

引文格式:张致齐,王密,曹金山,等.基于物方一致性的珞珈三号01星视频数据在轨实时稳像[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(6):899-910.DOI:10.13203/j.whugis20230329



Citation: ZHANG Zhiqi, WANG Mi, CAO Jinshan, et al. Object-Space-Consistency-Based Real-Time Stabilization Approach for Luojia3-01 Video Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(6): 899-910. DOI: 10.13203/j.whugis20230329

# 基于物方一致性的珞珈三号01星视频数据 在轨实时稳像

张致齐<sup>1,2</sup> 王密<sup>2</sup> 曹金山<sup>1</sup> 刘闯<sup>1</sup> 廖敦波<sup>3</sup>

1 湖北工业大学计算机学院,湖北 武汉,430068

2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

3 武汉华迪维度科技有限公司,湖北 武汉,430074

**摘要:**利用高分辨率敏捷光学卫星的凝视观测能力,对特定区域或目标进行连续观测,从而实现区域监测、目标跟踪等应用,是高分辨率光学卫星的应用热点之一。获取的凝视观测数据经过几何与稳像处理后,能得到稳定的高质量视频数据。但受制于过程中需要的大量运算,星载设备计算与存储能力难以满足,该处理只能由地面系统在事后完成,信息获取的时效性低。针对该问题,基于珞珈三号01星数据特点与星载硬件计算能力,提出一种基于物方一致性的在轨视频帧实时稳像方法。所提方法利用实时几何定位,在卫星成像过程中实时提取并对目标区域影像进行几何校正;同时利用影像帧之间地理信息的一致性,对相邻影像帧进行实时配准,保证帧间相对精度;在此基础上,通过构建算法并行流水线,实时生成带有地理编码的兴趣区视频帧序列。使用珞珈三号01星真实数据与帧率(6帧/s)进行实验,结果表明,基于珞珈三号01星嵌入式星载处理硬件,所提方法能够实现快于6帧/s的处理速度,同时获得的视频帧序列带有地理编码,且帧间稳像精度达0.328像素,可满足星载实时服务需求。

**关键词:**视频稳像;兴趣区提取;实时处理;星上处理

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2023-12-01

DOI:10.13203/j.whugis20230329

文章编号:1671-8860(2024)06-0899-12

## Object-Space-Consistency-Based Real-Time Stabilization Approach for Luojia3-01 Video Data

ZHANG Zhiqi<sup>1,2</sup> WANG Mi<sup>2</sup> CAO Jinshan<sup>1</sup> LIU Chuang<sup>1</sup> LIAO Dunbo<sup>3</sup>

1 School of Computer Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China

2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Wuhan Huadi Dimension Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract: Objectives:** High-resolution agile optical satellites can continuously observe specific regions or targets, thereby realizing applications such as regional monitoring and target tracking. In order to obtain stable and high-quality video data, continuous observation data need to be geographically corrected and stabilized. This process requires a large amount of calculation, but the on-board computing and storage device cannot meet the demand. Therefore, this process can only be completed afterwards by on-ground system, resulting in a significant delay in information acquisition. **Methods:** This paper proposes an object-space-consistency-based real-time stabilization approach for Luojia3-01 satellite video data, which is based on data characteristics and computing capability of embedded on-board hardware. The proposed approach employs real-time geometric positioning to extract and correct the region of interest (ROI) in real-time during satellite imaging. Additionally, it employs the consistency of geographical information in real-time align ad-

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3902800);国家自然科学基金(61901307);湖北省面上项目(2022CFB352)。

第一作者:张致齐,博士,副教授,主要从事遥感数据高性能处理方面的研究。zzq540@hbut.edu.cn

通讯作者:王密,博士,教授。wangmi@whu.edu.cn

adjacent image frames to ensure the relative accuracy between sequence frames. On the basis, it generates a sequence of video frames of ROI with geographical encoding in real-time through the construction of a parallel pipeline of algorithms. **Results:** The experiments are conducted by the actual data of LuoJia3-01 satellite with the frame rate of 6 frame per second, and the proposed approach can realize the faster processing based on the embedded on-board processing hardware. Furthermore, the obtained video frame sequence with geographic encoding and the inter-frame stabilized accuracy is better than 0.328 pixels. **Conclusions:** The proposed approach can meet the requirements of on-board real-time service.

**Key words:** video stabilization; region of interest (ROI) extraction; real-time processing; onboard processing

随着 GeoEye、WorldView、Pleiades、资源系列、高分系列、遥感系列及商业遥感卫星等国内外高分辨率光学卫星相继投入使用,卫星遥感已步入数据获取手段多样化、信息海量化的新时代<sup>[1-4]</sup>。然而受制于冗长的数据获取、传输、处理链路及星地传输带宽瓶颈,接收到的遥感数据能够被及时处理并供用户有效使用的比例较低<sup>[5]</sup>。同时,公众对遥感影像在区域监测、目标定位、目标跟踪、灾害响应、应急救援、突发事件处置等时间敏感应用领域的时效性要求日益提高,其瓶颈在于如何及时处理爆炸式增长的数据。近年来,珞珈三号 01 星等新型卫星搭载了星上计算平台,将关键处理算法迁移到星上,实现了实时处理与信息提取<sup>[6-8]</sup>,这种模式能够有效减少数据量、降低星地数传和地面处理压力<sup>[9]</sup>,显著缩短信息获取时延。然而,空间环境的特殊性极大地限制了星上计算平台的处理能力,为了保证电子设备的正常工作,硬件设计时需要克服 300 °C 以上的温差与高能宇宙射线的影响<sup>[10]</sup>,必须对电子设备元器件进行针对性的温控、加固和防护<sup>[11-15]</sup>,从而导致星上处理资源严重受限。因此星上应用只能受特定任务驱动而进行,以满足任务需求为目标,只对任务密切相关的数据进行实时处理<sup>[16-17]</sup>。

自 2013 年美国发射了 SkySat 系列首颗视频卫星以来,光学视频卫星作为一种新兴的遥感卫星类型取得了快速的发展。在国内,随着对地观测技术进步与商业航天的蓬勃发展,高景系列、吉林系列、北京系列、珠海系列、珞珈系列等新一代敏捷卫星均具备了灵活的对地机动观测能力。这些卫星能够在飞行过程中利用动中成像能力,实现对热点地区的连续高分辨率观测<sup>[18]</sup>,其序列观测数据经过地面系统离线处理后,能够服务于区域监测、目标跟踪、变化监测、灾害救援等应用场景,但其服务时效性仍有较大的提高空间。

在视频数据稳像处理过程中,受制于客观条件,卫星成像外方位元素通过定位与定姿系统以一定的时间间隔离散获取,各帧影像定位时通过

插值获得瞬时值,过程中受到平台抖动、轨道测量误差、姿态测量误差、视角差异等因素影响,影像帧间存在不可忽略的差异。为了消除帧间差异,主流视频稳像算法采用运动估计与补偿两个步骤<sup>[19-20]</sup>,前者利用块匹配<sup>[21]</sup>、特征法<sup>[22-23]</sup>、光流法<sup>[24]</sup>、频域法<sup>[25]</sup>等得到帧间运动矢量,建立运动模型;后者利用上述模型,以主帧为基准对其他帧进行几何纠正,从而得到稳定的影像序列。学者们对此开展了一系列研究,并取得了较好的结果<sup>[26-33]</sup>,但是这些方法主要关注稳像精度,对执行效率则几乎没有考虑。在星载应用场景中,一方面,高分辨率卫星在连续成像过程中获得的数据量很大,另一方面,星载设备以嵌入式为主,计算与存储能力受限,现有方法直接部署于星载平台,无法满足海量数据实时稳像处理需求。

针对上述问题,本文提出一种基于物方一致性的视频数据在轨实时稳像方法。首先,与传统地面处理相比,精简了几何校正流程,缩减了数据量并提高了处理效率;然后,利用几何校正后兴趣区(region of interest, ROI)影像基本一致的特点,使用匹配加直接平移的策略实现帧间配准,避免了传统方法逐帧重采样耗时,进一步提高了效率;最后,结合星载硬件特点,在算法层面构建了稳定的并行流水线,从而实时生成带有地理编码的 ROI 视频帧序列。在保证可接受的稳像精度的前提下,本文方法能够极大地提升处理效率,并适配实际的星载应用。

## 1 高分辨率视频数据实时稳像方法

针对星载实时稳像处理的效率瓶颈问题,本文遵循流式处理的原则,利用影像帧间地理信息的一致性,一方面,对相机成像的影像中的兴趣区域进行逐帧校正,得到带地理编码的 ROI 产品,并消除大部分帧间差异;另一方面,考虑相邻帧 ROI 产品间仍然存在的几何不一致,通过快速匹配和平移完成实时配准,本文方法的主要流程如图 1 所

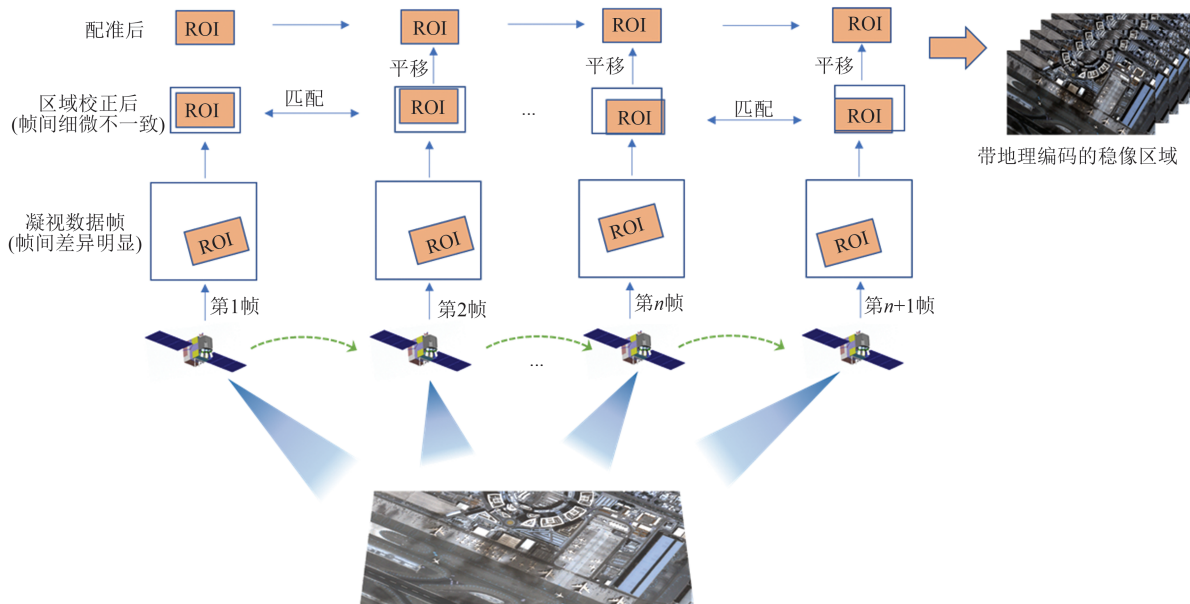


图1 本文方法主要流程

Fig. 1 Flowchart of the Proposed Method

示。算法面临的主要挑战在于,是否能在下一帧输入前完成上一帧的所有处理,如若不能,则会导致数据丢失、跳帧、失配等问题,严重影响后续视频生成。

### 1.1 兴趣区实时提取与校正

主流高分辨率光学卫星能够通过搭载的姿态、轨道测量子系统以一定的频率获得自身姿态、轨道信息,星载应用可据此通过插值得到成像瞬间的姿态、轨道用于建立严格成像几何模型。一般采用探元指向角模型对内方位元素进行描述,其参数可在发射前由实验室标定或发射后定期在轨标定获取<sup>[34-35]</sup>。严格几何模型的计算式为:

$$\lambda \cdot \mathbf{R}_{\text{ECI}}^{\text{ECF}}(t) \cdot \mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{ECI}}(\varphi(t), \omega(t), \kappa(t)) \cdot \mathbf{R}_{\text{sensor}}^{\text{body}} \begin{bmatrix} \tan \phi_x \\ \tan \phi_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - X_s(t) \\ Y - Y_s(t) \\ Z - Z_s(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $t$  是相机记录的特定扫描行的成像时刻;  $\lambda$  是比例因子;  $\phi_x$  和  $\phi_y$  为探元指向角;  $\mathbf{R}_{\text{sensor}}^{\text{body}}$  代表传感器坐标系到卫星本体坐标系的旋转矩阵,通过在轨几何标定,并在相当长的时间内相对固定,可认为是一个常数;  $\mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{ECI}}(\varphi(t), \omega(t), \kappa(t))$  是卫星本体坐标系到地球惯性坐标系 (earth centered inertial, ECI) 的旋转矩阵;  $\varphi(t)$ 、 $\omega(t)$  和  $\kappa(t)$  分别是根据成像时刻内插姿态数据得到的俯仰、滚动、偏航角度;  $\mathbf{R}_{\text{ECI}}^{\text{ECF}}(t)$  是 ECI 到地心坐标系

(earth centered fixed, ECF) 的旋转矩阵;  $[X_s(t) \ Y_s(t) \ Z_s(t)]^T$  是 ECF 下根据成像时刻内插轨道数据得到的位置矢量;  $[X \ Y \ Z]^T$  为像点对应的地物点在物方坐标系下的坐标。

建立成像瞬间严格几何模型后,可以据此进行兴趣区提取与校正,从而消除主要的帧间不一致。算法流程如图 2 所示。

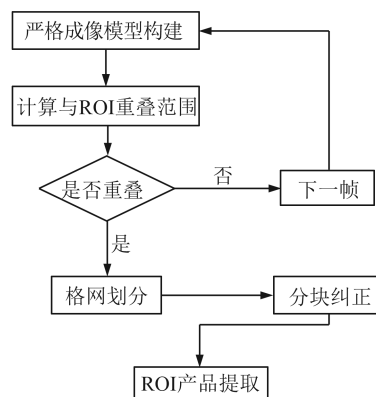


图2 ROI提取与校正流程

Fig. 2 Process of ROI Extraction and Correction

为了尽可能提高算法时效性,本文采用基于严格模型的区域快速校正算法,如图 3 所示。算法省略了传统预处理过程中的有理多项式模型 (rational polynomial coefficients, RPC) 生成和影像虚拟化处理,直接基于严格成像模型计算整幅影像几何格网,并基于此挑选覆盖 ROI 区域的原始影像进行提取和校正处理,相较传统几何校正算法,能够显著减少计算量。同时,这种方法也能更容易地进行并行化处理,从而缩短处理时间。

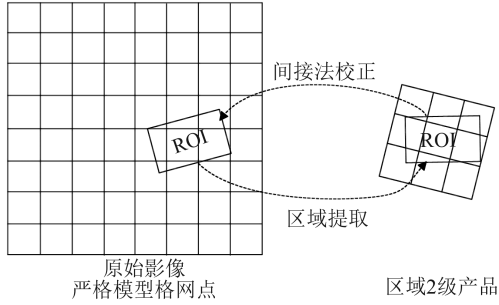


图3 基于严格模型的区域快速校正

Fig. 3 Rapid Geocorrection Based on Strict Geographic Model

为了效率最大化,格网块内部采用仿射变换模型对严格模型进行拟合,以减少像素插值运算过程中的计算量,计算式为:

$$\begin{cases} s = a_0 + a_1L + a_2B \\ l = b_0 + b_1L + b_2B \end{cases} \quad (2)$$

式中, $s$ 与 $l$ 分别表示影像点的列号与行号; $L$ 和 $B$ 分别表示对应的经度和纬度。根据每个格网4个角点的像-物坐标 $(s_i, l_i, L_i, B_i)$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ),构建误差方程:

$$AX = L \quad (3)$$

按照最小二乘平差,求解拟合参数:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (4)$$

$$\rho(c, r) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (g_{i,j} g'_{i+r,j+c}) - \frac{1}{mn} (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j}) (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g'_{i+r,j+c})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j}^2 - \frac{1}{mn} (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{i,j})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g'_{i+r,j+c}{}^2 - \frac{1}{mn} (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g'_{i+r,j+c})^2 \right]}} \quad (6)$$

式中, $c, r$ 表示相邻两帧中对应的坐标点; $m \times n$ 表示相关系数的统计窗口; $i, j$ 表示统计窗口内的任意两个坐标点; $g$ 表示对应坐标下的像素值。

帧间匹配主要步骤如下:

1) 在前帧ROI产品中按照一定间隔取 $C \times D$ 个格网点,并直接根据地理信息计算每个点的经纬度;

2) 根据各点经纬度和后帧地理信息,逐点计算上述点在后帧中的像素坐标,并以该坐标为中心,外扩 $k \times k$ 个像素大小区域作为匹配搜索范围;

3) 使用 $m \times n$  ( $m, n < k$ )作为相关系数统计窗口,逐点计算搜索范围内 $m \times n$ 窗口与前帧对应格网点周围 $m \times n$ 窗口的相关系数,取范围内最大值作为同名点,每个点需要计算 $(k-m+1) \times (k-n+1)$ 个相关系数,并从中选出最大值,单个相关系数计算方法如式(6)所示;

4) 由于相关系数匹配只能精确到整像素,需要进一步定位到亚像素,从算法执行效率考虑,

其中,

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 1 & L_1 & B_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & L_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & L_4 & B_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & L_4 & B_4 \end{bmatrix} \\ X = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ b_0 \ b_1 \ b_2]^T \\ L = [s_1 \ l_1 \ \dots \ s_4 \ l_4]^T \end{cases} \quad (5)$$

上述过程中,由于关注的是同一个ROI区域,高程可采用该区域的平均高程,拟合模型时可不予考虑。

逐块建立覆盖ROI区域的映射模型后,采用CPU/GPU协作的方式实现高效运算,由CPU执行块间并行处理,由GPU执行块内像素级并行处理,流程如图4(a)所示。

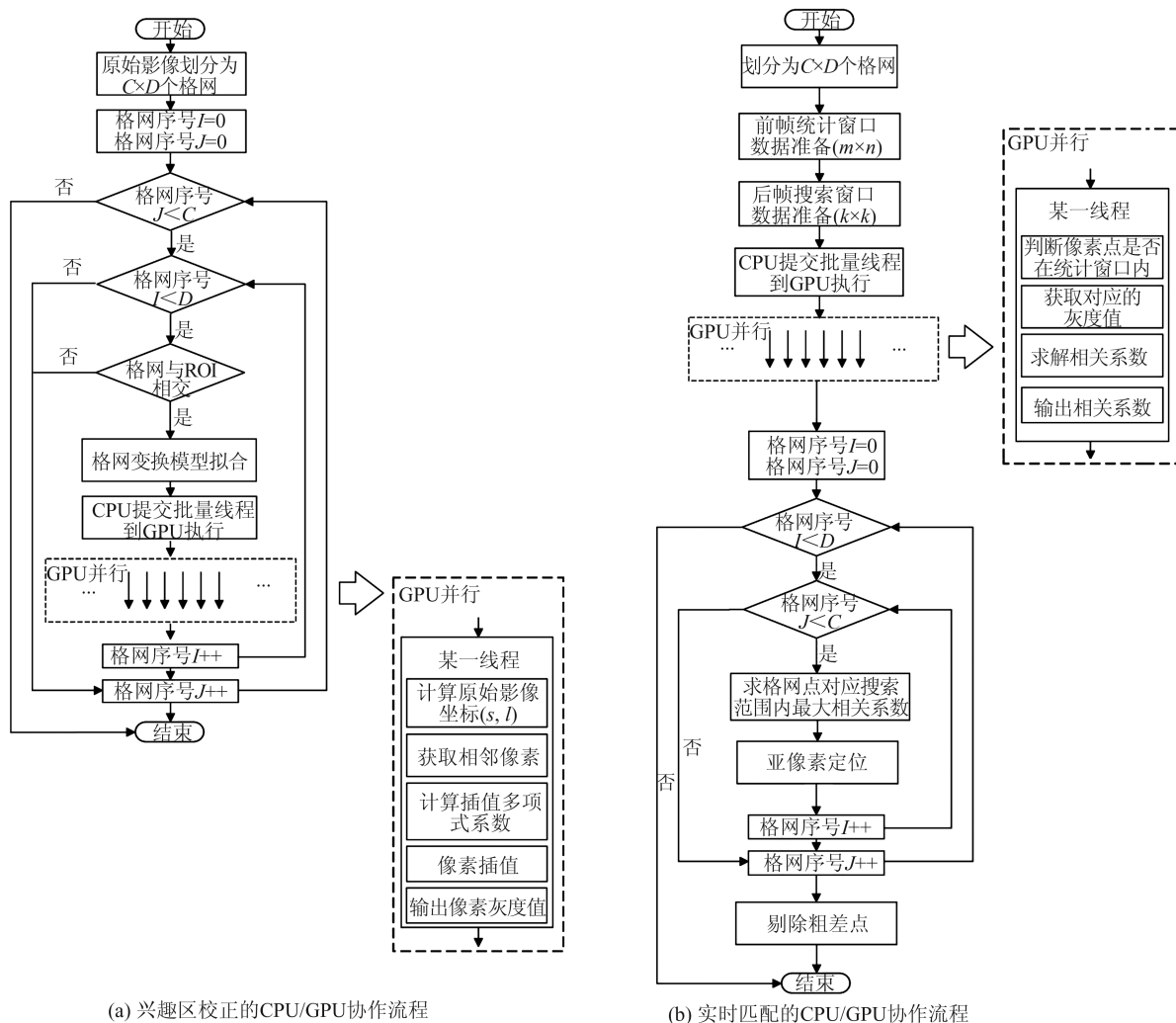
## 1.2 基于物方一致性的实时配准

卫星原始数据帧经过逐帧区域提取与校正后,得到带地理信息的2级ROI产品序列,虽然借此能够消除大部分帧间差异,但要满足视频生成需要,仍然需要以首帧为基准,对2级ROI产品序列做出逐帧微调。本文采用相关系数法进行帧间匹配,相关系数 $\rho$ 的计算式为:

本文采用抛物面拟合相关函数曲面<sup>[36]</sup>,即根据相关系数最大点的相邻点值,求解亚像素偏移,计算式为:

$$\begin{cases} dx = \frac{1}{2} \frac{\rho(c, r-1) - \rho(c, r+1)}{\rho(c, r-1) + \rho(c, r+1) - 2\rho(c, r)} \\ dy = \frac{1}{2} \frac{\rho(c-1, r) - \rho(c+1, r)}{\rho(c-1, r) + \rho(c+1, r) - 2\rho(c, r)} \end{cases} \quad (7)$$

要完成整个ROI区域的匹配,共需要计算 $C \times D \times (k-m+1) \times (k-n+1)$ 个相关系数,每个相关系数的计算需要 $m \times n$ 次循环,计算量较大。为了尽可能提高算法时效性,本文采用CPU/GPU协作的方式实现高效运算。由GPU执行相关系数层面的并行处理,由CPU执行格网级并行处理,流程如图4(b)所示。并行改造后, $C \times D \times (k-m+1) \times (k-n+1)$ 个相关系数可同时提交到GPU核心并发执行,时间复杂度降为 $O(c)$ ,而GPU线程计算的时间复杂度仅为 $O(n^2)$ ,匹配算法总时间复杂度降为 $O(n^2)$ 。



(a) 兴趣区校正的CPU/GPU协作流程

(b) 实时匹配的CPU/GPU协作流程

图 4 兴趣区校正和实时匹配流程

Fig. 4 ROI Correction and Real-Time Matching Flowchart

此外,虽然经过几何校正后的 ROI 产品帧间差异不大,但这种差异逐帧累积到一定程度则可能导致帧间失配。因此,为解决偏移累积问题,每帧配准后,需要将本次平移量和亚像素残差作为参数传递给下一帧,作为下一次匹配的初始偏移量,以保证逐帧匹配的稳定性。

### 1.3 算法并行流水线构建

在算法处理流程中,为得到配准的序列 ROI 影像,每帧原始影像需要依次经过相对辐射校正、Bayer 到 RGB 转换、灰度拉伸、ROI 提取与校正、ROI 帧间匹配、影像平移等处理。其中相对辐射校正、Bayer 到 RGB 转换、灰度拉伸操作必须按照先后顺序执行,且需要逐像素处理;ROI 提取与校正、ROI 帧间匹配、影像平移也需要大量像素操作,并且星载计算平台本身计算、存储能力不足,要满足实时处理需求具有很大的难度,因此本文通过构建算法并行流水线以提高处理效率。

设  $t_i$  为第  $i$  步算法的执行耗时(共  $N$  步),则处

理一帧总耗时为  $\sum_{i=1}^N t_i$ ,处理  $M$  帧总耗时为  $M \sum_{i=1}^N t_i$ 。

为了尽可能缩短整体执行时间,本文构建算法并行流水线,策略如下:

- 1) 将整体处理流程划分为  $N$  个处理步骤;
- 2) 启动  $N$  个独立线程,每个线程负责独立完成  $M$  帧数据的一步处理;
- 3) 线程之间通过循环队列缓存数据并进行同步,线程启动后监视输入缓存,当输入缓存中有新数据时,取出进行处理,处理完毕后,将处理结果放入输出缓存,传递给下一步算法;
- 4) 各步算法线程处理完毕写缓存前,判断输出缓存是否存在可用空间,若缓存满,则等待直至下一步算法线程取走一帧数据;
- 5)  $N$  个线程并发执行,对持续输入的数据进行连续处理。

经过流水线并行化后,处理总耗时缩短为:

$$t_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N t_i + (M-1)t_{\text{max}} \quad (8)$$

其中,  $t_{\text{max}} = \max(t_1, t_2, \dots, t_N)$ 。

综上所述,耗时为  $t_{\text{max}}$  的算法线程的执行效率决定了并行流水线整体执行效率;理论上算法步骤划分越细,流水线获得的性能提升也越大,当帧数  $M$  较大时,能够获得明显的性能提升。然而在实际构建并行流水线时,需综合考虑如下因素:

1) 划分越细的流水线越容易受到随机因素的干扰,从而造成某些环节的延迟,严重时会导致流水线的整体延迟甚至崩溃;

2) 并发流水线环节越多,操作系统在任务调度、资源分配上的开销越大,反而降低系统效率;

3) 需要非常仔细地对待并发线程间的缓存大小进行设置,以避免占用过多的内存空间或缓存太少不足以应对处理耗时的随机波动;

4) 每增加一级流水线就需要相应地分配一份专用数据缓存和临时存储空间;

5) 每增加一级流水线就需要启动独立的并发线程,挤占有限的系统资源,特别是本文的校正与匹配步骤均使用了CPU/GPU协同并行算法,不仅存在CPU核心使用上的竞争,也存在GPU核心使用上的竞争,这种竞争一方面提高了系统资源的使用率,同时也增加了流水线各环节发生延迟的概率。

珞珈三号01星搭载了低功耗、嵌入式GPU处理平台,配备了6核心ARM64指令集CPU,考虑到并发的数据接收、数据发送、主流程维护以及操作系统进程等基础功能的正常运行,并发的算法线程数目应控制在2~4个为宜。经综合比较试验并权衡后,本文建立了如下4级算法并行流水线:

1) 第一级:相机与平台数据监听线程。负责接收相机输入的全部成像数据,并将其存入缓存,在并发执行过程中,保证以固定频率接入数据,以及每帧相机原始的数据完整性;

2) 第二级:区域提取线程。负责从相机帧缓存中调取影像数据和辅助数据,并完成实时几何定位、相对辐射校正、Bayer到RGB转换、灰度拉伸、ROI提取与校正处理,生成2级ROI产品,并存入ROI队列缓存;

3) 第三级:帧间配准线程。负责从ROI队列缓存中依次提取校正后的ROI产品,并完成实时ROI帧间匹配与影像平移处理,将调整后的ROI帧存入已配准队列缓存;

4) 第四级:帧传输线程。负责从已配准队列缓存中依次提取配准后的ROI帧,调用数据下传接口下传数据。

建立并行流水线后的实时稳像算法流程如图5所示,其中相机与平台数据监听线程、帧传输线程主要受制于数据传输通道带宽,计算负载较轻,无需重点讨论。要使算法并行流水线的性能满足实时稳像需求,关键在于平衡区域提取线程、帧间配准线程间的耗时与资源使用。

对于区域提取线程而言,在对影像帧进行实时几何定位后,可以仅提取ROI区域数据进行处理,从而显著减少计算量。同理,相对辐射校正、Bayer转RGB、灰度拉伸操作均可以只对感兴趣区数据进行处理,实测在§1.1的CPU/GPU协作并行校正算法的基础上,在GPU并行执行重采样前,由GPU并行执行以上像素处理,可以减少内存级数据拷贝与访问次数,效率最高。此外,分块处理时的块大小设置也对算法的执行效率有明显的影晌,可作为算法的可调参数。

对于帧间配准线程而言,影响其性能的主要因素包括匹配点数量  $C \times D$ 、搜索窗口尺寸  $k \times k$ 、相关系数计算窗口尺寸  $m \times n$  等。在§1.2的CPU/GPU协作并行匹配算法中,单个GPU线程的并行粒度为一组相关系数的计算( $m \times n$ 像素),而同时提交到GPU的线程数为匹配点数与搜索窗口卷积次数的积,即  $C \times D \times (k-m+1) \times (k-n+1)$ ,当同时提交到GPU的计算任务过多时,会挤占上一级区域提取线程使用的资源,造成流水线整体延迟。因此  $C$ 、 $D$ 、 $k$ 、 $m$ 、 $n$  也可作为算法的可调参数进行精细调节。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验设计

本文实验采用珞珈三号01星于2023-02-21拍摄的迪拜机场真实凝视影像数据,共200帧。珞珈三号01星具备视频凝视成像能力,轨道高度约500 km,能够获取空间分辨率优于0.75 m的Bayer格式面阵影像,成像探元数为  $7\ 872 \times 5\ 985$  像素,频率为6帧/s(即相机每隔0.167 s输出一帧原始影像)<sup>[37]</sup>。基于珞珈三号01星面向终端用户的设计理念<sup>[38]</sup>,算法处理目标为输出稳定的  $1\ 920 \times 1\ 080$  像素(1080P)尺寸的带地理编码的ROI区域产品序列。本文使用Bayer格式原始影像序列如图6所示,可直观看到原始影像序列存在较明显的帧间不一致,无法直接用于视频生成。

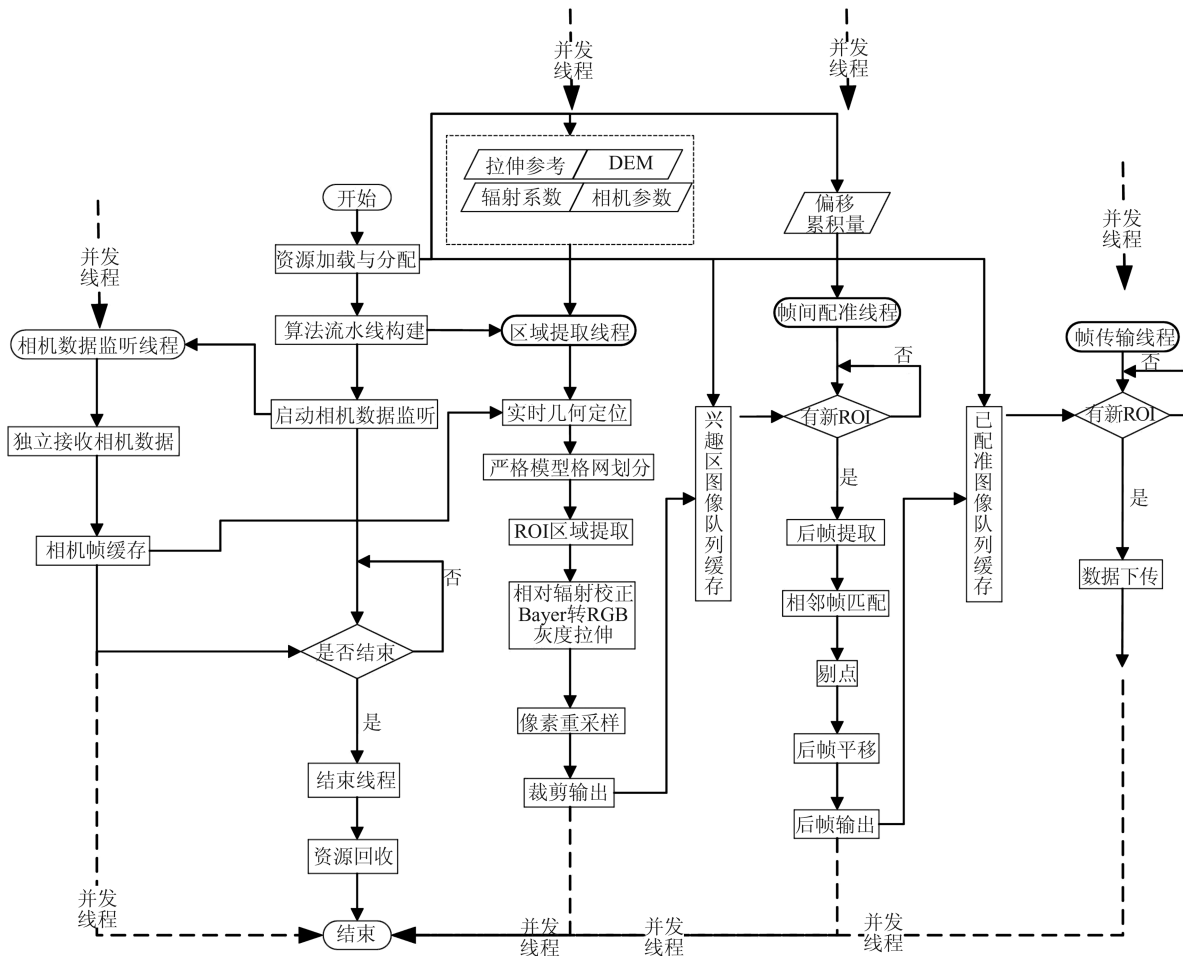


图 5 实时稳像算法流程

Fig. 5 Process of Real-Time Stabilization Algorithm

本文使用与珞珈三号 01 星星载设备一致的地面仿真设备测定算法性能,以确保与真实星载性能一致。如图 7 所示,处理设备以嵌入式 GPU 板卡为核心,配有 6 核心 ARM64 指令集 CPU 与 256 核心 GPU,核心总功耗 15 W(TDP),8 GB 运行内存,通过 PCIE 接口连接 FPGA,完成核心 GPU 板卡与外部的数据交换。星载应用基于核心板卡配备的 Linux 操作系统运行。

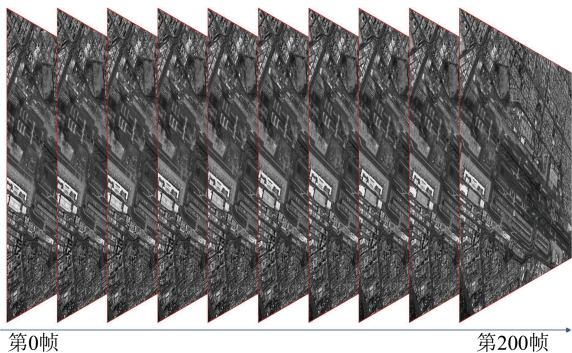


图 6 珞珈三号 01 星视频凝视数据(迪拜机场 2023-02-21)

Fig. 6 Video Data of LuoJia3-01 (Dubai Airport 2023-02-21)

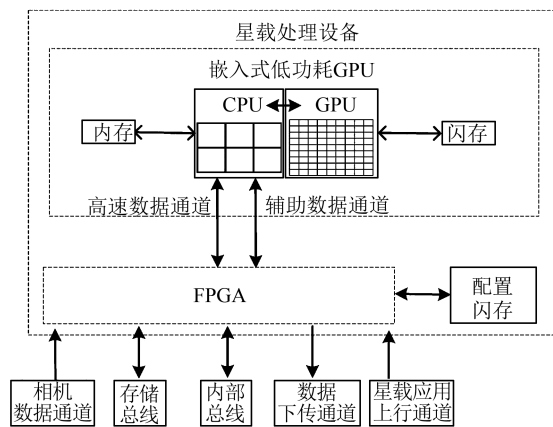


图 7 星载智能处理硬件架构<sup>[16]</sup>

Fig. 7 Hardware Architecture for Onboard Intelligent Processing<sup>[16]</sup>

### 2.2 算法时效性分析

为了客观衡量算法时效性,本文使用加速比  $S$  来衡量本文算法相对对比算法的性能提升程度,计算式为:

$$S = \frac{Q}{T_2} / \frac{Q}{T_1} = \frac{T_1}{T_2} \quad (9)$$

式中,  $Q$ 代表计算量;  $T_1$ 为对比算法处理耗时;  $T_2$ 为本文算法处理耗时。实验程序记录算法各步骤的开始、结束时间,并计算二者的差值作为算法的运行耗时。

本文选用带地理编码的高精度稳像方法<sup>[39]</sup>进行对比,该方法首先对各帧影像建立几何模型,然后进行逐帧帧间匹配并构建帧间运动模型,进而以前帧为基准,修正后帧定向模型,最后进行几何校正并提取ROI区域,得到带地理编码的视频帧序列。由于珞珈三号01星相机输出的是Bayer格式面阵影像,因此在帧间匹配前需对影像进行灰度处理,包括相对辐射校正、Bayer转RGB、灰度拉伸处理。在具体实现上,由于原始单线程版本在星载设备上执行很慢,本文采用OpenMP将对比较算法的可并行部分进行多线程并行加速,并行核心数设为4,实测各帧数据处理耗时如图8所示。

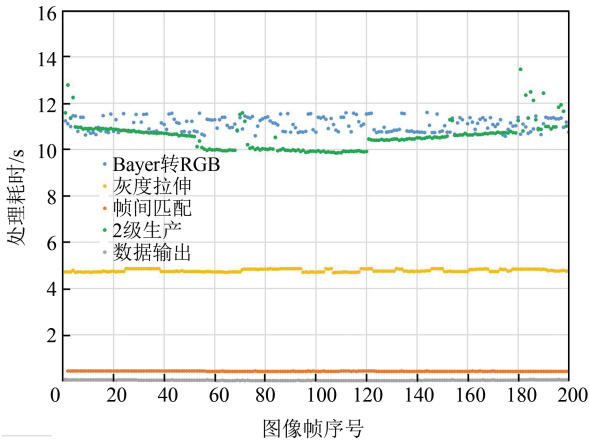


图8 传统算法各帧处理环节耗时

Fig. 8 Time Consumed in Each Frame Processing Session of the Traditional Algorithm

与之相较,本文算法优先考虑时效性,在结合硬件能力充分优化各步骤算法性能的基础上,进一步构建算法并行流水线,以实现星上实时处理。如§1.3所述,对于实时流入计算单元的原始相机帧数据,本文算法首先通过实时几何定位锁定目标区域,并对范围内影像进行几何校正处理,在几何校正同时由GPU先完成小块数据的相对辐射校正、Bayer转RGB、灰度拉伸处理,极大地提高了算法效率;校正后的ROI产品间进行逐帧配准,得到带地理编码的视频帧序列。实测各帧数据处理耗时如图9所示。

统计两种算法各帧平均处理耗时如表1所示,可见,仅从算法时效性角度分析,相较于高精度稳像方法,本文方法能够在相同硬件上获得平均135.63倍的性能提升。

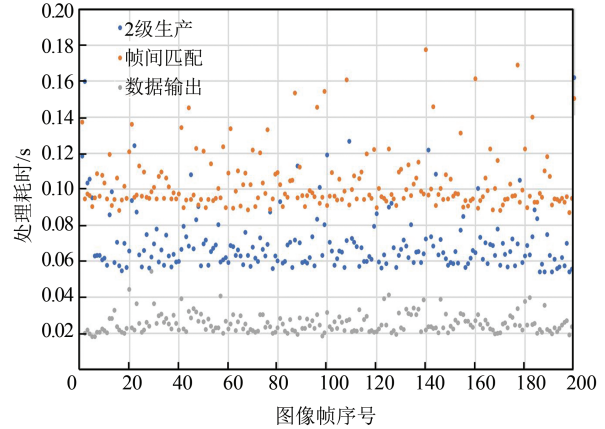


图9 本文算法各帧处理环节耗时

Fig. 9 Time Consumed in Each Frame Processing Session of the Proposed Algorithm

表1 算法性能对比

Tab. 1 Performance Comparison of Algorithms

算法步骤	不同方法耗时/s		加速比
	高精度稳像方法	本文方法	
相对辐射校正	11.068		
Bayer转RGB		0.070	377.30
灰度拉伸	4.767		
2级生产	10.576		
帧间匹配	0.417	0.103	4.05
数据输出	0.026	0.025	1.04
合计	26.854	0.198	135.63

为了满足6 Hz帧频(0.167 s)的星上实时处理需求,本文通过构建算法并行流水线实现了算法步骤间的并行操作,除了首尾帧外,完成一帧处理的耗时为最慢环节的耗时,即0.103 s。处理时间线如图10所示,可见即便是相对最耗时的帧间匹配操作,也能够稳定在0.167 s帧间隙内完成。相较于高精度稳像算法5 370.80 s的算法整体耗时,本文算法能够在33.16 s内完成所有数据的处理(数据长度33.33 s,等效加速比达161.97倍(引入算法并行流水线后),且留有38%的性能余量,时效性显著优于对比算法,能够基于低功耗嵌入式硬件满足珞珈三号01星的星上实时处理需求。

在此基础上,为了评估本文方法在不同ROI尺寸下的时效性,除了设定的1 080P(分辨率为1 920×1 080像素)的尺寸外,本文选用了720P(分辨率为1 280×720像素)、2K(分辨率为2 560×1 440像素)、2 048×2 048像素、4K(分辨率为3 840×2 160像素)等典型ROI尺寸进行对比,结果如图11所示。其中,蓝色折线代表不同尺寸下的ROI区域像素数。由图11可见,2级生产环节耗时与ROI像素量相关性最为明显,当



ROI 尺寸为  $2\ 048 \times 2\ 048$  像素时,平均单帧处理耗时  $0.157\ s$ ,与  $6\ Hz$  帧频( $0.167\ s$ )接近,此时本文方法依然能够满足实时处理需求,实际应用中建议 ROI 设定不要超过该尺寸;当 ROI 尺寸扩展到  $4K$  时,平均单帧耗时达  $0.263\ s$ ,此时会出现丢帧的现象,实际完成处理的帧数为  $124$  帧(共  $200$

帧)。因此,当 ROI 区域像素量小于  $2\ 048 \times 2\ 048$  像素时,本文方法能够在不丢帧的情况下,稳定地实现稳像处理;当 ROI 尺寸扩展到  $4K$  时,由于处理耗时增加,本文方法在丢弃部分影像帧的同时,仍能够稳定地完成稳像处理,以约  $4$  帧/s 的频率输出经过稳像的视频帧序列。

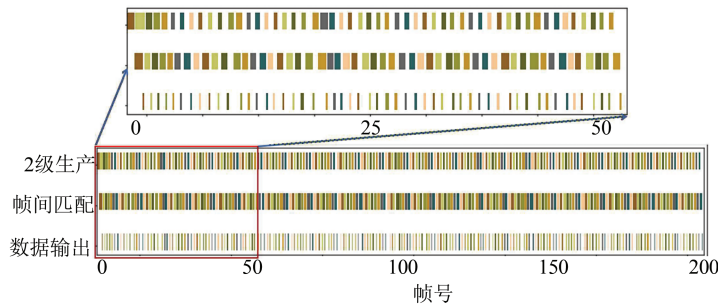


图 10 本文方法流式处理时间线

Fig. 10 Timeline of the Streaming Processing of the Proposed Method

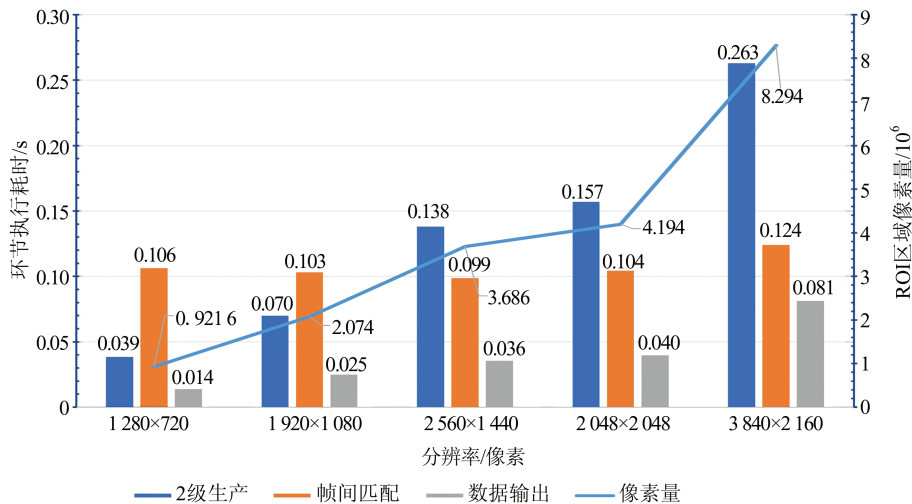


图 11 不同尺寸 ROI 处理耗时对比

Fig. 11 Time Consumption of Different ROI Sizes

### 2.3 帧间相对精度分析

本文采用像素平移的方法进行帧间配准,因此无法消除亚像素误差,但是得益于本文方法对帧间偏移做出了累积补偿,因此并未出现

失配的情况。图 12 显示了所有数据的帧间偏移情况,其中图 12(a)为帧间偏移量,图 12(b)为实际的帧间平移量,由图 12(a)的结果取整得到。

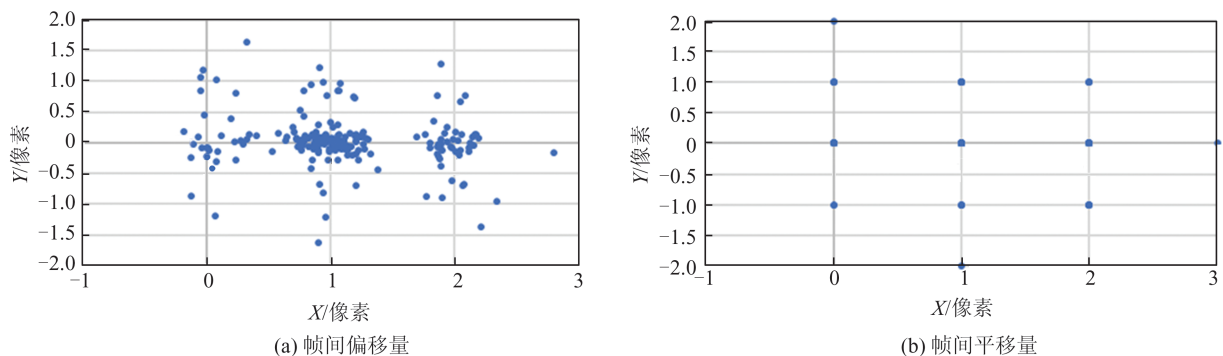


图 12 帧间偏移量与平移量分布

Fig. 12 Inter-frame Offset and Shift Distribution

平移后各帧间同名点残差分布如图13所示。从理论上来说,整像素平移后的残差应该在0.5像素以内,而图13中部分点超出了 $\pm 0.5$ 像素的范围,说明各帧ROI产品间仍然存在一定程度的内部畸变。

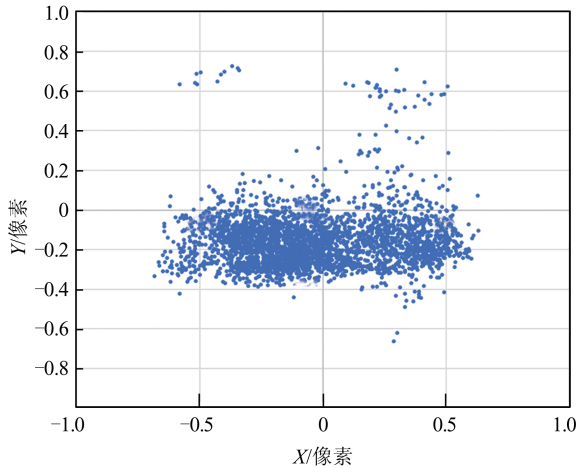


图13 总体帧间残差分布

Fig. 13 Overall Inter-frame Residual Distribution

影像帧统计稳像精度如图14与表2所示,整体而言,本文算法能够保证ROI产品序列的平均配准精度在0.5像素以内(平面均值为0.328像素),略逊于对比方法(平面均值为0.236像素)<sup>[39]</sup>。

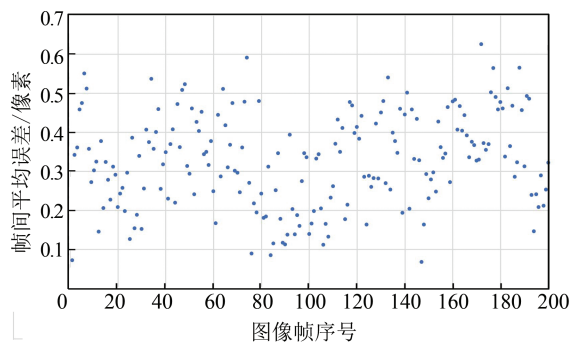


图14 稳像精度分布

Fig. 14 Steady Image Accuracy Distribution

### 3 结 语

针对星载设备计算与存储能力不足,难以满足卫星视频帧数据实时稳像处理需求的核心问题,本文提出一种基于物方一致性的星上视频帧实时提取方法。该方法利用高精度几何定位,在卫星成像过程中实时提取并对目标区域影像进行几何校正;同时利用影像帧之间地理信息的一致性,对相邻影像帧进行实时配准,保证序列帧间相对精度;在此基础上,通过构建算法并流水线实时生成带有地理编码的ROI视频帧序列。

表2 稳像精度

Tab. 2 Steady Image Accuracy

帧序号	中误差/像素		
	X方向	Y方向	平面
1~20	0.206 879 05	0.203 184 65	0.319 339 118
21~40	0.199 543 85	0.189 636 10	0.302 241 262
41~60	0.318 153 40	0.151 173 55	0.365 395 33
61~80	0.268 289 40	0.168 248 50	0.336 844 734
81~100	0.126 571 35	0.141 920 30	0.209 461 953
101~120	0.198 748 00	0.185 775 05	0.292 496 143
121~140	0.290 927 60	0.170 397 40	0.350 647 107
141~160	0.271 778 20	0.149 624 95	0.325 557 009
161~180	0.352 868 20	0.206 068 70	0.426 747 612
181~200	0.271 222 50	0.182 248 60	0.348 349 323
平均	0.250 498 155	0.174 827 78	0.327 707 959

使用珞珈三号01星真实6 Hz视频帧数据进行实验,结果表明,相对于高精度稳像算法,本文方法能够基于星载嵌入式硬件实现161.97倍的加速比,满足实时处理要求,同时稳像精度能够达到0.328像素。在时效性方面,最慢环节平均耗时0.103 s,相对于0.167 s的处理约束,本文方法在满足实时处理约束的同时,仍保留了约38%的性能余量,能够支撑更大输出区域或更高视频帧率的实时处理需求。此外,也可以通过调整对性能影响较大的几何校正和匹配等算法细节参数,更好地平衡算法计算量与处理精度,获得更进一步的性能提升。然而也需要注意,在显著提升处理时效性的同时,与侧重稳像精度的传统方法相比,本文方法在稳像精度方面稍显不足,主要体现在:(1)帧间配准采用了整像素平移的策略,使得在目视下个别视频帧间存在偶尔整像素抖动的情况;(2)前置的实时几何校正得到的ROI产品携带了因卫星高速运动过程中抖动和视角大幅变化引入的几何畸变,使得最终得到的ROI帧间存在难以通过平移而消除的细微几何差异。因此后续需要基于更多真实数据开展进一步研究,以弥补稳像精度方面的不足。

### 参 考 文 献

- [1] Dial G, Bowen H, Gerlach F, et al. IKONOS Satellite, Imagery, and Products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(1/2): 23-36.
- [2] Li Deren. China's First Civilian Three-Line-Array Stereo Mapping Satellite: ZY-3[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 317-322. (李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星: 资源三号测绘卫星[J]. *测绘学报*, 2012, 41(3):

- 317-322.)
- [3] Shi Weiguo, Zhou Limin, Jin Ying. Present Situation and Development of Global High-Resolution Commercial Remote Sensing Satellites[J]. *Satellite Application*, 2012(3): 43-50. (史伟国, 周立民, 靳颖. 全球高分辨率商业遥感卫星的现状与发展[J]. 卫星应用, 2012(3): 43-50.)
- [4] Wang Jingquan. Present Situation and Development Trend of Commercial Remote Sensing Satellite Market[J]. *Satellite Application*, 2012(1): 49-53. (王景泉. 商业遥感卫星市场的现状与发展趋势[J]. 卫星应用, 2012(1): 49-53.)
- [5] Yang Jingyu. Study on Parallel Processing Technologies of Photogrammetry Data Based on GPU[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011. (杨靖宇. 摄影测量数据GPU并行处理若干关键技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2011.)
- [6] Li Deren, Shen Xin, Gong Jianya, et al. On Construction of China's Space Information Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 711-715. (李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 711-715.)
- [7] Li Deren. Towards Geo-spatial Information Science in Big Data Era[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(4): 379-384. (李德仁. 展望大数据时代的地球空间信息学[J]. 测绘学报, 2016, 45(4): 379-384.)
- [8] Li Deren. From the Luojia Series Satellites to the Oriental Smart Eye Constellation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1557-1565. (李德仁. 从珞珈系列卫星到东方慧眼星座[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1557-1565.)
- [9] Zhang Bing. Intelligent Remote Sensing Satellite System [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2011, 15(3): 415-431. (张兵. 智能遥感卫星系统[J]. 遥感学报, 2011, 15(3): 415-431.)
- [10] Zhang Bo. A Research on Key Technologies for the High Reliability On-board Parallel System Based on Multiple DSPs[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (张博. 基于多DSP的高可靠并行星载计算机系统关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.)
- [11] Plante J, Shaw H. Evaluation of 3D Plus Packaging Test Structures for NASA Goddard Space Flight Center [C]//European Space Components Conference, Toulouse, France, 2022.
- [12] Wei Ning, Guo Hongxia, Yu Lunzheng, et al. Experimental Study of CMOS Device of Secondary Package with Electron Irradiation [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2003, 23(5): 396-400. (卫宁, 郭红霞, 于伦正, 等. 二次封装CMOS器件电子辐照实验研究[J]. 空间科学学报, 2003, 23(5): 396-400.)
- [13] Wang Yiqi, Zhao Fazhan, Liu Mengxin, et al. Study on the Deep Submicron Radiation Hardened SRAM Circuit for RHBD Technologies [J]. *Semiconductor Technology*, 2012, 37(1): 18-23. (王一奇, 赵发展, 刘梦新, 等. 基于RHBD技术的深亚微米抗辐射SRAM电路的研究[J]. 半导体技术, 2012, 37(1): 18-23.)
- [14] Franklin A D, Koswatta S O, Farmer D, et al. Scalable and Fully Self-Aligned N-type Carbon Nanotube Transistors with Gate-all-Around [C]//International Electron Devices Meeting, San Francisco, USA, 2012.
- [15] Nan H Q, Wang W, Choi K. Circuit Design for Carbon Nanotube Field Effect Transistors [C]//International SoC Design Conference, Jeju, South Korea, 2012.
- [16] Zhang Z Q, Qu Z, Liu S Y, et al. Expandable On-board Real-Time Edge Computing Architecture for Luojia3 Intelligent Remote Sensing Satellite [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3596.
- [17] Zhang Z Q, Wei L, Xiang S, et al. Task-Driven Onboard Real-Time Panchromatic Multispectral Fusion Processing Approach for High-Resolution Optical Remote Sensing Satellite [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 7636-7661.
- [18] Man Yiyun, Li Haichao. Imaging Characteristics Analysis for LEO Video Satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(5): 52-57. (满益云, 李海超. 低轨视频卫星成像特性分析[J]. 航天器工程, 2015, 24(5): 52-57.)
- [19] Ji Shujiao, Zhu Ming, Hu Hanping. Aero-Borne Electronic Image Stabilization Based on Feature Point Matching [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 841-849. (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, 6(6): 841-849.)
- [20] Liu Xianglei, Tong Xiaohua, Ma Jing. A Systemic Algorithm of Elliptical Artificial Targets Identification and Tracking for Image Sequences from Video-Grammetry [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(6): 663-669. (刘祥磊, 童小华, 马静. 视频测量影像序列椭圆形人工目标点快速识别和跟踪方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 663-669.)

- [21] Kim H S, Lee J H, Kim C K, et al. Zoom Motion Estimation Using Block-Based Fast Local Area Scaling [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(9): 1280-1291.
- [22] Kim T, Lee S, Paik J. Combined Shape and Feature-Based Video Analysis and Its Application to Non-rigid Object Tracking[J]. *IET Image Processing*, 2011, 5(1): 87.
- [23] Yi Meng. Image Registration Based on Feature Point and Its Application to Electronic Image Stabilization[D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (易盟. 基于特征点的图像配准及其在稳像中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.)
- [24] Lim A, Ramesh B, Yang Y, et al. Real-Time Optical Flow-Based Video Stabilization for Unmanned Aerial Vehicles [J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2019, 16(6): 1975-1985.
- [25] Erturk S. Digital Image Stabilization with Sub-image Phase Correlation Based Global Motion Estimation [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(4): 1320-1325.
- [26] Walha A, Wali A, Alimi A M. Video Stabilization with Moving Object Detecting and Tracking for Aerial Video Surveillance [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2015, 74(17): 6745-6767.
- [27] Kumar S, Azartash H, Biswas M, et al. Real-Time Affine Global Motion Estimation Using Phase Correlation and Its Application for Digital Image Stabilization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2011, 20(12): 3406-3418.
- [28] Zhang Maolei, Chen Jianguo, Yuan Hongyong, et al. Video Stabilization on a Six-Rotor Aircraft Platform [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2014, 54(11): 1412-1416. (张毛磊, 陈建国, 袁宏永, 等. 六旋翼飞行平台的视频稳像技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(11): 1412-1416.)
- [29] Matsushita Y, Ofek E, Ge W N, et al. Full-Frame Video Stabilization with Motion Inpainting [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(7): 1150-1163.
- [30] Aguilar W G, Angulo C. Real-Time Model-Based Video Stabilization for Microaerial Vehicles [J]. *Neural Processing Letters*, 2016, 43(2): 459-477.
- [31] Zhang G F, Hua W, Qin X Y, et al. Video Stabilization Based on a 3D Perspective Camera Model [J]. *The Visual Computer*, 2009, 25(11): 997-1008.
- [32] Murthy K, Shearn M, Smiley B D, et al. SkySat-1: Very High-Resolution Imagery from a Small Satellite [C]// *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites Conference*, Amsterdam, Netherlands, 2014.
- [33] Li Feng. Research on the Electronic Image Stabilization and Target Tracking Algorithm for Space Infrared Earth Observation Video Camera [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (李锋. 空间红外对地观测视频相机电子稳像与目标跟踪算法研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2018.)
- [34] Wang M, Yang B, Hu F, et al. On-orbit Geometric Calibration Model and Its Applications for High-Resolution Optical Satellite Imagery [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(5): 4391-4408.
- [35] Xu W, Gong J Y, Wang M. Development, Application, and Prospects for Chinese Land Observation Satellites [J]. *Geo-spatial Information Science*, 2014, 17(2): 102-109.
- [36] Wang Bingxue, Yong Yang, Tang Li, et al. Sub-pixel Localization Method Based on Relative Coefficient Fitting [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(11): 629-631. (王兵学, 雍杨, 唐黎, 等. 基于相关系数拟合的亚像素定位方法[J]. 红外技术, 2010, 32(11): 629-631.)
- [37] Li Deren, Wang Mi, Yang Fang. A New Generation of Intelligent Mapping and Remote Sensing Scientific Test Satellite Luojia-3 01 [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 789-796. (李德仁, 王密, 杨芳. 新一代智能测绘遥感科学试验卫星珞珈三号01星[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 789-796.)
- [38] Wang Mi, Yang Fang. Intelligent Remote Sensing Satellite and Remote Sensing Image Real-Time Service [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1586-1594. (王密, 杨芳. 智能遥感卫星与遥感影像实时服务[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1586-1594.)
- [39] Zhou Nan, Cao Jinshan, Xiao Lei, et al. A Geocoded Stabilization Approach for Optical Video Satellites in Object Space [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(2): 308-315. (周楠, 曹金山, 肖蕾, 等. 带有地理编码的光学视频卫星物方稳像方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(2): 308-315.)