

文章编号 1004-924X(2014)01-0177-09

大运动前景和旋转抖动视频的快速数字稳定

迪晓光^{1*}, 靳万鑫¹, 余 颖²

(1. 哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 空间重点物理实验室 北京 10076)

摘要:针对存在大的旋转抖动和大的运动前景的视频,提出了一种快速电子稳像方法。由于现有圆周投影法在估计图像大角度旋转运动时鲁棒性较差,故对算法进行了改进以提高投影相关匹配时的准确性。考虑常用的稳像算法难以处理含较大或较多运动前景的抖动视频,提出一种基于图像位平面金字塔的自适应取块平移运动估计方案;该方案可根据块匹配结果的统计特性决策最优取块模式,最大程度地避免运动前景对运动参数估计的干扰。最后,引入一种自适应分组的限幅加均值复合滤波方式,一方面通过限幅滤波修正帧间错误运动估计,另一方面自适应分组确定滤波窗口以达到较佳运动平滑效果。实验结果表明:改进的圆周投影法旋转估计的准确性和稳健性均有提高;自适应取块的平移运动估计方案能够准确估计较大运动前景抖动视频的运动参数,同时也适用于灰度特征不丰富的抖动视频;稳像的信噪比峰值可达 31.08 dB。

关键词:电子稳像;改进圆周投影;自适应块匹配;运动估计;运动滤波

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142201.0177

Digital video stabilization for large-scale moving foreground object and rotation jitter

DI Xiao-guang^{1*}, JIN Wan-xin¹, YU Ying²

(1. *Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;*

2. *Science and Technology Institute on Space Physics, Beijing 100076, China)*

** Corresponding author, E-mail: dixiaoguang@hit.edu.cn*

Abstract: For video images with large-scale moving foreground objects and rotation jitters, a new fast digital image stabilization algorithm was proposed. According to the poor robustness of the existing circular-projection algorithm to estimate video's rotation jitter with large angles, several modifications for existing circular-projection algorithm was performed to improve the accuracy in the projection correlation matching. As the jitter videos contain larger or much more moving foreground objects, a novel Adaptive Block-selected Matching Algorithm (ABSMA) based on image bit-plane pyramid was proposed to determine the optimal block selection mode according to statistical characteristics of block matching results and to effectively reduce moving foreground objects on global motion estimation. Fi-

收稿日期:2013-05-10;**修订日期:**2013-07-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61174202);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. HIT-NSRIF 201163);航天科技创新基金资助项目(No. CASC2011021);黑龙江省博士后科研启动基金资助项目(No. LBH-Q10078)

nally, an adaptive compound filter using the frame grouping and mean filter with a limiting magnitude was introduced, which could not only correct the inter-frame motion estimation error by limiting filter, but also could determine a filtering window to achieve better smoothness of motion by an adaptive frame grouping. Experimental results show that modified circular-projection algorithm has significant effect on improving the accuracy and robustness of image stabilization and the ABSMA can accurately estimate motion parameters of jitter videos with larger or more moving foreground objects. The proposed algorithm is also suitable for the jitter videos without rich gray features and its mean Peak Signal-to-noise Ratio(PSNR) can reach 31.08 dB.

Key words: digital image stabilization; modified circular-projection; adaptive block matching; motion estimation; motion filtering

1 引言

手持或安装在载体(如机载、车载等)上的摄像机在成像过程中,会由于震颤使得视频图像抖动,而电子稳像^[1]是利用数字图像处理技术抑制视频抖动的一种方法。与传统的机械或光学稳像技术相比,电子稳像具有成本低、硬件结构简单、功耗低等特点。帧间全局运动估计和图像抖动运动补偿是电子稳像的两大步骤,其中,运动估计是运动补偿的前提。由于图像帧间的运动形式主要为旋转和平移运动,所以能否有效地估计图像帧间的旋转和平移运动,对稳像效果至关重要。对于帧间大角度的旋转运动,传统的直接基于图像灰度信息匹配的运动估计方法^[2-3]已经难以适用。现有的旋转运动估计算法主要是通过提取图像特征点进行帧间匹配来求解^[4-6],但这种算法的时间复杂度和硬件要求较高,从而限制了它的实际应用。文献[7]和文献[8]提出了一种基于极坐标系的圆周投影法,该方法将图像帧间的旋转运动转化为极坐标系下的平移运动进行参数估计,但当图像移动量较大时,由于每帧图像边缘都包含较多的新信息,边缘信息的相关性变差就会导致相邻帧投影向量出现错误匹配结果。另外,图像中前景运动物体位置的变动,反映到圆周投影曲线上为曲线某处出现‘畸变’,同样影响最终的相关匹配结果。

针对包含较大或者较多运动前景的抖动视频,在进行运动估计时如何避免前景运动物体的干扰,并使运动估计结果保留全局运动而排除前景的局部运动是保证有效稳像的一个重要步骤。

文献[9]采用了随机抽样一致(RANSAC)的方法进行模型参数拟合,虽然在特定情况下能产生不错的稳像效果,但该方法的随机性很强,有时会产生不收敛的情况。文献[10]采用迭代最小平方方法计算全局运动,但对于较大运动前景视频的稳定效果较差^[11]。文献[11]在帧差分离图像运动前景和背景的基础上,利用筛选出的背景上的匹配块进行帧间全局运动估计,但对于包含较大且较为平坦的运动前景的视频,差分算法难以进行有效分离,从而导致稳像效果不佳。

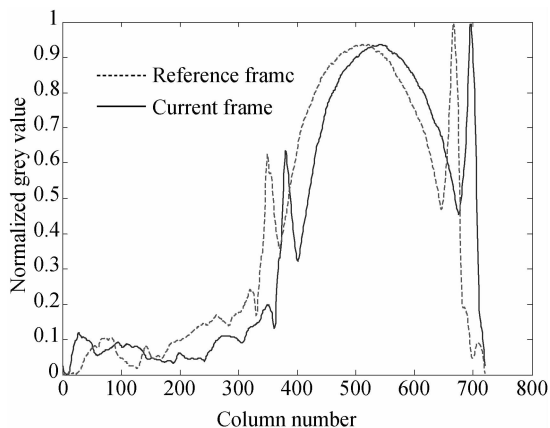
针对上述问题,本文对现有圆周投影算法进行了如下改进:(1)在获得每帧图像的圆周投影之前先滤除极坐标图像的边缘信息;(2)采用分段相关的方法进行帧间投影向量匹配,最大程度地消除因投影曲线某处‘畸变’产生的运动估计错误。文中提出了一种基于位平面金字塔的自适应取块的平移运动参数估计方案,用于有效改善含有较大运动前景的抖动视频。最后提出一种自适应分组的限幅加均值复合滤波方式,在修正可能出现的错误运动估计的同时,自适应选择均值滤波窗口以达到最佳的运动滤波效果。

2 改进的圆周投影法

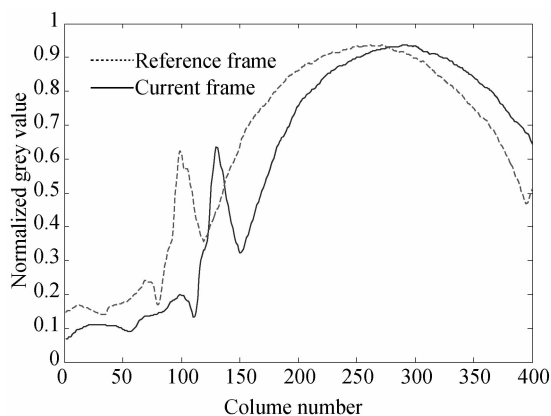
相比于旋转运动,图像帧间的平移运动更易估计,因此圆周投影法^[7-8]在估计帧间旋转运动参数时,首先进行原始图像的极坐标变换,将笛卡尔坐标系下的旋转运动转换成极坐标下的平移运动;然后进行极角轴上的梯度投影^[5],即圆周投影;最后,通过投影向量的帧间相关匹配确定旋转运动参数。



(a) 参考帧
(b) 当前帧
(a)Reference frame
(b)Current frame



(c) 传统的极坐标系圆周投影曲线
(c)Circular-projection curves in traditional polar coordinates



(d) 剔除图像边缘的相邻帧圆周投影曲线
(d)Modified circular projection curves after eliminating edge

图 1 改进的圆周投影法

Fig. 1 Modified circular-projection

实际上,由于每帧图像的边缘处都会包含一部分新信息,通过极坐标变换和极角轴梯度投影后,得到的圆周投影向量会因包含边缘新信息而导致帧间相关性变差,如图 1 所示。图 1(c)为相邻 2 帧图像(图 1(a)和图 1(b))的圆周投影曲线,显然投影曲线 2 在首尾附近的相关性变差。当图像的抖动程度增加时,这种边缘新信息的比重变大,使得投影曲线的相关性更低,最终会使匹配估计结果产生错误,因此在进行圆周投影向量相关

之前,要滤去图像的边缘新信息。实际中,可采用余弦滤波方法对极坐标图像进行处理,从而保留图像中间区域,降低边界信息的幅值。但考虑算法的实时性,本文采用直接剔除边界的方式来实现。由于相邻帧间的运动量一般小于图像自身长、宽尺寸的 15%,所以在图像长宽方向上各剔除 15%的外围边界量。

视频图像中的运动前景同样会影响相关匹配的准确性。由于运动前景在相邻图像帧中的位置不同,反映到相应的圆周投影曲线上,体现为某一段处的‘畸变’,导致最终的匹配错误。对此,本文提出一种分段相关匹配的方法加以解决,即将当前帧的圆周投影向量均分为 n 个等长子向量,取每一子向量在参考帧投影向量对应位置附近移动,通过相关度确定旋转运动参数,相关度算法如式(1)所示:

$$R(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2) = \frac{\text{cov}(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2)}{\sigma(\mathbf{V}_1)\sigma(\mathbf{V}_2)}. \quad (1)$$

其中: $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$ 为 2 个投影向量。

在获得的 n 个旋转运动估计中,相关性较差导致的错误估计结果往往是其中的最小值或最大值,所以去除 n 个估计中 2 个最大值和 2 个最小值,取其余 $n-4$ 个估计值的平均值作为当前帧相对于参考帧的最终旋转运动参数。为了保证有效分离错误估计结果,对于分段数 n 的选择不能太小;但如果 n 太大可能会导致 n 个估计结果中错误估计所占比例较多,剔除较为困难,同时计算量也相应增加。本文通过多次实验取 $n=10$ 。

3 基于位平面金字塔的自适应取块法

块匹配是估计平移运动的主要手段,为了减小前景的局部运动对图像全局运动估计时产生的不利影响,要尽量避免匹配块取自图像运动前景上,对于含较大或较多运动前景的抖动视频,传统的固定位置取块模式已无法适用。针对此类抖动视频,本文提出一种自适应取块策略,主要思路是稳像系统以不同取块模式下块匹配运动估计结果的统计特性为判断准则,确定最佳取块策略。同时为了最大限度地减小决策过程中的计算量,引

入了位平面金字塔,且决策过程只在位平面金字塔顶层进行,后续其他层的取块模式和顶层相同。

3.1 图像位平面金字塔的构建

位平面图像是灰度图像的一种二进制分解。图像每一像素的灰度值在数字存储器中以二进制的形式存储,所有二进制像素同一权位上的数组成的二值平面即为图像的位平面。由于仅涉及二值运算,采用位平面将提高图像处理本身的速度。

文献[3]中提到的分层位平面构造方法,在构造每帧图像的位平面金字塔时,首先采用均值滤波的方式构造每帧图像的 3 层灰度金字塔(如式(2)所示),而每帧图像的位平面金字塔的顶层采用该帧灰度金字塔顶层的第 5 位平面,中间层采用灰度金字塔中间层的第 6 位平面,底层采用灰度金字塔底层的第 7 位平面。

$$f_k^{(l+1)}(x,y) = \frac{1}{4} \sum_{m=0}^1 \sum_{n=0}^1 f_k^{(l)}(2x+m, 2y+n), \quad (2)$$

其中: $f_k^{(l)}(x,y)$ 表示第 k 帧图像的灰度金字塔第 l 层($l=0,1,2$)中坐标为 (x,y) 对应的像素值。

3.2 自适应取块的运动估计

匹配块位置的选择首先在默认取块模式,即第一类型取块模式下进行。第一类型取块模式主要基于大多数含有较大运动前景的抖动视频中,考虑运动前景往往处于图像的中心位置的事实,因此第一类型取块方式为在图像周边的内外 2 个矩形框上进行均匀取块。

用上述取块模式进行运动估计并不适用于运动前景在图像边缘处的抖动视频,如航拍和交通监控视频,这种视频图像边缘常会存在车辆的出入。在这些情况下,运动前景可能出现在图像中心附近,针对这一情况规定第二类型取块模式,即在图像的正负对角线附近选择若干匹配块。

通过大量实验可知,上述 2 种取块模式已能够包含绝大多数含较大或较多运动前景的抖动视频。但每种取块模式下,并非所有的匹配块都能选择在背景上,那些取自运动前景上的少量匹配块产生的局部运动估计结果将在后续的处理过程中通过滤波去除。

稳像系统会根据实际块匹配估计结果的统计特性在上述 2 种取块模式间自适应地进行选择,

具体流程如图 2 所示。下面就流程图 2 中的几个关键点作如下说明:

(1)在当前帧位平面金字塔顶层自适应确定取块模式的具体方法为:首先,默认为第一类型取块模式。若当前帧位平面金字塔顶层 N 个匹配块所得到的 N 个运动估计矢量中相同结果出现的频数小于 k ($0 < k < 1$),说明匹配块有可能取自图像周边的运动前景上,则该取块模式不当,系统切换为第二类型取块模式。本文基于实验给出 k 的推荐值为 $1/3$ 。

(2)在已确定取块模式的情形下,对于由少数仍然取自运动前景上的匹配块所得的估计矢量进行滤除,具体方法是:所有匹配块得到的 N 个运动估计矢量中,若相同矢量的频数大于 k ,此估计矢量则为全局运动估计,其余估计矢量则认为是取自运动前景得到的局部运动估计。在向金字塔下层传递时,只传递全局运动估计。

(3)位平面金字塔某一层利用上一层传递来的估计矢量进行小范围精匹配。假设当前帧位平面金字塔顶层将块匹配运动估计结果 $\Delta \mathbf{x}^{(2)}$, $\Delta \mathbf{y}^{(2)}$ 传给中间层,则对于中间层,首先按对应取块模式将每一匹配块移动到相邻帧金字塔中间层的 $(2\Delta \mathbf{x}^{(2)}, 2\Delta \mathbf{y}^{(2)})$ 位置处,再进行小范围精匹配;在获得的 N 个估计矢量中,将出现频数高于 k 的平移矢量 $(\Delta \mathbf{x}^{(1)}, \Delta \mathbf{y}^{(1)})$ 传递给当前帧位平面金字塔底层以进一步精匹配。

(4)以相邻 2 帧位平面金字塔中间层($f_{k-1}^{(1)}$ 和 $f_k^{(1)}$)为例说明位平面上每一匹配块获得估计运动矢量的方法。假设第 k 帧位平面金字塔中间层 $f_k^{(1)}$ 上的第 i 个($i=1,2,\dots,N$)匹配块 $B_{(k,i)}^{(1)}$ 在 $f_{k-1}^{(1)}$ 内的对应位置附近移动,寻找平均不匹配度最小值,此时 $B_{(k,i)}^{(1)}$ 的移动向量 $(\Delta \mathbf{x}_i^{(1)}, \Delta \mathbf{y}_i^{(1)})$ 则为对应估计矢量。

平均不匹配度计算方法如下:

$$C(\Delta \mathbf{x}_i^{(1)}, \Delta \mathbf{y}_i^{(1)}) = \frac{1}{WH} \sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H B_{(k,i)}^{(1)}(w,h) \oplus B_{(k+1,i)}^{(1)}(w + \Delta \mathbf{x}_i^{(1)}, h + \Delta \mathbf{y}_i^{(1)}), \quad (3)$$

其中: W 、 H 分别表示匹配块的宽度和高度。

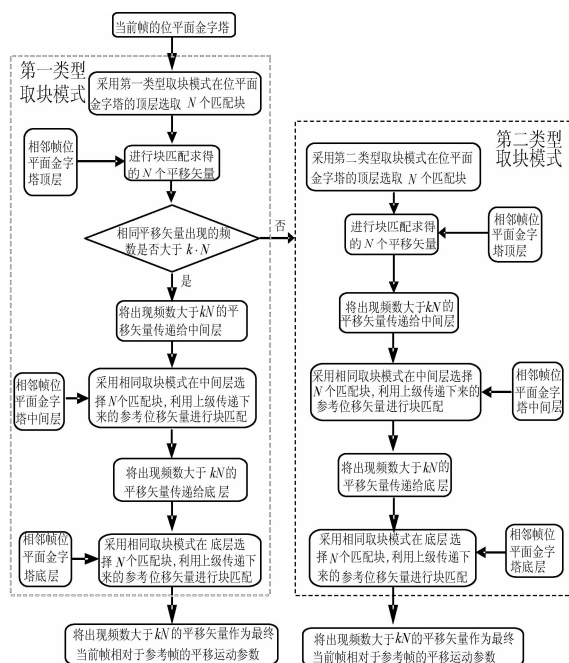


图 2 自适应取块帧间平移运动参数估计流程

Fig. 2 Flowchart of parameter estimation for translation motion between frames by using adaptive block matching

4 自适应分组的复合滤波方法

对运动估计结果滤波是提取视频图像的随机全局抖动,进而通过补偿获得稳定的视频。而实际上,所有的图像运动估计方法都要求图像具有比较丰富的灰度信息,对于灰度信息不满足要求的视频图像,将会出现错误的运动估计结果。另外,考虑到算法的实时性要求,必须采用计算复杂度低的方法,而均值滤波方法算法简单,耗时短,正好满足要求。但该算法的滤波效果和滤波窗口的选择有直接关系,如何针对不同的抖动程度选择合适的滤波窗口,以达到最佳滤波效果是采用该算法必须要解决的问题。

基于以上几方面考虑,本文提出一种自适应分组的限幅和均值的复合滤波算法,具体内容如下:

(1) 自适应确定当前组的处理帧数。以组为滤波处理单位,当前组处理帧数即为滤波窗口,窗口的大小主要取决于实际运动曲线的抖动程度,这里以上一组运动估计结果的最大值作为参考。如果此值超过某一阈值,说明图像抖动程度较大,则窗口选择小点的值以提高滤波灵敏度;反之,增大滤波窗口以提高滤波结果的平滑程度。同时为

了保证组与组之间图像无跳变平稳过渡,取上一组经过运动补偿的最后一帧为该组的首帧图像。

(2) 对当前组首先进行限幅滤波以修正错误运动估计。对错误运动估计的判断可先预设一可信阈值区间,如果某一帧间运动估计不在相应区间内,则需修正。修正的方法为采用与该错误估计值相邻的前后 2 个帧间运动估计均值代替该值。限幅滤波完成之后再使用均值滤波对运动估计结果进行平滑。

5 实验结果及评价

在 CPU 为 Intel Pentium B960,主频为 2.20 GHz 的 PC 机上进行试验。分别对所拍摄的有较大旋转抖动的视频和含有较大运动前景的抖动视频进行稳像,验证稳像效果。

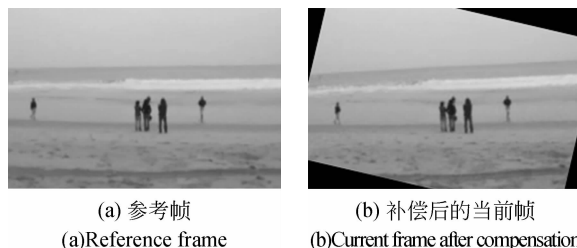
5.1 对于大角度旋转抖动的稳像结果

视频 1 中含较大的旋转抖动,取帧间旋转抖动程度较大的相邻 2 帧图像(360 pixel×540 pixel),如图 1(a)和 1(b)所示。采用不同方法对上述 2 帧图像进行旋转运动估计,对比结果如表 1 所示。表 1 中数据表明,改进的圆周投影法得到的旋转运动估计结果更接近于角点匹配结果。结合改进前后的圆周投影曲线(图 1(c),1(d))可知,图像边缘效应影响了现有圆周投影法的匹配精度,而改进的方法较好地克服了此因素的影响,最终旋转补偿结果如图 3(b)所示。

表 1 几种方法对于旋转运动估计的结果对比

Tab. 1 Comparison of estimation results for rotary motions by using different methods

旋转运动估计方法	估计结果	处理时间
	/ (°)	/s
基于仿射模型的 Harris 角点匹配	13.49	0.3
现有圆周投影法	10.15	0.024
改进的圆周投影法	13.15	0.024



(a) Reference frame (b) Current frame after compensation

图 3 旋转补偿结果

Fig. 3 Results of rotation compensation

5.2 含大运动前景的抖动视频的稳像

抖动视频 2 描述的是一辆电动车离开视场的过程,取不同时刻的 2 帧图像验证大运动前景下自适应取块的运动参数估计过程,如图 4(a)、4(b)所示。

在进行自适应取块的平移运动估计之前,首先利用改进的圆周投影法进行旋转运动的估计并进行补偿,旋转补偿后的图像如图 4(c)所示。

构建图 4(c)的位平面金字塔,并在顶层确定块模式。选择第一类型取块模式,取块方式如图 5(a)所示,匹配块个数 $N=79$ 。

顶层块匹配统计结果如图 5(b)和 5(c)所示。图 5(b)中水平运动估计值 $\Delta x^{(2)} = 1$ 对应的最大频数值为 16,仅占该图运动估计总数的 20.2%。图 5(c)所示的垂直运动估计值 $\Delta y^{(2)} = 5$ 对应的最大频数为 11,出现频数同样不足 $N/3$ 。所以该模式下估计结果 $(\Delta x^{(2)}, \Delta y^{(2)})$ 的可信度低,应选择第二类型取块模式。



图 4 含大运动前景的 2 帧图像
Fig. 4 Images contained large-scale moving foreground

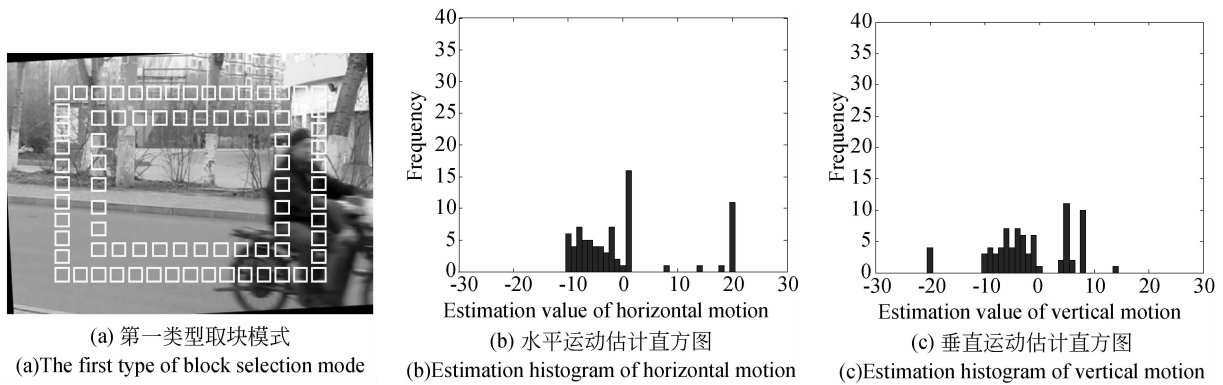


图 5 第一类型取块模式平移运动估计
Fig. 5 Translational motion estimation based on the first type of block selection mode

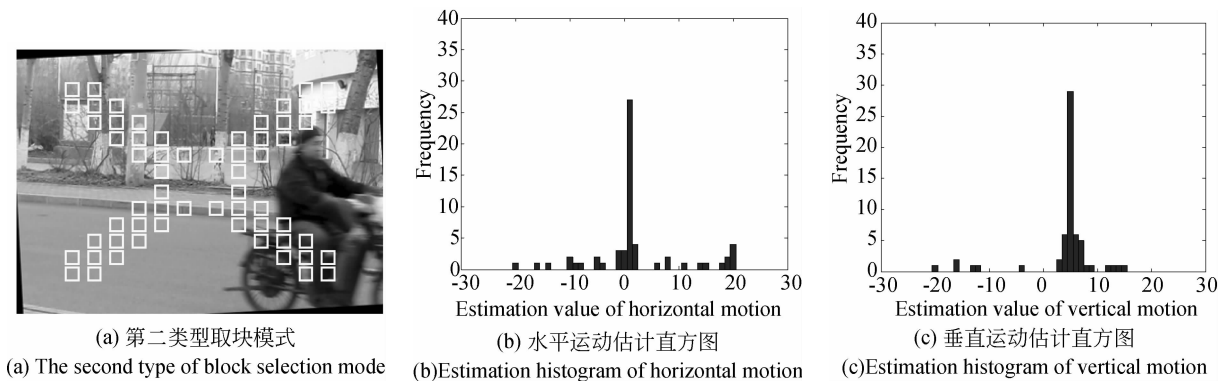


图 6 第二类型取块模式平移运动估计
Fig. 6 Translational motion estimation based on the second type of block selection mode

上述取块模式对应的运动估计结果出现了较大分散性,这主要有以下几点原因:(1)在第一类型取块模式下,匹配块有较大一部分取自运动前景,这些块估计结果为图 5(b)和 5(c)中第二大频数对应估计值;(2)图像左下部分处存在灰度特征不丰富的区域,其上的匹配块在匹配过程中会出现误匹配。

第二类型取块模式如图 6(a)所示,匹配块个数为 60。所有块的水平和垂直运动估计直方图分别如图 6(b)和 6(c)所示。由图 6 可知,水平和垂直运动估计统计结果最大频数对应的估计值分别为 $\Delta x^{(2)}=1, \Delta y^{(2)}=5$,相应频数分别为 27、29。频数出现次数均超过 $N/3$,所以在金字塔顶层按第二类型取块模式得到的运动估计值(1,5)为该层的全局运动估计,将其传递到中间层再进行精匹配。

基于位平面金字塔方法采用第二类型取块模式得到图像的全局运动估计参数对图 4(c)进行平移运动补偿,补偿后的图像如图 7(b)所示。

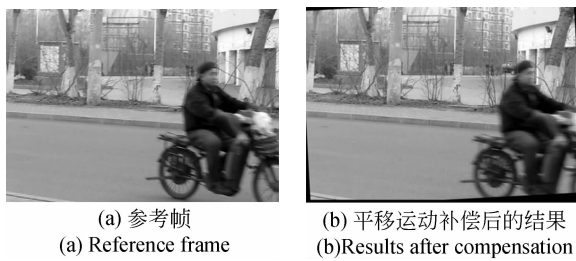


图 7 平移运动补偿后的图像
Fig. 7 Compensation results of translational motion

5.3 自适应分组对旋转和平移运动进行复合滤波

对视频 1,根据视频的抖动程度确定当前组的处理帧数。本文中抖动阈值取为 8 pixel。当前一组经过限幅滤波后的最大帧间运动参数大于此阈值时,当前组的处理帧数取 10;反之,当前组的处理帧数取 15。X 轴和 Y 轴方向限幅滤波的可信阈值区间均设为 $[-25, 25]$,旋转估计的可信阈值区间设为 $[-20^\circ, 20^\circ]$ 。旋转(前 40 帧)、平移运动估计自适应复合滤波结果分别如图 8、图 9 和图 10 所示。

图 9 表明,垂直方向运动估计结果在第 30 帧附近出现了估计错误,其估计值不在可信阈值区间范围内,系统在复合滤波过程中进行了校正。同时从运动估计范围来看,平移运动估计范围要大于 20 pixel。

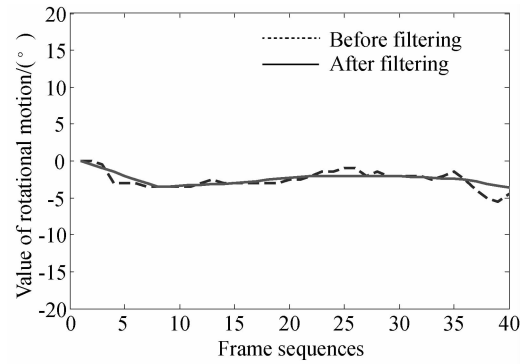


图 8 滤波前后的旋转运动曲线
Fig. 8 Rotational motion curves before and after filterings

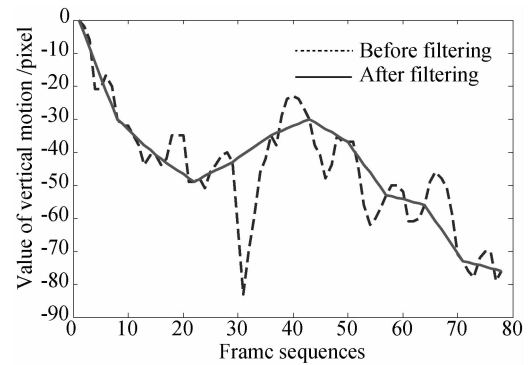


图 9 垂直方向滤波前后运动曲线
Fig. 9 Motion curves in vertical before and after filterings

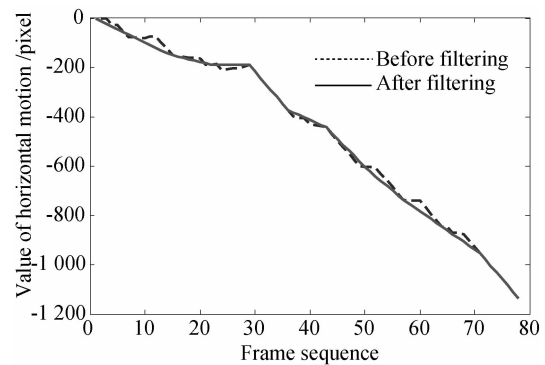


图 10 水平方向滤波前后运动曲线
Fig. 10 Motion curves in horizontal before and after filterings

5.4 稳像性能对比与评价

分别采用 Harris 角点匹配法与本文提出的方法对视频 2 的图像序列进行运动参数估计,并对稳像范围、处理速度和平均峰值信噪比(PSNR)等指标进行了对比,结果如表 2 所示。

表 2 不同稳像方案结果对比

Tab. 2 Comparison of image stabilization results by using different methods

稳像方案	平移估计 范围/pixel	旋转估计 范围/(°)/(frame · s ⁻¹)	处理速度	PSNR/ dB
本文方法	>20	>13	30	31.08
Harris 方法	10	>10	5	33.32

由表 2 的实验数据可以看出,与特征点匹配的电子稳像方案相比,本文所提出的自适应电子稳像方法既可以抑制大范围旋转和平移抖动视频的抖动,又具有较高的稳像精度,同时也满足实时性的要求。

6 结 论

本文在剔除极坐标图像边缘的基础之上对圆

周投影算法进行了改进,采用分段灰度相关匹配的方式进行旋转运动估计,从而解决了大范围旋转运动的估计问题。其次,针对含有较大或较多运动前景抖动视频,提出了基于位平面金字塔的自适应取块平移运动估计方案,克服了前景运动目标对平移运动估计结果的影响。最后,提出了一种基于自适应分组的复合滤波方式,在校正错误估计的同时,达到了良好的运动平滑滤波效果。实验结果表明:改进后的圆周投影法在估计帧间大角度旋转抖动时鲁棒性和准确性都有较大提高,所提出的自适应取块的平移运动估计方法不但适用于含较大或较多运动前景的抖动视频,而且对图像灰度特征不丰富的视频也有较好的适应性。稳像结果的 PSNR 可达到 31.08 dB,视频质量得到明显改善。

参考文献:

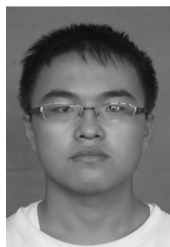
- [1] 赵红颖, 金宏, 熊经武. 电子稳像技术概述[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 353-359.
ZHAO H Y, JIN H, XIONG J W. A brief description of electronic image stabilization techniques [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 353-359. (in Chinese)
- [2] 罗诗途, 王艳玲, 张玘, 等. 车载图像跟踪系统中电子稳像算法的研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(1): 95-103.
LUO SH T, WANG Y L, ZHANG Q, *et al.*. Electronic image stabilizing algorithm for image tracking system on vehicle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 95-103. (in Chinese)
- [3] 郭宝龙, 朱娟娟, 孙伟. 电子稳像的分层位平面全局运动估计算法[J]. 光子学报, 2009, 38(11): 2993-2998.
GUO B L, ZHU J J, SUN W. Hierarchical bit-plane global motion estimation for image stabilization [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11): 2993-2998. (in Chinese)
- [4] 张坤, 许廷发, 王平, 等. 高精度实时全帧频 SURF 电子稳像方法[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1964-1972.
ZHANG K, XU T F, WANG P, *et al.*. Real time full frame digital image stabilization system by SURF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1964-1972. (in Chinese)
- [5] YANG J L, SCHONFELD D, MOHANED M. Robust video stabilization based on particle filter tracking of projected camera motion [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technol.*, 2009, 19(7): 945-954.
- [6] 王智慧, 王敬东, 李鹏, 等. 一种基于 KLT-RANSAC 全局运动估计的电子稳像算法研究[J]. 光电子技术, 2012, 32(1): 46-55.
WANG ZH H, WANG J D, LI P, *et al.*. Research on electronic image stabilization based on KLT-RANSAC global motion estimation [J]. *Opto. Electronic Technology*, 2012, 32(1): 46-55. (in Chinese)
- [7] 蔡昌金, 李友毅, 朱明. 基于圆周投影匹配的电子稳像技术研究[J]. 压电与声光, 2009, 31(3): 341-343.
CAI CH J, LI Y Y, ZHU M. Research of electronic image stability based on the circular projection matching [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2009, 31(3): 341-343. (in Chinese)
- [8] XIE T, ZHU B, XIE L J, *et al.*. A circular-projection based digital image stabilization algorithm and its implementation for rotating image sequences [C]. *International Conference on Signal Processing Proceedings*, 2010: 1236-1239.
- [9] LIU K X, QIAN J, YANG R K. Block matching

- algorithm based on RANSAC algorithm [C]. *International Conference on Image Analysis and Signal Processing*, 2010:223-227.
- [10] XI L D, LIN X G. Digital image stabilization based on circular block matching [J]. *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, 2006, 52 (2): 566-574.
- [11] 邱家涛,李玉山,初秀琴,等. 稳定运动物体视频的特征方法[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2300-2307.
- QIU J T, LI Y SH, CHU X Q, *et al.*. Feature-based approach for stabilizing videos with moving objects[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2300-2307. (in Chinese)

作者简介:



逄晓光(1972—),男,山西临汾人,博士,副教授,2004年于西北工业大学获得博士学位,主要从事成像制导、计算机视觉与飞行器控制方面的研究工作。E-mail: dixiaoguang@hit.edu.cn



靳万鑫(1992—),男,山西偏关人,主要从事计算机视觉与视频处理方面的研究工作。E-mail: jinvansin@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)