

基于可信度引导立体匹配的月球南极摄影测量地形重建方法

尤琼华^{1,2}, 叶真^{1,2}, 童小华^{1,2}, 徐聿升^{1,2}, 刘世杰^{1,2}, 谢欢^{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: 针对月球南极光照暗弱、阴影区域众多、月面形貌要素单一弱纹理, 给影像立体匹配和三维地形重建带来极大挑战和困难的问题, 提出了一种可信度引导的高效立体匹配算法 (Efficient Confidence-guided Stereo Matching, ECSM), 通过评估非支撑点的可信度来更新支撑点点集, 构建三角网并利用三角形顶点的可信度重新估算其内部视差, 提高匹配精度和效率。在此基础上, 构建了月面摄影测量三维地形重建方法, 并采用月球勘测轨道器 (Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO) 窄角相机高分辨率影像数据, 开展月球南极沙克尔顿 (Shackleton) 坑缘区域地形重建的验证实验。比较分析不同立体匹配算法生成的视差图和数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM), 结果表明: 所提出的算法在处理月面弱纹理和重复纹理区域影像方面具有可靠性。将生成的DEM与德国宇航中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) 制作的同区域DEM以及美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的月球轨道激光高度计DEM (LDEM) 进行对比分析, 高程和坡度信息方面都表现出较高的一致性, 验证了该方法的可行性和有效性, 为月球南极探测着陆区选择提供可靠的数据方法基础。

关键词: 月球南极; 地形重建; 立体匹配; 可信度引导

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)06-0586-12

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230120

引用格式: 尤琼华, 叶真, 童小华, 等. 基于可信度引导立体匹配的月球南极摄影测量地形重建方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(6): 586-597.

Reference format: YOU Q H, YE Z, TONG X H, et al. Terrain reconstruction for lunar south pole region based on confidence-guided stereo matching[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(6): 586-597.

引言

月球一直被视为人类离开地球、迈向深空领域的重要门户^[1]。开展月球探测, 对月球资源利用、月球基地建设及深入探索宇宙具有重要的意义。月球南极具备长时间持续的光照, 但其永久阴影区内温度极低, 可能含有丰富的水冰资源^[2]和罕见的二氧化碳冷阱^[3], 被视为“嫦娥七号”“嫦娥八号”探测任务以及科研站建设的目标区域^[4], 也是国际上最受关注的月球探测区域之一。沙克尔顿 (Shackleton) 陨石坑位于月球南极, 几乎重合于南极点, 完好地保留了陨石坑壁和边缘峰。由于太阳高度角较低和地形遮挡, 坑底存在永久阴影区。其坑缘区域长期处于光照之中, 是未来“阿尔忒弥斯3号” (Artemis 3) 等探月任务的重要着陆候选区域和科学探测区域之一^[5-6]。

随着月面三维重建技术的发展, 月球三维地形产品日益增多。在月球探测工程中, 三维地形产品发挥

着关键作用, 为月球着陆区选址等任务提供数据支持和依据^[7]。月球遥感影像全球制图产品为月球着陆区选择提供参考。Scholten等^[8]利用月球勘测轨道器相机系统 (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera, LROC) 广角相机立体影像数据生成了覆盖近乎全月的数字地形模型 (GLD100)。Barker等^[9]对月球轨道激光高度计 (Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA) 和“月女神” (SELenological and ENgineering Explorer, SELENE) 探测器地形相机的立体数据进行配准, 构建了高精度的近全月范围数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)。Li等^[10]采用“嫦娥二号”立体影像生成了全月DEM和数字正射影像图 (Digital Orthophoto Map, DOM)。月球遥感影像局部高分辨率制图用于研究特定区域地质和资源, 支持未来资源开发。德国宇航中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) 基于LROC立体影像数据构建月球局部DEM^[11]。

收稿日期: 2023-08-31 修回日期: 2023-11-03

基金项目: 国家自然科学基金 (42101447, 42221002); 上海市青年科技英才扬帆计划 (21YF1448800)

Di 等^[12]利用LROC窄角相机 (Narrow Angle Camera, NAC) 影像数据对“嫦娥五号”着陆区域进行1.5 m分辨率DOM制图。

在生成月面三维地形过程中, 立体密集匹配技术在影响DEM质量方面起着关键作用。立体匹配算法根据是否进行全局约束分为全局和局部匹配方法。有学者采用局部匹配方法对影像匹配^[13-14]。全局算法考虑相邻像素的视差约束, 匹配效果通常优于局部算法^[15], 但计算效率低、实现过程较复杂。为兼顾两者的优势, 通过动态规划实现一维约束近似于全局二维平滑约束的效果, Ye等^[16]采用基于分层互信息的半全局算法 (Semi-Global Matching, SGM) 对影像进行密集匹配, 而Guo等^[17]在该方法上进行了改进。为进一步提升高分辨率影像的匹配效率并保持匹配精度, Geiger等^[18]提出一种基于最大后验概率估计方法的高效大尺度立体匹配算法 (Efficient Large-scale Stereo Matching, ELAS)。

由于月表物质类型单调且缺乏大气层, 月面影像受光照条件变化影响明显, 存在反照率低、对比度弱和纹理信息匮乏等问题^[19]。当前月面影像立体匹配算法在弱纹理和纹理重复区域误匹配问题突出。受限于

月球轨道器测轨和测姿的精度, 以及有限的控制点数量, 与地观测制图相比, 月球遥感测图仍面临巨大的挑战和困难^[20-21]。鉴于上述问题, 本文提出了一种可信度引导的高效立体匹配算法 (Efficient Confidence-guided Stereo Matching, ECSM), 在ELAS算法的基础上引入可信度测度, 并通过动态调整支撑点点集和三角网结构, 使得低可信度像素点视差逐渐接近高可信度视差值。与ELAS相比, ECSM算法增强了对弱纹理和纹理重复区域匹配的准确性和鲁棒性。为验证该算法的可靠性, 本文选择月球南极沙克尔顿坑缘典型区域开展地形三维重建实验, 并将LOLA作为控制数据进行联合平差以提高月球地形产品的精度。实验结果表明, ECSM算法能够生成高精度的月球南极三维地形模型, 可为月球南极着陆区选址提供基础。

1 月面摄影测量三维重建方法

1.1 摄影测量三维重建方法

本文发展了月球高分辨率轨道器影像的摄影测量三维形貌重建方法, 主要分为以下步骤: 影像预处理、光束法平差、立体密集匹配、三角测量生成点云以及内插生成DEM, 流程图如图1所示。

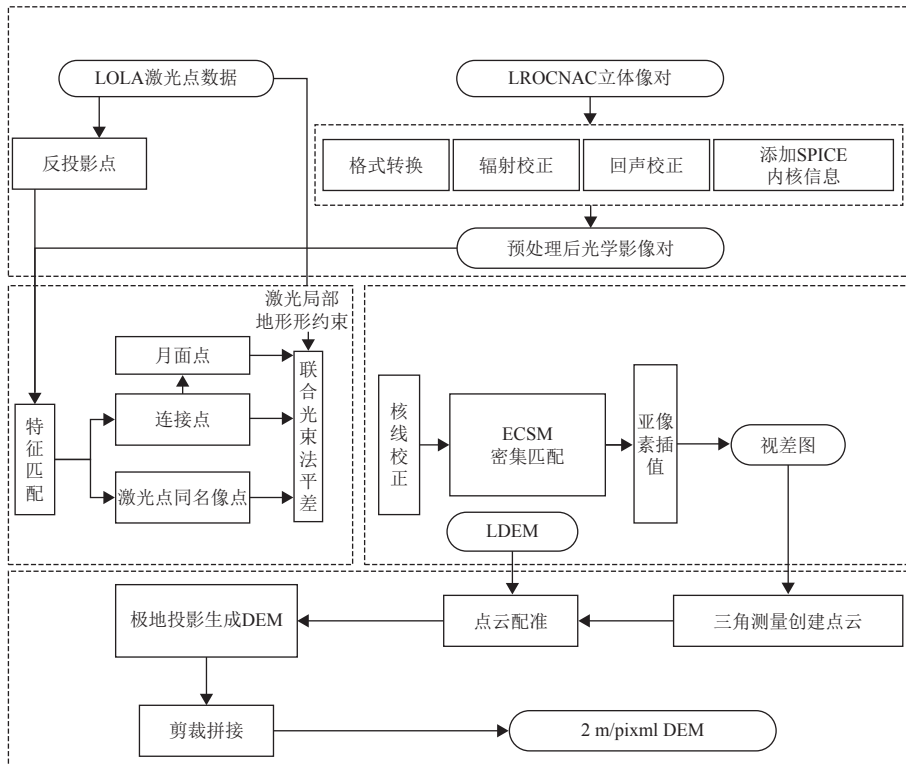


图 1 摄影测量三维重建流程

Fig. 1 Photogrammetric 3D reconstruction process

具体流程包括: ①影像预处理, 通过USGS ISIS软件^[22]对LROC NAC影像进行几何校正、辐射校正、去

噪和添加星历信息等预处理操作; ②联合光束法平差, 首先读取SPICE内核数据, 以获取相机初始外参

和扫描时间间隔, 构建严格成像模型, 其次将LOLA激光点反投影到影像上, 用SIFT算法提取反投影像点同名像点和影像对之间的连接点, 然后在联合平差过程中, 引入激光局部地形约束方程^[23], 最后基于最小二乘原理进行联合光束法平差求解, 获得精化的姿态轨道参数; ③立体密集匹配, 首先对影像分块, 其次利用仿射核线变换方法^[24]获取核线影像, 其中仿射基本矩阵利用黄金标准算法^[25]获得, 最后采用ECSM算法生成初始视差图并运用贝叶斯期望最大化加权仿射自适应窗口匹配方法进行亚像素插值^[26], 以提高视差图的精度; ④DEM生成, 通过三角化方法生成三维点云。然后采用滤波去除噪点、孤立点和不准确的区域。最后通过高程内插构建栅格化的DEM, 并与LDEM进行配准。

1.2 ECSM立体匹配算法

ELAS是一种概率生成模型的立体影像密集匹配算法。该算法将视差连续且左右一致的特征点作为支撑点, 并以其为顶点构建三角网, 计算先验视差, 从而减少视差搜索范围, 提高匹配效率。然而, 在影像弱纹理和纹理重复区域, ELAS算法存在难以获得支撑点的问题, 导致先验视差的精度降低。此外, 一旦支撑点被确定, 则无法再进行调整。针对上述问题, 本文对ELAS算法进行改进, 提出一种基于可信度引导的高效立体匹配算法 (ECSM)。该方法引入可信度作为度量, 并对非支撑点的可信度评估, 以确定高可信度点, 并将其纳入支撑点点集, 从而提高重建完整性。

1.2.1 可信度测度

像素点 (x,y) 的可信度测度^[27] $Conf(x,y)$ 采用如下定义

$$Conf(x,y) = \frac{\min_{d \neq D(x,y)} Cost(x,y,d)^2 - \min_{d=D(x,y)} Cost(x,y,d)^2}{\min_{d \neq D(x,y)} Cost(x,y,d)^2 + \min_{d=D(x,y)} Cost(x,y,d)^2} \quad (1)$$

其中: $\min_{d=D(x,y)} Cost(x,y,d)$ 代表像素点 (x,y) 在视差值 d 下的最小代价值, $\min_{d \neq D(x,y)} Cost(x,y,d)$ 为次最小代价值, $D(x,y)$ 为所有视差范围内找到的最小的代价值对应的视差值。次最小代价值与最小代价值之比越大, $Conf(x,y)$ 越接近1, 可信度越高, 反之, 此值越接近0, 可信度越低。

1.2.2 能量函数模型

设支持点的集合为 $S = (s_1, s_2, \dots, s_m)$, 其中 $s_m = (u_m, v_m, d_m)$, d_m 为像素点对应的视差值, m 为支撑点个数。设观测点的集合为 $O = (o_1, o_2, \dots, o_n)$, 其中 $o_n = (u_n, v_n, f_n, Conf_n)^T$, f_n 为像素点 (u_n, v_n) 的Sobel特征

描述子, 而 $Conf_n$ 为该点的可信度。左右影像的观测点分别为 $o_n^{(l)}$ 和 $o_n^{(r)}$, 其对应描述子分别为 $o_n^{(l)}$ 和 $f_n^{(r)}$, N 表示影像中的像素总个数。

将左图作为参考影像, 右图作为目标影像, ECSM算法使用最大后验概率来估算 $o_n^{(l)}$ 视差, 即给定 S 和 $o_n^{(l)}$, 根据先验概率分布随机采样 (u_n, v_n) 的视差 d_n , 再根据似然概率分布得到目标影像对应点 $o_n^{(r)}$ 。通过计算获得参考影像上视差 d_n 后, 根据可信度的定义, 再计算每个像素点的可信度。将满足可信度和视差约束的像素点加入支撑点点集, 得到新点集 S' 。

在给定 $o_n^{(l)}$ 新视差值 d'_n 的条件下, 左右两图影像的观测点 $o_n^{(l)}$ 、 $o_n^{(r)}$ 、新视差 S' 、原视差值 d_n 和可信度值 $Conf_n$ 相互独立, 根据贝叶斯法则, 后验概率可被联合分解为先验概率和似然概率的乘积, 并引入与视差偏离值和可信度成正相关的惩罚值再次估算视差值

$$P(d'_n | o_n^{(l)}, o_n^{(r)}, S', d_n, Conf_n) \propto P(d'_n | o_n^{(l)}, S') \cdot P(o_n^{(r)} | o_n^{(l)}, d'_n) P(d_n, Conf_n | d'_n) \quad (2)$$

其中, $P(d'_n | o_n^{(l)}, S')$ 为先验概率, 被定义为

$$\begin{cases} P(d'_n | o_n^{(l)}, S') \propto \\ \left\{ \gamma + \exp\left(-\frac{(d'_n - \mu(S', o_n^{(l)}))^2}{2\sigma^2}\right), |d'_n - \mu| < 3\sigma \vee d'_n \in N_s \right. \\ \left. 0, \text{其它} \right. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\mu(S', o_n^{(l)})$ 是连接支撑点和参考影像观测点的均值模型, 通过在支持点构成的三角网上进行分段线性插值来计算视差; N_s 是 $o_n^{(l)}$ 所在的 20×20 窗口内所有支撑点的视差值。

$P(o_n^{(r)} | o_n^{(l)}, d'_n)$ 为似然概率, 被定义为

$$\begin{cases} P(o_n^{(r)} | o_n^{(l)}, d'_n) \propto \\ \left\{ \exp(-\beta \|f_n^{(l)} - f_n^{(r)}\|_1), \begin{pmatrix} u_n^{(l)} \\ v_n^{(l)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_n^{(r)} + d'_n \\ v_n^{(r)} \end{pmatrix} \right. \\ \left. 0, \text{其它} \right. \end{cases} \quad (4)$$

其中: β 为常数; σ 为标准差。

$P(d_n, Conf_n | d'_n)$ 为惩罚值, 被定义为

$$P(d_n, Conf_n | d'_n) \propto \exp(-\psi(d_n, d'_n, Conf_n)) \quad (5)$$

其中: 函数 $\psi(d_n, d'_n, Conf_n)$ 是基于全变分模型的稳健函数, 目的是惩罚优化前后视差估算结果 d'_n 和 d_n 的偏差。

$$\begin{aligned} \psi(d_n, d'_n, Conf_n) = \\ -\log((1 - \eta)\exp(-|d'_n - d_n| \times w_{Conf} \times Conf_n) + \eta) \quad (6) \end{aligned}$$

其中: 参数 η 和 γ_d 为调节惩罚函数的尖锐程度和上限。当像素点可信度较高时, 新视差值应与之前估算的视差值接近, 反之, 将会大幅度调整视差从而提高匹配精度。

最大化后验概率等价于最小化能量函数, 将 γ_d 用可信度的倒数代替, 对后验概率取对数, 得到优化后的能量函数。

$$E(d') = \|f_n^{(l)} - f_n^{(r)}(d'_n)\|_1 - \frac{\log \left[\gamma + \exp \left(-\frac{[d'_n - \mu(S, o^{(l)})]^2}{2\sigma^2} \right) \right]}{\beta} - \frac{\log [(1 - \eta)\exp(-|d_n - d'_n| \times w_{Conf} \times Conf_n + \eta)]}{\beta} \quad (7)$$

w_{Conf} 决定了可信度在能量函数中的权重。ECSM 算法采用胜者为王策略解决最小代价视差估计问题,

实现逐行像素视差计算, 生成视差图。

1.2.3 ECSM算法步骤

改进的ECSM算法流程如图2所示。

1) 从同名像点中选择稳健匹配的支撑点, 并计算其视差值。将输入的影像每个像素点可信度初始化。以固定间隔均匀采样作为支撑候选点, 计算其 9×9 窗口内每个像素垂直和水平方向的 3×3 Sobel算子, 将其串联得到特征描述符用于匹配同名点。将满足以下条件的候选点筛选为初始支撑点 S , 并为其分配可信度为1。①左右视差一致性检验, 即比较在目标影像中同名点周围的窗口内最佳视差值 d_2 与参考影像中的像素点 p_1 的估计视差值 d_1 , 满足 $|d_1 - d_2| < 2$; ②最佳与次最佳比率检验, 即以参考影像中的像素点 p_1 为中心的窗口匹配中最佳匹配代价和次最佳匹配代价之间的比率低于固定阈值 $\tau = 0.85$; ③支撑点视差和领域内其它支撑点的视差应该一致。

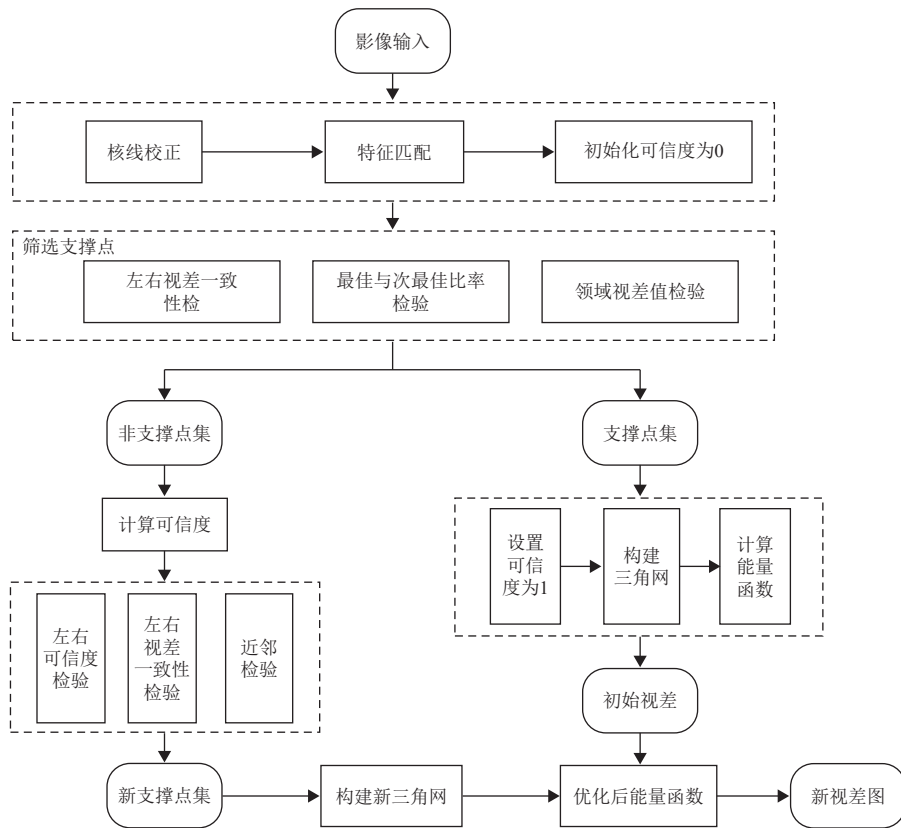


图 2 ECSM算法流程图

Fig. 2 Flow chart of ECSM algorithm

2) 利用支撑点的影像坐标构建三角网, 并根据其先验概率剔除误匹配点, 再利用三角网顶点的视差值估计影像视差平面模型, 最后通过插值方法得到初始视差图^[28-29]。

3) 计算参考影像每个像素的可信度, 并将可信度高的点进行筛选: ①该像素点及其目标影像中同名点的可信度均高于给定阈值; ②该像素点及其目标影像中同名点的视差值之差的绝对值小于2个像素; ③该像

素点邻域范围内没有其它支撑点, 避免过密的支撑点影响三角网的构建。将满足条件的像素点加入支撑点集, 增加并细化三角化区域的范围, 完成支撑点集的更新。

4) 基于胜者为王策略, 经过优化后的能量函数重新计算视差 d_n , 并进行左右一致性检验、连通域噪声剔除、中值滤波和无效区域孔洞插值等后处理步骤, 得到新视差图。

2 研究区和数据集

2.1 研究区简介

沙克尔顿 (Shackleton) 陨石坑中心的月面坐标为南纬 89.67° , 东经 129.78° , 该陨石坑的平均直径 21 km , 深度约 4.5 km , 其坑缘是阿尔忒弥斯任务的候选着陆点之一^[5-6]。本文选取沙克尔顿地区坑缘典型区域作为研究区域 (见图3中的白框标示, 其中图3和图4底图为

LDEM渲染图), 采用基于ECSM算法的摄影测量方法进行三维重建, 并验证该方法在月面地形重建中的可行性和有效性。

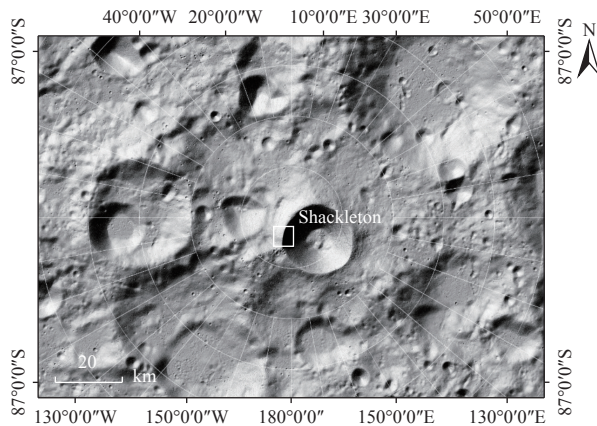


图3 沙克尔顿坑缘区域位置示意图
Fig. 3 Illustration of Shackleton crater rim area location

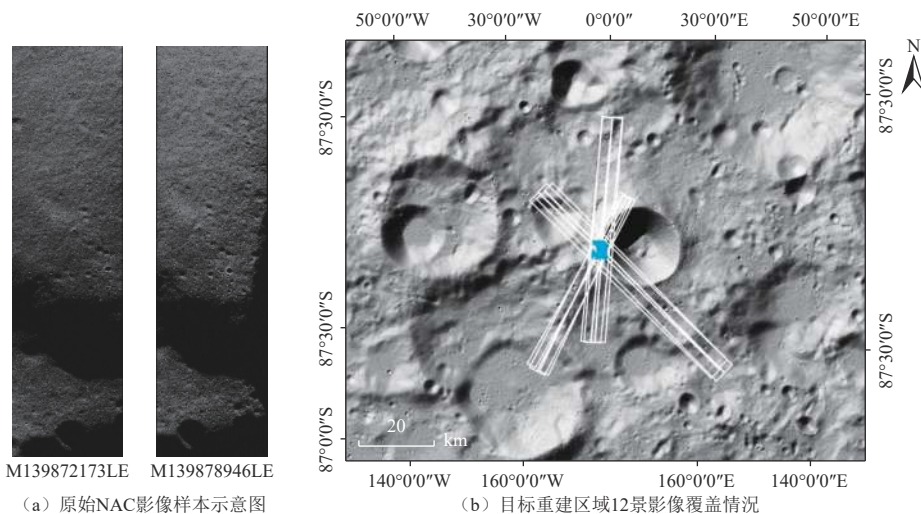


图4 原始NAC影像样本示意图与目标重建区覆盖情况
Fig. 4 Illustration of original NAC image samples and coverage of target reconstruction area

2.2 实验数据

月球勘测轨道器 (Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)^[30-31]搭载了一套推扫式相机系统, 包括两个窄角相机和一个广角相机。窄角相机可以获取高分辨率月表影像, 分辨率 $0.5\sim 2\text{ m}$ ^[31]。本文采用12景LROC窄角相机高分辨率影像作为数据基础, 具体的影像信息如表1所示。图4(a)为目标研究区域原始NAC影像样本示意图, 图4(b)为目标研究区域影像重叠情况图, 可以看到12景影像可完全覆盖目标重建区域 (以蓝色区域标示)。月球南极影像存在阴影区域, 增加了立体匹配的困难, 故本文选取影像中研究区域的有效部分进行重建 (约 $2\,500\times 6\,000$ 像素)。目标重

表1 实验影像参数

Table 1 Parameters of experimental image					
序号	影像	相位角/ ($^\circ$)	入射角/ ($^\circ$)	出射角/ ($^\circ$)	分辨率/ ($\text{m}\cdot\text{pixel}^{-1}$)
1	M139872173LE	88.700	88.490	1.700	1.090
2	M139878946LE	68.250	88.490	20.700	1.160
3	M140903652LE	88.080	87.910	1.690	0.950
4	M140917211LE	67.660	87.920	20.620	1.030
5	M141378588LE	88.270	87.960	1.700	1.240
6	M141385360LE	68.000	88.000	20.780	1.310
7	M139872173RE	88.430	88.500	1.140	1.090
8	M139878946RE	67.960	88.500	20.580	1.160
9	M140890072RE	67.280	87.920	20.650	1.000
10	M140903652RE	87.740	87.920	1.140	0.950
11	M141378588RE	87.690	87.980	1.140	1.240
12	M141385360RE	67.370	88.020	20.830	1.310

建区域具体经度范围 $180.820^{\circ} \sim 226.615^{\circ}$, 纬度范围 $89.633^{\circ} \sim 89.840^{\circ}$ 。本文还采用LOLA提供的激光测高点及其生成的数字高程模型 (LDEM) 作为评价参考标准来验证重建结果的精度。

3 实验结果与分析

3.1 实验设置与评估度量

本文所涉及实验均在相同的环境下进行, 即一台配置主频2.30 GHz、16核心Intel Core i7 CPU, 16 GB内存和64位操作系统的计算机。影像预处理主要利用USGS ISIS软件完成, 其它三维重建步骤则通过C++编程实现。为实现ECSM算法的最佳性能, 进行了多次测试以确定最优的能量函数参数组合, 详见表2。

表2 ECSM算法参数表
Table 2 ECSM algorithm parameter table

β	γ_d	σ	η	w_{Conf}
0.02	15	1	0.02	3

本文采用3种效果评估度量来定量评价立体匹配算法的性能: ①左右一致性检验: 分别计算同一组核线影像左右影像对应点的视差 d_{nl} 和 d_{nr} , 当 $|d_{nl} + d_{nr}| > 2$ 个像素时, 则视为误匹配点; ②中值滤波: 当某个点的视差与邻近 3×3 窗口内的视差中值差的绝对值大于0.5个像素时, 则视为误匹配; ③水平交叉区域检测^[32]: P_R 和 Q_R 分别是右影像某行上的任意两点, 在左图上的对应的点分别为 P_L 和 Q_L , 它们如果满足 $(d_{nP_L} - d_{nQ_L}) / (d_{nP_R} - d_{nQ_R}) > 0$ 则称 P_R 和 Q_R 满足水平顺序匹配约束, 否则称为发生水平交叉。同时, 剔除误匹配后视差空值也被视为误匹配点。上述3种效果评估度量方法的误

匹配率均以影像中误匹配像素个数占整个影像像素个数的百分比来衡量。

摄影测量三维重建的重建精度则通过计算高程值和坡度值的平均误差 (Mean Error, ME) E_{ME} 和标准差 (Standard Deviation, SD) E_{SD} 来评估

$$E_{\text{SD}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - E_{\text{ME}})^2 / n} \quad (8)$$

$$E_{\text{ME}} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i / n \quad (9)$$

其中: $\varepsilon_i = X - x$, X 为观测值的真实值, x 为观测值。

3.2 立体匹配算法实验结果与分析

为评价ECSM算法与其它4种立体匹配算法的鲁棒性, 本文在5对实验影像中选取部分区域开展立体匹配对比实验 (约 2000×2000 像素), 并对月表纹理较为单一且不明显和表面具有相似纹理特征的影像进行定性分析, 结果如图5所示。图5 (a) 是左影像图, 图5 (b) ~ (e) 分别是由块匹配算法 (Block-Matching, BM)、SGM算法、ELAS算法和ECSM算法计算得到的视差图。如白色矩形所示, ECSM算法生成的视差图中“孔洞”面积与ELAS算法相比较少。这是因为ELAS算法在上述区域获取的支撑点数量不足, 导致估算的视差值不可靠。相反, ECSM算法通过将高可信点加入支撑点点集弥补这一问题, 使其在月面影像匹配方面表现更优异。相较于SGM算法, ECSM算法产生伪影更少。这是因为SGM算法是基于以每个像素为中心的8个方向来估算视差, 相邻的两个扫描线之间共享的信息较少, 而ECSM算法是基于三角形约束来估算视差, 减少了线状伪影的产生。

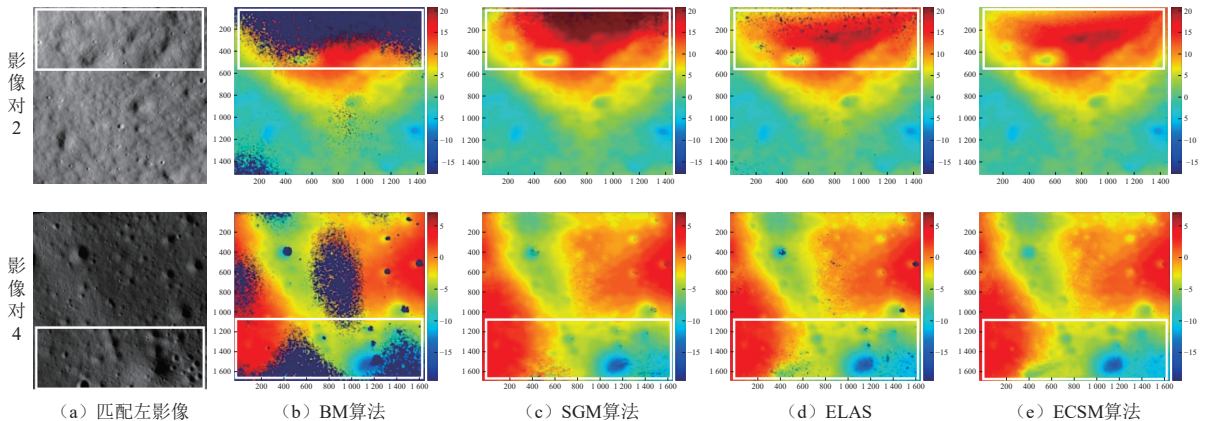


图5 不同立体匹配算法生成视差图

Fig. 5 Disparity maps generated by different stereo matching algorithms

左右一致性、中值滤波和水平交叉区域^[32]3种效果评估度量的视差对比结果如表3~5所示。ECSM算法

相对于ELAS算法有明显改进, 误匹配率明显降低, 其中效果最好的是影像对4, 减少了1.473%的误匹配率。

表3 左右一致性检验误匹配率表

Table 3 Left-right consistency check error matching rate

影像对	BM	SGM	ELAS	ECSM
影像对1	10.447	2.5325	3.407	2.583
影像对2	29.423	12.898	13.990	12.940
影像对3	13.431	0.657	1.064	0.694
影像对4	32.051	3.627	4.713	3.240
影像对5	13.847	1.006	1.418	1.123

表4 中值滤波误匹配率表

Table 4 Median filtering error matching rate

影像对	BM	SGM	ELAS	ECSM
影像对1	0.633	0.878	0.031	0.015
影像对2	1.169	3.144	0.074	0.034
影像对3	1.231	0.252	0.049	0.045
影像对4	1.760	1.780	0.055	0.028
影像对5	1.374	0.260	0.040	0.035

表5 水平交叉区域误匹配率表

Table 5 Horizontal cross-region error matching rate

影像对	BM	SGM	ELAS	ECSM
影像对1	7.485	0.866	0.895	0.012
影像对2	24.654	3.633	1.974	0.072
影像对3	9.484	0.204	0.256	0.022
影像对4	26.047	1.733	1.166	0.042
影像对5	9.766	0.211	0.473	0.208

ECSM算法的左右一致性精度接近于SGM算法，且产生的水平交叉区域最少，视差值与邻近3×3窗口内中值之间的差异也更小，视差更连续。

3.3 摄影测量三维重建实验结果与分析

3.3.1 DEM完整性实验结果

为验证ECSM算法在月面弱纹理和纹理重复区域地形重建的适用性，本文设计了DEM完整性对比实验。本文在实验影像中分别选取两对纹理单一和具有重复的形貌纹理的区域（约2 000×2 000像素）开展实验。实验通过BM算法、SGM算法、ELAS算法、ECSM算法和NASA开发的开源软件Ames Stereo Pipeline (ASP)^[33]计算获得视差图。其中，ASP采用以Census变换为代价计算函数二维搜索的SGM算法。然后对视差图进行左右一致性检验、中值滤波和水平交叉区域检验等3种滤波处理后生成DEM，对比生成DEM的完整性。完整性以原始立体影像成功生成DEM的格网数量与整个影像范围区域内的总格网数量之间的百分比关系来衡量，结果如图6所示（完整性数值标注在括号中）。常用的立体匹配算法在经过上述处理后，过滤了不准确的视差，但也导致了视差图出现“孔洞”，进而导致生成的DEM高程信息缺失。相较

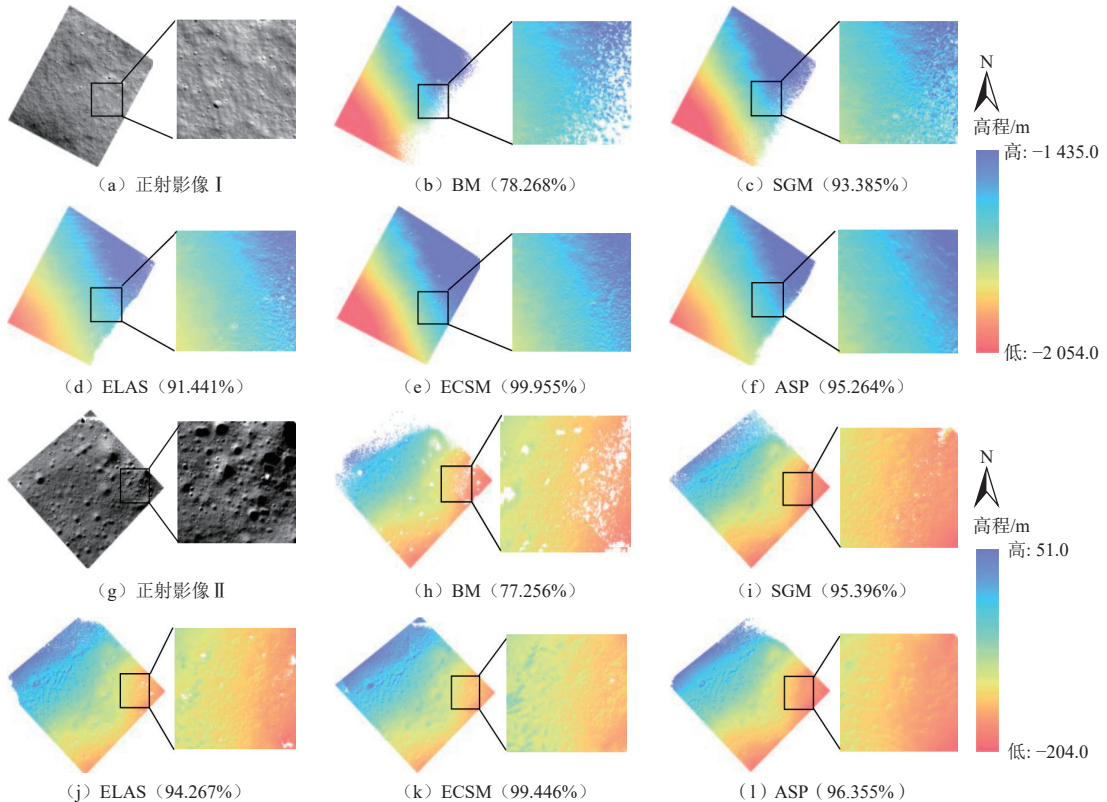


图6 DEM重建完整性对比

Fig. 6 Comparison of DEM reconstruction integrity

之下, ECSM算法生成的DEM具有更高的完整性, 达到了99.4%以上, 凸显了本文立体匹配算法在弱纹理和纹理重复区域影像的优势。图6的右侧图为左侧DEM黑色矩形区域的局部放大图, 对比可见, ASP生成的DEM存在明显的“阶梯”伪影, 这是因为Census变换主要利用中心像素对邻域像素进行编码后计算的代价^[34]。在处理弱纹理和纹理重复区域时, 由于中心像素的编码相似度较高, 导致重建后的高程信息出现不连续现象。而ECSM算法对影像进行卷积后, 利用后验概率计算代价, 减少了伪影的出现。

3.3.2 摄影测量三维重建实验结果

为进一步探究以LOLA为控制基准进行平差和点云配准对重建精度的影响, 本文设计了相应的地形重

建对比实验。对比试验涵盖了4种不同生成方式制作的DEM, 并采用2种DEM作为参考, 具体如下: ①仅平差DEM: 在平差过程中仅采用光束法平差生成的2 m分辨率DEM (图7 (b)); ②联合平差DEM: 通过局部地形约束的影像与LOLA激光点联合光束法平差方法生成的2 m分辨率DEM (图7 (e)); ③仅平差-点云配准DEM: 将仅平差DEM与LDEM进行点云配准后生成的2 m分辨率DEM (图7 (c)); ④联合平差-点云配准DEM: 将联合平差DEM与LDEM点云配准后生成的2 m分辨率DEM (图7 (f)); ⑤LDEM: NASA基于LOLA激光点, 通过轨道修正后生成的5 m分辨率DEM (图7 (a)); ⑥DLR DEM: DLR生成的同区域2 m分辨率DEM (图7 (d))。

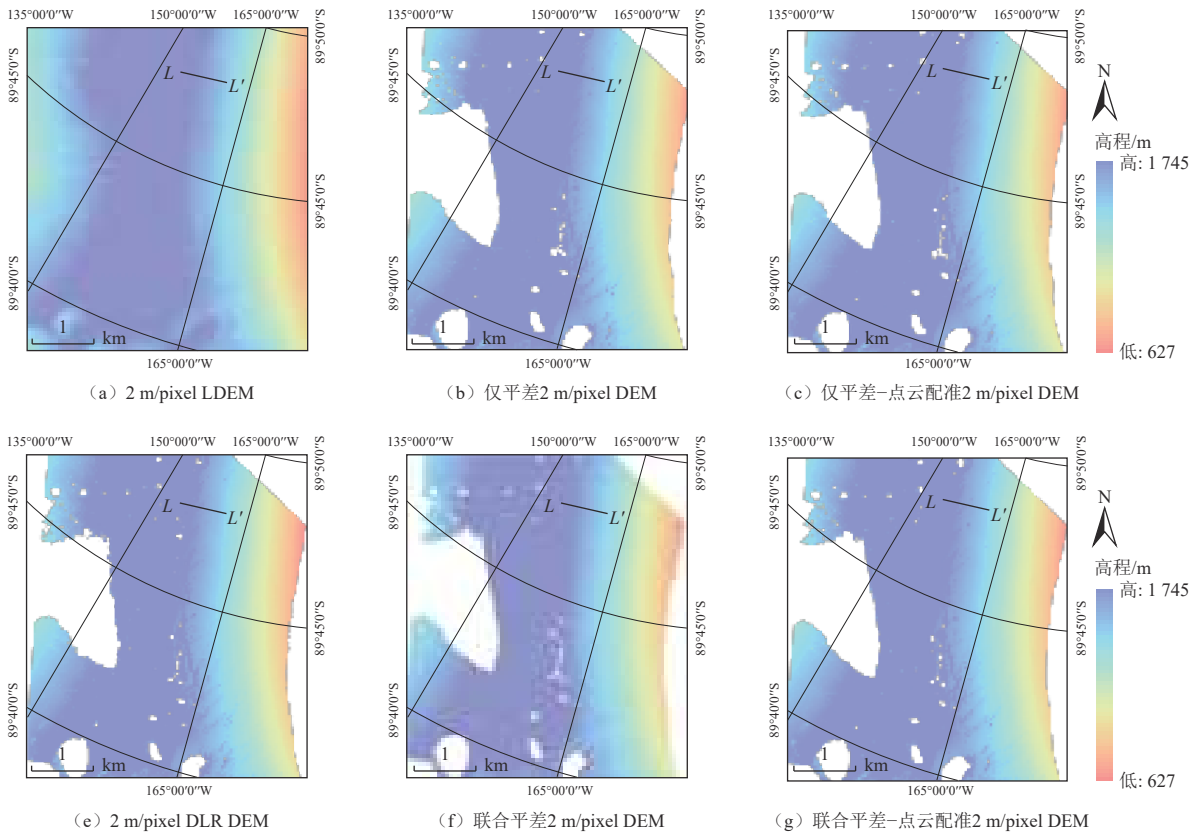


图 7 沙克尔顿坑缘区域6种DEM

Fig. 7 Six DEMs in the Shackleton crater rim area

点云配准后的DLR DEM、仅平差-点云配准DEM和联合平差-点云配准DEM分别与LDEM的高程差如图8所示。高程差主要集中在-3 ~ 3 m, 表现为周期性条纹状。这些周期性条纹误差很可能是由于影像成像时刻平台发生颤振导致。此外, 为适应光照和阴影变化, 轨道器姿态调整和数据采样频率不匹配都可能导致条纹状高程差的出现^[35]。通过对比图8 (b) 和

图8 (c) 可得, 在以LOLA激光测高数据为控制基准进行平差后, 高程差值较大的区域范围减少, 精度提高。

为深入分析联合平差和点云配准对地形三维重建产品质量的影响, 本文沿着图7 (a) ~ (f) 中的高程剖面线LL'进行剖面分析。结果如图9所示, 未以LOLA为控制基准进行平差的DEM在陨石坑内壁部分

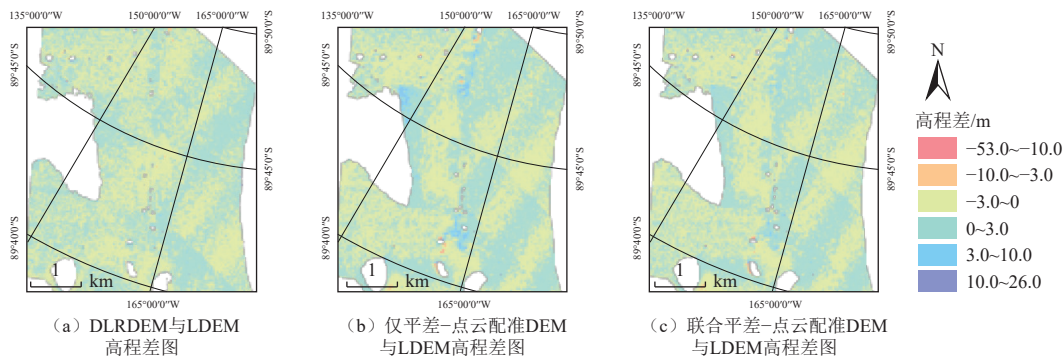


图8 沙克尔顿坑缘区域3种DEM高程差分布示意图

Fig. 8 Illustration of elevation differences in the Shackleton crater rim area for three DEM

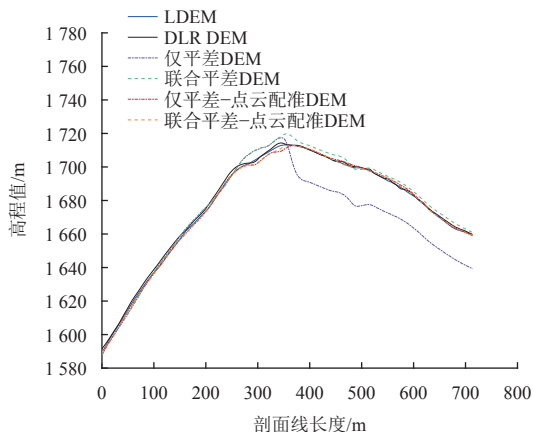


图9 沙克尔顿坑缘区域6种DEM剖面对比

Fig. 9 Comparison of six DEM profiles in the Shackleton crater rim area

地形与真实地形存在较大的高程偏差。而采用联合平差或点云配准后生成的DEM与LDEM有较好的拟合。当这两种方法联合使用时，生成的DEM与LDEM一致性最佳。这表明联合平差和点云配准处理都能有效提高DEM的质量。

3.3.3 三维重建地形分析

为评估地形精度并进行地形地貌分析，LDEM、DLR DEM、仅平差-点云配准DEM和联合平差-点云配准DEM对应的坡度图如图10所示，本文以LDEM生成的坡度图为基准，计算不同方法生成坡度图与基准之间的坡度差（图11）。结果显示沙克尔顿坑缘区域在山脊处地势平坦，靠近山脊处坡度变化明显。陨石坑外壁坡度较缓，坡度在 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ，在陨石坑内壁地势

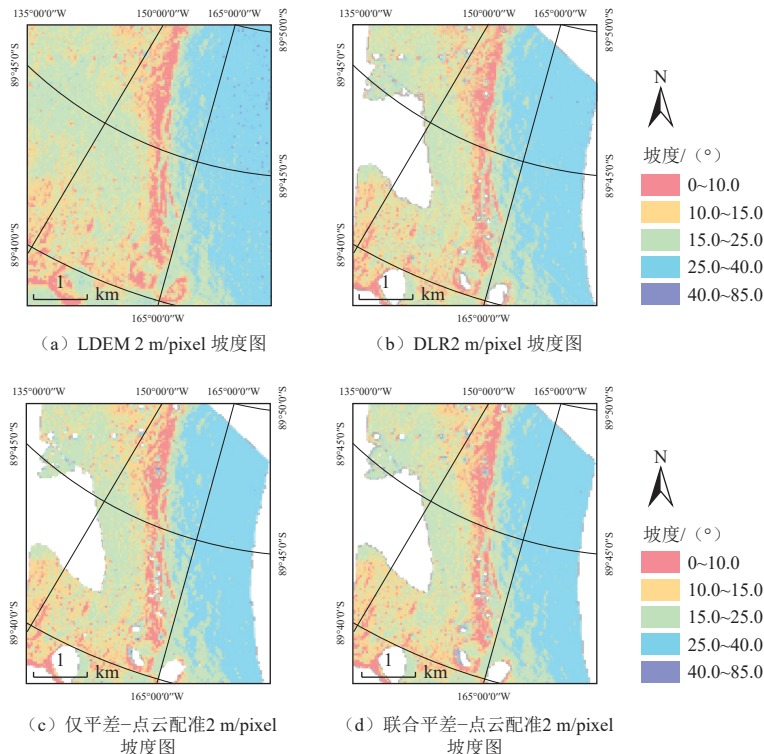


图10 沙克尔顿坑缘区域4种坡度图

Fig. 10 slope maps of the Shackleton crater rim area for 4 methods

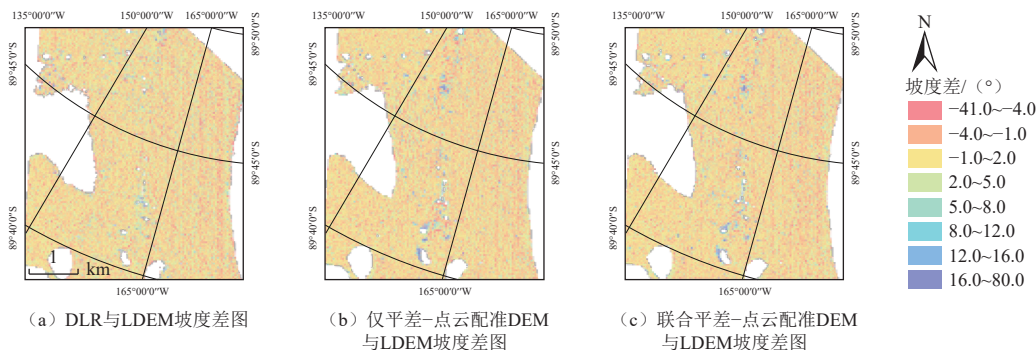


图 11 沙克尔顿坑缘区域3种坡度差图

Fig. 11 Slope difference maps of the Shackleton crater rim area for three methods

陡峭, 坡度在 $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 与陨石坑内壁情况相符^[5]。坡度差集中在 $-4^{\circ}\sim 2^{\circ}$, 与真实值具有较好一致性。

3.3.4 重建精度评定与分析

由于月球表面缺乏准确的控制点, 直接验证月面三维重建精度存在困难。因此, 本文采用间接方法评定DEM和坡度图的准确性。目前, LOLA是精度最高的对月激光测高仪, 其测距精度可达 0.1 m ^[31]。本文选择沙克尔顿坑缘区域部分经过NASA改正处理的LOLA激光测高点和基于LDEM生成的坡度图作为真实值, 提取激光点在DLR DEM和本文生成的同区域DEM上相应点的高程值和坡度值, 通过计算平均误差和标准差进行精度评估, 结果如表6和表7所示。以LOLA为控制基准进行平差并与LDEM配准后生成的DEM, 其检查点高程标准差为 2.713 m , 坡度标准差为 2.657° 。DLR DEM与LDEM进行配准后的检查点高程标准差为 2.658 m , 坡度标准差为 2.966° 。两者的高程精度相近, 而本文方法生成的坡度图精度更高, 更符合LDEM的坡度特征。

表 6 研究区不同DEM高程精度对比表

Table 6 Comparison of elevation accuracy of different DEM in the study area

DEM	平均误差/m	标准差/m
DLR DEM	0.377	2.658
仅平差DEM	7.383	8.693
联合平差DEM	-0.134	4.281
仅平差-点云配准DEM	0.377	2.764
联合平差-点云配准DEM	0.402	2.713

表 7 研究区不同坡度图精度对比表

Table 7 Comparison of accuracy of different slope map in the study Area

坡度图	平均误差/ $(^{\circ})$	标准差/ $(^{\circ})$
DLR生成坡度图	-0.178	2.966
仅平差-点云配准坡度图	-0.018	2.719
联合平差-点云配准坡度图	-0.043	2.657

4 结 论

本文利用高分辨率月球轨道器遥感数据, 研究了月球南极沙克尔顿坑缘地区的摄影测量三维重建方法。针对传统立体匹配算法在处理弱纹理和纹理重复区域效果不佳以及在获取支撑点后无法再更改的限制, 本文提出一种可信度引导的高效立体匹配算法(ECSM)。在对比实验中, ECSM算法生成的视差图和DEM比ELAS算法都有所提升, 特别在弱纹理和纹理相似处表现优异, 且在DEM重建完整性和伪影方面优于常用的SGM算法。本文重建的月面DEM体现出与现存地形产品较好的一致性。与DLR生成的坡度图相比, 坡度图与LDEM的形态和特征更一致, 在DEM精确性和反映月面的真实形态方面具有一定优势, 且与LDEM相比, 本研究DEM分辨率更高, 可为南极着陆区选址提供可靠的数据方法支撑。后续将进一步应用于月球南极其它区域, 并扩展至更大范围的地形重建研究, 从而更全面地服务于月球南极着陆探测任务。

参 考 文 献

- [1] 饶炜, 方越, 彭松, 等. 月球南极探测着陆区选址方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(6): 571-578.
RAO W, FANG Y, PENG S, et al. Landing site selection method of lunar south pole region[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(6): 571-578.
- [2] PAIGE D A, SIEGLER M A, ZHANG J A, et al. Diviner lunar radiometer observations of cold traps in the Moon's south polar region[J]. Science, 2010, 330(6003): 479-482.
- [3] SCHORGHOFER N, WILLIAMS J P, MARTINEZ-CAMACHO J, et al. Carbon dioxide cold traps on the Moon[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(20): e2021GL095533.
- [4] 王赤, 林杨挺, 裴照宇, 等. 月球科研站的关键科学问题[J]. 中国科学基金, 2022, 36(6): 830-840.
WANG C, LIN Y T, PEI Z Y, et al. Key scientific questions related to the lunar research station[J]. Bulletin of National Natural Science

- Foundation of China, 2022, 36(6): 830-840.
- [5] BERNHARDT H, ROBINSON M, BOYD A. Geomorphic map and science target identification on the Shackleton-de Gerlache ridge[J]. *Icarus*, 2022, 379: 114963.
- [6] KRING D A, BARRETT N, BOAZMAN S, et al. Artemis III EVA opportunities in the vicinity of the lunar south pole on the rim of Shackleton Crater[R]. Tucson, Arizona, USA: Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, 2020.
- [7] 柳思聪, 童小华, 刘世杰, 等. “天问一号”着陆区遥感形貌建模与制图分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(3): 338-347.
- LIU S C, TONG X H, LIU S J, et al. Topography modeling, mapping and analysis of China's first Mars mission Tianwen-1 landing area from remote sensing images[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(3): 338-347.
- [8] SCHOLTEN F, OBERST J, MATZ K D, et al. GLD100: the near - global lunar 100 m raster DTM from LROC WAC stereo image data[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117: E00H17.
- [9] BARKER M, MAZARICO E, NEUMANN G, et al. A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE terrain camera[J]. *Icarus*, 2016, 273: 346-355.
- [10] LI C L, REN X, LIU J J, et al. A new global and high resolution topographic map product of the Moon from Chang'E-2 image data[C]//Proceedings of 46th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, TX, USA: NASA, 2015 (1832): 1638.
- [11] OBERST J, SCHOLTEN F, MATZ K D, et al. Apollo 17 landing site topography from LROC NAC stereo data—first analysis and results[C]//Proceedings of 41st Annual Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, TX, USA: NASA, 2010 (1533): 2051.
- [12] DI K, JIA M, XIN X, et al. High-resolution large-area digital orthophoto map generation using LROC NAC images[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2019, 85(7): 481-491.
- [13] ZHANG L Y, CAI F D, WANG J J, et al. The SGM algorithm based on census transform for binocular stereo vision[C]//Proceedings of 2022 International Conference on Machine Learning and Knowledge Engineering (MLKE). Guilin, China: IEEE, 2022.
- [14] YANG S, LEI X, LIU Z, et al. An efficient local stereo matching method based on an adaptive exponentially weighted moving average filter in SLIC space[J]. *IET Image Processing*, 2021, 15(8): 1722-1732.
- [15] 彭曼, 邸凯昌, 刘召芹. 基于自适应马尔科夫随机场的深空探测影像密集匹配[J]. *遥感学报*, 2014, 18(1): 77-89.
- PENG M, DI K, LIU Z. Adaptive Markov random field model for dense matching of deep space stereo images[J]. *J Remote Sensing*, 2014, 18(1): 77-89.
- [16] YE L, PENG M, DI K, et al. Lunar terrain reconstruction from multi-view lroc nac images based on semi-global matching in object space[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, 43: 1177-1183.
- [17] GUO Y Q, GU M, XU Z D. Research on the improvement of semi-global matching algorithm for binocular vision based on lunar surface environment[J]. *Sensors*, 2023, 23(15): 6901.
- [18] GEIGER A, ROSER M, URTASUN R. Efficient large-scale stereo matching[C]//Proceedings of Asian conference on computer vision. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [19] 曾兴国, 左维, 李春来, 等. 中国月球地形制图研究进展[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(4): 570-578.
- ZENG X G, ZUO W, LI C L. Review on progress of lunar topographic mapping in China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(4): 570-578.
- [20] 邸凯昌, 刘斌, 刘召芹, 等. 月球遥感制图回顾与展望[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1230-1242.
- DI K C, LIU B, LIU Z Q, et al. Review and prospect of lunar mapping using remote sensing data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1230-1242.
- [21] 徐青, 耿迅. 地外天体形貌测绘研究现状与展望[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(3): 300-310.
- XU Q, GENG X. Recent advances and prospects in extraterrestrial planets mapping[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(3): 300-310.
- [22] GADDIS L, ANDERSON J, BECKER, K, et al. An overview of the Integrated Software for Imagers and Spectrometers (ISIS)[C]//Proceedings of 28th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Houston, TX, USA: NASA, 1997.
- [23] WU B, HU H, GUO J. Integration of Chang'E-2 imagery and LRO laser altimeter data with a combined block adjustment for precision lunar topographic modeling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 391: 1-15.
- [24] DE FRANCHIS C, MEINHARDT-LLOPIS E, MICHEL J, et al. An automatic and modular stereo pipeline for pushbroom images[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, 2: 49-56.
- [25] ZHANG Z, DERICHE R, FAUGERAS O, et al. A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry[J]. *Artificial Intelligence*, 1995, 78(1-2): 87-119.
- [26] NEFIAN A V, HUSMANN K, BROXTON M, et al. A Bayesian formulation for sub-pixel refinement in stereo orbital imagery [C]//Proceedings of 2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Cairo, Egypt: IEEE, 2009.
- [27] HU X Y, MORDOHAI P. Evaluation of stereo confidence indoors and outdoors[C]//Proceedings of 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2010.
- [28] LI R, DI K, HOWARD A B, et al. Rock modeling and matching for autonomous long-range Mars rover localization[J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 24(3): 187-203.
- [29] WU B, ZHANG Y, ZHU Q. Integrated point and edge matching on poor textural images constrained by self-adaptive triangulations[J]. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2012, 68: 40-55.
- [30] ROBINSON M S, BRYLOW S M, TSCHIMMEL M, et al. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview[J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1-4): 81-124.
- [31] VONDRAK R, KELLER J, CHIN G, et al. Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO): observations for lunar exploration and science[J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1): 7-22.
- [32] 贾波, 章毓晋, 林行刚. 视差图误差检测与校正的通用快速算法[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2000, 40(1): 28-31.
- JIA B, ZHANG Y J, LIN X G. General and fast algorithm for disparity error detection and correction[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2000, 40(1): 28-31.
- [33] BEYER R A, ALEXANDROV O, MCMICHAEL S. The ames stereo

- pipeline: NASA's open source software for deriving and processing terrain data[J]. *Earth and Space Science*, 2018, 5(9): 537-548.
- [34] ZABIH R, WOODFILL J. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence[C]//Proceedings of Computer Vision—ECCV'94: Third European Conference on Computer Vision Stockholm, Sweden: Springer Berlin Heidelberg, 1994: 151-158.
- [35] ROSIEK M R, THOMAS O, HOWINGTON-KRAUS E, et al. Lunar south pole digital elevation models from lunar reconnaissance orbiter narrow angle camera[C]//Proceedings of 44th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, TX, USA: NASA, 2013.

作者简介:

尤琼华(1999-), 博士研究生, 主要研究方向: 地形三维重建。

通信地址: 上海市杨浦区四平路1239号同济大学测绘与地理信息学院(200092)

E-mail: fionayou@tongji.edu.cn

叶真(1989-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 航天测绘遥感与深空探测。**本文通信作者。**

通信地址: 上海市杨浦区四平路1239号同济大学测绘与地理信息学院(200092)

E-mail: 89_yezhen@tongji.edu.cn

Terrain Reconstruction for Lunar South Pole Region Based on Confidence-Guided Stereo Matching

YOU Qionghua^{1,2}, YE Zhen^{1,2}, TONG Xiaohua^{1,2}, XU Yusheng^{1,2}, LIU Shijie^{1,2}, XIE Huan^{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 South Pole region's limited illumination, extensive shadowed regions, and homogenous surface features with weak textures pose significant challenges to stereoscopic image matching and 3D terrain reconstruction. To address these issues, an Efficient Confidence-guided Stereo Matching (ECSM) algorithm was proposed. This algorithm improved matching precision and efficiency by assessing the confidence of non-support points, updating the support point dataset, constructing a triangulated mesh, and recalculating disparities within triangle vertices based on their confidence levels. On this basis, a photogrammetric method for lunar 3D terrain reconstruction was established. High-resolution image data from the Lunar Reconnaissance Orbiter's Narrow Angle Camera was utilized for validation experiments conducted in the vicinity of the Shackleton crater within the lunar South Pole region. Qualitative and quantitative analyses of disparity maps and Digital Elevation Model (DEM) generated from different stereo matching algorithms demonstrated the reliability of the proposed algorithm in regions with weak and repetitive textures. Comparative analyses with the German Aerospace Center's DEM and NASA's Lunar Orbiter Laser Altimeter DEM (LDEM) for the same region revealed significant consistency in elevation and slope information, affirming the practicality and effectiveness of the proposed method. This study provides a methodological foundation for landing site selection for lunar South Pole explorations.

Keywords: lunar south pole; terrain reconstruction; stereo matching; confidence guide

Highlights:

- An Efficient Confidence-guided Stereo Matching Algorithm is proposed.
- Based on the proposed stereo matching algorithm, a high-precision 3D terrain reconstruction method for lunar photogrammetry is established, and experimental validation is conducted in the vicinity of the Shackleton Crater region at the lunar South Pole.
- Compared with commonly used algorithms such as SGM, the proposed stereo matching algorithm exhibits enhanced robustness and efficiency, resulting in DEM generation with better integrity.
- In terms of elevation and slope information, the generated DEM exhibits notable consistency with the DEMs produced by DLR and the LOLA DEM generated by NASA in the same region.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]