科学通报 2015 年 第 60 卷 第 28-29 期：2750 ~ 2757
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

基于 LRO NAC 影像的嫦娥三号着陆点高精度定位与精度验证

刘斌[①], 邸凯昌[①*], 王保丰[②], 唐歌实[②], 徐斌[①], 张璐璐[①], 刘召芹[①]

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
* 联系人, E-mail: dikc@radi.ac.cn

2015-04-03 收稿, 2015-04-24 接受, 2015-08-17 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2012CB719902)和国家自然科学基金(41301528, 41171355)资助

摘要 嫦娥三号(CE-3)着陆器的高精度定位具有重要的工程意义和科学应用价值. 本文研究基于美国月球侦察轨道器(lunar reconnaissance orbiter, LRO)窄角相机(narrow angle camera, NAC)高分辨率月球遥感影像进行CE-3着陆点高精度定位的方法, 并利用月面绝对控制点进行精度验证. 收集历年来CE-3号着陆区和月球表面棱镜点的LRO NAC数据, 利用精化后的轨道、姿态及相机参数等数据建立LRO NAC的严密成像几何模型, 通过严密成像几何模型的初始点位预测、人工量测和高精度匹配等方式, 获取影像上着陆点和月面激光测距反射棱镜点的影像坐标. 用DEM辅助单像测图方法分别对CE-3着陆点和各棱镜标志点进行定位解算, 将棱镜点的定位结果与地面观测的高精度定位值对比进行精度评价. 利用本文方法, 得到CE-3着陆点定位坐标为北纬44.1219°, 西经19.5113°.

关键词
嫦娥三号
着陆点定位
LRO NAC
月球激光测距
控制网

2013年12月14日, 嫦娥三号(CE-3)探测器成功实现月面软着陆, 12月15日实现了巡视器与着陆器的两器分离和互拍, 标志着CE-3任务取得圆满成功, 使我国成为世界上继美国和苏联后第3个实现月球软着陆的国家. CE-3着陆器在月固坐标系下的高精度定位具有重要的工程价值和重大的科学意义, 如CE-3高精度定位坐标可作为巡视器探测路径中局部坐标系的坐标转换至全球坐标系坐标的控制点. 另外, 结合对着陆器的长期无线电测量, 还可支持月球动力学研究和月面绝对控制网的优化.

在目前深空探测器精确定位研究中, 主要有无线电测量和卫星遥感影像定位2类方法. 甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)在国内外深空探测中得到了广泛的应用[1,2], 在嫦娥三号任务中, 基于无线电测量数据进行跟踪定位, 在短时间内得到嫦娥三号着陆器粗定位坐标为北纬44.1213°, 西经19.5093°[3], 通过持续观测, 对嫦娥三号着陆器进一步定位为北纬44.1206°, 西经19.5124°[3,4], 基于无线电测量结果在平地球/极轴坐标系(简称平轴坐标系), 历表采用DE421, 月球半径值为1737.4 km下给出. 利用VLBI对着陆器和巡视器的导航定位依然存在着精度和观测条件的制约, 因此很多学者研究利用卫星遥感影像进行着陆器的定位. 在火星探路者任务中, Golombek等人[5]利用Viking卫星影像与着陆器影像上人工选取的5对特征点通过方位角计算进行着陆点定位, 定位精度达到100 m; 在勇气号和机遇号火星探测车任务中, Li等人[6,7]利用MOC(mars orbiter camera)影像与火星车全景影像拼图方位角计算和撞击坑形状对比等方法进行了2个着陆点的高精度定位. Di等人[8]提出了通过火星车正射影像(digital

引用格式: 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. 科学通报, 2015, 60: 2750–2757
Liu B, Di K C, Wang B F, et al. Positioning and precision validation of Chang'E -3 Lander based on multiple LRO NAC images (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2750–2757, doi: 10.1360/N972015-00336

orthophoto map, DOM)与HiRISE卫星影像的匹配实现探测车自动高精度定位的方法; 在好奇号火星车探测任务中, 着陆点精确定位采用了降落图像与无线电定位相结合的方法[9,10]. 针对嫦娥三号着陆器的定位, 贾阳等人[11]、万文辉等人[12]分别利用不同方法将降落相机影像与CE-2 DOM进行配准, 并修正着陆器与降落相机安置参数后, 得出定位结果为北纬44.1188°, 西经19.5126°; Liu等人[13]利用CE-3导航相机在着陆器上获取的影像与降落相机DOM配准进行着陆器定位, 定位结果为北纬44.11884°, 西经19.51256°, 由于使用的降落相机DOM生产过程中使用了CE-2 DOM底图作为参考影像进行控制, 所以其绝对定位精度也取决于CE-2 DOM, 其定位结果与贾阳、万文辉等人的定位结果得到了相互验证; NASA于2013年9月30日公布了通过着陆前后LRO NAC图像对比, 计算的CE-3着陆器坐标: 北纬44.1214°, 西经19.5116°, 相对于平均半径的高程–2640 m[14]; Wagner等人[15]利用嫦娥三号着陆前后的5景LRO NAC影像对着陆点定位于北纬44.1213°, 西经19.5115°, 相对于平均半径的高程–2639 m, LRO NAC影像定位结果均采用平轴坐标系, 历表采用DE421, 月球半径值采用1737.4 km.

基于卫星遥感影像定位精度取决于卫星遥感影像本身的定位精度, CE-2 DOM绝对定位精度受限于轨道和姿态测量精度. 目前对月观测的卫星遥感影像中, LRO携带的窄角相机是在轨运行的对月表成像分辨率最高、定位最精确的传感器, 分辨率最高可达0.5 m. 其定位精度在经过基于lunar orbiter laser altimeter (LOLA)交叉点平差的轨道精化及相机在轨标定后, 能达到20 m以内[16,17]. 在前期国外团队利用LRO NAC影像对CE-3进行定位的工作中, 仅使用了少量的影像, 且并未对定位精度进行分析. 为获取高精度的CE-3着陆器定位坐标, 并对定位精度进行分析验证, 本研究中获取了嫦娥三号着陆点区域内着陆前后14幅覆盖着陆区的LRO NAC影像, 并利用NAIF SPICE获取精化后的轨道姿态参数及相机的内参数, 建立了LRO NAC的严密成像几何模型, 并利用单像测图方法进行着陆点的精确定位. 同时利用已有月面激光测距反射棱镜(lunar ranging retro reflector, LRRR)的高精度绝对坐标观测值, 与LRO NAC影像定位结果进行对比, 评价轨道姿态精化后LRO NAC影像的定位精度.

1 方法与数据

收集了2012年1月至2014年5月获取的CE-3号着陆区的21幅LRO NAC数据(分辨率1.5~2.1 m)进行CE-3定位解算. 首先利用精化后的LRO轨道、姿态及相机内参数建立LRO NAC的严密成像几何模型, 然后利用严密成像几何模型及CE-3的初始经纬度坐标预测着陆点在各影像上的影像坐标, 以预测的点位为基础进行标志点人工判读及高精度匹配, 最后利用精确的影像坐标及高精度DEM进行定位. DEM采用LRO激光高度计的全球DEM产品LDEM.

由于CE-3着陆点没有更高精度的定位值作为真值, 所以无法通过与真值对比的方式直接评价LRO NAC对CE-3定位的精度. 在以往的月球着陆探测任务中, 已经在月面安置了5个激光反射棱镜(美国阿波罗系列11号、14号、15号(简称A11, A14, A15)和苏联月球车1号、2号(简称LK1, LK2)), 通过长期的地基激光测距观测, 所确定的其位置的精度达到了厘米级[18,19], 可作为月面绝对控制点, 各棱镜点位置如表1所示, 表1中经纬度及半径值均已归算到平轴坐标系下, 采用DE421历表及1737.4 km的月球半径值. 因此, 本文利用这些月球控制点进行LRO NAC影像绝对定位精度验证. 我们收集了这些控制点所在的着陆区多年的LRO NAC影像, 并利用CE-3定位同样的方法对这些标志点定位, 对比影像定位结果与控制点坐标真值, 从而评价本文定位方法的精度. 本文整体技术路线如图1所示.

1.1 LRO NAC影像严密几何模型的建立

建立LRO NAC的严密成像几何模型, 即是建立LRO NAC影像的影像坐标与其对应月固坐标下的对

$$\begin{bmatrix} X-X_S \\ Y-Y_S \\ Z-Z_S \end{bmatrix} = \lambda \boldsymbol{R}_{ol}\boldsymbol{R}_{bo}\boldsymbol{R}_{ib}\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda R\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

表 1 激光反射棱镜位置测量值[18]

Table 1 Laser ranging derived coordinates of the five lunar retroreflectors[18]

激光反射棱镜	纬度(°)	经度(°)	半径(m)
A11 LRRR	0.673440	23.473073	1735472.7
A14 LRRR	–3.644170	342.521352	1736336.1
A15 LRRR	26.133396	3.628507	1735477.3
LK1 LRRR	38.315158	324.992036	1734928.7
LK2 LRRR	25.832307	30.922149	1734639.0

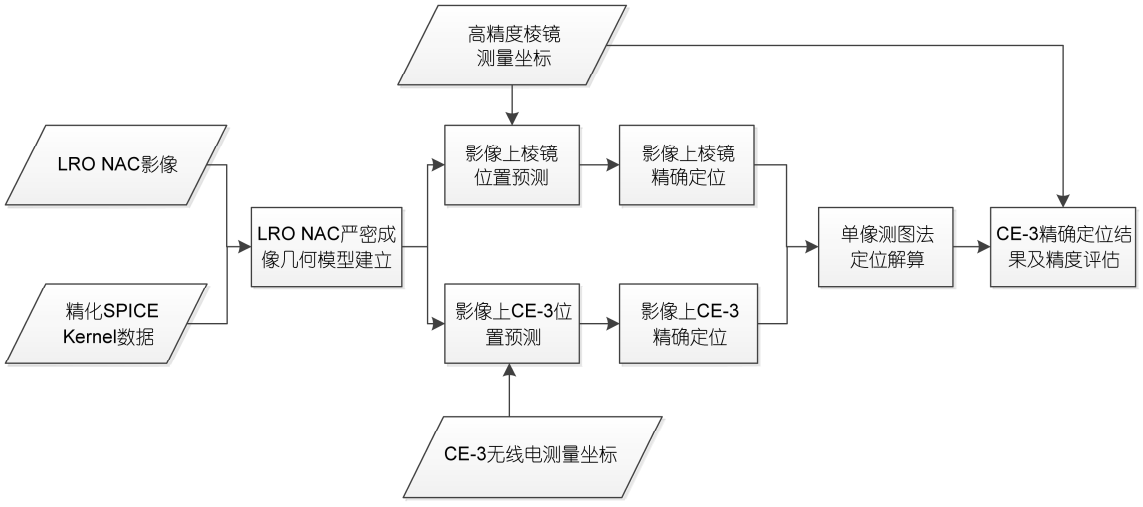


图 1 CE-3 定位方法及精度验证流程

Figure 1 Workflow of CE-3 positioning and precision validation

应关系. 根据共线方程, 严密成像几何模型可表示为其中, (x, y)为影像焦平面坐标; f为焦距; (X, Y, Z)和(X_s, Y_s, Z_s)为月固坐标系下的月面点坐标和摄影中心位置; $\boldsymbol{R}_{ib}$为像空间辅助坐标系到本体坐标系的旋转矩阵, $\boldsymbol{R}_{bo}$为本体坐标系到轨道坐标系的旋转矩阵, $\boldsymbol{R}_{ol}$是轨道坐标系到月固坐标系的旋转矩阵. λ是尺度因子; $\boldsymbol{R}$为整体的旋转矩阵, 旋转矩阵$\boldsymbol{R}$与内方位元素可以通过读取SPICE Kernel文件计算得到.

利用公式(1), 进行严密成像几何模型的正算, 即由影像上任意一像点坐标(r,c)和给定高程h计算其对应的经纬度(D_{lat}, D_{lon}).

首先利用像点坐标(r,c)经过内定向得到$[x\ y\ -f]^{\mathrm{T}}$. 然后将$R[x\ y\ -f]^{\mathrm{T}}$归一化得$[u_1\ u_2\ u_3]^{\mathrm{T}}$, 归一化公式为

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}u_1 & u_2 & u_3\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = R\Bigg[x\Big/\sqrt{x^2+y^2+f^2} \quad y\Big/\sqrt{x^2+y^2+f^2} \\ -f\Big/\sqrt{x^2+y^2+f^2}\Bigg]^{\mathrm{T}}.\end{aligned} \tag{2}$$

设月球的半径为R_L, 由球体公式可得, $X^2+Y^2+Z^2=(R_L+h)^2$, 将严密成像几何模型代入球体公式, 有:

$$(\lambda u_1+X_S)^2+(\lambda u_2+Y_S)^2+(\lambda u_3+Z_S)^2=(R_L+h)^2, \tag{3}$$

展开即为

$$\begin{aligned}&\lambda^2+2(X_S u_1+Y_S u_2+Z_S u_3)\lambda+(X_S{}^2+Y_S{}^2+Z_S{}^2)\\&\quad-(R_L+h)^2=0.\end{aligned}$$

可求得

$$\begin{aligned}&\lambda=-(X_S u_1+Y_S u_2+Z_S u_3)\\&\pm\sqrt{(X_S u_1+Y_S u_2+Z_S u_3)^2-(X_S{}^2+Y_S{}^2+Z_S{}^2)+(R_L+h)^2}.\end{aligned} \tag{4}$$

将λ带入严密成像公式即可求得(X, Y, Z). 大地经纬度坐标可由下式求得

$$\begin{cases}L=\mathrm{atan2}(Y,X),\\ B=\mathrm{atan2}(Z,\sqrt{X^2+Y^2}).\end{cases} \tag{5}$$

1.2 标志点位置提取

由于遥感影像覆盖区域大, 在一景影像大范围内寻找标志点往往较困难. 因此, 首先根据表1中的激光反射棱镜测量值及CE-3着陆点的粗测值, 在LRO NAC影像上进行初始点位的估计, 用于引导标志点的精确定位. 对于一个范围较小的局部区域, 遥感影像的几何变形可以用一个包含平移、缩放和旋转关系的仿射变换来描述. 本文采用迭代方法, 计算地面点坐标对应的像点坐标, 具体步骤如下.

(1) 由于卫星原始影像的中心点和4个角点的影像坐标对应的地面点坐标可由1.1中方法计算得到, 则可以利用已知点代入下式, 计算仿射变换参数f_0, f_1, f_2, g_0, g_1, g_2;

$$\begin{aligned}r&=f_0+f_1 lat+f_2 lon,\\ c&=g_0+g_1 lat+g_2 lon.\end{aligned} \tag{6}$$

(2) 将标志点的经纬度坐标(lat, lon)带入上式得到其预测的影像坐标(r_p, c_p);

(3) 根据1.1推导的光学卫星严密成像几何模型的正变换, 计算影像坐标(r_p, c_p, h)的地面点坐标(lat_p, lon_p);

(4) 计算残差e, 计算公式为$e=(|lat_p-lat|)^2+(|lon_p-lon|)^2$, 如果残差$e$满足设定的阈值, 直接输出

(r_p, c_p)作为标志点预测的影像坐标，否则以(r_p, c_p)为中心点，缩小经纬度坐标形成新的地面矩形区域范围，然后返回步骤(2)迭代运行，直到残差e满足设定的阈值.

然后根据预测的点位，在一幅影像上人工精确定位激光棱镜点. 在其他影像上，以人工确定棱镜点的局部影像为模板，以预测的点位为初值，通过影像最小二乘匹配，自动获取每张影像上的精确点位.

1.3 DEM辅助的单像测图方法

正算即由像方坐标(r, c)计算物方坐标(X, Y, Z)，理论上由2个已知参数解算3个未知参数是不可能的. 从1.1节可以看出，当物方高程已知时，由像素坐标(r, c)加物方高程Z可以确定球面坐标(X, Y, Z). 公式可简化表达如下

$$(X, Y, Z) = \mathrm{Func}RCZ(r, c, Z). \tag{7}$$

当物方高程未知时可以通过迭代过程求得地面高程：首先假设Z_0=0(点在投影基准面上)，由公式(7)确定平面坐标(X_0, Y_0)后到DEM上内插高程值Z_1，再次代入公式(7)确定平面坐标(X_1, Y_1)，如此迭代，直到前后2次坐标差值在限差之内时停止迭代. 由像方坐标(r, c)得到物方坐标(X, Y, Z)的具体过程如图2所示.

上述迭代过程，当地面坡度与物点的投影方向的竖直方向夹角之和大于90°时，迭代将不收敛. 此时可在每2次迭代后，求出其高程平均值作为新的Z_0，或在3次迭代后由下式计算近似正确高程

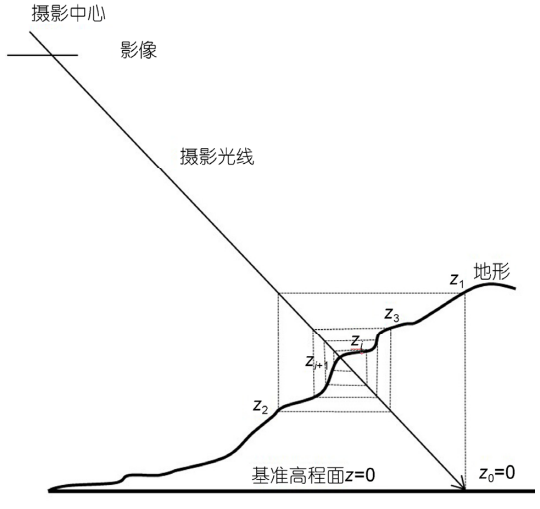


图 2 迭代法确定物方坐标示意图

Figure 2 Iterative method for 3D coordinates calculation in object space

$$Z = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2^2}{Z_1 + Z_3 - 2Z_2}, \tag{8}$$

其中Z_1, Z_2, Z_3为3次迭代的高程值.

2 着陆点定位

2.1 着陆点定位结果

首先根据标志点的经纬度，对标志点在影像上的行列号进行初始估计，以阿波罗11号棱镜点为例，在影像m109080308re上，利用本文1.2中的方法进行志点初始位置估计，估计点位为(1914.73, 22947.99). 利用人工判读的方式，在该影像上精确定位的点位为(1912.52, 22945.57)，其估计点位精度在平面约10个像素以内. 由此可见，在高精度的轨道、姿态及内方位元素的支撑下，影像的直接定位精度已较高，预测的点位值误差也能控制在较小的水平. 当人工确定一幅影像上标志点的精确坐标后，其他影像以标志点通过最小二乘影像匹配并自动获取点位坐标.

阿波罗11号、14号、15号着陆区人工标志包括月面激光测距反射棱镜(lunar ranging retro reflector, LRRR)、阿波罗月面实验包(apollo lunar surface experiment package, ALSEP)、登月舱(lunar modules, LM)，被动地震实验装置(passive seismic experiment, PSE)等；月球车1号和2号的人工标志为LRRR. 本文根据人工判断的难易程度，分别选择一些标志点进行判读，并利用相对关系推算出各标志点的绝对位置作为精度验证. 精确定位的部分标志点如图3所示.

在进行标志点识别的基础上，利用本方案进行多幅影像上的标志点定位，计算多幅影像定位结果的平均值及标准差. 计算中综合考虑成像条件，如观测角度、图像分辨率、成像时间等因素选择影像，对观测条件不佳，标志点定位观测值与平均值差值大于3倍标准偏差的影像作为粗差予以剔除. 最后将标志点绝对位置与平均值之间的差值作为定位结果的误差进行绝对定位精度验证，表2为进行粗差剔除后的计算结果，利用LRO NAC定位时均采用平轴坐标系，历表采用DE421，月球半径值采用1737.4 km.

由于LRO轨道设计及观测安排，使得各区域覆盖次数并不相同，且每次观测条件也各异，导致实验中每一观测区域的观测强度和精度也不相同. 在对各区域覆盖影像进行粗差剔除后，阿波罗11系列标志点具有32幅观测影像，而阿波罗14系列各标志点

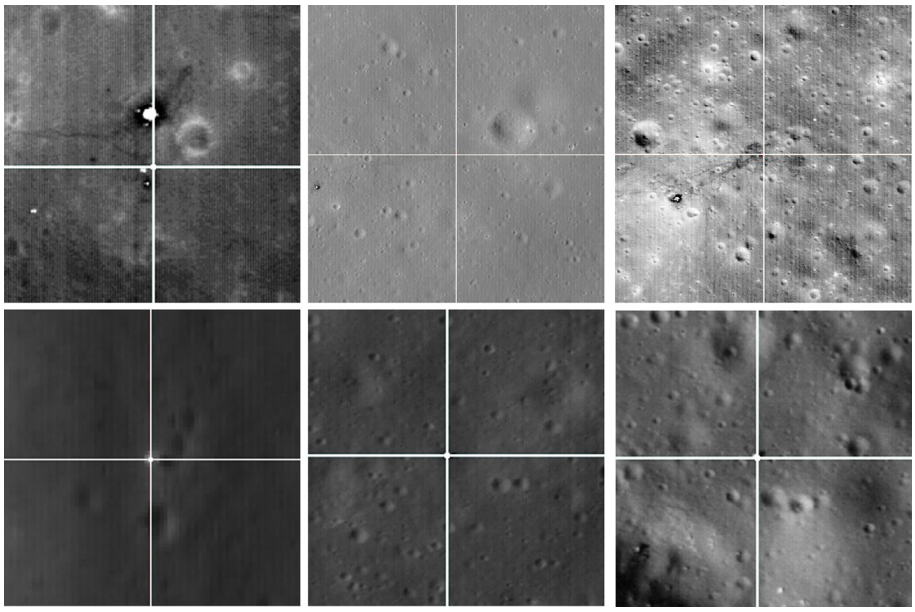


图 3 标志点在影像上精确定位图(从左上角顺时针分别为: A11 LRRR, A14 LRRR, A15 PSE, CE-3 着陆器, LK2 LRRR, LK1 LRRR)
Figure 3 Locations of the landmarks on images (Clockwise from top left: A11 LRRR, A14 LRRR, A15 PSE, CE-3 Lander, LK2 LRRR, LK1 LRRR)

表 2 激光反射棱镜/着陆舱等标志点定位结果及精度
Table 2 Coordinates of landmarks derived from multiple images and precision statistics

目标	计算的经纬度(平均值)			标准差			误差			影像数
	Lat (°)	Lon (°)	*R* (m)	Lat (°)	Lon (°)	*R* (m)	Lat (°)	Lon (°)	*R* (m)	
A11 LRRR	0.67355	23.47312	1735472.9	7.0	4.1	0.14	–3.0	–1.5	–0.2	32
A11 PSE	0.67332	23.47317	1735473.0	6.9	3.7	0.14	–	–	–	32
A11 LM	0.67427	23.47317	1735472.5	7.0	3.5	0.14	–	–	–	32
A14 LRRR	–3.64424	342.52137	1736339.4	6.0	2.5	0.06	2.1	–0.7	3.3	15
A14 PSE	–3.64421	342.52232	1736339.6	5.9	3.7	0.05	–	–	–	21
A14 ALSEP	–3.64432	342.52233	1736339.6	6.1	2.5	0.04	–	–	–	19
A15 ALSEP	26.13404	3.62981	1735476.7	8.0	6.6	0.15	–	–	–	26
A15 LM	26.13232	3.63333	1735474.7	8.3	7.2	0.14	–	–	–	25
A15 PSE	26.13400	3.62992	1735476.6	8.0	7.2	0.16	–	–	–	26
LK1 LRRR	38.31501	35.00809	1734924.9	8.4	7.1	0.03	4.6	3.8	3.7	20
LK2 LRRR	25.83243	30.92195	1734636.2	7.5	9.8	1.0	–3.9	6.1	2.8	10
CE-3	44.12189	19.51129	1734767.0	14.9	7.0	0.02	–	–	–	14

具有15到21幅观测影像(由于部分观测影像上无法准确刺出相关标志点, 所以计算时予以剔除, 导致同一系列不同类型标志点观测影像也不同). 阿波罗15系列标志点观测数也达到了25和26次. 月球车系列观测数相对较少, 最少的是月球车2号, 观测数为10次. 多影像观测取平均值, 并计算各标准点的标准差, 阿波罗系列和月球车系列各标志点标准差都在10 m量级, 利用A11, A14, LK1, LK2棱角点绝对坐标值与平均值相减计算其绝对的定位精度(由于A15 棱镜点坐标在影像上并不明显, 为了减少影像标志点刺点误差不一致性对结果分析带来的影响, 所以未纳入计算, 而ALSEP, LM, PSE等标志点没有实测高精度绝对坐标, 也不纳入绝对定位误差检验, 只作为多重观测误差特性检验), 阿波罗系列与月球车系列各标志点绝对定位精度均在10 m以内, 其中阿波罗系列定位精度更高, 能达到5 m的定位精度, 这些结果均大大优于单影像标称定位精度20 m, 截止2014年5月10日, LRO NAC影像共对CE-3着陆点覆盖了21次, 通过粗差剔除, 本实验中共选取了14景影像进行着陆点的定位(其中着陆前3景, 着陆后11景), 得到定位

坐标为北纬44.1219°, 西经19.5113°.

2.2 定位精度分析

基于LRO NAC影像单像量测得方法对CE-3着陆点进行定位, 其误差来源主要有: LRO的定轨、定姿误差, LRO NAC传感器的内方位元素误差, 单像量测时影像点位定位误差, 计算中由于DEM与影像定位不匹配及DEM本身精度产生的高程误差带来的投影差等. LRO NAC经过了严密的在轨检校后, 使用精化的轨道姿态和内方位元素进行单影像定位的精度达到20 m以内[16,17]. 单像测量的影像上的点位误差在亚像素级, 由于LRO NAC影像分辨率优于2 m, 所以该部分误差也在亚米级. 根据中心投影成像原理, 高差引起的投影差可由公式dl=dh tanθ进行计算, 其中dl为平面投影差, dh为高程误差, θ为观测光线与观测表面法线的夹角. DEM与影像定位不匹配及DEM本身精度产生的高程误差与地形相关, 由于本文试验区均为着陆区, 在一定范围内地形平坦, 且本文采用LDEM平面精度为20 m, 高程精度达到1 m[16], LRO NAC影像观测光线与观测表面法线的夹角每次观测不尽相同, 如果卫星进行侧摆观测时能达到40°, 但是大部分观测为垂直观测, θ在10°以内, 且大侧摆情况在数据选择时也会作为粗差剔除. 以高程误差dh为10 m, θ为10°时, 高程误差引起的投影差dl为1.7 m, 这部分误差相对轨道、姿态的测控误差也较小.

由于各种误差源引入的误差特性及大小各异, 不便分开对其误差特性进行分析, 因此, 本文直接对LRO NAC在单像量测下整体误差进行分析. A11 LRRR标志点具有32次观测, 观测时间从2009年8月10日到2014年3月13日, 观测角度从0.1°到34.1°, 分辨率从0.41 m 到1.27 m, 对LRO NAC影像的定位能力评估具有代表性, 因此本文以A11为例进行详细的误差分析.

利用本文方法将单张影像的定位结果与LRRR绝对坐标做差值, 并将误差换算成m为单位, 以2 m为间隔统计其误差分布特性. 误差分布如图4所示, 从图4上可以看出, 经度和纬度误差总体分布比较一致, 均显示出正态分布特性, 其中经度误差更为集中, 这与表2中经度标准差更小相符合, 单影像定位最大误差在20 m左右, 也与标称精度一致.

由于轨道测控的随机误差, 同时影像点位误差和高程误差引起的投影差等误差源引入的误差大小

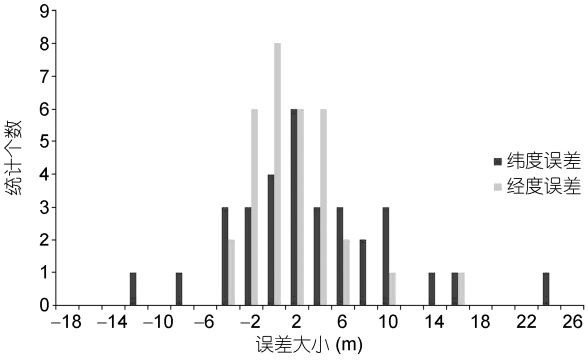


图 4 LRO NAC 影像定位误差分布直方图(A11 LRRR 标志点)
Figure 4 Histogram of LRO NAC postioning errors (A11 LRRR)

在每次观测时均不一样, 使得各单影像定位误差并不一致. 各误差源均具有偶然误差特性, 使得最终误差也具有偶然误差特性, 整体上呈正态分布(见图4). 根据测量平差理论可知, 多重观测取均值可以提高估值的精度. 表2中实验结果也印证了这一理论, 多重观测取均值减小了观测的偶然误差, 且阿波罗系列与月球车系列相比, 观测数据更多, 观测状态更好. 所以采用本文方法, 相比单影像20 m的定位精度, 阿波罗LRRR点观测精度得到了很大提高, 最后定位精度在5 m以内. 月球车系列稍差, 但也达到了10 m以内的定位精度.

考虑到LRO轨道、姿态及内方位元素精化精度在全球的一致性, 根据上述精度验证和分析结果, 我们有理由相信利用LRO NAC 单影像进行CE-3着陆点定位精度在20 m, 根据对LRO NAC影像误差特性的分析, 在本文提出的多重观测方案下, 能进一步提高其定位精度, 应该优于20 m. 目前, 由于CE-3着陆区观测数量有限, 且覆盖时间跨度和分辨率大小还不及阿波罗11, 因此其定位精度还达不到阿波罗11的5 m, 随着时间推移, 观测数目的增加, 本文方法还具备进一步提高CE-3定位精度的潜力.

目前, 已有CE-3定位研究中主要有基于无线电测量的方法, 基于影像(降落相机影像、导航相机影像)与DOM底图(CE-2 DOM、降落相机DOM)配准定位和基于LRO NAC影像直接量测的方法(表3), 无线电测量技术能在工程实施过程中快速高效地对CE-3进行定位, 支持了工程的顺利实施[3,4]; 基于影像与DOM底图配准的方式能在着陆后低成本、快速地进行高精度定位, 在CE-3工程任务实施期间也发挥了作用[11~13], 其绝对定位精度取决于CE-2 DOM底图本身

表 3 CE-3 着陆点定位结果

Table 3 Coordinates of CE-3 lander derived from different methods and data sources

定位方法	纬度(°)	经度(°)	备注
无线电测量初始定位	44.1213	19.5093	
无线电测量精定位	44.1206	19.5124	与LRO NAC定位相差在50 m以内[3,4,14]
降落相机影像与CE-2 DOM配准定位	44.1188	19.5126	精度取决于CE-2 DOM影像[11,12]
导航相机影像与降落相机DOM配准定位	44.1188	19.5126	精度取决于DOM精度[13]
着陆后1幅LRO NAC NASA定位	44.1214	19.5116	定位结果由M1142582775R计算[14]
着陆前后5幅LRO NAC影像定位	44.1213	19.5115	未经过粗差剔除处理[15]
本文方法	44.1219	19.5113	利用14幅影像, 最新精化后轨道姿态

的精度, 据制作CE-2 DOM的国家天文台团队的最新报道, CE-2 DOM与LRRR相比定位偏移为21~97 m[20], 因此基于影像与DOM底图配准的着陆器定位绝对精度也应当在此量级; 本文利用CE-3着陆后很长时间段的LRO NAC多幅影像进行直接量测定位, 使用了LRO最新精化后的轨道和姿态数据, 并且重复观测能够消除一定的偶然误差, 使得定位精度优于单幅和少数几幅LRO NAC影像定位结果, 是对无线电测量和影像与DOM底图配准定位结果的相互验证和精化, 具有一定科学参考价值, 该方法在未来获取更多重复观测的情况下可望获得更高的定位精度, 具有进一步应用的潜力. 综上所述, 这些不同方法、不同数据源的定位技术在工程任务不同阶段及工程任务结束后均发挥着不同的重要作用, 它们对于我国未来嫦娥五号的着陆和采样返回任务都具有实用价值.

3 结论

本文利用LRO NAC影像实现了对CE-3着陆器的高精度定位, 收集了目前已有的LRO NAC轨道器数据, 通过轨道器的多次重复观测, 提高了定位的精度. LRO NAC影像定位精度通过激光测距反射棱镜点得到验证. 本文结论如下.

(1) 利用本文单像测图方法, LRO NAC单影像直接定位精度能达到20 m.

(2) LRO NAC单像测图定位误差具有正态分布特性, 多次观测取均值的可以提高定位精度与稳定性, 定位精度优于20 m.

(3) 在考虑到轨道、姿态、内方位元素在精化后的精度在全球范围内的一致性, 利用本文方法对CE-3着陆器定位结果为北纬44.1219°, 西经19.5113°, 精度优于已有单影像或少量多影像定位结果, 具有一定的科学参考价值.

本文方法与无线电测量和影像与DOM底图配准定位方法可以相互验证和补充, 在未来的月球着陆探测任务中均有应用价值. 另外, 由于目前CE-3着陆区能形成较好基高比的LRO NAC立体影像较少, 随着时间推移, 当获取了大量稳定立体观测数据时, 如何基于立体的多次观测进行定位也是值得研究的问题. 同时, 如何将本文定位结果和定位方法用于构建月球精密的控制网也将是今后的一个研究方向.

致谢 感谢华盛顿大学圣路易斯分校PDS Geosciences Node 提供LRO NAC影像数据.

参考文献

1 Cao J F, Huang Y, Hu X G, et al. Determination of impact site of CE-1 using USB and VLBI data (in Chinese). J Astronaut, 2010, 7: 1724–1729 [曹建峰, 黄勇, 胡小工, 等. USB与VLBI联合确定"嫦娥一号"卫星撞月点的位置. 宇航学报, 2010, 7: 1724–1729]

2 Huang Y, Hu X G, Zhang X Z, et al. Improvement of orbit determination for geostationary satellites with VLBI tracking (in Chinese). Chin Sci Bull, 2011, 56: 1974–1981 [黄勇, 胡小工, 张秀忠, 等. VLBI应用于GEO导航卫星的测定轨. 科学通报, 2011, 56: 1974–1981]

3 Huang Y, Chang S Q, Li P J, et al. Orbit determination of Chang'E-3 and positioning of the lander and the rover. Chin Sci Bull, 2014, 59: 3858–3867 [黄勇, 昌胜骐, 李培佳, 等. "嫦娥三号"月球探测器的轨道确定和月面定位. 科学通报, 2014, 59: 2268–2277]

4 Li P J, Huang Y, Chang S Q, et al. Positioning for the Chang'E-3 lander and rover using Earth-based observations (in Chinese). Chin Sci Bull, 2014, 59: 3162–3173 [李培佳, 黄勇, 昌胜骐, 等. 基于地基观测的嫦娥三号着陆器与巡视器高精度定位. 科学通报, 2014, 59: 3162–3173]

5 Golombek M P, Cook R A, Economou T, et al. Overview of the mars pathfinder mission and assessment of landing site predictions. Science, 1997, 278: 1473–1748
6 Li R, Ma F, Xu F, et al. Localization of mars rovers using descent and surface-based image data. J Geophys Res, 2002, 107: 4.1–4.8
7 Li R, Di K, Matthies L, et al. Rover localization and landing-site mapping technology for the 2003 mars exploration rover mission. Photogramm Eng Remote Sens, 2004, 70: 77–90
8 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
9 Malin M C, Caplinger M A, Edgett K S, et al. The mars science laboratory (msl) mars descent imager (mardi) flight instrument. In: The 40th Lunar and Planetary Science Conference, 2009, 40: 1199
10 Martin-Mur T J, Kruizinga G L, Burkhart P D, et al. Mars science laboratory navigation results. In: The 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics, Pasadena, California, 2012
11 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]
12 Wan W, Liu Z, Liu Y, et al. Descent image matching based position evaluation for Chang'e-3 landing point (in Chinese). Spacecraft Eng, 2014, 23: 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. 航天器工程, 2014, 23: 5–12]
13 Liu Z, Di K, Peng M, et al. High precision landing site mapping and rover localization for Chang'E-3 mission. Sci China Phys Mech Astron, 2015, 58: 1–11
14 NASA Images of Chang'E 3 Landing Site. NASA news. 2013-12-30. http://www.nasa.gov/content/nasa-images-of-change-3- landing-site
15 Wagner R V, Robinson M S, Speyerer E J, et al. Locations of anthropogenic sites on the moon. In: The 45th Lunar and Planetary Science Conference, 2014, 45: 2259
16 Mazarico E, Rowlands D D, Neumann G A, et al. Orbit determination of the Lunar Reconnaissance Orbiter. J Geodesy, 2012, 86: 193–207
17 Speyerer E J, Wagner R V, Robinson M S, et al. In-flight geometric calibration of the lunar reconnaissance orbiter camera. In: ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, 1: 511–516
18 Wagner R V, Speyerer E J, Burns K N, et al. Revised coordinates for apollo hardware. In: ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, 1: 517–521
19 Xia J C, Ren X, Liu J J, et al. Positioning of lunar high-precision control points on Chang'E 1/2 original images (in Chinese). J Jilin Univ (Earth Sci Ed), 2012, 42: 460–468 [夏金超, 任鑫, 刘建军, 等. 月面高精度控制点在嫦娥一号和嫦娥二号原始影像上的定位. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42: 460–468]
20 Li C, Ren X, Liu J, et al. A new global and high resolution topographic map product of the moon from Chang'E-2 image data. In: The 46th Lunar Planetary Science Conference, 2015, abst. #1638

Positioning and precision validation of Chang'E-3 Lander based on multiple LRO NAC images

LIU Bin[1], DI KaiChang[1], WANG BaoFeng[2], TANG GeShi[2], XU Bin[1], ZHANG LuLu[1] & LIU ZhaoQin[1]

[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*

High precision positioning of Chang'E-3 lunar lander is of great importance for the mission operations and relevant scientific investigations. In this research, we calculate the location of Chang'E-3 lander using Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) narrow angle camera (NAC) images and validate the precision with the Lunar Ranging Retro Reflectors (LRRRs). First, we pinpoint the Chang'E-3 lander and other landmarks (LRRR etc.) on multiple LRO NAC images by manual interpretation and high-precision image matching. Then the geodetic coordinates are derived from the image coordinates with the rigorous sensor models established with the refined orbiter positions and attitudes from NAIF SPICE kernels. Finally, the average geodetic coordinates are calculated and considered as the locations of Chang'E-3 and other landmarks. As a result, the location of Chang'E-3 is determined to be 44.1219°N, 19.5113°W using 14 LRO NAC images. The five LRRRs with high-precision absolute locations available are used as check points to evaluate the poisoning errors. The results show that the location accuracy can reach 20 m with a single LRO NAC image, and positioning the lander using multiple images reduces random errors and provides better accuracy than that using a single image.

Chang'E-3, Lander positioning, LRO NAC, LRRR, control network

doi: 10.1360/N972015-00336