

## 一种用于块运动估计的匹配准则函数——块特征匹配函数<sup>1</sup>

骆立俊 邹采荣 何振亚

(东南大学无线电工程系 南京 210096)

**摘要** 本文提出了一种新的块运动估计匹配准则函数——块特征匹配 (BFM) 函数, 可以用于视频压缩的一些国际标准, 如 H.261, H.263, MPEG1, MPEG2, HDTV 的编解码器中。在这些视频压缩国际标准中视频系统编码器的复杂性最主要取决于运动估计算法。实时的块匹配运动估计的 VLSI 实现需要考虑以下几个方面: 在给定搜索域内运动搜索的复杂度; 每次块匹配运算的匹配计算复杂度; 每次块匹配运算需要从帧存读取到运动估计处理器的数据量大小; 实时硬件实现的适用性。仿真表明 BFM 算法非常简单有效, 可以大大降低相应的块匹配计算复杂度、匹配运算时数据传输时间。BFM 函数便于并行实现, 从而可以有效地缩短视频编码器的编码时间。本文还详细地给出了 BFM 函数与其它常用匹配准则函数的比较结果。

**关键词** 运动估计, MPEG1, MPEG2, H.261, H.263, HDTV, 匹配准则

**中图分类号** TN941, TN919.8

### 1 引言

视频编码技术在数字电视, 高清晰度电视, 可视电话, 会议电视和多媒体等视频通信服务中起着至关重要的作用。视频序列图象在时间上有很强的相关性, 利用块运动估计和运动补偿技术可以比较有效地去除图象帧间冗余度, 实现高码率压缩比, 所以这种技术已广泛用于视频压缩的一些国际标准, 如 H.261<sup>[1]</sup>, H.263<sup>[2]</sup>, MPEG1<sup>[3]</sup>, MPEG2<sup>[4]</sup>, 和 HDTV<sup>[5]</sup> 中。在这些视频压缩国际标准中, 视频系统编码器的复杂性最主要取决于运动估计算法。实时的块匹配运动估计的 VLSI 实现需要考虑以下几个方面: 在给定搜索域内运动搜索的复杂度; 每次块匹配运算的匹配计算复杂度; 每次块匹配运算需要从帧存读取到运动估计处理器的数据量大小; 实时硬件实现的适用性。目前运动估计算法有很多种, 全搜索运动估计 (FS) 算法<sup>[3]</sup> 由于精度高, 应用比较广泛, 但它的运动搜索复杂度很高, 特别是在大范围搜索时, 硬件实现难度很大。为了减少 FS 算法的运动搜索复杂度和数据读取复杂度, 出现了许多改进的运动估计算法, 如三步搜索法 (3SS)<sup>[6]</sup>, 共轭方向搜索法 (CDS)<sup>[7]</sup>, 二维对数搜索法 (LOGS)<sup>[8]</sup>, 交叉搜索法 (CS)<sup>[9]</sup>, 动态搜索窗调整搜索法 (DSWAS)<sup>[10]</sup> 等, 这些运动估计算法往往只能找到搜索区域的局部最优值, 但比 FS 算法大大减少了搜索复杂度。在这些算法中 3SS 算法是最简单有效的, 也是最常用的, 但 3SS 算法在搜索区域为  $(\pm 8, \pm 8)$  时初始搜索步长为 4, 对慢速运动块的估计来说太大, 所以出现了改进的三步搜索法 (N3SS)<sup>[11]</sup>, 四步搜索法 (4SS)<sup>[12]</sup> 等。以上的这些快速算法虽然减少了搜索复杂度, 但硬件结构仍很复杂。采用象素值整数映射的基于特征的块匹配算法 (FBBM)<sup>[13]</sup> 和多分辨率的运动估计算法

<sup>1</sup> 1997-03-25 收到, 1997-09-17 定稿

国家攀登计划 (神经网络) 重大项目和东南大学与非利浦公司消费电子领域合作项目资助课题

(MRME)<sup>[14-17]</sup> 虽然可以减少数据读取复杂度, 但需要在帧存和运动估计处理器附加一条地址线来控制每次搜索的搜索窗的位置, 导致系统性能大大降低。

显然, 运动估计的复杂度取决于运动搜索复杂度、匹配计算复杂度、数据读取复杂度和内存管理复杂度, 然而上述大部分运动估计算法的着眼点只限于减少运动搜索复杂度即运动搜索次数。在视频编码过程中, 运动估计的估计精度、数据读取复杂度和内存管理复杂度取决于所采用的块匹配准则, 常用的块匹配准则有绝对平均误差函数 (MAE)<sup>[6]</sup>、互相关函数 (CCF)<sup>[7]</sup>、均方误差函数 (MSE)<sup>[18]</sup> 和最大误差最小函数 (MME)<sup>[19]</sup>。采用块特征匹配的快速分层运动补偿视频编码 (HFM-ME) 算法<sup>[20]</sup>, 一方面采用二维对数搜索算法来减少运动搜索复杂度, 另一方面采用符号截尾特征 (STF) 矢量作为块匹配准则函数。STF 矢量由块内象素的均值和分层的符号矢量组成, 与上述的四种匹配准则相比, HFM-ME 算法数据量减少, 并且大部分运算为逻辑运算, 相应的块匹配计算复杂度、数据读取复杂度和内存管理复杂度大大降低, 很适合于 VLSI 实现, 但仍需要比较复杂的判别逻辑进行判别。

视频压缩的一些国际标准, 如 H.261, H.263, MPEG1, MPEG2, 和 HDTV, 没有对视频编码器中的运动估计算法和匹配函数作出统一的规定, 估计精度高、运算复杂度低的运动估计算法和匹配准则函数仍然是视频编码中的研究热点。本文提出了一种新的简单有效的块运动估计匹配准则函数——块特征匹配函数。在仿真分析中对绝对平均误差函数、互相关函数、均方误差函数和最大误差最小函数的性能进行了详细比较。

## 2 块特征匹配函数

在视频编码过程中, 运动估计的估计精度、匹配运算复杂度、数据读取复杂度和内存管理复杂度取决于所采用的块匹配准则。常用的块匹配准则有

### (1) 绝对平均误差函数 (MAE)

$$\text{MAE}(i, j) = \frac{1}{N^2} \sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y}^{y+N-1} |I_k(m, n) - I_{k-1}(m+i, n+j)|,$$

$$(V_x, V_y) = \min_{i, j \in D} \text{MAE}(i, j); \quad (1)$$

### (2) 互相关函数 (CCF)

$$\text{CCF}(i, j) = \frac{\sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y}^{y+N-1} I_k(m, n) I_{k-1}(m+i, n+j)}{\left[ \sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y}^{y+N-1} I_k(m, n) \right]^{1/2} \left[ \sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y}^{y+N-1} I_{k-1}(m+i, n+j) \right]^{1/2}},$$

$$(V_x, V_y) = \max_{i, j \in D} \text{CCF}(i, j); \quad (2)$$

### (3) 均方误差函数 (MSE)

$$\text{MSE}(i, j) = \frac{1}{N^2} \sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y}^{y+N-1} [I_k(m, n) - I_{k-1}(m+i, n+j)]^2,$$

$$(V_x, V_y) = \min_{i, j \in D} \text{MSE}(i, j); \quad (3)$$

表 1 四种准则函数每次块匹配运算的匹配计算复杂度

准则函数	加法	乘法	取绝对值	开方
MAE	$2N^2 - 1$	1	$N^2$	-
MSE	$3N^2 - 1$	$N^2 + 1$	-	-
CCF	$3N^2 - 3$	$3N^2 + 2$	-	2
MME	1	-	1	-

## (4) 最大误差最小函数 (MME)

$$\begin{aligned} \text{MME}(i, j) &= \max_{m, n \in G} |I_k(m, n) - I_{k-1}(m+i, n+j)|, \\ (V_x, V_y) &= \min_{i, j \in D} \text{MME}(i, j); \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $I_k(x, y)$  表示第  $k$  帧图象在象素点  $(x, y)$  处的亮度值, 完成运动估计的块的尺寸为  $N \times N$ , 块的运动矢量为  $(V_x, V_y)$ ,  $D$  表示搜索域,  $G$  表示当前块所在的区域。

绝对平均误差函数、互相关函数、均方误差函数和最大误差最小函数的匹配计算复杂度如表 1 所示。从表 1 中可以看出, CCF 匹配函数的计算过于复杂, MSE 匹配函数和 MAE 匹配函数的计算量有所降低, 但仍需要逐点计算进行累加, 不便于并行运算, MME 匹配函数则过于简单, 没有充分利用匹配块所包含的特征信息, 使运动估计的精度大大降低。

在不影响运动估计的估计精度条件下, 为了减少运动估计的数据读取复杂度、匹配运算复杂度和内存管理复杂度, 本文提出了一种新的块匹配准则函数——块特征匹配 (BFM) 函数:

$$\text{BFM}(i, j) = |\text{Mean}_k(x, y) - \text{Mean}_{k-1}(x+i, y+j)| + \lambda\beta(i, j), \quad (5)$$

$$(V_x, V_y) = \min_{i, j \in D} \text{BFM}(i, j), \quad (6)$$

其中

$$\text{Mean}_k(x, y) = \frac{1}{N^2} \sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y}^{y+N-1} I_k(m, n), \quad (7)$$

$$\beta(i, j) = \sum_{m=x}^{x+N-1} \sum_{n=y}^{y+N-1} |N_k(m, n) - N_{k-1}(m+i, n+j)|, \quad (8)$$

$$N_k(m, n) = f(I_k(m, n) - \text{Mean}_k(x, y)), \quad (9)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0; \end{cases} \quad (10)$$

$$N_k(x, y) = [N_k(x, y), N_k(x+1, y+1), \dots, N_k(x+P-1, y+N-1)]. \quad (11)$$

BFM 函数由两部分组成, 一个为两个块内象素各自均值之差的绝对值, 另一个为两个块各自符号矢量  $N_k(x, y)$  和  $N_{k-1}(x+i, y+j)$  的汉明距离  $\beta(i, j)$ , BFM 函数利用了块内象素的两个特征信息, 即块内象素的均值以及每个象素与均值的大小逻辑关系。本文依据大量的训练图象序列进行实验选取权值因子  $\lambda = 2$ 。

从 (2)-(11) 式中的可以看出, 用上述四种常用的匹配函数来作为匹配准则, 在每次块匹配运算时, 需要通过数据线传递  $N \times N$  字节的数据, 采用 BFM 函数来作为匹配准则, 每次只需要通过数据线传递  $N^2/8 + 1$  字节的数据, 其中块的均值有 1 个字节, 块符号矢量有  $N^2/8$

字节。若采用  $N \times N$  bit 的异或逻辑门, 两个块各自符号矢量的汉明距离  $\beta(i, j)$  的计算只需要一个时钟周期, 在匹配运算中可以忽略它的计算量, 并且每个块的均值和符号矢量只需要预先并行处理计算一次, 存储在 RAM 中, 在匹配运算中不需要重新计算, 每次匹配运算只需要一次乘法, 两次加法, 一次取绝对值, 在不明显降低系统性能的前提下, 匹配运算复杂度、运动估计的数据读取复杂度和内存管理复杂度大大减少。

### 3 仿真结果

本文以 MPEG2 视频编码器为例, 通过计算机模拟实验, 得出了 BFM 匹配函数与 MAE 函数、CCF 函数、MSE 函数和 MME 函数的对比实验结果。实验在两种条件下进行:

(1) 在 MPEG2 的 MP@LL 进行, 测试序列为 Table Tennis(50 帧), Flower Garden (40 帧), 和 Football(40 帧), 图象格式为  $352 \times 240$ , 色度格式为  $4:2:0$ , 帧频为 25Hz, 实验的压缩码率为 1.152Mbps;

(2) 在 MPEG2 的 MP@ML 进行, 测试序列为 Mobile & Calendar (33 帧), 图象格式为  $720 \times 486$ , 色度格式为  $4:2:2$ , 帧频为 25Hz, 实验的压缩码率为 5Mbps。

仿真采用的运动估计搜索区域为  $(\pm 16, \pm 16)$ , 搜索位移为  $(-16, +15.5)$ , 运动估计采用 FS 算法。为了便于比较, 我们也采用 CCF 函数、MSE 函数、MAE 函数和 MME 函数进行了仿真, 仿真结果如表 2 所示。表 2 是在视频编码器中采用不同的匹配准则函数时原始帧和估计帧的均方误差 (MSE) 的平均值以及解码后每帧的峰值信噪比 PSNR 的平均值的比较。从表 1 和表 2 中可以看出, BFM 匹配函数的性能与 CCF 函数、MAE 函数和 MSE 函数的性能很接近, 比 MME 函数的性能要好得多。它在运动估计后平均 MSE 的增加量并不大, 与 MAE 函数、CCF 函数和 MSE 函数相比, 解码后的平均 PSNR 分别只下降了 0.04dB、0.03dB 和 0.03dB, 而对应的运动估计所需要的时间却要少几个数量级, 并且便于并行实现, 这些充分说明了块特征匹配 BFM 函数是一个非常简单有效的匹配准则函数。从表 1 和 2 可以看出, BFM 函数非常明显地降低了运动估计的匹配运算复杂度、数据读取复杂度和内存管理复杂度, 从而大大提高了运算速度, 复原图象的主客观质量影响不大。BFM 匹配准则函数可以和任何常用的快速搜索算法相结合, 进一步减少运动估计的运动搜索复杂度。

表 2 采用不同的匹配准则函数视频编码器的平均 MSE 和平均 PSNR 的比较

匹配准则函数 序列图象	MAE		CCF		MSE		MME		BFM	
	平均 PSNR (dB)	平均 MSE								
Flower Garden	27.22	350.10	27.23	370.44	27.22	348.34	27.05	379.31	27.19	359.05
Table Tennis	33.39	95.76	33.38	97.48	33.38	94.42	33.12	102.26	33.36	98.96
Football	31.37	175.84	31.35	177.87	31.35	174.31	31.12	212.68	31.32	181.17
Mobile & Calendar	29.56	203.92	29.56	205.56	29.56	203.04	29.40	228.44	29.51	208.83
平均	30.39	206.41	30.38	212.84	30.38	205.03	30.17	230.67	30.35	212.00

### 4 结 论

本文提出了一种新的块运动估计匹配准则函数——块特征匹配函数, 可以用于视频压缩的一些国际标准, 如 H.261, H.263, MPEG1, MPEG2, HDTV 中。仿真表明 BFM 算法非

常简单有效,可以降低相应的块匹配计算复杂度、数据读取复杂度和内存管理复杂度。BFM 函数便于并行实现,从而可以有效地缩短视频编码器的编码时间,提高编码速度。

### 参 考 文 献

- [1] ITU-T H.261, Video Codec for Audiovisual Services at 64-1920 kbps, June 1990.
- [2] ITU-T H.263, Draft Recommendation H.263 Video Coding for Narrow Telecommunication Channels at Below 64kbps, Mar. 1995.
- [3] ISO/IEC 11172 (MPEG1 DIS), Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media at Up to About 1.5Mbps, Nov. 1991.
- [4] ISO/IEC 13818-2 (MPEG2 DIS), Coding of Moving Picture and Associated Audio, 1995.
- [5] HDTV, Grand Alliance HDTV System Specification, Version 2.0, Dec. 1994.
- [6] Koya T, Iinuma K, Hirano A, Iiyima Y, Ishi-guro T. Motion-compensated inter-frame coding for video conferencing. in Proc. NTC81, New Orleans, LA: Nov. 1981, C9.6.1-9.6.5.
- [7] Kappagantula S, Rao K R. Motion compensated inter-frame image prediction. IEEE Trans. on Commun., 1985, COM-33(9): 1011-1015.
- [8] Jain J R, Jain A K. Displacement measurement and its application in inter-frame image coding. IEEE Trans. on Commun., 1981, COM-29(12): 1799-1808.
- [9] Ghanbari T. The cross-search algorithm for motion estimation. IEEE Trans. on Commun., 1990, Com-38(7): 950-953.
- [10] Lee W, Wang J F, Lee J Y, Shie J D. Dynamic search-window adjustment and interlaced search for block-matching algorithm. IEEE Trans. on CAS VT, 1993, 3(2): 85-87.
- [11] Li W, Zeng B, Liou M. A new three-step search algorithm for block motion estimation. IEEE Trans. on CAS VT, 1994, 4(4): 438-442.
- [12] Po M, Ma W C. A novel four-step algorithm for fast block motion estimation. IEEE Trans. on CASVT, 1996, 6(3): 93-98.
- [13] Kim J S, Park R H. A fast feature-based block matching algorithm using integral projection. IEEE J. of Select. Areas Commun., 1992, 10(6): 968-971.
- [14] Bierling M. Displacement estimation by hierarchical block matching. in SPIE VCIP'88, San Diago: 1988, Vol.1001, 942-51.
- [15] Uz M, Vetterli M, Gall D L. Interpolative multiresolution coding of advanced TV and compatible subchannels. IEEE Trans. on CAS VT, 1991, 1(3): 86-99.
- [16] Gharavi G. Subband coding algorithms for video applications: videophone to HDTV conferencing. IEEE Trans. on CAS VT, 1991, 1(6): 174-183.
- [17] Zhang Y Q, Zafar S. Motion-compensated wavelet transform coding for color video compression. IEEE Trans. on CAS VT, 1992, 2(9): 286-296.
- [18] kappagantula S, Rao K R. Motion Compensated predictive coding. in SPIE 27th Proc. 432, New York: 1985, G67-70.
- [19] Chen M J, Chen L G, Chiueh T D. A new block-matching criterion for motion estimation and its implementation. IEEE Trans. on CAS VT, 1995, 5(6): 231-236.
- [20] Lee X B, Zhang Y Q. A fast hierarchical motion-compensation scheme for video coding using block feature matching. IEEE Trans. on CAS VT, 1996, 6(12): 627-635.

## A NEW MATCHING CRITERION FUNCTION FOR BLOCK MOTION ESTIMATION—BLOCK FEATURE MATCHING FUNCTION

Luo Lijun    Zou Cairong    He Zhenya

(*Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210096*)

**Abstract** A block feature matching (BFM) criterion function used for block motion estimation in some international standards such as H.261, H.263, MPEG1, MPEG2, and HDTV codecs is proposed in this paper. The complexity and VLSI implementation of real-time block matching motion estimation need to involve the following considerations: the motion searching complexity within a given search window, the basic matching complexity for each matching operation, and the required amount of data fetching from frame buffer to the motion estimation processor. Simulation indicated that the proposed BFM function is very simple and effective, thus the corresponding complexity of block matching computation and the time of data fetching are greatly reduced. Moreover, the BFM function can provide the potential of parallel VLSI implementation. Comparisons of the BFM with other criterion functions are also given in detail.

**Key words** Motion estimation, MPEG1, MPEG2, H.261, H.263, HDTV, Matching criterion

骆立俊：男，1970年生，博士生，研究方向为视频信号处理和神经网络等。

邹采荣：男，1962年生，教授，研究方向为视频信号处理，多维信号处理，以及神经网络等。

何振亚：男，1923年生，教授，博士生导师，研究方向为神经网络，自适应信号处理，以及数字图象处理等。