

基于模式和时空相关性的运动估计快速算法

宋建斌, 李 波, 李 炜, 马 丽

(北京航空航天大学计算机学院数字媒体室, 北京 100083)

摘 要: H. 264 标准中的多尺寸块运动估计, 在显著提高编码性能的同时, 大大增加了其计算量, 使得 H. 264 实时编码器的实现面临巨大挑战. 本文充分利用视频图像的时空相关性和多尺寸块间的运动相似性, 根据运动向量的中心偏置特性, 提出了一种运动估计快速算法. 该算法通过有效地预测搜索起点, 自适应选择搜索模式以及采用二级终止搜索策略等方式, 在编码性能相当的情况下, 运动估计的速度比全搜索算法提高了 95~247 倍, 比 H. 264 推荐的快速算法提高了 4.1~6.3 倍.

关键词: 视频压缩; 运动估计; 时空相关性; 模式相关性; 搜索模式

中图分类号: TN919 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2007)10-1823-05

A Fast Motion Estimation Algorithm Based on Mode and Spatiotemporal Correlation

SONG Jian bin, LI Bo, LI Wei, MA Li

(Digital Media Laboratory of School of Computer Science and Technology, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Compared with the previous standard, the compression performance of H. 264 has significantly improved because of different block size motion estimation. However, encoder using above technology becomes extraordinarily complex. Thus, a real-time video encoder based on H. 264 faces enormous challenges. Making full use of the spatiotemporal correlation of video and similar motion between the different size block, according to the central biased characteristic of motion vector, a fast motion estimation algorithm appropriated for H. 264 is proposed in this paper. By effective prediction of search window center point, adaptive selection of search patterns and termination of the search, the speed of the proposed algorithm speeds up 95~247 times than full search and 4.1~6.3 times than the fast motion estimation algorithm recommended in H. 264 while maintains similar distortion performance.

Key words: video compression; motion estimation; spatiotemporal correlation; mode correlation; search patterns

1 引言

随着多媒体技术和网络技术的发展, 出现了移动电视、IPTV 和手机电视等新的视频应用方式. 压缩比率高、恢复图像质量好、容错性能强是上述应用对视频编码提出的更高要求. 因此, 联合视频工作组 JVT (Joint Video Team) 在 2003 年 3 月提出了新一代视频编码标准 H. 264^[1]. 该标准采用了多尺寸块运动估计、整数 DCT 变换及环路滤波等多项新的编码技术. 同等质量条件下, 与 MPEG-4 标准^[2]相比, H. 264 标准的码率可节省 40% 以上^[3]. 然而, 上述技术的使用, 使得编码器变得异常复杂. 特别是运动估计, 约占用 60% (1 个参考帧) 到 80% (5 个参考帧) 的编码时间^[4]. 因此, 基于 H. 264 标准的实时编码器的实现面临巨大的挑战, 旨在降低计算量且适于 H. 264 标准的运动估计快速算法的研究显得非常必要.

全搜索运动估计 (FS) 虽然思想简单, 但效率极低, 一般作为基准算法用来分析快速算法的性能. 在考虑搜

索精度的前提下, 产生了许多运动估计快速算法^[5~9]. 这些算法仅仅从搜索模式和搜索策略角度展开研究, 没有充分利用视频图像的时空相关性有效预测搜索起点和提前退出搜索, 因此, 编码块的搜索次数仍然很高. MVFAST^[10]和 PMVFAST^[11]充分利用了视频图像的时空相关性, 在搜索速度方面有新的提高. MVFAST 和 PMVFAST 尽管纳入 MPEG-4 标准, 但并不适合 H. 264 的多尺寸块运动估计. 文献[4]提出了非对称多格点十字形六边形搜索, 已被收入 H. 264 标准, 参考软件 JM9.0 实现了该算法. 因为该算法采用交叉搜索和多分辨率网格搜索等确保视频编码质量的保守策略, 所以仍存在搜索冗余, 运动估计速度可进一步提高.

本文在分析宏块中不同尺寸块的运动相似性和相邻宏块间存在的时空相关性的基础上, 根据运动向量的中心偏置特性和非零运动向量水平分量常大于垂直分量的事实, 从搜索起点预测、搜索模式选择、搜索策略制定和搜索终止准则等方面进行研究, 提出适用于 H. 264 的基于模式和时空相关性的运动估计快速算法 (MSFAST).

2 H. 264 中的多尺寸块运动估计

为了使运动估计结果更优, 必须考虑运动向量等的编码位数, 因此, H. 264 标准采用 Lagrangian 代价函数作为块匹配误差函数.

2.1 块匹配误差函数

H. 264 使用的块匹配误差函数为 Lagrangian 代价函数^[12], 表示为:

$$J(B_i, m) = \lambda_{MOTION} \times R_{MOTION}(B_i, m) + D_{DFD}(B_i, m) \quad (1)$$

其中, B_i 为当前帧 F 内的块, 采用的编码模式为 $m \in M$ (M 为 H. 264 中帧间模式的集合), 函数 $R_{MOTION}(B_i, m)$ 为编码块 B_i 的运动向量 $MV_m = (m_x, m_y)$ 需要的比特数. λ_{MOTION} 是面向率失真优化的拉格朗日乘子, 定义为:

$$\lambda_{MOTION} = \sqrt{0.85 \times 2^{(Q-12)/3}} \quad (2)$$

其中 Q 表示量化参数. $D_{DFD}(B_i, m)$ 代表编码块的失真特性, 综合考虑匹配效果和计算复杂度, JM9. 0 中采用绝对误差和 SAD 来描述.

2.2 多尺寸块运动估计

由于图像的纹理复杂程度不同以及局部运动的方向和幅度不同, 基于不同尺寸块的运动估计更有利于提高编码效率. 因此, 在 H. 264 标准中, 共有 7 种不同的尺寸块, 分别对应一种帧间模式, 编号从 1 到 7, 如图 1 所示. 在参考软件 JM9. 0 中, 编码一个宏块, 分别按照不同的尺寸块在一定的搜索范围内进行运动估计, 然后根据 Lagrangian 代价函数求出最优的帧间模式并记录残差和运动向量. 可见, 多尺寸块运动估计的时间复杂度成倍增加. 依次对 7 种模式进行运动估计, JM9. 0 没有利用不同模式间存在的运动相似性. 本文根据块大小, 首先进行上层模式(如模式 1 是模式 2、3 的上层模式)的搜索, 其运动向量被选为下层模式的预测向量, 以提高搜索起点预测的准确性, 减少搜索次数.

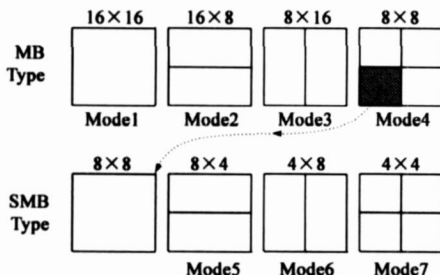


图 1 H.264 的 7 种帧间模式

3 运动估计快速算法

3.1 搜索起点预测

由于运动物体的整体性和视频运动的连续性, 因此, 视频运动必然具有时间和空间上的相关性, 同一宏块不同模式(不同尺寸块)间也存在着运动相似性(模

式相关性). 本文选用表 2 中的测试序列, 采用全搜索运动估计, 对所有宏块上下层模式(模式 1 为模式 2 和模式 3 的上层模式, 模式 2 和模式 3 为模式 4 的上层模式, 模式 4 为模式 5 和模式 6 的上层模式, 模式 5 和模式 6 为模式 7 的上层模式)间运动向量的差值做统计, 得到表 1. 观察表 1, 说明上下层模式运动向量相同的比例($\Delta x = 0, \Delta y = 0$)高达 97. 9%, 同一宏块上下层模式间存在着极强的运动相似性.

表 1 同一宏块上下层模式间运动向量差值比例表

$\Delta(x, y)$	0	1	2	3	4	5
0	97.9	0.6	0	0	0	0
1	1.1	0.1	0	0	0	0
2	0.2	0	0	0	0	0
3	0.1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

对于图 1 中的不同模式, 本文采用不同方法预测搜索起点. 以空间位置上的相邻块(如图 2(a) 中的 1 号块、2 号块和 3 号块)或时间上的相邻块(如图 2(a) 中的 4 号块)的运动向量来预测当前块的初始运动向量, 然后以此为起点作进一步的搜索. 通过对各种标准视频序列的统计结果表明有很大比例(64%~97%)的最优匹配点与上述预测运动向量对应的点相同, 因此这些点在搜索过程中的地位应高于其他点, 对它们进行搜索也是必要的. 因此, 本文采用了误差函数值比较法依次比较上述运动向量对应点, 确定搜索起点.

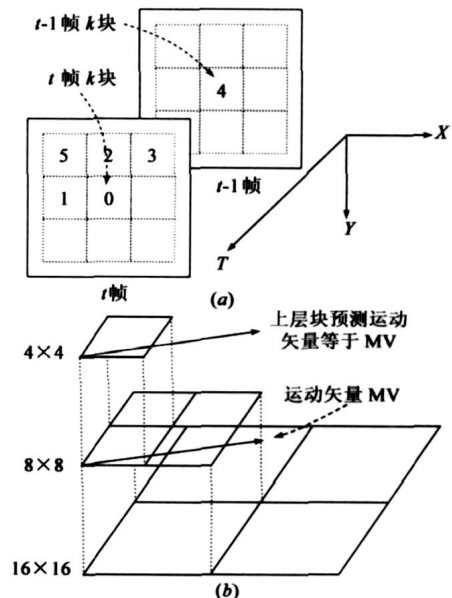


图 2 宏块的邻块以及宏块的划分

在图 2(a) 中, 设 1 号块、2 号块、3 号块和 4 号块的运动向量分别为 V_1, V_2, V_3 和 V_4 . 对应的误差函数值分别为 J_1, J_2, J_3 和 J_4 . 令 V_0 表示(0, 0)点运动向量, 其误差函数值记为 J_0 . 令图 2(b) 上层模式的运动向量为

V_u , 其误差函数值记为 J_u , 如果帧间模式为 1, 此时没有上层模式, 令 J_u 为足够大的值. 则预测的搜索起点 V_c 为: V_c 是 $MinJ$ 对应的点, 令 $MinJ = \min\{J_0, J_1, J_2, J_3, J_4, J_u\}$.

3.2 自适应的搜索模式

运动向量有两个明显的特征: 一是具有中心偏置特性^[7], 即大多数运动向量的模都比较小, 分布在搜索窗口中心附近; 二是非零运动向量的水平分量常大于垂直分量, 这与自然界物体运动的方向性相符合. 从搜索路线看, 菱形有其独特的优点, 菱形符合运动向量的分布. 因此, 本文采用自适应的梯度式菱形搜索模式. 自适应的梯度式搜索就是根据视频运动的特点和当前搜索结果沿着误差函数值降低的方向不断搜索, 直到搜索窗的边界或者符合终止准则.

根据上述特点, 本文的搜索模式分为大菱形模式 (LDS, 水平步长为 3, 垂直步长为 2) 和小菱形模式 (SDS, 步长为 1), 如图 3 所示. 与文献[9]中的大菱形模式不同, 本文的大菱形模式水平步长比垂直步长大, 更符合实际物体运动的方向性, 实现剧烈运动块最优位置的快速定位; 小菱形模式用于准静止或者运动一致性强的块的搜索, 或者用于大菱形搜索后的精细搜索.

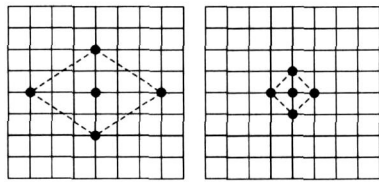


图 3 大菱形和小菱形搜索模式

本文根据视频运动的特点、当前搜索结果和当前块尺寸自适应地选择搜索模式. 首先对视频运动进行分类, 根据运动类型设置不同的初始模式. 为了使分类方法简单有效, 不引入过多的计算量, 本文的分类准则为: (1) 如果当前帧间模式大于 1 或者 $V_1 = V_2 = V_3 = V_4$, 表明运动变化类型为静态或准静态, 只需从搜索窗中心点作小步长的密集搜索, 因此当前块的初始搜索模式设为 SDS; (2) 否则, 当前帧间模式为 1 且 V_1, V_2, V_3 和 V_4 不全相等, 表明有中等或较大的运动, 需要在较大范围进行搜索, 设当前块初始搜索模式为 LDS. 在搜索过程中, 可根据搜索结果自适应调整搜索模式, 当误差函数值 J 小于某一阈值时, 可以认为搜索结果已具有相当的精度, 退出 LDS 搜索在小范围内进行 SDS 搜索即可. 实验证明, 上述分类法不仅简单, 而且有效.

3.3 二级搜索终止准则

文献[8]中的搜索模式为 SDS 时, 一次 SDS 后, 不管结果如何都让搜索过程结束, 会遗漏一些更优搜索点. 本文采用的方法为: 如果 SDS 搜索到的最优 (当前 J 值最小的点) 在小菱形中心, 则搜索过程结束; 否则, 继

续以 SDS 模式进行搜索.

为提高算法的速度, 一些算法利用了误差函数阈值作为搜索终止的条件. MVFAST 采用了固定的阈值, PMVFAST 则以当前块在空间上相邻块的最小误差函数值作为阈值. 事实上, 固定的阈值不具有普适性, 而当前帧相邻块的误差函数值的分布也没有很明确的相关性. 为了考察编码块 J 值与其邻块 J 值的相关关系, 本文针对表 2 中的测试序列, 记录了各编码块的 J 值. 经过统计分析, J 值的时间相关性比空间相关性更加明显. 图 4 为 Coastguard 不同帧 (2~5 帧) 中固定位置宏块 (第 164 个宏块) 不同模式的 J 值柱状图, 纵轴表示 J 值, 横轴表示帧间模式, 可看出, 相邻帧中同一位置宏块中相对应模式的 J 值具有很强的相关性.

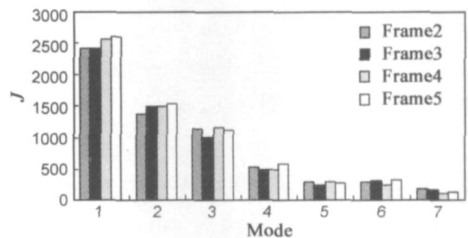


图 4 Coastguard 连续帧中 (2~5) 第 164 个宏块相应模式 J 值比较图

根据上文的分析结果, 本文采用如下方法确定误差函数阈值: 以参考帧同一位置块的 J 值乘以某个系数作为当前块的误差函数值阈值. 这种方法不受视频运动类型的影响, 具有较强的自适应性, 有助于以较小的搜索代价得到较好的搜索结果. 为了既加快搜索过程, 又不遗漏更优的搜索点, 本文采用了二级搜索终止准则, 其中 $T_1 = \alpha \times PrevJ$, $T_2 = \beta \times PrevJ$, $PrevJ$ 为参考帧中同位置宏块或其子块的 J 值. (1) 若 $J \leq T_1$, 表明搜索结果已经足够精确, 立即终止搜索过程; (2) 若 $T_1 < J \leq T_2$, 表明搜索结果尚可, 只需在小范围进行微调, 将搜索模式从 LDS 转为 SDS. 若当前宏块的 4# 邻块是 Intra 块时, 本文经过大量试验, 令 $T_1 = 500$, $T_2 = 750$; 若当前宏块的 4# 邻块是 Inter 块时且其编码模式大于 1 时, $PrevJ$ 取上层模式 J 值的一半 (如模式 2 和模式 3 的 $PrevJ$ 等于模式 1 J 值的一半), 否则 $PrevJ$ 取上层模式的 J 值.

上述系数 α 和 β 的范围大致为: $0.9 < \alpha < 1.4$, $1.2 < \beta < 2.5$, 且 $\alpha < \beta$. 总的来说, α 和 β 值越大, 搜索速度越快, 搜索效果就差. 因此在实际应用中可根据视频图像的特点和编码压缩的时间要求来设定. 作者通过大量试验, 在一般情况下, 当 $\alpha = 1.05$, $\beta = 1.5$ 时能较好的适应各种视频, 取得较好的编码质量.

3.4 算法描述

MSFAST 算法包括搜索起点预测、终止阈值确定、大菱形搜索、小菱形搜索、搜索模式决策等关键步骤.

下文用 V_0 、 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 和 V_u 分别表示向量(0, 0)以及1号块、2号块、3号块、4号块和上层模式的运动向量, 这些运动向量对应的误差函数值分别记为 J_0 、 J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 和 J_u . $ModeType$ 表示帧间预测模式, 取值1到7. $SearchType$ 表示搜索模式类型, 取值0表示采用LDS搜索, 取值1表示采用SDS搜索, 取值2表示进行一次SDS搜索后立即结束搜索. $PrevJ$ 表示参考块的误差函数值, T_1 、 T_2 是搜索终止的阈值参数, $MaxJ$ 表示一个足够大的 J 值上限. 算法描述如下:

Step1 得到参考运动向量以及误差函数值: 若1(2、3、4)号宏块存在且其为 Inter 宏块, 得到 V_1 (V_2 、 V_3 、 V_4) 并计算 J_1 (J_2 、 J_3 、 J_4), 否则 J_1 (J_2 、 J_3 、 J_4) = $MaxJ$; 若 $Modetype > 1$, 得到 V_u 并计算 J_u , 否则 $J_u = MaxJ$; 计算 $V_0 = (0, 0)$ 处的 J 值, 得到 J_0 .

Step2 搜索起点预测: $MinJ = \min\{J_0, J_1, J_2, J_3, J_4, J_u\}$, V_c 为 $MinJ$ 对应的向量, 以向量 V_c 为搜索窗口的中心.

Step3 终止阈值确定: 如果4号块为 Intra 块, $T_1 = 500$, $T_2 = 750$; 否则如果4号块为 Inter 块, $T_1 = \alpha \times PrevJ$, $T_2 = \beta \times PrevJ$, $ModeType$ 等于1时, $PrevJ$ 等于 J_u , $ModeType$ 大于1时, $PrevJ$ 等于 $J_u/2$.

Step4 搜索模式初始化: 如果 $ModeType$ 大于1或者 $V_1 = V_2 = V_3 = V_4$, $SearchType = 1$, 执行 Step6; 否则 $SearchType = 0$, 执行 Step5.

Step5 大菱形快速定位: 执行 LDS 搜索, 记录当前 $MinJ$; 如果最优顶点在大菱形中心, 执行 Step6; 否则执行 Step7.

Step6 小菱形精细搜索: 执行 SDS 搜索, 记录当前 $MinJ$; 如果最优顶点在小菱形中心或者 $SearchType = 2$, 执行 Step8; 否则执行 Step7.

Step7 搜索模式决策: 如果 $MinJ \leq T_1$, 执行 Step8; 否则如果 $SearchType = 0$ 且 $T_1 < MinJ \leq T_2$, 令 $SearchType = 1$, 执行 Step6; 否则 $SearchType = 0$ 且 $T_2 < MinJ$, 执行 Step5; 否则如果 $SearchType = 1$ 且 $T_1 < MinJ \leq T_2$, 令 $SearchType = 2$ 执行 Step6; 否则如果 $SearchType = 1$ 且 $T_2 < MinJ$, 执行 Step6.

Step8 结束搜索: 记录运动向量、帧间模式和对应残差, 整像素运动估计结束, 开始亚像素运动估计.

4 实验结果与分析

为了测试 MSFAST 算法的性能, 本文以 H. 264 的标准参考软件 JM9.0 为试验平台, 以基准算法 FS 和 JMFAST(H. 264 标准推荐的快速算法) 为比较对象, 选用纹理复杂程度, 运动剧烈程度, 镜头运动状况不同的国际标准测试序列(见表2)以及不同的量化参数进行了比

较试验, 测试和统计结果记录于表7中. 表7的前三列分别记录了序列名称、设定的QP值以及算法名称. 第6列记录了每个宏块的平均搜索点数(以 4×4 块为基本搜索单元). 以 FS 测试数据为基准, 第4列、第5列、第7列分别记录了位率增加的百分比, PSNR 值的提高值以及速度提高倍数.

表2 标准测试序列特性表

名称	尺寸	帧数	特性
Akiyo	176 × 144	300	A类图像序列: 空间细节较少, 活性较小
Mother	176 × 144	300	
Coastguard	176 × 144	300	
Foreman	176 × 144	400	B类图像序列: 空间细节适中, 活性较小; 或者空间细节较少, 活性适中
Carphone	176 × 144	380	
Bus	352 × 288	150	
Table	176 × 144	300	C类图像序列: 空间细节较多, 活性适中; 或者空间细节适中, 活性较大或者镜头迅速
Basket	352 × 288	200	
Flower	352 × 288	200	
Piano	720 × 576	100	

表3 本文算法与其他算法的比较

序列	量化参数	算法	位率增加百分比	Δ PSNR	搜索点数	速度倍数
Coastguard	40	FS	0	0	121968	1
		JMFAST	-0.3	-0.01	4174	28
		MSFAST	-0.1	0	740	164
Foreman	40	FS	0	0	121968	1
		JMFAST	2.9	0	5054	23
		MSFAST	5.6	0.05	980	123
Akiyo	36	FS	0	0	121968	1
		JMFAST	-0.1	-0.01	2006	60
		MSFAST	-0.1	-0.01	492	247
Table	36	FS	0	0	121968	1
		JMFAST	0.1	0	2925	41
		MSFAST	-0.4	-0.02	643	189
Mother	32	FS	0	0	121968	1
		JMFAST	1.1	0.01	3134	38
		MSFAST	1.8	0	675	180
Carphone	32	FS	0	0	121968	1
		JMFAST	0.6	0.01	3214	37
		MSFAST	1.6	0.02	764	159
Basket	40	FS	0	0	121968	1
		JMFAST	1.9	0.02	5187	23
		MSFAST	2.5	0.03	836	145
Flower	36	FS	0	0	121968	1
		JMFAST	-0.9	-0.01	4154	28
		MSFAST	-1.1	0	884	137
Bus	32	FS	0	0	121968	1
		JMFAST	-0.3	-0.02	6277	18
		MSFAST	0.1	0.01	1266	95
Piano	36	FS	0	0	121968	1
		JMFAST	0.1	0	3499	34
		MSFAST	-4.5	-0.08	833	146

表3说明, 与FS算法相比, MSFAST在大幅度提高

搜索速度(95~247倍,按搜索点数计算)的情况下得到了与其相当的质量效果,对于某些序列(如 Coastguard 和 Flower 序列),在保持平均 PSNR 值不变的情况下码率低于全搜索算法。这是因为,尽管公式(1)是目前最有效衡量运动估计效果的方法之一,但是,一方面,公式(1)中的失真特性(本文为 SAD)小并不能保证经变换量化后熵编码位数一定也小,另一方面,快速算法由于进行了起点预测,搜索窗口与 FS 不完全相同,因此,出现 MSFAST 在一些情况下优于 FS。与 JMFAST 算法相比,MSFAST 算法在质量相当的情况下,平均速度提高了 4.1~6.3 倍(按搜索点数计算),说明本文算法速度增益明显。

5 总结

本文利用视频图像存在的模式相关性和时空相关性,从搜索起点预测、搜索模式和策略以及搜索终止准则进行研究,试验证明,提出的运动估计快速算法在质量相当的情况下,速度增益明显。整齐化一的菱形搜索模式和简单有效的终止准则,使得本文算法适合在各种平台(PC机,嵌入式系统)上实现。目前,针对 H.264 的快速模式选择也是提高帧间编码速度的有效方法。在本文快速运动估计算法基础之上,结合帧间模式选择,预计能有效降低 H.264 编码器的计算复杂度,这是作者下一步要开展的研究工作。

参考文献:

- [1] ITU-T. Advanced video coding for generic audio visual services [S]. Recommendation H. 264, May 2003.
- [2] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11N3056. Information technology generic coding of audio visual objects Part2: visual[S]. ISO/IEC 14496 2 FDAM 1, Final draft amendment 1. Maui, Dec, 1999.
- [3] Thomas Wiegand, Gary J Sullivan, Gisle Bjøntegaard, Ajay Luthra. Overview of the H.264 video coding standard[J]. IEEE Trans Circuits Syst Video Technol, 2003, 13(7): 560-576.
- [4] Peng Yang, Yuwen He, Shi Qiang Yang. An unsymmetrical cross multi resolution motion search algorithm for MPEG4 AVC/H.264 coding[A]. IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)[C]. 2004: 531-534.
- [5] T Koga, K Iinuma, A Hirano, Y Iijima, T Ishiguro. Motion compensated interframe coding for video conferencing[A]. In Proc Nat Telecommun Conf[C]. New Orleans, LA, Nov. 29 Dec. 3, 1981, G5. 3. 1-5. 3. 5.
- [6] R Li, B Zeng, M L Liou. A new three step search algorithm for block motion estimation[J]. IEEE Trans on CSVT, 1994, 4(4): 438-442.
- [7] L M Po, W C Ma. A novel four step search algorithm for

fast block motion estimation[J]. IEEE Trans on CSVT, 1996, 6(3): 313-317.

- [8] J Y Tham, S Ranganath, M Ranganath, A A Kassim. A novel unrestricted center biased diamond search algorithm for block motion estimation[J]. IEEE Trans on CSVT, 1998, 8(4): 369-377.
- [9] Ce Zhu, Xiao Lin, Lap Pui Chau. Hexagon based search pattern for fast block motion estimation[J]. IEEE Trans on CSVT, 2002, 12(5): 349-355.
- [10] K K Ma, P I Hosur. Performance report of motion vector field adaptive search technique(MVFAST)[A]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG99[C]. Noordwijkerhout, NL, Mar. 2000.
- [11] A M Tourapis, O C Au, M L Liou. Fast block matching motion estimation using predictive motion vector field adaptive search technique(PMVFAST)[A]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG2000[C]. Noordwijkerhout, Netherlands, Mar, 2000.
- [12] Wiegand T, Schwarz H, Joch A, et al. Rate constrained coder control and comparison of video coding standards[J]. IEEE Trans on CSVT, 2003, 13(7): 688-703.

作者简介:



宋建斌 男,1977年7月出生于内蒙古自治区。北京航空航天大学计算机学院博士研究生。主要研究方向为视频压缩技术及其嵌入式的实现。E-mail: buaasjb@yahoo.com.cn



李波 男,1966年出生于四川,北京航空航天大学计算机学院教授、博士生导师。研究方向为数字视频处理、多媒体、智能信息处理与嵌入式数字图像处理。



李炜 男,1973年出生于陕西。北京航空航天大学计算机学院副教授,博士。研究方向为视频编码、多媒体系统与视频编码的VLSI设计。

马丽 女,1978年生于内蒙古自治区,北京联合大学自动化学院讲师,硕士研究生。研究方向为办公自动化与信号处理。