

一种快速半像素运动矢量搜索算法

董海燕 张其善

(北京航空航天大学电子信息工程学院信息与通信工程系, 北京 100083)

摘要 由于快速整像素搜索算法的提出和采纳, 致使半像素搜索过程在整个编码过程中占用的比重更为显著。为了减小半像素搜索的计算量, 提出了一种快速半像素运动矢量搜索算法。该算法是利用半像素搜索窗内的误差匹配曲面具有的单峰特性, 通过比较整像素运动矢量周围4个整像素点的绝对误差和(SAD)来实现可能的最小匹配误差半像素点的预测, 以排除大量不必要的计算量。实验结果表明, 该算法对于各种不同运动程度和空间细节的视频序列, 在保证和半像素全搜索法有相同图像质量的同时, 至少可节省66%的计算量。

关键词 视频压缩 视频编码 运动估计 块匹配 半像素搜索

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2005)07-0884-04

A Fast Half-pixel Motion Vector Search Algorithm

DONG Hai-yan, ZHANG Qi-shan

(Department Information and Communication Engineering, School of Electronic and Information Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract Half-pixel motion search is growing in importance for the whole coding process due to the adoption of fast integer pixel search algorithms. A minimal matching error direction prediction-based fast half-pixel motion vector search algorithm is proposed in this paper to reduce computation load of half-pixel search. Based on the single peak characteristic of half-pixel error matching function inside search area, the minimum matching distortion direction is predicted and possible half-pixel candidate positions with minimum matching distortion are selected based on SAD values comparison results of four integer-pixel points around integer-pixel motion vector. The experimental results reveal that, to all kinds of video sequences, the proposed algorithm can obtain almost the same video quality as that of the half-pixel full search algorithm while reducing at least 66% computation cost.

Keywords video compression, video coding, motion estimation, block matching, half-pixel search

1 引言

运动估计不仅是视频编码系统的关键部分, 同时也是整个视频编码器中计算量最大、耗费时间最多的部分^[1], 而且运动估计性能的优劣直接影响到整个视频编码器的运行效率和整个视频序列的重构质量。

由于自然物体运动的连续性, 相邻两帧之间物体的运动矢量不是以整像素为基本单位, 典型的运

动估计主要包括整像素运动估计和半像素运动估计两个部分。目前的快速搜索算法主要集中在整像素运动矢量搜索上, 而半像素运动矢量搜索一般采用全搜索方法, 即从整像素周围的8个半像素插值点以及整像素运动矢量点中找出其中最小块匹配误差点作为半像素精度的运动矢量。由于采用了快速整像素搜索算法, 因此每个块的整像素搜索可以减小到10个点以下^[2,3], 而每个块的半像素全搜索算法(half-pixel full search, HPFS)则包括8个半像素点的插值运算和9个点的块失真匹配运算。在整个运

基金项目: 国家自然科学基金项目(60372018)

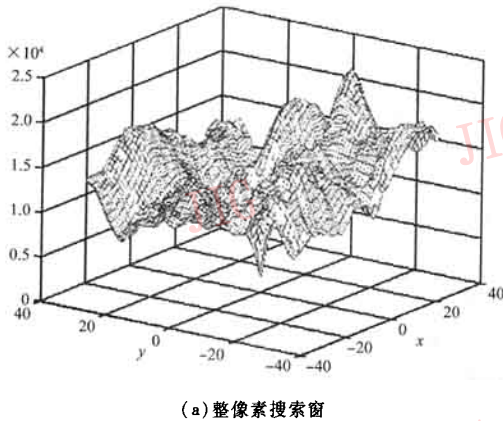
收稿日期: 2004-09-16; 改回日期: 2005-01-11

第一作者简介: 董海燕(1977~), 女, 2004年获北京理工大学光学工程博士学位, 现为北京航空航天大学电子信息工程学院博士后。主要研究方向为视频编码和传输, 多媒体系统和图像处理。E-mail: d_haiyan@163.com

动估计中,随着快速整像素运动搜索算法的使用,半像素搜索运算量所占的比例不断突显。因此,为了减小半像素搜索的计算量,研究快速半像素搜索算法有着非常重要的实用价值。

2 半像素搜索窗误差匹配曲面特性

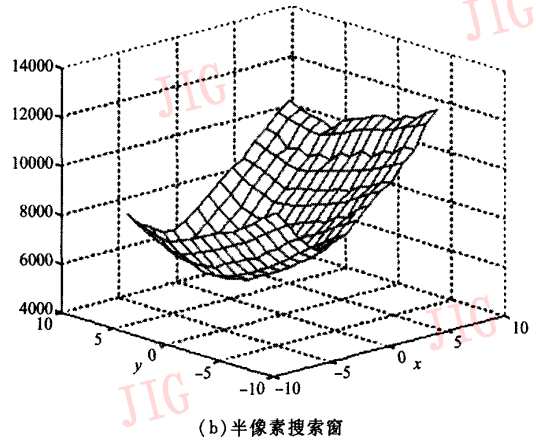
图 1 显示了 Foreman 测试序列的第 25 帧在不



(a) 整像素搜索窗

同搜索窗内(整像素搜索窗和半像素搜索窗)的误差匹配曲面特性。

由于搜索窗内细节特性的差异、物体运动的剧烈程度和不规则性,致使整像素搜索窗内的误差匹配曲面呈现出不规则多峰曲面的特点^[4](如图 1(a)所示),因此,基于误差匹配单峰曲面假设的算法常会因落入局部最小点而造成率失真性能的急剧下降,最终导致不适于整像素搜索策略^[5]。



(b) 半像素搜索窗

图 1 不同搜索窗内的误差匹配曲面特性

Fig. 1 Distortion matching surfaces for different search window

若用于运动估计的块大小为 $W \times H$, 搜索范围为 d , 那么, 由于半像素运动估计是在前面获得的整像素运动矢量周围通过线性内插得到的 8 个半像素候选点之间进行, 因此整个半像素搜索面积为 1, 而整像素搜索面积则为 $(W + 2d)(H + 2d)$, 是前者的 $(W + 2d)(H + 2d)$ 倍。同时, 相对于整像素搜索窗内误差匹配曲面不规则的特点, 相邻整像素数据内插获得的半像素数据由于具有很强的相关性, 因此, 不同于整像素搜索窗, 半像素搜索窗内的误差匹配曲面普遍地具有单峰曲面的特性(如图 1(b)所示)。

本文采用绝对误差和(sum of absolute difference, SAD)作为块失真匹配函数, 对多个不同视频内容的测试序列的半像素搜索区域误差匹配函数进行了统计。本文利用半像素全搜索法, 在整像素搜索结果的 ± 1 邻域内进行搜索, 如果在各个方向(水平、垂直以及两个对角线方向)上, 匹配误差都随着与亚像素搜索区域最小点距离的增加而增大, 就认为这个半像素搜索区域的匹配函数曲面呈单峰曲面。由表 1 可见, 平均 90% 的各测试序列半像素搜索块具有这种单峰曲面特性。该单峰曲面特性为本文快速半像素搜索算法的提出提供了客观依据。

表 1 具有单峰特征的半像素搜索区域

Tab. 1 The half pixel search area with single peak feature

测试序列	总块数	具有单峰特征的块数	比率(%)
Akiyo	150 246	147 917	98.45
Mother&Daughter	147 825	143 198	96.87
Coastguard	129 842	120 441	92.76
Foreman	136 546	119 272	87.35
Stefan	136 858	111 799	81.69
Mobile Calendar	145 613	115 645	79.42

3 快速半像素运动矢量搜索算法

如图 2 所示, 标记点 0 为参考帧中整像素运动搜索到的运动矢量指向的位置, 标记点 H_1, H_2, V_1, V_2 分别为以标记点 0 为中心水平向和垂直向的 4 个整像素点, 标记点 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 分别为整像素运动矢量周围的 8 个半像素点。从运算复杂度和便于硬件实现等方向考虑, 本文采用 SAD 作为块失真匹配函数。

在整像素搜索过程中, 由于整像素运动矢量周围的 4 个整像素点 H_1, H_2, V_1, V_2 的 SAD 值都已经

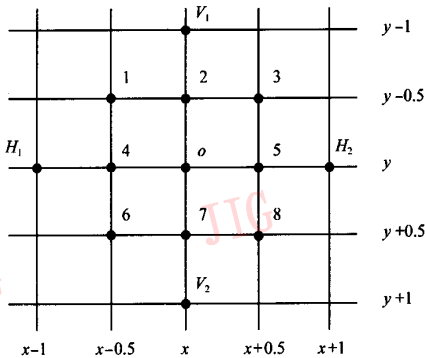


图 2 整像素和半像素的位置

Fig. 2 The positions of integer-pixels and half-pixels

得到,而且半像素搜索窗内的误差匹配曲面具有单峰曲面的特性,从而可以方便利用已知的这 4 个整像素点的 SAD 值来预测可能的最小匹配误差半像素点。

本文提出的快速半像素运动矢量搜索 (fast half-pixel motion vector search, FHPMVS) 算法的具体思想为:分别比较水平方向两个整像素点 H_1 和 H_2 、垂直方向两个整像素点 V_1 和 V_2 的绝对误差和值 SAD,首先得到两个方向的 SAD 值较小点;然后比较这两个较小点,以得到 SAD 值最小的点;接着根据这个 SAD 值最小的点来预测可能的半像素候选点;最后根据预测结果只搜索 SAD 值较小方向的候选点,并排除不可能的半像素候选点,以减小计算复杂度。例如,当 $SAD(H_1) = \min\{SAD(H_2), SAD(H_1)\}$ 且 $SAD(V_1) = \min\{SAD(V_1), SAD(V_2)\}$ 时,则得到的可能的具有最小 SAD 值的半像素点集为 $I = \{1, 2, 4\}$;接着继续比较 $SAD(H_1)$ 和 $SAD(V_1)$,若 $SAD(H_1) = \min\{SAD(H_1), SAD(V_1)\}$,则具有最小 SAD 值的可能的半像素点集变为 $I = \{1, 4\}$ 。依此类推,即可得到不同条件下可能的半像素搜索点(如表 2 所示)。

从表 2 可以看出,需要搜索的半像素点数从原来的 8 个点减少到 2 个。由于 FHPMVS 算法无需进行整个图像的半像素插值运算,而只进行这两个半像素点的插值运算,因此,每个块可节省 6 个半像素搜索点的失真函数运算量和插值运算量,这就大大减小了运算量,并大幅度提高了半像素搜索的速度。

但是,当整像素矢量周围的这 4 个整像素点 H_1, H_2, V_1, V_2 不全存在时,即整像素运动矢量指向的位置正好位于参考帧图像的 4 个边缘时,则

表 2 经过预测保留下来的半像素搜索点

Tab. 2 Half-pixel points needing search

条 件	可能的候选点
$SAD(H_1) \leq SAD(H_2)$ 且 $SAD(V_1) \leq SAD(V_2)$ 且 $SAD(H_1) \leq SAD(V_1)$	1, 4
$SAD(H_1) \leq SAD(H_2)$ 且 $SAD(V_1) \leq SAD(V_2)$ 且 $SAD(V_1) \leq SAD(H_1)$	1, 2
$SAD(H_2) \leq SAD(H_1)$ 且 $SAD(V_1) \leq SAD(V_1)$ 且 $SAD(V_1) \leq SAD(H_2)$	2, 3
$SAD(H_2) \leq SAD(H_1)$ 且 $SAD(V_1) \leq SAD(V_1)$ 且 $SAD(H_2) \leq SAD(V_1)$	3, 5
$SAD(H_2) \leq SAD(H_1)$ 且 $SAD(V_2) \leq SAD(V_1)$ 且 $SAD(H_2) \leq SAD(V_2)$	5, 8
$SAD(H_2) \leq SAD(H_1)$ 且 $SAD(V_2) \leq SAD(V_1)$ 且 $SAD(V_2) \leq SAD(H_2)$	7, 8
$SAD(H_1) \leq SAD(H_2)$ 且 $SAD(V_2) \leq SAD(V_1)$ 且 $SAD(H_1) \leq SAD(V_2)$	4, 6
$SAD(H_1) \leq SAD(H_2)$ 且 $SAD(V_2) \leq SAD(V_1)$ 且 $SAD(V_2) \leq SAD(H_1)$	6, 7

FHPMVS 算法使用半像素全搜索法。由于这种情况出现的概率很小,所以对整体运动估计速度的提高影响不大。

4 实验结果和分析

为测试 FHPMVS 算法的性能,本文采用 6 个 MPEG-4 标准测试序列进行了测试实验,其中, Akiyo 和 Mother&Daughter 序列属于空间细节不丰富、运动变化小的视频序列; Coastguard 和 Foreman 序列属于空间细节比较丰富、运动变化小或空间细节不丰富、运动量中等的视频序列; Stefan 和 Mobile Calendar 序列属于空间细节很丰富、运动变化中等或空间细节比较丰富、运动变化大的视频序列。实验参数设置如下: CIF (352 × 288) 分辨率, 编码码率为 384Kbit/s, 帧率为 30f/s。

为了评价算法性能,本文采用的评价指标为峰值信噪比 (peak signal noise ratio, PSNR)、编码字节数、搜索点数和节省的运算量。由于除数为 2 的除法可以用移位来实现,因此内插运算中的除法和加法的运算速度相同。设运动搜索的块大小为 $W \times H$, 则水平、垂直方向的半像素搜索点和对角线方向的半像素搜索点的运算次数分别为 $5 \times W \times H - 1$, $7 \times W \times H - 1$ 。表 3 为 FHPMVS 算法和半像素全搜索 HPFS 算法的实验数据比较。

表3 采用不同半像素搜索法的实验数据比较
Tab.3 Comparison of FHPMVS algorithm and HPFS algorithm

测试序列	算法	搜索点数	运算次数	节省运算量 (%)	PSNR(dB)	编码字节数 (Bytes)
Akiyo	HPFS	497 357	276 471 099	0.000	40.392	84 571
	FHPMVS	247 782	84 328 507	69.498	40.340	84 161
Mother&Daughter	HPFS	477 318	265 636 016	0.000	36.200	83 138
	FHPMVS	239 589	80 824 457	69.573	36.130	83 789
Coastguard	HPFS	474 669	264 708 767	0.000	29.331	85 855
	FHPMVS	255 252	85 012 560	67.884	29.261	85 461
Foreman	HPFS	471 427	265 850 604	0.000	33.528	82 237
	FHPMVS	286 134	89 123 832	66.476	33.498	81 976
Stefan	HPFS	456 272	254 453 213	0.000	26.832	79 450
	FHPMVS	242 526	80 345 844	68.424	26.743	79 560
Mobile Calendar	HPFS	404 554	223 831 318	0.000	23.765	84 682
	FHPMVS	183 315	64 843 361	71.030	23.770	84 985

用 PSNR 来分析视频质量可以得出:与半像素全搜索法相比,FHPMVS 算法可以提供几乎相同的视频质量,PSNR 仅差 0.09dB。对于某些视频序列,如对 Mobile Calendar 序列,FHPMVS 算法甚至可以提供比半像素全搜索法更高的视频质量。从搜索点数、运算次数节省运算量可以看出:与半像素全搜索算法相比,FHPMVS 算法至少可以节省 66% 的计算量。通过分析编码码流长度可以得出:FHPMVS 算法码流字节数平均增长仅为 0.78%。两种算法比较结果表明:FHPMVS 算法不仅对重建视频质量和编码长度的影响很小,而且在搜索速度上具有明显的优势,很适合实时应用的要求。从表 3 中 6 个 MPEG-4 标准测试序列的测试结果还可以看出,FHPMVS 算法具有很好的鲁棒性,对不同运动程度和空间细节的视频内容均可以获得很好的效果。

5 结 论

快速半像素运动矢量搜索算法是利用半像素搜索窗内的误差匹配曲面单峰曲面的特性,通过比较整像素运动矢量周围 4 个整像素点的 SAD 值来预测可能的最小匹配误差半像素点,以达到大大提高半像素搜索速度的目的。实验结果表明,对于各种

不同运动程度的视频序列,FHPMVS 算法都可以获得和半像素全搜索法几乎相同的图像质量,同时至少节省 66% 的计算量。总之,本文提出的算法在搜索速度和搜索效果两方面更具优势,尤其适用于实时性要求比较高的场合。

参考文献 (References)

- 1 Fukunaga S, Nakaya Y, Son S, *et al.* MPEG-4 video verification model version 14.0 [S]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG99/N2932, Victoria, Australia, Oct. 1999.
- 2 Tourapis Alexis M, Au Oscar C, Liou Ming L. Predictive motion vector field adaptive search technique (PMVFAST): enhancing block-based motion estimation [A]. In: Proceedings of SPIE on Visual Communications and Image Processing [C], San Jose, CA, USA, 2001, 4310: 883 ~ 892.
- 3 LI Bo, LI Wei, TU Yaming. A fast block-matching algorithm using smooth motion vector field adaptation search technique[J]. Journal Computer Science & Technology, 2003, 18(1): 14 ~ 21.
- 4 Du Cheng, He Yun, Zheng Junli. PPHPS: a parabolic prediction-based, fast half-pixel search algorithm for very low bit-rate moving-picture coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(6): 514 ~ 518.
- 5 Zhou Bo, Chen Jian. A fast two-step search algorithm half-pixel motion estimation [A]. In: Proceedings of the 2003 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems [C], Sharjah, United Arab Emirates, 2003, 2: 611 ~ 614.