

基于多视单目影像光度法的月球南极像素级三维重建

陈泽宇，李兆津，吴波，贾然野，彭悦

香港理工大学 土地测量与地理资讯学系 行星遥感实验室, 中国 香港 999077

摘要：月球表面精细三维重建对月球探测任务和科学的研究具有重要意义。过去几十年的研究主要侧重于激光测高与摄影测量方法的研究，但受限于硬件和方法原理，其三维重建DEM（Digital Elevation Model）的最高分辨率只能达到几十米或图像分辨率的若干倍，无法为地势复杂的月球南极探测提供有效支撑。影像光度法因其可以充分利用图像中每个像素的明暗信息，从而重建像素级分辨率的DEM受到了广泛关注。但月球南极太阳高度角接近 0° ，阴影效应严重，使用单张图像无法覆盖所有区域。其次，图像之间光照存在较大差异，直接通过多张图像建立约束方程容易造成冲突，使得优化计算不收敛，无法有效重建三维地形。因此，本文提出了一种基于多张单目影像光度法的像素级三维重建方法，方法的输入为多张高分辨率影像和相应的现有低分辨率DEM，通过构建多分辨率金字塔尺度空间，通过影像光度法逐级优化DEM，将原始的低分辨率DEM提升至像素级。在损失函数方面，本文充分考虑到月球南极图像之间的阴影差异，提出了相似性约束，从而保证在引入多光照方向约束的同时，也可有效利用每张图像特有的信息。在损失优化方面，本文引入了自适应学习率优化器，从而更好地保证损失函数的收敛。而优化过程中的梯度更新也为影像光度法的重建质量提供了参考。本文选取了月球南极着陆探测的重点区域—沙克尔顿撞击坑周边的两个局部区域来验证算法的有效性。与公开发布的基于摄影测量方法和激光点云生成的DEM相比，本文所提方法得到的DEM获得了更精细的像素级地形细节，高程精度优于一个像素。基于影像光度法DEM生成的光照模拟影像与遥感影像基本一致，证明实验区地形得到了较好的恢复。本文提出的新算法可以有效重建月球南极大范围高精度、像素级分辨率的DEM，为后续的月球南极探测任务和科学的研究提供重要的数据支撑。

关键词：月球南极，数字高程模型，像素级三维重建，影像光度法，摄影测量

中图分类号：TP701/P2

引用格式：陈泽宇, 李兆津, 吴波, 贾然野, 彭悦. 2025. 基于多视单目影像光度法的月球南极像素级三维重建. 遥感学报, 29(2): 415–428

Chen Z Y, Li Z J, Wu B, Jia R Y and Peng Y. 2025. Multi-view photometric from monocular images for pixel-wise 3D mapping of the lunar South Pole region. National Remote Sensing Bulletin, 29(2): 415–428 [DOI: 10.11834/jrs.20254059]

1 引言

月球南极因为极端光照条件形成了永久阴影区，光谱遥感等发现永久阴影区内可能蕴含水冰（Li等，2018），可为月球及深空探测提供重要资源，因而月球南极成为世界各国未来探测任务的热点（张玉征等，2024）。数字高程模型DEM（Digital Elevation Model）在着陆区选址及着陆安全评估（Wu等，2014, 2018, 2020）、以及月球科学的研究（De Rosa等，2012；Guo等，2021）中起到重要作用。

用。现有的月球表面DEM产品主要由月球勘测轨道器LRO（Lunar Reconnaissance Orbiter）上搭载的激光高度计LOLA（Lunar Orbiter Laser Altimeter）（Smith等，2010）、LRO窄角相机（NAC）影像摄影测量方法等生成（邸凯昌等，2016）。激光高度计随着卫星的移动向地面发射激光，并通过收到回波的时间以及当时卫星的位姿计算激光点的三维坐标（Smith等，2010）。LOLA为月球南极地区（南纬 85° 以上区域）提供完整的DEM覆盖，其分辨率最高达5 m/像素。但受限于激光点的密度和轨道的

收稿日期：2024-02-27；预印本：2024-06-28

基金项目：香港研究资助局项目（编号：R5043-19, PolyU 15210520, PolyU 15219821, PolyU 15215822）

第一作者简介：陈泽宇，研究方向为行星地形地貌。E-mail: zeyu-andrew.chen@connect.polyu.hk

通信作者简介：吴波，研究方向为摄影测量、行星遥感、行星科学。E-mail: bo.wu@polyu.edu.hk

精度, LOLA DEM 存在严重的过度内插现象, 有效分辨率较低, DEM 上还存在明显的条带噪音和错误高程点。摄影测量方法则主要是基于立体图像观测, 通过严密的光束法平差解算恢复三维地形。其中在多张图像上找到匹配点进行平差是摄影测量 DEM 生成和精度保证的基础。但月球南极图像之间存在较大阴影和灰度差异, 很难保证匹配点的数量以及分布的均匀性。即使能找到较多匹配点, 巨大的光照差异也会严重影响后续的密集匹配, 使得能重建的区域地形和细节十分有限, 在月球南极由 NAC 立体影像 ($\sim 1 \text{ m/像素}$) 生成的 DEM (2 m/像素 或 4 m/像素) 存在许多空洞区域 (Rosiek 等, 2013)。

影像光度法 (Photoclinometry or Shape-from-Shading) 近年来受到研究者的广泛关注。因为其可以只使用单张图像重建与输入影像相同分辨率的三维模型。影像光度法的基本原理是利用表面坡度和相机传感器接收到的辐亮度之间的关系, 通过表面反射模型和光照信息构建观测方程以求解表面坡度, 进而重建三维表面模型。影像光度法由 van Diggelen (1951) 提出并由 Horn (1977) 和 Kirk (1987) 等陆续完善。因为灰度图像沿光照方向的亮度变化最为明显, 一般会选择沿光照方向的地形剖面作为重建目标。但是如果推广到二维条件下, 相邻剖面的不一致性会成为影响重建结果的主要因素。Horn 和 Brooks (1986) 提出了一种平滑约束方法使得利用影像光度法生成的二维 DEM 平滑且连续。然而, 影像光度法由于依赖表面反照率、表面反射模型等导致其生成的 DEM 精度欠理想, 难以用于大范围的三维重建。

Grumpe 等 (2014) 与 Wu 等 (2018) 成功将影像光度法用于大范围月球表面三维重建。Grumpe 等 (2014) 利用已有的月球低分辨率 DEM 做约束, 使用更复杂的表面反射方程和更先进的求解方法来处理 NAC 影像, 逐像素重建得到精度更优的 DEM。Wu 等 (2018) 通过加入全局可变反照率, 使得影像光度法不仅仅考虑地形的变化, 也考虑不同区域反照率不同对地形重建带来的影响。Liu 和 Wu (2020) 将立体摄影测量与影像光度法几何起来, 利用 NAC 影像在嫦娥四号与嫦娥五号着陆区生成像素级分辨率、高精度 DEM (Wu 等, 2020)。

影像光度法在使用单张图像解算时, 因为未知数多于观测数, 其本质上是一个病态问题 (Durou

等, 2008)。当存在多张图像观测时, 同一区域的地形受到不同光照方向观测的约束, 可避免在单张图条件下出现的噪声, 也可恢复更准确的地形 (Liu 和 Wu, 2021)。同时, 对于月球南极的极端光照条件, 非永久阴影区也常会因为接近 0 度的太阳高度角和较大起伏的地势被阴影覆盖。而利用多张单目影像可提供更大的光照覆盖区域, 使得影像光度法可以重建更大范围的三维地形。

针对月球南极区域的极端光照条件, 本文提出了一种基于多视单目影像光度法的月球表面三维重建方法。该方法能够有效克服月球南极的极端光照困难并得到与输入图像分辨率相同的像素级 DEM。

2 多视单目影像光度法三维重建

2.1 算法流程概述

本文提出的基于多视单目影像的光度法的算法流程如图 1 所示。首先需要对数据进行预处理, 通过星历文件计算图像坐标系下的太阳高度角和方位角, 并根据计算得到的太阳方位信息对影像进行筛选。因为影像光度法的优势在于分辨局部的亮度变化而非辨认大尺度的光度变化, 本文算法采用金字塔优化策略。金字塔的最低分辨率为输入的初始 DEM 分辨率 (如 20 m/像素 的 LOLA DEM), 最高分辨率为输入影像的分辨率 (如 1 m/像素 的 NAC 影像), 每层金字塔由 n 幅影像和对应分辨率的初始 DEM 组成。从最低分辨率的影像开始, n 幅影像和初始 DEM 作为输入数据迭代优化 n 幅 DEM。每次迭代中, 算法会根据所提出的光度法损失函数构建 3 种约束方程: 即图像光度法约束、DEM 相似约束以及初始 DEM 控制约束, 再使用优化器进行梯度的解算和更新。当损失低于指定阈值时, 算法会判断当前生成 DEM 的分辨率是否等于指定分辨率。若分辨率低于指定分辨率, 当前生成的 DEM 将会上采样并和同等分辨率的影像进行下一轮的迭代, 直到光度法优化的 DEM 达到指定分辨率。最后, 得到与影像分辨率一致的高分辨率 DEM 作为输出。

2.2 影像预处理

预处理主要包括: 太阳方位角与高度角的计算, 图像筛选以及永久阴影区掩膜生成。

在太阳方位参数计算方面, LRO NAC 所提供

的参数为针对一轨影像中心点的太阳高度角和方位角 (De Rosa 等, 2012)。但在月球南极地区, 一轨影像内的经度和纬度变化较大, 因此无法直接使用提供的参数。其次, 由于本文算法是基于图像构建的, 即默认图像上方为地理的正北方向。

$$\text{Zenith}_p = \arccos(\sin lat_{\text{sun}} \times \sin lat_p + \cos lat_{\text{sun}} \times \cos lat_p \times \cos(lon_p - lon_{\text{sun}})) + lat_p \quad (1)$$

$$\text{Azimuth}_p = \arctan\left(\frac{\cos lat_{\text{sun}} \times \sin(lon_p - lon_{\text{sun}})}{(\cos lat_p \times \sin lat_{\text{sun}} - \sin lat_{\text{sun}} \times \cos lat_p \times \sin(lat_{\text{sun}} - lat_p))}\right) \quad (2)$$

当得到每幅图像的太阳方位、高度信息后, 可以进一步根据其光照情况筛选影像。筛选过程中应尽可能保证区域内有 360° 的光照观测, 从而确保非永久阴影区都有可利用的光度信息。

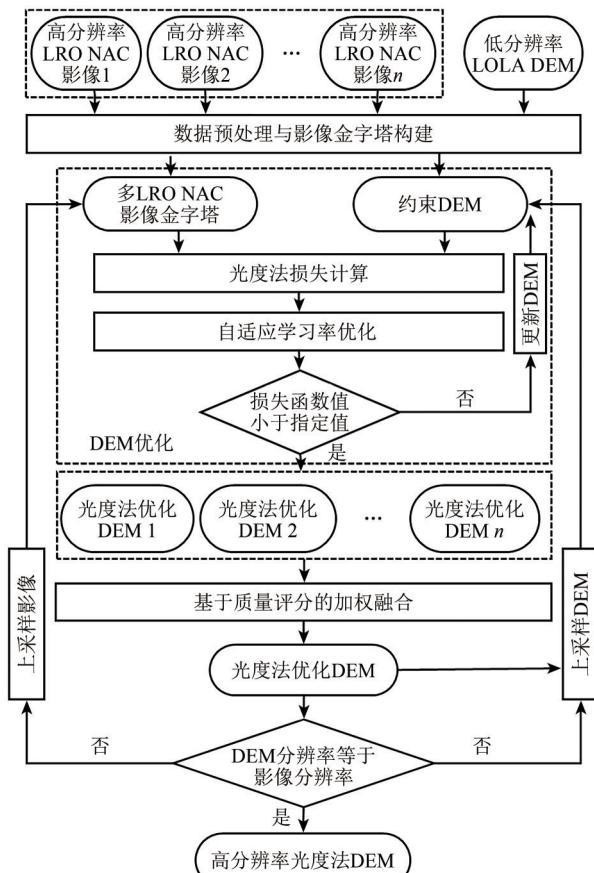


图1 多视影像光度法的算法流程

Fig. 1 The workflow of the multi-image photoclinometry algorithm

而对于永久阴影区, 因其不能提供有效的影像明暗信息用于三维重建, 所以本文根据 NASA 所公开发布永久阴影区的文件 ([https://wms.lroc.asu.edu/lroc/view_rdr/NAC_POLE_PSR_SOUTH\[2024-02-27\]](https://wms.lroc.asu.edu/lroc/view_rdr/NAC_POLE_PSR_SOUTH[2024-02-27])) 对每一张图像生成对应的永久阴影区掩膜, 使其不参与后续光度法优化。

但在月球南极地区经线密集, 地理北方向变化大。因此, 需先根据影像所拍摄时刻从星历文件得到太阳在该时刻的星下点 ($lat_{\text{sun}}, lon_{\text{sun}}$), 那么图像上其他任何点 P (lat_p, lon_p) 的太阳高度角 $Zenith_p$ 和太阳方位角 $Azimuth_p$ 可通过下式计算:

$$\text{Zenith}_p = \arccos(\sin lat_{\text{sun}} \times \sin lat_p + \cos lat_{\text{sun}} \times \cos lat_p \times \cos(lon_p - lon_{\text{sun}})) + lat_p \quad (1)$$

$$\text{Azimuth}_p = \arctan\left(\frac{\cos lat_{\text{sun}} \times \sin(lon_p - lon_{\text{sun}})}{(\cos lat_p \times \sin lat_{\text{sun}} - \sin lat_{\text{sun}} \times \cos lat_p \times \sin(lat_{\text{sun}} - lat_p))}\right) \quad (2)$$

2.3 影像光度法优化方程

假设一个表面反射模型 $R(x, y)$, 理想的影像亮度值 $I(x, y)$ 和地形坡度的关系如下所示:

$$I(x, y) = A \times R(x, y) \quad (3)$$

式中, A 表示表面反照率, x 和 y 表示影像二维行列坐标。本文中假设反照率为常数。假设月球表面服从月球朗博反射 (McEwen, 1991), 则对于每一张输入影像, 反射模型 R 可表示为

$$R(x, y) = \left(w_1 \frac{\mu_0}{\mu + \mu_0} + w_2 \mu_0 \right) \quad (4)$$

式中, μ_0 是入射角的余弦值, 代表光照向量和表面法向量之间的夹角; μ 为出射角的余弦值; w_1 和 w_2 为两个组分的权重参数, 权重值为可更新参数在迭代过程中决定。McEwen (1991) 假设 w_1 和 w_2 为相关关系, 即两者权值的和为 1。在实验中没有发现两种处理方式的明显区别。

利用影像光度法的原理, 即估计通过式 (3) 与式 (4) 生成的图像和实际图像之间的亮度差别来更新 DEM 高程值, 两者的均方根误差可以作为损失函数来迭代优化 DEM。其数学表达式为

$$L_{\text{pho}} = \sum_{i=1}^n m_i (I_i(x, y) - \hat{I}_i)^2 \quad (5)$$

式中, n 表示图像数量, m 表示遮挡阴影掩膜。由于月球南极存在大面积阴影区, 且有些阴影是由图像外部的地形遮挡导致, 计算阴影区内的均方根误差没有意义且会对结果造成干扰。对于每张输入的 NAC 影像, 会自动创建一张对应的遮挡阴影掩膜, 使得在计算均方根误差时忽略这些区域。

因为影像光度法求解是一个病态问题, 如果只利用式 (5) 优化 DEM 高程, 会出现凹凸歧义的问题 (Oliensis, 1991)。因此需要利用已知的高程信息作为限制, 使得高程的更新不会大幅度偏离。通常会使用已有低分辨率的 DEM 作为初始 DEM 和

参考值稳定优化过程。低分辨率DEM限制可表达为以下形式：

$$L_{\text{Con}} = \sum_{i=1}^n m_i (Z_i(x, y) - \hat{Z})^2 \quad (6)$$

式中， Z 代表高程， \hat{Z} 代表低分辨率DEM。

式（6）暗含了各自独立DEM的假设，即每幅影像可由影像光度法生成一幅对应的DEM。与传统方法即多幅影像共同优化同一幅DEM不同，本文提出了相似度损失函数使得每幅影像生成的DEM高程彼此接近。相似度损失表示如下：

$$L_{\text{simi}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n w_i w_j (Z_i(x, y) - Z_j(x, y))^2 \quad (7)$$

式中， w_i 表示每幅影像的权重。权重值根据梯度更新大小确定。在多视影像光度法中，因为每幅影像的光照条件和相机位姿的不同且反射模型不能完美模拟真实情况，使得多幅影像梯度值同时更新一幅DEM高程会出现无法有效收敛的情况。其次，有些区域虽然被几幅图像同时观测，但其中可能存在阴影遮挡进而影响从较好观测中计算得到的DEM。相似度损失可以动态约束不同影像生成DEM之间的差异，保留每张图特有的细节并鼓励每幅影像生成的DEM可以学习其他影像生成的DEM来优化自身的精度。同时，每幅影像会有一个对应的质量评分作为权重控制相似度损失的程度。

综上所述，优化多图影像光度法的总损失函数为

$$L_{\text{total}} = \alpha L_{\text{pho}} + \beta L_{\text{Con}} + \gamma L_{\text{simi}} \quad (8)$$

式中， α 、 β 和 γ 为每个损失函数的权重。根据本文大量的实验分析，建议其权重分别为 1, 1×10^{-5} 和 0.1。

2.4 自适应学习率优化器

优化器是影像光度法优化算法的重要组成部分。通常的优化方法包括梯度下降法 (Wu 等, 2018) 和牛顿法及其近似算法 (Alexandrov 和 Beyer, 2018)。然而，这些算法容易陷入局部最小值，与新近的优化器相比性能存在明显差距 (Choi 等, 2020)。

Adam 优化器 (Kingma 和 Ba, 2017) 已经成为很多深度学习任务的标准配置。其主要特点是综合考虑了一阶和二阶动量，保证了迭代过程的稳定并快速收敛。假设优化函数 f 中的待更新参数为

θ ，则待更新的梯度值为 g 为

$$g_t = \nabla_{\theta} f_t(\theta_{t-1}) \quad (9)$$

式中， t 为当前梯度更新步骤。对于获得的梯度 g ，它的一阶动量 m 为

$$m_t = \beta_1 \cdot m(t-1) + (1 - \beta_1) \cdot g_t \quad (10)$$

式中， β_1 为指数衰减率，控制不同动量批次的权重，默认为 0.9。二阶动量 v 的公式定义为

$$v_t = \beta_2 \cdot v_{t-1} + (1 - \beta_2) \cdot g_t^2 \quad (11)$$

式中， β_2 为指数衰减率，默认为 0.999。式（10）和式（11）不适用于在初始条件下即 $t=0$ 时的情况因为一阶和二阶动量为零或累计数量过少不够稳定。为了稳定初始阶段的梯度更新状况，实际的一阶和二阶动量更新公式为

$$\widehat{m}_t = m_t / (1 - \beta_1^t) \quad (12)$$

$$\widehat{v}_t = v_t / (1 - \beta_2^t) \quad (13)$$

基于式（10）—（13），参数更新的公式为

$$\theta_t = \theta_{t-1} - \alpha \cdot \widehat{m}_t / \left(\sqrt{\widehat{v}_t} + \varepsilon \right) \quad (14)$$

式中， $\varepsilon = 10^{-8}$ ，用来防止出现分母为零的情况。从式（14）可以看到，一阶动量用来控制梯度更新的方向。而二阶梯度更多的考虑了过往梯度更新的大小，即过去梯度震荡的幅度越大则更新的梯度越小，同样有利于稳定梯度更新过程并加速收敛。

2.5 基于质量评分的DEM加权融合

第2.3节基于NAC影像生成的 n 幅DEM需要进行融合作为最终的输出。因为式（5）损失函数的收敛代表损失值为零，即每幅影像生成的DEM和不完全一致，评估其结果的置信度并加权融合是提高最终DEM质量的重要步骤。

在迭代过程中，可以观察到有些影像收敛较为稳定，但是有一些则会在某一范围内震荡。这种现象是因为影像的光照条件不同，且影像的质量也有所差异。为了客观评估影像的差异并确定其权重，我们提出了基于梯度更新大小的权重评分，即：

$$w_i = g_i^2 / \sum_{i=0}^n g_i^2 \quad (15)$$

式中， g 为单幅影像在某一迭代次数范围内的梯度更新值的倒数，默认迭代次数统计范围为 100， n 为影像数量。如果某幅影像对应的DEM高程值频繁的大幅度改变，表现为梯度更新值的平方和

较大, 说明该幅影像相对于其他影像质量较低且不易收敛, 所以应该调低其在最后融合时的权重。在迭代优化结束后, 生成的 DEM 融合公式如下所示:

$$Z(x, y) = \operatorname{argmax} \left(\sum_{i=1}^n w_i m_i Z_i(x, y), \hat{Z} \right) \quad (16)$$

式中, Z 为最终的融合产品。若某一区域为永久阴影区, 即没有图像在这一区域记录有意义的灰度值, 则这一区域的高程值为初始低分辨率 DEM 的高程值。

3 月球南极三维重建实验与分析

3.1 实验数据

如图2所示, 本文所选取的两个实验区域均位于月球南极沙克尔顿撞击坑附近, 该区域为美国阿尔忒弥斯登月计划 (Peña-Asensio 等, 2024) 和欧空局月球着陆器计划 (De Rosa 等, 2012) 的候选着陆区。实验区1 ($137^{\circ}28'54''\text{W}$, $89^{\circ}27'52''\text{S}$) 位于月球南极的连接脊。实验区2 ($149^{\circ}22'46''\text{W}$, $89^{\circ}46'54''\text{S}$) 位于沙克尔顿撞击坑的边缘。实验区均为月球南极拥有最佳光照时长的区域 (Gläser 等, 2018), 有利于着陆器开展后续的探测活动。

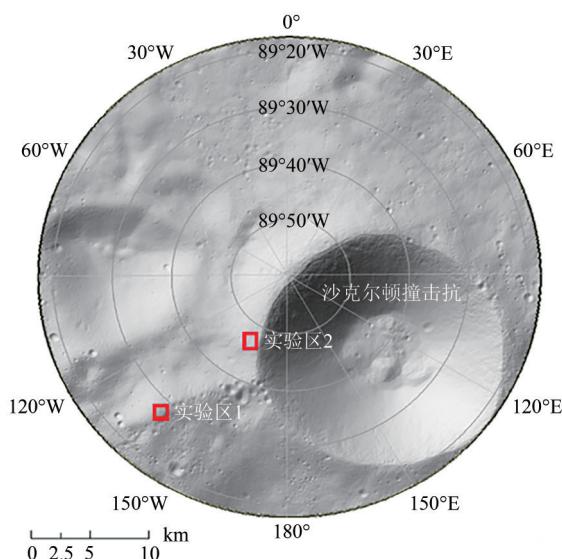


图2 实验区示意图
Fig. 2 illustration of the study areas

实验影像包括统一采样至 $1\text{ m}/\text{像素}$ 的 LRO NAC 影像和 $20\text{ m}/\text{像素}$ 的 LOLA DEM 作为影像光度法的

输入数据。表1列出了影像的详细信息, 其中太阳方位角与天顶角为根据式(1)与式(2)算得的图像坐标系下的角度。实验区1位于山脊顶部, 光照区域占整幅影像的比例较低, 需要不同的光照角度才能完整重建整个实验区。而实验区2地形朝向较为一致, 因此影像的光照条件较好, 故作为与实验区1的对照。另外, 本文利用两幅分别覆盖两个实验区域的分辨率为 2 m 的摄影测量 DEM (Rosiek 等, 2013) 和基于 LOLA 激光点生成的 $5\text{ m}/\text{像素}$ LDEM (Barker 等, 2021) 作为真值与影像光度法生成的 DEM 进行比较。由于存在永久阴影区, 个别撞击坑内部存在空洞, 阴影高程在比对结果中将被忽略。实验区1和2的影像展示在图3中。

表1 实验影像参数

Table 1 Parameters of images used in experimental analysis

| 实验区 | 影像编号 | 太阳方位角/(°) | 太阳天顶角/(°) |
|------|------------|-----------|-----------|
| 实验区1 | M139797542 | 9.1 | 88.3 |
| | M139756842 | 14.7 | 88.7 |
| | M164941830 | 62.7 | 89.8 |
| | M116434159 | 66.6 | 90.0 |
| | M111186999 | 85.7 | 88.5 |
| | M164731516 | 92.19 | 89.8 |
| | M139098568 | 107.6 | 88.2 |
| | M113230984 | 157.7 | 88.5 |
| | M171857276 | 165.3 | 88.3 |
| | M132646185 | 300.0 | 89.9 |
| 实验区2 | M142226765 | 26.2 | 88.7 |
| | M143508781 | 205.8 | 88.6 |
| | M143407023 | 219.5 | 88.6 |
| | M132822574 | 275.1 | 90.0 |
| | M117228165 | 313.9 | 90.0 |
| | M150366876 | 320.3 | 91.0 |

3.2 影像光度法 DEM 精度评估

3.2.1 实验区1

实验区1使用了10张NAC影像通过影像光度法生成 1 m 分辨率 DEM。为了准确比较生成的影像光度法 DEM 精度, 将生成的 1 m 分辨率 DEM 降采样到 2 m 与摄影测量 DEM 进行比较。同时, 也将 LOLA DEM 的分辨率升采样到 2 m 作为参考和其他 DEM 进行比较。

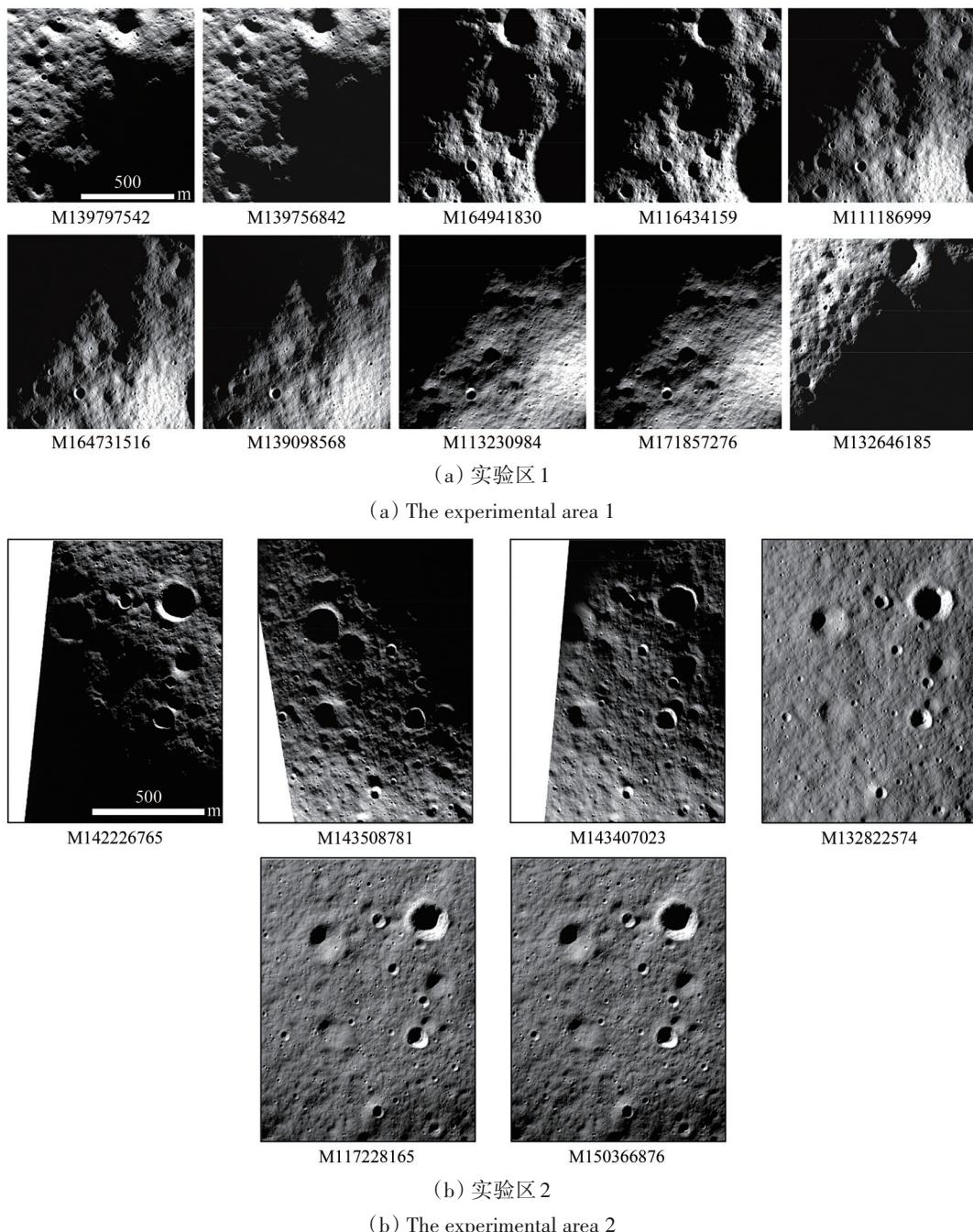


图3 实验区NAC影像

Fig. 3 NAC images used in the experimental areas

图4(a) — (c) 分别展示了实验区1用作初始约束的LOLA DEM、摄影测量DEM和本文所提的影像光度法生成的DEM及其各自的局部放大图。可以看到，3个DEM的整体地形趋势一致，但是在细节方面却有较大差异。LOLA DEM受限于激光采样点的分辨率，整体十分平滑，只能显示出较大尺度的地形变化。相比之下，摄影测量DEM可以有效恢复出一些地形细节，比如右下角大坑中的小坑（图4红框标注区域）。但如区域放大图

所示，受月球南极极端光照的影响，许多阴影覆盖区域因为无法得到有效匹配而产生空洞（图4蓝框标注区域等），影像匹配困难也为DEM引入了许多噪声。而得益于逐像素的优化解算，在本文影像光度法生成的DEM中，不仅保留了LOLA DEM的数据完整性，还恢复出了许多摄影测量DEM无法重建的地形细节。直径小于5 m的小撞击坑，也得到了完整的三维重建，大大提高了DEM的精度。

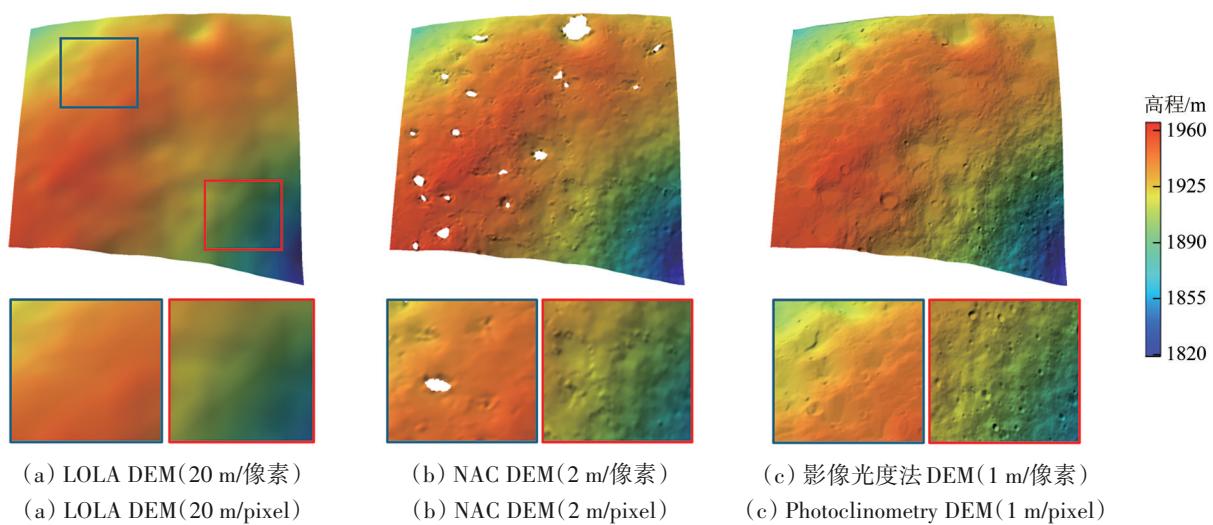


图4 实验区1 DEM对比以及矩形框中(图4 (a))的局部细节

Fig. 4 Comparison of the DEMs for study area 1 and the enlarged views corresponding to the bounding boxes in Fig. 4 (a)

本文以NASA公开发布的由摄影测量方法生成的2 m/像素NAC DEM (Rosiek等, 2013) 和基于LOLA激光点生成的5 m/像素LDEM (Barker等, 2021)为高程基准进行统计分析。值得注意的是, 基于激光点的LDEM受限于轨道精度以及迭代优化算法, 而摄影测量DEM受限于特征点的匹配、平差约束以及密集匹配的质量和精度, 均无法恢复真实的地形, 本文以其作为基准是因其将LOLA DEM的分辨率提升至5 m内, 且解算过程相对严密。因此, 本文将待评估DEM与两个高程基准之间的不一致性描述为差异, 而非误差。表2定量分析了输入的LOLA DEM与影像光度法优化后的DEM与两种高程基准的差异。可以看到, 无论是以摄影测量DEM或是激光LDEM为基准, 本文所提出的影像光度法均可有效降低差异值的均方根和最大值, 并将均方根差异控制在一个像素左右。

表2 实验区1的LOLA DEM、影像光度法DEM和摄影测量DEM、LDEM差异结果比较

Table 2 Comparison of LOLA, photoclinometric DEM with photogrammetric DEM and LDEM in study area 1

| DEM | 与摄影测量DEM | | 与LDEM | |
|----------|----------|------|--------|------|
| | 比较结果/m | | 比较结果/m | |
| | 均方根 | 最大值 | 均方根 | 最大值 |
| LOLA DEM | 1.12 | 9.31 | 1.52 | 6.88 |
| 影像光度法DEM | 1.03 | 8.19 | 1.12 | 6.53 |

为更有效分析差异来源, 图5展示了DEM的差异图, 并选取了3条有代表性的剖面线, 展示在图6中。在图5中可以明显看到LOLA DEM和NAC

DEM在右下角的大坑区域有较大的差异, 而这也在图6的第二条和第三条后一部分的剖面上得到了更直观的反映, 该范围内LOLA DEM与其余3个DEM的差异在2 m左右, 局部区域可以达到4 m。值得注意的是, 本文影像光度法输入的低分辨率DEM为LOLA DEM, 也证明了本文算法对输入DEM有较强的鲁棒性, 且具有恢复较大范围真实地形的能力。此外, 通过与摄影测量DEM的差异图可以看出, 影像光度法优化后的最大差异主要存在于空洞的边缘, 其产生原因可能为摄影测量DEM所带的噪声, 所以即使通过算法优化最大差异依旧有8.19 m。而与完整覆盖的激光测高方法生成的DEM相比, 最大差异值可以控制在6.53 m。

为更全面分析算法的准确性, 本文依据影像光度法DEM生成了模拟仿真图, 并与LRO NAC影像进行定性对比。仿真图生成的第一步为计算阴影遮挡情况, 第二步为非阴影区域光照渲染。由于月球南极区域太阳高度角接近90°, 局部高程的微小(<1 m)差异都会反映在渲染图中, 因此也成为衡量南极区域DEM准确度的方法(De Rosa等, 2012)。在计算遮挡情况时, 本文在以每个像素为中心的150 km范围内遍历计算遮挡角, 并与太阳高度角进行比较, 从而生成遮挡图。实验区内的高程以生成的影像光度法DEM为数据源, 实验区外用LOLA DEM作为高程基准。光照渲染使用式(4)计算。如图7所示, 本文选择了3幅有代表性且可完整覆盖实验区1的LRO NAC影像, 并依据其光照信息生成了对应的仿真图。可以看出, 通过模

拟仿真算法计算得到的图像与 LRO NAC 影像在遮挡情况下基本一致。在细节方面，在原始 NAC 影像中可见的小坑或者褶皱也可在模拟影像中找到。

在图 7 中可以观察到一些亮度较为不一致的小撞击坑，这些撞击坑由于被大面积的阴影覆盖，没有有效的光度信息，故无法恢复真实的高程值。

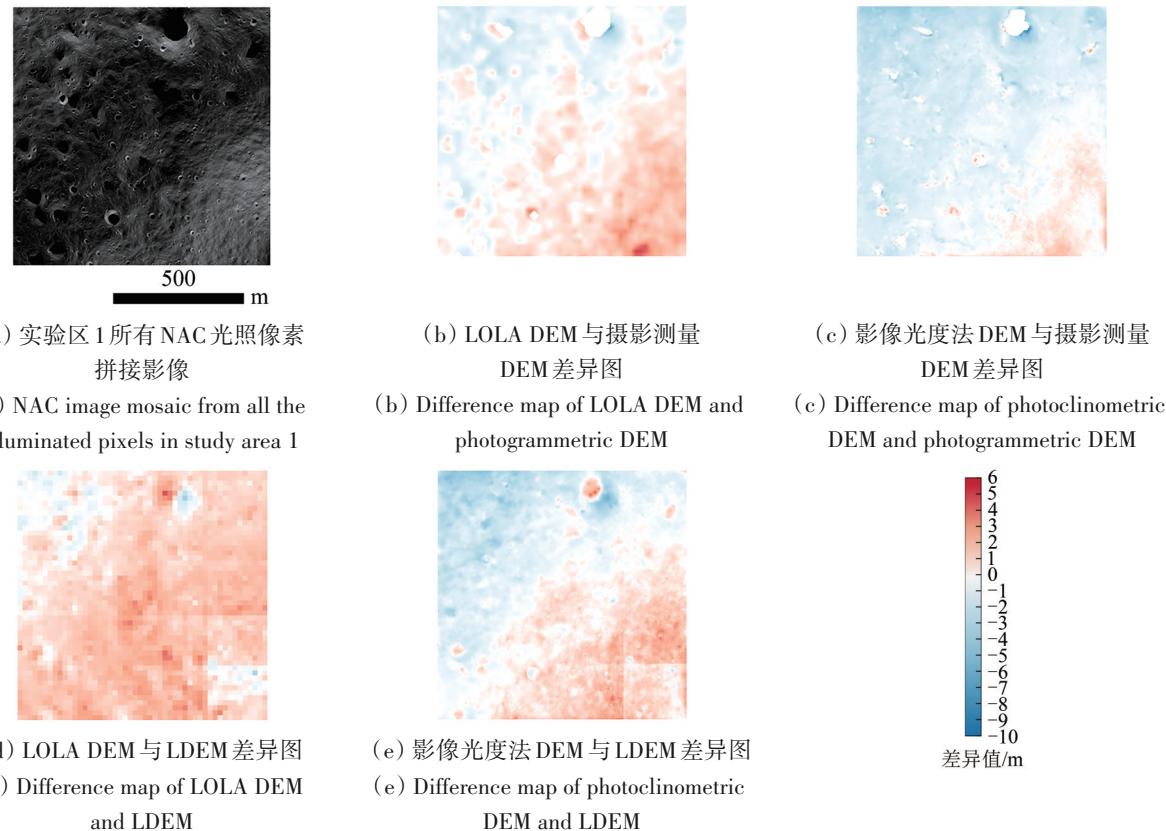


图 5 实验区1 LOLA DEM、影像光度法 DEM 分别和摄影测量 DEM、LDEM 比较结果

Fig. 5 Difference maps between the LOLA DEM, the photoclinometric DEM, and the photogrammetric DEM in study area 1

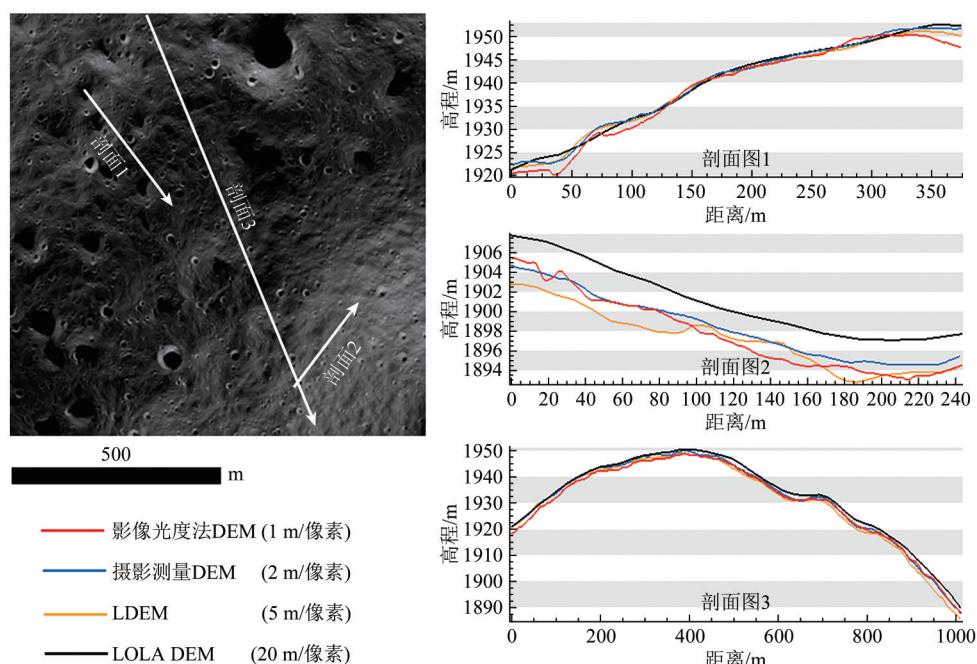


图 6 实验区1 DEM剖面图比较
Fig. 6 Profile comparison for study area 1

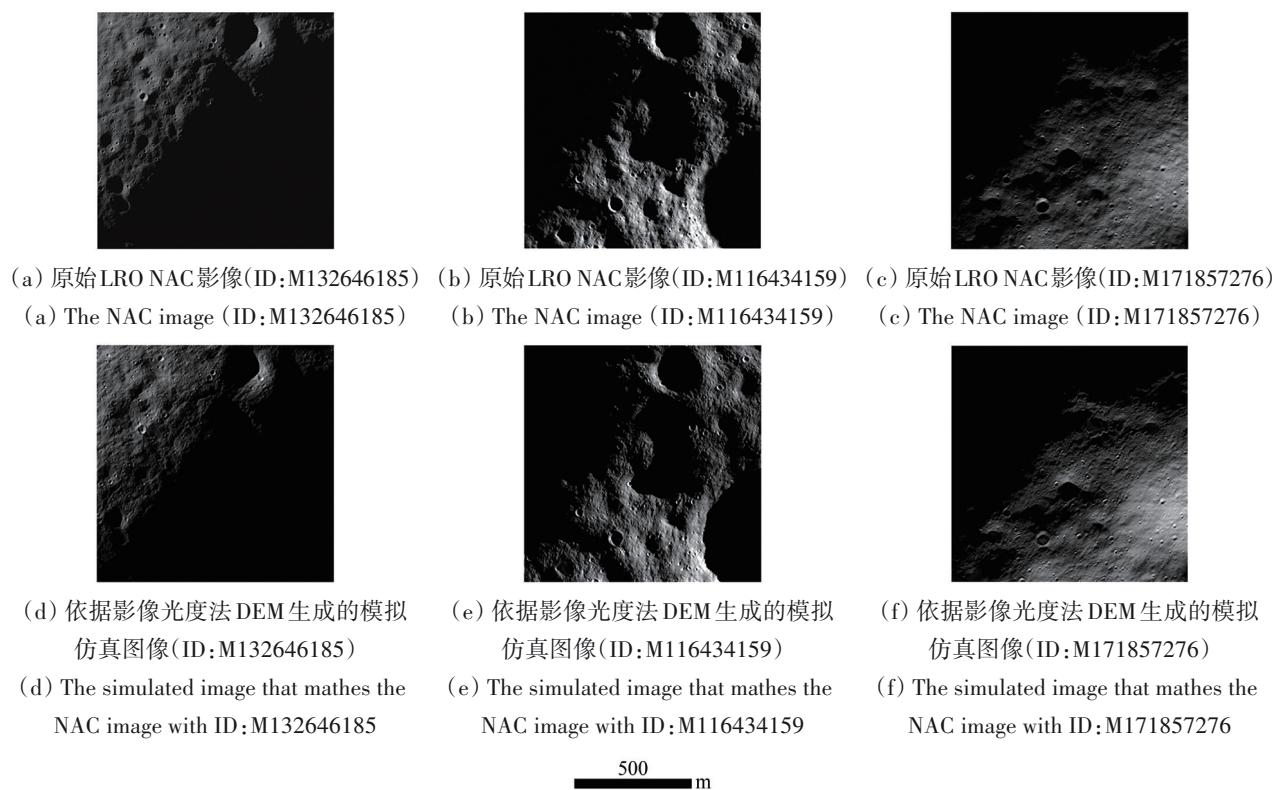


图7 实验区1模拟仿真实验结果图

Fig. 7 Simulation results of test area 1

3.2.2 实验区2

图8展示了实验区2的LOLA DEM和摄影测量DEM以及本文影像光度法DEM以及其代表性区域的放大图。与实验区1的结果相似，本文影像光度法DEM不仅完整恢复出了大坑的形状，也成功重建出小坑以及其他微小的地形变化（如红色和蓝色框标注区域）。表3中统计了实验区2中LOLA DEM、影像光度法DEM与两个高程基准（LDEM和摄影测

量DEM）的差异，并将差异图展示在图9中。可以看到，在整体地形相对平缓的区域，本文影像光度法优化可以将高程差异有效降低30%至一个像素以内，这也进一步证明了算法具有恢复高精度三维地形的能力。虽然最大差异并没有显著下降，但是由图9的差异图可以看到，最大差异均发生在摄影测量DEM空洞区域的边缘（例如图9（a）白色箭头标注区域），可能是由摄影测量DEM的噪声引起。

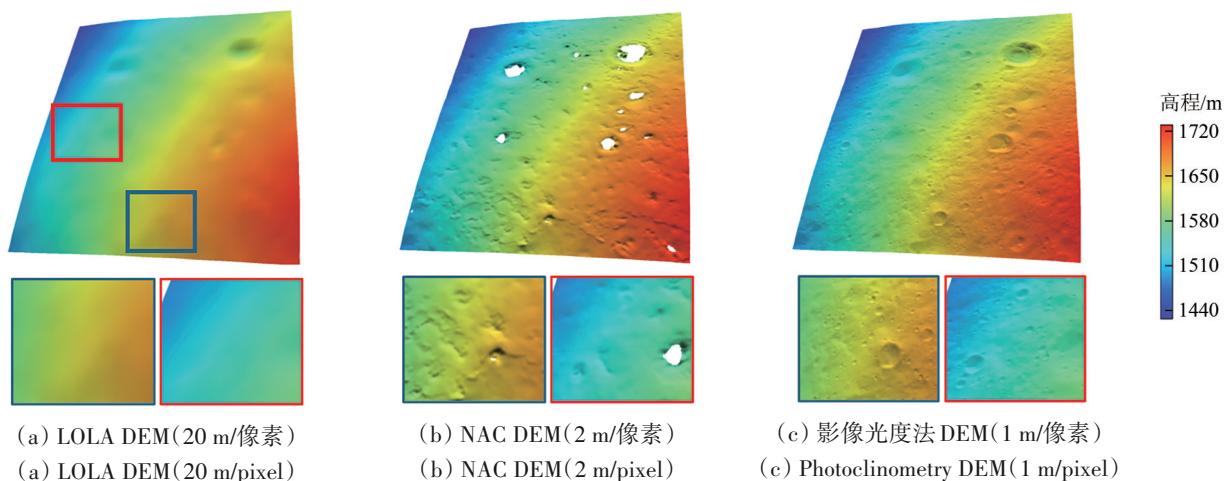


图8 实验区2 DEM对比以及矩形框中(LOLA DEM上)的局部细节

Fig. 8 Comparison of the DEMs for study area 2 and the zoomed views corresponding to the bounding box drawn on the LOLA DEM

表3 实验区2的LOLA DEM、影像光度法DEM和摄影测量DEM、LDEM差异结果比较

Table 3 Comparison of LOLA, photoclinometric DEM with photogrammetric DEM and LDEM in study area 2

| DEM | 与摄影测量 DEM 比较结果/m | | 与 LDEM 比较结果/m | |
|-----------|------------------|------|---------------|------|
| | 均方根 | 最大值 | 均方根 | 最大值 |
| LOLA DEM | 1.04 | 8.55 | 0.78 | 6.90 |
| 影像光度法 DEM | 0.70 | 8.53 | 0.73 | 7.17 |

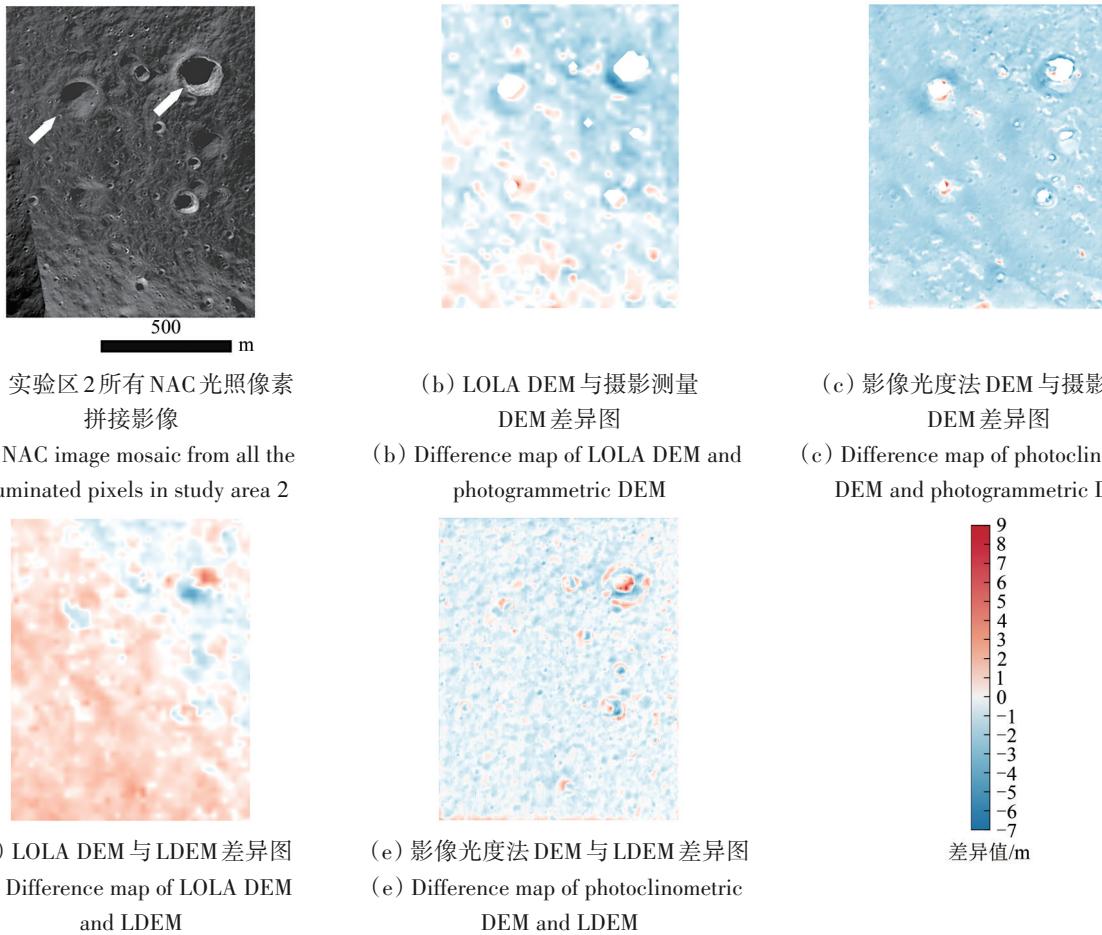


图9 实验区2 LOLA DEM、影像光度法DEM和摄影测量DEM、LDEM比较结果(白色箭头指向差异较大的空洞撞击坑边缘区域)

Fig. 9 Difference maps between the LOLA DEM, the photogrammetric DEM, and the photogrammetric DEM in study area 2 (The white arrow highlights the distinct edge areas of impact crater that lack elevation data)

如图10所示，本文还在整体和局部的尺度分别选取了3条高程剖面进行比较，以更直观地展示影像光度法DEM的高程精度。可以看到，即使在3个剖面图中黑色的LOLA DEM剖面线均与两个基准DEM有一定的偏离，但是优化过的影像光度法DEM可以在整体趋势以及一些大坑处与摄影测量DEM贴合。而在小坑区域，如剖面2所示，第一个两米深的小坑在影像光度法DEM中得到了完整的重建，但完全被摄影测量DEM忽略。这也说明摄影测量DEM在小范围内无法代表真实的地形，其差异来自于影像光度法DEM中的小撞击坑。

依据生成的影像光度法DEM，本文选择了3幅

能完整覆盖实验区2的NAC影像，并制作了对应光照的模拟仿真图，如图11所示。图11(d)右上角与图11(e)左上角的大范围阴影区域是由远处较高地形遮挡产生，说明影像光度法DEM在整体地形上恢复准确，这与图10所示的剖面图结果一致。但是通过图11(a)与图11(d)的对比可以发现在两幅图右上角大范围阴影区域有细微差异。而在局部细节方面，模拟影像与NAC影像整体上较为相似，也验证了影像光度法恢复像素级细节的能力。图11(c)则展示了整个区域无大范围阴影遮挡的情况，即其阴影完全由所在坑的边缘或附近较陡褶皱产生，从而可以更明显地观察

到整个实验区里被NAC影像观察到细节, 也可以通过影像光度法得到有效的恢复, 而坑内相似的

阴影大小和形状也说明所恢复的DEM与真实情况接近。

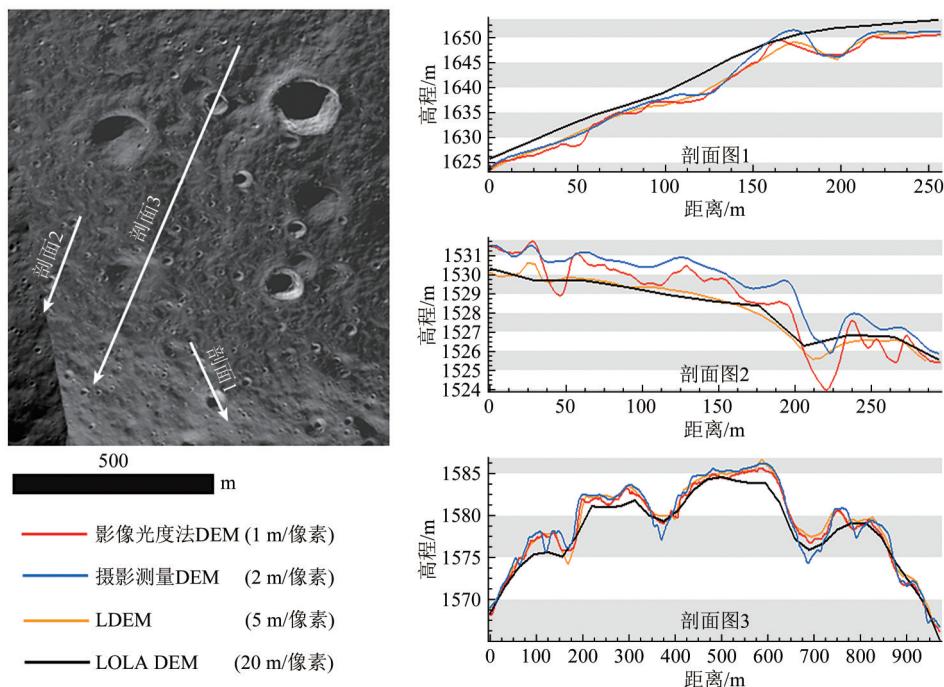


图10 实验区2 DEM剖面图比较
Fig. 10 Profile comparison for study area 2

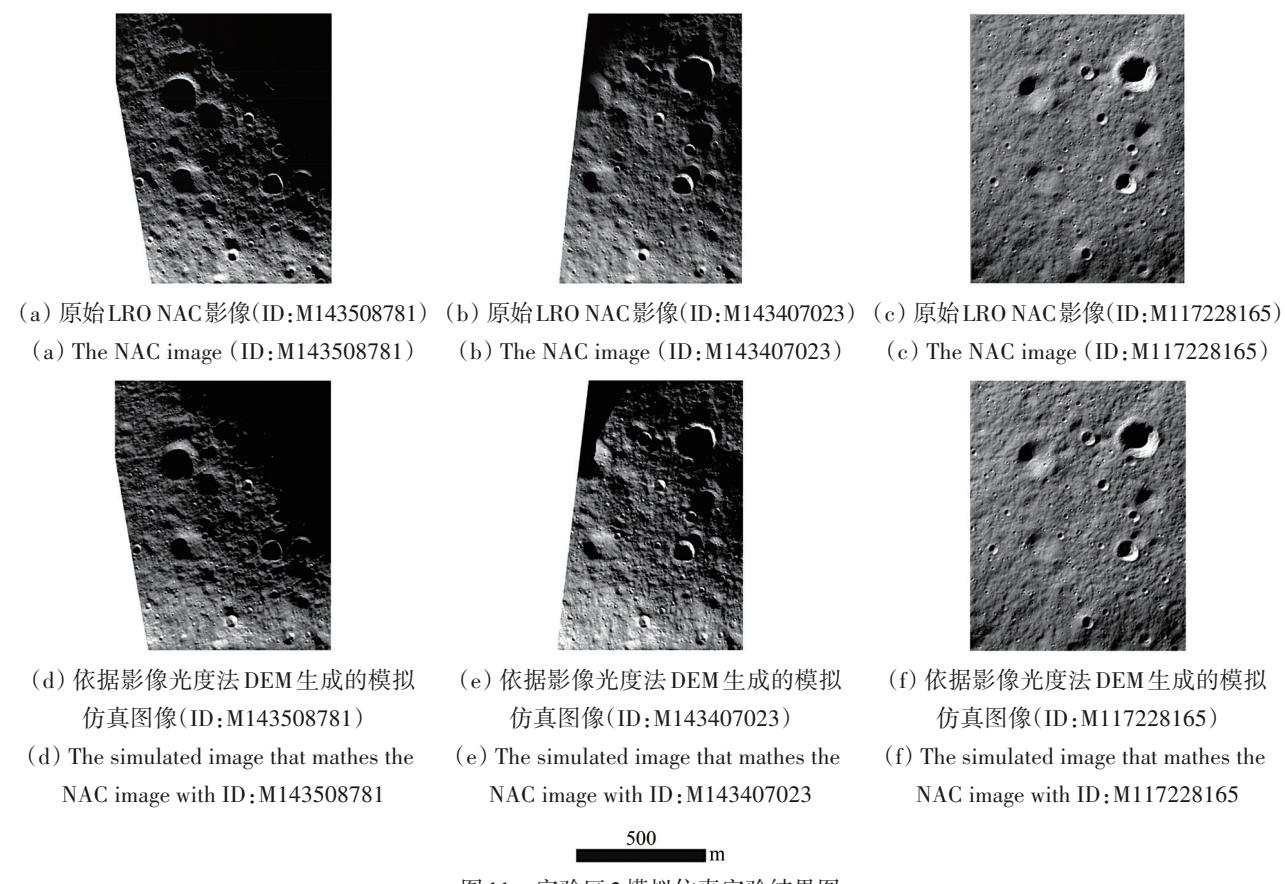


图11 实验区2模拟仿真实验结果图
Fig. 11 Simulation results of test area 2

4 结 论

针对月球南极极端光照条件，影像容易被阴影遮挡和干扰的问题，本文提出了基于多视单目影像光度法以重建像素级三维地形的方法。该方法使用 20 m/像素分辨率的 LOLA DEM 和多幅分辨率为 1 m/像素的 NAC 影像作为输入，构建多分辨率影像金字塔迭代优化地形。在损失函数借鉴传统影像光度法方法构建了图像反射率约束、初始 DEM 约束，并充分考虑了月球南极多幅图像有较大差异的问题，并提出 DEM 相似性约束。此外，本文还引入了自适应学习率的 Adam 优化器和利用更新梯度决定权重的融合算法，保证最后融合得到的 DEM 的质量和精度。

利用月球南极沙克尔顿撞击坑附近的两个局部区域进行实验分析。由实验结果可见，影像光度法 DEM 成功恢复了 NAC 影像上的细节，米级尺度小撞击坑都被成功重建。与摄影测量 DEM 的均方根差异分别为 1.03 m 和 0.70 m（对应 NAC 影像的一个像素大小左右），对应的 LOLA DEM 与摄影测量 DEM 差异为 1.12 m 和 1.04 m。与 LDEM 的均方根差异分别为 1.12 m 和 0.73 m，对应的 LOLA DEM 与 LDEM 的差异为 1.52 m 和 0.78 m。两组对比实验证明了本文提出方法的有效性。影像光度法 DEM 与摄影测量 DEM 和 LDEM 的差异主要存在于和 LOLA DEM 初始高程的不同。这一系统性差异依旧在优化后的影像光度法 DEM 上有所体现（图 5 (b)、图 5 (d) 和图 9 (d)）。细节上的差异则主要来源于两个基准 DEM 与影像光度法 DEM 的分辨率和几何配准的差异。高程剖面图细节显示小撞击坑的深度在影像光度法 DEM 上得以成功重建。基于影像光度法 DEM 的光照模拟仿真结果显示其渲染图与真实的卫星影像基本一致，小撞击坑都清晰可见，但是在永久阴影区的边缘会观察到一些微小的差异。由于永久阴影区内没有有效的影像信息，阴影区内高程会使用低分辨率 DEM 高程进行填补，造成了地形过渡的不连贯并反映在渲染图中。应谨慎对待在永久阴影区边缘的地形变化，以防止出现对于高程信息的错误解译（如同心坑等）。由于算法架构的灵活性，本文提出的方法对于使用的影像数量并无硬性要求。但是需要保证图片可以提供尽可能多的光度信息用来重建尽可能完整的 DEM。另外，在引入多张影像时，需要保证影

像间高质量的地理配准，以防止不同影像光度信息的相互影响，从而降低所获得 DEM 的有效分辨率。本文提出的多图影像光度法 DEM 显示了优秀的可靠性和鲁棒性，可以为未来的月球南极探测任务提供高分辨率、高精度的三维地形数据支撑。

参考文献(References)

- Alexandrov O and Beyer R A. 2018. Multiview shape-from-shading for planetary images. *Earth and Space Science*, 5(10): 652-666 [DOI: 10.1029/2018EA000390]
- Barker M K, Mazarico E, Neumann G A, Smith D E, Zuber M T and Head J W. 2021. Improved LOLA elevation maps for South Pole landing sites: error estimates and their impact on illumination conditions. *Planetary and Space Science*, 203: 105119 [DOI: 10.1016/j.pss.2020.105119]
- Choi D, Shallue C J, Nado Z, Lee J, Maddison C J and Dahl G E. 2020. On empirical comparisons of optimizers for deep learning. *arXiv:1910.05446* [DOI: 10.48550/arXiv.1910.05446]
- De Rosa D, Bussey B, Cahill J T, Lutz T, Crawford I A, Hackwill T, van Gasselt S, Neukum G, Witte L, McGovern A, Grindrod P M and Carpenter J M. 2012. Characterisation of potential landing sites for the European Space Agency's Lunar Lander project. *Planetary and Space Science*, 74(1): 224-246 [DOI: 10.1016/j.pss.2012.08.002]
- Di K C, Liu B, Liu Z Q and ZOU Y L. 2016. Review and prospect of lunar mapping using remote sensing data. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1230-1242 (邸凯昌, 刘斌, 刘召芹, 邹永廖. 2016. 月球遥感制图回顾与展望. 遥感学报, 20(5): 1230-1242) [DOI: 10.11834/jrs.20166158]
- Durou J D, Falcone M and Sagona M. 2008. Numerical methods for shape-from-shading: a new survey with benchmarks. *Computer Vision and Image Understanding*, 109(1): 22-43 [DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.003]
- Gläser P, Oberst J, Neumann G A, Mazarico E, Speyerer E J and Robinson M S. 2018. Illumination conditions at the lunar poles: implications for future exploration. *Planetary and Space Science*, 162: 170-178 [DOI: 10.1016/j.pss.2017.07.006]
- Grumpe A, Belkhir F and Wöhler C. 2014. Construction of lunar DEMs based on reflectance modelling. *Advances in Space Research*, 53(12): 1735-1767 [DOI: 10.1016/j.asr.2013.09.036]
- Guo D J, Fa W Z, Wu B, Li Y and Liu Y. 2021. Millimeter- to decimeter-scale surface roughness of the Moon at the Chang'e-4 exploration region. *Geophysical Research Letters*, 48(19): e2021GL094931 [DOI: 10.1029/2021GL094931]
- Horn B K P. 1977. Understanding image intensities. *Artificial Intelligence*, 8(2): 201-231 [DOI: 10.1016/0004-3702(77)90020-0]
- Horn B K P and Brooks M J. 1986. The variational approach to shape from shading. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 33(2): 174-208 [DOI: 10.1016/0734-189X(86)90114-3]
- Kingma D P and Ba J. 2017. Adam: a method for stochastic optimization.

- tion. arXiv:1412.6980 [DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980]
- Kirk R L. 1987. I. Thermal Evolution of Ganymede and Implications for Surface Features. II. Magnetohydrodynamic Constraints on Deep Zonal Flow in the Giant Planets. III. A Fast Finite-Element Algorithm for Two-Dimensional Photoclinometry. California Institute of Technology
- Li S, Lucey P G, Milliken R E, Hayne P O, Fisher E, Williams J P, Hurley D M and Elphic R C. 2018. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(36): 8907-8912 [DOI: 10.1073/pnas.1802345115]
- Liu W C and Wu B. 2020. An integrated photogrammetric and photoclinometric approach for illumination-invariant pixel-resolution 3D mapping of the lunar surface. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159: 153-168 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.017]
- Liu W C and Wu B. 2021. Influence of solar incidence angle on single-image photoclinometry for precision lunar topographic mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 182: 208-227 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.10.011]
- McEwen A S. 1991. Photometric functions for photoclinometry and other applications. *Icarus*, 92(2): 298-311 [DOI: 10.1016/0019-1035(91)90053-V]
- Oliensis J. 1991. Shape from shading as a partially well-constrained problem. *CVGIP: Image Understanding*, 54(2): 163-183 [DOI: 10.1016/1049-9660(91)90061-S]
- Peña-Asensio E, Sutherland J, Tripathi P, Mason K, Goodwin A, Bickel V T and Kring D A. 2024. Automated astronaut traverses with minimum metabolic workload: accessing permanently shadowed regions near the lunar South Pole. *Acta Astronautica*, 214: 324-342 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.10.010]
- Rosiek M R, Thomas O, Howington-Kraus E and Foster E. 2013. Lunar South Pole digital elevation models from lunar reconnaissance orbiter narrow angle camera/44th Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: [s.n.]
- Smith D E, Zuber M T, Jackson G B, Cavanaugh J F, Neumann G A, Riris H, Sun X L, Zellar R S, Coltharp C, Connelly J, Katz R B, Kleyner I, Liiva P, Matuszeski A, Mazarico E M, McGarry J F, Novo-Gradac A M, Ott M N, Peters C, Ramos-Izquierdo L A, Ramsey L, Rowlands D D, Schmidt S, Scott V S, Shaw G B, Smith J C, Swinski J P, Torrence M H, Unger G, Yu A W and Zagwodzki T W. 2010. The lunar orbiter laser altimeter investigation on the lunar reconnaissance orbiter mission. *Space Science Reviews*, 150(1): 209-241 [DOI: 10.1007/s11214-009-9512-y]
- van Diggelen J. 1951. A photometric investigation of the slopes and the heights of the ranges of hills in the Maria of the Moon. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 11: 283-289
- Wu B, Li F, Hu H, Zhao Y, Wang Y R, Xiao P P, Li Y, Liu W C, Chen L, Ge X M, Yang M, Xu Y Q, Ye Q, Wu X Y and Zhang H. 2020. Topographic and geomorphological mapping and analysis of the Chang'E-4 landing site on the far side of the Moon. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 86(4): 247-258 [DOI: 10.14358/PERS.86.4.247]
- Wu B, Li F, Ye L, Qiao S, Huang J, Wu X Y and Zhang H. 2014. Topographic modeling and analysis of the landing site of Chang'E-3 on the Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 405: 257-273 [DOI: 10.1016/j.epsl.2014.09.009]
- Wu B, Liu W C, Grumpe A and Wöhler C. 2018. Construction of pixel-level resolution DEMs from monocular images by shape and albedo from shading constrained with low-resolution DEM. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 140: 3-19 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.03.007]
- Zhang Y Z, Qiao L, Chen J, Zhang J, Li B and Ling Z C. 2025. Geological characteristics and evolution history of the Amundsen crater at the south polar region of the moon. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(2): 506-523 (张玉征, 乔乐, 陈剑, 张江, 李勃, 凌宗成. 2025. 月球南极阿蒙森(Amundsen)地区地质特征及演化历史研究. 遥感学报, 29(2): 506-523) [DOI: 10.11834/jrs.20244014]

Multi-view photoclinometry from monocular images for pixel-wise 3D mapping of the lunar South Pole region

CHEN Zeyu, LI Zhaojin, WU Bo, JIA Ranye, PENG Yue

Planetary Remote Sensing Laboratory, Department of Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China

Abstract: Three-dimensional mapping of the lunar surface is of immense importance for lunar exploration missions and scientific research. Research in the past decades has mainly focused on laser altimetry and photogrammetry methods to generate precise DEM based on rigorous mathematical calculation. Due to the limitation of the hardware and algorithms, these methods cannot meet the requirements for exploration of the lunar south pole, which demands meter-level resolution to guarantee safe descending and traversing. Thus, photoclinometry has received much attention because it can make full use of the images to reconstruct pixel-wise-resolution DEMs from monocular images. However, the lunar south pole suffers from solar elevation angles of nearly 0 degree, and the shadow effect is severe such that effectively

recovering all the terrain details using only a single image is not possible. Moreover, the loss functions established directly from multiple images in the photoclinometry algorithm may be inconsistent due to the major differences among the images caused by the varying illuminations. This limitation may cause difficulties in converging the loss and may prevent recovering the terrain. The paper presents a multiple image photoclinometry method for pixel-wise 3D reconstruction at the lunar south pole. The inputs of the method are multiple high-resolution images and corresponding low-resolution DEM, and a multi-resolution pyramid is used to optimize the DEM step by step. In terms of the loss function, this paper proposes a similarity constraint by fully considering the shadow differences between the lunar south pole images. Rather than optimizing a single DEM, the approach initializes multiple DEMs using the low-resolution DEM associated with each image. While the conventional photoclinometry constraints are established on each DEM, an encourage mechanism is then introduced to ensure the pixels cover the same region exhibit consistent elevation. With respect to the loss optimization, an adaptive learning rate optimizer is introduced to guarantee the convergence of the loss function. The gradient update information in the optimization stage could also provide a reference for the photometric quality of the image, which becomes an important index for the following DEM fusion. Two regions are selected around the Shackleton Crater at the lunar south pole for experimental analysis. Regarding the LDEM and photogrammetric DEM as the reference, the geometric accuracy of the DEMs generated from the proposed approach is about one pixel, and the terrain details (e.g., small craters and ridges) presented on the images are fully reconstructed. Rendering simulation is also conducted based on the reconstructed photoclinometry DEM for in-depth evaluation. By analyzing the DEM under various illumination conditions, the simulated images closely resemble the original NAC images, and thereby demonstrate the accuracy and precision of the photoclinometry-derived DEM. The method presented in this paper can effectively reconstruct high-resolution, high-precision DEMs from monocular images at the lunar south pole, and provide important 3D data support for future exploration missions to the lunar south pole and related scientific research.

Key words: Lunar South Pole, DEM, pixel-wise 3D reconstruction, photoclinometry, photogrammetry

Supported by Research Grants Council of Hong Kong (No. R5043-19, PolyU 15210520, PolyU 15219821, PolyU 15215822)