

一种结合遗传算法和钻石搜索的多模式快速运动估计方法

郑 伟¹, 刘文耀², 王涌天¹

(1. 北京理工大学光电工程系, 北京 100081; 2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电信息重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 为了解决视频编码中运动矢量搜索精度与速度的矛盾, 本文提出了一种基于遗传算法 (GA) 和钻石搜索 (DS) 的多模式快速运动估计方法——MMS 算法。它以图像序列的时空预测矢量作为图像活动剧烈程度的判据, 自适应选择搜索模式。针对平缓运动类型使用快速的 DS 搜索模式, 针对剧烈运动类型使用 GA/DS 联合搜索模式。与现有的次优解快速算法相比, MMS 有效地解决了在大运动矢量情况下编码器性能下降的问题, 可以从整体上提升编码器的性能, 接近理想的全搜索法的结果; 与其它直接利用 GA 进行全局优化的方法相比, MMS 利用 DS 配合 GA 实现加速收敛。此外, 通过引入多模式处理的概念, 在保证搜索精度的同时, 充分发挥了次优解算法的效率, 整体编码速度与 DS 等快速算法的结果十分接近。这一方法为有效地解决运动估计中的矛盾问题提供了一个新的处理框架。实验结果验证了算法的性能。

关键词: 视频编码; 运动估计; 遗传算法; 钻石搜索法; 多模式搜索法; 自适应; 时空相关

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 10-1911-06

A Fast Multi-Mode Search Algorithm Combining Genetic Algorithm with Diamond Search in Video Coding

ZHENG Wei¹, LIU Wei-yao², WANG Yong-tian¹

(1. Department of Optic & Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University,

Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, EMC, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to solve the conflicts between searching precision and searching speed of motion vectors in video coding, a fast MMS (Multi-Mode Search) algorithm based on GA (Genetic Algorithm) and DS (Diamond Search) is proposed in this paper. Its searching modes can be switched adaptively by the criterion of drastic level of the predictive motion vectors derived from the spatio-temporal coherence of the video sequences. In the mild motion mode, DS method is used directly; In the drastic motion mode, a combined GA/DS searching method is adopted. Comparing with nowadays fast sub-optimal searching methods, MMS can solve the performance falling problem in case of large motion vectors, which enhance the capability of video encoders thoroughly. Its performance is near to the results of ideal FS (Full Search) algorithm. Comparing with other searching methods using GA directly for obtaining global optimum, MMS combines DS with GA to achieve rapid convergence speed. Furthermore, by introducing multi-mode processing conception, the efficiency of sub-optimal searching methods is fully carried out. Its searching speed is nearly as fast as DS. And its searching precision is guaranteed simultaneously. This algorithm provides a new framework for solving the conflicts in motion estimation problems in video coding. The experimental results have rectified its effectiveness.

Key words: video coding; motion estimation; genetic algorithm (GA); diamond search (DS); multi-mode search (MMS); adaptive; spatio-temporal coherence

1 引言

运动估计是视频编码中的一个关键技术。现有的方法主要有块匹配法、像素递归法、光流场法等^[1]。在块匹配法中, 一直存在着运动矢量的搜索精度与速度之间的矛盾。全搜索

法 (FS, Full Search) 能够达到最高的匹配精度, 但是速度慢, 难以实用。为此, 先后出现了许多次优解快速算法, 如: 三步法 (TSS, Three Step Search)^[2]、改进三步法 (NTSS, New Three Step Search)^[3]、钻石搜索法 (DS, Diamond Search)^[4]、基于小波变换的分级搜索方法^[5]等等。它们的共同特点都是以单模态假设

为基础^[2],通过减少搜索步数,以牺牲匹配精度为代价而使速度得以提高.其共同问题是搜索过程易陷入局部最优,在场景运动剧烈的场合性能明显下降.

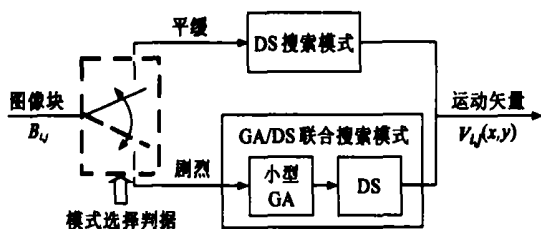
针对这一问题,先后提出了一些基于全局最优的运动估计算法^[6~9].多数方法是将遗传算法(GA, Genetic Algorithm)直接应用于运动估计,与全搜索法相比,虽然减少了搜索步数,但速度仍然远低于次优搜索法,同时也未充分发挥次优解算法的特有优势^[6~8].另一些方法将GA与一些快速算法相结合,提高了收敛速度^[9],但未区分运动类型,搜索模式固定,未达到最优化.

块匹配运动估计问题的本质是在一个多极值中寻找全局最优解,不存在精确的数学模型.统计结果表明运动矢量具有如下特点^[4]:对于自然图像序列,约52.76%~96.06%的运动矢量都分布在以(0,0)为中心,以2个像素为半径的圆周之内.这表明自然景物图像块的运动矢量一般都比较小,全局最优解的主峰就在原点附近,局部搜索域的单模态假设成立.因此,现有的快速搜索算法是可以适用的.同时它也说明,当图像序列发生剧烈的运动变化时,由于运动矢量过大或原点附近的次优峰过多,单模态假设就会失效.这就是在剧烈运动场合中现有的次优解搜索算法经常失效的根本原因.

基于以上分析,为了兼顾运动矢量的搜索精度与速度,本文引入了多模式的概念,提出了一种结合GA和DS,同时利用图像序列的时空相关性的多模式快速运动估计算法——MMS(Multi-Mode Search).它使用了互补的思想,可以根据序列的时空相关性预测搜索模式,自动适应平缓 and 剧烈的运动类型.与传统的次优解搜索方法相比,在剧烈运动场合,图像编码质量得到了显著的提高.与其它利用GA优化的搜索方法相比,它的运算速度很快,十分接近现有的快速算法.

2 多模式运动估计算法

MMS的原理框架如图1所示^[10].其中,借鉴了DS作为次优快速算法.这是因为DS是此类算法中性能最佳的一种,同时也被MPEG4校验模型所推荐,具有代表性.编码器可以对图像块的运动剧烈程度进行预测,选择最佳的运动估计方法.如果属于平缓运动的类型,则直接使用DS算法,以提高编码速度,称为DS搜索模式;若属于剧烈运动的类型,则先启动GA算法模块,再调用DS模块加速收敛,称为GA/DS联合搜索模式.后一种工作模式可以在保证搜索速度的前提下,提高发现全局最优解的概率,有效防止剧烈运动时编码器性能的跌落.



MMS算法需要解决两个关键问题:一是搜索模式的选择

判据,二是如何将GA应用于运动估计.以下分别进行说明.

2.1 搜索模式选择判据

模式选择的依据是编码图像块的运动剧烈程度.本文利用图像序列的时空相关性,用帧内和帧间的已知运动矢量进行预测.

对于一个图像块 $B_{i,j}$,将它的四个邻块 $B_{i,j-1}$, $B_{i-1,j-1}$, $B_{i-1,j}$ 和 $B_{i-1,j+1}$ (如图2所示)的已知运动矢量的加权平均值作为它的帧内运动矢量预测值 $\tilde{V}_{i,j}$,如果邻块不存在,则以零矢量代替.帧内预测公式为^[13]:

$$\tilde{V}_{i,j}^{(k)} = \left[\frac{1}{6} (V_{i-1,j-1}^{(k)} + 2V_{i-1,j}^{(k)} + V_{i-1,j+1}^{(k)} + 2V_{i,j-1}^{(k)}) \right] \quad (1)$$

其中, α 是权重因子,在实验中取 0.6~0.9.相应地,用上一帧的对应块及周围8个邻块的运动矢量加权值作为帧间运动矢量预测值 $\tilde{V}_{i,j}^{*(k)}$ ^[13]:

$$\tilde{V}_{i,j}^{*(k)} = (1 - \alpha) \cdot \frac{1}{24} \left(16V_{i,j}^{(k-1)} + \sum_{\substack{m-i|j=1 \\ n-i|j=1}} V_{m,n}^{(k-1)} \right) \quad (2)$$

取二者中模值最大者作为预测矢量.

$$V_{i,j} = \max(\tilde{V}_{i,j}^{(k)}, \tilde{V}_{i,j}^{*(k)}) \quad (3)$$

令图像序列中的全部图像块集合为 A ,其中,平缓 and 剧烈运动类型的图像块集合分别用 S 和 D 表示.有 $A = S \cup D$, $S \cap D = \emptyset$,则

$$B_{i,j} \begin{cases} S, & V_{i,j} \leq d_{th} \\ D, & V_{i,j} > d_{th} \end{cases} \quad (4)$$

即,如果 $V_{i,j}$ 的1范数 $\|V_{i,j}\|_1$ 超过某一阈值 d_{th} ,则可认为这个图像块发生了剧烈运动,否则是平缓运动.矢量 $V(x,y)$ 的1范数 $\|V\|_1$ 定义为:

$$\|V\|_1 = |x| + |y| \quad (5)$$

根据Shan Zhu的统计数据^[4],本文将阈值设置为 $d_{th} = 5$.试验表明, d_{th} 设置为5~12之间的数值时,性能相近;超过12以后,一般对DS算法的改进不明显;小于5则有可能破坏DS的性能,编码器的整体搜索精度反而下降.

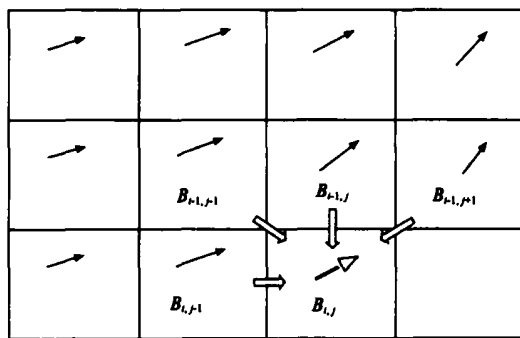


图2 帧内运动矢量预测示意图

2.2 GA算法、存在的问题及解决方法

GA是模拟生物种群进化机制的一种寻求全局最优解的随机优化搜索算法^[11,12].它有四个关键参数:种群规模 M ,迭代次数 T ,交叉概率 p_c 和变异概率 p_m ,可以用一个四元组 (M, T, p_c, p_m) 来表示.

一般,不宜直接搬移GA算法到运动估计问题中.这是因为GA的局部收敛速度慢.为了取长补短,本文使用了GA/DS

联合搜索模式.它分成两个阶段:在第一阶段使用 GA,目的是利用全局随机优化机制提高跳出局部最优和发现全局最优解的几率,使优选解以较大的概率分布在主峰附近;第二阶段使用 DS,在局部搜索区域内快速收敛于一个最优解. GA 全局优化能力强,局部优化能力弱,DS 算法的特性与之正好相反,因此 GA/DS 模式是一种优势互补的做法.

为了提高速度,需要使用了较小 M 和 T ,同时增大 p_c 和 p_m 以加速进化,提高发现全局最优的几率.经大量试验,本文选取的参数为 (10,5,0.8,0.1).

限于篇幅,下面仅简要说明运动矢量的染色体编解码和适应度函数的选择方法. GA 算法的其余共性问题可参阅相关文献 [11, 12].

2.2.1 染色体编解码

染色体编码用带符号位的二进制码或格雷码^[12].编码长度取决于运动矢量的搜索的范围和精度.以本文中的实验为例,运动矢量的搜索范围是 32×32 ,其水平和垂直分量均限制于 $[-16, 15]$,搜索精度为 1 个像素.因此,运动矢量 $V(x, y)$ 的水平和垂直分量均可用 5 位带符号位的二进制编码来表示,即 $x = (b_{x4}, b_{x3}, b_{x2}, b_{x1}, b_{x0})_2$, $y = (b_{y4}, b_{y3}, b_{y2}, b_{y1}, b_{y0})_2$.将其串联起来,形成一个长度为 10bits 的码串 X .如图 3 所示:

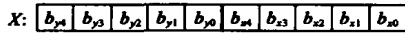


图 3 运动矢量的染色体编码结构

编码以后,解空间和遗传算法的搜索空间具有了一一对应的关系.解码是上述过程的反向操作.

2.2.2 适应度函数的选择

首先,对个体 X_i 进行解码处理,得到运动矢量的两个分量 x_i 和 y_i ,然后利用在这一匹配位置的绝对误差和 (SAD, Sum of Absolute Difference)^[14],计算适应度评价函数 $F(X_i)$:

$$F(X_i) = C_{max} - \frac{SAD(x_i, y_i)}{M/2-1 \quad N/2-1}$$

$$= C_{max} - \frac{|f_k(m, n) - f_{k-1}(m + y_i, n + x_i)|}{m - M/2 \quad n - N/2}$$

(6)

适应度是一个与 SAD 相对应的函数.匹配误差越小,运动矢量染色体的适应度越高.式中, C_{max} 是一个足够大的常数,取为大于 $255 \times H_B \times W_B$ 的某一个整数, H_B 和 W_B 分别为匹配块的高度和宽度.

2.3 算法流程图

图 4 是 MMS 算法的流程图.首先通过序列的时空相关预测获得搜索模式.即,利用相邻帧和邻接块已知的运动矢量,通过式 (1) ~ (3) 估计该图像块的运动矢量 $\hat{v}_{i,j}$.根据模式切换判据式 (4) ~ (5),预测图像块 $B_{i,j}$ 的运动类型.然后进行多模式处理.如果属于平缓类型,则预置初始搜索位置在原点,直接使用 DS 搜索模式,提高匹配速度;如果属于剧烈运动类型,则预置初始搜索位置为 $\hat{v}_{i,j}$,再利用 GA/DS 联合搜索模式,提升这种情况下编码器的性能.

3 实验结果

以 MPEG4 标准序列 foreman 和 coastguard 的前 100 帧为测试对象.图像格式 CIF 格式,分辨率 352×288 .编码器采用

PB 帧编码格式,12 帧为一组,每组顺序为 IBBPBBPBBPBB.图像块的大小为 16×16 ,搜索窗口 32×32 .I, P 帧均使用 SPIHT 编码方法^[15];P, B 帧利用了 OBMC 运动补偿技术^[16].其中 Y 分量进行 5 级小波分解, C_b 、 C_r 分量进行 4 级分解.平均压缩比 I 帧 8 倍, P 帧 100 倍, B 帧 102.4 倍 (无算术编码)^[10].实验目的是在同一测试环境下对比 FS, TSS, DS, GAS 和 MMS 五种搜索算法的性能.其中 GAS 是基于小型遗传算法的搜索法,参数 (10,5,0.8,0.1),与 MMS 算法中的 GA/DS 联合搜索模块所使用的相同.

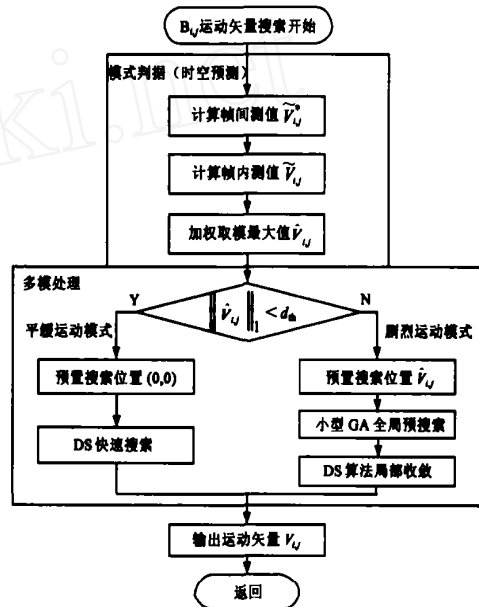


图 4 MMS 算法流程图

3.1 实验结果

图 5 (a)、(b) 分别是两个编码序列 Y 分量信噪比的测试结果.其中,除了编号为 61, 73 和 85 三个 I 帧以外,其余的 P, B 帧均使用了运动估计.从编码结果来看,本文的 MMS 算法几乎在每一帧都优于传统的 TSS 和 MPEG4 推荐的 DS 搜索算法,非常接近理想的 FS 的搜索结果.其中提升明显的帧已用椭圆标出.

图 5 (a) Foreman 序列在 72, 78, 83, 93 帧附近有较明显的动作. MMS 算法为编码器提供了有效的补偿,改善了信噪比.图 5 (b) Coastguard 序列在 65-85 区间有一段快速上摇镜头的过程, TSS 和 DS 等次优解算法陷入局部最优,性能明显跌落. MMS 算法可以在这种情况下自动切换到第二种 GA/DS 联合搜索模式,使编码器的整体性能有明显的提升,有效地弥补了这一不足.

图 6 和图 7 是 FS, TSS, DS 以及 MMS 四种运动估计算法在 foreman 第 78 帧和 coastguard 第 72 帧编码结果的主观质量对比.从中可以看出,与 TSS 和 DS 相比,使用 MMS 的解码图像质量得到了明显改善,与理想的 FS 算法的效果十分接近.

表 1 是 MPEG4 的 6 组 CIF 序列前 100 帧的编码时间数据.其中,前三组是 B 类测试序列,运动性较强,后三组是 A 类序列. MMS 与速度最快的 DS 算法相比,除了 coastguard 由于有较长的镜头快速运动而使编码时间增长为 31.6% 以外,其

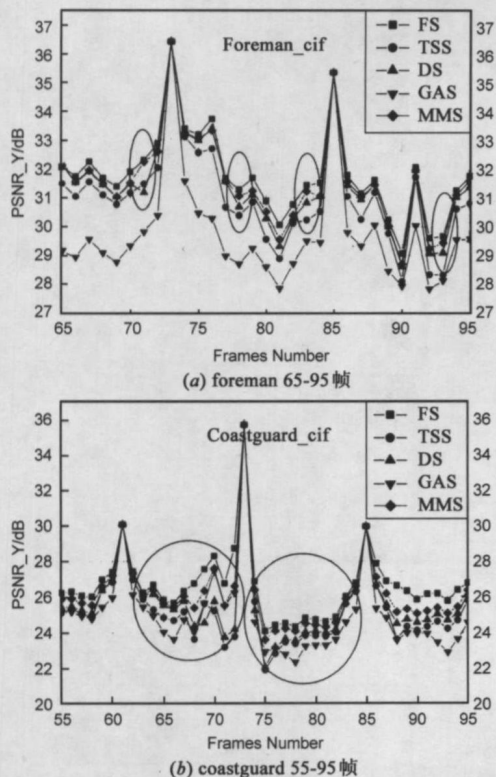
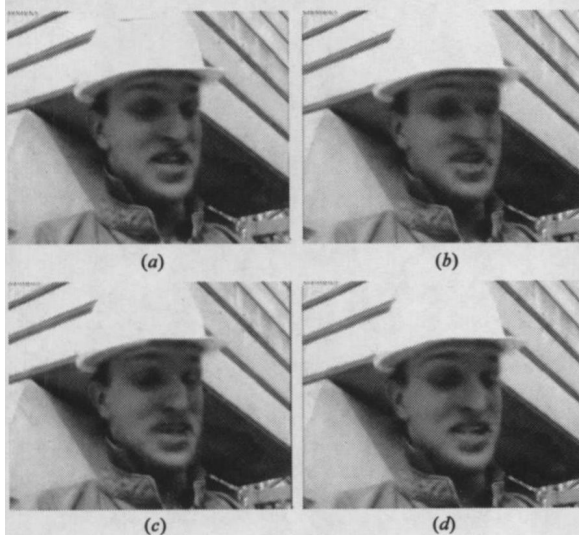


图 5 FS、TSS、DS、GAS、MMS 五种运动估计算法的性能对比

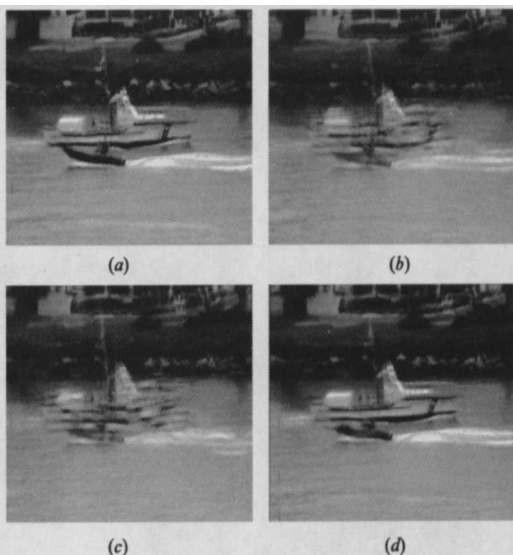


(a) FS 算法: PSNR_Y: 31.28(dB); PSNR_C_v: 40.06(dB); PSNR_C_s: 40.97(dB)
 (b) TSS 算法: PSNR_Y: 30.38(dB); PSNR_C_v: 40.17(dB); PSNR_C_s: 40.78(dB);
 (c) DS 算法: PSNR_Y: 30.68(dB); PSNR_C_v: 40.11(dB); PSNR_C_s: 40.98(dB)
 (d) MMS 算法: PSNR_Y: 31.06(dB); PSNR_C_v: 40.21(dB); PSNR_C_s: 40.98(dB)

图 6 foreman 78 帧 FS、TSS、DS 算法与 MMS 算法的主观效果对比

余序列的时间增长率均在 7% 以下. 特别是对于 Hall 和 Akiyo 以缓慢运动为主的序列, 时间增长分别为 1.4% 和 0.7%, 几

乎可以忽略不计. 以上结果是在主频 1GHz, 操作系统是 windows2000 的 PC 机上得到的.



(a) FS 算法: PSNR_Y: 28.71(dB); PSNR_C_v: 39.74(dB); PSNR_C_s: 41.13(dB)
 (b) TSS 算法: PSNR_Y: 23.77(dB); PSNR_C_v: 40.10(dB); PSNR_C_s: 41.43(dB);
 (c) DS 算法: PSNR_Y: 24.20(dB); PSNR_C_v: 39.89(dB); PSNR_C_s: 40.89(dB)
 (d) MMS 算法: PSNR_Y: 26.60(dB); PSNR_C_v: 39.55(dB); PSNR_C_s: 40.67(dB)

图 7 coastguard 72 帧 FS、TSS、DS 算法与 MMS 算法的主观效果对比

虽然使用 GA 会使运算复杂度增大, 但是一方面, 由于是小规模的 GA (10, 5, 0.8, 0.1), 搜索点数为 $10 \times 5 \times 2 = 100$, 远低于 FS 算法的 $32 \times 32 = 1024$ 点; 另一方面, 由于自然序列图像以缓慢运动类型为主^[4], 所以编码器启动第二种 GA/DS 联合搜索模式的几率很小, 因此, 整体编码速度与单纯的 DS 算法很接近.

3.2 讨论

从本文的实验结果可以得出将 GA 应用于运动估计的三个有用的结论^[10]:

(1) 图 5 (a) Foreman 序列的 GAS 测试结果说明, 在平缓运动中不宜使用 GA. 因为在这种情况下, 运动矢量就在原点附近, 单模态假设成立. 如果此时使用 GA, 一方面使搜索区域进行了不必要的扩展, 另一方面 GA 后期收敛慢^[11]的缺点会制约编码速度. 特别是当 GA 不能充分收敛时, 甚至低于次优的结果.

(2) 图 5 (b) Coastguard 序列的 GAS 测试结果表明, 在剧烈运动中, 相对于次优解搜索法, 即使不能完全收敛的小型 GA 也能有良好的表现. 这是因为在这种情况下, 运动矢量远离原点, 次优峰增多, TSS, DS 等基于单模态的算法极有可能失效. GA 以其在初始阶段所特有的全局优化能力, 其性能表现可以信赖.

(3) 从两个序列的 MMS 测试结果来看, 将 GA 与 DS 有机结合的 MMS 算法可以使编码器的性能大为改观. 一方面, 它既能充分发挥 GA 在初始阶段的全局优化能力, 又能利用 DS

加速 GA 的后期收敛,是一种很好的做法;另一方面,利用了多模式的概念,编码器针对不同的运动类型进行自适应最优处理,使 MMS 算法对于不同的运动情况都有良好的表现。

表 1 FS、TSS、DS、GAS 和 MMS 五种算法的编码时间对比

100 帧编码时间(ms)	FS(理想)	TSS(常用)	DS(MPEG-4 推荐)	GAS(遗传)	MMS(本文)	MMS 时间增长(对比 DS)	MMS 增长率 %
Coastguard	1268314	254987	270639	307092	356202	85563	31.6
Foreman	1357181	270073	279567	313651	296286	16719	6.0
News	1284597	241457	234507	325268	246715	12208	5.2
Container	1284286	262988	259944	322373	271611	11667	4.5
Hall	1275253	272462	270649	309225	274395	3746	1.4
Akiyo	1276806	242369	235018	311728	236641	1623	0.7

4 结论

为了解决运动矢量搜索精度和速度的矛盾,本文通过分析问题的成因,引入了多模式处理的概念,提出了一种在视频序列中基于 GA 和 DS,同时结合图像序列时空相关性的多模式运动估计算法,有效地解决了这一问题,为运动估计问题提供了一个新的处理框架。它的特点在于:

(1) 与单纯的次优解算法相比, MMS 算法在适应大运动矢量方面性能优异,可以有效地提高剧烈运动时编码图像的质量;

(2) 与直接利用 GA 等全局优化的运动估计算法^[6~8]相比, MMS 算法充分利用了 GA 初始阶段的全局优化能力强和 DS 局部收敛速度快的优点,实现二者的优势互补。

(3) 与其它结合次优解和 GA 的一些快速算法^[9]相比,在编码速度上, MMS 在保证编码图像质量的情况下,利用自然景物的运动矢量分布特点和多模式处理的概念,充分发挥了次优解算法的搜索速度快的优势。GA 只在较小的概率下被启用,整体编码速度得以提高,与现有快速的 DS 算法几乎可以比拟。

综上所述, MMS 算法可以自适应地兼顾运动矢量搜索精度和速度的要求,适应视频编码的实际需要。

参考文献:

[1] Dufaux F, Moscheni F. Motion estimation techniques for digital TV: a review and a new contribution [A]. Proceedings of the IEEE [C]. New York, NY, USA, 1995, 83(6): 858 - 876.

[2] KIM J N, CHOI T S. A fast three-step search algorithm with minimum checking points using unimodal error surface assumption [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1998, 44(3): 638 - 648.

[3] Li Renxiang, Zeng Bing, Liou Ming-l. A new three-step search algorithm for block motion estimation [J]. IEEE Transaction on Circuits and System for Video Technology, 1994, 4(4): 438 - 442.

[4] Zhu Shan, Ma Kai-kuang. A New diamond search algorithm for fast block matching motion estimation [A]. IEEE International Conference on Information, Communications and Signal Pro-

cessing [C]. Singapore, 1997. 292 - 296.

- [5] Zhang Y Q, Zafar S. Motion-compensated wavelet transform coding for color video compression [J]. IEEE Transaction on Circuits System and Video Technology, 1992(2): 285 - 296.
- [6] Lin Chun-hung, Wu Jar-ling. Genetic block matching algorithm for video coding [A]. the Third IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems [C]. 1996. 544 - 547.
- [7] 李维, 徐维朴, 郑南宁, 等. 一种新的基于遗传算法的快速运动估计方法 [J]. 电子学报, 2000, 28(6): 114 - 117.
- Li K, Xu W P, Zheng N N, et al. A novel fast motion estimation method based on genetic algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2000. 28(6): 114 - 117. (in Chinese)
- [8] 龚涛, 丁润涛. 一种基于改进的遗传算法的块匹配运动估计方法 [J]. 信号处理, 2003, 19(3): 207 - 210.
- Gong T, Ding R T. A modified genetic algorithm based block matching motion estimation method [J]. Signal Processing, 2003, 19(3): 207-210. (in Chinese)
- [9] So M F, Wu A. Four-step genetic search for block motion estimation [A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. Seattle, Washington, USA, 1998. 1393 - 1396.
- [10] 郑伟. 彩色序列图像小波压缩编码的研究 [D]. 天津大学: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2003. 84 - 106.
- [11] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 176 - 188.
- [12] 米凯利维茨 Z. 演化程序-遗传算法和数据编码的结合 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 73 - 80.
- [13] 施建良, 潘健, 余松煜, 等. 一种基于时空相关性的运动估计算法 [J]. 电子科学学刊, 1999, 21(3): 349 - 354.
- Shi J L, Pan J, Yu S Y. A new motion estimation algorithm based on spatio-temporal coherence [J]. Journal of Electronics, 1993, 21(3): 349 - 354. (in Chinese)
- [14] 沈兰荪, 卓力, 田栋, 等. 视频编码与低速率传输 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 327 - 331.
- [15] Said A, Pealman W A. A new fast and efficient image codec on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Trans on Cir-

cuits System and Video Technology, 1996, 6(3) :243 - 250.

- [16] Orchard M T, Sullivan G J. Overlapped block motion compensation: an estimation theoretic approach[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1994, (3) :693 - 699.

作者简介:



郑伟 男, 1974 年出生于陕西牛武, 博士, 1996 年毕业于天津理工学院无线电系, 1999 和 2003 年于天津大学电子工程系和精仪系获得通信与电子系统专业硕士学位和光学工程专业博士学位, 现为北京理工大学光电工程系博士后研究人员. 研究方向: 图像编码、视觉跟踪、增强现实技术. E-mail: zhengwester@gmail.com



刘文耀 男, 1944 年出生于河北完县, 天津大学精仪系教授、博士生导师, 主要研究领域为光电图像处理、光电信息工程. 已出版专著两部, 学术论文 120 余篇.



王涌天 男, 1957 年出生于北京, 北京理工大学光电工程系教授、博士生导师, 教育部长江学者奖励计划特聘教授. 研究方向: 技术光学、图像处理、虚拟现实、增强现实.

www.cnki.net