空间机器人的研究与仿壁虎机器人关键技术

戴振东^{①*}, 彭福军^②

① 南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 南京 210016;

② 上海宇航系统工程研究所, 上海 201108

* 联系人, E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

2015-05-26 收稿, 2015-06-26 接受, 2015-08-03 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(51435008)资助

摘要 简要回顾了国内外空间机器人的应用需求、结构性能和未来发展, 提出空间机器人面临的科学问题和关键技术. 空间机器人可分为机械臂系统、带陪护功能的机器人和检测服务机器人, 特别关注基于范德华力机制, 有望实现微重力下在空间站表面实现仿生壁虎机器人及干黏附的进展和关键技术. 机械臂系统应特别关注满足高刚度结构轻量化需求的新材料、新设计和新制造技术、机械臂-作业对象-空间站多体系统动力学、真空-微重力-高低温-宇宙辐射特殊环境下机械臂运动系统的润滑技术等问题. 带陪护功能的机器人需要研究在密闭、狭小、失重环境下, 航天员生理、心理和行为的变化规律及其机器人构型、陪护效果和辅助作业的要求和解决方案, 研究陪护需要的高级人工智能技术, 从语音识别、表情识别到自然语义理解等交叉学科的问题. 检测维护机器人的关键是发展高低温、空间辐射、真空及微重力下实现固体间的稳定接触技术、干黏附微纳有序刚毛阵列的制造技术和基于干黏附的机器人设计和运动规划技术.

关键词

空间机器人
在轨服务
干黏附
仿壁虎黏附

空间站是人类探索宇宙的重要起点、也为我们认识所生存的地球提供新的视点. 国际空间站各舱段所配备的机械臂/机器人在空间站建设、运营、维修中发挥了举足轻重的作用. 我国空间站建造中, 配备了两套机械臂, 用于货物搬运、载荷更换、航天员辅助、舱段巡视等操作任务. 随着我国空间站建造与运营工作的深入, 空间站维护、空间试验及其他操作任务将更加繁重和复杂, 现有的机械臂难以满足舱外全局可达、舱内狭小空间作业等方面的需求. 针对我国空间站规划长期无人、短期有人照料的特点, 发展多种空间站用机器人的需求更加迫切.

本文将回顾国内外空间机器人的发展历程、分析需求任务的变化及其带来的挑战、展望新技术革命将产生的发展趋势, 为空间机器人的未来发展提出建议.

1 空间机器人的需求分析

空间机器人的概念是美国在20世纪70年代为满足大型空间站建设的需求提出的, 纵观俄、美、中的空间站发展, 在建设和使用中已经大量使用以机械臂为特征的空间机器人. 目前在轨的国际空间站和月宫一号, 以及未来空间站的安全检测和维修维护, 对机器人性能提出了新的要求. 应用需求有:

第一, 以“和平号”、“空间实验室”和“国际空间站”为代表的第3代和第4代空间站, 在建设过程中就大量使用机器人, 以完成不同舱段的安装任务. 在后期的空间站运行过程中, 物资的转运过程也大量使用了机器人, 而这类机器人的主要特征还是基于航天器的机械臂, 即一端固定在空间站或者货运飞船上, 另一端完成对需要作业的舱段或者货物的操作.

引用格式: 戴振东, 彭福军. 空间机器人的研究与仿壁虎机器人关键技术. 科学通报, 2015, 60: 3114–3124

Dai Z D, Peng F J. Research progress of space robots and key technologies of gecko-inspired robots (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3114–3124, doi: 10.1360/N972015-00582

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00582>

我国的空间站由核心舱、实验舱I、实验舱II组成,配备核心舱大型机械臂和实验舱小型机械臂两种规格的机械臂.这些机械臂尚不能满足空间站检测、维护和航天员辅助作业对位置历便性(指抵达空间站上所有几何位置,包括狭小空间和复杂结构)的需求.

第二,“国际空间站”运行中已有的检测和维修,依靠航天员出舱,或者在机械臂辅助下完成.我国载人航天工程空间站进入运行阶段后,同样会面临大量检测和维修问题.这类在轨服务任务可以归纳为:(1)宇航员无法到达空间的检测和维修;(2)舱外替代航天员的巡检和维护;(3)为航天员作业提供辅助支持.这些需求对空间机器人的性能提出了全新的要求.

第三,在空间站封闭、狭小的环境中,航天员面临失重、孤独等问题,容易引起心理失调,影响工作质量,甚至危机航天器的安全.解决航天员的心理问题,也是未来空间机器人可以大有作为的领域.

面临的主要科学问题和关键技术有:(1)微重力环境下,物体处于漂浮状态,如何实现机器人和空间站舱体内外面的稳定固定?(2)真空环境下,如何实现机械臂系统运动过程摩擦面润滑剂的自修复?(3)多机器人协调过程的动力学.

下文将回顾空间机器人的发展、科学问题和关键技术的研究进展、展望空间机器人技术的未来发展.

2 空间机械臂系统

空间机械臂系统是目前空间机器人中应用最广和最成熟的领域.20世纪90年代首次实现在轨验证.到目前为止,针对空间机械臂的技术验证或航天器任务需求,已开展了数百种空间机器人样机研制或概念设计,约12种完成了在轨运行任务或经历飞行验证.

2.1 单机机械臂系统

单机机械臂系统在空间建设中发挥了巨大的作用,如美国航天飞机远程操作臂SRMS(1981年)^[1](图1(a))、空间站远程遥操作SSRMS(2001~2009年间)^[2](图1(b))、灵巧机械手SPDM(SRMS, SSRMS及SPDM由加拿大MDA公司承制)^[3]、第二代机器人航天员Robonaut2^[4](图1(c))、国际空间站日本实验舱机械臂JEMRMS^[5]、小型空间宇航员KIROBO(2013年)^[6].今后几年将有更多的空间机器人进入空间完成航天任务或演示验证,如欧空局的欧洲机械臂ERA及欧洲机器人Eurobot臂等. SRMS在哥伦比亚航天飞机上服役,标志着空间机械臂真正投入空间应用; SSRMS在空间站的组装中发挥了重大的作用;安装在国际空间站日本实验舱(JEM)上的JEMRMS用作JEM的机器人实验或支持JEM的维修服务, JEMRMS由主臂MA、小灵巧臂SFA和控制站组成.

单臂机器人空间机器人的特点是:(1)机械臂主要用于执行舱段组装与对接、货物搬运、载荷更换、航天器巡视等任务;(2)结构上由关节串联结构,含5~7个自由度,由关节、臂杆、末端效应器等组成;(3)机械臂的操作和作业通过多关节协调达到指定位置,通过末端效应器对目标实施作业,末端效应器的功能根据作业需要设计;(4)机械臂系统一般配视觉、六维力觉传感器,与外界环境直接发生作用的末端效应器部分集成传感器相对较多;(5)已解决空间机器人机构设计、天地时延遥操作、路径规划、视觉测量与伺服等问题.

2.2 多机械臂系统

航天机械臂系统的趋势是从单臂向多臂协同发展,以便使机械臂在完成作业任务时更容易、经济且具有更好的柔性、鲁棒性、容错性和并行性.双臂机器人类似人的双臂,能完成对于人来说易于实现的

图1 (网络版彩色)空间站机械臂系统. (a) 航天飞机远程操作臂; (b) 空间站远程遥操作系统; (c) 日本实验舱机械臂

Figure 1 (Color online) Mechanical arm systems for space station. (a) Shuttle and mechanical arm; (b) remote manipulator system for space station; (c) mechanical arm for Japanese Kibo module

功能. 在美国, 20世纪90年代NASA联合几个高校开展了空间工作者Skyworker^[7]、飞行遥操作机器人服务者FTS、Ranger^[8]计划机器人等多臂机器人预先研究. 2008年双臂机器人灵巧机械手(SPDM)作为加拿大II臂系统的重要部分发射入轨, 标志着双臂机器人投入空间应用^[9]. 2012年NASA利用灵巧机械手开展了在轨燃料补加任务的演示, 验证了灵巧机械手双臂灵巧操作的能力.

空间多臂机器人的特点是: (1) 由两个以上机械臂组成, 部分机械臂在躯干部分也设置自由度, 构成了拟人双臂机器人, 为了避障并使机器人具有人的机构特点, 单臂一般具有7自由度; (2) 机械臂用于载荷的灵巧操作, 多臂可并行操作或协调工作; (3) 机械臂的配备工具箱包括多种功能不同的末端工具, 执行不同的任务时更换末端工具, 如灵巧机械手的末端工具就包括载荷更换工具OTCM、自适应机械手(SARAH)(图2)等; (4) 机械臂的各臂之间控制上存在着依赖关系, 共享数据, 形成物理与信息上的耦合; (5) 解决了多臂协同控制、机器人智能控制及自主操作技术等, 双臂机器人已具有拟人机器人的特点, 为空间拟人机器人的研究奠定了基础.

综上所述, 国际空间站机械臂系统经历了单机机械臂、双机械臂、仿人机器人等阶段. 目前, 针对装配、舱段转移、大部件更换等需要大的力-力矩输出的作业, 机械臂依然是主要的发展方向. 这些机器人与空间站需要专用接口联接, 尚不能满足空间历便性的需求.

2.3 机械臂系统的科学问题和关键技术

工业机器人(机械臂)在各类生产线上发挥着举足轻重的作用, 相关技术已经相当成熟, 与地面机械臂相比, 空间机械臂系统进一步发展需要解决的问题如下:

(1) 空间机械臂系统作业过程对空间站位置、姿态的影响. 地面机械臂固定在地球上, 机械臂作业过程导致的系统(机械臂、作业对象、地球)惯性分布和转动惯量分布的变化不可忽略. 而空间机械臂作业过程, 如舱体转位, 导致的空间站、机械臂和作业对象形成的系统惯性和转动惯量发生变化, 从而影响系统的位置——姿态发生变化. (2) 在真空、微重力、高低温、宇宙辐射环境下, 机械臂运动系统的润滑技术. 在上述条件下润滑材料在固体表面上的物理化

图2 (网络版彩色)灵巧机械手 SARAH 开展在轨补加任务

Figure 2 (Color online) SARAH for SPDM operations in space station

学吸附和脱附机制及其调控、微重力下润滑材料的迁移和扩散规律的掌握, 是进一步发展空间润滑技术必须掌握的科学知识. (3) 高刚度结构的轻量化设计和制造技术. 无论从发射还是使用角度看, 结构轻量化度具有非常重要的价值, 而实际作业过程又需要机械臂有高的刚度, 满足高刚度, 有轻量化需求的新材料和新结构是未来应该关注的重点领域.

3 带陪护功能的机器人

3.1 仿人空间机器人

仿人机器人具有辅助作业和心理陪伴等多种功能, 20世纪90年代美国就开展了机器人宇航员Robonaut的研制, 完成Robonaut1地面样机的研制和地面试验^[10]; 2011年NASA与通用公司(GM)联合研制的第二代机器人宇航员(Robonaut2)(图3)进入国际空间站^[11], 是空间拟人机器人发展的里程碑. 其主要特点为: (1) 在形体上具有头部、颈部、躯干、双臂、多指灵巧手等人类的特征, Robonaut2全身共42个自由度, 其中包括3自由度颈部、2个7自由度的手臂、2个12自由度的五指灵巧手以及1自由度腰部, 因此可接近人的工作能力; (2) 五指灵巧手的程度与宇航员相当, 可直接使用宇航员的工具, 5个手指共12个自由度, 运动灵活, 可辅助宇航员完成部分空间操作任务; (3) 集成了视觉可见光、红外视觉、六维腕力觉、接触力觉、角度及位移等多达350个传感器, 是典型多传感器集成的复杂系统; (4) 空间拟人机器人需着重解决五指灵巧手的设计、多传感器集成与信息融合、机器人学习及自主控制、人机交互等难题.

图3 (网络版彩色)机器人航天员 Robonaut 2 在国际空间站地面遥控测试

Figure 3 (Color online) The ground remote control test of Robonaut 2 in space station

2013年日本“鹤”号货运飞船发射了机器人宇航员“KIROBO”^[12](身高34 cm, 重1 kg)(图4), 可与人做语言交流, 有肢体语言, 主要任务是陪国际空间站上的日本宇航员说话, 消除在空间站的寂寞感。虽然KIROBO的功能有限, 但作为一个完整的空间拟人机器人系统, 其发射进一步确立了日本在拟人机器人领域的领先地位, 为未来机器人最终可替代或辅助宇航员工作奠定了基础。

3.2 个人卫星助手

个人卫星助手^[13](personal satellite assistant, PSA)(图5)是美国为国际空间站配置的舱内机器人, 用于空间站健康管理、故障诊断、自动化试验等任务, 配置了丰富的传感器, 可在微重力下实现6自由度导航、宇航员个人工作支援、库存跟踪和环境监测等任务。能识别宇航员语音指令并执行。从现有资料看, PSA仍然使用基于物质喷射驱动, 这限制了PSA的进一步使用。

图5 (网络版彩色)个人卫星助手

Figure 5 (Color online) Personal satellite assistant

图4 (网络版彩色)小型机器人宇航员“KIROBO”

Figure 4 (Color online) Little robot astronaut KIROBO

3.3 带陪护功能机器人的科学问题和关键技术

空间站机器人的作业辅助和心理陪护是多学科交叉问题, 涉及到人机关系、行为心理、人工智能等多个领域, 是空间机器人发展的新方向。主要问题可以概括为:

(1) 作业辅助和陪护机器人的构型与陪护效果和作业效率研究。

(2) 密闭、狭小、失重环境条件下, 航天员生理、心理和行为的变化规律及其正向调节方法。

(3) 陪护功能涉及的人工智能的高级领域, 包括语音识别、自然语义理解、甚至表情识别等交叉学科的问题。

(4) 微重力下方向感缺失及人体触觉信息表达异常(无重力感)或者缺失(如拥抱和握手等)的心理影响机制及正向调节方法。

4 检测维护机器人系统

在地球环境下, 机器人在地面上的运动, 依靠重

图 6 (网络版彩色)CMU 研制了爬壁机器人。(a) 轮足式, 两个行走轮分别有 3 个黏附脚掌; (2) 干黏性材料做履带, 可在竖直表面爬行, 但不能转向; (3) Geckobot 仿大壁虎结构, 用单片机控制机器人的运动

Figure 6 (Color online) Wall-climbing robot developed by CMU. (a) Wheel-pad type, three adhesive pads located on two wheels; (b) crawler-type, crawl made up of adhesive, which makes the machine climbing vertically, but can not turn direction; (c) Gecko-mimicking Geckobot, motion was controlled by a SCM

力在接触面间形成法向支撑力和切向摩擦力, 实现稳定接触. 在零表面(90° -墙面)和负表面(180° -天花板), 机器人需要克服重力, 目前这类机器人可采用真空吸附、磁吸附、仿生刚毛吸附和黏性聚合物黏合等, 实现机器人接触单元在目标面上的稳定接触. 但真空和微重力环境下, 目前已知实现固体间稳定接触的有效机制是范德华力.

4.1 干黏附机器人的发展

在国外, 卡内基麦隆大学Unver和Stiff^[14]研制了多款仿生刚毛吸附的爬壁机器人——Waalbot、履带式机器人和Geckobot. 其中Geckobot可以实现 85° 斜面爬行为, Waalbot能实现垂直表面爬行. (图6)

美国斯坦福大学的Cutkosky等人^[15]在2008年研制了一种仿壁虎机器人Sticky-bot. Stickybot有4只黏

性脚, 脚上有4个脚趾, 脚趾有微纳米尺度的仿生刚毛, 脚趾能外翻和内收, 模拟壁虎脚趾的运动. 脚上控制脚趾运动的绳机构联动, 可实现脚与附着面的最大接触、黏附和脱附. 腿机构为四杆机构, 一个电机实现前后移动, 另一个电机实现四杆机构的转动, 实现抬腿动作, 第三个电机控制壁虎脚趾的运动(图7). Stickybot的吸附原理、运动形式、机器人外形上都比较接近壁虎, 但未见进一步报道.

加拿大Simon Fraser University为欧空局研制了一种壁虎机器人, 重240 g, 型如坦克^[16]. 随后研制了6足攀爬机器人Abigaille(图8). Abigaille具有干黏附攀爬墙面的能力. 研究者Mike Henrey表示“这是仿生的实证, 从大自然寻找工程解答”. 2014年1月该机器人在ESA在荷兰Noordwijk的欧洲太空及科技中心(ESTEC)的物质测试实验室展开测试, 模拟太空的真空及温度条件, 发现壁虎机器人的附着能力很好. ESA表示, 壁虎机器人的脚底板覆盖有超细纤维, 如同壁虎脚趾上的毛发一般, 能沿着宇宙飞船外壳爬行, 发挥清洁及维护功能.

国内中国科技大学开展了基于黏附材料的爬壁小车的实验研究. 南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所(简称南航仿生所)经过10多年的前

图 7 (网络版彩色)斯坦福大学的Stickybot. (a) Stickybot II; (b) Stickybot III; (c) Stickybot的黏附脚掌

Figure 7 (Color online) Stickybot developed by Stanford. (a) Stickybot II; (b) Stickybot III; (c) adhesive pad of Stickybot

图8 (网络版彩色)ESA 壁虎机器人

Figure 8 (Color online) Gecko mimicking robot by ESA

期研究,在壁虎运动仿生方面开展了系统深入的研究.通过对生物结构、运动步态、力学分析、仿壁虎脚掌黏附材料制备等方面的研究,研制了仿壁虎脚底刚毛结构的黏附材料结构,实现了在90°墙面上的爬行(图9)^[17].

2011年7月在中国工程院和美国工程院共同举办的“第二届中美工程前沿研讨会”上,戴振东介绍了仿壁虎黏附的研究,美国喷气推进实验室(JPL)于2012年通过DARPA的凤凰计划,实施仿壁虎黏附的航天应用研究,于2013年开始初步的地面试验(图10).2014年4月3日中国国防科技信息网报道,凤凰计划已完成第一阶段任务,同时启动第二阶段8个合同.但相关研究资料均被美方屏蔽.我们分析可能是研究工作已经进入到关键阶段,因此,可认为我们的研究工作和美方的研究基本同步,亟需抓紧开展研究.目前所有研究尚未开展在轨环境下的验证试验.

4.2 聚合物干黏附材料的发展

2000年Full等人^[18]揭示了壁虎脚掌的黏附特性和机制.认为刚毛是干黏附的关键,为此各国学者致力于仿生刚毛的研究、研制和在机器人上的运用.壁虎脚底刚毛直径约10 nm、长度约100~200 μm、紧密有序排列而不相互黏连、数量约50万个,能够形成约10 N/cm²的黏附力.基于结构仿生的理念,国内外广泛开展了干黏附刚毛阵列的制备研究,目前最好的仿生黏附阵列可产生约100 N/cm²黏附力^[19](美

图9 (网络版彩色)南航仿生所研制的仿壁虎机器人((a), (b))和四足机器人(c)

Figure 9 (Color online) Gecko-inspired robot ((a), (b)) and quadruped robot (c) by IBSS

图10 (网络版彩色)美国JPL的仿壁虎干黏附空间应用地面实验

Figure 10 (Color online) Gecko-inspired adhesive pads for space application by JPL

国Dai L M是戴振东主持的国家自然科学基金重大国际合作项目的美方合作伙伴),是壁虎脚底刚毛黏附力的10倍,限于美国对碳纳米管材料的出口出境限制,相关的合作测试在美国完成.此外,国内外许多

学者致力于研制仿壁虎脚掌刚毛结构的倾斜、末端分支、膨大的微纳米黏附阵列,以得到可自由调控黏附性能的仿壁虎脚掌,并已取得显著进展。

基于化学、物理、微机械加工等原理,采用了微纳模注塑法、反应性等离子体刻蚀法、静电诱导刻蚀法、自组织结构孔模板浇注法等方法,采用聚酰亚胺(PI)、聚氨酯(PU)、硅橡胶(PDMS)、碳纳米管(CNT)等材料制备了仿生刚毛(表1)^[20]。

使用不同材料和各种制备方法获得的刚毛阵列各有其独特的特点。聚氨酯阵列的弹性模量可调性最强,黏弹性好,黏附强度适中;硅橡胶阵列加工工艺相对简单,机械性能适中,需要的预负载小,但产生的黏附力相对小;纳米管阵列的材料弹性模量大,黏附性能强,但需要的预负载大,且脱附比较困难。依据壁虎脚掌刚毛黏附力产生的机理,刚毛的形状对黏附力具有重要的影响。研究表明:(1) 高密度的人工刚毛阵列具有大的相互接触面积,是产生大黏附力的必要条件。(2) 支杆末端庞大结构可增加相互接触面积,从而优化黏附性能。(3) 支杆倾斜的人工刚毛可调控机械性能,从而调控刚毛黏附性能。(4) 末端分级的多层结构可以提高黏附阵列对不同材质表面的适应能力,从而表现出良好的黏附性。故世界各国的研究人员正致力于寻找制备具有上述结构刚毛的制备技术。国外的相关研究进展如下。

在末端庞大刚毛阵列研制方面,Manchester大学的Geim等人^[21]制备了聚酰亚胺微突起阵列,直径0.5 μm ,高2 μm ,间隔1.6 μm 。1 cm^2 PI微突起阵列可悬挂一个蜘蛛人玩偶(高50 cm,重40 g)。

在高密度刚毛阵列研制方面,California大学Lee等人^[22]用聚丙烯(poly-propylene)制造出微米级黏附阵列。刚毛弹性模量为1 GPa,直径为0.6 μm ,阵列基底厚度为25 μm 。在很小的预负载下,2 cm $\times$ 2 cm的阵列片切向能够承受400 g重物,法向能够很好地脱附,具有较好的重复使用性。

在倾斜支杆刚毛阵列研制方面,Stanford大学Cutkosky等人^[23]从优化黏附支杆形貌出发,研制了倾斜杆式且末端尖锐的毫米级阵列。采用模具浇注法,浇注材料为聚氨酯,浇注出的黏附阵列黏附强度约为0.24 N/cm^2 ,具有明显的各向异性,能实现壁虎爬行过程中类似的滑黏现象,并成功用于仿壁虎爬壁机器人。

南航仿生所做了大量的工作,利用真空浇铸,烤箱固化等技术制备了硅橡胶基刚毛阵列,支杆具有规则的末端形貌,取向一致,且分布均匀。黏附力达到国外同类材料的同等水平^[24]。

中国科学院合肥智能机械研究所梅涛等人^[25]用ICP深刻蚀方法制备模板,浇注硅橡胶和聚酰亚胺,固化后脱模得到多种长径比的微黏附阵列,阵列垂直分布,刚毛为圆柱状,长度分别为1, 5, 10 μm ,直径分别为2, 2, 5 μm 。其中长5 μm ,直径2 μm 的阵列所测得的法向黏附强度最大,为1.94 N/cm^2 。试验结果表明:对于微米级阵列,相同间距下,长径比过大或过小,都会严重降低阵列的黏附性能。

卡内基麦隆大学Sitti等人^[26]研制的支杆倾斜分布的微米级阵列。采用模具注塑法,光刻工艺制模,聚氨酯材料浇注,得到长径比为2.4~4,法向黏附强度可达2.5~3.2 N/cm^2 ,具有较好的柔顺性。微黏附阵列与玻璃球面接触的黏附性能测试结果显示:长径比大的阵列比长径比小的阵列黏附强度高。

Artz等人^[27]利用光刻与模具工艺,制造了多种末端形貌的微黏附阵列,并研究了各种接触末端形貌对黏附阵列法向黏附和切向黏附的影响,结果显示接触末端对黏附性能有明显的影响,蘑菇状的末端阵列的法向黏附最大,匙突的末端阵列的法向黏附次之,球状和平的末端阵列的黏附较小,凹槽的末端黏附最小。

德国马普金属所的Gorb等人^[28]用模具注塑法,得到长100 μm ,直径40 μm ,末端为蘑菇状的硅橡胶基微黏附阵列。此黏附阵列的法向黏附强度可达6 N/cm^2 。

表1 不同仿壁虎刚毛微/纳黏附阵列制备的比较

Table 1 Bio-inspired adhesive setae arrays

材料	壁虎刚毛	聚丙烯	聚酰亚胺	聚氨酯	聚硅氧烷	碳纳米管
弹性模量(GPa)	1~3	~1	~3	<0.01	~0.003	>500
长径比	7~43	~30	0.5~7	1~4	0.5~7.5	>100
黏附强度(N/cm^2)	10		0.1~3	0.2~18	~6	~20
剪切强度(N/cm^2)	55	2	—	—	—	91
预载强度(N/cm^2)	<0.05	<0.1	50	12	0.8	125

与光滑玻璃平面接触的黏附测试结果表明,优化的末端设计使得阵列具有更多的优点:末端薄壁层使得黏附杆在细微颗粒污染的条件下仍保证可靠的接触面积;杆间隙可容纳污染颗粒,提高阵列的表面适应性;个别缺陷支杆不会影响周围支杆的黏附性能。

在多层复合结构方面, Carnegie Mellon大学Sitti等人^[29]研制了多种具有两层或多级仿壁虎微黏附阵列。微黏附阵列的制作工艺主要分为两步:首先采用光刻制模,聚氨酯材料浇注固化,脱模后得到不同直径和长径比,支杆垂直或倾斜且末端平整的微黏附阵列;接着在微阵列支杆的末端胶结固化一层不同于底端支杆的聚氨酯材料,得到末端膨大的结构,或者将阵列浸入同样的聚氨酯中,使其保留在阵列末端,在固化的时候对阵列施加一定的载荷,使其形成盘状末端。或将更小直径的末端盘状刚毛植造到支杆的末端,形成两级结构。

在多级分支刚毛阵列研制方面,韩国Jeong等人^[30]提出了一种大长径比聚合物微杆阵列的制造方法,这种阵列具有多级分支结构。采用纳模注塑法制备,在聚氨酯丙烯酸聚合物上光刻出微米级的细孔,制成上模。将聚氨酯上模覆盖在热塑性聚合物层上,黏流态的聚合物因毛细作用将顺孔而上,充满细孔,在一定温度下固化,脱模后便得到一层微米级的聚合物阵列。末级的纳米级黏附阵列采用同样的固化方法,固结于次级的微米级支杆上。

4.3 碳纳米管阵列干黏附材料的发展

Akron大学Ge等人^[31]用化学气相沉积的方法得到了宽度50~500 μm ,长度200~500 μm 的壁虎胶带。该胶带由高密度碳纳米管阵列组成,1 cm^2 的柔性壁虎胶带能够承受36 N切向黏附力,4倍于壁虎生物体脚掌刚毛的黏附能力。

Dayton的Dai等人^[19]最近利用化学气相沉积的方法得到高密度的碳纳米管黏附阵列(图11)。相对于Ge等人的碳纳米刚毛阵列,Dai等人的创新之处在于:在黏附阵列顶部采用弯曲的碳纳米管代替直立的碳纳米管,从而增加了刚毛的有效接触面积,故得到了更为强大的黏附性能。在20 N的法向预载力下,4 mm×4 mm的黏附阵列片可产生14.8 N的切向黏附力,切向黏附强度高达92.5 N/cm^2 ,远远超过壁虎生物体脚掌的黏附强度。如此大的切向黏附强度,若在吸附与脱附功能上加以改进,实现稳定吸附和主动脱附,

图11 Dai L M 研制的碳纳米管黏附阵列^[19]

Figure 11 Adhesive carbon nanotube array by Dai L M^[19]

类似壁虎飞檐走壁的本领在不久的将来有望成为普通人都能掌握的基本技能。Dai L M与戴振东合作,对推进中国在黏附阵列仿壁虎机器人应用上起到重要推动作用。

戴振东在CNTA黏附性能研究方面也开展了大量的前期工作。2009年和美国Dai L M合作承担重大国际合作项目,对Dai L M研制的CNT阵列的黏附性能做了系统的测评;2010年和芬兰Oulu大学合作制备了图案化CNTA阵列(图12),转移至PET柔性基底^[32],开展了真空和高温下材料黏附性能演化的实验研究^[33];和中国科学院苏州纳米材料与纳米仿生研究所(简称苏州纳米所)合作研制CNTA柔性黏附材料,研制了专用黏附性能实验台,测定了干黏附结构的预压力、侧向滑移、法向黏附力和切向黏附力,现有水平是:预压力28 N/cm^2 ,切向黏附力26 N/cm^2 ,法向黏附力6 N/cm^2 , $A/P \approx 0.93$ 。

南航仿生所与苏州纳米所合作研制了系列碳纳米管阵列,并对其性能做了系统的实验研究(图13)。

4.4 空间站检测机器人关键技术

空间站检测机器人的核心技术是机器人与空间站间的稳定接触。目前已知能够支撑形成稳定接触的最佳物理机制为仿壁虎范德华力。为满足空间站检测机器人的需求,尚有下列问题有待解决。

(1) 基于干黏附的仿壁虎黏附阵列的空间环境适应性研究,不同干黏附材料在低温、空间辐射、真空及微重力下的性能演化。

(2) 干黏附微纳米有序刚毛阵列的制造技术。目前德国已经实现了数微米直径、数十微米长度的聚合

图 12 南航仿生所与 OULU 大学、苏州纳米所合作研制的碳纳米管阵列

Figure 12 Patterned carbon nanotube array by IBSS, Oulu and Sinano

图 13 (网络版彩色)碳纳米管阵列的测试实验方法(a)和实验后的阵列形貌((b)~(d))

Figure 13 (Color online) Methods to measure the adhesion force of carbon nanotube array (a) and morphology of the carbon nanotube array before and after experiments ((b)–(d))

物刚毛阵列的规模制备,国内外也发展了基于自组织原理的碳纳米管阵列的制备方法和相关技术,但黏附稳定性有待提高,成本有待降低。

(3) 基于干黏附的机器人足端轨迹和机器人运动规划技术。

(4) 可靠黏附接触的感知与脱附风险评估技术。

5 结论和展望

机器人技术是空间站发展不可替代的重要组成

部分。机械臂在未来空间站的建设中依然具有不可替代的作业。其发展方向是通过材料和结构的优化设计,保障刚度、实现轻量化,研究机械臂运动系统的润滑和机械臂作业过程的动力学问题。陪护机器人的发展满足密闭、狭小、失重环境下,航天员心理和行为正向调节的需求,并解决相关的人工智能等交叉学科的问题。检测维护机器人则需要研究固体间稳定接触的保障技术、纳米有序刚毛阵列的制造技术和黏附机器人设计和控制技术。

参考文献

- 1 Nguyen P K, Ravindran R, Carr R, et al. Structural flexibility of the shuttle remote manipulator system mechanical arm. In: Proceedings of the Guidance and Control Conference, 1982. 246–256
- 2 McGregor R, Oshinowo L. Flight 6A: Deployment and Checkout of the Space Station Remote Manipulator System (SSRMS). In: Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS), 2001
- 3 Sallaberger C, Force S P T, Agency C S. Canadian space robotic activities. *Acta Astronaut*, 1997, 41: 239–246
- 4 Diftler M A, Mehling J S, Abdallah M E, et al. Robonaut 2—The first humanoid robot in space. In: International Conference on Robotics and Automation, 2011. 2178–2183
- 5 Laryssa P, Lindsay E, Layi O, et al. International space station robotics: A comparative study of ERA, JEMRMS and MSS. In: Proceedings of the 7th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, ASTRA, 2002
- 6 Zawieska K, Duffy B R. Human-robot exploration. In: The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2014. 808–813
- 7 Staritz P J, Skaff S, Urmson C, et al. Skyworker: A robot for assembly, inspection and maintenance of large scale orbital facilities. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2001, 4: 4180–4185
- 8 Parrish C J. The ranger telerobotic shuttle experiment: An on-orbit satellite servicer. *Artif Intell*, 1999, 440: 225
- 9 Rubinger B, Fulford P, Gregoris L, et al. Self-adapting robotic auxiliary hand (SARAH) for SPDM operations on the international space station. In: Proceedings of I-SAIRAS, Quebec, Canada, 2001
- 10 Diftler M A, Culbert C J, Ambrose R O, et al. Evolution of the NASA/DARPA robonaut control system. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2003, 2: 2543–2548
- 11 Diftler M A, Mehling J S, Abdallah M E, et al. Robonaut 2—The first humanoid robot in space. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011. 2178–2183
- 12 Howell E. Astronauts and Some Australians Get Lonely. How To Fix? This Robot Could Be A Start. *Australian Science*, 2015, <http://www.australianscience.com.au/space/astronauts-and-some-australians-get-lonely-how-to-fix-this-robot-could-be-a-start>
- 13 Dorais G A, Gawdiak Y. The personal satellite assistant: An internal spacecraft autonomous mobile monitor. *IEEE Aerospace Conference*, 2003, 1: 333–348
- 14 Unver O, Sitti M. Flat dry elastomer adhesives as attachment materials for climbing robots. *IEEE Trans Robot*, 2010, 26: 131–141
- 15 Kim S, Trujillo S, Cutkosky M R. Smooth vertical surface climbing with directional adhesion. *IEEE Trans Robot*, 2008, 24: 1–10
- 16 Henrey M, Ahmed A, Boscariol P, et al. Abigail-III: A versatile, bioinspired hexapod for scaling smooth vertical surfaces. *J Bion Eng*, 2014, 11: 1–17
- 17 Yu Z, Wang Z, Liu R, et al. Stable gait planning for a gecko-inspired robot to climb on vertical surface. In: IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2013. 307–311
- 18 Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature*, 2000, 405: 681–685
- 19 Qu L T, Dai L M, Stone M, et al. Carbon nanotube arrays with strong shear binding-on and easy normal lifting-off. *Science*, 2008, 322: 238–242
- 20 Zhang H, Guo D J, Dai Z D. Progress on gecko-inspired micro/nano-adhesion arrays. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1843–1850
- 21 Geim A K, Dubonos S V, Grigorieva I V, et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. *Nat Mater*, 2003, 2: 461–463

- 22 Lee J, Fearing R S, Komvopoulos K. Directional adhesion of gecko-inspired angled microfiber arrays. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 191910
- 23 Kim S, Spenko M, Trujillo S, et al. Whole body adhesion: Hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot. In: *International Conference on Robotics and Automation*, 2007. 1268–1273
- 24 Zhang H, Wu L W, Jia S X, et al. Fabrication and adhesion of hierarchical micro-seta (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 673–681 [张昊, 吴连伟, 贾世星, 等. 层级仿生微阵列的制备及黏附性能. *科学通报*, 2012, 57: 673–681]
- 25 Shan J, Mei T, Ni L, et al. Fabrication and adhesive force analysis of biomimetic gecko foot-hair array. In: *1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2006. 1546–1549
- 26 Kim S, Sitti M, Jang J H, et al. Fabrication of bio-inspired elastomer nanofiber arrays with spatulate tips using notching effect. *IEEE Conference on Nanotechnology*, 2008: 780–782
- 27 Greiner C, del Campo A, Arzt E. Adhesion of bioinspired micropatterned surfaces: Effects of pillar radius, aspect ratio, and preload. *Langmuir*, 2007, 23: 3495–3502
- 28 Gorb S N, Sinha M, Peressadko A, et al. Insects did it first: A micropatterned adhesive tape for robotic applications. *Bio-inspir Biomimet*, 2007, 2: S117
- 29 Murphy M P, Aksak B, Sitti M. Adhesion and anisotropic friction enhancements of angled heterogeneous micro-fiber arrays with spherical and spatula tips. *J Adhesion Sci Technol*, 2007, 21: 1281–1296
- 30 Jeong H, Lee S, Kim P, et al. High aspect-ratio polymer nanostructures by tailored capillarity and adhesive force. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects*, 2008, 313–314: 359–364
- 31 Ge L H, Sethi S, Ci L J, et al. Carbon nanotube-based synthetic gecko tapes. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 10792–10795
- 32 Luo M, Li Y, Yao Y G, et al. The transfer and adhesion of alligned carbon nanotube (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 771–779 [罗敏, 李阳, 姚亚刚, 等. 干黏附碳纳米管垂直阵列的转移及其黏附性能评价. *科学通报*, 2015, 60: 771–779]
- 33 Li Y, Wang Z Y, He Q S, et al. Adhesion of a carbon nanotube array and its polydimethylsiloxane composite in vacuum and thermal vacuum (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 213–223 [李阳, 汪中原, 何青松, 等. 碳纳米管阵列及其增强高分子复合材料在真空和高温环境下的黏附性能. *科学通报*, 2015, 60: 213–223]

Research progress of space robots and key technologies of gecko-inspired robots

DAI ZhenDong¹ & PENG FuJun²

¹Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

²Aerospace System Engineering in Shanghai, Shanghai 201108, China

In this paper we briefly review the structure, performance and future requirements of space robots, and identify the scientific problems and key technologies needing further study. Based on their functions, we divided space robots into mechanical arm systems, robots with a supporting function and robots for in-orbit servicing. Specific attention is paid to the van der Waals mechanism, which enables the attractive force generated between two solid bodies using the technique inspired by the gecko's array of attaching pads, and is the key technology that supports robots designed for micro-gravity condition for in-orbit servicing in space stations. Further studies on mechanical arm systems should focus on the high stiffness lightweight requirements by introducing new materials, design and manufacturing technologies, multibody dynamics of the mechanical arms, objects and stations, lubrication of the motion systems in a vacuum, microgravity, high-low temperatures, and cosmic radiation environments. Studies on robots with a support function need to pay attention to changes in astronauts' physical and psychological behaviour in an enclosed, confined, microgravity environment, and ways to make the robots work positively through designing suitable configurations and auxiliary operations. The interdisciplinary questions related to advanced artificial intelligence, such as speech recognition, expression recognition and understanding natural language, also need be studied. The key technology needed for in-orbit servicing robots is a dry adhesive for robots operating under high and low temperatures, space radiation, and in a vacuum to realize stable contact between a station and robots.

space robots, in-orbit servicing, dry adhesive, gecko-inspired adhesive

doi: 10.1360/N972015-00582