基于视觉的嫦娥四号探测器着陆点定位

王稼^{1,2}, 吴伟仁³, 李剑¹, 邱凯昌⁴, 万文辉^{4*}, 谢剑锋¹, 彭嫚⁴, 王保丰^{1,2}, 刘斌⁴,
贾萌娜⁴, 席露华¹, 赵瑞¹

1. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094;

2. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094;

3. 探月与航天工程中心, 北京 100037;

4. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101

* E-mail: wanwh@radi.ac.cn

收稿日期: 2019-02-26; 接受日期: 2019-07-04; 网络版发表日期: 2020-01-03

国家自然科学基金(批准号: 41771488, 41671458, 11773004, 61573049)资助项目

摘要 我国于2018年12月8日发射嫦娥四号月球探测器, 实施世界上首次月球背面软着陆和巡视探测. 探测器着陆点的快速高精度定位是其中的一个重要技术环节, 也是着陆器和巡视器开展月面探测工作的重要前提. 本文基于高精度图像匹配和几何变换方法, 结合实际工程任务需求, 首先利用探测器动力下降期间的近实时高压缩比降落序列影像完成了着陆点的快速初始定位; 其次利用回放的低压缩比降落影像对该位置进行了精化, 最终解算的嫦娥四号探测器着陆点位置为(177.5884°E, 45.4565°S). 该定位方法及结果被成功应用于实际工程任务中, 为嫦娥四号任务着陆区的地形分析及后续遥操作的任务规划提供了重要支持.

关键词 嫦娥四号, 月球探测, 着陆点定位, 降落影像

1 引言

北京时间2019年1月3日10时26分, 嫦娥四号月球探测器顺利在预选着陆区月球背面南极-艾特肯(South Pole-Aitken, SPA)盆地内的冯·卡门(Von Karman)撞击坑成功着陆^[1]. 1月11日16时, 嫦娥四号巡视器与着陆器在“鹊桥”中继星的支持下, 成功实施了两器互拍, 标志着我国嫦娥四号任务圆满成功. 此次任务实现了人类历史上首次航天器在月球背面软着陆和巡视勘察, 首次月球背面与地球的中继通信, 开启了人类探索宇宙奥秘的新篇章. 着陆点的精确位置信息是建立巡视

器工作坐标系的重要依据, 为着陆区的地形分析和后续任务规划及科学探测提供位置信息和基础数据, 是着陆器和巡视器开展各项月面探测工作的重要前提^[2~4].

基于视觉的着陆定位技术在月球、行星、小行星及彗星的着陆与采样返回任务中均得到了应用^[2~5]. 我国在嫦娥三号任务中也采用了视觉图像处理的方法实现探测器着陆点的定位^[6,7], 万文辉等人^[2]、贾阳等人^[3]利用降落图像、导航相机图像和嫦娥二号数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)对着陆点位置进行解算, 其定位结果均是在探测器落月后数小时完成

引用格式: 王稼, 吴伟仁, 李剑, 等. 基于视觉的嫦娥四号探测器着陆点定位. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 41–53

Wang J, Wu W R, Li J, et al. Vision based Chang'E-4 landing point localization (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 41–53, doi: 10.1360/SST-2019-0073

的. Wagner等人^[8]、LRO团队^[9]、刘斌等人^[4]利用月球勘测轨道器(lunar reconnaissance orbiter, LRO)再次飞越着陆区上方获取的图像, 通过对比着陆前后影像以离线处理的方式对定位结果的精度进行了评估. 目前看来, 提高现有的应用于工程中的着陆点视觉定位方法实时性, 才能更好地满足工程任务的实际需求. 此外, 嫦娥三号着陆区为月球正面, 借助嫦娥一号X频段UXB(unified X-band)与甚长基线干涉测量VLBI(very long baseline interferometry)等观测数据可为着陆点定位提供服务^[10]. 而嫦娥四号着陆区为月球背面, 由于月球遮挡, 传统测距、测速及VLBI技术在探测器动力下降阶段无法发挥作用, 因而整个降落过程中无法获取无线电定位结果. 因此, 在嫦娥四号任务中, 基于视觉影像的定位技术成为着陆点快速、高精度定位的主要技术手段^[7]. 另外, 受“鹊桥”中继传输链路的带宽限制, 嫦娥四号探测器动力下降阶段采取了高压压缩比(1:64)的方式对降落影像进行压缩传输(嫦娥三号采用的是1:8压缩比)^[11], 使得原始影像斑块效应明显, 为基于降落影像的图像匹配增加了难度.

着陆区大范围、高分辨率的DOM是基于视觉的着陆点定位的参考基准. 目前覆盖全月、分辨率最高的立体影像数据为嫦娥二号轨道器影像, 国家天文台已面向全球发布了全月7 m/pixel的DOM及20 m/pixel的数字高程模型(digital elevation model, DEM)产品^[12]. 北京航天飞行控制中心联合中国科学院遥感与数字地

球研究所遥感科学国家重点实验室, 利用LRO窄角相机(narrow angle camera, NAC)^[13]的100幅影像, 制作了着陆区分辨率约为1 m/pixel的高精度无缝DOM, 与嫦娥二号DOM一起用作着陆点定位的底图.

本文基于嫦娥四号序列降落影像的成像特点及下传约束, 利用近实时下传的高压缩比(1:64)降落影像实现了着陆点的快速初始定位; 利用回放的低压压缩比(1:8)的降落影像实现了着陆点的高精度定位. 为了解决高压压缩比导致原始降落影像的斑块效应, 在匹配定位处理前先对原始影像采用“去块效应”进行预处理增强, 为后续图像匹配奠定基础. 针对序列影像间的尺度与旋转变化特点引入SIFT匹配方法及构建几何映射模型, 并同步完成着陆点位置信息的传递, 有效提升了定位效率. 利用回放的低压压缩比降落影像, 选择序列高分辨率图像进行二次精细定位解算, 有效保证了最终着陆点定位结果的精度及可靠性.

2 探测器动力下降过程分析

嫦娥四号探测器的动力下降过程经历着陆准备段、主减速段、快速调整段、接近段、悬停段、(精)避障段以及缓速下降段共7个阶段^[1,11,14], 由距离月面15 km高度至接触月球表面, 整个过程约为687 s. 利用下传的遥测信息绘制了嫦娥四号探测器动力下降阶段空间位置变换曲线, 如图1所示.

图1 (网络版彩图) Chang'E-4探测器动力下降阶段空间位置变化. (a) 月面高度-时间关系图; (b) 月面高度-航向位移关系图
Figure 1 (Color online) Position of Chang'E-4 during the descent phase with action of thrusts. (a) Lunar height-time; (b) lunar height-heading displacement.

嫦娥四号着陆区为月球背面, 航迹的高度起伏相对于月球正面明显增大且波动明显, 因此需要优化着陆过程中的分段控制目标和导航信息的引入时间, 同时对导航算法进行优化^[11]. 探测器在距离月面高度为 6 km 之后就迅速调整着陆姿态, 运动轨迹改为垂直向下^[11,14]; 同时, 为了增加着陆安全性, 嫦娥四号探测器还采取了接力避障的方式: 即在距离月面高度约为 2 km 时, 探测器首先进行一次光学粗避障; 在距离月面高度为 100 m 左右时, 探测器利用激光敏感器实现精细避障.

同嫦娥三号任务一样, 嫦娥四号探测器底部以垂直向下的视角安装了降落相机, 像幅大小为 1024 像素 $\times$ 1024 像素, 视场角约为 45°^[1]. 动力下降段开始后约 328 s 降落相机开机, 随后开始抽帧下传降落影像数据, 影像分辨率由低至高, 直至探测器着陆月面. 在 1 km $\times$ 1 km 范围内, 降落影像的分辨率优于 1 m/pixel; 在以着陆点为中心的 50 m $\times$ 50 m 范围内, 降落影像的分辨率可达到 0.1 m/pixel^[15]. 在探测器动力下降阶段

采取近实时、抽帧、压缩方式共下传 59 幅 1:64 高压压缩比的降落影像, 这些数据是用于着陆点初始定位的重要数据. 当探测器落月顺利完成两器分离后, 通过回放的方式回传给地面约 5441 幅降落原始影像, 其中 1:8 低压缩比的影像约为 5300 幅, 这些数据是用于着陆点精确定位的主要数据. 图 2(a) 为探测器下传的首幅降落影像, 是 1:64 高压压缩比的近实时影像, 距离月面高度为 3 km 以上; 图 2(b) 为探测器落月后的首幅影像, 图像压缩比为 1:8.

由以上分析可知, 相对于嫦娥三号任务, 嫦娥四号任务在动力下降阶段主要有两方面的变化: 一是下降轨迹; 二是受传输带宽的限制, 降落影像的下传受到诸多限制, 具体见表 1 所示.

3 定位方法

为了兼顾工程任务对着陆点定位的时效性与高精度要求, 本文提出由粗至精的着陆点定位方法, 首先是

图 2 (网络版彩图)地面接收的首幅降落影像和落月后影像. (a) 地面接收到的首幅降落影像(北京时间2019-01-03T10:23:03, 帧号1624); (b) 地面接收到的首幅落月后影像(北京时间2019-01-03T11:44:33, 帧号5416)

Figure 2 (Color online) The first descent and landing image received by the ground. (a) The first descent image (2019-01-03T10:23:03, Beijing time, Frame No. 1624); (b) the first landing image (2019-01-03T11:44:33, Beijing time, Frame No. 5416).

表 1 Chang'E-4和Chang'E-3动力下降阶段的主要状态差异

Table 1 Main differences during the descent phase with action of thrusters between Chang'E-4 and Chang'E-3

变化项	嫦娥四号	嫦娥三号
动力下降轨迹	接近段开始距离月面高度由 6 km 至 100 m	接近段开始距离月面高度由 3 km 至 100 m
	采用垂直下降方式逐步接近着陆区	采用倾斜下降方式逐步接近着陆区
降落图像下传方式	影像压缩比 1:64	影像压缩比 1:8
	约 6~7 s 抽帧下传 1 幅图像	约 5 s 抽帧下传 1 幅图像
	压缩后每幅图像的大小约为 128 K bits	压缩后每幅图像的大小约为 1 M bits

利用动力下降阶段近实时抽帧下传的高压缩比(1:64)降落影像实现着陆点的初始(粗)定位; 其次是利用回放的低压缩比(1:8)降落影像, 通过高分辨率降落影像与着陆区DOM底图匹配来实现着陆点的精确(精)定位, 具体实现流程如图3所示。

如图3所示, 着陆点定位的算法流程主要可以分为以下5个步骤: 首先采用“去块效应”预处理算法对原始图像进行增强处理, 提升图像纹理质量; 再使用序列图像获取的特征点实现着陆点位置的传递计算; 然后挑选其中的中分辨率降落影像, 通过影像特征显著的撞击坑建立该影像与着陆区DOM底图之间的几何映射关系从而实现着陆点的初始定位; 接着利用回放的低压缩比(1:8)降落影像, 挑选分辨率较高的影像, 采用之前类似的处理方法完成着陆点像坐标的初始传递; 最后根据着陆点初始定位结果对着陆区DOM底图进行裁剪, 通过高分辨率降落影像与DOM底图的匹配来实现着陆点的精确定位。

3.1 高压缩比降落影像的增强预处理

高压缩比降落影像在近实时下传过程中, 采用了基于分块的离散余弦变换(BDCT)的压缩技术, 由于没有考虑像素在相邻块中的相关性, 粗糙量化使得相邻块的DCT系数取样落在不同的量化区间, 从而导致在

块边界上产生“块效应”^[16]。为了提升高压缩比降落影像质量, 首先需对其进行图像增强预处理, 总体算法流程如图4所示。

受降落相机安装位置影响, 每幅降落影像中均有一部分固定区域被探测器支架遮挡, 而这部分遮挡区域未包含有效的着陆区纹理信息。基于这个考虑, 首先设计了一个掩模模板对其中的无效区域进行标记; 为了提高图像增强效果, 结合DCT特性及月球表面纹理特征, 将图像分为均匀块和非均匀块; 然后对均匀块使用自适应平滑函数增强, 对非均匀块用Lee提出的Sigma滤波器, 使用 5×5 大小的窗口在需要平滑的区域处理; 最后获得增强后的图像。

3.2 基于降落序列影像的着陆点位置传递

基于降落序列影像的着陆点位置传递流程如图5所示, 使用序列图像进行基于SIFT的特征提取与匹配, 根据得到的特征点集求解降落初帧图像和末帧图像的坐标变换关系, 从而解算着陆点在初帧图像中的像坐标。

序列降落影像(包括高、低压缩比)存在缩放、部分旋转等几何变形, 为获得稳健的匹配结果, 选用SIFT特征提取作为图像仿射不变特征提取方法, 并基于提取的特征实现图像间的高精度匹配。采用关键点特征

图3 嫦娥四号着陆点定位流程图

Figure 3 Flowchart of landing location for Chang'E-4.

图 4 去除块效应的图像增强处理流程

Figure 4 Flowchart of image enhancement to remove block effect.

图 5 基于降落序列影像的着陆点位置传递流程

Figure 5 Flowchart of landing location transfer based on descent sequence images.

向量的欧式距离作为两幅影像关键点的相似性判定度量, 应用中为了获得足够多的特征点, 相似性测度阈值取0.75~0.85. 考虑到探测器着陆点小范围一般地势起伏较为平坦, 本文采用如式(1)的单应变换模型计算相邻影像间的几何关系^[17].

$$\begin{bmatrix} x_{n+1}^k \\ y_{n+1}^k \\ 1 \end{bmatrix} = H_n^{n+1} \begin{bmatrix} x_n^k \\ y_n^k \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (n = 0, 1, \dots, m, \quad 3 \leq k < j), \quad (1)$$

其中, H_n^{n+1} 为单应变换系数, 通常用 $\begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$ 9个

参数来表示, (x_n^k, y_n^k) 及 (x_{n+1}^k, y_{n+1}^k) 分别为相邻降落影像同名特征点的像坐标.

针对相邻影像间SIFT的误匹配, 采用选权迭代法检测匹配的中粗差, 即首先通过式(1)模型计算每一对匹配点的模型残差, 剔除其中不满足残差阈值的点对; 然后, 重复上述步骤, 直至参与计算的所有点对的残差均满足阈值要求; 最后输出粗差剔除后的正确匹配结果进行几何关系计算.

3.3 降落影像与DOM底图的几何关系建立

降落影像与DOM底图影像的成像时间、太阳高度角、太阳方位角均不相同, 这些因素会导致两类影像基于同一目标区域的纹理出现较大差异, 常见的基于特征的匹配算法及基于区域的匹配算法均无法适用. 实际上, 月球表面会布满大大小小的撞击坑, 由于地形凹陷, 这些撞击坑在影像中多会呈现出两侧坑沿明暗对比明显的特点.

基于以上分析, 首先通过降落影像中的撞击坑找到DOM底图上的大致区域, 然后在人工干预下确认4组以上的同名特征点, 最后采用仿射模型求得它们之间的几何关系. 为确保人工干预的准确性, 在实施过程中采取多次实验取平均值的策略.

4 定位结果及分析

嫦娥四号任务执行过程中, 在接收到全部高压压缩比(1:64)影像后约20 min, 通过图像增强处理、序列影像间的匹配及中分辨率降落影像与DOM底图等一系列处理运算, 实现了着陆点的初始定位. 在探测器着陆

后第二天, 接收到低压缩比降落影像后约10 min, 北京航天飞行控制中心利用高分辨率的降落影像与着陆区DOM进行特征匹配, 进一步优化了着陆点的定位结果. 本文中的中分辨率影像指的是距离月面高度为1.0~1.5 km时的降落相机影像, 分辨率为0.8~1.2 m/pixel, 该分辨率同着陆区底图分辨率较接近(约1.0 m/pixel); 高分辨率影像指的是距离月面高度为0.2 km以下时的降落相机影像, 分辨率均高于0.2 m/pixel.

4.1 着陆点初始定位

嫦娥四号任务在动力下降阶段(即北京时间2019年1月3日10时23分03秒至10时29分21秒), 共实时接收到1:64压缩比的降落影像59幅. 其中前27幅为“接近段”至“缓速下降段”的影像, 后32幅均为探测器落月后的影像. 因此, 在任务实施过程中选用前27幅影像进行着陆点的初始定位计算.

4.1.1 高压压缩比影像预处理效果

图6为处理前后的对比效果图. 经过增强处理后, 不仅提高了原始图像的纹理质量, 而且还有效保留了边缘和图像细节, 为后续图像匹配奠定了基础. 采用批处理方式全自动运行, 处理27幅图像的时间约为15 s.

4.1.2 序列影像匹配效果

图7为相邻序列影像的部分匹配情况, 其中图7(a)两幅影像的距离月面高度约为200 m, 图7(b)两幅影像的距离月面高度约为1.6 km. 经过图像增强处理后, 软件能够实现全自动匹配; 基于获得的匹配特征点集建立映射模型并完成着陆点的像坐标传递, 无需人工干预, 处理27幅图像的时间约为2 min.

4.1.3 中分辨率降落影像与DOM的匹配结果

首先根据惯导提供的探测器着陆点概略位置

图6 (网络版彩图)原始图像及增强图像对比图(帧号1754). (a) 原始图像; (b) 原始图像局部细节; (c) 增强后的图像; (d) 增强后图像局部细节

Figure 6 (Color online) Comparison of the original image and the enhanced image (Frame No. 1754). (a) Original image; (b) local details of the original image; (c) enhanced image; (d) local details of the enhanced image.

图7 (网络版彩图)相邻序列影像的SIFT匹配结果. (a) 降落影像(帧号3054-2989)匹配结果, 共44个同名点; (b) 降落影像(帧号2339-2274)匹配结果, 共24个同名点

Figure 7 (Color online) SIFT matching results of adjacent sequence images. (a) Matching result of the descent images (Frame Nos. 3054 and 2989), 44 matched points included; (b) matching result of the descent images (Frame Nos. 2339 and 2274), 24 matched points included.

(177.5°E, 45.5°S)对着陆区DOM底图进行裁剪, 然后选用中分辨率降落影像与裁剪后的DOM图像进行匹配. 为确保匹配正确性, 需人工干预, 处理时间约为15 min. 两幅影像的匹配结果如图8所示, 中分辨率降落影像距离月面高度约为1 km, 图像分辨率约为0.8 m/pixel. 着陆点的初始定位结果为(177.5876°E, 45.4564°S).

4.2 着陆点精确定位

在探测器落月后约15 h, 即北京时间2019年1月04日07时22分至10时37分, 嫦娥四号探测器开始回放低压缩比(1:8)降落影像, 其中约有2600幅图像为探测器动力下降过程的图像, 距离月面高度约为2~3 km, 选用其

中的10幅高分辨降落影像进行着陆点的精确定位.

4.2.1 高分辨率降落影像的最优选择结果

选取探测器缓速下降段的降落影像(帧号3396)作为末帧图像, 距离月面高度约为30 m; 接近段的降落影像(帧号2946)作为初帧图像, 距离月面高度约为200 m. 实验中, 依照50帧的均匀间隔选取接近段至缓速下降段共10幅图像, 相邻图像的成像间隔为5 s, 具体的成像情况见表2所示. 其中成像帧序号、成像时间包含在降落影像的描述文件中, 成像时探测器的星下点经度、星下点纬度、高度信息可根据成像时间由相应的遥测信息对查到. 受传输时延的影响, 这三类信息是个

图 8 (网络版彩图)中分辨率降落影像与裁剪后的DOM图像的匹配结果. (a) 降落影像(帧号2469); (b) 裁剪后的DOM图像(I_{DOM})

Figure 8 (Color online) Matching results of the medium-resolution descent image and the clipped DOM image. (a) Descent image (Frame No. 2469); (b) clipped DOM image (I_{DOM}).

表 2 降落影像成像情况

Table 2 Details of descent images

图像帧号	成像时刻 (北京时间)	星下点经度 (°)	星下点纬度 (°)	距离月面 高度 (m)	图像分辨率 (m/pixel)	着陆点像坐标	
						x	y
3396	2019/01/03 10:25:49	—	—	—	—	512	512
3346	2019/01/03 10:25:44	—	—	—	—	492.95	463.55
3296	2019/01/03 10:25:39	177.5744	-45.4599	146	0.12	487.16	459.04
3246	2019/01/03 10:25:34	—	—	—	—	477.07	473.87
3196	2019/01/03 10:25:29	—	—	—	—	466.01	496.09
3146	2019/01/03 10:25:24	—	—	—	—	456.40	494.75
3096	2019/01/03 10:25:19	—	—	—	—	425.60	526.62
3046	2019/01/03 10:25:14	177.5764	-45.4598	200	0.17	398.73	549.98
2996	2019/01/03 10:25:09	—	—	—	—	393.82	563.82
2946	2019/01/03 10:25:04	—	—	—	—	393.37	554.10

a) “—”项由于无法根据成像时刻从遥测信息中查到相应的信息.

概略值, 与实际情况存在一定偏差. 同时, 由降落相机相关参数及影像距离月面高度, 还可计算求得每幅图像的分辨率.

4.2.2 序列影像匹配效果

相邻图像的部分匹配结果如图9所示, 计算的着陆点在每幅影像中的像坐标见表2右侧两列.

4.2.3 高分辨率降落影像与DOM的匹配结果

根据第4.1节计算出的着陆点初始定位结果对着陆区DOM图像进行更精确范围的裁剪, 然后选用高分辨率降落影像(帧号2946)与裁剪后的DOM图像(记为 I'_{DOM})进行匹配. 本过程需适当人工干预, 为确保同名特征点的准确性, 共进行3组实验, 总处理时间约为5 min. 3组实验的影像匹配结果如图10~12所示, 其中图10(b)~12(b)的圆圈代表着陆点在影像中的位置, 具体的同名点信息见表3. 依据3组实验结果, 取它们的均值作为精确定位结果.

4.3 精度评估

4.3.1 算法理论精度评估

依据第3节所述的着陆点定位实施算法流程及策略可知, 其绝对定位精度主要取决于两个方面: 一是图

像的匹配精度; 二是着陆区底图DOM的制图精度. 其中, 图像匹配的误差主要来源于以下两点.

(1) 着陆点在序列降落影像间的传递误差

着陆点在序列降落影像间的传递误差主要来源于以下两个方面: 一是降落影像间的匹配误差, 基于SIFT算法的相邻影像的匹配精度可控制在传递影像的1个像素^[6,18]; 二是由影像间的传递模型引入, 根据控制点的拟合残差, 精度在亚像素^[18], 本文中取0.3个像素, 假设有 n 幅序列降落影像, 那么模型间的传递误差可表示为 $\sqrt{n-1} \times 0.3$ 个像素. 取传递影像的最大分辨率(即初帧影像)计算, 为0.12 m/pixel, n 取10, 那么, 着陆点在序列影像间的传递误差 a 表示为

$$a = \sqrt{(1 \times 0.12)^2 + (\sqrt{10-1} \times 0.3 \times 0.12)^2} \approx 0.16 \text{ m}. \quad (2)$$

(2) 降落影像与着陆区DOM底图的匹配

记匹配误差为 β , 主要是由人工在降落影像与着陆区DOM底图之间确定同名特征点造成, 难以给出具体的定性指标, 采取多次实验取平均值的方法可将 β 控制在2 pixel. 记底图DOM的分辨率为res, 本文取res为1 m/pixel, 那么降落影像与DOM的匹配误差 $\beta = 2 \times 1 = 2 \text{ m}$.

因此, 图像匹配的精度pre1可表示为

图9 (网络版彩图)部分相邻图像的SIFT匹配结果. (a) 降落影像3396-3346匹配结果, 共59个同名点; (b) 降落影像3296-3246匹配结果, 共495个同名点; (c) 降落影像3146-3096匹配结果, 共555个同名点; (d) 降落影像2996-2946匹配结果, 共871个同名点

Figure 9 (Color online) SIFT matching results of partial adjacent images. (a) Matching result of descent images (Frame Nos. 3396 and 3346), 59 matched points included; (b) matching result of descent images (Frame Nos. 3296 and 3246), 495 matched points included; (c) matching result of descent image (Frame Nos. 3146 and 3096), 555 matched points included; (d) matching result of descent image (Frame Nos. 2996 and 2946), 871 matched points included.

图 10 (网络版彩图)第1组结果—降落影像(帧号2946)与 I'_{DOM} 图像. (a) 原始影像; (b) 局部放大

Figure 10 (Color online) Group 1—descent image (Frame No. 2946) and I'_{DOM} . (a) Original images; (b) local details.

图 11 (网络版彩图)第2组结果—降落影像(帧号2946)与 I'_{DOM} 图像. (a) 原始影像; (b) 局部放大

Figure 11 (Color online) Group 2—descent image (Frame No. 2946) and I'_{DOM} . (a) Original images; (b) local details.

图 12 (网络版彩图)第3组结果—降落影像(帧号2946)与 I'_{DOM} 图像. (a) 原始影像; (b) 局部放大

Figure 12 (Color online) Group 3—descent image (Frame No. 2946) and I'_{DOM} . (a) Original images; (b) local details.

$$\text{pre1} = \sqrt{0.16^2 + 2^2} \approx 2 \text{ m}.$$

另一方面, 就是底图DOM的制图精度, 记为pre2. 其误差主要取决于传感器本身的定位误差, 包括传感器的定轨、定姿以及内方位的测量误差, 据文献[18]介绍, LRO定轨精度约为20 m.

那么本文的绝对定位误差精度pre可表示为

$$\text{pre} = \sqrt{\text{pre1}^2 + \text{pre2}^2} = \sqrt{2^2 + 20^2} \approx 20.1 \text{ m}. \quad (3)$$

需要说明的是, 由于LRO的定轨精度是大量轨道数据的统计精度, 定轨误差会导致每幅LRO NAC影像的定位精度不尽相同; 同时LRO NAC DOM底图的精度还会受到影像传感器姿态精度的影响, 因此式(3)中得到的绝对定位精度仅是一种理想状态下的大致

估计.

4.3.2 定位结果比对

中国科学院遥感与数字地球研究所的研究团队基于嫦娥二号正射影像、LROC NAC DOM、嫦娥四号降落相机及监视相机影像等多源数据, 利用影像特征匹配定位和单像视觉测量定位技术, 确定了嫦娥四号探测器着陆点的位置^[19]; NASA/GSFC/ASU于探测器着陆后, 利用着陆前的1幅LRO NAC影像, 也公布了嫦娥四号探测器着陆点的位置信息^[20]. 这些定位结果与本文定位结果的比对见表4, 可以看出本文的精确定位结果与目前国内外公布的结果的一致性较好, 而初始定位的偏差主要来源于高压压缩比下图像纹理信息的缺失以及抽帧下传方式导致降落序列图像的不连续.

基于探测器着陆点的快速、高精度定位结果, 北

京航天飞行控制中心成功实施了嫦娥四号两器互拍的周期规划, 见图13所示, 其中A点、C'点为两器互拍点, S1点为第1月昼巡视器的休眠点, 底图是用多幅降落影像制作的高分辨率DOM.

5 结论

本文采用计算机视觉方法在高精度图像匹配和几何变换的基础上实现了嫦娥四号探测器着陆点绝对定位. 利用动力下降过程中高压压缩比的降落影像, 在探测器着陆月面后的20 min内实现了着陆点的初始定位; 之后通过回放的低压压缩比降落影像, 进一步精化了着陆点的位置信息. 该结果与目前国内外公布的各类定位结果精度一致, 探测器着陆点的高精度定位结果有效地支持了嫦娥四号后续遥操作任务.

本文的定位方法是相对着陆区底图的结果, 定位

表 3 3组实验的匹配结果

Table 3 Matching results of three groups

点位	影像	第1组		第2组		第3组	
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
同名点1	降落影像	467.24	467.24	483.50	105.34	458.16	176.01
	DOM图像	122.43	122.43	137.76	88.63	133.54	95.49
同名点2	降落影像	224.41	224.41	802.59	596.51	130.84	838.45
	DOM图像	104.89	104.89	173.59	131.88	94.80	152.11
同名点3	降落影像	649.48	649.48	678.57	839.25	319.66	467.88
	DOM图像	135.93	135.93	154.79	151.57	117.78	122.44
同名点4	降落影像	655.88	655.88	323.36	467.24	706.11	808.45
	DOM图像	136.61	136.61	117.16	122.43	158.22	149.49
同名点5	降落影像	839.72	839.72	312.17	655.88	741.40	383.18
	DOM图像	152.13	152.13	115.69	136.61	159.68	113.42
着陆点像坐标		(125.03, 129.69)		(127.58, 128.42)		(125.37, 128.14)	
着陆点地理坐标		(177.58835, -45.45652)		(177.58844, -45.45648)		(177.58836, -45.45647)	

表 4 嫦娥四号着陆点定位结果比对

Table 4 Comparison of Chang'E-4 landing position results

数据	经度 (°)	纬度 (°)	说明
27幅(高压压缩比)降落影像, LRO NAC DOM, CE-2 DOM	177.5876	-45.4564	本文方法, 着陆点初始定位结果
10幅(低压压缩比)降落影像, LRO NAC DOM, CE-2 DOM	177.5884	-45.4565	本文方法, 着陆点精确定位结果
LRO NAC影像M1298916428LR	177.589	-45.457	NASA/GSFC/ASU ^[20]
CE-2 DOM, LRO NAC DOM, 降落影像, 监视相机影像	177.588	-45.457	邸凯昌等, 遥感学报, 2019 ^[19]

图 13 (网络版彩图)嫦娥四号两器互拍段周期规划示意图

Figure 13 (Color online) Schematic diagram of periodic planning for rover and lander mutual-photograph of CE-4.

精度与底图DOM的制图精度密切相关, 下一步将开展月球多源遥感数据的高精度着陆区制图研究, 为基于视觉的着陆点定位方法提供覆盖范围更广、精度更高的制图产品, 同时也能为探测器落月后的路径规划和

安全导航提供基础数据支持. 另外, 由于目前覆盖嫦娥四号着陆区的高精度LRO NAC影像数量还比较少, 随着后期影像数据的累积, 之后还可以开展基于多重覆盖遥感影像的高精度定位研究.

致谢 感谢北京航天飞行控制中心刘磊工程师、卜彦龙工程师为本文写作提供的帮助和支持。

参考文献

- 1 Jia Y Z, Zou Y L, Xue C B, et al. Scientific objectives and payloads of Chang'E-4 mission (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2018, 38: 118–130 [贾瑛卓, 邹永廖, 薛长斌, 等. 嫦娥四号任务科学目标和有效载荷配置. *空间科学学报*, 2018, 38: 118–130]
- 2 Wan W H, Liu Z Q, Liu Y L, et al. Descent image matching based position evaluation for Chang'E-3 landing point (in Chinese). *Space Craft Eng*, 2014, 23: 5–12 [万文辉, 刘召芹, 刘一良, 等. 基于降落图像匹配的嫦娥三号着陆点位置评估. *航天器工程*, 2014, 23: 5–12]
- 3 Jia Y, Liu S C, Li M L, et al. Chang'E-3 system pinpoint landing localization based on descent image sequence (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 1838–1843 [贾阳, 刘少创, 李明磊, 等. 利用降落影像序列实现嫦娥三号系统着陆点高精度定位. *科学通报*, 2014, 59: 1838–1843]
- 4 Liu B, Di K C, Wang B F, et al. Positioning and precision validation of Chang'E-3 lander based on multiple LRO NAC images (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 2750–2757 [刘斌, 邸凯昌, 王保丰, 等. 基于LRO NAC影像的嫦娥三号着陆点高精度定位与精度验证. *科学通报*, 2015, 60: 2750–2757]

- 5 Li J F, Cui W, Baoyin H X. A survey of autonomous navigation for deep space exploration (in Chinese). *Mech Eng*, 2012, 34: 1–9 [李俊峰, 崔文, 宝音贺西. 深空探测自主导航技术综述. *力学与实践*, 2012, 34: 1–9]
- 6 Wu W R, Zhou J L, Wang B F, et al. Key technologies in the teleoperation of Chang'E-3 “Jade Rabbit” rover (in Chinese). *Sci Sin Inf*, 2014, 44: 425–440 [吴伟仁, 周建亮, 王保丰, 等. 嫦娥三号“玉兔号”巡视器遥操作中的关键技术. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44: 425–440]
- 7 Wang J, Wan W H, Zhao H Z, et al. Vision-based positioning method for Chang'E-4 lander (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2019, 25: 12–18 [王稼, 万文辉, 赵焕洲, 等. 基于视觉的嫦娥四号探测器着陆点定位方法. *载人航天*, 2019, 25: 12–18]
- 8 Wagner R V, Robinson M S, Speyerer E J, et al. Locations of anthropogenic sites on the Moon. In: 45th Lunar & Planetary Science Conference. The Woodlands, 2014. 2259
- 9 NASA/GSFC/Arizona State University. NASA Images of Chang'E-3 Landing Site. [2014-01-23]. <http://www.nasa.gov/content/nasa-images-of-change-3-landing-site/>
- 10 Cao J F, Zhang Y, Hu S J, et al. An analysis of precise positioning and accuracy of the CE-3 lunarlander soft landing (in Chinese). *Geom Inform Sci Wuhan Univ*, 2016, 41: 274–278 [曹建峰, 张宇, 胡松杰, 等. 嫦娥三号着陆器精确定位与精度分析. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2016, 41: 274–278]
- 11 Ye P J, Sun Z Z, Zhang H, et al. Mission design of Chang'E-4 probe system (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 1–14 [叶培建, 孙泽洲, 张熹, 等. 嫦娥四号探测器系统任务设计. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49: 1–14]
- 12 Li C L, Liu J J, Ren X, et al. Lunar global high-precision terrain reconstruction based on Chang'E-2 stereo images (in Chinese). *Geom Inform Sci Wuhan Univ*, 2018, 43: 485–495 [李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 基于嫦娥二号立体影像的全月高精度地形重建. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2018, 43: 485–495]
- 13 Robinson M S, Brylow S M, Tschimmel M, et al. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview. *Space Sci Rev*, 2010, 150: 81–124
- 14 Li F, Zhang H, Wu X Y, et al. Influence analysis of terrain of the farside of the moon on soft landing (in Chinese). *J Deep Space Expl*, 2017, 4: 143–149 [李飞, 张熹, 吴学英, 等. 月球背面地形对软着陆探测的影像分析. *深空探测学报*, 2017, 4: 143–149]
- 15 Liu B, Xu B, Liu Z Q, et al. Descending and landing trajectory recovery of Chang'E-3 lander using descent images (in Chinese). *J Remote Sens*, 2014, 18: 981–987 [刘斌, 徐斌, 刘召芹, 等. 基于降落相机图像的嫦娥三号着陆轨迹恢复. *遥感学报*, 2014, 18: 981–987]
- 16 Xie S L, Zhou Z H. A new adapt reduction algorithm of blocking artifacts (in Chinese). *Acta Electron Sin*, 2005, 33: 1897–1900 [谢胜利, 周智恒. 一种自适应消除块效应的新算法. *电子学报*, 2005, 33: 1897–1900]
- 17 Wang J, Peng M, Wan W, et al. Positioning method of Chang'E-4 lander based on multi-source images. In: 69th International Astronautical Congress (IAC), 2018. 4321–4332
- 18 Mazarico E, Rowlands D D, Neumann G A, et al. Orbit determination of the Lunar Reconnaissance Orbiter. *J Geod*, 2012, 86: 193–207
- 19 Di K C, Liu Z Q, Liu B, et al. Chang'E-4 lander localization based on multi-source data (in Chinese). *J Remote Sens*, 2019, 23: 177–184. [邸凯昌, 刘召芹, 刘斌, 等. 多源数据的嫦娥四号着陆点定位. *遥感学报*, 2019, 23: 177–184]
- 20 NASA/GSFC/Arizona State University. Chang'E 4 Lander Coordinates. [2019-01-11]. <http://lroc.sese.asu.edu/posts/1087/>

Vision based Chang'E-4 landing point localization

WANG Jia^{1,2}, WU WeiRen³, LI Jian¹, DI KaiChang⁴, WAN WenHui⁴, XIE JianFeng¹, PENG Man⁴, WANG BaoFeng^{1,2}, LIU Bin⁴, JIA MengNa⁴ & XI LuHua¹ ZHAO Rui¹

¹ Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

² National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China;

³ Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100037, China;

⁴ State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

On December 8, 2018, China launched the Chang'E-4 lunar probe and implemented soft landing and patrol exploration on the lunar farside for the first time. Fast and high-precision positioning of the landing point is a critical step of the mission, and also an important prerequisite for surface operations of the lander and rover. Based on the high-precision image matching and geometric transformation methods, and considering the engineering requirements, the landing point location of the Chang'E-4 lander was initially determined using the near real-time high compression ratio descent sequence images. Then, the position was refined using the replayed low compression ratio descent images, and the landing point position was calculated to be (177.5884°E, 45.4565°S). The landing point localization method and result have been successfully applied to actual engineering tasks for the first time in China, thus providing important support to the topographic analysis of the landing area and mission planning of the follow-up teleoperations.

Chang'E-4, lunar exploration, landing position, descent images

doi: [10.1360/SST-2019-0073](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0073)