

# 基于降落图像匹配的嫦娥三号着陆点位置评估

万文辉<sup>1</sup> 刘召芹<sup>1</sup> 刘一良<sup>1</sup> 刘斌<sup>1</sup> 邱凯昌<sup>1</sup>

周建亮<sup>2</sup> 王保丰<sup>2</sup> 刘传凯<sup>2</sup> 王镓<sup>2</sup>

(1 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, 北京 100101)

(2 北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

**摘要** 提出了一种应用着陆器降落相机序列图像和嫦娥二号数字正射影像(DOM)的嫦娥三号着陆点位置评估方法。以高分辨率降落图像上的着陆器位置为基础,通过降落序列图像间的尺度不变特征转换(SIFT)匹配,计算序列图像间的几何转换参数,完成着陆器在低分辨率降落图像上的定位。并通过提取降落图像与嫦娥二号 DOM 影像上的撞击坑,实现图像间的匹配与几何转换参数的计算,最终得到着陆器在嫦娥二号 DOM 影像上的位置。通过对比美国“月球勘测轨道器”(LRO)拍摄到的着陆器真实位置,验证了定位方法的有效性,其定位精度在 DOM 影像 1 个像素以内。

**关键词** 嫦娥三号着陆器;降落相机图像;嫦娥二号卫星图像;图像匹配;撞击坑提取;“月球勘测轨道器”影像

中图分类号:V474.3 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1673-8748.2014.04.002

## Descent Image Matching Based Position Evaluation for Chang'e-3 Landing Point

WAN Wenhui<sup>1</sup> LIU Zhaoqin<sup>1</sup> LIU Yiliang<sup>1</sup> LIU Bin<sup>1</sup> DI Kaichang<sup>1</sup>

ZHOU Jianliang<sup>2</sup> WANG Baofeng<sup>2</sup> LIU Chuankai<sup>2</sup> WANG Jia<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and

Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2 Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** This paper proposes position precision evaluation method of Chang'e-3 landing point based on descent sequence images and Chang'e-2 DOM(Digital Orthoimage Map). Firstly, the landing position of Chang'e-3 is manually determined on the descent image with highest resolution, and then transferred to other descent images by the geometry relationship established through SIFT matching among descent images. Secondly, lunar crater extraction method, implemented by mean-shift image segmentation, is applied to the registration of low resolution descent image and Chang'e-2 DOM. Consequently, the landing position is transferred to Chang'e-2 DOM. The localization accuracy is higher than a pixel of Chang'e-2 DOM, and is verified by the landing position observed by the LRO image.

**Key words:** Chang'e-3 lander; descent image; Chang'e-2 image; image matching; crater extraction; LRO image

收稿日期:2014-03-25; 修回日期:2014-06-18

基金项目:国家自然科学基金(41171355,61305137,61104190),973 计划课题(2012CB719902)

作者简介:万文辉,男,博士,助理研究员,研究方向为深空探测器导航定位。Email:wanwh@radi.ac.cn。

## 1 引言

我国探月工程二期嫦娥三号探测器于 2013 年 12 月 2 日在西昌卫星发射中心发射,经过 12 天在轨运行,于 14 日在月球虹湾地区成功实现月面软着陆。着陆过程中,着陆器携带玉兔号月球车从近月点 15 km 高度上启动 7500 N 变推力发动机实现着陆器的减速下降。在距离月表高度 2 km 时,着陆器启动调姿发动机调整着陆器姿态并在 100 m 高度实现悬停避障,自主选择地形平坦的着陆位置后进入缓速下降段,最终着陆器与玉兔号月球车安全着陆于虹湾雨海地区。经遥测,确定着陆点位置位于月球北纬 44.12°,西经 19.51°。为了监视着陆过程,位于着陆器底部的降落相机获取了大量的降落序列影像,记录了着陆器下降着陆区的情况。着陆后玉兔号月球车通过着陆器上的转移机构安全移动至月表,完成两器分离后实施月表巡视探测。

为了安全高效地实施探测任务,须确定着陆点位置及其地形地貌信息,为规划后续两器分离、月表巡视探测等任务提供数据基础。嫦娥一号、二号卫星已获取了月表高分辨率立体影像数据,并对着陆区实施了三维制图。着陆点位置则通过无线电测量获取了初始定位结果。然而,由于测控及坐标系统转换的误差,使得将遥测的着陆器位置直接叠加在卫星影像上时存在较大的偏差,误差可达数百米。将着陆器高精度地定位在卫星影像上,能够支持空地一体化的探测,对巡视探测任务的实施以及任务完成后的综合分析都具有重要意义。在近期的深空探测任务中,美国火星探路者号(Mars Pathfinder)探测器着陆点的定位是通过在着陆器影像及海盗号(Viking)探测器影像上人工选取 5 对特征点进行方位角计算得到的,定位精度 100 m<sup>[1]</sup>。火星车探测任务(Mars Exploration Rover Mission)中,在火星车全景拼图上选取远处山峰等地标点,通过后交会计算得到着陆点位置,并在随后获取的火星轨道器摄影机(Mars Orbiter Camera, MOC)影像中观测到了火星车,精化了定位结果<sup>[2-3]</sup>。于 2011 年成功着陆的美国“火星科学实验室”(Mars Science Laboratory)好奇号火星车上安置了一台像幅为 1600×1200 像素的降落相机,降落过程中以 4.5 幅/秒获取了大量降落图像,结合无线电定位结果,实现了着陆点精确定位<sup>[4-5]</sup>。以上方法较多通过人工交互完成,对操作人员要求较高。Di 等人提出了一种通过火

星车 DOM 影像同卫星影像的 SIFT 匹配,将探测车自动定位于“火星勘测轨道器”(LRO)的高分辨率成像科学装置(HiRISE)拍摄的影像上的高精度定位方法<sup>[6]</sup>。由于嫦娥二号卫星影像分辨率较低,高分辨率的降落相机影像同嫦娥系列卫星影像的匹配存在相当大的难度,无法直接应用于嫦娥三号着陆点的定位中,因而,利用降落序列图像过渡连续的特点,通过降落序列图像建立着陆影像同卫星影像间几何关系,实现嫦娥三号着陆器在降落图像和卫星图像上的高精度定位。本文探讨的嫦娥二号影像上嫦娥三号着陆点位置的评估方法为后续任务规划提供了参考。

## 2 获取数据内容分析

嫦娥一号是我国首颗绕月人造卫星,其搭载的三线阵 CCD 立体相机获取了全月球影像数据,为我国月球科学研究和后续月球探测工程的开展提供了重要的月表形貌信息<sup>[7]</sup>。为了获取更为丰富的着陆区的形貌特征数据,嫦娥二号在嫦娥一号的基础上作了重要的技术改进,通过搭载成像能力更强的立体相机,在 100 km/100 km 圆轨道上实现了分辨率优于 10 m 的全月成像,并针对虹湾预选着陆区通过降轨获取了分辨率优于 1.5 m 的三线阵立体影像数据<sup>[8]</sup>,为着陆区精细制图提供了数据源,是嫦娥三号科学探测任务的基础数据。开发了嫦娥二号立体影像自检校光束法平差方法,精化了嫦娥二号推扫式严格几何成像模型,实现了虹湾区着陆区的高精度制图,得到了该区域的 1.5 m 分辨率的数字高程模型(DEM)及数字正射影像(DOM)数据<sup>[9]</sup>。

目前,在轨运行的、对月表成像分辨率最高的图像是由美国于 2009 年 6 月 19 日发射的 LRO 上携带的窄角相机获取的,分辨率最高可达 0.5 m<sup>[10]</sup>。2013 年 12 月 30 日,美国国家航空航天局(NASA)在其官方网站上公布了 LRO 窄角相机获取的嫦娥三号着陆区 1.5 m 分辨率影像,通过该影像可以清晰地观测到嫦娥三号着陆器与玉兔号月球车<sup>[11]</sup>。因而,采用此结果作为真值,验证定位结果精度。

嫦娥三号实现了我国首次地外天体的软着陆,使用了完全自主的月面软着陆方式。着陆过程中,着陆器上降落相机获取了大量降落图像。降落相机像幅为 1024×1024 像素,视场角为 45.4°,以向下垂直的视角安置于着陆器底部。在着陆器位于 15 km 高度时,降落相机启动并以 10 帧每秒的速度获取了

着陆器降落至月面静止过程中的共 4672 幅降落影像。降落过程中着陆器姿态稳定、相机采集帧频高、成像条件良好,所获取的降落序列图像纹理丰富,相邻帧之间视差较小,能够连续地反映着陆器下月表可视范围的变化。

### 3 嫦娥三号着陆器定位

降落相机在 30 m 高度以下的缓速下降段获取了着陆器降落至月面的降落图像,通过分析降落区域变化,可获得着陆器在降落影像中的位置,得到高分辨率的着陆影像。然而,该图像视场较小、分辨率

(高于 0.05 m)远高于着陆区嫦娥二号影像制作的 DOM,无法直接通过该图像同卫星影像 DOM 数据的匹配将着陆器定位于卫星影像上。为此,本文首先通过匹配确定降落序列影像间几何变换关系,将高分辨率降落图像上的着陆位置传递至低分辨率的降落图像上,然后依据低分辨率的降落图像同卫星影像 DOM 数据匹配,实现着陆器在卫星影像上的初始定位。以此结果为基础,在着陆区附近选择一定数量特征点,直接建立高分辨率降落影像同卫星影像 DOM 间的关系实现着陆点定位。整体操作如图 1 所示。

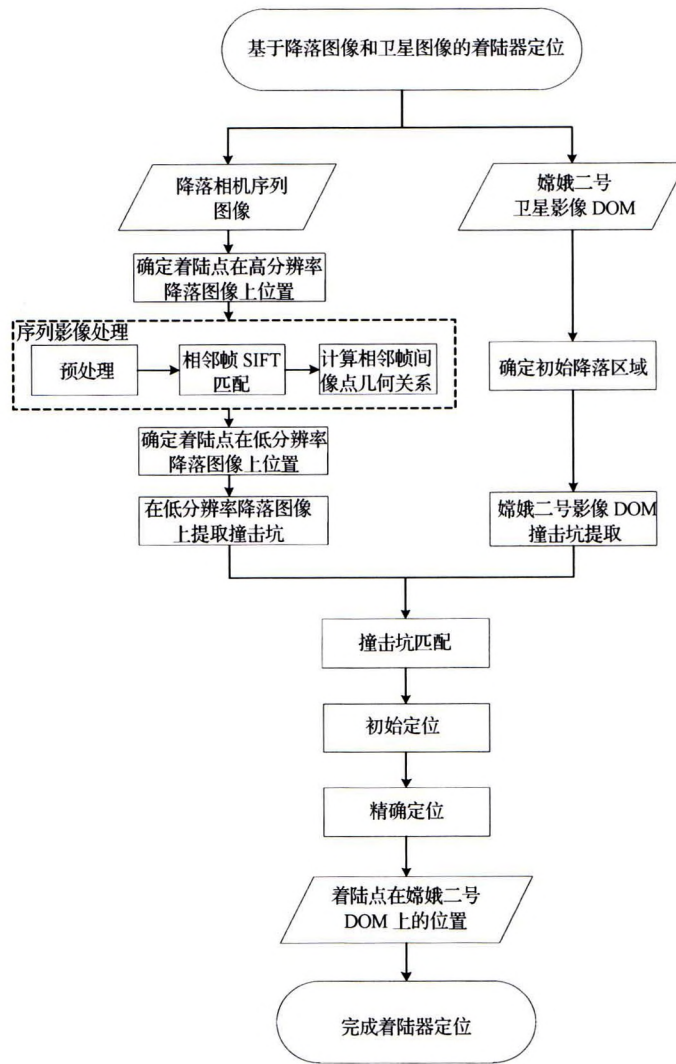


图 1 应用降落图像和卫星图像的着陆点定位流程

Fig. 1 Workflow of lander localization based on descent and satellite images

#### 3.1 着陆器在降落序列图像上的定位

##### 3.1.1 降落图像预处理

大部分降落图像成像姿态是倾斜的,图像纹理

存在变形。因而,在进行定位处理之前先对图像进行预处理,根据测控得到的概略姿态将图像投影至水平面上,使图像由倾斜中心投影图变换为近似正

射投影图像。处理的主要步骤有:首先,计算每一个图像像点对应的地面点坐标,在删除其中距离过远的点后,得到地面点集;然后,计算点集的外接矩形地理范围,在确定适当的图幅大小后,计算得到正射影像分辨率;最后,依据分辨率与外接矩形位置,设定水平面坐标,采用反投影方法得到近似正射投影图像。图 2 所示为预处理结果。

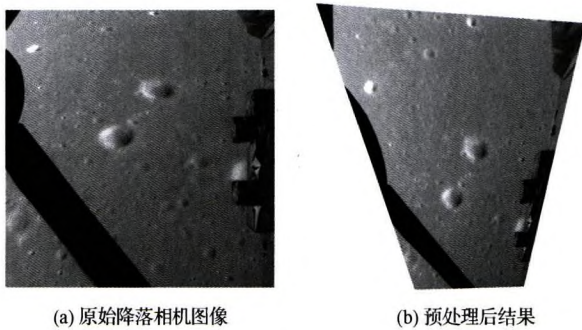


图 2 降落图像预处理结果

Fig. 2 Pre-processing of descent image

### 3.1.2 着陆点在高分辨率降落图像上的定位

将着陆器定位于在降落相机序列图像,首先须确定着陆器在某一张降落图像上的位置。由于着陆器在降落至距离月表为 3 m 的高度时关闭发动机,以自由落体方式着陆月面。此时,降落相机姿态平稳、离月表较近、光线未被遮挡,为了方便处理,本文将此位置附近获取的降落图像的中心作为着陆点位置。图 3 为 3 m 高度获取的降落图像,其中的绿色点为设定的着陆点位置。实际上,降落相机安置位置偏离着陆器质心约 1.26 m,在最终确定着陆点在卫星影像上的位置时将加入该偏移量。

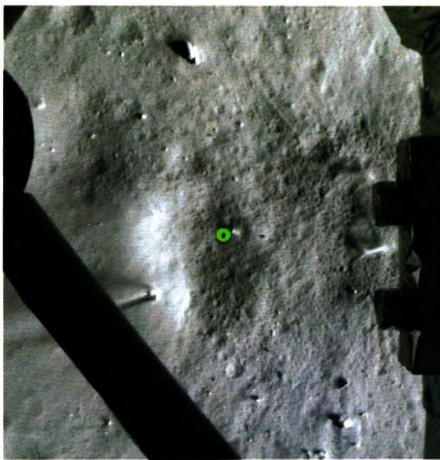


图 3 着陆点在高分辨率降落图像上的定位

Fig. 3 Lander localization on high resolution descent image

### 3.1.3 降落序列图像匹配与着陆点定位

降落相机图像分辨率同拍摄高度相关,在垂直角度下图像中心分辨率为

$$R_G = 2H \cdot \tan(A_{FOV}/2)/w \quad (1)$$

式中:  $R_G$  为地面分辨率,  $H$  为成像高度,  $A_{FOV}$  为相机横向视场角,  $w$  为图像宽度。

由式(1)可知,成像高度 2 km 的降落图像分辨率同卫星影像 DOM 分辨率相当。由于原始降落图像帧频高,数据量较大,为了简化数据处理,本文抽取在 2 km 左右高度至缓速下降段区间拍摄的 17 幅降落序列图像进行处理。这 17 幅降落序列图像中分辨率最高为 0.002 5 m,即图 3 中的图像;分辨率最低约为 1.66 m,接近嫦娥二号卫星影像 DOM 分辨率。处理过程中,图 3 得到的着陆点位置将通过序列图像匹配逐级传递至最低分辨率的降落图像上,为后续同卫星影像 DOM 的匹配作准备。

图像间采用 SIFT 方法进行特征点提取与匹配<sup>[12]</sup>,得到的同名特征点经过 RANSAC 方法剔除其中的粗差<sup>[13]</sup>。在相邻帧之间,利用得到的匹配点结果,采用如下所示的仿射变换模型计算图像坐标间变换关系:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 & b_0 \\ a_1 & b_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $a_0$ 、 $b_0$ 、 $c_0$ 、 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  为仿射系数;  $x_0$ 、 $y_0$  及  $x_1$ 、 $y_1$  分别为两幅图像上匹配点坐标。理论上当存在 3 对匹配点时,式(2)即有解。一般情况下,可以得到远多于 3 对的匹配点,因而在计算式(2)方程时,可联立得式(3),采用最小二乘法求解最优解。

$$\begin{bmatrix} x_0 & y_0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_0 & y_0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 & b_0 & c_0 & a_1 & b_1 & c_1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3)$$

解出图像间的模型变换参数后,由两幅图像上任意一点位置均可互相转换。因而,每幅降落相机图像上的着陆点位置通过计算得到。图 4 是相邻帧间降落图像匹配与定位的结果,通过匹配高分辨率降落图像上确定的像素位置可传递至低分辨率的降落图像。图 5 是 17 幅降落图像连续匹配后基于帧间几何参数进行的配准叠加结果,绿色标志点为着陆点在序列图像上的位置。

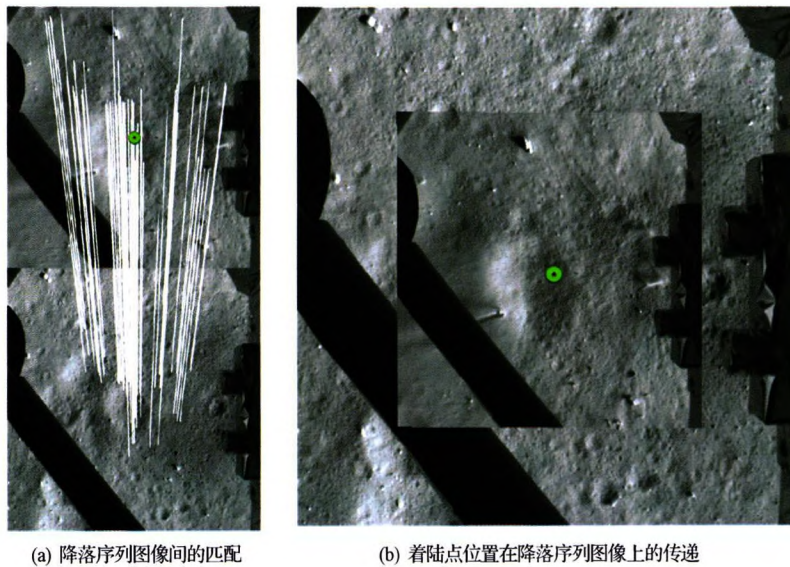


图 4 相邻帧降落序列图像匹配与定位结果

Fig. 4 Matching and localization results



图 5 着陆点在降落序列图像上的定位

Fig. 5 Lander localization on sequence descent images

### 3.2 着陆器在高分辨率卫星影像上的定位

降落相机图像与卫星影像成像时间不同,在不同的太阳高度角、方位角的影响下导致图像纹理存在较大差异,常见的基于点特征的匹配算法,如模板匹配、SIFT 匹配等方法,无法在此类图像间取得满意的匹配结果。实际上,在火星、月球等星球表面,布满了大大小小的撞击坑,是行星表面最显著的特征。由于地形高度上凹陷,撞击坑在影像中多呈现两侧坑沿沿明暗对比明显的特点。因而,本文通过提取降落影像与卫星影像 DOM 中的撞击坑中心位置,得到相应的撞击坑分布状态,求取两类影像中撞击坑分布的几何关系,实现影像间特征的匹配。

#### 3.2.1 撞击坑提取

自动识别与提取撞击坑一直是行星研究遥感的热点和难点之一。目前,已有多种对撞击坑识别与

提取的方法,包括人工识别、基于形态拟合及基于机器学习的方法<sup>[14-15]</sup>。本文中,从撞击坑在降落图像与卫星影像 DOM 中的灰度特征出发,检测撞击坑边缘偏暗与偏亮的区域,拟合圆并确定圆中心位置,确定撞击坑中心位置。该方法具体步骤如下:首先,通过 Mean Shift 方法对图像进行分割<sup>[16]</sup>,提取当中灰度值较亮与较暗的区域,分别标识为明亮区与灰暗区,作为撞击坑备选区域;其次,在明亮区一定距离范围内搜索区域面积相近的灰暗区,将两者进行配对得到撞击坑初始提取结果;然后,统计每一提取结果里明亮区域中心到灰暗区中心的方向矢量,剔除其中不符合方向约束的区域,得到正确的提取结果;最后,求取区域最小外接圆,确定撞击坑位置<sup>[17]</sup>。

#### 3.2.2 撞击坑匹配

由于降落图像与嫦娥二号 DOM 均是校正后的影像,因而通过相似变换模型建立两类图像上撞击坑位置数据的转换关系。相似变换模型可表示为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $a, b, c, d$  为相似变换系数。

为了对两类图像上的撞击坑进行匹配,本文采用基于相似变换模型的 RANSAC 方法检测撞击坑的匹配关系。主要步骤有:首先在两个数据集内任取的两对点坐标计算相似变换参数;然后利用此参数计算所有的降落相机上点在嫦娥二号 DOM 上对应的位置,在此位置一定范围内搜索是否存在撞击坑,若存在,则将所有已匹配上的点利用最小二乘求

解变换系数并计算残差方均根;最后,对数据集内所有点做以上处理,在残差方均根满足阈值的情况下,选定匹配点对数量最多的情况下对应的相似变换参数作为最终的结果。利用该参数建立降落相机图像与嫦娥二号 DOM 影像间坐标的变换关系。图 6 为撞击坑提取与匹配的结果。在图 6(a)与图 6(d)分别为嫦娥二号卫星影像与降落相机预处理后图像;

图 6(b)与图 6(e)为对图像进行 Mean-shift 分割以后的结果;图 6(c)与图 6(f)为对分割结果进行撞击坑区域提取的结果,图中白色和黑色区域为提取出的撞击坑明亮与灰暗的区域,经过对两类区域的自动选取与合并,提取出了撞击坑区域,即图中红色圆圈区域;图 6(g)为利用 RANSAC 方法检测出的撞击坑匹配结果,即图中绿线所连接的撞击坑对。

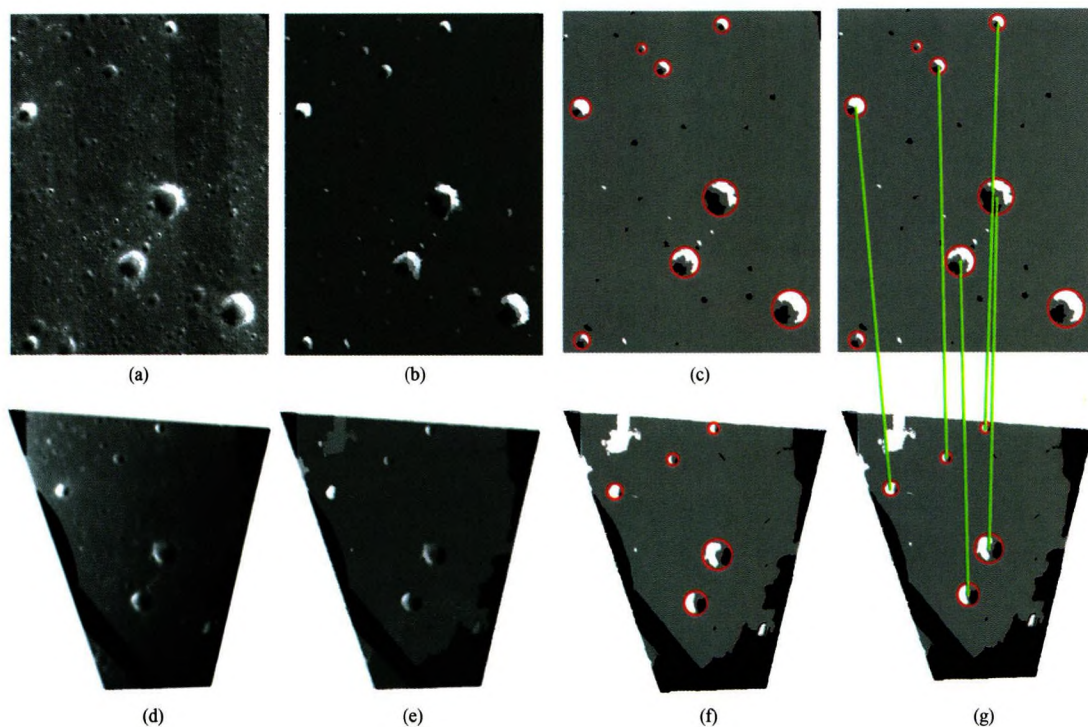


图 6 卫星图像和降落图像中的撞击坑提取与匹配

Fig. 6 Crater extraction and matching between satellite image and descent image

### 3.2.3 着陆点精确定位

通过 3.2.1 节中确定的降落相机图像同嫦娥二号 DOM 影像间几何关系,可得到低分辨率降落序列图像上的着陆点位置在嫦娥二号 DOM 影像上的定位结果。然而,由于降落序列影像内的定位存在误差累积,撞击坑区域提取的精度也受光照条件影响较大,上述方法得到的定位结果精度不高。因而,本文依据已得到的着陆点位置作为初值,确定嫦娥二号 DOM 上的初始着陆区域,并加入此区域同百米悬停位置附近获取降落图像间的同名特征点对。经过图像间几何关系的计算,由百米悬停位置的降落图像上着陆点位置确定卫星图像上的着陆点位置,在初始定位的基础上实现着陆点的高精度定位。图 7 中红色连线为嫦娥二号 DOM 与悬停位置降落图像间选取的同名特征点,左侧绿色点为由右侧降落图像上着陆位置计算得到的在嫦娥二号 DOM 上的着陆点位置。

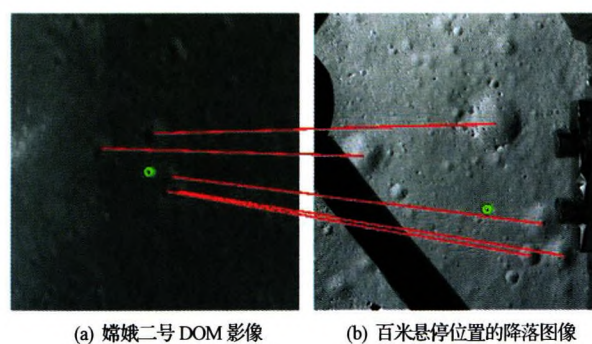


图 7 着陆器在嫦娥二号 DOM 上的高精度定位结果

Fig. 7 High-precision lander localization result on Chang'e-2 DOM

利用降落相机同着陆器的安置参数修正定位结果后,最终将着陆器中心定位于嫦娥三号 DOM 上,定位出的着陆点位置为北纬  $44.118^{\circ}$ ,西经  $19.512^{\circ}$ 。定位结果如图 8 所示,图中绿色箭头所指为着陆区局部放大结果。

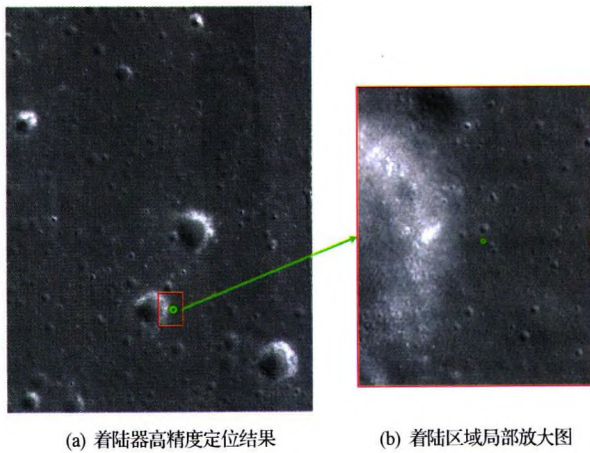


图 8 着陆器在嫦娥二号 DOM 上的高精度定位结果  
Fig. 8 High-precision lander localization result  
on Chang'e-2 DOM

### 3.3 定位精度分析与验证

本文提出的着陆器定位方法中,由低分辨率的降落图像同卫星图像匹配得到的着陆点位置仅用于确定着陆点大致区域。实际是悬停位置降落图像同卫星图像的匹配结果决定最终定位结果。相应的定位精度则是由同卫星影像匹配精度与此处降落图像上得到的着陆点精度决定。悬停位置降落图像分辨率较高(约 0.08 m),由最低位置降落图像传递至悬停位置降落图像的着陆点精度优于卫星影像 1 个像素(1.5 m),且同卫星影像匹配精度也优于 1 个像素。因而,理论上最终定位结果应优于卫星图像 1 个像素。

为了实际检验定位结果,用于上文所述类似的图像匹配定位方法将着陆器定位于 LRO 影像上(图 9 中红点所示),通过对比 LRO 影像上着陆器的真实位置(图像中白色亮点)验证定位精度。通过图 9 中着陆点位置的对比,本文所提方法定位精度优于卫星影像 1 个像素,表明通过序列图像匹配定位的方法具有较高的精度。

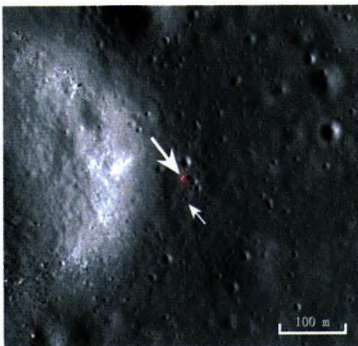


图 9 着陆器在 LRO 影像上的定位与对比  
Fig. 9 Lander localization on LRO image and its  
comparison with observed location

## 4 结束语

针对嫦娥三号着陆点在卫星图像中精确定位的需要,本文通过降落序列图像间的 SIFT 匹配结果,建立图像间坐标几何变换关系,将在高分辨率降落图像上确定的着陆点位置定位于与卫星图像分辨率相当的降落图像上。随后,通过撞击坑的提取与匹配,完成降落相机图像同嫦娥二号 DOM 的匹配,得到两类图像间的几何位置转换关系,最终实现着陆点在嫦娥二号 DOM 影像的定位。文中通过将着陆点在 LRO 影像上的定位结果同实际观测到的着陆器位置进行对比,验证了本定位方法的有效性,定位精度优于卫星影像 1 个像素(1.5 m)。着陆点在降落图像和卫星图像的高精度定位,有力地支持了后续巡视器探测任务的开展。

### 参考文献 (References)

- [1] Golombek M, Cook R, Economou T, et al. Overview of the Mars Pathfinder mission and assessment of landing site predictions[J]. *Science*, 1997, 278: 1473-1748
- [2] Li R, Ma F, Xu F, et al. Localization of Mars rovers using descent and surface-based image data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(E11): 1-8
- [3] Li R, Di K, Matthies L, et al. Rover localization and landing-site mapping technology for the 2003 mars exploration rover mission[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, 70(1): 77-90
- [4] Malin M, Caplinger M, Edgett K, et al. The Mars Science Laboratory (MSL) Mars Descent Imager (MARDI) flight instrument[C]//The 40<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 2009: 1199
- [5] Martin-Mur T, Kruizinga, G, Wong M, et al. Mars-Science Laboratory navigation results[C]// The 23<sup>rd</sup> International Symposium on Space Flight Dynamics. Washington D. C. ;NASA, 2012
- [6] Di K, Liu Z, Yue Z. Mars rover localization based on feature matching between ground and orbital imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2011, 77(8):781-791
- [7] 欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 等. 绕月探测工程的初步科学成果[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(3):261-280  
Ouyang Ziyuan, Li Chunlai, Zou Yongliao, et al. The primary science result from the Chang'e-1 probe[J].

- Sci China; Earth Sci, 2010, 40(3): 261-280 (in Chinese)
- [8] 郝哲, 蔡金曼, 刘凝哲. 中国航天史上又一次重大跨越——访探月工程总设计师吴伟仁、副总指挥吴志坚[J]. 国防科技工业, 2011, 9: 14-17  
Hao Zhe, Cai Jinman, Liu Ningzhe. Another major progress in Chinese space history-Interview with Wu Weiren and Wu Zhijian, who are the Chief designer and Deputy Chief designer of Chang'e project[J]. Defence Science and Technology Industry, 2011, 9: 14-17 (in Chinese)
- [9] 刘一良, 刘斌, 彭嫚, 等. 嫦娥二号立体影像自检校光束法平差方法初探[C]//第18届中国遥感大会. 北京: 中国遥感委员会, 2010  
Liu Yiliang, Liu Bing, Peng Man, et al. A preliminary result of self-calibration bundle adjustment of Chang'e-2 stereo imagery [C]//The 18<sup>th</sup> Conference of Remote Sensing of China. Beijing: CNCRS, 2010 (in Chinese)
- [10] 郑永春, 邹永廖, 付晓辉. LRO 和 LCROSS 探月计划: 科学探测的分析与启示[J]. 航天器工程, 2011, 20(4): 117-129  
Zhen Yongchun, Zou Yongliao, Fu Xiaohui. LRO and LCROSS mission: overview and enlightenment for future lunar exploration[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 117-129 (in Chinese)
- [11] NASA. NASA images of Chang'e 3 landing site[EB/OL]. [2013-12-30]. <http://www.nasa.gov/content/nasa-images-of-change-3-landing-site>
- [12] Lowe D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110
- [13] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Graphics and Image Processing, 1981, 24(6): 381-395
- [14] 刘宇轩, 刘建军, 牟伶俐, 等. 撞击坑识别方法综述[J]. 天文研究与技术, 2012, 9(2): 203-212  
Liu Yuxuan, Liu Jianjun, Mu Lingli, et al. A review of impact-crater detection[J]. Astronomical Research and Technology, 2012, 9(2): 203-212 (in Chinese)
- [15] 魏士俨, 张建利, 彭松, 等. 虹湾地区月面撞击坑自动提取[J]. 计算机仿真, 2013, 30(8): 74-77  
Wei Shiyuan, Zhang Jianli, Peng Song, et al. Automated detection of lunar craters in sinus iridum[J]. Computer Simulation, 2013, 30(8): 74-77 (in Chinese)
- [16] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619
- [17] 丁萌, 曹云峰, 吴庆宪. 一种从月面图像检测陨石坑的方法[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 1243-1248  
Ding Meng, Cao Yunfeng, Wu Qingxian. A method of craters detection from the surface imagery of Moon [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(3): 1243-1248 (in Chinese)

(编辑: 李多)

## 基于降落图像匹配的嫦娥三号着陆点位置评估

作者: [万文辉](#), [刘召芹](#), [刘一良](#), [刘斌](#), [邸凯昌](#), [周建亮](#), [王保丰](#), [刘传凯](#), [王镓](#)  
作者单位: [万文辉, 刘召芹, 刘一良, 刘斌, 邸凯昌 \(中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京, 100101\)](#), [周建亮, 王保丰, 刘传凯, 王镓 \(北京航天飞行控制中心, 北京, 100094\)](#)  
刊名: [航天器工程](#)  
英文刊名: [Spacecraft Engineering](#)  
年, 卷(期): 2014, 23(4)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_htqgc201404002.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_htqgc201404002.aspx)