

模块化超冗余度空间机械臂的设计与实验

李艳辉^{1,2}, 霍琦^{1,2}, 李昂^{1,2}, 贺帅^{1,2}, 张恩阳^{1,2,3},
赛华阳^{1,2,3}, 朱明超^{1,2}, 徐振邦^{1,2}

(1. 中国科学院空间光学系统在轨制造与集成重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对空间在轨服务任务需求设计了一种 9 自由度的模块化超冗余空间机械臂。该机械臂由 9 个相同的机械臂关节构成, 其关节数量可根据任务要求进行调整。模块化关节采用一体化设计, 关节内部合理地布置了机械传动部分与电气部分。基于改进的 Bi-RRT 算法和建立的机械臂的正逆运动学模型, 机械臂进行了穿越复杂障碍环境的仿真和实验, 实验结果表明该机械臂可以灵活地穿越障碍环境。基于阻抗控制算法, 分别采用该机械臂进行了写字实验和恒力保持实验, 实验结果表明机械臂具有良好的力控制能力。实验验证了该机械臂具备在复杂空间环境中执行在轨服务的能力。

关键词: 空间机械臂; 超冗余; 模块化; 避障; 力控制

中图分类号: TP241

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2022)-01-0055-11

Design and Experiment of Modular Hyper-redundant Space Manipulator

LI Yanhui^{1,2}, HUO Qi^{1,2}, LI Ang^{1,2}, HE Shuai^{1,2}, ZHANG Enyang^{1,2,3},
SAI Huayang^{1,2,3}, ZHU Mingchao^{1,2}, XU Zhengbang^{1,2}

(1. Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of On-orbit Manufacturing and Integration for Space Optics System, Changchun 130033, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A modular hyper-redundant space manipulator with 9-DOF (degree-of-freedom) is designed for the requirements of space on-orbit service tasks. The designed manipulator is composed of 9 identical manipulator joints, and the number of joints can be adjusted according to the task requirements. The modular joint is of an integrated design, and the mechanical transmission part and electrical part are reasonably arranged in the joint. Based on the improved Bi-RRT (bidirectional rapidly-exploring random tree) algorithm and the established forward and inverse kinematics models of the manipulator, the simulation and experiment of the manipulator crossing the complex obstacle environment are carried out. The experimental results show that the designed manipulator can cross the obstacle environment flexibly. Based on the impedance control algorithm, the writing experiment and the constant force holding experiment are carried out with the manipulator, respectively. The experimental results show that the manipulator has a good force control ability. The above experiments verify that the designed manipulator has the ability to perform on-orbit service in the complex space environment.

Keywords: space manipulator; hyper-redundant; modularization; obstacle avoidance; force control

1 引言 (Introduction)

空间在轨服务一直是空间技术中一项重要的研究课题^[1]。空间机械臂被认为是取代人类宇航员执行危险、困难太空任务的重要手段, 可以执行的操作任务包括目标检测、抓取、安装、拆卸等^[2]。而复杂的空间环境为空间机械臂的设计和开发带来了巨大的挑战。

模块化机械臂是提高机械臂系统耐用性和降低设计成本的有效解决方案^[3]。目前的蛇形机器人具有很好的模块性, 并且已在地面和水下得到了成功应用^[4-6]。对于空间机械臂而言, 机械臂关节发生故障将严重影响机械臂的性能, 而且在复杂的太空环境中对空间机械臂进行维修需要付出极大的人力、物力成本。模块化的超冗余机械臂是解决这一问题的有效途径, 通过直接更换发生故障的机械臂

模块能减少航天员的出舱时间、降低操作难度。同时,超冗余机械臂具有很高的灵活度和避障能力,即其中某一关节发生故障,也不会对机械臂的性能造成很大影响。因此,开发模块化的超冗余空间机械臂是未来空间机械臂的重要发展方向。

自加拿大在 1981 年开发了世界上第一个用于执行在轨空间任务的机械臂系统 SRMS 后^[7],在接下来的几十年间,各国相继开发了许多用于执行在轨任务的空间机械臂。例如空间站遥控操纵器系统^[8]、加拿大航天局研发的专用灵巧机械臂 SPDM^[9]、日本研制的实验舱遥操作机械臂系统^[10]以及用于国际空间站的欧洲机械臂^[11]。为了搭建和维护空间站,我国研制了中国空间站远程机械臂系统 CSSRMS,主要包括 2 个 7 自由度的核心舱机械臂和实验舱机械臂^[12]。上述冗余空间机械臂可以完成一般的搬运、维修等避障运动,其主要适用场景是航天舱外的较大工作空间,所以其臂杆较长,但是较长的臂杆会导致机械臂小范围的避障运动受到极大的限制,而且机械臂的冗余自由度较少,灵活性不足。加拿大研发的灵巧机械臂 SPDM 采用双臂结构,提高了机械臂系统的灵活度,但是单臂的自由度数都没有超过 7 个,仍然难以在小范围复杂环境中工作。日本提出的空间机械臂是将一大一小 2 只具有 6 个自由度的机械臂串联在一起,总自由度达到 12,但是在小范围环境中工作的主要是 6 自由度小臂,其避障能力有限。此外,其他仍处于地面实验阶段的空间机械臂包括德国轨道服务任务机械臂 DEOS (deutsche orbit servicing mission, DEOS)^[13]、凤凰计划机械臂^[14]、Lemur IIb 机械臂^[15]等,这些都没有真正实现模块化,因此在关节发生故障后很难进行更换。

从以上研究可以看出,目前采用模块化关节的超冗余机械臂仍没有被应用到空间机械臂的设计中。超冗余机械臂的优点是运动灵活度高、避障能力强,但是自由度的增加也会给机械臂的制造和控制带来困难,因为增加自由度会使累积误差增大,导致机械臂的运动精度和运动稳定性降低。一般而言,超冗余机械臂可以分为连续型机械臂和关节型机械臂。连续型机械臂常使用柔性可伸长的软材料作为机械臂本体,如中国科学技术大学 Jiang 等^[16]提出了一种蜂巢气动网络结构,并基于这种结构制备了兼具灵活度和大负载能力的软体机械臂,可以完成开门和拉抽屉等复杂任务。上海交通大学谷国迎团队^[17-18]设计的线缆驱动的超冗余机械臂具有 24 个自由度,可以灵活地跨越复杂的障碍环境。大连理工大学彭海军团队^[19]利用张拉整体结

构质量轻、变形大等特点,提出一种基于张拉整体结构的连续型机械臂。但连续型的超冗余机械臂往往不具备大的负载能力,并且很难达到较高的控制精度。关节型机械臂是由多个刚性机械臂关节串联组成,如 Transeth 等^[20-21]和 Wright 等^[22]模仿蛇跨越障碍时的步态设计了一种蛇形机器人,它具有很高的灵活性与适应性,并且能够在复杂的地形中执行搜救任务。Mu 等^[23]设计了 2 种模块化、球形关节的蛇形机器人,降低了机器人移动时与道路之间的摩擦。上述冗余的蛇形机器人往往被用于探索复杂的地面环境,不具备抓取或移动重物的能力。Gallardo 等^[24]设计了一种由并联机构模块组成的机械关节的超冗余机械臂,利用旋量理论进行了运动学分析,并通过实验证明了该机器人良好的运动性能。Zhao 等^[25-26]设计了一种由并联机构模块组成的超冗余机械臂,与之结构相似的还有 Hu 等^[27-28]设计的由并联模块组成的超冗余机械臂。Taherifar 等^[29]提出了一种由液压系统驱动的并联模块组成的超冗余机械臂,通过液压阀控制机械臂的运动,具有高刚度和强负载能力的优点。这种由并联模块组成的机械臂往往有较高的定位精度,但控制复杂,并且机械臂体积较大,并不适于执行空间在轨组装或在轨服务任务。Xu 等^[30]设计了一个 9 自由度的超冗余机械臂,但该机械臂仅由多个电机串联组装,机械臂线缆均暴露在外,并且机械臂的末端负载很小。

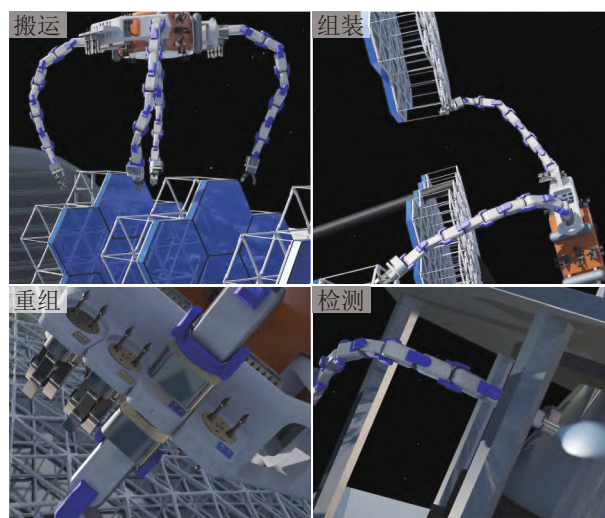


图 1 模块化超冗余空间机械臂在轨服务假想图

Fig.1 Hypothetical diagram of on-orbit service of the modular hyper-redundant space manipulator

综上所述,现有的超冗余机械臂仍存在末端负载小、体积大等问题,难以满足在轨组装的任务需求。为了解决上述问题,本文设计了一种可用于在

轨服务的模块化超冗余空间机械臂, 如图 1 所示。所设计的空间机械臂采用模块化设计, 由 9 个关节模块串联构成, 具有良好的灵活性与容错性。机械臂关节模块设计紧凑, 电子元件被集成在内部的电路板中。为了实现机械臂在复杂环境中的灵活操作, 分别推导了机械臂的正运动学和逆运动学模型, 通过机械臂的避障实验验证了其通过复杂障碍环境的灵活性。为了增强机械臂的力感知能力设计了阻抗控制器, 并分别进行了写字实验、恒力控制实验以及机械臂的协同搬运实验。

2 机械结构设计 (Mechanical structure design)

模块化超冗余空间机械臂通过 9 个相同的接头与集成控制系统连接, 每个关节包括机械系统和电子控制系统, 具有高集成、低重量和大负载的优点。机械臂的模型图和实物图如图 2 所示, 相邻关节之间沿关节中心轴线以 90° 夹角连接, 各连接板均进行了减质量处理以降低机械臂整体的质量。所设计的机械臂系统参数如表 1 所示。



图 2 机械臂模型与实物图
Fig.2 Manipulator model and its physical drawing

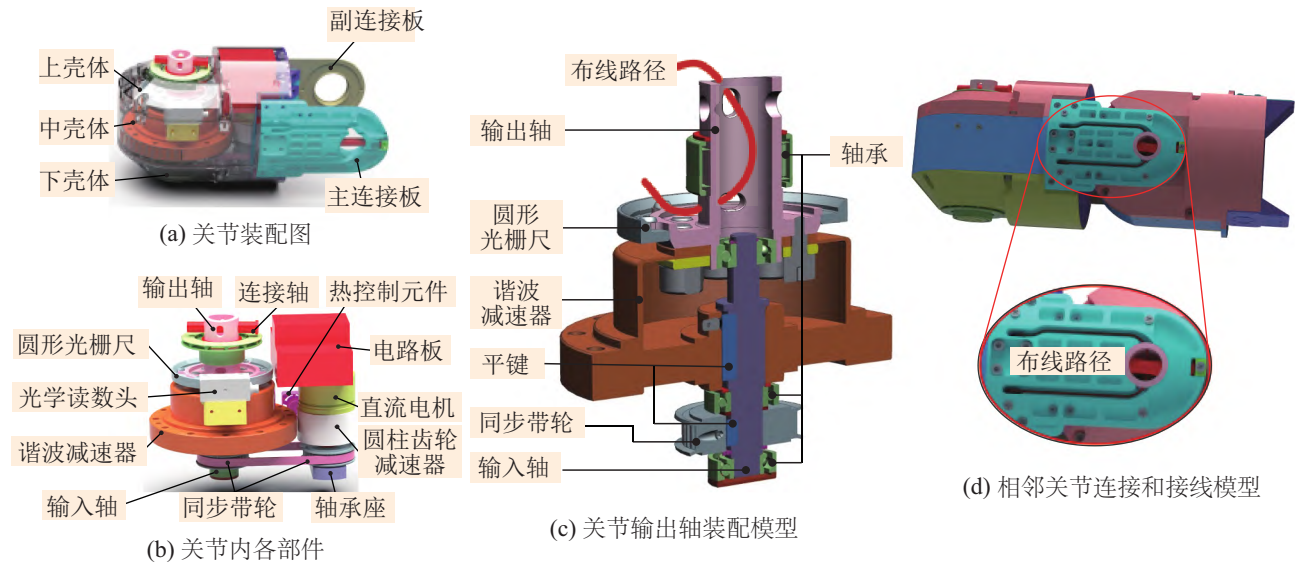


图 3 机械臂关节的模型图
Fig.3 Model diagram of manipulator joints

表 1 机械臂系统参数表 Tab.1 Parameters of the manipulator system	
系统参数	参数值
尺寸参数	关节直径: 69.5 mm
	关节长度: 166 mm
	整臂长度 (9 个关节模块): 1.49 m
质量参数	关节质量: 3.42 kg
	整臂质量: 30.60 kg
制动器参数	最大扭矩: 212.15 N·m
	最大转速: 2.83 r/min
功率	24 V 电压下额定功率: 154 W
通信	100 Mbit/s 以太网
传感器	电机角度和速度传感器、电压传感器、电流传感器
工作空间	$9.5576 \times 10^9 \text{ mm}^3$
关节转角范围	$-\pi/2 \sim \pi/2$

所设计的机械臂关节如图 3 所示, 其中, 图 3(a) 表示关节的壳体结构和连接件结构。可以看出, 关节的外部结构主要包括上壳体、中壳体和下壳体, 各壳体之间通过螺栓连接。图 3(b) 表示关节内部各结构的排布情况, 左侧包括关节的输出轴和连接轴, 圆形光栅尺和光学读数头用于测量关节的旋转角度, 谐波减速器被固定在中部壳体。直流电机通过同步带轮将动力传递到谐波减速器, 其直流电机的末端安装有圆柱齿轮减速器, 驱动器等电子器件被固定在电机上部。底壳内的轴承支架等部件主要用于辅助电机轴旋转。关节采用 Maxon 永磁同步电机提供驱动力, 该电机具有散热性好、使用寿命长和瞬时转矩过载能力强等优点。

机械臂关节采用了 2 级减速设计来增大关节的输出扭矩，分别为安装在电机输出轴上的 Maxon 行星齿轮减速器和固定在输出轴的 Nidec Shimpo 谐波减速器，总减速比达 3120 : 1，这使得机械臂关节最大可提供 190 N·m 的输出扭矩^[31]。电机将产生的扭矩直接传递给直齿圆柱齿轮减速器，从而使齿轮轴产生扭矩，进而通过同步带轮将扭矩传递给输入轴，再通过谐波减速器放大输入轴的扭矩，并将其传递到输出轴。最后，输出轴通过连接轴将上一个关节的输出扭矩传递给下一个关节，从而达到关节旋转的目的，其关节输出轴组件模型如图 3(c) 所示。

机械臂关节之间的布线也是关节的设计难点之一，所设计的关节可以将相邻 2 个关节之间的连接线内嵌于关节的副连接板中，如图 3(d) 所示。副连接板外部安装主连接板，避免机械臂线路的外露和线路缠绕。机械臂仅需一根通信总线和电源线即可连接到机械臂的各个关节，其中通信总线和电源线分别布置在关节两侧的连接板中。

关节内的传感器由 3 部分组成。第一部分为增量式编码器，与电机直接相连，用于测量电机的转速；第二部分是集成在控制器内部的电流传感器，为电机提供电流闭环控制和限流保护；第三部分是圆形光栅尺读数头，连接在关节输出轴上，读数头通过 BiSS（双工同步串行）通信读取圆形光栅尺的刻度，实时检测输出轴的角度值，精度可达 $6.86 \times 10^{-4} (^{\circ})$ 。读数头记录的数据被传递给控制器，以校正关节实际输出的角度偏差。

为了降低样机在地面测试时的成本，接头壳体材料选用 7A09 型号的硬质合金，而不是昂贵的碳纤维。受地面重力的影响，连接轴和输出轴由 TC4 型号的钛合金改为 40Cr 型号的合金。同时，接头外壳表面进行阳极氧化和喷砂处理，以防止磨损和腐蚀。

3 电控方案设计 (Design of the electrical control scheme)

超冗余机械臂的电控系统由一个供电系统、一个主控制系统以及各关节内部的电气系统组成，如图 4(a) 所示。为了提高控制系统的可靠性和计算能力，采用 TMS320F28069 浮点处理器作为控制器，实现控制器局域网 (controller area network, CAN) 总线通信、传感器信息采集和位置控制，如图 4(b) 所示。图 4(c) 表示每个关节内部定制的 PCB (printed

circuit board) 板，包括与 Maxon 电机相匹配的 ESCON 模块 50/5 驱动器、霍尔传感器接口和增量式编码器接口。

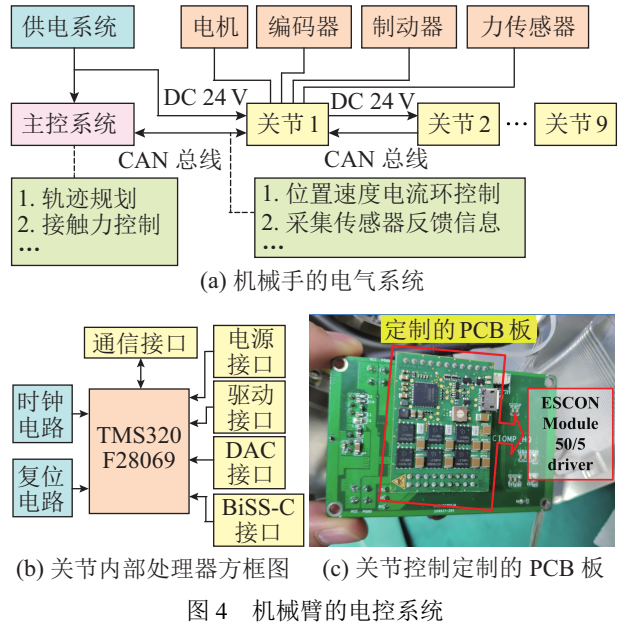


图 4 机械臂的电控系统

Fig.4 The electrical control system of the manipulator

图 5 为机械臂的位置、速度以及电流的三路闭环控制框图。电流回路控制器位于最内环，由于需要保护控制电路，必须限制电流回路的输入和输出，以避免电流过载造成电机损坏。速度环在电流环之外，控制伺服系统的速度。为了避免传动系统中间隙、摩擦等非线性因素的影响，速度控制采用了以电机转速为被控对象的内闭环。位置环在速度环之外，为保证控制精度满足要求，位置环采用外闭环控制输出轴的角度。

机械臂的系统通信由 2 部分组成，一部分是单关节通过串行外设接口进行内部通信，另一部分是单关节与主控单元通过控制器 CAN 总线进行通信。串行外设接口通信主要用于采集圆形光栅尺上的信息，并向数模转换模块发送指令，实现对单关节的位置控制。CAN 总线通信允许机械臂的主控系统获得每个关节的状态信息，然后作出相应的决定。

为了方便操作人员对所设计的机械臂进行运动控制，针对所设计的机械臂开发了一套控制软件，其软件框架如图 6 所示。机械臂上位机软件可以提供良好的人机操作界面和丰富的接口，并能够实时显示机械臂信息。下位机软件接收并处理来自上位机、传感器和关节驱动器的控制指令和传感器数据，实现对机械臂精准、灵活的控制。

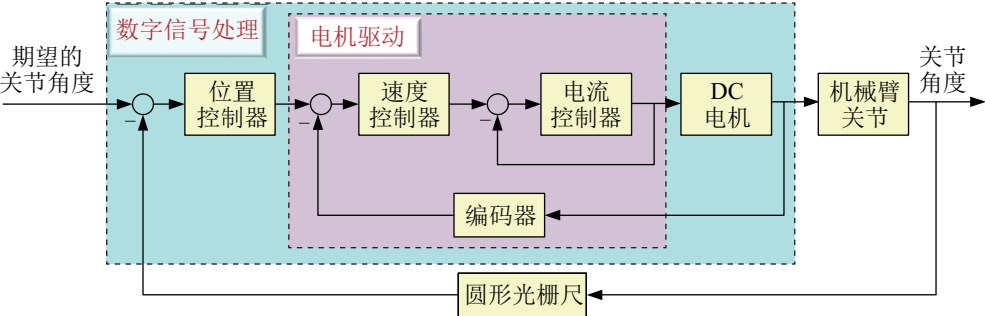


图 5 机械臂关节的三路回环控制结构

Fig.5 Three-way loop control structure of the manipulator joint



图 6 机械臂控制软件框架

Fig.6 The control software framework of the manipulator

4 机械臂运动学与阻抗控制方法（Kinematics and impedance control method of the manipulator）

4.1 机械臂的正运动学

建立机械臂的正、逆运动学方程是机械臂进行路径规划的基础。在图 7 中，将机械臂的各关节简化为连杆，并在各关节的连接处建立坐标系。表 2

中，使用改进的 DH（modified Denavit-Hartenberg，MDH）参数法建立机械臂的运动学模型，其中 α_{i-1}

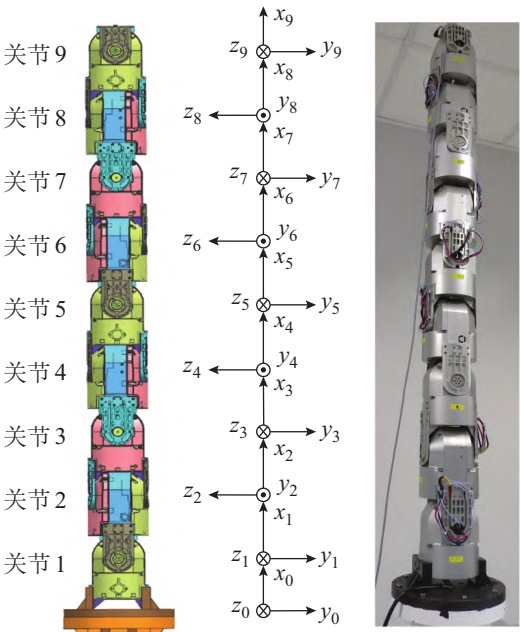


图 7 9 自由度机械臂的参数化建模

Fig.7 Parametric modeling of 9-DOF manipulator

表 2 9 自由度机械臂的 DH 参数表
Tab.2 DH parameters of 9-DOF manipulator

i	α_{i-1}	a_{i-1} / mm	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	$-\pi/2$	165.5	0	θ_2
3	$\pi/2$	165.5	0	θ_3
4	$-\pi/2$	165.5	0	θ_4
5	$\pi/2$	165.5	0	θ_5
6	$-\pi/2$	165.5	0	θ_6
7	$\pi/2$	165.5	0	θ_7
8	$-\pi/2$	165.5	0	θ_8
9	$\pi/2$	165.5	0	θ_9

表示两相邻关节之间的关节角, a_{i-1} 表示两相邻旋转轴之间的距离, d_{i-1} 表示关节轴线从一个连杆坐标系到另一个连杆坐标系的距离, θ_{i-1} 表示一个连杆相对于另一个连杆的关节轴线的旋转角度, $i = 1, 2, \dots, 9$ 。

因此可以推导出连杆 i 相对于连杆 $i-1$ 的位置关系的变换矩阵 ${}^{i-1}_i \mathbf{T}$:

$$\begin{aligned} {}^{i-1}_i \mathbf{T} &= \text{rot}(X_{i-1}, \alpha_{i-1}) \text{trans}(a_{i-1}, 0, 0) \text{rot}(Z_i, \theta_i) \times \\ &\quad \text{trans}(0, 0, d_i) \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ &\quad \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

其中 $c\theta = \cos \theta$, $s\theta = \sin \theta$, $c\alpha_{i-1} = \cos \alpha_{i-1}$, $s\alpha_{i-1} = \sin \alpha_{i-1}$ 。根据式 (1) 可以得到, 机械臂末端坐标系相对于基坐标系的位姿矩阵 ${}^0_9 \mathbf{T}$ 与关节变量向量 $\Theta = [\theta_1, \dots, \theta_9]^T$ 的函数 $f_{\text{kine}}(\Theta)$ 为

$$\begin{aligned} {}^0_9 \mathbf{T} &= f_{\text{kine}}(\Theta) \\ &= {}^0_1 \mathbf{T}_2 {}^2_3 \mathbf{T}_4 {}^4_5 \mathbf{T}_6 {}^6_7 \mathbf{T}_8 {}^8_9 \mathbf{T} \\ &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

式 (2) 给出了末端执行器相对于基础坐标系的

位置和姿态, 可以用矩阵 $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ 表示

机械臂末端的姿态, $\mathbf{P} = [P_x \ P_y \ P_z]$ 表示机械臂末端的位置, 以上描述了 9 自由度机械臂的正向运动学。

4.2 机械臂的逆运动学

机械臂的逆运动学解算即通过已知机器人的末

端位姿 ${}^0_9 \mathbf{T}$ 对相应的关节变量进行求解的过程。梯度投影法将逆运动学问题的解分解为最小范数解和齐次解 2 部分, 第 1 项称为特解, 能完成机械臂的运动, 第 2 项称为齐次解, 对机械臂末端在笛卡儿空间的速度矢量没有影响。通过求解正向运动学关于时间的导数, 可以得到机械臂末端的速度与关节角度之间的关系为

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} = \mathbf{J}(\Theta) \dot{\Theta} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{J}(\Theta)$ 是关于 Θ 的雅可比矩阵, 它建立了机械臂关节角和末端速度之间的关系。根据式 (3) 可以得到, 当 $\mathbf{J}(\Theta)$ 满秩时, 机械臂的关节角速度可以表示为

$$\dot{\Theta} = \mathbf{J}^{-1}(\Theta) \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于本文所设计的机械臂为超冗余的, 因此无论是否满秩, 该矩阵都无法得到常规的逆。目前绝大多数对冗余自由度机器人的研究都使用伪逆法求解, 其计算如下:

$$\dot{\Theta} = \mathbf{J}^{+1}(\Theta) \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{J}^{+1}(\Theta)$ 表示雅可比矩阵 $\mathbf{J}(\Theta)$ 的伪逆矩阵。为防止出现奇异, 引入阻尼系数 u , 可以得到奇异鲁棒性逆矩阵:

$$\mathbf{J}^* = \mathbf{J}^T (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + u^2 \mathbf{I})^{-1} \quad (6)$$

对于所设计的超冗余机械臂, 式 (5) 中的解为最小范数解, 即所解出的机械臂关节角速度组成的向量范数最小。

为了在不改变机械臂末端位姿的情况下实现自运动, 在式 (4) 中增加齐次线性解, 该齐次线性解与最小范数解是正交的关系, 同时该解也包括在矩阵 $\mathbf{J}$ 的零空间内。此外, 引入目标函数 $H(\Theta)$ 实现关节限位

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \left(\frac{q_i - \frac{q_{i\max} + q_{i\min}}{2}}{\frac{q_{i\max} + q_{i\min}}{2} - q_{i\min}} \right)^2 \\ &= \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \left(\frac{q_i}{q_{i\max}} \right)^2 \quad (7) \end{aligned}$$

最后采用梯度投影法进行逆运动学的求解, 解得:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^+ \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} + \mathbf{k}(\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \nabla H(\boldsymbol{\Theta}) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{I}$ 为 9×9 的单位矩阵, $\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}$ 是关于 $\mathbf{J}$ 的零空间投影矩阵, $\mathbf{k}$ 为比例因子, $\nabla H(\boldsymbol{\Theta})$ 可以表示为

$$\nabla H(\boldsymbol{\Theta}) = \left[\frac{\partial H}{\partial \theta_1}, \frac{\partial H}{\partial \theta_2}, \dots, \frac{\partial H}{\partial \theta_9} \right]^T$$

其中, 比例因子 $\mathbf{k}$ 可设为

$$\mathbf{k} = \text{diag} [0.0001 \ 0.0001 \ 0.0001 \ 1 \ 1 \ 1]$$

4.3 改进的 Bi-RRT 算法

为了使机械臂具备在复杂障碍环境中工作的能力, 采用一种改进的基于双向快速搜索随机树 (Bi-RRT) 的轨迹规划算法。相较于传统的 Bi-RRT 算法, 改进的 Bi-RRT 算法在创建搜索树之前先保存一棵完整的树, 从而保留了一条完整的无障碍路径。这样, 在计算从起点到目标点的无碰撞路径时, 可以大大减少算法循环的次数, 从而提高避障效率。

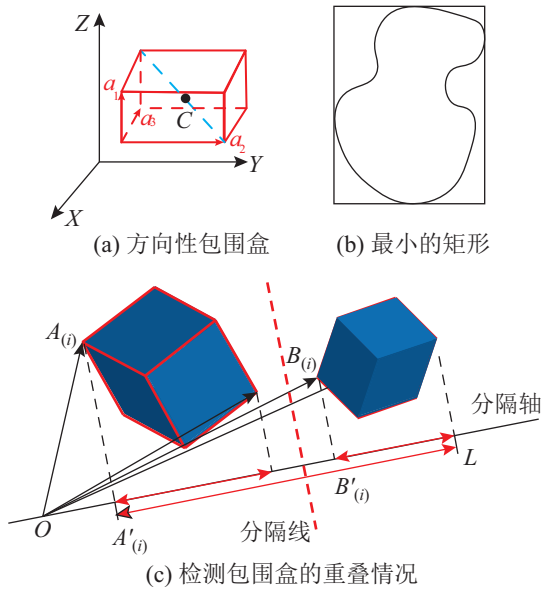


图 8 改进的 Bi-RRT 算法
Fig.8 Improved Bi-RRT algorithm

本文使用定向包围盒 (OBB) 算法来检测机械手与障碍物之间是否存在碰撞^[32]。OBB 被定义为 3 维空间中任意方向的长方体。OBB 边界框的模型如图 8(a) 所示, 其中 C 表示边界框的中心, a_1 、 a_2 和 a_3 是方向轴。OBB 的边界框是指包含对象和

边框的最小矩形, 如图 8(b) 所示。图 8(c) 表示利用包围盒进行碰撞检测, 其中 L 表示 OBB 的潜在分隔轴, O 为分隔轴上的一个随机点, $A_{(i)}$ 和 $B_{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, 8$) 分别表示 2 个边界框上的端点。

$$OA_{(i)'}_{\max/\min} = \frac{\overrightarrow{OA_{(i)}} \cdot \overrightarrow{OL}}{|\overrightarrow{OL}|} \quad (9)$$

$$OB_{(i)'}_{\max/\min} = \frac{\overrightarrow{OB_{(i)}} \cdot \overrightarrow{OL}}{|\overrightarrow{OL}|} \quad (10)$$

$$|\overrightarrow{OB_{(i)}}|_{\max/\min} = \frac{\overrightarrow{OB_{(i)}} \cdot \overrightarrow{OL}}{|\overrightarrow{OL}|} \quad (11)$$

2 个边界框不重叠的充要条件是

$$|A_{(i)'}_{\min} A_{(i)'}_{\max}| + |B_{(i)'}_{\min} B_{(i)'}_{\max}| < |A_{(i)'}_{\min} B_{(i)'}_{\max}|_{\max} \quad (12)$$

图 8(c) 中的 2 个 OBB 有 15 个潜在的分隔轴, 其中 2 个轴是 2 个长方体的方向轴, 9 个是方向轴的叉积。将 OBB 的边界框投影到 L 轴上, 并检查投影线段是否重合, 如果投影线段没有发生重合, 就可以认为机械臂没有与环境发生碰撞。

5 实验验证 (Experimental verification)

为了说明所设计的机械臂穿越复杂障碍环境的能力与力控制能力, 共开展了机械臂的避障实验、写字实验和力保持实验。

5.1 机械臂避障实验

高度的灵活性与避障能力是超冗余机械臂的重要优势, 因此, 为了验证所设计机械臂的灵活性, 设计了一个复杂的障碍环境, 主要包括 3 个挡板围起来的狭窄空间, 如图 9 所示。其中, 障碍物尺寸为 $600 \text{ mm} \times 530 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$, 机械臂末端需要沿障碍物 m 方向处进入障碍物, 沿 n 方向穿越障碍物。

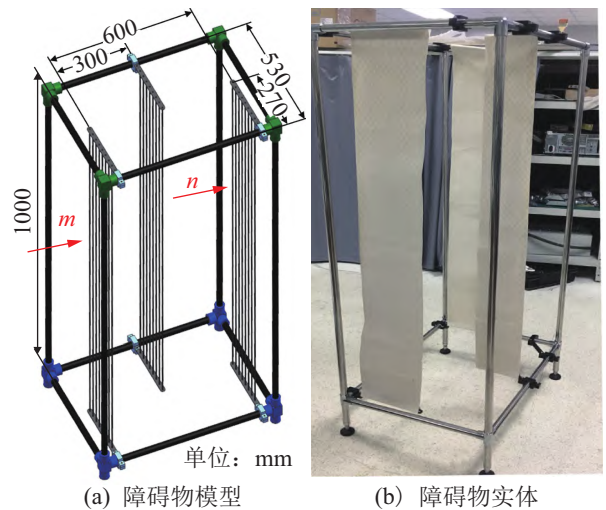


图 9 障碍物环境

Fig.9 Obstacle environment

首先利用改进的 Bi-RRT 算法对机械臂在障碍环境中工作的过程进行仿真，仿真结果如图 10 和图 11 所示。由图 10 可知，机械臂需要经过 10 次连续的关节角度变换才能穿越所设置的障碍环境。ADAMS 软件仿真过程如图 11 所示，可以看出，机械臂在穿越障碍的过程中没有与环境发生碰撞。

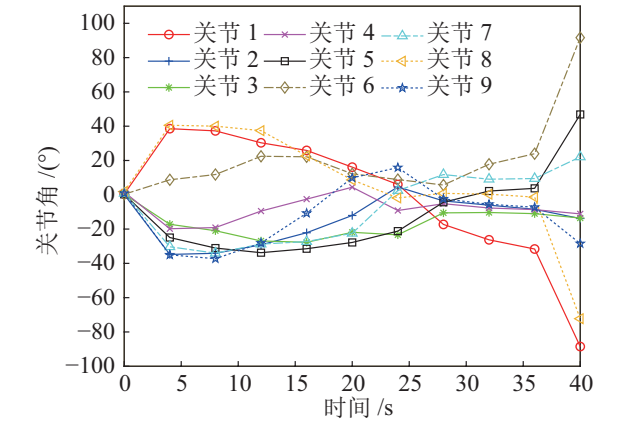


图 10 通过仿真规划得到的机械臂关节角度
Fig.10 Manipulator joint angles obtained by simulation planning

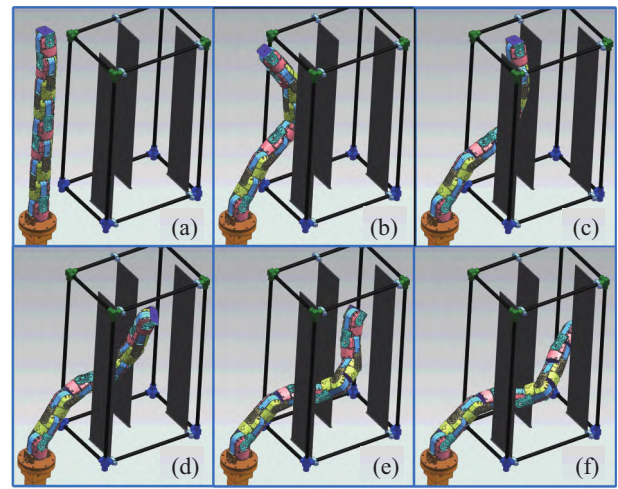


图 11 机械臂穿越障碍物的过程仿真
Fig.11 Process simulation of manipulator crossing obstacles

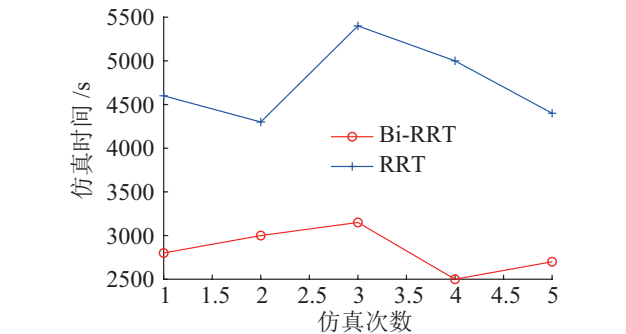


图 12 传统 Bi-RRT 算法和改进的 Bi-RRT 算法的计算时间
Fig.12 Calculation time of the traditional Bi-RRT algorithm and the improved Bi-RRT algorithm

为了说明所采用的避障算法的优越性，分别使用改进的 Bi-RRT 算法和传统的 Bi-RRT 算法对所设计的机械臂进行了 5 次重复的穿越障碍环境的仿真实验，仿真结果如图 12 所示。在仿真过程中，计算机采用了 Intel® Core™ i7-7700 中央处理器，运行频率为 3.60 GHz，内存为 8 GB，软件为 Matlab R2017b，操作系统为 Windows 10。图 12 的计算结果表明，改进的 Bi-RRT 算法具有较短的计算时间和较高的效率。

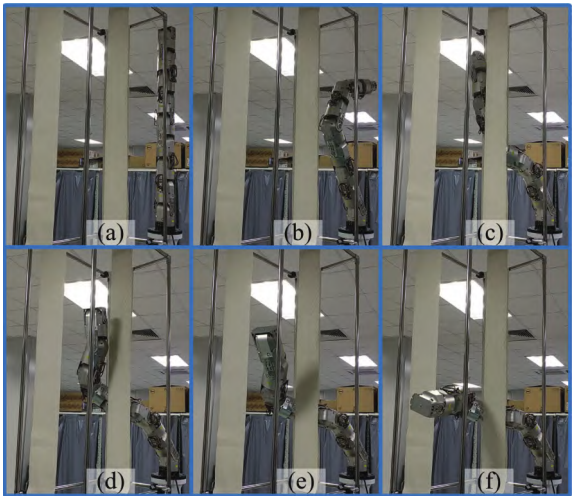


图 13 机械臂穿越障碍物的实验过程
Fig.13 The experimental process of manipulator crossing obstacles

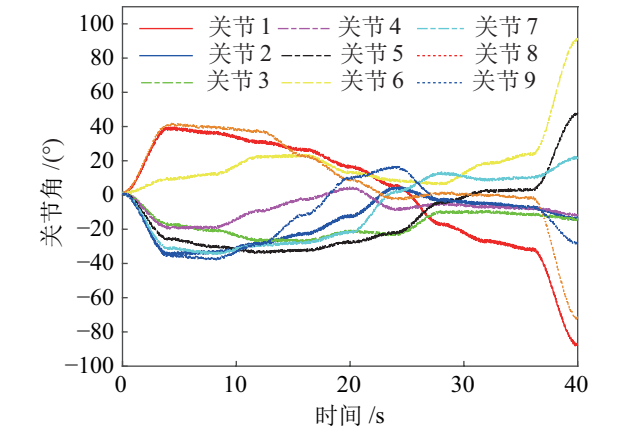
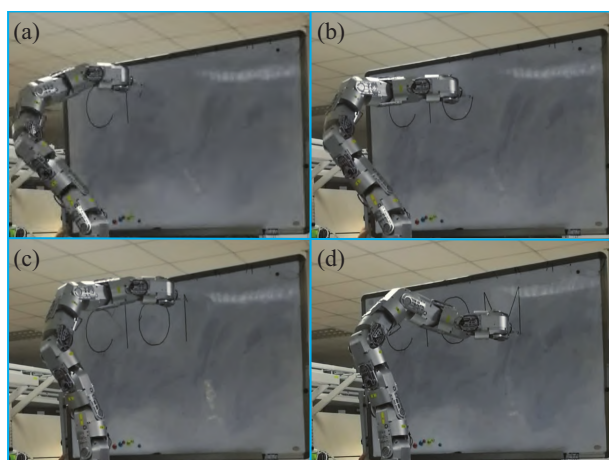


图 14 机械臂穿越障碍物的关节曲线
Fig.14 Joint curves of manipulator crossing obstacles

将仿真得到的各阶段的关节角度下发给机械臂的各个关节控制机械臂穿越所设置的障碍环境。实验过程如图 13 所示，可以看出，所设计的超冗余机械臂可以灵活地穿越复杂且狭窄的障碍环境，在穿越过程中没有与障碍物发生碰撞，并且机械臂关节穿越障碍环境的路径与仿真得到的路径几乎一致。采集的机械臂关节角度的变化曲线如图 14 所示，可以看出机械臂的实际运动与仿真得到的关节

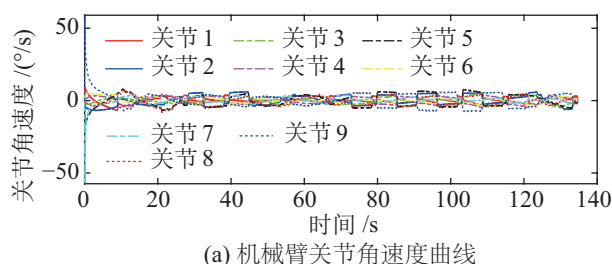
角度的变化情况一致。试验结果表明,相比于传统的机械臂,所设计的超冗余机械臂具有更高的灵活性,可以在复杂的障碍环境中执行任务。



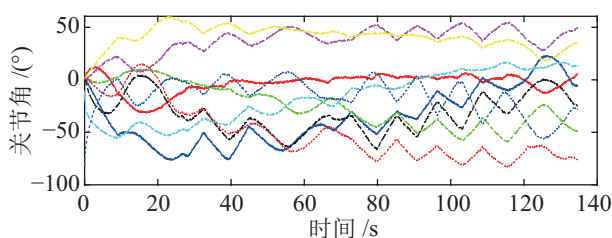
(a) 开始书写字母“O” (b) 书写字母“O”的过程
(c) 开始书写字母“M” (d) 完成字母“M”的书写

图15 机械臂写字实验

Fig.15 The writing experiment of the manipulator



(a) 机械臂关节角速度曲线



(b) 机械臂关节角变化曲线

图16 机械臂写字实验中关节角度和角速度变化曲线

Fig.16 Curves of joint angle and angular velocity in the writing experiment of the manipulator

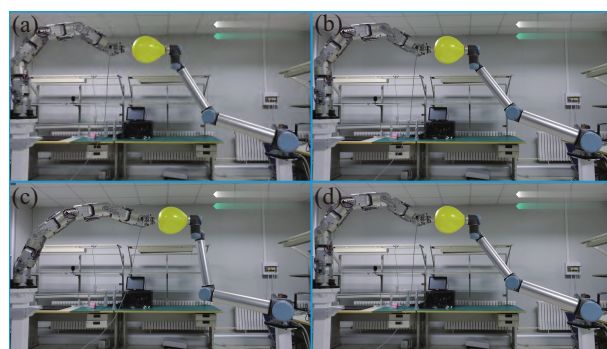
5.2 机械臂写字实验

控制机械臂末端在写字板上写字除了需要合理地规划机械臂末端的运动轨迹外,还需要机械臂末端与写字板之间保持合理的接触力。该实验主要通过阻抗控制算法^[33]以及机械臂的路径规划控制机械臂在写字板上写下“CIOM”4个字母。实验过程如图15所示,可以看出机械臂在写字板上依次清晰地写下了“CIOM”,书写过程中没有出现由于机械臂末端接触力的突变而引起书写不清晰的现象。机械臂关节角和关节速度曲线如图16所示。

该实验说明了所设计的机械臂具有良好的力控制能力与轨迹规划能力。

5.3 机械臂恒力保持实验

为了说明所设计的机械臂具有精准的恒力保持性能,进行了机械臂的恒力保持实验。该实验需要在机械臂末端接触的外界环境发生变化时,主动调整9个关节的角度使机械臂末端压力保持恒定。首先,将一个充满气的气球固定在UR10机械臂的末端,并在所设计的超冗余机械臂的末端安装一个6维力传感器。力传感器型号为OptoForce HEX-70-XE-200N,力采集周期为0.01s。接着,使超冗余机械臂末端接触气球,同时UR10机械臂进行不确定的往复运动,通过阻抗控制算法使超冗余机械臂末端与气球之间的接触力保持恒定。实验过程如图17所示,可以看出,在UR10机械臂进行往复运动的同时,超冗余机械臂也相应地跟随运动。同时,气球的形状在实验过程中并没有发生明显变化。图18显示了实验过程中超冗余机械臂末端沿水平方向的压力值随时间的变化曲线,可以看出超冗余机械臂在跟随UR10机械臂运动的过程中能够始终将末端与气球之间的压力保持在10N左右。在机械臂末端与气球之间产生稳定的接触压力后,最大接触压力误差为1.8N。考虑到压力传感器在测量过程中不可避免地受到噪声的影响,该压力误差值是可以接受的。由此可以看出,通过阻抗控制算法,即使外界环境不断发生变化,所设计的超冗余机械臂末端仍可以精确地保持所给定的压力值不变。



(a) 超冗余机械臂与气球未接触
(b) 超冗余机械臂与气球接触达到稳定状态
(c) UR10机械臂向右运动 (d) UR10机械臂向左运动

图17 机械臂的恒力保持实验

Fig.17 Constant force holding experiment of the manipulator

从以上3个实验可以看出,所设计的超冗余机械臂具有穿越复杂障碍环境的优越性能、良好的力控制能力,并能实现与其他机械臂的协同工作。因此,所设计的机械臂具备在复杂的空间环境中执行各种在轨服务的基本能力。

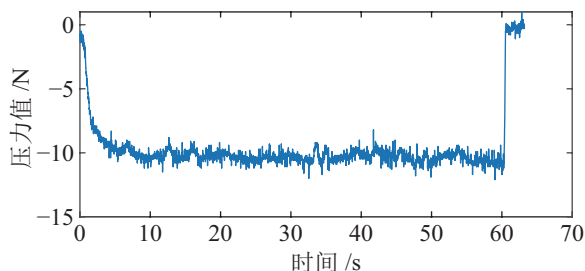


图 18 机械臂末端与气球之间的压力随时间的变化曲线

Fig.18 The change curve of the pressure between the manipulator end-effector and the balloon with time

6 结论 (Conclusion)

本文针对空间在轨服务任务设计了一种 9 自由度超冗余模块化空间机械臂, 该机械臂由 9 个相同的关节模块构成, 具有穿越复杂障碍环境的能力以及良好的力控制能力。对机械臂关节进行了合理的结构设计, 关节内部结构紧凑并能实现最大 $190 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的扭矩输出。机械臂的伺服控制系统采用位置、速度以及电流的三路回环控制, 提高了机械臂的位置控制精度。基于改进的 Bi-RRT 算法和阻抗控制算法, 机械臂在复杂环境中分别进行了避障、写字和力控制实验。实验结果表明, 所设计的模块化超冗余机械臂具有灵活的避障能力和良好的力控制能力, 能够在复杂空间环境下满足在轨服务任务的基本需求。

参考文献 (References)

- [1] Flores-Abad A, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 68: 1-26.
- [2] Diftler M A, Mehling J, Abdallah M E, et al. Robonaut 2 – The first humanoid robot in space[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 2178-2183.
- [3] Kimura S, Takahashi M, Okuyama T, et al. A fault-tolerant control algorithm having a decentralized autonomous architecture for space hyper-redundant manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 1998, 28(4): 521-527.
- [4] Chirikjian G S, Burdick J W. A hyper-redundant manipulator[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1994, 1(4): 22-29.
- [5] Wright C, Buchan A, Brown B, et al. Design and architecture of the unified modular snake robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 4347-4354.
- [6] School of Computer Science, Carnegie Mellon University. CMU's snakebot goes for a swim[EB/OL]. (2021-04-13) [2021-06-10]. <https://www.scs.cmu.edu/news/2021/cmus-snakebot-goes-swim>.
- [7] Wu E C, Hwang J C. Fault-tolerant joint development for the space shuttle remote manipulator system: Analysis and experiment[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 675-684.
- [8] Crane C D III, Duffy J, Carnahan T. A kinematic analysis of the space station remote manipulator system[J]. Journal of Robotic Systems, 1991, 8(5): 637-658.
- [9] Ou M, Wang J, Misra S, et al. On the validation of SPDM task verification facility[J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21(5): 219-235.
- [10] Matsueda T, Kuraoka K, Goma K, et al. JEMRMS system design and development status[C]//National Telesystems Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2002: 391-395.
- [11] Boumans R, Heemskerk C. The European robotic arm for the International Space Station[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1998, 23(1/2): 17-27.
- [12] 刘宏, 蒋再男, 刘业超. 空间机械臂技术发展综述[J]. 载人航天, 2015, 21(5): 435-443.
- [13] Liu H, Jiang Z N, Liu Y C. Review of space manipulator technology[J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(5): 435-443.
- [14] Rupp T, Boge T, Kiehling R, et al. Flight dynamics challenges of the German on-orbit servicing mission DEOS[C]//21st International Symposium on Space Flight Dynamics. Toulouse, France: German Aerospace Agency Toulouse, 2009.
- [15] Piskorz D. On-orbit assembly of space assets: A path to affordable and adaptable space infrastructure[DB/OL]. (2018-05-05) [2021-06-10]. <http://aerospace.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2018/02/OnOrbitAssembly.pdf>.
- [16] Kennedy B, Okon A, Aghazarian H, et al. Lemur IIB: A robotic system for steep terrain access[J]. Industrial Robot, 2005, 33(4): 265-269.
- [17] Jiang H, Wang Z, Jin Y, et al. Hierarchical control of soft manipulators towards unstructured interactions[J]. International Journal of Robotics Research, 2021, 40(1): 411-434.
- [18] Tang L, Wang J, Zheng Y, et al. Design of a cable-driven hyper-redundant robot with experimental validation[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(5). DOI: 10.1177/1729881417734458.
- [19] Tang L, Zhu L M, Zhu X Y, et al. Confined spaces path following for cable-driven snake robots with prediction lookup and interpolation algorithms[J]. Science China: Technological Sciences, 2020, 63(2): 255-264.
- [20] Li B Y, Kan Z Y, Peng H J, et al. Design and research on a continuum manipulator based on tensegrity structure[J]. Robot, 2020, 42(6): 48-58.
- [21] Transteth A A, Leine R I, Glocker C, et al. 3-D snake robot motion: Nonsmooth modeling, simulations, and experiments[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(2): 361-376.
- [22] Transteth A A, Leine R I, Glocker C, et al. Snake robot obstacle-aided locomotion: Modeling, simulations, and experiments[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(1): 88-104.
- [23] Wright C, Buchan A, Brown B, et al. Design and architecture of the unified modular snake robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 4347-4354.
- [24] Mu Z G, Wang H M, Xu W F, et al. Two types of snake-like robots for complex environment exploration: Design, development, and experiment[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(9). DOI: 10.1177/1687814017721854.

- [24] Gallardo J, Orozco H, Rico J M, et al. A new spatial hyper-redundant manipulator[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2009, 25(4/5): 703-708.
- [25] Zhao Y, Lei J, Peng Z, et al. Inverse displacement analysis of a hyper-redundant elephant's trunk robot[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, 15: 397-407.
- [26] Zhao Y, Song X, Zhang X, et al. A hyper-redundant elephant's trunk robot with an open structure: Design, kinematics, control and prototype[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33(6). DOI: 10.1186/s10033-020-00509-4.
- [27] Hu B, Wang Y, Yu J J, et al. Solving kinematics and stiffness of a novel n(2-UPS/PS+RPS) spatial hyper-redundant manipulator[J]. *Robotica*, 2016, 34(10): 2386-2399.
- [28] Hu B, Cui H, Shi D S, et al. Reachable workspace determination for a spatial hyper-redundant manipulator formed by several parallel manipulators[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(2): 869-877.
- [29] Taherifar A, Salarieh H, Alasty A. Kinematic control of a new hyper-redundant manipulator with lockable joints[J]. *Scientia Iranica*, 2013, 20(6): 1742-1752.
- [30] Xu X S, Ananthanarayanan H, Ordonez R. Design and construction of 9-DOF hyper-redundant robotic arm[C]//IEEE Aerospace and Electronics Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 321-326.
- [31] 何俊培, 徐振邦, 于阳, 等. 九自由度超冗余机械臂的设计和测试[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(12z): 80-86.
- He J P, Xu Z B, Yu Y, et al. Design and experimental testing of a 9-DOF hyper-redundant robotic arm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(12z): 80-86.
- [32] Chang J W, Wang W, Kim M S. Efficient collision detection using a dual OBB-sphere bounding volume hierarchy[J]. *Computer-Aided Design*, 2010, 42(1): 50-57.
- [33] 甘亚辉, 段晋军, 戴先中. 非结构环境下的机器人自适应变阻抗力跟踪控制方法[J]. *控制与决策*, 2019(10): 2134-2142.
- Gan Y H, Duan J J, Dai X Z. Robot adaptive variable impedance force tracking control method in unstructured environment[J]. *Control and Decision*, 2019(10): 2134-2142.

作者简介:

- 李艳辉 (1986-), 男, 硕士, 副研究员。研究领域: 机器人控制, 运动规划。
- 霍琦 (1988-), 男, 硕士, 助理研究员。研究领域: 机器人控制, 控制系统集成, 电气自动化设计。
- 李昂 (1988-), 硕士, 助理研究员。研究方向: 机器人智能控制。

(上接第54页)

- [13] Miyasaka M, Haghighipanah M, Li Y M, et al. Modeling cable-driven robot with hysteresis and cable-pulley network friction[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(2): 1095-1104.
- [14] Baek D, Seo J H, Kim J, et al. Hysteresis compensator with learning-based hybrid joint angle estimation for flexible surgery robots[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 6837-6844.
- [15] Porto R A, Nageotte F, Zanne P, et al. Position control of medical cable-driven flexible instruments by combining machine learning and kinematic analysis[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 7913-7919.
- [16] Xu K, Simaan N. Actuation compensation for flexible surgical snake-like robots with redundant remote actuation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 4148-4154.
- [17] Simaan N, Xu K, Wei W, et al. Design and integration of a telerobotic system for minimally invasive surgery of the throat[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2009, 28(9): 1134-1153.
- [18] Yuan H, Zhang W J, Dai Y C, et al. Analytical and numerical methods for the stiffness modeling of cable-driven serpentine manipulators[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 156. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104179.

作者简介:

- 杨太玮 (1994-), 男, 博士生。研究领域: 绳驱超冗余机器人建模与控制。
- 郑旭东 (1988-), 男, 博士。研究领域: 绳索动力学, 多体动力学。
- 徐文福 (1979-), 男, 博士, 教授。研究领域: 精细作业柔性机器人, 空间机器人, 仿生飞行机器人。