

## 实时电子数字稳像系统并行处理的快速实现

时永刚 周渝斌 赵跃进

(北京理工大学信息科学与技术学院 北京 100081)

**摘要** 电子数字稳像系统待处理的数据量和计算量非常大,其实时性要求使得系统必须具有很高的数据处理速度。结合图像视频数据处理高度并行化、重复性处理的特征,在程序编制上,采用并行处理方法,利用单指令多数据流(Single Instruction Multiple Data, SIMD)、流水线 SIMD 技术和多线程设计方法。采用块匹配法进行运动估计,以总绝对差作为匹配准则,以菱形搜索与三步快速搜索相结合的综合搜索策略,减少了运算量,进一步加快了处理速度。同时,使用 Kalman 低通滤波方法去除图像的高频抖动,而保留了平滑的全局运动,保证了系统的有效性和鲁棒性。通过这些措施,在普通 PC 机上实现了系统的高效实时处理。

**关键词** 图像稳定,运动估计,并行处理,块匹配, Kalman 滤波

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)07-1174-05

## Fast Parallel Implementation of Real-Time Electronic Digital Image Stabilization System

Shi Yong-gang Zhou Yu-bin Zhao Yue-jin

(School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** Electronic Digital Image Stabilization (EDIS) system has a large amount of data and intensive computation. The real-time implementation of EDIS system entails rapid processing of data. The characteristics of video and image series process are the data high parallelism and repeating computation. According to the requirements and characteristics of system, using efficient C++ with inline SIMD (Single Instruction Multiple Data) and multi-thread programming to achieve real-time performance of the system in conventional PC. The block-matching motion estimation, with SAD (Sum of Absolute Differences) criterion, with modified three-step search strategy in conjunction with diamond search technology, is used to reduce computation and accelerate the execution. The stabilization system uses Kalman filter to remove high-frequency image jitter with retained smooth global movements. The results of test show that it is possible to implement an efficient and robust real-time stabilization system in conventional PC.

**Key words** Image stabilization, Motion estimation, Parallel processing, Block-matching, Kalman filter

### 1 引言

当从运动载体使用摄像机对目标进行拍摄时,载体非平稳运动常会导致获得的视频信号存在帧间的非平稳抖动。例如,在手持摄像<sup>[1,2]</sup>、机器人视觉<sup>[3]</sup>、车载摄像<sup>[4]</sup>以及飞行器的监视观察<sup>[5]</sup>等系统中,常存在这一问题。图像稳定技术的目的就是通过对运动补偿去除或尽量减少不期望的抖动<sup>[6]</sup>。传统的稳像技术有机械的、光学的和机电相结合等几种类型,这些技术比较成熟,但存在着结构复杂、体积大、功耗大,易受使用场合限制等缺点。电子稳像技术是一种新型图像稳定技术,它综合电子、计算机、数字信号处理等技术为一体来实现图像序列稳定,系统中不包含附加的机械、光学系统

和光电转换器。与传统光学稳像、机电稳像方法相比,电子数字稳像技术具有易于操作、精度高、灵活性强、高智能、体积小、可集成化等诸多优点,而且便于和图像拼接、图像增强、信息融合、目标追踪、目标识别等各种图像处理技术综合运用,在军事和民用领域都有着极为广阔的应用发展前景,是目前一个活跃的研究课题。

电子数字稳像(Electronic Digital Image Stabilization, EDIS)系统是实时处理系统,由于要对视频即图像序列进行实时化处理,不仅待处理数据量很大,而且帧间运动矢量估计具有极大的计算量。这些特点使得许多实时的稳像系统常需在专用的图像处理系统或工作站上来完成。实验使用块匹配进行运动估计,以总绝对差(SAD)作为匹配准则,使用 Kalman 滤波方法进行全局运动矢量估计,以菱形搜索与三步快速搜索相结合的搜索策略扩大了有效的搜索范围。结合电

子稳像系统的实际要求和视频图像数据处理高度并行化的特征,采用并行化实现方法,利用单指令多数据流(SIMD)、流水线 SIMD 技术和处理任务的多线程设计方法,充分发挥 PC 机处理多媒体数据的潜力,在普通 PC 机上实现了系统的有效实时处理。

论文第 2 节介绍了电子稳像系统的构成及原理;第 3 节是运动矢量估计数学模型的建立;第 4 节是匹配准则和搜索算法的确定;第 5 节为系统的实现部分,给出了使用 Windows 多线程和 SIMD 技术的具体实现方法和实验结果;第 6 节是结束语。

## 2 系统构成及其工作原理

电子稳像系统一般主要由有 3 部分组成:运动矢量估计模块(ME),运动矢量补偿模块(MC)和图像序列合成模块(IC),如图 1 所示。运动矢量估计模块使用匹配准则,并通过一定的搜索策略,估计出图像序列中相邻两帧间的全局运动矢量,并将运动参数传给运动补偿模块。运动补偿模块根据运动估计参数,从全局运动矢量的反方向,将当前帧校正到正确位置,同时将补偿后的图像序列传送到图像合成模块。在图像合成模块,根据运动估计的搜索范围,对图像序列进行剪切等处理,去除只在某些单帧图像中出现的场景,通过合成,生成场景连续、画面大小一致的稳定图像序列。由于存在剪切等处理,稳定图像序列的画面尺寸比摄像机采集到的画面尺寸有所减小,减小量等于运动估计的搜索范围大小。3 个组成部分中,运动矢量估计是系统中最为关键和重要的环节。这一部分不仅待处理数据量巨大,而且包含了密集的计算量,是整个稳像算法的基础。运动矢量估计的搜索范围、精度、准确度、鲁棒性等直接决定了系统的整体性能。运动矢量补偿和图像序列合成,涉及到很小的计算量,实现简单。

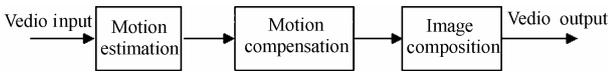


图 1 电子稳像实验系统框图

Fig.1 Scheme of EDIS experimental system

## 3 全局帧间运动矢量估计

### 3.1 摄像机在 3D 空间和成像面的运动仿射模型

电子稳像系统中,摄像机的运动是一种刚体运动模式,有 6 个自由度,即沿坐标轴  $(X, Y, Z)$  的 3 个平移量  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  和 3 个绕轴旋转量  $(\varphi, \psi, \theta)$ 。摄像机和场景之间的运动是一种相对运动,为简化处理,以摄像机镜头光心为原点,水平方向为  $X$  轴,垂直方向为  $Y$  轴,光轴方向为  $Z$  轴,建立坐标系  $\{C\}$ 。在这一坐标系中,摄像机可看作是静止的,而运动全部来自场景。类似地建立图像坐标系  $\{I\}$ 。在目标上任取一点  $P$  作为

观察点,设采样周期为  $T$ ,则在  $kT$  时刻,点  $P$  在坐标系  $\{C\}$  中的坐标为  $(X_k, Y_k, Z_k)^T$ ,其在坐标系  $\{I\}$  对应点  $p$  的坐标为  $(x_k, y_k)^T$ ;在  $(k+1)T$  时刻,点  $P$  在  $\{C\}$  中坐标为  $(X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1})^T$ ,在  $\{I\}$  中对应点  $p$  坐标为  $(x_{k+1}, y_{k+1})^T$ ,在笛卡尔坐标系,不同时刻  $P$  点中的仿射运动模型为

$$\begin{pmatrix} X_{k+1} \\ Y_{k+1} \\ Z_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} & R_{xz} \\ R_{yx} & R_{yy} & R_{yz} \\ R_{zx} & R_{zy} & R_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中  $R_{xx} = \cos \psi \cos \theta, R_{xy} = \sin \varphi \sin \psi \cos \theta - \cos \varphi \sin \theta, R_{xz} = \cos \varphi \sin \psi \cos \theta + \sin \varphi \sin \theta, R_{yx} = \cos \psi \sin \theta, R_{yy} = \sin \varphi \sin \psi \sin \theta - \cos \varphi \cos \theta, R_{yz} = \cos \varphi \sin \psi \sin \theta - \sin \varphi \cos \theta, R_{zx} = -\sin \psi, R_{zy} = \sin \varphi \cos \psi, R_{zz} = \cos \varphi \cos \psi$ 。

场景中目标在摄像机的成像面上,表现为 2D 运动。由于摄像机距离场景目标很远,可认为无限远,绕  $(X, Y)$  轴的旋转在像面上表现不明显,其影响可忽略不计。此时,场景目标在成像面上的 2D 仿射运动模型为

$$\begin{pmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (2)$$

### 3.2 基于 Kalman 滤波原理的全局运动矢量估计

电子稳像系统中,摄像机运动是载体行进运动和随机抖动的叠加。抖动运动具有随机性,相当于信号中的噪声,相对平滑运动来说是高频信号。通常,平滑行进运动的频率远低于 1Hz,而抖动信号高于 1Hz,甚至 5Hz 以上。因此,摄像机运动是低频平稳信号和高频随机噪声信号的叠加,两信号之间相互独立。稳像目的就是要找出并消除连续帧之间运动矢量包含的随机信号——抖动运动矢量,因此可以采用低通滤波器过滤掉不期望的高频随机抖动噪声信号。

在应用 Kalman 滤波估计理论时,必须首先建立关于所要解决问题对象的数学模型,即系统的状态方程和观测方程<sup>[7]</sup>。对于一个离散线性系统,状态方程为  $\mathbf{x}(k) = \mathbf{F} \times \mathbf{x}(k-1) + \mathbf{w}(k-1)$ ,观测方程为  $\mathbf{y}(k) = \mathbf{H} \times \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k)$ 。其中,  $\mathbf{x}(k)$  为状态矢量,  $\mathbf{y}(k)$  为观测矢量,  $\mathbf{F}$  为状态转移矩阵,它包含了物体空间运动的信息,  $\mathbf{H}$  为系统的测量矩阵,  $\mathbf{w}(k)$ ,  $\mathbf{v}(k)$  分别为系统和观测噪声矢量,服从正态分布,即  $\mathbf{w}(k) \sim N(0, \mathbf{Q})$ ,  $\mathbf{v}(k) \sim N(0, \mathbf{R})$ 。

Kalman 滤波的估计方程可以写为  $\hat{\mathbf{x}}^-(k+1) = \mathbf{F} \times \hat{\mathbf{x}}(k)$ ,  $\hat{\mathbf{x}}^-(k+1)$  为第  $k+1$  帧(下一个状态)的先验估计矢量,  $\hat{\mathbf{x}}(k)$  为当前帧的后验估计。后验估计的协方差矩阵为  $\mathbf{P}_e(k) = E[(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k))(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k))^T]$ ,先验估计的协方差矩阵为  $\mathbf{P}_e^-(k+1) = \mathbf{F} \mathbf{P}_e(k) \mathbf{F}^T$ 。在对先验估计进行矫正时,可以从后验状态估计  $\hat{\mathbf{x}}(k) = \hat{\mathbf{x}}^-(k) + \mathbf{G}(k)(\mathbf{y}(k) - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}^-(k))$  计算出增益矩阵  $\mathbf{G}(k) = \mathbf{P}_e^-(k) \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_e^-(k) \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$ 。每次通过新的观测值,对原来的先验估计进行修正。Kalman 滤波的迭代处理时可以根据已有的观测值预测下一次的观测值,并通过新

的观测值对估计值进行修正,这种特性使得 Kalman 滤波方法用于电子稳像系统的图像序列帧间估计具有可行性。

**3.2.1 匀加速运动模型** 图像序列中每帧图像的全局运动矢量反映了当前帧与前一帧之间的空间位置变化。标准视频的采样周期 $T$ 是不变的(Pal制式: 40ms, NTSC制式: 33.3ms),根据式(2)可以算出当前帧的瞬时速度。对匀加速运动模型来说,下一帧的水平运动速度 $v_x$ 为前一帧的水平速度与为水平方向加速度和采样周期乘积 $a_x T$ 之和。垂直方向的速度也是如此。由此得出匀加速运动模型的状态转移方程<sup>[8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} v_x(k) \\ v_y(k) \\ a_x(k) \\ a_y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x(k-1) \\ v_y(k-1) \\ a_x(k-1) \\ a_y(k-1) \end{bmatrix} + [w] \quad (3)$$

$w(k)=[0,0,u_1(k),u_2(k)]$ 是 $x,y$ 方向加速度变化的扰动, $u_1(k),u_2(k)$ 相互独立,序列的每一帧都可以根据式(3)计算。令 $mv_x$ 和 $mv_y$ 为 $kT$ 时刻,相邻两帧图像在水平和垂直方向运动矢量的观测值,得到观测方程:

$$\begin{bmatrix} mv_x(k) \\ mv_y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x(k) \\ v_y(k) \\ a_x(k) \\ a_y(k) \end{bmatrix} + [v] \quad (4)$$

$v(k)=[v_1(k),v_2(k)]^T$ 是具有零均值的高斯白噪声。

在电子稳像系统的匀加速运动模型里,每一帧的速度修正矢量 $V_{cor}(k)$ 为

$$V_{cor}(k) = V_{Klm}(k) - V_{act}(k) + V_{cor}(k-1) \quad (5)$$

式中 $V_{Klm}(k)$ ,  $V_{act}(k)$ ,  $V_{cor}(k-1)$ 分别为 Kalman 滤波估计值,根据式(2)经运动估计得到的实际运动矢量,前一帧的修正矢量。

**3.2.2 匀速运动模型** 匀速运动模型以每一帧的相对于第1帧的绝对空间位置作为差分运动矢量,其数值等于当前两帧的位置差与前面累积运动矢量之和。实际上,可以通过帧的空间位置确定摄像机的瞬时位置,也可以通过帧间运动矢量确定摄像机的瞬时速度。这一模型中,第1帧为参考帧,位置设为0点。以后每一帧的绝对位置都是前一帧的位置加上当前的帧间运动矢量。这样,可以得到匀加速运动模型的状态方程:

$$\begin{bmatrix} p_x(k) \\ p_y(k) \\ v_x(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \tau & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \tau \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x(k-1) \\ p_y(k-1) \\ v_x(k-1) \\ v_y(k-1) \end{bmatrix} + [w] \quad (6)$$

$p_x(k), p_y(k)$ 分别表示第 $k$ 帧在水平和垂直方向的空间位置。有两种方法建立观测系统:既可以通过观测帧间运动矢量建立,也可以通过累积前面帧的运动矢量估计当前帧的绝对位置,为了统一这两种模型,用帧的绝对位置建立观测方程:

$$\begin{bmatrix} mp_x(k) \\ mp_y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x(k) \\ p_y(k) \\ v_x(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix} + [v] \quad (7)$$

建立上面的状态转换方程和观测方程后,也就确定了估计和观测噪声变量,加入 Kalman 滤波进行实时滤波,可以估计出状态的变化。匀速全局运动模型直接平滑了每帧的坐标后得到稳像后的输出坐标。Kalman 滤波位置直接给出了每一帧相对于前一帧的坐标位置,因此,任一帧的速度修正矢量 $V_{cor}(k)$ 为

$$V_{cor}(k) = V_{Klm}(k) - V_{act}(k) \quad (8)$$

式中 $V_{Klm}(k)$ ,  $V_{act}(k)$ 意义与式(9)中相同。

#### 4 帧间运动矢量估计方案

块匹配法在视频处理中有着广泛的应用<sup>[9]</sup>。这是因为:

(1) 块匹配法计算简单,实现方便,耗时少;(2) 视频中相邻两帧图像相互匹配时,对应位置像素的灰度值是一致的。因此,实验中选用了块匹配的方法,并使用总绝对差(SAD)作为匹配准则,进行运动矢量估计。根据计算量大小和图像中相邻像素间的相关性,一般的块匹配算法通常选用 $16 \times 16$ (或者 $8 \times 8$ )的匹配块。从当前帧提取出的浮动匹配块,在参考帧搜索区域内按照特定的搜索策略,进行匹配处理。两个匹配块灰度值的总绝对差函数取得最小值的位置,就是正确的匹配位置,两帧图像匹配块之间的位置差就是帧间运动偏移矢量。块匹配的基本思想如图2所示。

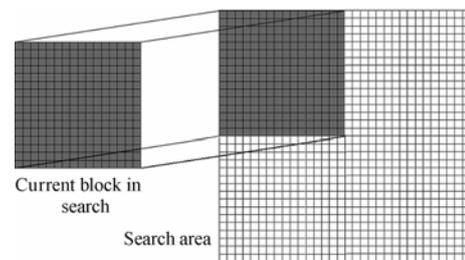


图2 块匹配示意图

Fig. 2 Scheme of block-matching algorithm

通常的搜索方案有穷尽搜索法、变步长方法、三步快速搜索法、对数搜索法、螺旋式搜索法、菱形搜索法、交叉搜索法、多分辨率策略、小波变换金字塔方法<sup>[10]</sup>等。穷尽搜索算法的精度最高,它可以获得全局上的最优运动矢量,但运算量大,不利于实时实现。在电子稳像系统中,由于搜索的范围很大,可达 $(\pm 128) \times (\pm 128)$ 像素或者更大,因此像素之间的相关性变得很小,直接采用三步快速搜索算法或者交叉搜索算法后容易陷入局部极值,使得系统的性能不够理想。实验选用了改进的三步搜索法<sup>[10]</sup>,如图3所示。该方法是在三步法的基础上,结合菱形搜索法和螺旋搜索法的特点,以

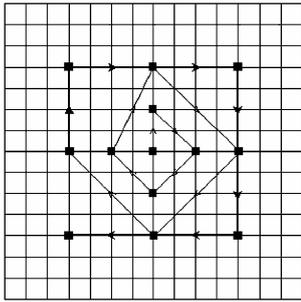


图3 改进的三步搜索法

Fig. 3 Improved three-step search algorithm

菱形顶点作为初始搜索点。搜索时,从中心点开始向四周螺旋发散地进行搜索,一旦符合指定条件停止搜索,记为初始匹配位置。然后,进入搜索的第二步,以初始匹配位置点为中心进行三步搜索。这种算法比三步法计算量增加很少,通过螺旋式搜索,可以在很大程度上避免陷入局部极值。

## 5 运动估计程序的优化与实现

电子稳像实验是在 EDIS 软件实验平台上进行的, EDIS 实验验证系统是本实验室在 Visual C++ 6.0 集成环境下开发的应用软件系统,运行在 PC 机上,由 CCD 摄像机、数据采集卡、仿真振动平台、监视显示器组成整个系统,该系统可以实现多种稳像算法并进行验证。实验中,并行化处理主要包括 Windows 多线程处理技术和 SIMD 并行处理技术。

### 5.1 系统任务的多线程并行处理

使用 Windows 多线程程序设计方法,可以在一个进程中同时处理多个任务。电子稳像系统主要的处理任务有:(1) 图像序列数据的采集和传输;(2) 帧间运动矢量估计;(3) 运动补偿、图像序列合成和数据的输出;(4) 操作者的实时控制和主要参数输出等。

采用单线程编程方法,这些处理任务只能按顺序依次实现。由于图像采集帧率为 25 帧/秒,其时间间隔与其它部分处理速度无关,会造成处理任务之间发生冲突,从而导致丢帧现象。采用多线程,就可以将不同的处理任务分配到多个线程里去并行执行。根据以上主要任务,对应地设计 4 个线程。在数据采集线程中,为避免数据采集过程中对数据进行处理,在计算机内存里设计两个反转数据缓冲区域。当一个内存区正在接收图像数据时,对其进行锁定,并给出锁定标志,这时 CPU 不能对该区域的数据进行操作处理。待一幅图像存储结束后,解除锁定标志,把锁定标志传递给另一个缓冲区,这时可以对第 1 个区域的数据进行处理,而第 2 个接受数据,如此循环反转,始终保持翻转到正面的内存区内是最新等待处理的数据内容。系统主要任务的多线程并行实现,可以最大限度地保证图像数据采集和处理的实时性,同时,在控制主线程里又能及时地响应用户的操作和进行一些必要的参数输出。采用多线程之后,图像的采集、处理、显

示、控制等工作可以并行进行,从而大大提高程序的运行效率,满足实时处理要求。

### 5.2 系统数据的 SIMD 并行优化处理

SIMD 是一种单指令多数据技术,在基于 DSP 的程序设计中有着广泛的应用<sup>[11]</sup>,它能在一个指令周期内同时处理多个数据,通过并行处理,提高数据的吞吐量。Intel 公司先后在 Pentium 系列中引入了 MMX, SSE, SSE2 和 SSE3 等 SIMD 多媒体处理指令集,在许多方面得到了应用<sup>[12-14]</sup>,也得到了 AMD 公司的全力支持。这些技术的引入,使得普通 PC 机在处理多媒体方面具有了很强的能力。MMX, SSE, SSE2 和 SSE3 针对的是不同的数据类型。MMX, SSE2 只能在整数上支持 SIMD,而 SSE 指令增加对单精度浮点数支持。MMX 可以进行同时对 8 个 8 位的整数操作, SSE 可以同时处理 4 个 32 位的浮点数操作,而 SSE2 可以进行同时对 16 个 8 位的整数操作。MMX 指令利用了 8 个 64 位通用寄存器, SSE, SSE2 和 SSE3 则利用了 8 个 128 位通用寄存器。SSE3 指令集只有 7 条指令,主要是对数据的存取进行优化。

在实时的电子稳像系统中,面临许多问题,一是庞大的数据量,二是密集的计算量。其中运动偏移矢量的计算在实时处理中有着至关重要的作用,这部分处理工作是一些高度重复运行的循环,这些循环虽然只占程序代码的 10% 或更少,却要占用多达 80~90% 的执行时间。这种不断重复地循环打乱了 CPU 内部的流水线,降低了 CPU 执行的效率。运动估计的效率和精度直接影响了系统的性能和后续的处理,如:视频的帧频(PAL: 25 帧/秒; NTSC: 30 帧/秒)、可以矫正的偏移量的范围(水平方向和垂直方向偏移的像素数  $\pm x, \pm y$ ) 以及配准的精度(像素或者子像素)。电子数字稳像实验系统,也具有视频处理的主要特点:数据以字节(8 bits)为单位、高度并行、重复计算等。在系统具体的实现过程中,通过在 Visual C++ 中嵌入并行化汇编语言的混合编程设计,大大加快了程序的执行速度,提高了系统效率,满足了实时处理的要求。

实验工作平台为: 3.0GHz Intel Pentium-IV CPU, 512M DDR400 内存, 图像帧频为 25 帧/秒。表 1 给出了二维平移情况下,使用 C, MMX, SSE2 等不同实现方法所得到的运动矢量估计所需时间的对比结果。搜索范围 64×64, 匹配块大小是 16×16。表中实验结果为 50 次计算的平均值,结果表示为  $\mu \pm \sigma$ ,  $\mu$  为均值,  $\sigma$  为均方差。

表 1 实验结果表明, SIMD 与 C 相比,运算速度有比较明显的提高, MMX 的速度提升在 4 倍多,而 SSE2 对速度的提升将近 7 倍。

在图像进行旋转时,需进行浮点运算,同时需选用合适的插值技术,根据计算量和插值效果,选用了双线性插值<sup>[15]</sup>。实验中,使用了 SSE 并行处理指令,角度旋转范围:  $\pm 7^\circ$ , 步长为  $0.2^\circ$ 。由于图像旋转的步长和角度范围具有规律,预

表1 不同实现方法的执行时间(ms)

Tab.1 Execution time of different implementation

C	MMX	SSE2
18.47±1.22	4.13±0.74	2.96±0.21

先将这些点的角度和半径值算好,采用直接查表的方式,能够减少部分运算,提高运算速度。表2给出了计算图像间旋转角度时,不同实现方法耗用时间的对比结果。表2数据显示,汇编编程(Assemble)比C大约提高了15%,SSE比C大约提高了27%,运用查表技术计算速度进一步提高了25%左右。

表2 图像旋转计算速度对比(ms)

Tab.2 Comparison of computing velocity when rotation occurred between two frames

C		Assemble		SSE	
查表前	查表后	查表前	查表后	查表前	查表后
45.20±1.03	32.93±1.32	37.42±1.17	7.38±0.64	33.84±0.98	25.79±1.12

## 6 结束语

电子数字稳像系统的数据量和计算量都非常之大,其实时性的实现对数据的处理速度提出了很高要求。论文结合系统图像数据处理高度并行化、重复处理以及数据单字节(8 bit)的特征,在程序编制上,采用并行处理方法,利用单指令多数据流、流水线SIMD技术和多线程设计方法,大大提高了运行速度。同时,采用块匹配法进行运动估计,以总绝对差作为匹配准则,减少了运算量,进一步加快了处理速度。以菱形搜索与三步快速搜索相结合的搜索策略扩大了有效的搜索范围,同时,使用Kalman低通滤波方法去除帧间运动的高频抖动成分,保持了平滑的全局运动。通过这些措施,在普通PC机上实现了系统的高效实时处理。目前,该系统可以达到的指标:图像大小640×480像素,256灰度级,相邻两帧在水平、垂直方向上偏移量达到0~±64像素,视频输出20~25帧/秒。

## 参考文献

- [1] Haruhisa O, Manabu H, Kazuhiko S, *et al.*. Optimum selection algorithm of motion estimation blocks for fast and robust digital image stabilization. Proc. IEEE International Conference on Consumer Electronics, Los Angeles, CA, USA, June 2003: 396 – 397.
- [2] Kim P. Image sequence stabilization scheme using FIR filtering. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2003, 1(4): 515 – 519.
- [3] Kurazume R, Hirose S. Development of image stabilization system for remote operation of walking robots. Proc. 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. San Francisco, CA, USA, April 2000: 1856 – 1861.
- [4] Jin J S, Zhu Z, Xu G. A stable vision system for moving vehicles. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2000, 1(1): 32 – 39.
- [5] Carmona C. Vegetation L-band image processing system, geometric performances and spatio-temporal stability. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(9): 1769 – 1777.
- [6] Duric Z, Rosenfeld A. Image sequence stabilization in real time. *Real-Time Imaging*, 1996, 2(5): 271 – 284.
- [7] Brown R G, Hwang P Y C. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, 1992: 190 – 288.
- [8] Ertürk S. Real-time digital image stabilization using Kalman filters. *Real-Time Imaging*, 2002, 8(5): 317 – 328.
- [9] Marc C, Purnendu S. Survey of motion estimation techniques for video compression. Proc. of SPIE, vol. 4796, Seattle, WA, United States, 2002: 218 – 226.
- [10] 周渝斌. 数字图像稳定算法研究和系统设计[D]. [博士学位文], 北京: 北京理工大学, 2004.
- [11] Derby J H, Moreno J H. A high-performance embedded DSP core with novel SIMD features. Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Hong Kong, April 2003, 301 – 304.
- [12] Cheresiz D, Juurlink B, Vassiliadis S, *et al.*. Architectural support for 3D graphics in the complex streamed instruction set. *International Journal of Parallel and Distributed Systems and Networks*, 2002, 5(4): 185 – 193.
- [13] Ahmad I, Yeung D K, Zheng W, *et al.*. Software based MPEG-2 encoding system with scalable and multithreaded architecture. Proc. of SPIE: Commercial Applications for High-Performance Computing, Denver, Colorado USA, August 2001, vol. 4528: 44 – 49.
- [14] Servetti A, Rinotti A, De Martin J C. Fast implementation of the MPEG-4 AAC main and low complexity decoder. Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, Canada, May 2004, vol. 5: 249 – 252.
- [15] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, *et al.*. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1999, chapter 10.

时永刚: 男, 1970年生, 博士, 副教授, 研究方向为数字图像处理、多源信息相似性的统计分析 with 描述、视频的并行处理等。

周渝斌: 男, 1973年生, 博士生, 研究方向为数字图像处理、电子稳像技术研究。

赵跃进: 男, 1958年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为光电信号处理、电子稳像技术研究。