

基于自适应补偿的电子稳像方法

尹丽华^{1,2,3,4}, 李范鸣^{1,2,4}, 刘士建^{1,2,4}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京, 100049;
3. 上海科技大学, 上海 200031; 4. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要:基于车载的光电系统在采集图像的过程中,载车的随机振动会导致视频序列发生抖动,需要通过稳像技术来消除。为解决传统电子稳像方法中存在帧间跳变、机械性选择参考帧,以及边缘信息丢失的问题,提出了一种基于自适应补偿的电子稳像方法。首先,自适应地更新参考帧,后续帧与更新的参考帧进行特征点的提取和匹配,并通过参数迭代方法求解相对于第1帧的全局运动参数;然后,区分不同的全局运动参数:旋转角度、水平、垂直方向的偏移量,并通过运动滤波从全局运动参数中分离出扫描运动,补偿随机抖动;最后,采用后向映射方式实现运动补偿,并运用图像镶嵌,即利用参考基准帧的信息对校正后图像的边缘信息进行补偿。实验结果表明:稳像后视频序列有很好的视觉稳定效果,且提高了峰值信噪比(PSNR)和帧间变换保真度(ITF)。本文的方法具有很好的鲁棒性,在不同的视频场景下都可以实现稳像,可以满足稳像的精度要求。

关键词:电子稳像;自适应;参数迭代;图像镶嵌;PSNR

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.11.020

Electronic image stabilization method based on adaptive compensation

YIN Li-hua^{1,2,3,4}, LI Fan-ming^{1,2,4}, LIU Shi-jian^{1,2,4}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. ShanghaiTech University, Shanghai 200031, China;
4. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai 200083, China)

Abstract:In order to solve the problems of interframe hopping, mechanically selecting reference frame, missing edge information in traditional electronic image stabilization method, an electronic image stabilization method based on adaptive compensation is proposed. Firstly, the reference frame is updated adaptively, and feature points are extracted and matched for the follow-up frames and updated reference frame, then the global motion parameters relative to the first frame can be solved through parameter iteration method. Secondly, different global motion parameters are distinguished, such as rotation angle, horizontal and vertical offset, the scanning movement was isolated from the global motion parameters by filtering and the random jitter can be compensated. Finally, motion compensation can be achieved by backward mapping and image mosaic, namely compensating the image edge information according to the basis reference frame of information. Experimental results indicate that the video sequence after image stabilization has good stable visual effect with higher PSNR and ITF. The method has good robustness, and can achieve image stabilization under different video scenes, which meets the precision requirements.

Key words:electronic image stabilization; adaptive; parameter iteration; image mosaic; PSNR

1 引言

电子稳像技术^[1-3]的目的是消除图像全局运动

中的无意的随机抖动,运动估计和运动补偿是影响稳像精度的关键环节。

基金项目:国家 863 计划资助项目(No. 2011AA7031002G);中国科学院上海技术物理研究所创新基金项目(No. CX-122)资助。

作者简介:尹丽华(1988-),女,博士研究生,主要从事数字图像处理及电子稳像方面的研究。E-mail:1098606535@qq.com

收稿日期:2017-03-24;**修订日期:**2017-05-14

运动估计环节需要确定当前帧相对参考帧的全局运动偏移量。目前,常用的特征点^[4-5]提取算子包括 Harris 算子^[6]、Noble 算子^[7]、BRISK 算子^[8]、SIFT 算子^[9]、SURF 算子^[10]等,结合抗前景干扰^[11]策略可以进一步提高运动估计精度。接着通过对全局运动参数进行运动滤波^[12],分离出随机运动分量。运动补偿方式主要采用固定帧补偿和相邻帧补偿。黄文娟^[13]等人提出的参考帧选择策略,虽然在一定程度上解决了视频突变的问题,但不具有自适应性。随着摄像机的运动,视频中的无定义区域不断增大,影响稳像的视觉效果^[14-15]。所以,对未定义区域^[16]的处理方法将直接影响稳像的效果。常用处理方法预留丢失区域为黑框,但该方法视觉效果较差;扩展补偿后的图像到整个屏幕,图像的分辨率会降低。

针对以上问题,本文提出了一种基于自适应补偿的电子稳像方法,将 SURF 特征点匹配对数与匹配阈值关系作为参考帧更新与否的条件;通过迭代方法求取相对于补偿基准帧的全局运动参数;通过运动滤波分离出扫描运动,补偿随机的抖动而保留扫描运动;最后,通过图像镶嵌,即利用参考基准帧的信息对校正后图像边缘信息进行补偿。

2 基于自适应补偿的稳像原理

2.1 基于自适应补偿的稳像过程

图 1 是基于自适应补偿的稳像方法流程图。

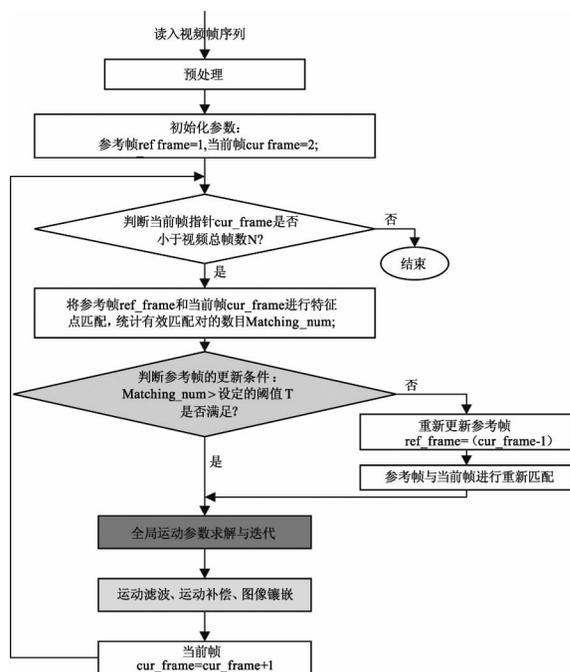


图 1 基于自适应补偿的稳像方法流程图

Fig. 1 Flow chart of image stabilization method based on adaptive compensation

本文稳像方法包括:预处理、运动估计、参考帧的自适应更新、全局运动参数的迭代、运动滤波、运动补偿、图像镶嵌。其中,参考帧的自适应更新、全局运动参数的求解与迭代以及图像镶嵌是本方法的关键环节。各环节的基本介绍如下:

- 图像预处理:通过直方图均衡化、滤波等提高红外图像的信噪比;
- 运动估计:确定当前帧相对参考帧的全局运动偏移量;
- 参考帧的自适应更新:判断参考帧与当前帧的匹配对数与匹配阈值 T 的关系,确定是否需要更新参考帧;
- 全局运动参数的求解与迭代:以第 1 帧图像为补偿的基准帧,通过迭代方法公式求当前帧相对于第 1 帧的全局运动参数;
- 运动滤波:从全局运动参数中分离出随机抖动,并补偿随机抖动而保留有意的主运动;
- 运动补偿:通过最近邻插值或双线性插值的方式实现运动补偿;
- 图像镶嵌:利用参考基准帧的信息对校正后图像的边缘信息进行补偿。

2.2 预处理与运动估计

首先进行预处理,比如直方图均衡化、滤波等,从而提高图像的信噪比;然后,通过运动估计环节确定当前帧相对于参考帧的全局运动偏移量,采用 SURF 算法提取参考帧和当前帧的特征点,利用 KLT 算法进行特征点的初匹配,并通过 RANSAC 算法剔除大量的误匹配对。

2.3 参考帧的自适应更新

针对固定参考帧更新问题,本文提出了参考帧的自适应更新准则,具体如下:将当前帧 cur_frame 与参考帧 ref_frame 进行特征点匹配,并统计有效的匹配对数目 $Matching_num$,通过分析 $Matching_num$ 与匹配阈值 T 的关系,如果满足条件 $Matching_num < T$,则参考帧更新为 $(cur_frame-1)$,否则,参考帧保持不变。

匹配阈值 T 的选取也是关键,理论上求解相似模型需要 3 对匹配对,实际上为计算最小二乘解,需要的匹配对数要远远大于 3,结合参考帧中 SURF 特征点的数目 $num0$ 设定匹配阈值 T ,则匹

配阈值 T 一般取 $T = \lfloor \frac{\text{num}0}{3} \rfloor$, 其中符号“ $\lfloor \cdot \rfloor$ ”为向下取整。

2.4 全局运动参数的求解与迭代

为求解全局运动参数, 采用相似模型, 该模型可描述摄像机的平移、旋转和变焦, 关系如下:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} &= s \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{Ref}} \\ y_{\text{Ref}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} tx \\ ty \end{bmatrix} \\ &= R_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + T_i \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\begin{bmatrix} x_{\text{Ref}} \\ y_{\text{Ref}} \end{bmatrix}$ 为参考帧中的特征点坐标; $\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}$ 为当前帧中的匹配点坐标; s 为变焦系数(一般 $s = 1$); θ 为旋转角度; tx 、 ty 分别表示水平、垂直方向的偏移量。当旋转角度 $\theta < 5^\circ$ 时, $\cos\theta \approx 1$, $\sin\theta \approx \theta$, 可通过最小二乘法得到参数: θ 、 tx 、 ty 。

为克服帧间跳变的问题, 本文将第 1 帧作为补偿的基准帧, 全局运动参数求解的迭代公式如下:

$$X_n = R_n X_{\text{Ref}} + T_n = \dots = \widetilde{R}_n X_1 + \widetilde{T}_n \quad (2)$$

式中, $X_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix}$; $X_{\text{Ref}} = \begin{bmatrix} x_{\text{Ref}} \\ y_{\text{Ref}} \end{bmatrix}$; $(\widetilde{R}_n, \widetilde{T}_n)$ 为第 n 帧图像相对第 1 帧图像的全局运动参数; X_{Ref} 为第 n 帧图像对应的参考帧, 初始化参数 R_1 和 T_1 :

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则旋转矩阵 \widetilde{R}_n 的迭代公式为:

$$\widetilde{R}_n = R_n \cdot \prod_{i=1}^{len} R_{(\text{ref}(i))} \quad (4)$$

平移矩阵 \widetilde{T}_n 的迭代公式为:

$$\text{If } len \leq 1, \quad \widetilde{T}_n = T_n + R_n \cdot T_{(\text{ref}(len))} \quad (5)$$

$$\text{Else } \widetilde{T}_n = T_n + R_n \cdot T_{(\text{ref}(len))} + \sum_{i=len-1}^1 (R_n \cdot T_{(\text{ref}(i))} \cdot \prod_{j=\text{ref}(len)}^{\text{ref}(i+1)} R_j) \quad (6)$$

式中, len 为第 n 帧之前的所有参考帧数目; ref 为第 n 帧之前的所有参考帧。利用公式(4)、(5)或(6)可得到当前第 n 帧与第 1 帧之间的累积变换的全局运动参数 $(\widetilde{R}_n, \widetilde{T}_n)$, 图 2 是第 1 帧担任补偿基准的示意图。

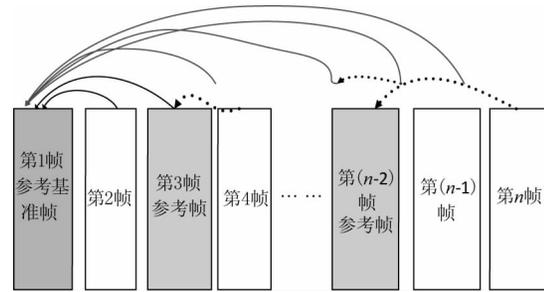


图 2 第 1 帧担任补偿基准的示意图

Fig. 2 Diagram of first frame as compensation reference

2.5 运动滤波

通过运动估计得到的全局运动参数, 并不能直接用于运动补偿, 需要通过运动滤波方法^[12,17]从全局运动参数中分离有意的主运动和无意的随机抖动, 具体可采用均值滤波或卡尔曼滤波。

2.6 图像补偿

2.6.1 运动补偿

通过运动滤波可以得到待补偿的全局运动参数 $V' = (\hat{R}_n, \hat{T}_n)$, 其中 $\hat{R}_n = \widetilde{R}_n$, $\hat{T}_n = \widetilde{T}_n - \widetilde{T}_{scan}$, \widetilde{T}_{scan} 表示当前帧的扫描运动矢量, 具体补偿关系如下:

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \hat{R}_n \begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} + \hat{T}_n \quad (7)$$

后向映射的补偿方式如图 3 所示, 从源图像 $f_n(x_n, y_n)$ 得到校正后图像 $f'_n(x'_n, y'_n)$, 对最终图像 $f'_n(x'_n, y'_n)$ 进行逐个像素的扫描、计算, 得到其在源图像中对应的非整数坐标 (x_n, y_n) , 然后采用最近邻插值方式实现图像的补偿。当同时满足条件 $1 \leq \lfloor x_n \rfloor \leq \text{row}$ 和 $1 \leq \lfloor y_n \rfloor \leq \text{col}$ 时, 其中, row 和 col 分别为图像的行数和列数, 采用如下补偿方式:

$$f'_n(x'_n, y'_n) = f_n(\lfloor x_n \rfloor, \lfloor y_n \rfloor) \quad (8)$$

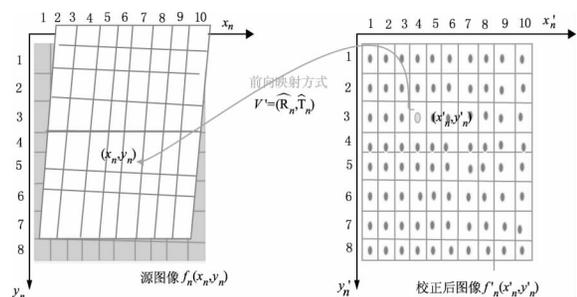


图 3 后向映射的补偿方式

Fig. 3 Backward mapping compensation

否则, 利用参考基准帧的信息进行图像镶嵌, 弥

补当前校正帧的边缘信息。

2.6.2 图像镶嵌

随着摄像机的扫描运动,稳像后的图像会丢失其边缘信息,本文提出图像镶嵌的方法,利用参考基准帧的信息弥补当前帧的边缘信息。具体原理如下:通过公式(2)和(7)经推导可得到当前帧的校正图像与参考基准帧的坐标之间满足如下关系:

$$\widetilde{R}_n X_n' = \widetilde{R}_n (X_1 + \widetilde{R}_n^{-1} \cdot \widetilde{T}_{scan}) \quad (9)$$

其中, \widetilde{R}_n^{-1} 为 \widetilde{R}_n 的逆矩阵。令 $\widetilde{Temp} = \widetilde{R}_n^{-1} \cdot \widetilde{T}_{scan}$, 则图像镶嵌的公式为:

$$f_1(x_n' - \lfloor \widetilde{Temp}(1) \rfloor, y_n' - \lfloor \widetilde{Temp}(2) \rfloor) \quad (10)$$

其中, x_n' 和 y_n' 分别满足 $1 \leq (x_n' - \lfloor \widetilde{Temp}(1) \rfloor) \leq row$ 和 $1 \leq (y_n' - \lfloor \widetilde{Temp}(2) \rfloor) \leq col$ 。

2.7 稳像的评价指标

本文采用主观评价方法、峰值信噪比^[13] (PSNR)、帧间变换保真度 (ITF) 评价稳像效果。

峰值信噪比 (PSNR) 方法:

$$PSNR(I_1, I_0) = 10 \log \frac{I_{max}^2}{MSE(I_1, I_0)} \quad (11)$$

式中, I_{max} 是最大亮度值; $MSE(I_1, I_0)$ 表示参考帧与当前帧之间的均方差, 峰值信噪比 PSNR 值越大, 表示帧间灰度差越小, 稳像效果越好。

帧间变换保真度 (ITF) 方法:

$$ITF = \frac{1}{N_{frame} - 1} \sum_{i=1}^{N_{frame}-1} PSNR(i) \quad (12)$$

式中, N_{frame} 表示视频的总帧数; $PSNR(i)$ 是连续两帧 ($i, i+1$) 的峰值信噪比。ITF 可有效衡量帧间的平滑度。

3 实验结果与分析

通过车载光电成像系统采集的视频序列, 红外图像的大小为 288×800 , 图像位数 14 bit, 前 15 帧作为下文的实验数据源。

3.1 运动估计与全局运动参数的求解

首先, 图像进行预处理; 然后, 参考帧和当前帧进行 SURF 特征点提取, 通过 KLT 算法对特征点进行初匹配, 采用 RANSAC 算法进行大量误匹配对的剔除, 匹配准确率可以达到 95.3%。

参考帧的自适应更新结果与匹配阈值 T 选取有关, 当 $T=30$, 前 15 帧中更新的参考帧为: 第 1 帧、第 4 帧、第 6 帧、第 10 帧、第 13 帧, 即 $ref = [1, 4, 6, 10, 13]$ 。通过迭代公式(4)、(5)、(6)可求解当前帧相对于第 1 帧的全局运动参数 ($\widetilde{R}_n, \widetilde{T}_n$), 则第 5 帧的全局运动参数迭代结果为:

$$\widetilde{R}_5 = R_5 R_4 R_1 \quad (13)$$

$$\widetilde{T}_5 = R_5 R_4 T_1 + R_5 T_4 + T_5 \quad (14)$$

而第 7 帧的全局运动参数迭代结果为:

$$\widetilde{R}_7 = R_7 R_6 R_4 R_1 \quad (15)$$

$$\widetilde{T}_7 = R_7 R_6 R_4 T_1 + R_7 R_6 T_4 + R_7 T_6 + T_7 \quad (16)$$

则相对于第 1 帧的水平偏移量 $\widetilde{tx}_n = \widetilde{T}_n(1)$, 垂直偏移量 $\widetilde{ty}_n = \widetilde{T}_n(2)$, 旋转的角度 $\widetilde{\theta}_n = \arctan(-\frac{\widetilde{R}_n(1,2)}{\widetilde{R}_n(1,1)})$ 。

3.2 运动滤波的实验

相对于第 1 帧的全局运动参数为 ($\widetilde{\theta}, \widetilde{tx}, \widetilde{ty}$), 水平偏移量 \widetilde{tx} 存在有意的运动需要通过运动滤波(均值滤波或卡尔曼滤波)方法分离出扫描运动 $\widehat{scan_tx}$, 得到需要补偿的随机抖动 \widehat{tx} (即 $\widehat{tx} = \widetilde{tx} - \widehat{scan_tx}$), 对于旋转角度 $\widetilde{\theta}$ 、垂直偏移量 \widetilde{ty} 属于随机抖动, 是需要通过稳像技术消除的抖动。对水平方向的运动矢量进行均值或卡尔曼滤波的结果分别如图 4 所示。

滑动窗口长度为 3 ($m=3$) 的均值滤波器的模型为:

$$\widehat{scan_tx}_k = \frac{1}{3} \times (\widetilde{tx}_k + \widetilde{tx}_{k-1} + \widetilde{tx}_{k-2}) \quad (17)$$

卡尔曼滤波器的模型如下:

状态方程:

$$S(k) = \Phi \cdot S(k-1) + w(k) \quad (18)$$

量测方程:

$$Z(k) = H \cdot S(k) + v(k) \quad (19)$$

其中, 状态矢量为 $S(k) = [dtx(k); dtvx(k)]$; 观测矢量为 $Z(k) = [dtx(k)]$; 过程噪声为 $w(k) \sim N(0, Q_k)$; 量测噪声为 $v(k) \sim N(0, R_k)$, 在本实验

中, $W_k = \begin{bmatrix} \text{sigma}1^2 & 0 \\ 0 & \text{sigma}1^2 \end{bmatrix}$, $V_k = \text{sigma}2^2$, 且 $\text{sigma}1 = 0.01$; $\text{sigma}1 = 2$, 初始化状态值 $S(0) = [dx(0); 0]$ 和误差协方差矩阵 $P(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

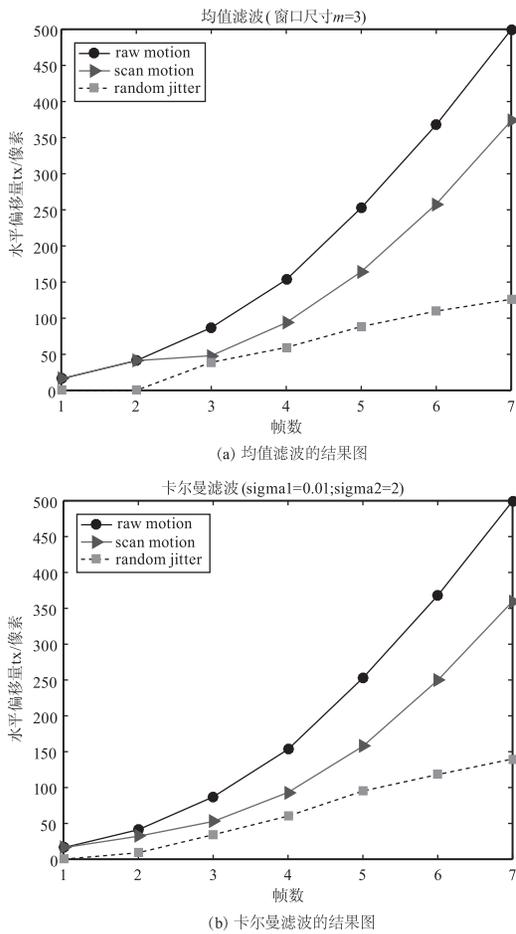


图4 滤波结果的对比

Fig. 4 Comparison of motion filtering results

通过图4可以看到,两种滤波器都能起到平滑的作用,但是卡尔曼滤波器受初始条件(状态噪声 Q ,量测噪声 R 、初始状态 $S(0)$ 、误差协方差 $P(0)$)的影响较大,所以,在本文实验最终选用均值滤波方式。

3.3 图像补偿的实验

图5是视频中第1~5帧原图像,将第1帧原图像作为补偿的基准帧,根据运动滤波得到的全局运动参数 $V' = (\hat{R}_n, \hat{T}_n)$ 反向补偿当前帧。

对于未定义区域,预留丢失区域为黑框的稳像结果如图6所示,以第2、4帧为例,由图6可以看出,预留丢失区域为黑框,影响稳像的视觉效

果,并且随着摄像机的抖动,未定义区域也会越来越大。



图5 原图像

Fig. 5 Original images

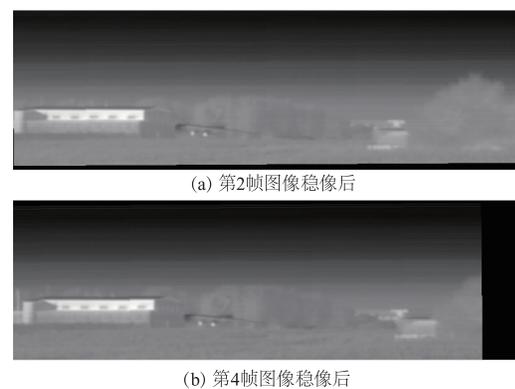


图6 无图像镶嵌的稳像结果

Fig. 6 Image stabilization results without image mosaic

为进一步改善稳像后的图像视觉效果,本文采用了图像镶嵌的方法,即利用参考基准帧的信息弥补当前帧的未定义区域的边缘信息,第2~5帧的稳

像补偿结果如图7所示。通过图5、图6与图7对比可以发现,基于自适应补偿的稳像方法可以很好地实现稳像目的,去除摄像机的随机抖动,保留摄像机的主动扫描运动,有效弥补了未定义区域的边缘信息,改善了稳像的视觉效果。

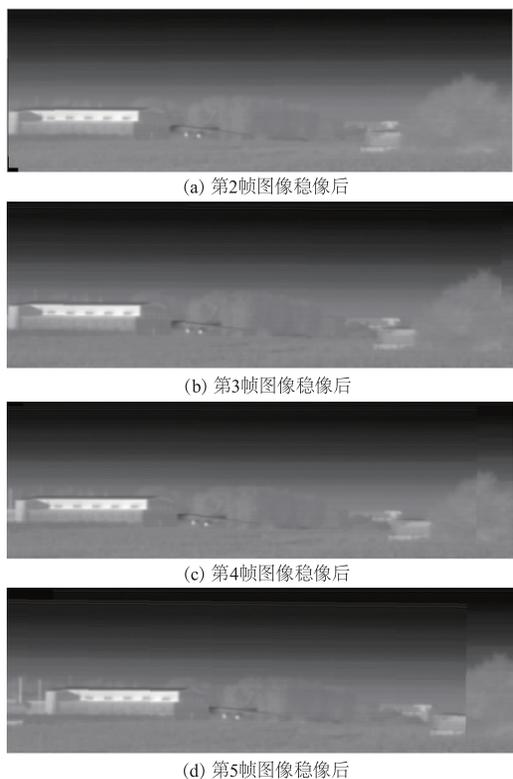


图7 加入图像镶嵌的稳像结果

Fig. 7 Image stabilization results by image mosaic

3.4 评价指标

首先,通过主观评价稳像的效果,通过图7可以发现,稳像后视频很好地补偿了摄像机的随机抖动,而保留了摄像机的有意的扫描运动,视频比较流畅,晃动情况明显得到改善。

然后,采用峰值信噪比(PSNR)评价稳像的效果,PSNR越大,稳像的效果越好。图8是稳像前后的PSNR值对比图,通过图8可以发现,稳像后的PSNR值得到明显提高,说明相邻帧的灰度差变小,图像得到很好的稳定。对于原始视频的平均PSNR为45.55 dB,而稳像后的PSNR值得到提高,平均PSNR为47.20 dB,稳像后的PSNR值平均提高了1.64 dB,相对于稳像前PSNR提高3.6%。

最后,采用帧间变换保真度(ITF)评价稳像的

效果。本实验中,选取3个场景下的视频(视频1、视频2,视频3),则稳像前后的ITF结果对比结果如表1所示。从表1结果可以看出,本文的稳像方法可以有效提高帧间变换保真度(ITF),视频2取50帧的时候,稳像后比稳像前ITF可以提高15.19%,说明该方法具有很好的运动平滑能力和鲁棒性,对不同的场景都能实现稳像的目的。

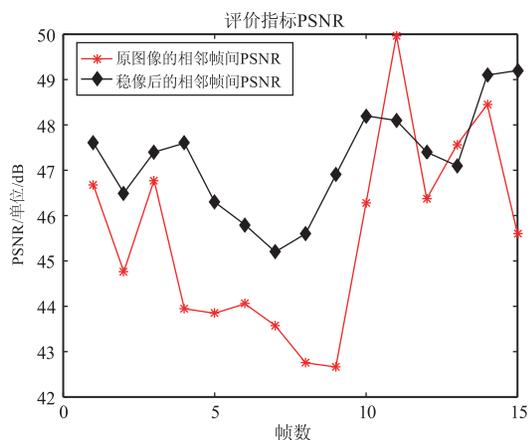


图8 稳像前后的PSNR值

Fig. 8 The PSNR values before and after image stabilization

表1 稳像前后的ITF值

Tab. 1 The ITF values before and after image stabilization

视频序号	总帧数:15帧		总帧数:30帧		总帧数:50帧	
	稳像前ITF/dB	稳像后ITF/dB	稳像前ITF/dB	稳像后ITF/dB	稳像前ITF/dB	稳像后ITF/dB
1	27.862	31.429	29.251	30.410	22.735	23.166
2	43.149	48.307	34.896	35.943	36.761	42.345
3	49.965	50.121	48.327	48.364	41.638	40.124

4 结论

针对传统电子稳像法存在帧间跳变、参考帧选择的机械性,以及边缘信息丢失的问题,提出了一种基于自适应补偿的电子稳像方法。首先,本文介绍了基于自适应补偿的稳像原理,并重点分析参考帧的自适应更新、全局运动参数的求解迭代、图像镶嵌;然后,进行了稳像实验的结果与分析,最后,通过主观评价、峰值信噪比(PSNR)、帧间变换保真度(ITF)评价基于自适应补偿的稳像效果的好坏。实验结果证明:稳像后的视频序列得到很好的稳定,且峰值信噪比(PSNR)提高了

3.6%, 帧间变换保真度 (ITF) 提高了 15.19%, 该方法对不同的视频场景都可以实现稳像, 基本可以满足稳像的精度要求。

参考文献:

- [1] QIU Jiatao. A Study of Electronic Image Stabilization Algorithms and Visual Tracking Algorithms[D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
邱家涛. 电子稳像算法和视觉跟踪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [2] LAI Lijun. The study of digital image stabilization technology[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
赖丽君. 电子稳像技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2016.
- [3] ZHU Juanjuan. Research on Theory and Application of Electronic Image Stabilization [D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
朱娟娟. 电子稳像理论及其应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [4] JI Shujiao, ZHU Ming, HU Hanping. Aero-borne electronic image stabilization based on feature point matching [J]. Chinese Optics, 2013, (06): 841 - 849. (in Chinese)
吉淑娇, 朱明, 胡汉平. 基于特征点匹配的电子稳像技术[J]. 中国光学, 2013, (06): 841 - 849.
- [5] CUI Changhao, WANG Xiaojian, LIU Xin. Electronic image stabilization algorithm based on feature points matching[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(9): 1119 - 1122. (in Chinese)
崔昌浩, 王晓剑, 刘鑫. 基于特征点匹配的电子稳像算法研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(9): 1119 - 1122.
- [6] WU Guonan, ZHOU Chaochao, YIN Wenbo. Electronic Image Stabilization Algorithm Based on Harris Corner and Modified Hu-moments [J]. Computer Engineering, 2013, 39(3): 300 - 305. (in Chinese)
吴国楠, 周超超, 尹文波. 基于 Harris 角点与改进 Hu 矩的电子稳像算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(3): 300 - 305.
- [7] CHU Shouyan, XI Zhihong. Digital image stabilization based on improved Noble feature matching[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(01): 204 - 212. (in Chinese)
初守艳, 席志红. 改进 Noble 算子匹配的电子稳像法[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(01): 204 - 212.
- [8] CUI Shaohui, XIE Zheng, WANG Gang, et al. Feature matching electronic image stabilization based on binary robust invariant scalable keypoints [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(9): 2715 - 2723. (in Chinese)
崔少辉, 谢征, 王刚等. 二进制鲁棒不变尺度特征匹配电子稳像[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(9): 2715 - 2723.
- [9] Qin H. Electronic image stabilization algorithm based on PCA-SIFT feature matching and self-adaptive high-pass filtering [C]. International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, 2014: 93011H - 93011H - 7.
- [10] WU Wei, XU Tingfa, WANG Yawei, et al. High precision digital image stabilization with full frame compensation. Chinese Optics, 2013, 6(3): 378 - 385. (in Chinese)
吴威, 许廷发, 王亚伟, 等. 高精度全景补偿电子稳像[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 378 - 385.
- [11] ZHU Juanjuan, FAN Jing, GUO Baolong. Adaptive Electronic Image Stabilization Algorithm Resistant to Foreground Moving Object [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, (06): 45 - 52. (in Chinese)
朱娟娟, 范静, 郭宝龙. 抗前景干扰的自适应电子稳像算法[J]. 光子学报, 2015, (06): 45 - 52.
- [12] WANG Bin, ZHAO Yuejin. Motion filtering algorithm for tracking technology based on image stabilization [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(01): 202 - 206. (in Chinese)
王斌, 赵跃进. 基于电子稳像跟踪技术的运动滤波算法[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(01): 202 - 206.
- [13] HUANG Wenjuan, WANG Jindong, XUE Chongfei, et al. The Reference Frame Selection Strategy in Electronic Image Stabilization [J]. Infrared Technology, 2016, 38(2): 163 - 167. (in Chinese)
黄文娟, 王敬东, 薛重飞, 等. 电子稳像中的参考帧选

- 择策略[J]. 红外技术,2016,38(2):163-167.
- [14] HUANG Chen, WANG Jianjun, GAO Xin, et al. . Study on Video stabilization performance assessment in electronic image stabilization[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(5): 477-481. (in Chinese)
- 黄晨, 王建军, 高昕, 等. 电子稳像中稳像质量评价方法研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(5): 477-481.
- [15] LU Gaojie, ZHANG Guohua, CHE Hong. Study of electronic image stabilization algorithm accuracy evaluation method[J]. Lightning and Control, 2011, (03): 76-79. (in Chinese)
- 吕高杰, 张国华, 车宏. 电子稳像算法精度评价方法研究[J]. 电光与控制, 2011, (03): 76-79.
- [16] Litvin A, Konrad J, Karl W C. Probabilistic video stabilization using Kalman filtering and mosaicing[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003, 5022: 663-674.
- [17] ZHANG Haojun. Research on Key Technologies for Infrared Image Restoration, Video Stabilization and Imaging System Based on Embedded System[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- 张浩钧. 红外系统中电子复原、稳像及嵌入式成像系统关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.