0254-6124/2021/41(2)-320–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Jia, XIN Xin, WAN Wenhui, CUI Xiaofeng, RONG Zhifei, YOU Yi, HE Ximing. Location and accuracy validation of lunar landing point based on multi-source images (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(2): 320-328. DOI:10.11728/cjss2021.02.320

基于多源影像的探测器月面着陆点定位与精度验证 *

王 镓[1] 辛 鑫[2] 万文辉[2] 崔晓峰[1]
荣志飞[1] 游 祎[1] 何锡明[1]

1(北京航天飞行控制中心 北京 100094)

2(中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室 北京 100101)

摘 要 探测器月面着陆点高精度定位是探测器着陆的重要技术环节, 也是地外天体探测器开展各项工作的重要前提. 本文基于多源图像数据, 利用图像特征匹配和多重覆盖影像定位技术, 设计了探测器月面着陆点高精度定位方法, 并使用嫦娥三号任务相关影像进行了定位实验与精度验证. 在高精度图像匹配和几何变换的基础上, 降落相机序列影像间的匹配精度达到子像素, LRO NAC 影像与中分辨率降落图像的匹配精度优于 1 pixel, 最终解算的嫦娥三号探测器着陆点坐标为 (44.1196°N, 19.5148°W). 本文方法综合利用了多源图像数据, 不完全依靠着陆区 DOM 底图的制图精度, 是对影像与 DOM 底图配准定位结果的进一步精化, 在未来的月球着陆探测任务中具有应用价值.

关键词 多源影像, 着陆点定位, 降落影像, LRO NAC, 特征匹配

中图分类号 V 529

Location and Accuracy Validation of Lunar Landing Point Based on Multi-source Images

WANG Jia[1] XIN Xin[2] WAN Wenhui[2] CUI Xiaofeng[1]
RONG Zhifei[1] YOU Yi[1] HE Ximing[1]

1(*Beijing Aerospace Control Center, Beijing* 100094)

2(*State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101)

Abstract High-precision positioning of the landing site is a critical step in the mission and an important prerequisite for surface operations of the lander and rover. In this paper, a high-precision positioning method of the landing site was designed based on image feature matching and multiple image localization methods. And the positioning experiment and accuracy validation were carried out in Chang'E-3 landing site. On the basis of high-precision image matching and geometric transformation, the matching precision between the sequent descent images reached sub-pixel, and the matching

* 国家自然科学基金项目资助 (41771488)
2019-11-18 收到原稿, 2020-10-20 收到修定稿
E-mail: 15210106156@139.com. 通信作者 辛鑫, E-mail: xinxin@tcu.edu.cn

accuracy between LRO NAC image and medium-resolution descent image was better than 1 pixel. The landing position was calculated to be (44.1196°N, 19.5148°W). This method comprehensively utilized multi-source images, and didn't entirely depend on the mapping accuracy of the landing base map. It was a further refinement of the matching results between the images and landing base map. So, this high-precision positioning method can be applied in future deep space exploration missions.

Key words Multi-source image, Landing site location, Descent image, LRO NAC, Feature matching

0 引言

探测器月面着陆点的高精度定位是建立巡视器工作坐标系的重要依据, 能够为着陆区地形分析和巡视探测的任务规划及科学探测提供位置信息和基础数据, 是地外天体探测器开展各项工作的重要前提 [1−3].

基于视觉图像的着陆定位技术在月球、行星、小行星和彗星的着陆与采样返回任务中均得到了应用. 基于嫦娥三号任务的图像数据, 已有研究进行了着陆点精确定位, 其方法包括以下 4 种: (1) 利用图像特征匹配和几何变换方法, 将降落相机影像与着陆区数字正射影像 (Digital Ortho Map, DOM) 进行匹配来完成着陆点的位置解算 [4,5]; (2) 基于月球勘测轨道飞行器 (Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO) 携带的窄角相机 (Narrow Angle Camera, NAC) 影像, 待探测器着陆月面后, 调整 LRO 探测器再次对着陆区成像, 利用 LRO NAC 影像恢复出着陆区三维地形, 进而求解着陆点的位置 [6]; (3) 使用类似的数据源, 仅依靠着陆前后的 LRO NAC 影像, 通过对比的手段确定着陆点的精确位置 [7]; (4) 通过着陆后的 LRO NAC 影像定位着陆器, 再利用着陆区多重覆盖 LRO NAC 影像的单像测图技术实现着陆点位置的精确评估 [8]. 可以看出, 方法 1 实时性较高, 但定位精度依赖于着陆区 DOM 的制图精度; 方法 2∼4 的定位精度与使用的 LRO NAC 影像分辨率相关, 不依赖于着陆区 DOM 底图的制图精度, 同时通过多重观测能够消除一定的偶然误差从而保证定位精度, 但是其具有一定局限性, 需要等待着陆器着陆月面后, LRO 飞越着陆点上方并获取相关图像.

本文结合探测器月面着陆的下降过程特点, 在分析现有多源图像数据成像特点的基础上, 利用图像特征匹配和多重覆盖影像定位技术, 设计了探测器月面着陆点高精度定位方法. 针对序列降落图像间的尺度与旋转变化特点引入尺度不变特征变换 (Scale-Invariant Feature Transform, SIFT) 匹配方法并构建映射模型, 同步完成着陆点位置的传递. 这种方法在定位解算中无需再使用遥感影像的严密或通用成像几何模型进行定位解算, 简化了文献 [4], [8] 的方法流程. 基于分辨率较高的 LRO NAC 影像, 利用其正射影像进行多重观测, 有效地保证了着陆点定位结果的精度及可靠性.

1 数据

中国已成功实施的两次月面软着陆任务 (嫦娥三号、四号) 在探测器底部均安装了降落相机. 动力下降开始后不久降落相机将开机, 在着陆过程中能够获取分辨率由低到高的序列图像数据, 直至探测器着陆月面, 降落相机关机. 所获取的降落相机图像不仅可以连续反映探测器落月过程中月球表面的变化范围, 还可以实时监视探测器的降落过程, 并且影像重叠度比较高, 是基于影像的探测器着陆定位的重要数据源.

着陆区大范围、高分辨率 DOM 是基于影像的探测器月面着陆点定位的参考基准. 本文选取 LRO NAC 影像制作的嫦娥三号着陆区 DOM 数据作为粗定位的底图数据, 该数据通过行星数据系统 (Planetary Data System, PDS) 网站 * 获得, 分辨率为 1.6 m·pixel^{-1}, 图幅大小为 11 171 pixel× 47 903 pixel. 需要指出的是, 本文方法选取的 DOM 底图并不局限于 LRO NAC 影像制作的 DOM 数据, 当该影像无法覆盖着陆点时, 可选取目前覆盖全月、分辨率最高的嫦娥二号 DOM 数据 [9].

*http://ode.rsl.wustl.edu/moon/

LRO NAC 是目前在轨飞行的对月成像分辨率最高、定位最精确的传感器, 其分辨率最高可以达到 0.5 m·pixel^{-1}[10]. 截至目前, LRO NAC 共对嫦娥三号着陆点进行 44 次覆盖, 对嫦娥四号着陆点进行 8 次覆盖.

2 定位方法

基于多源影像的探测器月面着陆点定位方法主要分为两个步骤: (1) 利用探测器下传的降落相机序列图像与着陆区 DOM 底图进行匹配, 求解着陆点的初始位置信息; (2) 将中分辨率的降落图像 (与 LRO NAC 影像分辨率相当) 与多幅覆盖着陆区的 LRO NAC 图像进行匹配, 再结合着陆区的高程信息, 最终实现着陆点的精确定位, 如图 1 所示.

着陆点精确位置确定又可以分为 4 步: (1) 利用降落相机序列图像进行特征提取与匹配, 求解着陆点在中分辨率降落图像中的像坐标; (2) 将中分辨率降落图像与着陆区 DOM 底图进行匹配, 求解着陆点的初始位置; (3) 检索所有覆盖该位置的 LRO NAC 影像并对其进行正射校正, 将中分辨率降落图像与每一幅校正后的 LRO NAC 影像进行匹配, 由匹配结果计算出着陆点的位置信息; (4) 对多次计算结果求取平均值, 作为探测器着陆点的精确定位结果.

2.1 利用图像特征匹配技术实现着陆点粗定位

基于序列降落影像的成像特点, 采用 SIFT 算子 [11,12] 对序列图像进行特征提取与匹配, 根据得到的匹配特征点集实现着陆点位置的传递, 求解着陆点在中分辨率降落图像中的像坐标. 针对影像间的误匹配, 采用选权迭代法检测匹配的中粗差 [13].

基于影像的撞击坑特征, 确定其在 DOM 底图上的大致区域, 在人工干预下确认 4 组以上同名特征点; 采用仿射模型求得降落影像 (中分辨率) 与着陆区 DOM 底图之间的几何关系, 实现着陆点的粗定

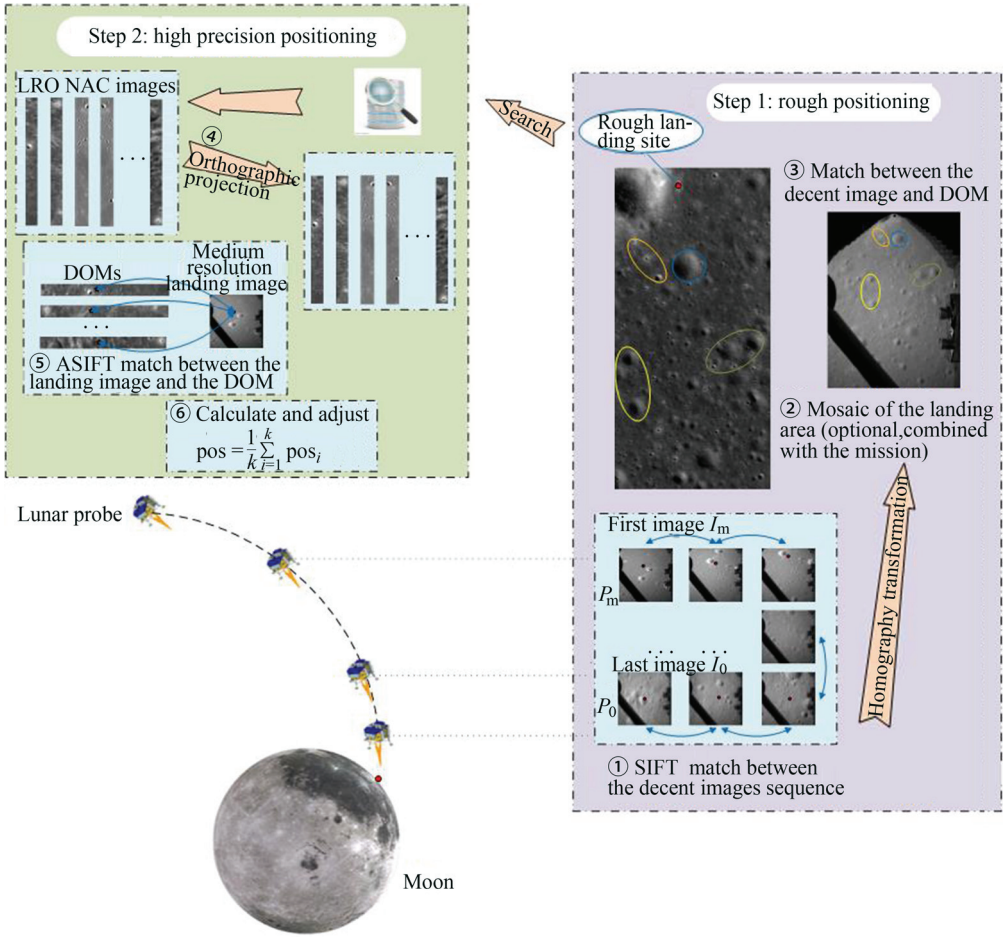

图 1 着陆点定位方法

Fig. 1 Landing position method

位. 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.

在进行降落影像与 DOM 底图匹配的过程中, 还可以结合具体的任务特点, 将变分辨率的降落序列图像进行拼接, 扩大图像数据区域范围, 提高图像匹配的成功率.

2.2 利用有理函数模型实现 LRO NAC 影像正射校正

LRO 窄角相机为线阵推扫式成像, 采用有理函数模型 RFM (Rational Function Model) 作为其严格成像几何模型的替代, 拟合精度在像方可以达到 0.01 pixel[14]. 这里采用了包含 78 个参数 (即有理函数系数 RPC, Rational Function Coefficient) 的三阶多项式有理函数模型, 有

$$\begin{aligned} r_n =&\big[(1\ X_n\ Y_n\ Z_n\ \cdots\ Y_n\ Z_n^2\ Z_n^3)\cdot\\ &(a_0\ a_1\ a_2\ \cdots\ a_{19})^{\mathrm{T}}\big]\cdot\\ &\big[(1\ X_n\ Y_n\ Z_n\ \cdots\ Y_n\ Z_n^2\ Z_n^3)\cdot\\ &(1\ b_1\ b_2\ \cdots\ b_{19})^{\mathrm{T}}\big]^{-1},\\ c_n =&\big[(1\ X_n\ Y_n\ Z_n\ \cdots\ Y_n\ Z_n^2\ Z_n^3)\cdot\\ &(c_0\ c_1\ c_2\ \cdots\ c_{19})^{\mathrm{T}}\big]\cdot\\ &\big[(1\ X_n\ Y_n\ Z_n\ \cdots\ Y_n\ Z_n^2\ Z_n^3)\cdot\\ &(1\ d_1\ d_2\ \cdots\ d_{19})^{\mathrm{T}}\big]^{-1}. \end{aligned} \tag{1}$$

对每幅 LRO NAC 影像建立有理函数模型的过程即是通过对严格几何模型 RSM (Rigorous Sensor Model) 的拟合求解 RPC 的过程. 首先根据 LRO NAC 影像和严格几何模型 RSM (Rigorous Sensor Model) 生成大量虚拟控制点, 即把影像区域的高程分成若干个高程面, 在像方以一定间距生成影像的格网点坐标作为像方虚拟控制点; 然后根据严格几何模型将格网点影像坐标投影到各个高程面上得到物方虚拟控制点.

LRO NAC 影像的 RSM 可由共线方程表达, 即

$$\begin{bmatrix} X-X_{\mathrm{s}} \\ Y-Y_{\mathrm{s}} \\ Z-Z_{\mathrm{s}} \end{bmatrix} = \lambda \boldsymbol{R}_{\mathrm{op}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{bo}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{ib}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \boldsymbol{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}. \tag{2}$$

式中: f 为焦距, (x,y) 为像点的焦平面坐标, 可通过查阅 LRO IK 文件的内方位参数 (IO) 由畸变模型计算获得; (X,Y,Z) 为对应的物方点在星固坐标系的坐标, $(X_{\mathrm{s}},Y_{\mathrm{s}},Z_{\mathrm{s}})$ 为摄影中心在星固坐标系中的坐标; $\boldsymbol{R}_{\mathrm{ib}}$ 为像空间坐标系到轨道器本体坐标系的旋转矩阵; $\boldsymbol{R}_{\mathrm{bo}}$ 为轨道器本体坐标系到轨道坐标系的旋转矩阵; $\boldsymbol{R}_{\mathrm{op}}$ 为轨道坐标系到星固坐标系的旋转矩阵; λ 为比例因子; $\boldsymbol{R}$ 为像空间坐标系到星固坐标系总的旋转矩阵. 旋转矩阵可以根据 SPICE kernel 中的 SPK (星历数据) 和 CK (姿态数据) 文件得到, 期间要经过从惯性坐标系到星固坐标系的转换, 以上参数均视为已知. 得到这些大量的虚拟控制点对后, 可以通过最小二乘方法解算该幅影像的 RPC 系数.

在 DEM 的辅助下, 根据建立的 LRO NAC 成像几何模型, 求解每个像点坐标对应的大地坐标即可完成影像的正射校正.

以上处理过程不涉及图像匹配, 坐标系转换误差可忽略不计, 影像定位误差主要取决于传感器本身定位误差, 包括传感器的定轨、定姿以及内方位的测量误差, 约为 20 m[15].

3 实验结果及分析

选用嫦娥三号任务动力下降段的降落相机序列图像数据、虹湾地区 DOM 影像及相关的 LRO NAC 影像进行了嫦娥三号探测器着陆点定位实验. 经解算, 嫦娥三号探测器着陆点位置信息为 (44.1196°N, 19.5148°W).

3.1 粗定位结果

嫦娥三号动力下降段轨迹倾斜向下, 采用拼接方法能够有效扩大图像的数据区域范围, 如图 2 和 3 所示.

33 幅降落相机镶嵌影像的图幅为 397 pixel×508 pixel, 分辨率约为 1.5 m·pixel^{-1}. 考虑到镶嵌影像的面积占比不到 DOM 影像的 1%, 实验中首先根据惯导提供的概略位置对原始 DOM 图像进行裁剪. 图 3 给出了两幅影像的匹配情况, 解算出的初始着陆点位置为 (19.513°W, 44.119°N).

3.2 精定位结果

由于粗定位过程采用着陆区的 DOM 作为定位底图, 其定位精度除受图像匹配的影响外, 还取决于 DOM 的制图精度, 而在 DOM 制作过程中也会引入匹配误差等. 因此本文根据解算出的粗定位结果, 通过 PDS 网站下载涵盖该信息的多景 EDR 级 NAC 影像, 对每景影像分别进行匹配解算, 通过定位结果

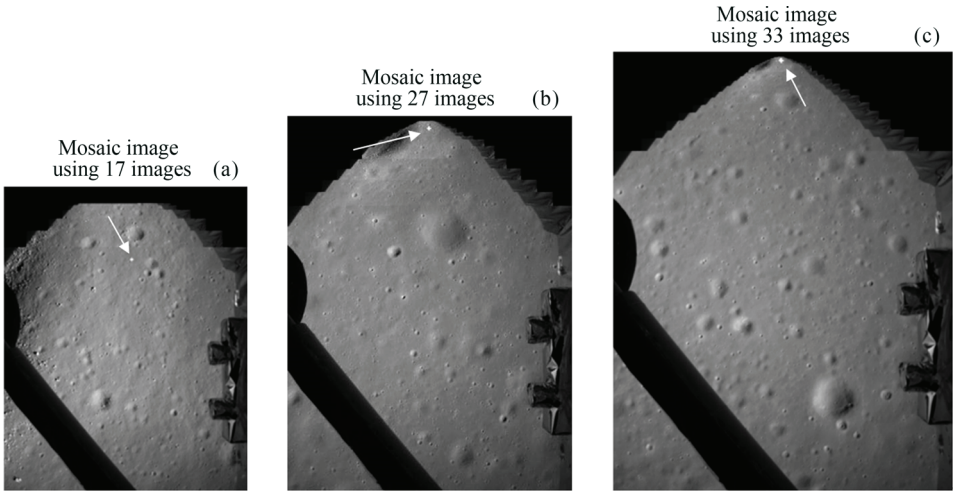

图 2 降落相机图像拼接 (镶嵌) 结果 (箭头标识的白色十字叉代表着陆点在该幅拼接图像中的位置)

Fig. 2 Resultant mosaic of the landing area (The white cross marked by the arrow represents the position of the landing site in the mosaic image)

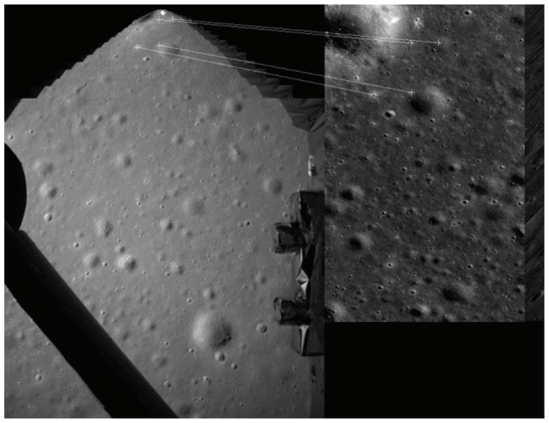

图 3 拼接图像与 DOM 影像的匹配

Fig. 3 Matching result between the mosaic image and the DOM

取平均的方式来消除定位的偶然误差, 实现着陆点的精确定位. 考虑图像亮度不能太暗, 在检索时将太阳高度角的范围限制为 0°∼80°, 截至 2018 年 8 月 22 日, 满足条件的影像共 36 幅, 图像具体信息列于表 1. 由表 1 可以看出, NAC 影像的分辨率较高, 平均约为 1.5 m·pixel^{-1}.

下载其 EDR 级数据, 依照 2.2 节的方法对各 EDR 级 NAC 原始影像进行正射校正; 实验选用的 DEM 为 SLDEM2015[16], 通过 PDS 网站下载. NAC 影像的图幅大小为 5064 pixel×52 224 pixel, 直接参与匹配会影响运算速度, 因此根据粗定位结果对正射影像进行裁剪, 这些影像的缩略结果如图 4 所示.

因成像时间、轨道高度等差异, 影像受光照影响较大, 给图像的自动匹配造成很大难度. 依据现有经验, 目前 Affine-SIFT (ASIFT) 算法 [17] 可较好地适应不同光照条件的图像自动匹配, 本文使用的匹配方法由网络开源 ASIFT 匹配代码实现 *[18]. 考虑到同等分辨率的影像进行自动匹配的成功率更高, 选取中分辨率的降落图像与 NAC 正射影像进行匹配. 该降落图像的图幅大小为 1024 pixel×1024 pixel, 分辨率约为 1.8 m·pixel^{-1}.

影像 M1145007448RE 和 M1147368335RE 分辨率较低, 不利于后续匹配处理, 实验中不作选用, 在图 4 中以蓝色方框标识. 影像 M1123733573LE, M1142582775LE, M1147268724LE, M1147290066LE 以及 M1243808548RE (见图 4 中以黄色标记的 5 幅影像) 不包含着陆点, 因此实验中也不选用. 将剩余的 29 幅影像分别与中分辨率降落图像匹配运算. 经实验发现, 只有与降落影像光照方向相同的 NAC 影像才能自动匹配得到同名特征点, 见图 4 中 5 幅标记红色方框的影像, 具体为 M1152001999RE, M1154358210RE, M1200241207LE, M1200241207RE 以及 M1259058367LE, 其与中分辨率降落影像的匹配情况依次如图 5∼9 所示.

根据单应变换公式, 由匹配的同名特征点可以计

*http://demo.ipol.im/demo/my_affine_sift/

表 1 实验选用的 LROC NAC 影像成像情况

Table 1 LROC NAC imaging

序号	影像名称	入射角/(°)	发射角/(°)	分辨率/(m·pixel^{-1})	中心纬度/(°)	中心经度/(°)
1	M1116664800RE	1.23	44.83	1.098	44.61	340.432
2	M1123733573LE	1.77	74.51	1.465	42.855	340.537
3	M1127248516LE	1.78	75.54	1.519	44.495	340.136
4	M1129602407LE	1.78	58.88	1.519	44.385	340.446
5	M1142554338LE	34.72	73.87	1.755	44.63	340.35
6	M1142568554LE	18.41	75.24	1.54	44.4	340.41
7	M1142582775LE	0.85	76.52	1.47	3 44.39	340.232
8	M1142596997RE	21.27	78.17	1.559	44.37	340.6
9	M1144922100LE	20.18	56.49	1.554	44.36	340.48
10	M1144929211LE	11.19	57.06	1.497	44.37	340.465
11	M1144936321LE	1.79	57.62	1.475	44.37	340.43
12	M1144943432LE	7.96	58.21	1.488	44.375	340.429
13	M1144950543LE	17.16	58.78	1.544	44.37	340.4
14	M1145007448RE	63.04	64.25	2.983	44.755	340.961
15	M1147268724LE	31.69	44.27	1.702	44.39	340.276
16	M1147290066LE	5.04	45.01	1.484	44.405	340.327
17	M1147290066RE	2.06	45.09	1.48	44.4	340.67
18	M1147304295RE	16.97	45.64	1.531	44.38	340.65
19	M1147368335RE	66	49.46	3.487	44.707	341.392
20	M1149645693RE	4.41	45.0	1.483	44.41	340.38
21	M1152001999RE	1.2	56.56	1.357	44.0	340.59
22	M1154358210RE	1.2	74.52	1.447	44.2	340.46
23	M1157862508LE	5.04	75.16	1.446	44.07	340.48
24	M1160218845LE	1.78	58.47	1.445	44.05	340.57
25	M1162575180RE	1.2	47.51	1.448	44.41	340.6
26	M1164923253RE	8.87	46.83	1.465	44.36	340.5
27	M1164930369RE	0.38	46.63	1.451	44.37	340.4
28	M1164944600RE	19.37	46.23	1.534	44.37	340.33
29	M1180251193RE	15.32	45.39	1.443	44.235	340.41
30	M1200241207LE	1.77	75.33	1.358	44.11	340.63
31	M1200241207RE	1.19	75.54	1.355	44.095	340.334
32	M1243808548RE	1.19	60.96	1.233	44.275	340.5207
33	M1254353205LE	1.75	44.93	1.107	43.8802	340.5387
34	M1259058367LE	1.75	63.21	1.136	44.1302	340.4388
35	M181302794LE	1.78	71.7	1.568	43.42	340.488
36	M183661683LE	1.78	54.12	1.569	44.33	340.339

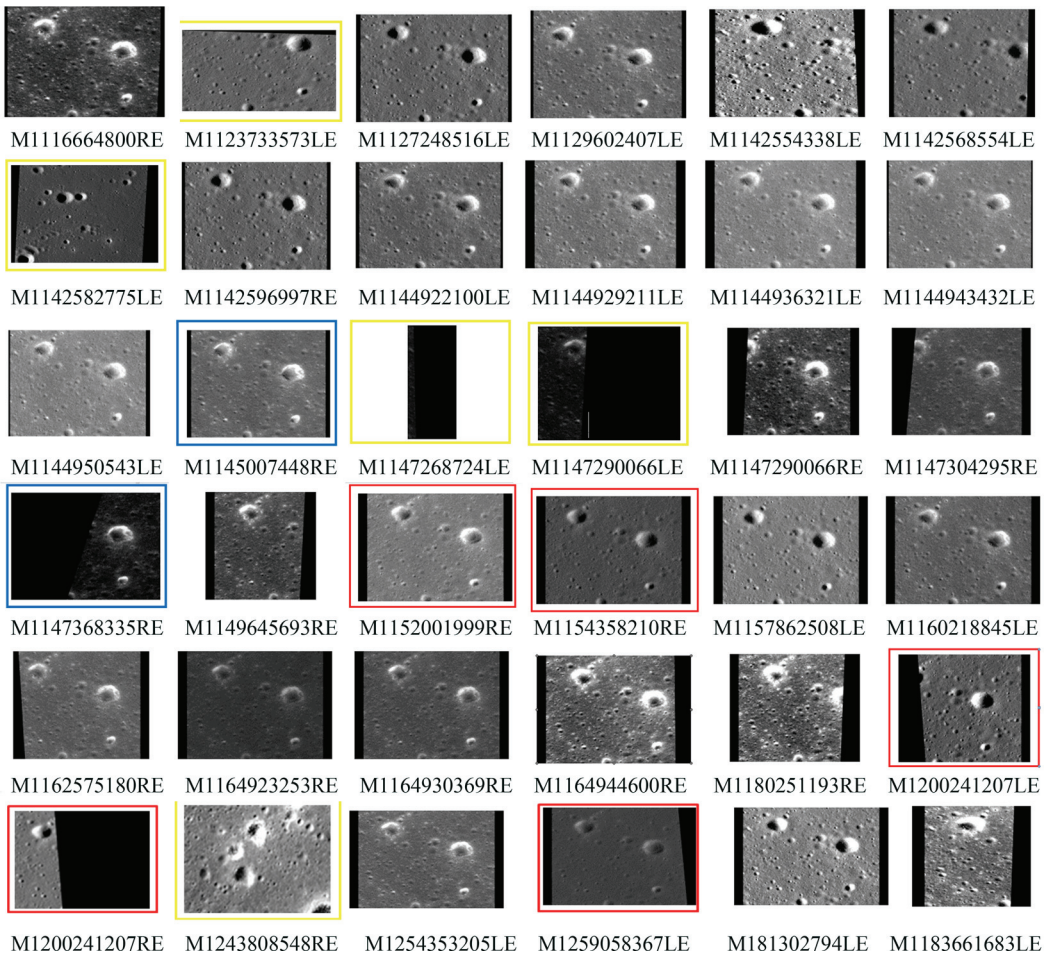

图 4 裁剪后的 LRO NAC 正射影像缩略结果

Fig. 4 Thumbnail of the tailored LRO NAC DOM

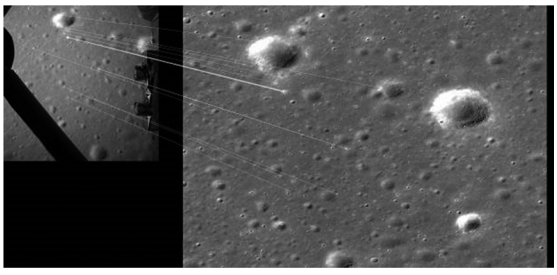

图 5 与 M1152001999RE 影像的匹配 (共 18 个点)

Fig. 5 Matching with M1152001999RE, 18 homonyms

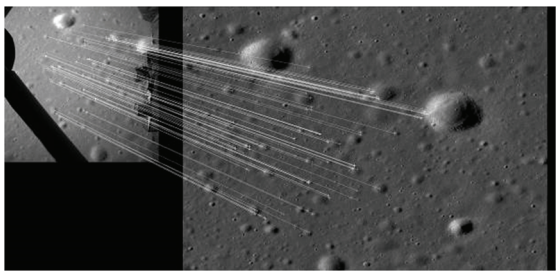

图 6 与 M1154358210RE 影像的匹配 (共 115 个点)

Fig. 6 Matching with M1154358210RE, 115 homonyms

算中分辨率降落图像与 LROC NAC 影像的单应变换参数, 从而精确求解着陆点在每幅影像中的地理坐标, 具体结果列于表 2.

3.3 结果比对分析

目前, 已有相关研究团队利用嫦娥三号图像数据进行了定位实验, 各方法与本文定位结果的对比列于表 3.

表 3 中结果 1~4 均是基于 LRO NAC 影像, 结果 2~3 的一致性较好, 结果 4 由于最后进行了平差处理, 因而与结果 2 和 3 略有不同. 结果 5 和 6 都是基于降落图像与嫦娥三号着陆区 DOM 底图进行配准定位的, 定位精度与 DOM 底图的制图精度密切相关; 由于使用的数据源类似, 因此精度相当. 本文着

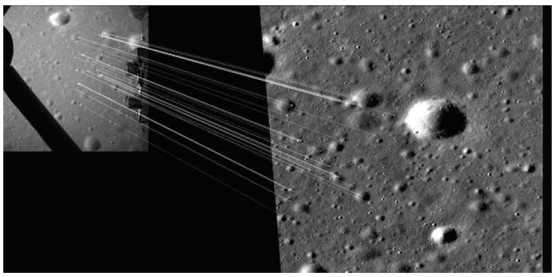

图 7　与 M1200241207LE 影像的匹配 (共 53 个点)

Fig. 7　Matching with M1200241207LE, 53 homonyms

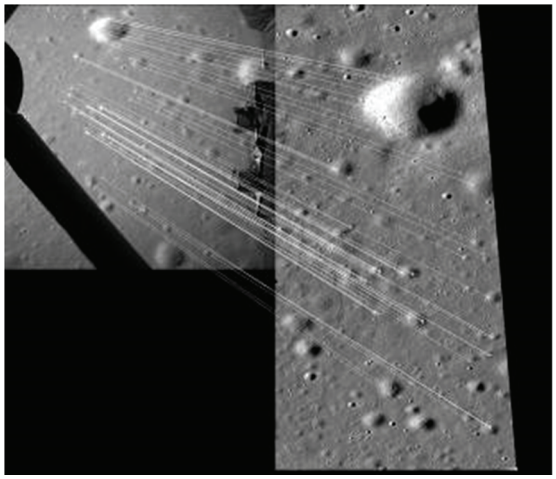

图 8　与 M1200241207RE 影像的匹配 (共 75 个点)

Fig. 8　Matching with M1200241207RE, 75 homonyms

陆点的像坐标是通过降落影像间的特征匹配传递获得的, 其传递误差可控制在 0.4 m (以 10 幅影像计)[1]; 最终的定位结果取的是多重 LRO NAC 影像定位的均值, 一定程度上消除了偶然误差.

4　结论

本文基于多源图像数据, 结合探测器月面着陆特点, 设计了着陆点高精度定位方法. 通过动力下降的序列降落图像与着陆区 DOM 匹配, 实现着陆点的粗定位; 将中分辨率降落图像与覆盖着陆区的 LRO NAC 影像进行匹配, 通过重复观测进一步优化了着陆点的位置信息. 使用嫦娥三号任务相关影像开展

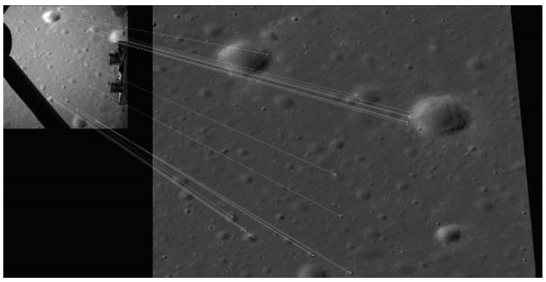

图 9　与 M1259058367LE 影像的匹配 (共 21 个点)

Fig. 9　Matching with M1200241207RE, 21 homonyms

表 2　单应变换参数及定位结果

Table 2　Uniform transformation parameters and positioning results

影像名称	单应变换参数									着陆点地理坐标	
	$p[0]$	$p[1]$	$p[2]$	$p[3]$	$p[4]$	$p[5]$	$p[6]$	$p[7]$	$p[8]$	经度/(°)	纬度/(°)
M1152001999RE	2.47	0.52	−217.8	0.08	2.52	79.79	0.000 055	0.000 523	1.00	−19.511 286	44.121 183
M1154358210RE	2.38	0.51	−252.6	0.01	2.52	112.08	−0.000 012	0.000 542	1.00	−19.514 429	44.121 080
M1200241207LE	2.51	0.49	−324.1	−0.02	2.69	185.62	−0.000 030	0.000 526	1.00	−19.516 744	44.115 557
M1200241207RE	2.61	0.44	−536.5	0.03	2.80	143.05	0.000 004	0.000 574	1.00	−19.518 481	44.119 002
M1259058367LE	3.23	0.64	−330.2	0.11	3.30	101.08	0.000 033	0.000 513	1.00	−19.513 006	44.120 923

表 3　嫦娥三号着陆点定位结果比对

Table 3　Positioning statistics of landing point of Chang'E-3 probe

数据	经度/(°)	纬度/(°)	说明
降落影像、虹湾地区 DOM、正射校正的多幅 LRO NAC 影像	−19.5148	44.1196	结果 1, 本文方法
着陆后 1 幅 LRO NAC 影像	−19.5116	44.1214	结果 2, 文献 [6] 方法
着陆前后 5 幅 LRO NAC 影像	−19.5115	44.1213	结果 3, 文献 [7] 方法
着陆前后 14 幅 LRO NAC 影像	−19.5113	44.1219	结果 4, 文献 [8] 方法
降落影像和 Chang'E-2 DOM	−19.5125	44.1189	结果 5, 文献 [4] 方法
降落影像、导航影像及 Chang'E-2 DOM	−19.5126	44.1188	结果 6, 文献 [5] 方法

了定位实验与精度验证, 最终解算出的着陆点位置信息为 (44.1196°N, 19.5148°W), 与目前已公布的各类定位结果精度一致.

该方法综合利用了多源图像数据, 但不完全依靠着陆区 DOM 底图的制图精度, 是对影像与 DOM 底图配准定位结果的进一步精化, 在未来的月球着陆探测任务中具有应用价值. 另外, 由于目前覆盖嫦娥四号着陆区的 LRO NAC 影像数量较少, 随着后期数据的累积, 可以利用该方法对嫦娥四号着陆点的定位结果进行验证分析.

参考文献

[1] WANG Jia, WU Weiren, LI Jian, *et al.* Vision based Chang'E-4 landing point localization [J]. *Sci. Sin. Tech.*, 2020, **50**: 41-53 (王镓, 吴伟仁, 李剑, 等. 基于视觉的嫦娥四号探测器着陆点定位 [J]. 中国科学: 技术科学, 2020, **50**: 41-53)

[2] DI Kaichang, LIU Zhaoqin, LIU Bin, *et al.* Chang'E-4 lander localization based on multi-source data [J]. *J. Remote Sens.*, 2019, **23**(1): 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 [J]. 遥感学报, 2019, **23**(1): 177-184)

[3] LIU Jianjun, REN Xin, YAN Wei, *et al.* Descent trajectory reconstruction and landing site positioning of Chang'E-4 on the lunar farside [J]. *Nature Commun.*, 2019, **10**(1): 4229

[4] WAN Wenhui, LIU Zhaoqin, LIU Yiliang, *et al.* Descent image matching based position evaluation for Chang'E-3 landing point [J]. *Spacecraft Eng.*, 2014, **23**(4): 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 [J]. 航天器工程, 2014, **23**(4): 5-12)

[5] JIA Yang, LIU Shaochuang, LI Minglei, *et al.* Chang'E-3 system pinpoint landing localization based on descent image sequence [J]. *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 [J]. 科学通报, 2014, **59**: 1838-1843)

[6] NASA Images of Chang'E-3 Landing Site [EB/OL]. NASA/GSFC/Arizona State University. [2014-01-23]. http://www.nasa.gov/content/nasa-images-of-change-3-landing-site/

[7] WAGNER R V, ROBINSON M S, SPEYERER E J, *et al.* Locations of anthropogenic sites on the Moon [C]//45th Lunar & Planetary Science Conference. The Woodlands, Texas: Universities Space Research Association, 2014: 225

[8] LIU Bin, DI Kaichang, WANG Baofeng, *et al.* Positioning and precision validation of Chang'E-3 Lander based on multiple LRO NAC images [J]. *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 [J]. 科学通报, 2015, **60**: 2750-2757)

[9] LI CHunlai, LIU Jianjun, REN Xin, *et al.* Lunar Global High-precision terrain reconstruction based on Chang'E-2 stereo images [J]. *Geomat. Inform. Sci. Wuhan Univ.*, 2018, **43**(4): 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 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2018, **43**(4): 485-495)

[10] ROBINSON M S, BRYLOW S M, TSCHIMMEL M, *et al.* Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview [J]. *Space Sci. Rev.*, 2010, **150**(1/2/3/4): 81-124

[11] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]//Proceeding of the International Conference on Computer Vision, Kerkyra: IEEE, 1999

[12] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *Int. J. Comput. Vision*, 2004, **60**(2): 91-110

[13] WANG Jia, WAN Wenhui, ZHAO Huanzhou, *et al.* Vision-based positioning method for Chang'E-4 lander [J]. *Man. Spaceflight*, 2019, **25**(1): 12-18 (王镓, 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 [J]. 载人航天, 2019, **25**(1): 12-18)

[14] XIN Xin. Research on Matching of Obiter Imagery and Digital Elevation Model [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019 (辛鑫, 月球轨道器影像与高程数据匹配方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019)

[15] MAZARICO E, ROWLANDS D D, NEUMANN G A, *et al.* Orbit determination of the lunar reconnaissance orbiter [J]. *J. Geod.*, 2012, **86**(3): 193-207

[16] BARKER M K, MAZARICO E, NEUMANN G A, *et al.* A new lunar digital elevation model from the lunar orbiter laser altimeter and SELENE terrain camera [J]. *Icarus*, 2016, **273**: 346-355

[17] MOREL J M, YU G. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison [J]. *SIAM J. Imag. Sci.*, 2009, **2**(2): 438-469

[18] YU G, MOREL J M. ASIFT: an algorithm for fully affine invariant comparison [J]. *Image Proc. Line*, 2011, **1**: 11-38