文章编号 1004-924X(2015)05-1458-08

基于改进运动矢量估计法的视频稳像

吉淑娇[1,2,3],朱 明[1*],雷艳敏[3],胡汉平[1,2]

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 长春大学 电子信息工程学院,吉林 长春 130022)

摘要:提出用改进的运动矢量估计方法对视频序列进行运动补偿,以有效去除机载成像设备摄取视频序列的帧间抖动,实现电子稳像。介绍了 BRISK 算子提取特征的模型和算子描述方式,利用 BRISK 算子提取相邻帧的稳定特征点并进行匹配,结合参数仿射变换模型实现帧间运动矢量粗估计。为了提高运动矢量估计的精度,引入粒子滤波解决因特征点景深不同引起的运动矢量估计失准的问题,继而采用加权最小二乘法改进运动矢量估计。最后采用卡尔曼滤波从全局运动矢量里分离出运动补偿分量,对视频序列进行逐帧补偿。实验表明,视频序列稳像后的帧间变换保真度值提高了近 3 db,显示提出的的稳像算法可以处理复杂运动下视频的帧间抖动,且快速准确并具有一定的鲁棒性。

关 键 词:电子稳像;视频稳像;特征匹配;粒子滤波;运动补偿;评价指标

中图分类号:V557;TN941.1 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20152305.1458

Video stabilization with improved motion vector estimation

JI Shu-jiao[1,2,3], ZHU Ming[1*], LEI Yan-min[3], HU Han-ping[1,2]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *College of Electronics and Information Engineering, Changchun University, Changchun* 130022, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhu-mingca@163.com*

Abstract: An improved motion vector estimation algorithm was proposed to remove effectively the inter frame jitter of the video sequences recorded by airborne imaging equipment and to realize the electronic image stability. The BRISK operator and the corresponding feature extraction model were introduced. Then, the BRISK operator was employed to extract and match the stable feature points of neighbor frames. By combining with the affine transformation motion model, the rough estimation of inter frame motion vectors was implemented. To improve the accuracy of motion vector estimation, the particle filter with the weighted least-square method was employed to solve the problem of the motion vector calculation inaccuracy caused by different depths of the feature points. Finally, the Kalman filter was used to separate the jitter components from the global motion vectors for compensating the video sequences frame by frame. The experimental result indicates that the inter-frame

收稿日期:2014-08-18;**修订日期**:2014-09-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61203242);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20140101084JC);吉林省教育厅资助项目(No. 2015LY502L11)

transformation fidelity (ITF) of video sequence has improved about 3 db, which verifies that the proposed stabilized algorithm removes inter-frame jitter of high frequency under complicated movement with fast speed, higher accuracy and stronger robustness.

Key words: electronic image stabilization; video stabilization; feature matching; particle filter; motion compensation; evaluation index

1 引　言

机载摄像系统主要安装在无人机或直升机上，无人机飞行高度在几千米左右，理想情况下，其图像清晰度能达千万像素。但工作状态下，受风力等外界因素的影响，无人机会出现不规则运动，从而导致所摄取的视频序列具有较大的晃动。因此需要利用电子稳像技术对其进行稳像处理，去除随机抖动的干扰。

国内外诸多学者对电子稳像技术展开了广泛的研究[1-6]，其中采用基于特征匹配结合运动滤波方法处理随机抖动视频取得了很好的效果。文献[7]采用 Harris 算子提取特征点，并结合自适应 Kalman 滤波进行运动滤波。但由于这种方法所采用的算子不具有尺度不变性，故不能处理带有尺度变换的图像，且算子利用梯度信息提取特征点所耗费的时间较长。文献[8]采用尺度不变特征变换(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)算子提取和描述特征点，并利用 Kalman 滤波结合中值滤波处理航拍视频的稳像，但由于 SIFT 描述子的维度太高，虽然其稳像效果良好，但无法实时处理。文献[9-10]采用加速鲁棒特征(Speed-UP Robust Feature, SURF)算子提取特征点，再分别结合低通滤波和粒子滤波做稳像处理，但 SURF 算子的描述子在计算特征点主方向的时候要多次重复计算 Harr 小波的响应值，稳像速度仍难以提高，文献[11]改进了 SURF 算法，但效果并不明显。文献[12]利用 KLT 算子提取特征点，并将特征点分为前景特征点和背景特征点进行处理，该算法只利用背景特征点做运动估计，但很多情况下区分困难，且只适用于前景物体运动缓慢或者不动的情况。

特征点提取和描述子的匹配时间过长会严重影响运动估计的速度，本文采用即能抗旋转又能抗尺度变换二进制局部特征算子 BRISK(Binary Robust Invariant Scalable Keypoint)[13-14]以提高运动估计速度。考虑特征点的景深不同会影响运动估计的准确性，本文采用粒子滤波获得粒子权重，以解决因景深不同而使运动矢量失准问题，文中采用 Kalman 滤波去除高频的抖动运动分量，对视频序列进行补偿获得稳定视频序列。实验证明，提出的算法有效且具有一定的鲁棒性。

2 特征点提取与描述

2.1 BRISK 特征点提取

2011 年 Stefan 在 ICCV 会议上提出采用 BRISK 算子进行特征提取和匹配。此算子的计算复杂度低，是一种低存储、高功效的二进制算子，且具有尺度不变性。在 BRISK 特征检测中，尺度空间包含 n 个外层和 n 个内层，分别用 c_i 和 d_i 表示，其中 $i=0,1,\cdots,n-1$。n 取多少与图像尺度变化有关，一般尺度足够大才会保证计算的精度。c_0 层采用 FAST 5-8 检测特征点，其余层则主要采用 FAST 9-16 进行检测[13,15,16]。为了提高特征点的准确度，对检测出的特征点的同层及其上、下层进行非极大值抑制，并对极大值做连续的尺度优化。内层 d_i 位于 c_i 与 c_{i-1} 层之间，第 1 内层 d_o 由初始图像使用因子 1.5 进行下采样获得，其余内层通过对 d_o 连续采样获得[13]。

2.2 BRISK 描述符

BRISK 描述符由二进制比特串组成，其采样模式为在关键点附近取分布在以关键点为中心的 4 个同心圆圈上的 60 个点，如图 1 所示。

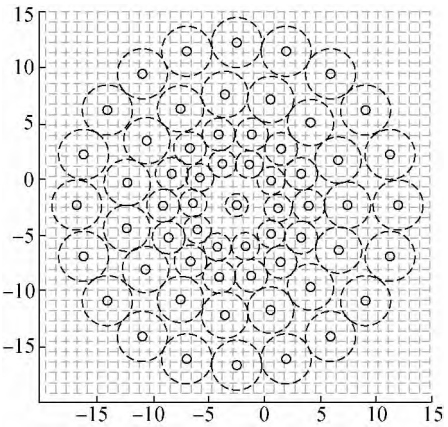


图 1　BRISK 采样模式

Fig. 1　Sampling mode of BRISK

由图 1 可知，为了得到鲁棒性高的采样点对，首先使用方差为 σ_i（其大小正比于采样点各自所在圆上采样点之间的距离）的高斯函数对每个采样点进行平滑。在现有 $60\times(60-1)/2=1\ 770$ 对采样点对中，任取一对 (p_i,p_j)，设高斯平滑后它们的灰度值分别表示为 $I(p_i,\sigma_i)$ 和 $I(p_j,\sigma_j)$，则局部梯度为：

$$g(p_i,p_j)=(p_j-p_i)\cdot\frac{I(p_j,\sigma_j)-I(p_i,\sigma_i)}{\|p_j-p_i\|^2}. \tag{1}$$

定义集合 A 为所有的特征点对集，S 和 L 分别是它的子集，其中 S 表示短距离采样点对的集合，L 表示长距离采样点对的集合，公式如下：

$$S=\{(p_i,p_j)\in A\mid\|p_j-p_i\|<\delta_{\max}\}\subseteq A, \tag{2}$$

$$L=\{(p_i,p_j)\in A\mid\|p_j-p_i\|>\delta_{\min}\}\subseteq A. \tag{3}$$

设 t 为关键点的尺度，则阈值分别设置为 $\delta_{\max}=9.75t$，$\delta_{\min}=13.67t$。为了减少计算量，对长距离采样点对和短距离采样点对分别处理，用下式来求取长距离特征点的主方向：

$$\boldsymbol{g}=\begin{pmatrix}g_x\\g_y\end{pmatrix}=\frac{1}{l}\cdot\sum_{(p_i,p_j)\in L}g(p_i,p_j). \tag{4}$$

在 BRISK 描述符中，为了实现旋转不变性，把采样模式绕关键点旋转 $\alpha=\arctan(g_y,g_x)$ 后，对所有短距离集合 S 内的采样点对进行对比，得到级联的 512 bit 的二进制串。每个比特位 b 由下式计算得到：

$$b=\begin{cases}1, I(p_j^\alpha,\sigma_j)>I(p_i^\alpha,\sigma_i)\\0, \text{otherwise}\end{cases},\ \forall(p_i^\alpha,p_j^\alpha)\in S. \tag{5}$$

获得二进制比特串后，在进行匹配的时候，计算每对描述子之间的汉明距离。设任意一对描述子串分别为 Str_1 和 Str_2，则可以写成：

$$Str_1=x_1x_2\cdots x_{512}, \tag{6}$$

$$Str_2=y_1y_2\cdots y_{512}. \tag{7}$$

两式中 x,y 分别取 0 或 1。通常采用最近邻域汉明距离获得匹配点对，汉明距离越小，说明它们的匹配度越高[11]。

3　基于特征点加权的全局运动补偿

3.1　传统运动矢量估计

获得相邻两帧图像的匹配特征点对的坐标后，采用 4 参数的仿射变换模型[8]计算运动矢量：

$$\begin{pmatrix}X_n\\Y_n\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}a&-b&t_x\\b&a&t_y\\0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}X_{n-1}\\Y_{n-1}\\1\end{pmatrix}, \tag{8}$$

上式可以写成 $\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{M}\boldsymbol{X}$，其中 a,b 分别代表图像的缩放和旋转分量，t_x 和 t_y 分别代表图像间的平移分量，(X_{n-1},Y_{n-1}) 和 (X_n,Y_n) 分别代表参考帧和当前帧的特征点坐标。式(8)为超定方程组，特征点越多，计算量越大，因此必须合理控制特征点提取算子的尺度和阈值。最后利用最小二乘法便可求得参数的运动矢量。即：

$$\boldsymbol{M}=[\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}]^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}. \tag{9}$$

3.2　改进的运动矢量估计方法

实际上，采用上述方法只能大致计算出运动矢量，因为不同的特征点景深会严重影响运动矢量的准确性[3]。因此本文提出采用粒子滤波的方式获得特征点权重，以确保特征点之间景深的相似性，继而利用加权最小二乘获得准确的运动矢量。粒子滤波的基本思想[10,18-20]是从重要性概率密度采样，即利用带权重的粒子 $\{X_t^i,\omega_{t-1}^i\}_{i=1}^N$ 近似获得系统状态的后验概率密度 $P(X_{t-1}\mid Z_{1,t-1})$，并估计系统状态。其中 X_t 为目标状态，Z_t 为 t 时刻的观测值。

本算法中，随机选用一组特征点对组成粒子。用式(8)计算运动矢量，特征点对要多于 3 对。一个特征点可能属于多个粒子，获得 N 个粒子后，它的权重由逐点均方准则确定，即：

$$\omega_t^i=\frac{\exp\left(-\dfrac{(I_{t-1}-I_t^i)^2}{2\sigma_t}\right)}{\sum_{i=1}^{N}\exp\left(-\dfrac{(I_{t-1}-I_t^i)^2}{2\sigma_t}\right)}, \tag{10}$$

式中：ω_t^i 表示第 i 个粒子在 t 时刻的权重；I_{t-1} 为 $t-1$ 时刻的图像；σ_t 为方差。I_t^i 为 I_t 采用式(8)基于第 i 个粒子计算的第 i 帧补偿图像。由于补偿图像存在无定义区，因此计算的时候只取参考帧的中心区域 $w/2\times h/2$（w,h 分别为参考帧图像的宽度和高度）。特征点的权重由粒子的权重获得，即：

$$W_t^j=\frac{1}{N_t^j}\sum_{k=1}^{N_t^j}\omega_t^k, \tag{11}$$

其中：W_t^j 为第 j 个特征点在 t 时刻的权重；N_t^j 为第 j 个特征点所对应的粒子数；ω_t^k 为相应粒子的权重。获得粒子权重后，运用加权最小二乘法来准确估计当前帧的运动矢量。

$$\boldsymbol{M}=[\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{X}]^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{Y}, \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{\Lambda}=\mathrm{diag}(W_t^1,W_t^2,\cdots,W_t^N)$，$N$ 为一帧图像中的所有特征点数。

根据文献[10]可知，若每个粒子的特征点数目不同，则会影响到全局运动矢量的准确度，当特征点数超过 30 个时，每个特征点的景深都一致，此时粒子将对运动估计失去作用，因此要合理选择特征点的数目。

3.3　Kalman 滤波获取补偿分量

Kalman 滤波[8,21]用来从运动矢量中提取出有意运动矢量，整个过程是根据前一时刻的估计值和协方差估计值预测出当前时刻的运动矢量。其预测方程和更新方程分别为：

预测方程：

$$\begin{cases} s(k\mid k-1)=\boldsymbol{F}s(k-1\mid k-1) \\ p(k\mid k-1)=\boldsymbol{F}p(k-1\mid k-1)\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q} \end{cases}, \tag{13}$$

更新方程：

$$S(k\mid k)=s(k\mid k-1)+k_g(k)(z(k)-\boldsymbol{H}s(k\mid k-1))$$

$$P(k\mid k)=(\boldsymbol{I}-k_g(k)\boldsymbol{H})P(k\mid k-1)$$

$$k_g(k)=\boldsymbol{H}P(k-1\mid k-1)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}P(k\mid k-1)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}+R)^{-1}, \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{F}$ 为状态矩阵，$\boldsymbol{H}$ 为观测矩阵。$w(k)$，$v(k)$ 都为均值为零、方差分别为 Q 和 R 的高斯噪声，Q、R 的取值不同会影响补偿的效果。

4　本文算法总结

本文算法流程如图 2 所示，各个步骤的具体实现总结如下：

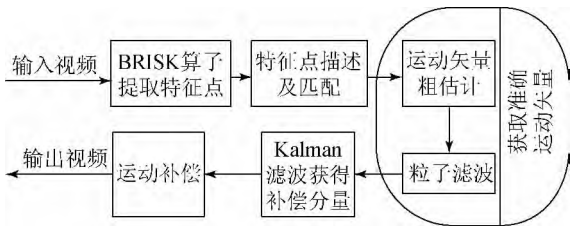


图 2　本文算法流程

Fig. 2　Flowchart of proposed algorithm

(1)利用 BRISK 提取相邻帧特征点，进行匹配后，获得匹配点对，带入式(8)，粗估计帧间运动矢量；

(2)利用粒子滤波获得粒子权重，利用式(12)计算准确的运动矢量，定义第 n 帧的运动矢量为 $\boldsymbol{M}_n$，可由式(16)获得，$\boldsymbol{M}_{i(i-1)}$ 为相邻帧运动矢量，将各运动矢量组成运动矢量矩阵；

$$\boldsymbol{M}_n=\prod_{i=1}^{n}\boldsymbol{M}_{i(i-1)}. \tag{16}$$

(3)将上一步获得的运动矢量矩阵作为滤波的观测矩阵，进行 Kalman 滤波，获取运动补偿参数；

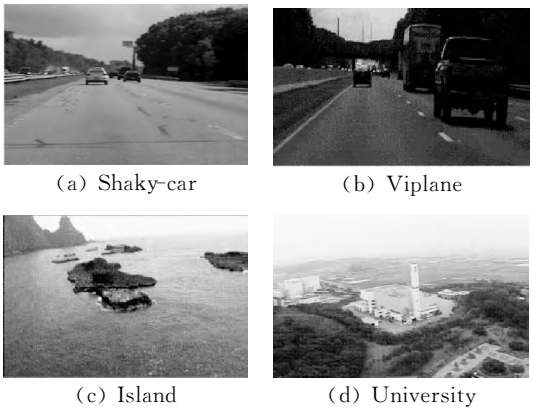
(4)对当前帧进行逐帧补偿：首先在参考帧中找到相应的像素位置，然后按照没有抖动分量的情况对参考帧按照式(17)做变换，获得稳像后的第 n 帧序列。式中 $\boldsymbol{M}_n'$ 为滤波后的有益运动分量。

$$\begin{pmatrix} X_n' \\ Y_n' \\ 1 \end{pmatrix}=\boldsymbol{M}_n^{-1}\boldsymbol{M}_n'\begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \\ 1 \end{pmatrix}. \tag{17}$$

5　实验与结果分析

为了验证本文算法的有效性，采用 4 个典型的航拍视频“Shaky-car”、“Viplane”、“Island”和“University”作为研究对象[21]，如图 3 所示。本实验的计算机采用 Intel 奔腾处理器，CPU 主频 2.90GHz，内存 4G。

这 4 个视频各具特点：“Shaky-car”和“Viplane”分别为 132 frame 和 80 frame 的含运动车体的抖动视频。“Island”和“University”都包含 300 frame 的 720×480 的视频序列，前者在水平方向具有小于 2 pixel 的自身运动并带有高频的随机振动，后者含有规则的小于 2 pixel 的运动，并带有高频的旋转和平移抖动。



(a) Shaky-car　(b) Viplane

(c) Island　(d) University

图 3　实验视频

Fig. 3　Experimental videos

5.1　特征点提取及匹配实验

本文采用“Shaky-car”作为实验视频，另几个视频具有同样的效果。图 4 为采用 BRISK 算子对相邻两帧序列的特征点匹配结果。为了获得准确的匹配点对，采用 RANSAC 方法去除误匹配点对。图 4 上图为直接匹配的结果，下图为采用 RANSAC 方法之后的结果。通过比较可以看出，下图位于车上的特征点已经被滤掉，仅剩下背景面上的特征点。



图 4　特征点匹配

Fig. 4　Matching of feature points

5.2　运动补偿实验分析

在获取粗运动矢量估计后，参照文献[10]采用加权最小二乘算子计算精确运动矢量。粒子滤波中的粒子数目要根据具体视频来选取。为了验证粒子滤波提取运动矢量的准确性，用已知的 4 参数变换矩阵[11]对 4 个视频序列的第一帧进行变换，分别采用 BRISK 结合最小二乘(LS)方法和 BRISK 结合加权最小二乘(WLS)方法对每个视频帧变换前后 2 幅图像求取运动矢量，比较它们的准确性。表 1 给出了给定的 4 参数为：[0.998　−0.062　7.675；0.062　0.998　1.176；0 0 1]。

由表 1 可知，采用加权最小二乘提取的运动矢量更为准确。由于采用相邻帧测试，因此尺度因子和缩放因子相差不大，而主要差别体现在水平和垂直的平移因子上。

接着对准确估计的运动矢量做运动滤波处理，图 5(彩图见期刊电子版)给出“Shaky-car”前 100 frame 序列做 Kalman 滤波前后的 4 参数曲线，其他几个视频效果相似。

表 1　两种方法运动矢量对比

Tab. 1　Comparison of motion vector by two ways

	BRISK+LS	BRISK+WLS
Shaky-car	$\begin{bmatrix}0.986 & -0.072 & 8.784\\ 0.072 & 0.986 & 2.654\\ 0.000 & 0.000 & 1.000\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0.994 & -0.065 & 7.688\\ 0.065 & 0.994 & 1.264\\ 0.000 & 0.000 & 1.000\end{bmatrix}$
Viplane	$\begin{bmatrix}0.996 & -0.058 & 8.624\\ 0.058 & 0.996 & 1.985\\ 0.000 & 0.000 & 1.000\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0.998 & -0.061 & 7.554\\ 0.061 & 0.998 & 1.256\\ 0.000 & 0.000 & 1.000\end{bmatrix}$
University	$\begin{bmatrix}0.996 & -0.064 & 7.976\\ 0.064 & 0.996 & 1.652\\ 0.000 & 0.000 & 1.000\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0.998 & -0.062 & 7.682\\ 0.062 & 0.998 & 1.226\\ 0.000 & 0.000 & 1.000\end{bmatrix}$
Island	$\begin{bmatrix}0.990 & -0.064 & 6.987\\ 0.064 & 0.990 & 2.064\\ 0.000 & 0.000 & 1.000\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0.999 & -0.060 & 7.652\\ 0.060 & 0.999 & 1.185\\ 0.000 & 0.000 & 1.000\end{bmatrix}$

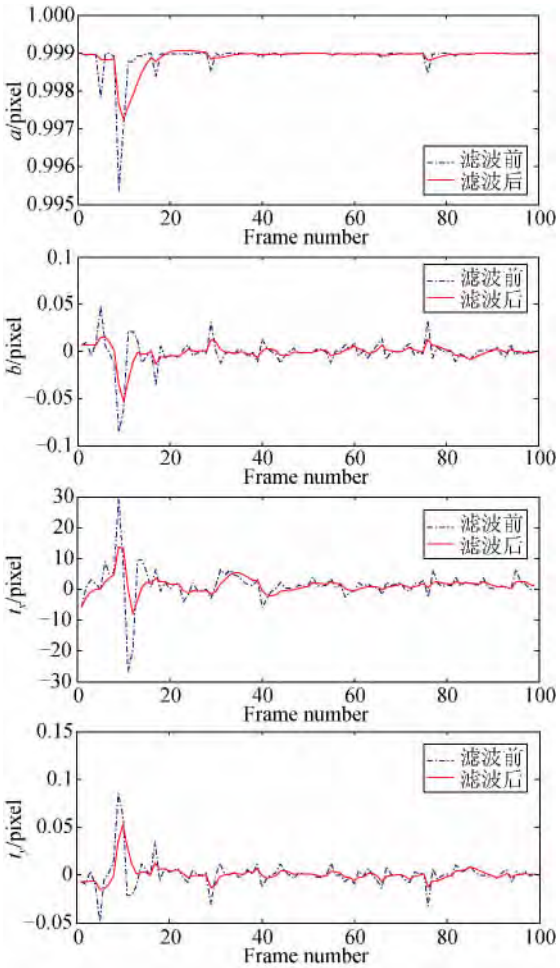


图 5　滤波结果比较

Fig. 5　Comparison of filtering results

根据 4 个参数的滤波曲线可以看出，滤波后的红线比滤波之前的蓝色线要平稳很多，尤其平移分量 t_x 和 t_y。

5.3　稳像效果

为了更直观地看到本文算法的效果，图 6 上图给出了“Shaky-car”视频经运动补偿后的一帧图像与原图像进行对比，可见两幅图像匹配良好。图 6 下图给出了 10 frame“Shaky-car”视频序列稳像前、后的均值对比结果（由于序列的场景有变化，帧数太多看不到效果）。由于稳像前存在随机抖动，均值图片很模糊，稳像后均值图像的车体已经很清晰，说明很好地去掉了抖动干扰。



图 6　稳像图像均值效果

Fig. 6　Average image results of stabilized video

图 7 给出了采用本文算法得到的稳像前后两 frame 图像的差值图像。左图为稳像前相邻帧的差值图像，右图为稳像后相邻帧的差值图像。图中信息也验证了本文算法的有效性。



图 7　稳像前后图像差值对比

Fig. 7　Comparison of image differences for stabilized videos

5.4　和其他算法比较

利用帧间变换保真度 ITF[6,8,10,22] 来客观地说明算法的性能，其定义如式(18)所示：

$$ITF=\frac{1}{N_{\text{frame}}-1}\sum_{K=1}^{N_{\text{frame}}-1}PSNR(k),\quad(18)$$

其中：N_{frame} 为视频的总帧数，PSNR[7-8] 为两帧图像的峰值信噪比，其定义如式(19)所示：

$$PSNR(I_1,I_0)=10\log\frac{255^2}{MSE(I_1,I_0)},\quad(19)$$

其中：MSE 为两帧图像的均方差；I_1，I_0 为相邻帧图像。

表 2 列出了本文算法与 Zhu's[7] 和 Song's[10] 算法对 4 个实验视频图像稳像后的 ITF 结果，由于本文对稳像后视频的无定义区没有处理，因此对稳像前后视频做了适当的剪切处理，这样比较 ITF 的值才具有实际意义。

表 2　3 种算法 ITF 值对比

Tab. 2　ITF Comparison of three algorithms (dB)

VideoSeq.	Original	Zhu's	Song's	Ours
Shaky-car	23.53	24.42	25.81	25.95
Viplane	22.86	23.01	25.12	25.44
Island	24.37	26.20	27.46	27.49
University	23.75	24.96	26.23	26.20

为了验证本文算法在速度上的优势，表 3 给出了 3 种算法处理单帧视频序列所耗时间。

由表 2、表 3 可知，本文算法与 Song's 算法对各视频的 ITF 值很接近，这是因为都采用了加权粒子滤波方法，但本文算法耗时明显少于 Zhu's 和 Song's 算法，它们采用的是 Harris 和 SURF 算子，这也体现了二进制算子 BRISK 的时间优势。由于 Zhu's 算法没有考虑特征点景深的影响，其稳像后视频的 ITF 值明显小于 Song's 和本文算法，但所用时间和本文算法相差不多。对不同视频，本文算法的 ITF 值较其它两种算法平均提高了近 3 dB。

表 3　3 种算法时间对比

Tab. 3　Time comparison of three algorithms (s)

Video Seq.	Zhu's	Song's	Ours
Shaky-car(320×240)	0.38	0.43	0.32
Viplane(360×168)	0.42	0.50	0.46
Island (720×480)	0.84	0.90	0.82
University (720×480)	0.79	0.88	0.81

6 结　论

本文采用加权最小二乘法进行运动矢量提取，以含有抖动矢量的航拍视频序列为研究对象，进行了电子稳像实验。文中采用基于二进制的 BRISK 算子提取特征点并通过汉明距离进行匹配。利用匹配特征点，结合 4 参数仿射变换模型大致求取帧间运动矢量。为了提高运动估计矢量精度，利用加权最小二乘的粒子滤波方法对运动矢量进行增强，从而改进了运动矢量估计过程。实验证明，这样处理会获得更准确的运动估计，从而保证稳像的准确性。接着采用 Kalman 滤波获得抖动分量进行补偿处理，较好地保留了视频序列的自身运动。实验结果表明所采用的算法在时间上具有优势，并提高了峰值信噪比，主观上获得了去除抖动的稳定视频，减少了人眼不适的感觉。本文的下一步工作是对无定义区进行重构，以保证稳像视频的分辨率不变。

参考文献：

[1] LEE T H, LEE Y G, SONG B CH. Fast 3D video stabilization using ROI-based warping [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2014, 25(5):943-950.

[2] ZHOU Z H, JIN H L, MA Y. Plane-based content preserving warps for video stabilization[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*,2013: 2299-2306.

[3] **逄晓光，靳万鑫，余颖. 大运动前景和旋转抖动视频的快速数字稳定**[J]. **光学 精密工程**, 2014,22(1): 178-185.
DI X G, JIN W X, YU Y. Digital video stabilization for large-scale moving foreground object and rotation jitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):178-185. (in Chinese)

[4] TANG CH ZH, WANG R G. Sparse moving factorization for subspace video stabilization [C]. 2014 *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2014: 4314-4318.

[5] **孙辉**. Bayer **彩色序列图像的电子稳像**[J]. **光学 精密工程**,2014,22(2):481-488.
SUN H. Electronic image stabilization for Bayer color video sequence image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 481-488. (in Chinese)

[6] KIM S W, YIN SH M, YUN K M, *et al*.. Spatio-temporal weighting in local patches for direct estimation of camera motion in video stabilization [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2014, 118:71-83.

[7] ZHU J J, GUO B L. Electronic image stabilization algorithms based on adaptive motion filter [J]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2013,50(1):204-209.

[8] WALHAA, WALI A, ALIMI A M. Video stabilization for aerial video surveillance [C]. *AASRI Conference on Intelligent System and Control*, 2013,4:72-77.

[9] AGUILAR W G, ANGULO C. Robust video stabilization based on motion intention for low-cost micro aerial vehicles [C]. 2014 11*th International Conference on Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, 2014:1-6.

[10] SONG CH H, ZHAO H, JING W, *et al*.. Robust video stabilization based on particle filtering with weighted feature points [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012,58(2):570-577.

[11] **初守燕，席志红. 结合** SURF **的数字稳像技术**[J]. **计算机辅助设计与图形图像学报**, 2014, 26(2): 241-247.
CHU SH Y, XI ZH H, Digital image stabilization based on SURF[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(2): 241-247. (in Chinese)

[12] KIM S K, KANG S J, WANG T S. *et al*.. Feature point classification based global motion estimation for video stabilization [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2013, 59(1): 267-272.

[13] LEUTENEGGER S, CHLI M, SIEGWA-RTRY. BRISK: binary robust invariant scalable keypoints [C]. 2011 *IEEE International Conference on Computer Vision(ICCV)*, 2011:2548-2555.

[14] **林森，苑玮琦，宋辉. 二进制鲁棒不变尺度特征在非接触掌纹识别中的应用**[J]. **仪器仪表学报**, 2013,34(12): 2785-2792.
LIN S, YUAN W Q, SONG H. Application of binary robust invariant scalable keypoints in non-

contact palmprint recognition [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(12): 2785-2792. (in Chinese)

[15] **王灿进，孙涛，陈娟. 局部不变特征匹配的并行加速技术研究[J]. 液晶与显示**，2014，29(2)：266-273.
WANG C J, SUN T, CHEN J. Speeding up local invariant feature matching using parallel technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014,29(2):266-273. (in Chinese)

[16] **王飞宇，邸男，贾平. 结合尺度空间** FAST **角点检测器和** SURF **描绘器的图像特征[J]. 液晶与显示**，2014,29(4):598-604.
WANG F Y, DI N, JIA P. Image features using scale-space FAST corner detector and SURF descriptor [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014,29(4):598-604. (in Chinese)

[17] ROSTEN E, PORTER R, DRUMMOND T. Faster and better: a machine learning approach to corner detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(1): 105-119.

[18] YANG J, SCHONFELD D, CHEN C, *et al*.. Online video stabilization based on particle filters [C]. 2006 *IEEE International Conference on Image Processing*, 2006:1545-1548.

[19] YANG J L, SCHONFELD D, MOHAMED M D. Robust video stabilization based on particle filter tracking of projected camera motion [J]. *IEEE Transactions on. Circuits and System for Video Technology*, 2009, 19(7):945-954.

[20] WANG Y R, TANG X L, QING C. Dynamic appearance model for particle filter based visual tracking [J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45(12): 4510-4523.

[21] WANG CH T, KIM J H, BYUN K Y, *et al*.. Robust digital image stabilization using the Kalman filter [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009,55(1):6-14.

[22] VERMA K, KUMAR A, GUPTA S, *et al*.. Fast and robust real time digital video stabilization with smear removal using integral projection curve warping technique[C]. 2014 *Twentieth National Conference on Communications*, 2014:1-6.

作者简介：



吉淑娇(1978—)，**女，吉林农安人，博士研究生，讲师，**2004 **年、**2006 **年于辽宁科技大学分别获得学士、硕士学位，主要从事图像处理、电子稳像等方面的研究。**E-mail：shujiaoji@163.com

导师简介：



朱　明(1964—)，**男，江西南昌人，研究员，博士生导师，**1985 **年于南京航空航天大学获得学士学位，**1991 **年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位，主要从事视频图像处理和光电成像测量技术以及目标识别与电视跟踪技术方面的研究。**E-mail：zhu-mingca@163.com

(版权所有　未经许可　不得转载)