# 基于方向自适应菱形搜索的运动估计算法

李 荣 张其善 杨东凯

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘 要**: 基于对运动矢量分布特性的研究,提出了一种基于方向自适应菱形搜索的运动估计算法. 该算法对搜索起始点进行预测;设置"双阈值",针对匹配块提前中止搜索;并根据运动特征,自适应地选择小菱形模板和4种新型的方向自适应菱形模板,具有强烈的搜索方向性. 实验结果证明,该算法不仅大幅度地减少了平均搜索点数,而且在一定程度上提高了重建图像的信噪比,其搜索速度和精度均优于传统的快速运动估计算法.

**关 键 词**: 运动估计; 块匹配; 视频; 方向自适应菱形搜索

**中图分类号**: TN 919. 81

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)09-1065-05

## Directional adaptive diamond search for motion estimation

Li Rong Zhang Qishan Yang Dongkai

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the research of motion vector distribution, a novel directional adaptive diamond search (DADS) algorithm was proposed. This algorithm adopted three strategies: the initial search point prediction strategy, the early search termination strategy, and the directional adaptive diamond search strategy. The initial search point prediction strategy made the predicted motion vectors close to true values and avoided them falling into the local optimal. The early search termination strategy detected the matching macroblock according to two fixed thresholds, and terminated the current search immediately. The directional adaptive diamond search strategy adopted the small diamond search pattern (SDSP) and four novel directional adaptive diamond search patterns (DADSP), and the search patterns were utilized adaptively based on the type of motion activity. Experimental results show that the proposed algorithm not only significantly reduces the average search points, but also improves the search accuracy to a certain extent, and it excels other traditional fast block matching algorithms in speed and veracity.

Key words: motion estimation; block matching; video; directional adaptive diamond search

运动估计是视频编码的关键技术之一,其中应用最为广泛的是块匹配运动估计. 目前,块匹配运动估计算法中精度最高的是全搜索法(FS, Full Search). FS对搜索区域内所有像素点均进行匹配运算,可以达到最佳匹配,但其搜索点数多,运算量大. 因此,出现了很多快速算法,如早期的三步法、十字法,通过限制搜索位置的数目来减少计算量,但搜索步长较大,容易陷入局部搜索. 为了避免上述问题,出现了以视频序列运动矢量中心偏置特性为基础的算法,如四步搜索法(4SS, 4-Step Search)、菱形搜索法(DS, Diamond Search)[1]、六边形搜索法(HEXBS, Hexagon-Based Search)[2],以及利用不同搜索模板进行组合搜索的算法,如十字菱形六边形搜索法(CDHS, Cross-Diamond-Hexagonal Search)[3],在保持一定搜索精度的同时提高了搜索速度,然而它们都以原点作为搜索起始点,并没有充分利用运动矢量的相关性. 因此出现了运动矢量场自适

**收稿日期**: 2007-09-06

**基金项目**: 国家自然科学基金资助项目(60602046)

**作者简介**: 李 荣(1983-),女,陕西汉中人,硕士生, lirong1983@gmail.com.

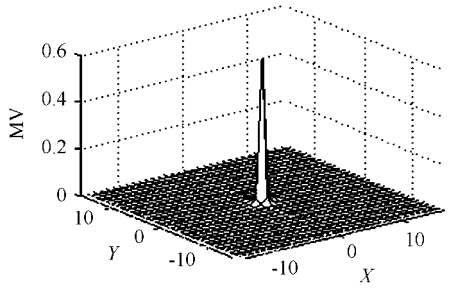
应搜索 (MVFAST, Motion Vector Field Adaptive Search Technique)[4]、自适应十字形搜索 (ARPS, Adaptive Rood Pattern Search)[5]等算法,利用运动矢量相关性进行矢量预测,搜索效率很高,但它们并没有充分考虑运动矢量的方向性.

本文在研究了现有块匹配运动估计算法优缺点基础上,提出了一种方向自适应菱形搜索 (DADS, Directional Adaptive Diamond Search)算法.该算法利用运动矢量相关性进行起始点预测;设置"双阈值",对匹配块直接中止搜索;并结合小菱形模板和新型的方向自适应菱形模板进行搜索,提高了搜索速度和精度.

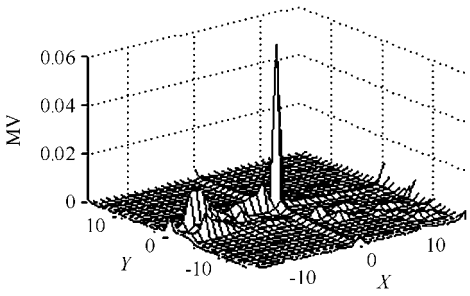
## 1 运动矢量的分布特性

本文通过对大量视频序列进行统计,得出运动矢量具有以下分布特性:

1) 运动矢量具有中心偏移特性.运动矢量 (MV, Motion Vecor)大多集中在距离搜索窗中心位置 (0,0)点 5×5的区域内,并在 (0,0)点概率分布出现尖峰,如图 1所示.




a m & d序列



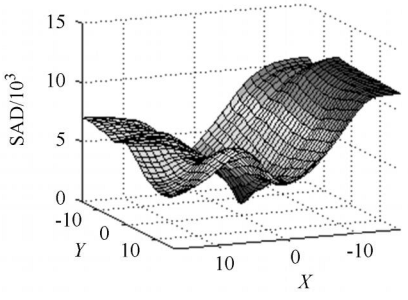

b football序列

图 1 运动矢量的空间分布

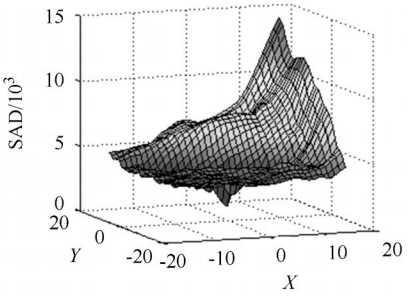
图 1a为 m & d序列前 100帧在匹配窗为 ±16条件下的运动矢量概率分布情况,在 (0,0)点为 61.4%,在距离中心位置 5×5区域内高达 78.6%.图 1b为 football序列在相同条件下的运动矢量分布情况,可以看出即使运动较为剧烈的视频序列,其运动矢量依然集中在中心位置.

2) 运动矢量具有相关性和方向性.视频序列同一帧及相邻帧的相邻宏块之间具有相同或相似的运动矢量,因此运动矢量具有时空相关性.此外,从图 1b可以看出, football序列运动矢量除了集中在中心位置外,在水平和垂直方向也有较高分布,运动矢量具有一定方向性.

3) 匹配误差的绝对误差和 (SAD, Sum of Absolute Differences)曲面沿某一梯度下降,同时具有多峰的分布特性.图 2a、图 2b分别为 m & d序列和 football序列的某宏块在 ±16范围内 SAD分布图,可以看出误差曲面沿一定的方向趋向中心位置的最小点.同时在大多数部分,曲面存在一个或多个局部极小点,呈现多峰分布特性.




a m & d序列




b football序列

图 2 图像宏块的 SAD分布

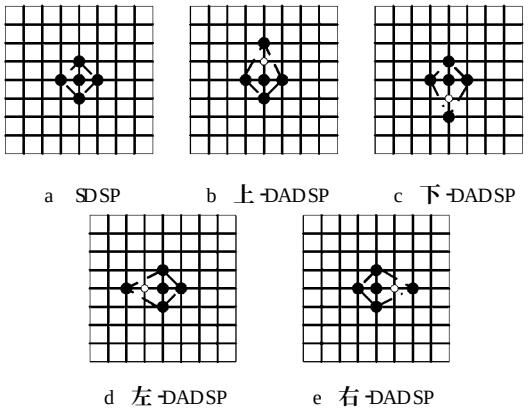
## 2 方向自适应菱形搜索算法

### 2.1 搜索模板

基于上述对运动矢量分布特性的分析,DADS算法采用了两种模板:小菱形模板 (SDSP, Small Diamond Search Pattern)和新型的方向自适应菱形模板 (DADSP, Directional Adaptive Diamond Search Pattern).SDSP模板充分利用了运动矢量的中心偏移特性,搜索范围更加集中.DADSP模板具有方向性和不对称性,更好地适应了搜索方向.图 3a为 SDSP模板;图 3b～图 3e为 4个 DADSP模板,其中空心点为跳过点.

### 2.2 DADS搜索算法

DADS搜索算法包括 3部分:起始点预测策略,搜索中止策略和方向自适应菱形搜索策略.起始点预测使起始点更接近真实值,可以有效避免



a　SDSP　　b　上-DADSP　　c　下-DADSP

d　左-DADSP　　e　右-DADSP

图 3　DADS算法搜索模板

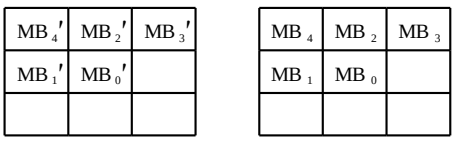
搜索陷入局部最优;搜索中止策略可以更快速地检测出匹配块,一但绝对误差小于设定阈值,搜索立即中止;方向自适应菱形搜索策略利用小菱形模板和方向自适应菱形模板进行搜索,在预测运动矢量基础上,集中在搜索窗中心位置附近进行方向自适应性搜索,提高了搜索效率.

2.2.1　起始点预测策略

视频序列的运动矢量具有空间和时间相关性,利用该特性对当前块的运动矢量进行预测,有利于使搜索起始点更接近真实值,提高搜索的速度和精度.图 4为时空域中宏块的相邻关系,其中 $MB_0$为当前帧编码宏块,$MB_1$～$MB_3$为空间域中与其相关性最强的 3个宏块,即帧内当前块的上方、左方、右上方的相邻宏块 (若 $MB_3$不存在,用左上方宏块 $MB_4$代替);参考帧对应位置上的宏块分别表示为 $MB_0'$～$MB_4'$,其中 $MB_0'$为时间域中与 $MB_0$相关性最强的宏块. DADS算法选取这 4个时空相关性最强的宏块作为参考进行起始点预测.定义参考运动矢量集合为

$$V = \{V_0, V_1, V_2, V_3(V_4), V_0'\}$$

其中,$V_0 = \{0, 0\}$; $V_i = \{x_i, y_i\}$, $i = 1, 2, 3(4)$,表示 3个空域邻块的运动矢量; $V_0' = \{x_0', y_0'\}$,表示时域邻块的运动矢量.




a　参考帧　　b　当前帧

图 4　时空域中宏块的相邻关系

起始点预测的传统方法有加权法、平均值法、中值法、匹配误差比较法等.中值法利用 $V_i = \{x_i, y_i\}$, $i = 1, 2, 3(4)$这 3个空域邻块的运动矢量的中值 $V_m = \{\text{median}(x_1, x_2, x_3(x_4)), \text{median}(y_1, y_2, y_3(y_4))\}$,进行预测,运算复杂度小,预测精度较高.匹配误差比较法通过对集合 $V$ 中的各预测矢量进行比较,取使得 SAD最小的运动矢量 $V_s$作为搜索起始点,其预测精度较高,但运算量较大. DADS算法采用中值法与匹配误差比较法相结合的预测方法来确定搜索起始点,用中值法作初步定位,匹配误差比较法作再次定位,在保证预测精度的同时提高了速度.

2.2.2　搜索中止策略

DADS算法采用绝对误差和 SAD作为搜索中止策略中的匹配准则,其具体表达如下:

$$S_{SAD}(i, j) = \sum_{m=0}^{M}\sum_{n=0}^{N} | f_k(m, n) - f_{k-1}(m + i, n + j) | \quad (1)$$

在搜索过程中,如果当前宏块与参考宏块的 SAD小于一定判定阈值,则认为该参考宏块是当前宏块的最佳匹配块,从而中止搜索,参考运动矢量为最优运动矢量;如果宏块间的 SAD大于判定阈值,则说明该参考宏块不是最佳匹配块,需进一步搜索.在 DADS算法中,搜索中止策略主要针对起始点预测初步定位、再次定位得到的预测运动矢量进行检测,设定了"双阈值":初步定位判定阈值 $T_{th1}$和再次定位判定阈值 $T_{th2}$.如果预测运动矢量所对应的宏块与参考宏块的 SAD小于判定阈值,则中止搜索,该运动矢量为最优运动矢量,否则作进一步搜索.

在搜索中止策略中,确定适当的判定阈值是关键所在.阈值太大会影响搜索的精度,把不匹配块错判为匹配块;阈值太小又会使得搜索的速度降低,很多匹配块被误认为非匹配块从而进入下一步搜索,加大了运算量.据统计,大多数情况下,在当前宏块与参考宏块间的 SAD小于 512时,两个宏块间相似度很高,两者匹配.因此 DADS算法将初步定位判定阈值设为 $T_{th1} = 256$,再次定位判定阈值设为 $T_{th2} = 512$.可以看到本算法采用了搜索中止策略,在大多数情况下仅针对参考运动矢量集合中的运动矢量进行检测就可完成搜索,大幅度降低了运算量.

2.2.3　方向自适应菱形搜索策略

基于运动矢量场的分布特性, DADS算法提出了一种新的搜索策略:方向自适应菱形搜索策略.该策略将具有"聚焦性"的小菱形模板和具有"方向性"的方向自适应菱形模板相结合,提高了搜索的速度与精度,具体步骤如下:

**步骤 1**　以预测的搜索起始点作为小菱形模板 SDSP的中心,在该模板对应的 5个搜索点处分别计算其 SAD,得出最小误差点 (MBD, Block Distortion Measure).若 MBD在中心点,则跳至步

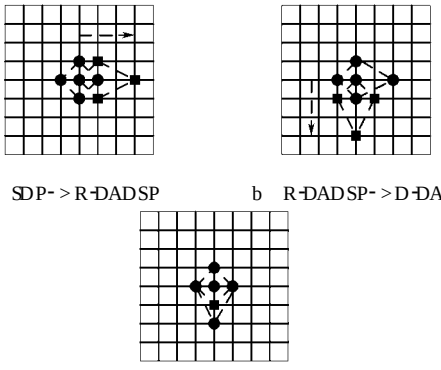
骤 4,否则跳至步骤 2.

**步骤 2** 以上一次的 MBD 点为中心,并根据上一次 MBD 点所确定的方向选择 DADSP 模板. 若 MBD 在中心点的上方,选择上-DADSP 进行搜索;若 MBD 在中心点的下方,选择下-DADSP 进行搜索;若 MBD 在中心点的左方,选择左-DADSP 进行搜索;若 MBD 在中心点的右方,则选择右-DADSP 进行搜索,找出新的 MBD 点. 如果新的 MBD 在中心点,则跳至步骤 3,否则重复步骤 2.

**步骤 3** 以上一次的 MBD 点为中心,选用小菱形模板 SDSP 作最后的定位搜索(由于 SDSP 模板中有 4个点已经进行了搜索,此时相当于仅对剩下的点,即图 3b～图 3e 中的空心点进行搜索),得到新的 MBD 点,跳至步骤 4.

**步骤 4** 该 MBD 点为最佳匹配点,所对应的运动矢量为最优运动矢量,算法结束.

在搜索过程中,几种可能的模板变换规则为: SDSP-> DADSP, DADSP -> DADSP, DADSP -> SDSP,图 5给出了这几种变换的示例.



a SDP-> R-DADSP b R-DADSP-> D-DADSP

c D-DADSP-> SDSP

图 5 搜索模板变换规则

### 2.2.4 DADS搜索算法

在上述 3个关键技术的基础上,本文提出了 DADS搜索算法,步骤如下:

**步骤 1** 采用起始点预测策略的中值法初步定位得到预测运动矢量 $V_m$,对 $V_m$所对应的参考宏块进行判定. 根据搜索中止策略,如果参考宏块与当前宏块的匹配误差小于判定阈值 $T_{th1}$时,跳至步骤 4,否则跳至步骤 2.

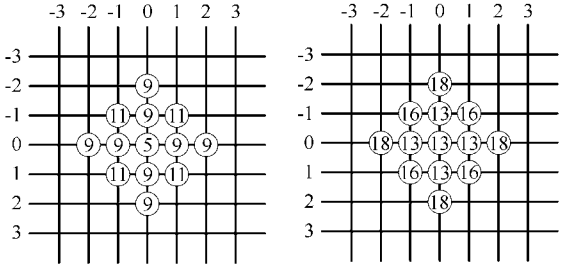
**步骤 2** 采用起始点预测策略的匹配误差比较法再次定位得到运动矢量 $V_s$. 如果 $V_s$所对应的参考宏块与当前宏块的匹配误差小于判定阈值 $T_{th2}$时,跳至步骤 4,否则跳至步骤 3.

**步骤 3** 以预测起始点为搜索中心,将小菱形模板 SDSP 和方向自适应菱形模板 DADSP 相结合,采用方向自适应菱形搜索策略做进一步搜索,直至找到 MBD 点,跳至步骤 4.

**步骤 4** 以该点作为最佳匹配点,当前运动矢量为最优运动矢量,算法结束.

### 2.3 算法分析

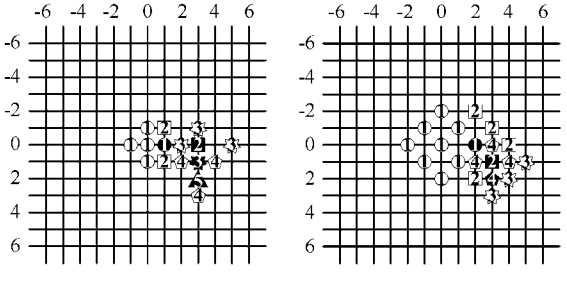
DADS算法中的起始点预测策略和搜索中止策略,使得算法仅通过对参考运动矢量集合中的预测运动矢量进行检测、搜索 1～5个点就中止的可能性大大增加. 方向自适应菱形搜索策略在以上两个策略的基础上,以预测搜索起始点为中心,将 SDSP 模板和 DADSP 模板相结合,在运动较大时加强运动方向上的搜索,保持了"方向性",在遇到小运动时,又灵活采用小模板搜索,实现了"聚焦性",具有很高的搜索效率. 如在距中心点半径为 1处,DADS算法仅需搜索 9个点,而 TSS (Three-Step Search)算法需要检测 25个点、4SS 算法需要检测 17个点、DS算法需要检测 13个点. 通过理论计算,可得出在距中心点半径为 ±2 区域内 DADS算法和 DS算法所需要的最小搜索点数,如图 6a、图 6b所示. 可以看出 DADS算法的搜索点数比 DS算法少 4～9个,水平和垂直方向上节省的点数比其它方向上的多而且随距离的增加而增加,体现了算法的搜索方向性.




a DADS算法的最小搜索点数 b DS算法的最小搜索点数

图 6 搜索点数统计(距中心点半径为 ±2区域内)

图 7为一个用 DADS算法和 DS算法搜索运动矢量 (3, 2)的例子. 从图 7a可以看出 DADS算法搜索用了 5步,共搜索了 16个点;图 7b为用 DS算法搜索该运动矢量的可能路径,搜索用了 4步,共搜索了 21个点. 可以看出,DADS算法虽然步数比 DS算法多一步,但搜索点数比 DS算法减




a DADS算法的搜索过程 b DS算法的搜索过程

图 7 运动矢量 (3, 2)的搜索过程

少了 5个,具有很高的搜索效率.

## 3　实验结果与分析

为了验证算法性能,本文选取 5种有代表性的块匹配算法 FS, 4SS, DS, ARPS, MVFAST, 与 DADS算法进行对比实验. 实验基于 H. 264/AVC架构自行编码完成,主要验证运动估计算法性能,不涉及变换量化等其它部分. 实验选用的宏块大小为 16 ×16像素,搜索窗为 +16像素,匹配准则为 SAD,选用了 6个有代表性的 CIF标准测试序列,即小运动序列 silent, m & d,中等运动序列 foreman, bus,和大运动序列 stefan, football 实验通过对这 6个序列前 100帧进行测试,得出算法的平均搜索点数 (ASP, Average Search Point)及重构帧的峰值信噪比 (PSNR, Peak Signal-to-Noise Ratio). ASP反映了算法的运算复杂度, PSNR值反映了算法的精度.

表 1列出了各运动估计算法的 ASP和 PSNR. 可以看出 FS算法搜索精度最高,但平均搜索点数最大;在各运动估计算法中, DADS算法平均搜索点数最少,其搜索速度比 FS, 4SS, DS, ARPS, MVFAST分别提高了 99. 5%, 75. 2%, 73. 1%, 25. 5%和 19. 5%,而且 DADS算法搜索精度与 FS算法最接近,其 PSNR值仅比 FS损失了 0. 39 dB,比 4SS, DS, ARPS, MVFAST分别提高了 0. 88 dB, 0. 89 dB, 0. 28 dB, 0. 2 dB,具有很高的搜索精度.

**表 1　各运动估计算法的 ASP和 PSNR**

| 测试序列 | | FS | 4SS | DS | ARPS | MVFAST | DADS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| silent | ASP | 1089 | 16. 61 | 13. 36 | 2. 99 | 2. 95 | 2. 55 |
| | PSNR | 36. 37 | 35. 86 | 35. 78 | 35. 8 | 35. 89 | 35. 94 |
| m & d | ASP | 1089 | 16. 88 | 13. 59 | 2. 49 | 2. 56 | 2. 11 |
| | PSNR | 40. 12 | 39. 93 | 39. 94 | 39. 9 | 39. 95 | 39. 98 |
| foreman | ASP | 1089 | 18. 75 | 16. 33 | 7. 28 | 8. 25 | 5. 04 |
| | PSNR | 33. 43 | 32. 92 | 33. 09 | 32. 94 | 33. 04 | 33. 07 |
| bus | ASP | 1089 | 21. 57 | 20. 48 | 9. 32 | 7. 41 | 5. 82 |
| | PSNR | 24. 9 | 21. 78 | 21. 77 | 23. 57 | 23. 73 | 24. 53 |
| stefan | ASP | 1089 | 19. 6 | 17. 82 | 7. 06 | 6. 10 | 5. 01 |
| | PSNR | 25. 75 | 23. 89 | 23. 84 | 25. 32 | 25. 36 | 25. 51 |
| football | ASP | 1089 | 26. 95 | 28. 34 | 15. 14 | 12. 13 | 11. 21 |
| | PSNR | 25. 42 | 24 | 23. 89 | 24. 46 | 24. 5 | 24. 65 |

图 8、图 9分别为 foreman序列前 100帧各搜索算法 ASP和 PSNR值的曲线图,从图中可以直观地看出 DADS算法具有最小的算法复杂度和较高的搜索精度.

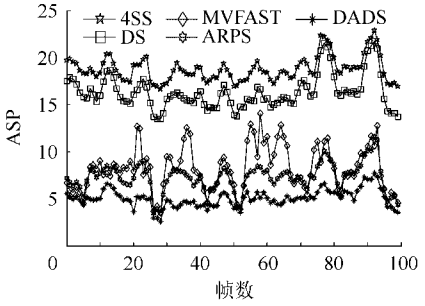



图 8　foreman序列 ASP曲线图

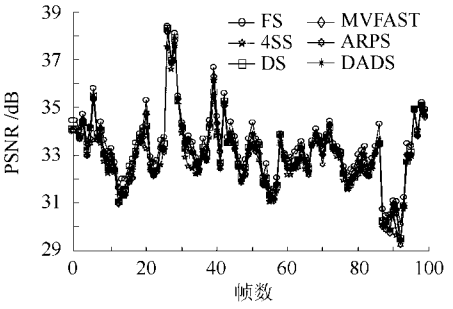



图 9　foreman序列 PSNR曲线图

## 4　结 束 语

本文基于运动矢量的分布特性,提出一种方向自适应菱形搜索算法. 该算法采用了起始点预测策略、搜索中止策略和方向自适应菱形搜索策略,在保证搜索精度的同时大幅度提高算法的搜索速度. 实验证明, DADS算法在搜索速度和精度方面均超过了以往的经典快速运动估计算法,如 DS, MVFAST等,具有很高的搜索效率. 下一步将系统研究模式选择算法,将其与 DADS运动搜索算法相结合,进一步提高运动估计算法的性能.

### 参考文献 (References)

[1] Zhu S, Ma K K. A new diamond search algorithm for fast block-matching motion estimation[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9(2): 287 - 290

[2] Zhu C, Lin X, Chau L P. Hexagon-based search pattern for fast block motion estimation[J]. IEEE Trans Circuits Systems for Video Technology, 2002, 12(5): 349 - 355

[3] Cheung C H, Po L M. Novel cross-diamond-hexagonal search algorithms for fast block motion estimation[J]. IEEE Trans Multimedia, 2005, 7(1): 16 - 22

[4] Hosur P I, Ma K K. Motion vector field adaptive fast motion estimation[C]// International Conf Information, Communication and Signal Processing '99. Singapore City: [s. n.], 1999: 7 - 10

[5] Nie Y, Ma K K. Adaptive rood pattern search for fast block-matching motion estimation[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2002, 11(12): 1442 - 1449

(责任编辑:娄　嘉)