

# 高分辨率卫星正射影像快速制作

宋小波

黄山领创测绘有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i4.6745

**[摘要]** 在具有精确地理信息的参考影像支持下，通过异源影像的配准来制作高分辨率卫星正射影像已成为正射影像制作的主要途径之一。针对异源光学影像的配准，分别设计实现了基于 ESITT 与 RFM 引导下的 Forester 特征匹配算法，并采用多项式、小面元以及仿射变换等几何纠正模型，实现了高分辨率光学卫星正射影像的快速自动制作。试验结果表明，本文方法有效提升了经典 SIFT 算法的适用性，对于异源影像配准具有良好的效果，正射纠正相对精度优于 1.2 个像素，满足了光学卫星正射影像自动快速制作的实际生产需求。

**[关键词]** 正射影像；参考影像；SIFT 影像配准；RFM；几何纠正

## High-resolution satellite orthophoto images for rapid production

Song Xiaobo

Huangshan Lingchuang Surveying and Mapping Co., Ltd

**[Abstract]** With the support of reference images with accurate geographic information, the production of high-resolution satellite positive projection images through the registration of heterologous images has become one of the main ways of positive projection image production. For the registration of heterologous optical images, the Forester feature matching algorithm based on ESSITT and RFT is designed respectively, and the geometric correction model such as polynomial, small plane element and affine transformation is adopted to realize the rapid automatic production of high-resolution optical satellite orthophotivie images. The test results show that the method in this paper effectively improves the applicability of the classical SIFT algorithm, and has a good effect on heterologous image registration. The relative accuracy of orthotopic correction is better than 1.2 pixels, which meets the actual production requirements of automatic and rapid production of optical satellite orthophotor image.

**[Key words]** direct image; reference image; SIFT image registration; RFM; geometric correction

### 引言

正射影像产品形象、直观、可读性强、时效性好，需求日益旺盛和迫切，已经成为测绘 4D 产品的首选。常规光学卫星影像 DOM 的生产，通常利用天绘、资源三号等测绘卫星影像，经过空中三角测量、密集匹配、前方交会、DEM 生成，处理过程相对复杂，并且需要高精度 DEM 数据的支持。非测绘类遥感卫星，通常具有获取机动、高分辨率的优势，但精度难以保证；

另外，不具备立体成像能力，无法直接获取 DEMo 而测绘类遥感影像一般精度较高，但现有卫星影像的分辨率相对较低。这两类数据在精度、分辨率和时效性方面有很强的互补性，二者融合后既可以解决看得清、辨得明的问题，又可以解决定得准和现势性的问题。因此，基于异源影像配准的高分辨率正射影像制作已成为 DOM 制作的主要途径之一。

基于异源影像配准的高分辨率卫星正射影像制作的实质

是利用已有参考正射影像的几何信息作为控制实现对异源影像的纠正，是一种相对快速纠正的方法，关键环节是建立待纠正影像与参考影像之间的几何转换关系，主要包括影像匹配、几何纠正两个主要步骤。在影像特征匹配方面，因 SIFT (scale-*iova*2anWeatumtransform) 特征具有尺度、旋转不变性，且对光照变化和视觉变化具有不变性，因此基于 sift 的特征匹配方法在影像相对定向、影像配准、自动纠正等方面得到了良好的应用[1-6]。而异源卫星影像之间通常具有大的分辨率差异、明显的辐射差异和严重的几何变形，其自动匹配一直存在着匹配率低、可靠性差等问题。因此，针对这些问题，本文借鉴文献 7~10 的思想，在传统 SIFT 和 Forstner 特征匹配的基础上，针对异源光学影像之间的匹配，分别设计实现了增强 SIFT (enhancedscale-*iova*2antWaturytransform 简称 ESIFT) 和 RFM (有理多项式模型, RationalFunctionModel) 引导下的 Forstner 匹配算法，实现了参考影像和待纠正影像的自动快速配准。后续几何纠正方面，利用仿射变换、多项式和小面元三种快速纠正模型完成对影像的几何纠正；并利用三套实际影像数据进行了试验，定量分析了三种纠正方法的精度。试验结果表明，本文方法很好地解决异源光学卫星影像之间由于尺度差异大、辐射差异明显、几何变形显著带来的自动匹配难题，达到了较为理想的自动化处理效果。

## 1 DOM 快速制作流程及方法

光学卫星 DOM 制作时根据影像参数的不同，采用两种思路进行匹配：待纠正光学影像没有地理参考信息时，采用 ESIFT 特征匹配算法进行盲匹配；反之，采用 RFM 引导下的 Forstner 匹配方法进行同名点匹配。DOM 制作的整体处理流程主要包括五个步骤：①首先根据影像大小和尺度，对影像进行金字塔采样。②在金字塔的顶层实施基于特征的匹配，对每一种方法提取的同名特征点，利用 RANSAC 准则剔除外点，保证匹配结果可靠。③根据金字塔采样关系，对金字塔顶层提取的同名特征点传递到下一层，直至金字塔底层；在金字塔的底层，利用上层的几何关系，对待纠正影像进行快速的纠正与重采样，然后再进行匹配。由于已经消除了大的几何畸变，所以采用常规的基于灰度的影像匹配算法。④采用仿射变换、多项式纠正、小面元纠正分别对纠正影像进行几何纠正。⑤最后对纠正后的正射影像进行精度评定。

### 1.1 影像匹配

#### (1) ESIFT 匹配算法

SIFT 算子主要分为尺度空间构建、尺度空间极值检测、关键点定位、方向确定、关键点描述等五个步骤。其中，尺度空间的构建主要分为高斯金字塔影像和高斯差分尺度空间构建两部分，而后者在前者基础上进行相邻图层相减即可。构建高斯金字塔影像时，高斯核尺寸的大小与其所需时间密切相关。

在不同核尺寸下，通过对不同尺度、不同旋转角度的遥感影像进行试验发现，随着核尺寸增大，构建金字塔影像消耗时间不断增加，检测出的关键点数目也逐步增多。但当核尺寸增大到一定程度，关键点数目开始呈现下降趋势。

本文通过试验发现，随着核尺寸的逐渐增加，检测出的关键点数目会出现临界值，临界值出现时对应的核尺寸不尽相同。为了避免上述情况，争取在较少时间内提取出较多特征点，本文 ESIFT 匹配对 SIFT 算法进行了增强，提出一种自适应确定高斯核尺寸的方法，找出最优临界值，确保在较少时间内关键点数量能够保持足够的数量。

#### (2) RFM 引导下的 Forstner 匹配算法

RFM 引导下的 Foerster 匹配算法的基本思想是首先利用待纠正影像的 RFM，结合参考影像的坐标信息，对待纠正影像进行快速初纠正，以消除待纠正影像与原始影像之间的大的位置差异与旋转变形等，使其具有统一的地理参考，然后进行基于 Forstner 算子的匹配。首先利用 RFM 对待纠正影像进行初纠正和重采样，然后在参考影像和初纠正后影像的金字塔影像顶层利用 Forstner 特征提取算子提取一定数目的特征点；然后根据参考影像上特征点的地面坐标，确定搜索范围，在初纠正后的影像上利用灰度匹配算法寻找同名点；最后再对同名特征点进行检查，剔除误匹配点。

### 1.2 几何纠正

几何纠正近似模型常用的包括仿射变换法、多项式纠正法和小面元纠正法。仿射变换是一种线性变换，它能够同时满足平移、尺度和旋转纠正的要求，其表达式如公式 (1) 所示：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & t_x \\ a_3 & a_4 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ref} \\ y_{ref} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中： $(x, y)$  与  $(x_{ref}, y_{ref})$  分别表示纠正后像点坐标和参考影像上像点坐标； $t_x, t_y$  表示平移量； $a_i (i=1, 2, 3, 4)$  反映图像旋转、缩放等变化。

多项式模型把影像之间的变形看作是平移变换、尺度变换和旋转变换三种基本变形及其它变形的综合，其原理比较直观，计算较为简单，尤其是对于平坦地区的影像，其纠正精度能够很好地满足实际应用。常用的多项式模型为一次、二次多项式模型，其表达式分别见公式 (2) 和 (3)：

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1 x_{ref} + a_2 y_{ref} \\ y &= b_0 + b_1 x_{ref} + b_2 y_{ref} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1 x_{ref} + a_2 x_{ref}^2 + a_3 x_{ref} y_{ref} + a_4 x_{ref}^2 + a_5 y_{ref}^2 \\ y &= b_0 + a_1 x_{ref} + b_2 y_{ref} + b_3 x_{ref} y_{ref} + b_4 x_{ref}^2 + b_5 y_{ref}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中： $(x, y)$  与  $(x_{ref}, y_{ref})$  分别表示纠正后像点坐标和

参考影像上像点坐标： $a_i$  与  $b_i$  表示拟合的变换系数。

小面元纠正是根据控制点的分布，构建三角网；对于每一个三角形，以仿射变换关系完成该三角形内所有像元的坐标计算。

三种几何纠正方法中，仿射变换和多项式纠正均为整体变换，计算简单，适合于平坦地区，地形起伏变化剧烈时则会产生较大的误差，影响整体精度。小面元纠正实质是多个局部仿射变换的综合，能够顾及到局部几何变形，精度较好，对于地形变化较大区域具有较好的适应性，但过程较为复杂；此外，小面元纠正模型的精度受控制点的分布影响较大，当分布不够均匀时，则会造成部分三角形过大、从而影响精度的情况。

### 1.3 精度评定

精度评定主要采用目视检查法和中误差法。其中，目视检查法主要利用棋盘影像的方式，即分别对参考影像和纠正后影像按一定的间隔分别交替取样，生成一幅新的类似棋盘格形式的影像，通过检查每个矩形格网接边线处地物或特征的对齐情况来检查局部是否存在大的误差。

## 2 试验及结果分析

### 2.1 试验数据

为了验证本文方法用于生产的有效性和对不同类型遥感影像的适应性，选用三套数据进行试验，每套数据均包括一幅参考影像和一幅待纠正影像。试验运行环境为联想 P90 工作站，操作系统为 windows764 位，CPU 为 E5-2236，主频 2.27GHz，内存 32GB。

数据一（如图 3 所示）拍摄地点为平坦地区；参考影像为天绘一号 7m 分辨率正射影像，图像大小为 7977x7003 像素；待纠正影像为国产高分九号卫星影像，图像大小为 19592x19619 像素，分辨率为 0.2 米，拍摄时间为 2021 年 10 月 30 日。

数据二（如图 4 所示）拍摄地点为某港口，参考影像为 WorldView 卫星正射影像，分辨率为 0.5m，图像大小为 10100x7834；待纠正影像为某高分率卫星影像，分辨率为 0.1m，图像大小为 4516x6430，拍摄时间为 2021 年 5 月 14 日。

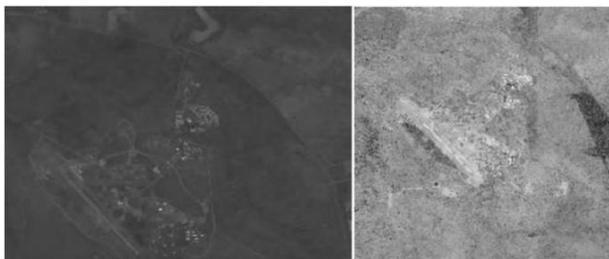


图 3 天绘一号参考影像与待纠正高九号卫星影像



图 4 WorldView 参考影像与待纠正国产卫星影像

数据三（如图 5 所示）拍摄地点为某机场附近，参考影像为 Geoeye 卫星正射影像，分辨率为 0.21m，图像大小为 13950x19299 像素；待纠正影像为国产高分九号卫星影像，图像大小为 8524x7673 像素，分辨率为 0.2m，拍摄时间为 2021 年 6 月 8 日。



图 5 Geoeye 参考影像与待纠正高分九号光学卫星影像

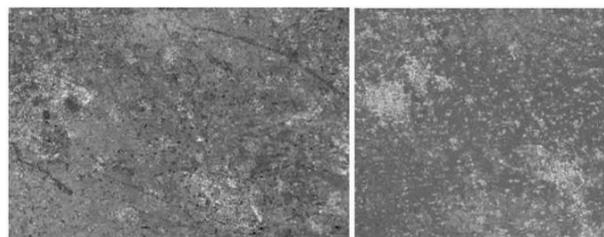


图 6 谷歌参考影像与待纠正天绘一号卫星三线阵影像

表格 1 三套数据相对正射纠正精度

试验数据	匹配算法	匹配总点数		纠正模型 (精度 pixel)		
		控制点	检查点	放射变换	多项式	小面元
数据一	ESIFT	42	14	0.376585	0.376987	0.289906
数据二	ESIFT	39	13	1.479680	1.478096	1.296992
数据三	ESIFT	632	211	1.142082	1.169985	1.141874

### 2.2 试验结果分析

三套数据的匹配点数和精度分析结果见表 1，匹配结果、生成的正射影像及棋盘影像局部放大结果如图 7~14 所示，图中十字丝处为匹配成功的点，红色十字丝点为控制点、蓝色十字丝点为检查点。根据表 1 结果，三套数据纠正后相对精度均在 1.5 个像素以内，最高达到了三分之一像素，表明本文方法可以用于正射影像的实际生产；而且仿射变换与多项式法结果相当，小面元法精度要高于仿射变换和多项式法，这是由数学模型决定的，当控制点数量足够多且分布均匀时，小面元法将无限接近数字微分纠正法。数据一、数据二、数据三均为平坦

地区, 仿射变换、多项式模型也能获得较高的纠正精度, 与小面元模型结果差别不大; 而数据四既有平地也有山地, 地形变化较大, 则显示出小面元模型的优势。

数据一匹配结果如图 7 所示, 共匹配成功 56 个点, 分布不够均匀。对照图 3 的原始影像, 从几何上来看, 两幅影像虽没有大的旋转, 但参考影像的分辨率为 5 米, 待纠正影像分辨率为 0.7 米, 尺度差异显著, 达到了 7 倍; 而且一个为全色影像, 一个为 RGB 影像, 辐射差异明显, 所以导致匹配成功的点数较少。生成的正射影像及棋盘格目视检查影像分别如图 8、图 9 所示, 从图 8 放大结果来看, 道路接缝处非常吻合, 目视检查基本都在一个像素以内, 说明了本文方法对于尺度和辐射差异显著的影像仍然收到了良好的效果。



图 7 数据一匹配结果

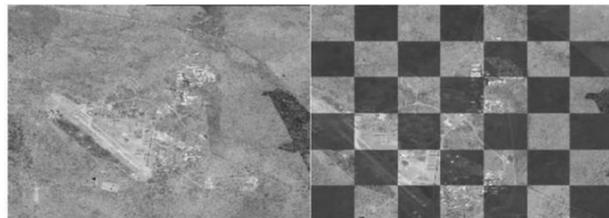


图 8 数据一正射影像局部放大图

数据二匹配结果如图 9 所示, 共匹配成功 52 个点, 分布也存在疏密不均的现象, 究其原因主要是因为这两幅影像分辨率相差达到了四倍, 尺度差异比较显著, 而且辐射差异也较为明显, 这都对影像匹配造成了一定挑战。检查图 10 的棋盘格影像发现大部分区域接边准确, 在一个像素左右, 但右下角区域道路接缝存在错开的现象, 对照图 9 发现, 这里因为缺乏必要匹配点, 从而导致局部存在较大的位置变形。



图 9 数据二匹配结果

数据三由于两幅影像分辨率比较接近, 而且属于平坦地区, 所以匹配到了大量的同名点, 匹配结果如图 11 所示, 共匹配成功 843 个同名点。数据三生成的正射影像及棋盘格影像

如图 12 所示, 目视检查发现, 匹配密集的区域, 误差基本在一个像素在内; 缺少匹配点的区域, 由于缺乏必要的控制, 个别地方误差达到了两个像素。



图 10 数据二正射影像局部放大图



图 11 数据三匹配结果

### 3 结语

本文面向参考影像支持下的高分辨率卫星 DOM 快速制作, 针对经典 SIFT 算法应用于遥感影像配准的局限以及为了提高特征匹配算法与成果精度的可靠性, 设计实现了基于 ESIFT 匹配、RFM 引导下的 Forstder 匹配的异源影像配准算法, 试验分析了仿射变换、多项式、小面元等三种几何纠正模型的精度, 结果表明本文方法生成的成果精度可靠, 对于尺度、辐射差异大的光学卫星影像具有较好的适应性, 可以用于光学卫星正射影像的实际生产。目前主要针对光学与光学影像之间的配准进行了分析, 下一步将针对光学和雷达影像的配准开展试验研究。

### 【参考文献】

- [1]王楠.基于高分辨率遥感卫星数据的正射影像制作方法[J].经纬天地, 2022(03): 23-27+31.
- [2]田峰, 许丽杰, 刘建军.基于高分辨率卫星影像制作正射影像流程研究[J].世界有色金属, 2016(12): 79-80.
- [3]林京, 于雅辉, 宋威, 等.基于地理国情普查高分辨率卫星遥感数据正射影像制作[J].测绘与空间地理信息, 2016, 39(06): 142-144+147.
- [4]米超川, 刘英.基于 GXL 系统利用高分辨率卫星影像制作正射影像[J].测绘标准化, 2014, 30(02): 43-44.
- [5]仇生泉, 任向红.基于 PCI 软件的高分辨率卫星正射影像图的制作——以中卫市为例[J].江西测绘, 2007(03): 35-37.