

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2013.03.029

利用平滑区域检测的 HEVC 帧内编码快速算法

蒋 洁¹, 郭宝龙¹, 莫 玮², 焦昶哲¹, 孙 伟¹

(1. 西安电子科技大学 智能控制与图像工程研究所, 陕西 西安 710071;

2. 中国电子技术标准化研究所, 北京 100071)

摘要: 为了降低高性能视频编码(HEVC)帧内编码的计算复杂度,在其二叉树编码结构的基础上,提出了一种根据平滑区域检测结果跳过子块划分的帧内编码快速算法.首先,通过统计多种不同内容的视频在不同量化参数下最终选取的编码块尺寸分布,分析了图像平滑特性与编码块尺寸大小的关系;进而根据当前已编码预测单元的编码信息,对当前区域是否属于平滑区域进行检测,根据检测结果自适应地跳过不适合此纹理特性编码块划分的编码过程.在最新的 HM4.0 平台上的实验结果表明,在相同的重建图像峰值信噪比下,所提算法在低复杂度和高性能标的测试条件下,编码时间分别减少了 24.8% 和 18.6%,而码率分别只有 0.44% 和 0.12% 的细微增加.

关键词: 高性能视频编码;帧内预测;二叉树结构;平滑区域检测;快速算法

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2013)03-0194-07

Fast intra coding algorithm using smooth region detection for HEVC

JIANG Jie¹, GUO Baolong¹, MO Wei², JIAO Changzhe¹, SUN Wei¹

(1. Research Inst. of Intelligent Control & Image Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. China Electronics Standardization Institute, Beijing 100071, China)

Abstract: Based on the quadtree structure of the HEVC coding unit, a fast intra coding algorithm that skips splitting subblock is proposed according to the result of the smooth region detection to reduce the intra coding complexity. First, the relationship between the image smoothness and coding unit's size has been analyzed by counting statistically the distribution of corresponding final coding units' sizes selected under different quantization parameters for different video contents. Second, whether the current coding unit belongs to the smooth region is detected according to the coding information on the current coding unit, which can help determine how to adaptively skip the coding process of the coding unit sizes not suitable for the texture features. Experimental results on the latest HM4.0 show that, on average, compared with the default fast approach set in the HEVC reference software, the proposed algorithm reduces the computational complexity by 24.8% and 18.6% for Low Complexity (Loco) and High Efficiency (HE) test sets, respectively, while incurring only 0.44% and 0.12% increment on the total bit rate, at the same peak signal to noise ratio (PSNR), which is of great practical value.

Key Words: HEVC; intra prediction; quadtree structure; smooth region detection; fast algorithm

正在制定的下一代视频编码标准高性能视频编码(HEVC)的帧内编码技术,通过提供更多的预测方向^[1]及更多的块划分方式^[2],使得 HEVC 的帧内编码性能明显提高,在全 I 帧的测试条件下,比 H.264/AVC 的压缩能力平均提高了 25%^[3].但其高性能是以高编码复杂度为代价的,特别是基于二叉树分层的多种预测单元划分类型,是导致编码复杂度增加的一个重要因素.因此,如何针对 HEVC 的编码新结构,研究简单有效的降低编码复杂度的方法,是新一代视频压缩标准 HEVC 满足实时应用的关键.文献[4]提出

收稿日期:2012-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61003196,61201290);教育部直属高校基本科研业务费资助项目(K50511040008)

作者简介:蒋 洁(1983-),女,西安电子科技大学博士研究生,E-mail:jjgirl2008@126.com.

不经过变换量化等步骤,而通过预处理提前排除一些可能性很小的预测模式.文献[5]提出一种通过简化率失真模型来减少预测模式的方法.文献[6]在文献[5]的基础上,进行了改进,提高了预测精度.文献[7]通过减少 64×64 块中预测模式来降低运算复杂度.这些方法都是研究在给定尺寸的帧内预测单元类型下,如何减少所要遍历的帧内预测模式的数目,并没有利用到不同的帧内预测单元类型和块划分大小对视频不同纹理内容的适应特性.

为进一步提高 HEVC 的编码速度,笔者提出一种跳过子块划分的快速帧内编码算法.通过统计多种不同内容的视频在不同量化参数下最终选取的编码块尺寸分布,分析了图像平滑特性与编码块尺寸大小的关系;进而根据已编码预测单元的编码信息,对当前区域是否属于平滑区域进行了分析,根据分析结果自适应地跳过不适合此纹理特性编码块划分的编码过程.在最新的 HM4.0 平台上的实验结果表明,在相同的重建图像峰值信噪比(PSNR)下,在低复杂度(LoCo)和高性能(HE)标准测试条件下,所提算法能使编码时间分别减少 24.8% 和 18.6%,而码率分别只有 0.44% 和 0.12% 的细微增加,具有显著的实用价值.

1 HEVC 中的帧内编码快速算法

相对于 H.264/AVC, HEVC 基于四叉树的编码单元结构提供了更灵活的编码、预测及变换单元,提高了帧内编码的精度;并在 H.264/AVC 的基础上,提供了更精细的块划分,支持更大的块尺寸,在原有的 16×16 、 8×8 、 4×4 块划分的基础上,新增了 32×32 、 64×64 等编码单元划分.每种块划分按照从大到小的顺序,以四叉树状的形式由编码器灵活决定,具体编码单元的尺寸划分如图 1 所示.每个尺寸的编码单元可以使用 $2N \times 2N$ 方式的预测单元,此时,预测单元的尺寸与所述编码单元的尺寸相等.所述编码单元还可以使用 $N \times N$ 方式的预测单元进行编码,此时,所述编码单元可划分成 4 个相同大小的子编码单元,分别进行编码,并通过子块划分标记 S_i 来确定是否需要进一步划分,其中 S_{cu} 表示当前编码单元大小, D_{cu} 表示当前编码单元深度.其最大的编码块尺寸为 64×64 ,而此编码块还可以进一步划分为 4 个 32×32 的编码块,每个 32×32 还可以再划分为 4 个 16×16 的编码块,依此类推,直到编码块的尺寸为 4×4 为止.其中,每个块是其更小的划分块的父块.对一个 64×64 的编码单元,编码器通过遍历所有划分方式的可能组合,最后采用率失真性能最好的一种划分组合,对该最大编码单元进行编码.因此,HEVC 的块划分结构使得其更加灵活,更能适应视频内容的不同特征.

在帧内预测方向的设计上,上一代视频编码国际标准 H.264/AVC 最多支持的 9 种预测方向已经不能满足高清视频中更为复杂细致的纹理结构.为达到更精确的预测效果,HEVC 提供了更多的预测方向,每种尺寸的块划分支持最高 34 种预测方向.在获得当前块最优预测方向时,可以使用全率失真方法(Full RD),对每一个预测方向都进行编码尝试,并选择率失真性能最好的一个方向作为当前编码块的帧内预测方向.如果在 HEVC 中要遍历所有的预测模式,对于一个 64×64 的编码块,要遍历 $5 + 34 \times 4 + 34 \times 16 + 34 \times 64 + 17 \times 256 = 7208$ 次的率失真优化过程,计算量相当大.为了降低编码复杂度,一些快速算法相继被提出并采纳到 HEVC 中,表 1 归纳比较了在 HEVC 中先后被使用的两种快速算法.

TmuC0.7^[4]中,先对 HEVC 中新增的预测方向进行模式粗选(Rough Mode Decision, RMD),粗选出一种模式,再与几种默认模式一起进行率失真计算,从而降低帧内编码复杂度.在模式粗选时,使用残差系数哈达码变换的绝对值和函数(HSAD)作为预判断函数.

JCTVC-C207^[5]中,为了提高快速算法的编码精度,用改进了的粗选准则函数遍历所有的预测模式,从中选出 N 种相对最优的模式进行率失真优化计算(不同尺寸的预测单元对应不同的 N),最终确定最优的预测模式.实验结果表明,该算法相对于 TmuC0.7,在不降低编码增益的同时,编码时间约降低了 16%,因此

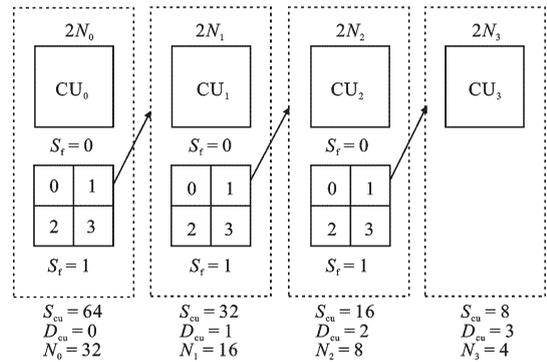


图 1 编码单元划分深度与编码单元尺寸的对 应关系

被最新的 HEVC 参考软件采纳.

表 1 HEVC 中的两种快速算法比较

	模式粗选	进行率失真优化的模式数量
Full RD	无	17 for 4×4 34 for 8×8, 16×16 and 32×32 5 for 64×64
TMuC 0.7	$\min_{\text{mode}} \text{HSAD}(\text{Res}_{\text{mode}})$, where no mode for 64×64 $\text{mode} = \{9, 10, \dots, 16\}$ for 4×4 $\text{mode} = \{9, 10, \dots, 33\}$ for 8×8 $\text{mode} = \{5, 10, \dots, 33\}$ for 16×16 and 32×32	First N modes +1 (best mode from RMD) 9+1 for 4×4 and 8×8 4+1 for 16×16 and 32×32 5 for 64×64
JCTVC-C207	$\min_{N \text{ modes}} (\text{HSAD}(\text{Res}_{\text{mode}}) + \lambda \cdot \text{bit}(\text{mode}))$ where $\text{mode} \in \text{All modes}$	N best modes (from RMD) 9 for 4×4 and 8×8 4 or 16×16 and 32×32 5 for 64×64

HEVC 中现有的快速算法都是在给定的某个帧内预测单元类型下,减少其需要遍历的帧内预测模式数,并没有利用不同的帧内预测单元尺寸对视频不同纹理内容的适应特性,来进一步降低 HEVC 的编码复杂度.

2 基于平滑区域检测的 HEVC 快速帧内编码算法

2.1 HEVC 的帧内编码块大小与视频内容的联系分析

为了分析不同内容特性的视频序列所使用的编码尺寸的分布特性,首先对文献[8]给出的通用测试条件中 18 个测试序列进行了帧内编码,统计了不同尺寸编码块所占的比重.其中 Class A、Class B 和 Class E 分别为分辨率为 2400×1600、1920×1080 和 1280×720 的高清序列,Class C 和 Class D 分别为 832×480 及 416×240 的 WVGA 和 WQVGA 小尺寸序列.高清序列中有较多的平滑区域,而小尺寸序列中,视频内容相对丰富,因而平滑区域相对较少.图 2 为量化参数(QP)等于 27 时,5 类不同分辨率视频序列中各编码块尺寸所占的平均比重分布.

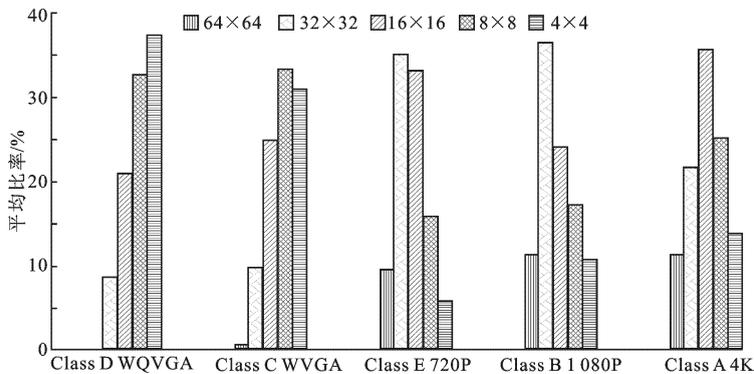


图 2 QP 为 27 时不同分辨率序列中各编码单元尺寸所占的平均比率比较

由图 2 可以看出,在平滑区域较多的高清序列中,使用的大尺寸编码块,如 32×32 及 64×64 块的比重,明显比 WVGA 和 WQVGA 中使用这种尺寸的比重更大.而在视频内容相对丰富、平滑区域较少的 WVGA 和 WQVGA 序列中,大部分使用适合非平滑区域的 4×4 和 8×8 的编码块尺寸.相对于较低分辨率的视频序列,高清序列具有更多的平滑区域,因此大尺寸编码单元块类型所占的比率增加.由以上分析可知,视频纹理平滑相似的区域,经过率失真优化选择后,这些区域通常用较大的编码单元块尺寸进行编码;而视频纹理细节丰富细腻的区域,经过率失真优化选择后,通常选用较小的编码单元块尺寸进行编码.如果能根据当前

编码区域的平滑特性,自适应地跳过一些不适合所属区域内容的编码块尺寸类型的编码过程,便能减少遍历这些编码块类型所需要的计算过程,进而简化帧内编码复杂度.

2.2 基于平滑区域检测的 HEVC 快速帧内编码算法

如前所述,在 HEVC 进行帧内编码时,对一个最大的 64×64 编码单元,需要遍历 64×64 到 4×4 的所有四叉数各个节点的所有块尺寸的可能组合,需要比较大的计算量.根据上述对编码块大小选择与视频内容的分析,在进行当前块的编码时,可根据当前已编码块的编码率失真信息,对当前区域是否属于平滑区域进行检测,如果属于平滑区域,则跳过不适合此纹理特性的更小编码块划分的编码过程,从而减少 HEVC 的帧内编码复杂度.由于最底层的节点,即 4×4 块划分不能继续分割为更小的子块,因此,在 4×4 子块编码时,默认不使用该方法.而在其他尺寸节点上,根据实际计算结果,自适应地使用该方法.在 64×64 这个最顶层的根节点上,首先对此 64×64 的块进行正常编码,使用其编码率失真信息,检测其区域平滑特性,按照文中方法,判断是否需要将所述块分割为 4 个 32×32 的节点,如果是,则依次进行上述 4 个 32×32 块划分的编码,并依次判断其中的每一个 32×32 块划分是否需要继续分割为 16×16 的划分,以此类推,直到 4×4 子块节点.

文中方法在编码器到达的每一个节点,需要检测该节点对应的编码块所处区域是否属于平滑区域.目前有 3 种方法表述图像纹理的平滑程度:直方图法^[9]、变换残差绝对值和(SATD)法^[10]及预测模式相似度检测法^[11].这些方法也都曾被引入到 H.264/AVC 的快速算法中进行研究,且能在一定程度上提高编码的速度,但相对于率失真优化模型,精度不高,导致编码性能下降比较明显,并且 SATD 法及直方图的计算都需要额外的计算量.文中方法在进行所述平滑区域检测时,根据当前节点编码块的编码率失真,与预先定义的阈值比较,可以简单有效地判断该节点编码块所处的区域是否属于纹理分布平滑的区域.如果当前编码块的编码率失真小于所述阈值,说明当前块所处的区域比较容易编码,因此属于平滑区域.显然,不同尺寸的编码块,其对应的阈值是不一样的.并且,由于在编码过程中,QP 的大小对编码块尺寸的选择也有较大影响,为了比较准确地获得不同尺寸的阈值,还需要分析不同 QP 对阈值定义的影响.这里对文献[8]给出的通用测试条件中 18 个测试序列进行测试,统计不同 QP 下,不同尺寸编码单元所占的比率变化,其均值统计结果如表 2 所示.由表 2 可以看出,大尺寸编码单元的比率随着 QP 的增加而增加.在 QP 增加时,编码块类型和预测模式等需要的比特所占总码率的比重增加,因此,阈值应具有较小的值以减少误判情况.

表 2 通用测试序列下各编码单元所占的比率 %

QP	64×64	32×32	16×16	8×8	4×4
22	4.95	18.09	24.34	26.45	26.17
27	6.35	21.94	26.34	24.70	20.68
32	8.69	23.98	29.47	22.62	15.24
37	11.91	27.92	29.95	20.16	10.06

基于以上分析,在确定当前块的编码信息时,使用该预测单元的率失真作为其编码信息,对文献[8]给出的通用测试条件中的 18 个通用测试序列的编码信息统计,定义所用的阈值函数为

$$T_h = 2.5(D^2 - 7D + 18) \begin{cases} 1, & \text{QP} \geq 32 \\ 64/\text{QP}, & \text{QP} < 32 \end{cases}, \quad (1)$$

其中, D 表示编码单元划分深度,在 HEVC 中取值范围是 $[0, 4]$,其决定了当前编码块的尺寸大小.

在进行当前节点的帧内编码时,文中算法的流程图如图 3 所示,具体步骤如下:

(1) 读取当前的编码单元深度及量化系数 QP 值,通过式(1)求得相应的阈值 T_h .

(2) 比较当前编码单元中最优帧内编码模式的率失真值(RD) J_{\min} 与 T_h ,如果 $J_{\min} < T_h$,则该节点的编码块不进行编码单元的继续划分, $S_f = 0$,当前模式为最终帧内编码模式;如果 $J_{\min} > T_h$,则跳到步骤(3).

(3) $S_f = 1$,当前编码单元继续划分成 4 个子编码单元,对每个子编码单元从步骤(1)开始执行.直到编码单元深度为 4,即编码单元尺寸为 4×4 ,不能再细分为止.

(4) 计算完毕,得到最佳预测模式.

使用文中算法后,能进一步降低 HEVC 的帧内编码复杂度,例如一个 32×32 大小的子块,当它不需要

继续下分,即它最终的编码预测单元是 32×32 时,如果能提前确定它的编码单元尺寸,在 HEVC 全遍历算法上可以省去其子划分共计 $4 \times 34 + 16 \times 34 + 64 \times 17 = 1768$ 次的率失真优化,在使用现有快速算法的参考模型(HM)平台上,也可以进一步节省其子划分共计 $4 \times 4 + 16 \times 9 + 64 \times 9 = 736$ 次的率失真优化,从而降低了计算复杂度.

3 实验结果和分析

为验证文中算法的有效性,将其集成在 HEVC 参考模型 HM4.0^[12]中,在全 I 帧结构下,按照文献[8]中通用的测试条件,对低复杂度(LoCo)和高性能(HE)测试条件进行试验,测试 QP 点为 22,27,32,37,每个序列各测试 10 帧.

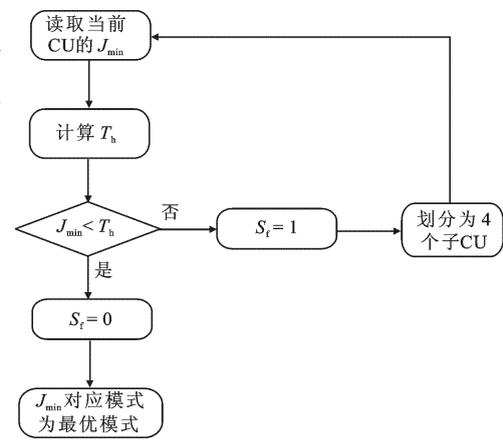


图 3 文中算法的流程图

这里主要从文中算法带来的速度增益以及付出的相应代价来考虑该算法的性能,具体包括以下两方面.

(1) 节省的编码时间百分比 T_{saving} , 即

$$T_{\text{saving}} = [(T_{\text{ref}} - T_{\text{pro}}) / T_{\text{ref}}] \times 100\% \quad (2)$$

其中, T_{ref} 表示使用 HEVC 现有快速算法^[5]的编码时间, T_{pro} 是采用文中算法的编码时间. 在获得同等编码性能的条件下 T_{saving} 越大, 表示编码器的计算复杂度降低得越多, 快速算法的性能就越好.

(2) 对应的编码质量损失, 用 R_{BD} 表示在相同峰值信噪比下, 编码码率的变化, 即

$$R_{\text{BD}} = [(R_{\text{BDpro}} - R_{\text{BDref}}) / R_{\text{BDref}}] \times 100\% \quad (3)$$

其中, R_{BDpro} 表示文中算法的编码码率, R_{BDref} 表示 HEVC 编码器得到的编码码率.

表 3 通用测试序列下码率损失及节省时间对比 %

Class	Sequence	LoCo		HE	
		R_{BD}	T_{saving}	R_{BD}	T_{saving}
Class A	Traffic	0.16	25.8	0.11	19.6
	4K PeopleOnStreet	0.24	22.0	0.10	16.3
Class B	Kimono	0.04	33.0	0.17	28.0
	1080P ParkScene	0.02	27.1	0.01	19.3
	Cactus	0.45	24.8	0.26	19.0
	BasketballDrive	0.64	42.6	0.07	34.1
Class C	BQTerrace	0.89	23.8	0.02	15.8
	BasketballDrill	1.01	24.5	0.41	18.6
	WVGA BQMall	0.22	19.9	0.10	13.2
	PartyScene	0.14	4.7	0.03	3.7
Class D	RaceHorses	0.04	18.0	0.01	11.1
	BasketballPass	0.41	20.1	0.03	17.1
	WQVGA BQSquare	0.04	12.5	0.04	7.6
Class E	BlowingBubbles	0.08	4.3	0.14	5.5
	RaceHorses	0.16	8.7	0.05	6.0
	Vidyo1	1.75	45.4	0.12	33.9
	720P Vidyo3	0.99	43.7	0.38	32.3
	Vidyo4	0.58	44.9	0.17	33.9
Average		0.44	24.8	0.12	18.6

由于快速算法本身是通过跳过部分编码模式来达到降低编码复杂度的目的的, 因此所选的最终编码模式有可能不是最优的, 必然会导致编码性能的降低, 即 PSNR 的降低或者输出的码率增大. 若算法能够节省

编码时间,同时只有极小的 PSNR 降低及微小的码率增加,则说明算法具有较好的性能.表 3 为各序列在 BDRate 模型下的测试结果.从表 3 中可以看出,在 LoCo 测试条件下,在相同的 PSNR 下,平均码率增加只有 0.44%左右,而编码时间则减少了 24.8%;在 HE 测试条件下,全序列的码率增加只有 0.12%,而编码时间则减少了 18.6%.从不同序列对应的数据可以看出,文中算法具有理论意义和实际应用价值.

为了更直观地表示编码器性能的损失,图 4 分别给出了 LoCo 测试条件下的 BasketballPass 序列,HE 测试条件下的 RaceHorses 序列,文中算法与 HEVC 中现有快速算法^[5]的 RD 曲线比较.其 RD 曲线几乎重叠,表明所提快速算法的编码性能与 HEVC 的算法相比,没有明显下降.图 5 给出了 BasketballPass 序列的主观质量比较,由图 5 可知,文中算法的主观质量与 HEVC 的算法相比,也没有明显下降.

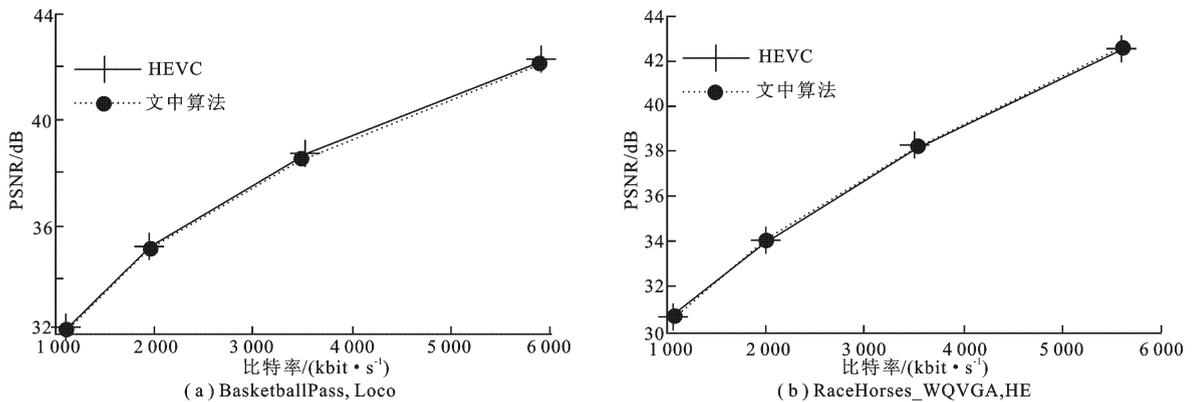


图 4 文中算法与 HEVC 的 RD 曲线比较

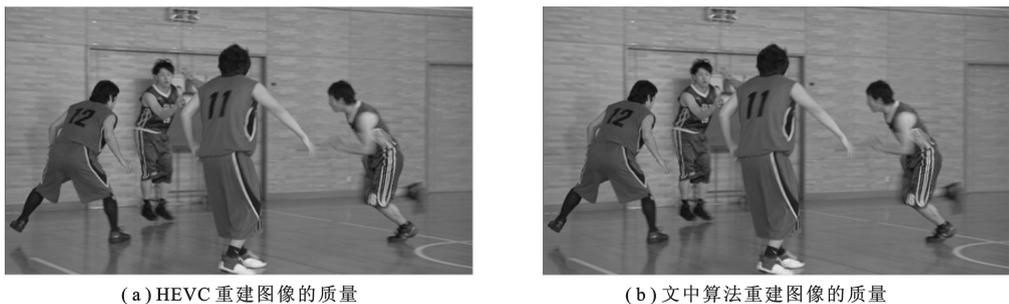


图 5 文中算法与 HEVC 的主观质量比较(BasketballPass, LoCo)

4 结束语

HEVC 中现有的快速算法都是通过引入简化的率失真模型粗选出几个相对较优的编码模式,减少需要遍历率失真优化模式的个数,从而降低计算复杂度,并没有利用到不同的帧内预测单元类型和块划分大小对视频不同纹理内容的适应特性,以进一步降低 HEVC 的编码复杂度.针对这个问题,笔者深入研究了 HEVC 中帧内编码结构的新特点,分析视频内容的平滑区域与最终编码块大小的相应关系,提出了一种基于平滑区域检测的快速帧内预测算法,在预测单元模式选择的层面提前终止一些不必要的子块细分,省去了这些细分子块的各方向预测过程,并与 HEVC 现有的快速算法相兼容,在主客观质量几乎没有下降的前提下,提高了 20%的编码速率,具有显著的实用价值.

参考文献:

- [1] Lainema J, Ugur K. Angular Intra Prediction in High Efficiency Video Coding (HEVC) [C]//IEEE 13th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP). Hangzhou: IEEE Computer Society, 2011: 1-5.
- [2] Woo-Jin H, Junghye M, Il-Koo K, et al. Improved Video Compression Efficiency Through Flexible Unit Representation and Corresponding Extension of Coding Tools [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20

(12): 1709-1720.

- [3] Ugur K, Andersson K, Fuldseth A, et al. High Performance, Low Complexity Video Coding and the Emerging HEVC Standard [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(12): 1688-1697.
- [4] Min J, Lee S, Kim I, et al. Unification of the Directional Intra Prediction Methods in TMuC[DB/OL]. [2011-02-10]. http://phenix.int-evry.fr/jct/doc_end_user/documents/20_Geneva/wg11/JCTVC-B100.zip.
- [5] Piao Y, Min J, Chen J. Encoder Improvement of Unified Intra Prediction[DB/OL]. [2011-03-10]. http://phenix.int-evry.fr/jct/doc_end_user/documents/3_Guangzhou/wg11/JCTVC-C207-m18245-v2-JCTVC-C207.zip.
- [6] Zhao L, Zhang L, Zhao X, et al. Further Encoder Improvement of Intra Mode Decision[DB/OL]. [2011-03-10]. http://phenix.int-evry.fr/jct/doc_end_user/documents/4_Daegu/wg11/JCTVC-D283-v3.zip.
- [7] Sugimoto K, Minezawa A, Sekiguchi S. Reduced Number of Intra 64×64 Prediction Mode[DB/OL]. [2011-03-10]. http://phenix.int-evry.fr/jct/doc_end_user/documents/7_Geneva/wg11/JCTVC-G447-v2.zip.
- [8] Bossen F. Common Test Conditions and Software Reference Configurations[DB/OL]. [2011-03-10]. http://phenix.int-evry.fr/jct/doc_end_user/documents/5_Geneva/wg11/JCTVC-E700-v1.zip.
- [9] Yang C, Po L, Lan W. A Fast H.264 Intra Prediction Algorithm Using Macroblock Properties [C]//Proc of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'04). Singapore: IEEE, 2004: 461-464.
- [10] 谢晶, 贾克斌. 一种基于二维直方图的 H.264/AVC 快速帧内预测判决算法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(7): 1053-1060.
Xie Jing, Jia Kebin. A Fast Intra-frame Prediction Algorithm Based on Two-Dimensional Histogram for H.264/AVC [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2005, 27(7): 1053-1060.
- [11] Lin Y, Lee Y, Wu C. Efficient Algorithm for H.264/AVC Intra Frame Video Coding [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(10): 1367-1372.
- [12] Bossen F. HEVC Reference Software HM-4.0[CP/OL]. [2011-02-20]. https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn_TMuCSoftware/tags/HM-4.0.

(编辑: 齐淑娟)

(上接第 179 页)

- [9] Kumar S, Lemke K, Paar C. Some Thoughts about Implementation Properties of Stream Ciphers [C]//SASC 2004, Workshop Record. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 311-319.
- [10] Key E L. An Analysis of the Structure and Complexity of Nonlinear Binary Sequence Generators [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1976, 22(11): 732-736.
- [11] Tu Ziran, Deng Yingpu. Boolean Functions Optimizing Most of the Cryptographic Criteria [J]. Discrete Applied Mathematics, 2012, 160(4-5): 427-435.
- [12] Zhang Weiguo, Xiao Guozhen. Construction of Almost Optimal Resilient Functions Via Concatenating Maiorana-mcfarland Functions[J]. Science China Information Sciences, 2011, 54(4): 909-912.
- [13] 何业锋, 马文平. 一类具有高非线性度的密码函数[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(6): 1107-1110.
He Yefeng, Ma Wenping. One Class of Highly Nonlinear Cryptographic Functions [J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(6): 1107-1110.
- [14] Hell M, Johansson T, Meier W. Grain-a Stream Cipher for Constrained Environments [EB/OL]. [2012-02-23]. <http://www.ecrypt.eu.org/stream/grainp3.html>.

(编辑: 齐淑娟)