引文格式：孙云飞,任光耀,王保前,等. 一种SAR影像辅助的光学卫星影像自动几何定位方法[J]. 地理空间信息, 2026, 24(5): 6-11. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2026.05.002

一种SAR影像辅助的光学卫星影像自动几何定位方法

孙云飞[1]，任光耀[1*]，王保前[2]，侯恩兵[1]
（1. 安徽省第二测绘院，安徽 合肥 230601；2. 中国测绘科学研究院，北京 100036）

摘　要：利用SAR卫星影像和光学卫星影像在几何定位方面的互补特性，提出了一种SAR影像辅助的光学卫星影像高精度自动几何定位方法。首先对SAR正射影像和目标光学卫星影像进行重叠检测；再利用多模态匹配算法对光学影像和SAR正射影像进行影像匹配和控制点优选；最后以匹配的虚拟控制点和光学影像为输入信息，基于有理函数模型进行平差解算，实现光学卫星影像的精准几何定位。结果表明，该方法显著提高了光学卫星影像的几何定位精度，且具有较高的自动计算效率，对于地形图测绘领域中的影像快速更新生产具有一定的指导意义。

关键词：光学卫星；SAR卫星；影像匹配；几何定位
中图分类号：P228.1　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）05-0006-06

Automatic Geometric Positioning Method for Optical Satellite Images Assisted by SAR Images

SUN Yunfei[1], REN Guangyao[1], WANG Baoqian[2], HOU Enbing[1]
(1. The Second Surveying and Mapping Institute of Anhui Province, Hefei 230601, China;
2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China)

Abstract: We proposed a high-precision automatic geometric positioning method for optical satellite images assisted by SAR images, which took advantage of the complementary characteristics of SAR and optical satellite images in geometric positioning. Firstly, the SAR DOMs and the target optical satellite images were superimposed detection. Then, a multi-modal matching algorithm was used to perform image matching and control point optimization for optical images and SAR DOMs. Finally, the matched virtual control points and optical images were used as input information, and perform block adjustment using the rational function model to achieve accurate geometric positioning of optical satellite images. The method proposed in this paper can greatly improve the geometric positioning accuracy of optical satellite images, and has high automatic calculation efficiency, which has certain guiding significance for the rapid update production of topographic maps in the field of photogrammetry.

Key words: optical satellite, SAR satellite, image matching, geometric positioning

地形图测绘主要基于光学卫星影像，因此高精度、自动化的几何定位是光学卫星数据生产的必要条件。传统光学卫星几何定位方法需要以地面控制点、已有地形图或数字表面模型（DSM）数据为控制基础[1-7]，但在部分地区地面控制点测量难以实施，高精度地形图、DSM数据难以获取。综合利用多类型传感器数据在几何定位精度方面的互补性，对于促进快速准确的全球地形图测绘工作大有裨益。合成孔径雷达（SAR）卫星作为一种主动式遥感卫星，具有很高的空间分辨率和几何定位精度[8-11]。在卫星速度、位置、多普勒、斜距参数、地表高程和椭球参数等参数被精确测量的前提下，SAR影像的定位精度较高[12-14]。因此，SAR数据可作为一种可信的数据源，为光学卫星影像的几何定位提供控制信息，且该数据在全球大部分区域都易于获取。与传统光学正射影像图提供控制信息的方式相同[15]，需在待定位的光学卫星影像与SAR正射影像之间找到一些连接点作为参考控制点，以提高光学卫星影像的定位精度[16-17]。由于光学卫星和SAR卫星在成像原理、视角和波段等方面都有很大差异，因此二者的自动匹配问题变得非常具有挑战性。为解决该问题，Reinartz等[18]采用一种自适应互信息方法来匹配光学和SAR卫星影像，将得到的匹配点用于优化原始光学影像的有理多项式系数（RPC）参数。结果显示，光学卫星影像的几何定位

项目来源：安徽省自然资源厅2025年度自然资源科技资助项目（2025-K-18）；安徽省测绘局2025年度科技创新项目（2025-KJ-05）；自然资源部2024年度部省合作项目（2024ZRBSHZ158）。
第一作者简介：孙云飞（1981—），本科，工程师，主要从事自然资源遥感、省级基础测绘等工作，E-mail：187399830@qq.com。
通信作者：任光耀（1985—），硕士，高级工程师，主要从事自然资源遥感、实景三维、省级基础测绘等工作，E-mail：408855582@qq.com。

精度提升至10 m以内；但该方法没有考虑复杂地形，且不能使用多张SAR影像同时作为参考。Merkle等[19]采用大量预先配准的TerraSAR-X和PRISM影像数据集训练一个孪生神经网络，用于提取光学与SAR影像之间的同名点，再利用匹配点优化传感器模型，进而提高几何定位精度；但该方法无法处理光学和SAR影像之间存在大偏移的情况，且受限于GPU内存，无法直接处理原始尺寸的卫星影像数据。针对光学卫星与SAR卫星影像几何定位的技术难点，本文提出了一种以SAR正射影像为参考的光学卫星影像自动几何定位方法。首先通过分析和判断光学卫星与SAR正射影像的重叠关系，确定影像配准参考数据集；然后采用结合地形信息的多模态影像匹配算法提取影像间的同名点和优选控制点；最后利用有理函数模型（RFM）的RPC解算实现光学卫星影像定位参数的自动优化。

1　技术路线

本文提出了一种以SAR正射影像为参考控制的光学卫星影像自动精准几何定位方法。其实现流程包括：①根据待定位光学卫星影像位置信息收集测区中所有可用的SAR正射影像，并与之进行重叠检测，判断二者是否满足进行定位的重叠度条件，收集具有较大重叠度的SAR正射影像，形成参考影像集合；②为目标光学影像及其参考影像集合中的SAR影像构建影像金字塔，若光学影像与SAR影像的分辨率差异不超过2倍，通常构建4层金字塔影像，层级间缩放比为2，若分辨率差异大于2倍，则根据差异倍数增加一定的金字塔影像层数，并建立查找表以保证在分辨率差异较小的层级间进行影像匹配；③利用SAR-Harris特征检测器[20]在参考影像上检测特征点，为保证特征点分布的均匀性和较高的区分性，本文采用基于影像分块的特征检测策略；④对特征点进行坐标转换得到对应的地面点坐标，并通过RFM将地面点投影到光学影像上，以光学影像的点位为特征点的初始对应，计算局部影像区域的AWOG模板特征[21]，并对匹配点位置精化输出同名点集合，完成结合地形信息的影像匹配；⑤对同名点集合进行RANSAC粗差剔除，以优选的匹配点对为参考控制点，以光学卫星影像数据为输入，进行基于RFM仿射变换补偿模型的平差计算，优化当前层级金字塔对应的光学影像RPC参数；⑥重复步骤③~⑤，通过逐级计算和传递影像仿射变换参数，实现底层金字塔光学卫星影像的高精度几何定位。

2　关键技术

2.1　结合地形信息的SAR影像与光学卫星自动匹配

由于光学卫星原始影像与SAR参考影像之间存在很大的几何差异，因此需要进行Image-Reshaping操作（图1）以大致消除影像间旋转、尺度等显著几何差异。首先以SAR参考影像的特征点为中心设置一个正方形模板窗口，结合影像自身元数据和研究区DEM（本文采用30 m分辨率的SRTM数据）得到窗口影像对应的地面区域；再利用RFM和光学影像RPC参数将地面区域投影到目标光学影像上，得到粗略的初始对应区域；然后建立目标光学影像上初始对应区域和SAR参考影像上标准方形窗口之间的仿射变换模型，并根据变换模型对初始对应区域按照双线性插值的方式进行影像重采样，大致消除两个影像区域之间的旋转、尺度等显著几何差异，得到同为标准方形窗口的搜索区域；最后构建SAR参考影像上模板窗口和目标光学影像上搜索区域的AWOG模板特征[22-23]，利用3D-PC[24]完成模板匹配，得到初始匹配点对集合，并利用RANSAC算法[25]粗差剔除优选点对集合，得到最终基于RFM的参考控制点，实现结合地形信息的影像匹配。

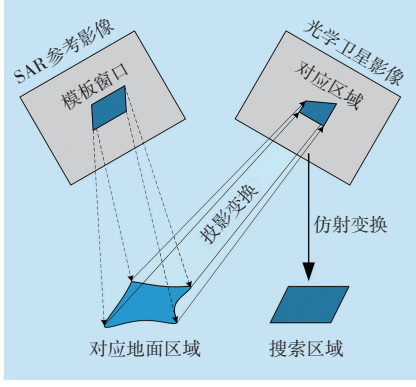


图1　Image-Reshaping示意图

2.2　基于RFM的光学卫星影像高精度几何定位

基于RFM的仿射变换补偿模型被用于更新光学影像的RPC参数，以提高光学影像的定位精度[26]。仿射变换模型被广泛应用于高分辨率光学卫星影像RPC参数的偏差补偿，表达式为：

$$\begin{cases}\Delta x = a_0 + a_1 x_o + a_2 y_o \\ \Delta y = b_0 + b_1 x_o + b_2 y_o\end{cases} \tag{1}$$

式中，x_o、y_o为目标光学卫星影像上匹配点坐标；a_i、b_i（$i=0,1,2$）为待求仿射变换模型参数。

特别的，a_0、b_0分别补偿影像列、行方向的误差，分别由CCD线阵传感器扫描方向上和卫星运行方向上的位姿测量误差引起；a_2、b_1分别补偿由惯性

导航系统和星载GNSS系统漂移误差所导致的影像误差；a_1、b_2补偿由内定向参数误差导致的影像误差。为得到SAR参考影像上的特征点p在光学卫星影像上的初始对应位置，首先需得到以经纬度表示的特征点地理坐标，即

$$\begin{cases}\left(\lambda^p,\phi^p\right)=\text{proj2geo}(x^p_{\text{proj}},y^p_{\text{proj}})\\ x^p_{\text{proj}}=x^{ul}_{\text{proj}}+\text{Re}^x_{\text{s}}x^p_{\text{s}}\\ y^p_{\text{proj}}=y^{ul}_{\text{proj}}+\text{Re}^y_{\text{s}}y^p_{\text{s}}\end{cases}\tag{2}$$

式中，x^p_{s}和y^p_{s}分别为SAR影像上p点的列、行坐标，s表示SAR影像场景；$\left(\lambda^p,\phi^p\right)$为$p$点对应的经纬度坐标；$(x^p_{\text{proj}},y^p_{\text{proj}})$为$p$点对应的投影坐标；proj2geo()为坐标转换函数，将点位坐标从投影坐标系转换到参考地理坐标系；$(x^{ul}_{\text{proj}},y^{ul}_{\text{proj}})$为SAR参考影像左上角点的投影坐标；$\text{Re}^x_{\text{s}}$和$\text{Re}^y_{\text{s}}$为SAR参考影像列、行方向的分辨率。

得到SAR参考影像上特征点对应的地理坐标后，可根据研究区DEM得到对应的点位高程，并通过影像的RPC参数结合RFM将点位投影到光学影像上，得到对应的影像坐标，即

$$\begin{cases}\overline{x^p_{\text{oc}}}=\text{RPC}_x\left(\overline{\lambda^p},\overline{\phi^p},\overline{h^p}\right)\\ \overline{y^p_{\text{oc}}}=\text{RPC}_y\left(\overline{\lambda^p},\overline{\phi^p},\overline{h^p}\right)\end{cases}\tag{3}$$

式中，$\left(\overline{x^p_{\text{oc}}},\overline{y^p_{\text{oc}}}\right)$为由RFM前向计算得到的$p$点在光学影像上的归一化像素坐标，o表示光学影像场景，c表示由计算得到；$\left(\overline{\lambda^p},\overline{\phi^p},\overline{h^p}\right)$为$p$点的归一化物方坐标。

对于光学影像上的每一个影像点，结合式（1）和式（3），可得到区域网平差模型，即

$$\begin{cases}v^p_x=-x^p_{\text{om}}+x^p_{\text{oc}}+\Delta x\\ v^p_y=-y^p_{\text{om}}+y^p_{\text{oc}}+\Delta y\end{cases}\tag{4}$$

式中，x^p_{om}和y^p_{om}为由影像匹配得到的p点在光学影像上的列、行坐标，m表示由匹配得到；x^p_{oc}和y^p_{oc}为由RFM前向计算得到的p点在光学影像上的非归一化列、行坐标。

通过最小二乘平差方法得到待求仿射变换参数a_i和b_i的最优估计值。

3 实验与结果分析

3.1 测区与实验数据描述

本文选取广州市及其周边地区作为实验区，南北长约180 km，东西宽约140 km；西部和西南部多为丘陵地貌，南部为平地，其余部分为山区，东北部山区最大高差接近1 200 m；区内地貌类型比较丰富。参考影像为TerraSAR-X正射影像，空间分辨率为3 m，平面定位精度优于3 m。经过人工测量，待定位光学卫星影像与SAR参考影像的位置偏差在90~260 m，影像数据的详细信息见表1。高程数据为30 m分辨率的SRTM数据，计算机配置为Intel(R) Xeon(R) W-2123 CPU @3.6GHz，RAM 64GB，HDD 4TB。

表1 实验数据信息表

类型	传感器	GSD/m	日期	数量/景
SAR DOM	TerraSAR-X	3.0	2017年9月	12
光学卫星影像	GF-1	2.0-PAN 8.0-MUX	2018年9月	8
	GF-2	0.8-PAN 3.2-MUX	2016年11月	8
	ZY-3	2.1-3.5-PAN 5.8-MUX	2017年12月	12

SAR参考影像和光学卫星影像分布见图2，4景GF-1号影像覆盖了实验区中所有可用的参考影像，其中G1B_1和GF1D_3影像约1/3的区域无参考影像，GF1B_2、GF1D_4影像有小部分区域没有参考影像；4景GF-2号影像覆盖实验区的中西部地区，且在各自面幅范围内均不存在无参考影像的情况；3景ZY-3号影像覆盖实验区的中西部地区，ZY302_1影像约1/3的区域没有参考影像，ZY302_2、ZY302_3影像有小部分区域无参考影像。

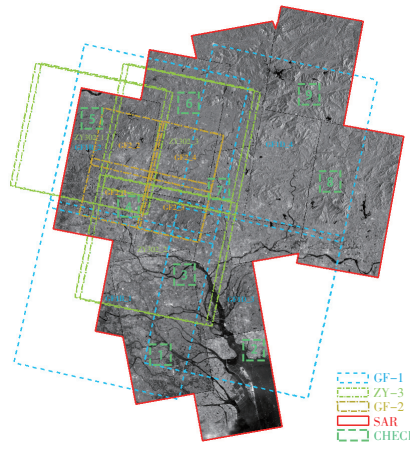


图2 SAR参考影像与光学卫星影像分布图

3.2 几何定位结果分析

实验成功提取了37 008个参考控制点（GCPs）。光学卫星影像与SAR参考影像之间匹配的GCPs数据整体分布见图3，可以看出，经过影像自动匹配和点位优选，光学影像不仅得到了大量的匹配点，而且在有效影像范围内分布均匀，成为良好的GCPs。

ID编号为1022889700599的GCPs点在光学卫星影像和SAR参考影像上的点位信息见图4，左上部分窗口显示该点的位置略图和点号，左侧矩阵分布的小窗口显示光学卫星影像上的点位信息（影像缩放

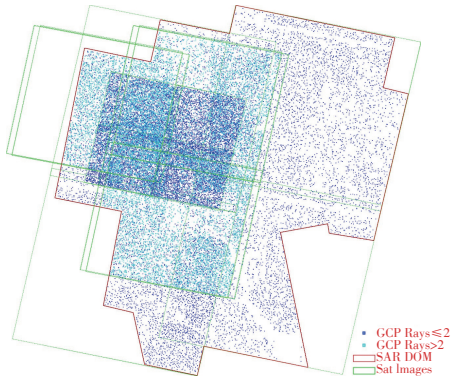


图3　GCPs整体分布图

倍率、点ID编号、像方坐标、像方残差）；右上部列表中显示所有光学卫星影像在平差过程中定义的模型编号等信息，右侧中部列表依次显示GCPs点ID编号、匹配光线数（预测光线数）、*X*方向像方残差、*Y*方向像方残差、平面像方残差，右下方窗口显示SAR参考影像上的点位信息（影像缩放倍率、点ID编号、像方坐标）；可以看出，作为优选后的GCPs，其平面误差均优于1个SAR参考影像像元（GSD=3 m）。

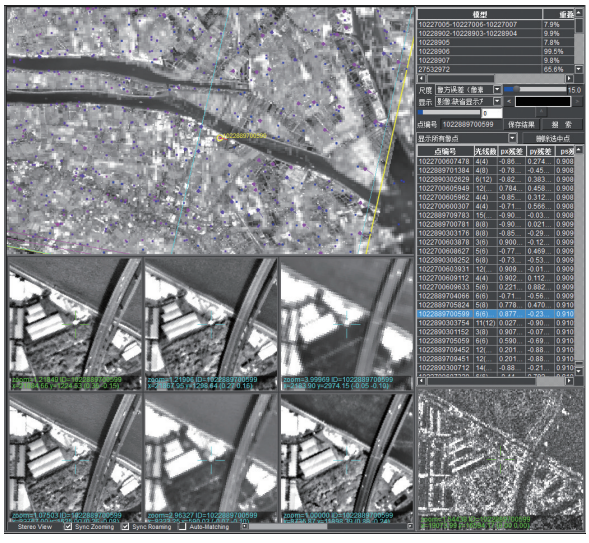


图4　GCPs点位信息

光学卫星影像定量统计结果见表2，从可用的SAR参考影像数量来看，每张光学卫星影像都获得了大量GCPs，GF1B_2影像得到最多，其影像范围中地貌类型较多。经过定位后，光学卫星影像相对于SAR参考影像的定位中误差被约束在0.21~0.85像素之间，对应到物方空间为0.63~2.55 m。由于SAR参考影像的几何定位精度优于1像素，因此光学卫星影像的几何定位精度得到了显著提高。此外，本文方法具有较高的效率，GF2-1影像的处理时间为38.3 s，通常运行时间会随参考影像的数量而增加。例如，GF1B_2影像的处理时间比GF1B_3和GF1B_4影像短，GF1B_2影像在有6幅参考影像的情况下比GF1B_3和GF1B_4影像（7幅）获取了更多的GCPs。

表2　光学卫星影像实验结果

影像编号	参考影像/幅	GCPs数量/个	RMSE/像素	*T*/s
GF1B_1	5	6 479	0.33	85.6
GF1B_2	6	9 868	0.29	90.3
GF1D_3	7	5 463	0.23	97.5
GF1D_4	7	6 033	0.24	98.2
GF2_1	2	5 403	0.22	38.3
GF2_2	3	5 198	0.23	42.5
GF2_3	3	5 438	0.24	43.7
GF2_4	3	4 351	0.21	43.5
ZY302_1	3	4 589	0.74	68.9
ZY302_2	5	5 086	0.80	70.3
ZY302_3	6	5 911	0.84	73.6

注：RMSE为经过几何定位处理后的光学影像与SAR参考影像之间的定位误差（ZY-3数据以每组影像的立体模型记录，GF-1和GF-2以每组影像的PAN影像记录）；*T*为运行时间。

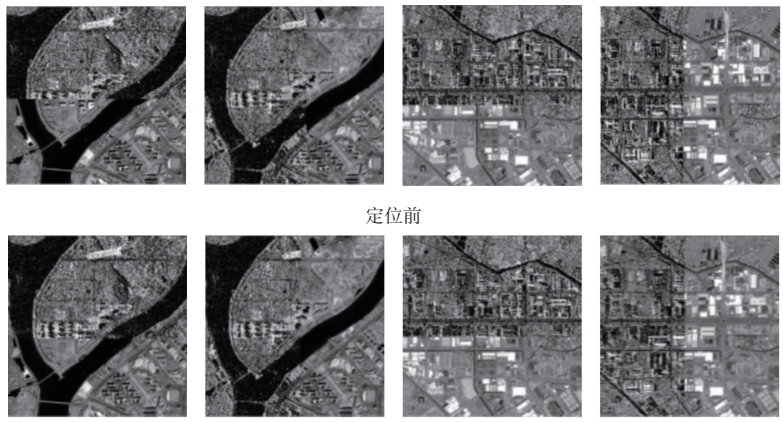
由于SAR影像在山区或密集城市区域具有较大的几何畸变，影像匹配误差较大，对光学影像的几何定位误差也较大，因此为有效评定本文方法的几何定位精度，参考相关测绘生产项目的精度检验方法，引入第三方软件（ArcMap）进行精度统计和验证。首先在整个测区内按照不同地貌类型均匀选取9个待检测区域；然后通过ArcMap软件分别在SAR参考影像和光学卫星正射影像的待检测区域均匀采集若干个同名特征点位坐标；最后以SAR参考影像像元为单位，统计待检测区域的同名点位误差。光学卫星影像定位精度见表3，可以看出，经过本文方法的几何定位处理，光学卫星影像相对于SAR参考影像的定位精度在山地和平地（城区）区域误差较大，约为0.7~0.9像素，在丘陵区域的误差较小，约为0.5像素，第三方检测结果与自动匹配统计结果基本一致。

光学卫星原始影像（定位前）与光学卫星正射影像（定位后）分别与对应SAR参考影像的叠加效果见

表3　光学卫星影像定位精度统计表

检测区域编号	地貌类型	同名点数量/个	RMSE/像素
1		9	0.75
2	平地	9	0.78
3		9	0.73
4		9	0.49
5	丘陵	9	0.51
6		9	0.43
7		9	0.89
8	山地	8	0.91
9		8	0.89

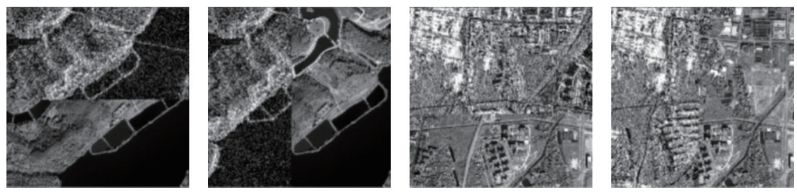
图5，可以看出，光学卫星影像和SAR参考影像在定位前的位置差异非常大，GF-2号影像达到了200 m以上，定位后二者差异约为SAR参考影像的1个像元大小（3 m），定位精度显著提高。



定位前

定位后

a GF-1号影像

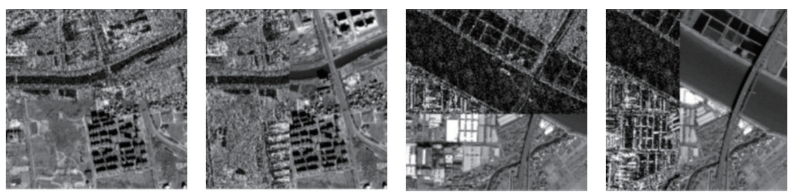


定位前

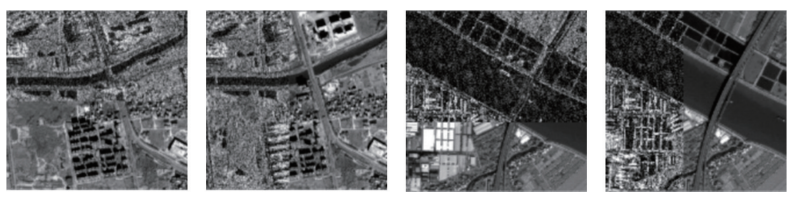


定位后

b GF-2号影像



定位前



定位后

c ZY-3号影像

图5　定位前后光学卫星影像与SAR参考影像叠加效果图

4　结　论

本文提出了一种SAR正射影像辅助的光学卫星影像自动几何定位方法，采用多模态匹配算法匹配光学卫星影像与SAR正射影像并优选连接点作为虚拟控制点，通过基于RFM的区域网平差算法逐步优化光学卫星影像RPC参数，进而完成卫星影像的自动几何定位。实验以12幅TerraSAR-X正射影像为参考数据，对GF-1号、GF-2号和ZY-3号影像进行自动几何定位，验证本文方法的精确性和有效性。结果显示，光学卫星影像的定位精度均得到了显著提高，与SAR正射影像间的位置误差由260 m提高至3 m左右，且本

文方法具有非常高的计算效率，在一般工作站配置下，处理一幅常规幅面的卫星影像耗时为40~100 s。此外，本文方法经程序化设计已经编译实现了模块化的实用工具（图4），实际应用于测绘生产单位相关数据工程生产项目中，对于地形图测绘领域中的影像快速更新生产具有一定指导意义。

参考文献

[1] Li R, Deshpande S, Niu X, et al. Geometric Integration of Aerial and High-resolution Satellite Imagery and Application in Shoreline Mapping[J]. Marine Geodesy, 2008, 31(3): 143-159

[2] Tang S, Wu B, Zhu Q. Combined Adjustment of Multi-resolution Satellite Imagery for Improved Geo-positioning Accuracy[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 114:125-136

[3] Chen D, Tang Y, Zhang H, et al. Incremental Factorization of Big Time Series Data with Blind Factor Approximation[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2019, 33(2):569-584

[4] Cléri I, Pierrot-Deseilligny M, Vallet B. Automatic Georeferencing of a Heritage of Old Analog Aerial Photographs[J]. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, II-3:33-40

[5] Pehani P, Čotar K, Marsetič A, et al. Automatic Geometric Processing for very High Resolution Optical Satellite Data Based on Vector Roads and Orthophotos[J]. Remote Sensing, 2016, 8:343

[6] 刘学人. DSM控制的高分辨率卫星影像几何精度校正[J]. 地理空间信息, 2023, 21(6):82-85

[7] Zhu Q, Jiang W, Zhu Y, et al. Geometric Accuracy Improvement Method for High-resolution Optical Satellite Remote Sensing Imagery Combining Multi-temporal SAR Imagery and GLAS Data[J]. Remote Sensing, 2020, 12:568

[8] Zebker H A, Goldstein R M. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B5): 4993-4999

[9] Werninghaus R, Buckreuss S. The TerraSAR-X Mission and System Design[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 48(2):606-614

[10] 张庆君. 高分三号卫星总体设计与关键技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(3):269-277

[11] 楼良盛, 刘志铭, 张昊, 等. 天绘二号卫星工程设计与实现[J]. 测绘学报, 2020, 49(10):1252-1264

[12] 李涛, 唐新明, 高小明, 等. SAR卫星业务化地形测绘能力分析与展望[J]. 测绘学报, 2021, 50(7):891-904

[13] Bresnahan P C. Absolute Geolocation Accuracy Evaluation of TerraSAR-X-1 Spotlight and Stripmap Imagery: Study Results[C]//Proceedings of Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop, Fairfax, VA, USA, 2009

[14] Eineder M, Minet C, Steigenberger P, et al. Imaging Geodesy: Toward Centimeter-level Ranging Accuracy with TerraSAR-X[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 49(2):661-671

[15] 曹南, 蔡扬扬, 李旭洋, 等. 高分辨率遥感影像特征点自动化匹配方法研究[J]. 地理空间信息, 2022, 20(11):9-13

[16] Bagheri H, Schmitt M, d'Angelo P, et al. A Framework for SAR-optical Stereogrammetry over Urban Areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 146:389-408

[17] Jiao N, Wang F, You H, et al. A Generic Framework for Improving the Geopositioning Accuracy of Multi-source Optical and SAR Imagery[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 169:377-388

[18] Reinartz P, Müller R, Schwind P, et al. Orthorectification of VHR Optical Satellite Data Exploiting the Geometric Accuracy of TerraSAR-X Data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(1):124-132

[19] Merkle N, Luo W, Auer S, et al. Exploiting Deep Matching and SAR Data for the Geo-localization Accuracy Improvement of Optical Satellite Images[J]. Remote Sensing, 2017, 9:586

[20] Dellinger F, Delon J, Gousseau Y, et al. SAR-SIFT: A SIFT-like Algorithm for SAR Images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 53(1):453-466

[21] 樊仲藜, 张力, 王庆栋, 等. SAR影像和光学影像梯度方向加权的快速匹配方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(10): 1390-1403

[22] Fan Z L, Liu Y X, Liu Y X, et al. 3MRS: An Effective Coarse-to-Fine Matching Method for Multimodal Remote Sensing Imagery[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3):478

[23] Ye Y, Bruzzone L, Shan J, et al. Fast and Robust Matching for Multimodal Remote Sensing Image Registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(11):9059-9070

[24] Foroosh H, Zerubia J B, Berthod M. Extension of Phase Correlation to Subpixel Registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(3):188-200

[25] Wu Y, Ma W, Gong M, et al. A Novel Point-matching Algorithm Based on Fast Sample Consensus for Image Registration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 12(1):43-47

[26] Grodecki J, Dial G. Block Adjustment of High-resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(1):59-68