



Robot for Planetary Exploration

北京航空航天大学机器人研究所 丁希仑 徐 坤



丁希仑

工学博士,北京航空航天大学机器人研究所教授、博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者。国际机构与机器人科学联合会(IF TOMM)机器人学和机械电子技术委员会委员、中国宇航学会机器人专业委员会委员、中国自动化学会机器人竞赛工作委员会委员、中国自动化学会智能自动化专业委员会委员,2006-2009 英国伦敦大学国王学院机械工程系客座访问教授。

星球探测机器人要能保证探测的范围足够广,对复杂的外形环境要有很好的适应性和通过性,具有稳定高速高效的行驶能力,并有一定的避障能力、爬坡越障能力和耐磨损能力等。

在现有的技术条件下,人类要实现长时间的载人太空航行,还是一件比较困难的事情。如果用机器人来代替人类,实现长时间的太空旅行并登陆其他星球,进行环境探测,并将所得数据传回地球,深入研究各天体的地质特性和所处的空间环境,探索行星系统的形成和演化历史,以寻求解决太阳系起源和生命起源的最基本问题,是一件十分可行的事情。因此,在过去的几十年里,世界上许多国家相继开展了星球探测计划。我

国也于2007年10月成功发射了“嫦娥一号”探月卫星,并于2010年10月又成功发射了“嫦娥二号”探月卫星,而且包括着陆器和探测车的登月探测器——“嫦娥三号”探月卫星——也将于今年年底发射,逐渐实现在月球的着陆与返回,并进一步开展登陆火星等太空探测任务^[1-2]。

在进行月球等星球探测的初级阶段,机器人可以代替人类考察宇航员未来的登陆地点、科学家感兴趣的区域,以及放置仪器、采集样本和传

送视频图像等。在后期的基地建设和维护的各个阶段中,机器人也是必不可少的工具和手段,可以使宇航员的工作更加安全、经济。星球探测机器人要能保证探测的范围足够广,对复杂的外形环境要有很好的适应性和通过性,具有稳定高速高效的行驶能力,并有一定的避障能力、爬坡越障能力和耐磨损能力等。因此,星球探测机器人应该具有与之相适应的结构^[3-4]。

星球探测机器人的研究涉及多种学科技术,其研究内容包括结构、传感、控制等多个方面,本文仅简述一下星球探测机器人的移动系统发展现状和着陆方式以及未来发展趋势。

星球探测机器人研究现状

1 国外研究现状

美国和前苏联可谓是星球探测机器人研究的先驱国。美国和前苏联在20世纪60年代末期开始了月球表面的探测任务,70年代,美国宇航员乘坐“Apollo”号登月飞船成功的完成了对月球的探测任务^[5],前苏联的“Lunokhod”探测车也成功的登上月球,完成探测任务。然而美国“Apollo”计划所使用的月球车(Lunar Roving Vehicle),如图1所示,为有人驾驶的月球车,没有实现自主控制,并不是完全意义上的探月机器人。现在美国已经进行一系列的对火星的探测任务,研制了如“Rocky”系列、“索杰纳(Sojourner)”、“勇气”号、“机遇”号和“好奇”号等探测机器人^[6-7]。还有日本、欧空局等国家或组织都根据自己的探测计划,纷纷投入巨资,研制各种星球探测机器人。这些探测机器人都有一定的变形能力,在着陆后会根据地形环境自动从闭合状态自动展开至工作状态。

星球探测机器人的行驶机构大致分为轮式、腿式和履带式3种。其中,履带式行驶机构容易被星球表面

土壤磨损,所以很少应用。因此,目前研究的探测机器人还是以轮式和腿式这两种机构为主。轮式行驶机构的星球探测机器人比较常见,如美国国家航空航天管理局(NASA)研制的火星车“索杰纳(Sojourner)”(图2)、“勇气”号(图3)、“机遇”号和“好奇”号(图4),都是六轮行驶机构。美国喷气实验室的“Nanorover”微型火星车(图5)是一种奇特的轮式移动机构,能够底盘朝上时自动翻转,

自动矫正。前苏联登月的“Lunokhod”月球车是8轮行驶机构。由美国卡内基-梅隆大学(CMU)机器人研究所野外机器人中心研制的“流浪者(Nomad)”(图6)类似于一种行星车。日本研究的“Tri-Star”系列月球漫游车为三轮行驶机构。

轮式探测车具有机械结构简单、运动速度快和控制容易的优点,但对复杂未知非结构环境(如:尘土较厚的软土质或岩石错综密集的星球

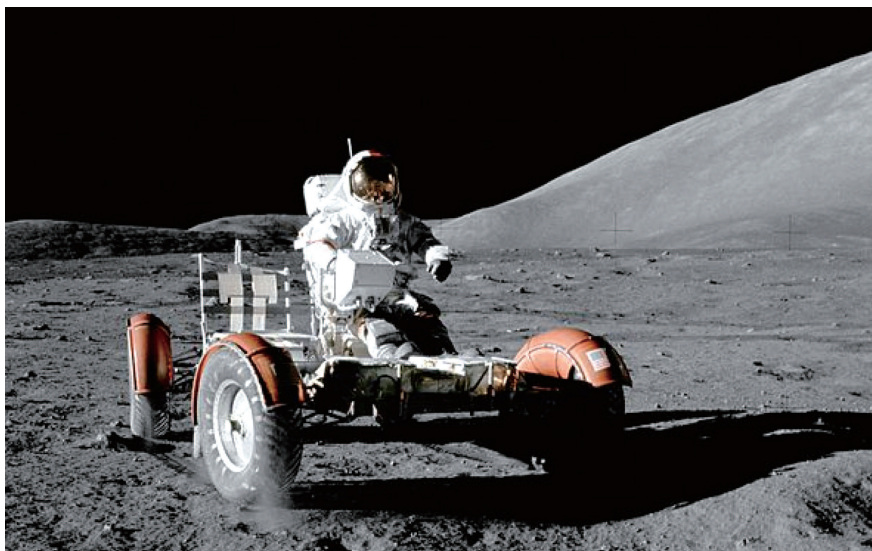


图1 美国Apollo计划月球车

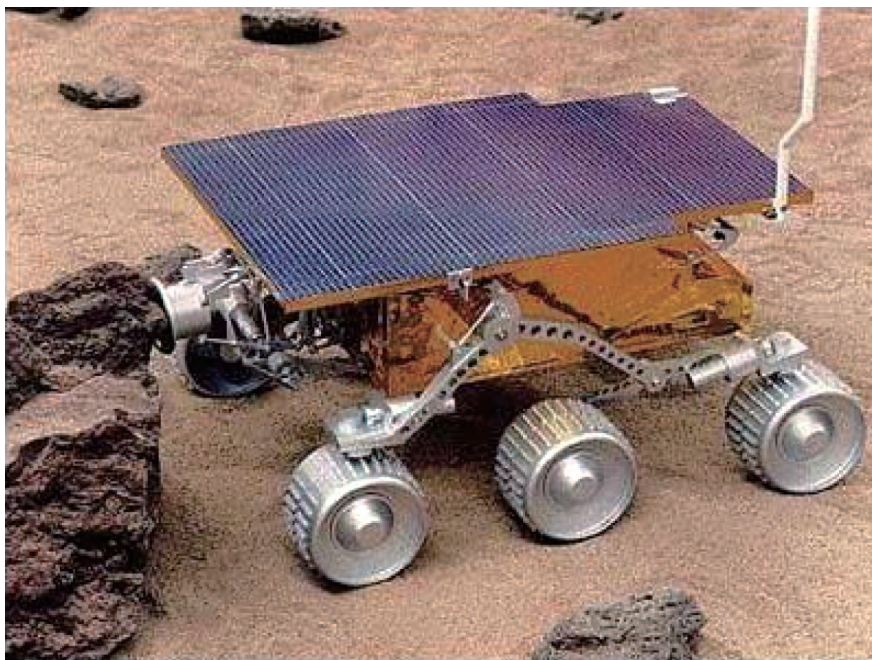


图2 火星车“Sojourner”

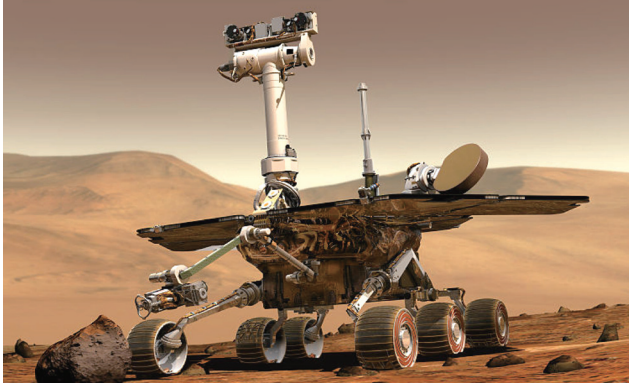


图3 勇气号

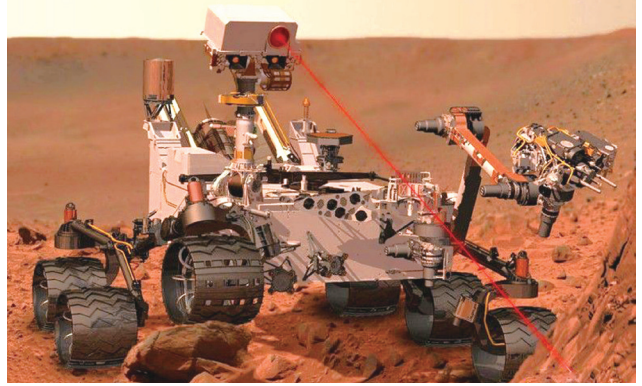


图4 好奇号

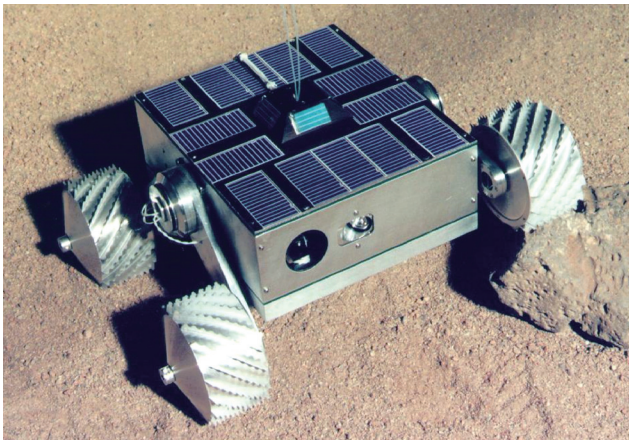


图5 Nanorover



图6 Nomad

表面)的适应能力差,不能完成对复杂环境的探测任务。

有一部分探测机器人采用腿式步行机构。腿式步行机构具有很强的地貌适应性,非常适合在凹凸交错复杂的岩石表面或土质松软的表面环境运动,机动性能较好。美国的喷气动力实验室(JPL)研制“LEMUR”六足步行机器人,能够进行灵巧的小规模的装配,对大型空间设备进行监测和维护。“Spider-bot”微型机器人(图7)只有手掌大小,具有6条腿,以3足步态爬行,用于绘制星球地图,可以在国际空间站上进行维护工作,或者在地面上进行危险区域的探测。卡内基-梅隆大学研制的六足火星漫游车“Ambler”(图8)的腿由一个在水平面内运动的旋转杆件和一个在垂直平面内作直线运动的伸展杆件组成,旋转杆件和伸展杆件正交,伸展杆独立调节并采用被动脚,

使机器人始终保持水平的状态^[8]。东京大学的“Titan”系列机器人为四足结构,其腿部机构具有2个自由度的连线机构和一个旋转自由度^[9]。德国研究的“BISAM”四足步行机器人(图9)的身体具有5个活动自由度,可以旋转肩部和臀部,能够以类似于哺乳动物的行走方式爬行^[10]。西班牙研究的“SILO4”和“SILO6”步行机器人(图10)的腿具有3个旋转自由度,足由一个被动全方位关节构成^[11-12]。

为了充分利用轮式机构和腿式机构的优点,实现二者的优势互补,出现了轮腿式混合结构探测机器人的设计思想。该类型的探测机器人能够保障一定的越障、避障等能力,对复杂星球表面环境具有较强的适应性,同时还具有稳定高速行驶的能力,相应的活动范围也较大。以JPL为首,包括NASA、斯坦

福大学、波音公司在内的科研单位研制的一种新型的六轮腿机器人——ATHLETE(All-Terrain Hex-Legged Extra-Terrestrial Explorer)^[13-15],是这类探测机器人的典型代表。它能够用轮子在起伏不平的地面上行驶,也能在非常粗糙或陡峭地形里用腿行走(图11)。

2 国内研究现状

随着我国综合国力的增强和空间探测计划的开展,国内已经有一批高校和科研院所进行探测机器人方面的先期方案设计和研制,但主要针对月球探测。

由航天集团和几所高校联合开发的“月球车”在2006年的珠海航展上亮相(图12)。同时,上海航天局联合国内数十家科研机构共同研制了自己的“月球车”。除此之外,国内各大高校都着手研制自己的星球机器人。如,哈尔滨工业大学、上

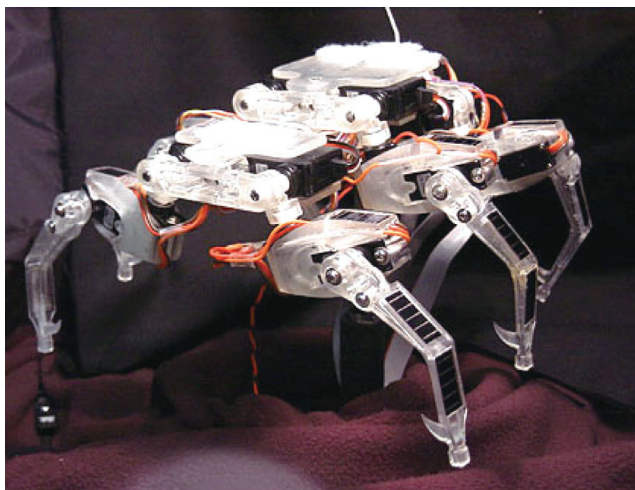


图7 Spider-bot

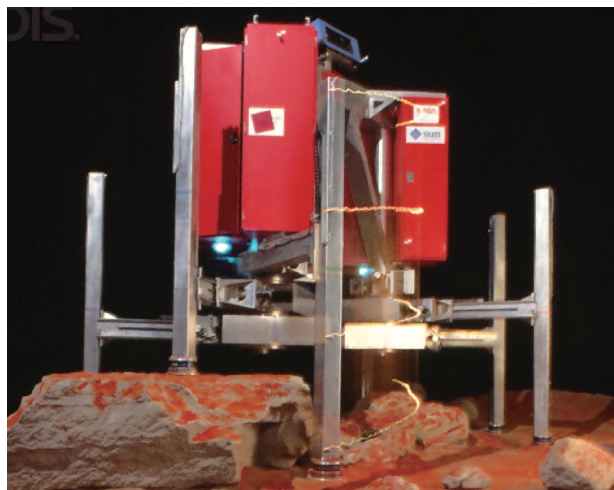


图8 Ambler

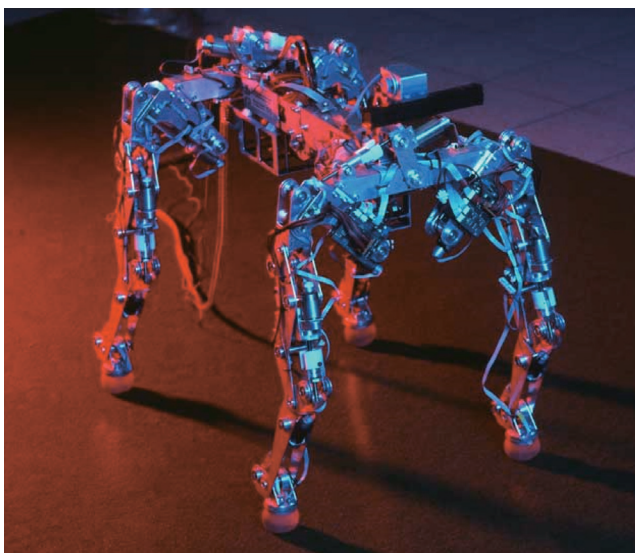


图9 BISAM

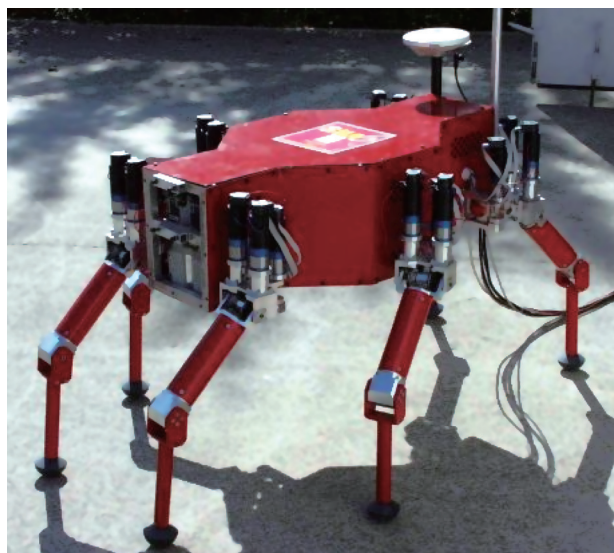


图10 SILO6

上海交通大学等高校都研制了自己的“月球车”。而北京航空航天大学独辟蹊径,将轮腿融合在一起,设计开发了六足轮腿结构的星球探测机器人,如图13所示。

由于我国星球探测机器人的研究起步较晚,整体来说,星球探测机器人的技术水平和欧美日的差距还很远,有待奋起直追。

星球探测机器人的着陆方式

星球探测机器人要经过发射、轨道转移、绕星飞行这一漫长的过程,安全地降落在目的星球上才能开展

相应的探测任务,完成自己的探测使命。着陆成功与否,关系到整个探测任务能否成功。探测机器人能不能安全降落,其着陆方式至关重要。

航天器着陆方式分为“硬着陆”和“软着陆”两种。顾名思义,“硬着陆”是指航天器未经专门减速装置的减速,而以较大速度直接冲撞着陆的方式称作硬着陆。由于着陆速度过大,航天器将完全或大部损坏,因此航天器硬着陆就是毁灭性的着陆。“软着陆”是指航天器经专门减速装置减速后,以一定的速度安全着陆的着陆方式。星球探测机器人在着陆过程中必须保证自身及携带设备的

安全,以保证着陆后开展探测任务。因此,星球探测机器人不可能采用“硬着陆”方式,而必须采用“软着陆”的方式。

为了将星球探测机器人安全送上外星,目前采用过的软着陆策略有“反推火箭+脚架”式、“反推火箭+缓冲气囊”式以及“反推火箭+空中吊车”式三种。在有大气层的外星(如火星),可以利用降落伞进行前期减速,以降低降落速度;而在没有大气层的外星(如月球),只能利用反推火箭的反推力来降低着陆速度。

“反推火箭+脚架”方式是外星着陆的传统方式,优点是定位准,

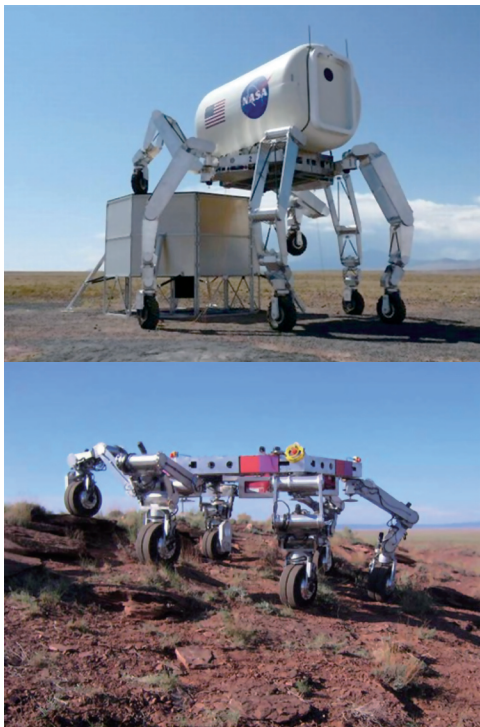


图11 ATHLETE探测机器人

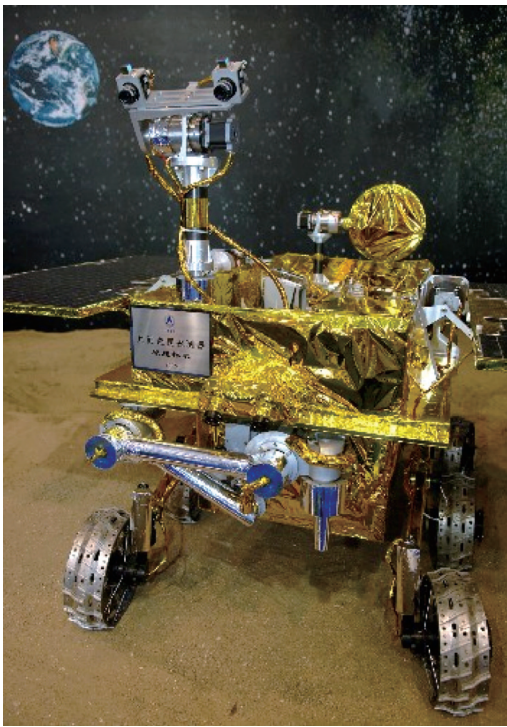


图12 中国航天集团月球车

缺点是反推发动机附着在探测器表面无法移除,落地时扬尘也比较严重。历史上苏联的两架月球探测车Lunokhod 1和2就使用了这样的着陆策略:车体在上,脚架式着陆架在下,以“反推火箭+脚架”方式着陆,着陆后月球车从斜坡驶离着陆架进行探测。2008年美国发射的“凤凰号”火星探测器也采用了这种着陆方式,如图14所示。

“反推火箭+缓冲气囊”方式就是针对“反推火箭+脚架”方式的问

题做出的改进:将反推火箭放置在降落伞和探测机器人中段,探测机器人用气囊保护,降落时先放出气囊,然后火箭点火控制下降速度,着陆后气囊缓冲反弹以保护装置。这种方式显然无法做到精确定位,气囊弹跳的停止距离一般在一千米左右。此外,气囊本身也比较脆弱,无法为过大过重的探测机器人提供保护,如果气囊意外破裂的话也很可能造成探测机器人的损毁,而且,在没有大气层的星球(如月球)也不能采用。美

国的火星探测车“机遇”号和“勇气”号就采用这种方式着陆火星,如图15所示。

美国的“好奇”号采用了反推火箭在上,车体在下的“反推火箭+空中吊车”模式,如图16所示。这种方式同样是将火箭与车体分开,而又能实现精确着陆,避免了前两种着陆方式的弱点,但是过程较为复杂。

星球探测机器人的发展趋势

星球探测机器人的移动方式开始从单一的移动机构向复合式移动机构方向过渡,本体从简单的折叠机构向更强变形能力的机构发展。星球探测机器人能够根据外星环境状况,选取合适的移动方式,并改变自身构型,通过探测区域,高效地完成探测任务。因此,具有复合移动方式和具有一定变形能力的星球探测机器人将是未来研究的一个重要方向。

未来将出现载人星球探测机器人,其将具有自动驾驶和人工驾驶两种模式,不仅能像美国的“Apollo”计划的月球车那样人工驾驶,还能像其

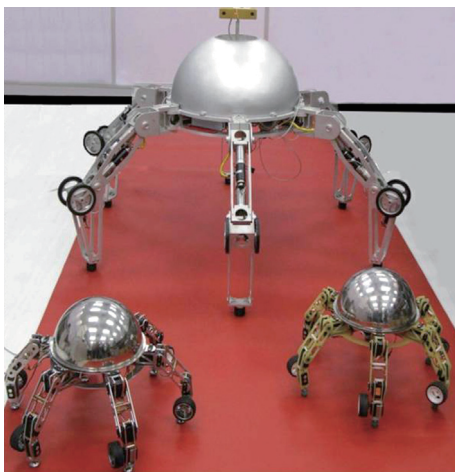


图13 北航六足轮腿结构星球探测机器人



图14 “反推火箭+脚架”着陆

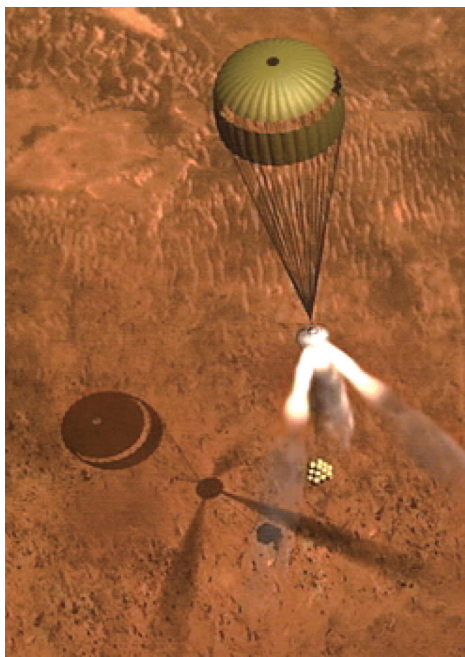


图15 “反推火箭+缓冲气囊”着陆



图16 “反推火箭+空中吊车”着陆

他无人探测机器人那样自主驾驶。宇航员登陆其他星球后的活动范围有限,而载人星球探测机器人是扩大宇航员活动范围、减小宇航员体力消耗的有效探测工具。载人星球机器人可以作为一个大载重多用途的工具来协助人类进行星球探测,帮助宇航员从着陆器上卸下仪器装备并进行长距离的运输,随时存放宇航员采集的岩石和土壤样本。在建立外星基地后,载人星球探测机器人可以帮助宇航员完成长距离的物资搬运工作。

星球探测机器人的智能化程度将会越来越高,导航定位以及地图构建的能力将越来越精确,其自身携带的仪器设备的功能也越来越强,能源的使用效率也将越来越高,探测能力也将越来越优秀。

同时,星球探测机器人根据任务不同,会出现专用、通用的星球探测机器人组成一个机器人群体。这种在综合集成基础上的机器人群体能力的增强并不是单个机器人能力的简单迭加,而具有突现特性,一定程度上呈现指数倍增趋势,在外星探测与开发中会具有突出优势。

结论与展望

经过多年的研究,国内外在星球探测机器人领域取得了大量的成果。但是,陷入软土壤中或倾翻后能自动恢复正常行驶能力的星球探测机器人还有待进一步研究与开发,同时外星能源、智能导航等一系列问题有待科研工作者的进一步研究。国内在星球探测机器人方面的研究刚刚起步,有待于奋起直追。相信很快我国的“月球车”将登陆月球表面进行探测,不久的将来,我国的火星探测机器人也会登陆火星。

参考文献

- [1] 殷礼明. 中国深空探测器技术的发与展望. 中国航天, 2003(2): 39-43.
- [2] 吴伟仁, 刘晓川. 国外深空探测的发展研究. 中国航天, 2004(1): 26-30.
- [3] 胡明, 邓宗全, 高海波, 等. 摇臂—转向架式月球探测车越障通过性分析. 上海交通大学学报, 2005(6): 928-932.
- [4] 丁希仑, 石旭尧, 王志英, 等. “月球探测(车)机器人技术的发展与展望”. 机器人技术与应用, 2008(3): 5-9.
- [5] Connors M M, Eppler D B, Morrow D

G. Interviews with the apollo lunar surface astronauts in support of planning for EVA systems design. NASA-TM-108846, September 1, 1994.

[6] Maimone M, Johnson A, Cheng Y, et al. Autonomous navigation results from the Mars exploration rover (MER) mission, Proc. 9th Int. Symp. Experimental Robot. (ISER). Singapore, 2004.

[7] Maimone M, Cheng Y, Matthies L. Two years of visual odometry on the Mars exploration rovers, Field Robot J. 2007, 24(3): 169-186.

[8] Bares J, Hebert M. Ambler an autonomous rover for planetary exploration. IEEE Computer. 1998, 22(6): 18-26.

[9] Arikawa K, Hirose S. Development of quadruped walking robot TITAN-VIII, In: Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems'96, 4-8 Nov. 1996, 1: 208-214.

[10] Berns K, Ilg W, Deck M. The mammalian-like quadrupedal walking machine BISAM, In: 5th International Workshop on Advanced Motion Control 1998, AMC '98-Coimbra, 29 June-1 July 1998: 429-433.

[11] De Santos P G, Galvez J A, Estremera J, et al. SIL04: a true walking robot for the comparative study of walking machine techniques, Robotics & Automation Magazine, IEEE, Dec. 2003, 10(4): 23-32.

[12] Estremera J, Cobano J A, Gonzalez de S P. Continuous free-crab gaits for hexapod robots on a natural terrain with forbidden zones: An application to humanitarian demining, Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58(5): 700-711.

[13] Wilcox B. Athlete: A mobility and manipulation system for the moon. Aerospace Conference, 2007 IEEE. March 2007: 1-10.

[14] Wilcox B, Athlete: An option for mobile lunar landers. Aerospace Conference, 2008 IEEE, March 2008: 1-8.

[15] Heverly M. Development of the Tri-ATHLETE Lunar Vehicle Prototype. 2010.

(责编 日午)