

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.02.08

无控制点场景下基于多运动目标的 卫星视频稳像算法

李睿瑄, 李峰*, 辛蕾, 杨雪, 张南

(钱学森空间技术实验室, 北京 100094)

摘要: 为了解决无控制点场景下现有卫星视频稳像算法失效的问题, 提出了一种基于多运动目标的卫星视频稳像算法, 该算法构建了目标检测、轨迹平滑和范数优化的框架, 将多目标卡尔曼滤波、rlowess轨迹平滑与L1-L2范数优化相结合, 最终实现卫星视频稳像。利用海上多目标舰船观测数据集开展实验, 结果表明基于多运动目标的卫星视频稳像算法在X、Y方向上的稳像误差均不超过0.3个像素, 验证了该算法的有效性。本研究填补了无控制点场景下卫星视频稳像的技术空白, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 无控制点场景; 卫星视频稳像; 多运动目标; 亚像元级; 卡尔曼滤波; rlowess平滑; L1-L2范数优化

中图分类号: TP751.1; TB9; V19 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2024) 02-0070-12

Satellite video stabilization algorithm based on multiple moving targets in no-control-point scenarios

LI Ruixuan, LI Feng*, XIN Lei, YANG Xue, ZHANG Nan

(Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To address the failure of existing satellite video stabilization algorithms in no-control-point scenarios, a satellite video stabilization algorithm based on multiple moving targets is proposed. This algorithm constructs a framework that integrates target detection, trajectory smoothing, and norm optimization by combining multi-target Kalman filtering, rlowess trajectory smoothing, and L1-L2 norm optimization, ultimately achieving satellite video stabilization. Experiments were conducted using a maritime multi-target ship observation dataset. The results show that the stabilization error of the proposed algorithm can be controlled within 0.3 pixels in both the X and Y directions, and validate the effectiveness of the algorithm. This study fills the technical gap in satellite video stabilization in no-control-point scenarios and has broad and significant engineering application value.

Key words: no-control-point scenarios; satellite video stabilization; multiple moving targets; sub-pixel level; Kalman filtering; rlowess smoothing; L1-L2 norm optimization

收稿日期: 2024-03-08; 修回日期: 2024-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(62205371); 国家重点研发计划项目(2020YFA0714101)

引用格式: 李睿瑄, 李峰, 辛蕾, 等. 无控制点场景下基于多运动目标的卫星视频稳像算法[J]. 计测技术, 2024, 44(2): 70-81.

Citation: LI R X, LI F, XIN L, et al. Satellite video stabilization algorithm based on multiple moving targets in no-control-point scenarios[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(2): 70-81.



0 引言

视频相机具有灵敏度高、时间分辨力高、成本低^[1]、可灵活调整成像积分时间^[2]的优点,对视频相机采集的图像进行超分辨力重建还可以进一步提升图像的清晰度^[3]。高轨卫星具有全天时观测的优点,利用高轨卫星搭载视频相机成像逐渐成为新的发展趋势。但这种成像方式存在一些问题,一方面,由于卫星轨道高度较高且平台姿态稳定度指标较低,导致光学系统轴线漂移量增大;另一方面,由于高轨卫星相较于低轨卫星的帧频较低,观测时会出现目标在像面上反复跳变的问题。同时,在对海面等空旷环境下的目标进行观测时,由于缺乏地面控制点信息,无法使用传统的基于控制点的算法对卫星视频进行稳像处理。为了实现卫星视频稳像,需要解决帧间的像元不一致性问题。

现阶段,国内外诸多学者针对视频稳像问题开展了研究。视频稳像技术包含三个关键步骤:全局运动矢量估计、运动补偿、稳像视频重建^[4]。首先,通过全局运动矢量估计解析帧间的运动,这个过程利用帧间像素的相关性,将复杂的运动背景问题转换成静态的背景问题。现有算法(例如块匹配法^[5]、灰度投影法^[6]、特征点匹配算法^[7-8]、光流法^[9]等)通过构建运动模型推断相机的运动轨迹,同时有效地识别并排除非静止目标。之后的运动补偿技术旨在平滑和纠正视频中的运动不一致性,主要包括滤波法、曲线拟合/插值法、基于优化的算法。滤波法包括低通滤波^[10]、均值滤波^[11]、卡尔曼滤波^[12]、多轨迹映射滤波^[13]等,可以有效平滑目标轨迹;曲线拟合/插值法可以更加精确地进行轨迹校正^[14-17];基于优化的算法可以将运动补偿中的各种问题转化为优化问题的约束条件,实现较好的稳像效果^[18-20]。最后,进行稳像视频重建,即根据运动补偿过程得到的主观运动对原视频进行处理,输出得到稳定的视频。稳像视频重建算法主要包括2D全帧变换^[21]、基于内容保留的变换^[22]、渲染^[23]等。

现有视频稳像算法虽然能够对一般场景下的视频稳像产生积极作用,但是无法有效地解决无控制点场景下的卫星视频稳像问题。针对此问题,

本文提出一种面向无控制点场景的卫星视频稳像算法,通过结合多目标卡尔曼滤波、rlowess轨迹平滑与L1-L2范数优化,实现亚像元级的有效稳像。该算法充分利用前景动目标在像面上跳变的一致性,并结合轨迹拟合与范数优化的方法,有效地挖掘卫星视频中的时空信息。之后,为了验证该算法的稳像效果,利用海上舰船目标观测数据集开展实验。

1 算法原理

将相机抖动看作高斯模型,考虑像面上存在多目标时,所有目标的抖动偏差一致。求取平滑优化后的滤波值,计算滤波值指向观测值的运动矢量,对当前帧图像按照运动矢量的反方向进行补偿,计算所有目标的偏差值进行像面修正。算法原理如图1所示,假设视场中存在3个舰船目标,将像面抖动看作刚性平移模型,因此每个目标在同一帧的偏移量相同。虚线为真实的运动轨迹,虚线上的三角形为修正后的目标点,舰船的质心圆点为存在抖动的目标观测点,粗箭头为修正矢量。

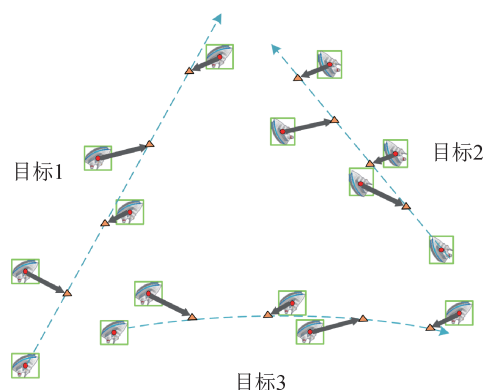


图1 无控制点场景下基于多运动目标的卫星视频稳像算法原理

Fig.1 Principle of satellite video stabilization algorithm based on multiple moving targets in no-control-point scenarios

现有的基于帧间特征点配准的算法无法解决无控制点情况下的卫星视频稳像问题,因此,本文构建出基于前景的视频稳像算法,将视频稳像问题转化为目标检测和轨迹平滑的问题。搭建了基于目标检测、卡尔曼滤波、rlowess平滑和L1-L2范数优化的框架,具体算法步骤如图2所示。视频

稳像误差用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)衡量,其代表预测值与真实值之间的偏差。

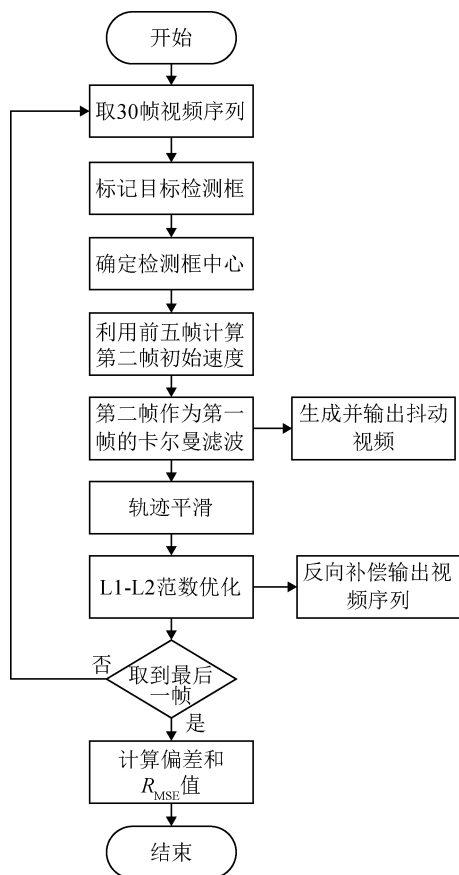


图2 无控制点场景下基于多运动目标的卫星视频稳像算法流程

Fig.2 Process of satellite video stabilization algorithm based on multiple moving targets in no-control-point scenarios

假设目标检测框提取中心位置 (x, y) ,中心点的运动速度为 (v_x, v_y) ,二维目标的状态向量为 $[x, y, v_x, v_y]^T$,观测矩阵 $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$,取前5帧速度的平均值作为第2帧的速度值,之后将第2帧的速度值看作第1帧的初始速度值,通过不断观测新一帧的坐标位置和速度,得到卡尔曼滤波结果。

现有的视频稳像算法通常没有引入目标轨迹平滑的概念,并且轨迹平滑算法多基于单目标检测与跟踪。本文提出一种将时间域叠加的多目标轨迹重构与相机抖动相结合的思路,因此需要研究时域上的轨迹平滑问题。该问题也可以归纳为

二维散点滤波、线性或非线性回归、轨迹重构、曲线拟合或近似和轨迹匹配等研究范畴。

目前已有的平滑算法包括:①使用特定滤波器或平滑器处理的算法,例如卡尔曼滤波器、巴特沃斯滤波器、卡尔曼平滑器(例如 Rauch-Tung-Striebel smoother, RTS smoother)、基于小波的滤波器、Savitzky-Golay 滤波器、滑动平均(Mean Average, MA)算法等;②基于概率统计学意义上的经典平滑算法,例如 Cholesky 平滑算法、均方根信息平滑算法等;③基于分段线性假设与插值的平滑算法,例如 Spline 样条曲线拟合、贝塞尔曲线拟合等;④基于回归的算法,例如 RDP(Ramer-Douglas-Peucker)算法、Schneider 算法、局部加权回归法等;⑤基于优化的算法,例如 L1 范数优化、多运动轨迹优化等。

L1 范数优化可以最大限度地保留特征信息,L2 范数优化可以使拟合的轨迹更加接近原路径。因此,本文参考 GRUNDMANN M^[24]提出的对相机运动路径的 L1 范数优化算法,将目标的运动看作匀速和匀加速运动的组合,运用 L1 范数约束目标轨迹的二阶差分和三阶差分,在 L1 范数的基础上引入 L2 范数约束目标的轨迹偏差值,并对 L1 范数和 L2 范数表达式的系数设置不同的权重,得到线性优化的轨迹处理结果。本文提出的 L1-L2 最优化算法首先确定最优化目标路径的准则,利用准则建立目标函数,再根据其他因素添加限制条件,提出最优化路径问题并求解,最后对原始帧进行补偿,实现最优化目标路径。

根据舰船目标可能出现的匀速运动或匀加速运动状态,优化目标路径的准则采用不同的优化标准。当目标匀速运动时,优化标准为

$$D^2(P) = \sum_t P_{t+2} - 2P_{t+1} + P_t \quad (1)$$

式中: D^2 为二阶微分算子, P 为运动目标的滤波轨迹, t 为帧数,此时 $D^2(P) = 0$ 。

当目标匀加速运动时,优化标准为

$$D^3(P) = \sum_t P_{t+3} - 3P_{t+2} + 3P_{t+1} - P_t \quad (2)$$

此时 $D^3(P) = 0$ 。结合 L2 范数对不同参数设置权重,得到轨迹拟合的目标函数为

$$O(P) = w_1 \|D^2(P)\|_1 + w_2 \|D^3(P)\|_1 + \alpha \|P - C\|_2 \quad (3)$$

式中： O 为目标函数， w_1 、 w_2 为L1范数的权重， α 为L2范数的权重， C 为未优化的原始目标轨迹。通过调整权重值，可以获得最小的目标函数，并且目标函数值越小，轨迹越平滑。

$D^2(P)$ 和 $D^3(P)$ 使用L1范数约束，用来保证最优轨迹的平滑度。由于目标处于静止状态时不能应用卡尔曼滤波，这里只讨论运动目标，不计算最优轨迹的一阶差分。 $P - C$ 使用L2范数约束，该部分用来计算最优轨迹与原始轨迹的均方差，使得最优轨迹尽可能地接近原始路径。

为实现天基高帧频的持续观测，一般通过探测器开窗策略获取视频序列，当开窗的尺寸较小时，像面抖动可以近似为平移模型。原始轨迹上的目标点坐标为 (x, y) ，最优轨迹上的坐标对应为 (x', y') ，坐标转换公式为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \quad (4)$$

由定义知， $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ 组成的轨迹为 C ， $\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$ 组成的轨迹为 P ， M 为原始轨迹与最优轨迹的差值，即 $P - C$ 。

$$\begin{aligned} -e_i^1 &\leq C_{t+2} - 2C_{t+1} + C_t + M_{t+2} - 2M_{t+1} + M_t \leq e_i^1 \\ -e_i^2 &\leq C_{t+3} - 3C_{t+2} + 3C_{t+1} - C_t + M_{t+3} - 3M_{t+2} + 3M_{t+1} - M_t \leq e_i^2 \\ e_i^1 &\geq 0 \\ e_i^2 &\geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式中： e_i^j 为正向松弛变量组成的向量。

2 实验及分析

选择由YIN Q^[25]等人制作的吉林一号卫星星座采集的卫星数据集VISO进行仿真验证，该卫星数据集的采样帧频为10帧/s，选取其中的前30帧进行论证，即视频采样时长为3 s。数据集1中包含3个舰船动目标，数据集2中包含7个舰船动目标。该卫星数据集的采样帧频快，且数据集中包含的舰船数目多、舰船纹理清晰，有利于开展本文算法的仿真实验研究。

另外，本文还探究了目标数目和采样帧频两个变量对视频稳像效果的影响。当卫星观测动目标时，往往需要实时地在监视器视频流中找到目标并得到它的运动轨迹。为提高视频处理的实

$\|D^2(P)\|_1$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \|D^2(P)\|_1 &= \sum_{t=1}^{n-2} |D(P_{t+2}) - D(P_{t+1})| \\ &= \sum_{t=1}^{n-2} |(P_{t+2} - P_{t+1}) - (P_{t+1} - P_t)| \\ &= \sum_{t=1}^{n-2} |P_{t+2} - 2P_{t+1} + P_t| \\ &= \sum_{t=1}^{n-2} |(C_{t+2} + M_{t+2}) - 2(C_{t+1} + M_{t+1}) + (C_t + M_t)| \\ &= \sum_{t=1}^{n-2} |C_{t+2} - 2C_{t+1} + C_t + M_{t+2} - 2M_{t+1} + M_t| \end{aligned} \quad (5)$$

同理， $\|D^3(P)\|_1$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \|D^3(P)\|_1 &= \sum_{t=1}^{n-3} |P_{t+3} - 3P_{t+2} + 3P_{t+1} - P_t| \\ &= \sum_{t=1}^{n-3} |C_{t+3} - 3C_{t+2} + 3C_{t+1} - C_t + M_{t+3} - 3M_{t+2} + 3M_{t+1} - M_t| \end{aligned} \quad (6)$$

$\|P - C\|_2$ 可以表示为

$$\|P - C\|_2 = \sqrt{\sum_{t=1}^n (P_t - C_t)^2} = \sqrt{\sum_{t=1}^n (M_t)^2} \quad (7)$$

式中： $M_t = \begin{bmatrix} dx_t \\ dy_t \end{bmatrix}$ 。

对L1范数的部分引入松弛变量去除绝对值，约束公式为

时性，以30帧为一个处理单元，将30帧内的物体运动看作是匀速直线运动，将平滑后的结果实时输出。这种方法可以避免现有的视频稳像离线处理技术需要长轨迹特征的缺点，实现算法的加速。相较传统的特征点提取及匹配算法，本文算法的处理效率更高。

假设像面上初始存在的目标数全程不变，中间不会出现碎云遮挡的丢数问题，设置卡尔曼滤波参数为

$$\begin{aligned} \Delta m &= 10^{-2} \\ Q &= \Delta m * \begin{bmatrix} 0.5 & & & \\ & 1 & & \\ & & 0.5 & \\ & & & 1 \end{bmatrix} \\ R &= 10 \begin{bmatrix} 1 & \\ & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

式中： Δm 为系数缩放比例， Q 为过程噪声的均值， R 为观测噪声的均值。

通过导入一组配准好的卫星图像序列，叠加均值为0、标准差为3的亚像素级的高斯噪声，得到含抖动的图像序列，然后对像面上的不同目标分别进行卡尔曼滤波及平滑和优化，得到数据处理后的结果。基于卫星得到的配准后的稳定数据及目标检测标签值，计算目标检测框的中心位置，仿真生成运动目标在像面上的抖动，并进行滤波及平滑处理，最后将平滑后的轨迹数据与稳定轨迹数据进行比较，计算 R_{MSE} 值，评估算法的平滑效果。

将本文算法与传统的卡尔曼滤波分别结合MA法、lowess法、loess法、sgolay法及rloess法的滤波效果进行对比。卡尔曼滤波及轨迹平滑前后目标1的轨迹效果对比如图3所示。

由图3可以看出原始观测值的抖动非常显著，在横纵坐标上的抖动像素标准差约为3个像素，进行卡尔曼滤波和轨迹平滑后，显著地降低了滤波轨迹与真实轨迹的偏差。当滤波轨迹接近真实轨迹时，计算基于空域的多目标抖动偏差值的均值，并在相应方向上进行运动补偿，可以得到平稳的视频。

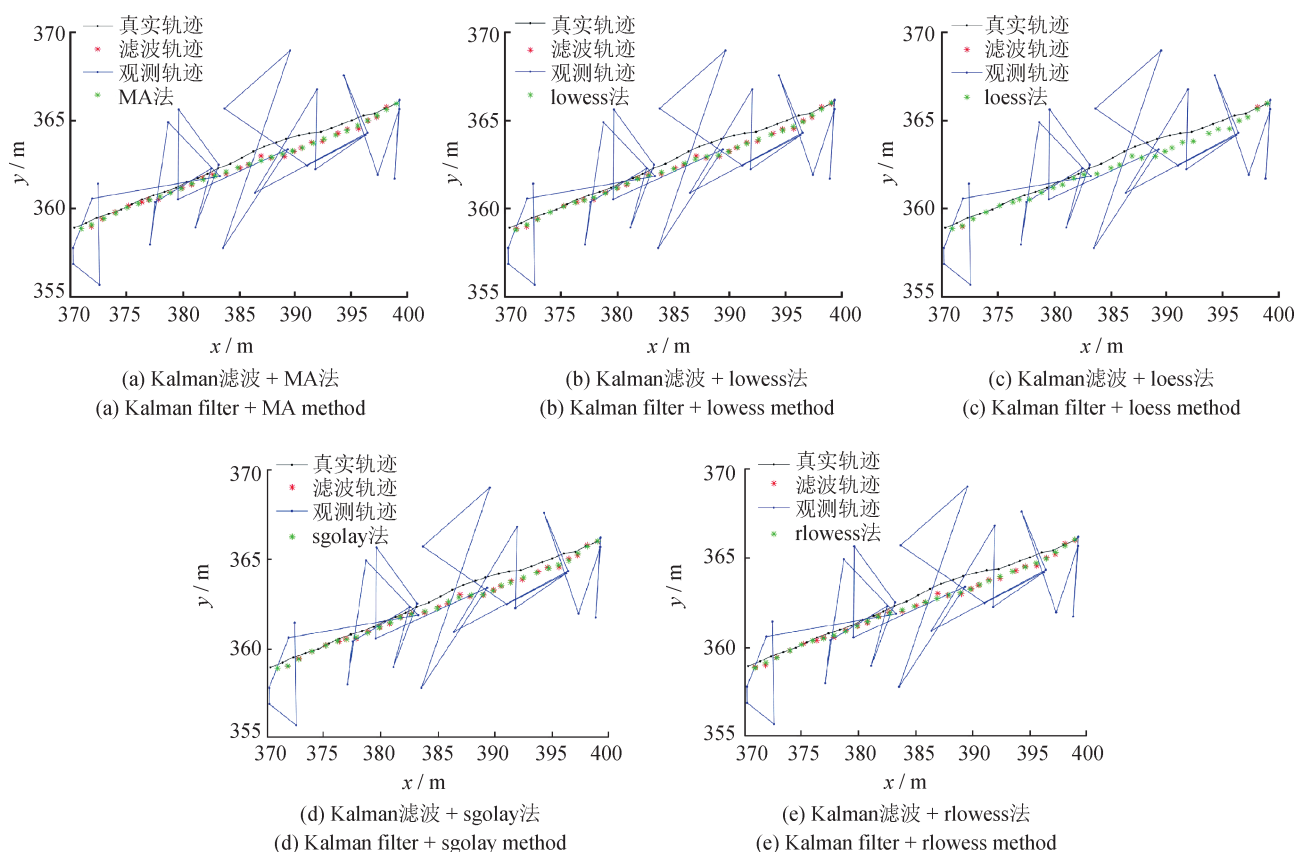


图3 卡尔曼滤波及轨迹平滑前后目标1的轨迹效果对比图

Fig.3 Comparison of trajectory results of target 1 before and after Kalman filtering and trajectory smoothing

本文算法(参数取值为 $w_1 = 10$, $w_2 = 20$, $\alpha = 1$)与传统滤波平滑算法处理轨迹对比如图4所示,滤波后的轨迹点越接近黑色点状的真实轨迹点,表明补偿后的稳像误差越小。

将不同算法的第1、5、15、25、30帧的图像提取出来进行对比,原始抖动图像如图5(a)所示,本文算法输出图像如图5(b)所示,分别选取右上角部分进行放大显示,如图5(c)、图5(d)所示。

视频图像的原点在左上角,向右为 X 方向,向下为 Y 方向。为了更好地体现算法的处理效果,输入输出图像没有裁剪黑边。聚焦右上角箭头指示的白点位置,并标注白点质心的坐标,可以准确地展示视频抖动情况。图5(c)中,白点在不同帧中明显存在位移,但是在进行稳像后的图5(d)中,白点在不同帧中的相对位置变得更加统一,证明了本文稳像算法的有效性。

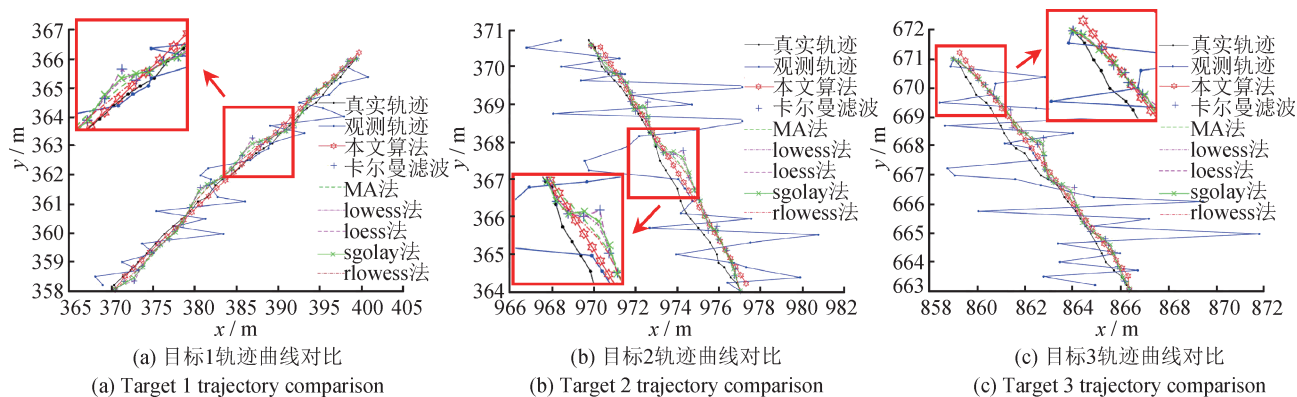


图4 本文算法与传统滤波平滑算法处理轨迹对比图

Fig.4 Comparison of trajectories processed by this paper's algorithm and traditional filter smoothing algorithm

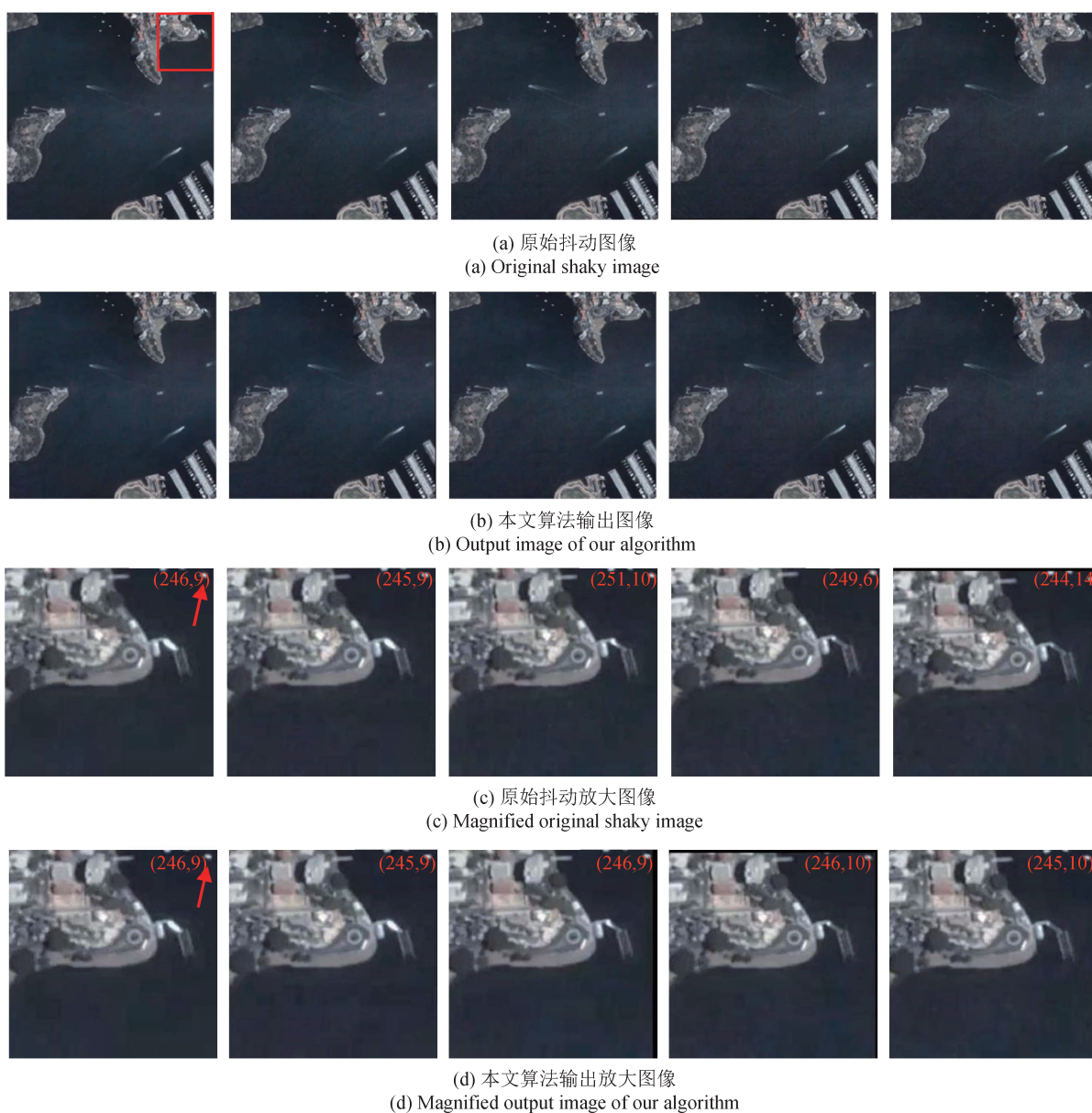


图5 数据集1稳像效果对比图

Fig.5 Comparison of image stabilization results for dataset 1

在进行可视化展示之后,还需要进行客观质量评价以更好地量化稳像算法的处理效果。 R_{MSE} 值和稳像前后的补偿像素值非常接近,因此使用 R_{MSE} 值量化卫星视频稳像的像素精度。表1展示了观测

值、单一卡尔曼滤波、卡尔曼滤波结合MA法、lowess法、loess法、sgolay法、rloess法的稳像结果以及应用本文算法的稳像结果。本文算法X方向误差约为0.3像素,Y方向误差约为0.2像素。

表1 数据集1的 R_{MSE} 值对比
Tab.1 Comparison of R_{MSE} values for dataset 1

实验对象	方向	观测值	Kalman	MA	rowless	roless	sgolay	rloess	本文算法
目标1	X	3.037 0	0.369 4	0.334 9	0.351 0	0.367 3	0.359 4	0.346 3	0.253 3
	Y	3.335 7	0.301 5	0.256 2	0.273 7	0.293 4	0.288 0	0.272 0	0.121 8
目标2	X	3.037 0	0.369 4	0.334 9	0.351 0	0.367 3	0.359 4	0.346 3	0.253 3
	Y	3.335 7	0.301 5	0.256 2	0.273 7	0.293 4	0.288 0	0.272 0	0.121 8
目标3	X	3.037 0	0.369 4	0.334 9	0.351 0	0.367 3	0.359 4	0.346 3	0.253 3
	Y	3.335 7	0.301 5	0.256 2	0.273 7	0.293 4	0.288 0	0.272 0	0.121 8

根据表1可知,如果只采用卡尔曼滤波对目标轨迹进行处理,得到X、Y方向的 R_{MSE} 值分别为0.369 4和0.301 5;结合轨迹平滑算法后,MA平滑算法和rloess算法的滤波效果相较其他平滑算法更好。在这个基础上应用L1-L2范数优化,X方向的 R_{MSE} 值可以降低到0.253 3,Y方向的 R_{MSE} 值降低到0.121 8。本文算法的 R_{MSE} 值与原始观测值相比,X方向下降了12.0倍,Y方向下降了27.4倍。

与此同时,所有目标的观测值和滤波平滑值均相同,这为后续基于多目标进行视频稳像提供了良好的基础。当像面的抖动接近平移模型时,可以将动目标的中心作为轨迹滤波的参考点进行视频稳像。如果舰船目标的匀速直线运动特性良

好,该算法滤波处理后得到的数据将逼近真值。综上所述,本文提出的算法在解决像面抖动问题方面具有良好的工程应用价值。

3 变化参数讨论

3.1 视频采样率对稳像效果的影响

对原始的输入视频进行2倍降采样处理,采样率变为 $1/2 f_s$,即隔一帧采样一个数据。同样取30帧视频数据,得到的滤波结果如图6所示,可以看出本文算法的轨迹平滑效果更好,输出的红星点迹更加接近真实的黑色点迹,这意味着在运动补偿后可以获得更加平稳的视频处理效果。在相同条件下,应用不同轨迹平滑算法进行视频稳像,并利用

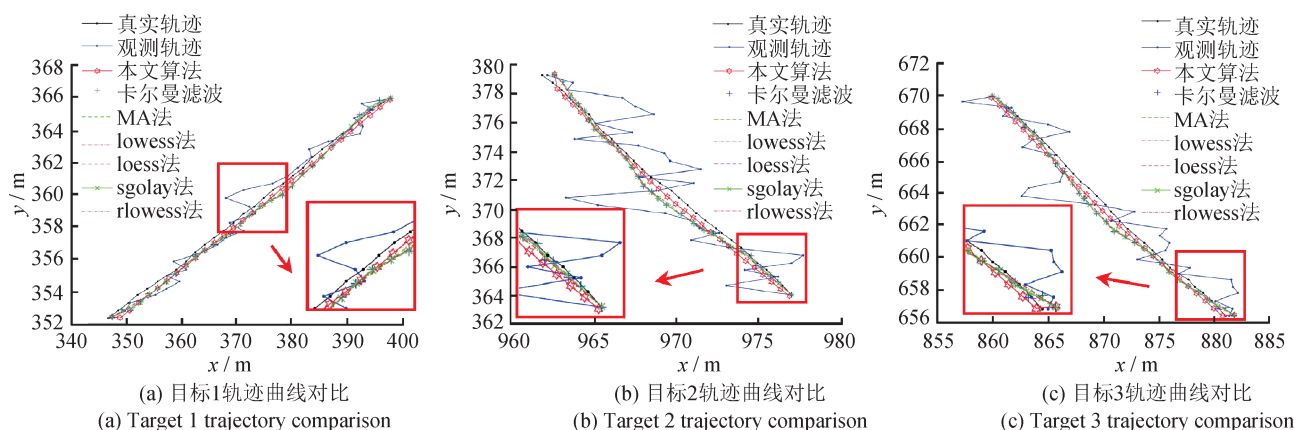


图6 数据集1在 $1/2 f_s$ 的滤波效果对比图

Fig.6 Comparison of filtering results at $1/2 f_s$ for dataset 1

客观质量评价指标进行分析,具体的 R_{MSE} 值对比如表2所示。利用数据集1进行实验时,本文算法 X 方向、 Y 方向的像素误差均约为0.3像素。由于采样率下降,信号对噪声的敏感性下降,得到的线性滤波结果更好。本文算法的 R_{MSE} 值与原始观测值相比, X 方向降低了14.1倍, Y 方向降低了10.4倍。

表2 数据集1在1/2 fs的 R_{MSE} 值对比
Tab.2 Comparison of R_{MSE} values at 1/2 fs for dataset 1

实验对象	方向	观测值	Kalman	MA	lowess	loess	sgolay	rloess	本文算法
目标1	X	3.110 4	0.266 6	0.266 6	0.281 1	0.307 3	0.290 1	0.277 4	0.220 3
	Y	2.434 2	0.295 3	0.295 3	0.305 5	0.318 5	0.314 4	0.286 1	0.235 1
目标2	X	3.110 4	0.266 6	0.266 6	0.281 1	0.307 3	0.290 1	0.277 4	0.220 3
	Y	2.434 2	0.295 3	0.295 3	0.305 5	0.318 5	0.314 4	0.286 1	0.235 1
目标3	X	3.110 4	0.266 6	0.266 6	0.281 1	0.307 3	0.290 1	0.277 4	0.220 3
	Y	2.434 2	0.295 3	0.295 3	0.305 5	0.318 5	0.314 4	0.286 1	0.235 1

3.2 目标个数对稳像效果的影响

为了研究不同目标数对滤波结果的影响,选择VISO数据集中的另一组图像,记为数据集2,该数据集的目标数为7,并且像面上不仅存在匀速直线运动的目标,还存在机动拐弯的目标。依然选取30帧进行分析,数据集2的滤波效果对比图如图7所示。

由于目标4和目标6的运动状态与匀速直线运动有差异,卡尔曼滤波和轨迹平滑的拟合效果不好,但若增加L1-L2范数的约束,则可以在有效减小误差的同时得到更加平滑的运动轨迹。各算法的稳像效果如图8所示,依然截取不同算法的第1、5、15、25、30帧图像进行对比。为了更好地体现算法的处理效果,输入输出图像同样没有裁剪黑

表3 数据集2的 R_{MSE} 值对比
Tab.3 Comparison of R_{MSE} values for dataset 2

实验对象	方向	观测值	Kalman	MA	lowess	loess	sgolay	rloess	本文算法
目标1	X	2.038 7	0.149 9	0.118 0	0.131 7	0.149 7	0.144 0	0.127 4	0.114 1
	Y	3.413 8	0.296 4	0.238 0	0.254 6	0.289 3	0.285 6	0.229 5	0.160 8
目标2	X	2.038 7	0.149 9	0.118 0	0.131 7	0.149 7	0.144 0	0.127 4	0.114 1
	Y	3.413 8	0.296 4	0.238 0	0.254 6	0.289 3	0.285 6	0.229 5	0.160 8
目标3	X	2.038 7	0.149 9	0.118 0	0.131 7	0.149 7	0.144 0	0.127 4	0.114 1
	Y	3.413 8	0.296 4	0.238 0	0.254 6	0.289 3	0.285 6	0.229 5	0.160 8
目标4	X	2.038 7	0.149 9	0.118 0	0.131 7	0.149 7	0.144 0	0.127 4	0.114 1
	Y	3.413 8	0.296 4	0.238 0	0.254 6	0.289 3	0.285 6	0.229 5	0.160 8
目标5	X	2.038 7	0.149 9	0.118 0	0.131 7	0.149 7	0.144 0	0.127 4	0.114 1
	Y	3.413 8	0.296 4	0.238 0	0.254 6	0.289 3	0.285 6	0.229 5	0.160 8
目标6	X	2.038 7	0.149 9	0.118 0	0.131 7	0.149 7	0.144 0	0.127 4	0.114 1
	Y	3.413 8	0.296 4	0.238 0	0.254 6	0.289 3	0.285 6	0.229 5	0.160 8
目标7	X	2.038 7	0.149 9	0.118 0	0.131 7	0.149 7	0.144 0	0.127 4	0.114 1
	Y	3.413 8	0.296 4	0.238 0	0.254 6	0.289 3	0.285 6	0.229 5	0.160 8

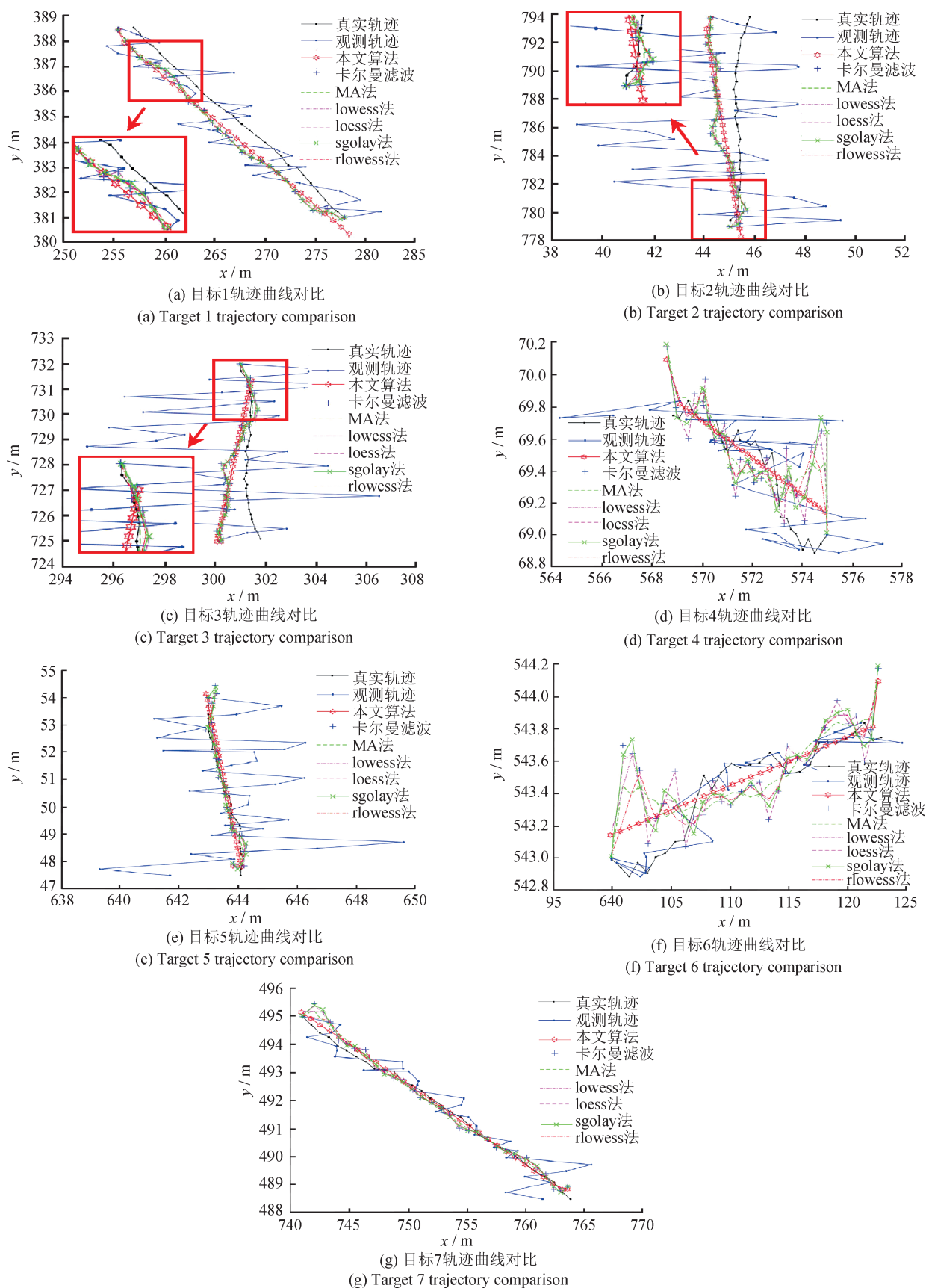


图7 数据集2的滤波效果对比图

Fig.7 Comparison of filtering effect for dataset 2

边。在这组数据中,以左下角的箭头所指圆形区域的质心作为参考,同样分别标注质心的坐标位置,可以看出图8(c)展示的原始抖动图像中质心

明显存在位移,但是图8(d)中,质心在不同帧中的相对位置变得更加统一,验证了本文算法的鲁棒性。

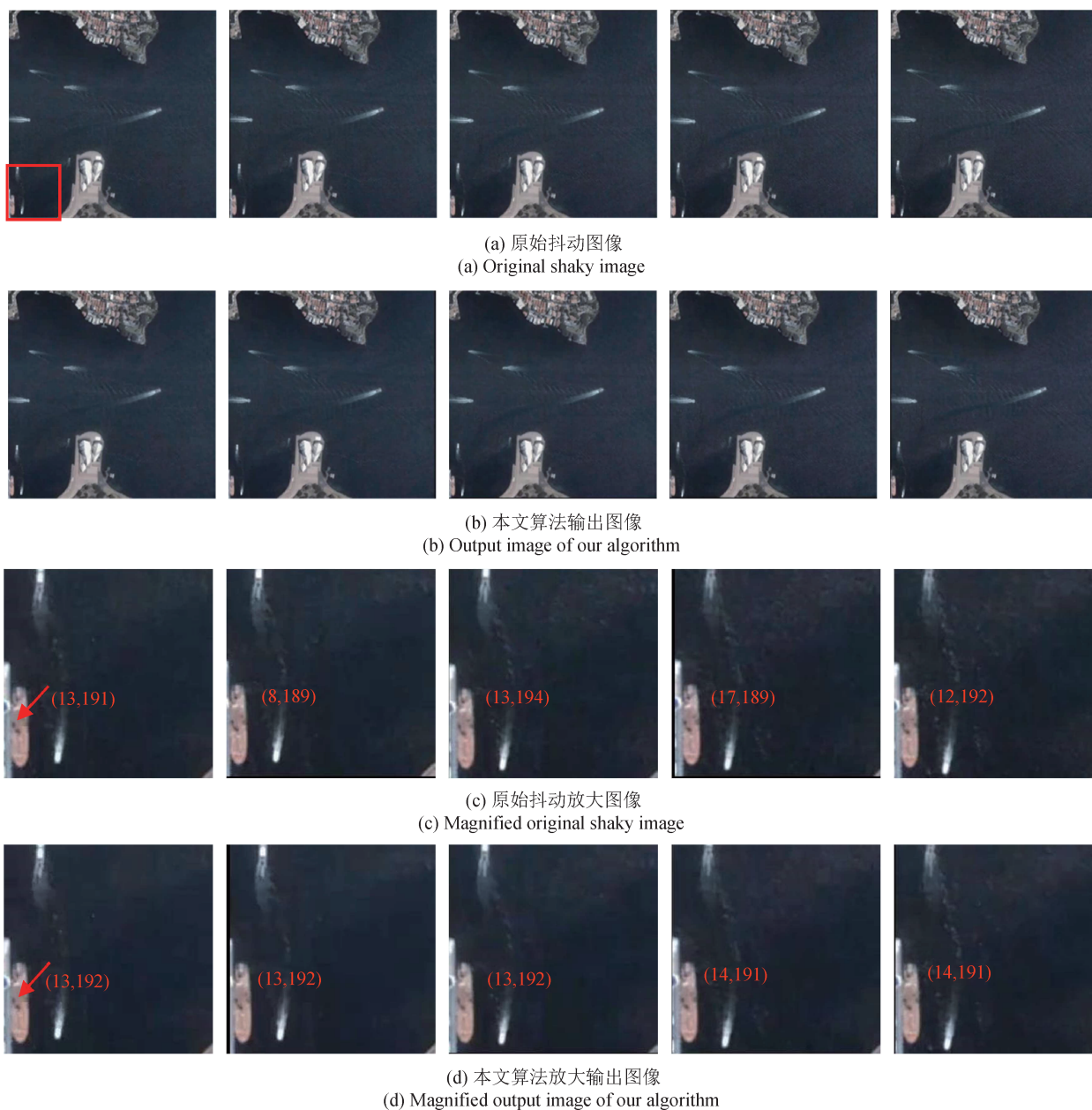


图8 数据集2的稳像效果对比图

Fig.8 Comparison of image stabilization results for dataset 2

对于所有算法在数据集2上的稳像效果进行客观的质量评价,数据集2的RMSE值对比如表3所示。利用数据集2进行实验时,本文算法 X 、 Y 方向的像素误差均约为0.2像素。本文算法中的 R_{MSE} 值与原始观测值相比, X 方向降低了17.9倍, Y 方向降低了19.6倍。本文算法在数据集2中同样取

得了良好的稳像效果,进一步验证了算法的鲁棒性和有效性。

综上,根据实验结果可以推断出:输入视频的采样帧频越高,即帧间连续性越好,并且多目标的运动特性越接近匀速直线运动,输出的视频稳像效果越好。

4 结论

卫星视频稳像技术对于实现高精度航天探测识别具有重要意义。针对现有卫星视频稳像算法难以实现无控制点条件下视频稳像的问题,提出了无控制点场景下基于多运动目标的卫星视频稳像算法。通过搭建目标检测、轨迹平滑和范数优化的综合算法框架,将视频稳像问题转化为轨迹平滑问题,将多目标卡尔曼滤波、rlowess轨迹平滑和L1-L2范数优化相结合,对输入的含抖动的卫星视频进行处理,最终输出合成后的稳像视频。利用海上多目标舰船观测数据集进行实验,结果显示本文算法的稳像误差可以控制在0.3个像素之内,验证了算法的有效性。本文算法不受采样帧数的影响,可以人为地调整需要导入数据帧的数目,并且算法性能依然能够保持在较好水平。该算法还可实现其他环境中(例如沙漠、草原等)的多运动目标卫星视频稳像,具有广泛的工程应用价值,为促进卫星高分辨力成像技术发展提供了有力支撑,对于推动航天高精度探测识别领域发展具有积极意义。

参考文献

- [1] LI F, YANG X, LU X T, et al. A new hyper-temporal imaging mode for spaceborne CMOS cameras[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 514-525.
- [2] 马文坡, 练敏隆. “高分四号”卫星凝视相机的技术特点[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(4): 26-31.
MA W P, LIAN M L. Technical characteristics of Gaofen-4 satellite gaze camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(4): 26-31. (in Chinese)
- [3] 刘薇, 高慧婷, 曹世翔, 等. “高分四号”卫星面阵凝视相机超分辨技术[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(4): 87-95.
LIU W, GAO H T, CAO S X, et al. Super-resolution technology of Gaofen-4 satellite's surface-array gazing camera[J]. Space Return and Remote Sensing, 2016, 37(4): 87-95. (in Chinese)
- [4] CHANG L, YANGKE L. Global motion estimation based on SIFT feature match for digital image stabilization[C]// Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology. 2011, 4: 2264-2267.
- [5] CHEN T. Video stabilization algorithm using a block-based parametric motion model[J]. Information System Laboratory, Department of Electrical Engineering, Stanford University, 2000.
- [6] HU F, MA J, SHEN L, et al. Digital video stabilization based on multilayer gray projection[J]. Signal Processing: Image Communication, 2018, 68: 42-57.
- [7] 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, 2008, 32(1): 105-119.
- [8] SHI J B, TOMASI C. Good features to track[C]// Proc of IEEE Computer Society Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 1994: 593-600.
- [9] HARRIS C G, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]// Alvey Vision Conference. 1988, 15(50): 147-151.
- [10] 许杰, 杨硕, 王明辉. 基于抖动帧检测和低通滤波的数字视频稳像算法[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2013, 25(6): 1234-1240.
XU J, YANG S, WANG M H. Digital video image stabilization algorithm based on jitter frame detection and low-pass filtering[J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2013, 25(6): 1234-1240. (in Chinese)
- [11] RAWAT P, SAWALE M D. Gaussian kernel filtering for video stabilization[C]// 2017 International Conference on Recent Innovations in Signal processing and Embedded Systems (RISE). IEEE, 2017: 142-147.
- [12] ERTURK S. Image sequence stabilization based on Kalman filtering of frame position[J]. Electronics Letters, 2001, 37(20): 1217-1219.
- [13] LEE Y G. A novel camera path planning algorithm for real-time video stabilization[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2019(1): 1-16.
- [14] 苏德伦, 王仕成, 张安京. 基于遗传算法的正弦波四参数曲线拟合[J]. 计测技术, 2005, 25(6): 18-20.
SU D L, WANG S C, ZHANG A J. Four-parameter curve fitting of sine wave based on genetic algorithm[J]. Metrology & Measurement Technology, 2005, 25(6): 18-20. (in Chinese)
- [15] CHEN B Y, LEE K Y, HUANG W T, et al. Capturing intention-based full-frame video stabilization[J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(7): 1805-1814.
- [16] GLEICHER M L, LIU F. Re-cinematography: improving

- the camera dynamics of casual video [C]// ACM International Conference on Multimedia. 2007: 27-36.
- [17] YAN W Q, KANKANHALLI M S. Detection and removal of lighting & shaking artifacts in home videos [C]// ACM International Conference on Multimedia. 2002: 107-116.
- [18] 杨雨辰, 毋立芳, 简萌, 等. Savitzky-Golay滤波和L1范数优化相结合的视频稳像算法[J]. 信号处理, 2020, 36(11): 1829-1837.
- YANG Y C, WU L F, JIAN M, et al. Video stabilization algorithm based on Savitzky-Golay filtering and L1 norm optimization[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(11): 1829-1837. (in Chinese)
- [19] LIU S, YUAN L, TAN P, et al. Bundled camera paths for video stabilization [J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 1-10.
- [20] KOPF J, COHEN M F, SZELISKI R. First-person hyperlapse videos [J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 1-10.
- [21] HUANG Z Y, HE F Z, CAI X T, et al. A 2D-3D hybrid approach to video stabilization [C]// 12th International Conference on Computer - Aided Design and Computer Graphics. 2011: 146-150.
- [22] 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. 2013: 2299-2306.
- [23] ZHAO W Y, LI X, PENG Z, et al. Fast full-frame video stabilization with iterative optimization [C]// IEEE / CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2023: 23524-23544.
- [24] GRUNDMANN M, KWATRA V, ESSA I. Auto-directed video stabilization with robust L1 optimal camera paths [C]// Cvpr. IEEE, 2011: 225-232.
- [25] YIN Q, HU Q, LIU H, et al. Detecting and tracking small and dense moving objects in satellite videos: a benchmark[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1-18.

(本文编辑: 刘宇轩, 贾长逸)



第一作者: 李睿瑄(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为图像重建、目标检测和视频稳像。



通信作者: 李峰(1975—), 男, 研究员, 主要研究方向为图像重建、压缩感知。