

一种快速高效的部分失真块运动估计搜索算法

李子印 朱善安

(浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

摘要 在保证图像质量与全搜索算法(FS)相近的前提下,为降低现有部分失真块运动估计算法的计算量,提出了一种快速高效的搜索算法——基于运动场预测的部分失真块运动估计搜索算法(PMVPDS)。PMVPDS将本文提出的可调部分失真准则和运动场估计技术、中途停止技术相结合,能快速找到匹配点。仿真结果表明PMVPDS和正规化部分失真搜索算法(NPDS)、分级部分失真搜索算法(PPDS)相比,搜索速度分别加快了2~7倍和0.6~3倍,并且图像质量也有一定的提高。另外,PMVPDS算法中的图像质量和搜索速度是可调的。

关键词 视频压缩 运动估计 块匹配 搜索算法

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)04-0480-06

A Fast Efficient Partial Distortion Search Algorithm for Block Motion Estimation

LI Zi-yin, ZHU Shan-an

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Under the prerequisite of assuring image quality close to full search algorithm (FS), a fast efficient search algorithm—partial distortion search algorithm for block motion estimation based on predictive motion vector field (PMVPDS) is proposed in order to reduce the computational complexity of existent partial distortion algorithms. PMVPDS takes advantages of the adjustable partial distortion criterion (APDC) proposed in this paper, predictive motion vector field technique and half-stop technique to find suited points quickly. Simulation results demonstrate that PMVPDS provides about 2~7 and 0.6~3 times speedup respectively, and achieves better PSNR performance compared to the normalized partial distortion search algorithm (NPDS) and the progressive partial distortion search algorithm (PPDS). Moreover, the image quality and search speed of proposed PMVPDS algorithm are adjustable.

Keywords video compression, motion estimation, block-matching, search algorithm

1 引言

运动估计是视频压缩中的关键技术。块匹配算法(BMA)因具有简单、实用的特点而得到广泛应用。在BMA中,全搜索法(FS)精度最高,但是巨大的计算量使其不宜实时应用。因此,提出了很多快速块搜索算法,如新三步法(NTSS)^[1]、四步法(FSS)^[2]、梯度下降法(BBGDS)^[3]、基于菱形的搜索算法(DS)^[4]、准菱形搜索算法(PDS)^[5]和快速分

类搜索算法^[6]等。这些算法通过限制搜索点数来降低计算量,明显加快了搜索速度,可以满足实时应用的要求,但图像质量大多有较大的下降。所以这些算法往往不能满足对图像质量有较高要求的应用场所。最近出现的一些部分失真算法不限制搜索点数,例如正规化部分失真搜索算法(NPDS)^[7]和分级部分失真搜索算法(PPDS)^[8]。这些算法在保证高图像质量的同时,计算量也得到了一定的降低,但是依然存在计算量较大的缺点。

针对上述问题,本文提出了基于运动场预测的

收稿日期:2005-03-21; 改回日期:2005-06-13

第一作者简介:李子印(1978~),男。现为浙江大学电气学院控制理论与控制工程专业博士研究生。主要研究方向为图像压缩和视频信号处理与通信。E-mail: liziyin@sohu.com

部分失真块运动估计搜索算法 (PMVPDS)。与现有的部分失真算法相比较,该算法搜索速度明显加快,计算量大幅降低,图像质量也有一定的提高,而且算法的图像质量和搜索速度是可调的。

2 PMVPDS 算法

2.1 可调的部分失真准则 (APDC)

在 BMA 中,运动估计通常使用块的全部像素来计算失真度,这大大增加了计算量。实际上,只使用其中的一部分像素就可以对失真度有较好的度量。

当块的大小为 16×16 时,第 n 帧左上角坐标为 (k, l) 的块与第 $n-1$ 帧左上角坐标为 $(k+u, l+v)$ 的块间的绝对偏差和 (SAD) 由下式给出:

$$SAD(k, l; u, v) = \sum_{i=0}^{15} \sum_{j=0}^{15} |I_n(k+i, l+j) - I_{n-1}(k+i+u, l+j+v)| \quad (1)$$

在 NPDS 算法中,为了降低计算复杂度,将 $SAD(k, l; u, v)$ 分成 16 个部分失真度量 $sad_p(k, l; u, v)$ ($p=1, 2, \dots, 16$)。第 p 个部分失真度量定义如下:

$$sad_p(k, l; u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 |I_n(k+4i+s_p, l+4j+t_p) - I_{n-1}(k+4i+s_p+u, l+4j+t_p+v)| \quad (2)$$

其中, s_p 和 t_p 分别为第 p 个部分失真度量所用左上角像素的坐标相对于块左上角坐标的水平和垂直偏移。第 p 次的累加部分失真定义为

$$SAD_p(k, l; u, v) = \sum_{i=1}^p sad_i(k, l; u, v) = SAD_{p-1}(k, l; u, v) + sad_p(k, l; u, v) \quad (3)$$

设当前已找到的最小失真为 D_{min} ,从 $p=1$ 开始, NPDS 算法判断不等式:

$$16 \times SAD_p(k, l; u, v) > p \times D_{min} \quad (4)$$

是否成立,如果式(4)成立,则认为当前搜索点不是匹配点;否则,继续计算 $SAD_{p+1}(k, l; u, v)$ 。

对失真度进行度量时,使用的像素点太少,往往不能正确表征块的失真度,造成误判,易引起图像质量的较大下降。NPDS 算法中的部分失真准则从 $p=1$ 开始进行判断,就存在这样的问题;另外,在很多应用中,要求运动估计算法能对图像质量和搜索速度进行调节,而现有部分失真算法不能满足这样的要求。

本文在 NPDS 的基础上提出了可调的部分失真

准则 (APDC)。通过对大量测试序列进行试验,发现当 $p \geq 3$ 时,误判的概率小于 5%。所以 APDC 从 $p=3$ 时开始判断,这样可以避免图像质量的明显下降。另外, APDC 准则可以调节图像质量和搜索速度。让函数 $c(p, q)$ 代替不等式(4)中的参数 p ,作为控制图像质量和搜索速度之间矛盾的调节函数。函数 $c(p, q)$ 定义为

$$c(p, q) = (1-q)p + qN \quad 0 \leq q \leq 1 \quad (5)$$

N 为块的大小,这里 $N=16$ 。这样,得到不等式

$$16 \times D_p(k, l; u, v) > [(1-q)p + qN] \times D_{min} \quad 0 \leq q \leq 1 \quad (6)$$

当 $q=0$ 时, $c(p, q) = p$, APDC 的搜索速度最快;当 q 值增大时,搜索速度下降,而图像质量得到提高;当 $q=1$ 时, $c(p, q) = N$, APDC 提供最优的部分失真算法性能。

APDC 的算法流程如图 1 所示,首先计算 $SAD_3(k, l; u, v)$;然后判断不等式(6)是否成立,如果成立,则认为该点不是匹配点;否则,计算累加部分失真 $SAD_{p+1}(k, l; u, v)$,继续判断。如果判断结束(即 $p=16$)时,式(6)仍然不成立,则当前搜索点为新的最小失真点。

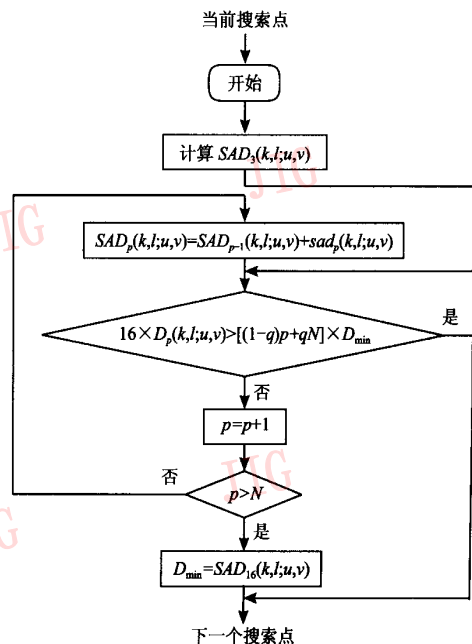


图 1 APDC 的算法流程

Fig. 1 Flow chart of APDC

APDC 不但可以把非匹配点尽早排除,降低了计算量,而且可用于调节图像质量和搜索速度,同时避免了现存部分失真准则容易造成图像质量下降的

缺点。

2.2 运动场估计技术和中途停止技术

图像的全局运动造成不同块之间运动的空间相关性,运动在时间上的连续性使得相邻帧之间具有相似性,即运动的时间相关性。文献[9]等就利用了运动矢量的这一特性。这意味着可以利用时间和空间上相邻块的运动矢量来预测当前块的运动,这称为运动场估计技术。运动场估计技术可以使运动估计算法尽快找到匹配点,明显降低计算量,提高搜索速度。

现有的部分失真算法没有利用运动矢量的这一特点。PMVPDS 利用该技术,进一步降低了运动估计算法的计算量。

PMVPDS 以当前块 3 个空间相邻块的运动矢量(左方 $MV1$ 、上方 $MV2$ 和右上方 $MV3$)、前一帧对应块的运动矢量 $MV4$ 和 $MV5(0,0)$ 共 5 个运动矢量作为候选预测器。预测运动矢量 P 用中值法求出:

$$P_x = \text{Median}(MV1_x, MV2_x, MV3_x) \quad (7)$$

$$P_y = \text{Median}(MV1_y, MV2_y, MV3_y)$$

大量测试序列实验结果如表 1 所示,可以看出运动矢量通常也总是高度集中在预测运动矢量 P 附近,这称为中值偏移性;另外运动矢量与候选预测器也有较大的相关性。

表 1 运动矢量的中值偏移性

Tab.1 Median-biased characteristic of motion vectors

测试序列 (CIF 格式)	运动矢量等于 P 的 块比例 (%)	运动矢量等于 P 或候选 预测器的块比例 (%)
Container	99.6	99.8
Hall Monitor	97.8	98.5
Akiyo	99.1	99.4
M & D	91.3	94.6
News	93.5	95.9
Silence	87.6	93.3
Coastguard	83.1	89.6
Foreman	67.3	78.4
Tennis	72.7	89.8

基于以上的实验和分析,PMVPDS 在运动场估计技术的基础上,结合中途停止技术加快搜索速度。该技术具体体现为以下几点:

(1)一步停止准则 如果预测运动矢量 P 所对应点的 SAD 值小于阈值 T_A ,则认为该点为匹配点,停止搜索。

(2)两步停止准则 如果一步停止准则不成立,则再搜索几个候选预测器,找出其中块失真最小的点(MBD 点)。如果该点的 SAD 值小于阈值 T_B ,则认为该点为匹配点,停止搜索。

(3)多步停止准则 如果一步和两步停止准则都不成立,则进行螺旋形路径搜索。在其过程中,如果当前搜索点的 SAD 值小于阈值 T_B ,则认为该点为匹配点,停止搜索。

2.3 PMVPDS 算法步骤

PMVPDS 算法可以描述如下:

(1)利用 3 个空间相邻块,用中值法求出当前块的预测运动矢量 P 。如果 P 对应点的 SAD 值小于阈值 T_A ,则该点为匹配点,停止搜索;否则,转到下一步。

(2)搜索候选预测器对应的 5 个点,找到其中的 MBD 点。如果该点对应的 SAD 值小于 T_B ,则该点为匹配点,停止搜索;否则,转到下一步。

(3)沿着螺旋形搜索路径继续搜索,直到当前搜索点的 SAD 值小于 T_B ,该点即为匹配点。如果不能找到这样的点,则搜索完整个搜索窗后找到的 MBD 点即为匹配点。

当搜索区域为 ± 7 时,PMVPDS 的搜索过程如图 2 所示。

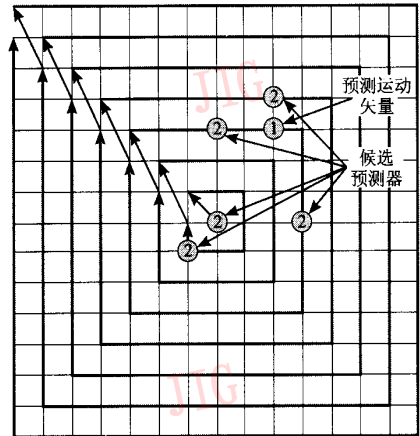


图 2 PMVPDS 的搜索过程

Fig.2 Search process of PMVPDS algorithm

阈值 T_A 根据相邻块自适应调整,可以是相邻块的失真度和运动矢量的线性或非线性函数。设 $MSAD_1, \dots, MSAD_4$ 分别为当前块的 3 个相邻块和前一帧对应块的失真。 T_A 定义为

$$T_A = F(MSAD_1, \dots, MSAD_4, MV1, \dots, MV4) \quad (8)$$

为了计算简单,令 T_A 取 $MSAD_1, \dots, MSAD_4$ 中的最小值:

$$T_A = \min(MSAD_1, \dots, MSAD_4) \quad (9)$$

T_A 的取值范围为 $[512, 1024]$ 。根据对大量测试序列的实验,阈值 T_B 取为

$$T_B = T_A + 256 \quad (10)$$

计算块失真时采用文中提出的可调部分失真准则。

3 实验结果

为了比较 PMVPDS 和其他算法的效果,在相同

条件下,对 FS、NPDS、PPDS 和 PMVPDS 进行了实验。实验使用改进的 XVID-1.1.0 编码器,运动估计搜索区域为 ± 7 ,第 1 帧设置为 I 帧,其他为 P 帧,码率设置为 512Kbit/s。

大量测试序列仿真结果表明,PMVPDS 算法的搜索速度明显加快,计算量大幅降低,图像质量和现有的部分失真算法相比也有一定的提高。

为了具有代表意义,以典型的少空间细节且运动缓慢的 Hall Monitor 测试序列(CIF 格式)、中等空间细节且运动缓慢的 Silent Voice 测试序列(CIF 格式)和多空间细节且运动剧烈的 Table Tennis 测试序列(SIF 格式)为例,其实验结果如表 2 所示。

表 2 FS、NPDS、PPDS 和 PMVPDS 的平均计算量和信噪比性能比较

Tab.2 Computational Complexity and Average PSNR of FS, NPDS, PPDS and PMVPDS

测试序列(格式)	算法	取绝对值	加/减	比较/移位	总计	比 FS 加速(倍)	平均信噪比(dB)
Hall Monitor (CIF)	FS	52 870	105 534	206	158 610	1.00	36.63
	NPDS	5 085	10 171	540	15 796	9.04	35.88
	PPDS	2 239	4 477	585	7 301	20.72	35.70
	PMVPDS	685	1 370	108	2 163	72.33	36.34
Silent Voice (CIF)	FS	52 870	105 534	206	158 610	1.00	35.35
	NPDS	4 308	8 616	492	13 416	10.82	34.72
	PPDS	1 633	3 266	526	5 425	28.24	34.53
	PMVPDS	1 069	2 137	175	3 381	45.91	35.15
Table Tennis (SIF)	FS	52 870	105 534	206	158 610	1.00	29.74
	NPDS	4 234	8 293	510	13 037	11.17	28.65
	PPDS	2 614	5 050	524	8 188	18.37	28.55
	PMVPDS	1 258	2 517	190	3 965	39.00	29.46

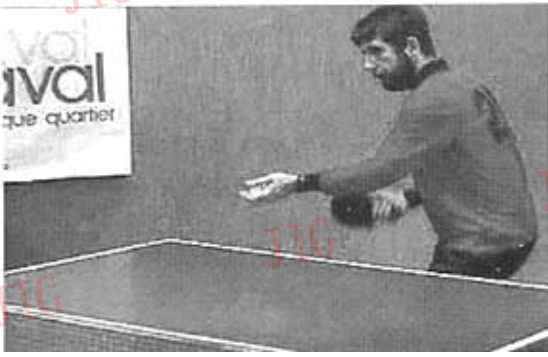
从表 2 可以看出,PMVPDS 和现有的部分失真算法相比,计算量大幅度降低,搜索速度明显加快。对于 Hall Monitor 测试序列,PMVPDS 和 FS、NPDS、PPDS 相比,搜索速度分别提高了 72.33 倍、6.30 倍和 2.38 倍;对于 Silent Voice 测试序列,分别提高了 45.91 倍、2.97 倍和 0.60 倍;对于 Table Tennis 测试序列,则分别提高了 39.00 倍、2.29 倍和 1.07 倍。并且对于运动越缓慢的序列,PMVPDS 的搜索速度优势越明显。

PMVPDS 的搜索速度明显提高,同时图像的主观质量比现有部分失真算法也有较大提高,能保持和 FS 相近的图像质量。从图 3 ~ 图 5 可以看出,图像的主观质量有所提高。从表 2 和图 6 ~ 8 可以看出,PMVPDS 的 PSNR 值比 FS 只降低了大约 0.2 ~ 0.3dB,比 NPDS 提高大约 0.4 ~ 0.8dB,比

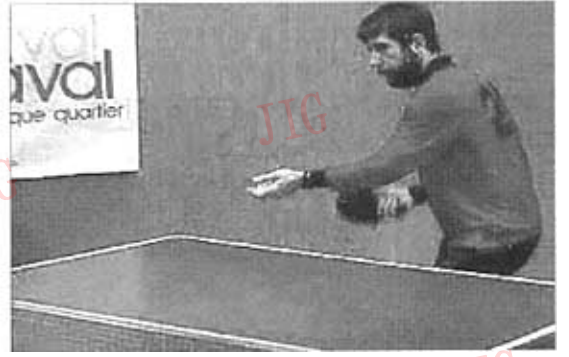
PPDS 提高大约 0.5 ~ 0.9dB。

4 结 论

PMVPDS 将运动场预测技术、中途停止技术和螺旋形搜索路径相结合,明显降低了计算量,加快了搜索速度。运动估计准则采用文中提出的可调部分失真准则,进一步降低了计算量,同时避免了图像质量的较大下降。PMVPDS 算法较好地解决了现有部分失真算法存在的计算量较大和图像质量下降问题。仿真结果表明,该算法可广泛应用于各种视频序列,对于运动较慢的视频有更突出的效果。算法不足之处在于可调部分失真准则中的调节参数 q 需要凭经验设定,没有提出自适应调整的方法。



(a) PMVPDS 算法



(b) NPDS 算法

图 3 Table Tennis 第 60 帧的重建图像

Fig. 3 Frame 60 reconstructed image of Table Tennis sequence



(a) PMVPDS 算法



(b) NPDS 算法

图 4 Hall Monitor 第 100 帧的重建图像

Fig. 4 Frame 100 reconstructed image of Hall Monitor sequence



(a) PMVPDS 算法



(b) NPDS 算法

图 5 Silent Voice 第 100 帧的重建图像

Fig. 5 Frame 100 reconstructed image of Silent Voice sequence

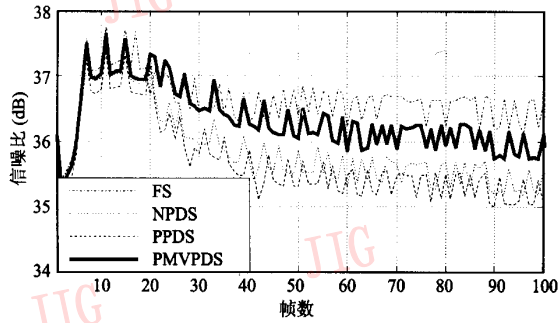


图 6 测试序列为 Hall Monitor 时 FS、NPDS、PPDS 和 PMVPDS 的 PSNR 对比

Fig. 6 Frame-based PSNR performance of FS, NPDS, PPDS and PMVPDS in Hall Monitor

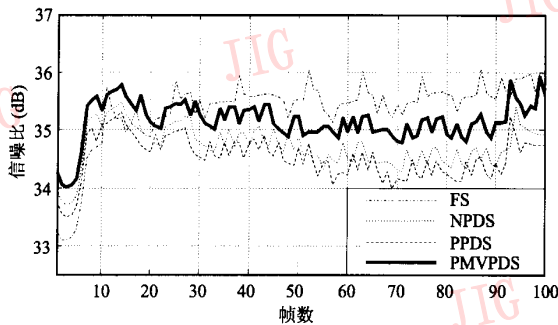


图 7 测试序列为 Silent Voice 时 FS、NPDS、PPDS 和 PMVPDS 的 PSNR 对比

Fig. 7 Frame-based PSNR performance of FS, NPDS, PPDS and PMVPDS in Silent Voice

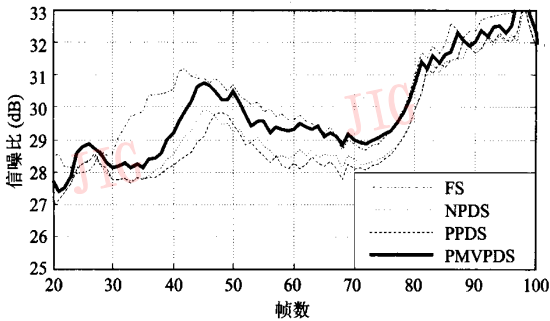


图 8 测试序列为 Table Tennis 时 FS、NPDS、PPDS 和 PMVPDS 的 PSNR 对比

Fig. 8 Frame-based PSNR performance of FS, NPDS, PPDS and PMVPDS in Table Tennis

参考文献 (References)

- 1 Li Ren-xiang, Zeng Bing, Liou Ming L. A new three-step search algorithm for block motion estimation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1994, 4(4):438 ~ 442.
- 2 Po Lai-man, Ma Wing-chung. A Novel Four-step search algorithm for fast block motion estimation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3):313 ~ 317.
- 3 Liu Lurng-Kuo, Feig Ephraim. A block-based gradient descent search algorithm for block motion estimation in video coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(4):419 ~ 423.
- 4 Zhu Shan, Ma Kai-kuang. A new diamond search algorithm for fast block matching motion estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(2):287 ~ 290.
- 5 Gong Tao, Ding Run-tao. A modified motion estimation algorithm—pseudo-diamond search method [J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(11): 1181 ~ 1186. [龚涛, 丁润涛. 一种改进的有效运动估计方法——准菱形搜索法 [J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(11): 1181 ~ 1186.]
- 6 Chu Xiu-qin, Li Yu-shan. A fast classified search algorithm for motion estimation [J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(10): 1067 ~ 1070. [初秀琴, 李玉山. 一种快速分类搜索运动估计新方法 [J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(10): 1067 ~ 1070.]
- 7 Cheung Chok-Kwan, Po Lai-Man. Normalized partial distortion search algorithm for block motion estimation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2000, 10(3): 417 ~ 422.
- 8 Cheung Chun-Ho, Po Lai-Man. A fast block motion estimation using progressive partial distortion search [A]. In: Proceedings of 2001 International Symposium on Intelligent Multimedia, Video and Speech Processing [C], Hong Kong, China, 2001: 506 ~ 509.
- 9 Li Xiang, Wu Guo-wei. A fast motion estimation algorithm based on adaptive search range for H.264 [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(4): 471 ~ 476. [李翔, 吴国威. 一种适用于 H.264 的基于自适应搜索范围的快速运动估计算法 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(4): 471 ~ 476.]