

火星地形测绘研究综述

徐青¹, 耿迅^{1,2}, 蓝朝桢^{1,3}, 邢帅¹

(1. 信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450052; 2. 西安测绘信息技术总站, 西安 710054;
3. 北京理工大学 深空探测技术研究所, 北京 100081)

摘要: 火星地形测绘是开展火星科学研究的基础。介绍了与地形测绘相关的火星探测任务,并对地形测绘传感器进行了分析。阐述了火星地形测绘摄影测量数据处理的基本原理,研究了基于 SPICE 库建立火星表面线阵影像严密几何模型的方法。讨论了火星地形测绘摄影测量数据处理中的光束法平差、密集匹配以及多线阵拼接等关键技术。在总结现有火星地形测绘任务特点的基础上,针对我国开展火星地形测绘研究提出了建议。

关键词: 火星; 行星地形测绘; 摄影测量; 线阵推扫式影像; 行星数据系统

中图分类号: P236 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2014)01-0028-08

Review of Mars Topographic Mapping

XU Qing¹, GENG Xun^{1,2}, LAN Chaozhen^{1,3}, XING Shuai¹

(1. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China;
2. Technical Division of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;
3. Institute of Deep Space Exploration Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Mars topographic mapping is the basis for scientific research of Mars. Firstly, Mars exploration tasks related to topographic mapping are introduced and the characteristics of mapping cameras are analyzed. Currently, the photogrammetric processing of stereo imagery is the main method to derive Mars topographic data, and the basic procedure of data processing and the conventional coordinate system of Mars are introduced as well. Then, the construction of rigorous geometric model of linear pushbroom imagery using SPICE kernels is discussed. The key techniques of photogrammetric processing for Mars topographic mapping such as bundle adjustment, dense image matching and montage of multi-linear CCD array are investigated. At last, some proposals are given to China on the Mars topographic mapping research.

Key words: Mars; planetary topographic mapping; photogrammetry; linear pushbroom imagery; planetary data system (PDS)

0 引言

火星距离地球最近约 5500 万千米,最远约 4 亿千米,其半径为 3396 km,约为地球半径的 1/2。火星是太阳系内最具孕育生命潜力的类地行星。继月球探测之后,火星探测是本世纪各国深空探测活动的重点^[1-2]。火星探测始于 20 世纪 60 年代,经历了飞越探测 (Fly-by)、轨道器 (Orbiter)、着陆器

(Lander)和火星车 (Rover) 四个阶段。1971 年,美国发射的“水手 9 号”探测器成为第一个火星轨道器,绘制了 7000 多幅火星表面图像,涵盖了火星大部分区域,但是分辨率较低,仅有 1 ~ 2 km。1971 年,前苏联的“火星 3 号”成功进入火星轨道,并首次实现软着陆,但是着陆器在着陆不久后就和地面失去了联系,而轨道器则继续正常工作。1976 年 7 月,美国“海盗 1 号”(Viking-1) 登陆火星,是首次完

收稿日期:2013-08-06; 修回日期:2013-10-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB720000);国家自然科学基金资助项目(41371436);中国博士后基金资助(2013M540870)

全获得成功的火星着陆探测器。1997年7月,“火星探路者”(Mars path finder, MPF)在火星表面成功着陆,其携带的火星车实现了人类历史上首次火星巡视探测。近年来,美国相继成功发射了“勇气号”(Spirit)、“机遇号”(Opportunity)、“凤凰号”(Phoenix)和“好奇号”(Curiosity)着陆器,以及“火星全球勘测者”(Mars global surveyor, MGS)和“火星侦察轨道器”(Mars reconnaissance orbiter, MRO)等轨道探测器,掀起了火星探测的高潮。2003年6月,欧洲成功发射了第一个火星探测器——“火星快车”(Mars express, MEX)。中国、俄罗斯、日本和印度等国在进行月球探测的基础上,也相继开展火星探测计划。本文对火星地形测绘研究现状进行了总结,介绍了地形测绘相关的火星探测任务,分析了火星地形测绘数据处理流程与关键技术,最后针对我国开展火星地形测绘提出了几点思考。

1 地形测绘相关火星探测任务

火星地形测绘是开展火星科学研究的基础,获取高分辨率火星地形数据也是着陆器安全着陆的前提。通过火星轨道器在轨飞行获取火星表面立体影像并进行后期摄影测量处理,是获取火星表面地形数据的主要方法。美国、前苏联以及欧洲在实施火星探测任务初期的一个主要科学目标就是获取火星的地形数据,以便于着陆区选址以及辅助火星着陆器安全着陆。火星探测任务实施以来,与地形测绘相关的火星探测任务主要有“海盗号”、“火星全球勘测者”、“火星快车”以及“火星侦察轨道器”,各个任务特点及地形测绘成果情况见表1。

1976年,发射的美国“海盗号”火星探测器同时包括轨道探测器与着陆探测器。利用“海盗号”轨道探测器获取的立体影像数据通过摄影测量处理,

首次制作了1:200万比例尺火星全球影像图^[3]。“海盗号”火星探测任务的成功实施,揭开了火星的神秘面纱,极大地提高了人类对火星的认识。

1996年11月,美国“火星全球勘测者”发射,卫星工作轨道为300 km,通过对MOC(Mars orbiter camera)线阵相机与激光测高数据(MOLA)的联合处理,生成了分辨率介于200~300 m($1/256^\circ \times 1/256^\circ$)的火星全球地形数据(两极地区地形分辨率更高),高程精度为5~30 m,是目前可公开获取的分辨率最高的火星全球地形数据^[4-5]。

“火星快车”探测器上搭载了HRSC(High resolution stereo camera)高分辨率立体测绘相机,影像分辨率达10 m,可制作火星全球1:20万比例尺地形图,相对定位精度为10~20 m^[6-8]。“火星快车”高分辨率影像目前已经基本覆盖火星全球。利用HRSC影像数据可以获得分辨率优于百米的火星全球地形数据。目前,欧空局并未发布高分辨率火星全球地形数据,部分区域可获取20~50 m分辨率地形数据。HRSC相机可同时获取高分辨率全色影像与低分辨率多光谱影像,通过融合处理可以生成高分辨率多光谱影像^[9]。

2005年,美国发射的“火星侦察轨道器”携带了HiRISE相机,影像分辨率优于0.5 m,是目前为止分辨率最高的火星探测器,但是仅能覆盖火星表面不足1%的区域^[10-11]。HiRISE适用于对着陆区等重点探测区域进行详细测绘,在实施“好奇号”着陆探测计划时,利用HiRISE对多个备选着陆区进行了详细探测,获取了备选着陆区的精确地形数据,确保了“好奇号”探测任务的顺利实施。

在成像传感器方面,海盗号由于任务实施较早,搭载的是框幅式相机,而随后的成像传感器均为线阵相机,其中MOC和HiRISE为单线阵传感器,采用

表1 地形测绘相关火星探测任务

Table 1 Mars exploration task related to topographic mapping

任务名称	国家/地区	任务时间	测绘相机	测绘相机类型	立体方式	轨道高度/km	分辨率/m	地形测绘成果
Viking	美国	1975年	—	框幅式	异轨立体	300	150~300	1:200万比例尺地形图
MGS	美国	1996年	MOC	单线阵	异轨立体	300	250	200~300 m全球地形数据
MEX	欧洲	2003年	HRSC	单镜头多线阵	同轨立体	250	10	20~50 m全球地形数据(基本涵盖火星全球)
MRO	美国	2005年	HiRISE	多线阵拼接	异轨立体	300	0.5	局部地区优于1 m分辨率地形数据

异轨方式构成立体影像,立体像对选取相对困难,后期摄影测量数据处理难度相对较大。MOC 宽视场影像虽然具备全球覆盖能力,但是影像分辨率较低;而 HiRISE 虽然分辨率高,但是覆盖范围有限。相比其它火星探测器,欧空局火星快车携带的 HRSC 相机采用三线阵原理,可构成同轨立体,在影像分辨率及全球覆盖性方面具有优势。

2 火星地形测绘数据处理关键技术

从“海盗号”火星探测任务算起,美国与欧洲开始火星地形测绘研究已经有近 40 年的时间,在行星地形测绘数据处理方面已经形成一套体系,其数据存储、处理、发布已经比较规范。目前,美国国家航空航天局(NASA)深空探测任务均使用行星数据系统(Planetary data system, PDS),数据预处理通常使用 ISIS(Integrated system for imagers and spectrometers)系统,卫星位置、姿态、传感器几何参数等辅助信息则使用 SPICE 库方式存储。欧空局、日本、印度的部分深空探测任务数据也采用了这样的方式。

2.1 火星地形测绘摄影测量数据处理流程

火星地形测绘摄影测量数据处理基本流程如图 1 所示。对火星探测传感器获取的立体影像进行辐射校正,综合利用 VLBI(甚长基线干涉测量)、多谱测速、天文导航、星敏感器、惯导等设备获取的卫星位置、姿态数据进行融合解算,获取初始外方位元素,利用几何检校数据、辐射校正后的立体影像以及初始外方位元素数据进行区域网光束法平差,提高立体影像几何定位精度,然后进行摄影测量立体测图处理生成火星表面数字高程模型与正射影像图。激光测高数据经过滤波处理剔除粗差后,可内插生成火星表面数字高程模型。火星地形测绘的基本原理与对地观测卫星以及月球地形测绘是相同的。月球距离地球平均为 38 万千米,对地观测卫星轨道高度通常为几百千米。与月球探测相比,火星探测难度更大,目前火星探测任务成功率不足一半。对地观测卫星可以使用 GPS 进行精密定轨,定轨精度可以达到厘米级,星敏感器姿态确定精度可以达到角秒级,而火星由于距离地球较远,其定轨、定姿精度有限,后期摄影测量数据处理难度较大。

2.2 火星坐标系

火星坐标系是开展火星地形测绘的基础,随着火

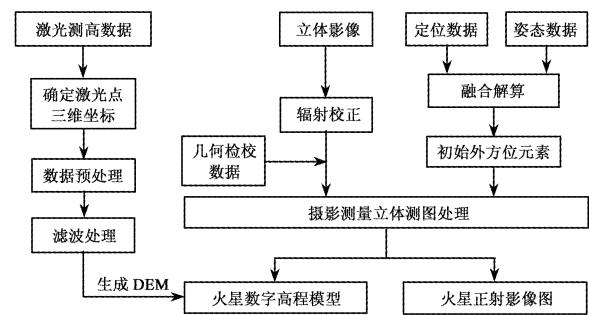


图 1 火星地形测绘摄影测量数据处理基本流程

Fig. 1 Photogrammetric processing procedure for Mars topographic mapping

星探测程度的不断深入,火星坐标系精度也不断得到改善。火星表面经纬度定义方式与地球相同,如图 2 所示。常用的火星坐标系定义中经度有两种表示形式,一种是 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$,一种是 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$,纬度范围为 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$,火星首子午线定义在火星表面的 Airy-0 陨石坑区域^[12]。通过多次火星探测任务的实施,火星的星历参数已经比较精确,从近几年发布的行星星历来看,火星的星历参数并没有变化^[13]。

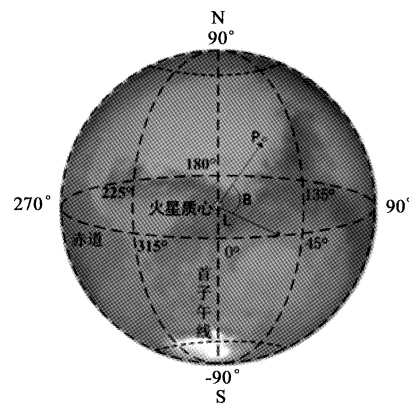


图 2 火星经纬度定义

Fig. 2 Definition of longitude and latitude for Mars

制作火星地形图时需要确定火星椭球参数。目前常用的火星椭球参数有椭球体与正球体两种定义,且参数也有所不同,如表 2 所示。各个火星探测任务所采用的坐标系定义也不尽相同,因此在处理数据以及对比分析时需要统一坐标系。由于椭球体在地图投影计算等应用时相对复杂,IAU 定义的椭球体即 IAU_MARS_2000(长半轴为 3396.19 km,短半轴为 3376.20 km)并未得到普遍应用。实际火星探测任务数据处理中多使用正球体,如 HRSC 地形数据产品即采用半径为 3396.0 km 的正球体。

表 2 常用火星参考椭球参数

Table 2 Reference ellipsoid parameters of Mars

椭球方式	长半轴 /km	短半轴 /km	备注
椭球体	3396.19	3376.20	实际应用较少
正球体	3396.0	3396.0	HRSC 地形数据
正球体	3396.19	3396.19	MOLA 地形数据

火星制图地图投影在北纬 88°至南纬 88°之间一般使用 EquiRectangular 投影,两极地区采用 StereoGraphic 投影。图 3 是两种投影方式表示的火星全球地形数据。

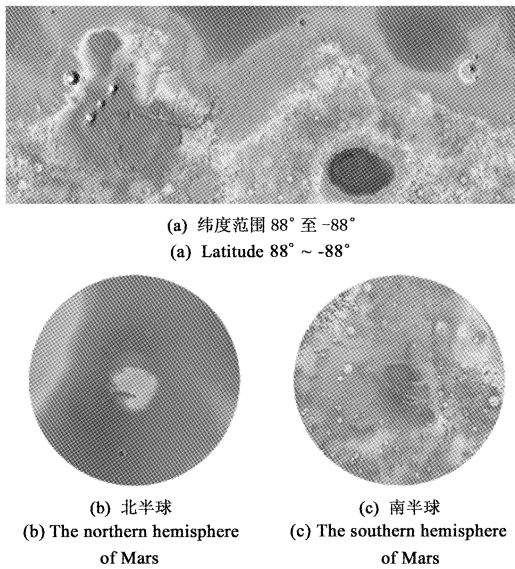


图 3 火星全球地形与地图投影方式示意

Fig. 3 Global topographic map of Mars

2.3 ISIS 行星数据处理系统

ISIS 是美国地质调查局 (USGS) 开发的专用于行星数据处理的软件系统,提供了各个行星探测任务数据处理接口^[8]。随着深空探测国际合作越来越密切,除支持 NASA 自己的深空探测任务以外,ISIS 也逐渐支持欧空局、日本、印度等国家的深空探测任务。ISIS 系统运行在 Linux 平台下,图像输入格式一般均为 PDS 文件格式,通过 ISIS 导入转换成 .cub 图像格式 (ISIS 内部默认图像格式)。ISIS 也提供了一部分摄影测量数据处理功能,如光束法平差、影像匹配、DEM 自动生成等,但是在摄影测量处理方面并不专业。实际上 NASA 行星制图小组处理行星数据同时使用了 ISIS 与海拉瓦 (Socet set) 摄影测量系统。ISIS 负责前期的数据预处理,如 PDS 影像格式转换、辐射校正、位置、姿态数据转换、传感器

严密几何模型构建等,而后期光束法平差、DEM 自动生成则由专业摄影测量系统完成。

行星地形测绘除影像数据外,还含有辅助的传感器参数、探测器位置、姿态、坐标转换、时间转换参数等。NASA 使用 SPICE 库提供对这些辅助参数的封装^[14]。SPICE 中的 S 表示飞行器 (Spacecraft), P 表示行星 (Planet), I 表示仪器 (Instrument), C 表示各种转换矩阵 (C-matrix), E 表示探测任务 (Events)。SPICE 库中各个库对应的辅助信息如表 3 所示。

表 3 SPICE 库主要功能说明

Table 3 Contents of SPICE kernels

库名称	库功能	文件后缀
SPK	卫星星历数据	.bsp
CK	卫星姿态数据	.bc
PCK	行星坐标系参数	.tpc
IK	传感器参数	.ti
FK	框架转换参数	.tf
LSK	时间转换参数	.tls
SCLK	卫星钟参数	.tsc

NASA 的深空探测任务均使用 PDS 行星数据系统进行归档。PDS 本身是一种文件格式,文件后缀一般为 .img。PDS 文件中不仅含有影像数据,还含有相关的辅助信息,即 PDS 文件前端采用 ASCII 码形式给出影像辅助信息,然后是二进制码格式的影像数据。可以使用 ISIS 的 pds2isis 将 PDS 格式的数据导入 ISIS 系统,转换为 .cub 文件格式。著名的开源图像处理引擎 (GDAL) 提供了对 PDS 文件格式的支持,可以将 PDS 数据格式转换为 TIFF 图像格式^[15]。

2.4 线阵影像严密几何模型

火星地形测绘相机普遍使用线阵传感器,因此线阵影像严密几何模型的构建是后序摄影测量数据处理的基础。下面以火星快车 HRSC 线阵影像为例,介绍利用 SPICE 库构建线阵影像严密几何模型的方法。从 SPICE 库中可以获取 HRSC 线阵相机的几何参数,如 CCD 像素数为 5184,相机焦距为 175 mm,影像辐射分辨率为 12 位。HRSC 相机可同时获取 9 个波段线阵影像,其相机焦平面线阵排列如图 4 所示,9 条线阵平行安置于焦平面上,坐标系 Y 轴与探测器飞行方向相同,X 轴沿线阵排列方向与 Y 轴垂直,Z 轴垂直于焦平面指向摄影方向 (图 4 中垂直页面向里),三轴组成右手系。

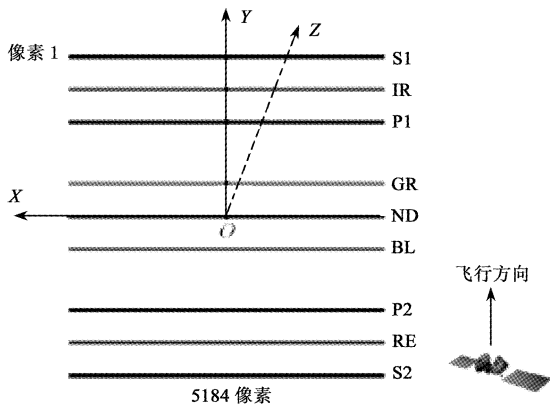


图 4 HRSC 相机线阵 CCD 排列
Fig. 4 HRSC Linear array camera

构建 HRSC 线阵传感器严密几何模型所需的相机几何参数、外方位元素等数据可利用 SPICE 库提供的火星快车任务辅助数据计算得出。图 5 是利用 SPICE 库获取 HRSC 影像外方位元素的示意图。时间转换为 J2000 历书时,摄影测量物方坐标系统一转换至火星地固坐标系 (Mars body-fixed coordinate system)。

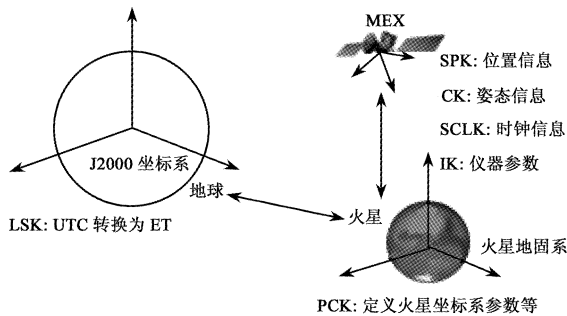


图 5 利用 SPICE 库获取 HRSC 外方位元素
Fig. 5 Obtaining EO using SPICE kernels

根据 HRSC 相机几何参数以及由 SPICE 库转换得到的影像外方位元素等信息可构建火星快车 HRSC 影像严格几何模型,公式如下

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} + \lambda R_{J2000}^{MARS} R_{star}^{J2000} R_{body}^{star} R_{camera}^{body} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (x, y) 为 HRSC 影像上的像点坐标, f 为相机焦距, $[X, Y, Z]^T$ 为火星地面点坐标, $[X_s, Y_s, Z_s]^T$ 为精密定轨后的火星探测器位置, R_{J2000}^{Mars} 为 J2000 坐标系到火星地固坐标系旋转矩阵, R_{star}^{J2000} 为星敏感器测定的探测器姿态, R_{body}^{star} 为卫星本体至星敏感器的

旋转矩阵, R_{camera}^{body} 为相机与卫星本体间的安装矩阵。

2.5 平差数学模型

线阵相机属于推扫式成像,影像外方位元素随扫描行变化,如图 6 所示。由于卫星运行姿态比较平稳,外方位元素可以表示成扫描行或者曝光时刻的函数。

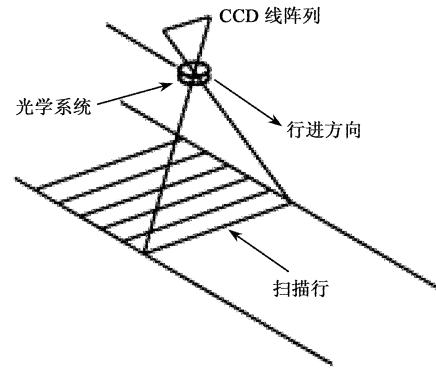


图 6 线阵 CCD 影像推扫式示意图
Fig. 6 Imaging principle of linear pushbroom imagery

线阵传感器平差数学模型主要有多项式模型与定向片模型^[16]。王任享提出的三线阵 CCD 影像 EFP 光束法平差方法在“嫦娥一号”月球三线阵 CCD 影像数据处理中得到了实际应用^[17]。多项式模型将各扫描行的外方位元素表示成飞行时间的低阶多项式,将求解各扫描行的外方位元素转换为求解多项式系数,以二阶多项式为例,其公式如下

$$\begin{cases} X_s(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \\ Y_s(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \\ Z_s(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 \\ \omega(t) = d_0 + d_1 t + d_2 t^2 \\ \phi(t) = e_0 + e_1 t + e_2 t^2 \\ \kappa(t) = f_0 + f_1 t + f_2 t^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $X_s(t), Y_s(t), Z_s(t)$ 是扫描行的摄站位置, $\omega(t), \phi(t), \kappa(t)$ 是扫描行姿态参数, $a_i, b_i, \dots, f_i (i = 0, 1, 2)$ 是传感器模型的多项式系数。因此,如果采用二阶多项式模型,则仅需要求出 18 个多项式系数即可根据任意扫描行的曝光时刻计算出外方位元素。文献[4-5]在对 MGS 任务 MOC 影像进行光束法平差时采用了二阶多项式数学模型。Chen 利用二阶多项式模型表示外方位元素,同时对传感器内方位元素进行建模构建了 HiRISE 平差模型,在光束法平差模型中增加了“勇气号”探测器获取

的影像数据作为控制点信息^[18]。Li 等利用三阶多项式建立了 MRO 任务 HiRISE 影像的严格平差模型,利用平差后的结果在“勇气号”火星车着陆区生成了 1 m 格网的高分辨率地形数据^[10]。Spiegel 利用三阶多项式进行 HRSC 影像的光束法平差,并引入漂移误差改正模型进一步补偿系统误差,提高定位精度^[19]。

多项式模型未知数个数少,计算过程简单,但是不适用于曝光时间较长的卫星影像。如果卫星影像曝光时间较长,则可以采用分段多项式模型或者定向片模型。定向片的基本思想是平差求解定向片位置的外方位元素,然后内插其他扫描线的外方位元素,基本原理如图 7 所示,火星地面点 P 对应的下视影像点 p_N 成像于第 K 和第 $K+1$ 定向片之间,通常可以利用该点附近 4 个定向片时刻的外方位元素按照 Lagrange 多项式内插出 p_N 的外方位元素^[20]。

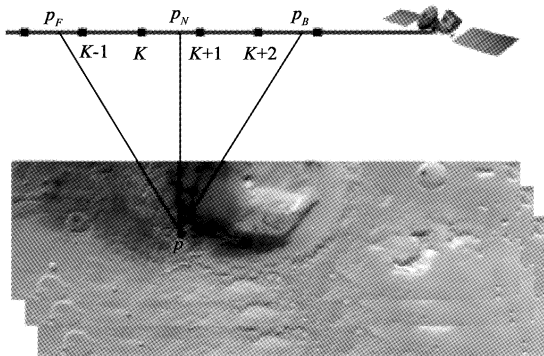


图 7 线阵传感器定向片模型

Fig. 7 Orientation fix model

行星地形测绘有效载荷除立体测绘相机外,通常还搭载有激光测高仪,如美国 MGS 火星探测器搭载的 MOLA。一般来说,激光测高仪的高程测量精度较高,但是激光点的距离较大,而影像数据的分辨率一般要优于激光点的间距。将高分辨率的影像数据与高精度的激光测高数据进行联合处理,可以提高几何定位的精度。引入激光测高数据联合平差的基本思想是,将激光测高数据作为限制信息与光束法平差模型联合求解。SHAN 等通过将 MOC 影像与 MOLA 激光点进行配准引入高程控制信息,即在常规光束法平差模型中加入地面激光点至投影中心的距离与激光测距距离相等这一约束条件^[4]。为提高 CE-1 三线阵 CCD 数据立体定位精度,赵双明等对 CE-1 立体相机影像与激光高度仪数据的不一

致性进行了分析^[21]。线阵影像数据与激光测高数据联合处理的一个关键问题是线阵影像与激光点数据的快速、精确配准,涉及最佳扫描行的快速定位,赵双明等提出了一种激光点反投影快速算法,通过建立双线性变换关系快速确定影像搜索窗口^[21];王密等提出了一种利用物方几何约束进行线阵影像地面点反投影计算的方法^[22];耿迅等基于物方投影面几何约束思想,对线阵 CCD 的分段处理以及分段投影面的快速确定进行优化,实现了“火星快车”HRSC 线阵影像的快速几何纠正^[23]。

2.6 密集匹配自动提取 DEM

利用立体影像自动生成 DEM 的核心问题是影像的密集匹配。火星地形多类似于地球表面的沙漠或戈壁地区,影像纹理信息相对贫乏,影像匹配难度较大。但是与对地观测卫星影像匹配相比,火星表面影像匹配时也有一些有利条件,如火星表面不存在人工建筑物,对地观测影像匹配中的难点问题如遮挡和移动目标等在火星表面也不存在。在处理时,需要针对火星地表影像的这些特点,对现有匹配算法进行改进^[24]。Kirk 等通过对 MGS 任务的 MOC 影像进行密集匹配处理,获取了“勇气号”与“机遇号”着陆器着陆区域的高分辨率地形数据^[25],利用 MRO 的 HiRISE 立体影像自动生成了“凤凰号”着陆区域的米级分辨率地形数据^[26]。Klaus 介绍了从 HRSC 立体影像中提取高分辨率 DEM 的方法。为实现影像的高精度、快速匹配,通常需要利用核线几何约束^[27]。由于线阵相机行中心投影的特殊性,线阵影像的核线几何关系比框幅式影像复杂,卫星摄影测量领域中许多学者研究了线阵影像的核线几何关系^[28],其结论与方法同样适用于火星地形测绘。耿迅等针对“火星快车”HRSC 线阵影像提出了一种近似核线重采样方法^[29]。德国宇航中心的 Hirschmüller 提出了半全局匹配算法 (Semi-global matching, SGM)^[30],SGM 算法的匹配精度与效率得到了广泛认可,目前已经成功用于多个商业摄影测量系统,且应用于 HRSC 影像的 DEM 自动生成。

2.7 多线阵拼接

HiRISE 是目前分辨率最高的火星探测传感器,虽然影像分辨率高,但是对应地面覆盖范围则较小。受当前制造工艺所限,单片 CCD 长度有限,高分辨率卫星影像通常采用多线阵拼接方式提高影像覆盖

范围,相邻 CCD 之间重叠若干像素,如“昴星团”(Pleiades)、“资源三号”、“天绘一号”高分辨率相机等对地观测卫星均采用了线阵拼接方式,如图 8 所示。HiRISE 相机焦平面含有红色、蓝-绿以及近红外三个波段,其中红色波段由 10 个线阵 CCD 拼接而成,蓝-绿波段与近红外波段各由 2 个 CCD 拼接而成。由于多线阵拼接时相邻线阵间有一定重叠区域,后期可通过数据处理方式形成一条“虚拟影像”,可将“虚拟影像”当做一条线阵 CCD 进行几何处理,自动提取 DEM。文献[11]详细介绍了 HiRISE 高分辨率相机的多片 CCD 拼接原理以及数据处理方法,并利用 HiRISE 立体像对生成了局部区域高分辨率地形数据。

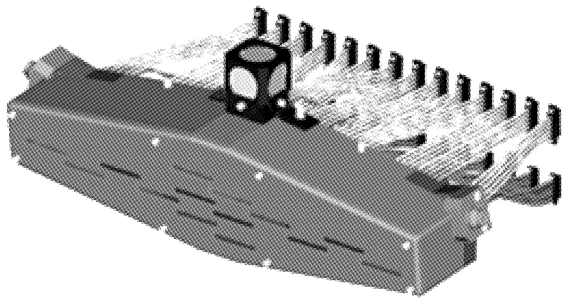


图 8 HiRISE 多线阵拼接示意图

Fig. 8 Montage of multi-linear CCD for HiRISE

3 我国开展火星地形测绘的思考

目前,我国已经成功发射了“嫦娥一号”与“嫦娥二号”月球轨道探测器,“嫦娥三号”也已经顺利实现月面软着陆。通过嫦娥工程,我国在月球探测以及月球地形测绘方面积累了一定经验。但是无论是发射火星轨道探测器还是火星着陆器,火星探测的难度要比月球探测大很多。火星地形数据对着陆区选址、着陆器安全着陆以及火星科学研究具有重要意义。获取高精度、高分辨率的火星地形数据也是我国开展火星探测需要解决的一个重要科学问题。结合我国深空探测的具体实际情况,针对我国开展火星地形测绘谈几点思考。

1) 虽然目前可以公开获取 200 ~ 300 m 分辨率的火星地形数据,但是为保证我国火星探测尤其是着陆探测任务的顺利实施,必须依靠自主手段获取高分辨率火星地形数据。

2) 我国开展火星地形测绘需要利用高分辨率

对地观测卫星以及月球地形测绘的技术基础。另外,开展火星地形测绘对于卫星定姿、定轨精度、光学传感器制作水平有更高的要求,这些也会促进我国高分辨率对地观测卫星事业的发展。

3) 我国开展火星地形测绘既要坚持独立自主,也要开展国际合作,借鉴美国和欧洲现有的成功经验,在地形测绘传感器设计、数据处理、坐标系参数等方面充分利用现有研究成果。NASA 的 PDS 行星数据系统以及 SPICE 库辅助数据存储方式值得我们学习与借鉴。

4) 火星探测成本较高,且从卫星发射到飞抵火星需要大约半年的时间。“海盗号”和“火星快车”都是同时搭载了轨道器与着陆探测器,建议我国在开展火星探测时也采用这种方式。轨道器可以对着陆区进行详细探测,获取高分辨率地形数据,有助于着陆器安全着陆。但是这对地面数据处理系统的稳定性和实时性提出了更高要求。

5) 虽然火星地形测绘的摄影测量数据基本原理与对地观测卫星相同,但是也有一些问题是现有摄影测量系统不能解决的,如影像与激光测高数据的联合平差、弱纹理区域的密集匹配等,因此需要对现有摄影测量系统加以改进。

参 考 文 献

- [1] Kirk R L, Kraus E H, Rosiek M. Recent planetary topographic mapping at the USGS, Flagstaff: Moon, Mars, Venus, and Beyond[C]. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, Netherlands, 2000: 476 - 490.
- [2] 徐青. 数字空间与深空测绘及其支撑技术[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(2): 97 - 100. [Xu Q. Digital space & spacial survey and its supporting techniques[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2006, 23(2): 97 - 100.]
- [3] Rosiek M, Kirk R L, Archinal B A, et al. Utility of Viking orbiter images and products for Mars mapping [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(10): 1187 - 1195.
- [4] Shan J, Yoon J S, Lee D S, et al. Photogrammetric analysis of the Mars global surveyor mapping data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(1): 97 - 108.
- [5] Yoon J S, Shan J. Combined adjustment of MOC stereo imagery and MOLA altimetry data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(10): 1179 - 1186.
- [6] Alibert J, Attwenger M, Barrett J, et al. HRSC on Mars Express-photogrammetric and cartographic research [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(10): 1153 - 1166.
- [7] Scholten F, Gwinwe K, Roatsch T, et al. Mars Express HRSC

- data processing-methods and operational aspects [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71 (10): 1143 - 1152.
- [8] Kirk R L, Kraus E H, Galuszka D, et al. Topomapping of Mars with HRSC images, ISIS, and a commercial stereo workstation [C]. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, 2006.
- [9] 耿迅,蓝朝桢,徐青,等. 火星快车 HRSC 线阵推扫式影像地面点反投影快速融合 [J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(6): 601 - 605. [Geng X, Lan C Z, Xu Q, et al. Data fusion of Mars Express HRSC linear pushbroom imagery based on fast algorithm for back projection [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(6): 601 - 605.]
- [10] Li R X, Hwangbao J, Chen Y H, et al. Rigorous photogrammetric processing of HiRISE stereo imagery for Mars topographic mapping [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(7): 2558 - 2572.
- [11] McEwen A S, Banks M E, Baugh N, et al. The high resolution imaging science experiment (HiRISE) during MRO ' s primary science phase (PSP) [J]. ICARUS, 2010, 37(2): 1 - 36.
- [12] Duxbury T C, Kirk R L, Archinal B A, et al. Mars geodesy/ cartography working group recommendations on Mars cartographic constants and coordinate systems [C]. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Ottawa, Canada, 2002.
- [13] Seidelmann P K, Archinal B A, A'hearn M F, et al. Report of the IAU/IAG working group on cartographic coordinates and rotational elements [J]. Celestial, Mechanics and Dynamical Astronomy, 2007: 155 - 180.
- [14] Acton C. Ancillary data services of NASA ' s navigation and ancillary information facility [J]. Planetary and Space Science, 1996: 44(1): 65 - 70.
- [15] GDAL [EB/OL]. [2013 - 08 - 06]. <http://www.gdal.org>.
- [16] Hofmann O, Nave P, Ebner H. DPS-A digital photogrammetric system for producing digital elevation models and orthophotos by means of linear array scanner imagery [C]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1982: 846 - 851.
- [17] 王任享. 月球卫星三线阵 CCD 影像 EFP 光束法空中三角测量 [J]. 测绘科学, 2008, 33(4): 1 - 7. [Wang R X. EFP Bundle triangulation using lunar imagery obtained from satellite three-line-array camera [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(4): 1 - 7.]
- [18] Chen Y H. Bundle adjustment of Mars HiRISE orbiter stereo images based on the rigorous sensor model [C]. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Beijing, China, 2008: 999 - 1004.
- [19] Spiegel M. Improvement of interior and exterior orientation of the three linear scanner camera HRSC with simultaneous adjustment [C]. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Munich, Germany, 2007, 161 - 166.
- [20] 刘军. GPS/IMU 辅助机载线阵 CCD 影像定位技术研究 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2007. [Liu J. A study on the positioning theory of airborne linear CCD imagery supported by GPS/IMU [D]. Information Engineering University, Zhengzhou, 2007.]
- [21] 赵双明,李德仁,牟伶俐. CE-1 立体相机影像与激光高度计数据不一致性分析 [J]. 测绘学报, 2011, 40(6): 751 - 755. [Zhao S M, Li D R, Mou L L. Inconsistency analysis of CE-1 stereo camera images and laser altimeter data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(6): 751 - 755.]
- [22] 王密,胡芬,王海涛. 一种基于物方几何约束的线阵推扫式影像坐标反投影计算的快速算法 [J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 384 - 390. [Wang M, Hu F, Wang H T. A fast algorithm for back project calculation of linear array pushbroom imageries based on object-space geometric constraint [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(3): 384 - 390.]
- [23] 耿迅,徐青,邢帅,等. 基于最佳扫描行快速搜索策略的线阵推扫式影像微分纠正算法 [J]. 测绘学报, 2013, 42(6): 861 - 868. [Geng X, Xu Q, Xing S, et al. Differential rectification of linear pushbroom imagery based on the fast algorithm for best scan line searching [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(6): 861 - 868.]
- [24] 耿迅,徐青,蓝朝桢,等. 火星快车 HRSC 影像三维地形重建 [C]. 第九届深空探测学术会议论文集, 杭州, 中国, 2012: 776 - 781. [Geng X, Xu Q, Lan C Z, et al. Martian surface topographic reconstruction based on Mars Express HRSC imagery [C]. Deep Space Exploration, Hangzhou, China, 2012: 776 - 781.]
- [25] Kirk R L, Kraus E H, Redding B, et al. High-resolution topomapping of candidate MER landing sites with Mars orbiter camera narrow - angle images [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(12).
- [26] Kirk R L, Kraus E H. Ultra high resolution topographic mapping of Mars with MRO HiRISE stereo images: meter-scale slopes of candidate phoenix landing sites [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 113(2).
- [27] Klaus G. Derivation and validation of high - resolution digital terrain models from Mars Express HRSC data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005.
- [28] 张永生,巩丹超,刘军,等. 高分辨率遥感卫星应用——成像模型、处理算法及应用技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. [Zhang Y S, Gong D C, Liu J, et al. The application of high resolution remote sensing satellite——imaging model, processing algorithm and application technology [M]. Beijing: Science Press, 2007.]
- [29] 耿迅,徐青,邢帅,等. 火星快车 HRSC 线阵影像投影轨迹法近似核线重采样 [J]. 武汉大学学报, 信息科学版, 已录用. [Geng X, Xu Q, Xing S, et al. Approximate epipolar resampling of Mars Express HRSC linear pushbroom imagery based on projection trajectory method [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, in press.]
- [30] Hirschmüller H. Stereo processing by semi - global matching and mutual information [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 328 - 341.

作者简介:

徐青(1964 -),男,教授,博士生导师,主要研究方向为数字摄影测量、三维可视化、行星测绘。

通信地址:河南省郑州市陇海中路 66 号航测教研室 (450052)

电话:(0371)81635247

E-mail:xq@szdceec.com

(责任编辑:宋宏)