

文章编号 1004-924X(2024)22-3383-12

场景切换感知的地基成像系统电子稳像技术

宋力夺¹, 李洪文^{1*}, 王鸣浩¹, 杨轻云², 张世学¹, 王超¹

(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. 东北师范大学 前沿交叉研究院, 吉林 长春 130024)

摘要:在地基实况测量望远镜中,通常包含捕获和成像两组光学系统。望远镜使用捕获系统对目标闭环跟踪时,由于视场较大,跟踪精度低,可明显感受成像系统的视频抖动,不利于目标实时观察和相关科学实验。为解决上述问题,本文提出一种支持场景切换感知的电子稳像技术。首先,目标未出现时,通过最大连通区域法对每帧图像尝试提取目标特征区域,直至成功提取。接着,对于每帧图像,使用核相关滤波器对上一帧训练模型进行特征匹配,并更新训练模型。其次,使用最小二乘法拟合目标运动轨迹,通过误差分析判断目标真伪。最后,根据目标真伪判断结果,决定当前图像的裁剪是否使用抖动补偿。实验结果表明:经过该技术处理的视频,目标稳定性具有较大提升,相邻图像特征区域抖动幅度最大值从 ± 10 pixels降低至约 ± 1 pixel,使用前 50 帧图像作为参考帧的峰值信噪比平均提升 4.62 dB;同时算法能够感知目标进入和离开视场;算法处理时间小于 2 ms,满足实时处理需求。实现连续观测多目标的稳像流程自动化功能,提升相关科学实验的质量和成功率。

关键词:闭环跟踪;电子稳像;核相关滤波;最小二乘法;误差分析

中图分类号:TP391;TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243222.3383

EIS for ground-based imaging systems supporting scene switching perception

SONG Liduo¹, LI Hongwen^{1*}, WANG Minghao¹, YANG Qingyun², ZHANG Shixue¹, WANG Chao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. Academy for Advanced Interdisciplinary Studies, Northeast Normal University,
Changchun 130024, China)

* Corresponding author, E-mail: lihongwen@ciomp.ac.cn

Abstract: Ground based real-time measurement telescopes typically include two sets of optical systems for capture and imaging. When a telescope uses a capture system to track an object in a closed-loop manner, due to the large field of view and low tracking accuracy, the video jitter of the imaging system can be clearly felt, which is not conducive to real-time observation of the object and related scientific experiments. To address the aforementioned issues, this article proposed an electronic image stabilization technology that supports scene switching perception. Firstly, when the object did not appear, the maximum connected re-

收稿日期:2024-05-27;修订日期:2024-07-23.

基金项目:青年科学基金项目(No. 62305327);吉林省科技发展计划项目(No. 20210401162YY);中国科学院关键核心技术攻关项目(No. YZQT024)

gion method was used to attempt to extract the object feature region for each frame until it was successfully extracted. Then, for each image, a kernel correlation filter was used to match the features of the previous frame's training model, and the training model was updated. Next, the least squares method was used to fit the object motion trajectory and determine the authenticity of the object through error analysis. Finally, determined whether to use jitter compensation for cropping the current image based on the authenticity of the object. Experimental results indicate that the video processed by this technology has a significant improvement in object stability, the maximum jitter amplitude of adjacent image feature regions decreases from ± 10 pixels to approximately ± 1 pixel, the peak signal-to-noise ratio of reference frames within 50 frames is increased by an average of 4.62 dB; Simultaneously, the algorithm can perceive the object entering and leaving the field of view; The algorithm processing time is less than 2 ms, meeting the online processing requirements. Realize the automation of the image stabilization process for continuous observation of multiple objects, and improve the quality and success rate of related scientific experiments.

Key words: closed loop tracking; electronic image stabilization; kernel correlation filter; least squares method; error analysis

1 引言

地基光电望远镜成像系统主要分为近红外、短波红外、中波红外和长波红外 4 个波段,具有非常广泛的应用场景和研究价值。常见成像系统研究方向如:红外辐射特性测量^[1-2],飞行器姿态测量^[3-4]和目标跟踪^[5]等,在航空航天、科学研究、国防等领域起到重要作用。赵志刚等对近 20 年的国外中长波红外成像技术进行研究^[6],从单波段成像逐步发展到双波段融合成像。成像系统的稳定成像能力,尤其对于实时观测及测量系统,不仅影响到操作人员的用户体验,也直接影响相关科学实验的质量和成功率。

为呈现更大的远距离目标图像,同时展示更为丰富的细节,成像系统视场通常很小。此时需要望远镜控制系统具有更高的引导精度,否则会产生比大视场光学系统更为明显的视频抖动。但是在望远镜实际使用的过程中,往往不具备高精度引导条件。比如在网络外引导中,本地望远镜控制系统的引导精度取决于引导源的引导频率、引导数据精度及网络延迟等因素;此外,望远镜伺服控制系统使用编码器的精度,时统设备提供的时间精度,同样影响望远镜的引导精度。

近些年国内外在望远镜精密控制领域进行深入研究^[7]。如亓波等利用双快速控制反射镜融合的双重复合轴跟踪算法,可以有效提高跟踪精度^[8];陈阳等通过研究发现,时滞为影响精跟踪系

统精度的重要因素,并通过优化降低时滞带来的不利影响,提升跟踪精度^[9]。但上述方法需要从光学、机械结构和电路系统多学科配合设计实现,对光电系统设计要求较高。且在实际使用过程中发现,并非所有目标都具备粗跟踪条件,若目标无法进行粗跟踪,精跟踪和超精跟踪也难以顺利进行。

稳像技术近些年在智能手机、数码摄像机、汽车影像和无人机等消费类电子产品领域发展迅速,该技术也称视频防抖。稳像主要分为光学稳像(Optical Image Stabilization, OIS)和电子稳像(Electronic Image Stabilization, EIS),绝大多数产品使用光学稳像和电子稳像的混合策略。Yiming Wang 等对稳像技术近年来的发展和未来面临的挑战进行了分析总结^[10]。但电子产品无论从视频抖动形式、图像特点或者光路设计,都与光电望远镜有很大差别,比如光电望远镜不存在陀螺仪、加速度计、阻尼器等用于光学稳像的装置,本文以电子稳像方法作为主要研究方向进行深入探讨。传统电子稳像算法如块匹配法、位平面匹配法稳像效果一般且计算量大;Mesh-Flow 是一种基于网格光流的最小延时在线视频稳像算法^[11];Miao Wang 等提出一种基于卷积神经网络的低延时视频稳像解决方案 StabNet^[12];Yufei Xu 等研究一种基于无监督学习的视频稳像算法 DUT^[13],阿里达摩院对该算法进行优化,并将 DUT-RAFT 算法在 ModelScope 平台开源。

上述算法对电子产品的视频稳像处理具有良好表现,但并不适用于地基成像系统,具体原因将在 2.1 节进行分析。

因此,结合电子稳像技术和光电望远镜成像系统的自身特点,本文对适用于地基成像系统的稳像技术展开研究,旨在提供一种低成本,操作简单,且能够在多数目标场景完成最基本的实时稳像功能融合方法。为降低算法给计算机带来的性能损耗,尽可能选用光电望远镜图像处理系统中常用算法,如核相关滤波等,提高计算结果复用的可能性。但核相关滤波算法无法感知目标进入和离开视场,目标切换过程中特征区域提取错误会导致稳像功能失效。为解决上述问题,本研究通过图像处理、最小二乘法和误差分析等算法感知场景切换,最终实现能够感知场景切换的电子稳像技术。

2 问题分析与工作原理

2.1 视频抖动原因分析

在望远镜跟踪目标过程中,导致视频抖动的可能原因有多种,其中包括:望远镜引导数据不平滑,网络外引导时引导误差和网络拥塞,望远镜伺服控制器跟踪误差等。

本文实验中,导致视频抖动主要原因是:捕获分系统(大视场)的脱靶量提取精度低,在对目标进行脱靶量闭环跟踪时误差较大,导致同一设备上的成像分系统(小视场)出现明显的抖动。表 1 为捕获分系统和成像分系统主要光学指标对比。两个分系统的相机分辨率相同,但视场差距很大,捕获分系统的视场是成像分系统的 22 倍。

表 1 分系统主要指标对比

Tab. 1 Comparison of main indicators of subsystems

Parameters	Capture	Imaging
Camera resolution/pix	640×512	640×512
Field of view/(°)	1.6	0.073
Dimension/(arc sec·pix ⁻¹)	7.02	0.32

使用捕获分系统对望远镜闭环跟踪时,以常用的目标提取和质心计算方法,假设相邻图像水平和垂直方向的质心计算误差介于±0.5 pixels 之间,使用该质心计算的脱靶量对望远镜进行闭

环跟踪引导,望远镜引导会产生小于±3.5"的误差,由于视场差距,叠加大气扰动等其他因素的影响,成像分系统的图像抖动可能超过±10 pixels。

选取民航飞机作为实验对象,使用捕获分系统对该目标进行闭环跟踪。成像分系统(中波)对该目标成像如图 1 所示。

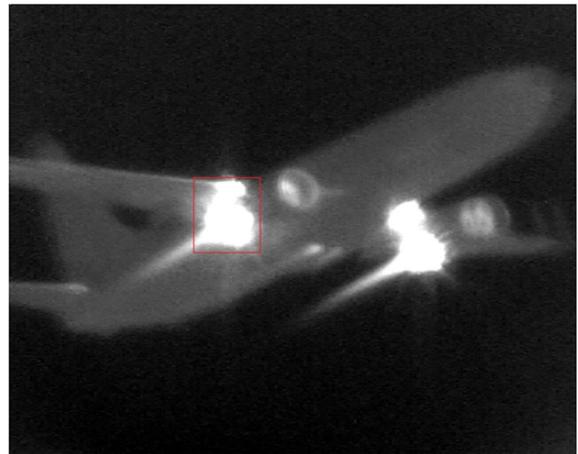


图 1 中波成像分系统成像示例

Fig. 1 Example of medium wave imaging subsystem

选取图 1 中红色方框作为特征区域(彩图见期刊电子版),将连续 300 帧图像匹配的特征区域求加权质心,每帧特征区域质心像素坐标 $(x_{c(i)}, y_{c(i)})$ 与前一帧 $(x_{c(i-1)}, y_{c(i-1)})$ 作差绘制曲线。特征区域质心的波动基本可以代表整个目标的抖动幅度,在图 2 中,相邻帧目标位置差距最大超过 10 pixels。

MeshFlow 和 StabNet 等电子稳像方法处理电子产品视频抖动通常具有良好表现,但地基成像系统图像和视频具有一定的特殊性,具体区别如下:

(1) 地基成像系统常用帧频为 50 Hz 或 100 Hz,算法总处理时间应小于 10 ms,还要考虑图像预处理和目标跟踪等算法,留给稳像算法时间有限。

(2) 地基成像系统观测图像通常为黑色背景、亮目标,图像特征主要集中在目标区域,而电子产品图像为彩色复杂背景,图像大部分区域均有特征。

(3) 地基成像系统视频抖动方式仅有水平和

垂直的位移抖动,主流电子稳像算法还需要解决旋转、翻转等其他形式的抖动。

(4) 地基成像系统中目标成像变化缓慢。所以评价稳像效果时,不能只以相邻帧作为参考帧进行评价。

(5) 地基成像系统只有目标进入视场后才具有稳像处理的必要性,无目标的纯背景视频不需要稳像处理或不关注稳像效果。

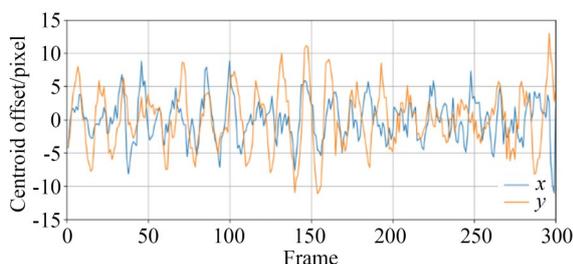


图2 特征区域质心波动图

Fig. 2 Feature region centroid wave diagram

判断场景切换的目的是提升稳像处理的成功率,4.2.1节将通过实验说明该能力的重要性,主要方法是确定目标是否进入或离开视场。目标进入视场的判断方法比较简单,将在3.1节中详细阐述。目前目标离开视场的主流判断方法使用卡尔曼滤波(Kalman filtering),范文兵等通过卡尔曼滤波对目标在图像中的运动轨迹预测判断目标是否被遮挡^[14]。但是基于图像内部的轨迹预测并不完全适用于本研究,原因如下:

(1) 本研究主要处理图像抖动问题,原始图像目标在图像内部水平和垂直的抖动幅度超过 ± 10 pixels,且不同目标在不同的引导方式下抖动幅度不等,无法以图像内部的轨迹预测判断其是否离开视场。

(2) 操作人员手动切换观测目标时,成像系统不会感知。如果视场中没有目标,核相关滤波器可能在视频中某一位置反复错误提取图像特征,导致卡尔曼滤波方法失效。

为此,本研究结合望远镜指向信息,通过图像处理,误差分析等方法,判断目标是否离开视场。

2.2 基本工作流程

图3为场景切换感知稳像技术数据流图。算法的2个输入分别为预处理图像和望远镜指向信息,输出为裁剪图像。其中:输入的预处理图像

为8位灰度图像,图像中有、无目标均可;输入的望远镜指向信息为图像曝光中心时刻的时间信息,以及望远镜伺服控制器反馈的方位轴和俯仰轴的编码器值;输出的裁剪图像,当目标存在时,目标在视频中的位置比原始视频更加稳定。

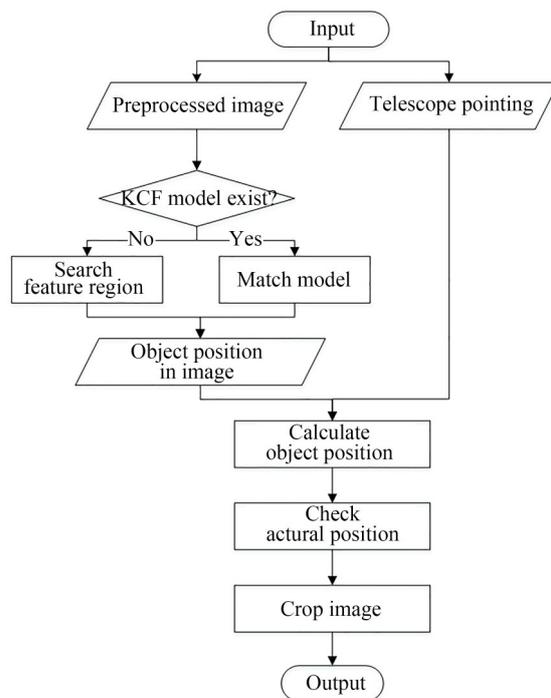


图3 算法数据流图

Fig. 3 Data flow diagram of algorithm

当算法接收到第 i 帧预处理图像和望远镜指向信息后,若第 $i-1$ 帧图像未得到核相关滤波模型,则进入目标搜索流程,否则进入目标匹配流程。

2.2.1 目标搜索流程

对于目标搜索流程,主要按照以下步骤进行:

(1) 选取最大连通区域。若最大连通区域像素数量小于阈值,则图像进行居中裁剪,流程结束;否则进入步骤(2)。

(2) 使用核相关滤波对该区域训练特征模型。

(3) 计算目标位置(特征区域质心的方位角和俯仰角)。

(4) 图像居中裁剪。

2.2.2 目标匹配流程

对于目标匹配流程,主要按照以下步骤进行:

- (1) 使用核相关滤波匹配特征区域。
- (2) 计算目标位置(特征区域质心的方位角和俯仰角)。
- (3) 将第 $i - n$ 帧至第 $i - 1$ 帧图像的目标位置拟合成目标运动轨迹。
- (4) 通过误差分析判断当前图像得到的特征区域是否为真实目标。若不是,则删除核相关滤波模型,图像进行居中裁剪,流程结束;否则进入步骤(5)。
- (5) 使用当前特征区域更新核相关滤波模型。
- (6) 抖动补偿裁剪。

3 稳像技术关键算法

3.1 特征区域选取

若目标尚未出现在视场中(或已有目标已经消失),需要对每帧图像进行特征区域选取。无论是否选取到特征区域,该图像都做居中裁剪,具体裁剪方法参考 3.5 节。图像特征区域选取方法采用最大连通区域法。如图 4,首先将预

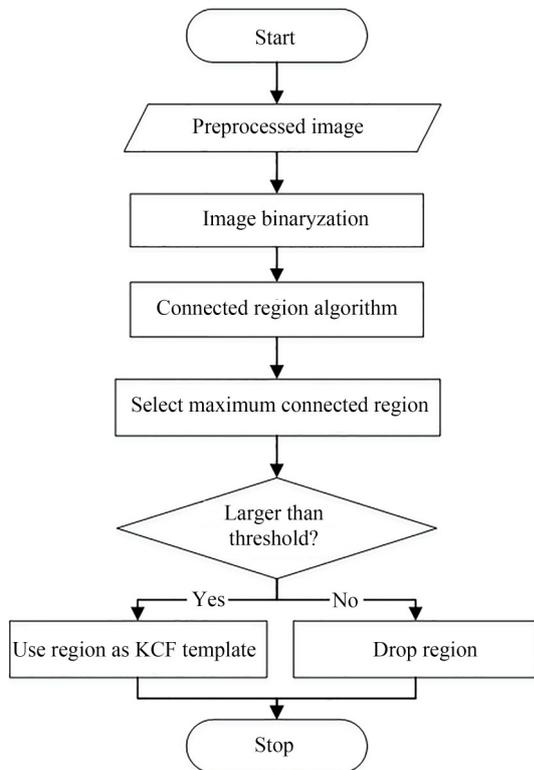


图 4 特征区域选取流程图

Fig. 4 Process diagram for feature region selection

处理图像做图像二值化^[15],再通过连通区域法^[16]找到所有连通域,从中找到像素数量最大的连通域。若像素数量大于阈值,则将其视为特征区域^[17],使用核相关滤波器训练特征模型,下一帧图像不再选取特征区域;若该区域像素数量小于阈值,可认为是噪声,结束稳像计算流程,下一帧图像重新选取特征区域。

3.2 核相关滤波

核相关滤波(KCF, Kernel Correlation Filter)是由 Henriques J F 等提出的经典理论^[18],属于判别式目标跟踪算法,是光电探测系统中常用的目标检测跟踪算法^[19-20]。

核相关滤波的主要工作原理是,首先选取一个目标(或特征区域),算法通过对窗口水平和垂直的循环位移获得大量训练样本,并以岭回归函数对这些样本进行训练。通过高斯函数计算目标区域的相关响应值,找到其中的最大响应值,可认为是目标位置。核相关滤波的原理和代码经过多年发展已经非常成熟,本文不对原理性内容做过多介绍。

本研究中,设当前图像为第 i 帧,核相关滤波主要分为以下两种使用情况。

(1) 若第 $i - 1$ 帧图像无特征模型,且当前帧已通过 3.1 节方法选出特征区域,则使用核相关滤波器将该特征区域训练为特征模型。

(2) 若第 $i - 1$ 帧图像有特征模型,核相关滤波器使用该特征模型提取第 i 帧图像的特征区域,并更新特征模型。

3.3 目标位置计算

光电望远镜系统在计算目标位置时,通常使用加权质心算法选取特征区域中心。该算法主要思想是,将特征区域外接矩形内的所有像素点进行加权平均。

加权质心计算公式如下:

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum_{(x,y) \in S} (I(x,y) \cdot x)}{\sum_{(x,y) \in S} I(x,y)} \\ y_c = \frac{\sum_{(x,y) \in S} (I(x,y) \cdot y)}{\sum_{(x,y) \in S} I(x,y)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: S 表示特征区域内所有像素点的集合, I 为预处理图像, (x_c, y_c) 即为该连通区域的质心。

计算加权质心后,由下式计算目标位置,方位(az)和俯仰(el):

$$\begin{cases} el_{\text{obs}} = el_{\text{enc}} - (y_c - h/2) \cdot dim_y \\ az_{\text{obs}} = az_{\text{enc}} + (x_c - w/2) / \cos(el_{\text{obs}}) \cdot dim_x \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $(az_{\text{obs}}, el_{\text{obs}})$ 表示目标方位轴和俯仰轴角度值; $(az_{\text{enc}}, el_{\text{enc}})$ 为图像曝光中心时刻方位轴和俯仰轴的编码器角度值; (x_c, y_c) 为目标特征区域的像素质心; w 和 h 为图像的宽和高, 单位为像素; 量纲(图像中每个像素表示方位和俯仰的角度)记为 dim_x 和 dim_y 。

3.4 目标真伪判别

当视场中存在目标时,由核相关滤波器匹配的特征区域通常为最优匹配。如果目标离开视场,核相关滤波器同样会提供一个匹配区域,在这里称为伪目标。本节通过对目标位置误差分析识别目标真伪,感知场景切换。

由 3.3 节计算的目标位置未必是真实目标,可将 $(az_{\text{obs}}, el_{\text{obs}})$ 当作测量值,误差计算公式如式(3):

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}. \quad (3)$$

此时真值未知。可将历史 n 帧图像(不包含当前帧)目标的轨迹分别拟合成方位和俯仰的一元二次轨迹方程:

$$\begin{cases} az = a_{az} \cdot t^2 + b_{az} \cdot t + c_{az} \\ el = a_{el} \cdot t^2 + b_{el} \cdot t + c_{el} \end{cases}. \quad (4)$$

由于方位和俯仰的轨迹方程计算方法相同,为使表述简洁,之后使用 l 表示 az 或 el , a 、 b 和 c 表示一元二次方程系数,得到残差方程:

$$v = l - (t^2 \cdot a + t \cdot b + c), \quad (5)$$

式中: t 为图像曝光中心时刻,在本实验中,相机采集图像使用恒定曝光外触发模式,时间 t 可使用帧号代替。可通过最小二乘法^[21]计算得到,正规方程见公式(6):

$$A^T A x = A^T y, \quad (6)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} t_{i-n}^2 & t_{i-n} & 1 \\ t_{i-(n-1)}^2 & t_{i-(n-1)} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{i-1}^2 & t_{i-1} & 1 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad y =$$

$$\begin{bmatrix} l_{i-n} \\ l_{i-(n-1)} \\ \vdots \\ l_{i-1} \end{bmatrix}, \quad i \text{ 为当前图像的帧号, } n \text{ 为使用历史图像}$$

的帧数。由于目标轨迹仅可以短时间内近似使用公式(4)表示,且 n 过大会导致更为复杂的矩阵运算,所以建议 n 的取值范围为 $10 \leq n \leq 20$, 且时间跨度不宜大于 1 s 。

为方便计算,后续使用残差 v 的绝对值表示误差,即:

$$\Delta = |v|. \quad (7)$$

目标运动轨迹受编码器采样精度、时间精度、目标距离、望远镜视场和大气扰动等因素影响,不能简单将 Δ 与某一固定阈值比较,该阈值大概率是动态变化的。在此借鉴最大误差法思想,根据公式(5)得到的残差方程,求得历史 n 帧目标位置的误差,记为: $\Delta_{i-n}, \Delta_{i-(n-1)}, \dots, \Delta_{i-1}$, 并得到最大误差值 Δ_{max} 。通过对比 Δ 与 $k \cdot \Delta_{\text{max}}$ 的大小确定目标的真伪。当 $\Delta \leq k \cdot \Delta_{\text{max}}$ 时,可认为是真实目标,否则认为是伪目标。在本实验中,令 $n = 20, k = 3$, 即可识别目标消失或场景切换的情况。

3.5 图像裁剪

如图 5 所示,预处理图像原图宽度为 w , 高度为 h , 抖动补偿裁剪时图像左右共裁剪 $r = r_1 + r_2$ 列数据, 上下共裁剪 $s = s_1 + s_2$ 行数据, 最终得到中间显示区域。为保证较好的稳像效果, 又不至于有明显的视场损失, 在本实验中, 设置 $r = w \times 0.1, s = h \times 0.1$ 。裁剪区域尺寸固定为, $w_{\text{crop}} = w - r, h_{\text{crop}} = h - s$ 。本节主要介绍裁剪区域左上角坐标 (x_i, y_i) 的计算方法。

3.5.1 无目标裁剪

当图像中没有目标时,无需关注图像稳像效果,此时使用居中裁剪。 $(r \times 0.5, s \times 0.5)$ 即为

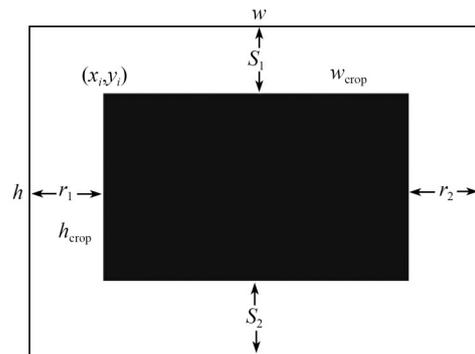


图 5 裁剪区域示意图

Fig. 5 Crop region diagram

裁剪区域左上角坐标值。

3.5.2 有目标裁剪

当目标进入视场,并使用3.1节方法获得其特征区域,图像裁剪区域使用居中裁剪,称该图像为首帧目标图像。

若当前图像为目标图像(非首帧),特征区域质心为 $(x_{c(i)}, y_{c(i)})$ 且已被认定为真实目标,则计算裁剪区域左上角坐标按照如公式(8):

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} + (x_{c(i)} - x_{c(i-1)}) \\ y_i = y_{i-1} + (y_{c(i)} - y_{c(i-1)}) \end{cases} \quad (8)$$

公式(8)通过对比第*i*帧及第*i*-1帧图像目标区域质心的偏差,计算第*i*帧目标图像裁剪的起始位置 (x_i, y_i) 。在实际使用时要考虑 (x_i, y_i) 是否导致裁剪越界的情况,并做出相应处理,本节不作讨论。

4 实验结果与分析

实验人员对民航飞机和国际空间站等目标进行连续观测实验。该算法嵌入至成像分系统

图像处理流程中,实验中使用捕获分系统对目标闭环跟踪,观察成像分系统显示终端视频稳像效果及场景切换感知能力。为对比算法处理前后的效果,同时将预处理图像序列,及每帧图像曝光中心时刻的编码器和时间信息记录下来。

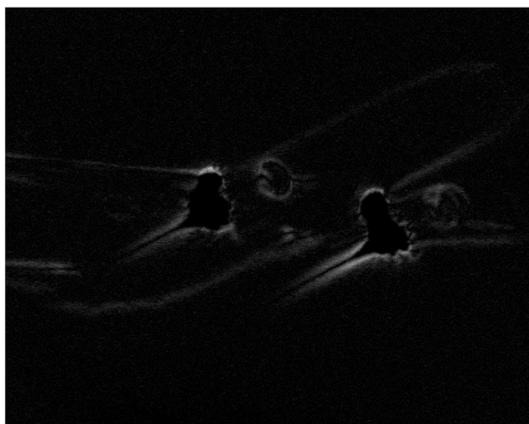
本章将从视频稳像效果,场景切换感知能力和算法性能3方面对该技术做出客观评价。

4.1 视频稳像效果

4.1.1 差分法

为将稳像效果的直观视觉感受呈现出来,分别将抖动补偿前后的图像序列相邻帧做差分运算,得到差分图像。在该方法中,若相邻图像差异越大,则残留的灰度值越大;反之灰度值残留越小。

如图6,(a)为原始视频的差分图像,分辨率为 640×512 ,该图中民航飞机的整体轮廓清晰可见,说明相邻图像差异大、抖动明显;(b)为经过抖动补偿的差分图像,分辨率为 576×460 ,该图像残留灰度值明显小于(a),说明相邻图像差异小、抖动现象视觉感受不明显。



(a) 未做稳像处理
(a) Without EIS



(b) 经过稳像处理
(b) After EIS

图6 相邻两帧差分图像

Fig. 6 Difference between adjacent two frames

4.1.2 峰值信噪比

峰值信噪比(PSNR, Peak signal-to-noise ratio)是常用作评价稳像效果的指标^[22]。公式如式(9)和式(10)所示:

$$MSE = \frac{1}{h \cdot w} \sum_{y=0}^{h-1} \sum_{x=0}^{w-1} (I(x, y) - K(x, y))^2 \quad (9)$$

$$PSNR = 10 \times \lg \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \quad (10)$$

其中： h 和 w 表示图像的高度和宽度像素值； $I(x, y)$ 和 $K(x, y)$ 分别表示当前帧和参考帧在像素点 (x, y) 的灰度值； MSE 即为均方误差； MAX_I 为图像最大灰度值； $PSNR$ 即为峰值信噪比。通常来讲，评价第 i 帧图像稳像效果时可将参考帧 K 定义为第 $i-1$ 帧图像，但考虑到地基成像系统目标视频特性，本实验将参考帧 K 的范围设定为 $i-1$ 帧至 $i-50$ 帧。本文稳像算法实验中命名为 KCF-Stab。

首先对比 KCF-Stab 与原始图像，如图 7，分别取参考帧为 $i-1$ ， $i-25$ 和 $i-50$ 绘制 PSNR 曲线。KCF-Stab 随着参考帧间隔增加，PSNR 相对稳定，原始图像 PSNR 曲线均值下降较快。

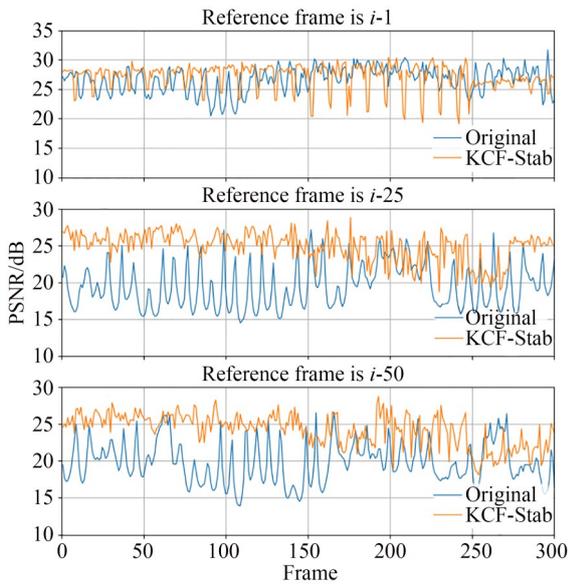


图 7 峰值信噪比对比曲线

Fig. 7 Comparison chart of PSNR

表 2 记录了 KCF-Stab 与原始图像的 PSNR 均值，可以发现，原始图像的 PSNR 均值随参考帧选取间隔增加而迅速下降，当参考帧选择 $i-50$ 帧时，下降至接近最小值。KCF-Stab 稳像效果相对稳定，优化明显，参考帧 50 帧以内的 PSNR 平均提升 4.62 dB。

图 8 展示 KCF-Stab 与其他稳像算法的效果对比，将每个算法生成的图片序列，分别以 $i-1$ 帧至 $i-50$ 帧为参考帧绘制 PSNR 均值曲线。从图中可以看出，尽管 KCF-Stab 在参考帧为 $i-1$ 时并不占有优势，但随着参考帧的前移，算法优

势快速增加。对于地基成像系统而言，目标观测视频持续稳定性更为重要。

表 2 峰值信噪比优化

Tab. 2 PSNR optimization (dB)

Reference	Original	KCF-Stab	Increase
$i-1$	26.63	27.10	0.47
$i-5$	20.11	25.49	5.38
$i-25$	19.43	24.90	5.47
$i-50$	19.84	24.26	4.42
Avg	20.34	24.96	4.62

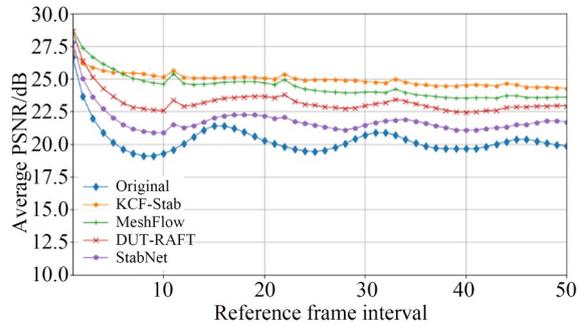


图 8 多种算法峰值信噪比对比

Fig. 8 PSNR Comparison by Multiple Algorithms

4.1.3 特征区域抖动曲线

再次使用图 2 中的方法，选取其他特征区域计算加权质心绘制抖动曲线如图 9。相邻图像水平和垂直的波动最大值从超过 ± 10 pixels 降低至约 ± 1 pixels，稳像效果明显。

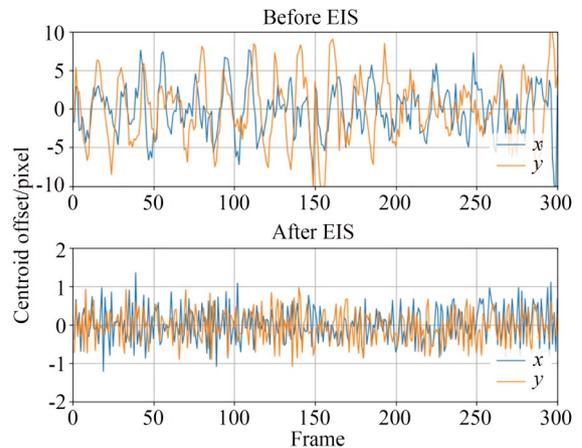


图 9 特征区域抖动对比曲线

Fig. 9 Feature region jitter comparison curve

4.2 场景切换感知能力

4.2.1 消融实验

为验证场景切换感知能力的必要性,对两个连续观测目标进行打开和关闭场景切换感知能力的对比实验。如图 10 所示,(a)为某民航飞机观测最后一帧完整图像,特征区域为右侧发动机位置,符合特征区域选择要求,稳像效果正常;

(b)为国际空间站(ISS)第 1 帧稳定跟踪图像,算法不具备场景切换感知能力,特征区域被核相关滤波器计算为图像右上角,稳像算法失效,视频发生明显抖动;(c)为国际空间站(ISS)第 1 帧稳定跟踪图像,此时算法具备场景切换感知能力,特征区域重新选择在左下角太阳能板处,稳像效果正常。

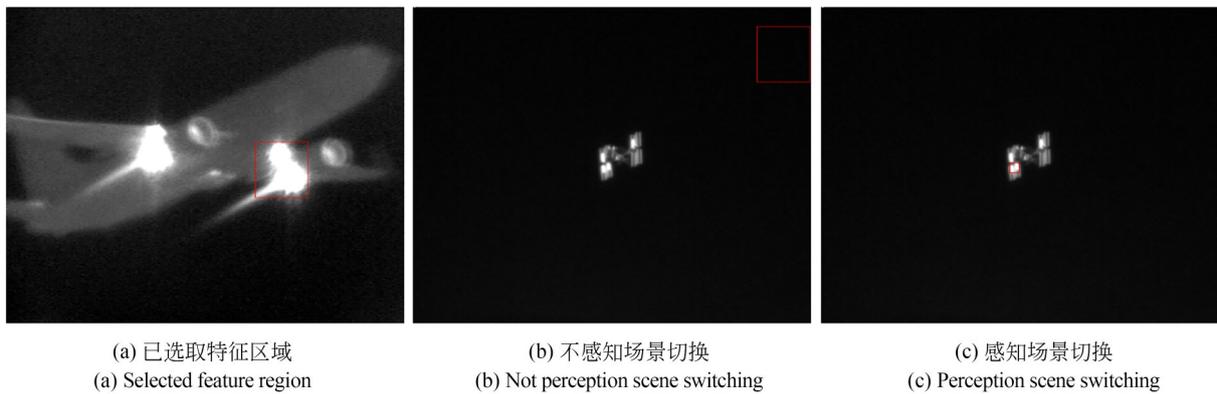


图 10 是否感知场景切换对比图

Fig. 10 Comparison for whether perceive scene switching

由实验可知,具备场景切换感知能力,目标切换后稳像算法大概率持续有效;否则切换目标后稳像算法可能失效,继续观测其他目标也将无法恢复。

4.2.2 目标进入视场

对于实验观测的不同距离和类型的有形状目标,其最大连通区域通常大于 100 pixels,本文所用民航飞机最大连通区域超过 5 000 pixels;再次使用该成像系统对天空背景进行观测,最大连通区域一般小于 40 pixels。若将阈值设为 80 pixels,可区分绝大多数有形状目标和纯天空背景图片。算法满足感知目标进入视场的要求。需要注意的是,预处理输入应为经过非均匀校正,背景均匀的图像,若探测器响应不均匀造成图像中存在大面积亮斑,会导致最大连通区域法对目标的错误提取。

4.2.3 目标离开视场

实验分别对主动切换观测目标和目标被遮挡等情况测试感知目标离开视场的能力,算法均能在目标离开视场后 2 帧内感知。

在本文 3.4 节所述目标真伪判别方法中,令

$n = 20, k = 3$,对当前图像目标位置测量误差进行分析。图 11 为某次观测目标特征区域被遮挡后首帧,轨迹残差绘制散点图。图中历史 n 帧图像的 $\Delta_{\max(az)} = 2.01''$, $\Delta_{\max(el)} = 5.33''$,当前图像 $\Delta_{az} = 35.36''$, $\Delta_{el} = 18.38''$,方位和俯仰误差满足 $\Delta > k \cdot \Delta_{\max}$,认为目标已经离开视场。

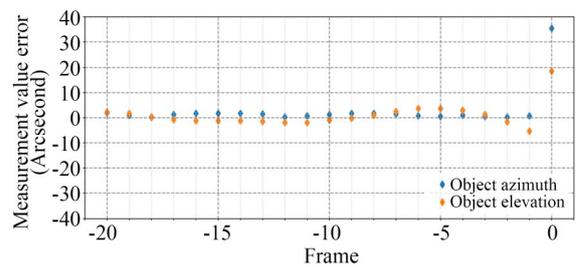


图 11 目标消失位置测量值误差

Fig. 11 Measurement error of object disappearance position

4.3 算法性能

表 3 中标注了主要算法处理平台信息,实验对主要算法流程耗时进行统计。目标搜索流程平均耗时 0.42 ms,目标匹配流程平均耗时 1.53 ms,其中核相关滤波算法耗时 1.28 ms,目

表 3 算法处理平台

Tab. 3 Algorithm processing platform

Module	Platform
CPU	Intel(R) Core(TM) i9-11900K@3.50 GHz
OS	Windows 10
Language	C++, OpenCV 4.9

标真伪判别耗时 0.25 ms。两个流程耗时均小于 2 ms, 满足 100 Hz 帧频的实时稳像处理要求。MeshFlow 和 StabNet 耗时超过 10 ms, DUT-RAFT 属于离线视频处理算法, 均不符合要求。

4.4 实验总结

无论从稳像效果还是算法性能来看, 本文提出的 KCF-Stab 稳像技术在地基成像系统中均优于其他主流算法。但必须说明的是, 该技术并不适用于手持设备或无人机等电子产品。地基成像系统观测目标的图像和视频具有一定的特殊性, 决定了 KCF-Stab 的良好表现。

5 结 论

本文以地基实况测量望远镜成像系统为例, 对地基成像系统的图像及视频特点进行详细分析。首先, 基于系统常用帧频并考虑已有的图像预处理和目标跟踪等算法, 确定稳像算

法的耗时应在 2 ms 以下; 跟踪过程中只关注有目标时段的稳像效果, 纯背景时段不关注; 有目标时段图像为黑色背景, 目标变化缓慢, 需关注一段时间内的目标稳定性; 视频抖动形式仅包含水平和垂直方向的位移抖动, 不包含其他形式。根据以上特点, 本文提出了一种基于核相关滤波的稳像方法, 该方法耗时短, 在目标平台平均耗时为 1.28 ms。该稳像方法成功提升了目标视频的连续稳定性, 使用前 50 帧图像作为参考帧的峰值信噪比平均提升 4.62 dB, 主要特征区域抖动幅度最大值从超过 ± 10 pixels 降低至约 ± 1 pixels, 改善效果明显。但核相关滤波算法无法识别目标进入和离开视场, 若观测场景切换可能引起目标提取错误进而导致稳像失效, 文章又通过图像处理的方法判断目标进入视场, 该方法耗时 0.42 ms, 利用望远镜指向信息确定目标观测位置, 使用误差分析的方法判断目标离开视场, 该方法耗时 0.25 ms。目标搜索流程和目标匹配流程耗时均小于 2 ms, 满足 100 Hz 帧频的实时稳像处理要求。通过上述方法, 实现了连续观测多目标的稳像流程自动化功能。不仅大幅提升望远镜操作人员的用户体验, 同时操作人员可将更多精力用于关注目标细节, 有效提升实验质量和成功率。

参考文献:

- [1] LI J Y, ZHAO H J, GU X F, *et al.* Analysis of space-based observed infrared characteristics of aircraft in the air [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15 (2): 535.
- [2] 贺元兴, 张浩元, 司文涛, 等. 空中目标红外辐射强度计算通用模型及其应用[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 182-187.
HE Y X, ZHANG H Y, SI W T, *et al.* General model for calculating infrared-radiation intensity of aerial target and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 182-187. (in Chinese)
- [3] YANG Y B, SUN S Y, HUANG J Q, *et al.* Large-scale aircraft pose estimation system based on depth cameras[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(6): 3736.
- [4] HUANG G, XIE J, GAO Z Y. Research on High Dynamic and High-Precision Attitude Position Measurement Technology for Aircraft[M]. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 2023.
- [5] 孙梦宇, 王鹏, 徐均琪, 等. 自适应信息选择的变尺度相关滤波红外目标跟踪算法[J]. *光子学报*, 2023, 52(12): 1210003.
SUN M Y, WANG P, XU J Q, *et al.* Adaptive information selection for infrared object tracking with variable scale correlation filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(12): 1210003. (in Chinese)
- [6] 赵志刚, 王鑫, 彭廷海, 等. 国外中长波双波段红外成像技术的发展及应用[J]. *红外技术*, 2020, 42 (4): 312-319.
ZHAO Z G, WANG X, PENG T H, *et al.* Status quo and application of middle and long wave dual-band infrared imaging technologies in Occident[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42 (4): 312-319. (in Chinese)

- [7] 唐涛,马佳光,陈洪斌,等. 光电跟踪系统中精密控制技术研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 200315.
TANG T, MA J G, CHEN H B, *et al.* A review on precision control methodologies for optical-electric tracking control system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200315. (in Chinese)
- [8] 元波,陈洪斌,任戈,等. 100km 量子纠缠分发实验捕获跟踪技术[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1628-1634.
QI B, CHEN H B, Ren G, *et al.* ATP technology for 100-kilometer Quantum Entanglement Distribution Experiment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1628-1634. (in Chinese)
- [9] 陈阳,赵子达,张书哲,等. 卫星激光通信精跟踪时滞预补偿技术(特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(7): 3788/LOP240795.
CHEN Y, ZHAO Z D, ZHANG S Z, *et al.* Fine tracking time delay compensation technology for space optical communication (invited) [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(7): 3788/LOP240795. (in Chinese)
- [10] WANG Y M, HUANG Q, JIANG C X, *et al.* Video stabilization: a comprehensive survey [J]. *Neurocomputing*, 2023, 516: 205-230.
- [11] LIU S C, TAN P, YUAN L, *et al.* *Meshflow: Minimum Latency Online Video Stabilization* [M]. LEIBEB, MATASJ, SEBEN, alet, eds. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 800-815.
- [12] WANG M, YANG G Y, LIN J K, *et al.* Deep online video stabilization with multi-grid warping transformation learning[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2018; 28(5): 2283-2292.
- [13] XU Y F, ZHANG J, MAYBANK S J, *et al.* DUT: learning video stabilization by simply watching unstable videos[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2022, 31: 4306-4320.
- [14] 范文兵,张璐璐. 基于核相关滤波和卡尔曼滤波预测的混合跟踪方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(02): 20-26.
FAN W B, ZHANG L L. A hybrid tracking method based on kernel correlation filtering and Kalman filter prediction[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Edition)*, 2024, 45(02): 20-26. (in Chinese)
- [15] 吕建威,钱锋,韩昊男,等. 结合天空分割和雾气浓度估计的图像去雾[J]. 光学精密工程, 2022, 30(4): 464-477.
LV J W, QIAN F, HAN H N, *et al.* Single image dehazing with sky segmentation and haze density estimation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(4): 464-477. (in Chinese)
- [16] 张超,时春霖,吴建霖,等. 面向视频测量机器人高噪声小视场星图的星点提取[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 193-202.
ZHANG C, SHI C L, WU J L, *et al.* Star extraction of high noise star map with small field of view based on video measurement robot[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, 58(2): 193-202. (in Chinese)
- [17] 李澜,巩彩兰,黄华文,等. 基于离散余弦变换的无人机耀斑图像恢复算法[J]. 光学学报, 2020, 40(19): 186-191.
Li L, Gong C L, Huang H W, *et al.* Unmanned Aerial Vehicle Glint Image Restoration Algorithm Based on Discrete Cosine Transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 186-191. (in Chinese)
- [18] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, *et al.* High-speed tracking with kernelized correlation filters [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(3): 583-596.
- [19] 杨德振,喻松林,冯进军,等. 机载复杂场景下的低虚警红外目标检测[J]. 光学精密工程, 2022, 30(1): 96-107.
YANG D Z, YU S L, FENG J J, *et al.* Low false alarm infrared target detection in airborne complex scenes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(1): 96-107. (in Chinese)
- [20] 刘耀胜,廖育荣,林存宝,等. 基于特征融合与抗遮挡的卫星视频目标跟踪方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2537-2547.
LIU Y S, LIAO Y R, LIN C B, *et al.* Feature-fusion and anti-occlusion based target tracking method for satellite videos [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 48(12): 2537-2547. (in Chinese)
- [21] DING F. Least squares parameter estimation and multi-innovation least squares methods for linear fitting problems from noisy data[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2023, 426:

115107.

- [22] LING X J, ZHOU Y J, PENG J X. Research on Video Image Stabilization Decision Algorithm Based on Roi Block Matching Method [C]. *Inter-*

national Conference on Computer Graphics, Artificial Intelligence, and Data Processing (ICCAID 2022). December 23 2022-January 25, 2023, Guangzhou, China. SPIE, 2023.

作者简介:



宋力夺(1987—),男,吉林长春人,硕士研究生,助理研究员,2012年于吉林大学获得硕士学位,主要从事望远镜精密跟踪及数字图像处理等研究工作。E-mail:songlido@sina.com

通讯作者:



李洪文(1970—),男,四川乐至人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要从事地基大型望远镜精密跟踪控制及总体技术。E-mail:lihongwen@ciomp.ac.cn