

一种基于生物地理优化的快速运动估计算法

张萍* 魏平 于鸿洋

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 为了提高视频编码中运动估计的性能, 该文提出了一种新的基于生物地理优化的快速运动估计算法。该算法以运动矢量的特性为基础, 通过生物地理优化算法的迁徙和变异操作搜索全局最优解, 克服了以往快速搜索算法容易陷入局部最优的缺点, 同时采用了早期和迭代终止策略, 进一步简化运算复杂度。实验表明, 该算法的整体性能高于以往快速搜索算法, 可以有效兼顾搜索精度和速度的要求。由于实现简单和适用面广, 该算法能满足实时视频编码的需求。

关键词: 运动估计; 视频编码; 生物地理优化; 块匹配; 全局优化

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)05-1017-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00805

A Biogeography-based Optimization Algorithm for Fast Motion Estimation

Zhang Ping Wei Ping Yu Hong-yang

(School of Electronic Engineer, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In order to improve the performance of motion estimation in video encoding, a biogeography-based optimization algorithm is proposed for fast motion estimation. Based on the characteristic of motion vector, the method used the migration and mutation of Biogeography-Based Optimization (BBO) to search global optimum and overcame the shortcoming of falling into local optimum in existing fast block-matching algorithms. Meanwhile, it adopted early and iterative termination strategy to further simplify computational complexity. Experimental results show that it has higher efficiency than the existing fast algorithms in terms of search accuracy and speed. Because of simple and practicality, it is feasible for real-time video encoding.

Key words: Motion estimation; Video encoding; Biogeography-Based Optimization (BBO); Block matching; Optimization

1 引言

在通常的视频压缩编码过程中, 运动估计占用了总计算量的 60%–80%^[1], 因此寻找简单高效的运动估计算法一直是视频编码领域中的研究重点和热点。目前大多数国际视频编码标准都采用了基于块匹配的运动估计算法。在块匹配算法中, 全搜索算法(FS)搜索精度高但计算量巨大, 很难被真正应用。因此, 研究者们提出了多个基于固定搜索模板的快速搜索算法, 比如菱形法(DS)^[2], 十字法(ARPS)^[3], 六边形法(HEXBS)^[4], 以及多种多模式结合算法^[5,6]等。这类算法虽然计算复杂度低, 但都是基于匹配误差单调递减的假设, 即在整个误差曲面上, 只有一个最小值。而实际序列中的匹配误差是多极值状态, 因此这类快速搜索算法在不同程度上容易陷入

局部最优, 从而导致编码效率降低。针对这一问题, 研究者们将基于群智能的全局最优化方法应用到运动估计中, 主要以遗传算法(GA)^[7,8]和粒子群算法(PSO)^[9,10]为代表。这类搜索算法利用群体智能的全局优化特性寻找到较好的全局最优解, 但其计算复杂度高于基于固定模板的搜索算法。

最近, 文献[11]提出了一种新的群智能优化方法, 称为生物地理优化算法(Biogeography-Based Optimization, BBO)。与遗传算法和粒子群算法相比, 生物地理优化算法的参数少、实现简单、收敛速度快和搜索剪度高。这些优势使得生物地理优化算法已经应用到了一些实际问题中比如飞机传感器检测^[11], 卫星图像识别^[12], 电源功率问题^[13]等。根据以上分析, 本文首次将生物地理优化应用到运动估计中, 提出了一种新的基于生物地理优化的快速运动估计算法。该算法以视频序列的时空相关性和运动矢量的中心偏置特性为基础, 利用生物地理优

2010-08-05 收到, 2010-12-01 改回

中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2009J024)资助课题

*通信作者: 张萍 pingzh@uestc.edu.cn

化算法寻找全局最优解，克服了以往快速搜索算法的弊病，同时采用早期和迭代终止策略，进一步简化运算复杂度，从而在保证搜索精度的同时，提高了搜索速度。

2 基于生物地理优化的快速运动估计算法 (MEBBO)

BBO 算法的基本思想是通过群体中相邻个体的迁徙和特别个体的变异来寻找全局最优解。在 BBO 中，每个个体被认为是一个岛屿(island)，岛屿的优劣用岛屿适合性指标(Island Suitability Index, ISI)来衡量，岛屿的特性用适合性指标变量(Suitability Index Variable, SIV)表示。本文以运动矢量的特性为基础，将 BBO 中的岛屿、适合性指标变量、适合性指标分别和块匹配运动估计算法中的搜索点、搜索点坐标、块匹配误差准则一一对应起来，利用 BBO 的迁徙和变异操作寻找最佳匹配块。

下面具体讨论基于 BBO 的快速运动估计算法 (MEBBO)的实现和步骤。

2.1 岛适应性指标 (ISI) 函数的选择

在基于块匹配的运动估计中，通常选用运算量最小且便于硬件实现的绝对误差和 SAD (Sum of Absolute Difference)作为匹配准则^[14]。其公式如下：

$$SAD(x_i, y_i) = \sum_{m=1}^W \sum_{n=1}^H |f_k(m, n) - f_{k-1}(m+x_i, n+y_i)| \quad (1)$$

其中 (x_i, y_i) 是运动矢量， f_k 和 f_{k-1} 是当前帧在点 (m, n) 处的像素值和参考帧在点 $(m+x_i, n+y_i)$ 的像素值。 W 和 H 是宏块的宽和高。因此，在 MEBBO 算法中，选取适应性指标函数为一个与 SAD 相对应的函数，可表示为

$$ISI(x_i^{(k)}, y_i^{(k)}) = C_{\max} - SAD(x_i^{(k)}, y_i^{(k)}) \quad (2)$$

式中 C_{\max} 是一个足够大的正数，以保证 $ISI(x_i, y_i)$ 始终是一个非负数。 k 表示迭代次数。可以看出，匹配误差越小，则适应性指标越高。因此，ISI 最高的点就是最佳匹配点。

2.2 初始种群的选择

根据文献[15]的结论，大约 81.80%的运动矢量分布在中心附近范围 ± 2 的正方形区域内，因此，选取如图 1 所示的 5 个点作为固定初始点。实心的圆是当前搜索区域的中心点，为预测运动矢量的位置。其余空心的圆为周围 4 个点，成直线型分布。该分布不同于基于固定模板搜索算法中通常的对称分布，因为 BBO 算法的迁徙操作完成的是搜索点坐标的对应交换，直线型分布的初始搜索点在经过迁徙操作后，产生最佳匹配点的可能性比对称分布更

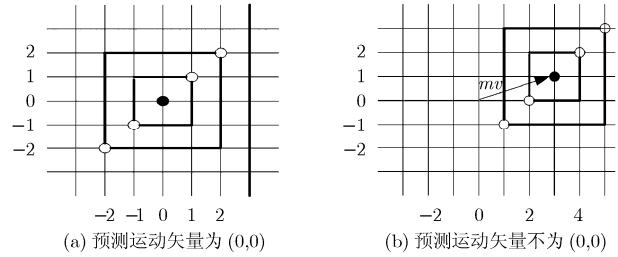


图 1 初始种群固定点位置分布

大，有利于提高搜索效率。

同时，为了保持 BBO 的随机性能和减少计算复杂度，按照式(3)生成 2 个随机点作为初始种群的另一部分。

$$P_{i,j} = [R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min} + 1) \cdot \text{rand}(0,1)] \quad (3)$$

(R_{\min}, R_{\max}) 为运动估计的搜索区域。 $\text{rand}(0,1)$ 是 $(0, 1)$ 均匀分布中的一个随机数。

2.3 迁徙操作 (migration)

在 MEBBO 算法中， N 个搜索点组成一个群体 $(ISLAND_1, ISLAND_2, \dots, ISLAND_N)$ ，每个搜索点的适合性指标变量为 (SIV_x, SIV_y) ，即运动矢量的水平和垂直坐标。结合搜索点特性，定义每个搜索点的迁入率 λ_i 和迁出率 μ_i 分别如下：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i &= I(1 - \alpha_i / N) \\ \mu_i &= E\alpha_i / N \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 I 是最大迁入率， E 是最大迁出率。 α_i 是一个索引值 $\alpha_i = N - i$ ， $i = 1, 2, \dots, N$ 。搜索点的迁入迁出率和其 ISI 有线性关系，如图 2 所示：

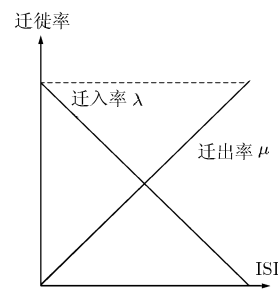


图 2 迁徙率和 ISI 关系

从式(4)和图 2 可以看出，迁入率和迁出率是成反比的，高 ISI 的点有高的迁出率和低的迁入率。迁徙操作具体过程如下：

(1)对 N 个搜索点按照 ISI 值大小降序排序，得到 $(ISLAND_1, ISLAND_2, \dots, ISLAND_N)$ 。

(2)对于所有搜索点的坐标 SIV_x 或 SIV_y ，根据迁入率 λ_i ，决定该坐标是否可以迁入到点 $ISLAND_i$ ，也即，是否可以代替 $ISLAND_i$ 中对应的

坐标。

(3)如果该坐标可以迁入到点 ISLAND_{*i*},再根据迁出率 μ_j ,选择需要迁出坐标的点 ISLAND_{*i*},再从 ISLAND_{*i*} 中随机选取一个坐标变量代替点 ISLAND_{*i*} 中的对应坐标。

重复(1)-(3)的步骤,直到迭代结束。可以看出,每次迁徙操作后,最高 ISI 的点得到更新,逐渐逼近最佳匹配点。

2.4 变异操作(mutation)

BBO 算法中每个搜索点的变异率定义如下:

$$m_i = m_{\max}(1 - P_i / P_{\max}) \quad (5)$$

其中 m_{\max} 是最大变异率, $P_{\max} = \arg \max P_i$, $i = 1, N$ 。 P_i 定义如下,其中 $P_1 = 1/N$ 。

$$P_i = \begin{cases} -(\lambda_i + \mu_i)P_i + \mu_{i+1}P_{i+1}, & i = 1 \\ -(\lambda_i + \mu_i)P_i + \lambda_{i-1}P_{i-1} + \mu_{i+1}P_{i+1}, & 1 < i \leq N - 1 \\ -(\lambda_i + \mu_i)P_i + \lambda_{i-1}P_{i-1}, & i = N \end{cases} \quad (6)$$

如果某个点的变异率为非零,则根据变异率随机产生一个坐标,取代该点已有的坐标。很显然,这种简单的变异操作无法满足运动估计的要求。由于柯西分布容易得到产生远离原点的随机数,扩大搜索范围^[16],因此可根据变异率对当前 k 次迭代中最高 ISI 点 $I_{\text{best}}^{(k)}$ 按照柯西分布进行变异,使得运动估计可以在搜索空间的其他区域内继续进行搜索。

$$I_{\text{best}}^{(k)'} = \begin{cases} I_{\text{best}}^{(k)}(1 + 0.618 * C(0,1)), & m_{\text{best}}^{(k)} > \text{rand}(0,1) \\ I_{\text{best}}^{(k)}, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

其中 $C(0,1)$ 产生服从标准柯西分布的随机数, $m_{\text{best}}^{(k)}$ 为点 $I_{\text{best}}^{(k)}$ 的变异率。如果变异后得到的点 $I_{\text{best}}^{(k)'}$ 的适应度值比 $I_{\text{best}}^{(k)}$ 好,就取代 $I_{\text{best}}^{(k)}$ 作为当前全局最优解。

2.5 相同点检查

迁徙和变异操作都容易产生相同点,因此要进行相同点检查。对 M 个相同点,保留一个,而其他相同点 $P_i^{(k)}$, $i = 1, 2, \dots, M$, 用 $P_i^{(k)'}$ 代替。 $P_i^{(k)'}$ 是以最高 ISI 点 $I_{\text{best}}^{(k)}$ 为基础,按照式(8)产生。

$$P_i^{(k)'} = I_{\text{best}}^{(k)} + (I_{\text{best}}^{(k)} - P_i^{(k)}) \cdot \text{rand}(0,1) \quad (8)$$

2.6 终止策略

为了减少 MEBBO 算法的迭代次数,提高搜索速度,本文采用早期终止和迭代终止策略。

(1)早期终止 视频序列中,静止块或者类似静止块的 SAD 值非常小^[17],因此可在迭代前计算所有初始点的适应度值,如果某一点的适应度值大于或等于阈值 T_h ,就直接结束搜索,否则进入迭代过程。根据文献[17]实验统计, T_h 选取 512 值最合适。

(2)迭代终止 迭代终止的条件有两个。其一是

达到规定的最大迭代次数。其二,随着迭代次数增加,前后两次迭代找到的最佳点 ISI 值之差越来越小。因此当该差值小于寻优缓慢指数 δ 时,说明寻优缓慢或停止,可提前终止迭代。

$$|\text{ISI}(\text{Cur}_{\text{best}}^{(k)}) - \text{ISI}(\text{Prev}_{\text{best}}^{(k)})| / C_{\max} < \delta \quad (9)$$

其中 $\text{Cur}_{\text{best}}^{(k)}$ 为当前迭代的最高 ISI 点, $\text{Prev}_{\text{best}}^{(k)}$ 为前一次迭代的最高 ISI 点。根据实验统计结果,取最大迭代次数为 5, δ 为 0.1。

2.7 算法流程结构

综上所述,基于生物地理优化的快速运动估计算法(MEBBO)可归结为以下步骤:

步骤 1 确定初始搜索种群,定义多个初始参数,比如迭代次数,最大迁入迁出率,最大变异率等。

步骤 2 计算每个搜索点的适应度值,根据早期终止策略判断,如果满足直接退出搜索,否则转向步骤 3。

步骤 3 根据适合度值的大小对搜索点排序,并保存最高 ISI 对应的点。同时计算每个搜索点的迁入迁出率和变异概率。

步骤 4 执行迁徙操作:根据迁入率和迁出率决定搜索点的坐标是否改变,从而产生新的搜索点。

步骤 5 执行变异操作。如果变异率非零,则根据变异公式对当前最高 ISI 点进行变异,并更新。

步骤 6 进行相同点检查,用随机点替代相同点。对所有搜索点重新排序,保持最高 ISI 对应的点。如果迭代终止条件满足退出迭代,否则重复步骤 3。

步骤 7 结束。返回最高 ISI 对应的点的位置,即为运动矢量的位置。

3 仿真结果和性能评价

在仿真实验中,为了检验算法的适应性,选取不同图像格式和不同运动程度的多个标准测试序列(表 1)进行测试。序列的帧数为 100。宏块大小固定为 16×16 ,搜索范围为 $(-16, +16)$ 。帧类型依次为 IPPPPPPP, GOP 大小为 16。

3.1 基于群智能的运动估计算法比较

首先比较群智能算法 GA, PSO, BBO 应用到运动估计中的性能,除了调整与运动估计相关的参数或编码外,不做其他改进。设定各算法的种群规模为 10,最大迭代数为 5,则各算法运算复杂度相同,即搜索点数都为 $10 \times 5 = 50$ 点。

对各算法搜索性能的评价主要是搜索精度和速度两方面。对搜索精度的评价,本文比较编码重建帧的平均峰值信噪比(PSNR)。对搜索速度的评价,在搜索点数相同时比较各算法的运行时间。各个算

表1 各种标准测试序列

序列	格式	帧率 (帧/秒)	运动程度
CONTAINER	176×144	15	背景和物体运动非常缓慢, 摄像机静止
MOTHER	352×288	30	背景静止, 人物缓慢运动, 摄像机静止
BUS	352×288	30	背景和物体运动适中, 摄像机中速平移
CITY	704×576	60	背景物体静止, 摄像机中速平移和旋转
TENNIS	352×240	30	物体运动剧烈, 摄像机中速缩放
SOCCER	704×576	60	人物运动剧烈, 摄像机快速平移

法的平均 PSNR(dB)值和平均运行时间(s)如表 2。

从表 2 可以看出, GA 的搜索精度最差, 搜索速度最慢, 这是因为 GA 的参数和操作较多。PSO 的搜索精度和速度比 GA 均有所提高, 但差于 BBO。而 BBO 对于运动平缓 and 剧烈的序列, 均可以获得比 PSO 和 GA 高的搜索精度和快的搜索速度。

3.2 多种运动估计算法比较

在同一测试环境下, 对全搜索(FS), 菱形法(DS), 十字法(ARPS), 六边形(HEXBS), BBO 算法, MEBBO 算法进行测试。此部分的 BBO 算法, 在搜索区域内直接随机选取搜索点, 其点数和最大迭代次数等和 MEBBO 算法都相同。

3.2.1 搜索精度比较 各算法的平均 PSNR 值如表 3 所示。其中 DIF 是其他各算法与 FS 算法对比的差

值。

表 3 显示, 对于物体运动平缓的序列如 MOTHER 和 CONTAINER, DS, ARPS, HEXBS 算法与 FS 算法的 PSNR 差值非常小, 但随着摄像机和物体的运动剧烈程度逐步增加, 如 BUS 到 SOCCER 序列, DS 等算法与 FS 算法的 PSNR 差值逐步增大, 这是因为当运动剧烈程度增加时, 匹配误差单调性假设失效, DS 等算法陷于局部最优, 无法获得全局最优解。

对于运动平缓序列, MEBBO 算法的 PSNR 值与 DS 等算法相近, 而对于运动剧烈序列如 TENNIS 和 SOCCER, MEBBO 算法能得到较为准确的全局最优解, 其 PSNR 值高于 DS 等算法。特别地, 对于物体和摄像机同时运动的 BUS 序列, MEBBO 算法的 PSNR 值远高于 DS 等算法。而 BBO 算法, 由于没有考虑运动矢量特性, 其 PSNR 值远低于 MEBBO 和 DS 等算法, 对于运动平缓序列, PSNR 值下降很厉害。

图 3 比较了各算法对 BUS, CITY, TENNIS, SOCCER 序列每帧的 PSNR 值。可以看出, 对于运动变化较大的部分如 BUS 序列的 65-75 帧, SOCCER 序列的 45-65 帧, DS, ARPS, HEXBS 算法的 PSNR 值明显下降且波动厉害, 而 MEBBO 算法的 PSNR 值波动较小, 能有效减少视频质量大的波动。

3.2.2 搜索速度比较 各算法的搜索模式不同, 因此相应的搜索点数不同, 而运动估计绝大部分时间是

表2 GA, PSO, BBO 算法的平均 PSNR 和运行时间

序列 算法	CONTAINER		MOTHER		BUS		CITY		TENNIS		SOCCER	
	PSNR	速度	PSNR	速度	PSNR	速度	PSNR	速度	PSNR	速度	PSNR	速度
GA	17.5	84.0	24.5	336.9	16.6	338.2	21.8	1352	19.56	285.5	23.9	1368
PSO	18.7	68.9	26.6	276.4	17.7	277.9	22.7	1118	20.51	234.5	26.7	1126
BBO	19.9	58.9	27.7	234.9	18.8	235.7	24.0	949	21.32	197.5	27.3	953

表3 FS, DS, ARPS, HEXBS, BBO, MEBBO 算法平均 PSNR 值比较

序列 算法	CONTAINER		MOTHER		BUS		CITY		TENNIS		SOCCER	
	PSNR	DIF	PSNR	DIF	PSNR	DIF	PSNR	DIF	PSNR	DIF	PSNR	DIF
FS	43.67	0	40.23	0	25.04	0	30.97	0	28.19	0	30.09	0
DS	43.66	-0.01	40.05	-0.18	21.58	-3.46	29.75	-1.22	27.17	-1.02	28.03	-2.06
HEXBS	43.64	-0.03	39.89	-0.34	21.41	-3.63	29.08	-1.89	26.64	-1.55	27.65	-2.44
ARPS	43.65	-0.02	39.98	-0.25	21.11	-3.93	29.00	-1.97	26.50	-1.69	27.79	-2.30
BBO	37.46	-6.21	35.35	-4.88	20.57	-4.47	25.90	-5.07	23.01	-5.18	27.26	-2.83
MEBBO	43.66	-0.01	39.99	-0.24	23.59	-1.45	30.54	-0.43	27.25	-0.94	29.54	-0.55

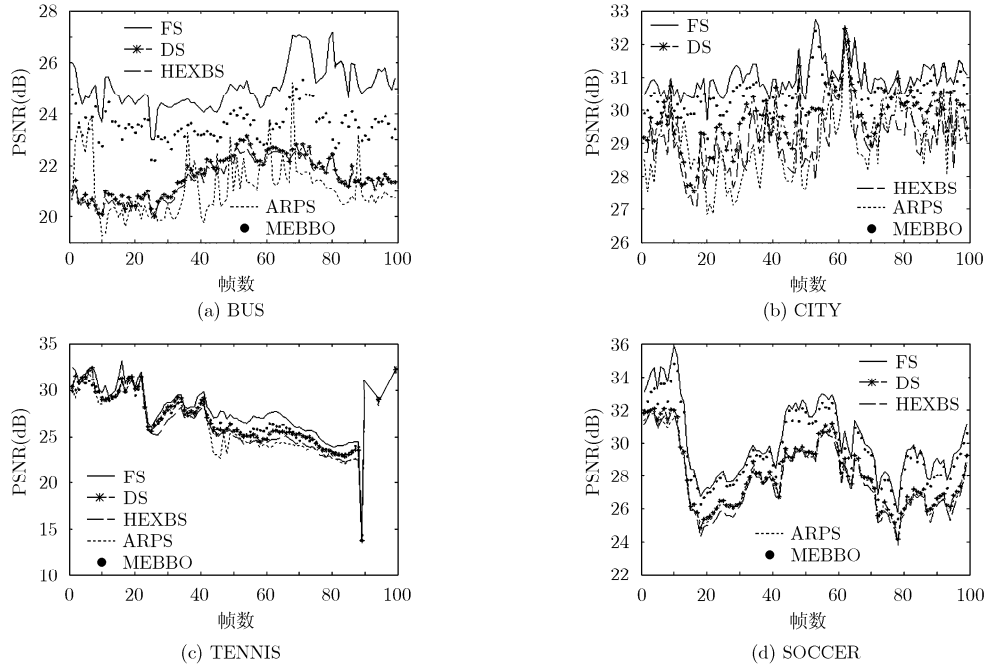


图 3 各算法每帧的 PSNR 值

消耗在搜索点的匹配误差准则的计算上^[14]，所以比较 MEBBO 算法和其他算法的搜索速度，可以直接采用匹配块所需平均搜索点数来衡量。搜索点数越少，搜索速度也就越高。表 4 给出了各算法的平均搜索点数比较，其中比率为其他各算法与 FS 算法的对比值。

从表 4 可以看出，对于运动平缓的序列，MEBBO 算法的搜索点数与 DS 等算法相当，甚至更少。对于运动中等和剧烈的序列，MEBBO 算法为了得到较为准确的全局最优解进行迭代的次数有所增加，因此其搜索点数大约是 DS 等算法的 2-3 倍。尽管如此，MEBBO 算法的搜索点数远低于 FS 算法，最多不到 7%。而对于不同序列，BBO 算法的搜索点数均高于 MEBBO 算法。

为了更直观的比较各个算法的性能，图 4 给出 BUS 序列的第 72 帧的运动补偿后的重构图。

从图 4 可以看出，MEBBO 算法性能明显优于 DS, ARPS, HEXBS, BBO 算法，运动补偿后的效果和 FS 算法最接近。

最后，对运动估计的搜索精度和速度进行权衡，可以得出以下结论，MEBBO 算法在运动缓慢时保持和以往快速搜索算法相当的搜索精度和速度，而当运动剧烈时，在牺牲少量搜索速度的情况下获得了搜索精度的大幅度提高，同时减少了视频质量大的波动。因此，该算法是一种可行的、有较高搜索性能的运动估计算法。

4 结论

本文提出了一种基于生物地理优化的快速运动估计算法，该算法有效地结合了运动矢量的特性，利用生物地理优化的全局搜索特性寻找全局最优，克服了以往快速搜索算法容易陷入局部最优的缺点，可以有效兼顾搜索精度和速度的要求。由于实

表 4 各个算法平均搜索点数比较

序列	CONTAINER		MOTHER		BUS		CITY		TENNIS		SOCCER	
	点数	比率(%)	点数	比率(%)	点数	比率(%)	点数	比率(%)	点数	比率(%)	点数	比率(%)
FS	1024	100	1024	100	1024	100	1024	100	1024	100	1024	100
DS	11.42	1.11	13.59	1.32	20.44	1.99	20.39	1.99	16.71	1.63	40.68	3.97
HEXBS	9.66	0.94	11.05	1.07	15.33	1.49	15.13	1.47	13.11	1.28	26.79	2.61
ARPS	4.87	0.47	6.42	0.62	13.21	1.29	13.83	1.35	13.22	1.29	38.77	3.78
BBO	19.06	1.86	20.03	1.96	53.97	5.27	54.84	5.35	75.16	7.33	78.19	7.63
MEBBO	2.82	0.27	8.82	0.86	38.75	3.78	39.21	3.83	49.47	4.83	69.48	6.78

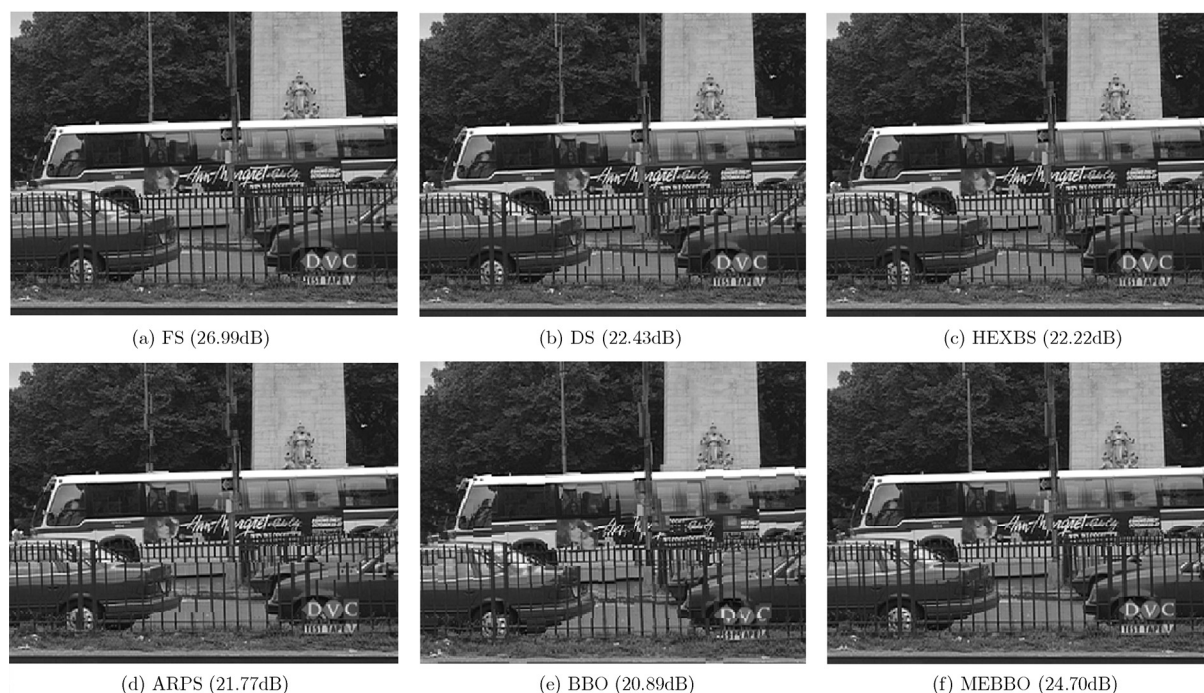


图4 BUS序列第72帧图像的运动补偿重构图

现简单和适用面广, 该算法可以适应实时视频编码的实际需求。然而从实验数据看, 该算法在搜索速度上还有待进一步提高。在今后研究中, 可将MEBBO算法和基于固定模板的搜索算法有效的结合, 选取简单实用的判断准则, 建立合适的模型, 自适应选择合适的搜索模式, 获得搜索精度和速度的最佳平衡。

参考文献

- [1] Yang Peng, He Yu-wen, and Yang Shi-qiang. An unsymmetrical-cross multi-resolution motion search algorithm for MPEG4-AVC/ H.264 coding [C]. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, Taipei, China, June 2004: 531-534.
- [2] Zhu S and Ma K K. A new diamond search algorithm for fast matching motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(2): 287-290.
- [3] Nie Y and Ma K K. Adaptive rood pattern search for fast block-matching notion estimation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(12): 1442-1448.
- [4] Ce Zhu, Xiao Lin, and Chau Lap-pui. Hexagon-based search pattern for fast block motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2002, 12(5): 349-355.
- [5] Tsai Jang-er and Hang Hsueh-ming. Modeling of pattern-based block motion estimation and its application [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(1): 108-113.
- [6] Ng Ka-ho, Po Lai-man, and Wong Ka-man, *et al.* A search patterns switching algorithm for block motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(5): 753-759.
- [7] 李坤, 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 Kun, Xu Wei-pu, and Zheng Nan-ning, *et al.* A novel fast motion estimation method based on genetic algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(6): 114-117.
- [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 Tao and Ding Run-tao. A modified genetic algorithm based block matching motion estimation method [J]. *Signal Processing*, 2003, 19(3): 207-210.
- [9] Yuan Xue-dong and Shen Xiao-jing. Block matching algorithm based on particle swarm optimization for motion estimation [C]. *International Conference on Embedded Software and Systems*, Chengdu, China, July 29-31, 2008: 191-194.
- [10] Ranganadham Dan, Pavankumar gorpuni. An efficient bidirectional frame prediction using particle swarm optimization technique[C]. *International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*, Kottayam, Kerala, India, Oct. 27-28, 2009: 42-46.
- [11] Dan Simon. Biogeography-based optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008, 12(6): 702-713.

- [12] Rick Rarick and Dan Simon, *et al.*. Biogeography-based optimization and the solution of the power flow problem[C]. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics San Antonio, TX, USA, October 2009: 1003–1008.
- [13] Panchal V K and Singh Parminder, *et al.*. Biogeography based satellite image classification [J]. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 2009, 6(2): 269–274.
- [14] 向友君, 雷娜, 余卫宇等. 运动估计算法匹配准则研究[J]. *计算机科学*, 2009, 36(9): 278–280.
- Xiang You-jun, Lei Na, and Yu Wei-yu, *et al.*. Research of block matching criterion for motion estimation[J]. *Computer Science*, 2009, 36(9): 278–280.
- [15] Cheung C H and Po L M. A novel cross-siamond search algorithm for fast block motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2002, 12(12): 1168–1177.
- [16] 林丹, 李敏强, 寇纪淞. 进化规划和进化策略中变异算子的若干研究[J]. *天津大学学报*, 2000, 33(5): 627–630.
- Lin Dan, Li Min-qiang, and Kou Ji-song. On research of mutation operation evolutionary programming and evolutionary strategies [J]. *Journal of Tianjin University*, 2000, 33(5): 627–630.
- [17] Hosur P I and Ma K K. Motion vector field adaptive fast motion estimation[C]. International Conf. Information, Communication and Signal Processing'99, Singapore city, Singapore, 1999: 7–10.
- 张 萍: 女, 1976 年生, 讲师, 研究方向为视频编码、智能信息处理.
- 魏 平: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号处理、电子对抗.
- 于鸿洋: 男, 1964 年生, 副教授, 研究方向为视频处理、多媒体通信.