引文格式：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. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.06.021

DSM控制的高分辨率卫星影像几何精度校正

刘学人[1]
（1. 中煤航测遥感集团有限公司，陕西 西安 7100000）

摘　要：随着光学卫星影像分辨率越来越高，其几何精校正的精度要求也越来越高。传统的参考底图与DEM控制的卫星影像几何校正方法已经难以提供足够的精度，因此提出了一种使用高分辨率DSM同时作为卫星影像几何精校正中平面控制与高程控制的来源，对卫星影像的RPC模型参数进行校正的方法。并通过实验对美国拉斯维加斯地区的GeoEye-2影像进行几何精校正，通过人工获取的控制点进行检查，结果表明利用0.5 m分辨率的DSM作为控制，其校正后的平面精度可以达到0.6 m的水平，因此该方法可基本满足像素级的绝对精度要求，可应用于卫星影像几何精度校正。

关键词：高分辨率卫星影像；几何纠正；地面表面模型；有理多项式相机模型
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）06-0082-04

DSM-Constrained Geometric Accuracy Correction of High-resolution Satellite Imagery

LIU Xueren[1]
(1. Aerial Photogrammetry and Remote Sensing Group Co., Ltd., China National Administration of Coal Geology (ARSC), Xi’an 710000, China)

Abstract: With the increasing resolution of optical satellite images, the accuracy requirements for geometric accuracy correction are also increasing. The traditional geometric correction methods for satellite images controlled by reference maps and DEM have been difficult to provide sufficient accuracy. Therefore, we proposed a method for correcting the RPC model parameters of satellite images by using high-resolution DSM as the source of both plane control and elevation control in geometric precision correction of satellite images. Through experiments, the GeoEye-2 images in the Las Vegas Region of the United States were geometrically refined and checked using manually acquired control points. The results show that taking a 0.5 m resolution DSM as a control, the corrected planar accuracy can reach a level of 0.6 m. Therefore, this method can basically meet the absolute accuracy requirements at the pixel level, and be applied to geometric accuracy correction of satellite images.

Key words: high-resolution satellite imagery, geometric correction, DSM, RPC

随着光学卫星影像的分辨率越来越高，对卫星影像处理精度的要求越来越高[1]。现有的高分辨率光学卫星影像测绘产品的自动化生产模式一般是使用参考底图作为平面控制，高精度数字高程模型提供高程控制，通过自动匹配和区域网平差，实现大范围、多时相卫星影像的无缝镶嵌和拼接。但这种模式在亚米级卫星影像的生产中，精度存在瓶颈，已经越来越难以满足生产需要。因此，需要将地物表面三维信息直接用于卫星影像的几何校正[2-3]。目前，能提供地物表面三维信息的主要有立体像对、激光点云和数字地表模型。与立体像对和激光点云相比，DSM是一张反映了地物表面高程的正射影像，与目前常用的参考影像与参考DEM具有完全一样的格式。因此，如能实现DSM约束的光学卫星影像几何精校正，则可以在不对现有卫星影像产品生产线进行较大改动的情况下，获得极高的精度。其中，利用DSM进行高程约束的方式较为简单，直接用平面控制从中内插得到地物表面高程值即可，但是要从DSM中获取平面控制，则需要解决DSM与光学卫星影像的匹配问题。得益于多模态、多源异构遥感数据联合处理的不断深入研究，多模态影像的匹配和配准技术得到的大力发展，目前已经有多种可以实现跨模态影像匹配的方法，如SAR-SIFT、RIFT等。本文拟采用RIFT算法对光学卫星影像和DSM进行匹配，从而获得同名点，实现DSM的平面控制。

1　DSM控制平差的方法

1.1　基于RIFT算法的DSM与光学卫星影像匹配

传统的匹配算法如SIFT、SURF、ASIFT算法都是针对自然图像、光学卫星影像的匹配设计的[14-16]，其

收稿日期：2023-03-09；修回日期：2023-03-21。
作者简介：刘学人（1979—），硕士研究生，高级工程师，从事测绘航空摄影工作，E-mail：17274085@qq.com。

特点在于具有较强的透视变换抗性，即可以抵抗一定的尺度变换、旋转和仿射变化造成的图像变形。但是光学卫星影像与DSM属于完全不同的模态，光学卫星影像的灰度值反映的是地物的波谱反射率，而DSM的灰度值反映的是地表的高程。同时，这种完全不同的模态还会引起更多问题，如光学影像往往会有详细的纹理特性，如屋顶、道路上都会因地表物理性质的不同导致灰度的差异，从而得到复杂的纹理，而DSM在这些物体上往往是一个平滑的表面，其纹理结构极其简单。这种影像之间的非线性灰度差异和纹理细节不对称的现象，会导致传统的SIFT等算法匹配失败。要解决这一问题，需要采用专用的多模态匹配算法。

RIFT算法是由李加元[7]等提出的一种基于辐射变异不敏感特征变换的多模态图像匹配方法，它的原理是：基于相位一致性和最大索引映射，首先检测相位一致性图像的角点特征点和边缘特征点，因为角点特征通常具有更好的重复性，并且存在更多的边缘特征；然后，构造了一个基于log-Gabor卷积序列的最大索引映射，它比传统的梯度映射对非线性辐射畸变具有更强的鲁棒性；由于最大索引映射对旋转非常敏感，不同的旋转角度可能导致不同的最大索引映射，分析了旋转对最大索引映射值的内在影响，并通过构造多个最大索引映射来实现旋转不变性[8-10]。

1.2　物方控制点的获取

通过RIFT算法对得到光学卫星影像I和DSM I_{dsm}的匹配点集$\{p, p_{dsm}\}_i$，其中p为光学影像中的同名像点，即控制点像点，p_{dsm}为DSM中的同名像点。要对光学卫星影像的RPC模型进行几何精校正，需要先获得物方控制点$P=(\text{Longitude}, \text{Latitude}, \text{Height})$，其中Longitude和Latitude分别为经度和纬度，Height为控制点高程。

其中，物方平面坐标获取的步骤为：

1）通过DSM图像的物方像方转换信息（又称为GeoTransformation信息）将p_{dsm}映射到DSM所在物方坐标系中的点上：

$$X=g_1+g_2x_{dsm}+g_3y_{dsm}$$
$$Y=g_4+g_5x_{dsm}+g_6y_{dsm}$$

式中，g_1到g_6为DSM影像的GeoTransformation模型参数，一般可以通过影像的元数据信息获得。

2）根据DSM所在的物方坐标系信息（可能为地方投影坐标系），构建物方坐标系与WGS84坐标系的转换模型，然后将投影坐标(X, Y)转换为经纬度（longitude，latitude）。

控制点高程坐标可以直接从DSM中通过“双线性内插”得到。需要注意，常见的DSM产品一般提供正常高数据（即海拔高），这一高程参考基准是大地水准面。大地水准面是一个不规则的形状，考虑到卫星影像覆盖范围大，其RPC模型可能无法吸收大地水准面不规则形状引起的误差，一般选择在椭球高（大地高）的参考系中进行RPC模型的求解和优化。要得到椭球高系统下的高程，需要在正常高的数值中加上高程异常改正，即

$$\text{height}_{\text{ellipsoidal}}=\text{height}_{\text{geoid}}+\text{EGM}(\text{Longitude}, \text{Latitude})$$

式中，$\text{height}_{\text{geoid}}$为大地高；$\text{height}_{\text{ellipsoidal}}$为椭球高；EGM(.)为全球重力异常数据，目前常用的是1996年版。

1.3　光学卫星影像RPC模型参数的校正

目前，光学卫星影像的几何信息一般通过附带的RPC模型提供。RPC模型是有理多项式相机模型（rational polynomial camera model）的缩写，是一种通用的传感器成像模型，其形式简单，不涉及到复杂的大地坐标系的转换，又保持了成像模型的精度，并且对卫星的姿轨参数，传感器的具体技术细节起到了一定的保密作用[8]。这一特性使RPC模型广泛用于提供卫星影像产品的地理参考。RPC模型一共有80个模型参数（一般求解其中78个参数，分母此项固定为1）和10个归一化参数[11]。在基于RFM的卫星影像几何处理中，一般不直接求解78个模型参数，因为当控制点数量不足时，RPC参数的求解存在严重的过度参数化，一般是对RPC模型转换得到的像点坐标，添加一个线性变换模型，吸收RPC模型的定位误差。该模型称为“RPC模型附加像方变换模型”，其形式为：

$$x=a_0+a_1x_n+a_2y_n$$
$$y=a_3+a_4x_n+a_5y_n$$

式中，(x_n, y_n)为像方坐标计算值，指通过初始RPC模型从物方转换到像方的坐标；(x, y)为精确像方坐标，通过附加像方变换模型对像方坐标计算值转换得到。在求解PC模型附加像方变换模型时，求解目标为最小化(x, y)与像控点坐标之间的残差。

通过本文第1.2节的方法获得物方控制点后，通过初始RPC参数奖物方控制点坐标转换为像方坐标(x_n, y_n)，结合控制点的像控点坐标$p=(x, y)$，可以构

建误差方程，从而求解得到RPC附加像方线性模型参数 $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$，实现RPC模型初始误差的吸收。

RPC模型附加像方变换模型并非所有遥感影像处理软件都能支持[12]。因此，为了应用高精度纠正的成果，还需要利用初始RPC参数和附加像方变换模型，构架虚拟控制点空间网格，从而求解得到新的RPC参数。虚拟控制点格网的设置方式如图1所示，在高程方向上以一定的间隔分层，在平面上，以一定的格网间距建立地面的规则格网，生成格网点地面坐标，再利用初始RPC模型和求解得到的附加像方变换模型，计算出格网点在影像上的坐标，最后构建间接平差模型进行求解。

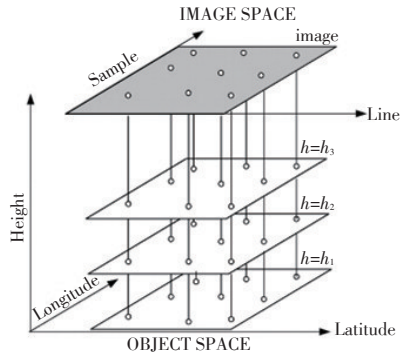


图1 虚拟控制点格式设置图

2 实验验证

为了验证上述方法的可行性和精度，本文采用了美国拉斯维加斯地区的GeoEye2影像作为实验对象。GeoEye2是一颗地球观测卫星，由Maxar公司负责运营，可以提供最高0.41 m的融合影像产品，轨道高度为500 km。本次用于实验的数据获取于2014年，分辨率为0.5 m，覆盖了美国内华达州拉斯维加斯市中心地区。

用作控制的DSM来源是美国3DEP项目中的激光点云。美国3DEP项目全称为“The 3D Elevation Program”，试图在2016—2023年期间，通过机载激光点云的手段获取美国大部分地区的精细三维表面模型，每年的项目投入约6.9亿美元。其中拉斯维加斯地区的3DEP激光点云数据获取于2016年，其精度和密度达到3DEP产品的QL1标准，即高程精度（中误差）优于10 cm，平面精度优于35 cm，点密度大于每平方米8个点（不考虑航带重叠）。在实验中，通过ArcMap软件中的“LAS数据集转栅格”工具将拉斯维加斯的点云数据转化为0.5 m分辨率的DSM。

为了与0.5 m分辨率DSM控制的GeoEye2影像几何校正精度，作业员从原始的3 DEP点云中选择房角、道路交叉等显著位置的20个物方控制点，并在GeoEye2影像中获取了物方控制点对应的像点，作为检查点对校正后的RPC模型精度进行检查。GeoEye2影像、DSM、检查点分布如图2所示。

本次实验采用了2020款联想Legion-Y9000P移动计算机进行实验，该计算机拥有8核CPU，64 GB内存，固态硬盘（三星PM981 a硬盘），根据评测，该计算机在GPU不工作时，CPU可以长期以75 W的功率运行。

2.1 光学影像与DSM的匹配结果

在本计算机中，通过8线程并行RIFT匹配，用时约20 min。共获得RIFT匹配点31 678个。匹配点最大误差4.47像素，中误差1.45像素。匹配点整体点位分布如图3所示，部分匹配点细节如图4所示。其中，大部分匹配点位于房角等具有强烈边缘的地方。

2.2 DSM控制的卫星影像几何精校正结果

表1给出了使用0.5 m分辨率DSM控制的GeoEye2影像几何校正后，检查点的反投影精度，其中 x 方向

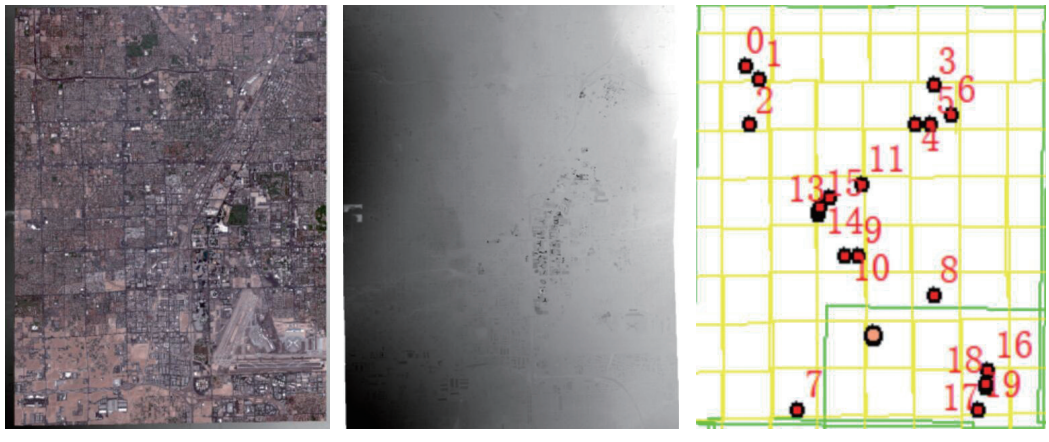


图2 本实验所用的光学卫星影像和DSM

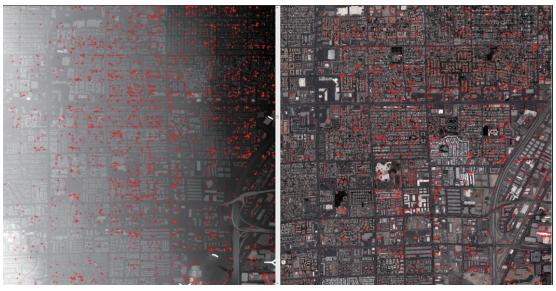


图3　匹配点整体点位分布

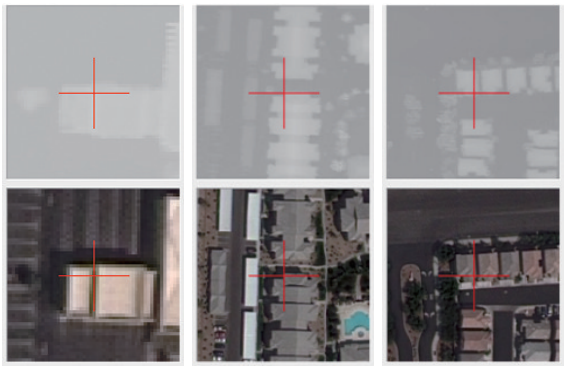


图4　部分匹配点细节

的平均误差为–0.366，中误差为0.636，最大误差为1.118，最小误差为–1.104；y方向的平均误差为1.051，中误差为1.355，最大误差为3.041，最小误差为–0.263。

表1　几何精校正结果/像素

方向	平均误差	中误差	最大误差	最小误差
x	–0.366	0.636	1.118	–1.104
y	1.051	1.355	3.041	–0.263

考虑到GeoEye影像为0.5 m的分辨率，可以发现，通过高精度DSM与城市地区卫星影像的匹配，直接获得外业控制点，其几何精校正的中误差可以达到0.7 m以内，基本满足1∶1万测图精度。

3　结论与展望

本文验证了使用DSM既作平面控制又作高程控制的高分辨率光学卫星影像几何精校正方法的有效性，通过RIFT算法，可以得到数万对匹配点（控制点），匹配精度达到1~2像素水平。利用这些匹配点得到物方控制点的平面坐标，并直接从DSM中内插得到地表地物的高程，对光学卫星影像的RPC模型精细校正，可以达到优于0.7 m的平面精度，表明此方法可以达到1∶1万DOM产品生产精度标准。

但是，本文目前仅对城市地区做了验证，未来还需要用更多地貌地形、更多分辨率、更多数据源的影像进行测试，进一步验证本文方法的有效性。

参考文献

[1] Yang G D, Guo C, Zhang X Q. Research on the Geometric Correction Method of Gaofen-2 Satellite Image[J]. Surveying and Geospatial Information, 2018, 41(10): 15-17

[2] Tang X M, Wang H Y. Application Analysis and Prospect of Ziyuan-3 Satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(5): 1-10

[3] Zhang Y, Wan Y, Huang X, et al. DEM-assisted RFM Block Adjustment of PushbroomNadir Viewing Hrsimagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 54(2): 1 025-1 034

[4] Ng P C, Henikoff S. SiftI : Predicting Amino Acid Changes that Affect Protein Function[J]. Nucleic Acids Research, 2003, 31(13): 3 812-3 814

[5] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up Robust Features (SURF)[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359

[6] Morel J M, Yu G. Asift: A New Framework for Fully Affine Invariant Image Comparison[J]. Siam Journal on Imaging Sciences, 2009, 2(2): 438-469

[7] Li J, Hu Q, Ai M. RIFT: Multi-modal Image Matching Based on Radiation-variation Insensitive Feature Transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 29: 3 296-3 310

[8] 王斯健. 控制点图元库的卫星影像高精度几何校正方法研究[J]. 测绘通报, 2021(增刊): 183-187

[9] 拓万兵, 陈昱蓉, 赵新坤. 卫星遥感影像几何纠正模型精度对比研究[J]. 地理空间信息, 2019, 17(5): 50-52

[10] 孙治贵, 王铁, 刘少杰, 等. 基于GPS的气象卫星数据地理定位精度验证[J]. 地理空间信息, 2019, 17(5): 23-26

[11] 孟伟灿, 张强, 张一平, 等. 融合高精度导航定位信息的高分辨率影像精校正处理技术[C]//第八届高分辨率对地观测学术年会组委会. 第八届高分辨率对地观测学术年会论文集, 2022: 896-909

[12] 张亚妮, 胡德勇, 于琛, 等. 基于优化有理函数模型的高分辨率遥感影像几何校正及其精度评估:以ZY-3和Pléiades卫星数据为例[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 37-44