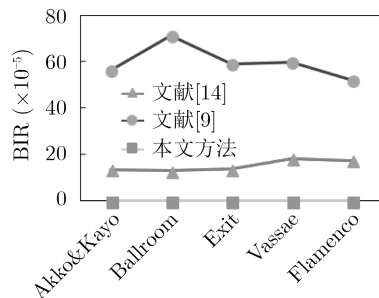


图12 各算法的比特率变化率BIR (×10⁻⁵)

分别进行, 以适合不同的使用场景。实验结果表明, 本文算法在维持立体视频码流不变和格式兼容的前提下, 未因信息隐藏而引起显著的视频质量下降, 具有计算复杂度低, 码率稳定性好, 实时性强的特点。算法同样适用于3D-HEVC视频加密与信息隐藏。

参考文献

- [1] WIEN M, BOYCE J M, STOCKHAMMER T, *et al.* Standardization status of immersive video coding[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2019, 9(1): 5–17. doi: [10.1109/JETCAS.2019.2898948](https://doi.org/10.1109/JETCAS.2019.2898948).
- [2] GAO Wei, JIANG Gangyi, YU Mei, *et al.* Lossless fragile watermarking algorithm in compressed domain for multiview video coding[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(8): 9737–9762. doi: [10.1007/s11042-018-6538-8](https://doi.org/10.1007/s11042-018-6538-8).
- [3] XU Dawen, WANG Rangding, and ZHU Yani. Tunable data hiding in partially encrypted H. 264/AVC videos[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2017, 45: 34–45. doi: [10.1016/j.jvcir.2017.02.008](https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2017.02.008).
- [4] SONG Guanghua, LI Zhitang, ZHAO Juan, *et al.* A reversible video steganography algorithm for MVC based on motion vector[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2015, 74(11): 3759–3782. doi: [10.1007/s11042-013-1798-9](https://doi.org/10.1007/s11042-013-1798-9).
- [5] SONG Guanghua, LI Zhitang, ZHAO Juan, *et al.* A data hiding algorithm for 3D videos based on inter-MBs[C]. The 10th International Conference on Intelligent Computing Theory, Taiyuan, China, 2014: 541–552. doi: [10.1007/978-3-319-09333-8_60](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09333-8_60).
- [6] LI Wenfeng, JIANG Gangyi, and LUO Ting. A watermarking algorithm for 3D videos stream based on spatiotemporal correlation[C]. 2015 International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering, Zhengzhou, China, 2015: 680–688. doi: [10.2991/isrme-15.2015.136](https://doi.org/10.2991/isrme-15.2015.136).
- [7] 王静. 三维视频信息隐藏技术及其应用研究[D]. [硕士学位论文], 宁波大学, 2017.
WANG Jing. The research of three-dimensional video information hiding technology and its application[D]. [Master dissertation], Ningbo University, 2017.
- [8] EL-SHAFAI W, EL-RABAI S, EL-HALAWANY M M, *et al.* Efficient hybrid watermarking schemes for robust and secure 3D- MVC communication[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2018, 31(4): e3478. doi: [10.1002/dac.3478](https://doi.org/10.1002/dac.3478).
- [9] ZHAO Juan and LI Zhitang. Three-dimensional histogram shifting for reversible data hiding[J]. *Multimedia Systems*, 2018, 24(1): 95–109. doi: [10.1007/s00530-016-0529-2](https://doi.org/10.1007/s00530-016-0529-2).
- [10] SHAO Feng, LI Kemeng, LIN Weisi, *et al.* Using binocular feature combination for blind quality assessment of stereoscopic images[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(10): 1548–1551. doi: [10.1109/LSP.2015.2413946](https://doi.org/10.1109/LSP.2015.2413946).
- [11] XU Dawen, WANG Rangding, and SHI Y Q. Data hiding in encrypted H. 264/AVC video streams by codeword substitution[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2014, 9(4): 596–606. doi: [10.1109/TIFS.2014.2302899](https://doi.org/10.1109/TIFS.2014.2302899).
- [12] WANG X, JIANG G Y, ZHOU J M, *et al.* Visibility threshold of compressed stereoscopic image: Effects of asymmetrical coding[J]. *The Imaging Science Journal*, 2013, 61(2): 172–182. doi: [10.1179/1743131X11Y.0000000035](https://doi.org/10.1179/1743131X11Y.0000000035).
- [13] WANG Zhou, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600–612. doi: [10.1109/TIP.2003.819861](https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861).
- [14] XIAO Feng. DCT-based video quality evaluation[R]. Final Project for EE392J, 2000.

高巍: 男, 1969年生, 博士生, 讲师, 研究方向为3D视频信息隐藏。
蒋刚毅: 男, 1964年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为多媒体信号处理与通信、3D视频系统编码与传输、图像与视频质量评价、信息隐藏。
郁梅: 女, 1968年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为多媒体信号处理与通信研究。
骆挺: 男, 1980年生, 博士, 副教授, 研究方向为多媒体信息隐藏。

责任编辑: 陈倩