

中图法分类号: TN919.81 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)11-1596-07

检索信息: 王明江, 王进祥, 商迪. 一种适合可变块运动估计硬件实现的改进三步搜索算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(11):1596-1602

一种适合可变块运动估计硬件实现的 改进三步搜索算法

王明江, 王进祥, 商迪

(哈尔滨工业大学科学园 微电子中心, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对三步搜索算法(TSS)不适合搜索中小运动剧烈程度的视频序列, 提出了一种基于初始点预测、加强对小范围搜索的可扩展的三步搜索算法。算法在保证对较剧烈的视频序列搜索有效性的同时, 加强了对中小剧烈程度视频序列的有效搜索, 在匹配精度、搜索点数等算法性能方面相对于三步搜索算法有了明显的改善, 同时有利于搜索模板的硬件易实现性, 最后将其引入到变尺寸块运动估计中, 获得了较好的效果。

关键词: 中值预测; 小范围精细搜索; 矩形模板; 变尺寸块运动估计

An improved three step search algorithm fit for VBSME hardware implementation

WANG Mingjiang, WANG Jinxiang, SHANG Di

(Microelectronics Centre Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: Based on the analysis of the reason that the TSS algorithm is unfit for searching low drastic video sequence, an extensible three step search algorithm(TSS) is proposed based on the prediction of initial point and enhanced searching in small range. The proposed algorithm has a significant improvement over the TSS both on matching precision and the reduced number of searching points, which enhances point searching in small range effectively, and the hardware structure mapping to the algorithm is easy to be implemented at the same time. The algorithm is also very fit for Variable Block-Size Integer Motion Estimation.

Keywords: median prediction; enhanced searching in small range; rectangle template; VBSME

0 引言

现代的视频图像压缩标准通常采用时域模型和空域(或频域)模型来完成视频数据的压缩, 运动估计作为时域模型的主要组成部分, 占据了编码器相当一部分的计算资源, 并在很大程度上决定了视频编码器的整体性能。目前主流的视频编码器均采用基于块匹配的运动估计策略, 对应的搜索算法可以分为两类: 全搜索算法和快速搜索算法。全搜索算

法的匹配精度最高, 但需要耗费巨大的计算资源, 所以近年来运动估计搜索算法的研究热点都集中在快速搜索算法。经典的快速搜索算法有 2 维对数搜索法、三步法、菱形算法、六边形算法等, 近年来 MPEG-4、H. 264 等标准先后采纳了 MVFAST、PMVFAST、UMHexagonS、EPZS 等高效的快速搜索算法, 这些算法在搜索代价大大降低的前提下获得了与全搜索算法近似的搜索效果。这些算法尽管具有很高的编码效率, 但由于算法搜索路径复杂, 搜索模式多种多样, 判断和分支处理众多, 使得很难设计出

收稿日期: 2009-03-08; 改回日期: 2009-07-10

第一作者简介: 王明江(1968—), 男, 教授。1998 年于复旦大学获微电子与固体电子学专业博士学位。现主要研究方向为多媒体芯片体系结构研究。E-mail: mjwang@hit.edu.cn。

对应的并行处理结构,因此不适合硬件设计的要求。而三步法作为一种经典的快速搜索算法,由于其具有相对简单的搜索模板,使得算法所映射出硬件结构的数据流十分规整,常适合硬件实现,相应硬件结构的研究也比较成熟。但三步法以初始搜索点为中心的由粗到细的搜索过程,使得其比较适合搜索运动比较剧烈的视频序列,对运动量不大的视频序列非常容易陷入局部最优,从而导致算法的匹配效果较差。针对这种情况近年来先后出现了 NTSS, ETSS 等改进的三步搜索算法^[1-2],但仍存在着类似硬件实现比较困难的问题。本文首先对原始的三步搜索算法不适合搜索中小剧烈程度视频图像的原因进行分析,然后针对上述问题在三步法的基础上提出了一种适合硬件实现的,基于初始预测点的可扩展的三步搜索算法(MTSS),在保证算法硬件可实现性的前提下,很好地解决了算法性能不高的问题,并将改进的算法应用到变尺寸块运动估计中。

1 搜索算法的改进

1.1 TSS 算法分析及预测起点三步法(PTSS)的引入

三步搜索算法(TSS)由 Koga 等人在 1981 年提出,由于其具有搜索模板简单、匹配性能良好等特点,已经在低比特率视频等领域获得广泛应用。TSS 算法的基本思想是采用一种由粗到细的搜索模式,以参考帧中与当前编码块具有相同位置处作为搜索窗口的中心开始搜索,每一步按一定的步长取周围 8 个点构成该步的搜索点群,进行匹配计算,并跟踪其中的最小误差点,进入下一步搜索,直至进行到最小步长,各步所取步长依次为 4, 2, 1。

TSS 算法的描述如下:

1) 以搜索窗口的中心为起点,选取最大搜索长度的一半作为步长,对周围距离步长的 8 个点进行块匹配误差比较;

2) 将步骤 1) 的步长减半作为本步的当前步长,搜索中心移至步骤 1) 的最佳匹配点,重新对当前中心点及距离当前中心点为当前步长的 8 个点的块匹配误差进行比较;

3) 找出最小块匹配误差所对应的点,若此时步长为 1,则所在位置点就对应最优运动矢量 mv ,算法结束;否则重复步骤 2)。

算法搜索的过程示意图如图 1 所示,图中标号表示搜索的步数,每次块匹配过程要经过三次搜索匹配才能确定最优运动矢量。

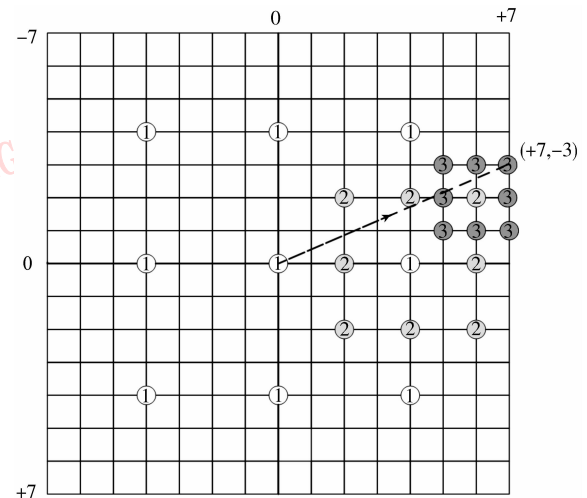


图 1 三步搜索算法搜索路径示意图

Fig. 1 Three-step search algorithm schematic diagram

以三步法为代表的固定模式快速搜索算法通常都基于这样的假设:搜索窗内的误差曲面是呈单峰分布的,而实际中由于视频序列的多样性,这个假设经常不会成立。实际搜索窗内的误差曲面在存在全局极值单峰的同时,还存在着众多的由次优点组成的局部极值峰。而由于视频是运动的图像序列,当前编码块在不同序列间的单峰极值点是运动的,所以三步法以初始的零点作为搜索起始点,并且其第 1 步较大的搜索步长使得其搜索过程非常容易陷入局部最优,因而影响了搜索的匹配精度。如果在搜索的初始阶段就能够通过初始点预测使得其搜索起点以较大的概率落在全局最优点附近,就能够有效地减少落入局部最优的可能,提高算法的匹配精度^[5]。基于初始点预测的运动估计已经被 MPEG-4 和 H. 264 等视频标准的参考软件所采纳,表 1 给出了原始的基于零点的三步法(TSS)、基于预测初始点三步法(PTSS)及全搜索算法(FULL)的算法性能比较,可见引入初始点预测能够大幅度改善运动估计的效果。

预测搜索初始点主要基于 3 种策略:利用空间上、时间上和统计上的相关性,考虑到硬件方式实现搜索算法的代价,通常采用中值预测的方法,即采取左侧块、上方块、右上方块运动矢量的中值作为当前块的预测矢量。本文算法在预测初始运动向量的方面,采取了中值预测的方式。

表 1 PTSS 与 TSS、全搜索算法的性能 (PSNR/dB) 比较

Tab. 1 Comparison of PSNR for various sequences among PTSS, TSS and FULL algorithm

Video Seq.	News	Foreman	Coast guard	Football
TSS	37.60	35.18	32.86	34.27
PTSS	37.61	35.61	33.15	34.34
FULL	37.63	35.89	33.27	34.65

注: 以 CIF 格式 Foreman 序列, 码率为 300 kbit/s

1.2 改进三步法的提出 (MTSS)

由于视频图像在空间上具有很大的相关性, 通过邻近块 mv 中值预测获得的当前块预测 mv 通常都会具有非常高的准确性, 表 2 给出了采用全搜索算法获得的不同视频序列 (CIF 格式 300 帧) 最优 mv 落在预测中心点周围不同环状区域内的比例。从中可以看出不同视频序列的最优 mv 大都会在预测点附近 ± 2 的范围内被搜索获得, 即运动矢量的分布具有中心偏向性。

表 2 不同序列最优 mv 落在预测 mv 周围环状区域的分布 / %Tab. 2 Best mv distribution probability around the predict mv among different sequences

测试序列	搜索步长 Step/像素			
	0	1	2	>2
News	82.12	9.57	3.25	5.06
Mobile	49.09	44.98	4.45	1.48
Foreman	33.27	40.70	6.93	19.10
Coastguard	41.20	39.26	6.18	13.35
Football	19.51	17.10	6.99	42.84

对于平缓的运动序列 (如表 2 中给出的 News 序列), 大部分的图像内容是静止的或接近静止的, 预测 mv 往往与实际 mv 非常接近, 一般的搜索模板覆盖的范围都能有效包含最优点, 此时各种搜索算法的匹配精度差别基本可以忽略; 对于运动非常剧烈、无序的视频图像 (如表 2 中的 Football 序列), 预测 mv 可能不是很准确, 从而导致实际的 mv 可能偏离预测值较大, 此时 PTSS 算法第 1 步采用的较大的搜索步长, 能很有效地捕获最优点, 获得较好的搜索效果, 这也是 PTSS 算法适合搜索剧烈运动视频序列的原因; 但是现实世界中大部分都是中低速的视频序列 (如图中的 Foreman 序列), 实际的运动偏移与预测 mv 之间仅存在着比较小的偏差, 一般视频序列的最优 mv 有 80% 以上的概率都能在预测中心点 ± 2 的范围内获得, 这时 PTSS 算法第 1 步较大步

长的搜索模板, 很可能就会错过全局最优点, 即使假设 PTSS 算法此时仍能有效地检测到最优点所在的位置, 对于可能性最大的中心点附近, PTSS 在距离中心点 ± 2 的范围内附近最多只能搜索 17 个点, 通常情况下能够覆盖的点数要更少些 (如图 2 中只覆盖了 12 点), 并且由于众多次优点的存在以及三步法基于全局最优点单调分布推进搜索路径的特性, 仍然很可能无法获得全局最优点。如图 2 中, 在 Step = 2 的匹配过程中, A 点优于 B 点, 对于最优 mv 在 C 点的情形, PTSS 算法将无法搜索到 C, 造成搜索精度的失配。而上述这种情况在实际中是非常有可能出现的, 一种可能解决的办法就是在距离中心点附近即更可能获得全局最优 mv 的范围内投入更多的运算量。并且这种趋势对于算法的硬件实现是有利的, 因为密集的点分布将有利于硬件结构设计。

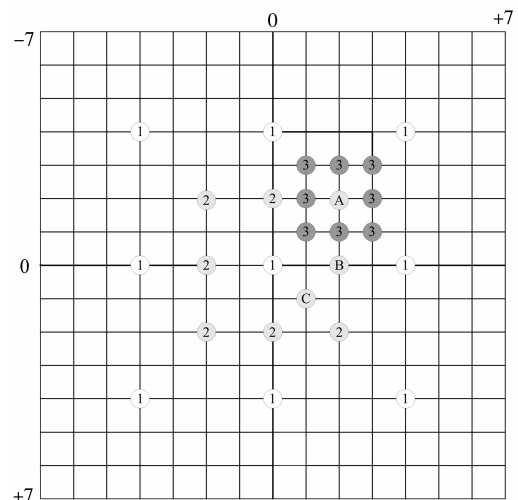


图 2 PTSS 算法在小范围内搜索可能失配示意图

Fig. 2 PTSS algorithm's possible mismatching diagram in small search area

根据上面的分析, 本文算法在此处做了较大的改进, 对更可能获得全局最优 mv 即预测中心点附近的小范围区域进行精细搜索。算法认为通过中值预测获得的 mv 在大部分的情况下具有较高的准确度, 能够保证全局最优点落在预测 mv 附近较小的范围内, 因此算法在第 1 部分取消了 PTSS 算法中步长为 4 的搜索过程, 而是分别搜索预测中心点、距离中心点步长为 1 的 8 个点和步长为 2 的 8 个点, 即先在小范围内进行精细搜索, 根据这一步的搜索结果来判断是否需要将搜索模板外扩进行步长为 4 的搜索, 如果判断出序列的运动趋势较小, 则只进行步

长为 1 的精细搜索,否则再把步长扩展到 4 进行较大范围内的搜索。算法的步骤如下:

1) 以中值预测 mv 所指向的点作为搜索中心点,分别搜索中心点、距离中心点步长为 1 的 8 个点和步长为 2 的 8 个点,如果最优点落在了中心点,说明预测点已经在较大的范围内形成单峰最优,此时就认为已经搜索到最优点,结束搜索,如果最优点落在了步长为 1 的 8 个点,跳到步骤 2),如果最优点落在了步长为 2 的 8 个点,跳至步骤 3);

2) 最优点落在步长为 1 的 8 个点,此时认为 mv 较小,采用小范围内的搜索,以最优点为中心搜索周围的 8 个点,获得的最优点就作为搜索的全局最优点,结束搜索;

3) 最优点落在了步长为 2 的 8 个点,此时说明预测 mv 具有较大的偏差,实际的 mv 具有较大的趋势,此时搜索步长为 4 的矩形窗上的 8 个点,进行择优,如果最优点落在了步长为 4 的矩形窗上,说明运动向量具有较大的运动趋势,跳至步骤 4),如果最优点仍在步长为 2 的矩形窗上,说明 mv 大小居中,跳至步骤 5);

4) 以步长为 4 矩形窗上的最优点为中心,搜索以其为中心的步长为 2 的矩形窗上的 8 个点,获得最优点后,以步长为 1 的矩形窗进行搜索,获得的最优点作为全局最优输出,结束搜索;

5) 以步长为 2 矩形窗上的最优点为中心,搜索以其为中心的步长为 1 的矩形窗上的 8 个点,获得的最优点作为全局最优点输出,结束搜索。

MTSS 算法的搜索过程示意图如图 3 所示,图中 Possible_MV3 就是通过步骤 1)3)4)获得的最优 mv 。

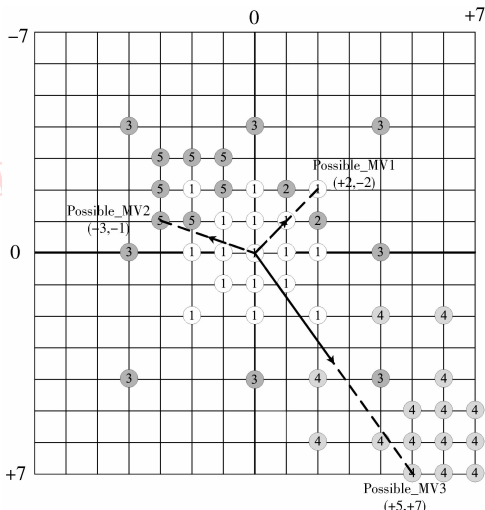


图 3 MTSS 算法搜索路径示意图
Fig. 3 MTSS search path diagram

这种具有伸缩性的搜索算法,在加强了对中小剧烈程度视频序列有效搜索的同时,由于其搜索范围的可扩展性将能够保证对较剧烈的视频序列搜索的有效性,而鉴于现实世界中图像序列的相关性,算法中扩展的部分只占很小的一部分比例,算法能够在获得更优搜索效果的同时,较大程度减小搜索的计算量。

2 基于 MTSS 算法的变尺寸块运动估计

2.1 基于 MTSS 的变尺寸块运动估计

为了有效降低视频编码后的残差值,近年来出现的 H.264 和 AVS 等视频编码标准都毫无例外地引入了变尺寸块运动估计技术,但是通常意义上的通过模式预测来减少所需要计算模式数目的方法,如利用时空关系预测当前编码块模式、早期中止策略、通过统计进行模式选择等方法,尽管能够减少变尺寸块运动估计的计算量,但是却不可避免地带来了编码性能上的损失,而且这些模式选择算法在硬件实现上大都存在一定的困难,所以遍历所有可能的模式,进行视频编码,对于对计算量不是很敏感的运动估计硬件加速器来说仍然是一个非常好的选择。本文在支持变尺寸块运动估计方面引入自顶向下预测的方式^[6],如图 4 所示,通过采用 MTSS 算法先对 16×16 的大块进行相对较为精细的搜索,获得 16×16 块的最优 mv ,然后以此确定 16×8 和 8×16 块运动估计的搜索起点,对于 8×8 块采用 16×8 块运动估计获得的 mv 作为其预测 mv ,依此类推,每个模式的子块都采用存储起来的其上层块的 mv 作为其预测 mv ,然后再进行运动估计,这样可以使得子块能够获得更为精确的预测 mv ,子块只需要在较小的范围内进行精细搜索,即可以获得比较理想的搜索效果。

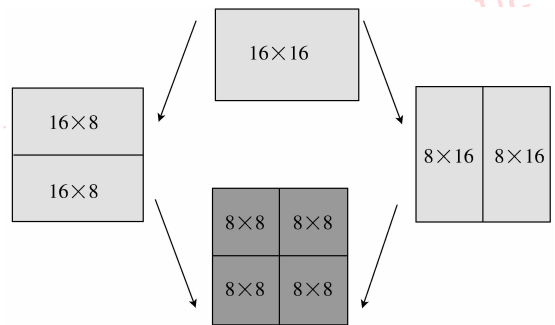


图 4 自顶向下的分裂预测
Fig. 4 Top-down layered prediction

对于子块的运动估计,取上层块 mv 作为当前块的预测 mv ,以其所指向的点作为搜索中心点,搜索中心点和周围的 8 个点,如果最优点落在了中心点结束搜索,否则以最优点为中心,再搜索以其为中心的 8 个点,获得的最优点作为当前模式的最优 mv ,结束当前模式搜索。两种具有代表性的搜索路径如图 5 所示。

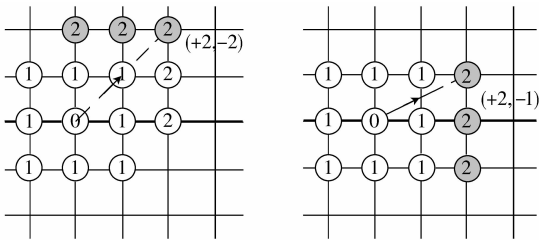


图 5 步长为 1 的小矩形精细搜索过程

Fig. 5 Fine rectangle search process while step equals to 1

2.2 矩形搜索模板硬件可实现性分析

用硬件来实现的运动估计搜索算法需要满足两个条件:一是搜索算法要具备较高的图像编码质量;二是对应所选算法映射出的硬件结构必须具备比较规则的数据流结构及较低的数据存储实现代价,以使得对应的硬件结构实现代价不会过高。在这两个前提下,算法硬件实现具有的并行处理及可流水实现的优势才具有实际的意义。三步搜索算法每一步中均采纳了 9 点的矩形的搜索模板,很容易映射出具有规则数据流的硬件结构。

如图 6 所示,在搜索窗口中,矩形搜索模板同一行的像素点所对应的参考宏块间存在着类似于全搜索模板时的数据重叠,对应硬件实现时,在完成当

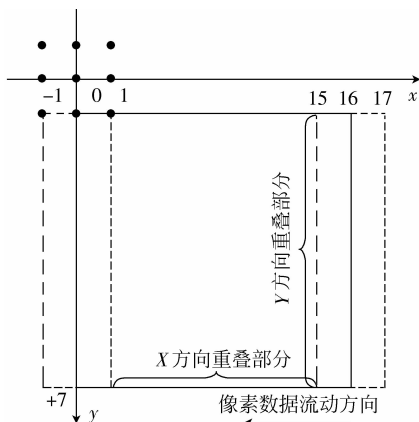


图 6 矩形搜索模板数据重叠示意图

Fig. 6 Overlap data of rectangle search template

前像素块匹配进行下一个像素点的匹配计算时,只需要读入重叠之外的部分参考区域数据就可以完成下一个像素点的匹配,因此对应实现的控制数据流将会十分规则,不同处理单元对应的数据输入完全可以做成流水结构,以减小硬件开销,由此带来的对存储器带宽要求的降低和对存储器操作次数的减少将会极大地降低硬件结构的功耗。同时又可以通过像素下采样的方式实现数据处理的并行化,又可以进一步加快硬件处理的速度,而对于菱形、六边形等搜索模板,数据的并行处理可以做到,但由于搜索模板中搜索点分布的不规则性,将很难实现数据的流水操作,并且硬件实现结构的复杂度要远高于三步法对应的硬件结构。所以三步法在算法的硬件实现上具有明显的优势,国内外先后已经给出了成熟的硬件结构^[3],图 7 中给出了一种可能的硬件实现结构,搜索窗口数据流水输入处理单元,而当前像素块数据广播输入处理单元,多组 PE 实现并行处理(图中未标出)。本文算法保持了原三步法每步处理都要求处理矩形搜索模板的特点,在提高搜索算法匹配精度和减少计算量的同时,又有利于三步法易于硬件实现的优点。

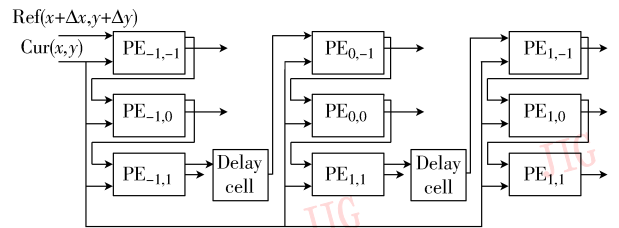


图 7 一种可能的矩形搜索模板实现结构^[4]

Fig. 7 One possible structure of rectangle search template realization

近年来所提出的三步法改进算法,主要可以分为两类:一类是固定搜索路径的 TSS 算法,另一类是可变路径的 TSS 算法。固定路径的 TSS 算法由于视频序列的多样性在算法性能方面不可避免地存在着局限性,而目前以提出的可变路径的 TSS 算法又存在搜索点数过多的问题,而且这些算法大多引入了其他搜索模板,如在初始搜索点附近引入菱形搜索模板、引入更为密集的矩形搜索模板(如 5×5 模板)。本文算法在搜索路径的灵活性方面和搜索代价方面进行了比较好的折中,每次都以 3×3 的模板进行搜索(每次搜索都能映射出规则的硬件实现结构),在保证搜索有效性的同时,又具备能够接受的

实现代价。

3 算法仿真结果与分析

为了验证 MTSS 算法以及将 MTSS 引入到变尺寸块运动估计后的性能,将算法实现的 c 代码集成到 H.264 参考软件(JM10.1)中进行算法性能测试,除了与 PTSS 算法进行对比外,实验还给出了与目

前业界非常有代表性的菱形搜索算法(DIAM)以及全搜索算法(FULL)对比的结果。实验环境如下:采用率失真优化模型,搜索窗口的半径取 16,帧率为 30 帧/秒,参考帧数目为 1,选取 News(平缓)、Foreman(中速)、Mobile(多细节)、Football(快速)4 组 CIF 格式的视频序列(100 帧),根据不同序列进行码率限定,获得算法的 PSNR 和运动估计时间和搜索点数如表 3、表 4 所示。

表 3 MTSS 算法与 PTSS 算法、菱形算法、全搜索算法性能比较(限制码率)

Tab.3 Performance comparison among MTSS,PTSS,DIAMOND algorithm and FS algorithm

视频序列	算法	PSNR /dB	码率/(kbit/s)	ME. T /s	Points
News	PTSS	37.68	202.38	1.042	25.00
	DIAM	37.69	202.42	1.016	13.91
	MTSS	37.69	202.48	1.003	18.31
	FULL	37.70	202.61	14.480	1024
Mobile	PTSS	32.31	1 004.3	1.071	25.00
	DIAM	32.41	1 004.7	1.023	14.05
	MTSS	32.42	1 004.1	0.952	18.68
	FULL	32.40	1 004.8	14.381	1024
Foreman	PTSS	35.60	299.73	1.187	25.00
	DIAM	35.70	300.11	1.105	17.29
	MTSS	35.79	300.07	1.074	21.43
	FULL	35.89	299.99	14.605	1 024
Football	PTSS	34.64	800.63	1.320	25.00
	DIAM	34.65	800.56	1.371	25.02
	MTSS	34.65	800.61	1.340	26.50
	FULL	34.94	800.75	15.050	1 024

表 4 引入 MTSS 算法前后的变尺寸块运动估计算法性能比较

Tab.4 Performance comparison between adopt MTSS algorithm or not in variable block size motion estimation algorithm

视频序列	算法	PSNR /dB	码率 / (kbit/s)	ME. T /s
Foreman (限码率)	MTSS(16×16)	35.82	301.55	1.105
	FULL(16×16)	35.92	301.68	14.160
	MTSS(16×16-8×8)	36.40	301.97	3.833
	FULL(16×16-8×8)	36.59	301.76	17.641
Foreman (不限码率)	MTSS(16×16)	36.64	365.72	1.177
	FULL(16×16)	36.65	360.30	15.126
	MTSS(16×16-8×8)	36.77	332.56	4.146
	FULL(16×16-8×8)	36.81	322.31	18.387

从表 3 中数据可以看出,对于 news 这类大部分内容为静止的视频序列,采用各种搜索算法获得的

匹配效果都非常接近,MTSS 相对于 PTSS 在搜索点数和搜索时间上具有很大程度的改善,大约提高了 25%左右;对于 foreman 这类包含较多无序运动的中速运动序列,MTSS 相对于 PTSS 具有很明显的改进效果,在限制码率为 300 kbit/s 的条件下,图像质量大约提高了 0.2 dB,搜索点数也有小幅度的下降,相对于目前主流的菱形搜索算法也具有更优的匹配效果;对于低速运动、多细节的 mobile 序列,MTSS 算法相对于 PTSS 算法也有 0.1 dB 左右的提高;对于 football 序列由于 MTSS 的外延搜索部分增加,搜索点数有了一定程度的上升,但是仍然保持了与 PTSS 和菱形算法相近的匹配效果。从上面的分析能够看出,MTSS 相对于 PTSS 算法在搜索精度、搜索点数方面都具有明显的性能改善,而在搜索时间上也占优,与目前主流的菱形搜索算法的总体性能相当,因此有利于硬件实现对算法性能的要求。

从表 4 中数据可以看出对于中速、包含较多无序运动的 foreman 序列,在限制码率为 300 kbit/s 的条件下,引入 MTSS 算法和小块 mv 预测的变尺寸运动估计算法相对于采用全搜索算法历尽 4 种模式择优的算法大约有 0.2dB 的图像质量损失,但要远优于只采用一种模式的全搜索算法获得的搜索效果;在不限制码率的条件下,前者相对于后者在图像编码质量上的差别可以忽略,而在码率上只有 3.18% 的小幅度提升。考虑到计算量的大幅度节省(硬件实现时这点更加明显),在某些对编码速率、成本和功耗要求比较苛刻的场合,本文提出的算法将能很好的取代全搜索算法。

4 结 论

在对三步搜索算法不适合搜索中小剧烈程度视频序列的原因进行分析的基础上,提出了一种先对小范围进行精细搜索的、可扩展的改进三步搜索算法,然后对算法的硬件可实现性进行了分析,并将其引入到了变尺寸块运动估计中,实验结果表明算法在保证对较剧烈的视频序列搜索有效性的同时,加强了对中小剧烈程度视频序列有效搜索,并一定程度减少了搜索的点数,相对于 PTSS 算法获得了较

大程度的改进,并且在变尺寸块运动估计中获得了较好的结果。

参考文献 (References)

- [1] Xuan Jing, Chau Lap Pui. An efficient three-step search algorithm for block motion estimation[J]. IEEE Transactions on Multimedia,2004,6(3):435-438.
- [2] Li Reoxiang, Zeng Bing, Liou M L. New three-step search algorithm for block motion estimation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology,1994,4(4):438-442.
- [3] Srinivasarao B K N, Chakrabarti I. A parallel architectural implementation of the fast three step search algorithm for block motion estimation [C]//Proceedings of IEEE SSD2008. 5th International Multi-Conference New York:IEEE,2008:1-6.
- [4] Yap S Y, McCanny J V. A VLSI architecture for variable block size video motion estimation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs,2004,51(7):384-389.
- [5] Wen Jun, Wang Peng. A new predictive three-step search algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(6): 862-865. [文俊,王朋. 一种预测三步搜索算法[J]. 上海交通大学学报, 2003,37(6):862-865.]
- [6] Chen Chun, Yang Zhi, Bu Jiajun, et al. A fast variable-block-size motion estimation algorithm for H.264[J]. Journal of Image and Graphics. 2007,12(2):272-276. [陈纯,杨智,卜佳俊,等. 一种基于 H.264 的可变块快速运动估计算法[J]. 中国图象图形学报, 2007,12(2):272-276.]