

基于纹理相似性的高效视频编码帧间预测优化算法

吴宪云^{*①②} 高媛媛^① 刘凯^② 李云松^①

^①(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室 西安 710071)

^②(西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

摘要: 为了提高高效率视频编码(HEVC)的编码效率, 该文对帧间预测算法进行优化, 提出一种基于纹理相似性的快速深度判决算法。随着视频分辨率的提高, 视频序列中的空域冗余也随之增加, HEVC 通过增加编码块尺寸来提高预测效率, 代价就是编码复杂度的急剧增加。通过对视频序列分析可知, 图像中的平滑区域与细节区域在相邻帧中存在很大的相关性。该文利用相邻已编码帧的相邻编码块的深度信息, 来快速判决当前待编码块的深度信息。对于平滑区域, 快速判决待编码最大编码单元的最大深度, 以减少小块编码单元的模式判决; 对于细节区域, 快速判决待编码最大编码单元的最小深度, 以减少大块编码单元的模式判决。实验结果表明, 与原始的 HEVC 算法相比, 该文所提算法编码比特率平均增加约 0.13%以内, PSNR 的平均降幅为 0.09 dB, 算法运行时间平均减少了约 50%。

关键词: 高效视频编码; 帧间预测; 深度判决

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009/5896(2016)03-0655-06

DOI: 10.11999/JEIT150672

An Optimized Inter-prediction Algorithm for High Efficiency Video Coding Based on Texture Similarity

WU Xianyun^{*①②} GAO Yuanyuan^① LIU Kai^② LI Yunsong^①

^①(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In this paper, an optimized inter-prediction algorithm is proposed for High Efficiency Video Coding (HEVC) based on video texture similarity. With the increasing of the video resolution, spatial statistical redundancy is increased meanwhile. HEVC improves the coding efficiency by using large coding units, therefore increases the coding complexity significantly. For video sequence, the flat area and texture area are high correlated between adjacent frames. In this paper, previous encoded depth or split depth information is used to determine fast the depth of current encoding coding unit. For flat area, the algorithm predicts the maximum depth to reduce the mode decision for smaller coding units. For texture area, the algorithm can fast determine the minimum depth which can save the mode decision for larger coding units. Experimental result shows that the proposed algorithm can reduce 50% coding complexity compared with original HEVC algorithm. Meanwhile, the average PSNR only decreases 0.09 dB and the average coding rate is increased about 0.13%.

Key words: High Efficiency Video Coding (HEVC); Inter-prediction; Depth decision

1 引言

随着视频应用的普及, 对视频的分辨率多样性要求的逐渐增长, 高清(HD)视频应用的普及、超高

清视频的出现都对现有的 H.264/AVC 提出巨大挑战^[1], 同时对现有移动设备以及网络带宽带来巨大冲击, 如何在有限的带宽以及现有的移动设备上满足人们对超高清视频的需求成为日益重要的问题。

2010 年 4 月, JCT-VC 在德国的德累斯顿召开的第 1 次会议发布了新一代视频编码标准 HEVC (High Efficiency Video Coding)^[2]。HEVC 利用较先进的编码工具, 针对不同内容属性的视频可以自适应选择最优的编码模式, 已达到高效的视频压缩, 跟前一代视频压缩标准 H.264/AVC 相比, 压缩比可以提高 50%^[2]。但相应的编码复杂率也随之提高^[3]。HEVC 在性能提升方面的改进是以牺牲大幅的编码

收稿日期: 2015-05-04; 改回日期: 2016-01-05; 网络出版: 2016-01-14

*通信作者: 吴宪云 xywu@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 中国博士后科学基金(2013M540735), 国家自然科学基金(61301291, 61301287, 61222101), 111 工程(B08038), 陕西省科技创新团队项目, 中央高校基本科研业务基金

Foundation Items: China Postdoctoral Science Foundation (2013M540735), The National Natural Science Foundation of China (61301291, 61301287, 61222101), 111 Project (B08038), Shaanxi Province Science and Technology Innovation Team, Central University Basic Research Fund

复杂度为代价, 所以实现视频压缩的关键问题是在保证压缩效率与图像质量前提下有效减低编码复杂度。

HEVC 采用四叉树的划分结构, 提高了编码性能的同时也增加了编码复杂度。为了提高编码效率, 文献 [3,4] 利用前一帧的最大编码单元 (Largest Coding Unit, LCU) 分割信息来预测当前位置 LCU 的分割层数, 减少了编码单元 (Coding Unit, CU) 模式的判决次数。文献 [5-7] 利用视频前后帧相关性以及视频统计特性对 HEVC 帧内编码进行了优化, 提高了帧内编码效率。文献 [8-10] 利用运动一致性以及视觉特性进行快速帧间编码, 获得了较好的效果。文献 [11-15] 利用了 HEVC 中的 SKIP 模式, 进一步提高了现有优化算法性能。文献 [16] 提出根据周围邻块的预测单元 (Prediction Unit, PU) 预测模式来减少遍历帧间 PU 模式的次数, 从而进一步降低编码复杂度。

上述方法均取得较好的效果, 但是这些方法没有考虑到视频中的纹理特性。通过对视频序列分析可知, 图像中的平滑区域与细节区域在相邻帧中存在很大的相关性, 本文通过分析帧间序列的相关性, 对复杂度较高的深度判决做了深入研究, 提出了关于帧间快速深度判决的算法, 跳过或者提前终止 LCU 以及 CU 的划分深度, 同时采用 SKIP 快速算法, 在保证了一定的图像质量和压缩性能基础上, 显著提高编码效率。

2 帧间算法复杂度分析

2.1 CU 划分深度复杂度分析

HEVC 相比较 H.264 的显著改进之一是采用四叉树的划分结构, 基于率失真 (Rate Distortion, RD) 代价确定 CU 划分的处理顺序^[4], 编码单元从深度为 0 依次增加为 3, 对应块大小依次为 64×64 , 32×32 , 16×16 , 8×8 。为了选择最优的 LCU 划分方式, 需要遍历所有的划分深度, 每种深度均需要进行预测、变换、量化和熵编码, 从而求得当前的率失真代价来判断是否划分^[5]。HEVC 根据当前层 CU 率失真代价与下一层 4 个子 CU 的率失真总和来判断当前层 CU 是否划分。

对于每个 CU 来说, 四叉树遍历后得到的最优的树形结构。如图 1 所示。

由图 1 发现, 当最大划分深度为 3 时, 对于单个 LCU 需要进行 64 次 CU 预测编码的遍历才可以确定最优划分方式。而对于序列 BasketballDrill 来说, 一帧图像包含 104 个 LCU, 则需要遍历 6656

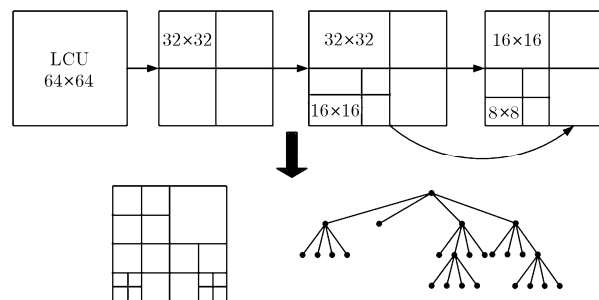


图 1 CU 划分结构示意图

次 CU 编码, 且每次遍历都需要确认最佳预测模式, 且进行 TU 划分, 进而求得当前块的率失真代价, 计算复杂度相当高^[6]。所以, 很有必要对 CU 的划分方式进行优化。

2.2 帧间 LCU 及 CU 划分深度相关性分析

视频在本质上是由一系列连续的图像序列组成, 相邻图像之间时域上相差很短, 往往表现出很强的相关性^[7-10]。根据视频序列的这一特性, 结合图像的分割深度结构图, 发现相邻两帧图像的 LCU 划分深度有较强的相关性 (图 2 为相邻帧 LCU 分割模式对比图), 所以前一帧同位 LCU 深度可以作为当前帧同位 LCU 的参考。同时考虑到帧间运动矢量^[11,12], 我们把前一帧同位 LCU (以下简称参考 LCU) 以及它的左邻块、右邻块、上邻块、下邻块 (以下简称时域邻块 LCU) 的深度信息同时作为当前 LCU 划分深度的参考。

为了验证选取 LCU 深度策略的正确性, 我们对帧间 LCU 的深度相似性进行统计。分别选取 4 组不同的序列为: BlowingBubbles (416×240), BasketballDrill (832×480), Vidyo1 (1080×720) 和 ParkScene (1920×1080)。每组序列选取 100 帧图像, 在同样情况下统计参考 LCU 以及时域邻块 LCU 与当前 LCU 划分深度相似性。得出的结果如表 1 所示。

其中, 第 1 列表示当前帧 LCU 深度与前一帧同位 LCU 以及时域邻块 LCU 的深度相同, 第 2 列表示当前 LCU 与前一帧同位 LCU 以及时域邻块 LCU 的深度均小于 2, 第 3 列表示当前 LCU 与前一帧同位 LCU 以及邻块 LCU 的深度均大于等于 2, 最后

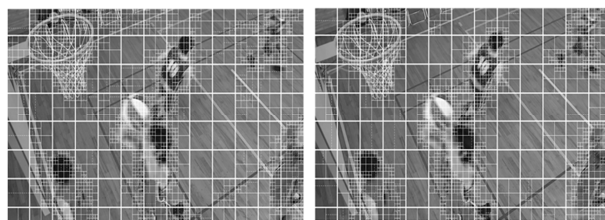


图 2 相邻帧 LCU 分割模式对比图

表 1 当前 LCU 与时域邻块 LCU 深度相似性关系(%)

序列	深度相同	深度均小于 2	深度大于等于 2	总体相似度
BasketballDrill	30.77	13.86	27.61	72.24
Blowbubbles	5.41	12.10	52.14	69.65
vidyo1	64.23	7.39	6.60	78.22
ParkScene	34.67	9.95	31.95	76.57

一列表示三者之和，即整体的相似性。由此看出，相邻帧相同位置处 LCU 划分深度确有相关性，而且整体相关性均大于 60%，所以在此基础上的优化十分有意义。

同时，确定 LCU 优化方法以后，在此基础上对 CU 划分方式进行优化。找到当前 CU(curCU)的参考帧同位 CU(记为 SCU)的划分深度，记为 d_{SCU} ，当前 CU 的深度记为 d_{CU} ，依次对 P 帧的每一个 CU 相对应的 d_{SCU} 与 d_{CU} 进行比对，定义变量 RATE 分两种情况讨论二者的关联性：

(1)若 RATE 表示 curCU 与 SCU 深度相同的概率，定义 RATE 为

$$RATE = R_{SAME}/T \quad (1)$$

其中定义变量 R_{SAME} 初始值为 0，如果 $d_{SCU} = d_{CU}$ ， R_{SAME} 加 1，反之不变。同时，记当前序列中 CU 总数为 T 。

(2)若 RATE 表示 curCU 与 SCU 深度相似的概率，定义 RATE 为

$$RATE = R_{SIMILIAR}/T \quad (2)$$

式(2)中 $R_{SIMILIAR}$ 初始值为 0，若 $d_{SCU} - 1 \leq d_{CU} \leq d_{SCU} + 1$ ， $R_{SIMILIAR}$ 加 1，反之不变。同时，记当前序列中 CU 总数为 T 。

为了证明这种选取策略的合理性，比较相邻帧 CU 划分深度的相似性，我们选取 BlowingBubbles(416×240), BasketballDrill(832×480), Vidyo1(1080×720)和 ParkScene(1920×1080) 4 组分辨率不同的序列进行测试。每组序列选取 100 帧图像，统计相邻帧 CU 划分尺度相同或相似的概率，即分别统计式(1)以及式(2)的情况下 RATE 的大小，得到的结果分别如表 2、表 3 所示。

表 2 curCU 与 SCU 划分深度相同概率

序列(分辨率)	RATE(%)
BlowingBubbles(416×240)	57.4
BasketballDrill(832×480)	69.3
Vidyo1(1280×720)	82.2
ParkScene(1920×1080)	54.9

表 3 curCU 与 SCU 划分深度相似概率

序列(分辨率)	RATE(%)
BlowingBubbles(416×240)	90.2
BasketballDrill(832×480)	95.0
Vidyo1(1280×720)	97.5
ParkScene(1920×1080)	89.2

由表 3 可以看出，在式(2)的情况下 RATE 值较大，证明了式(2)选取 CU 深度的正确性。由以上分析，我们可以确定 LCU 以及 CU 选取深度的方案。

在对帧间进行优化的同时，我们发现 SKIP 模式不需要编码量化后的残差，大大减少编码和划分复杂度，会相对减少编码比特率和编码时间^[13,14]，本文采取 SKIP 模式快速判决。

3 基于纹理相似性的快速帧间深度判决算法

前面分析了 CU 划分深度复杂性和 LCU 以及 CU 相关性分析，并在此基础上做了大量测试，从测试结果发现当前 LCU 的划分深度与其参考 LCU 以及邻块 LCU 有很强的相似性，针对此提出了 LCU 快速深度决策。同时，考虑到不满足相似性条件的 LCU，我们利用同位 CU 之间划分深度的相关性，在同位 CU 基础上做+1、-1 的操作，大大节省了编码时间。综上，本文提出的快速深度决策是结合 LCU 深度快速选择算法以及 CU 深度模式判定算法两部分构成，其算法步骤如下：

步骤 1 如果当前帧是 I 帧，正常编码，否则执行步骤 2；

步骤 2 如果当前 LCU 的时域邻块 LCU(上邻块、下邻块、左邻块、右邻块 LCU)存在，且时域邻块 LCU 的深度等于同位 LCU，则直接令 LCU 完成时域邻块 LCU 的深度计算，否则进行步骤 3；

步骤 3 时域邻块 LCU 以及同位 LCU 深度均小于 2，则当前 LCU 只完成深度为 0-1 的划分，否则进行步骤 4；

步骤 4 时域邻块 LCU 以及同位 LCU 深度大于等于 2，则当前 LCU 深度直接从 2 开始划分，否则进行步骤 5；

步骤 5 当前 CU 深度小于前一帧相同位置处 CU 深度减 1，则忽略当前编码，直接划分为 4 个子 CU 进行处理，否则进行步骤 6；

步骤 6 当前 CU 深度大于前一帧相同位置处

CU 深度, 只完成当前深度的计算, 不再划分, 否则执行步骤 7;

步骤 7 对当前 CU 进行正常编码并继续划分。

算法流程图如图 3 所示。

4 性能测试

本文使用了不同分辨率的测试序列, 分别对原版算法和本文提出的改进算法进行了实验, 验证改进算法的有效性。将本文算法加入到 HM10.0 代码进行修改并实现其功能, 改进算法与原版算法采用相同的配置, CTU 的最大尺寸设置为 64×64 , 编码块的最大划分深度设置为 3。所有实验采用同一计算机测试平台, 硬件配置为 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU, 2.93 GHz 主频、2.00 GB 内存, 编译及运行环境均为 VS2010, 实验选取了 5 种不同纹理、运动特征和分辨率的测试序列, 分别为 Blowing-Bubbles(分辨率 416×240), BasketballDrill(分辨率 832×480), FourPeople(分辨率 1280×720), BqTerrace(分辨率 1920×1080)和 BasketballDrive(分辨率 1920×1080), 每组序列选取 100 帧, 分别采用不同的 QP(22, 27, 32, 37)进行测试。

本文采用比特率差值百分比(ΔBit)和峰值信噪

比差值(ΔPSNR)作为编码效率评价的标准^[15], ΔTime 是时间差值的百分比, 作为编码复杂度的度量值。

$$\Delta\text{Time} = \frac{\text{Time}_{\text{HM}} - \text{Time}_{\text{new}}}{\text{Time}_{\text{HM}}} \times 100\% \quad (3)$$

对本文提出的快速深度判决算法和原版算法进行试验, 得到了表 4 的测试结果, 由表中数据可以看出, 不同序列在不同 QP 条件下采用快速算法的码流比原版码流平均增加了 0.13%左右, 而 PSNR 的平均降低了 0.09 dB 左右。在保持了原有的图像质量的情况下, 码流大小还有所减少, 编码时间平均能够减少 50.43%左右, 编码速度也是有显著的提升。相比于文献[16], 本文算法在节省编码时间的同时, 减少了码流, 而 PSNR 只略微降低, 充分证明本文算法的合理性。

文献[16]提出基于 PU 模式的预测算法, 利用了两种相关性:(1)相邻两帧图像中的同位 CU 中的 PU 模式相关性;(2)考虑到 MV 的存在, 利用了同位 CU 的邻块 CU 中的 PU 模式相关性。通过利用这两种相关性信息跳过多余的 PU 预测模式, 从而进一步提高编码效率。本文算法则是在 CU 层面的优化,

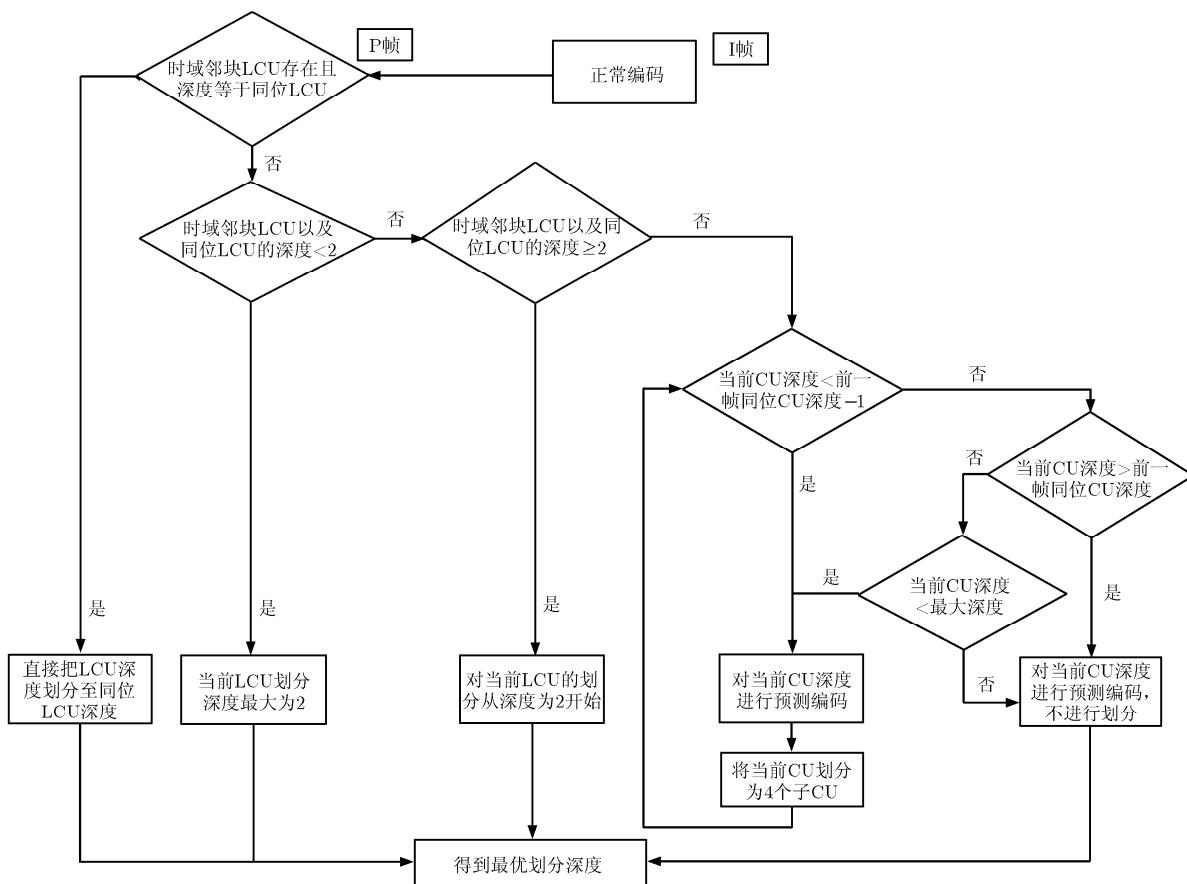


图3 最终算法流程图

表 4 编码性能比较

序列	QP	本文算法			文献[16]		
		Δ PSNR(dB)	Δ Bit(%)	Δ Time(%)	Δ PSNR(dB)	Δ Bit(%)	Δ Time(%)
Blowbubbles (416×240)	22	-0.02	-0.17	-34.91	-0.06	2.21	-40.63
	27	-0.08	-1.02	-36.68	-0.08	2.25	-44.89
	32	-0.13	-0.43	-41.53	-0.10	1.62	-47.68
	37	-0.18	-1.77	-51.66	-0.10	1.54	-48.08
BasketballDrill (832×480)	22	-0.04	0.87	-37.67	-0.04	2.03	-40.10
	27	-0.09	0.44	-39.98	-0.04	1.52	-45.09
	32	-0.14	0.56	-48.16	-0.05	1.56	-48.23
	37	-0.15	0.37	-55.35	-0.06	0.65	-51.04
FourPeople (1280×720)	22	-0.06	-1.47	-56.30	-0.03	1.44	-47.45
	27	-0.09	-1.19	-66.83	-0.03	1.57	-50.37
	32	-0.13	1.91	-78.07	-0.03	1.12	-53.89
	37	-0.15	2.59	-82.20	-0.04	0.76	-55.02
BasketballDrive (1920×1080)	22	-0.01	0.23	-30.34	-0.01	1.50	-39.64
	27	-0.02	0.41	-39.36	-0.03	0.54	-41.53
	32	-0.06	0.31	-51.31	-0.05	0.26	-45.82
	37	-0.09	0.39	-56.47	-0.04	0.17	-45.67
平均		-0.09	0.13	-50.43	-0.05	1.30	-46.57

通过分析相邻帧之间的纹理相似性，充分利用了相邻帧同位 CU 以及邻块 CU 深度信息，跳过不必要的深度划分，从而减少编码复杂度。从实验结果可以看到，文献[16]在进一步对 PU 模式进行优化后的性能仅与本文所提算法接近，而本文算法由于利用到了纹理信息，能够更好地适应不同纹理区域，因此获得了更好的优化结果。需要注意的是，文献[16]中的 PU 优化算法也可以作为本文算法的补充，进一步提高本文算法性能。

图 4 为序列 BasketballDrill 分别在 HM 算法与本文算法下 CU 划分深度对比图。结合表 5，我们发现相对于 HM 算法，本文算法在保持了 CU 划分深度大致相同的情况下，复杂度大大减少，验证了本文所提算法的有效性。

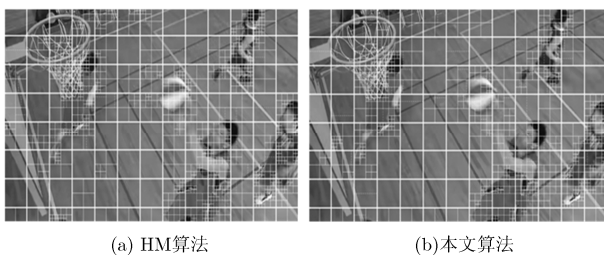
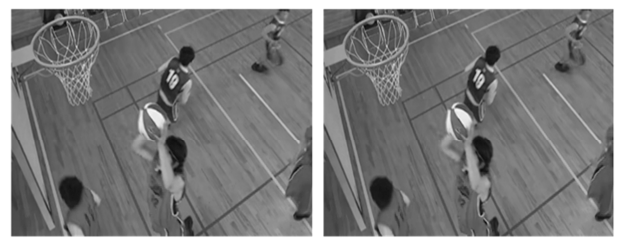


图 4 BasketballDrill 序列(第 52 帧) 在 QP=22 时的 CU 划分深度对比

表 5 本文算法与 HM 算法 CU 划分深度相同概率

序列(分辨率)	RATE(%)
BlowingBubbles(416×240)	70.31
BasketballDrill(832×480)	75.78
Vidyo1(1280×720)	85.20
ParkScene(1920×1080)	71.18

图 5 为序列 BasketballDrill 的重建图像，其中，图 5(a)是经过 HM10.0 版本程序原始算法恢复出来的重建图像，图 5(b)是本文算法压缩恢复出的重建图像。通过对比可以看出，本文提出并实现的预测快速判决方法可以保证与原算法几乎一致的图像质量。



(a) HM算法(PSNR: 33.48 dB) (b)本文算法(PSNR: 33.41 dB)

图 5 BasketballDrill 序列第 19 帧(QP=32)重建图对比

5 结束语

随着视频应用的普及视频图像的分辨率越来越高, 视频信息的数据量急剧增加, 在有限的带宽内如何存储和传输存在巨大压力。HEVC 是新一代的视频压缩标准, 在 H.264 的基础上压缩比提升了一倍, 但是却带来了 2~4 倍的计算复杂度。本文提出了一种快速深度判决算法, 能够根据相邻已编码帧的深度信息对当前编码深度进行快速判决, 能够很好地适应平滑区域和纹理区域。实验结果表明, 本文算法能够减少 50% 的编码复杂度, 码率平均增加约 0.13%, PSNR 平均减少约 0.09 dB。

参考文献

- [1] SULLIVAN G, OHM J R, HAN W J, *et al.* Overview of the high efficiency video coding (Hevc) standard[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(12): 1649-1668. doi: 10.1109/TCSVT.2012.2221191.
- [2] WIEGAND T, SULLIVAN G, LUTHRA A, *et al.* Overview of the H.264/AVC video coding standard[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2013, 13(7): 560-576. doi: 10.1109/TCSVT.2003.815165.
- [3] 李维, 张和仙, 杨付正. 高效率视频编码快速模式判决算法[J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(8): 104-110.
LI Wei, ZHANG Hexian and YANG Fuzheng. A fast mode decision algorithm for high efficiency video coding[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(8): 104-110.
- [4] SHEN Liqun, LIU Zhi, ZHANG Xinpeng, *et al.* An effective CU size decision method for HEVC encoders[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(2): 465-470. doi: 10.1109/TMM.2012.2231060.
- [5] 齐美彬, 陈秀丽, 杨艳芳, 等. 高效率视频编码帧内预测编码单元划分快速算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(7): 1699-1705. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01148.
QI Meibin, CHEN Xiuli, YANG Yanfang, *et al.* Fast coding unit splitting algorithm for high efficiency video coding intra prediction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(7): 1699-1705. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01148.
- [6] 成益龙, 滕国伟, 石旭利, 等. 一种快速 HEVC 帧内预测算法[J]. *电视技术*, 2012, 36(21): 4-7.
CHENG Yilong, TENG Guowei, SHI Xuli, *et al.* Fast intra prediction algorithm for HEVC[J]. *Video Engineering*, 2012, 36(21): 4-7.
- [7] 蒋洁, 郭宝龙, 莫玮, 等. 利用平滑区域检测的 HEVC 帧内编码快速算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2013, 40(3): 194-200.
JIANG J, GUO Baolong, MO Wei, *et al.* Fast intra coding algorithm using smooth region detection for HEVC[J]. *Journal of Xidian University*, 2013, 40(3): 194-200.
- [8] KIM IlKoo, LEE Sunil, PIAO Yinji, *et al.* Coding efficiency comparison of new video coding standards: HEVC vs VP9 vs AVS2 video[C]. 2014 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW), 2014: 1-6, Chengdu, China. doi: 10.1109/ICMEW.2014.6890700.
- [9] MALLIKARACHCHI T, FERNANDO A, and ARACHCHI H K. Effective coding unit size decision based on motion homogeneity classification for HEVC Inter prediction[C]. 2014 IEEE International Conference on Image Processing(ICIP), Paris, 2014: 3691-3695.
- [10] TU Qin, GUO Xiaoqing, MEN Aidong, *et al.* An adaptive CU depth selection mechanism based on visual sensitivity for HEVC inter coding[C]. IEEE 79th Vehicular Technology Conference(VTC Spring), Seoul, Korea, 2014: 1-5.
- [11] YOO H M and SUH J W. Fast coding unit decision based on skipping of inter and intra prediction units[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(10): 750-752. doi: 10.1049/el.2014.0451.
- [12] SUN L, AU O C, ZHAO C, *et al.* Rate distortion modeling and adaptive rate control scheme for High Efficiency Video Coding (HEVC)[C], 2014 IEEE International Symposium on Circuits And Systems (ISCAS), Melbourne, Australia, 2014: 1933-1936.
- [13] 李双十. 基于视频统计特性的 HEVC 快速帧间预测算法研究[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2014.
LI Shuangshi. A study of fast inter prediction algorithm based on video statistical properties for HEVC[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2014
- [14] HOU Xiaotao and XUE Yonglin. Fast coding unit partitioning algorithm for HEVC[C]. 2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Seoul, Korea, 2014: 7-10. doi: 10.1109/ICCE.2014.6775886.
- [15] 张和仙. 下一代视频编码标准 HEVC 帧间预测优化算法研究[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2013.
ZHANG Hexian. Research on optimization of inter prediction in HEVC[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2013.
- [16] 李元, 何小海, 钟国韵, 等. 一种基于时域相关性的高性能视频编码快速帧间预测单元模式判决算法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(10): 2365-2370. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00028.
LI Yuan, HE Xiaohai, ZHONG Guoyun, *et al.* A fast inter-frame prediction unit mode decision algorithm for high efficiency video coding based on temporal correlation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(10): 2365-2370. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00028.

吴宏云: 男, 1985年生, 讲师, 研究方向为视频编码以及高光谱图像处理。
高媛媛: 女, 1991年生, 硕士生, 研究方向为视频编码。
刘凯: 男, 1977年生, 教授, 研究方向为视频编码及VLSI设计。
李云松: 男, 1974年生, 教授, 研究方向为图像视频传输、处理以及编码。