

# 基于连续消除的六边形自适应搜索算法

黄 帅, 宋国新

(华东理工大学计算机系, 上海 200237)

**摘 要:** 结合连续消除算法提出了一种新的运动估计算法——基于连续消除的六边形自适应搜索算法, 该算法采用六边形和小菱形搜索模板, 并利用连续消除算法对每个待匹配点进行判断, 减少待匹配点的个数。试验结果表明, 该算法的搜索速度优于现有的快速运动估计算法, 搜索精度接近于全搜索算法。

**关键词:** 运动估计; 块匹配算法; 连续消除算法(SEA); SEA-HMVFAST

## Hexagon-based Self-adaptive Search Algorithm Using Successive Elimination

HUANG Shuai, SONG Guoxin

(Department of Computer, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237)

**【Abstract】** This paper proposes a hexagon-based self-adaptive algorithm using successive elimination(SEA-HMVFAST), a new fast motion estimation algorithm. In SEA-HMVFAST, every candidate block is first determined whether to match or not using the successive elimination algorithm, then a new hexagon search pattern and a common diamond search pattern are adaptively used. Experimental results show that the proposed algorithm provides faster search speed than other existing fast block-matching algorithm, while the distortion is almost the same as the FS algorithm.

**【Key words】** Motion estimation; BMA; Successive elimination algorithm(SEA); SEA-HMVFAST

### 1 概述

对于视频序列图像, 由于相邻帧之间存在很大的时间相关性, 即时间冗余, 因此通过减少时间冗余, 可以大幅度提高视频编码的效率。而运动估计是一种有效的方法, 已经被许多视频编码标准所采纳。

运动估计方法分为两类: 块匹配算法(BMA)和像素递归算法(PRA)。BMA 算法简单和易于 VLSI 实现, 被广泛应用。在 BMA 中, 当前图像帧被分成大小固定的矩形块, 对于每一块, 在参考帧的搜索窗内找到最匹配的块来估计当前运动向量, 它是通过最小化一个匹配判别式来执行, 如绝对差和(SAD)。

目前, 块匹配运动估计算法中搜索精度最高的是全搜索算法(FS)<sup>[1]</sup>, FS是对搜索范围内的每一个像素点进行匹配以得到一个最优的运动矢量。但它的计算复杂度高, 不宜实时应用。为此人们提出各种快速算法, 如三步法(TSS)<sup>[2]</sup>、二维对数法(TDL)<sup>[3]</sup>, 通过限制搜索位置的数目来减少计算量, 但它们在第一步搜索步长较大, 不利于估计小的运动块; 新四步法(NFSS)<sup>[4]</sup>、基于块的梯度下降法(BBGDS)<sup>[5]</sup>利用运动矢量具有中心偏移的特性, 提高了匹配速度, 减少了陷入局部极小的可能性, 但它们都是以原点作为初始搜索中心, 没有充分利用相邻块之间的运动相关性。1999年10月, 菱形法(DS)<sup>[6]</sup>被MPEG-4 国际标准采纳并收入验证模型(VM), 虽然它的综合性能较其他算法优越, 但不能根据图像的内容作出灵活处理, 即不管是什么样的运动, 一律先用大模板(LDSP)(见图 1(a))来搜索, 再使用小模板(SDSP)(见图 1(b)), 这对小运动是一种浪费。后来又提出了MVFAST算法, 其本

质是一种改进的DS算法, 它基于大小两个菱形模板, 根据运动类型选择不同的模板进行匹配。这些算法虽然大大减少了搜索时间, 但都有其自身的缺陷, 而且估计精度仍与FS有较大差距, 搜索速度仍难以很好地满足实际要求。本文充分利用序列图像的运动矢量时间、空间分布特性——中心偏移性和相关性, 并结合连续消除算法(SEA)提出了新的算法——基于连续消除的六边形自适应搜索算法(SEA-HMVFAST)。

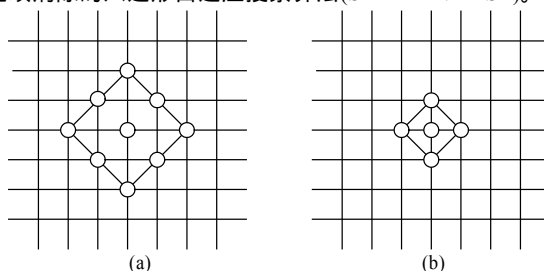


图1 菱形(DS)模板

### 2 连续消除算法(SEA)

SEA(Successive Elimination Algorithm)<sup>[7]</sup>是 W.Li 和 E.Safari 于 1995 年提出的。它可以减少 FS 算法的高运算量, 同时可以得到与其相同的匹配精度。SEA 利用一个简洁的不等式来减少待匹配点的绝对误差和 SAD 计算量, 避免对没有希望成为最佳匹配点位置作进一步的计算。

**基金项目:** 上海市科技发展基金资助项目(045115009)

**作者简介:** 黄 帅(1982 - ), 男, 硕士生, 主研方向: 视频编码; 宋国新, 教授、博导

**收稿日期:** 2006-01-26 **E-mail:** hshshy@163.com

SEA 认为某一点(i,j)有可能成为最佳匹配点的前提条件是：

$$\text{Sum0} - \text{MinSAD} \leq \text{Sum}(i,j) \leq \text{Sum0} + \text{MinSAD} \quad (1)$$

其中，Sum0 为待编码块各点灰度的绝对值之和；MinSAD 为已搜索过的点中最小的 SAD。Sum(i,j) 为待匹配块(i,j)各点灰度的绝对值之和。

根据该式，可提前终止某一点的匹配搜索，即每次搜索新的匹配点时，先判断是否满足式(1)，若满足，则计算 SAD(i,j)，否则就跳过该点直接取下一点。若 SAD(i,j) 比当前 MinSAD 小，则更新 MinSAD：MinSAD = SAD(i,j)。其算法流程如图 2。

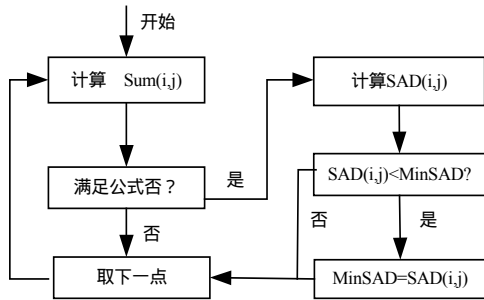


图 2 SEA 连续消除算法流程

### 3 基于连续消除的六边形自适应搜索算法

#### 3.1 静止块判断

实际中绝大多数图像序列的运动都很小，如视频电话、视频会议，背景几乎是静止的，前景的运动也不大，运动矢量通常是高度集中分布在搜索窗的中心位置附近，称为中心偏移性。为此可构造阈值 T，在搜索前首先检测(0, 0)矢量，本算法使用 SAD 作为衡量判断误差的准则。其定义为

$$\text{SAD}(i,j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |f_k(m,n) - f_{k-1}(m+i,n+j)| \quad (2)$$

如果满足  $\text{SAD}(0, 0) < T$ ，认为该块属于静止块，其运动矢量就是(0, 0)，停止搜索。实验证明当  $T=512$  时，误判概率和虚警概率最小。但由于运动序列的复杂性，显然固定的阈值不具有普适性，为此根据运动的相关性，使用新的阈值设定方法。

可以利用相邻块的运动矢量来预测当前块的搜索起点。一般来说，空间位置的已编码的相邻块和前一帧的图像块都可以被用来预测当前块的运动矢量。

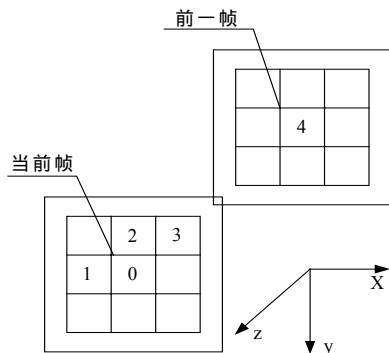


图 3 空间和时间的相关块

实验表明，当前块与帧内上方、左方和右上方的子块的相关性最强，而与其他位置的相关性则较弱，图 3 为运动估计中用到的空间和时间相关的块，其中 1#、2#和 3#块为空间相关的块，4#为前一帧与当前块位置相同的块。为此，本文

算法采用了以 4#的 SAD 作为判断宏块是否为静止块的阈值。令 4#块的 SAD 值为 SAD4，则阈值  $T = \text{SAD}_4$ 。因为块对应的阈值是自适应变化的，所以这种阈值设置方式比采用固定阈值的方式适应性更强，判断静止块更准确。

另外如果当前块的相邻块的运动矢量相同，则当前块与这些块具有相同运动矢量的概率为 96.8%，此时可以认为当前块的运动与它们是相同的。

#### 3.2 起始点预测

搜索起始点预测可以根据当前块的运动类型来设定。令运动矢量集合  $V = \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4\}$ ， $V_0 = (0, 0)$ ， $V_i = (x_i, y_i)$ ， $i = 1, 2, 3, 4$  分别表示图 3 中 1、2、3 和 4 号块的运动矢量， $l_i = |x_i| + |y_i|$ ，令  $L = \max(l_1, l_2, l_3, l_4)$ ，设定阈值  $L_1$  和  $L_2$ ，且  $L_1 \leq L_2$ 。当  $L \leq L_1$  时，当前块被认为是小运动块；当  $L_1 < L < L_2$ ，当前块为中等运动块；当  $L \geq L_2$  时，当前块为大运动块。如果当前块为小运动块或中等运动块时，则无须进行起始点预测；如果当前块为大运动块，则应进行起始点预测，使搜索起始点更接近全局最小点。根据实验结果，设定  $L_1 = 1, L_2 = 2$ 。

确定搜索起始点常用的方法有中值法、加权平均法和 SAD 比较法 3 种，本文采用了 SAD 比较法的预测方式，主要因为：首先，在多数情况下，预测效果是第一位的；其次，由于运动的相关性，各预测块运动矢量对应的点都有可能成为最优解，因此这些点在搜索过程中的地位应高于其它点；此外通过 SAD 比较法得到的预测起点都是相邻块的运动矢量，有助于提高运动矢量的差值编码效率。

在图 3 中，设 1、2、3 和 4 号块的运动矢量分别为  $V(x_1, y_1)$ ， $V(x_2, y_2)$ 、 $V(x_3, y_3)$  和  $V(x_4, y_4)$ ，块失真度分别为  $\text{SAD}_1$ 、 $\text{SAD}_2$ 、 $\text{SAD}_3$  和  $\text{SAD}_4$ ；令  $V_0$  表示(0,0)位置的运动矢量，其块失真度记为  $\text{SAD}_0$ 。令  $\text{MinSAD} = \min\{\text{SAD}_0, \text{SAD}_1, \text{SAD}_2, \text{SAD}_3, \text{SAD}_4\}$ ，则预测搜索起点就是 MinSAD 对应的运动矢量。

#### 3.3 搜索策略

在菱形搜索算法的 LDSP 中，四周的 8 个匹配点到中心点位置距离是不同的：水平和垂直方向的间距为 2 像素，而中心点和对角方向的间距为  $\sqrt{2}$  像素。因此使用 LDSP 进行粗定位时，沿不同方向移动的匹配速度也是不同的，当模板沿水平或垂直方向移动，此时的搜索速度为 2 像素/步；当沿对角方向移动时其速度为  $\sqrt{2}$  像素/步。

另一方面，在模板移动的每一步中，不同的搜索方向需要检测的搜索点数也不同。在水平和垂直方向上需要检测 5 个点，而在对角方向上只需检测 3 个点即可。所以本文使用了六边形搜索法(HEXBS)，把大菱形模板换成六边形模板(HSP)(见图 4)，并结合连续消除算法，提出了新的搜索策略。

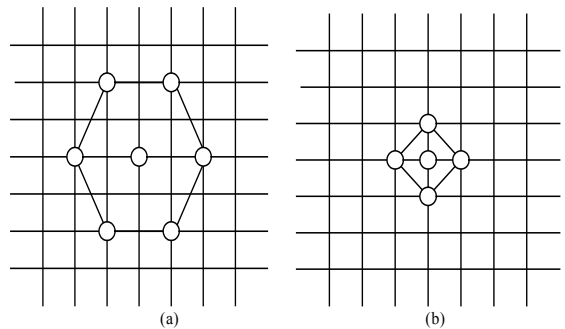


图 4 六边形模板(HSP)和小菱形模板(SDSP)

该算法具体步骤如下：

**step1** 先计算 HSP 搜索区域中心点的 SAD 值,然后利用 SEA 算法对周围 6 个点进行匹配计算,若周围 6 个点都未满足 SEA 算法的判断条件式(1),则进行 step3;若至少有一点满足该条件,并且 MBD 点位于中心点,则进行 step3;否则到 step2。

**step2** 以上一步找到的 MBD 点作为中心点,用新的 HSP 和 SEA 来计算,若周围 6 个点都未满足式(1)或者 MBD 点位于中心点则进行 step3;否则重复 step2。

**step3** 以上一步找到的 MBD 点作为中心点,将 HSP 换为 SDSP,在 5 个点处利用 SEA 计算,若周围 4 个点都不能满足式(1),则 SDSP 的中心点所在位置即对应最佳运动矢量,搜索结束;否则找出 MBD 点,转 step4。

**step4** 搜索上一步找到的 MBD 点两侧与中心点距离为  $\sqrt{2}$  的两点,用式(1)进行判断,找出这 3 点中新的 MBD 点,该点所在位置即对应为最佳运动矢量,搜索结束。

### 3.4 SEA-HMVFAST 算法描述

根据上述思想,SEA-HMVFAST 算法的具体步骤如下:

**step1** 判断  $V(x_1,y_1)$ 、 $V(x_2,y_2)$ 和 $V(x_3,y_3)$  3 个矢量是否相同,若相同则当前块的运动矢量为 $V(x_3,y_3)$ ,转step6;否则计算(0,0)点处的SAD值,记为SAD0,若SAD0<T,则该块为静止块,运动矢量为(0,0),转step6;否则转step2。

**step2**  $l_i = |x_i| + |y_i|, i=1,2,3,4$ , 令  $L = \max(l_1, l_2, l_3, l_4)$ , 如果  $L \leq L_1$ , 则该块为小运动块,  $V_p = (0,0)$ , 转 step4; 如果  $L_1 < L < L_2$ , 则该块为中等运动块, 转 step5; 如果  $L \geq L_2$  时, 则该块为大运动块, 转 step3;

**step3** 计算时空相邻点的SAD,令MinSAD=min{SAD<sub>0</sub>,SAD<sub>1</sub>,SAD<sub>2</sub>,SAD<sub>3</sub>,SAD<sub>4</sub>} ,则预测矢量 $V_p$ 等于MinSAD对应的运动矢量,转step4。

**step4** 以 $V_p$ 为中心采用SDSP模板进行匹配搜索,先计算中心点的SAD值,然后利用SEA算法的判断条件式(1)对周围 4 个点进行判断,若 4 个点都不满足式(1),则中心点即为最优运动矢量,转step6;否则找出MBD点,若MBD点位于中心位置,则中心点即为最优运动矢量,转step6;否则令此MBD点为起始点,重复step4,继续使用SDSP和SEA进行匹配。

**step5** 以当前点为搜索起始点,使用前述的基于 SEA 的六边形搜索策略进行匹配搜索。

**step6** 算法结束。

在该算法中,以参考帧同一位置块的 SAD<sub>4</sub> 作为 T 的值,即  $T = SAD_4$ ; 另外设定  $L_1 = 1, L_2 = 2$ 。

## 4 实验结果分析

为了验证算法的性能,在相同条件下对 FS、TSS、DS、MVFAST 和 SEA-HMVFAST 进行了计算机仿真实验。实验以 Claire、Football 和 Mobile 3 个标准序列作为测试序列,每个序列选前 100 帧,使用的宏块大小为  $16 \times 16$ ,搜索范围为  $15 \times 15$ ,匹配准则为 SAD。

实验得到各算法的平均搜索点数如表 1 所示。从表 1 中可以看出,SEA-HMVFAST 算法在各种序列中所用的平均搜索点数都是最少的,说明 SEA-HMVFAST 算法是搜索速度最快的。

表 1 每块平均搜索点数比较

算法	Claire		Football		Mobile	
	平均搜索点数	加速倍数	平均搜索点数	加速倍数	平均搜索点数	加速倍数
FS	225	1.00	225	1.00	225	1.00
TSS	25	9.00	25	9.00	25	9.00
DS	13.22	17.02	16.75	13.43	13.23	17.01
MVFAST	1.63	138.04	9.45	23.81	7.10	31.69
SEA-HMVFAST	1.51	149.00	8.97	25.08	7.03	32.00

表 2 列出了各算法的重构图像的  $P_{SNR}$  平均值以及与 FS 的比较结果。从中可以看出,FS 算法的平均  $P_{SNR}$  值最高,说明效果最好。而 SEA-HMVFAST 算法与 FS 算法的值都比较接近,且明显高于其他算法,这说明 SEA-HMVFAST 算法在准确性上要比其他算法更好,最为接近 FS 算法。

表 2 平均  $P_{SNR}$  值比较(单位: dB)

算法	Claire		Football		Mobile	
	$P_{SNR}$	$\Delta P_{SNR}$	$P_{SNR}$	$\Delta P_{SNR}$	$P_{SNR}$	$\Delta P_{SNR}$
FS	41.32	0.00	22.46	0.00	22.75	0.00
TSS	41.00	-0.32	21.36	-1.10	22.43	-0.32
DS	41.30	-0.02	21.73	-0.73	22.68	-0.07
MVFAST	41.29	-0.03	21.95	-0.51	22.73	-0.02
SEA-HMVFAST	41.28	-0.04	21.93	-0.53	22.73	-0.02

## 5 结束语

本文根据序列图像的运动矢量中心偏移和相关性,并结合连续消除算法(SEA)提出了 SEA-HMVFAST 算法。该算法根据视频序列的运动类型自适应的选择不同的搜索策略,算法采用六边形和小菱形模板,并对每个匹配点进行 SEA 判断,减少待匹配点的个数,在保证搜索精度的同时有效地提高了搜索的速度。试验结果表明,SEA-HMVFAST 算法在复杂度和准确性上都优于以往快速运动估计算法。

## 参考文献

- 1 刘海峰. 运动估值快速块匹配算法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2002.
- 2 Li R, Zeng B, Liou M L. A New Three-step Search Algorithm for Block Motion Estimation[J]. IEEE Trans. on Circuits System for Video Technology, 1994, 4(4): 438-442.
- 3 Jain J, Jain A. Displacement Measurement and Its Application in Interframe Image Coding[J]. IEEE Trans. on Communication, 1981, 29(12): 1799-1808.
- 4 Po L M, Ma W C. A Novel Four-step Search Algorithm for Fast Motion Estimation[J]. IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technol., 1996, 6(3): 313-317.
- 5 Liu L K, Feig E. A Block-based Gradient Descent Search Algorithm for Block Motion Estimation in Video Coding[J]. IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technol., 1996, 6(4): 419-422.
- 6 Zhu S, Ma K K. A New Diamond Algorithm for Fast Block-matching Motion Estimation[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2000, 9(2): 287-290.
- 7 Li W, Salari E. Successive Elimination Algorithm for Motion Estimation[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1995, 4(1):105-107.
- 8 Li W. Fine Granularity Scalability in MPEG-4 for Streaming Video[C]. Proc. of ISCAS'00, Geneva, Switzerland, 2000-05: 28-31.