

勇气号和机遇号火星车定位方法评述

邱凯昌

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要 评述了应用于勇气号和机遇号火星车的无线电测控定位、航迹推算、太阳图像确定方位角、视觉测程、光束法平差定位、地面影像与高分辨率卫星影像对比等多种定位方法,分析了其精度、适用范围、进一步发展的潜力等,对中国探月二期工程以及以后的火星探测工程中的探测车定位具有借鉴作用。

关键词 火星探测 火星车定位 精度

中图分类号: V416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8748(2009)05-0001-05

A Review of Spirit and Opportunity Rover Localization Methods

DI Kaichang

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: This paper reviews the rover localization methods for Spirit and Opportunity rovers of the Mars Exploration Rover mission, including radio tracking, dead reckoning, sun sensor for absolute heading determination, visual odometry, bundle adjustment of rover image network, and comparison of rover and high-resolution satellite images. The application scopes, accuracies and development potentials of these methods are analyzed, which can be used as a reference for rover localization in the future lunar and Mars rover missions.

Key words: Mars exploration; rover localization; accuracy

1 引言

在美国国家航空航天局(NASA)2003火星探测车任务中,勇气号(Spirit)和机遇号(Opportunity)火星车携带相同的科学和工程仪器于2004年1月4日和25日分别在古谢夫陨石坑(Gusev Crater)和梅里迪亚尼平原(Meridiani Planum)成功着陆,业务化运行至今(2009年6月底)已近5年半的时间,在科学发现和工程实施方面都取得了空前的成功,而高精度的火星车定位对安全行驶及科学目

标和工程目标的实现发挥了关键性的作用^[1-3]。勇气号和机遇号火星车的定位运用了无线电测控定位、航迹推算、太阳图像确定方位角、视觉测程、光束法平差定位、地面影像与高分辨率卫星影像对比等多种方法,每种方法都有其自身的优点和局限,多种方法的优化组合保证了定位信息的及时、精确。本文根据笔者在美国多年的研究经历及参加勇气号和机遇号火星车探测任务超过4年的业务化运行工作经验,对勇气号和机遇号火星车的定位方法进行评述,分析各种方法的原理、适用范围、精度、进一步发展的潜力等,希望对中国探月二期工程以及以后的火星探测工程中的探测车定位具有借鉴作用。

收稿日期:2009-07-02; 修回日期:2009-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40871202); 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2009AA12Z310)

作者简介:邱凯昌(1967-),男,博士,研究员,博士生导师,现从事行星遥感制图与导航定位研究。

2 勇气号和机遇号火星车相关硬件、导航方式及坐标参考系统简述

火星车采用六轮驱动,轴距 1.2 m,顶部的立体相机横杆距地面 1.5 m。相机杆上的导航相机 Navcam (Navigation Camera) 是一对全色相机,立体基线长 20 cm,相机主距 14.67 mm,视场角 45° ;全景相机 Pancam (Panoramic Camera) 是一对高分辨率多光谱相机,立体基线长 30 cm,相机主距 43 mm,视场角 16.8° 。相机杆可以在水平方向旋转 360° ,垂直方向旋转 $\pm 90^\circ$,使得 Navcam 和 Pancam 都可以方便地拍摄全景图像。避障相机 Hazcam (Hazard-avoidance Camera) 有两对全色相机,分别固定于太阳能电池阵下的前后部,立体基线长 10 cm,相机主距 5.58 mm,视场角约 120° ^[2]。

车上计算机采用 32 位 RAD6000 微处理器,128 MB RAM、256 MB 闪存^[4]。火星车执行行驶及数据获取命令以一个火星日(约为 24h40min)为一个周期,一个火星日的典型行驶距离为 20~50 m,偶尔会超过 100 m。长距离的行驶一般由“盲行驶”和“自主行驶”两种模式混合实现,首先在安全行驶路径内盲行驶,然后开启自主行驶模式用导航和避障软件选择路径行驶,整个行驶路径中盲行驶的距离远远超过自主行驶距离^[5]。安全行驶路径根据前一个火星日 Navcam 或 Pancam 立体相机影像及其派生的坡度图等地形制图产品由人工确定,因此立体相机的测图能力和地形制图产品的精度和可靠性十分重要^[6-7]。火星车在平坦坚硬的地面上盲行驶的最高速度为 5 cm/s,在自主行驶模式下的速度约为 1 cm/s^[4]。

火星车导航定位及任务实施涉及到全球和局部多个坐标参考系统,火星全球参考系统主要包括火星惯性参考系统和火星星固参考系统^[6]。惯性参考系统原点在火星质心,主要用于飞行器导航以及从地球或火星卫星上对火星着陆器和火星车进行无线电测控定位。火星星固参考系统原点也在火星质心,其 Z 轴与旋转轴重合正方向指向北极, X 轴在赤道平面内正方向指向中央子午线, Y 轴与 X 轴和 Z 轴构成右手直角坐标系。在星固参考系统中,火星的形状用圆球来近似。火星星固参考系统主要用于从卫星图像上量测火星表面目标。

火星车着陆后,为便于作业,定义了一系列的工作区局部坐标系 (Site Frame),其 X 轴指向当地

北方向, Z 轴向下与法线方向重合, Y 轴向东与 X 轴和 Z 轴构成直角坐标系。第一个工作区坐标系 (Site 0) 的原点在着陆点中心,相邻工作区坐标系的相互关系用一个三维平移向量和一个四元组定义的旋转矩阵确定^[3]。第一个工作区坐标系又被定义为着陆区局部坐标框架 (Landing Site Local frame, LSL),整个着陆区的摄影测量定位制图工作都在 LSL 中进行。火星车的相机模型定义在火星车参考系统 (Rover Frame) 中, X 轴指向前方, Z 轴向下, Y 轴向右。根据火星车的位置和姿态经一系列的平移和旋转可将相机模型及量测结果从火星车坐标系转换至工作区坐标系和 LSL 坐标系^[3]。

3 勇气号和机遇号火星车的定位方法

3.1 无线电测控定位

勇气号和机遇号火星车用其无线电系统同地球跟踪站直接通信或与火星轨道器通信,根据无线电信号的多普勒频移来确定火星车在火星惯性参考系统中的位置。通过多次重复测控定位,火星车在惯性参考系统中的定位精度可达 $1\sim 10\text{ m}$ ^[6]。无线电测控确定的火星车位置可以转换到星固参考系统中,转换精度为 $\pm 250\text{ m}$ ^[6]。

勇气号火星车着陆后,美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 导航团队把第 2 个火星日至第 4 个火星日地球测控站直接得到的双向多普勒信号以及勇气号与奥德赛轨道器在两次通信窗口得到的双向多普勒信号联合处理,得到了着陆器的位置(即火星车初始位置)^[6]。机遇号着陆器的定位也采用了相同的方法。在勇气号的第 94 至 98 火星日位置、机遇号第 75 至第 78 火星日位置火星车原地不动实施软件更新上载任务,无线电测控定位方法在这两个位置再次对火星车进行定位。着陆点和软件更新位置也通过卫星图像中地物识别和平面三角交会的方法定位。将无线电测控定位位置转换至星固参考系统并与基于卫星图像定位的位置相比较发现,两种定位方法勇气号两个位置的差别均为 370 m 左右,在机遇号的两个位置均为 135 m 左右,表明两种方法都精确、可靠,两种方法得到的位置的差别主要来源于惯性参考系统和星固参考系统转换带来的误差。此后,无线电测控定位方法还用于少数几个火星车停留了较长时间的关键位置。

无线电测控定位方法的优点是全局绝对定位,缺点是无法实现实时自主定位。应当结合其他方法

使用,并消除惯性参考系统和星固参考系统坐标转换带来的误差。适合用于着陆器定位和火星车停留较长位置的定位。

3.2 航迹推算

航迹推算法(Dead Reckoning)基于里程表和惯性导航器件(Inertial Measurement Unit, IMU)计算火星车的位置和姿态,不依赖于外界环境信息,是一种车上实时自主定位方法。勇气号和机遇号火星车所用IMU是Litton LN-200型,由表面姿态位置及指向(Surface Attitude Position and Pointing, SAPP)软件以8Hz的频率计算和更新其姿态和位置,其中姿态更新由三轴加速度计和三轴陀螺仪量测,位置由IMU和里程计转数共同计算^[8]。SAPP软件获取火星车位置的设计精度为行驶距离的10%,即在100m的行驶距离累积定位误差不超过10m^[8]。

航迹推算法的优点是功耗小、自主性强、计算简单、相对廉价,缺点是IMU随时间漂移及车轮打滑在长距离导航定位中会产生较大误差,例如在勇气号着陆区的哥伦比亚山、机遇号着陆区的鹰坑(Eagle Crater)和耐力坑(Endurance Crater)上坡时出现过严重的打滑现象,其中在哥伦比亚山上坡时有一次高达125%的车轮打滑(指令是向前行驶,实际打滑到后面)^[5]。根据其固有的优缺点,航迹推算法作为基本的车上实时定位方法仍然会被广泛应用,当有条件应用其他精度较高的方法时再对其定位误差进行定期或不定期的改正。

3.3 太阳图像确定方位角

勇气号和机遇号火星车还用其Pancam作为太阳敏感器获取太阳图像,确定图像中太阳质心位置,计算相对于火星车参考系统的太阳方位角和高度角,然后利用太阳星历表和太阳时计算太阳方位角和高度角,通过两组姿态的关系计算火星车相对于正北方向的绝对方位角,改正IMU随时间漂移带来的方位角累积误差。根据在地球上的测试,用太阳图像确定方位角的精度为 $\pm 3^\circ$ ^[9]。这一方法无法单独用于探测车定位,未来的月球车和火星车探测任务中应与航迹推算法结合使用,用于不定期地改进方位角测定精度。

3.4 视觉测程

视觉测程法(Visual Odometry, VO)基于连续拍摄的导航相机立体像对在二维影像平面和三维地面空间追踪特征点并估计相对的位置和姿态实现车上实时定位,改正由航迹推算方法在车轮打滑时带

来的较大定位误差^[2, 5, 6]。JPL开发的VO算法的基本过程是^[10]: 1) 在第一个立体像对上用 $F_{L_{rstner}}$ 算子提取特征点; 2) 用相关系数法在第一个立体像对上进行特征点匹配,并用双二次方内插方法将匹配位置定位到子像素,计算匹配成功的特征点三维坐标; 3) 根据航迹推算获得的第二个立体像对的位置和姿态将这些三维点投影到第二个立体相对中,用相关系数法匹配实现特征点的追踪并计算新的三维坐标; 4) 用RANSAC方法在计算两组三维点六自由度刚性变换过程中剔除匹配和追踪的粗差,最后用最大似然估计计算第二个立体像对相对于第一对立体像对的位置和姿态变化,进而获得火星车在前后两个位置间的位置和姿态变化; 5) 对新获取的立体像对重复以上过程,更新火星车位置和姿态,若提取和追踪的特征点数量不足或最终的位置和姿态估计不收敛,则不更新而沿用航迹推算法得到的位置和姿态。

为了保证前后立体像对间有较大的重叠和较小的目标形状变化,相邻像对间拍摄间距不超过75cm,摄影方位角的变化不超过 18° ^[2, 10]。由于火星车上计算机速度的限制,获取和处理一个立体像对并更新位置和姿态需要近3min的时间,速度太慢,因而VO无法用于勇气号和机遇号的全行程,而是用于部分短距离关键路径上的局部定位(一般小于15m),如预计车轮打滑时、接近指定的科学目标时^[5]。

JPL曾在地球上模拟火星环境下多次试验验证视觉测程法的有效性和精度。在“火星庭院”的一次典型试验中,火星车行驶了24m,VO定位误差小于2.5%;在“约翰逊山谷”的一次29m行驶试验中,VO产生的定位误差小于1.5%^[9]。据JPL研究者的报道^[10-11],从着陆至2005年3月5日的一年多时间里,勇气号有184个火星日行驶,其中52个火星日应用了视觉测程,计算收敛成功率为97%;机遇号有172个火星日行驶,其中75个火星日应用了视觉测程,成功率为95%。VO不成功的情况一般是没有足够的特征点、特征点分布范围太小、火星车自身阴影的影响等。

总之,勇气号和机遇号火星车所用的视觉测程方法的优点是自主性强、精度较高,能改正航迹推算方法在车轮打滑和IMU漂移时的定位误差;其缺点是计算速度慢、只能应用于局部定位,成功与否依赖于地形特征。VO速度慢的缺点部分是由于火星车计算机的计算能力限制,未来的火星车或月球车

计算机的计算能力应该会强得多。针对在地形特征贫乏情况下 VO 失败的情况,应开发新的算法并结合其他定位方法予以克服。随着计算机能力的提高和算法的改进,未来的 VO 定位方法是可以实现快速、全程定位,可望得到广泛应用。

3.5 光束法平差定位

美国俄亥俄州立大学制图与地理信息系统实验室开发的基于光束法平差(Bundle Adjustment, BA)的定位方法是将导航相机和全景相机在不同摄站拍摄的图像连接起来构成图像网,通过对图像网的摄影测量光束法平差,提高图像位置和方位参数以及地面点位置的精度和一致性,从而实现火星车的长距离高精度定位^[2-3, 12-13]。在加利福尼亚银湖沙漠同 JPL 做的联合野外测试表明,利用降落图像和地面火星车图像联合光束法平差定位精度达 0.1%,仅用火星车图像的光束法平差定位精度为 0.2%^[12-13]。光束法平差定位方法的优点是不需要短距离连续拍照,可以在火星车整个路径上进行全局定位,定位精度较高,缺点是尚未达到全自动化,目前需要在地球上计算。

对勇气号火星车的光束法平差定位从着陆点开始一直持续至今,BA 改正了航迹推算算法在车轮打滑和 IMU 漂移带来的较大的累积误差^[2]。例如:从第 154 至第 670 个火星日,勇气号从山脚下爬上了 Husband 山的山顶并开始下坡,同 BA 定位结果相比,航迹推算法定位累积误差为 67.9 m,占行驶距离 1.85 km 的 3.7%,其中最大相对误差为 10.5% (行驶 540.6 m 时累积误差 56.6 m)^[3]。由于火星上目前没有 GPS 提供精确的地面实况数据,无法精确评估火星车的绝对定位精度。然而,在 2005 年 1 月 3 日发布的 MOC NA (Mars Orbital Camera, Narrow Angle) 1m 分辨率的卫星影像中,可以看到从着陆点到哥伦比亚山的大部分车辙。用此卫星图像中观测到的行驶路线与光束法平差定位得到的行驶路线进行对比,发现在路线终点的差别为 12 m,约为行驶距离 3.08 km 的 0.4%^[3]。此误差间接表达了 BA 定位的精度,其中也包含了卫星影像处理的误差。

自机遇号在“鹰坑”内着陆至第 62 个火星日,基于光束法平差的定位处理改正了由于车轮打滑带来的高达 21% 的定位误差^[2]。此后,由于该区火星表面几乎没有岩石等明显特征,行驶距离过长而没有拍摄图像,使得基于 BA 的连续定位方法无法实施。在能够观测到明显特征(如陨石坑)的地方,用火星

车图像产生的正射影像同卫星影像地图对比来对机遇号火星车定位。

光束法平差定位方法应当在未来的月球车和火星车探测任务中发挥重要的作用。需要进一步增强该方法,提高自动化程度,关键之一是自动选取相邻摄站间的连接点构成影像区域网。近两年,俄亥俄州立大学与 JPL 联合开发了基于 BA 和 VO 集成的长距离火星车定位技术,在保持高精度的前提下显著提高了自动化程度,并在银湖沙漠进行了测试^[14]。

3.6 地面影像与高分辨率卫星影像对比

尽管 VO 和 BA 方法的定位精度远高于航迹推算算法,它们在长距离的定位中仍然不可避免地有误差累积。即使 BA 的定位精度为 0.2%,10 km 的行驶路线也会产生 20 m 的累积误差。可以应用高分辨率的卫星图像消除仅利用地面传感器和图像进行火星车定位的误差累积。目前,火星卫星图像的分辨率越来越高,如 HiRISE 图像分辨率为 30 cm,为实现这一目的提供了有利条件。可以用火星车图像产生的正射影像同高分辨率图像叠加对比;在多个 HiRISE 图像中观测到了火星车,可以直接定位消除累积误差;对于勇气号着陆区多石块的特点,可以通过匹配分别从火星车图像和 HiRISE 图像中提取的石块实现火星车在卫星图像上的定位。在业务化运行过程中,这些方法基本上是以手工方式实现的。中科院遥感所的行星遥感制图与导航定位研究组,近期在地面与卫星影像集成的探测车定位方面取得了积极的进展,实现了地面影像与高分辨率卫星影像的自动配准和火星车定位,定位精度优于卫星图像一个像素(HiRISE 图像 30 cm)。

最后,将各种定位方法的特点总结比较如表 1。

4 结语

应用于勇气号和机遇号火星车的多种定位方法各有其优缺点和适用范围,它们在业务化运行中的应用经验值得借鉴。这些方法本身也在不断发展完善,在未来的月球车和火星车探测任务中可以优化组合,发挥各自的作用。

致谢

本文主要根据作者在美国俄亥俄州立大学制图与地理信息系统实验室所做研究和作为共同项目负责人参与勇气号和机遇号火星车业务化运行工作经

验总结而成,在此对俄亥俄州立大学火星探测项目负责人、制图与地理信息系统实验室主任李荣兴教

授表示衷心的感谢,同时对参加火星探测项目的同事们表示诚挚的谢意!

表 1 勇气号和机遇号火星车多种定位方法的比较

Table 1 Comparison of Spirit and Opportunity rover localization methods

	全局或着陆区局部定位	定位计算平台	应用范围	定位精度
无线电测控	全局	地球上	着陆点和火星车停留时间较长的位置	惯性参考系统 1~10 m, 转换到星固参考系统中的转换精度 $\pm 250\text{m}$
航迹推算	局部	火星车上	路径全程	10%
太阳图像确定方位角	局部绝对方位角	火星车上	部分位置	3°
视觉测程	局部	火星车上	部分短路径	3%
光束法平差	局部	地球上	路径全程	0~2%
地面影像与高分辨率卫星影像对比	全局	地球上	部分有明显特征的位置	卫星图像一个像素(如 HiRISE 30cm)

参考文献 (References)

- [1] Arvidson R E, Anderson R C, Bartlett P, et al Localization and physical properties experiments conducted by Spirit at Gusev Crater [J]. Science, Special Issue on MER 2003 Mission, 2004, 305(5685): 821-824
- [2] Li R, Squyres S W, Arvidson R E, et al Initial results of rover localization and topographic mapping for the 2003 Mars exploration rover mission [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Special issue on Mapping Mars, 2005, 71(10): 1129-1142
- [3] Di K, Xu F, Wang J, et al Photogrammetric processing of rover imagery of the 2003 Mars Exploration rover mission [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, 63: 181-201
- [4] NASA (National Aeronautics and Space Administration). Mars exploration rover landings press kit [EB/OL]. (2004-01). <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/newsroom/merlandings.pdf>
- [5] Maimone M, Johnson A, Cheng Y, et al Autonomous navigation results from the Mars exploration rover (MER) mission [C]. 9th International Symposium on Experimental Robotics (ISER), June 2004
- [6] Li R, Di K, Matthies L H, et al Rover localization and landing site mapping technology for 2003 Mars Exploration Rover mission [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70(1): 77-90
- [7] Di K, Li R Topographic mapping capability analysis of Mars exploration rover 2003 mission imagery [C]. The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT 2007), May 2007, Padua, Italy
- [8] Ali K, Vanelli C, Biesiadecki J, et al Attitude and position estimation on the Mars exploration rovers [C]. Proc. of the 2005 IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 2005
- [9] Trebbi-Ollenu A, Huntsberger T, Cheng Y, et al Design and analysis of a Sun sensor for planetary rover absolute heading detection [J]. IEEE Trans Robotics and Automation, 2001, 17(6): 939-947
- [10] Cheng Y, Maimone M W, Matthies L H. Visual odometry on the Mars exploration rovers [J]. IEEE Robotics and Automation, Special Issue (MER), 2006, 13(2): 54-62
- [11] Maimone M W, Cheng Y, Matthies L H. Two years of visual odometry on the Mars exploration rovers [J]. Journal of Field Robotics, Special issue on Space Robotics, 2007, 24(3): 169-186
- [12] Li R, Ma F, Xu F, et al Localization of Mars rovers using descent and surface-based image data [J]. Journal of Geophysical Research-Planets, 2002, 107(E11): 4148
- [13] Di K, Li R, Matthies L H, et al A study on optimal design of image traverse networks for Mars rover localization [C]// Proceeding of ACSM-ASPRS 2002 Annual Conference Washington, D C April 19-26, 2002
- [14] Di K, Wang J, He S, et al Toward autonomous Mars rover localization: operations in MER 2003 mission and new development for future missions [C]//The XXI Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Beijing: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, July 1-11, 2008

(编辑:朱丽)