

文章编号: 0253-2239(2006)04-0516-6

电子稳像的特征点跟踪算法*

朱娟娟 郭宝龙

(西安电子科技大学 机电工程学院智能控制与图像工程研究所, 西安 710071)

摘要: 提出一种利用特征跟踪进行电子稳像的算法,该算法具有计算量小,精度高,有鲁棒性等优点。算法由两部分构成:(1)基于特征点集二维运动模型进行全局运动估计。提取图像的特征点,以其为中心建立特征窗进行块匹配,得到匹配特征点集,根据特征点集内具有稳定相对位置的结构特征,提出距离不变准则,对特征匹配进行验证,以保证各点的局部运动具有良好的全局一致性,从而形成特征点集的全局运动矢量;(2)利用自适应均值滤波去除摄像机抖动。均值滤波器可以有效平滑摄像机的高频抖动,同时滤波器尺寸自适应地根据抖动频率来调整大小,能够防止过稳或欠稳。实验结果表明,该算法能够有效减轻摄像机的旋转和平移抖动。

关键词: 图像处理; 电子稳像; 全局运动估计; 特征点匹配; 运动补偿

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A

Features Tracking Algorithm for Video Stabilization

Zhu Juanjuan Guo Baolong

(School of Electromechanical Engineering, Intelligent Control and Image Engineering Institute, Xidian University, Xian 710071)

Abstract: A video stabilization algorithm is presented, which has the advantages of low computation cost, high accuracy and robustness. It consists of two parts: (1) global motion estimation is performed based on two-dimensional motion model of feature points set. The feature window with each selected feature point as the center is matched and then the corresponding points are obtained. The feature set has a stable structure, and the relative positions of all points are stable. So distance invariant criterion is proposed to check the feature matching, keep global coherence of all local motions and produce the global motion vector of the feature points; (2) a self-adaptive average filtering is applied to exclude the influence of the camera dithering. The average filter can smooth out the high frequency dithering effectively and adjust the window length automatically according to dithering frequency to prevent overstabilization or understabilization. Experimental results show that the algorithm can effectively reduce the influence of unwanted camera rotation and translation dithering.

Key words: image processing; electronic image stabilization; global motion estimation; feature points matching; motion compensation

1 引言

电子稳像是一种结合电子设备和数字图像处理,消减摄像机抖动导致的视频序列不稳定甚至模糊现象的技术。与传统的机械稳像和光学稳像^[1]相比,它具有易操作,精度高,体积小,功耗小,以及能实现实时处理等特点,是现代稳像技术发展的主要方向。目前,电子稳像技术已经被广泛用于摄像机抖动的检测和消除,视频压缩,运动目标的检测和跟

踪,以及图像拼接等领域。

经典的稳像算法有块匹配算法(BMA)^[2],投影算法(PA)^[3],位平面匹配方法(BPM)^[4],它们都是针对摄像机的平移运动。块匹配算法是基于块内运动一致性的假设,投影算法要求图像具有一定的衬比度和明显的灰度变化,位平面匹配方法是一个比较新的算法,它只利用图像的一个位平面进行匹配,速度快,但是精度有待于提高。当发生旋转运动时,

* 国家自然科学基金(69975015)资助课题。

作者简介: 朱娟娟(1980~),女,江苏南通人,西安电子科技大学博士研究生,主要从事图像处理和电子稳像的研究。

E-mail: zhujoo@126.com

收稿日期: 2005-05-18; 收到修改稿日期: 2005-07-20

通常采用特征跟踪算法(FTA)^[5],但当跟踪过程中遇到特征遮挡、背景中小物体运动、异物进入视场等问题时,仍没有一个有效的解决方案。

上述问题解决的关键是准确地提取全局运动信息以去除摄像机的随机抖动。局部特征的运动是模糊的和不确定的^[6],但同一图像中的所有特征点之间具有相互约束,形成一个整体的约束结构^[7],该结构具有稳定性和抗干扰能力。本文基于特征点集运动矢量的提取和自适应滤波技术,提出了一种带特征匹配验证的电子稳像算法(FMVA)。该算法研究了特征点集内存在的相对位置稳定的结构特征,提出了两点间距在摄像机平移和旋转运动前后不变的距离准则,以去除误匹配,保证运动矢量一致性,提高全局运动估计的精度;另外,分析了摄像机扫描运动和随机抖动的运动特征,利用自适应窗长的均值滤波器平滑抖动,能够在去除抖动的同时跟随摄像机的真实扫描。实验时采用图像差值和图像序列帧间相似度对稳定结果进行了评定,结果表明 FMVA 算法可以有效处理摄像机的平移和旋转抖动,实时实现视频序列的稳像处理。

2 全局运动估计

摄像机的抖动引起视频序列背景的运动,全局运动估计就是估计背景运动的规律,它是稳像系统的关键步骤,是去除抖动的前提。

FMVA 算法采取的全局运动估计是基于特征点跟踪的思想,具体原理是:选取图像不同区域内的多个特征点,构成特征点集,点集内各点之间的相对位置形成稳定的结构,约束每点的局部运动必须保持全局一致性,因此,可以将这个结构作为全局信息,作为一个整体来跟踪它的运动轨迹,从而来保证运动估计的全局性和鲁棒性,提高抗噪声干扰的能

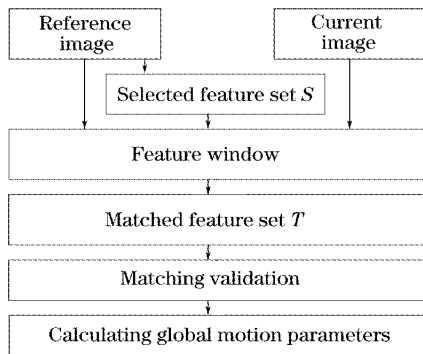


图 1 全局运动估计流程图

Fig. 1 Flow diagram of global motion estimation

力。实现步骤是:利用高斯-拉普拉斯算子对参考图像进行滤波处理,平滑噪声,分区域选取特征点集 S ;以每一特征点为中心,建立特征窗做块匹配,得到匹配特征点集 T ;基于多点结构约束的思想,利用相对距离不变准则去除误匹配和局部运动点;然后将剩余的正确匹配点对带入二维运动模型,用最优优化计算方法求出最优解即全局运动矢量。图 1 为 FMVA 算法中全局运动估计的流程图。

2.1 特征点对的对应关系

为了对抖动视频序列进行电子稳像处理,首先必须分析图像相对于 CCD 摄像机载体的运动,图像的运动可以看作是由摄像机的某些运动分量引起的。

为了分析视频序列帧间运动,以摄像机当前位置为参照,建立 CCD 摄像机载体动坐标系为 $O-XYZ$,其中 O 为光轴中心,像平面坐标系定义为 $W-UV$,如图 2 所示。

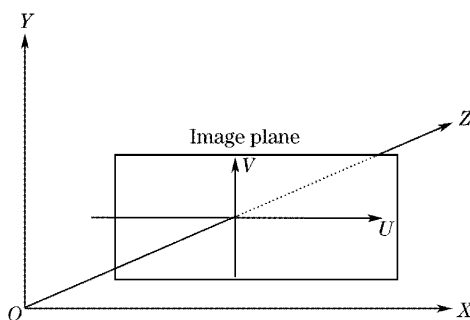


图 2 运动坐标系

Fig. 2 Motion coordinates system

摄像机运动有 6 个自由分量:3 个平移分量 (T_x, T_y, T_z) 和 3 个旋转分量 (α, β, γ) ,分别表示绕 XYZ 轴的平移和旋转,其中,绕水平轴(pitch)改变俯仰角、绕垂直轴(yaw)改变方位角和绕视向滚动(roll,视向即垂直于成像平面的轴)。假定空间坐标系中一点 (x, y, z) ,移动到点 (x', y', z') ,相应地,其投影像平面坐标由 (u, v) 运动到 (u', v') ,其焦距也由 f 变为 f' ,则两点空间坐标的对应关系可由(1)式表示,两点像平面坐标由(2)式表示:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ i & j & k \\ l & m & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} u' = f' \frac{au + bv + cf + fT_x/z}{lu + mv + nf + fT_z/z}, \\ v' = f' \frac{i u + j v + k f + fT_y/z}{lu + mv + nf + fT_z/z}, \end{cases} \quad (2)$$

当旋转角度小于 5° 时,(2)式可以近似为(3)式:

$$\begin{cases} u' = f' \frac{u + \alpha v - \gamma f + fT_x/z}{\gamma u - \beta v + f + fT_z/z}, \\ v' = f' \frac{-\alpha u + v + \beta f + fT_y/z}{\gamma u - \beta v + f + fT_z/z}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{令 } s = (\gamma u - \beta v + f + fT_z/z)/f', \quad (4)$$

则(3)式转变为

$$\begin{cases} s \cdot u' = u + \alpha v - \gamma f + fT_x/z, \\ s \cdot v' = -\alpha u + v + \beta f + fT_y/z. \end{cases} \quad (5)$$

假设一台运动中的摄像机面对着一个平坦的面进行拍摄,即所有场景点的景深相等,或者各点景深变化远远小于平均景深,此时,摄像机的平移运动就会导致二维图像的均一比例变化和平移;当旋转角度很小(小于 5°),摄像机的滚动导致图像整体的旋转,同时,摄像机的俯仰和偏向导致图像整体的二维平移。此时可以建立二维仿射模型如下:

$$\begin{cases} s \cdot u' = u + \alpha v + T_u, \\ s \cdot v' = v - \alpha u + T_v, \end{cases} \quad (6)$$

其中 s 是比例因子, (T_u, T_v) 是平移量, α 是旋转角度。由此,只要给定两帧图像之间一组(大于3对)匹配点对,就可以求出方程(6)的最小二乘解。这种模型形式简单,求解稳定,在许多场景中得到应用^[8,9]。

2.2 参考图像中特征点的选取

图像的边缘是图像的最基本特征,边缘上的点作为特征点,它的邻域将成为一个灰度级的变化带,即灰度变换信息丰富,利于后面的匹配运算。比较常用的边缘提取方法就是微分算子,理论上,一阶导数取极大值或二阶导数取零值的像点对应着边界点。事实上,由于边界灰度变化不陡以及图像中噪声的影响,使提取的边界点集过宽或有间断。根据人眼模型和对动物的大量实验研究,Marr等^[10]提出先用高斯函数对图像平滑滤波,然后对滤波后的图像进行拉普拉斯运算,输出值为零的点即认为是边界点。使用高斯函数卷积相当于低通滤波过程,其后的拉普拉斯运算相当于高通滤波过程,故总体上高斯-拉普拉斯算子(LOG)为一带通滤波过程。

FMVA算法提取特征点的方法是:先对图像用高斯-拉普拉斯算子滤波,然后将得到的滤波图像分成 $N \times N$ 个区域,在每一区域内选取灰度值最大的点作为该区域的特征点。

2.3 特征点的匹配及其验证

所谓特征点的匹配,就是在当前帧中找到与参考帧中的每一特征点的唯一匹配点。本文以参考图像的特征点为中心,构造 $M \times M$ 的特征窗,利用菱

形搜索策略(DS)^[11]和最小绝对误差和准则(SAD),在当前图像中得到匹配图像块,则该块的中心点即为对应匹配点。选择合适的窗大小,既要保证块的信息含量,又要保证块内运动的一致性和不受旋转运动错位的影响。在旋转小于 5° 时,选用 9×9 的特征窗。

由此可以得到参考帧和当前帧的匹配特征点集,理论上,每一对点都满足(1)式的二维运动模型,由此寻找点集之间的转换关系,就是待求的稳定的全局运动矢量。然而,在特征点匹配过程中,由于匹配算法的缺陷、特征点位于重复纹理区域、受噪声干扰、被遮挡或移出视野等原因,不能完全正确匹配,导致各个局部运动的模糊性。但当所有特征点构成一个约束结构,特征点集就具有整体稳定性。特征点集存在稳定的结构特征,其中最简单的特征就是两点之间的相对位置,当摄像机只存在平移和旋转运动时,图像中所有特征点之间的相对距离在摄像机运动前后是保持不变的,即特征点的两两间距是不变的。由此,利用距离准则消除误匹配是实现运动一致性对应的一种有效方法,并具有鲁棒性和抑制噪声干扰等优点。

由此,FMVA算法提出了距离不变准则:给定共有 N 个特征点的特征集 S 和其匹配特征集 T , S 中特征点 (u_i, v_i) 和 T 中 (u'_i, v'_i) 是正确匹配点对的充要条件是, (u_i, v_i) 到 S 中其他特征点 (u_j, v_j) 的距离与 (u'_i, v'_i) 到 T 中其他匹配点 (u'_j, v'_j) 的距离相等,即满足

$$\sqrt{(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2} = \sqrt{(u'_i - u'_j)^2 + (v'_i - v'_j)^2}, \quad (7)$$

其中 $i, j = 1, 2, \dots, N$ 。通过距离准则对匹配进行验证,以删除误匹配和局部运动点,以提高全局运动估计的精度。通常,由于正确匹配点对数远大于错误的对数,因而只要到一半以上点的距离满足条件就可以认为是正确匹配。在实际应用中,只要两距离之差小于设定的阈值,就可以认为距离相等。

图3给出了一个距离准则的示意图,图3(a)是选取的6个特征点构成的点集,以点1为例,它到其余5个点的距离构成一个稳定的结构,即在摄像机运动前后应该保持不变,但是由于误匹配的存在(点2和2'),仅有 $l_{12} \neq l'_{12}$ 而到其余点的距离满足距离准则,故可以判断点1和1'是正确匹配点对;而对于点2,它到其余所有点的距离都不相等,故可判断为误匹配点对。

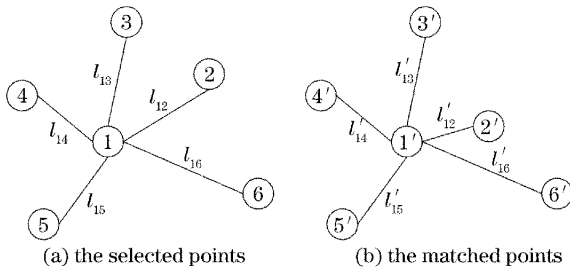


图3 距离准则示意图。(a)提取特征点,(b)匹配特征点
Fig.3 Illustration of distance criterion. (a) The selected points, (b) the matched points

2.4 运动参量的确定

(6)式应用于 N 对特征匹配点,可得到含有 3 个未知参量的 $2N$ 个线性方程式,本文假设 $s=1$ 。

$$\begin{bmatrix} u_{i,k} \\ v_{i,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha \\ \alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{j,k} \\ v_{j,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_u \\ T_v \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

对该方程展开并移项,以矩阵形式重新整理得 $\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{m}$,其中

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} u_{i,1} - u_{j,1} \\ v_{i,1} - v_{j,1} \\ \dots \\ u_{i,N} - u_{j,N} \\ v_{i,N} - v_{j,N} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -v_{j,1} & 1 & 0 \\ u_{j,1} & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ -v_{j,N} & 1 & 0 \\ u_{j,N} & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

为了求出 $\mathbf{m} = [\alpha, T_u, T_v]^T$,采用非线性迭代最小化算法,首先就要对 \mathbf{m} 进行初始化:选取在模板匹配过程中最小绝对误差和准则值最小的 n 对匹配点, $n \geq 2$, \mathbf{m} 的初始值可由下式解得

$$\mathbf{m} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}, \quad (10)$$

然后通过最小化已知特征点和估计特征点之间的坐标差的平方,建立目标函数,利用 Levenberg-Marquardt^[12]优化方法迭代求解,目标能量函数定义式为

$$E = \sum_{i=1}^N [(u_i - \hat{u}_i)^2 + (v_i - \hat{v}_i)^2] =$$

$$\begin{bmatrix} u_i - \hat{u}_i \\ v_i - \hat{v}_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} u_i - \hat{u}_i \\ v_i - \hat{v}_i \end{bmatrix} = \mathbf{e}^T \mathbf{e}, \quad (11)$$

其中 $[u_i, v_i]^T$ 和 $[\hat{u}_i, \hat{v}_i]^T$ 分别表示当前图像中已知特征点和根据参考图像中特征点预测的匹配点。在迭代过程中,判断迭代次数是否达到最大迭代次数,

和两次计算的目标函数差值是否小于某一阈值来终止计算。

3 视频序列帧间补偿

3.1 运动参量自适应平滑滤波原理

在对图像进行补偿时,必须明确需要补偿的只是摄像机的随机抖动,而保留正常的扫描运动,从而达到有效减轻摄像机的抖动,同时又能实时跟踪真实场景。

分析摄像机的运动具有如下特点:摄像机的正常扫描运动在一定时间内具有方向和幅值的一致性,是平滑的低频运动;而随机振动则包含了快速的运动参量变化,是高频运动。因此,采用均值滤波器可以去除这种高频成分。对于频率较大的抖动,滤波器长度宜取较小值,否则会出现过稳现象;而对于频率较小的抖动,若滤波器长度过小,就会出现欠稳现象。

FMVA 算法采用的自适应滤波方法为:选取运动矢量的一个分量,计算其变化波形的平滑指数和突变指数;如果波形的平滑指数小于最低平滑阈值 (LS=2),或者平滑指数小于最大平滑阈值 (HS=16)且波形突变指数小于突变最低阈值 (LB=0.06),则表明图像序列运动变化相对较为平缓,故需增加均值滤波器尺寸(但最大不超过 11);反之,如果波形变化比较显著,则应该采用较小的滤波器尺寸进行均值处理。

3.2 自适应帧间补偿实现步骤

为了求出运动矢量波形平滑指数和波形突变指数,对以下参量进行定义:

定义 1:波形变化累积和 (D),记录前 N 个运动波形的累积变化:

$$D = \sum_{i=1}^N |x_i - x_{ave}|, \quad x_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (12)$$

其中 x 为运动矢量 \mathbf{m}_i 的一个分量, N 为滤波器尺寸, x_{ave} 为运动参量波形中前 N 个运动参量的平均值。

定义 2:波形突变指数 (δ), δ 越接近 1 表征运动波形突变程度越大。

$$\delta = \max\{|x_i - x_{ave}|, i = 1, 2, \dots, N\} / D. \quad (13)$$

定义 3:波形平滑指数 (ρ) $\rho < 1$,表征运动波形有较好的平滑程度:

$$\rho = D / x_{ave}. \quad (14)$$

自适应帧间补偿实现步骤:

step 1:初始化滤波器尺寸 N 为 5,求出视频序列前 N 帧的 $N-1$ 个运动矢量;

step 2: 求出视频序列第 N 个运动参量, 计算这 N 个运动矢量的波形平滑指数 ρ 和波形突变指数 δ , 并作如下判断:

如果 $N=11$, 则停止计算;

如果 $\rho < LS$ 或 $\rho < HS$ 和 $\delta < LB$, 则尺寸加 1, 并且重复 step 2;

其他情况, 中止尺寸增加, 到 step 3;

step 3: 根据 N 确定补偿参量。

$$\Delta m_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_{i-(N-n)} - m_i, \quad (15)$$

其中 m_i 是第 i 和 $(i+1)$ 帧图像之间的运动参量。

确定各帧图像的补偿参量后, 带入二维运动模型对当前图像进行变换, 显然变换后的坐标值不一定在整数格上, 由于实时处理的限制, 本文采用了最临近插值法。

4 实验结果及分析

实验是在 Pentium IV 2.4 GHz、256 MB 内存的计算机上进行的, 视频捕捉设备选用天敏 10Moons SDK2000 视频监控卡, 以 30 fps 的帧率采集 240×320 的真彩色图像。为了更好地模拟实际振动, 摄像机被安放在一个抖动平台上, 该平台可以实现水平和垂直方向 3 Hz 的振动, 水平振幅 1 mm, 垂直振幅 3 mm。

对于输入参考帧做剪切处理, 去掉边缘若干行列, 这样做的目的是防止特征点选在了移入或移出的场景中, 无法进行特征匹配。然后利用高斯-拉普拉斯算子进行特征点选取, 建立特征窗, 在当前帧中找到匹配点并进行特征验证, 结果如图 4 所示。图中标记“+”是正确匹配的特征点对, 标记“●”是误匹配的特征点对, 通过特征点对验证, 将这 4 对点删除, 留下 12 对正确匹配特征点。利用 Levenberg-Marquardt 算法求出运动参量, 通过均值滤波, 求出

补偿参量 ($\alpha = -0.9, T_u = -1.496, T_v = 2.476$), 对当前图像进行补偿。

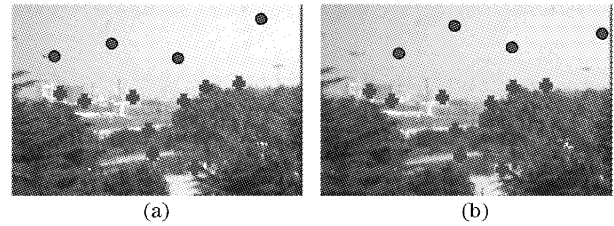


图 4 特征点检测及匹配验证结果。(a) 参考帧中特征点, (b) 当前帧中匹配点

Fig. 4 Result of feature points detection and matching validation. (a) Feature points in reference frame, (b) matched points in current frame

图 5 分别给出了未加特征匹配验证的补偿结果图 5(a) 和本文的经特征验证的补偿结果图 5(b), 可见错误匹配点对运动参量计算精度的影响是比较大的, 从而可能会导致较大的误补偿。

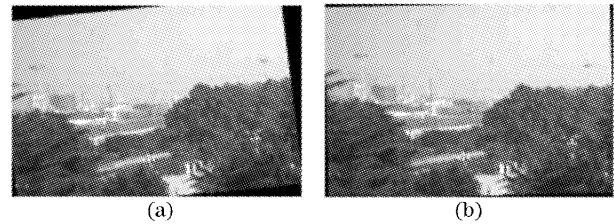


图 5 匹配验证补偿结果比较。(a) 未经验证的补偿结果图, (b) 验证后的补偿结果图

Fig. 5 Comparison of compensation result. (a) Compensation without validation, (b) compensation with validation

图 6 给出了均值滤波处理前后的运动矢量序列图 (以 40 帧为例), 摄像机的主要运动是, 水平和垂直方向均存在抖动, 同时还有少量的绕光轴旋转变化的, 不存在变焦运动。由图 6 可以看出, 滤波前, 帧间运动矢量存在剧烈的抖动, 滤波后, 很好地去除了高频的抖动, 平滑了运动矢量。这就充分说明了均值滤波器的平滑作用, 明显减轻图像序列的抖动现象。

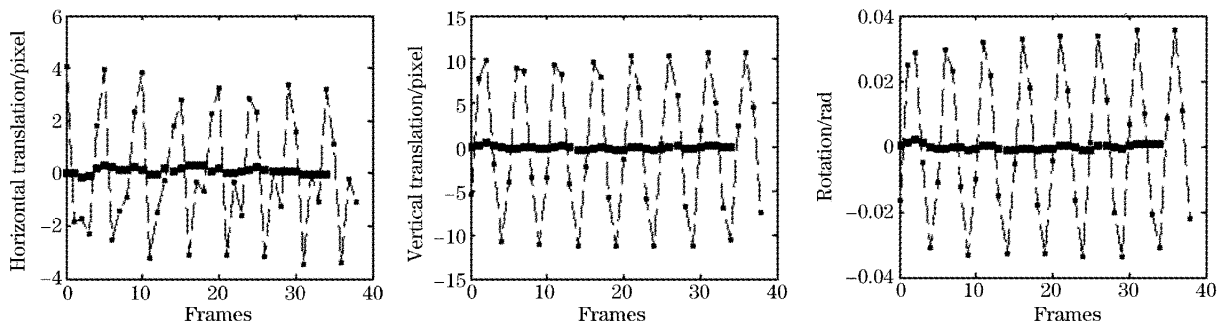


图 6 自适应均值滤波结果

Fig. 6 Result of adaptive average filtering

为了具体说明结果序列的稳定性,我们又给出了客观峰值信噪比(PSNR)值和主观质量的比较。图7给出了原始序列的帧间逼真度(图中下方曲线oPSNR)和稳定序列的帧间逼真度(图中上方曲线sPSNR)。由于摄像机的运动,图像边缘信息会有损失,故而此处计算的峰值信噪比是在剪切边缘处理后的图像之间进行的。

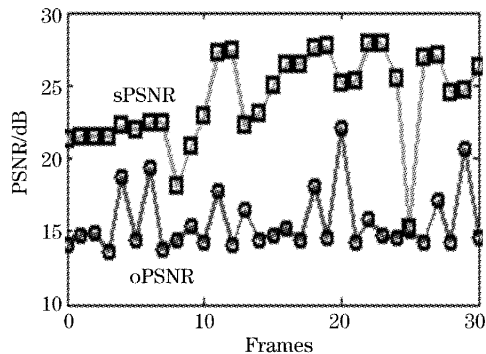


图7 图像序列帧间逼真度比较

Fig. 7 Comparison of PSNR

图8是原始序列中某时刻图像与其前一帧的差值图像,和稳定序列中同一时刻的差值图像比较。当两帧之间的运动矢量被完全补偿时,它们的差值图像各点像素灰度值应为零,差值越小说明两帧图像越相似,对应的图像序列逼真度也就越高,结果序列也就越稳定。

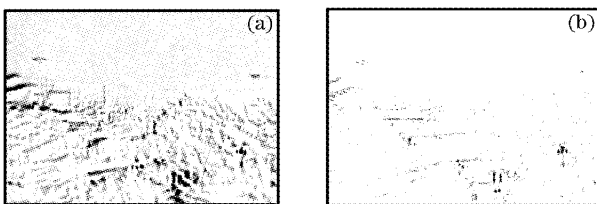


图8 稳定前后差值图像比较。(a)原始差值图像,
(b)稳定差值图像

Fig. 8 Comparison of difference image between (a) original frames, (b) stabilized frames

5 结 论

本文提出了一种带特征匹配验证的电子稳像算法(FMVA),该算法通过距离不变准则对特征匹配进行验证,从而保证运动参量的全局性和准确性;补偿时对运动参量进行自适应均值滤波,一方面可以有效平滑摄像机的抖动,同时又能保留摄像机的扫描运动,实现实时稳定图像序列。

电子稳像技术研究总是围绕着稳像精度和实时性这两个方面展开,它们决定了稳像系统的性能。

以下几个方面值得我们今后深入的研究和探讨:

1) 稳像算法中对全局运动估计提出了较高的要求,快速准确的全局运动估计算法是一个需要深入研究的课题;

2) 稳像系统的实时性通常会由于算法过于复杂以及采用串行方式执行而难以实现,所以可以尝试使用并行实现技术,并结合并行计算机和神经网络等方法进一步提高算法的速度;

3) 基于人的视觉理解的去抖动,例如人在晃动的载体上可以判断静止的物体是不动的,由此可以推想,计算机视觉系统也可以通过感知自身的运动来判定抖动的存在,从而实现自稳定。

4) 关于图像稳定程度的描述^[13],目前尚缺乏统一的客观评价标准。

参 考 文 献

- 1 Zhao Yuejin, Lian Tongshu. Three-axis image stabilizing reflecting prism assembly in convergent light[J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, 12(8): 749~754 (in Chinese)
- 2 赵跃进,连铜淑. 会聚光路中的三轴稳像棱镜组[J]. *光学学报*, 1992, 12(8): 749~754
- 3 F. Vella, A. Castorina, M. Mancuso *et al.*. Digital image stabilization by adaptive block motion vectors filtering[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2002, 48(3): 796~801
- 4 K. Sauer, B. Schwartz. Efficient block motion estimation using integral projections [J]. *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, 6(5): 513~518
- 5 C. Tomasi, T. Kanade. Detection and tracking of point features [R]. Technical Report CMU-CS-91-132, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, April, 1991
- 6 Sung-Jea Ko, Sung-Hee Lee, Seung-Won Jeon *et al.*. Digital image stabilizing algorithms based on bit-plane matching [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1998, 44(3): 617~622
- 7 E. Hildreth, A. M. Waxman. *Computation of Visual Motion* [M]. Cambridge, MIT Press, 1984. 126~187
- 8 Guo Baolong, Guo Lei. A new approach to visual motion computation[J]. *J. Xidian University*, 1994, 21(4): 457~463 (in Chinese)
- 9 郭宝龙,郭雷. 视学运动计算的新方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 1994, 21(4): 457~463
- 10 C. Morimoto, R. Chellappa. Fast electronic digital image stabilization [R]. University Maryland, Technical Report of CVL, 1995
- 11 Q. Zheng, R. Chellappa. A computational vision approach to image registration[J]. *IEEE Transactions Image Processing*, 1993, 2(3): 311~326
- 12 D. Marr, E. Hildreth. Theory of edge detection[J]. *Proceedings Royal Society of London*, 1980, B207(1167): 187~217
- 13 Liu Haifeng, Guo Baolong, Feng Zongzhe. A square diamond search algorithm for block motion estimation [J]. *Chin. J. Computers*, 2002, 25(7): 747~752 (in Chinese)
- 14 刘海峰,郭宝龙,冯宗哲. 用于块匹配运动估值的正方形-菱形搜索算法[J]. *计算机学报*, 2002, 25(7): 747~752
- 15 Yuan Yaxiang, Sun Wenyu. *Optimization Theory and Method* [M]. Beijing, Science Press, 1997. 382~3911 (in Chinese)
- 16 袁亚湘,孙文渝. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 382~391
- 17 Li Qi, Xu Zhihai, Feng Huajun *et al.*. A descriptive method for image stability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(3): 427~430 (in Chinese)
- 18 李奇,徐之海,冯华君等. 一种图像稳定程度的描述方法[J]. *光学学报*, 2004, 24(3): 427~430