天宫二号机械手关键技术及在轨试验

刘宏, 李志奇*, 刘伊威, 金明河, 倪风雷, 刘业超, 夏进军, 张元飞

哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001

* E-mail: lzq@hit.edu.cn

收稿日期: 2018-05-28; 接受日期: 2018-09-30; 网络版发表日期: 2018-11-19

国家重点研发计划(标号: 2017YFB1300400)和国家自然科学基金创新研究群体项目(批准号: 51521003)资助

摘要 空间机械臂可以降低宇航员舱外活动风险, 提高空间探索效率, 具有广泛的应用前景. 近年来随着机器人技术的发展, 空间机械臂逐渐成为空间技术领域的热点研究方向. 天宫二号空间实验室任务中的人机协同在轨维修科学试验是天宫二号三大关键试验任务之一, 其核心是天宫二号机械臂系统. 这是一套集成了多种传感器、具备多种控制模式的舱内空间机器人系统, 包括6自由度机械臂、五指仿人灵巧手、手眼相机和全局相机、在轨人机接口(空间鼠标和数据手套)等模块, 其设计目标是: 在空间微重力环境下与航天员配合完成多种演示验证任务; 对空间机器人关键技术以及在轨人机协同关键技术进行验证和评价; 为空间机器人辅助或配合航天员开展在轨维修积累经验 and 数据. 针对人机协同中的安全性问题, 采用基于可变步长的轨迹规划方法, 使机械臂在与周围环境发生接触时能够局部智能地调整其运动轨迹, 达到减小或者消除碰撞力的目的; 针对五指灵巧手的抓握控制问题, 提出了基于目标物体笛卡尔刚度的协调抓握控制方法, 以适应外力的变化达到稳定抓握的目的; 针对数据手套与灵巧手之间的位姿映射问题, 采用基于指尖位置的人手与五指灵巧手运动映射方法以达到精确位姿映射. 天宫二号机械臂系统于2016年9月15日随天宫二号空间实验室发射入轨. 在10月27日到11月13日期间, 宇航员与机械臂系统协同开展了动力学参数辨识、抓漂浮物体、与航天员握手、在轨维修等试验, 成功完成了所有预定任务, 为今后空间机器人的应用奠定了基础.

关键词 空间机器人, 在轨服务, 人机协同, 仿人灵巧手

1 引言

空间机械臂可以代替或辅助航天员完成在轨装配、在轨维修、燃料加注、轨道清理、航天器巡检等工作, 大幅度降低航天员出舱活动的风险, 提高空间探索活动的效率, 具有广阔的应用前景.

近年来, 随着空间技术和机器人技术的发展, 空间

机械臂逐渐成为空间技术领域的热点研究方向, 各国竞相开展相关研究. 加拿大航天飞机远程机械臂(SRMS)是国际上第一套空间机械臂^[1], 臂长约15 m, 重约410.5 kg, 具有6个自由度. SRMS采用在轨遥操作控制模式, 即航天员通过舱内遥操作人机接口操控空间机械臂. 控制模式包括自动模式、手动增强模式、单关节驱动模式、直接驱动模式及备份驱动模式等.

引用格式: 刘宏, 李志奇, 刘伊威, 等. 天宫二号机械手关键技术及在轨试验. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 1313–1320

Liu H, Li Z Q, Liu Y W, et al. Key technologies of TianGong-2 robotic hand and its on-orbit experiments (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 1313–1320, doi: 10.1360/N092018-00168

SRMS可以执行有效载荷的部署和回收, 转移和支持航天员舱外作业、卫星维修、国际空间站建造等任务。

基于航天飞机远程机械臂的技术积累和应用经验, 加拿大为国际空间站上研制了移动服务系统(MSS)^[2], 其包括移动平台(MBS)、空间站遥控机械臂(SSRMS)以及专用灵巧机械臂(SPDM)。其中移动平台作为机械臂的基座, 实现机械臂的大范围移动; 空间站遥控机械臂长17.6 m, 最大载荷110000 kg, 可以完成载荷搬运、辅助宇航员出舱等任务; 专用灵巧机械臂为双臂系统, 可以完成对载荷的灵巧操作, 例如模块更换、燃料加注等。

除此之外, 国际空间站的日本实验舱段配置了由日本航天局JAXA研制的日本实验舱远程机械臂JEMRMS^[3], 用以支持和操作舱外设备, 以减轻航天员舱外活动的工作负担。并计划在俄罗斯舱段安装由欧空局研制的空间机械臂。

基于机器人相关技术, 特别是人工智能技术的长足进步, 各航天强国也致力于开发面向未来的、智能化程度更高的灵巧空间机器人。其中具有代表性的是NASA和通用公司联合研制的机器人宇航员系统R2^[4-6]。R2区别于其它空间机器人的显著特征是它的双臂末端均安装了12个自由度五指灵巧手^[7]并具备强大的环境感知能力。末端执行器的高度仿人化使R2具备与航天员共享工具及人机接口的能力, 目前R2已经完成了操作空间站内的按钮、开关以及旋钮, 使用空气流量计及RFID储存物资扫描仪等功能验证实验。

自20世纪90年代以来, 我国就开始稳步推进载人空间站工程。目前已经成功完成了“三步走”战略中的载人飞船和空间实验室阶段, 迈入空间站建设阶段。中国空间站远程机械臂系统CSSRMS(Chinese Space Station Remote Manipulator System)项目也已经立项并处在研制与地面测试阶段^[8]。鉴于空间机器人系统的复杂性以及空间任务的苛刻要求, 空间机器人的应用不可能一蹴而就, 迫切需要开展空间机器人的在轨实验, 为今后空间机器人在空间站的建造和维护的应用积累技术和经验。另外, 空间机器人在月球及其他星球探测、航天器在轨维护、空间碎片清理等领域也有广泛的应用前景。

因此, 天宫二号任务中规划了人机协同在轨维修科学试验。作为天宫二号三大关键试验任务之一, 天

宫二号机械臂系统是一套集成了多种传感器、具备多种控制模式的舱内空间机器人系统, 它包括6自由度机械臂、五指仿人灵巧手、手眼相机和全局相机、在轨人机接口(空间鼠标和数据手套)等模块, 其设计目标是在空间微重力环境下与航天员配合完成多种演示验证任务, 对空间机器人关键技术以及在轨人机协同关键技术进行验证和评价, 为空间机器人辅助或配合航天员开展在轨维修积累经验和数据。该试验由哈尔滨工业大学与中国航天科技集团公司第五研究院、北京理工大学共同完成。

天宫二号机械臂系统于2016年9月15日随天宫二号空间实验室发射入轨, 在神州飞船与天宫二号空间实验室对接后, 在10月27日到11月13日期间, 宇航员与机械臂系统协同开展了动力学参数辨识、抓漂浮物体、与航天员握手、在轨维修等试验, 成功完成了所有预定任务。在空间机器人动力学、在轨精细操作以及人机协同技术等方面积累了大量宝贵的经验和数据。本文将介绍天宫二号机械臂系统的关键技术及在轨试验情况。

2 系统组成

天宫二号机械臂系统的预定任务是:

- (1) 验证在轨服务机器人的软硬件设计, 特别是五指灵巧手使用在轨工具执行多种任务的能力;
- (2) 验证在轨人机协同关键技术, 包括安全策略、人机工效学设计及人机协同工作效率等;
- (3) 验证在轨遥操作技术, 为今后舱内宇航员遥控舱外机械臂积累经验和数据。

根据上述任务, 天宫二号机械臂系统包含三大功能组件, 即: (1) 6自由度轻型机械臂和五指仿人灵巧手^[9,10]组成的机械臂本体; (2) 在轨遥操作人机接口, 包括空间鼠标、数据手套及遥操作工作站; (3) 视觉测量模块, 包括全局立体视觉模块及固定在机械臂末端的单目手眼相机, 如图1所示。各功能模块之间的连接关系如图2所示。机械手系统接收天宫二号提供的100 V电源, 经过DC/DC变换为机械手、控制电箱、相机模块等供电; 系统1553B总线与天宫二号数管系统连接, 接收地面指令并回传遥测数据。

天宫二号机械臂系统的特点可以概括为仿人型设计以及多传感器/多控制模式。6自由度轻型机械臂各

图 1 (网络版彩图)天宫二号机械手系统的组成

图 2 (网络版彩图)天宫二号机械手功能模块图

个关节均配置有关节位置、关节力矩、电机位置、电机电流、温度等多种传感器; 为扩大关节的活动范围、避免线缆缠绕, 采用大中心孔结构(图3); 机械臂末端安装有五指仿人灵巧手, 灵巧手手指集成了电机位置、关节位置、关节力矩、指尖六维力/力矩、触觉、温度等多种传感器. 灵巧手手掌中的控制板与各个手指并行通信, 实现五指的协同控制, 并提供灵巧手对外的电气接口(图4).

人机交互设备是航天员与机器人信息交互的桥梁. 数据手套和三维鼠标分别用于对五指灵巧手和6自由度机械臂的遥操作控制, 遥操作工作站实现指令的实时采集及预处理. 特别地, 在处理数据手套指令时, 遥操作工作站需要克服人手与五指灵巧手在构型、自由度、尺寸等方面的差异, 实现人手动作与机械手动作的精确映射. 全局相机和手眼相机是机器人感知外部环境变化的窗口, 主要用于实现机器人的局部自主控制以及在轨轨迹修正.

图 3 (网络版彩图)轻型机械臂的关节及电气系统配置

图 4 (网络版彩图)五指仿人灵巧手的电气系统^[9]

3 关键技术

3.1 基于可变步长的机械臂轨迹规划

天宫二号机械臂和宇航员位于同一狭小空间中, 因此安全性设计在整个研制过程中都被视为最重要的指标. 除了大裕量设计、大量地面仿真验证以外, 在机械臂的控制方法上, 天宫二号机械臂采用了基于可变步长的轨迹规划方法^[11], 使机械臂在与周围环境发生接触时能够局部智能地调整其运动轨迹, 达到减小或者消除碰撞力的目的. 该方法的基本思想是根据关节力矩传感器测量值实时调整时间参考的递增量, 如图5所示. 在自由空间运动时, 时间步长的调整为固定正值, 轨迹规划与传统的轨迹规划相同; 在发生碰撞时, 根据碰撞力大小和相对机械手运动的作用方向, 调整时间步长的大小及正负. 当碰撞力的方向与机械手的

图 5 (网络版彩图)基于可变步长的机械臂轨迹规划

运动方向相反, 阻挡机械手的运动时, 为了减小碰撞力, 机械臂的运动速度应该减慢、甚至停止, 或者作反向运动, 减小时间增量; 当碰撞力的方向与速度的运动方向相同推动机械臂加速运动时, 为了减小碰撞力, 机械臂的运动速度应该加快, 即增大时间增量。

3.2 基于目标物体笛卡尔刚度的协调抓握控制

为了减少计算量、简化控制过程,提出了五指灵巧手的层次化控制结构,把整体复杂的控制问题分成若干个容易实现的子问题^[12]。如图6所示,其中规划协调层对多指手抓取过程中的接触点、抓取姿态进行规划,称为物体位姿控制层,而底层手指控制层则根据上一级的输出命令完成相对简单的任务。在这种层次化的控制结构中,顶层控制层与底层控制器相互独立,不需要相互了解结构和参数;同时,底层手指控制器的优先级相同,即五个手指的控制是并行的,这有利于提高系统的计算速度和响应速度。

对于多指机器人灵巧手而言, 对于给定的物体, 存在无数组抓取方式, 还需要在众多的方式中选择合适的抓取点, 计算各个抓取点施加的抓取力. 并且由于被抓取物体的几何尺寸、摆放位置等误差影响, 基于精确模型的灵巧手自主抓取难以实现. 针对五指仿人灵巧手协调抓握的难题, 提出了基于目标物体笛卡尔刚度的阻抗抓取方法^[13], 如图7所示. 首先, 根据物体的参考位置、刚度设置, 基于多指运动学方程、抓取模型以及手指的运动学方程得到各手指关节的参考位置, 同时计算得到相对物体刚度的手指关节刚度. 然后, 基于手指的参考位置和刚度分别对各手指进行阻抗控制. 最后, 通过多指运动学方程和抓取模型在线计算相对各手指指尖位置的物体位置, 并可得到作用于物体上的外力. 在多指手实现对物体或工具(比如电动工具)的稳定抓取以后, 如果外力平稳对物体施加力

图 6 (网络版彩图)五指仿人灵巧手的层次化控制结构

图 7 基于物体的阻抗抓取控制框图

(例如拧螺钉时的反作用力), 那么要求各手指对物体施加的合力与外力要相当, 可以将外力作为控制系统的力反馈信息, 并根据多指手的抓取模型将其分配到各手指. 由于手指物体的抓握是在参考位置的基础上施加稳定的作用力, 从而能够克服位置误差、操作外力等对抓握稳定性的影响.

3.3 基于指尖位置的人手与灵巧手运动映射方法

由于人手与五指仿人灵巧手结构、尺寸、自由度等不同,难以准确地建立航天员的人手对五指仿人灵巧手的运动映射,航天员手指的动作难以通过数据手套准确地传递给灵巧手。针对上述问题,提出了基于指尖位置的映射方法,将人手的运动映射到五指仿人灵巧手上。首先对人手建立了运动学模型,如图8所示,人手模型按优先次序满足以下三个要求:(1)模型能够精确地表示和测量人手各关节角度和手指指尖位置;(2)模型中手指关节配置位置要和数据手套关节传感器所处位置相一致;(3)考虑人手模型和五指仿人灵巧手模型之间的结构相似性。针对模型参数难以直接测量的问题,提出了基于指尖位置的闭环识别方法,得到了比较精确的模型几何参数,即图8中描述各坐标系之间相对姿态的参数。由于人手手掌和五指仿人灵巧手指的结构差异,人手手指的工作空间按照机械手与人手的尺寸比例进行等比例放大(即1.2倍)后,有些人手的指尖位置就不可避免的超出了五指仿人灵巧手的运动范围,因此,针对五指仿人灵巧手提出了基于笛卡儿空间的指尖位置映射的方法。首先,基于人手

图 9 (网络版彩图) (a) 机械臂招手; (b) 关节摩擦辨识

图 10 (网络版彩图) (a) 机械臂运动到固定位置; (b) 手眼相机视场

控制模型，以达到在机械臂旋拧轴线和电连接器轴线不完全匹配的情况下，控制灵巧手与电连接器之间接触力的目的。在使用电动工具拧松螺钉试验中，机器

图 11 (网络版彩图)抓漂浮小球

人的操作流程如下:

- (1) 机器人从电动工具存放位置抓取电动工具(图14(a)和(b));
- (2) 移动到螺钉上方基于视觉伺服实现电动工具与螺钉对准(图14(c));
- (3) 灵巧手扣动电动工具按钮, 机械臂切换到力控制模式, 下压并保持一段时间后上抬(图14(d));
- (4) 重复(2)和(3)中的步骤拧松第二个螺钉(图14(e)和(f));
- (5) 机器人把电动工具放回其存放位置(图14(g)和(h)).

4.3 在轨遥操作试验

鉴于机器人目前尚不具备自主遂行复杂在轨任务

图 12 (网络版彩图)拧松电连接器试验

图 13 (网络版彩图)撕开多层防护试验

图 14 (网络版彩图)抓握电动工具拧松螺钉试验

的能力, 在轨遥操作控制模式是目前空间机器人控制的重要手段之一. 与天地遥操作相比, 在轨遥操作的控制回路时延更小, 控制精度更高. 天宫二号空间机械臂的另一项试验内容即为测试空间机械臂及灵巧手的在轨遥操作控制. 试验系统包括用以控制6自由度机械臂的空间鼠标、控制五指灵巧手的数据手套、遥操作工作站以及机器人本体. 在试验中, 宇航员通过遥操作设备控制向机器人发送期望位置指令(图15), 遥操

图 15 (网络版彩图)宇航员通过空间鼠标和数据手套控制天宫二号机械臂和灵巧手

作工作站负责接收指令并进行预处理, 即基于3.3节中的方法把从数据手套接收到的位置指令转换成灵巧手的期望关节位置; 基于机械臂逆运动学把空间鼠标给出的期望三维位姿转换为机械臂关节期望位置.

5 结论与后续工作

在天宫二号任务中, 由哈尔滨工业大学与中国航天科技集团公司第五研究院、北京理工大学联合研制的机械手系统成功完成了在轨维修验证试验, 包括拆卸电连接器、撕开多层防护、旋拧电连接器、使用电动工具拧松螺钉以及在轨遥操作等, 达到了验证机械手软硬件设计、验证在轨人机协同关键技术以及在轨遥操作技术的目标, 为后续空间机器人辅助或配合航天员开展在轨维修积累了经验和数据. 在此次在轨维修试验的基础上, 我们的后续工作拟包括: (1) 针对舱外极端环境的机械手的软硬件升级; (2) 机械手动力学天地差异的建模、分析及应对; (3) 改进在轨遥操作设备的人机工效学设计.

致谢 天宫二号机械手在轨维修试验是由哈尔滨工业大学与中国航天科技集团公司第五研究院、北京理工大学共同完成. 其中, 中国航天科技集团公司第五研究院负责试验方案的制定; 北京理工大学蒋志宏教授团队负责双目视觉引导系统的研制. 在项目进行过程中, 相关参研人员展现了令人敬佩的专业知识和奉献精神, 对项目的圆满完成起到了关键作用. 在此, 作者向他们表示诚挚的感谢!

参考文献

- 1 Sachdev S S. Canadarm: A review of its flights. *J Vacuum Sci Tech A-Vacuum Surfs Films*, 1986, 4: 268–272

- 2 Floresabad A, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. *Prog Aerosp Sci*, 2014; 1–26
- 3 Sato N, Wakabayashi Y. JEMRMS design features and topics from testing. In: 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (ISAIRAS). Quebec, 2001
- 4 Diftler M A, Mehling J, Abdallah M E, et al. Robonaut 2-The first humanoid robot in space. In: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2011. 2178–2183
- 5 Tzvetkova G V. Robonaut 2: Mission, technologies, perspectives. *J Theor Appl Mech*, 2014, 44: 97–102
- 6 Ahlstrom T, Curtis A, Diftler M, et al. Robonaut 2 on the international space station: Status update and preparations for IVA mobility. *Aiaa Space Conference and Exposition*, 2013, 35: 211–220
- 7 Bridgwater L B, Ihrke C, Diftler M A, et al. The robonaut 2 hand-designed to do work with tools. In: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2012. 3425–3430
- 8 刘宏, 蒋再男, 刘页超. 空间机械臂技术发展综述. *载人航天*, 2015, 21: 435–443
- 9 Liu H, Meusel P, Seitz N, et al. The modular multisensory DLR-HIT-Hand. *Mechanism Machine Theor*, 2007, 42: 612–625
- 10 Liu H, Wu K, Meusel P, et al. Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT Hand II. In: 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2008
- 11 刘页超, 夏进军, 倪风雷, 等. 中国专利, 201410264716.2, 2014
- 12 何平. 基于物体阻抗的机器人灵巧手控制. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004
- 13 胡海鹰. HIT/DLR机器人灵巧手遥操作系统的研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006

Key technologies of TianGong-2 robotic hand and its on-orbit experiments

LIU Hong, LI ZhiQi, LIU YiWei, JIN MingHe, NI FengLei, LIU YeChao, XIA JinJun & ZHANG YuanFei

School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

With the development of robotics in recent years, space robotic manipulators have become a research focus on space technologies. In the TianGong-2 (TG-2) spacelab mission, a human-robot collaborative on-orbit servicing experiment was planned as one of the three key tasks. The central component of this task is the TG-2 robotic manipulator, which is a multisensory in-vehicle space robot with multiple control modes, including a 6-DOF robotic arm, a five-fingered humanoid hand, hand-eye and global cameras, and on-orbit human-machine interfaces(space mouse and cyber glove). The design purpose of TG-2 robotic task is to complete various prototypical experiments under micro-g environment to validate key technologies of space robots and on-orbit human-robot collaboration and gain experience and experimental data about robotic on-orbit servicing by assisting or cooperating with human astronauts. A variable time-scale motion plan method, which could adjust the trajectories of the robot to reduce or eliminate the collision force between the robot collide with the environment, is developed for safe human-robot collaboration. The five-fingered hand grasp control is based on an approach coined as “coordinated grasp control based object Cartesian stiffness” for the adaptation of external forces and robust grasp. To solve the kinematic mapping from cyber glove commands to five-fingered robotic hand, a fingertip-position-based method is proposed to acquire precise solutions. The TG-2 robotic manipulator was launched to space in Sep. 15, 2016. From Oct. 27 to Nov. 13, 2016, all the planned experiments, including dynamic parameter identification, grasping floating objects and prototypical on-orbit servicing, were carried out successfully under the supervision and assistance of the two astronauts, laying foundations for the future applications of space robots.

space robots, on-orbit servicing, human-robot collaboration

doi: [10.1360/N092018-00168](https://doi.org/10.1360/N092018-00168)