

基于降落相机图像的嫦娥三号着陆轨迹恢复

刘斌¹, 徐斌¹, 刘召芹¹, 刘一良¹, 邱凯昌¹, 唐歌实², 周建亮²

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感国家重点实验室, 北京 100101;

2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094

摘 要: 嫦娥三号降落相机在探测器实施软着陆的过程中获取了大量序列月面图像, 这些图像不仅为公众提供了可视化的着陆过程, 而且为着陆器在卫星遥感影像上的高精度定位提供了数据基础。在分析这些序列图像成像几何特性的基础上, 提出一种利用降落序列图像进行嫦娥三号着陆器轨迹及姿态恢复的方法。首先通过序列影像进行自由网平差, 建立各降落影像及月面的相对位置和姿态关系; 然后通过量测卫星遥感影像及降落影像上月面标志物的尺寸, 求解出建立的相对模型的尺度, 从而恢复出序列降落影像在着陆过程中的带尺寸的位置和姿态; 最后通过降落影像的密集匹配, 完成着陆区域月表 3 维模型的重建。本文充分挖掘了降落相机的应用潜力, 为嫦娥三号着陆任务中后续科学探测工作提供了高精度的数据支持。

关键词: 嫦娥三号, 降落相机影像, 轨迹恢复, 光束法平差, 3 维重建

中图分类号: P236 **文献标志码:** A

引用格式: 刘斌, 徐斌, 刘召芹, 刘一良, 邱凯昌, 唐歌实, 周建亮. 2014. 基于降落相机图像的嫦娥三号着陆轨迹恢复. 遥感学报, 18(5): 981-987

Liu B, Xu B, Liu Z Q, Liu Y L, Di K C, Tang G S and Zhou J L. 2014. Descending and landing trajectory recovery of Chang'e-3 lander using descent images. Journal of Remote Sensing, 18(5): 981-987 [DOI: 10.11834/jrs.20144071]

1 引言

嫦娥三号(CE-3)月球探测器于 2013 年 12 月 14 日成功实现了月面软着陆(19.51°W, 44.12°N), 并于 15 日实现了巡视器与着陆器的两器分离和互拍, 标志着中国嫦娥三号任务的圆满成功。在 CE-3 着陆器减速和软着陆过程中, 安装于着陆器下方的降落相机获取了月球表面大量的序列图像, 通过这些图像可以实时监视降落过程。

目前, 已有研究和模拟实验利用降落相机进行着陆器的高精度定位与制图; Li 等人(2002)研究了利用火星降落相机进行探测车高精度定位的方法, 以及利用降落相机进行着陆区高精度制图的潜力。Ma 等人(2001)利用模拟的降落影像与巡视器影像联合平差, 提高了着陆区的制图精度。Matthies 等

人(1997)利用着陆器、巡视器和降落影像, 研究了基于视觉的火星车定位方法。在实际的火星探测任务中, 勇气号、机遇号仅获取了 3 幅分辨率较低的降落影像, 并没有实际的工程应用; 好奇号获取了大量的降落图像, 但仅利用影像比对的方式进行了着陆点定位(Parker 等, 2013), 没有利用降落影像进行着陆器的轨迹恢复和着陆区域的 3 维重建。

2 CE-3 降落相机成像几何特性分析

2.1 CE-3 降落影像获取过程

降落相机采用光学、结构、电子学系统和温控一体化设计。正常成像距离是 4 m 到无穷远, 图像大小为 1024 × 1024 像素, 设计焦距为 8.3 mm, 像素大小为 6.7 μm。CE-3 着陆器进入动力下降段后,

收稿日期: 2014-03-07; 修订日期: 2014-05-07; 优先数字出版日期: 2014-05-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号: 2012CB719902); 国家自然科学基金(编号: 41301528, 41171355)

第一作者简介: 刘斌(1984—)男, 博士, 助理研究员。主要研究方向为地球及行星遥感影像高精度定位制图。E-mail: liubin@radi.ac.cn

通信作者简介: 邱凯昌(1967—)男, 研究员。主要研究方向为行星遥感知图与导航定位。E-mail: dike@radi.ac.cn

在距离着陆区约 2 km 时开机,成像过程如图 1 所示。经过进入阶段、下降阶段、悬停、避障阶段到着陆阶段,成像高度变化范围约为 2 km—4 m。帧频不小于 10 帧/s,成像目标为降落区域的月表月貌特征和地形地貌特征。着陆器着陆后,降落相机停止工作。整个过程降落相机共传回 4672 张图像,这些图像在巡视器路径规划中已经发挥了重要作用,对后续着陆区形貌和地质研究具有重要价值。

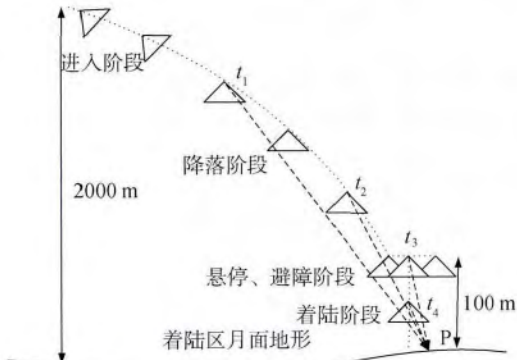


图 1 CE-3 降落相机成像过程

Fig. 1 CE-3 descend camera imaging process

2.2 CE-3 降落影像立体视觉潜力分析

根据框幅式相机成像原理,CE-3 降落影像成像几何模型可以用共线方程表示:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f_x \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 &= -f_y \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 (x, y) 为像点坐标, (x_0, y_0) 为像主点坐标, (f_x, f_y) 为相机有效焦距, (X, Y, Z) 为目标点的 3 维坐标, (X_s, Y_s, Z_s) 为相机光学中心空间坐标, $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$ 为相机姿态角的方向余弦。

利用降落影像进行轨迹恢复的过程,即为建立影像间相对位置和姿态关系,并利用物方点进行绝对定向的过程。这个过程中,影像之间需要形成立体观测。在传统航空摄影测量中,形成立体观测影像需要有重叠度(即形成立体观测的影像需要对同一地区进行观测),而且重叠度满足一定范围要求(使得立体观测交会角满足一定的要求,构成稳定的观测几何)。

对降落相机成像分析可知,由于 CE-3 着陆器重力下降过程姿态平稳,降落相机能够始终对正下方进行拍摄,所获取的影像覆盖范围能够重叠。从图 1 可以看出,降落过程着陆器向着进入的方向呈

抛物线下降,该过程成像位置有偏移,使得对同一点成像时观测光线存在交会条件。图 1 中 t_1 时刻与 t_2 时刻的影像对 P 点成像时形成的立体观测即为成像位置的变化所产生。当着陆器垂直下降时,影像间的立体观测主要来自于影像分辨率变化导致的观测角度的不同而产生的交会角。图 1 中 t_3 时刻与 t_4 时刻的成像所形成的立体观测即为上述情况。对于着陆区域的点 P,各时刻影像均对其进行观测,且通过以上两种方式形成了立体几何观测条件。在降落相机序列观测影像中,如果能获得足够多且分布较好的同名点对,即可利用立体观测几何关系恢复出成像时相机间的相对位置关系,再利用少量物方控制点,根据绝对定向原理恢复着陆器降落时的真实位置和姿态。目前已有着陆区的由 CE-2 卫星遥感影像制作的 1.5 m 分辨率的正射影像(DOM)和 4 m 分辨率的 DEM,可作为参考基准选取控制点。利用参考 DOM 人工选取控制点时,像平面误差能控制在 ± 1 个像素以内,高程值则利用控制点的经纬度在 DEM 上内插获取。

3 降落轨迹恢复方法

降落相机影像是一系列存在立体观测条件的序列影像,利用影像立体量测原理,降落相机轨迹恢复技术流程如图 2 所示。

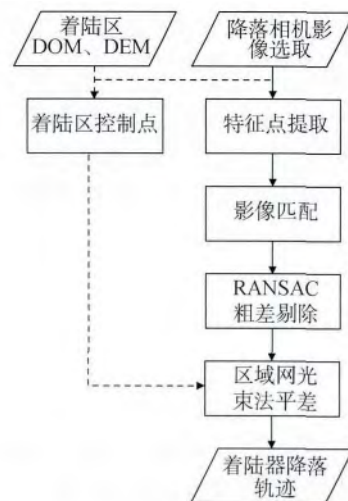


图 2 降落轨迹恢复技术流程

Fig. 2 Workflow of trajectory recovery

主要步骤如下:

(1) 利用尺度不变特征变换 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform) 算法(Lowe 2004) 提取参与平差解

算降落影像的特征点,进行各影像间的影像匹配。

(2) 利用随机抽样一致性 RANSAC (Random Sample Consensus) 算法(Fischler 和 Bolles ,1981) 进行误匹配点剔除。

(3) 建立误差方程,进行光束法平差(Snively 等 2006 2008),由于方程求解未知数较多、各参数间存在相关性导致了法方程病态,故采用稀疏矩阵求解方法(Lourakis 和 Argyros 2009)。

(4) 当着陆区有一定精度的 DOM 和 DEM 时,可以与降落影像进行匹配,获取物方控制点参与光束法的平差解算。

(5) 输出影像轨迹,包括每幅影像获取时的 3 维位置和姿态。

同时,利用密集匹配技术,可以从序列降落图像中获取大量密集匹配点,根据求取的影像位置和姿态进行空间前方交会,以获取物方点云,进而生成着陆区 DEM,再通过空间投影的方法生成着陆区的正射影像。

4 数据处理与结果分析

4.1 数据选取与预处理

在初始动力下降阶段,降落相机进行倾斜摄影,该部分像片摄影区域内地物几何变形大,难以进行连接点匹配,因此本文平差影像从进入阶段的 13:08:12 开始选取。

由于降落相机帧频不小于 10 帧/s,分析发现相邻影像重叠度接近 99%,间隔 10 张的影像重叠度接近 93%。因此,在不影响计算结果精度的情况下,为提高解算效率、避免冗余,将 10 Hz 影像抽样为 1 Hz。根据影像覆盖区域的重叠度以及影像成像间隔,从 4672 幅降落影像中选择 180 张(1 Hz)进行平差解算(图 3)。

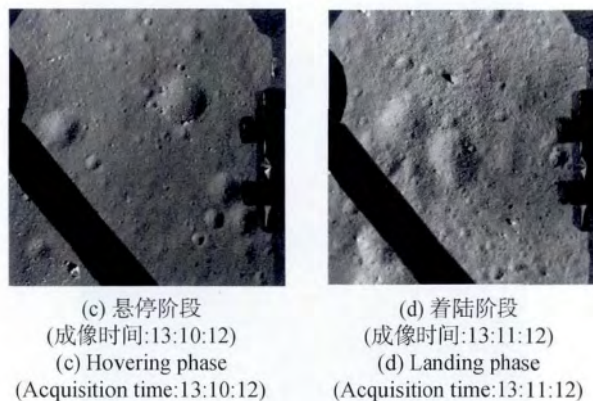
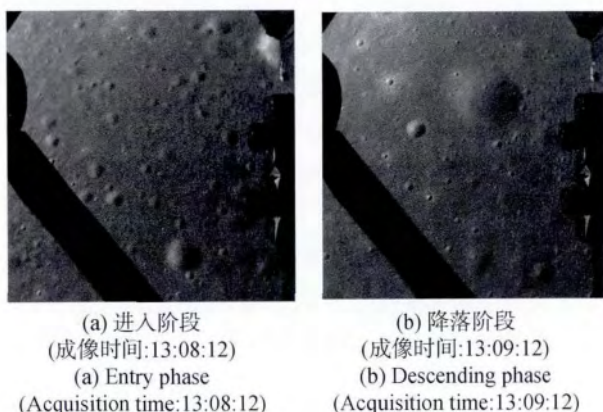


图 3 用于区域网平差解算的部分图像

Fig. 3 Example images used in the adjustment

受降落相机安装位置的影响,每张影像中都有一部分固定区域被着陆器支架遮挡。如果采用原始影像直接参与 SIFT 匹配,则遮挡区内会产生大量的无效匹配点。为此,匹配过程中对每张影像都添加了掩膜(图 4),落在掩膜区域内的影像不参与匹配运算。掩膜根据遮挡区与地物的灰度反差经半自动提取得到。



图 4 掩膜范围示意图(红色部分)

Fig. 4 Mask zone of descent image (red part)

利用 CE-2 卫星遥感影像生产的 DOM 和 DEM,在影像范围内选取均匀分布的 26 个控制点和 18 个检查点进行绝对定向。其中,控制点和检查点的平面坐标从 1.5 m 分辨率的 DOM 中获取,高程坐标从 4 m 分辨率的 DEM 中获取,控制点和检查点的分布如图 5 所示。

降落图像光束法平差计算后,得到控制点和检查点的平差精度均优于 ± 1 m(表 1、表 2),轨迹恢复的绝对精度则取决于参考 DOM 与 DEM 的精度。

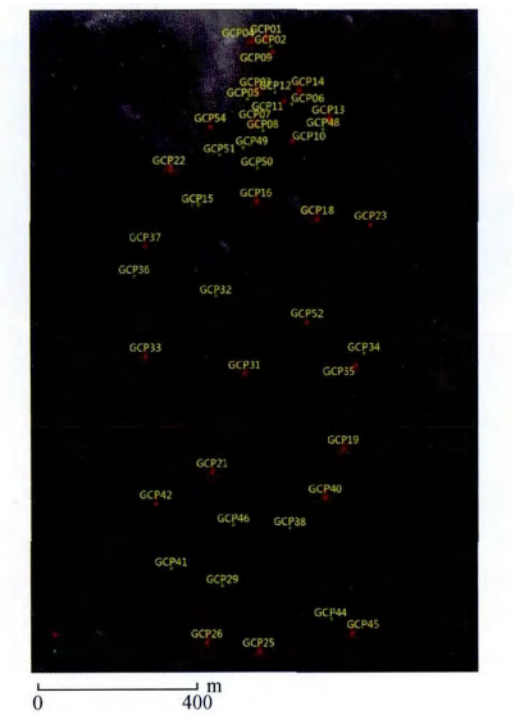


图5 控制点分布图

Fig.5 Distribution of control points

表1 控制点误差

Table 1 Control points errors

点号	X 方向误差/m	Y 方向误差/m	Z 方向误差/m
GCP01	-0.828	0.300	-0.782
GCP03	-0.429	-0.352	-0.122
GCP04	-1.196	0.436	-0.099
GCP07	-0.502	0.277	-0.895
GCP09	-0.511	-1.173	0.523
GCP10	0.181	-0.824	-0.535
GCP11	0.047	-0.294	0.139
GCP13	0.505	-0.200	0.517
GCP14	0.833	0.750	0.771
GCP16	-0.272	0.022	0.467
GCP18	0.355	-1.100	-0.065
GCP19	1.459	0.707	-0.515
GCP21	-0.345	0.525	-1.008
GCP22	0.395	1.148	1.270
GCP23	0.658	-0.528	0.517
GCP25	-1.572	0.221	0.275
GCP26	0.050	1.751	0.062
GCP31	0.764	-0.670	-0.067
GCP33	-0.007	1.215	-0.267
GCP35	0.382	-0.314	0.282
GCP37	-0.623	0.184	0.110
GCP40	1.206	-0.495	-0.910
GCP42	-0.939	0.166	-1.305
GCP45	0.734	-0.444	0.245
GCP52	-0.536	-0.947	-0.165
GCP54	-0.206	0.098	-0.547
中误差	0.724	0.717	0.602

表2 检查点精度

Table 2 Check points errors

点号	X 方向误差/m	Y 方向误差/m	Z 方向误差/m
GCP02	0.920	-1.618	0.198
GCP05	0.369	0.259	-0.117
GCP06	-1.069	-1.554	0.306
GCP08	0.312	0.142	-0.006
GCP12	0.396	-1.029	-0.136
GCP15	-1.327	1.101	0.868
GCP29	-0.188	-0.435	0.621
GCP32	1.324	-0.007	1.575
GCP34	1.808	-0.756	-0.796
GCP36	-0.661	1.594	-1.192
GCP38	-0.098	-0.369	0.602
GCP41	-0.833	0.402	-1.694
GCP44	1.839	-0.340	-0.207
GCP46	0.139	-0.021	-0.947
GCP48	0.608	-0.366	0.745
GCP49	-0.102	0.036	-0.167
GCP50	-0.023	-0.253	0.860
GCP51	0.856	0.476	0.595
中误差	0.908	0.800	0.806

4.2 轨迹恢复

利用选取的降落影像,恢复出降落过程轨迹如图6所示。

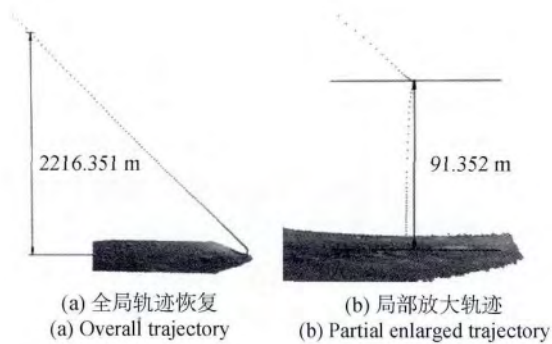


图6 恢复轨迹的效果图

Fig.6 Trajectory recovery diagram

分析外方位元素中角元素的变化(图7所示)可知,降落阶段开始于距离月面高度2216.351 m处。根据影像外方位元素中Z值分析可知在悬停避障阶段,离月面平均高度为91.352 m,与设计参数基本一致。

从图8可以看出,着陆器降落阶段速度由37 m/s减速下降,经过悬停避障后,加速至4.5 m/s左右,然后又减速至1.5 m/s匀速下降。

图9中加速度曲线呈现出的状态反映了反推发动机的工作状态。

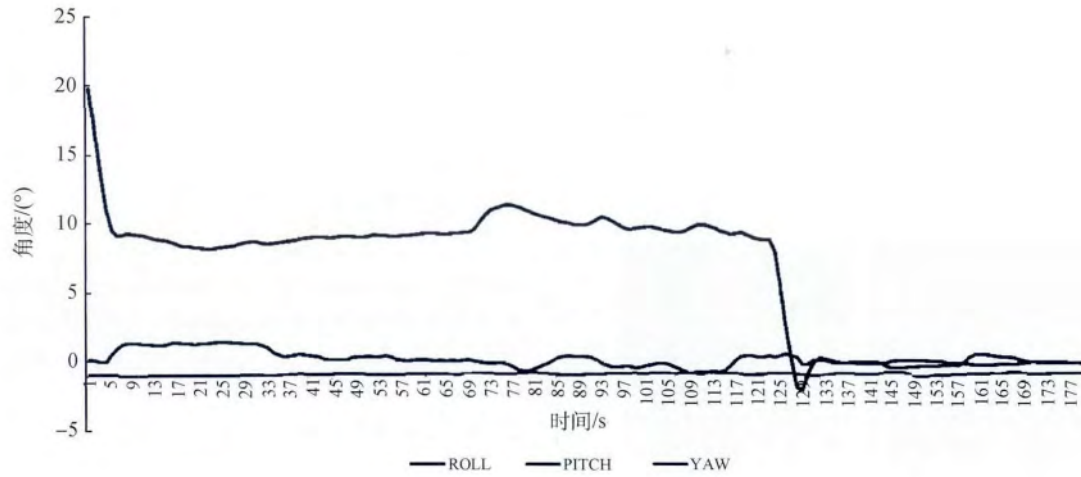


图7 角元素随时间变化示意图

Fig. 7 Orientation curve of the lander

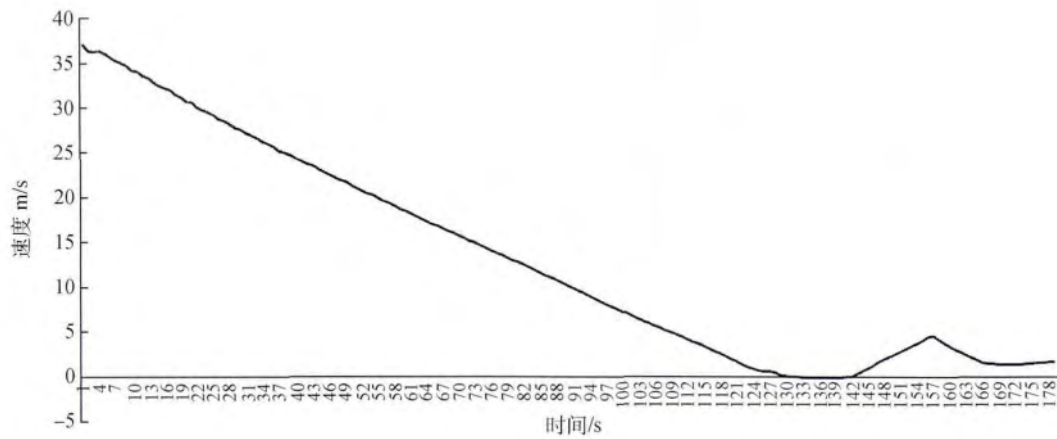


图8 着陆器下降速度曲线

Fig. 8 Speed curve of the lander

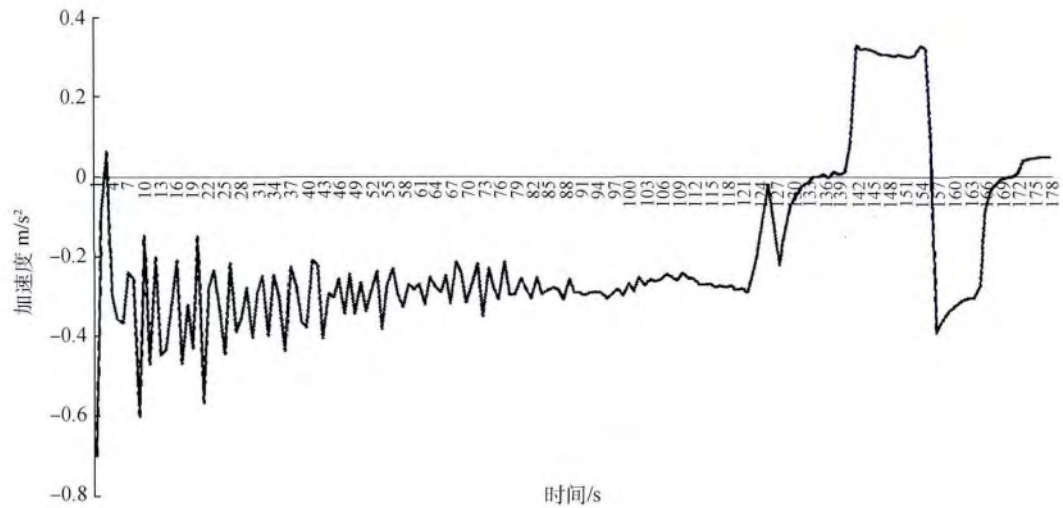


图9 着陆器加速度曲线

Fig. 9 Acceleration curve of the lander

轨迹恢复得到了降落图像的位置和姿态,在此基础上,利用密集匹配技术,生成物方点云,再通过投影和融合,获得了着陆区的3维表面模型(图10)。其中,右上图是左图中矩形内的放大图,右下图是右上图矩形内的放大图。在1 km 的区域内,月面模型分辨率可达0.4 m。

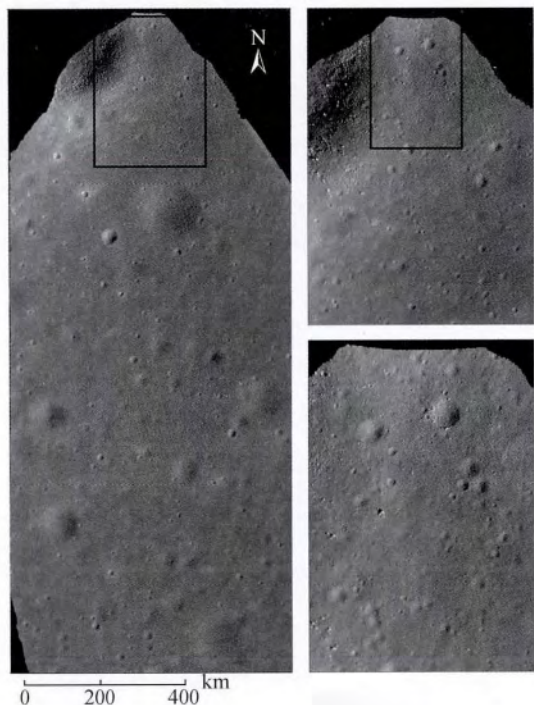


图10 着陆区月面正射影像

Fig. 10 DOM generated from descent images

5 结 论

通过对降落相机几何特性的分析,得出降落相机可进行立体观测的结论,利用光束法区域网平差方法恢复降落过程轨迹,即降落相机影像获取时刻的位置和姿态;以从CE-2 遥感影像提取的1.5 m 分辨率DOM 及4 m 分辨率DEM 为参考,选取控制点进行绝对定向,定向平差精度在 ± 1 m 量级;在轨迹恢复的基础上,利用影像密集匹配技术可以建立高分辨率的着陆区月面3维模型,作为相关科学研究的基础数据。

后续工作中,还将对获取降落过程中的测控数据进行精度对比分析;充分分析和挖掘降落相机的几何信息,制作不同范围、不同分辨率的正射影像和DEM,作为后续科学应用的基础数据。

参考文献(References)

- Fischler M A and Bolles R C. 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6): 381 - 395 [DOI: 10.1145/358669.358692]
- Li R X, Ma F, Xu F L, Matthies L H, Olson C F and Raymond E A. 2002. Localization of mars rovers using descent and surface-based image data. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991 - 2012), 107(E11): FIDO 4-1-FIDO 4 - 8 [DOI: 10.1029/2000JE001443]
- Lourakis M I A and Argyros A A. 2009. SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 36(1): Article No. 2 [DOI: 10.1145/1486525.1486527]
- Lowe D G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2): 91 - 110 [DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94]
- Ma F, Di K C, Li R, Matthies L and Olson C. 2001. Incremental Mars rover localization using descent and rover imagery // *ASPRS 2001 Annual Conference*. St. Louis: 25 - 27
- Matthies L, Olson C F, Tharp G and Laubach S. 1997. Visual localization methods for Mars rovers using lander, rover, and descent imagery // *Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space (i-SAIRAS)*. Tokyo, Japan: 413 - 418
- Parker T J, Malin M C, Calef F J, Deen R G, Gengl H E, Golombek M P, Hall J R, Pariser O, Powell M, Seltten R S and MSL Science Team. 2013. Localization and 'contextualization' of curiosity in gale crater, and other landed mars missions. 44th Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, Texas: Lunar and Planetary Institute: 2534
- Snavely N, Seitz S M and Szeliski R. 2006. Photo tourism: exploring photo collections in 3D. *ACM transactions on graphics (TOG)*, 25(3): 835 - 846 [DOI: 10.1145/1141911.1141964]
- Snavely N, Seitz S M and Szeliski R. 2008. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2): 189 - 210 [DOI: 10.1007/s11263-007-0107-3]

Descending and landing trajectory recovery of Chang'e-3 lander using descent images

LIU Bin¹, XU Bin¹, LIU Zhaoqin¹, LIU Yiliang¹, DI Kaichang¹,
TANG Geshi², ZHOU Jianliang²

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: Chang'e-3 (CE-3) was successfully soft landed on the Moon on Saturday, December 14, 2013. The descent camera on-board lander acquired a large amount of descent images during the landing process. In addition to visualization of the landing process to the public, these images are supportive for pinpointing locations of lander and rover after landing. With a detailed analysis of the geometric characteristics of these sequence descent images, we propose a method to recover the descending and landing trajectory using descent images with bundle adjustment techniques.

Descending and landing trajectory can provide critical information of the motion state of lander during safe landing. So far, there is no report of recovery of descending and landing trajectory using descent images for Lunar or Mars landers. In this paper, we study the capability of trajectory recovery using CE-3 descent images. By fully utilizing the information of descent images, we reconstruct the trajectory and the three-dimensional terrain model of the CE-3 landing area. We provide a new approach to obtaining the lander's states in entry, descending, and landing phases. The derived Digital Terrain Model (DTM) of landing area is of very high resolution and valuable in mission operations and scientific investigations.

The method includes the following steps: (1) SIFT-based image matching is performed among the sequence images. (2) Matching gross errors are eliminated by a RANSAC algorithm and the remaining matched points are used as tie points to form an image network. (3) Bundle adjustment of the image network is performed with control points which were acquired by matching the descent images with a Digital Ortho Map (DOM) generated from CE-2 images previously. As the output of bundle adjustment, the descending and landing trajectory is obtained, which includes the positions and attitudes of the lander when the descent images were taken. Based on the recovered trajectory, the lander's states on entry, descending, and landing can be analyzed. DOM and DEM with much higher resolution than orbiter images have also been generated from the descent images.

We obtain 26 control points and 18 check points from 1.5 m resolution DOM and 4 m resolution DEM. The points are incorporated in the bundle adjustment. The RMS of control points and check points are 0.60 m and 0.75 m respectively. Based on the trajectory obtained from bundle adjustment, the lander's motion state is analyzed, in which the speed curve and acceleration curve can reveal the engine thrust changes. The Digital Surface Model (DSM) with a resolution of 0.4 m has been produced and has been used in rover path planning and other mission operations. This method has been proved effective through applications in CE-3 mission.

Key words: Chang'e-3 mission, descent image, trajectory recovery, bundle adjustment, three-dimensional reconstruction