

基于改进TZsearch的视频快速编码算法研究

钟林钢¹, 袁 晴², 叶兴扬²

¹UT斯达康通讯有限公司, 浙江 杭州

²杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州

Email: lgzhong@utstar.com, 1020155907@qq.com, 736980185@qq.com

收稿日期: 2021年8月14日; 录用日期: 2021年9月10日; 发布日期: 2021年9月17日

摘 要

随着网络多媒体技术的高速发展以及H.265/HEVC视频编解码标准的不断运用, 如何高效地进行视频编码是值得关注的热点之一。针对高效编码视频序列的问题, 基于H.265/HEVC帧间预测过程中的运动估计原理以及对视频图像最优点的概率统计, 加入判断提前终止搜索条件, 提出一种基于改进TZsearch的快速编码算法, 有效降低了视频编码时间。通过对经典视频序列的编码验证和对比, 改进TZsearch算法在满足编码质量的同时降低编码时间15.37%, 更加准确、高效地实现了视频编码。

关键词

运动估计, TZSearch算法, 光栅搜索

Research of Fast Video Coding Algorithm on Improved TZsearch

Lingang Zhong¹, Qing Yuan², Xingyang Ye²

¹UT Starcom Telecom Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²School of Electronic and Information Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang

Email: lgzhong@utstar.com, 1020155907@qq.com, 736980185@qq.com

Received: Aug. 14th, 2021; accepted: Sep. 10th, 2021; published: Sep. 17th, 2021

Abstract

With the rapid development of network multimedia technology and the continuous application of H.265/HEVC video codec standard, how to encode video efficiently is one of the hotspots worthy of attention. Aiming at the problem of efficient coding of video sequences, based on the motion esti-

mation principle in the process of H.265/HEVC inter prediction and the probability statistics of the best advantage of SS video image, adding the judgment early termination search condition, a fast coding algorithm based on improved TZsearch is proposed, which effectively reduces the video coding time. Through the coding verification and comparison of classical video sequences, the improved TZsearch algorithm not only meets the coding quality, but also reduces the coding time by 15.37%, and realizes video coding more accurately and efficiently.

Keywords

Motion Estimation, TZSearch Algorithm, Raster Search

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

H.265/HEVC 作为目前广泛使用的视频编解码标准, 主要采用混合编码框架技术, 编码压缩能力相较于 H.264 提升 50% [1]。随着 H.265/HEVC 编码率的提升, 其编码效率也急剧降低[2]。其中帧间预测是时间复杂度最高的关键技术, 同时能直接影响到视频编码后主客观质量, 主要采用的方式是运动估计。

运动估计常用的搜索算法有新三步搜索算法[3]、二维对数搜索算法[4]、三步搜索算法(Three Step Search, TSS) [5]及全搜索算法(Full Search, FS) [6]等。在搜索最佳匹配块的过程中需要使用一定的搜索算法, 是编解码过程中时间复杂度最高的模块, 搜索的精度与时间决定视频的实时压缩效率, 其中包括设置搜索的起点、搜索范围大小的确定、选取搜索模式。针对提升编码效率的需求, 国内外学者对编码搜索算法开展了一系列的研究, 并进行了算法改进。Li X 等人提出一种基于六边形搜索模板的改进 TZSearch 算法, 将六边形搜索模板替代菱形模板, 六边形模板仅需要 30 次搜索, 将搜索速度提升 1.7~6.5 倍, 性能损失小于 2% [7]。Tang 等人提出一种基于运动情况改变搜索模板的改进 TZSearch 算法, 帧内运动剧烈的搜索块采用底数为 4 的六边形搜索模板, 运动缓慢的搜索块采用底数为 4 的六边形搜索模板, 帧间相关性大的搜索块采用光栅扫描模板, 这种改进 TZSearch 算法适用于平行相机拍摄的视频序列[8]。Purnachand 等人提出一种提前设置阈值进行判断的改进 TZSearch 算法, 不再采用 TZSearch 算法中传统八点钻石搜索模板, 而是使用六边形搜索模板进行代替, 并且在开始搜索过程前设定步长的阈值, 当搜索步长小于设定阈值的情况下采用六边形搜索模板[9]。Kibeya 等人提出一种基于精细化搜索的改进 TZSearch 算法, 不再根据搜索步长进行两点搜索和光栅扫描搜索, 直接使用八点钻石搜索模板进行搜索, 并提出三种细化搜索模型优化搜索路径来解决精度降低的问题[10]。上述的算法大多适用于运动平稳的视频序列, 针对较为复杂的视频序列会有较大的质量损失, 并且上述算法均没有区分视频中物体高速与低速运动时的编码效率, 存在搜索次数多、编码效率低等问题。本文提出一种基于改进 TZsearch 的快速编解码算法, 通过对高速与低速视频不同运动状态编码分析和算法改进, 在保证编码质量的同时提升了编码效率, 减少了编码时间, 更加适用于实时视频编码的场景。

2. 运动估计

2.1. 运动估计原理

H.265/HEVC 中采用基于块匹配的运动估计, 将一帧视频图片分成多个区域块, 运动估计是指为当

前图像的像素块在已编码图像中寻找最佳匹配块,从而计算运动矢量[11]。将相邻两帧图像通过树形编码单元分别分成互相独立的像素块,根据搜索范围在参考帧中按照规定算法搜索误差最小的块,通过块匹配原则计算搜索块与当前帧块之间的匹配度,从而得到当前帧的最佳匹配块并计算出当前帧的运动矢量。在编码当前帧时只需要传输参考图像的位置信息和两者之间计算出来的运动矢量,解码时依旧参考帧与残差数据预测出当前帧。

2.2. 块匹配准则

运动估计需要有一个准则来判定搜索块的匹配度,不同的块匹配标准具有不同的判决精度,并且所产生的残余块的系数也不同,从而导致编码压缩率存在某些差异。这些块匹配准则分别是最小均方误差 MSE [12]、绝对误差和 SAD [13]和最大匹配像素数 MPC [14]。

1) MSE 准则:

$$MSE(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [f_i(m, n) - f_{i-1}(m+x, n+y)]^2 \quad (1)$$

2) SAD 准则:

$$SAD(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |f_i(m, n) - f_{i-1}(m+x, n+y)| \quad (2)$$

3) MPC 准则:

$$MPC(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T(f_i(m, n), f_{i-1}(m+x, n+y)) \quad (3)$$

其中块区域边长 M 、 N , (x, y) 表示运动估计, f_i 和 f_{i-1} 表示当前图像像素和参考图像像素。

在这三个匹配准则中, SAD 准则不含乘除法运算,使用最为广泛。在本文中也将采用这种准则进行搜索块匹配。本文在运动估计过程中使用拉格朗日率失真优化方法来计算运动矢量,率失真代价 J 计算如下:

$$J = SAD(x, y) + \lambda_m \cdot R_m \quad (4)$$

其中 λ_m 表示拉格朗日因子, R_m 表示比特数。

3. 改进 TZSearch 算法

3.1. TZSearch 算法原理

视频序列中物体运动状态不同,很难用单一的模型确定最优匹配块,难以用一种单一的搜索模板同时满足性能与计算复杂度最优。TZSearch 作为快速搜索算法,它是一种混合搜索模型,搜索模型有八点方形、八点钻石、光栅以及两点等,具体如图 1 所示。

TZSearch 算法不再使用原点作为搜索起始点,综合考虑视频序列特性采用 AMVP 技术预测新的起始搜索点,利用时域或空域上相邻宏块的 MV 对当前块进行预测并作为起始点预测集合中元素之一,从预测集合中选择率失真代价 J 最小的点作为最优起始搜索中心,节省搜索时间。另外,当步长为 1 时采用两点搜索算法,搜索图像中与当前最优点距离最近的点,例如若最优点为 2 时会搜索 a、b 两个点,若最优点为 6 时会搜索 e、g 两个点,从而补充搜索最优点尚未搜索的点;当搜索步长大于设定的阈值时采用光栅扫描模式,提高搜索的准确性。综上所述, TZSearch 算法满足搜索准确性的同时减少搜索时间,在准确性和计算复杂度方面均有可取之处。

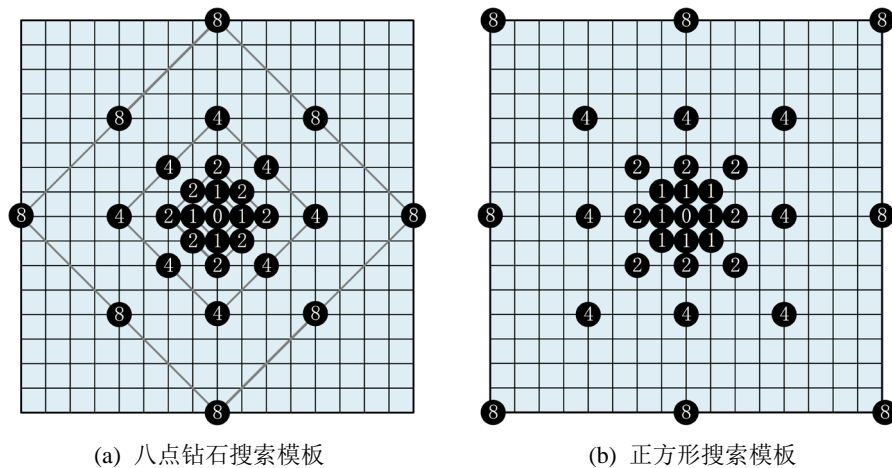


Figure 1. Schematic diagram of TZSearch algorithm
图 1. TZSearch 算法示意图

TZSearch 算法流程具体描述如下:

Step1: 起始搜索点的预测。采用 AMVP 技术在五个候选运动矢量 MV 中选择最优作为最优起始点;

Step2: 从起始搜索点以搜索步长为 1 开始, 采用八点钻石、方形模板, 以 2 的倍数依次增加, 若搜索框大小为 64 依次进行步长为 1、2、4、8、16、32、64 的模板搜索, 选出 J 最小的点作为该次步长搜索的最优点;

Step3: 若搜索步长等于 1, 则需要在该步长搜索起点的周围做两点搜索;

Step4: 若搜索步长大于某个设定的步长, 以当前起始搜索点为中心, 在一定搜索框内使用光栅搜索算法进行搜索, 选出 J 最小的点作为该次步长搜索的最优点;

Step5: 以前面步骤得到的最优点作为最新起始搜索点, 重复上述步骤使用同类型搜索模板进行循环搜索, 直到最佳匹配点出现在搜索中心位置时退出循环, 并保存最佳 MV 和 SAD。

TZSearch 算法引入预测初始搜索点的概念, 使用可变长的搜索模式降低计算复杂度, 减少搜索次数与时间, 进一步提高了搜索过程的精准性, 搜索流程图如图 2 所示。

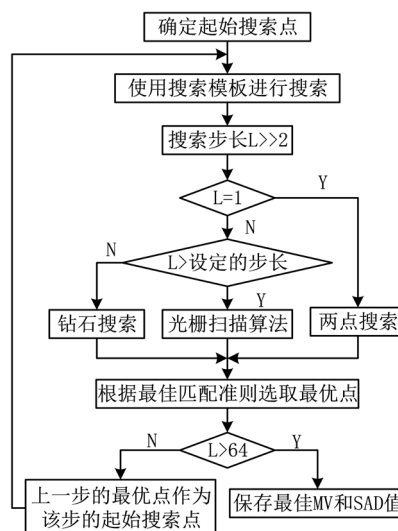


Figure 2. Flow chart of TZSearch algorithm
图 2. TZSearch 算法流程图

3.2. 最优点的概率分布统计

在 TZSearch 算法搜索过程中, 从起始搜索点以搜索步长为 1 开始, 以 2 的倍数依次增加, 若搜索框大小为 64 依次进行步长为 1~64 的模板搜索, 搜索次数最大为 $4 + 6 \times 8 = 52$ 。TZSearch 算法中搜索步长等于 1 时搜索次数为 4, 当步长不等于 1 时搜索次数为 8, 设置搜索轮数为 k , 取值为 1~7。若在该次搜索过程中找到最优优点时, 表明以该点作为该次搜索的最优点也是下次搜索的最优起始点。

通过对六个视频测试序列进行 TZSearch 算法测验, 统计视频图像中各个最优优点的概率如表 1 所示, $k=1$ 表明当搜索起点就是最优优点时, 概率占 54% 左右; $k=2$ 表明当搜索步长等于 1 时找到最优优点, 概率占 30% 左右; $k=3$ 表明当搜索步长等于 2 时找到最优优点, 概率占 9% 左右; $k=4$ 表明当搜索步长等于 4 时找到最优优点时, 概率占 5% 左右; $k=5$ 表明当搜索步长等于 8 时找到最优优点, 概率占 1% 左右; 当搜索步长大于 8 时搜索最优优点的概率可以忽略不计。

Table 1. The best probability statistics of test video sequence

表 1. 测试视频序列中最优点的概率统计

视频序列	1	2	3	4	5
Race Horses	50.25%	31.54%	10.32%	5.32%	1.57%
Traffic	53.65%	30.25%	10.58%	3.74%	1.58%
Four People	57.35%	29.31%	8.32%	3.21%	1.31%
Slide Editing	59.25%	28.35%	7.17%	4.35%	0.68%
Basketball Pass	50.29%	31.23%	9.96%	6.76%	1.56%
Park Scene	53.37%	28.32%	8.42%	9.32%	0.37%
AVERAGE	54.03%	29.83%	9.13%	5.45%	1.18%

根据表 1 中的概率统计结果, 视频内容运动情况较剧烈时需要多次迭代步长搜索才能找到最优优点, 运动较缓慢时搜索起点有 60% 左右的概率就是最优优点, 不需要进行搜索; 当搜索步长小于等于 8 时找到最优优点的概率达 98% 以上, 表明在当前搜索起始点的周围能够找到最优优点。

3.3. TZSearch 算法改进

通过对视频中最优点的概率统计, 当搜索轮数大于等于 4 (即搜索步长大于等于 8) 时已能够找到最优优点。在 TZSearch 算法中匹配搜索固定是七轮, 搜索次数设置为 $4 + 6 \times 8 = 52$ 次, 在找到最优优点后继续后面的搜索会增加编码计算复杂度, 增加编码时间。这里提出 TZSearch 算法改进方法, 通过加入判断提前终止搜索条件的方式使得当搜索过程中在找到最优优点后及时退出搜索过程, 从而降低 TZSearch 算法搜索次数并减少编码时间。改进的 TZSearch 算法搜索流程图如图 3 所示。

加入判断提前终止搜索条件的改进 TZSearch 算法流程具体描述如下:

Step1: 起始搜索点的预测。在五个候选 MV 中选择最优作为确定最优起始搜索点;

Step2: 从起始搜索点以搜索步长为 1 开始, 以 2 的倍数依次增加, 根据最佳匹配法则选出 J 最小的点作为该次步长搜索的最优点;

Step3: 若搜索步长等于 1, 则需要在该步长搜索起点的周围做两点搜索; 若搜索步长大于某个设定的步长, 以当前起始搜索点为中心, 在一定搜索框内使用光栅扫描模式进行搜索, 选择选出 J 最小的点作为该次步长搜索的最优点;

Step4: 根据最佳匹配法则计算当前搜索步长下所有匹配点的 SAD 值, 若所有匹配点的 SAD 值均大于当前的最优点, 则提前停止搜索过程;

Step5: 以前面步骤得到的最优点作为最新起始点, 重复上述步骤进行循环搜索, 直到最优点出现在搜索中心位置时退出循环, 并保存最佳 MV 和 SAD 值。

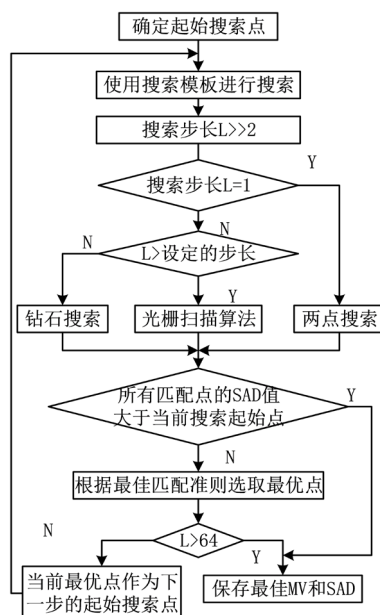


Figure 3. Flow chart of TZSearch adding judgment of early termination search
图 3. 加入判断提前终止搜索条件的 TZSearch 算法流程图

4. 试验结果和性能分析

为了验证上述改进 TZSearch 算法的有效性, 与全搜索(FS)算法、TZSearch 算法做对比试验。以 HM16.19 为测试平台, 基于 Visual Studio 2015 在 Intel(R) Core(TM) i5-4590 主频 3.30 GHz 和 64 位操作系统的计算机上采用六个经典视频测试序列进行验证。

六个经典视频测试序列分别选取前 30 帧图像进行编码, 并将六个视频分成两组, 分别对高速与低速两种运动物体视频进行对比, 三种算法通过对不同视频的编码时间、峰值信噪比 PSNR、比特率 RATE 等指标进行运算。三种算法的编码运算对比结果表 2 所示。

Table 2. Comparison results of coding operation on three algorithms
表 2. 三种算法编码运算对比结果表

视频序列	QP	FS			TZSearch			改进 TZSearch			
		Time (s)	PSNR (dB)	Rate (kbps)	Time (s)	PSNR (dB)	Rate (kbps)	Time (s)	PSNR (dB)	Rate (kbps)	
低速	Traffic	22	2205.05	41.66	17170.60	1816.96	41.65	17169.40	1616.37	41.56	17054.25
		27	1626.00	39.00	6186.11	1339.82	38.99	6185.90	1201.48	38.89	6123.85
		32	1389.35	36.52	2804.26	1144.83	36.53	2803.41	1024.32	36.36	2782.65
		37	1270.75	34.02	1383.65	1047.10	34.01	1382.73	987.47	33.04	1331.45
高速	Basketball Pass	22	47.83	41.60	879.91	39.08	41.60	878.91	34.53	41.32	893.37
		27	40.34	38.08	435.16	32.95	38.06	434.95	28.31	37.89	443.24
		32	39.70	35.52	236.32	32.44	35.49	235.41	26.96	34.98	225.72
		37	31.47	32.32	116.36	25.71	32.29	115.88	23.25	31.99	117.57

Continued

低速	Race Horses	22	158.66	38.83	5324.70	128.66	38.80	5322.34	95.34	38.69	5421.30
		27	134.75	33.73	2921.65	109.28	33.72	2920.77	86.36	33.54	2949.98
		32	115.73	30.16	1586.12	93.86	30.08	1585.85	74.62	29.81	1604.82
		37	104.24	28.50	901.66	84.54	28.44	901.22	65.57	28.62	939.57
	Park Scene	22	1262.20	40.50	9351.65	1024.91	40.50	9349.65	893.35	40.37	9336.29
		27	940.73	37.86	3724.63	763.87	37.83	3723.90	683.06	37.66	3767.96
		32	834.03	35.37	1641.63	677.23	35.36	1640.16	580.70	35.10	1655.04
		37	762.99	33.10	726.85	619.55	33.04	725.55	553.85	32.69	732.62
高速	Four People	22	362.15	43.41	3001.66	293.34	43.39	2999.34	257.49	43.12	3033.14
		27	303.82	41.10	1252.62	246.09	41.09	1251.60	213.96	40.82	1313.47
		32	280.74	38.49	666.60	227.40	38.47	665.97	200.27	37.98	688.27
		37	269.97	35.62	379.03	218.68	35.61	378.19	194.76	35.09	402.29
	Slide Editing	22	299.56	46.77	1478.32	236.95	46.77	1476.70	215.95	46.65	1501.99
		27	285.36	41.10	1143.99	225.72	41.03	1142.25	208.42	40.82	1180.40
		32	298.76	37.00	850.98	220.52	37.00	849.86	203.07	36.68	861.76
		37	276.60	32.65	593.53	218.79	32.63	592.92	196.53	32.57	630.42
AVERAGE			555.87	37.20	2698.25	452.84	37.18	2697.20	409.83	36.96	2726.46

根据对六个视频测试序列验证结果的统计,可以看出 TZsearch 算法编码时间相比全搜索算法减少了 18.6%,而改进 TZsearch 算法编码时间又有进一步减少,相比全搜索算法减少了 26.3%,说明改进 TZsearch 对于运动物体的编码效率优化比较明显。从 Rate 和 PSNR 来看,全搜索、TZsearch 和改进 TZsearch 算法三者的性能参数差距不大。PSNR 越大说明图像编码质量越好,从中可以看出 FS 算法的编码性能略优于 TZSearch 算法和改进 TZsearch 算法。

为了更直观对比 TZSearch 和改进 TZSearch 算法的区别,计算出视频编码过程中的编码性能指标 BD-Rate [15]、BD-PSNR [16]以及两种算法编码时间的百分比,并将不同速度状态下视频编码结果分别表示如表 3 和表 4 所示。BD-Rate 表示当改进 TZSearch 算法与 TZSearch 算法的平均 PSNR 相同时编码比特率的增加量,数值为正表示改进 TZSearch 算法的编码性能降低;BD-PSNR 表示当改进 TZSearch 算法与 TZSearch 算法的平均 Rate 相同时 PSNR 的增加量,数值为正表示改进 TZSearch 算法的编码性能提升[17] [18]。运动时间用公式(5)进行比较:

$$\Delta T = \frac{T_{TZsearch-imp} - T_{TZsearch}}{T_{TZsearch-imp}} \times 100\% \quad (5)$$

其中分式的分母表示改进 TZsearch 算法运动估计搜索过程所耗费的时间,分子表示改进 TZSearch 算法与 TZsearch 算法运动估计搜索过程所耗费的差值。

从表 3 和表 4 可以看出, TZSearch 算法的平均 PSNR 值比改进 TZSearch 算法高 0.2218 dB,说明 TZSearch 算法的编码性能略优于加入判断提前终止搜索条件的改进 TZSearch 算法。改进后的 TZSearch 算法同 PSNR 下比特率增加了 0.52%,但编码时间与 TZSearch 算法相比减少了 15.37%左右,计算复杂度远远低于 TZSearch 算法。此外,不同速度状态下视频编码效率是不同的,对于低速运动物体的视频 TZSearch 算法编码时间相较于 TZSearch 算法编码时间减少 18.41%,对于高速运动物体的视频 TZSearch 算法编码时间相较于 TZSearch 算法编码时间减少 12.34%,改进后的 TZSearch 对于低速运动物体的编码效率优化更加明显。尤其是对于 RaceHorses.yuv 这个视频序列,背景不变,视频内容运动较缓慢,搜索

过程中检测到最优点时提前终止搜索，编码时间减少 29.34%，而编码效果并没有因此降低。改进后的 TZSearch 算法可以准确、高效地实现视频编解码，更有利于视频格式转换、视频帧率提升，从而满足基于实时视频传输系统的需求。

Table 3. Comparison of motion estimation on TZSearch and improved TZSearch for low speed video
表 3. 低速物体视频情况下 TZSearch 与改进 TZSearch 算法运动估计运算对比结果表

视频序列	性能比较		时间比较
	BD-Rate	BD-PSNR	
Traffic	0.47%	-0.171 dB	-10.74%
Basketball Pass	0.69%	-0.312 dB	-15.14%
Race Horses	0.52%	-0.235 dB	-29.34%
AVERAGE	0.56%	-0.239 dB	-18.41%

Table 4. Comparison of high speed video motion estimation on TZSearch and improved TZSearch
表 4. 高速物体视频情况下 TZSearch 与改进 TZSearch 算法运动估计运算对比结果表

视频序列	性能比较		时间比较
	BD-Rate	BD-PSNR	
Park Scene	0.84%	-0.242 dB	-13.81%
Four People	0.14%	-0.518 dB	-13.74%
Slide Editing	0.45%	-0.652 dB	-9.47%
AVERAGE	0.48%	-0.470 dB	-12.34%

5. 结论

针对高效编码视频序列的问题，基于帧间预测过程中的运动估计和快速搜索算法编码原理，提出一种基于改进 TZSearch 的快速编解码算法。在算法中通过对视频图像最优点的概率统计，加入判断提前终止搜索条件，使得视频编码时间大大降低。经过六组经典视频序列编码验证，改进 TZSearch 算法在满足编码质量的同时使得编码时间降低了 15.37%，更加准确、高效地实现视频编码。

参考文献

- [1] Sullivan, G.J., Ohm, J.R., Han, W.J., *et al.* (2013) Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard. *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, **22**, 1649-1668. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2012.2221191>
- [2] Alves, G., Carvalho, M., Pagliari, C.L., *et al.* (2020) The JPEG Pleno Light Field Coding Standard 4D-Transform Mode: How to Design an Efficient 4D-Native Codec. *IEEE Access*, **8**, 807-829.
- [3] Biswas, B., Mukherjee, R. and Chakrabarti, I. (2015) An Efficient VLSI Architecture for Motion Estimation Using New Three Step Search Algorithm. *TENCON 2014-2014 IEEE Region 10 Conference*, Bangkok, 22-25 October 2014, 1-5.
- [4] Sayadi, F.E., Marwa, C., Bahri, H., *et al.* (2018) Parallel Full Search Algorithm for Motion Estimation on GPU. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering*, **11**, 317-323.
- [5] Qin, C., Li, L., *et al.* (2018) A New Three-Step Iterative Method for a Countable Family of Pseudo-Contractive Mappings in Hilbert Spaces. *Journal of Computational Analysis and Applications*, **25**, 860-875.
- [6] Basha, S.M. and Kannan, M. (2016) Design and Implementation of Low-Power Motion Estimation Based on Modified Full-Search Block Motion Estimation. *Journal of Computational Science*, **21**, 327-332.
- [7] Li, X., Wang, R., Wang, W., *et al.* (2014) Fast Motion Estimation Methods for HEVC. 2014 *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, Beijing, 25-27 June 2014, 1-4.

-
- [8] Tang, X.L., Dai, S.K. and Cai, C.H. (2010) An Analysis of TZSearch Algorithm in JMVC. *The 2010 International Conference on Green Circuits and Systems*, Shanghai, 21-23 June 2010, 516-520.
- [9] Purnachand, N., Alves, L.N. and Navarro, A. (2012) Improvements to TZSearch Motion Estimation Algorithm for Multiview Video Coding. *2012 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, Vienna, 11-13 April 2012, 388-391.
- [10] Kibeya, H., Belghith, F., Loukil, H., *et al.* (2014) TZSearch Pattern Search Improvement for HEVC Motion Estimation Modules. *2014 1st International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, Sousse, 17-19 March 2014, 95-99.
- [11] Yu, X., Liu, Z., Liu, J., *et al.* (2015) VLSI Friendly Fast CU/PU Mode Decision for HEVC Intra Encoding: Leveraging Convolution Neural Network. *2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Quebec City, 27-30 September 2015, 1285-1289.
- [12] Pishdad, L. and Labeau, F. (2020) Analytic Minimum Mean-Square Error Bounds in Linear Dynamic Systems with Gaussian Mixture Noise Statistics. *IEEE Access*, **8**, 990-999.
- [13] Chandran, K. and Chandramani, P.V. (2019) Energy-Efficient System-on-Chip Reconfigurable Architecture Design for Sum of Absolute Difference Computation in Motion Estimation Process of H.265/HEVC Video Encoding. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, **6**, 1532-1542.
- [14] Huang, Y.P., Singh, P. and Kuo, H.C. (2020) A Hybrid Fuzzy Clustering Approach for the Recognition and Visualization of MRI Images of Parkinson's Disease. *IEEE Access*, **8**, 41-51. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969806>
- [15] Monteiro, E., Grellert, M., Bampi, S., *et al.* (2015) Rate-Distortion and Energy Performance of HEVC and H.264/AVC Encoders: A Comparative Analysis. *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Lisbon, 24-27 May 2015, 1278-1281.
- [16] Pjanic, P., Willi, S., Iwai, D., *et al.* (2018) Seamless Multi-Projection Revisited. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **11**, 2963-2973. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2868597>
- [17] Wang, Z., Wang, P., Zhang, H., *et al.* (2014) Texture Direction Based Optimization for Intra Prediction in HEVC. *Ieice Transactions on Information & Systems*, **E97.D**, 1390-1393.
- [18] Pan, Z., Yi, X., Zhang, Y., *et al.* (2020) Efficient In-Loop Filtering Based on Enhanced Deep Convolutional Neural Networks for HEVC. *IEEE Transactions on Image Processing*, **29**, 5352-5366. <https://doi.org/10.1109/TIP.2020.2982534>