引文格式：占媛,马卫春,孙赜. 基于Fast-NCC SFOC与小面元的全色—多光谱配准方法[J]. 地理空间信息, 2026, 24(5): 12-15. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.05.003

基于Fast-NCC SFOC与小面元的全色—多光谱配准方法

占　媛[1]，马卫春[1]，孙　赜[2]
（1. 安徽省基础测绘信息中心，安徽 合肥 230031；2. 吉林师范大学，吉林 四平 136000）

摘　要：根据国产卫星全色与多光谱影像数据独特的成像特性和显著的时空—光谱差异，深入剖析了影像融合前配准误差的成因，并对相关配准方法进行了研究。针对传统人工配准效率低下、商业软件适用性不足等难题，提出了一种高效高精度的全色—多光谱配准方法。Fast-NCC SFOC与小面元微分校正技术相结合能有效修正国产卫星全色和多光谱影像的配准误差。利用吉林一号安徽地区影像数据进行验证，结果表明该方法配准精度优于1个全色像素，可为后续国产卫星的遥感应用提供重要的技术支撑。

关键词：国产卫星；影像融合；全色—多光谱配准
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）05-0012-04

Panchromatic and Multi-spectral Images Registration Method Based on Fast-NCC SFOC and Tiny Facet Element

ZHAN Yuan[1], MA Weichun[1], SUN Ze[2]
(1. Anhui Province Fundamental Geomatics Center, Hefei 230031, China;
2. Jilin Normal University, Siping 136000, China)

Abstract: Based on the unique imaging characteristics of domestic satellite panchromatic and multi-spectral image data and their significant spatio-temporal-spectral differences, we conducted an in-depth analysis of the causes of registration errors prior to image fusion and studied relevant registration methods. Addressing the issues of low efficiency in traditional manual registration and insufficient applicability of commercial software, we proposed a panchromatic and multi-spectral images registration method with high efficiency and high precision. By integrating Fast-NCC SFOC and tiny facet element differential correction technology, this method effectively corrects registration errors of domestic satellite panchromatic and multi-spectral images. This method was validated by Jilin-1 data from Anhui Province, China. The result demonstrates that the registration accuracy achieved by this method is better than one panchromatic pixel, providing important technical support for subsequent remote sensing applications of domestic satellites.

Key words: domestic satellite, image fusion, panchromatic and multi-spectral images registration

现代遥感卫星通常集成全色与多光谱传感器观测，但在拍摄过程中可能存在成像时间不一致的现象。以QuickBird卫星为例，其全色和多光谱传感器存在约0.2 s[1]的成像时差，而遥感卫星在太空中的飞行速度至少为7.9 km/s[2]，成像时差将导致多光谱影像与全色影像不能完全对准。此外，国产卫星全色影像普遍采用多片线阵CCD拼接以扩大幅宽，将引入各种系统性几何偏差，影响全色与多光谱数据的像元级配准精度。图像配准是遥感图像处理的关键步骤，全色和多光谱影像配准精度将直接影响遥感影像质量和后续应用效果[3]。在实际生产过程中，部分国产卫星数据在完成平差校正后仍存在配准偏差，导致融合影像出现晕边、重影、错位等问题，这主要源于正射校正后影像虽被归一化至相同方向和尺度，但因成像时差、卫星平台颤振[4]、分辨率差异、波段差异[5]和校准随机误差[6]等因素，全色与多光谱影像间仍残留配准误差，需进一步修正。目前主流融合方法均以全色和多光谱影像准确配准为前提，若配准精度不足，将严重制约高分辨遥感影像融合、变化检测等后续应用的精度水平。

国内外学者针对影像配准问题开展了大量研究，主要可分为基于区域、基于特征和基于学习的方法3类。基于区域的方法包含基于灰度和基于变换域匹配，前者如互相关法[7]、互信息法[8]，实现简单但对大形变和噪声敏感、速度慢；后者如傅里叶变换法[9]，计算效率较高但依赖图像间相同区域，难以满足国产卫星高精度配准需求。基于特征的方法通过提取特征点进行

项目来源：安徽省测绘局2025年度科技创新资助项目（2025-KJ-10）。
第一作者简介：占媛（1989—），硕士，工程师，主要从事地理信息数据处理、摄影测量与遥感等应用研究工作，E-mail：805123079@qq.com。

匹配，如SIFT[10]、SURF[11]、ORB[12]等算法，对旋转和尺度变化鲁棒性强[13]，但在处理国产高分辨率卫星影像时，因分辨率差异和特征点分布不均等因素面临匹配效率低下的问题。基于学习的方法，如基于卷积神经网络的端到端配准模型正被逐步应用[14]，但目前受限于高质量标注数据不足，其鲁棒性常需结合传统方法予以增强。目前ENVI、Erdas、PCI Geomatica等主流商业软件基于传统配准方法，对QuickBird、WorldView等国际卫星数据具有较高精度，但难以满足国产卫星影像的特殊需求[15]。国产商业软件多采用基于特征点匹配的小面元微分校正或仿射变换模型，其性能依赖于精确的同名点匹配和确定性几何变换关系，但全色与多光谱影像间缺乏严格的空间对应性，导致处理后仍存在非线性、不连续的几何错位，且计算效率较低。本文针对国产卫星多光谱与全色影像配准存在的问题，基于其成像几何规律分析配准误差成因，提出了一种准确稳健、适用性强且自动化的高精度配准方法。以吉林一号安徽地区数据为实验对象，验证了该方法在提升影像融合质量和生产效率方面的有效性。研究成果可为国产卫星影像的高精度自动化处理提供技术支撑，增强遥感数据的应用价值，为各领域决策提供更可靠的信息支持。

1　研究方法

对全色与多光谱数据进行正射校正后，首先利用遥感影像匹配方法快速、精确地识别影像间的同名点，并通过一阶与二阶通道的可导向滤波器（SFOC）新型特征描述符[16]提升同名点匹配的精度；再采用基于NCC和SFOC的快速匹配相似性度量方法（Fast-NCC SFOC），结合快速傅里叶变换（FFT）和积分图像加速匹配过程，并剔除提取控制点的误差；然后引入小面元微分校正[17]，有效修正全色和多光谱影像的非线性误差；最终实现全色—多光谱影像之间的高精度匹配。

1.1　基于Fast-NCC SFOC的精确控制点提取

1）特征提取匹配。SFOC描述符主要由具有多尺度策略的一阶可控通道、二阶可控通道和膨胀高斯卷积与归一化3个关键组件构成[16]，利用可转向滤波器的多尺度策略和不同膨胀率的膨胀高斯卷积提取多方向多尺度的结构特征，提高抗干扰能力。本文首先利用该描述符对已正射校正的全色和多光谱影像进行特征提取，再采用Fast-NCC SFOC进行模板匹配，与SFOC特征最相似的位置即为控制点。具体计算过程为：

$$\mathrm{NCC}_{\mathrm{SFOC}}(S,T)=\frac{R_{ST}(x,y,z)-R_S(x,y,z)R_T(i,j,z)/mnz}{\sqrt{[R_{SS}(x,y,z)-R_S^2(x,y,z)/mnz]}\sqrt{R_{TT}(i,j,z)-R_T^2(i,j,z)/mnz}} \tag{1}$$

式中，$\mathrm{NCC}_{\mathrm{SFOC}}(S,T)$为模板窗口$T(i,j,z)$和搜索窗口$S(x,y,z)$在位置$(i,j,z)$处的特征值。

通过FFT技术和积分图像提高计算效率，式（1）中仅包含与$S(x,y,z)$相关的3项，即

$$R_{ST}(x,y,z)=\int^{-1}[\int(S)\int^{*}(T)] \tag{2}$$

$$\begin{cases}R_S(x,y,z)=\sum_{h=1}^{z}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}S(x+i,y+j,z)\\ R_{SS}(x,y,z)=\sum_{h=1}^{z}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}S^2(x+i,y+j,z)\end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases}R_T(i,j,z)=\sum_{h=1}^{z}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}T(i,j,z)\\ R_{TT}(i,j,z)=\sum_{h=1}^{z}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}T^2(i,j,z)\end{cases} \tag{4}$$

式中，$\int$为FFT信号；$\int^{*}$为变换结果的共轭复运算；$\int^{-1}$为逆FFT（IFFT）。

利用积分图像替代原始的求和过程，可以高效计算R_s和R_{ss}项。积分过程仅涉及有限数量的额外操作，Fast-NCC SFOC算法的复杂度主要由式（2）中的FFT和IFFT决定，而NCC算法复杂度与模板窗口和搜索窗口大小的乘积成正比，因此模板和搜索窗口越大，Fast-NCC SFOC的计算优势越大，匹配效率得到大幅提高。

2）控制点优化。在实际生产中部分影像存在失真、大面积水域或云层阴影遮挡等现象，因此在特征提取完成后，本文采用RANSAC算法和空间约束筛选匹配点对，剔除误匹配特征点，以提高特征点的匹配精度和可靠度。

1.2　小面元微分校正

由于全色和多光谱影像之间主要是非线性、不连续的几何错位，高阶多项式等全局变换模型无法满足配准精度要求，因此本文采用小面元微分校正进行变换模型估计，通过逐面元校正实现全局高精度配准。

1）小面元划分。将待校正影像划分为多个小面元，面元大小可根据地形复杂度和控制点密度动态调整，确保每个小面元内的几何变形可近似为简单的线性或低阶多项式变形；同时约束每个面元内至少包含3个不共线的精确控制点，不足时通过相邻面元控制点共享补充，保证模型可解与稳定性。对于每个待校正的面元，搜索落入其内部及周边缓冲区的所有精确控制点，通过这些点对的坐标构建变换关系。

2）局部模型构建。面元内采用局部仿射变换模型求解几何变换参数，以较少的参数有效补偿影像间的平移、旋转、缩放、剪切等变形，在保证精度的同

时兼顾运算效率，数学表达式为：

$$\begin{cases} x' = a_0 + a_1 x + a_2 y \\ y' = b_0 + b_1 x + b_2 y \end{cases} \tag{5}$$

式中，(x,y)为多光谱影像上的原始像素坐标；(x',y')为其对应于全色影像上的目标坐标；a_0、a_1、a_2、b_0、b_1、b_2为待求解的变换参数。

参数求解过程中采用加权最小二乘法进行拟合。初步解算完成后，计算面元内控制点经变换后的残差，若某个控制点的残差异常，则将其判定为粗差予以剔除，并重新解算变换参数，确保后续配准的精确性。

1.3 影像配准与评估

在基于几何变换模型的影像配准过程中，针对各面元逐一处理时，需将原始多光谱影像中的像素坐标映射至全色影像坐标系下，但变换后的目标坐标往往不位于整数行列位置，直接赋值将导致像素错位或信息损失。本文采用反解法[17]，将全色影像上每个像素的行列坐标逆向映射至多光谱影像坐标系中，根据其在多光谱图像上对应的非整数位置，选取邻近的4个像素点，运用双线性插值算法计算该像素值，不仅有效保持了影像纹理细节，也显著提升了配准精度。本文通过均方根误差（RMSE）和目视检测共同评估配准结果的精度。

2 实验区域与结果评估

为验证本文配准方法的准确性和通用性，选取安徽省4景吉林一号卫星影像进行实验分析（表1、图1）。

表1 影像全色与多光谱配准实验数据

影像	获取时间	区域位置	主要地形	光谱范围/nm		空间分辨率/m
影像一	2024-04-18	安徽省合肥市区及肥西	平原	全色	450~700	0.75
影像二	2024-05-10	安徽省六安市舒城县	山区丘陵	多光谱	430~520	3.00
影像三	2024-01-13	安徽省宣城市郎溪县	平原丘陵		520~610	
影像四	2024-01-13	安徽省宣城市广德市	山区丘陵		610~690	
					770~895	

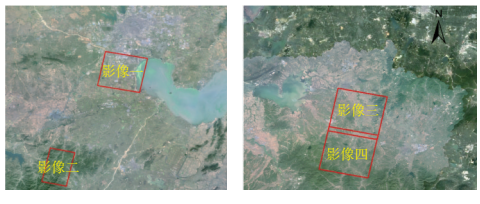
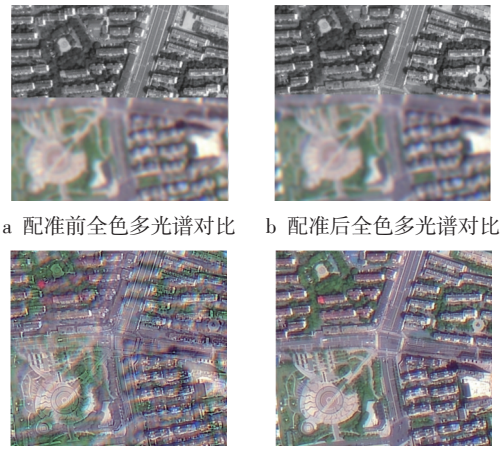


图1 实验影像分布图

2.1 配准结果对比

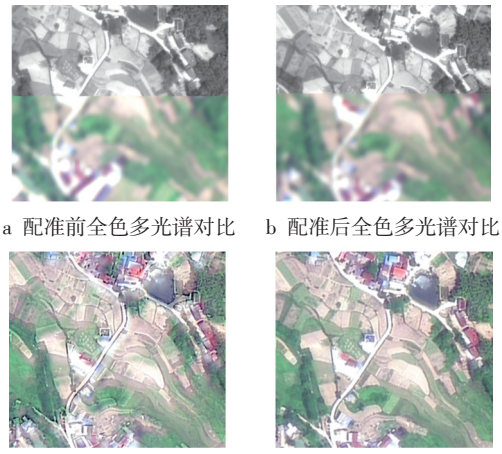
通过目视检测进行定性验证，以正射校正后全色影像为模板影像，通过叠加显示和局部放大对比，验证全色多光谱边缘与纹理的配准一致性。3组遥感影像利用本文方法处理前后的全色与多光谱叠加对比和融合效果见图2~4，可以看出，图2、3中的建筑物、道路、田块等地物，配准前道路错位，有明显位移现象，建筑物、田块等边缘颜色溢出，呈现多彩颜色，边缘模糊，利用本文方法配准后各类地物边缘清晰，色彩均匀且无错位，影像的精度和质量均得到大幅提高；图4中山区地形起伏较大，配准前融合结果存在



a 配准前全色多光谱对比 b 配准后全色多光谱对比

c 配准前融合结果 d 配准后融合结果

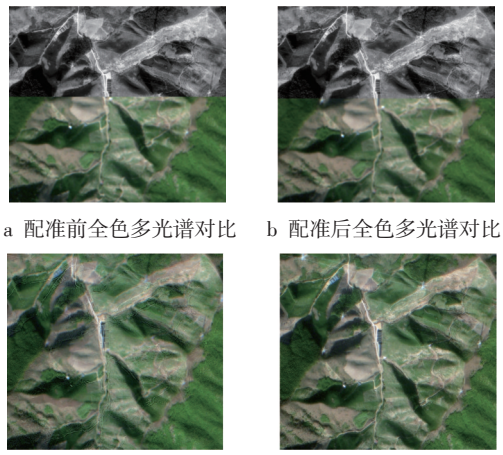
图2 影像一配准结果前后对比



a 配准前全色多光谱对比 b 配准后全色多光谱对比

c 配准前融合结果 d 配准后融合结果

图3 影像二配准结果前后对比



a 配准前全色多光谱对比 b 配准后全色多光谱对比

c 配准前融合结果 d 配准后融合结果

图4 影像四配准结果前后对比

明显重影和位移，本文方法使全色与多光谱影像基本完全配准，融合效果明显，颜色均匀；对比配准前后效果可知，本文方法能有效提高全色多光谱的配准精度，二者的配准结果极大地影响融合效果。

2.2　人工精度评估

为进一步验证配准结果的准确性，本文采用RMSE进行评估。RMSE可反映配准后影像与参考影像之间的像素偏移程度，从而确保配准结果的准确性和可靠性。高质量融合影像生产需保证多光谱和全色影像同名点映射精度在1个全色像元以内，山地、高山地不超过1.5个全色像元[3]。在影像上随机均匀地选取至少20个同名点作为检查点，输出各点在原始全色影像和配准后多光谱影像中的坐标，计算二者的中误差，结果见表2，配准前偏移量均较大，不满足影像配准技术指标要求；4景影像的配准中误差分别为0.45、0.93、0.74、0.73 m，影像二主要为山地，因此4景影像的配准误差均满足指标要求。结果表明，本文方法适用于各类地形场景的影像数据，配准后成果能满足融合要求。

表2　不同影像配准前后精度对比

影像	配准前后	检查点数/个	平面误差/m		
			X	*Y*	RMSE
影像一	配准前	20	19.684	21.876	29.430
	配准后	20	0.353	0.354	0.450
影像二	配准前	20	3.643	5.716	6.779
	配准后	20	0.660	0.654	0.930
影像三	配准前	22	22.111	55.645	59.880
	配准后	21	0.549	0.498	0.740
影像四	配准前	29	21.794	45.715	50.640
	配准后	20	0.546	0.488	0.730

3　结　语

本文从国产卫星全色多光谱的成像机理出发，针对部分国产卫星全色和多光谱影像完成平差校正后仍存在配准偏差的实际生产问题，对其产生原因和配准方法进行了分析研究，提出结合Fast-NCC SFOC和小面元微分校正的方法，有效修正了全色和多光谱影像的偏移误差，实现了全色多光谱之间的精确配准。实验结果表明，配准后精度满足影像配准技术指标要求，进一步验证了本文方法的有效性和准确性。研究结果为国产卫星全色多光谱数据批量配准提供了一种有效且高效的解决方法，为后续国产卫星的遥感应用提供了重要的技术支撑。

参考文献

[1]　李想,杨灿坤,周春平,等. 高分辨率光学卫星图像目标运动信息提取研究综述[J]. 国土资源遥感,2019,31(3):1-9

[2]　姚永祥,张永军,万一,等. 顾及各向异性加权力矩与绝对相位方向的异源影像匹配[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(11):1727-1736

[3]　丁海燕,刘合辉,刘春菊. SIFT遥感影像快速配准方法[J]. 地理空间信息,2017,15(2): 69-71

[4]　张永军,王梦欣,万一,等. 高分七号卫星影像融合中的全色—多光谱配准误差补偿模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1029-1038

[5]　赵旭辉,蒋永华. 一种考虑云层影响的遥感影像波段配准方案[J]. 地理空间信息,2020,18(5):65-69

[6]　Xie G, Wang M, Zhang Z, et al. Near Real-time Automatic Sub-pixel Registration of Panchromatic and Multispectral Images for Pan-sharpening[J]. Remote Sensing,2021,13(18):3674

[7]　Studholme C,Hill D,Hawkes D. An Overlap Invariant Entropy Measure of 3D Medical Image Alignment[J]. Pattern Recognition,1999,32(1):71-86

[8]　Viola P, Wells W M. Alignment by Maximization of Mutual Information[J]. International Journal of Computer Vision,1997,24(2):137-154

[9]　Anuta P E. Spatial Registration of Multispectral and Multitemporal Digital Imagery Using Fast Fourier Transform Techniques[J]. IEEE Transactions on Geoscience Electronics,1970,8(4):353-368

[10]　Lowe D G. Object Recognition from Local Scale-invariant Features[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision,1999:1150-1157

[11]　Bay H, Tuytelaars T, Gool L V. SURF: Speeded Up Robust Features[C]//Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision. Graz,Austria,2006:404-417

[12]　Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An Efficient Alternative to SIFT or SURF[C]. 2011 IEEE International Conference on Computer Vision,2011

[13]　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

[14]　Wang S,Quan D,Liang X,et al. A Deep Learning Framework for Remote Sensing Image Registration[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2018,145:148-164

[15]　王森. 高分二号全色与多光谱遥感图像配准插件研发[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2020

[16]　Ye Y, Zhu B, Tang T, et al. A Robust Multimodal Remote Sensing Image Registration Method and System Using Steerable Filters with First- and Second-order Gradients[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2022,188:331-350

[17]　朱红,宋伟东,谭海,等. Delaunay三角网优化下的小面元遥感影像配准算法[J]. 信号处理,2016,32(9):1032-1038