



天问一号火星探测器着陆点快速精确定位

鄢咏折^{1,2}, 张建利³, 亓晨⁴, 温博³, 吴运佳^{1,2}, 彭松³, 马友青¹, 金晟毅³, 张烁¹, 张天翼⁵, 田鹤⁵, 贾阳^{3*}, 刘少创^{1*}

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

4. 武汉大学测绘学院, 武汉 430072;

5. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 长春 130025

* 联系人, E-mail: jiayangdoc@sohu.com; liusc@radi.ac.cn

2021-06-07 收稿, 2021-10-28 修回, 2021-11-02 接受, 2021-11-03 网络版发表

国家自然科学基金(42071447)资助

摘要 为实现天问一号着陆点快速精确定位, 规划火星车行驶路径, 并将火星车后续数据纳入统一的地理坐标系, 本研究利用着陆初期有限数据(天问一号环绕器获取的遥感影像、一幅悬停避障缓速下降阶段的GNC(guidance, navigation and control)避障敏感器拍摄的降落影像和导航相机在着陆平台的环拍立体像对)完成定位任务. 首先, 通过导航相机的环拍影像生成着陆点周围陨石坑、沙丘、火山口、山梁之间的拓扑关系. 然后, 以根据环绕器的遥感影像生成的数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)为底图, 将导航相机生成的陨石坑、沙丘、火山口、山梁之间的拓扑关系与底图预着陆区的陨石坑、沙丘、火山口、山梁之间的拓扑关系进行模糊匹配, 以确定疑似着陆点, 并结合降落影像在疑似着陆点中确定着陆点的粗略位置. 最后, 根据导航相机影像多像空间后方交会解算着陆点的精确位置为109.925°E, 25.066°N.

关键词 天问一号火星探测器, 着陆点快速定位, 拓扑关系的模糊匹配, 多像空间后方交会

2021年5月15日上午7时18分, 天问一号着陆巡视器成功降落火星. 我国成为继美国之后第二个成功登陆火星的国家. 根据降落轨道数据分析预估着陆点位置为109.908°E, 25.083°N, 但因采用降落伞着陆的方式, 着陆过程中会受风力等不可预估的外力影响, 仍需要根据着陆前后的影像进行火星探测器着陆点的精确定位, 以便规划火星车行驶路径, 并将后续的遥测数据纳入一个统一的地理坐标系中. 嫦娥三号和嫦娥四号巡视器同样进行了着陆点定位的工作. Wu等人^[1]与贾阳等人^[2]通过美国月球勘测轨道器(lunar reconnaissance orbiter, LRO)窄角相机图像和1.5 m分辨率的嫦

娥二号卫星图像进行着陆区的地形重建, 并与降落影像进行匹配, 完成了嫦娥三号月球车着陆点定位的任务; 在嫦娥四号任务中, 生成着陆点附近区域的数字高程模型(digital elevation model, DEM)和数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM), 并在此基础上进行了陨石坑和岩石的精细尺度分析^[3]. 万文辉等人^[4]基于序列降落影像上的撞击坑, 与嫦娥二号卫星底图上的撞击坑进行匹配, 完成了嫦娥四号巡视器着陆点定位的任务. Di等人^[5]提出, 将降落影像与遥感影像制作的DOM进行SIFT(scale-invariant feature transform)影像匹配, 进而实现火星探测器着陆点定位, 但SIFT影像匹配

引用格式: 鄢咏折, 张建利, 亓晨, 等. 天问一号火星探测器着陆点快速精确定位. 科学通报, 2022, 67: 204–211

Yan Y Z, Zhang J L, Qi C, et al. Fast and precise localization of Tianwen-1 Mars rover landing site (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 204–211, doi: 10.1360/TB-2021-0541

受光照方向影响较大,对待匹配影像和底图光照一致性要求较高。Wei等人^[6]也探讨了根据线特征匹配进行火星探测器着陆点定位的方法,但该方法要求降落影像的覆盖范围较大,需提取足够的线特征进行匹配。

因为火星离地球的距离远远大于月球离地球的距离,数据传输效率较低,无法像月球一样快速接收大量的影像作为着陆点定位依据,根据天问一号任务需求确定影像传输优先级后,着陆初期接收的降落影像仅有一幅,且为了进行着陆点精确定位,影像高度较低,影像覆盖范围较小。基于两点:仅一幅降落影像;降落影像覆盖范围小,以上着陆点定位方法在天问一号火星探测器着陆点快速定位时不适用。本研究基于着陆点立体导航相机的环拍影像和遥感影像制作的DOM,进行了火星探测器着陆点快速定位,确定了疑似着陆点,并使用覆盖范围较小的一幅降落影像进行核验,确定了着陆点的粗略位置,作为多像空间后方交会的初始值。最后,结合环绕器遥感影像制作的DEM,通过多像空间后方交会法解算着陆点的精确位置。

1 着陆点快速精确定位方法

1.1 数据分析

截至2021年5月22日,天问一号火星探测器预着陆区的国内影像数据有:(1)环绕器在椭圆轨道上获取的推扫式遥感影像,经过数据处理后生产出带有地理坐标信息的正射影像产品及数字高程产品;(2)着陆平台在悬停避障与缓速下降阶段获取的一幅降落影像;(3)着陆后,火星车立体导航相机在着陆平台上获取俯仰角接近水平(约 -5°)的12对环拍立体像对。天问一号火星探测器预着陆区的国外影像数据有火星勘测轨道飞行器(Mars reconnaissance orbiter, MRO)影像。具体参数如表1。

美国MRO影像、环绕器DOM和DEM具有地理坐标信息,都可以作为火星探测器着陆点定位底图,但MRO影像分辨率较环绕器DOM低,所以选择环绕器DOM和DEM作为火星探测器着陆点定位底图。降落影像分辨率小,能获取细节信息,但覆盖范围太小,适合用于火星探测器着陆点定位的核准。环拍立体像对与降落影像相比,视野范围更大,同时,立体像对进行空间前方交会可以解算同名特征点在火星车本体系下的三维坐标,并且根据多像空间后方交会可以解算火星车位置,适合用于火星探测器着陆点的精确定位。

1.2 定位方法

根据表1,降落影像的覆盖范围过小,仅依靠其纹理信息难以确定着陆点位置,需要有更大范围的特征描述确定着陆点粗略位置。导航相机在着陆平台上的环拍影像摄影中心位置较高,主光轴方向接近水平,视场范围更远,所以根据导航相机的环拍影像能获取更大范围的特征描述,即着陆点周围陨石坑、沙丘、火山口、山梁等地貌之间的拓扑关系。图1为火星探测器着陆点快速精确定位的流程,具体步骤如下。

(1) 导航立体相机标定^[7,8],确定导航立体相机的左右相机内参(相机焦距、像主点像点坐标)和左右相机外参(左右相机相对位置关系,即旋转矩阵与平移变量)。

(2) 在环绕器遥感影像制作的DOM上,以预估着陆点为圆心、20 km为半径的圆作为预着陆区,在预着陆区范围内提取陨石坑、沙丘、火山口、山梁等地貌,并生成拓扑关系图。特别是火山口,因地形较高,即使着陆点离其较远,仍能在导航相机的环拍影像中成像。步骤(1)与(2)在导航相机的环拍影像和降落影像接收前完成。

(3) 根据步骤(1)中的导航相机标定参数和导航相

表 1 着陆点相关数据

Table 1 Data of the landing site

数据类型	分辨率	波段	影像覆盖范围
环绕器DOM	0.7 m	全色	覆盖整个着陆区
环绕器DEM	3.5 m	无	覆盖整个着陆区
降落影像	约0.05 m	全色	约100 m×100 m
环拍立体像对	相机主距为2394 pixel, 像幅为2048 pixel×2048 pixel	彩色 (红、绿、蓝)	最远能覆盖到约1.6 km的火山口
MRO影像	约5.6 m	全色	覆盖整个着陆区

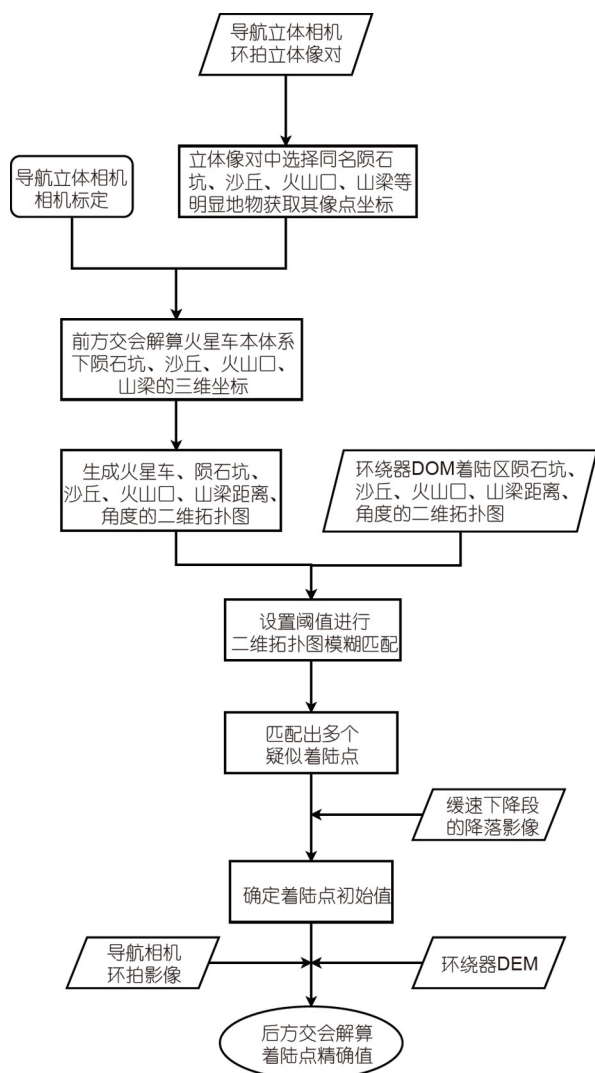


图1 火星探测器着陆点快速精确定位流程图

Figure 1 Flow chart of the Mars rover's rapid and precise landing position

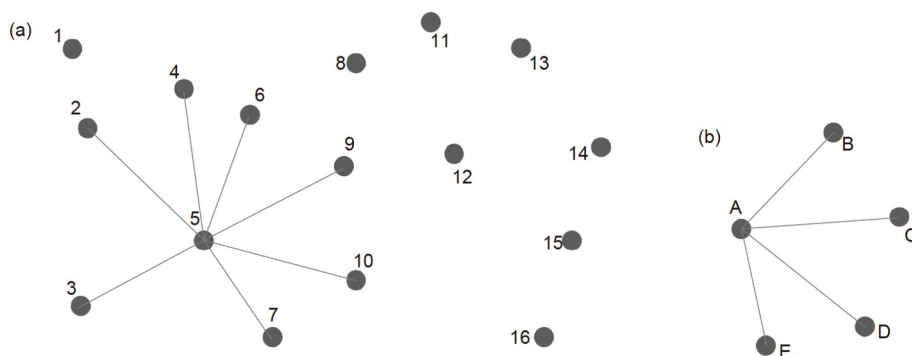


图2 拓扑关系模糊匹配方法示意图。(a) 以特征5为种子点的底图拓扑关系(步骤2); (b) 以特征A为种子点的待匹配拓扑关系(步骤3)

Figure 2 Schematic diagram of the fuzzy matching method of the topological relationship. (a) Basemap topological relationship with 5 as a seed (step 2); (b) map-matching topological relationship with A as a seed (step 3)

机的立体像对中的同名像点(选取陨石坑、沙丘、火山口、山梁等特征地貌)进行空间前方交会^[9,10], 解算出陨石坑、沙丘、火山口、山梁等地貌在火星车本体体系下的三维点坐标, 并去掉高程信息, 生成陨石坑、沙丘、火山口、山梁等地貌的二维拓扑关系。

(4) 将步骤(3)生成的拓扑关系与步骤(2)的底图拓扑关系进行模糊配准^[11,12]。具体方法以图2举例说明。在底图上依次以每一个特征为种子点, 以不大于待匹配拓扑关系中的最远距离为限, 生成种子点与其他任意两个特征间距离-角度-距离的匹配因子, 如图2(a)为以特征5为种子点生成的距离-角度-距离的匹配因子示意图。由导航立体相机空间前方交会出陨石坑、沙丘、火山口、山梁等地貌的三维坐标, 去掉高程信息后, 以每一个特征为种子点, 生成种子点与其他任意两个特征间距离-角度-距离的匹配因子, 如图2(b)为以特征A为种子点生成的距离-角度-距离的匹配因子示意图。将特征5与特征A的匹配因子逐一比较, 当两者接近的匹配因子数量占特征A匹配因子总数的比例超过给定阈值时, 即认为特征5与特征A匹配。

(5) 步骤(4)在底图环绕器DOM上可以匹配出多对特征关系, 因待匹配拓扑关系的坐标系为火星车本体系, 其原点(0,0)即为火星车位置。将其映射到底图环绕器DOM上, 进而选出多个疑似着陆点, 根据降落影像确定其中一个疑似着陆点为着陆点粗略值。

(6) 通过环绕器DEM和DOM获取着陆点粗略位置周边陨石坑、沙丘、火山口、山梁等地貌的三维坐标, 根据导航相机360°环拍影像进行多像空间后方交会^[13,14]。如图3所示, 分别解算出左右导航相机在环绕器DOM投影坐标系下的位置及姿态, 误差方程如

式(1)^[10]:

$$V = AX - L, \quad (1)$$

其中,

$$V = [v_{x_i}^j \ v_{y_i}^j]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{i11}^j & a_{i12}^j & a_{i13}^j & a_{i14}^j & a_{i15}^j & a_{i16}^j \\ a_{i21}^j & a_{i22}^j & a_{i23}^j & a_{i24}^j & a_{i25}^j & a_{i26}^j \end{bmatrix},$$

$$X = [\Delta X_s^j \ \Delta Y_s^j \ \Delta Z_s^j \ \Delta \varphi^j \ \Delta \omega^j \ \Delta \kappa^j],$$

$$L = [x_i^j - (x_i^j) \ y_i^j - (y_i^j)]^T,$$

V 代表像点坐标 (x_i, y_i) 的改正数矩阵; A 代表系数矩阵, 即关于未知数 X_s^j 、 Y_s^j 、 Z_s^j 、 φ^j 、 ω^j 、 κ^j 的偏导数; X 代表摄影中心位置及姿态, 即求解的未知数; L 代表像点观测坐标与计算值差值的矩阵; j 表示第 j 张影像; i 表示第 j 张影像上的第 i 个特征点. 每张影像至少需要3个特征点, 即可通过最小二乘法求解未知数 X_s^j 、 Y_s^j 、 Z_s^j 、 φ^j 、 ω^j 、 κ^j . 因导航立体相机位于云台上, 环拍时云台绕桅杆旋转 360° , 所以桅杆精确定位为 $\left(\text{average}\left(\frac{X_{s\text{左}}^j + X_{s\text{右}}^j}{2}\right), \text{average}\left(\frac{Y_{s\text{左}}^j + Y_{s\text{右}}^j}{2}\right)\right)$, 最后根据火星车中心与桅杆的位置关系完成火星探测器着陆点的精确定位.

2 着陆点快速精确定位结果

将导航相机中的陨石坑、沙丘、火山口、山梁等

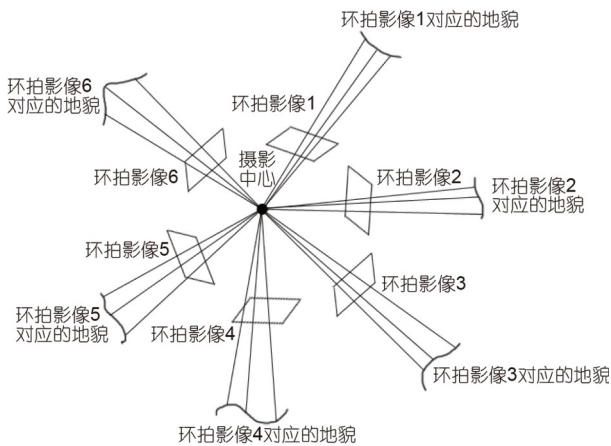


图3 多像空间后方交会示意图

Figure 3 Schematic diagram of the multi-image space resection

特征地貌间的拓扑关系与底图(环绕器DOM的预着陆区)的陨石坑、沙丘、火山口、山梁等特征地貌间的拓扑关系进行模糊匹配, 并结合降落影像确定火星探测器着陆点的粗略位置. 根据导航相机环拍立体像对提取了2个火山口、1个陨石坑、2个沙丘、1个山梁共6处特征地貌, 通过空间前方交会解算它们在火星车本体下的三维坐标, 去掉高程信息后生成二维拓扑关系, 将其与底图特征地貌的拓扑关系进行模糊匹配, 在底图上匹配出相应的特征地貌, 如图4所示. 天问一号火星探测器着陆点粗略位置周围的陨石坑、沙丘、火山口、山梁等特征地貌在火星车导航相机影像拼接的全景图上与在环绕器DOM上的对应关系如图5. 图6为降落影像在环绕器DOM上的落图, 即确定火星探测器着陆点的粗略位置.

最后, 根据导航相机多像空间后方交会精确解算

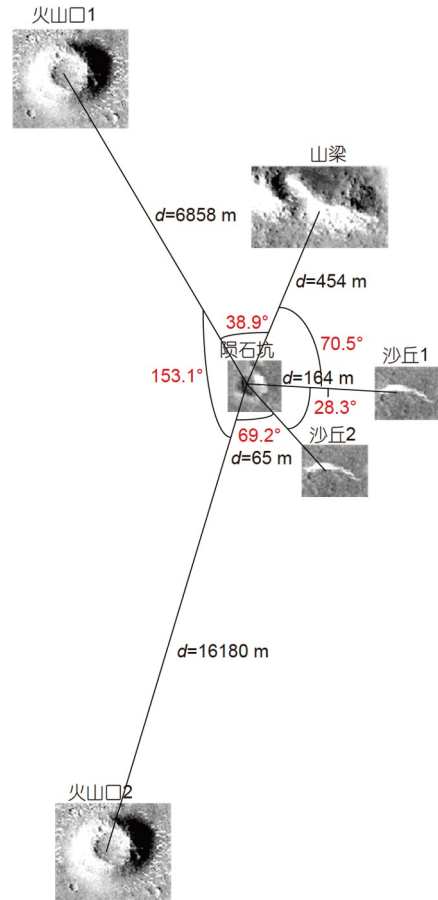


图4 (网络版彩色)陨石坑、沙丘、火山口、山梁等特征地貌的拓扑关系示意图

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of the topological relationship of features such as craters, sand dunes, volcanic vents, and hill ridges

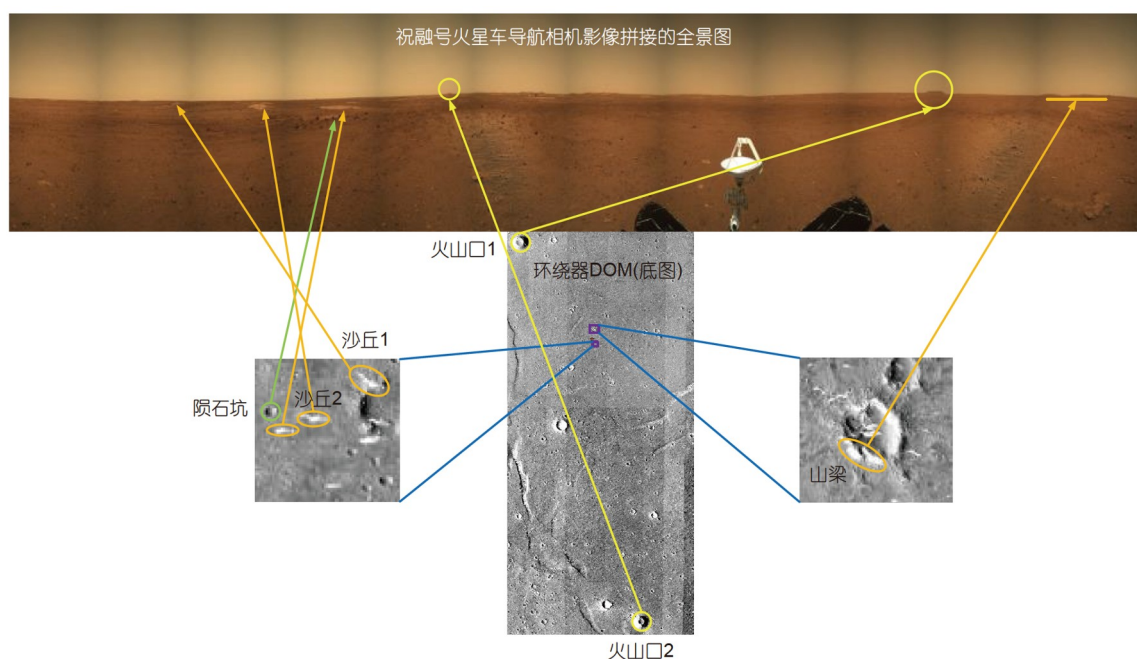


图5 (网络版彩色)导航相机影像拼接的全景图与环绕器DOM特征地貌对应关系

Figure 5 (Color online) Correspondence between the features in the navigation cameras' mosaic image and the orbiter DOM

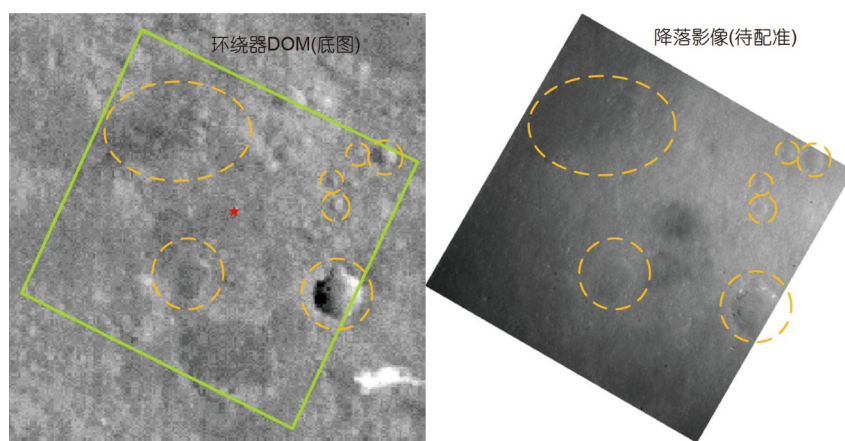


图6 (网络版彩色)天问一号火星探测器着陆点粗略位置在环绕器DOM上的落图及与降落影像的对应关系。方框为降落影像在环绕器DOM上的范围, 虚线圈为对应的特征地形

Figure 6 (Color online) Correspondence between Tianwen-1 Mars rover's rough landing site on the orbiter DOM and the descent image. The box shows the range of the descent image on the orbiter DOM, and the dashed circles are the corresponding features

火星探测器着陆点的投影坐标, 反投影到火星惯性坐标系下, 经纬度为 109.925°E , 25.066°N , 如图7所示。

3 着陆点定位结果验证

美国时间2021年6月6日, 美国MRO的HiRISE相机拍摄到天问一号着陆平台和祝融号火星车的影像。因HiRISE影像与我国火星环绕器DOM的投影参数不同,

主要是中央子午线不同, 所以HiRISE影像与我国火星环绕器DOM有偏差。消除偏差后, 将着陆点定位结果与HiRISE影像上的着陆平台成像进行比较, 如图8所示, 经量测, 定位误差约为3 m。

4 结论

因着陆初期接收的可用于火星探测器着陆点定位

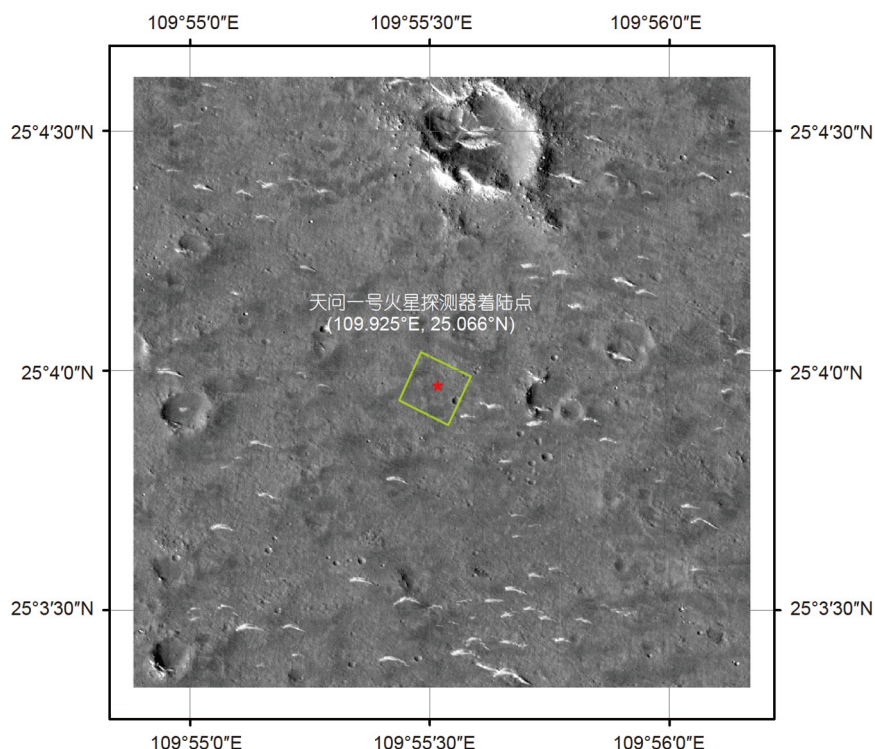


图7 天问一号火星探测器着陆点的精确定位结果. 方框为降落影像的范围

Figure 7 Tianwen-1 Mars rover's precise landing location. The box shows the range of the descent image

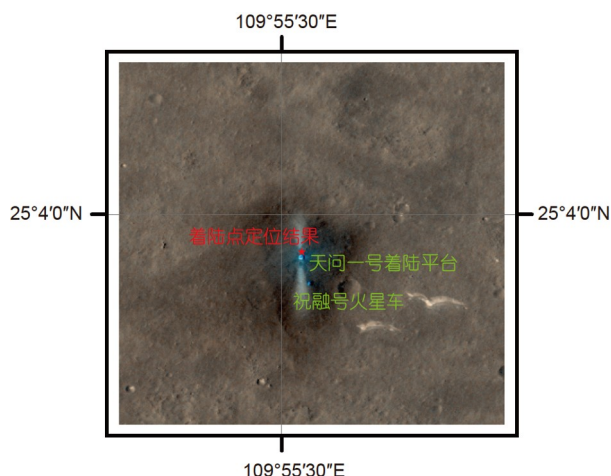


图8 着陆点定位结果与HiRISE影像上的着陆平台成像的比较.

★为着陆点定位结果, 大亮斑为着陆平台成像, 小亮斑为火星车成像
Figure 8 Comparison of landing positioning results with landing platform on HiRISE image. ★ stands for the result of the landing location, the large bright spot is the image of the landing platform, and the small bright spot is the image of the rover

的数据较少, 为了在现有数据基础上尽快完成着陆点精确定位, 本文提出了一种火星探测器着陆点快速精确定位的方法, 以环绕器DOM为底图, 环绕器DEM提供特征点高程信息, 辅以一幅覆盖范围小的降落影像, 最终通过导航相机的环拍影像进行多像空间后方交会从而实现着陆点定位. 该方法根据较大范围的拓扑关系模糊匹配确定多个疑似着陆点, 很好地解决了仅基于影像匹配的不同光照方向引起的误匹配问题, 而且具有旋转不变性, 保障了定位结果的准确性. 约半个月后, 天问一号着陆平台在美国MRO的HiRISE影像中的成像验证了本研究方法着陆点定位结果的精度. 另外, 在时效性方面, 作为底图的DOM获取时间早于降落影像与导航相机环拍影像的获取时间, 可以提前完成对预着陆区的陨石坑、沙丘、火山口、山梁等特征地貌的提取并生成拓扑关系, 能有效节省火星探测器着陆后着陆点定位的时间.

参考文献

- 1 Wu B, Li F, Ye L, et al. Topographic modeling and analysis of the landing site of Chang'E-3 on the Moon. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 405: 257–

273

- 2 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]
- 3 Wu B, Li Y, Liu W C, et al. Centimeter-resolution topographic modeling and fine-scale analysis of craters and rocks at the Chang'E-4 landing site. *Earth Planet Sci Lett*, 2021, 553: 116666
- 4 Wan W H, Liu Z Q, Liu Y L, et al. Location assessment of Chang'E-3 landing site based on descent image matching (in Chinese). *Spacecr Eng*, 2014, 23: 5–12 [王文辉, 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]
- 5 Di K, Liu Z, Yue Z. Mars rover localization based on feature matching between ground and orbital imagery. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2011, 77: 781–791
- 6 Shao W, Cao L, Guo W, et al. Visual navigation algorithm based on line geomorphic feature matching for Mars landing. *Acta Astronaut*, 2020, 173: 383–391
- 7 Li C Y, Wang L, Lu X, et al. A calibration method of binocular stereo vision camera (in Chinese). *Aerosp Control Appl*, 2010, 36: 51–54 [李春艳, 王立, 卢欣, 等. 一种双目立体视觉相机标定方法. *空间控制技术与应用*, 2010, 36: 51–54]
- 8 Tan X J, Yu Z, Li J. An improved calibration method of stereo camera (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2006, 35: 138–142 [谭晓军, 余志, 李军. 一种改进的立体摄像机标定方法. *测绘学报*, 2006, 35: 138–142]
- 9 Zhang Z X, Zhang J Q. *Digital Photogrammetry* (in Chinese). Wuhan: Wuhan University Press, 2012. 55–59 [张祖勋, 张剑清. *数字摄影测量学*. 武汉: 武汉大学出版社, 2012. 55–59]
- 10 Zhang J Q, Pan L, Wang S G. *Photogrammetry* (in Chinese). Wuhan: Wuhan University Press, 2006. 17–33 [张剑清, 潘励, 王树根. *摄影测量学*. 武汉: 武汉大学出版社, 2006. 17–33]
- 11 Yang X Y, Huang S G. Map matching algorithm based on topological structure/adaptive fuzzy decision (in Chinese). *J Shanghai Jiao Tong Univ*, 2004, 38: 1389–1393 [杨新勇, 黄圣国. 基于拓扑结构/自适应模糊决策的地图匹配算法. *上海交通大学学报*, 2004, 38: 1389–1393]
- 12 Ye Y Q, Wan B, Chen B. A fuzzy matching algorithm of surface and entity based on the similarity of components related regions (in Chinese). *Earth Sci*, 2010, 35: 385–390 [叶亚琴, 万波, 陈波. 基于成分关联区域相似度的面实体模糊匹配算法. *地球科学*, 2010, 35: 385–390]
- 13 Wang D, Feng W H, Lu X S, et al. CCD camera calibration based on multi-slice space resection (in Chinese). *Sci Surv Mapp*, 2006, 31: 64–66 [王冬, 冯文灏, 卢秀山, 等. 基于多片空间后方交会的CCD相机检校. *测绘科学*, 2006, 31: 64–66]
- 14 Chang H M, Li H. Research on multi-site close-range photogrammetry system (in Chinese). *J Test Meas Technol*, 2014, 28: 360–363 [常何民, 李华. 多站点近景摄影测量系统研究. *测试技术学报*, 2014, 28: 360–363]

Summary for “天问一号火星探测器着陆点快速精确定位”

Fast and precise localization of Tianwen-1 Mars rover landing site

Yongzhe Yan^{1,2}, Jianli Zhang³, Chen Qi⁴, Bo Wen³, Yunjia Wu^{1,2}, Song Peng³, Youqing Ma¹, Shengyi Jin³, Shuo Zhang¹, Tianyi Zhang⁵, He Tian⁵, Yang Jia^{3*} & Shaochuang Liu^{1*}

¹ Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

⁴ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

⁵ School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

* Corresponding authors, E-mail: jiayangdoc@sohu.com; liusc@radi.ac.cn

At 7:18 on May 15, 2021, Beijing time, more than 9 months after the launch of China's first Mars exploration mission Tianwen-1, the lander successfully landed in the pre-selected landing area in the southern Utopia Plain of Mars. The overall terrain in this area is relatively flat, making it easier for the Tianwen-1 lander to land safely, but there are still scattered obstacles such as craters, sand dunes, and ridges. Therefore, the Tianwen-1 lander still needs to be accurately located, in order to plan the path of the rover, preventing the rover from overturning due to obstructive terrain. Besides, incorporating the follow-up data of the rover into the unified Martian geographic coordinate system also needs the accurate landing site. The location of the landing site can be estimated according to the lander's landing orbit data, however, due to the parachute landing method, the error of the estimated location is large, so the image obtained after the landing of the Tianwen-1 lander should be used to accurately locate the landing site.

Mars is far away from the Earth, and data transmission channel is limited. After the Tianwen-1 landed, the relevant image data received until May 22, 2021 only had the following three types of data: Remote sensing images obtained by the orbiter, a descent image during hovering obstacle avoidance and slow descent phase, and the ring-shot stereo image pairs of the Mars rover's navigation camera on the landing platform after landing. In order to locate the landing site of the Mars rover as soon as possible, this article proposes a precise positioning method based on the above limited data. At first, using the digital orthophoto map (DOM) generated by the orbiter remote sensing image as the base map, extract the craters, sand dunes, craters and ridges in the pre-selected landing area, and calculate the topological relationship between them. In addition, the topological relationship between the crater, sand dune, crater and ridge around the landing site is also calculated based on the ring-shot stereo image pair of the navigation camera. The second step is to perform fuzzy matching between the topological relationship of the feature geomorphology calculated by the navigation camera's ring-shooting stereo pair and the topological relationship of the feature geomorphology extracted from the DOM of the orbiter remote sensing image to obtain several suspected landing sites, and then to determine one of them as the initial position of the landing site based on the descent image during the hovering obstacle avoidance and slow descent phase obtained near the landing site. Finally, through the multi-image space resection of the navigation camera images, the precise position of the landing site is calculated as (109.925°E, 25.066°N). This method makes full use of the limited data at the initial stage of the landing, and realizes the first-time positioning of the Tianwen-1 lander's landing site. It has strong timeliness and ensures the safe movement of the rover.

On June 6, 2021, U.S. time, the HiRISE camera on the Mars reconnaissance orbiter (MRO) captured high-resolution remote sensing images of the Tianwen-1 lander and the Mars rover. The position of the Tianwen-1 lander on the image is the same as that in this article, which further verifies the accuracy of the positioning method.

Tianwen-1 Mars rover, fast localization of landing point, fuzzy match based on topological relationship, resection based on multiple images

doi: [10.1360/TB-2021-0541](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0541)