

文章编号 1004-924X(2012)08-1838-08

面向探月卫星景象导航的局部基准图制备

卜彦龙*, 唐歌实, 王 美

(航天飞行动力学重点实验室 北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

摘要:为了可靠制备月球卫星景象辅助导航和着陆过程中的月面局部基准图,分析了月面局部基准图制备过程中出现的相关问题和解决方法。结合“嫦娥二号”月球卫星测控和导航实际约束条件分析了各种误差的起因及限制方法,给出了基于美国月球勘测轨道飞行器相机(LROC)全月面基准影像图的月面局部基准图制备算法。实验结果表明,按照所提方法生成的局部基准图与“嫦娥二号”局部正摄影像图像面特征一致,由映射变换产生的图像坐标最大定位误差为7.065 1 m,观测图尺寸为20 km×20 km时的最大形变偏差为6.18 m,正摄影像图像面特征和定位偏差均能够满足月球卫星景象导航定位精度的要求。

关键词:月球卫星;景象匹配导航;月球局部基准图;约束条件;误差分析

中图分类号:V474.3;V448.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1838

Preparation of local base map for lunar orbiter scene matching navigation

BU Yan-long*, TANG Ge-shi, WANG Mei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics,
Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: byl_nudi@yahoo.com.cn

Abstract: To prepare a lunar local base map for the lunar orbiter scene aided navigation and landing, the preparing method and related problems for the lunar local base map were researched in this paper. Based on real data from Chang-E 2 mission, error generation and restriction ways for the local base map were analyzed combining with constraints from measurement, tracking and navigation. A set of algorithm for preparing the lunar local base map was proposed according to the global base map by Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) in LRO mission. Experimental results show that pixel features from the generated local base map are consistent with corresponding features from Chang-E 2 orthographic projection images, the maximum coordinate location error by projection is 7.065 1 m, and the distortion error is 6.18 m for the observing map size in 20 km×20 km. These results meet the precision requirement of the scene aided navigation for the lunar orbiter very well.

Key words: lunar orbiter; scene matching navigation; lunar local base map; restrict condition; error analysis

收稿日期:2012-03-31;修订日期:2012-05-09.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. 9140A2406712KG13290)

1 引言

在月球卫星长期环月运行以及月面着陆器精确着陆过程中,景象匹配可以为卫星导航定位发挥重要的作用^[1-2]。月面景象匹配定位的基本原理是将星上实拍观测图与预先采集并经过制备的局部区域基准图进行匹配以确定拍摄点自身的精确位置,可见基准图标定精确且使用方便是匹配定位得以顺利进行的基本前提。

通常来说,制备月面基准图主要包括合理映射像素点和对各像素点坐标进行精确标定。目前,月面基准图的成果主要集中在全月面影像图的制作领域。Eliason 等利用 Clementine 750 nm 谱段的影像数据,制作了月球基本地图(UVVIS 750 nm Basemap)^[3]。2005 年月球统一控制网(the Unified Lunar Control Network 2005, UL-CN2005)的建立为月球制图提供了一个统一的基础^[4]。目前全球定位精度最高的全月基准图是美国基于 LRO 搭载的 LROC 广角相机图像制作的全月图(The WAC global mosaic),它由 2009 年 11 月至 2011 年 2 月间拍摄的 15 000 块广角图像拼接而成,并采用 LOLA 数据进行了校正,该影像图分辨率和定位精度均达到 100 m。国内在全月面影像图的制作领域也取得了丰硕的成果,李春来等利用“嫦娥一号”卫星 CCD 立体成像数据并结合激光高度数据制作了“嫦娥一号”全月球影像图^[5],其精度达到 100 m 到 1.5 km,李学军等开发了全月面影像图自动生成软件^[6],中国国防科技工业局 2012 年刚刚发布的嫦娥二号全月面影像图成为世界最清晰的全月影像图,其分辨率达到 7 m^[7]。

为满足月面局部特征分析和匹配定位等特殊目标,提出了以高精度全月面基准图为基础的月面局部基准图制备的需求。月球卫星运行环境与近地飞行器存在许多差别,包括:(1)月球曲率比地球小两个量级^[8],其半径仅为地球的 1/6;(2)月球卫星轨道高度一般在百公里量级,远高于通常的近地飞行器;(3)卫星不采用近地飞行器中常用的惯性设备或 GPS 进行导航,而是通过地面测站进行远距离无线电测量^[9]。这些差别决定了月

面景象匹配定位中,不能完全依照近地飞行器图像导航来考虑月面局部基准图制备问题,而必须结合月球、卫星和导航的特点进行分析,部分环节可以简化,但部分环节受到更多的约束。

本文结合月球、探月卫星及其导航特点进行月面局部基准图制备方法的研究,并进行相关误差和约束的分析。首先对局部基准图制备的基本原理进行剖析;接着对算法产生的误差进行分析。在此基础上,结合“嫦娥二号”卫星实际状态分析测控约束对局部基准图覆盖范围的影响;最后通过实验进行算法有效性的验证并给出结论。

2 基本原理

2.1 坐标系定义

月面局部基准图制备过程中涉及 4 个基本坐标系,即月心大地坐标系,月固直角坐标系,当地月理坐标系和图像坐标系,它们是月面局部基准图变换与标定的基础。为方便算法分析和表达,以下进行统一定义。月固直角系 $O_e-x_e y_e z_e$ (下简称 e 系),原点 O_e 位于月球中心, $O_e z_e$ 轴沿月轴指向北极方向, $O_e x_e$ 轴位于赤道平面内通过零子午线, $O_e y_e$ 由右手规则确定。月心大地坐标系与月固直角系采用相同的参考架,以经度、纬度和高度表示位置。当地月理系 $O_A-x_g y_g z_g$ (下简称 g 系)采用东北天坐标系,原点 O_A 位于月面上 A 点, $O_A x_g$ 沿纬线向东, $O_A y_g$ 沿子午线向北, $O_A z_g$ 由 $O_A x_g$ 、 $O_A y_g$ 按右手规则指向天。图像坐标系 $I-x_1 y_1$ 是以图像左上角 I 为原点,以像素为坐标单位的直角坐标系, x_1 、 y_1 分别表示像素在图像中的列与行。

2.2 基本过程描述

在高精度全月面影像图已知的前提下,面向图像匹配定位的月面局部基准图制备过程如图 1 所示,描述如下:根据月球卫星星历约束确定局部基准图原点的月心大地系近似坐标,根据月球卫星测控、导航及月球形状约束确定局部基准图范围;建立当地月理坐标系,将局部基准图范围内各位置点的月心大地系坐标映射到当地月理坐标系上,通过插值实现对应位置像素灰度赋值;结合全月面影像图分辨率和匹配精度的要求确定将局部

基准图分辨率变换到合理值;最后对局部基准图精度进行评估。

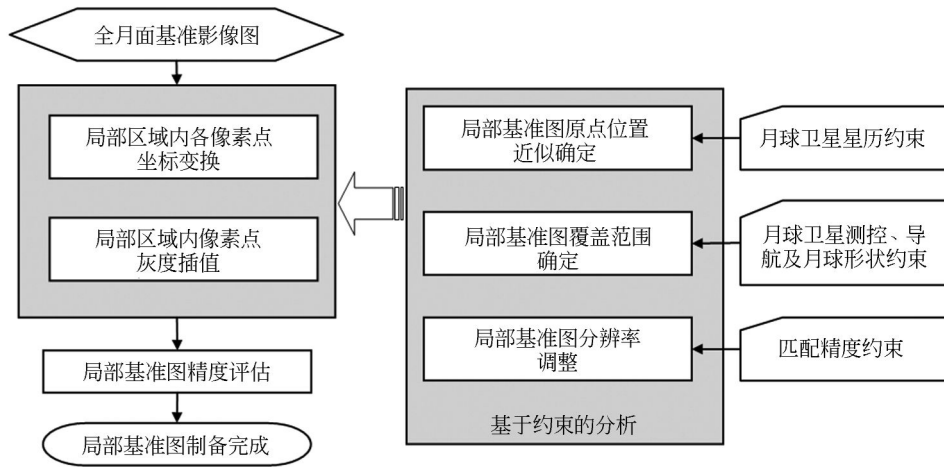


图 1 面向图像匹配定位的月面局部基准图制备过程

Fig. 1 Sketch map of lunar local base map preparation for matching aided localization

2.3 位置变换关系

为了表达方便,全月面影像图通常建立在月心大地坐标系上,环月卫星获得的观测图建立在图像坐标系中,该坐标系是平面直角坐标系,为了保证匹配定位中观测图与基准图对应关系一致,局部基准图也必须建立在一个平面直角坐标系中。首先涉及到月固直角坐标系和月心大地坐标系的变换关系,由于月球的偏心率 10^{-3} 为量级,计算中往往首先将其视为半径为 R 的均匀球体,再将月面高程 h 累加在此均匀球体上,因此任意点的月固直角系坐标和相应的月心大地系坐标存在正向转换关系如式(1),以及逆向转换关系如式(2):

$$\begin{cases} x_e \\ y_e \\ z_e \end{cases} = \begin{cases} (R+h)\cos B\cos L \\ (R+h)\cos B\sin L \\ (R+h)\sin B \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} L = \arctan\left(\frac{y_e}{x_e}\right) + \begin{cases} 0, & x_e > 0, y_e > 0 \\ p, & x_e < 0 \\ 2p, & x_e > 0, y_e < 0 \end{cases} \\ B = \arctan\left[\frac{z_e}{r}\right] \\ h = \sqrt{r^2 + (z_e + R^2 \sin B)^2} - R \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $r = \sqrt{x_e^2 + y_e^2}$ 。

设当地月理系原点 O_A 的月固直角系坐标为 (x_A^s, y_A^s, z_A^s) , 记作 X_A^s , 则根据坐标系转换规则, 当地月理系中任意点 P 坐标 X_P^s 与对应的月固直角系下坐标 X_P^e 存在映射关系如式(3):

$$X_P^e = A \cdot C(L_A) \cdot C(B_A) \cdot X_P^s + X_A^s, \quad (3)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad C(L_A) = \begin{bmatrix} \cos L_A & 0 & \sin L_A \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin L_A & 0 & \cos L_A \end{bmatrix},$$

$$C(B_A) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos B_A & \sin B_A \\ 0 & -\sin B_A & \cos B_A \end{bmatrix}.$$

相应地,若 P 点月固直角系下坐标 X_P^e 已知, 则其在当地月理系下坐标 X_P^s 表达如式(4):

$$X_P^s = C'(B_A) \cdot C'(L_A) \cdot A' \cdot (X_P^e - X_A^s). \quad (4)$$

同时结合式(1)、(2), 便可实现 P 点坐标在月心大地系、月固直角系和当地月理系间的随意转换。

2.4 像素值映射算法描述

将局部基准图定义为当地月理系下的矩形平面图像, 其原点 O_A 位于图像左下角, 图像平面处于当地月理系 $O_A x^s y^s$ 平面之上, 即 $z^s = 0$ 。这样局部基准图区域内任意点 P 的当地月理系坐标 X_P^s 可记为 $(x_P^s, y_P^s, 0)$, 其月固直角系坐标 X_P^e 可根据(3)式求得, 记为 (x_A^e, y_A^e, z_A^e) , 对应的大地经纬度可由公式(2)表示为 (L_P, B_P) 。在全月面影像图中查取相应经纬度位置对应的点 Q , 通过插值计算该处的像素值 I_Q , 并将 I_Q 作为 X_P^e 处的像素值。这样遍历当地月理系下局部基准图区域内所有点的像素值, 可以得到反插值的局部基准图。可以通过多种插值方法实现反插值, 如最邻近插

值、双线性插值及双二次插值等。

需要说明,也可以通过正插值得到局部基准图各点的图像值,即在确定了局部基准图原点 O_A 以及图像区域在月球大地系的经纬度范围后,利用(1)式和(4)式,直接将图像灰度值从月球大地系映射到当地月理系,再根据映射结果在当地月理系上的局部基准图区域中进行像素双线性插值。从原理上讲,正插值和反插值没有本质区别,存在唯一的对应关系,但是从方法实现的角度上讲,正插值实现起来难度较大,原因如下:(i)图像区域在月球大地系的经纬度范围不好直接确定;(ii)映射到当地月理系下的点存在明显的分布不均匀性,不利于小范围插值。

3 误差分析

按照误差产生方式不同,由映射算法产生的局部基准图各像素点的误差分为两类,一为像素灰度值误差,二为局部基准图坐标点位置与月球大地系上对应坐标点之间的定位偏差。

3.1 像素灰度值误差

像素灰度值误差主要包括像素插值时引入的插值误差,以及月面成像点高程变化产生的映射误差。插值误差只出现在小的内插区域中,不会对图像造成大的影响;而映射误差产生原理如图 2 所示,实际成像点 Q 的月面投影为 Q_1 ,若不考虑 Q 点高程的影响,会将 Q 点灰度值映射到 Q_2 处,由此产生映射误差 Q_1Q_2 ,其表达如下:

$$\delta_1 = h \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

式(5)中, α 表示相机成像角度, h 表示月面成像点的高程, H 表示卫星高度,根据该式可知,映射偏

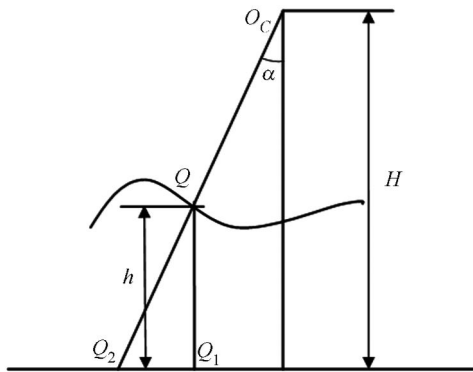


图 2 高程引起的映射误差原理
Fig. 2 Error generation by elevation

差由 α 和 h 共同决定,而与 H 无关。特别说明,当局部基准图根据全月面基准影像图来生成时,如果制作全月面基准影像图过程中已经考虑到高程变化影响并进行了正摄校正,则在局部基准图中也不需要额外考虑高程带来的映射误差。

3.2 坐标定位偏差

为方便分析坐标定位偏差,在当地月理系下建立几何关系分析平面投影带来的偏差,当地月理系投影关系如图 3 所示。以等效球面上某点 A 为原点建立当地月理系, P_1 表示该系中任意一点, O_c 表示月心。设 A 点的地球直角系坐标为 (x_A^e, y_A^e, z_A^e) , P_1 的当地月理系坐标为 $(x_{P_1}^l, y_{P_1}^l, 0)$,将 O_cP_1 与等效球体的交点记为 P_2 ,根据公式(2)及(3),可得 P_1 的大地系坐标 $(L_{P_1}, B_{P_1}, |P_1P_2|)$ 。

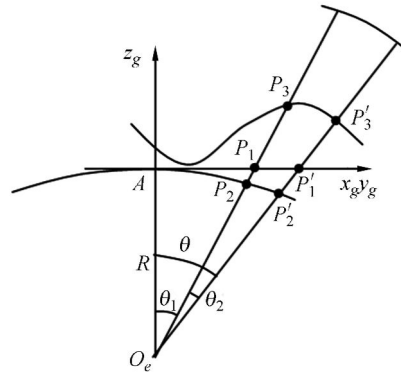


图 3 平面投影偏差原理
Fig. 3 Error generation by planisphere

若在圆柱投影图中不考虑高程关系,局部区域基准图上 P_1 位置的像素值以圆柱投影图上 P_2 处的像素值表示,局部区域基准图上另一点 P_1' 位置的像素值以圆柱投影图上 P_2' 处的像素值表示。这样,局部区域基准图上线段 P_1P_1' 对应的月面区域为弧段 $\overline{P_2P_2'}$,一般情况下,观测图为拍摄弧段的平面展开。记弧长 $|\overline{P_2P_2'}|$ 为 d , $|AP_1'|$ 为 D ,根据几何关系,夹角 $\theta, \theta_1, \theta_2$ 可分别表达如下:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan((D - |P_1P_1'|)/R) \\ \theta_2 = d/R \\ \theta = \theta_1 + \theta_2 = \arctan(D/R) \end{cases} \quad (6)$$

弧长 $|\overline{P_2P_2'}|$ 与当地月理系投影长度 $|P_1P_1'|$ 间偏差表达如下式(7):

$$\delta = |P_1 P_1'| - |\overline{P_2 P_2'}| = R \tan(\theta) - R \tan(\theta_1) -$$

$$R \theta_2 = \frac{(D^2 + R^2) \tan(d/R)}{R + D \tan(d/R)} - d. \quad (7)$$

式(7)即为由于局部基准图投影关系产生的形变偏差表达式,当 $\theta_1 = 0$ 时, P_1 与原点 A 重合,该式就转换成局部基准图中 P_1' 点处的坐标定位误差,表达如式(8):

$$\Delta = R \arctan(D/R) - D. \quad (8)$$

4 约束条件分析

通过上述分析,按照所提算法制备的局部基准图会出现各种误差。结合实际应用中的约束条件,可以使局部基准图既满足应用需求,又可将误差限制在较小范围内。在探月卫星景象匹配定位应用中,局部基准图覆盖范围的选择是实际约束对基准图制备影响的显著体现,确定合理范围的科学根据就是对月球形状、卫星运行特点以及目前地面无线电测控水平等约束进行综合分析。以下分别从局部基准图覆盖范围的下限和上限来分析约束的影响。

4.1 覆盖范围下限约束分析

为局部基准图设置范围下限的目的是确保用于匹配定位的观测图能够落入局部基准图覆盖范围之内,局部基准图范围的下限由地面无线电测定轨精度和测控实施模式决定。在“嫦娥一号”与“嫦娥二号”任务中,地面无线电测定轨精度均已达到百米量级^[10],随着卫星运行时间的增加,轨道预报误差会不断积累。按照一昼夜一次定轨和预报的测控模式,卫星星下点最大积累误差会达到公里量级,如果遇到动量轮不规则卸载等情况,误差甚至达到数公里。

以 σ 表示测控周期内轨道预报最大绝对误差的均方差,在光学景象匹配辅助组合导航中,常常将匹配区覆盖范围按照飞行器平台主惯导位置累积误差均方差的若干倍(如 3 倍)来确定,这种做法的前提是认为观测位置测量偏差等同于飞行器平台主惯导位置累积误差,而且位置测量偏差符合正态随机分布。在位置累积误差的 3 倍均方差下,由正态分布随机过程的基本性质可知,观测图落入适配区覆盖范围的概率将为 96%,按照这种方法,局部基准图中心取在轨道预报位置处,覆盖范围下限 R_L 可以式(9)表达:

$$R_L = 2 \cdot 3\sigma = 6\sigma. \quad (9)$$

4.2 覆盖范围上限约束分析

为局部基准图设置范围上限,一是为了限制景象匹配的搜索范围,继而提高匹配效率;二是可以将局部基准图每点坐标定位误差控制在可接受范围内,三是保证基准图存在投影畸变时能够 and 观测图正确匹配对应。若可接受的坐标定位误差为 Δ_1 ,则根据式(8),可求得局部基准图覆盖范围上限的数值解;同时,若匹配过程中观测图径向尺寸为 d ,基准图允许形变为 δ ,则根据形变偏差表达式(7),可以给出局部基准图覆盖范围上限的另一个解,其为解析解,二者求其小即为局部基准图的范围上限。

5 实验与分析

根据上述局部基准图制备原理及约束分析方法,以美国 LROC-WAC 全月基准图为基础,结合“嫦娥二号”卫星实际运行情况及约束条件,实现局部基准图的制备。

5.1 覆盖范围确定

将卫星一昼夜轨道预报最大绝对误差均值取为 5 km,则根据式(9),可得覆盖范围下限为 30 km。确定覆盖范围上限时,取可接受坐标定位误差阈值 Δ_1 为 20 m,相当于全月面影像上 0.2 倍亚像素值,月球半径 R 取为 1 737.4 km,则根据式(8),可绘出不同覆盖范围下坐标定位误差曲线如图 4。其中,坐标定位误差曲线与误差阈值的交点即为由可接受坐标定位误差约束得出的局部基准图覆盖范围上限值 D_1 ,即为 56.689 km。

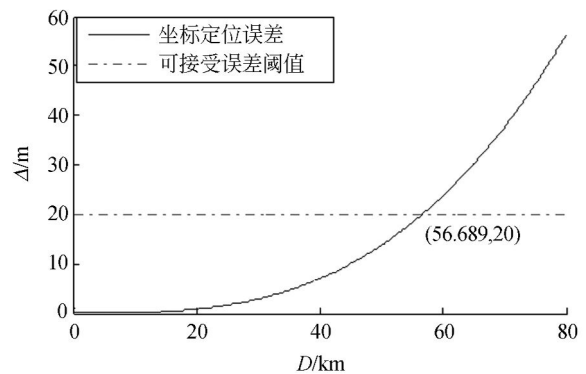


图 4 不同覆盖范围下坐标定位误差曲线

Fig. 4 Curve for position error under different cover ranges

根据式(7),将局部基准图覆盖范围 D 和观测图径向尺寸 d 均作为自变量,可绘出匹配中的形变偏差曲面如图 5,它是 d 的增函数。若匹配过程中观测图径向尺寸 d 为 10 km,基准图允许形变 d 为 0.1 pixel 即 10 m,根据图 4 可得此时对应的为 59.97 km。

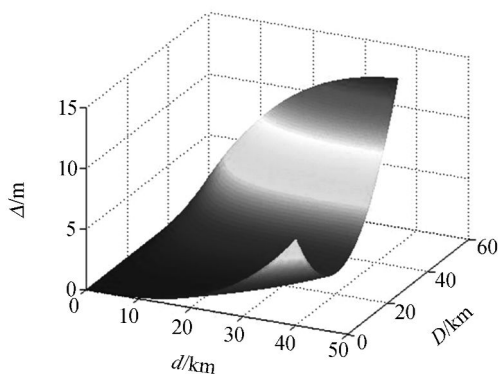


图 5 匹配中的形变偏差曲面

Fig. 5 Curved surface of geometrical distortion

根据 4.2 节描述方法,取 D_1 与 D_2 中较小值,即可得到局部基准图覆盖范围上限值为 56.689 km。综合上述,在所给参数的约束下,局部基准图的合理覆盖范围为 [30 km, 56.689 km]。

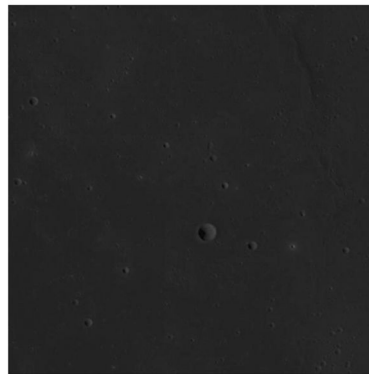
5.2 局部基准图生成及误差分析

在合理覆盖范围内,根据 2.3 节方法可以制备原点大地坐标为任意 (L_A, B_A, R) 的局部基准图区域,图 6(a)给出在 $(309.001^\circ, 35.3^\circ, R)$ 处,尺寸为 $40\text{ km} \times 40\text{ km}$ 的局部基准图制备结果,其中各像素采用四点双线性插值方法,图 6(b)阴影部分为局部基准图在 WAC 基准图中的对应图像区域,作为对比,图 6(c)给出由“嫦娥二号” CCD 拍摄的局部区域观测图,为对比方便,该图经过了像素分辨率的调整。

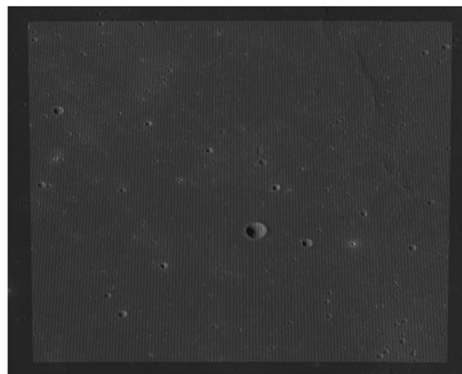
从图 6(b)可以看出,沿同一经度方向图像被明显地压缩,沿同一纬度方向图像也存在变形。作为对照,图 6(a)局部基准图横向和纵向分布均匀,陨石坑均呈规则的圆形,其反应出的特征与图 6(c)中的对应特征一致。为了定量验证局部基准图的匹配性能,以下进行基于改进归一化互信息测度的匹配成功率实验^[11],用 A, B 代表两块图象区域, $I(A, B)$ 表示两图象的互信息,则归一化互信息 $I_1(A, B)$ 表达如下:

$$\begin{cases} I_1(A, B) = 2I(A, B) / [H(A) + H(B)] \\ I(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B) \end{cases}, (10)$$

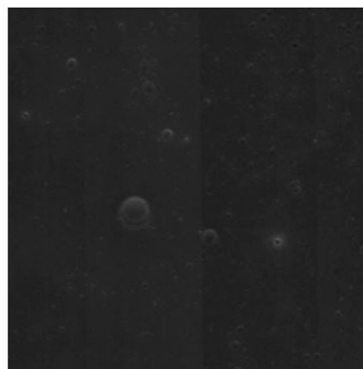
式中: $H(A)$ 与 $H(B)$ 分别为图象区域与的信息熵, $H(A, B)$ 为联合熵。



(a) 局部基准图
(a) Local base map



(b) LROC 影像图
(b) LROC scene map



(c) CE-2 观测图
(c) CE-2 observed image

图 6 局部基准图及对照影像

Fig. 6 Local base map and images for comparison

实验中以“嫦娥二号”图像作为观测图,表 1 给出了不同尺度的观测图分别与局部基准图以及 WAC 影像图的匹配实验结果。为了匹配方便,计算时将观测图的分辨率通过图像抽样调整至 100 m。

表 1 基于归一化互信息匹配算法的匹配成功率实验

Tab. 1 Experiments for success rate under mutual information based matching

观测图原始 像素尺寸/pixel ²	经分辨率调整的 像素尺寸/pixel ²	局部基准 图成功率	WAC 原始影 像成功率
700×700	49×49	0.576	0.334
1 400×1 400	98×98	0.733	0.455
2 100×2 100	147×147	0.822	0.272
2 800×2 800	196×196	0.863	0.128

表 2 不同尺寸观测图的最大形变偏差

Tab. 2 Geometrical distortion under different observing image ranges

观测图径向尺寸 /km	观测图径向像元 /pixel	最大形变偏差 /m
6	857	2.73
8	1 142	3.45
10	1 428	4.09
12	1 714	4.64
14	1 999	5.13
16	2 285	5.54
18	2 570	5.89
20	2 856	6.18

由表 1 可见,LROC-WAC 原始影像不能够直接用于匹配,而经过制备的局部基准图,匹配性能显著提高,而且随着观测图尺寸的增加,匹配成功率不断提升。需要说明的是,当观测图取 19.6 km×19.6 km 时,匹配成功率为 0.863,制约匹配成功率的因素来自多个方面,包括匹配区的选择

和匹配算法的改进,本实验的目的只是检验局部基准图的投影映射效果,通过实验表明所制备的局部基准图可以做进一步匹配算法及相关问题的分析。

若以“嫦娥二号”卫星测控条件作为约束,在所限定局部基准图的覆盖范围内,根据式(8)可计算图 6(a)的最大坐标定位误差为 7.065 1 m;同时根据式(7)可以对观测图尺寸的选择提出约束,如表 2 所示为不同径向尺寸的观测图 and 对应局部基准图区域中的最大形变偏差。此处须特别说明,坐标定位误差与形变偏差均指由本文算法映射关系产生的偏差,并不是原始全月影像图的测量误差。

6 结 论

月面局部基准图的制备是月球卫星景象辅助导航中一项基础性的关键技术。本文基于美国 LRO 卫星获得的 LROC 全月面基准影像图,并结合月球参数以及“嫦娥二号”月球卫星测控和导航约束,研究了面向“嫦娥”卫星数据的月面局部基准图制备方法。深入分析了制备月面局部基准图过程中出现的相关问题,尤其是结合实际约束条件分析了各种误差起因及限制方法,给出了完整的局部基准图制备算法。按照所提方法生成的 40 km×40 km 覆盖范围下的局部基准图与“嫦娥二号”局部观测图像面特征一致,映射变换产生的图像坐标最大定位误差为 7.065 1 m,观测图尺寸为 20 km×20 km 时的最大形变偏差为 6.18 m,实验表明所生成的月面局部基准图在满足基准图定位精度要求的前提下,同时满足了各种约束条件。在进一步的研究中,希望将月面局部基准图的制备流程与月面匹配定位方案相结合,进而简化匹配过程,提高匹配精度。

参考文献:

- [1] ANDREW E J, JAMES F M. Overview of terrain relative navigation approaches for precise lunar landing[C]. 2008 IEEE Aerospace Conference, 2008:1-10.
- [2] ANDREW E J, ADNAN A, LARRY H M. A general approach to terrain relative navigation for planetary landing[C]. Proceedings of the AIAA Infotech@Aerospace Conference, AIAA 2007-2854.
- [3] ELIASON E, ISBELL C, LEE E, et al.. The clementine UVVIS global lunar mosaic[R], 1999.
- [4] ARCHINAL B A, ROSIEK M R, KIRK R L, et al.. Completion of the unified lunar control network 2005 and topographic model[C]. 37th Lunar and Planetary Science Conference. Houston:2006;

- 2310.
- [5] 李春来,刘建军,任鑫,等.嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图[J].中国科学:地球科学,2010,40(3):294-306.
LI C L, LIU J J, REN X, *et al.*. The global image of the moon by the Chang'E-1: data processing and lunar cartography[J]. *Sci China Earth Sci*, 2010, 40(3): 294-306. (in Chinese)
- [6] 李学军,王新波,谢剑薇,等.嫦娥一号月面影像图自动生成软件的设计与实现[J].装备指挥技术学院学报,2009,20(1):85-90.
LI X J, WANG X B, XIE J W, *et al.*. Design and implementation of software for automatic producing selenograph from images taken by CE-1 satellite [J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2009, 20(1): 85-90. (in Chinese)
- [7] <http://www.cic.gov.cn>[OL].
- [8] 刘林,王歆.月球探测器轨道力学[M].北京:国防工业出版社,2006.
LIU L, WANG X. *An Orbital Dynamics of Lunar Probe* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [9] CATHERINE L T, JAMES S B. *Radiometric Tracking Techniques for Deep Space Navigation* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [10] 陈明,唐歌实,曹建峰,等.嫦娥一号绕月探测卫星精密定轨实现[J].武汉大学学报:信息科学版,2011,36(2):212-217.
CHEN M, TANG G S, CAO J F, *et al.*. Precision orbit determination of CE-1 lunar satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2): 212-217. (in Chinese)
- [11] STUDHOLME C, HILL D L G, HAWKES D J. An overlap invariant entropy measure of 3D medical image alignment [J]. *Pattern Recognition*, 1999, 32(1): 71-86.

作者简介:



卜彦龙(1979—),男,山西太原人,博士,工程师,分别于2005年,2009年于国防科技大学获得硕士和博士学位,主要从事航天器精确导航与遥感图像处理方面的研究。E-mail: byl_nudt@yahoo.com.cn



唐歌实(1969—),男,四川内江人,博士,研究员,现为航天飞行动力学技术国家级重点实验室主任,载人航天工程轨道专家组组长,主要从事航天器测控和轨道确定方面的研究。E-mail: tgs@bacc.org.cn



王美(1984—),女,河北沧州人,硕士,2008年、2012年于西安交通大学分别获得学士和硕士学位,主要从事航天器精确导航与无线电测控方面的研究。E-mail: wm2004xijiao@163.com