科学通报 2015 年 第 60 卷 第 4 期：372 ~ 378
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

嫦娥三号月面巡视探测器高精度定位

刘少创[①⑤], 贾阳[②], 马友青[①*], 顾征[②], 魏士俨[③], 李群智[②], 徐辛超[④], 温博[②], 张烁[⑤], 李明磊[①], 马浩[①], 杨欢[⑤]

① 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101;
② 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
③ 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005;
④ 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新 123000;
⑤ 武汉大学测绘学院, 武汉 430072
* 联系人, E-mail: myq_1987@163.com

2014-07-28 收稿, 2014-10-14 接受, 2014-12-25 网络版发表
国家自然科学基金(41071298, 41401535)资助

摘要 高精度的定位技术是嫦娥三号月面巡视探测器在月表实施科学探测任务的重要保障, 本文提出了适用于月面环境无高精度控制点的立体图像条带网定位方法. 首先, 在地面控制场中, 采用基于控制点的光束法平差方法获得精确的相机标定参数, 进而计算出立体相机的摄影基线和相对方位元素. 其次, 通过像点匹配、前方交会完成图像的立体模型构建, 然后根据不同摄站间的连接点序列建立立体图像条带网. 依据连接点坐标观测值的权矩阵和扩展正交Procrustes理论, 对立体图像条带网的数学模型进行最小二乘平差, 直接获得月面巡视探测器的位置与姿态信息. 最后在室内试验场内进行了新方法和传统光束法平差方法的对比验证, 结果表明新方法在稳定性和计算效率方面优于后者, 探测器定位精度相当. 在此基础上, 新方法应用于嫦娥三号月面巡视探测器的遥操作系统, 充分满足了探测器的定位需求.

关键词
嫦娥三号
月面巡视探测器
定位
相机标定
立体图像条带网

嫦娥三号是我国探月工程第二阶段的登月探测器, 包括着陆器和月面巡视探测器(“玉兔号”月球车)[1]. 2013年12月14日21时11分, 嫦娥三号成功着陆在月球西经19.5126°、北纬44.1188°的虹湾以东区域[2], 15日4时35分, 月面巡视探测器与着陆器成功分离, 顺利驶抵月球表面. 在嫦娥三号月面巡视探测器上, 安置了一对全景相机、一对导航相机、惯性导航系统和里程计等, 并实时向地面接收站传送立体图像、遥测位置与姿态(位姿)等信息. 由于存在系统误差、车轮打滑等因素的影响, 导致遥测位姿数据无法准确地反映探测器当前状态, 难以满足导航控制、移动规划等需求. 因此, 需研究月面巡视探测器的定位技术.

目前, 有不少学者提出了一些有效的定位方法: (1) 石德乐等人[3]提到了星地敏感器测量、甚高频多普勒跟踪、惯性导航系统和里程计的组合测量以及视觉里程计技术. 前者以恒星和无线电系统来确定巡视探测器的粗略位置, 精度较低, 后者根据前后立体图像的匹配点对采用最大似然法估计巡视探测器的位姿信息, 在FIDO漫游车和MER火星车中获得了应用, 使定位精度达到了移动距离的2.5%; (2) 基于控制信息的图像定位技术[2~4], 包括利用轨道器影像控制点和着陆器的特征点, 但存在月面环境特征、相机视场角等诸多因素的限制; (3) 马友青等人[5]提出了立体图像导航定位技术, 通过立体图像相对定向获取相机的相对方位元素后, 对连接点构建立体模型,

引用格式: 刘少创, 贾阳, 马友青, 等. 嫦娥三号月面巡视探测器高精度定位. 科学通报, 2015, 60: 372–378
Liu S C, Jia Y, Ma Y Q, et al. High precision localization of the Chang'E-3 lunar rover (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 372–378, doi: 10.1360/N972014-00455

最后采用加权总体最小二乘平差实现巡视探测器位置的计算, 在我国月面巡视探测器样机的定位试验中得到了验证, 定位精度为移动距离的4.28%; (4) 光束法平差定位技术[6~8]. 在惯性导航系统提供探测器位姿信息的基础上, 通过相机坐标系与探测器本体系的坐标转换流程, 可计算出相机的位姿数据, 并作为平差的初始值. 通过连接点建立图像网络进行迭代计算, 获得较高精度的相机位置, 最后通过坐标转换的逆过程, 计算探测器的位置. 该方法的收敛性依赖于未知数的初始值精度, 在精度较差的初始值下难以准确收敛. 因此, 坐标转换精度、探测器位姿精度直接影响定位结果. Di等人[6]在MER火星车测试中采用光束法平差技术, 使定位精度达到移动距离的2%. 在我国月面巡视探测器样机的定位试验中, 马友青等人[7]利用光束法平差技术给出了尚未进行相机精标定下的探测器定位精度, 其值为移动距离的4.8%. 王保丰等人[8]采用光束法平差技术定位出月面巡视探测器在着陆点周围的位置, 但尚未公布整个移动过程中的位置信息. 针对月面环境无高精度控制点下的月面巡视探测器定位问题, 本文提出了立体图像条带网定位方法, 并与光束法平差方法进行对比验证.

1 嫦娥三号月面巡视探测器摄影测量定位方法

1.1 相机标定及立体相机相对方位元素的计算

立体相机的高精度标定, 提供相机内方位元素[9](主距f, 像主点偏移量x_0和y_0)、畸变参数[7,10]. 第一步, 建立标定控制场, 将控制场坐标系、室内GPS坐标系与月面巡视探测器本体系进行关联; 第二步, 通过月面巡视探测器导航定位坐标系转换体系[5]可换算出相机坐标系与控制场坐标系的位姿关系, 并将其作为像片外方位元素[9]的初始值; 第三步, 月面巡视探测器在不同位置, 利用立体相机对控制场进行多角度成像, 对立体图像进行特征点的量取, 其像点对应控制点. 视像点坐标、控制点坐标、像片内方位元素和相机畸变参数为观测量, 视像片外方位元素、控制点坐标、像片内方位元素和像点坐标系统误差为待求参数, 构建并解算误差方程式, 即可解算出待求参数的精确值. 月面巡视探测器正样立体相机的标定参数如表1所示.

依据左右像片外方位元素即可间接计算探测器立体相机的相对方位元素, 如表2所示.

1.2 稀疏同名像点匹配、连接点选择

利用SIFT算法对立体图像进行特征点提取, 然后利用特征向量的Euclid距离判断立体图像特征点的相似性[11]. 以左相机图像中的某特征点为例, 计算出右相机图像中与其Euclid距离最近的前两个特征点, 若最近的距离与次近的距离的比值小于设定的阈值, 则接受这一对匹配点, 完成同名像点匹配. 考虑到同一特征点在前后摄站图像上的成像有较大的分辨率差异和变形, 因此在选择连接点时, 采用人工选取和基于欧氏距离一致性[8]的粗差剔除方法保持选点的准确性.

表 1 月面巡视探测器立体相机的试验场标定参数

Table 1 Calibration parameters of the lunar rover's stereo cameras in the ground field

	f(像素)	x_0,y_0(像素)	径向畸变参数k_1	径向畸变参数k_2	偏心畸变参数p_1	偏心畸变参数p_2
左导航	1181.4	3.1, 11.5	-2.1597×10^{-8}	3.1118×10^{-14}	1.4603×10^{-7}	-3.1304×10^{-7}
右导航	1196.6	−1.0, −18.4	-2.2209×10^{-8}	3.0968×10^{-14}	-5.3254×10^{-9}	-2.8598×10^{-7}
左全景	3395.8	−18.0, 4.5	-2.7444×10^{-9}	3.0343×10^{-15}	6.3701×10^{-7}	4.6876×10^{-8}
右全景	3395.6	−17.3, −0.4	3.4428×10^{-9}	3.4532×10^{-16}	4.3370×10^{-7}	-3.3783×10^{-7}

表 2 月面巡视探测器立体相机摄影基线及相对方位元素[a)]

Table 2 Baseline and relative orientation elements of the lunar rover's stereo cameras[a)]

	摄影基线(mm)	μ(rad)	v(rad)	φ_0(rad)	ω_0(rad)	κ_0(rad)
导航相机	269.2	−0.0022	−0.0340	−0.0054	0.0078	0.0003
全景相机	271.4	0.0140	−0.0369	−0.0055	0.0005	0.0001

a) μ, v, φ_0, ω_0和κ_0构成了立体相机的相对方位元素[5]

为保证计算结果的稳定性和准确性，需为连接点制定一套选择标准：连接点应均匀分布在图像重叠区域，有一定纵深方向上的延伸；遵循离月面巡视探测器越近，点位越多的原则，避免出现3点或者多点共线、共面的情况，保证连接点数目(多于5个)；考虑到同名像点匹配以及人为选点出现粗差的不确定性，建议月面巡视探测器月面移动时采取“前视-后视”的成像模式，可确保足够大的重叠区域. 图1给出导航相机图像的连接点分布示意.

1.3 立体图像条带网的构建和数学模型解算

通过相机畸变参数对同名像点坐标进行系统误差补偿，然后根据相机内方位元素、相对方位元素和系统误差补偿后的同名像点坐标，对连接点进行前方交会[5]，获得在左相机系下的三维坐标. 然后经过月面巡视探测器导航定位坐标系转换体系，获得连接点在探测器本体系下的坐标，完成立体模型的构建. 在重叠的覆盖区域，选择分布均匀、有一定纵深方向的连接点序列，将不同摄站的探测器立体模型进行关联，从而构建立体图像条带网，其数学模型为

$$\boldsymbol{B}_{p\times 3}=c\boldsymbol{A}_{p\times 3}\boldsymbol{\xi}_{3\times 3}+\boldsymbol{e}_{p\times 1}\boldsymbol{t}^{\mathrm{T}}{}_{1\times 3}, \tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{B}_{p\times 3}$, $\boldsymbol{A}_{p\times 3}$分别为前一个摄站、当前摄站中$p$个连接点的三维坐标构成的矩阵，$c$为比例系数，$\boldsymbol{e}$为元素全为1的向量，$\boldsymbol{t}$=[$\Delta X$ ΔY ΔZ]，$\boldsymbol{\xi}$分别为待解算的三维平移向量和3×3的姿态角旋转矩阵(元素由月面巡视探测器的偏航角κ、俯仰角ω、滚动角φ等3个独立参数构成). 在解算(1)式时，通常采用最小二乘平差，对待解算参数初始值的依赖性较强.

Procrustes理论的核心问题为求解立体模型间的最优变换参数，由于其具有直接解算的特点受到广泛的研究. Akca[12]探讨了Procrustes理论应用于摄影测量学中的可行性，Crosilla等人[13]将Procrustes理论引入到独立模型法光束法平差中，实现了独立模型向控制点坐标系趋近的最优估计，但需要包含共有的连接点和一定数量的控制点. 马友青等人[5,14]提出了基于Procrustes理论和加权总体最小二乘的立体模型几何变换方法，并将其与距离权矩阵应用在月面巡视探测器样机室内试验场的定位测试中，取得了较好的结果. 基于以上分析，立体图像条带网定位方法在扩展正交Procrustes理论[12]和连接点坐标距离权[5]的基础上，对(1)式进行加权最小二乘平差

$$\begin{aligned}&\min\nolimits_{\mathrm{wls}}\mathrm{tr}\left(\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{p\times p}\boldsymbol{V}\boldsymbol{W}_{3\times 3}\right)\\&=\min\nolimits_{\mathrm{wls}}\mathrm{tr}\left[(c\boldsymbol{Q}\boldsymbol{A}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e}\boldsymbol{t}^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{Q}\boldsymbol{B})^{\mathrm{T}}(c\boldsymbol{Q}\boldsymbol{A}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e}\boldsymbol{t}^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{Q}\boldsymbol{B})\right],\end{aligned} \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{V}$为残差矩阵，$\boldsymbol{V}=c\boldsymbol{A}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{e}\boldsymbol{t}^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{B}$，$\mathrm{tr}(\cdot)$为矩阵迹运算，$\boldsymbol{W}_{3\times 3}$为单个连接点内部坐标($X$ Y Z)的权矩阵，在本方法中视为单位矩阵，$\boldsymbol{W}_{p\times p}$为$p$个连接点之间的坐标距离权矩阵，令$\boldsymbol{W}_{p\times p}=\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}$. (2)式的参数解表达式[12]为

$$\boldsymbol{\xi}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{t}=(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{B}-c\boldsymbol{Q}\boldsymbol{A}\boldsymbol{\xi})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e}\Big/\left[(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})\right], \tag{3}$$

其中，$\mathrm{SVD}\left\{(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{A})^{\mathrm{T}}\left[\boldsymbol{e}-\dfrac{(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})^{\mathrm{T}}}{(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})}\right]\boldsymbol{Q}\boldsymbol{B}\right\}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}$, SVD为矩阵的奇异值分解运算符，$\boldsymbol{U}$和$\boldsymbol{V}$分别为对应的左奇异、右奇异正交矩阵，$\boldsymbol{\sigma}$为奇异值构成的对角线矩阵. c通过

$$c=\frac{\mathrm{tr}\left\{\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{A})^{\mathrm{T}}\left[\boldsymbol{e}-\dfrac{(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})^{\mathrm{T}}}{(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})}\right]\boldsymbol{Q}\boldsymbol{B}\right\}}{\mathrm{tr}\left\{(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{A})^{\mathrm{T}}\left[\boldsymbol{e}-\dfrac{(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})^{\mathrm{T}}}{(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{e})}\right]\boldsymbol{Q}\boldsymbol{A}\right\}}$$

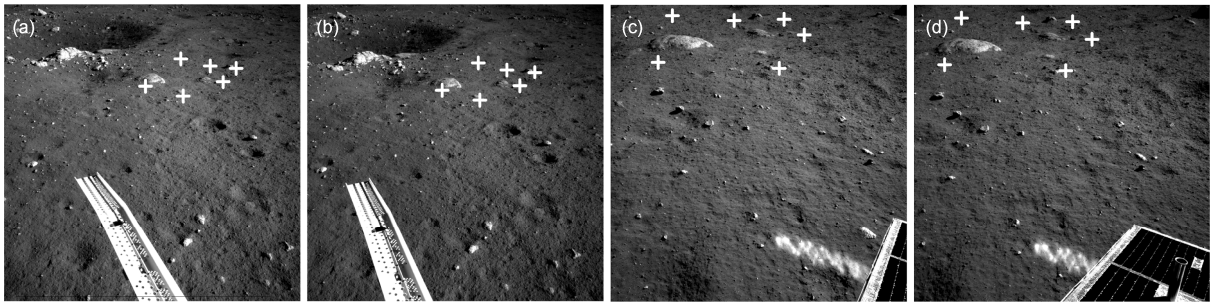


图1 相邻摄站立体图像的连接点. (a), (b) 月面巡视探测器在着陆器顶部拍摄的图像; (c), (d) 月面巡视探测器在探测点X拍摄的图像，白色十字丝为连接点

Figure 1 Connection points of stereo images at the adjacent stations. (a), (b) Images of the lunar rover taken at the top of the lander; (c), (d) images of the lunar rover taken in the detection point X, the white wire as the connection points

即可获得. 利用(3)式计算出ξ即可计算出月面巡视探测器的姿态角, 再联合 t 即可获得当前摄站与前一摄站探测器本体系间的位姿关系. 由于第一个摄站探测器本体系与着陆点坐标系的位姿关系唯一确定, 即可将当前摄站探测器本体系纳入到着陆点坐标系下.

立体图像条带网定位方法在理论上的贡献在于: 从摄影测量学的基础理论出发, 将立体图像条带网的数学模型视为最小二乘平差问题, 根据距离权设计连接点的坐标观测量权值, 并结合扩展正交Procrustes理论实现探测器位姿的直接求解, 最终给出了如(3)式的计算表达式.

2 嫦娥三号月面巡视探测器定位结果与精度验证

月面巡视探测器在月表移动时, 无法提供精确的位姿信息, 需进行定位方法精度的验证.

2.1 月面巡视探测器定位方法的精度验证

月面巡视探测器样机工作在近似月面环境中的室内试验场内, 用两台全站仪联测出所有控制点在控制场坐标系下的坐标, 仪器的测角精度是2.0″, 点位测量精度为0.12 mm. 然后用4台室内GPS设备测量月面巡视探测器车体支架特征点和部分控制点坐标, 仪器的测角精度是1.0″, 点位测量精度为0.1 mm. 通过控制点和支架特征点将月面巡视探测器本体系、室内GPS坐标系和控制场坐标系建立联系. 月面巡视探测器在22个不同位置进行相机成像, 采用立体图像条带网定位方法(方法1)和光束法平差定位方法(方法2)进行定位测试, 测试结果如表3所示.

在表3中, 第2和3列分别表示的是相邻摄站、当前摄站的编号和所使用的立体图像类型, 且相邻摄

表 3 月面巡视探测器样机在室内试验场的定位结果汇总

Table 3 Summary localization results of the lunar rover prototype in the indoor testing field

序号	相邻摄站	当前摄站	相对距离(m)	绝对定位精度(m)		相对定位精度(%)	
				方法1	方法2	方法1	方法2
1	B2全景	B4导航	13.830	0.422	0.301	3.05	2.18
2	B2导航	B4导航	13.830	0.809	0.854	5.85	6.17
3	B4全景	B3导航	5.760	0.139	0.230	2.41	3.99
4	B2全景	C2-X导航	6.079	0.399	0.409	6.56	6.73
5	B2导航	C2-A导航	8.633	0.223	0.204	2.58	2.36
6	C2导航	C2-B导航	4.806	0.387	0.309	8.05	6.43
7	C2-B导航	C2-C导航	6.711	0.240	0.210	3.58	3.13
8	C2-C导航	C2-D导航	5.377	0.280	0.337	5.21	6.27
9	C2-D导航	C7-1导航	6.476	0.242	0.367	3.74	5.67
10	C7-1导航	C7-2导航	7.331	0.196	0.102	2.67	1.39
11	C7-2导航	C7-S1导航	9.581	0.258	0.218	2.69	2.28
12	C2-B导航	C7-S1全景	6.994	0.189	0.203	2.70	2.90
13	C7-2全景	C4-0全景	16.680	0.590	0.417	3.54	2.50
14	C7-2导航	C4-0导航	7.384	0.220	0.133	2.98	1.80
15	C4-0全景	C4-1全景	9.025	0.224	0.149	2.48	1.65
16	C4-0全景	C4-1导航	9.025	0.330	0.453	3.66	5.02
17	C4-0导航	C4-1导航	10.190	0.545	0.396	5.35	3.89
18	C4-1导航	C4-2导航	9.427	0.390	0.682	4.14	7.23
19	C4-0全景	C4-2全景	18.320	1.100	1.214	6.00	6.63
20	C4-2全景	C4-3导航	9.808	0.170	0.112	1.73	1.14
21	C4-2导航	C4-4导航	9.756	0.844	0.793	8.65	8.13
22	C4-2全景	C4-5导航	11.090	0.362	0.130	3.26	1.17

站探测器的位置数据由室内GPS测量获得, 相对距离表示的是摄站间距, 绝对定位精度表示的是探测器当前摄站定位位置与室内GPS实测位置的平面较差, 相对定位精度为绝对精度与相对距离的比值. 定义小于9 m的相对距离为短程距离, 大于9 m而小于12 m的为中程距离, 大于12 m的为长程距离, 根据相对距离统计表3的探测器定位次数, 结果如表4所示.

光束法平差定位方法、立体图像条带网定位方法的优缺点:

(ⅰ) 方法稳定性. 光束法平差定位方法的数学模型为图像像点坐标观测值改正数的最小二乘问题[7], 在理论上较为严谨, 但需要足够多的控制条件, 从而实现相机内外参数、特征点坐标等待解算参数的整体求解. 在遥测数据精度较差或者错误(探测器车轮打滑侧移)的情况下, 光束法平差定位方法将难以获得准确的收敛结果. 立体图像条带网定位方法解算的核心问题为相邻摄站探测器本体系间的三维坐标转换, 其数学模型仍为最小二乘问题, 且待解算参数的数目更少, 可实现大角度立体模型间的直接计算. 因此, 后者更适合遥测位姿数据缺失或者精度较低情况下的探测器定位, 稳定性较强. 另外, 立体图像条带网定位方法引入了连接点坐标距离权矩阵, 不同于光束法平差过程中采用的选权迭代法, 更为适合立体相机平行于月面的成像方式.

表 4 月面巡视探测器样机的定位次数统计与相对定位精度

Table 4 Number of statistical localization and relative localization precision of the rover prototype

相对距离	探测器定位次数	相对定位精度(平均值)(%)	
		方法1	方法2
短程距离	10	4.05	4.07
中程距离	8	4.00	3.81
长程距离	4	4.61	4.37

表 5 两种定位方法的计算时间(ms)[a)]

Table 5 Calculation time of the two rover's localization methods (ms)[a)]

连接点数目	立体图像条带网定位方法	光束法平差定位方法
5	1	563
6	1	568
9	1	591
12	1	584

a) 数据的测试环境为Intel(R) Core(TM)i5@2.50 GHz, 2 GB内存的系统

(ⅱ) 计算效率. 光束法平差定位方法是前方交会、后方交会反复迭代的过程, 且方程式的构造较为复杂, 且需要将修正后的像片外方位元素通过导航定位坐标系转换体系, 进一步换算探测器的位置. 而立体图像条带网定位方法的数学模型较为简单, 可直接计算出探测器的位置信息, 因此, 计算效率高于前者, 表5统计的是为连接点像点坐标输入到计算出探测器位置的耗时.

(ⅲ) 计算结果. 从表4中可知, 在短程距离的10次测试中, 相对定位精度的平均值依次为4.05%, 4.07%, 精度相当. 在中程、长程距离内, 立体图像条带网定位方法的精度(平均值)略低于光束法平差定位方法. 连接点的分布对两种方法均存在较大的影响, 中程、长程距离下, 相邻摄站图像的重叠区域较小, 使连接点难以达到选择标准. 在一些不理想的连接点分布情况下, 两种定位方法失败. 光束法平差定位方法通常采用增大收敛阈值、病态性方程求解的手段, 以获得较为准确的定位结果. 因此, 连接点分布对计算结果的影响, 光束法平差定位方法较小.

根据表3和4可以总结出月面巡视探测器在不同移动距离下的成像策略: 短程距离移动时, 采用相邻摄站的导航图像; 中程距离移动时, 采用导航与全景图像; 长程距离移动时, 应采用全景图像. 真实的月面环境难以提供高精度的控制点信息, 以及受到震颤、环境等因素的影响, 相机标定参数、转移机械结构的运动参数将会发生某种程度的变化, 探测器定位方法应遵循在求解较少的待解算参数情况下获得较高精度的定位结果的原则. 嫦娥三号月面巡视探测器移动中, 相邻摄站距离均在9 m以内, 因此, 建议两种方法相互验证, 保证探测器的定位精度.

2.2 嫦娥三号月面巡视探测器的定位结果及特征点重建

嫦娥三号月面巡视探测器在月面累积行走112.1 m, 在重建探测器本体系的N0200, N0204和N0208三个探测点, 遥测位姿数据的获取是一个连续过程. 在利用导航图像完成光束法平差、立体图像条带网定位方法的计算后, 图2给出了探测器月面移动阶段的完整路径示意, 并在表6统计了探测器定位位置与遥测位置数据的平面距离.

如图2所示, 带有三角形、五边形标识的线段分别表示光束法平差、立体图像条带网定位方法的探测

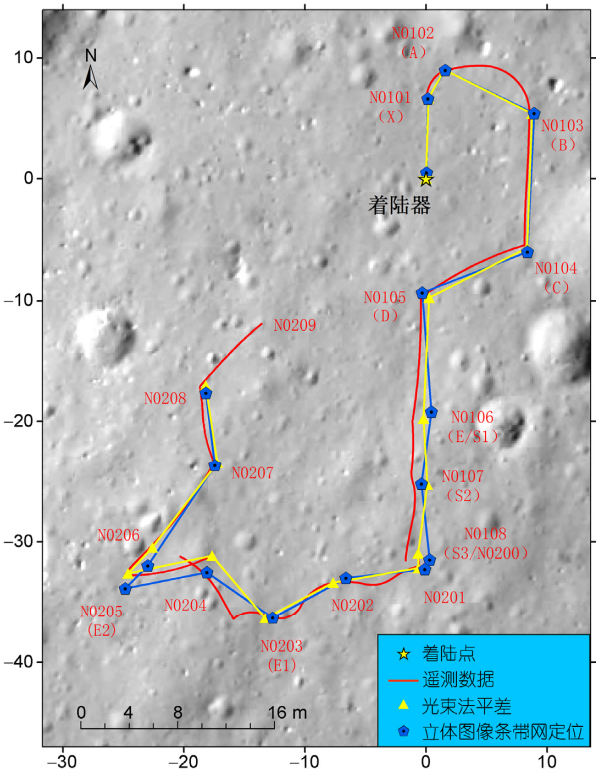


图 2 (网络版彩色)嫦娥三号月面巡视探测器的移动路径和定位路径

Figure 2 (Color online) Moving path and location path of the Chang'E-3 lunar rover

器定位路径，不带标志的线段表示的是探测器的遥测路径.

从表6中得出，立体图像条带网定位方法可以显著地修正遥测位置数据，与光束法平差定位方法相互验证，实现了探测器高精度定位.

为考察定位方法对月面特征点的重建精度，本文提出了一种重建精度评价方法：在遥测位姿数据

表 6 探测器定位方法对遥测位置数据的修正结果统计(m)

Table 6 Statistical correction results of the telemetry location datas using the rover's localization methods (m)

探测点编号	立体图像条带网定位方法	光束法平差定位方法
N0200	2.207	1.126
N0204	2.644	2.571
N0208	0.871	0.493

和立体图像条带网定位方法计算的探测器位置数据(姿态角沿用遥测姿态角)的两种情况下，统计相邻摄站连接点在着陆坐标系下的坐标差. 以图2中的连接点为研究对象，连接点在物方的平面坐标差分别为0.210和0.108 m，三维坐标差分别为0.245和0.112 m. 立体图像条带网定位方法在平面和三维空间中提高的幅度分别为48.6%=(0.210–0.108)/0.210和54.3%=(0.245–0.112)/0.245，这从另一个角度验证了立体图像条带网定位方法的有效性.

3 结论

针对嫦娥三号月面巡视探测器的定位问题，本文从摄影测量学出发，提出了立体图像条带网定位方法. 与光束法平差定位方法相比，新方法适用于大角度立体模型的直接几何计算，克服了对遥测位姿数据初始值的依赖性. 在方法使用上，新方法与光束法平差定位方法相互验证，应用于月面巡视探测器的遥操作系统，在无高精度控制点的月面环境中实现探测器的定位，并能进一步地修正遥测位姿数据，为其系统误差检校和探测器车轮滑移率的预测提供了基础研究数据.

参考文献

1 Sun Z Z, Jia Y, Zhang H. Technological advancements and promotion roles of Chang'E-3 lunar probe mission. Sci China Tech Sci, 2013, 56: 2702–2708

2 Jiang 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 Shi D L, Ye P J, Jia Y. Study on Chinese lunar rover location methods. Spacecr Eng, 2006, 15: 14–20 [石德乐, 叶培建, 贾阳. 我国月面巡视探测器定位方法研究. 航天器工程, 2006, 15: 14–20]

4 Shi D L, Ye P J, Jia Y, et al. Research on lunar rover locating method based on lander stereo vision. Spacecr Eng, 2007, 16: 25–32

5 Ma Y Q, Liu S C, Jia Y, et al. Experimental research of navigation and localization algorithm based on stereo images for the lunar rover (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 1097–1104 [马友青, 刘少创, 贾阳, 等. 基于立体图像的月球车导航定位试验研究. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1097–1104]

6 Di K, Xu F, Wang J, et al. Photogrammetric processing of rover imagery of the 2003 Mars exploration rover mission. J Photogr Remote Sensing, 2008, 63: 181–201
7 Ma Y Q, Jia Y H, Liu S C, et al. Bundle adjustment based on LM algorithm for rover navigation and localization (in Chinese). J Northeastern Univ (Natural Science), 2014, 35: 489–493 [马友青, 贾永红, 刘少创, 等. 基于 LM 法的光束法平差巡视器导航定位. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35: 489–493]
8 Wang B F, Zhou J L, Tang G S, et al. Research on visual localization method of lunar rover (in Chinese). Sci Sin Inf, 2014, 44: 452–460 [王保丰, 周建亮, 唐歌实, 等. 嫦娥三号巡视器视觉定位方法. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 452–460]
9 Wang Z Z. Principle of Photogrammetry (in Chinese). Wuhan: Wuhan University Press, 1990 [王之卓. 摄影测量原理. 武汉: 武汉大学出版社, 1990]
10 Weng J Y. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. IEEE Trans PAMI, 1992, 14: 965–980
11 Wu W R, Wang D Y, Xing Y, et al. Binocular visual odometry algorithm and experimentation research for the lunar rover (in Chinese). Sci Sin Inf, 2011, 41: 1415–1422 [吴伟仁, 王大轶, 邢琰, 等. 月球车巡视探测的双目视觉里程算法与实验研究. 中国科学: 信息科学, 2011, 41: 1415–1422]
12 Akca D. Generalized Procrustes Analysis and Its Applications in Photogrammetry. Zurich: ETH Zurich, 2004. 10–15
13 Crosilla F, Beinat A. Use of generalised Procrustes analysis for the photogrammetric block adjustment by independent models. J Photogr Remote Sensing, 2002, 56: 195–209
14 Ma Y Q, Liu S C, Wei S Y, et al. Research on terrestrial analytical photogrammetry with weighted total least squares (in Chinese). Geomat Inf Sci Wuhan Univ, 2013, doi: 10.13203/j.whugis20130387 [马友青, 刘少创, 魏士俨, 等. 加权总体最小二乘的地面解析摄影测量算法. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, doi: 10.13203/j.whugis20130387]

High precision localization of the Chang'E-3 lunar rover

LIU ShaoChuang[1,5], JIA Yang[2], MA YouQing[1], GU Zheng[2], WEI ShiYan[3], LI QunZhi[2], XU XinChao[4], WEN Bo[2], ZHANG Shuo[5], LI MingLei[1], MA Hao[1] & YANG Huan[5]

[1] *Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
[2] *Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;*
[3] *Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China;*
[4] *School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;*
[5] *School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430072, China*

High-precision localization technology is an important component for conducting scientific explorations in the Chang'E-3 lunar rover mission. In this study, the exact stereo images strips network localization (SISNL) method is proposed to solve the localization problem of the lack of high-precision control points on the lunar surface. First, we obtained the camera calibration parameters using the bundle adjustment algorithm in a ground field with some known control points. Hence the baseline and relative orientation elements of the stereo cameras were acquired. Second, after building the stereoscopic model using feature matching and forward intersection, the stereo images strips network was generated, using the sequence of connection points at different stations. Third, based on the weighting matrix of the coordinate observations of the connection points, and on the extended orthogonal Procrustes theory, the least squares adjustment algorithm was used to solve the mathematical model of the images strips network. The lunar rover's position and attitude information was then acquired directly. At the end of the study, we compared the SISNL method with the traditional bundle adjustment method using the indoor testing field data. Though the two methods have equivalent localization accuracy, the comparision results show that the SISNL method was superior to the latter in terms of both stability and efficiency. On this basis, the SISNL method was successfully applied to the Chang'E-3 lunar rover teleoperation system and satisfied the demand for lunar rover localization.

Chang'E-3, lunar rover, localization, camera calibration, stereo images strips network

doi: 10.1360/N972014-00455