



航 / 天 / 动 / 力 / 学 / 研 / 究 / 丛 / 书

Visual-aided Navigation and Tele-operation

视觉导航 与遥操作



航天飞行动力学技术重点实验室 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

《航天动力学研究》丛书

视觉导航与遥操作

Visual-aided Navigation and Tele-operation

航天飞行动力学技术重点实验室 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书为丛书第三辑,以“空间视觉导航与遥操作”为主题,共收录 23 篇论文,源于我国载人航天与深空探测系列任务中对月面探测、空间导航以及空间站对接的技术需求,是航天飞行动力学技术重点实验室与西北工业大学、中国科学院遥感应用研究所、国防科技大学以及装备学院等科研单位合作项目的成果总结,内容涵盖月球车视觉导航、深空视觉定位/定轨以及空间操控等方面的理论分析成果和工程应用结果。

本书可供从事航天动力学技术研究的科研人员使用,也适合高校航天相关专业研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

视觉导航与遥操作/航天飞行动力学技术重点实验室
编著. —北京:国防工业出版社, 2013. 11
(航天动力学研究丛书)
ISBN 978-7-118-09064-2

I. ①视... II. ①航... III. ①航天导航—视觉
导航—研究②航天导航—航天遥感—研究 IV. ①V556

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 242962 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 889 × 1168 1/16 印张 10 字数 319 千字

2013 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

《航天动力学研究》丛书编审委员会

名誉主任 沈荣骏(院士)

主 任 陈宏敏

副 主 任 李 剑 周建亮

顾 问 李济生(院士) 余梦伦(院士) 魏奉思(院士)

于起峰(院士) 李泽椿(院士) 吴一戎(院士)

陈炳忠 隋起胜 周建平 吴伟仁 刘 林

秘 书 长 申敬松

委 员 (按姓氏笔画排序)

万卫星(院士) 王 赤 王飞雪 王劲松 平劲松

朱民才 李广云 李革非 张继贤 罗建军 周建华

房建成 孟 桥 赵长印 胡 军 胡松杰 皇甫堪

袁建平 郭树人 曹喜滨 葛林林(澳大利亚) 董光亮

韩崇昭 谢剑峰 廖新浩 濮祖荫

《航天动力学研究》丛书编辑委员会

主 编 唐歌实

副 主 编 王保丰 李羿霏

编 辑 卜彦龙 王 镓 刘传凯 李立春 彭 嫚

编 务 李 黎 师 明

序 言

航天动力学是研究航天器和运载器在飞行中所受的力及其在力作用下的运动的学科。航天动力学是我国航天事业发展的一个重要支撑学科,随着载人航天、月球探测、交会对接和深空探测等航天任务的展开,我国的航天动力学研究取得了一个又一个的成就,也遇到了越来越多的挑战。航天动力学是一个需要持续推动、不懈探索的学术领域,需要广大航天科技工作者承担起历史赋予的使命,夯实基础,脚踏实地,开拓创新,推动我国的航天事业向着世界科技高峰不断攀登。

《航天动力学研究》丛书将提炼航天飞行动力学技术国家级重点实验室在本领域各个研究方向开展科研试验、预先研究、学术交流、对外合作等活动过程中的优秀成果,以论文、研究报告等形式进行展示交流,这是该实验室在开放交流方面走出的十分重要的一步。该丛书拟设置 10 个专题:深空探测轨道测定与控制,交会对接,视觉导航与遥操作,轨道与姿态动力学,深空探测信号处理,精密定轨,空间天气及航天应用,火星探测,航天任务规划与控制,小卫星探测与轨道测定。

《航天动力学研究》丛书的陆续出版,将为航天动力学领域的研究人员提供良好的展示与交流平台,并将大力促进科学研究成果尽快向我国航天工程应用的转化。它不仅是航天领域最新工程任务和科研技术进展的直播窗口,也是相关专业科技工作者学术工作的展示舞台,同时还是国内外科研机构相互学习的交流基地。

祖国航天事业的蓬勃发展赋予了我们光荣而艰巨的历史重任,希望《航天动力学研究》丛书能够推动航天动力学领域的发展,为祖国的航天事业做出贡献。

沈崇骏

2011 年 10 月 1 日

前 言

依照我国探月工程“绕、落、回”的实施规划,“嫦娥”三号卫星的主要任务是突破月球软着陆、月面巡视勘察、月夜生存、深空测控通信与遥操作等关键技术,实现我国首次对地外天体的着陆巡视探测。从“嫦娥”三号卫星着陆器中走出的月面巡视器,是我国自行研制的第一个具备深空遥操作综合探测能力的机器人,基于自身相机成像和地面控制,可以实现导航、避障、路线选择、探测点与探测仪器选择,以及机械臂操作等复杂功能。显而易见,为了保障月面巡视器科学探测目标成功实施,视觉导航技术和遥操作技术至关重要。

视觉导航与遥操作是空间探测器导航、控制领域的共用关键技术。过去数十年间,美国、俄罗斯等国在各项空间探测任务的推动下,引领着这些技术的发展。关于空间探测器视觉导航,典型的应用有美国“勇气”号和“好奇”号火星车在火星表面立体相机导航,以及“深度撞击”“火星侦察轨道器”等空间探测器的自主光学导航。关于空间遥操作,典型的应用包括月球车、火星车上的机械臂探测,以及国际空间站对接,哈勃望远镜太空维修等。受到前期深空技术整体发展的制约,我国在空间视觉导航与遥操作方面的积累相对较弱,但近年来在载人航天和深空探测系列任务的牵引下,相关技术发展迅速,并且取得了较为丰富的研究成果。

航天飞行动力学技术重点实验室在承担国家载人航天、探月工程飞控任务过程中,掌握了大量航天飞行的关键技术。除为航天工程任务提供技术支持外,实验室还致力于开展关于深空探测新技术的探索性研究工作。结合天体表面探测、空间站对接、航天器导航与着陆等任务对视觉导航与遥操作技术的需求,开展了月球车视觉导航、航天器视觉定位/定轨,以及空间机械臂操控等方面的大量前瞻性研究,其中很多研究成果将被“嫦娥”三号任务以及后续相关航天任务应用和检验。

《航天动力学研究》丛书第三辑以“空间视觉导航与遥操作”为主题,整理了航天飞行动力学技术重点实验室及国内合作科研单位的专家、学者在空间视觉导航与遥操作领域的研究成果,从领域综述、理论研究以及实验分析等不同角度进行归纳。这些工作既是对已有成果的总结,也包含对相关技术发展的深入思考,希望对国内从事空间视觉导航与遥操作相关领域研究的科研人员有所帮助。

目 录

登月宇航员导航定位需求分析及技术方案探讨.....	邸凯昌(1)
A Vision-based 3D Grasp Planning Approach for the Space Robot with a Simple Gripper	Liu Chuankai, Su Jian hua, Qiao Hong(7)
面向深空天体探测的轨道器视觉定位技术及应用	卜彦龙, 唐歌实(17)
月球车与着陆器相对定位方法研究	王保丰, 唐歌实, 谢剑锋, 等(24)
基于视觉的卫星位置姿态自测量研究	李想, 于起峰, 雷志辉, 等(29)
空间非合作目标相对导航算法研究	龚柏春, 罗建军, 姚伟(35)
飞行器视觉/惯导自定位及目标位置估计	苏海峰, 岳晓奎, 郭明(40)
飞行器姿态视觉测量系统研究及参数分析	李想, 于起峰, 雷志辉(46)
基于 SIFT 匹配和光束法平差的深空探测车多相机目标交接	邸凯昌, 张重阳, 刘召芹(52)
月球车双目视觉三维地形重建算法研究	王镓, 唐歌实, 王保丰, 等(57)
一种月面巡视探测器的避障规划算法	刘祥, 王保丰(63)
火星 HiRISE 影像立体测图方法研究	胡文敏, 刘一良, 王保丰(70)
卫星星历和姿态在同名像点匹配中的应用研究	李学军, 杨阿华, 刘涛, 等(75)
无人飞行器自主引导着陆的点特征提取方法	胡天江, 宋欣平, 孔维炜, 等(80)
CPU/GPU 协同下基于 RFM 的卫星遥感影像快速几何校正	孙义威, 刘斌, 孙喜亮, 等(86)
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, 等(93)
基于虚拟现实的月球车在线控制	杨成, 周建亮, 孙军, 等(100)
小波分形与形状模型相结合的月面着陆区地形模拟	卜彦龙, 唐歌实, 王镓(107)
基于球面模型的月球车鱼眼相机标定方法研究	王保丰, 唐歌实(114)
基于 FAST 特征的深空飞行器视觉辅助组合导航	肖明, 潘亮, 胡天江, 等(121)
Global Image Matching Based on Feature Point Constrained Markov Random Field Model for Planetary Mapping	Peng Man, Liu Yiliang, Liu zhaoqin, et al(128)
A Method to Estimate the Off-plane Distance Using Homography Induced Parallax for Lunar Landing	Li Lichun, Zhou Jianliang, Sun Jun, et al(134)
深空探测车的视觉测程定位新方法	万文辉, 邸凯昌, 刘召芹(139)

CONTENTS

Demand Analysis and Technical Solution of Astronaut Localization on Lunar Surface	Di Kaichang(1)
A Vision-based 3D Grasp Planning Approach for the Space Robot with a Simple Gripper	Liu Chuankai, Su Jianhua, Qiao Hong(7)
Vision-based Orbiter Location Technique and Application for Celestial Body Exploration in Deep Space	Bu Yanlong, Tang Geshe(17)
A Localization Method for Computing the Relative Positions between Lunar Rover and Lander	Wang Baofeng, Tang Geshe, Xie Jianfeng, et al(24)
Vision-based Position and Attitude Estimation for Satellites	Li Xiang, Yu Qifeng, Lei Zhihui, et al(29)
Research on Relative Navigation Algorithm for Space Non-Cooperative Target	Gong Baichun, Luo Jianjun, Yao Wei(35)
Attitude and Position Estimation Based on Vision and IMU	Su Haifeng, Yue Xiaokui, Guo Ming(40)
Parametric Analysis of Vision-based Aircraft Attitude Sensor	Li Xiang, Yu Qifeng, Lei Zhihui(46)
Rover Camera Handoff Based on SIFT Matching and Bundle Adjustment	Di Kaichang, Zhang Chongyang, Liu Zhaoqin(52)
An Terrain Reconstruction Algorithm for a Lunar Rover with a Binocular Stereo Vision System	Wang Jia, Tang Geshe Wang Baofeng, et al(57)
An Obstacle Avoidance and Path Planning Algorithm for Lunar Rover	Liu Xiang, Wang Baofeng(63)
Mars Orbital Image Stereo Mapping With HiRISE Data	Hu Wenmin, Liu Yiliang, Wang Baofeng(70)
Applying Satellite Ephemeris and Attitude to Corresponding Point Matching	Li Xuejun, Yang ahua, Liu Tao, et al(75)
Corner Detection for Autonomous Landing Guidance of Unmanned Aerial Vehicles	Hu Tianjiang, Song Xinping, Kong Weiwei, et al(80)
A CPU/GPU Collaborative Approach to High-Speed Remote Sensing Image Rectification Based on RFM	Sun Yiwei, Liu Bin, Sun Xiliang ,et al(86)
Local Base Map Preparation for Lunar Orbiter Scene Matching Aided Navigation	Bu Yanlong, Tang Geshe, Wang Mei, et al(93)
Online Control of Unmanned Lunar Rover by Virtual Reality	Yang Cheng, Zhou Jianliang, Sun Jun, et al(103)

Terrain Simulation of Lunar Landing Areas Based on the Integration of Wavelet-Based Fractal Model and Shape Models	Bu Yanlong, Tang Geshi, Wang Jia(107)
A Calibration Method Basedon Sphere-Model of a Fish-Eye Camera on Lunar Rover	Wang Baofeng, Tang Geshi(114)
Vision Aided Navigation for Deep Spacecraft Based on FAST Feature	Xiao Ming, Pan Liang, Hu Tianjiang, et al(121)
Global Image Matching Based on Feature Point Constrained Markov Random Field Model for Planetary Mapping	Peng Man, Liu Yiliang, Liu Zhaoqin, et al(128)
A Method to Estimate the Off-plane Distance Using Homography Induced Parallax for Lunar Landing	Li Lichun, Zhou Jianliang, Sun Jun, et al(134)
A New Visual Odometry Method for Planetary Rover Localization	Wan Wenhui, Di Kaichang, Liu Zhaoqin(139)

登月宇航员导航定位需求分析及技术方案探讨

邱凯昌

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要: 登月宇航员在月面的导航定位对宇航员安全、高效地完成载人登月科学和工程任务并安全回到登月舱直至返回地球具有至关重要的意义。本文系统分析了登月宇航员导航定位的需求, 提出要综合利用深空测控、轨道器、登月舱、月面信标、月球车及宇航服上的多种传感器, 构建一体化、无缝、高精度的导航定位传感器网络基础设施并开发以宇航员为中心的导航定位关键技术, 同时探讨了地月协同的宇航员导航定位服务模式。

关键词: 载人登月; 宇航员导航定位; 传感器网络

1 引言

我国的无人探月工程“嫦娥”计划分为“绕、落、回”三期, 已经圆满完成的一期工程即“嫦娥”一号绕月探测工程, 实现了对月球全球性、整体性与综合性探测并取得了一系列科学成果^[1], 正在展开的二期工程将实现月面软着陆器探测和月球车月面巡视勘察; 正在论证的探月三期工程的核心任务是无人月球表面采样返回。无人探月工程完成后, 载人登月将会是我国未来月球探测工程的主要发展目标。在载人登月工程中, 登月宇航员在月面的导航定位对宇航员安全、高效地完成载人登月科学和工程任务, 并安全回到登月舱直至重返地球具有至关重要的意义。

本文以美国“阿波罗”登月任务中典型月面工作内容为引导, 系统分析登月宇航员执行月面探测任务对导航定位的需求, 进而依据月球和行星探测导航定位技术研究及应用新进展, 提出一种基于空地一体化传感器网络基础设施的导航定位技术方案, 并探讨地月协同的宇航员导航定位服务模式。

2 登月宇航员导航定位需求分析

从美国航空航天局“阿波罗”11 任务宇航员阿姆斯特朗和奥尔德林首次登陆月球, 至“阿波罗”17 任务宇航员塞尔南和施密特最后的月面行走, 迄今为止人类 6 次 12 人成功登陆月球。表 1 简要列出了“阿波罗”计划 6 次成功登月任务的有关信息^[2, 3], 表中 EASEP 为“阿波罗”初期科学实验组件, 包含激光测距反射镜和被动式月震仪; ALSEP 为“阿波罗”月面科学实验组件, 包含中心控制站、核动力发电机、激光测距反射镜、主动或被动式月震仪、月表磁力仪、月表重力仪、太阳风光谱仪、大气成分探测仪、热流探测仪、月球环境离子探测仪等。从表中可以清晰地看出, 1969—1972 年短短 4 年间, 美国航空航天局登月探测能力逐步增强: 登月地点从平坦地区到峡谷和山区越来越具有挑战性, 月面停留和工作时间越来越长, 舱外行走次数越来越多, 月面实验设备日臻完善, 采样量越来越大。特别是从“阿波罗”15 任务开始, 宇航员驾驶四轮月球车行驶, 探测范围大大增强, 如“阿波罗”17 任务中, 宇航员驾驶距离达 35km。

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

* 本文曾在 2010 年中国工程院载人登月与深空探测工程科技论坛交流。

表1 “阿波罗”计划6次成功登月任务

	登月时间	登月地点	月面停留时间	舱外行走次数	月面实验装置	采样重量	月球车
阿波罗 11	1969 年 7 月 20 日	静海	21 时 36 分	1	EASEP	22 kg	
阿波罗 12	1969 年 11 月 19 日	风暴洋	31 时 31 分	2	ALSEP	34 kg	
阿波罗 14	1971 年 2 月 5 日	弗拉·摩洛哥地区	33 时 31 分	2	ALSEP	43 kg	
阿波罗 15	1971 年 7 月 30 日	亚平宁山哈德利峡谷	66 时 55 分	3	ALSEP	77 kg	驾驶月球车
阿波罗 16	1972 年 4 月 20 日	笛卡儿高地	71 时 2 分	3	ALSEP	96 kg	驾驶月球车
阿波罗 17	1972 年 12 月 11 日	陶拉斯·利特罗山脉	75 分	3	ALSEP	110 kg	驾驶月球车

下面通过“阿波罗”登月任务中几个典型的工作场景,分析宇航员在月面执行探测任务时对导航定位信息和技术的需求。图1为“阿波罗”11任务的宇航员奥尔德林从登月舱下到月面前的影像,由第一个登月的宇航员阿姆斯特朗拍摄。在安全着陆后,需要对登月舱/着陆点进行定位,登月舱/着陆点在全球坐标系(惯性坐标系及月固坐标系)中的位置是登月工程所必需的关键信息,其定位精度直接关系到宇航员从登月舱上升级起飞返回环月轨道与指挥舱会合的顺利程度。着陆点的位置定义为着陆区局部坐标系的原点,为了使用便利宇航员行走路线及采样位置的定位一般是在着陆区局部坐标系中进行。因此,着陆点的定位精度也直接影响到将宇航员行走路线及采样位置等转换到月固坐标系的精度。

图2为“阿波罗”12任务宇航员康拉德出登月舱后到达1967年4月着陆的无人探测器“勘探者”3号。在向“勘探者”3号出发前,需要确切地知道该目标相对于登月舱的距离与方位以及沿途地形的坡度等信息,以便在允许的时间内到达目标执行任务然后返回登月舱。宇航员在

月面布设科学实验组件时(图3),需要确定各个设备间的相互位置以及它们相对于登月舱的位置,以便使其观测的科学数据有精确的坐标。同样地,如图4和图5所示,当宇航员在月面驾驶月球车驶向感兴趣的科学目标时,需要知道目标相对于登月舱的位置、月球车相对于登月舱和目标的位置、宇航员离车后相对于目标以及月球车的位置等。同时,两个宇航员在月面工作时总是相互配合,因此也需要随时知道他们之间的相互位置,以便使他们相距很远时也能有效配合。

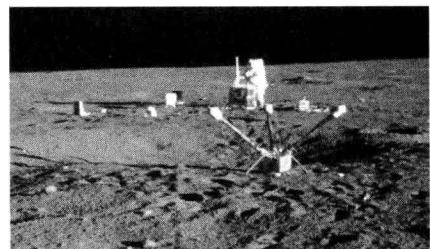


图3 “阿波罗”12任务宇航员比恩在月面实验组件的中心控制站

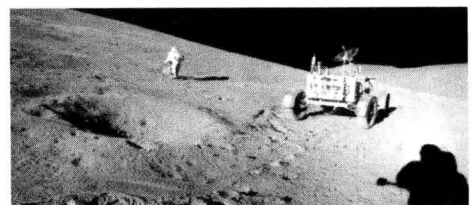


图4 “阿波罗”15任务宇航员斯科特检查一个小撞击坑附近的大石块



图5 “阿波罗”17任务宇航员斯密特在巨石前准备采样



图1 “阿波罗”11任务宇航员奥尔德林从登月舱下来

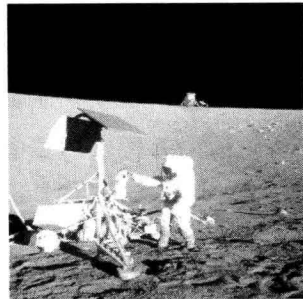


图2 “阿波罗”12任务宇航员康拉德到达先前着陆的“勘探者”3号

宇航员在月面判断距离、方位和大小比在地球上要困难得多,而“阿波罗”时代的导航定位技术相对原始落后,主要依赖着陆前的中、高分辨率轨道器影像,很大程度上制约了登月宇航员执行月面探测任务的效率和精确探测能力。图6和图7展示了一个典型的导航定位困难的例子,图6中为“阿波罗”14任务宇航员米切尔查看规划路线图的情景。根据任务规划要求他要和同伴谢泼德一起到位于登月舱东北部约1.1 km的圆锥撞击坑边沿采样,撞击坑中来自月球深部的物质将会对研究月球历史具有重要价值。然而,由于该区月表地形延绵起伏而且没有熟悉的目标作为参考点,两名宇航员最终没有找到并到达圆锥撞击坑边沿^[2]。从任务结束后通过仔细对比轨道器影像和月面拍摄影像重建的宇航员实际行走路线图(图7)可以看出,他们当时已经非常接近离撞击坑边沿,仅有20多米的距离。

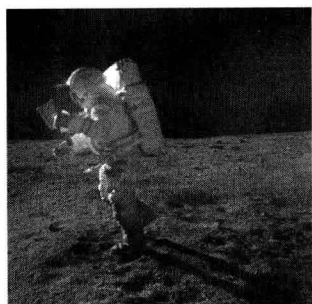


图6 “阿波罗”14任务宇航员米切尔查看规划路线图

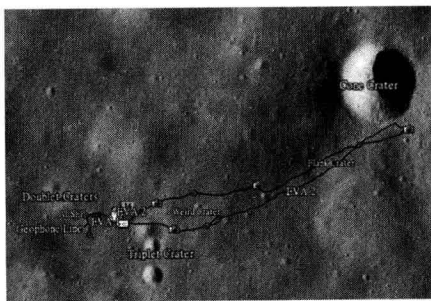


图7 “阿波罗”14任务结束后重建的宇航员行走路线图(取自 Google Moon)

宇航员在月面判断距离、方位和大小的困难有以下几个方面的原因:第一,如“阿波罗”17任务宇航员塞尔南解释的那样,在月面判断距离困难的原因是没有树木、房屋等熟悉的目标作为参照物;第

二,由于月球上没有大气,因而就没有在地球上存在的大气透视效应(目标离观察者越远,目标与背景的反差越小,目标内部反差与饱和度也会越低),对于判断远近不利;第三,耳石信号和肌肉感觉是感知行走距离的重要信息源^[4],而月球的微重力(仅有地球的1/6)环境使耳石信号和肌肉感觉发生变化,宇航员在月面感知行走距离产生困难;第四,宇航员的头盔限制了其视野,从而减弱了利用光流信息估计行走距离的能力^[5]。

对于未来载人登月任务中的宇航员导航定位,一方面相关科学技术的进步将提供比“阿波罗”登月时代更先进更完善的设备、设施和技术,另一方面新的载人登月任务也必然在科学上和工程上有更高的要求,比如在具有重大科学意义更具有挑战性的区域登陆、月面驾驶或行走探测更大的范围等,这就为宇航员的导航定位提出了新的挑战。

根据以上分析,将登月宇航员导航定位的需求简要总结如下:①着陆后需要对登月舱/着陆点定位;②宇航员在登月舱外行走和执行各种任务时需要实时导航定位,即随时知道宇航员相对于登月舱的位置以便安全返回;③对科学目标进行定位探测和采样前需要对目标和采样点进行定位;④宇航员在月面布设科学实验组件时需要组件单元定位;⑤宇航员在月面驾驶月球车时需要月球车进行实时定位;⑥多名宇航员协同作业时,需要他们之间相对定位。

3 登月宇航员导航定位技术方案探讨

借鉴美国航空航天局“勇气”号和“机遇”号火星车导航定位技术^[6],在李荣兴教授和笔者等近年对登月宇航员定位研究的基础上^[7,8],本文提出一套基于空地一体化传感器网络基础设施的导航定位技术方案,建议综合利用深空测控、轨道器、登月舱、月面信标、月球车及宇航服上的多种传感器,构建一体化、无缝、高精度的导航定位传感器网络基础设施。图8列出了该传感器网络中所涉及的传感器,以及这些传感器在宇航员导航定位中的作用。其中,轨道器传感器提供宇航员月面探测的区域性宏观信息,月面传感器、月球车和宇航服上的传感

器提供不同视角的精细局部信息,只有空地信息一体化才能使宇航员路线规划和执行任务更加安全和高效。建立起了这样一种空地一体化传感器网络基础设施并开发出相应导航定位关键技术,再经

过充分的实验验证,就能最终实现在月球表面无GPS的荒芜环境与在地球上GPS导航一样便利,在导航定位能力、精度、可靠性和速度上大大超越“阿波罗”探月时代。

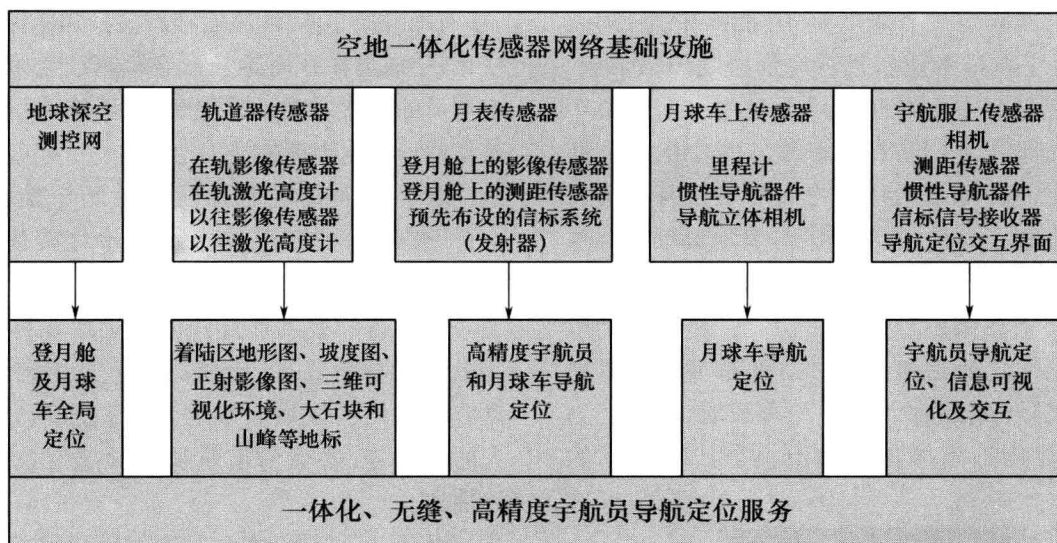


图8 空地一体化传感器网络基础设施和导航定位应用框架

宇航员的导航定位以及执行月面任务时涉及多个坐标系和时间系统,全局坐标系中的惯性坐标系(如J2000)便于深空测控轨道器位置和姿态,月固坐标系便于确定月面目标特征、登月舱、月球车和宇航员的全局位置;以登月舱为原点的着陆区局部坐标系便于月面探测任务规划,以宇航员为中心的局部坐标系便于宇航员到达具体目标执行任务。因此,要实现宇航员一体化、无缝、高精度的导航定位,除了需要开发和采用最新传的感器技术及先进的导航定位方法外,还需要建立不同时间系统、不同坐标系统间精确的转换关系。

登月舱及月球车的全局定位可以通过深空测控网用无线电测控方法获得,直接测控结果定义在惯性坐标系中,在月固坐标系中的位置可以通过坐标转换得到。通过长时间的重复观测,对登月舱的测控定位精度可以不断提高。神舟飞船系列和“嫦娥”一号任务的测控实践使我国在深空测控能力上快速发展,可以预见,到实施载人登月时,深空测控技术会发展到一个更高的水平。

利用在轨或以往的轨道器传感器数据(影像数据和激光测高数据等)可以生成着陆区地形图、坡度图、正射影像以及三维可视化环境,既为安全着陆提供地形信息支持,也为着陆后宇航员执行任务和导航定位提供工作底图。从高分辨率影像(米级和亚米级)中量测的大石块和山峰等地标可以帮助宇航员感知周围环境,从而更准确地理解规划路线。另外,登月舱在月固坐标系中的坐标还可以通过对比登月舱获取的地面影像和着陆区高分辨率轨道器影像获得;如果在着陆后又重新获取了高分辨率轨道器影像,就可以直接在影像上辨认登月舱。国内外在利用轨道器数据进行着陆区制图已有相对成熟的技术和经验,但在多源甚至多任务轨道器传感器数据的集成处理方面还需进一步研究,需要开发更加严密和高精度的方法消除多源数据间的不一致性,从而生成高精度的一致性的地形数据。

利用登月舱上的传感器(如相机、测距仪等)以及预先布设的信标发射器可以直接对宇航员进行

定位。信标系统可以采用无线电频率、微波、超声或激光,通过宇航员携带的接收器接收发射器发射的信标信号,通过三边测量或三角测量计算宇航员的位置。信标发射器在月固坐标系中的位置可以通过对比登月舱获取的包含信标发射器的地面影像和着陆区高分辨率轨道器影像得到。用信标系统对宇航员定位的优点是定位精度很高,但需首先额外布设,并且超出地面发射器覆盖范围后无法使用。

月球车上的传感器用于对月球车在着陆区局部坐标系中直接定位,目前国际上最成功的“勇气”号和“机遇”号火星车的导航定位技术值得借鉴^[6]。需要进一步研发的是如何提高月球车导航定位的速度和精度。

宇航服上传感器为宇航员在着陆区局部坐标系中的实时追踪定位提供了可能,鉴于国际和国内相关的研究较少,需要加紧研究和开发相关的导航定位关键技术。宇航员导航定位信息的可视化与信息交互界面也十分重要,建议采用最新的超薄可折叠软显示器技术,将其“缝制”在宇航服的袖子上,便于宇航员观察和交互。

从图8和上述论述中可以看出,在该传感器网络基础设施中,不同传感器的导航定位能力和应用有一定的重叠,因此可以在部分传感器出现故障时仍然保证宇航员导航定位服务的可靠性。一般地,可以采用扩展的卡尔曼滤波器模型将多平台多传感器组合起来,根据各传感器精度设定卡尔曼滤波器参数,可以获得最优的导航定位结果。

整个宇航员导航定位系统的设计应当以宇航员为中心,体现在以下几个方面:①宇航员任何时候都应该知道他相对于登月舱、月球车和同伴的位置及方向,不管他们在不在视野内;②宇航服上交互界面上显示的导航定位信息根据宇航员所执行任务的不同而不同,只显示必需的信息,而不是越多越好;③宇航服上交互界面的交互方式尽量简单,考虑到戴手套操作的不便,可用几个大按钮触控或声控。

宇航员导航定位计算和服务的实现宜采用地月协同的模式,在通信系统的支持下,复杂、大数据量以及需要专家交互的导航定位计算应当放到位于地球控制中心的高性能服务器上,进行定期更新;相对简单且完全自动的导航定位计算可在登月舱服务器中进行,实时更新;而宇航服上的客户端仅用于信息可视化与交互。

4 结束语

宇航员导航定位是载人登月任务必需的关键技术之一,本文在进行宇航员导航定位需求分析的基础上,提出了构建空地一体化传感器网络基础设施、开发以宇航员为中心的导航定位关键技术、提供地月协同的宇航员导航定位服务的一套技术方案,希望为我国载人登月论证工作以及相关研究工作提供一种思路。

致谢:文中“阿波罗”任务典型工作场景图片(图1~图6)取自美国航空航天局“阿波罗”月表日志(Apollo Lunar Surface Journal)网站。本文的一些认识和探讨也得益于本人在美国俄亥俄州立大学制图与地理信息系统实验室多年从事火星和月球探测中制图与导航定位研究的经历,在此对该实验室主任李荣兴教授表示衷心的感谢!

参考文献

- [1] 欧阳自远,李春来,邹永廖,等. 绕月探测工程的初步科学成果, 中国科学(地球科学),2010,40(3): 261-280.
- [2] Mellberg WF. Moon Missions - Mankind's first voyages to another world. Plymouth, MI: Plymouth Press, Ltd., 1997.
- [3] Jones E M, Glover K. Apollo Lunar Surface Journal [EB/OL]. (2010-06). <http://www.hq.nasa.gov/alsj/frame.html>.
- [4] Rieser JJ, PickHL, Ashmead DH, Garing AE. Calibration of human locomotion and models of perceptual motor organization. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 1995, 21: 480-497.
- [5] Creem - Regehr SH, Willemsen P, Gooch AA, Thompson WB. The influence of restricted viewing conditions on egocentric distance perception; Implications for real and virtual environments. Perception,

- 2005, 34: 191 – 204.
- [6] 邸凯昌. “勇气”号和“机遇”号火星车定位方法评述, 航天器工程, 2009, 18(5): 1 – 5.
- [7] Li R, DiK, Wu B, et al. Enhancement of Spatial Orientation Capability of Astronauts on the Lunar Surface Supported by Integrated Sensor Network and Information Technology. Proceedings of the NL-SI Lunar Science Conference, July 20 – 23, 2008, Moffett Field, CA.
- [8] Li R, He S, Skopljak B, et al. Development of a Lunar Astronaut

Spatial Orientation and Information System (LASOIS). Proceedings of the ASPRS 2010 Annual Conference, April 26 – 30, 2010, San Diego, CA.

作者简介

邸凯昌, 1967 年出生, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 行星遥感制图与探测车导航定位。

E – mail: kedi@irsa.ac.cn。

Demand Analysis and Technical Solution of Astronaut Localization on Lunar Surface

Di Kaichang

(Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: Astronaut navigation and localization on lunar surface is crucial to safe and efficient accomplishment of science and engineering tasks and coming back to the lunar module. Based on systematic demand analysis of lunar astronaut localization, this paper proposes a sensor network based methodology for integrated, seamless and high – precision localization, combining earth – based radio tracking and sensors from orbiter, lunar module, lunar surface beacons, lunar vehicle and space suit. Key techniques for astronaut – centered localization and earth – moon collaborative localization service are also discussed in this paper.

Key words: human lunar exploration; astronauts navigation and localization; sensor network

A Vision – based 3D Grasp Planning Approach for the Space Robot with a Simple Gripper

Liu Chuankai^{1,2}, Su Jian hua³, Qiao Hong³

(1. Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics Laboratory, Beijing 100094;

2. Beijing Aerospace Control Center, Beijing, 100094;

3. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: Stable grasp is a basic capacity for a space robot to implement satellite rescue, spacecraft rendezvous and docking, and other space tasks. Usually, the grasping operation of a space robot is guided by visual information of the target object. In traditional works, visual information is used to construct the full or partial 3D shape models of the object, from which the grasping positions for the placement of gripper fingertips could be determined by a complex computation. However, the uncertainties on the reconstruction of 3D models and the determination of the grasping positions could lead to an unstable grasp. In this paper, the problem of vision – based 3D grasping from one object image is investigated, and the “attractive regions” proposed in our previous works^[9] is introduced to analyze the 3D grasping process. (1) It is proven that a form closure grasp can be achieved if the state of 3D object is in an attractive region formed in the 3D grasping process. (2) Meanwhile, the initial contact regions, from which the object can be grasped to a 3D form – closure state, are computed from the contour of the object. (3) A practical grasping system with four – finger gripper is designed, and a vision – based grasp planning approach is formulated. Finally, an experiment is conducted to show the efficiency of the proposed method.

Key words: Vision – based grasp, attractive region, 3D grasp, form – closure

1. Introduction

Space robotics has been considered one of the most promising approaches for on – orbit services, such as docking, berthing, refueling, repairing, upgrading, transporting, rescuing, and orbit cleanup. For each of these tasks, the space robot must grasp the target object and then operate it according to the system command. Thus, how to grasp a 3D object stably should be paid enough attentions for successful actions of space robots during the execution of space tasks. Form-closure grasp is usually used to address the stable grasping problem and has drawn lots of attentions. Bic-

chi et al.^[1] defined form closure as the ability of a gripper to completely restrain the motions of the manipulated object, relying only on unilateral contact constraints. Markenscoff^[2] pointed out that a grasp is form-closure if the entire wrench space can be positively spanned by the primitive contact wrenches generated. Kao^[3] discussed the form – closure from the viewpoint of potential energy by replacing the gripper and object configuration with under – constrained elastic mechanism. It was shown that the grasp is in a stable configuration if and only if the potential energy attach to locally minimum at the equilibrium state.

Analysis of keeping the grasped objects in their stabilities attracted many researchers’ attentions, and