

星载光子点云支持下的卫星影像区域网平差

来文艺¹, 方勇^{2*}¹长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;²西安测绘研究所, 陕西 西安 710054

摘要 以 ICESat-2 为代表的光子计数激光雷达对地观测手段具有地面足印小、采样频率高、波束数量多等特点, 获取点云的平面精度和飞行方向数据密集程度得到很大提升, 可作为一种新型三维控制条件以提高卫星影像定位精度。为解决光子点云没有同步影像记录平面位置的应用难题, 提出一种星载光子计数激光点云支持下的卫星影像定位精度提升方法。首先采用三维地形剖面匹配方法实现对光子点云数据与卫星立体影像自动生成的数字表面模型(DSM)的精确配准; 然后依据坡度变化从光子剖面点云中提取地形特征点, 联合 DSM 多种地形特征生成共同地形特征控制点; 最后将该地形特征控制点作为平高控制条件引入带附件参数的卫星影像区域网空中三角测量过程, 以进一步提升定位精度。利用陕西省两个地区的 ZY-3 影像和 ATLAS ATL03 级数据进行实验, 结果表明与完全无控定位方法和 SRTM 数据辅助定位方法相比, 所提方法能够显著提高 ZY-3 影像平面和高程定位精度, 提升幅度相对于 SRTM 数据分别可以达到 60% 和 34% 左右, 验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词 星载光子剖面点云; 地形匹配; 地形特征点; 平高控制点; 联合区域网平差

中图分类号 P236 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221362

Block Adjustment of Satellite Images Supported by Spaceborne Photon Point Cloud

Lai Wenyi¹, Fang Yong^{2*}

¹*School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*

²*Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, Shaanxi, China*

Abstract The photon counting lidar earth observation means denoted by ICESat-2 have the features of small ground footprints, high repetition frequency, and multibeams. The plane accuracy and flight direction data density of acquired point cloud have been greatly improved. As a result, it can be applied as a novel three-dimensional control condition to enhance the precision of satellite image location. To address the application problem of photon point clouds without synchronous image recording plane position, the research suggests a technique to enhance the positional accuracy of satellite images supported by spaceborne photon counting laser point clouds. First, the three-dimensional terrain profile matching approach is used to achieve precise registration between photon point cloud data and digital surface model (DSM) for the automatic generation of satellite stereo images. Then, terrain feature points are retrieved from the photon profile point cloud based on slope change, and the common terrain feature control points are produced by combining several terrain features of DSM. Finally, the terrain feature points as planimetric and elevation control conditions are added into the satellite image block adjustment with additional parameters to further improve positioning accuracy. Experimental results on the ZY-3 satellite images and ATLAS ATL03 data in Shaanxi Province demonstrate that the proposed method can efficiently improve the accuracy of the ZY-3 image plane and elevation positioning compared to completely uncontrolled positioning method and shuttle radar topography mission (SRTM) data-assisted positioning method. The proposed method's efficacy and viability are confirmed by the fact that the increasing rates of plane accuracy and elevation positioning accuracy over SRTM data can reach 60% and 34%, respectively.

Key words spaceborne photon profile point cloud; terrain matching; terrain feature point; horizontal and vertical control point; joint block adjustment

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-04-29; 录用日期: 2022-05-21; 网络首发日期: 2022-05-30

基金项目: 航天系统部预研项目(105020101, 105020303)

通信作者: *yong.fang@vip.sina.com

1 引言

近年来我国高分辨率遥感卫星技术得到长足发展,利用卫星立体影像实现目标高精度定位的研究越来越受到学者们的重视。目前尽管在没有地面控制点的情况下对卫星影像直接进行地理定位具有较高精度,但高程精度仅能满足困难测绘地区精度需求,因此通过其他手段辅助空中三角测量成为提升定位精度的基本技术途径。学者们利用正射影像^[1]、SAR影像^[2]、全球数字高程模型(DEM)^[3-4]等数据进行辅助定位,研究表明开源DEM的精度有限,可以在一定程度上改善影像定位精度。随着星载激光对地观测技术的快速发展,以ICESat-2为代表的光子计数激光雷达观测技术具有地面激光足印小、数据采样频率高、波束数量多等特点。星载光子计数点云具有较高平面精度(优于5 m)和极大的高程精度(优于1 m)^[5],方位向采样间距为0.7 m,能形成密集剖面式点云,因此光子点云可以作为一种新型控制数据用于提高卫星影像定位精度。Li等^[6]讨论和分析了单光子激光高度计的距离宽度对探测概率和测距精度的影响。么嘉棋等^[7]对光子体制卫星大气探测技术进行了调研归纳。王密等^[8]通过参考DEM和属性参数筛选出光子点云作为全球高程控制点,并通过实验验证方法的有效性。

目前,星载激光测量数据支持下的卫星影像定位精度提升应用成为近年来的研究热点^[9-13]。大多数学者多采用严格几何成像模型^[14]或有理函数模型附加像面仿射变换模型构建卫星影像空中三角测量平差数学模型,并只利用星载点云数据作为高程控制条件。李国元等^[15]、曹宁等^[16]、王晋等^[17]将ICESat点云数据引入卫星影像区域网平差中,结果表明在没有外业控制点的情况下,提出的方法可以提高卫星影像的高程精度。唐新明等^[18]使用激光测高数据作为高程控制,联合高分七号进行区域网平差,实现区域网影像高程精度提升。蔡超^[19]基于ICESat-2点云与光学影像联合自动提取高精度三维控制点,辅助ZY-3卫星进行区域网平差,从而实现高精度DEM提取。张鑫磊等^[20]设计实现了星载激光测高数据与遥感影像的联合平差方案,在平差过程中迭代修正激光测高点平面坐标,提高了定位精度,但并未从根本上解决激光点与影像严格对应问题。

2 所提方法内容

在区域网整体平差过程中,所提方法不仅将光子激光点云数据作为高程控制数据,而且作为平高控制条件来提高卫星影像定位精度。首先采用三维地形匹配方法实现对高精度光子点云和高分辨率立体影像生成数字表面模型(DSM)之间的初配准;其次通过曲线拟合,设置坡度变化率^[21],提取光子点云地形特征点和DSM的地形特征;通过判断光子地形特征点与DSM

地形特征的关系,筛选出两种数据均存在的明显地形特征点,将地形特征点作为平高控制点,辅助卫星立体影像进行区域网平差。为验证所提方法的有效性,选择陕西地区ZY-3影像和ICESat-2数据进行实验并进行精度验证,分析无控与有控对卫星影像对地定位精度的影响,具体处理流程如图1所示。

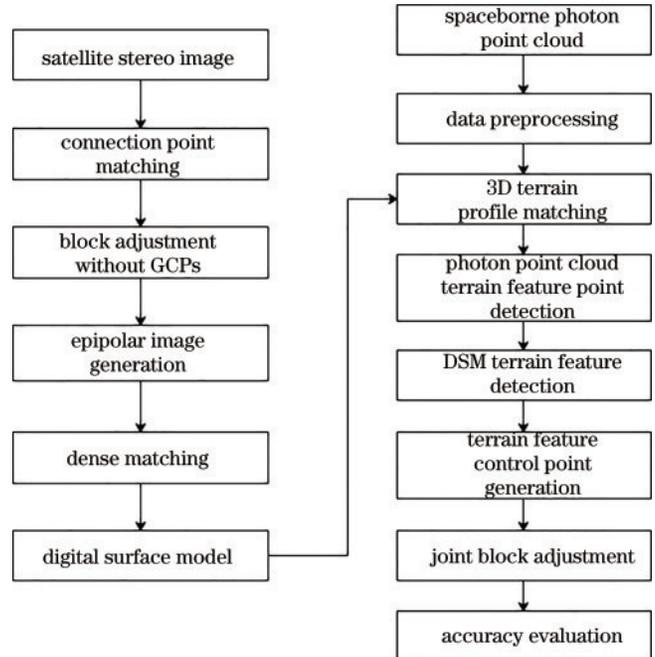


图1 星载光子点云联合立体影像区域网平差处理流程
Fig.1 Joint block adjustment process flow for spaceborne photon point cloud and stereo images

3 光子点云联合卫星影像区域网平差

3.1 光子点云与立体影像三维地形剖面匹配

卫星立体影像和星载激光点云是两种具有不同几何特性的数据,要实现点云与影像之间的联合处理,必须建立点云与影像生成DSM、DEM之间的严格对应,因此首先需要解决两种数据之间的位置偏移修正问题。在卫星立体影像密集匹配基础上,采用最小高差法^[22]实现光子剖面点云与生成DSM之间的三维地形匹配,基本原理示意图如图2所示,虚线方框为搜索范围,粗实线为三波束原始光子点云地面轨迹,虚线为光子点云在其标称精度范围内不同步距的搜索间隔。基本方法是:首先将DSM转换为规则格网数据,以多波束激光点云条带其中一轨数据为单位,在水平或垂直方向以一定搜索步长 Δx 或 Δy 移动,寻找两种数据平面坐标相同点,如果不存在对应点就利用激光点相邻的点进行内插;然后计算多个条带上每个激光点与DSM对应平面位置的绝对高程差,直至遍历步长设置区域内的所有区域,确定对应点之间最小绝对高差位置,该位置就是剖面点云与DSM匹配的平面坐标位置。

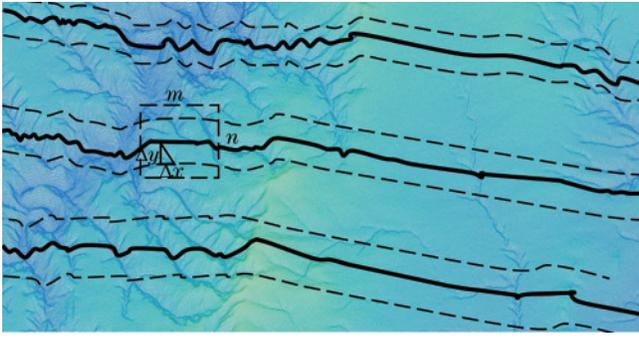


图2 多波束光子点云与立体影像生成DSM三维地形剖面匹配原理示意图

Fig. 2 Diagram of 3D terrain profile matching principle between multi-beam photon point cloud and DSM generated by stereo images

反距离权重内插公式为

$$d_i = \sqrt{(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2}, \quad (1)$$

$$\omega_i = \frac{1}{d_i^2}, \quad (2)$$

$$h_i = \sum_{i=1}^k \omega_i \cdot z_i, \quad (3)$$

式中： d_i 为模型中邻近点到光子点的平面距离； ω_i 是根据距离计算出的邻近点的权重； h_i 为光子点在模型中内插的高程； z_i 是激光点的邻近点高程； k 为邻近点数。

基于最小高差法的剖面激光点与DSM之间地形匹配的基本公式为

$$d_{\min} = \min \sum_{s=1}^3 \sum_{l=-m}^m \sum_{j=-n}^n \left[\sum_{i=1}^N |Z_i(X, Y) - h_i(X + l \cdot \Delta x, Y + j \cdot \Delta y)| / N \right], \quad (4)$$

式中： s 为波束数； d_{\min} 为光子点云条带与卫星影像生成DSM数据沿剖面的高程差绝对值； N 为条带激光点个数； Z_i 为激光点高程值。以此为条件构建最小高程差配准，即可获取光子剖面点云条带相对于卫星影像生成DSM轨迹方向的最佳匹配位置，从而达到获取空间位置整体偏移量的目的。

3.2 地形特征点联合检测

在剖面点云和光学影像生成DSM地形匹配基础上进行联合特征点检测，由于沿卫星飞行方向采集频率很高，光子点云分布相对比较密集，形成的剖面点云序列记录了地形精细起伏。星载激光三维点云数据和卫星光学立体影像均包含不同特征地形信息，因此可以从这两个数据集中获取共同地形特征。分别从星载光子剖面点云和卫星影像DSM数据提取地形特征，基于点对点距离最小化约束关系获得地形特征点。对于星载光子点云，该数据是离散的三维数据，利用相邻

激光点进行曲线拟合，相较直接利用激光观测点，具有更高鲁棒性和准确性。依据激光测量点的高程信息，通过设置坡度变化来自动提取坡度变化大的地形特征点，如山脊点、山谷点和山脚点等。在卫星影像生成DSM上提取山脊线、山谷线、山顶点等地形特征，比较激光点提取特征点与DSM地形特征相互之间的空间关系，设定筛选准则，确定共同地形特征点作为控制点。

这里采用地形坡度作为基本判据，坡度是描述地形特征的重要指标，能间接地反映地形的起伏形态和结构。对于离散的光子点云数据，采用高斯拟合方法拟合曲线，能够获得更为可靠的地形特征点；然后依据坡度变化从星载光子点云轨迹的高程剖面中提取地形特征点，通过设置坡度变化阈值作为判据，所有坡度变化值大于阈值的地形特征点都会被自动标注。以ICESat-2点云数据为例，提取效果如图3所示，连续光子点云构成地形剖面，经过高斯曲线拟合后形成较为光滑的曲线，根据坡度阈值自动提取的地形特征点以五角星显示，均处于地形特征显著变化位置。

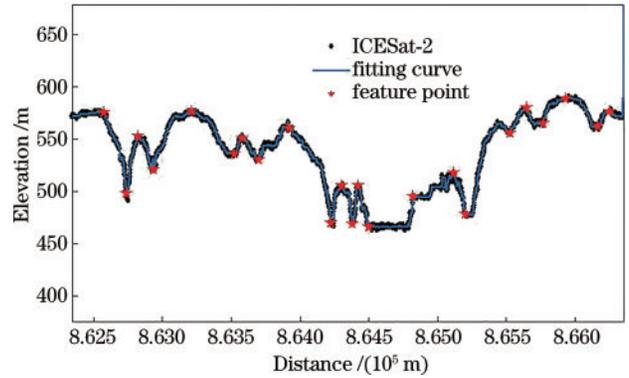


图3 从光子剖面点云提取的地形特征点

Fig. 3 Terrain feature points extracted from the photon profile point cloud

利用地形特征提取算法提取卫星影像生成DSM的山脊线、山谷线等，效果如图4所示，基本处理过程为：首先利用DSM数据提取地面坡向变率(SOA)和地面正负地形，取正地形上坡向变率的大值为山脊，负地形上坡向变率的大值为山谷。对于DSM提取的地形特征点，如山顶点等，通过判断与星载光子点云提取地形特征点的位置关系，设定距离阈值作为共同特征点判断条件；对于DSM提取的地形特征线，如山脊线等，通过判断点是否在线上，或点到线的最短距离是否满足阈值，设定这两个条件作为是否是共同地形特征点的判据。

3.3 联合立体影像区域网平差方法

激光地形特征点联合卫星影像区域网平差原理是：将激光点作为控制条件引入有理函数模型(RFM)补偿方程，解决无控条件下将待解算参数作为自由未知数进行求解时导致平差精度不稳定、系统误差不断累积等问题，得到准确可靠的补偿系数，以实现卫星影像定

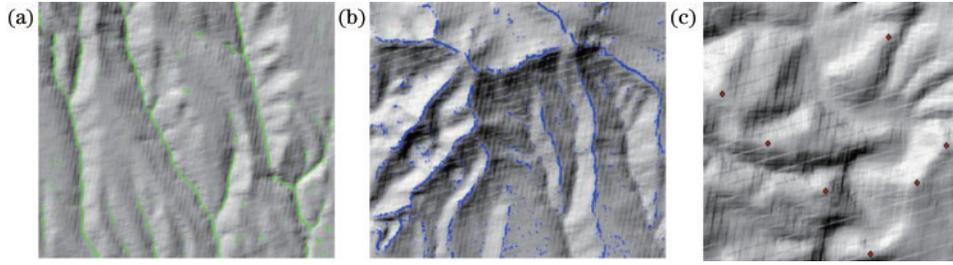


图 4 从卫星影像生成 DSM 提取的地形特征。(a)山谷线;(b)山脊线;(c)山顶点

Fig. 4 Terrain features extracted from DSM generated by satellite images. (a) Valley line; (b) ridge line; (c) surface peak

位精度提升。基本过程是:首先对卫星影像进行连接点匹配并进行自由网平差;然后将共同地形特征点作为平高控制条件带入含补偿系数的卫星影像区域网平差过程,根据不同数据观测精度,可以设定不同权值参与平差,直到迭代计算收敛;最后统计平差精度,输出平差结果,即精化后的影像定位参数,包括 RFM 系数和补偿系数,综合使用,从而实现卫星影像定位精度提升。该平差方案的特点在于,由于光子点云沿飞行方向密集连续,为自动提取具有激光与立体影像两种主被动三维观测数据的地形特征提供了可能,从而为光子点云在非同步影像上位置确定提供了有效途径,使得平面精度和高程精度的优势均能够得到充分发挥。

3.4 平差模型

目前高分辨率卫星影像的成像模型一般采用 RFM^[23],该成像模型具有简单性与通用性的优点。RFM 将像点坐标($S_{\text{sample}}, L_{\text{line}}$)表示为以相应地面点空间坐标(P, L, H)(其中 P 为纬度, L 为经度, H 为高程)为自变量的多项式的比值:

$$\begin{cases} c_n = \frac{N_l(P_n, L_n, H_n)}{D_l(P_n, L_n, H_n)} \\ r_n = \frac{N_s(P_n, L_n, H_n)}{D_s(P_n, L_n, H_n)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: (P_n, L_n, H_n) 为正则化的地面坐标; (c_n, r_n) 为正则化的影像坐标; $n=1, 2, 3$ 。

$$\begin{cases} c_n = \frac{S_{\text{sample}} - S_{\text{sample_off}}}{S_{\text{sample_scale}}} \\ r_n = \frac{L_{\text{line}} - L_{\text{line_off}}}{L_{\text{line_scale}}} \\ P_n = \frac{L_{\text{longitude}} - L_{\text{longitude_off}}}{L_{\text{longitude_scale}}} \\ L_n = \frac{L_{\text{latitude}} - L_{\text{latitude_off}}}{L_{\text{latitude_scale}}} \\ H_n = \frac{H_{\text{height}} - H_{\text{height_off}}}{H_{\text{height_scale}}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $L_{\text{line_off}}, S_{\text{sample_off}}, L_{\text{longitude_off}}, L_{\text{latitude_off}}, H_{\text{height_off}}$ 为正则化平移参数; $L_{\text{line_scale}}, S_{\text{sample_scale}}, L_{\text{longitude_scale}}, L_{\text{latitude_scale}}, H_{\text{height_scale}}$ 为正则化比例参数。

高分辨率卫星影像 RFM 通过引入像方空间坐标

补偿值 ($\Delta c, \Delta r$) 进一步提高定位精度,一般采用仿射变换模型,基于 RFM 补偿方程的区域网平差模型为

$$\begin{cases} c_n = \frac{N_l(P_n, L_n, H_n)}{D_l(P_n, L_n, H_n)} \cdot S_{\text{sample_scale}} + S_{\text{sample_off}} + \Delta c \\ r_n = \frac{N_s(P_n, L_n, H_n)}{D_s(P_n, L_n, H_n)} \cdot L_{\text{line_scale}} + L_{\text{line_off}} + \Delta r \end{cases} \quad (7)$$

仿射变换模型的形式为

$$\begin{cases} \Delta c = a_0 + a_1 S_{\text{sample}} + a_2 L_{\text{line}} \\ \Delta r = b_0 + b_1 S_{\text{sample}} + b_2 L_{\text{line}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ 为像方坐标补偿的仿射变换系数。

对式(7)进行线性化,可得区域网平差误差方程式:

$$\mathbf{V}_l = \mathbf{A}_l \mathbf{X} + \mathbf{B}_l \mathbf{Y}_l - l_l \quad (9)$$

式中: \mathbf{V}_l 为 RFM 补偿方程的残差向量; $\mathbf{X} = [\Delta a_0 \ \Delta a_1 \ \Delta a_2 \ \Delta b_0 \ \Delta b_1 \ \Delta b_2]^T$ 为像方仿射变换参数改正数; $\mathbf{Y}_l = [\Delta L_{\text{on}} \ \Delta L_{\text{at}} \ \Delta h]^T$ 为连接点物方坐标改正数; $\mathbf{A}_l, \mathbf{B}_l$ 为对应系数矩阵; l_l 为初值计算的常量。

4 实验结果与分析

4.1 实验数据

以陕西省为试验区域,试验范围包含咸阳周边区域,实验数据采用同一地区 ZY-3 卫星影像和 ICESat-2 ATLAS 数据。ZY-3 卫星影像获取时间是 2019 年 4 月 7 日,测区包含山地、平原等多种类型地形,高程起伏达 1200 m。试验时采用 5 轨 ATLAS ATLO3 数据,获取时间范围为 2018 年 10 月 26 日到 2021 年 1 月 11 日,大地基准为 WGS-84 坐标系,平面坐标为经纬度,高程坐标为 WGS-84 椭球高。ICESat-2 卫星每轨数据包含 6 个波束,6 束激光一强一弱组成 3 组,由于弱波束采集的信号光子较少,这里采用 3 个强波束数据,沿轨激光点间隔为 0.7 m。

4.2 数据预处理结果

首先利用 ZY-3 影像生成 DSM,其过程是:主要根据影像与影像之间的同名点自动生成连接点,借助加入的基准数据,根据原始影像和基准影像之间的位置关系和纹理特征提取控制点,连接点提取和控制点提取完毕后进行平差运算;其次获取核线影像产品,最后

利用生产的核线影像产品结合初始匹配结果,再经过立体密集点云匹配或特征点数据插值生成 DSM 栅格产品。由 ZY-3 三线阵影像生成 DSM 结果如图 5 所示,地面参考数据为 SRTM-DEM (shuttle radar topography mission-DEM),生成格网间隔为 5 m,DSM 的相对高程精度为 4.036 m。

从 ICESat-2 官网下载的光子点云数据中选取中高置信度的信号光子,通过去噪、滤波,滤除低质量的异常点,处理前后效果图如图 6 所示。处理后光子点云数量保留率为 40% 左右,采用 ZY-3 影像生成 DSM

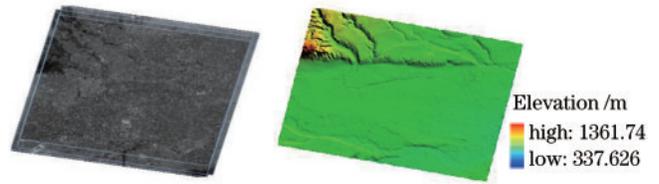


图 5 ZY-3 立体影像生成的 DSM

Fig. 5 DSM generated by ZY-3 stereo images

进一步对光子点云进行粗差剔除,计算激光点对应位置的 DSM 高程差,利用 3σ 准则剔除 ICESat-2 异常点,剩下的激光点作为下一步处理数据。

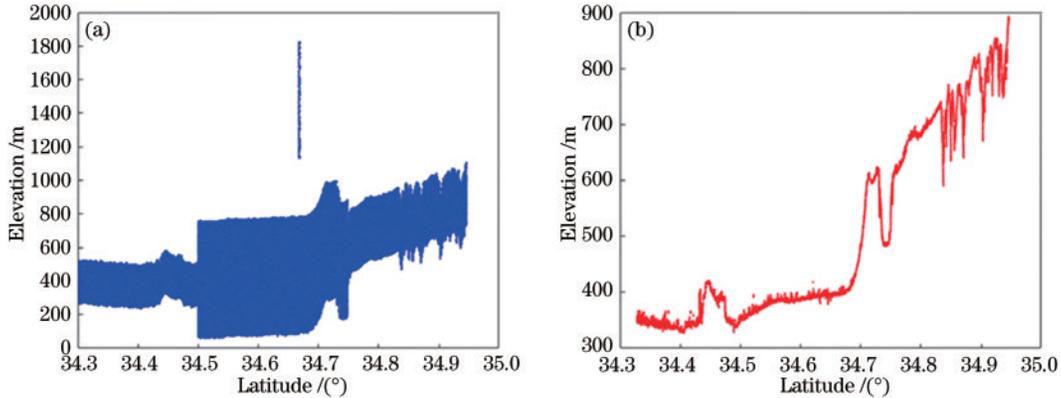


图 6 光子点云去噪前后的对比。(a)去噪前;(b)去噪后

Fig. 6 Comparison of photon point cloud before and after denoising. (a) Before denoising; (b) after denoising

4.3 光子点云三维地形匹配

预处理后的激光点云数据在水平方向以一定步长进行移动搜索。采用最小高差法进行激光点云与立体影像的三维配准,初步消除两种数据在水平位置的偏差。数据配准结果如表 1 所示,可以看出:每轨数据与 DSM 均存在一定位置偏差,平面方向位置偏差值随着获取时间和区域地形不同而不同,有的位于地形起伏大的位置,误差相对于平地来说较大;由于光子点云受地表覆盖影响存在不确定性,与影像生成 DSM 存在不对应情况,更高分辨率影像生成更小间距 DSM 时有可能误差会更准确一些,量级为 10~30 m,高程方向偏差在 3 m 左右,基本反映了两种数据之间的系统几何精度情况。

在计算出偏移值后,为了进一步分析匹配前后两种数据高程差的分布特征,按照探测时间顺序绘制了每轨数据匹配前后高程差的直方图,统计了匹配前后

表 1 ICESat-2 点云与 DSM 的三维地形匹配结果

Table 1 3D terrain matching results of ICESat-2 point cloud and DSM

Track data name	X/m	Y/m	Z/m
ATL03_20181026073719_04230102_004_01	15	22.5	2.35
ATL03_20200113222846_02780606_003_01	1	18	4.06
ATL03_20200221083219_08650602_004_01	-13.5	30	3.81
ATL03_20201021205538_04230902_004_01	-28.5	6	2.59
ATL03_20210111050804_02781006_004_01	-28.5	-16.5	3.10

的激光点数量、高差的平均值和标准差,统计结果如表 2 所示。总体上和匹配前相比,匹配后的平均高差误差相对下降;平均误差均大于 0,说明研究区的 ZY-3 DSM 普遍低于星载光子计数点云数据;从匹配前后高程差分布情况可以看出,消除水平偏差后,高程差变化呈现降低的趋势。

为了分析坡度对地形匹配的误差影响,按照坡度 $0^\circ \sim 2^\circ$ 、 $2^\circ \sim 6^\circ$ 、 $>6^\circ$ 分为三类,对应平地、丘陵和山地,比较 ZY-3 DSM 与 ATLAS 条带上各点的高程值匹配前后分布变化,来验证地形匹配结果的有效性。采用平均误差 (ME)、平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE) 统计三种地形匹配前后高程误差对比,结果如表 3 所示。可以看出:匹配前,三种地形高程的平均误差、平均绝对误差均为正值;匹配后,平均误差、平均绝对误差均有下降,幅度约为 20%~40%;对于均方根误差,高程误差随着地形坡度的增大而增大,说明坡度对高程精度具有很大影响。

4.4 地形特征点联合提取

实现光子激光点云和立体影像生成 DSM 的三维配准后,在 DSM 上提取山脊线、山谷线、山顶点等特殊地形特征;根据 ICESat-2 剖面激光点云的高程信息,设定连续激光点前后坡度变化作为阈值,自动提取相应的地形特征点,如山脊点、山谷点和山脚点等。依据两类地形特征的位置关系,判断筛选出共同地形特征点。图 7 为提取特征点在地形和影像上的对应位置。

表 2 光子点云数据与 DSM 匹配前后高差分析结果

Table 2 Analysis results of height difference between photon point cloud data and DSM before and after matching unit: m

Track data name	Mean		Standard deviation	
	Before matching	After matching	Before matching	After matching
ATL03_20181026073719_04230102_004_01	2.93	1.64	2.61	2.89
ATL03_20200113222846_02780606_003_01	2.57	2.44	3.11	2.64
ATL03_20200221083219_08650602_004_01	3.14	2.98	1.67	1.72
ATL03_20201021205538_04230902_004_01	2.21	1.27	2.10	2.59
ATL03_20210111050804_02781006_004_01	2.25	1.68	2.77	2.58

表 3 不同坡度下地形匹配前后高程误差统计

Table 3 Elevation error statistics under different slopes before and after terrain matching

unit: m

Slope	ME		MAE		RMSE	
	Before matching	After matching	Before matching	After matching	Before matching	After matching
0°-2°	2.02	1.52	2.32	1.75	5.07	4.08
2°-6°	3.72	2.79	4.32	3.29	8.51	6.47
>6°	2.94	1.65	3.39	2.72	15.48	11.28

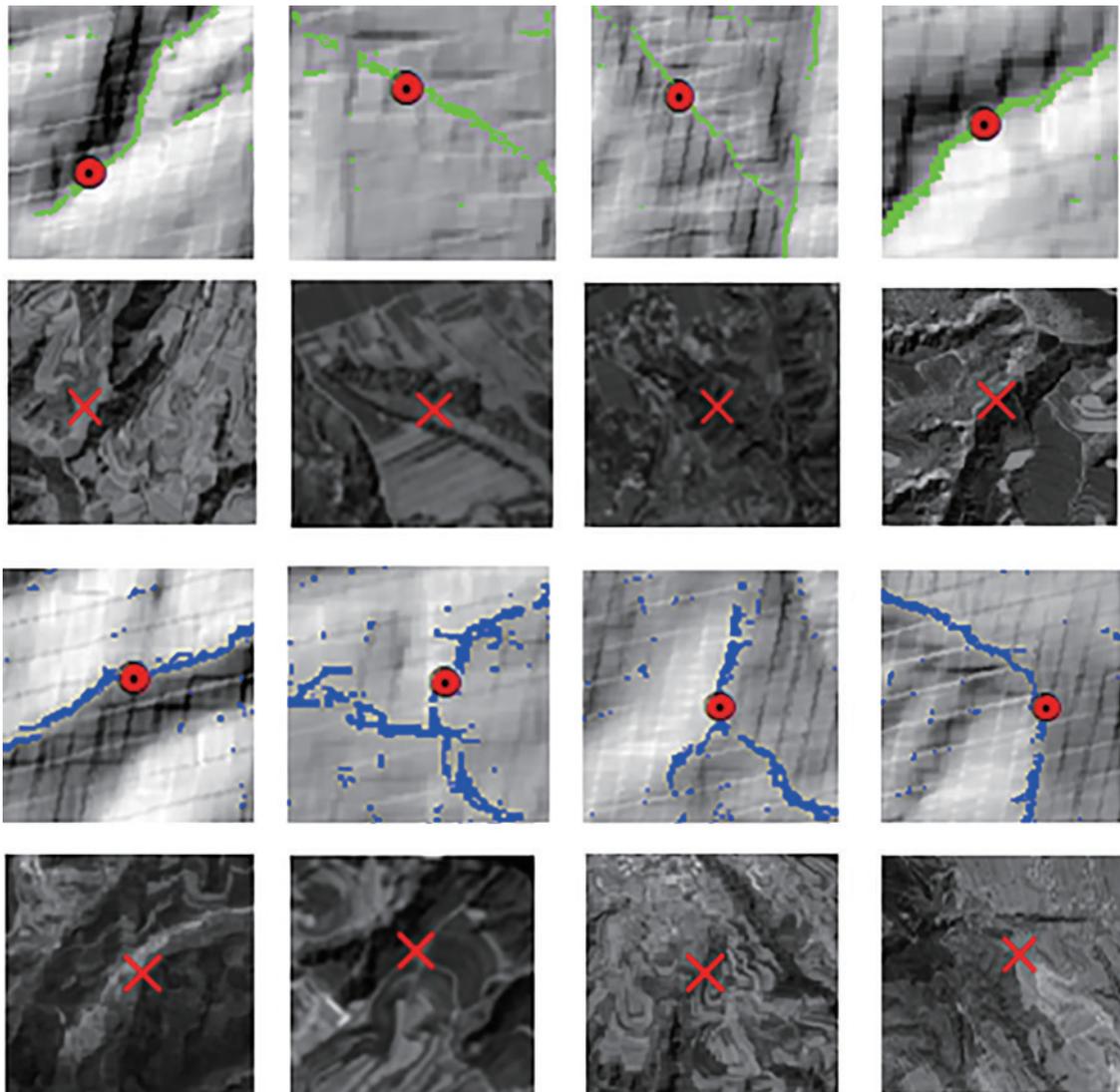


图 7 两种数据提取地形特征的对应关系

Fig. 7 Corresponding relation of terrain features extracted from two kinds of data

最终各轨数据提取特征点情况如表 4 所示,联合 DSM 地形特征检测生成具有显著共同特征的点数分别为 33、19、20、13 和 32,提取成功率为 0.79%~0.1%。提取率低的原因是:DSM 格网间距为 5 m,光子点云间距为 0.7 m,检测结果主要为明显地形特征点,更高分辨率影像生成更小间距 DSM 有可能进一步增加控制点提取数量;其次,现有点云轨迹经过的地区地面起伏不大,本文主要是基于坡度变化提取地形特征点的,这种情况下阈值设置过大,错漏了不满足条件的地形点。不过现有点数对辅助区域网空中三角测量和精度检测已经完全足够。

表 4 光子点云数据提取地形特征点统计结果

Table 4 Statistical results of terrain feature points extracted from photon point cloud data

Track data	Number of points
ATL03_20181026073719_04230102_004_01	33
ATL03_20200113222846_02780606_003_01	19
ATL03_20200221083219_08650602_004_01	20
ATL03_20201021205538_04230902_004_01	13
ATL03_20210111050804_02781006_004_01	32

4.5 联合平差处理

将提取的地形特征点作为三维控制点,一般对于单模型平差,至少需要 3 个控制点即可;对于区域网平差,对控制点的要求是控制点理论上越多越好,但是并不是控制点越多精度越好,当控制点达到一定数量,精度也会达到一个极限,不能无限提高精度。所以对于卫星影像区域网平差,控制点需要满足分布均匀的要

表 5 无控区域网平差与辅助区域网平差精度统计

Table 5 Accuracy statistics of uncontrolled block adjustment and auxiliary block adjustment

Control condition	Mean square error of image point /pixel	Number of control points	Number of checkpoints	Plane error /m	Elevation error /m
Uncontrolled	0.629			8.12	8.99
SRTM auxiliary	0.330			6.65	2.019
1 track photon point cloud assist	0.328	10	5	2.68	1.450
	0.326	18	7	2.64	1.390
5 track photon point cloud assist	0.325	10	50	2.57	1.325
	0.325	15	73	2.56	1.319

无控区域网平差只根据自带的有理函数模型,平面定位精度为 8.12 m,高程精度为 8.99 m。引入 5 m 分辨率开源 DOM 和公开 30 m 格网间距 SRTM 高程数据,增加一定精度的平面和高程几何约束,SRTM 辅助的立体影像定位平面精度为 6.65 m,高程精度为 2.019 m。试验区域加入 1 轨 ICESat-2 激光点云地形特征控制点后,可以明显提升影像的三维定位精度,平面精度提升到 2.64 m,高程精度提升到 1.390 m。加入 5 轨 ICESat-2 激光点云控制数据后,覆盖范围更加

求,数量最少情况下需保证四角加中间布控。采于 RFM 加像方仿射变换的区域网平差方法,控制点与检查点的分布如图 8 所示。

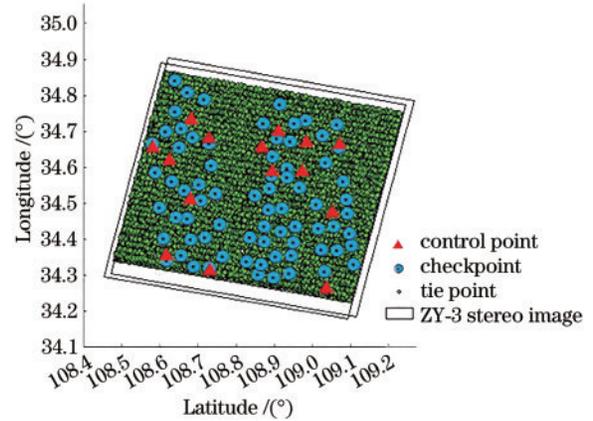


图 8 咸阳试验区影像、连接点、控制点、检查点分布图
Fig. 8 Distribution map of test area image, connection point, control point, check point in Xianyang

分别比较无控、SRTM DEM 辅助和加入 ICESat-2 控制点的区域网平差结果,同时为了验证激光控制点数对联合平差精度的影响,实验数据 1 对比了采用 1 轨和 5 轨数据的平差精度,结果如表 5 所示。其中 1 轨数据选择的是 ATL03_20200113222846_02780606_003_01 轨道,位于影像中间位置。首先对立体影像进行连接点匹配,获得匹配连接点 15398 个,加入 1 轨激光数据后,删除误差大的匹配点,还剩余 14614 个,平差后单位权重误差为 0.328 pixel;加入 5 轨激光数据后,删除误差大的匹配点,还剩余 14212 个,平差后单位权重误差为 0.325 pixel。

全面,控制点分布更加均匀,影像定位平面精度提升到 2.57 m,高程精度提升到 1.325 m。与完全无控定位和 SRTM 数据辅助定位方法相比,加入 5 轨 ICESat-2 激光点云控制数据的方法的平面精度分别从 8.12 m、6.65 m 提高到 2.56 m,高程精度从 8.99 m、2.019 m 提高到 1.319 m。相比 SRTM 数据辅助定位方法,加入 5 轨 ICESat-2 激光点云控制数据的方法的平面精度和高程精度分别提高了 61.5% 和 34.7%。从表 5 可以看到,光子激光点云能够提供足够数量控制点数据,辅助

卫星立体影像目标定位精度达到设计理论精度,继续加入更多控制点后定位精度不再有进一步提升。

4.6 进一步验证

为了进一步验证所提方法的可行性,选择西安地区为试验区域,试验数据同样采用同一地区的两种数据。提取的地形特征点的数量统计如表 6 所示。ATL03_20181217171333_12230106_003_01 轨道位于区域中间位置,地形变化不明显,联合 DSM 最终提取的特征点为 13 个,ATL03_20190416112928_02780306_003_01 轨道位于区域的右侧,地形起伏较

表 6 西安地区从光子点云数据提取的地形特征点统计结果
Table 6 Statistical results of terrain feature points extracted from photon point cloud data in Xi'an

Track name	Number of points
ATL03_20181217171333_12230106_003_01	13
ATL03_20190416112928_02780306_003_01	44

表 7 无控区域网平差与辅助区域网平差精度统计
Table 7 Accuracy statistics of uncontrolled block adjustment and auxiliary block adjustment

Control condition	Mean square error of image point /pixel	Number of control points	Number of checkpoints	Plane error /m	Elevation error /m
Uncontrolled	0.675			8.17	9.216
SRTM auxiliary	0.331			6.68	2.321
Photon point cloud assist	0.327	10	16	2.71	1.526

5 结 论

星载光子计数点云具有足印光斑较小、沿飞行方向密集分布等特性,为卫星影像定位精度提升提供了新的技术途径。鉴于光子点云数据难以获得同步影像并确定平面位置,与其他遥感影像联合使用时,较小的水平误差会引起很大的垂直误差。为了解决平面与高程控制的一致性,提出一种光子点云支持下的卫星影像联合平差方法,首先通过三维剖面地形匹配方法自动确定两种数据间的相对偏移量;然后对剖面点云和卫星影像生成 DSM 进行特征点检测,联合两种提取结果生成共同地形特征点;将该地形特征点作为高精度平高控制点引入卫星影像区域网平差过程,达到改善影像整体平差、提高定位精度的目标。研究结果如下。

1) 具有高采样频率的星载多波束激光测量数据精细呈现地形剖面特征,具备与卫星影像生成 DSM 之间开展三维地形剖面匹配条件,从而能够准确确定激光数据与立体影像之间相互空间位置关系,降低了光子点云平面不确定性对影像定位精度的影响。

2) 以地形坡度变化为特征阈值后可以有效从光子点云中提取地形特征点,与 DSM 地形特征具有较好的符合性,联合两种特征可以有效生成共同特征点,有效实现点云与立体影像之间平面精度和高程精度的可

大,联合 DSM 提取的特征点个数为 44。

将联合提取的地形特征点作为平高控制点,利用联合平差方法进行平差处理,对无控、SRTM 数据辅助和 ICESat-2 数据辅助区域网平差进行精度评定,结果如表 7 所示。

从表 7 可以看出:无控条件下,只是利用立体影像进行前方交会,系统误差较大;添加辅助数据 SRTM 时,有了相对的约束条件,可以在一定程度上增加对卫星影像的定位精度,平面精度和高程精度分别可以达到 6.68 m 和 2.321 m;采用更高精度的 ICESat-2 点云时,由于消除了平面位置的偏差,提高影像的三维定位精度的效果更明显,平面精度可以达 2.71 m,高程精度可以达 1.526 m,由于该区域城市高楼建筑物较多,高程精度误差相对较大,与完全无控定位和 SRTM 数据辅助定位方法相比,平面精度分别从 8.17 m、6.68 m 提高到 2.71 m,高程精度从 9.216 m、2.321 m 提高到 1.526 m,提升幅度相比 SRTM 数据分别达 59.4% 和 34.3%。

靠传递,能够充分发挥星载激光测量数据精度优势。

3) 光子点云控制点可以作为一种有效的平高控制点,控制点数量和分布更容易达到区域网控制要求。采用基于 RFM 补偿方程的区域网平差模型,相比 SRTM 数据,ZY-3 影像平面和高程定位精度提升幅度分别可以达 60% 和 34% 左右。

综上所述,相对于现有线性体制激光测高数据、开源全球 DEM,星载光子点云在提升卫星影像定位精度方面具有新的突破:一是作为控制数据分布的充分性;二是数据精度尤其是平面精度的提升。这都为实现全球精确测绘提供了一个新的发展方向。后续可能会更详细分析地表覆盖类型对地形特征点提取的影响,同时也会考虑点云语义信息和具有光谱信息的影像的联合处理。

参 考 文 献

- [1] Gianinnetto M, Scaioni M. Automated geometric correction of high-resolution pushbroom satellite data[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2008, 74(1): 107-116.
- [2] 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.

- [3] 周平, 唐新明, 曹宁, 等. SRTM 约束的无地面控制立体影像区域网平差[J]. 测绘学报, 2016, 45(11): 1318-1327.
Zhou P, Tang X M, Cao N, et al. SRTM-aided stereo image block adjustment without ground control points[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(11): 1318-1327.
- [4] 邸凯昌, 刘斌, 彭嫄, 等. 利用多探测任务数据建立新一代月球全球控制网的方案与关键技术[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 2099-2105.
Di K C, Liu B, Peng M, et al. Scheme and key techniques for construction of new-generation lunar global control network using multi-mission data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 2099-2105.
- [5] 曹彬才, 方勇, 高力, 等. 利用机载点云检核 ICESat-2/ATLAS 激光测高数据精度[J]. 测绘科学技术学报, 2020, 37(1): 50-55.
Cao B C, Fang Y, Gao L, et al. Verification of ICESat-2/ATLAS laser altimetry data accuracy using airborne point cloud[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2020, 37(1): 50-55.
- [6] Li G Y, Ye F H, Tang X M, et al. Influence of range gate width on detection probability and ranging accuracy of single photon laser altimetry satellite[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2020, 3(2): 36-44.
- [7] 么嘉祺, 翟浩然, 刘仁, 等. 光子体制激光测高卫星大气探测算法分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(22): 2228002.
Yao J Q, Zhai H R, Liu R, et al. Analysis of atmospheric detection algorithm by photon-counting laser altimeter satellite[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(22): 2228002.
- [8] 王密, 韦钰, 杨博, 等. ICESat-2/ATLAS 全球高程控制点提取与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(2): 184-192.
Wang M, Wei Y, Yang B, et al. Extraction and analysis of global elevation control points from ICESat-2/ATLAS data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2): 184-192.
- [9] 方勇, 曹彬才, 高力, 等. 激光雷达测绘卫星发展及应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 20201044.
Fang Y, Cao B C, Gao L, et al. Development and application of lidar mapping satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 20201044.
- [10] 李国元, 唐新明. 资源三号 02 星激光测高精度分析与验证[J]. 测绘学报, 2017, 46(12): 1939-1949.
Li G Y, Tang X M. Analysis and validation of ZY-3 02 satellite laser altimetry data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(12): 1939-1949.
- [11] 李国元. 对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践[J]. 测绘学报, 2018, 47(12): 1691.
Li G Y. Earth observing satellite laser altimeter data processing method and engineer practice[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(12): 1691.
- [12] Li G Y, Tang X M, Gao X M, et al. Improve the ZY-3 height accuracy using icesat/glas laser altimeter data[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLI-B1: 37-42.
- [13] Li G Y, Tang X M, Gao X M, et al. ZY-3 block adjustment supported by glas laser altimetry data[J]. The Photogrammetric Record, 2016, 31(153): 88-107.
- [14] 唐新明, 李国元, 高小明, 等. 卫星激光测高严密几何模型构建及精度初步验证[J]. 测绘学报, 2016, 45(10): 1182-1191.
Tang X M, Li G Y, Gao X M, et al. The rigorous geometric model of satellite laser altimeter and preliminarily accuracy validation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(10): 1182-1191.
- [15] 李国元, 唐新明, 王华斌, 等. GLAS 激光测高数据辅助的资源三号三线阵区域网平差研究[C]//第三届高分辨率对地观测学术年会优秀论文集. 北京: 高分辨率对地观测学术联盟, 2014: 586-600.
Li G Y, Tang X M, Wang H B, et al. Research on the ZY-3 block adjustment supported by the GLAS laser altimetry data[C]//The third China High Resolution Earth Observation Academic Alliance, 2014: 586-600.
- [16] 曹宁, 周平, 王霞, 等. 激光测高数据辅助卫星成像几何模型精化处理[J]. 遥感学报, 2018, 22(4): 599-610.
Cao N, Zhou P, Wang X, et al. Refined processing of laser altimeter data-aided satellite geometry model[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(4): 599-610.
- [17] 王晋, 张勇, 张祖勋, 等. ICESat 激光高程点辅助的天绘一号卫星影像立体区域网平差[J]. 测绘学报, 2018, 47(3): 359-369.
Wang J, Zhang Y, Zhang Z X, et al. ICESat laser points assisted block adjustment for mapping satellite-1 stereo imagery[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(3): 359-369.
- [18] 唐新明, 刘昌儒, 张恒, 等. 高分七号卫星立体影像与激光测高数据联合区域网平差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10): 1423-1430.
Tang X M, Liu C R, Zhang H, et al. GF-7 satellite stereo images block adjustment assisted with laser altimetry data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1423-1430.
- [19] 蔡超. ICESat-2 点云数据辅助卫星影像 DEM 提取方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
Cai C. Research on ICESat-2 point cloud data assisted satellite image DEM extraction method[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [20] 张鑫磊, 邢帅, 徐青, 等. ATLAS 数据与资源三号 02 星影像联合区域网平差[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S2): 155-162.
Zhang X L, Xing S, Xu Q, et al. Joint block adjustment for ATLAS data and ZY3-02 stereo imagery[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(S2): 155-162.
- [21] Liu S J, Lü Y, Tong X H, et al. An alternative approach for registration of high-resolution satellite optical imagery and ICESat laser altimetry data[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2008.
- [22] 张同刚, 岑敏仪, 冯义从, 等. 采用截尾最小二乘估计的 DEM 匹配方法[J]. 测绘学报, 2009, 38(2): 144-151.
Zhang T G, Cen M Y, Feng Y C, et al. DEM matching algorithm using least trimmed squares estimator[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(2): 144-151.
- [23] Grodecki J, Dial G. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, 69(1): 59-68.