

文章编号: 1672-8785(2024)02-0036-05

基于坡度检测与点密度自约束调整的 LOLA 地理定位误差校正

杨瑞林¹ 谢 欢^{1,2*} 刘小帅¹ 奚源廷¹ 晏雄锋^{1,2}
叶 真^{1,2} 刘世杰^{1,2} 童小华^{1,2}

(1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;

2. 上海市航天测绘遥感与空间探测重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 月球轨道器激光高度计(Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA)是目前月球探测中获取数据量最大、精度最高的激光高度计,可为其他月球产品提供地理控制。然而由于定轨不确定性和激光指向偏差,部分激光剖面存在地理定位误差。针对这些异常轨道数据,提出了一种改进的激光自约束调整方法。首先基于坡度将与周围地形差异过大的激光剖面识别为异常轨,并使用其余轨道作为参考对其进行基于点密度的自约束轨道调整(根据参考点密度自动选取合适的调整策略),最后合并两类轨道数据并进行最终调整,再将其作为改正后的结果。交叉点分析结果表明,该方法能有效校正异常轨道,从而提升数据精度。

关键词: 月球; 激光高度计; 地理定位误差; 自约束调整

中图分类号: TP79 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.02.005

LOLA Geolocation Error Correction Based on Slope Detection and Point Density Self-Constraint Adjustment

YANG Rui-lin¹, XIE Huan^{1,2*}, LIU Xiao-shuai¹, XI Yuan-tin¹, YAN Xiong-feng^{1,2},
YE Zhen^{1,2}, LIU Shi-jie^{1,2}, TONG Xiao-hua^{1,2}

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Space Mapping and Remote Sensing for Planetary Exploration, Shanghai 200092, China)

Abstract: The Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) is currently the largest and most accurate laser altimeter in lunar exploration, which can provide geographical control for other lunar products. However, due to the uncertainty of orbit determination and laser direction deviation, there are geographic positioning errors on some laser profiles. In view of these abnormal orbit data, an improved laser self-constrained adjustment method is proposed in this paper. Firstly, the laser profile that is too different from the surrounding terrain is identified as an abnormal orbit, and the remaining orbits are used as references to perform self-constrained orbit adjustment based on point density (selecting appropriate adjustment strategies according to the reference point density), and finally merging the two types of orbit data and performing final adjustment, and then using it as the corrected result. The intersection point analysis results show that this method can effectively correct abnormal orbits, thereby improving data accuracy.

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42271455; 42221002; 42325106); 上海市科技创新行动计划资助项目(22511102900; 21511103800); 航空航天飞行力学实验室资助项目(KGJ6142210110305); 上海市教委创新项目资助项目(2023ZKZD30)

作者简介: 杨瑞林(1999-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要研究方向为星载激光雷达数据处理。

*通讯作者: E-mail: huanxie@tongji.edu.cn

tified as an abnormal orbit based on the slope, and the other orbits are used as references for self-constrained orbit adjustment based on the point density (the appropriate adjustment strategy is automatically selected according to the reference point density). Finally, the two types of orbit data are merged and the final adjustment is made, and then it is used as the corrected result. The results of cross point analysis show that this method can effectively correct the anomalous orbit and improve the data accuracy.

Key words: lunar; laser altimeter; geolocation error; self-constraint adjustment

0 引言

美国 2009 年发射的月球勘测轨道器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)上搭载的 LOLA 是全球首台使用多波束测量月表的激光高度计,通过光学元件将单束激光分散为 5 束,因此每次发射都会在月表产生 5 个激光足印^[1]。运行到目前为止, LOLA 提供了全月范围的高精度激光点观测值,其衍生的数据产品对于永久阴影区探测、着陆选址等应用具有重要意义^[2]。然而,受到航天器定轨精度以及激光指向偏差等影响,部分 LOLA 轨道数据存在地理定位偏差。这些轨道数据的质量会受到不同程度的影响,并在数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)中以伪影的形式表现出来。

为了提高激光数据的精度,Neumann G A 等人通过全球交叉点平差的方式有效校正了火星轨道器激光高度计(Mars Orbiter Laser Altimeter, MOLA)轨道和仪器指向误差^[3]。Mazarico E 等人针对 LOLA 多波束测量特性,提出了一种条带交叉改正方法。他们以激光条带的重叠区域作为约束,提升了 LOLA 数据质量^[4]。然而,交叉点的搜索非常耗时,并且在插值过程中容易引入额外误差。利用高精度地形作为参考,对激光轨道进行改正是另一种有效方法。Barker M 等人利用 LOLA 数据自身构建参考 DEM,通过自配准的方式在南极高纬度区域实现了异常轨道的调整^[5]。Xie H 等人使用一种迭代自约束调整方法,直接根据激光点提供的参考信息进行逐轨调整^[6]。但当参考信息提供不准确时,这类方法的准确性可能会受到影响。

目前,对于激光数据的改正多采用自约束调整的方法,即在不加入外部高精度参考数据的情况下,仅通过自身构建几何约束来提高数据的整体精度。然而,在该过程中异常轨同样会参与约束构建,可能会在调整中提供不准确的参考信息从而造成误调整。因此,本文首先利用坡度作为参考进行异常轨识别,然后将其从原始数据中抽取出来,利用其余轨道来构建约束,并对这部分异常轨进行基于点密度的轨道调整。接着将调整后的异常轨数据重新加入原始数据中并进行整体自约束调整,最终得到高自洽性的激光数据集。

1 方法

LOLA 是搭载在 LRO 上的 7 个科学载荷之一,自 2009 年运行至今,累计获取了约 69 亿个月表三维点。LOLA 科学团队对数据进行了分级处理并公开发布。本文的研究对象为 LOLA 简缩数据(Reduced Data Record, RDR)。该数据产品是由原始测距数据(Experiment Data Record, EDA)结合航天器轨道和位姿解算生成的月表高程数据,其中主要包括按轨道编号组织的激光足印三维坐标。

1.1 异常轨识别

地理定位异常的轨道通常在三维方向上存在不同程度的几何偏移。由于与周围地形的差异过大,这些轨道数据在使用激光点插值生成的 DEM 中主要以伪影形式存在。Christian H 提出了最大坡度法(Maximum Slope Approach, MSA)。该方法使用坡度作为指标来探测和定位地球 DEM 产品中存在的伪影^[7]。本文参考了这种思想,并根据激光轨道的数据特点,研究了一种简单有效的伪影识别方法。首先,对

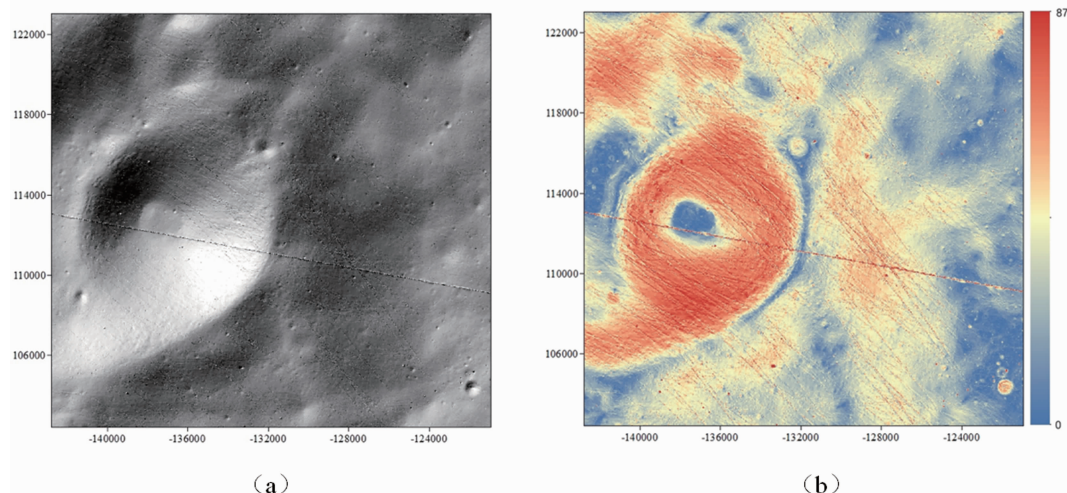


图 1 用原始数据构建的 DEM: (a)山体阴影; (b)坡度图

原始激光点数据使用张力样条插值生成合适分辨率的 DEM^[8]。接着计算反映高程变化程度的坡度图,即通过计算 DEM 中每个像元和相邻像元的高程值得到。

从图 1 中可以观察到有大量的线状伪影分布在其中,主要原因是激光剖面在水平或者高程方向上的偏移导致其中一条或多条轨道数据与周围地形不匹配,在视觉上表现为以该异常轨为轮廓的线状凸起或凹陷。本文所提出的识别方法主要利用了异常轨相比于其相邻像元的高程值具有较大差异的特点,通过寻找与周围地形起伏明显不符的轨道数据来将存在较大三维偏移的异常轨道筛选出来。由于坡度可以在一定程度上反映像元周围的高程变化情况,所以使用原始数据的坡度图作为输入。利用双线性插值将激光点与栅格坡度相匹配以获得点所在位置处的坡度值;然后分别将激光点坐标向 x-y 方向平移一个像素距离,以轨道为单位计算该轨所有点与这四个位置的坡度差值并取平均来作为该轨与周围地形起伏差异的度量值;最后将平均坡度差值较大的轨道识别为异常轨,并将其从原始数据中筛选出来。在数据分布较为稀疏的地方,直接剔除轨道可能会造成这部分的数据缺失,所以保留这些异常轨并对其进行进一步的改正。

1.2 基于点密度的自约束调整

LOLA 经过长年观测已在月表累积了大量

高精度观测值,其密度足以仅依靠自身来构建几何约束从而实现逐轨迭代调整。自约束调整的主要思想是将轨道在 x-y 方向上以亚像素距离进行移动,每次移动都计算参考高程与原始高程的均方根误差;当差值最小时,认为该轨达到了与参考地形的最佳拟合,并且在每次单轨调整完成后都用更新后的三维信息替换原始数据中的旧值;大多数轨道在经过 5 轮迭代后都能调整至正确位置。需要最小化的函数如下:

$$RMSE_i = \sqrt{(z_{R_i} - z_0)^T W_i (z_{R_i} - z_0) / M} \quad (1)$$

式中, z_{R_i} 代表参考高程; z_0 代表待调整点的高程; M 代表轨道总点数; W_i 是使用 Huber 加权^[9]后计算得到的权函数,主要目的是抑制异常点对轨道调整的影响。

对于与参考高程差值过大的点,当差值大于两倍标准差时,该点会被赋予其差值倒数的权重,而对差值在阈值以内的点则赋予数值为 1 的权重。在参考高程的计算中,使用激光点直接插值作为参考数据比使用参考 DEM 具有更高的精度。但该策略依赖于待调整轨道周围参考点的数量,数据稀疏时可能会严重影响参考信息的准确性。所以在调整前首先使用 k-d 树来统计以激光点为中心的 100 m 范围内能搜寻到的参考点数量,并按每轨为单位取均值作为该轨的点密度。考虑到使用激光点直接插值需要一定数量的点来稳定结果,所以当点密度

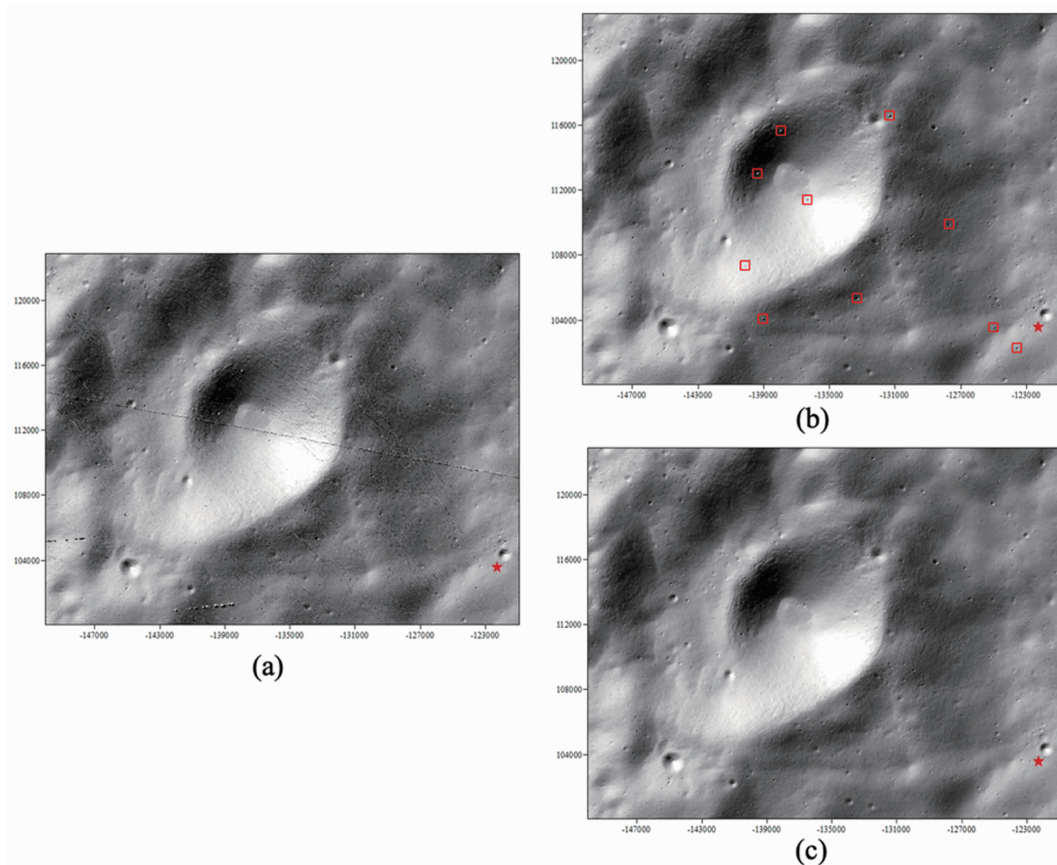


图 2 调整前后的山体阴影图(红星标出的地点为 LCROSS 撞击点): (a)调整前; (b)调整后(红框展示了部分经过异常点剔除后进一步消除的突刺异常); (c)调整后的最终效果

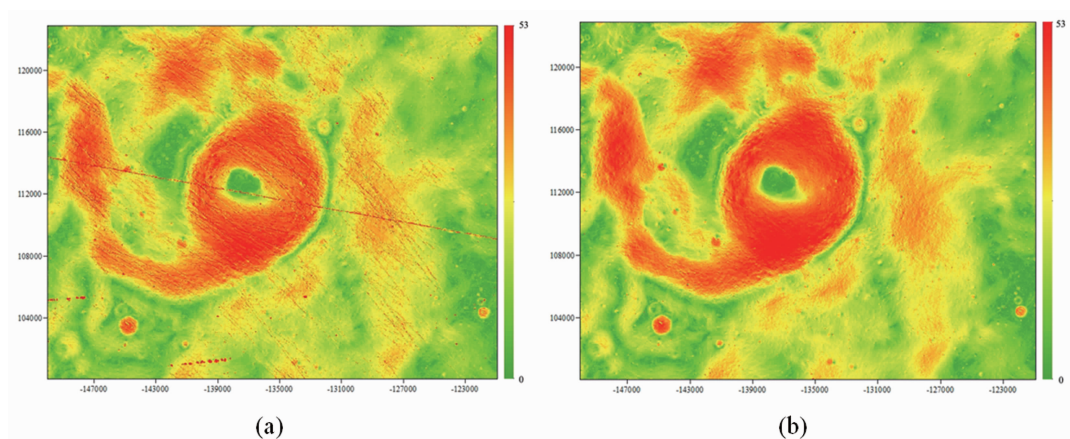


图 3 调整前后的坡度图: (a)调整前; (b)调整后

大于等于 5 (即该轨平均每个点在一定范围内都至少分布了 5 个以上的参考点) 时, 采用反距离权重插值来计算待调整点的参考高程。下面简要介绍计算过程。

假设待调整点的坐标为 (x_i, y_i) , 该点 100 m 范围内共分布了 N 个参考点, 其中参考点 h

的坐标为 (x_h, y_h) 。首先需要计算参考点与待调整点的距离 d_h :

$$d_h = \sqrt{(x_i - x_h)^2 + (y_i - y_h)^2} \quad (2)$$

接着根据距离计算每个参考点的权重 w_h :

$$w_h = \frac{d_h^{-p}}{\sum_{h=1}^N d_h^{-p}} \quad (3)$$

式中, p 为正实数, 通常选取 2。

最后, 计算每个参考点权重与高程值乘积的累加和作为待调整点的参考高程值。

$$z_{R_i} = \sum_{h=1}^N w_h z_h \quad (4)$$

当点密度小于 5 时, 采用去除待调整轨道后的剩余数据所构建的 DEM 来提供参考高程, 通过双线性插值将待调整点与参考 DEM 匹配后获取相应位置的高程值。

对于经过了轨道分类的两类数据, 首先将筛选出来的异常轨道从原始数据中抽取出来, 以抽取后的剩余数据作为参考对异常轨道进行一次迭代调整, 并以每轮调整的高程残差作为判断依据来丢弃掉差异过大的轨道。这一步的主要目的是改正具有较大误差的数据并剔除部分差异过大而无法实现正确调整的轨道。接着将改正后的异常轨重新加入原始数据中并进行整体迭代调整。本轮调整主要改正原始数据中残留的具有较小地理定位异常的剖面。最后使用坡度和粗糙度构建统计量来剔除数据中的粗差点, 得到具有高自洽性的激光数据集。

2 结果

实验区域在月球南极 84°S 左右, 位于月球陨石坑观测与传感卫星 (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite, LCROSS) 撞击点附近, 覆盖面积约为 690 km^2 , 共有 1335 轨 LOLA RDR 数据分布其中。经过上述流程进行轨道调整后, 分别对原始数据和调整后数据构建分辨率为 5 m 的 DEM 以及坡度图 (见图 2 与图 3)。由于原始数据中存在较多地理定位异常的轨道, DEM 中分布了大量不真实的地形特征。经过本文方法的改正后, 最终效果展示在图 2 (c) 中。可以明显看出, DEM 中存在的大部分伪影和突刺等异常得到了有效消除, 数据质量得到了提升。

不同轨道经过同一位置时会形成交叉点, 而这些轨道在交叉点位置上的高程差称为交叉点不符值。该指标可以在一定程度上反映数据的精度, 差值越小代表数据自洽性越高。平均

绝对偏差是将不符值取绝对值以后再求平均而得。从表 1 中可以看出, 经过调整以后, 交叉点不符值显著降低。同时我们对交叉点不符值进行了分箱统计。如图 4 所示, 调整后交叉点不符值的分布明显向中心聚拢, 改善了调整前的长尾分布。

表 1 调整前后交叉点不符值对比

	平均绝对偏差/m	标准差/m
改正前	1.796	2.740
改正后	0.512	0.725

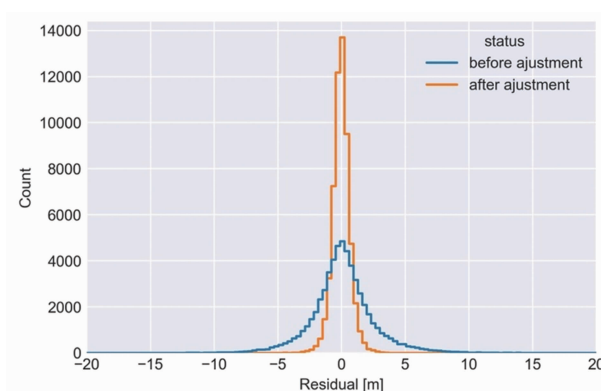


图 4 交叉点残差的直方图统计

3 结束语

针对异常轨道相较于周围地形具有较大高程差异的特点, 我们提出了一种基于坡度的异常轨识别方法, 并在之后进行了分批自约束调整。基于参考点的密度选取合适的调整策略以提高参考信息的准确性。经过最终调整以后, 区域中地理定位异常的轨道得到了有效改正, DEM 中的伪影被消除了, 交叉点不符值显著降低了, 数据精度得到了有效提升。相比于仅使用点或者参考 DEM 的自约束调整, 本文所提出的方法可以防止异常轨道在调整中提供错误的参考信息, 并能灵活选择不同的调整策略, 在激光点密度降低后也能达到良好的调整效果。然而对于中低纬度的激光数据, 由于轨道之间间隙过大, 仅使用自身数据难以提供准确的参考信息来修正地理定位异常的轨道。后期工作中将考虑结合外部辅助数据 (如影像或异源激光数据) 来对这部分轨道进行进一步

调整。

参考文献

- [1] Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Summary of the results from the Lunar Orbiter Laser Altimeter after seven years in lunar orbit [J]. *Icarus*, 2017, **283**: 70–91.
- [2] Qiao L, Ling Z, Head J W, et al. Analyses of Lunar Orbiter Laser Altimeter 1064-nm albedo in permanently shadowed regions of polar crater flat floors: Implications for surface water ice occurrence and future in situ exploration [J]. *Earth and Space Science*, 2019, **6**: 467–488.
- [3] Neumann G A, Rowlands D D, Lemoine F G, et al. Crossover analysis of Mars orbiter laser altimeter data [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, **106**(10): 23753–23768.
- [4] Mazarico E, Neumann G A, Rowlands D D, et al. Geodetic constraints from multi-beam laser altimeter crossovers [J]. *Journal of Geodesy*, 2010, **84**(6): 343–354.
- [5] Barker M, Mazarico E, Neumann G, et al. Improved LOLA elevation maps for south pole landing sites: Error estimates and their impact on illumination conditions [J]. *Planetary and Space Science*, 2020, **203**: 105–119.
- [6] Xie H, Liu X S, Xu Y S, et al. Using laser altimetry to finely map the permanently shadowed regions of the lunar south pole using an iterative self-constrained adjustment strategy [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, **15**: 9796–9808.
- [7] Christian H. Artefact detection in global digital elevation models (DEMs): The Maximum Slope Approach and its application for complete screening of the SRTM v4. 1 and MERIT DEMs [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **207**: 27–41.
- [8] Smith W H F, Wessel P. Gridding with continuous curvature splines in tension [J]. *Geophysics*, 1990, **55**(3): 293–305.
- [9] Huber P J. Robust regression: asymptotics, conjectures and Monte Carlo [J]. *The annals of statistics*, 1973, **1**(5): 799–821.