

引文格式: 钟灵毓, 薛武, 王鹏. 光学遥感影像几何校正方法分析[J]. 北京测绘, 2020, 34(9): 1271-1275.

DOI: 10.19580/j.cnki.1007-3000.2020.09.023

# 光学遥感影像几何校正方法分析

钟灵毓<sup>1</sup> 薛武<sup>2</sup> 王鹏<sup>2</sup>

(1. 航天工程大学研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学太空安全研究中心, 北京 101416)

[摘要] 随着遥感技术的不断发展, 遥感影像在幅宽、分辨率等方面不断提升, 生产的海量影像数据在实际应用中对时效和精度要求更高, 需要更加高效、鲁棒的几何校正预处理流程。本文对当前三种主要的几何校正方法进行了归纳和比较, 分析了其特点及适用性, 提出了光学遥感影像几何校正方法下一步发展方向的思考。

[关键词] 几何校正; 严格成像模型; 地面控制点; 开源地理信息

[中图分类号] P237 [文献标识码] A [文章编号] 1007-3000(2020)09-1271-5

## 0 引言

随着传感器、无人机和航天技术的发展, 各类大合成孔径、高分辨率、短重访周期的遥感卫星(星座)和大比例尺、低成本的无人机不断投入应用, 遥感逐步进入大数据时代<sup>[1-2]</sup>。各领域对高精度、高时效遥感信息的大量需求进一步推动遥感影像在幅宽、分辨率等方面不断提升, 所生产的海量遥感影像在传统预处理流程中难以做到精度与时效的兼顾, 更加高效、鲁棒的几何校正方法引起了广泛关注。

本文从基于严格成像模型、地面控制点、开源地理信息的三种方法分析了当前光学遥感影像几何校正的研究现状, 结合光学遥感影像的发展趋势指出了几何校正的研究方向, 以期提高光学遥感影像处理的精度和时效, 并为超宽幅卫星影像预处理提供参考。

## 1 三种常见几何校正方法

### 1.1 基于严格成像模型的几何校正方法研究

严格成像模型由共线条件方程扩展而来, 受传感器影响较大, 其像点与地面点之间的严格数学关系通过传感器物理特性与影像成像机理构建。该模型各参数相互独立, 且都具有物理意义, 所包含的3个内方位元素定义了传感器内部几

何关系, 6个外方位元素记录了传感器成像位置及姿态。其函数关系对每一个地面点与相应像点都严格成立, 理论基础严密、形式复杂, 相应的理论校正精度也较高, 是构建通用成像模型的基础。

基于严格成像模型的几何校正研究热点集中在以下两方面: (1) 建立准确、合适的几何模型以描述传感器姿态变化, 实现精确定位, 代表性方法有轨道根数法、定向片模型、3D物理模型、自检校模型等; (2) 弱化外方位元素之间强相关性的影响, 尽量减少精度误差, 代表性方法有增加虚拟误差方程、合并强相关项、岭估计等。在航空遥感领域一般结合机载平台特性进行研究, 莫德林等对航空线阵摆扫相机基于严格成像的几何处理全流程建立了理论模型, 为相机实际应用提供理论和技术支撑<sup>[3-4]</sup>。星载传感器建模多见于推扫式传感器, 对摆扫式传感器研究较少, 王涛等给出了SPOT 5、ZY-3等卫星的改化严格成像模型, 并设计了基于光束法区域网平差的验证方法, 为严格模型构建到应用提供了一般性思路<sup>[5]</sup>。韩杰等构建了GF-4卫星的严格成像模型, 并进行几何定位仿真实验, 形成几何外检校方法<sup>[6]</sup>。丁一凡等构建了基于视线的严格成像模型, 以解决红外摆扫相机的像元比例尺不一致、相邻帧影像拼接错位等问题, 实现了影像的高精度几何校正<sup>[7]</sup>。

### 1.2 基于地面控制点的几何校正方法研究

基于地面控制点的几何校正以仿射变换和

[收稿日期] 2020-04-13

[作者简介] 钟灵毓(1993—), 男, 山东济南人, 硕士在读, 研究方向为航天摄影测量与遥感。

E-mail: zlyUOSE@163.com

[通讯作者] 薛武, E-mail: xuewu\_81@126.com

投影变换为理论基础,通常选择一个适当的多项式(通用成像模型)来近似描述像点与地面点的坐标关系,其系数依据最小二乘法解算,对具体成像关系不予考虑。当前研究集中在控制点选取的影响和多项式算法优化两个方面。

常用的控制点选取方式有空中三角测量解算、GPS 测量、地形图采点、GPS 微分校正等。Turker 和 CLAVET 等人的研究表明采用经空中三角测量解算的控制点进行几何校正精度最高,经微分校正的 GPS 点次之,手持 GPS 实测和地形图取点最差<sup>[8-9]</sup>。高晖的研究表明控制点选取的数量、精度和分布均与校正精度相关:在一定范围内,地面控制点的数量与校正精度正相关,最少数量取决于不同的多项式算法;当满足一定控制点数量时,几何校正精度受控制点精度影响较大;改变控制点的平面和高程分布状态,造成控制点的局部密集或局部稀疏,校正精度会降低<sup>[10]</sup>。因此对于沙漠、森林、雪地等特征单一的影像,选取足够精度、数量的控制点难度极大。

多项式算法优化研究主要集中在坐标转换多项式构建方面。常用的坐标转换多项式有以下几种:

(1)一般多项式,可进一步改写为有理函数模型(Rational Function Model,RFM),以多项式比值的形式描述像点与地面点关系。RFM 模型特殊形式可明确为有理多项式模型(Rational Polynomial Coefficients,RPC),系数更多,计算更为复杂,校正精度也相应提高。RFM 模型与 RPC 模型的实质都是对严格成像模型的数学拟合。

(2)勒让德正交多项式、切比雪夫正交多项式,当法方程系数矩阵在计算过程中受控制点数据影响,出现病态矩阵难以求解时,可以选择勒让德正交多项式或切比雪夫正交多项式代替进行计算。

(3)分块多项式,使用控制点将影像划分为相应格网片,使用角点坐标和边界条件作为控制信息,通过线性内插进行校正,多适用于小区域范围的几何校正。Gobbi 等比对不同地形、分辨率影像的校正结果表明,当地形起伏较为复杂时使用多项式校正可能会导致读取倾斜和位移误差<sup>[11]</sup>。Zhou Guoqing 等提出了 ZOPE-RM 算法,选取影像重叠部分的连接点作为控制条件与地面控制点联立,对 DISP 影像使用控制点个数少于 6 个,减少了

二阶有理多项式对地面控制点的数量要求,提高了运算效率<sup>[12]</sup>。

### 1.3 基于开源地理信息的几何校正方法研究

随着遥感进入大数据时代,并呈现开源共享的趋势,张祖勋等提出“云控制”摄影测量的概念,对统一框架下的地理信息空间数据,以匹配或配准的方法获取大量、密集的控制信息,略过了控制点选取的步骤,便于提高效率、提升精度<sup>[1]</sup>。当前常见的开源地理信息数据包括开源 DEM 数据与卫星影像两类。

开源 DEM 数据来源广泛,校正时首先生成原始影像的数字表面模型,然后通过匹配已有的高精度 DEM 数据获取同名点,将同名点作为控制条件完成校正。代表性方法包括最小高差(LZD)法<sup>[13]</sup>、最小二乘 3D 表面匹配(LS3D)法<sup>[14]</sup>及其改进方法等,这些方法的匹配参数求解模型都是基于最小二乘原理建立,对 DEM 数据的针对性不强,例如 LS3D 法就是为解决三维表面数据的不规则分布匹配问题提出的。虽然在实际操作中匹配精度和效率较高,但尺度拉入范围一般较小,对匹配数据的姿态和精度有一定要求,一般难以获得。张浩等利用 SRTM-DEM 作为控制信息对 ZY-3 影像进行实验,提出了一种新的正射校正方法,精度提升近一倍<sup>[15]</sup>。

卫星影像具有定位精度高、细节特征多、获取途径广等特点,可采用影像匹配的方法以同名点代替地图选点和人工刺点。相较于地面控制点,匹配点具有获取速度更快、精度更高、数量更多的优点,当前研究以匹配算法的选择、改进为主。图像匹配相关算法可分为两类:(1)基于灰度的匹配算法,此类算法对灰度较为敏感,由于遥感影像获取条件不同,经辐射校正匀光处理后共轭点难以找到,匹配结果相对较差;(2)基于特征的匹配算法,此类算法将参考影像和待匹配影像中的点、线、曲率等共同特征提取作为共轭实体,通过建立共轭实体间的对应关系进行变换模型参数的解算。与灰度匹配相比,基于特征的匹配更加鲁棒,对具有大信息量、丰富细节的影像效果较好,更适用于遥感影像的处理,较为常见的算法有 SIFT、ASIFT、PCA-SIFT、SSIFT、SURF 等,吴一全等提出一种基于 NSCT 和 SURF 的遥感影像匹配算法,将 NSCT 的分解结果作为 SURF 算法的输入以降低噪声影响,结果表明该算法对旋转、亮度、噪声的鲁棒性均优于 SURF 和 SIFT 算

法<sup>[16]</sup>。国内外学者结合地形匹配的特点还进行了大量研究,进一步提出了基于边缘特征的匹配<sup>[17]</sup>、基于 L1+L2 范数的快速匹配<sup>[18]</sup>、基于物方多视的密集匹配<sup>[19]</sup>等算法。在具体应用中,Aguilar 等人对 WorldView-2 和 GeoEye-1 多源公开数据进行实验,提出一种联合定位方法,利用已有的公开影像数据和地形数据提取出三维控制点,对 RPC 参数进行系统误差修正,定位精度提升 75%<sup>[20]</sup>。潘雪琛提出一种利用基准影像数据辅助提高精度的方法,经验证可有效解决实测控制数据不足的问题,效果提升显著<sup>[21]</sup>。范大昭等基于深度卷积神经网络,采用双通道卷积层进一步优化了网络模型对尺度变化的适应性,实现了面向对象的异源、多时相、多分辨率卫星影像间自动匹配流程,得到更丰富的匹配点对<sup>[22]</sup>。

随着海量遥感数据的出现,传统匹配算法在精度和速度方面亟需提升。而近几年来,深度学习在图像领域的应用不断拓展,处理速度与准确率大幅提升,研究人员开始探索将遥感与人工智能交叉结合的方法。刘瑾等在航空影像的密集匹配中比较了深度学习与经典方法的效果,并对深度学习的泛化能力进行了分析<sup>[23]</sup>。徐超等提出一种综合深度卷积网络的摆扫影像反演恢复算法,在视场角的恒定关系与物像映射关系的基础上建立分辨率反演模型进行校正,同时建立了一种深度学习超分辨框架以增强视觉效果<sup>[24]</sup>。

但总体而言,当前采用深度学习方法的匹配精度低于经典方法的精度,且对训练数据集要求较高,特别是在几何领域的应用精度低于经典方法,需进一步研究<sup>[25]</sup>。

## 2 三种几何校正方法对比

基于严格成像模型的几何校正考虑了成像过程的物理意义,函数关系对每一组像点与地面点都严格成立,受地形起伏影响小,理论基础严密,理论精度最高。在实际应用中,严格成像模型精度高度依赖传感器参数精度,各卫星的详细姿轨参数多为保密不便获取,建模难度较大,同时受外方位元素间强相关性和方程计算复杂程度的影响,与理论值相比实际计算误差较大。基于地面控制点的几何校正表达形式相对简单,独立于传感器,适用性强,鲁棒性好,但是函数关系仅在控制点严格成立,校正精度高,其余点通过内插生成影像,有较大几率出现偏离、产生震荡,而且所需控制点数量随着高阶模型参数的增加而增加,容易导致解的不稳定性,产生病态方程。基于开源地理信息的几何校正当前主要以配准的方法弥补了地面控制点在数量和精度上的不足,能相对快速、可靠的完成校正;以深度学习网络直接参与几何形变的方法在精度上难以满足实际需要,可靠性较差,还有待于进一步研究。

三种几何校正方法具体对比如表 1 所示。

表 1 三种几何校正方法对比

方法	优点	局限性
基于地面控制点的几何校正	1. 独立于传感器模型,无需得到传感器参数,适用性强,鲁棒性好; 2. 形式简单,其系数包含各种因素(地球曲率、大气折光等)的影响; 3. 对地形平坦地区校正效果较好; 4. 计算简便,便于实时快速处理数据,适用于机载影像处理及卫星在轨快速处理。	1. 对控制点选取有严格要求,不适用于沙漠、森林、海洋等特征单一地域; 2. 高阶模型由于参数过多会导致解的不稳定性,容易产生病态方程; 3. 校正精度较低,函数关系仅对控制点严格成立,且受控制点的数量、精度、分布情况影响,对其余点可能会产生额外的内插误差。
基于严格成像模型的几何校正	1. 考虑成像过程的物理意义,利用成像传感器位置和姿态等成像物理参数来描述成像关系,每个参数都有物理意义并彼此相互独立,理论基础严密。 2. 建模完成后其函数关系对每一个地面点与相应像点都严格成立; 3. 受地形起伏影响较小,校正精度较高。	1. 模型精度高度依赖于传感器参数精度,参数不易获取,模型相对复杂,建立难度大; 2. 外方位元素之间存在强相关性,造成计算误差较大; 3. 方程系数较多,计算复杂,对所需的 DEM 数据精度要求较高。
基于开源地理信息的几何校正	1. 开源地理信息获取途径多,数据量大; 2. 算法匹配速度快,可迅速得到大量的高精度同名点,节约了人工采点的成本; 3. 受影像成像质量的影响相对较小,校正精度相对较高; 4. 可与人工智能相结合,技术前景较好。	1. 需要大量历史数据作为先验知识; 2. 当地貌发生变化时(如地质灾害、植被增减、枯水期或丰水期交替等),特征发生较大变化,误匹配的概率增大; 3. 开源 DEM 数据精度相对较低,且进行匹配时对采用的影像 DSM 数据精度要求较高。

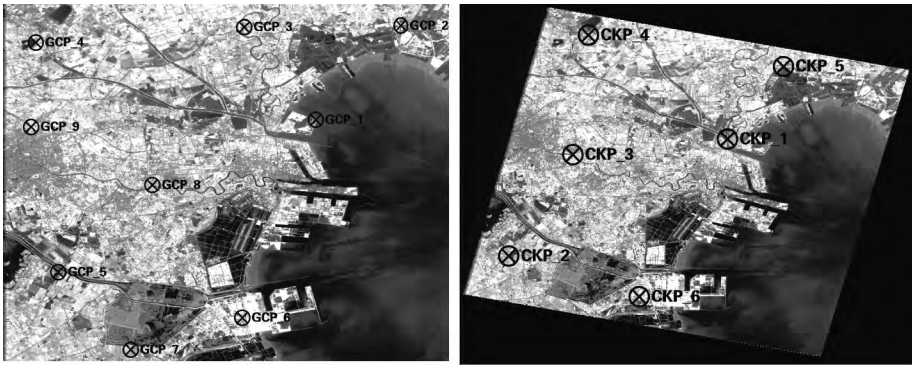


图 1 TY-10 天津港地区影像几何校正控制点与检查点分布

表 2 TY-10 影像几何校正结果

校正方法	GCP	检查点中误差/m		
		X	Y	H
仿射变换	9	6.309 43	7.001 92	9.425 27
有理多项式模型(人工选点)	9	6.006 98	6.350 77	8.741 62
有理多项式模型(匹配选点)	42	4.358 16	3.682 01	5.705 32

注： $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$

3 实验结果及分析

本文选用实验数据为 TY-10 卫星遥感影像，对应地区为天津港地区，影像分辨率 7.2 m，影像大小为 16 000×12 207 像元。分别采用仿射变换模型和有理多项式模型，使用双线性插值法进行采样，控制点选取方式采用正射影像人工选点和原始影像与正射影像 SIFT 匹配选点两种方式作为对照。为评价校正精度，分别在校正影像和参考正射影像上选取 6 个同名检查点，比较坐标差值并计算中误差，其中观测值为校正影像坐标，真值为对应正射影像坐标。TY-10 天津港地区影像几何校正控制点与检查点分布如图 1 所示，具体校正结果如表 2 所示。

从实验结果看，采用同等精度的控制数据，有理多项式模型能较好拟合严格成像模型，且校正精度优于仿射变换。采用开源地理信息匹配选点时，可以快速获得大量高精度控制点，且控制点数质量的增加有助于提高几何校正精度，验证了控制点数质量与校正精度间的正相关关系。

4 结束语

随着遥感大数据时代的到来，各领域对高精度、高时效遥感信息的需求日益增长，对海量光学遥感影像完成快速、可靠的几何预处理可以为

军事应用、环境变化、测绘制图等领域提供时效性强、细节特征丰富的优质数据源，具有较大的应用价值。从目前的研究现状看，还可以在以下几个方面加强研究：

(1)增强基于影像匹配校正的鲁棒性与适应性。在当前利用已有开源地理信息匹配的过程中，所采用的基准影像通常与待校正影像相似度较高，特征差异不明显。开源地理信息成像于不同时刻、不同角度，当系统的应用到工程中时，应当考虑因季节交替、地质灾害、人为破坏所带来的影像特征变化和误匹配问题，形成更加快速、精确的处理体系。

(2)在轨快速处理。对于用户的时效性数据需求，选用分段多项式等改进的通用几何模型，搭配控制点图元库，进行星上快速、自动的预处理。为重要目标识别等应用提供近实时的优质数据源。

(3)与深度学习相结合。深度学习在图像处理领域具有独特优势，面对信息量更丰富、精度要求更高的海量遥感数据，应当结合遥感影像特性进行深度学习网络建设，提升在图像配准、影像分类、目标检测等相关应用上的可靠性，形成完善具体的遥感影像智能化预处理流程。

参考文献

[1] 张祖勋,陶鹏杰. 谈大数据时代的“云控制”摄影测量[J]. 测绘学报,2017,46(10):1238-1248.

- [2] 宫鹏. 对遥感科学应用的一点看法[J]. 遥感学报, 2019, 23(4): 567-569.
- [3] 莫德林, 张永生, 王涛, 等. 航空线阵摆扫式相机成像仿真[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 328-337.
- [4] 莫德林, 张永生, 王涛, 等. 航空线阵摆扫式相机严格成像模型的构建与验证[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(3): 270-277.
- [5] 王涛, 张艳, 张永生, 等. 高分辨率遥感卫星传感器严格成像模型的建立及验证[J]. 遥感学报, 2013, 17(5): 1087-1102.
- [6] 韩杰, 谢勇. GF-4 卫星影像几何定位仿真分析[J]. 测绘通报, 2018(4): 23-27.
- [7] 丁一帆, 尤红建, 陈双军, 等. 一种面向红外摆扫成像的几何校正方法[J]. 遥感信息, 2018, 33(5): 76-81.
- [8] TURKER M, GACEMER A O. Geometric Correction Accuracy of IRS-1D PAN Imagery Using Topographic Map Versus GPS Control Points[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(6): 1095-1104.
- [9] CLAVET D., LASSERRE M., POULIOT J.. GPS Control for 1:50 000-scale Topographic Mapping from Satellite Images[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, 59(1): 107-111.
- [10] 高晖. 不同精度控制点对遥感图像几何校正的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- [11] GOBBI S, MAIMERI G, TATTONI C, et al. Orthorectification of a Large Dataset of Historical Aerial Images: Procedure and Precision Assessment in an Open Source Environment[J]. ISPRS Archives, 2018, 42(8): 53-59.
- [12] ZHOU Guoqing, YUE Tao, SHI Yujun, et al. Second-Order Polynomial Equation-Based Block Adjustment for Orthorectification of DISP Imagery[J]. Remote Sensing, 2016, 8(8): 680-685.
- [13] EBNER H, MÜLLER F. Processing of Digital Three-Line Imagery Using a Generalized Model for Combined Point Determination[J]. Photogrammetria, 1987, 41(3): 173-182.
- [14] GRÜN A, AKCA D. Least Squares 3D Surface and Curve Matching[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2005, 59(3): 151-174.
- [15] 张浩, 张过, 蒋永华, 等. 以 SRTM-DEM 为控制的光学卫星遥感立体影像正射纠正[J]. 测绘学报, 2016, 45(3): 326-331.
- [16] 吴一全, 沈毅, 陶飞翔. 基于 NSCT 和 SURF 的遥感图像匹配[J]. 遥感学报, 2014, 18(3): 618-629.
- [17] 陈小卫. 基于边缘特征的遥感影像匹配[D]. 河南郑州: 解放军信息工程大学, 2014.
- [18] 张明英. 图像特征相似性度量方法研究及应用[D]. 四川成都: 电子科技大学, 2019.
- [19] 张彦峰. 粗略地形引导下影像匹配与地表重建的半全局优化方法[D]. 湖北武汉: 武汉大学, 2017.
- [20] MANUEL A A, ABDERRAHIM N, FERNANDO J A, et al. Improving Georeferencing Accuracy of Very High Resolution Satellite Imagery Using Freely Available Ancillary Data at Global Coverage[J]. International Journal of Digital Earth, 2017, 10(10): 1055-1069.
- [21] 潘雪琛, 姜挺, 余岸竹, 等. 基准影像数据辅助遥感影像几何定位[J]. 遥感学报, 2019, 23(4): 673-684.
- [22] 范大昭, 董杨, 张永生. 卫星影像匹配的深度卷积神经网络方法[J]. 测绘学报, 2018, 47(6): 844-853.
- [23] 刘瑾, 季顺平. 基于深度学习的航空遥感影像密集匹配[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1141-1150.
- [24] 徐超, 金光, 杨秀彬, 等. 综合深度卷积网络的摆扫影像反演恢复算法[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1-11.
- [25] 龚健雅, 季顺平. 摄影测量与深度学习[J]. 测绘学报, 2018, 47(6): 693-704.

## Analysis of Optical Remote Sensing Image Geometric Rectification

ZHONG Lingyu<sup>1</sup>, XUE Wu<sup>2</sup>, Wang Peng<sup>2</sup>

(1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Space Security Research Center, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** With the continuous development of remote sensing technology, remote sensing images continue to improve in terms of width and resolution. The application of massive image data requires higher timeliness and accuracy, and requires a more efficient and robust geometric rectification preprocessing process. This paper summarizes and compares the current three main geometric rectification methods, analyzes their characteristics and applicability, and proposes the next direction of the development of geometric rectification methods for optical remote sensing images.

**Key words:** geometric rectification; rigorous imaging model; ground control point; open source geographic information