

## 我国深空探测光学敏感器技术发展与应用 (特约)

王 立, 吴奋陟\*, 梁 潇

(北京控制工程研究所, 北京 100190)

**摘 要:** 光学敏感器是深空探测航天器导航制导与控制系统的关键组成, 为航天器平台的稳定运行和有效载荷的科学探测提供指向和位置支持。文章对我国深空探测任务中研制与应用的姿态测量敏感器、自主导航光学敏感器、着陆避障光学敏感器、巡视探测光学敏感器典型产品进行了综述, 对其关键技术和发展趋势进行论述。

**关键词:** 深空探测; 光学敏感器; 典型应用; 发展趋势

中图分类号: V448 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201004

## Technical development and application of China deep space exploration optical sensor(*Invited*)

Wang Li, Wu Fenzhi\*, Liang Xiao

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Optical sensor is the key component of the navigation guidance and control system in the deep space exploration mission, and it provides direction and location for stable operation of the spacecraft and scientific detection of the payload. The typical products of attitude sensor, autonomous navigation optical sensor, landing and obstacle avoidance optical sensor, patrol detection optical sensor were reviewed, and the key technology and development tendency were discussed.

**Key words:** deep space exploration; optical sensor; typical application; development tendency

收稿日期: 2020-01-03; 修订日期: 2020-02-25

作者简介: 王立 (1977-), 男, 研究员, 主要从事深空探测光学导航及光学敏感器方面的研究。Email: bheart@263.net

通讯作者: 吴奋陟 (1986-), 女, 高级工程师, 主要从事深空探测光学导航及光学敏感器方面的研究。Email: wu.fenzhi@foxmail.com

## 0 引言

空间光学传感器是指应用于空间环境中基于光学探测原理获取航天器姿态或导航信息的传感器,如星传感器、太阳传感器、地球传感器、自主导航传感器、着陆避障传感器、交会对接光学传感器等。空间光学传感器是航天器的“眼睛”,为遥感测绘、武器跟踪、科学观测、深空探测等空间任务提供精确指向或位置信息。空间光学传感器与遥感相机、空间望远镜、对地激光高度计等光学载荷的探测机制类似,但两者在功能和作用上又有明显区别,光学载荷的目标一般是为科学探测提供有价值的物理数据,而光学传感器要为平台提供测量数据。相比载荷,光学传感器的数据直接接入控制闭环,输出要求实时性、准确性和可靠性,是航天器平台安全稳定运行的重要保障。

近几年,我国在深空探测领域发展迅速令世人瞩目,2013年“嫦娥三号”首次实现基于机器视觉的月面软着陆,2019年“嫦娥四号”首次完成月球背面软着陆,在此工程任务中“光学传感器”发挥了关键作用。按照深空探测任务场景的不同,深空探测光学传感器包括姿态测量传感器、自主导航传感器、着陆避障传感器及巡视探测传感器等。姿态测量传感器主要用于深空探测航天器巡航探测过程,以实现相对恒星等参考源的姿态测量。星传感器是常用的高精度姿态测量传感器,自20世纪50年代至今已研制出多种不同类型的星传感器产品并成功应用。典型产品如JPL研制的ASTROS星传感器、德国Jean-Optmnik公司研制的ASTRO-10星传感器等<sup>[1]</sup>。自主导航传感器用于航天器接近和绕飞探测过程,以实现目标天体捕获和相对指向与距离测量。典型产品如克莱门汀任务中基于地月图像进行自主导航的UV/Visible Camera<sup>[2]</sup>, Deep Space任务中用于自主导航与观测成像的MICAS成像仪<sup>[3]</sup>(图1(a)), MRO火星探测任务中用于自主导航的ONC相机<sup>[4]</sup>,以及小行星探测任务OSIRIS-REx中用于目标小天体捕获与跟踪的PolyCam相机和MapCam相机<sup>[5]</sup>等。着陆避障传感器用于地外天体着陆附着过程,根据不同地形特征选取安全着陆区域、实时分析探测器着陆下降的运动姿态和速度,实现障碍规避和安全、精准着陆。2004年美国火星探测巡视器MER中,降落图像运动估计系统对DIMES降落相机(图1(b))拍摄的降落序列图像

进行特征匹配与跟踪,实现降落速度的计算<sup>[6]</sup>。美国为未来火星、月球自主精确着陆与避障任务,发起了自主着陆及避障技术(ALHAT)项目(其闪光雷达见图2(a)),配置了激光高度计(Laser Altimeter)、多普勒测速仪(Doppler Velocimeter)、地形相对导航光学相机(TRN Optical Camera)、闪光雷达(Flash Lidar)等传感器,用于地形相对导航、自主障碍检测与规避、障碍相对导航,以实现无光照条件限制、任意地形条件下探测器的精准、安全着陆。巡视探测传感器用于月球、火星等地外天体巡视探测过程,为巡视器提供地形感知、障碍规避和路径规划服务,当前已完成地面验证<sup>[7]</sup>。欧洲ESA火星车和美国NASA的MER火星车、“好奇号”火星车均配备了双目视觉系统<sup>[8-9]</sup>(MER火星车避障相机见图2(b)),用视差原理获取测距信息,用于地外天体表面地图构建、巡视器路径规划和自主避障。

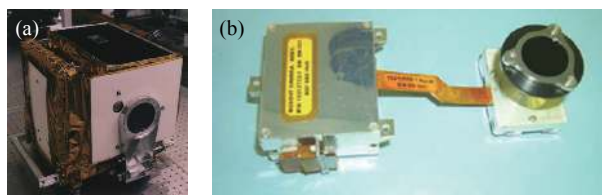


图1 (a)MICAS 成像仪<sup>[3]</sup>; (b)DIMES 降落相机<sup>[6]</sup>

Fig.1 (a) Miniature integrated camera spectrometer; (b) DIMES descent camera

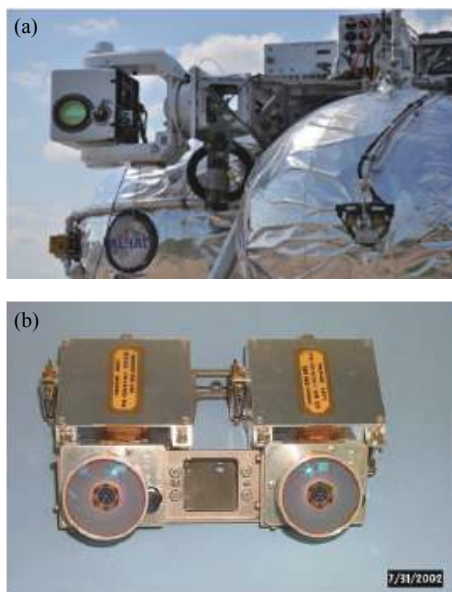


图2 (a)ALHAT 项目闪光雷达<sup>[7]</sup>; (b)MER 火星车避障相机<sup>[8]</sup>

Fig.2 (a) Flash lidar of ALHAT system; (b) Hazard avoidance cameras of MER

## 1 我国深空探测任务中的典型产品

我国深空探测以月球探测工程为突破,先后实现绕月探测、月面软着陆和表面巡视探测;月面采样返回的“嫦娥五号”探测器及火星着陆与巡视探测器也计划于 2020 年发射。深空探测光学传感器作为深空探测航天器导航制导与控制系统的核心测量单元,将为圆满完成探测任务承担重要作用。

### 1.1 姿态测量传感器

星传感器是最常用的姿态测量传感器,通过观测和识别视场内的多颗恒星获取光轴在惯性系的指向,用于航天器惯性姿态确定。随着我国深空探测任务的不断推进,对星传感器探测能力的要求也越来越高。表 1 和图 3 分别是探月工程“嫦娥”系列卫星配置的星传感器产品及其实物图。

表 1 探月工程“嫦娥”系列卫星星传感器产品

Tab.1 Star sensors in "Chang'e" series satellites of lunar exploration project

Product name	"Chang'e-1/-2" medium accuracy star sensor	"Chang'e-3/-4" APS star sensor	"Chang'e-5" high accuracy & long-period star sensor
Launch time	2007	2013	2020(plan)
Fov/(°)	10×10	20×20	20×20
Accuracy(3σ)/(″)	9	3	3
Limiting magnitude/Mv	+5.5	+5.5	+5.5
Dynamic performance/(°)·s <sup>-1</sup>	0.4	0.6	3
Update rate/Hz	4	10	10
Weight/kg	5.2	Head2.5	2.4
Power/W	<12	<11	<12

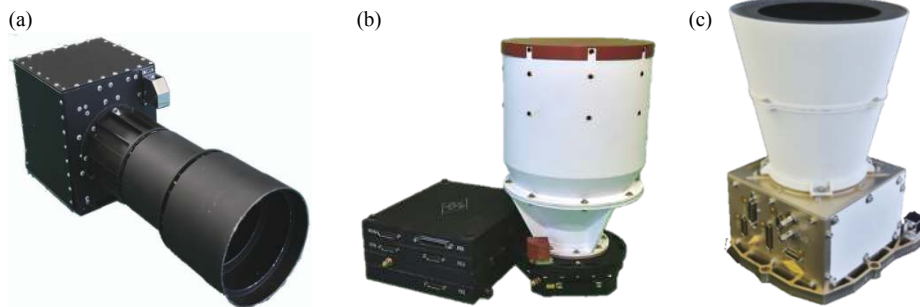


图 3 (a)“嫦娥一/二号”中等精度星传感器; (b)“嫦娥三/四号”APS 星传感器; (c)“嫦娥五号”小型长寿命星传感器

Fig.3 (a) "Chang'e-1/-2" medium accuracy star sensor; (b) "Chang'e-3/-4" APS star sensor; (c) "Chang'e-5" high accuracy & long-period star sensor

深空探测星传感器的光轴指向精度及动态性能等指标均有大幅提升。探测器技术、深度制冷技术、高速星图处理硬件化技术、噪声自适应修正技术、在轨标定等技术的发展也带动了小型化、高精度、高动态等不同系列星传感器的发展进步。

### 1.2 自主导航光学传感器

深空探测自主导航光学传感器,可以通过对行星、小天体、X 射线脉冲星等参考目标进行成像,以实现相对定向和自主导航,能够代替地面测控系统用于探测器星际飞行自主导航与目标接近引导。针对不同深空探测任务的具体需要,我国发展了紫外月球传感器、脉冲星导航传感器等一系列可用于深空探测的自主导航光学传感器。

#### 1.2.1 紫外月球传感器

利用紫外月球传感器进行航天器姿态确定是我

国探月工程的首创。紫外月球传感器在“嫦娥一号”、“嫦娥二号”探测器环月过程中对月球表面成像,通过对月球边缘信息进行提取和处理,确定月心矢量。为实现 200 km 绕月轨道对月球圆盘大范围成像,紫外月球传感器设计分段式反射成像系统,通过 8 棱镜外反射面实现 8 个月球圆盘边缘子视场的复合<sup>[10]</sup>。对获取的月球影像,采用快速边缘提取算法、晨昏线鉴别算法、月心矢量拟合算法等,实现月心矢量的计算以及探测器的姿态定向。“嫦娥一号”环月飞行期间,紫外月球传感器成功实现月球捕获,姿态精度优于 0.07°,“嫦娥二号”奔月期和环月期间均开展了自主导航离线验证。图 4 是“嫦娥一号/二号”探测器紫外月球传感器实物图及其在轨图像。

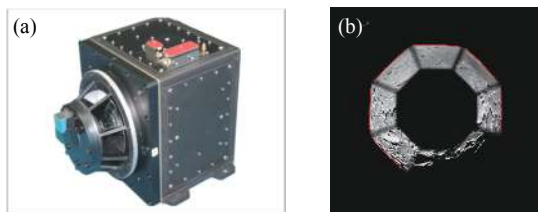


图 4 (a)“嫦娥一号/二号”探测器紫外月球传感器实物图; (b) 在轨图像  
Fig.4 (a) Physical map of "Chang'e-1/2" ultra-violet lunar sensor; (b) Image on orbit

### 1.2.2 脉冲星导航传感器

脉冲星导航是以脉冲星辐射的 X 射线光子作为天然信标,通过探测多颗脉冲星的光子信号到达太阳系质心的时间和到达航天器的时间差,从而确定航天器在太阳系质心坐标系下的位置、速度、时间和姿态等导航参数。我国在脉冲星导航方面虽然起步晚,但已成功发射脉冲星试验卫星,并首次捕获蟹状星云<sup>[11]</sup>。表 2 和图 5 分别是 X 射线脉冲星导航传感器的主要技术指标及实物图,2016 年成功在轨飞行验证,为后继的深空探测自主导航提供了一条重要技术实现途径。

表 2 X 射线脉冲星导航传感器主要技术指标

Tab.2 Main specifications of X-ray pulsar navigation sensor

Specifications	Value
Energy range/keV	0.5-10
Effective area/cm <sup>2</sup>	30.1
Time resolution/ $\mu$ s	1
Energy resolution	169 eV@5.9 keV
Fov/(°)	15

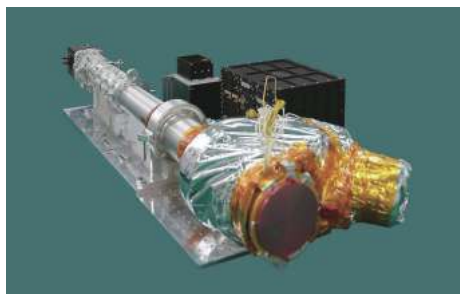


图 5 X 射线脉冲星导航传感器实物图

Fig.5 Physical map of X-ray pulsar navigation sensor

### 1.3 着陆避障光学传感器

我国“嫦娥三号”探测器于 2013 年 12 月 14 日成

功实现月面软着陆,成为世界上第三个掌握月面软着陆技术的国家。2019 年 1 月 3 日,“嫦娥四号”探测器成功着陆在月球背面,成为世界上首个在月球背面实现软着陆的探测器。“嫦娥三号”和“嫦娥四号”着陆探测器在下降过程中创造性地实现了接力避障策略,首先在远距离依靠着陆光学成像传感器进行粗障碍检测与规避,由着陆光学成像传感器对预选着陆区地形进行大动态范围成像,利用快速鲁棒图像分割算法、区域安全度评估算法,避开大型撞击坑在成像区域内选择安全着陆区域。悬停段开始,激光三维成像传感器对正下方着陆区进行精细化高程成像,通过区域地形坡度拟合判断障碍高差,避开小撞击坑和石块选择最平坦着陆区域实现安全软着陆。图 6 为“嫦娥三号/四号”着陆光学成像传感器和激光三维成像传感器。

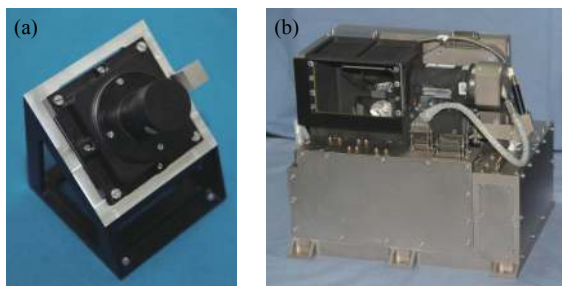


图 6 (a)“嫦娥三号/四号”着陆光学成像传感器; (b)“嫦娥三号/四号”激光三维成像传感器

Fig.6 (a) "Chang'e-3/4" landing optical obstacle avoidance sensor; (b) "Chang'e-3/4" laser 3D imaging sensor

在我国首次火星探测任务中,探测器着陆下降段的视觉测量采用长基线双目视觉系统与激光雷达组合方案。关键产品多功能避障传感器已先后完成直升机挂飞避障试验、塔架悬停试验,对各类模拟地形能够有效识别障碍,准确定位安全着陆区。

### 1.4 巡视探测光学传感器

“嫦娥三号”和“嫦娥四号”巡视器视觉导航系统配置了一对导航相机和一对避障相机。导航相机安装于巡视器桅杆,可获得月面巡视器四周大范围地形信息,从而为巡视器全局路径规划服务。避障相机位于巡视器车体围栏下方,可获得月面巡视器前方地形信息,为月面巡视器局部障碍识别和规避服务。避障相机与激光点阵器协同工作还可以实现紧急避障。图 7 是“嫦娥三号/四号”避障相机实物图及其在轨图像。



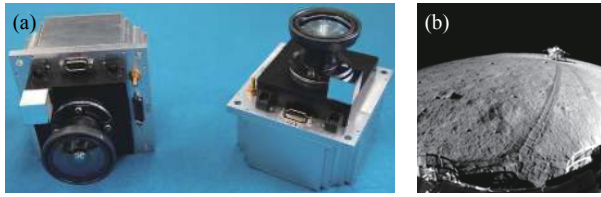


图 7 (a)“嫦娥三号/四号”巡视器避障相机实物图; (b) 在轨图像  
Fig.7 (a) Hazard avoidance camera of "Chang'e-3/-4" rover; (b) Image on orbit

在我国首次火星探测任务中,火星车同样配置了

导航相机和避障相机用于路径规划和障碍规避。导航相机除了用于全局路径规划外,还将承担科学探测任务,用于对火星表面地形进行立体彩色成像和地形地貌探测,是我国深空探测任务中首个将有效载荷和导航敏感器进行一体化设计的单机产品。表 3 是我国月球和火星探测任务导航相机与国外同类产品技术指标对比情况<sup>[8]</sup>。可以看到,我国研制的巡视器导航相机产品在视场、角分辨率、成像范围、功耗、三维恢复精度等方面均与其水平相当。

表 3 国内外月球火星巡视探测导航相机产品

Tab.3 Navigation cameras for Luna and Mars rover at home and abroad

Product name	NASA MER PanCam	NASA MER NavCam	China's Lunar Rover NavCam	China's Mars Rover NavCam
Fov/(°)	16×16	45×45	46×46	46.5×46.5
Spectrum range/nm	400-1 000(8 optical filters)	600-800	600-700	400-700
Focal length/mm	43	14.67	17.6	13.1
Entrance pupil diameter/mm	2.18	1.25	1.6	1.31
IFOV/mrad/pixel	0.28	0.82	0.8	0.4

## 2 关键技术和发展趋势

通过以上综述,深空探测光学传感器的发展进步依赖以下关键技术:

(1) 图像处理与识别算法。图像处理与识别是深空探测光学传感器感知空间环境、准确提供导航数据的前提。低信噪比下的目标识别与参数估计、特征提取与地形匹配导航、基于视觉 SLAM 和深度学习的巡视定位等都是深空探测光学传感器未来发展和性能提升的关键。

(2) 高性能图像处理平台。深空探测光学传感器实现自主化、智能化依赖高性能图像处理平台的计算能力,尤其对于我国未来小行星探测任务、木星及行星际穿越任务,高可靠、高性能的计算能力更为重要。

(3) 地面验证技术。深空探测属高价值空间探测任务,在地面利用大型试验系统按照实际任务模式对深空探测光学传感器的综合性能和关键指标进行系统性验证,能够有效考核传感器的设计和实现情况,降低任务风险,是任务成功的重要保证。

(4) 在轨标定技术。深空探测任务期周期长、空间环境复杂,光学传感器的光机结构和辐射特性不可避免会发生变化,因此,在轨标定技术对于深空探测

光学敏感器保持良好的在轨性能尤为重要。

随着我国月球与火星探测、小行星探测、木星探测任务的不断推进,未来深空探测光学传感器发展趋势如下:

(1) 导航敏感器与科学载荷一体化设计。敏感器兼具导航和科学探测能力,能够有效降低深空探测航天器的运载压力和任务成本,提高敏感器探测能力和科学产出。美国 OSIRIS-REx 小行星探测任务,科学 OCAMS 相机套件中的 PolyCam、MapCam 和 SamCam 既承担遥感制图和光谱观测等科学任务,同时还要完成星图导航、目标光学捕获、路标导航等导航任务。

(2) 自主智能化。深空探测光学敏感器不再完全依赖地面遥操作,能够自主决策和在线故障诊断与恢复,完成诸如在线制图与路标导航、巡视器自主导航与定位等在轨操作,降低深空网数传压力、应对探测目标和任务的不确定性。以深度学习为代表的智能化算法,能够有效提高深空探测光学传感器的环境感知能力,提升探测任务对不确定环境和探测目标的适应性,在深空探测资源受限的条件下提升任务自主规划能力。

(3) 轻小型。在保持和提高测量精度等性能指标的前提下,选用新型材料和一体化设计思想,降低光

学传感器尺寸和重量。

(4) 长寿命、高可靠。深空探测风险大、周期长、成本高,任务顶层设计趋向于多目标探测,我国小行星探测任务已明确提出“一次任务完成近地小行星伴飞、附着、取样返回和主带彗星探测”,这就要求深空探测光学传感器具有 15 年以上寿命,能够在任务周期内可靠稳定工作。

(5) 多体制数据融合。例如光学相机和激光雷达是深空探测中最常用的两种光学传感器。光学相机影像具有分辨率高、光谱信息丰富等特点,而激光雷达能够提供高精度的深度数据;将不同类型光学传感器的探测数据相互融合,能够丰富探测数据,保证深空探测导航信息的可靠性。

### 3 结 论

经过 20 多年的发展,我国深空探测光学传感器种类丰富、技术指标不断提升,保证了我国深空探测任务的推进与发展。文中根据深空探测任务场景的不同,分别对我国深空探测任务中应用的姿态测量传感器、自主导航光学传感器、着陆避障光学传感器、巡视探测光学传感器典型产品进行了综述,对其关键技术和发展趋势进行论述。

#### 参考文献:

- [1] Lu Xin, Li Chunyan, Li Xiao, et al. Current situation and development trends of starlight navigation technology [J]. *Aerospace Control and Application*, 2017, 43(4): 1-8.
- [2] Kordas Joseph F, Lewis Isabella T, Priest Robert E, et al. UV/Visible camera for the clementine mission[C]//SPIE's 1995 Symposium on OE/Aerospace Sensing and Dual use Photonics, 1995, 2478: 175-186.
- [3] Soderblom Larry, Beauchamp Pat, G S Chen, et al. Miniature Integrated Camera Spectrometer (MICAS) [C]//Technology Validation Symposium, 2000.
- [4] James Graf, Richard Zurek, Ross Jones, et al. An overview of the Mars reconnaissance orbiter mission[C]//Aerospace Conference Proceedings, IEEE, 2002,1:1-180.
- [5] Rizk B, Drouet d'Aubigny C, Golish D, et al. OCAMS: The OSIRIS-REx camera suite [J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(1): 1-55.
- [6] Yang Cheng, Andrew Johnson, Larry Matthies. MER-DIMES: A planetary landing application of computer vision[C]// Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005,1: 806-813.
- [7] Tye Brady, Erik Bailey, Timothy Crain, et al. ALHAT system validation[C]// 8th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems, 2011: 1-10.
- [8] Allan Eisenman, Carl Christian Liebe, Maimone Mark W, et al. Mars exploration rover engineering cameras[C]//Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites V, SPIE, 2001, 4540: 288-297.
- [9] Maki J, Thiessen D, Pourangi A, et al. The Mars science laboratory engineering cameras [J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170(1-4): 77-93.
- [10] Hao Yuncai, Wang Li. Several critical problems about ultra-violet lunar sensor for lunar exploration mission [J]. *Aerospace Control*, 2005, 23(1): 87-91.
- [11] Li Liansheng, Mei Zhiwu, Lv Zhengxin, et al. Overview of the development of X-ray pulsar navigation detection technology [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(5): 1-9.