

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.028

利用信息熵判定 HEVC 预测单元尺寸快速算法

冯 磊^{1,2}, 戴 明¹, 孙丽娜¹, 赵春蕾^{1,2}

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2.中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要: 为提高 HEVC 编码器的帧内预测速度, 提出一种基于信息熵的 high efficiency video coding (HEVC) 帧内预测单元 (PU) 尺寸快速判定算法. 利用图像的信息熵随图像中细节的丰富程度产生不同的值这一特性, 判断 PU 是否需要分割处理. 首先计算每个 LCU 的信息熵, 根据信息熵的结果从 64×64 至 4×4 的 PU 中找到最优的分割尺寸, 进而确定最佳编码深度, 再从该编码深度内进行帧内角度预测. 实验结果表明, 在保证编码性能基本不变的前提下, 帧内预测编码时间平均缩短了约 22.6%. 该算法精简了遍历搜索模式中不必要的率失真代价计算过程, 在保证图像质量的前提下, 缩短了帧内预测编码时间.

关键词: HEVC; 视频压缩; 帧内预测; 图像分割; 图像信息熵

中图分类号: TN941.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)09-0164-06

An algorithm of fast HEVC PU size decision using information entropy

FENG Lei^{1,2}, DAI Ming¹, SUN Lina¹, ZHAO Chunlei^{1,2}

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to improve the prediction speed of HEVC encoder, this paper proposed an algorithm of PU size decision based on information entropy for HEVC (High Efficiency Video Coding) intra prediction. This algorithm mainly utilizes the characteristic of image entropy producing different values with the richness of the image detail to decide whether the PUs need segmentation. Firstly, we calculate the information entropy of every LCU, then we can obtain the optimal partition size from the PU size of 64×64 to 4×4, so that the optimal coding depth is acquired, we can make the intra angular prediction in the optimal coding depth. The experimental results show that we can avoid the unnecessary RD cost calculating process in the traversal search mode, and the coding time was reduced by about 22.6% in the promise of coding performance essentially unchanged. This algorithm simplified the unnecessary rate-distortion cost procedure in traversal search mode, shortened the intra prediction coding time at high image quality level.

Keywords: HEVC; video compression; intra prediction; image segmentation; information entropy

近些年来,随着终端处理能力以及人们对多媒体体验要求的不断提高,高清视频已经成为多媒体主流趋势^[1-3]. 视频信息虽然具有直观性、确定性、高效性等优点,但由于其信息量大,因而在存储和传输方面面临着一些困难^[4-5],而现有的 H.264 编码标准的压缩效率仍然不足以应对高清、超高清视频应用,需要更为高效的编码压缩方案^[6]. 为了提升高清视频的编码效率,ISO/IEC 运动图像专家组 MPEG 和 ITU-T 视频编码专家组 VCEG 成立了一个

视频编码的合作组(JCT-VC)来发展下一代视频编码标准,提出了下一代视频编码标准 HEVC^[7].

为了对高分辨率视频进行压缩,HEVC 使用四叉树编码结构^[8],即编码单元(CU),预测单元(PU),变换单元(TU)3个概念描述整个编码过程. 采用这种结构设计的目的是使压缩预测更符合图像特性^[9]. HEVC 中,每一帧图像首先按顺序被依次分割为 64×64 大小的最大编码单元(LCU),从 LCU 开始,根据不同深度,每一个 CU 可以被递归的分割成 4 种深度的(64×64,32×32,16×16,8×8)的 CU,构成四叉树编码结构.

在每个深度的 CU 中,从多达 35 种不同的预测模式中寻找最优模式进行帧内预测编码. 与 H.264 相比,HEVC 编码器大幅提高了预测模式数量,必然

收稿日期: 2015-04-24

基金项目: 空军装备预研基金(402040205)

作者简介: 冯 磊(1988—),男,博士研究生;

戴 明(1965—),男,研究员,博士生导师

通信作者: 冯 磊, kabakfl@126.com

导致运算复杂度增加。因此,提高帧内预测的速度是目前亟待解决的问题。本文提出了一种基于信息熵的 HEVC 帧内预测 PU 分割的尺寸判定算法,可以在保证图像质量的前提下提高编码速度。

1 HEVC 帧内预测简介

HEVC 编码器在进行帧内预测过程中采用遍历搜索方式^[10],并利用率失真代价来判定最优候选模式。在参考软件 HM11.0 中,率失真代价函数为

$$R_{\text{cost}} = B_{\text{mode}} + \lambda_{\text{mode}} \times H_{\text{SSE}}. \quad (1)$$

其中: B_{mode} 为进行每一次模式判决所需要的比特值, H_{SSE} 为当前待编码像素块与匹配的像素块差值的平方和, λ_{mode} 为拉格朗日系数。

在遍历搜索过程中,需要在所有深度等级的 CU 中寻找率失真代价最低的帧内预测模式,直到 CU 达到最大深度为止^[11]。这种遍历搜索方式的缺点是:帧内预测虽然提高了预测精度,但也极大地增加了编码复杂度和编码时间。实际上,图像中纹理平坦的区域更适合用大尺寸 CU 进行预测,而纹理复杂的区域更适合用小尺寸 CU 进行预测。如果能够利用纹理特性预先判定 CU 的适当深度,则可跳过不必要的遍历搜索过程,从而节省编码时间。

近些年来,为了减小 HEVC 编码器的运算复杂度,相关研究者们进行了大量的研究,提出了若干比较有效的算法^[12]。Piao 等^[13]提出了一种算法,通过计算低复杂度率失真代价值和 Hadamard 变换系数的绝对值之和来预先筛选出帧内预测的最佳候选模式(RMD)。Zhao 等^[14]通过进一步将最可能模式(MPM)引入候选模式从而改进了 RMD 算法。Xiong 等^[15]提出一种基于理论分析的算法,利用非归一化的梯度方向直方图来选择最佳编码 CU 的尺寸。Huang 等^[16]提出了一种基于方差运算的 CU 尺寸判定算法,通过设定适当的阈值来决定是否对编码块进行分割。为了进一步提高编码效率,本文提出了一种基于信息熵的 HEVC 帧内预测 PU 的划分尺寸判定算法,在保证图像质量的前提下,减少编码时间。经过试验证实,相比于现有的分割算法,本文提出的算法在编码时间方面具有一定程度的提升。

2 基于信息熵的帧内预测

2.1 信息熵理论

信息熵最早由科学家香农提出,把熵作为一个随机事件发生的不确定性或信息量的量度^[17],记信息熵为

$$H(X) = H(P_1, P_2, \dots, P_n) = P(x_i) \log P(x_i). \quad (2)$$

其中: $P(x_i)$ 为当信源取第 i 个符号时的概率, $i =$

$1, 2, \dots, n$; $H(X)$ 为信源的信息熵,信息熵具有对称性、非负性、确定性、可加性等^[18],本文中主要用到的是信息熵的对称性。

熵的对称性表述为:矢量各分量的次序任意改变时,熵值不变,熵函数的取值仅与概率分布有关。也就是说,信息熵是整个信元的统计特征的表现,它从平均意义上度量信源的总体信息量^[19]。图像信息熵是把信息熵公式应用在图像上,设 $I(A_i)$ 是一个随机变量, $i = 1, 2, \dots, n$,其图像信息熵为

$$H(X) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \log_2 \frac{1}{P(A_i)} = - \sum_{i=1}^n P(A_i) \log_2 P(A_i). \quad (3)$$

由上式可见,某一随机变量的概率越大,其熵值越小。数字图像是由一系列的离散像素点构成,灰度值分为 256 级(0~255),组成集合 I ,具有灰度 j 的像素点在图像中出现的概率为 P_j ,灰度 J 的信息熵由式(3)得

$$H(P_j) = -P_j \log_2(P_j), 0 \leq j \leq 255. \quad (4)$$

不同灰度的熵的累积和为灰度图像的信息熵为

$$E = \sum_{j=0}^{255} H(P_j) = - \sum_{j=0}^{255} P_j \log_2(P_j). \quad (5)$$

对于某一帧给定的图像,信息熵反映了其中所包含的灰度信息的均值,通常,图像的细节越少,其中所包含的灰度级越少,则其熵值越小;反之,细节越多,所含灰度级越多,则熵值越大。当图像为确定的单一灰度($P_i = 1$),信息熵为 0;当图像包含所有 256 级的灰度,且 $P_i = P_j$ 时,信息熵最大。

2.2 信息熵在帧内预测方面的应用

通过上一小节的分析,利用图像的信息熵来判定图像的平坦程度,通过设定合适的阈值,对 PU 进行合理分块。进行帧内预测之前,先计算 LCU 的信息熵,根据信息熵的结果从 64×64 至 4×4 选择最优的分割模式,由于信息熵反映了全局统计特性,不体现图像的空间分布信息,首先利用父块和其 4 个子块信息熵的结果设定一个阈值,来判定图像的局部统计特性,由此可以判断图像块是否需要进一步分割。另外,通过实验已经证明任何一块复杂的图像,经过不断地分块,其子块的信息熵会接近平坦区的信息熵大小,其纹理复杂程度也会降低,随之信息熵也会降低。因此,本文的算法提出如下:对每一个 LCU 进行信息熵的计算,得到的结果与其 4 个子块的信息熵大小进行比较,如果 4 个子块的信息熵值大小差异不超过 10%,且均小于父块的信息熵,则分割终止,采用父块进行帧内预测与编码;如果任意一个子块的信息熵值比父块信息熵的值大 10%,或者任意

一个子块的信息熵值与其他子块相比大小超过 10%, 则该父块需要进行分割, 适合采用子块进行帧内预测与编码; 以此类推, 将上面的子块作为四叉树的根节点, 将其信息熵与四叉树子块进行比较, 判断是否需要进一步分割, 直到 PU 大小为 4×4 为止. 在这个判定的循环过程中, 如果找到了适合进行分割的 PU 的大小, 则跳出循环过程. 在帧内编码过程中, 对图像的每一个 LCU 进行上述判定过程达到提前判断分割大小的目的. 通过这样的判定过程获取每个待编码块的最佳编码深度后, 再进行角度预测, 可以节省编码时间.

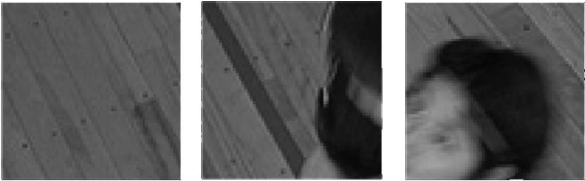
2.3 基于信息熵的分割算法验证

对实际的灰度图像进行该算法的分割实验. 任意取一帧灰度图像, 截取其中的 3 个 LCU 进行试验, 如图 1 所示. 在图 1 中分别取 A、B、C 3 个 LCU, 灰度图像如图 2 所示.



图 1 灰度图像中的 3 个 LCU 位置

Fig.1 The position of three LCUs in a grayscale image



(a) LCU_A (b) LCU_B (c) LCU_C

图 2 灰度图像中的 3 个 LCU

Fig.2 Three LCUs in the grayscale image

对 3 个 LCU 进行上述信息熵判定过程, 得到的结果分别如下.

1) 得到的 LCU_A 的 4 个子块和 A 本身的信息熵结果, 如图 3 所示.

信息熵分别为: 3.997 9, 4.432 5, 4.557 3, 4.974 9, 4.703 3. 由于子块 4 的信息熵大于父块, 需要对子块 4 进行再分割, 得到 4 个 32×32 的预测单元 (PU), 对 4 个 PU 进行信息熵计算, 得到的结果见表 1.

由表 1 可知, 块 2 的 4 个 16×16 子块的信息熵

与父块信息熵结果相比较, 满足分割终止条件, 因此该块适于采用 32×32 大小的 PU 进行帧内预测编码, 提前跳出分割判定过程; 其他 3 个 32×32 PU 的各个 16×16 子块信息熵大小之间差异超过了 10%, 应进行进一步分割判定. 依次对每个 16×16 块进行分割信息熵判定, 直到满足分割终止的条件最终的分割结果, 如图 4 所示. 由图 4 的分割结果可见, 这个 LCU 所显示的区域是地板, 属于一帧图像的背景区域, 适合采用较大的 32×32 , 16×16 的 PU 进行编码, 而对于地板之间的花纹, 需要采用较小的 8×8 , 4×4 的 PU 进行编码.

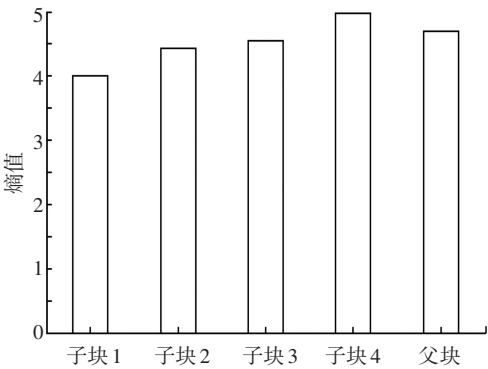


图 3 LCU_A 中各块信息熵

Fig.3 The subblock entropy values in LCU_A

表 1 4 个 32×32 PU 中各子块的信息熵

Tab.1 The subblock entropy values of 4 32×32 PU

子块	信息熵				
	16×16 PU_1	16×16 PU_2	16×16 PU_3	16×16 PU_4	32×32 PU
1	3.888 6	3.924 6	4.005 7	3.513 6	3.997 9
2	4.169 5	4.288 8	4.404 1	4.386 0	4.432 5
3	3.951 6	4.558 2	4.527 1	4.406 4	4.557 3
4	4.278 3	5.431 5	3.786 8	4.886 7	4.974 9

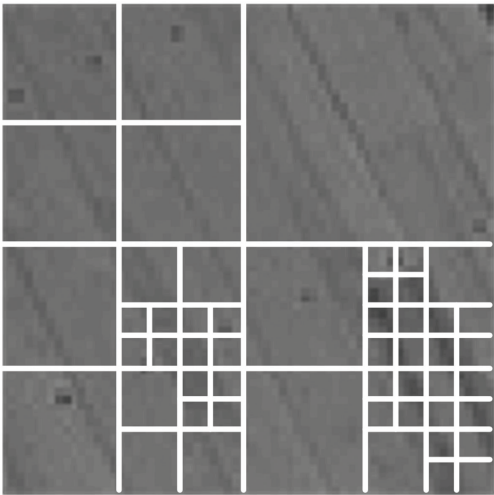


图 4 LCU_A 的分割结果

Fig.4 The segmentation of LCU_A

2)得到的 LCU_B 的 4 个子块和 B 本身的信息熵结果,如图 5 所示. 信息熵分别为 5.491 4, 6.290 7,5.584 6,6.566 7,6.536 9. 其中子块 4 的信息熵大于父块,需要进行分割,得到 4 个 32×32 的 PU,对 4 个 PU 进行信息熵计算,得到的结果见表 2.

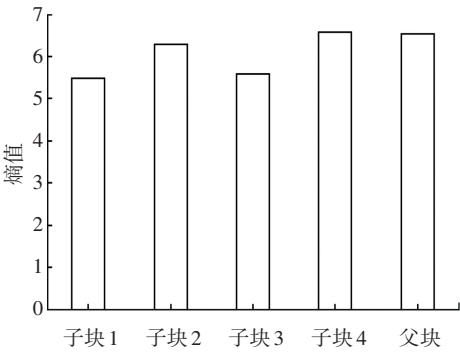


图 5 LCU_B 中各块信息熵

Fig.5 The subblock entropy values in LCU_B

表 2 4 个 32×32 PU 中各块的信息熵

Tab.2 The subblock entropy values of 4 32×32 PUs

子块	信息熵				
	16×16 PU_1	16×16 PU_2	16×16 PU_3	16×16 PU_4	32×32PU
1	5.386 8	4.580 0	5.034 2	5.314 0	5.491 4
2	5.493 0	4.408 0	5.502 3	5.535 0	6.290 7
3	4.375 5	5.736 1	5.034 8	5.119 0	5.584 6
4	6.082 9	5.679 8	6.307 8	5.079 2	6.566 7

由表 2 可知,4 个 32×32 块中的各个 16×16 子块信息熵大小之间差异超过了 10%,都需要进行进一步的分割. 依次对每个 16×16 块进行分割信息熵判定,直到满足分割终止的条件最终的分割结果如图 6 所示. 由图 6 的分割结果可见,这个 LCU 所显示的区域左半边是地板,属于一帧图像的背景区域,适合采用较大的 16×16 的 PU 进行编码,而对于地板之间的花纹,需要采用较小的 8×8, 4×4 的 PU 进行编码;右半部分是运动员的身体,处于运动状态,因此背景区域和运动物体交接处需要采用最小的 4×4 的 PU 进行编码,可见信息熵判定的分割效果满足实际需求.

3)得到的 LCU_C 的 4 个子块和 C 本身的信息熵结果,如图 7 所示,信息熵分别为 6.334 8,6.378 7, 6.872 1,6.480 9,7.094 1. 子块 3 的信息熵显著大于其他 3 个子块,需要进行分割处理. 得到 4 个 32×32 的 PU,对 4 个 PU 进行信息熵计算,得到的结果见表 3.

由表 3 可知,4 个 32×32 块中的各个 16×16 子块信息熵大小之间差异超过了 10%,都需要进行进

一步的分割. 依次对每个 16×16 块进行分割信息熵判定,直到满足分割终止的条件最终的分割结果如图 8 所示. 由图 8 的分割结果可见,这个 LCU 所显示的区域是运动员的头部,图像的背景区域依然是地板,适合采用较大的 16×16,8×8 的 PU 进行编码,运动员头部与背景区域交界处属于运动区域,采用最小的 4×4 的 PU 进行编码,运动员的面部特征属于一帧图像的细节区域,采用 8×8,4×4 的 PU 进行编码.

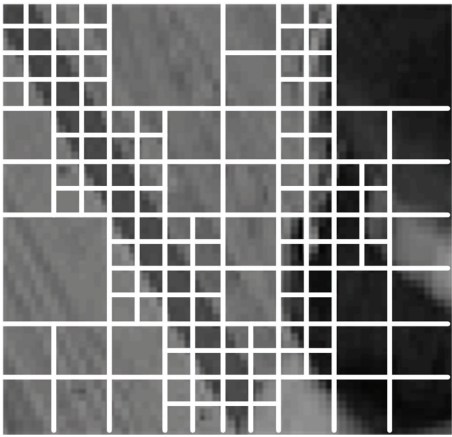


图 6 LCU_B 的分割结果

Fig.6 The segmentation of LCU_B

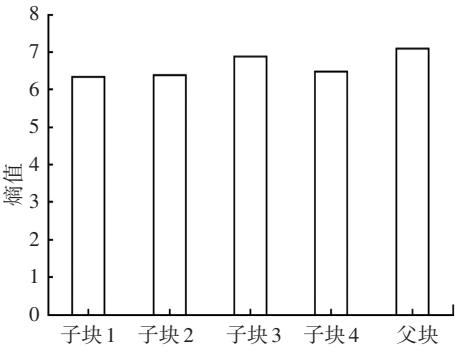


图 7 LCU_C 中各块信息熵

Fig.7 The subblock entropy values in LCU_C

表 3 4 个 32×32 PU 中各块的信息熵

Tab.3 The subblock entropy values of 4 32×32 PUs

子块	信息熵				
	16×16 PU_1	16×16 PU_2	16×16 PU_3	16×16 PU_4	32×32PU
1	4.351 0	5.501 3	6.270 8	5.304 0	6.334 8
2	5.061 0	4.888 9	5.664 1	5.868 0	6.378 7
3	5.722 4	6.506 8	5.338 1	6.707 5	6.872 1
4	4.535 9	5.954 7	5.751 7	5.670 8	6.480 9

由上面一帧图像内部的 3 个处于不同位置,表达不同内容的 LCU 的分割结果可知,采用信息熵进行图像编码前的 PU 预先判决是行之有效的.

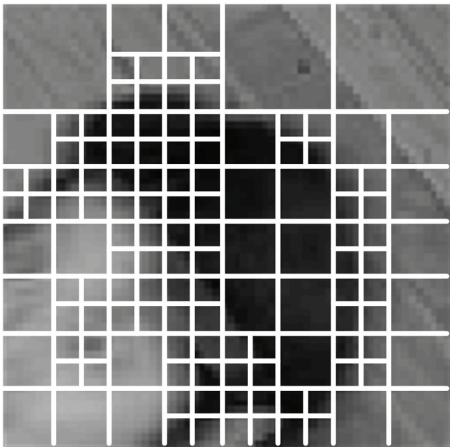


图 8 LCU_C 的分割结果

Fig.8 The segmentation of LCU_C

3 实验结果与分析

为了对本文提出的基于信息熵的快速帧内预测算法与标准帧内预测算法进行比较,将本文的算法的功能在 HEVC 参考软件 HM 11.0 上实现. 为了客观全面的验证本算法的最终性能,对几个不同纹理特点的标准视频序列分别进行测试. 实验采用全 I 帧进行编码,编码结构为深度为 4,最大 LCU 为 64×64,熵编码采用 CABAC 结构;测试序列采用 JCT-VC 推荐的不同分辨率下的各标准测试序列. 表 4 列出了本文提出的快速帧内 PU 分割算法的编码效果,表 5 为与其他算法的实验结果对比.

表 4 本文算法与标准算法的对比结果

Tab.4 Result of the proposed algorithm compared to the standard

测试序列	视频分辨率/ pix	率失真码流差/ %	编码时间 变化率/%
Traffic	2 560×1 600	-1.07	-18.7
People on Street	2 560×1 600	-1.28	-20.4
BQ Terrace	1 920×1 080	-0.57	-22.1
KimonoI	1 920×1 080	-0.21	-21.9
Basketball Drive	1 920×1 080	-0.39	-22.5
Park Scene	1 920×1 080	-0.74	-20.8
Cactus	1 920×1 080	-0.62	-21.4
Basketball Drill	832×480	-1.87	-23.9
Race Horses	832×480	-0.78	-17.4
Party Scene	832×480	-0.94	-19.3
BQ Mall	832×480	-0.16	-20.2
Blowing Bubbles	416×240	-0.38	-32.5
BQ Square	416×240	-0.52	-28.1
Basketball Pass	416×240	-0.49	-26.8
Race Horses	416×240	-0.86	-22.6

通过实验发现,对于具有较多的背景区域,且图像中物体运动不是很剧烈的测试序列,如 Blowing Bubbles,本算法的加速效果更加明显,这是因为:首先,图像中纹理越平滑,剧烈运动的物体越少,整幅图像中采用小块的 PU 所占的比例越少,编码器可以减少 PU 的分割次数,在较大的 PU 尺寸下跳出分割过程,达到节省编码时间的目的;其次,在本算法中,判断每种 PU 是否需要分割时,原来的标准算法是 4 个子块的率失真代价之和与上一级父块的率失真进行比较,而本算法只需进行每个子块与父块信息熵的比较,避免了每一次循环时的数值求和过程,这样也使得整体编码时间有所降低.

表 5 各尺寸测试序列下编码时间的比较

Tab.5 Comparison of coding time saving in other algorithm of text sequences

测试序列	视频分辨率/pix	编码时间变化率/%	
		文献[3]	本文方法
Traffic	2560×1600	-16.6	-18.7
People on Street	2560×1600	-15.8	-20.4
BQ Terrace	1920×1080	-19.4	-22.1
KimonoI	1920×1080	-19.2	-21.9
Basketball Drive	1920×1080	-19.1	-22.5
Park Scene	1920×1080	-16.3	-20.8
Cactus	1920×1080	-17.0	-21.4
Basketball Drill	832×480	-18.7	-23.9
Race Horses	832×480	-13.9	-17.4
Party Scene	832×480	-15.1	-19.3
BQ Mall	832×480	-14.2	-20.2
Blowing Bubbles	416×240	-20.1	-32.5
BQ Square	416×240	-18.4	-28.1
Basketball Pass	416×240	-17.9	-26.8
Race Horses	416×240	-14.7	-22.6

由表 4 可知,基于信息熵的 PU 尺寸预测可以在保证图像质量与原算法基本一致的前提下,平均提高了约 22.6% 的编码速度. 对于分辨率为 416×240 的“Blowing Bubbles”序列,可以获得最大的编码速度提升,达到了 32.5%,编码速度提升最小为分辨率 832×480 的“Race Horses”,对应速度提升了 17.4%. 由于 Blowing Bubbles 序列中运动物体移动缓慢,而且分辨率不是很高,采用较大尺寸的 PU 进行帧内预测编码的比例相对较大,跳过了小块 PU 的判定,因而编码速度提升较明显;“Race Horses”序列中物体运动剧烈,需要更多的小块 PU 进行编码,在分割判定中占用了较多的时间,所以编码速度提升较慢.

4 结 论

1)针对目前主流的 HEVC 编码器帧内预测算法速度偏慢的问题,提出一种基于信息熵的 HEVC 帧内预测单元尺寸快速判定算法. 该算法可使编码器在进行角度预测之前找到最佳帧内预测编码深度,并可以快速判定当前预测单元的尺寸.

2)图像的信息熵随图像中细节的丰富程度会产生不同的熵值,利用此特性可以作为本算法中图像块快速分割的依据.

3)使用本算法对 HEVC 标准视频序列进行测试,试验结果表明:本算法可以在保证图像质量与原算法基本一致的前提下,编码速度平均提升约 22.6%,减小了编码器的运算复杂度,节省了帧内预测的编码时间.

参考文献

[1] GARY J, OHM J, HAN W, et al. Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12): 1649-1650.

[2] 祝世平, 陈菊嫣. 基于预搜索的高效双目分形视频编码 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 675-684.

ZHU Shiping, CHEN Juqiang. Efficient stereo fractal video coding based on pre-searching [J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 675-684.

[3] SHEN Liquan, ZHANG Zhaoyan, AN Pin. Fast CU size decision and mode decision algorithm for HEVC intra coding [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2013, 59(1): 207-213.

[4] 赵春蕾, 戴明, 孙丽娜, 等. H.264/AVC 码率控制中初始量化参数的估计 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2553-2564.

ZHAO Chunlei, DAI Ming, SUN Lina, et al. Estimation of initial quantization parameters for H.264/AVC rate control [J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2014; 22(9): 2553-2564.

[5] 吴银花, 金龙旭, 张宁. 针对 H.264 改进的整像素运动估计算法 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 1017-1025.

WU Yinhua, JIN Longxu, ZHANG Ning. Improvement of fast inter pixel motion estimation algorithm for H.264 [J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 1017-1025.

[6] 温佳, 马彩文, 赵军锁, 等. 自适应提升小波在干涉高光谱压缩中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 4(7): 112-117.

WEN Jia, MA Caiwen, ZHAO Junsuo, et al. An adaptive wavelet transformation used on interference hyperspectral image compression [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 4(7): 112-117.

[7] VANNE J, VIITANEN M, TIMO D. Efficient mode decision

schemes for HEVC inter prediction [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2014, 9(24): 1579-1593.

[8] JANI L, FRANK B, HAN W, et al. Intra coding of the HEVC standard [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12): 1792-1794.

[9] CHO S, KIM M. Fast CU splitting and pruning for suboptimal CU partitioning in HEVC intra coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2013, 23(9): 1556-1557.

[10] WANG Lili, XIU Wanchi. Novel adaptive algorithm for intra prediction with compromised modes skipping and signaling processes in HEVC [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2013, 23(10): 1687, 1689.

[11] 方树青, 郁梅, 徐升阳, 等. 一种 HEVC 的快速帧间编码新方法 [J]. 光电子·激光, 2015, 26(5): 932-939.

FANG Shuqing, YU Mei, XU Shengyang, et al. A novel fast inter coding algorithm for HEVC [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2015, 26(5): 932-939.

[12] 孙乐, 戴明, 陈晓露, 等. 基于人眼视觉系统的 H.264/AVC 码率控制算法 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 1020-1028.

SUN Le, DAI Ming, CHEN Xiaolu, et al. H.264/AVC rate control algorithm based on human visual system [J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 1020-1028.

[13] PIAO Y, MIN J H, CHEN J. Encoder improvement of unified Intra prediction: JCTVC - C207 [S]. Guangzhou: Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC) of ITU-T and ISO/IEC, 2010.

[14] 赵亮. HEVC 帧内模式决策及其核心技术的研[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

ZHAO Liang. Researches on fast intra mode decision and core techniques in HEVC [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[15] XIONG Jian. Fast coding unit selection method for high efficiency video coding intra prediction [J]. Optical Engineering, 2013, 52(7): 1-9.

[16] HUANG Y, OU T, CHEN H. Fast decision of block size, prediction mode, and intra block for H.264 intra prediction [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(8): 1122-1132.

[17] BIALYNICKIBIRULA I, MYCIELSKI J. Uncertainty relations for information entropy in wave mechanics [J]. Communications in Mathematical Physics, 1975, 44(2): 129-132.

[18] CHEN Weiwei, WANG Xuan, MA Jianfeng, et al. Efficient intra prediction algorithm for H.264 based on information entropy [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(13): 114-116.

[19] 谢宏, 程浩忠, 牛东晓. 基于信息熵的粗糙集连续属性离散化算法 [J]. 计算机学报, 2005, 28(9): 1570-1574.

XIE Hong, CHENG Haozhong, NIU Dongxiao. Discretization of continuous attributes in rough set theory based on information entropy [J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(9): 1570-1574.

(编辑 魏希柱)