

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2023.03.008

基于亮度残差的 EVC 视频编码的快速 CU 划分算法

陈思佳¹, 李 跃², 林文斌^{1,2*}

(1. 南华大学 数理学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学计算机学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:基本视频编码标准(essential video coding, EVC)采用了新的四叉树与嵌套多叉树(quadtree plus multi-type tree, QTMT)分区结构,使视频编码的效率大大提高,其中 QTMT 包括四叉树分区、水平和垂直二叉树分区以及水平和垂直三叉树分区。然而,随着编码效率的提高,编码的复杂度也在增加。根据 EVC 编码单元(coding unit, CU)的亮度残差值设计了一种全新的 CU 快速划分算法, CU 的亮度残差值是由原始亮度值和预测亮度值之间的差异得到的,利用残差值,建立了一个 CU 提前终止模型,有效地降低了编码的复杂性。大量的实验结果表明,本文提出的方法平均减少了 31.56% 的编码时间,而 Bjøntegaard delta rate 的增加也是较小的。

关键词:EVC; CU 大小; 四叉树划分; 二叉树划分; 三叉树划分

中图分类号:TN919.81 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2023)03-0052-07

Residual-Based Fast CU Partitioning Algorithm for EVC

CHEN Sijia¹, LI Yue², LIN Wenbin^{1,2*}

(1. School of Mathematics and Physics, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2. School of Computer Science, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Essential video coding (EVC) uses a new quadtree with a nested multitype tree (QTMT) partition structure, resulting in much more efficient video encoding, including Quadro tree partitions, horizontal and vertical binary tree partitions, and horizontal and vertical trinomial tree partitions. However, as the coding efficiency increases, the coding complexity also increases. This study proposes an EVC coding unit (CU) size partitioning method based on CU residual values. The distortion of the CU is obtained from the difference between the original luminance pixels and the predicted pixels. Using the distortion, a CU partitioning early termination model is established, which effectively reduces the cod-

收稿日期:2023-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(62001209)

作者简介:陈思佳(1997—),女,硕士研究生,主要从事深度学习和强化学习方面的研究。E-mail:1053628529@qq.com。
*通信作者:林文斌(1970—)男,教授,博士,主要从事深度学习与强化学习等方面的研究。
E-mail:lwb@usc.edu

ing complexity. Experimental results show that the proposed method in this paper reduces the coding time by 31.56% on average, and the Bjøntegaard delta rate increases little.

key words: EVC; CU size; quadtree partitioning; binomial tree partitioning; trinomial tree partitioning

0 引 言

随着视频设备和技术的快速发展,新的视频类型,如超高清(high definition, HD)、高动态范围(high dynamic range, HDR)和虚拟现实(virtual reality, VR)已经出现。随着市场对高分辨率视频需求的不断增长,视频压缩编码的采用和应用面临着巨大的挑战,迫切需要建立能够很好支持高分辨率的下一代视频编码标准。为了解决这个问题,ISO/IEC 动态图像专家组(moving picture expert group, MPEG)制定了一个新的国际视频编码标准,称为基本视频编码标准(essential video coding, EVC)^[1]。EVC 与它的前身高效视频编码(high efficiency video coding, HEVC)相比,通过采用一些先进的方法,节省了大约 30% 的比特率,但编码的复杂度大大增加了^[2]。

作为最先进的视频编码标准的核心,EVC 的块分割结构通过灵活的块分割模式实现了高压缩性能。在 EVC 中,带有嵌套多类型树(quadtree with a nested multitype tree, QTMT)在 CU 分区形状方面提供了更大的灵活性。与其前身 HEVC 一样,EVC 使用基于块的编码,首先将每一帧划分为编码树单元(coding tree unit, CTU),然后进一步将 CTU 划分为不同大小的小编码单元。带有嵌套多类型树是 EVC 和 HEVC 在 CU 划分方面的一个明显区别。在 HEVC 中,只允许二叉树(Quadtree, QT)分区,这意味着一个 CU 只能是正方形,即一个 CU 的宽度和高度都应该是 64、32、16 或 8,预测单元(prediction unit, PU)的宽度和高度也可以是 4^[3-4]。然而,在 EVC 中,允许非对称分区,所以一个 CU 的宽度和高度不再需要相同,理论上,他们可以是 128、64、32、16、8 或 4 的任何组合。在 CU 分区过程中,对于正方形编码单元,EVC 使用二叉树编码结构,可以非常有效地将编码块分割成适应块特征的较小形状,特别是在对高视频分辨率(>1080p)进行编码时,而对于非正方形编码单元,可以使用二叉树(binary tree, BT)和二叉树(trinomial tree, TT)进行分区,其中每个分割模式有两个方向,垂直和水平。因

此, CU 可以通过四种不同的分割模式进行分割。即二分垂直划分(BI_VER_SPLIT, V_BT),二分水平划分(BI_HOR_SPLIT, H_BT),三分垂直划分(TRI_VER_SPLIT, V_TT)和三分水平划分(TRI_HOR_SPLIT, H_TT)。这些分割模式如图 1 所示。EVC 中 CTU 的最大尺寸是 128×128,一个 CTU 可以通过二叉树和二叉树结构进一步递归划分^①。例如,如果一个编码单元的宽度和高度相同,可以表示为 1:1 比例的 CU 或方形 CU;如果其高度等于 16,宽度等于 64,可以表示为 1:4 比例的 CU。CU 的划分是基于允许的 CU 形状及其允许的最大和最小尺寸。为了支持 64×64 通道,当 CU 尺寸大于 64×64 时,不允许使用二叉树划分且不能出现 1:4 或 4:1 比例的 CU。

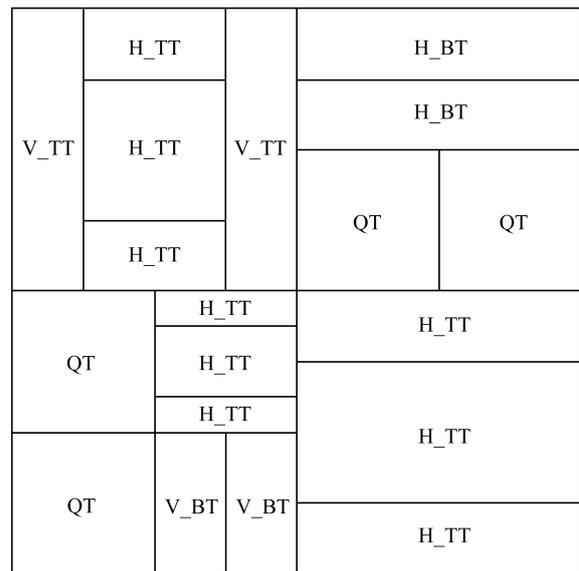


图 1 编码单元的划分结构

Fig. 1 Coding unit partition structure

EVC 中还有一个分割单元编码顺序(split unit coding order, SUCO),它允许分割单元从左到右(left-to-right, L2R)或从右到左(right-to-left,

① ISO/IEC. Test model of essential video coding (ETM3.0). 2019. <https://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-5/essential-video-coding/test-model-essential-video-coding-etm-30>.

R2L)的处理顺序。分割过程中的单元被进一步分割成两个、三个或四个单元,称为分割单元(split unit, SU)。由于二叉树结构的Z形扫描顺序和图片中CTU的栅格扫描,通常对分割单元的编码顺序是从左到右和从上到下。然而,正常的从左到右的编码顺序对左偏的特征比右偏的特征更有利。这种情况不仅在帧内预测中存在,同时在帧间预测中,具有右倾特征的块也不能从左邻右舍和上邻下舍中找到类似的运动信息。分割单元编码顺序支持更灵活的编码顺序,从左到右和从右到左,以允许从右侧参考编码单元进行帧内预测和使用右侧运动矢量预测器进行帧间预测。如果SU被水平分割,就会发出一个标志来表示分割单元的L2R或R2L的编码顺序,如图2所示。如果SU是由二叉树结构分割的,上下两个编码单元共享一个标志,如图2所示。如果没有对SU的编码顺序发出标志,则编码顺序跟随其父SU的编码顺序。

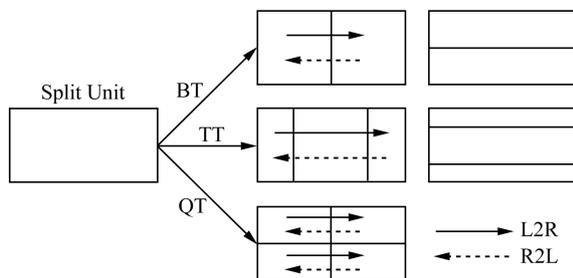


图2 BT/TT/QT划分中的编码顺序

Fig.2 Coding order in BT/TT/QT split

在EVC中,QTMT结构使用率失真优化(rate distortion optimization, RDO)过程来确定所有块的最佳划分。首先,将当前的CU作为叶子节点,不进行任何划分,然后尝试各种模式进行预测和转换,然后选择并存储最佳模式的率失真代价(rate distortion cost, RD-cost)。第二,根据划分模式,将CU划分为两个、三个或四个子CU。第三,递归地进行RDO过程,以确定这些子块的最佳分区。其中,最佳分区是具有最低RD-cost的分区。然而,整个过程是非常耗时的,为了解决这个问题,有必要探索一种高效的QTMT分区方法。

1 相关工作

为了降低编码复杂度,提高编码效率,研究人员提出了各种快速CU划分方法。目前,许多学

者提出了降低H.265/HEVC的编码复杂度的CU快速划分方法。为了减轻内部编码的复杂性,促进实时性的实现,B. Du等^[5]采用了机器学习技术:随机森林进行训练。基于离线训练,使用森林分类器来跳过或终止当前的CU深度级别,此外,相邻的CU大小决策被用来确定当前的深度范围。D. Ruiz等^[6]提出了一种新的CU大小分类器,包括一个具有三个分层节点的离线训练决策树。每个节点中计算的决策规则是基于CU的内容纹理属性和同一深度级别的子CU之间的统计信息,这种方法可以减少在预试验编码的粗略模式决策和率失真优化阶段需要检查的CU大小的数量。R. Sookyung等^[7]提出了一种基于机器学习的快速预测模式决策算法,采用随机森林和随机决策树的综合模型,随机森林用于估计来自预测单元的预测模式,并通过避免一些预测模式的密集RDO过程,显著减少了编码时间。Y. Zhang等^[8]提出了一种基于机器学习的高效视频编码单元的决策方法,在给定的RD-cost约束下,优化了CU层面的复杂度分配。

在通用视频编码(versatile video coding, VVC)的CU快速划分方法中,Y. Song等^[9]提出了一种基于纹理特征的低复杂度CU划分方法,即用子块的平均绝对偏差来衡量纹理复杂度,更好地平衡了编码效率和编码复杂度。T. L. Lin等^[10]提出了一种基于空间特征的CU二叉树的快速划分决策算法,以降低编码复杂度。T. Fu等^[11]提出了一种基于贝叶斯决策规则的新的快速块分割算法,充分讨论了由于新的编码块结构而引入的水平二叉树分割的信息。H. Schwarz等^[12]提出了几种快速CU划分算法,以减少测试的数量,更好的平衡了编码复杂度和编码效率。为了平衡编码效率和压缩质量,J. N. Chen等^[13]提出了一种基于方差和梯度的快速CU划分算法,以解决VVC中的矩形分割问题。S. H. Park等^[14]提出了一种利用跳过冗余多叉树修剪的快速编码方法,大大缩短了VVC的总编码时间。H. Yang等^[15]提出了一种由低复杂度的编码树单元结构决定的快速编码算法,该算法的贡献如下:1)探索新的块大小和编码模式分布特征,获得合理的快速编码方案;2)建立了新的快速QTMT分区决策框架,可以对QT和多类型树进行分区决策,并具有新的级联决策结构;3)具有梯度下降搜索的快速决策。Z. Jin等^[16]提出了一种基于卷积神经网络的快速编码单元深度决策算法,该算

法将 QTBT 分区的深度范围建模为一个多类分类问题,并试图直接预测 32×32 块的深度范围,而不是每个深度级别的划分。G. W. Tang 等^[17]针对各种编码单元的形状,提出了一种带有池变量卷积神经网络的帧内自适应 CU 划分决策算法。T. Amestoy 等^[18]提出了一种基于机器学习方法的轻量级和可调整的 QTBT 分区方案,该方案使用随机森林分类器来确定每个编码单元最可能的分区模式,为了最大限度地减少分类错误造成的编码损失,分类器决策的风险区间被引入到拟议的解决方案中,通过改变风险区间的大小,在降低编码复杂性和编码损失之间实现了可调整的权衡。

2 提出的算法

2.1 动机

为了提高编码效率,预测 CU 分区应跳过的分区模式,需要提取某些与最佳 CU 分区模式密切相关的特征。现有的许多工作通常提取多个特征来建立预测模型,这些特征直接决定了预测模型的性能和效果。例如,原始 CU 的亮度值的平均值、方差和梯度等特征被用来建立预测模型,虽然这些特征与 CU 分区模式有很强的相关性,但对于处理复杂纹理区域的 CU 分区来说,仍是相形见绌,不能很好地预测当前区域的 CU 是否应该被进一步划分^[19]。例如,原始 CU 的亮度值的方差被用来判断当前区域纹理是否平滑,并预测下一步的分区,但分区后重建的 CU 可能与原始 CU 非常相似,这很可能导致预测模型的失真,无法对 CU 进一步划分。在 EVC 中允许 QTMT 分区,因此迫切需要研究与这种新分区方法有更强相关性的特征。

2.2 基于残差的提前终止算法

为了选择最佳 CU 分区, CU 需要通过 RDO 过程递归地遍历所有可能的 QT、H_BT、V_BT、H_TT 和 V_TT 分区。具有最低 RD cost 的分区被作为最佳 CU 分区。在 CU 分区模式搜索过程中,首先计算每个分区模式(m)的 RD-cost:

$$J_m = D + \lambda \times B_m \quad (1)$$

所有分区中最小的 RD-cost 表示为:

$$J_{CU} = \text{agr} \min_{m \in M} \{J_m\} \quad (2)$$

其中 M 包含六个分区(NULL、QT、H_BT、V_BT、H_TT、V_TT, 其中 NULL 表示未分区)。一个 CTU 中的所有 CU 都需要进行上述计算, RD-cost 的计算非常复杂且一个 CU 只有一种最好的方式来划分。如果一个 CU 的最佳分区是 V_BT, 计算

其他分区的 RD-cost 只会增加编码的复杂度,而不会增加编码效率。如果能提前预测 CU 应该跳过的分区模式,将大大降低编码的复杂度。

本文没有直接使用原始 CU 的亮度值作为预测特征,而是从 QTMT 结构中提取内部预测后的亮度值作为更有效的特征。CU 的最佳分割方式由 RD-cost 决定, RD-cost 与预测失真(D)直接相关,由式(1)决定。CU 的预测失真越大,其 RD-cost 越大,反之亦然。如果某个划分模型的预测失真度很高,那么很可能当前的划分方式不是划分 CU 的最佳方式。考虑到模型的进一步优化和提高模型效率,选择用残差值 $P_{\text{resi}}(x, y)$, 即原始 CU 和预测 CU 之间的差值作为初步特征,记为:

$$P_{\text{resi}}(x, y) = |O(x, y) - P(x, y)| \quad (3)$$

其中, $O(x, y)$ 为原始的 CU 亮度值, $P(x, y)$ 为预测的 CU 亮度值。 $P_{\text{resi}}(x, y)$ 可以更好地反映预测失真和最佳分区模式之间的相关性,而且提取起来更简单。为了更好地反映数据的特点,计算了 $P_{\text{resi}}(x, y)$ 的均值和方差:

$$\mu = \frac{1}{w \times h} \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} P_{\text{resi}}(x, y) \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{1}{w \times h} \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} [P_{\text{resi}}(x, y) - \mu]^2 \quad (5)$$

式中, w 和 h 为 CU 的宽度和高度。

从式(3)~式(5)可以看出,如果残差值的方差较大,说明原始 CU 与预测 CU 之间的差异较大,需要进一步划分的概率较大;反之,如果残差的方差较小,说明原始 CU 与预测 CU 接近,则当前的划分模式可能是最佳划分模式。经过实验测试,将阈值设定为 50。

本文设计了两种提前终止算法:

1) 当 CU 的宽度大于或等于高度且残差小于阈值时,递归计算提前终止。

2) 当 CU 的宽度小于高度且残差小于阈值时,则提前终止递归计算。该算法的流程图如图 3 所示。

经过实验测试,算法 2 的效果要比算法 1 好。

3 实验结果

本文实验平台的 CPU 是 Intel i5-10400T 处理器,具有 8 G 内存和 64 位 Windows 11 操作系统。该算法用 C++ 语言实现,为了验证所提算法的性能,该算法在 EVC 软件(EVC test model 7.5, ETM7.5)上实现,量化参数(quantization parameter, QP)值被设置为 22、27、32 和 37。

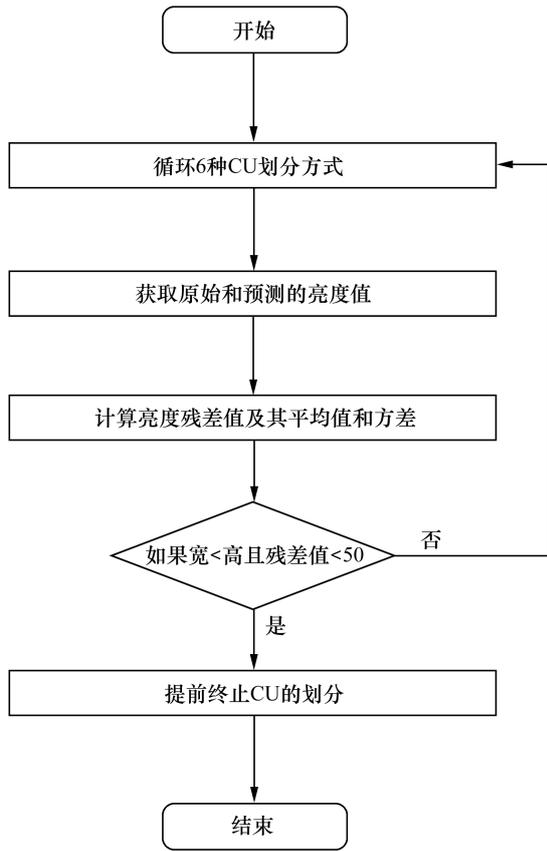


图 3 算法 2 的流程图

Fig. 3 Algorithm 2 flow chart

选择 HEVC 的标准测试序列, 涉及不同场景和不同分辨率。编码性能是通过与原始 EVC 编码器比较 Bjøntegaard delta rate (BD-rate) 和编码节省时间 (time saving, TS) 来衡量的。每个序列的 TS 是由四个不同 QP 的平均 TS 计算出来的, TS 用来表示复杂度的降低, 其计算方法是:

$$T_s = \frac{T_{ETM} - T_{pro}}{T_{ETM}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: T_{ETM} 为原算法的总编码时间, T_{pro} 为本文所提算法的总编码时间。实验结果是对四个 QP 的总和。

本文实验的测试序列涉及了 4 类不同场景和不同分辨率的视频。可以看出, 所提出的算法在所有序列都实现了不同程度的增益。编码时间上平均节省了约 31.56%, BD-rate 平均增加为 1.6%。最大的收益来自于“BQMall”序列, 它可以节省高达 51.74% 的编码时间。

表 1 显示了在不同分辨率的视频中, 本文的算法与 ETM7.5 的编码时间和 BD-rate 的比较。结果显示, 在不同的 QP 下, 此算法在所有的测试序列中都优于 ETM7.5。图 4 显示了四个 QP 下

的 TS, 可以看出本文提出的算法在不同的 QP 下均有明显的效果。其中, QP 为 22 时效果最明显, 节省了 33.92% 的编码时间。由于对 EVC 快速算法的研究相对较少, 将本文提出的算法与 Test model of essential video coding (ETM3.0). 2019^① 的 CU 划分提前终止算法进行了比较, 结果见表 2。实验结果显示, 在不同的分辨率视频和不同的 QP 下, 此算法均有效地降低了编码复杂度, 平均节省了 27.74% 的编码时间。最大的收益来自于序列“BQMall”, 它可以节省高达 52.48% 的编码时间。因此, 它表明此算法与以前的算法相比具有很强的竞争力。

表 1 所提算法与原始 ETM7.5 性能比较

Table 1 Performance comparison of the proposed algorithm with original in ETM 7.5

Class	Sequence	BD-rate/%	T_s /%
A	BasketballPass	2.0	46.40
	BlowingBubbles	2.0	48.49
	RaceHorses	2.0	39.74
B	BasketballDrill	2.1	47.61
	BQMall	1.9	51.74
C	RaceHorses	2.1	50.25
	ChinaSpeed	3.4	33.15
	FourPeople	0.5	13.76
D	Johnny	0.6	14.06
	KristenAndSara	0.4	11.39
	SlideEditing	0.6	9.12
E	SlideShow	0.8	9.55
	BasketballDrive	1.9	20.77
	Average	1.6	31.56

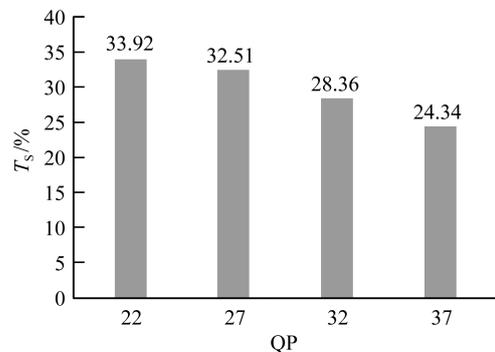


图 4 不同 QP 下的 TS 比较

Fig. 4 TS under different QP

① ISO/IEC. Test model of essential video coding (ETM3.0). 2019. <https://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-5/essential-video-coding/test-model-essential-video-coding-etm-30>.

表2 所提算法与1算法性能比较

Table 2 Performance comparison of the proposed algorithm with 1 algorithms

Class	Sequence	BD-rate/%	T_s /%
A	BasketballPass	1.8	46.40
	BlowingBubbles	1.7	49.45
	RaceHorses	1.8	40.19
B	BasketballDrill	1.9	46.32
	BQMall	1.6	52.48
	RaceHorses	2.2	50.72
C	ChinaSpeed	3.4	33.15
	FourPeople	0.5	12.03
	Johnny	0.4	12.99
D	KristenAndSara	0.2	11.67
	SlideEditing	0.8	10.35
	SlideShow	0.3	7.65
E	BasketballDrive	1.6	14.41
	Average	1.3	27.74

4 结 论

本文从原始亮度值和预测亮度值的差值中获得了 CU 的亮度残差值,使用亮度残差值构建了一个 CU 划分的早期终止模型。实验表明,本文提出的算法明显优于 ETM7.5,而且编码损失率也较小。该算法操作简单,效果较好,大大提高了视频编码的效率。因此将亮度残差值作为与 CU 划分联系更紧密的特征,具有更广泛的应用范围。

参考文献:

- [1] CHOI K, CHEN J, RUSANOVSKYY D, et al. An overview of the MPEG-5 essential video coding standard standards in a nutshell[J]. IEEE signal processing magazine, 2020, 37(3):160-167.
- [2] GROIS D, GILADI A, CHOI K, et al. Performance comparison of emerging EVC and VVC video coding standards with HEVC and AV1[J]. Smpte motion imaging journal, 2021, 130(4):68.
- [3] HU J, FU B, ZHANG Q Q. Fast prediction mode selection and CU Partition for HEVC intra coding[J]. IET image processing, 2020, 14(9):1892-1900.
- [4] SULLIVAN G J, OHM J R, HAN W J, et al. Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard[J]. IEEE transactions on circuits & systems for video tech-

nology, 2013, 22(12):1649-1668.

- [5] DU B, SIU W C, YANG X. Fast CU partition strategy for HEVC intra-frame coding using learning approach via random forests[C]//2015 Asia-Pacific Signal & Information Processing Association Summit & Conference. Hongkong, China: IEEE, 2015:1085-1090.
- [6] RUIZ D, FERNANDEZ-ESCRIBANO G, ADZIC V, et al. Fast CU partitioning algorithm for HEVC intra coding using data mining[J]. Multimedia tools & applications, 2017, 76(1):861-894.
- [7] SOOKYUNG R, KANG J W. Machine learning-based fast angular prediction mode decision technique in video coding[J]. IEEE transactions on image processing, 2018, 27(11):5525-5538.
- [8] ZHANG Y, KWONG S, WANG X, et al. Machine learning-based coding unit depth decisions for flexible complexity allocation in high efficiency video coding[J]. IEEE transactions on image processing, 2015, 24(7):2225-2238.
- [9] SONG Y, ZENG B, WANG M H. An efficient low-complexity block partition scheme for VVC intra coding[J]. Journal of real time image process, 2022, 19(1):161-172.
- [10] LIN T L, JIANG H Y, HUANG J Y, et al. Fast intra coding unit partition decision in H. 266/FVC based on spatial features[J]. Journal of real-time image processing, 2020, 17(3):493-510.
- [11] FU T, ZHANG H, MU F, et al. Fast CU partitioning algorithm for H. 266/VVC intra-frame coding[C]//2019 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). Shanghai, China: IEEE, 2019:55-60.
- [12] DE-LUXÁN-HERNÁNDEZ S, SCHWARZ H, MARPE D, et al. Fast line-based intra prediction for video coding [C]//2018 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM). Taichung, China: IEEE, 2018:135-138.
- [13] CHEN J N, SUN H M, JIRO KATTO, et al. Fast QTMT partition decision algorithm in VVC intra coding based on variance and gradient[C]//2019 IEEE International Conference on Visual Communications and Image Processing (VCIP). Sydney, Australia: IEEE, 2019:441-444.
- [14] PARK S H, KANG J W. Context-based ternary tree decision method in versatile video coding for fast intra coding[J]. IEEE access, 2019, 7:172597-172605.
- [15] YANG H, SHEN L Q, DONG X C, et al. Low-complexity CTU partition structure decision and fast intra mode decision for versatile video coding[J]. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, 2020, 30(6):1668-1682.
- [16] JIN Z, AN P, YANG C, et al. Fast QTBT partition algorithm for intra frame coding through convolutional neural network[J]. IEEE access, 2018, 6:54660-54673.

- [17] TANG G W, JING M G, ZENG X Y, et al. Adaptive CU split decision with pooling-variable CNN for VVC intra encoding [C]//2019 IEEE Visual Communications and Image Processing (VCIP). Sydney, Australia; IEEE, 2019: 85-88.
- [18] AMESTOY T, MERCAT A, HAMIDOUCHE W, et al. Tunable VVC frame partitioning based on lightweight machine learning [J]. IEEE transactions on image processing, 2020, 29: 1313-1328.
- [19] LI Y, YANG G, SONG Y, et al. Early intra CU size decision for versatile video coding based on a tunable decision model [J]. IEEE transactions on broadcasting, 2021, 67(3): 710-720.

(上接第45页)

- [7] 陈铠杰, 万德成. 基于黏性修正 SST $k-\omega$ 模型的水翼空化流数值模拟计算 [J]. 水动力学研究与进展, 2019, 34(2): 224-231.
- [8] LEE J R, JEON S M, HASOLLI N, et al. Removal characteristics of paint particles generated from paint spray booth [J]. The science of leadership forum, 2019, 26(21): 810-817.
- [9] HUANG S L, YIN C Y, YAP S Y. Particle size and metals concentrations of dust from a paint manufacturing plant [J]. Journal of hazardous materials, 2010, 174(1/2/3): 839-842.
- [10] 杜启蒙, 叶胜雄, 郭鑫涛, 等. 纸盒式干式喷房下的风平衡探索与实践 [J]. 内燃机与配件, 2021(22): 34-35.
- [11] 孔飞, 张川, 韩俊杰, 等. 迷宫纸盒过滤器过滤效果数值模拟 [J]. 现代涂料与涂装, 2020, 23(3): 45-48.

(上接第51页)

- [10] JIANG W, MA H, CHEN Y. Gradient based fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC [C]//2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet). Yichang, China; IEEE, 2012: 1836-1840.
- [11] JAMALI M, COULOMBE S. Fast HEVC intra mode decision based on RDO cost prediction [J]. IEEE transactions on broadcasting, 2018, 65(1): 109-122.
- [12] TARIQ J, KWONG S. Adaptive stopping strategies for fast intra mode decision in HEVC [J]. Journal of visual communication and image representation, 2018, 51: 1-13.
- [13] FLYNN D, MARPE D, NACCARI M, et al. Overview of the range extensions for the HEVC standard: Tools, profiles, and performance [J]. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, 2015, 26(1): 4-19.
- [14] YAO Y, WANG J, DU C, et al. A support vector machine based fast planar prediction mode decision algorithm for versatile video coding [J]. Multimedia tools and applications, 2022, 81(12): 17205-17222.