

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.06.019

空间站三指末端执行机构建模与操作验证

任蒙飞^{1,2}, 席笑天^{1,2}, 张崇峰³, 侯祺禹^{1,2}, 王宸^{1,2}, 陈金宝^{1,2},
马嘉³, 陈萌³

(1.南京航空航天大学宇航空间机构全国重点实验室,南京 210016; 2.南京航空航天大学深空探测星表机构
技术工信部重点实验室,南京 210016; 3.上海宇航系统工程研究所,上海 201109)

摘要:为满足航天器在轨维护等高风险任务对高可靠操作工具的迫切需求,针对多指机械手在非结构化环境中面临的稳定性与适应性难题,本文提出了一种涵盖静力学、运动学与动力学的多层次耦合建模方法。通过拓扑优化与变刚度原理构建欠驱动手指构型,采用D-H(Denavit-Hartenberg)参数法建立精确捏取与包络抓取的位姿变换模型,并结合牛顿-欧拉方程与拉格朗日动力学理论推导多体耦合动力学方程。仿真与平台实验验证表明:在400 N·mm驱动力矩下,三指接触力稳定于5~6 N范围,旋转阶段末端速度收敛至0.332 m/s,验证了所提方法的动态稳定性与抗干扰能力。本研究成果为精密操作领域提供了理论支撑,并可拓展至月面手术机器人操作等场景。

关键词:动力学建模;静力学建模;运动学建模;仿真验证

中图分类号:V528 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2025)06-1229-13

Modeling and Operation Verification of Three-Finger Manipulator of Space Stations

REN Mengfei^{1,2}, XI Xiaotian^{1,2}, ZHANG Chongfeng³, HOU Qiyu^{1,2}, WANG Chen^{1,2}, CHEN Jinbao^{1,2},
MA Jia³, CHEN Meng³

(1. National Key Laboratory of Aerospace Mechanism, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016,
China; 2. Key Laboratory of Exploration Mechanism of Deep Space Planet Surface, Ministry of Industry and Information
Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. Shanghai Institute of Aerospace
System Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: To meet the urgent need for highly reliable operation tools in high-risk tasks like in-orbit maintenance of spacecraft, a multi-level coupled modeling method is proposed covering statics, kinematics, and dynamics to address the stability and adaptability issues faced by multi-finger manipulators in unstructured environments. The underdriven finger configuration is constructed through topological optimization and the principle of variable stiffness. The pose transformation model for precise pinching and envelope grasping is established by using the D-H (Denavit-Hartenberg) parameter method, and the multi-body coupling dynamic equation is derived by combining the Newton-Euler equation and the Lagrange dynamics theory. Simulation and platform test show that under a driving torque of 400 N·mm, the three-finger contact force stabilizes within the range of 5—6 N, and the speed at the end of the twisting stage converges to 0.332 m/s, verifying

基金项目:国家自然科学基金(U21B6002, 52075242);江苏省自然科学基金(BK20210297);江苏省研究生科研创新计划(KYCX22_0382);宇航空间机构全国重点实验室自研课题(2024ASM-ZY08)。

收稿日期:2025-02-27; **修订日期:**2025-10-09

通信作者:王宸,男,副研究员,E-mail:nuaawangchen@nuaa.edu.cn。

引用格式:任蒙飞,席笑天,张崇峰,等.空间站三指末端执行机构建模与操作验证[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2025,57(6):1229-1241. REN Mengfei, XI Xiaotian, ZHANG Chongfeng, et al. Modeling and operation verification of three-finger manipulator of space stations[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(6):1229-1241.

the dynamic stability and anti-interference ability of the proposed method. Research results provide theoretical support for the field of precision operation and can be extended to scenarios such as the operation of surgical robots on the lunar surface.

Key words: dynamic modeling; statics modeling; kinematic modeling; simulation verification

中国空间站(China space station, CSS)已完成在轨组装并进入全功能运营阶段,标志着中国正式开启空间站长周期驻留与高效应用的新纪元。为保障这一国家级太空实验室持续稳定运行并深度释放其科研潜能,构建在轨自主服务体系已成为空间技术发展的重要战略方向。具备自主作业能力的空间末端工具系统可展现出显著优势,高效执行舱外维护、设备寿命拓展及功能升级等关键任务^[1]。研究空间站末端工具的重要性,在实际应用和理论发展上均有着深远的意义^[2]。末端工具的有效使用可以减少航天员出舱作业的次数和时间,从而降低他们在太空中的风险^[3]。其次,末端工具还可以用于科学试验和样品采集,为科学研究提供重要支持,例如对天体表面的资源分布情况和有价值样品的采集进行分析与深度研究。空间站末端工具的研究和开发推动了机器人技术的快速发展^[4]。为了适应太空环境的特殊要求,末端工具需要具备高精度、高可靠性等特点,促进了机械、控制和计算机等多个学科领域的交叉融合和共同发展。空间站末端工具是航天领域的重要技术之一,其研究和开发直接体现了一个国家的航天实力和国际航天领域的竞争力^[5]。

目前国内外相关技术已经初步成型,在多功能与模块化方面,哈尔滨工业大学航天器技术研究所基于最大抓取空间设计了一种欠驱动末端工具构型^[6]。刘彦恺等^[7]介绍了一种末端指段呈直线轨迹平动的直线平行夹持模式,基于该模式,提出了一种基于霍肯连杆机构实现的直线平夹自适应手指。姚宇航等^[8]利用弹簧设计了一种具有高适应性功能的3指变位机械手。戴景辉等^[9]针对耦合型假肢手适应性差,自适应假肢手运动拟人性差的问题,提出了一种兼具耦合运动功能与自适应运动功能欠驱动手指机构。李小彭等^[10]研究了一种新型的基于变胞原理的欠驱动手指,其拥有两种工作模式。雷翔鹏等^[11]给出两种模块化欠驱动手指的优化设计方法,分析了采用曲柄滑块以及四连杆机构可实现欠驱动,并减少驱动电机数。综上所述,为了功能性更强,机械手通常被设计成欠驱动的方式,尽可能减少驱动电机数量。在高精度定位与抓取方面,王邢波等^[12]针对灵巧手的手指轨迹跟踪问题,设计了一种基于径向基函数神经网络(Radial basis function neural network, RBFNN)的自适应控制系统。文献[13]研究了在测量不确定和不完整的情况下空间机器人捕获非合作卫星的空间

制导和控制方法,讨论了估计机器人控制系统的机载设备所需资源的操作策略。李华忠等^[14]研究了空间站大臂机械手共享控制系统及其仿真,提出了一种自主与遥控相结合的共享控制系统,其次重点研究了基于OpenGL的空间站大臂虚拟仿真环境建模技术,并开发了基于虚拟模型的自主规划算法。综上所述,通常采用学习与数据驱动的方式实现机械手的高精度定位与抓取作业。在智能化与自主化方面,徐潺潺^[15]研究了一种新型扭线驱动器以实现自适应负载边传动比和行程自感知功能;王帅军^[16]针对机器人推动与抓取任务中的自适应控制算法,结合深度学习、强化学习等具身智能技术,赋予机器人技术更多自适应性;童小宝等^[17]为解决多指间的力关联性以及单个手指的多个触觉传感器间的力关联性问题,设计了一种自适应多核稀疏表示方法以提高多指抓取过程中触觉物体识别表现。综上所述,智能化与自主化将是末端工具的未来发展不可避免的方向,其中感知识别是重点关注的领域。

在空间站机械手领域虽然已取得显著进展^[18],但仍存在一些研究空白和未解决的问题,如天基在轨操作:在轨服务、空间碎片清理、在轨维修、抓捕等相关技术^[19]。针对结构设计优化和复杂空间环境下的在轨捕获的方向,本文针对空间站复杂狭小空间作业需求,提出“需求牵引-多场耦合-迭代验证”的创新研究思路:以航天器在轨维护检修等极端工况为需求导向,构建静力学-运动学-动力学深度耦合模型,突破传统机械手“重量-性能”矛盾,形成“三维建模-两域验证-平台应用”方法论,最终通过航天级环境试验与螺栓操作实测验证,实现从基础理论到工程应用的完整技术闭环。提出一种欠驱动自适应三指机械手的设计方案及工作原理以满足当前多样化的空间站工作需求,其次对该机械手的静力学和动力学建模进行详细叙述,然后将对该机械手在较为狭小操作空间的运动路径进行合理规划以满足精细操作的需求,最后通过试验验证该方案的可行性,得到仿真试验数据并总结出结论。本文提出的欠驱动三指机械手设计方案旨在解决在复杂狭小空间环境下,空间机械手在执行捕获任务过程中遇到的质量过大、内部电机等元器件过于冗杂、灵活性不足等问题。

1 静力学建模及特性

多指静力学是研究多指机械手在静态情况下

的力学性能和力学平衡。这涉及多指机械手中各个指(手指、爪子等)的力学特性、关节力矩的分配、末端执行器的力矩需求等多个方面。三指机械手模型如图1所示。

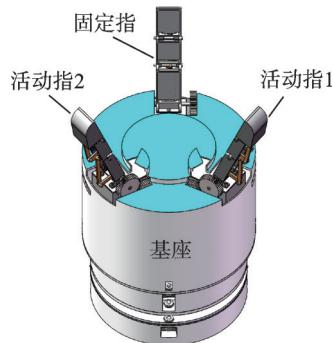


图1 三指机械手模型

Fig.1 Three-finger manipulator model

1.1 力学平衡

对于多指机械手而言,保持整体的力学平衡至关重要。这包括保证各个指头在抓取物体时的稳定性以及整个机械手在静止状态下的平衡。根据前文所述的三指机械手模型可知,该欠驱动机械手3根手指上分别安装有两套四连杆机构。该机构帮助手指对物体进行精确抓取,而抓取的关键部位位于远指节。对于三指由力矩平衡原理^[20]可得

$$\begin{cases} F_1[(l_{11} \sin \theta_{11} + l_{12} \sin \theta_{12} + d_1)] = T_1 \\ F_2[(l_{21} \sin \theta_{21} + l_{22} \sin \theta_{22} + d_2)] = T_2 \\ F_3[(l_{31} \sin \theta_{31} + l_{32} \sin \theta_{32} + d_3)] = T_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_1 、 F_2 、 F_3 分别代表物体与3个手指之间的接触力; l_{11} 、 l_{21} 、 l_{31} 和 l_{12} 、 l_{22} 、 l_{32} 分别代表3个手指的近指节和中指节的长度; θ_{11} 、 θ_{21} 、 θ_{31} 和 θ_{12} 、 θ_{22} 、 θ_{32} 分别代表3根手指的近指节、中指节和远指节与水平面所成的夹角大小; d_1 、 d_2 、 d_3 分别代表接触点到固定指、活动指1以及活动指2的各远指节关节轴心距离; T_1 、 T_2 、 T_3 分别代表三指与物体接触时产生的力矩。

由式(1)可知3根手指的抓取力与驱动力矩有着一一对应的关系。在抓取过程中可通过合理控制驱动力矩来精确控制抓取力。

1.2 关节力矩的分配

计算关节所需力矩,以保持机械手在特定姿势下的稳定性,同时满足夹持物体或执行其他任务的需求。

作用在刚体上的力和力矩构成的六维矢量称为力旋量坐标,表示为

$$F = \begin{bmatrix} f \\ \tau \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $f \in \mathbb{R}^3$ 为力分量; $\tau \in \mathbb{R}^3$ 为力矩分量。力旋量与运动旋量存在对偶关系,可用于速度分析和力学

分析。

多指抓取模型如图2所示,若每个手指和物体都是无摩擦点接触,用 n_i 表示第*i*个点接触的内法线单位矢量,用 r_i 表示该点的矢径,则手指对物体的作用可用六维力旋量表示为

$$F_i = |f_i| \begin{bmatrix} n_i \\ r_i \times n_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |f_i| \\ |\tau_i| \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 f_i 为力旋量的幅值,表示法向作用力的大小。

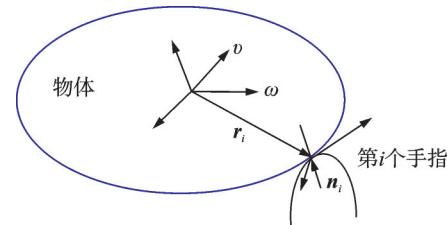


图2 多指抓取模型

Fig.2 Multi-finger grasping model

合成功力旋量在物体坐标系中表示为

$$\sum F_i = \sum f_i \begin{bmatrix} n_i \\ r_i \times n_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

三指机械手抓握如图3所示。要实现抓持的基本条件就是使力保持平衡状态,即作用于物体的合外力为零。力平衡方程将抓持所需要的接触力及所对应的关节力矩建立起联系。该机械手的三指与物体的接触模型可抽象为有摩擦的点接触,即每个接触点有3个独立的力旋量^[21],其表达式为

$$\begin{cases} F_1 = \begin{bmatrix} n_1 \cdot f_1 + m_{11} \cdot \tau_{11} + m_{12} \cdot \tau_{12} \\ (r_1 \times n_1) \cdot f_1 + (r_1 \times m_{11}) \cdot \tau_{11} + (r_1 \times m_{12}) \cdot \tau_{12} \end{bmatrix} \\ F_2 = \begin{bmatrix} n_2 \cdot f_2 + m_{21} \cdot \tau_{21} + m_{22} \cdot \tau_{22} \\ (r_2 \times n_2) \cdot f_2 + (r_2 \times m_{21}) \cdot \tau_{21} + (r_2 \times m_{22}) \cdot \tau_{22} \end{bmatrix} \\ F_3 = \begin{bmatrix} n_3 \cdot f_3 + m_{31} \cdot \tau_{31} + m_{32} \cdot \tau_{32} \\ (r_3 \times n_3) \cdot f_3 + (r_3 \times m_{31}) \cdot \tau_{31} + (r_3 \times m_{32}) \cdot \tau_{32} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

式中: n_1 、 n_2 、 n_3 代表所接触物体在3个接触点的内法线矢量; m_{11} 、 m_{12} 、 m_{21} 、 m_{22} 、 m_{31} 、 m_{32} 代表所接触物体在3个接触点的3对相互垂直的沿切线方向矢量; r_1 、 r_2 、 r_3 分别代表3个接触点的矢径(可以取手



图3 三指机械手抓握

Fig.3 Three-finger mechanical hand grasping

掌坐标系为基准坐标系); f_1, f_2, f_3 分别代表 3 个接触点的法向力; $\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{21}, \tau_{22}, \tau_{31}, \tau_{32}$ 分别代表 3 个接触点的 6 个切向力的大小, 如图 4 所示。

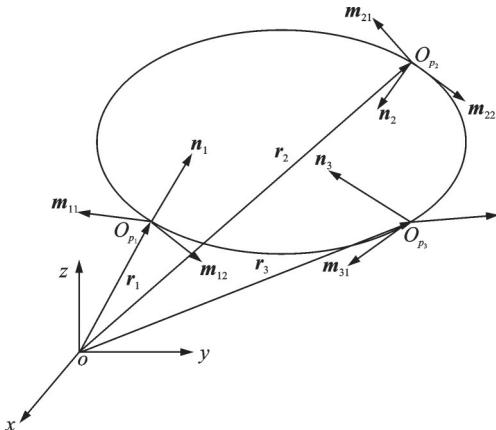


图 4 切向力示意图

Fig.4 Schematic diagram of tangential force

可以将式(5)简记为

$$F = C_1 f_{c1} + C_2 f_{c2} + C_3 f_{c3} \quad (6)$$

式中: C_1, C_2, C_3 为 6×3 的矩阵, 称之为接触矩阵; f_{c1}, f_{c2}, f_{c3} 为三维的矢量, 表示由接触法向力、切向力和力矩组成的力矢量, 称为操作力。

也可以将式(6)写成

$$F = Gf \quad (7)$$

式中: $G = [C_1 \ C_2 \ C_3]$ 称为该机械手的抓取矩阵; $f = [f_1^T \ f_2^T \ f_3^T]^T$ 表示操作力。

1.3 单手指静力学分析

1.3.1 指尖抓取静力学分析

为验证欠驱动灵巧抓手抓取稳定性, 对其进行抓取静力学分析。抓取时抓手方向不定, 为简化分析, 并与仿真验证作对比, 机械手自身质量与杆件互相摩擦力忽略不计^[22]。

单指静力学分析如图 5 所示, l_{xx} ($X \in \{A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K\}$) 为连杆长度, F_{xx} ($X \in \{B, C, E, F, G, H, J\}$, $x \in \{1, 2, 3\}$) 为连杆对连接点的作用力, F_e 为末端指节所受外力, x 为接触点与末端指节连接点竖直方向上的距离, F_T 为驱动力, d 为驱动力与近中心固定点之间的距离。 IG 段和 FB 段上分别有一根弹性系数为 k_1, k_2 的弹簧。

1.3.2 全包络抓取静力学分析

类似地, 对包络抓取进行静力学分析, 其抓取尺寸如图 6 所示。

$$\sum M = 0, \sum F_x = 0, \sum F_y = 0 \quad (8)$$

$$F_{J1} l_{J1} (-\cos(\varphi_1 + \varphi_4 + \theta_8)) + F_{H1x} l_{H1} (-\cos \varphi_1) = \\ \|F_1\| x_1 + F_{H1y} l_{H1} \sin \varphi_1 \quad (9)$$

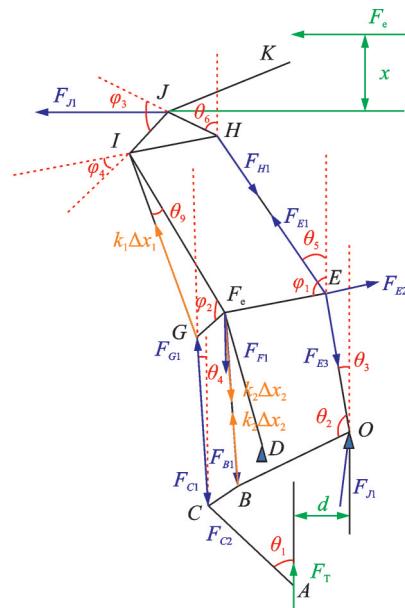


图 5 抓取物体时单手指结构简图

Fig.5 Simple diagram of single-finger structure when grasping an object

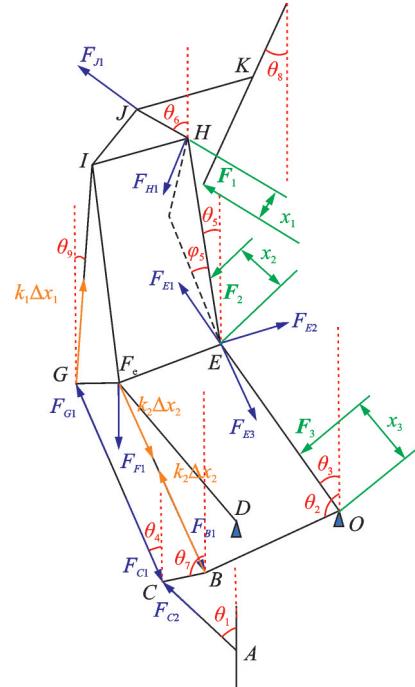


图 6 包络物体时单手指结构简图

Fig.6 Simple diagram of single-finger structure when enveloping an object

2 运动学建模

由于 D-H(Denavit-Hartenberg)理论在机器人机构运动学分析中的普适性与工程价值。为了进行运动学建模, 基于 D-H 矩阵变换理论对欠驱动手指运动学建模。这种建模方法不仅揭示了欠驱动手指在两种抓取模式下的运动传递特性, 更通过参数化的坐标变换矩阵, 为后续的抓取规划、力封闭分析以及控制算法设计奠定了数学基础。

2.1 D-H法则

D-H法则是一种比较简单的通用的建立连杆坐标系法则,通过D-H法则可以对任何机器人的连杆和关节进行建模,然后通过坐标系之间的齐次变换矩阵来描述相邻连杆之间的位置关系^[23]。

运用D-H法则建立连杆坐标系有如下规定:

- (1) z_i 的坐标轴方向沿着*i+1*关节轴。
- (2) x_i 轴的方向沿着 z_{i-1} 轴和 z_i 轴的公垂线方向,正方向由 z_{i-1} 指向 z_i 。

(3) y_i 轴的方向按照右手定则确定。

(4) 建立了连杆坐标系以后两个相坐标系之间的位置关系有如下参数进行描述: a_i 为两个关节轴 z_i 和 z_{i-1} 之间的最小距离即共法线长度; d_i 为公垂线 a_{i-1} 和 a_i 之间的距离; α_i 为 z_{i-1} 和 z_i 之间的夹角,绕 x_i 轴逆时针为正值; θ_i 为 x_{i-1} 和 x_i 之间的夹角,以绕 z_{i-1} 逆时针旋转为正值。

通过旋转公式和平移公式可以推导第*i*个坐标系相对于第*i-1*个坐标系的齐次变化矩阵

$$T_i^{i-1} = \text{Rot}(z_{i-1}, \theta_i) \text{Trans}(z_{i-1}, d_i)$$

$\text{Trans}(x_i, \alpha_i) \text{Rot}(x_i, \alpha_i) =$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 a_i 、 α_i 、 d_i 、 θ_i 分别为连杆的长度、连杆的偏置距离、连杆的转角和关节角。这几个参数就是用来描述相邻两个连杆之间空间位置关系的D-H参数。

2.2 精确捏取运动学分析

欠驱动手指进行精确捏取时只有远指节和物体进行接触,而其他两个指节由于弹簧和机械限位的作用组成一个刚性体,因此在建模时将两个指节看成是一个整体。运用D-H法则建立精确捏取模型,如图7所示,其D-H参数如表1所示。

将表1中D-H参数代入式(10)可以得到各个关节的相邻指节之间的齐次变换。可以得到近指节和远指节相对于基坐标系的变换矩阵为

$$T_3^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 = \begin{bmatrix} c_1 s_2 c_3 + c_1 c_2 s_3 & c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3 & s_1 & (l_1 + l_2) c_1 s_2 \\ s_1 s_2 c_3 + s_1 c_2 s_3 & s_1 s_2 s_3 - s_1 c_2 c_3 & -c_1 & (l_1 + l_2) s_1 s_2 \\ c_2 c_3 - s_2 s_3 & s_2 c_3 + c_2 s_3 & 0 & d + (l_1 + l_2) c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $c_1 = \cos \theta_1$, $c_2 = \cos \theta_2$, $c_3 = \cos \theta_3$, $s_1 = \sin \theta_1$, $s_2 = \sin \theta_2$, $s_3 = \sin \theta_3$ 。在不考虑手指宽度的情况下,假设手指关节上某一任意点 Q 点,其在某一连

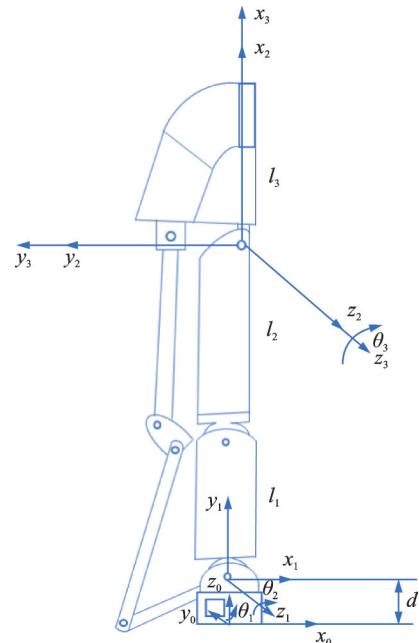


图7 精确捏取单指建模

Fig.7 Precisely pinch single finger for modeling

表1 精确捏取D-H参数

Table 1 Precisely pinch D-H parameter

关节	a_i	d_i	θ_i	α_i
1	0	d	θ_1	$\pi/2$
2	$l_1 + l_2$	0	$\pi/2 - \theta_2$	0
3	0	0	$-\theta_3$	0

杆参考坐标系 $x_i y_i z_i$ ($i=0, 1, 2, 3$)中的坐标为 $\mathbf{Q} = [m_i \ 0 \ 0 \ 1]^T$,其在固定参考坐标系 $x_0 y_0 z_0$ 中的坐标为 $\mathbf{Q}_i = [Q_{xi} \ Q_{yi} \ Q_{zi} \ 1]^T$ ($i=0, 1, 2, 3$)。由上面求得的变换矩阵可以得到

$$\mathbf{Q}_i = T_i^0 \mathbf{Q}_0 \quad (12)$$

由此可以得到欠驱动手指精确捏取时近指节和中指节上任意点在固定参考系 $x_0 y_0 z_0$ 中的坐标为

$$\begin{bmatrix} Q_{x2} \\ Q_{y2} \\ Q_{z2} \\ 1 \end{bmatrix} = T_2^0 \begin{bmatrix} m_2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2 c_1 s_2 + (l_1 + l_2) c_1 s_2 \\ m_2 s_1 s_2 + (l_1 + l_2) s_1 s_2 \\ m_2 c_2 + d + (l_1 + l_2) c_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

远指节上任意点在固定参考系 $x_0 y_0 z_0$ 中的坐标为

$$\begin{bmatrix} Q_{x3} \\ Q_{y3} \\ Q_{z3} \\ 1 \end{bmatrix} = T_3^0 \begin{bmatrix} m_3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_3 (c_1 s_2 c_3 + c_1 c_2 s_3) + (l_1 + l_2) c_1 s_2 \\ m_3 (s_1 s_2 c_3 + s_1 c_2 s_3) + (l_1 + l_2) s_1 s_2 \\ m_3 (c_2 c_3 - s_2 s_3) + d + (l_1 + l_2) c_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.3 包络抓取运动学分析

欠驱动手指在包络抓取时手指的3个关节都参与抓取,因此其建模与精确捏取时略有不同。运用D-H法则建立包络抓取模型,如图8所示,其D-H参数如表2所示。

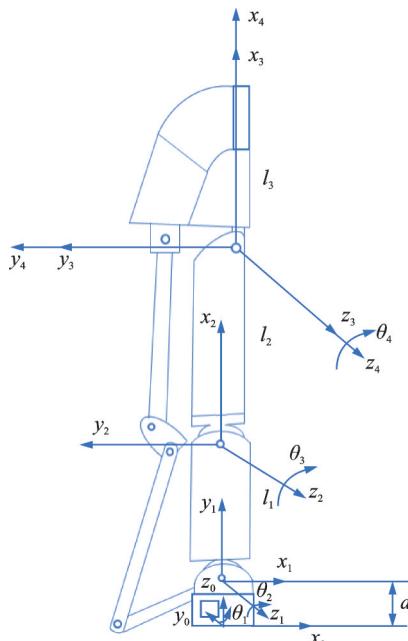


图8 包络抓取单指建模

Fig.8 Envelope grasping single-finger modeling

表2 包络抓取D-H参数

Table 2 Envelope grasping D-H parameter

关节	a_i	d_i	θ_i	α_i
1	0	d	θ_1	$\pi/2$
2	l_1	0	$\pi/2-\theta_2$	0
3	l_2	0	$-\theta_3$	0
4	0	0	$-\theta_4$	0

同样运用表2所列出的D-H参数,得到手指各个相邻关节之间坐标系变换的齐次变换矩阵为

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & \sin \theta_4 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

同样可以得到包络抓取时近指节、中指节和远指节坐标系相对于基坐标系的变换矩阵

$$T_4^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 = \begin{bmatrix} c_4 p_1 + s_4 p_2 & s_4 p_1 - c_4 p_2 & s_1 & l_2 p_1 + l_1 c_1 s_2 \\ c_4 p_3 + s_4 p_4 & s_4 p_3 - c_4 p_4 & -c_1 & l_2 p_3 + l_1 s_1 s_2 \\ c_4 p_5 - s_4 p_6 & s_4 p_5 + c_4 p_6 & 0 & d + l_2 p_5 + l_1 c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $c_4 = \cos \theta_4$, $s_4 = \sin \theta_4$, $p_1 = c_1 s_2 c_3 + c_1 c_2 s_3$, $p_2 = c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3$, $p_3 = s_1 s_2 c_3 + s_1 c_2 s_3$, $p_4 = s_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 s_3$

$$s_1 s_2 s_3, p_5 = c_2 c_3 - s_2 s_3, p_6 = s_2 c_3 + c_2 s_3$$

同样假设手指关节上任意一点 Q 在某一连杆参考坐标系 $x_i y_i z_i$ ($i=0,1,2,3,4$)中的坐标为 $Q = [m_i \ 0 \ 0 \ 1]^T$ ($i=0,1,2,3,4$)其在固定参考坐标系 $x_0 y_0 z_0$ 中的坐标为 $Q_i = [Q_{xi} \ Q_{yi} \ Q_{zi} \ 1]^T$ ($i=0,1,2,3,4$)。由上面求得的变换矩阵可以得到

$$Q_i = T_i^0 Q_0 \quad (17)$$

由此可以得到欠驱动手指包络抓取时近指节和中指节上任意点在固定参考系 $x_0 y_0 z_0$ 中的坐标为

$$\begin{bmatrix} Q_{x2} \\ Q_{y2} \\ Q_{z2} \\ 1 \end{bmatrix} = T_2^0 \begin{bmatrix} m_2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2 c_1 s_2 + l_1 c_1 s_2 \\ m_2 s_1 s_2 + l_1 s_1 s_2 \\ m_2 c_2 + d + l_1 c_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

远指节上任意点在固定参考系 $x_0 y_0 z_0$ 中的坐标为

$$\begin{bmatrix} Q_{x3} \\ Q_{y3} \\ Q_{z3} \\ 1 \end{bmatrix} = T_3^0 \begin{bmatrix} m_3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_3 p_1 - l_2 p_1 + l_2 c_1 s_2 \\ m_3 p_3 + l_2 p_3 + l_1 s_1 s_2 \\ m_3 p_5 + d + l_2 p_5 + l_1 c_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

3 动力学建模

机械手动力学建模主要采用牛顿欧拉法和拉格朗日动力学法。相比于牛顿欧拉法,拉格朗日动力学法的优势在于直接使用广义坐标描述系统的位形,无需预先处理约束条件;通过能量函数推导出运动方程,避免了复杂的矢量运算。总结来说,拉格朗日动力学法适用于多自由度的机械系统分析,并且系统性、简洁性突出。

该三指机械手的动力学建模部分采用拉格朗日动力学方程(11个自由度)。并以其中一个手指为例,首先通过计算手指的每个指节的质心对应的雅可比矩阵来推导出每个手指相对参考坐标系原点的雅可比矩阵,随后可以得到三指节机械手指的惯性矩阵等相关状态量。而该机械手所建立的广义拉格朗日动力学方程中的离心力和科氏力项因为该机械手所面对的狭小的工作环境而当成微小量可忽略不计,所以只需列出惯性量、重力项和外力矩项即可完成动力学建模。

3.1 三指机械手动力学建模

以其中一个固定指为例,图9所示为固定指在平面内运动,其广义坐标向量为 $q = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ 。令 l_1, l_2, l_3 分别为3根连杆质心到关节轴的距离, $m_{l_1}, m_{l_2}, m_{l_3}$ 为3根连杆的质量, $I_{l_1}, I_{l_2}, I_{l_3}$ 分别为相对于3根连杆的转动惯量, a_1, a_2, a_3 分别为3根杆长。

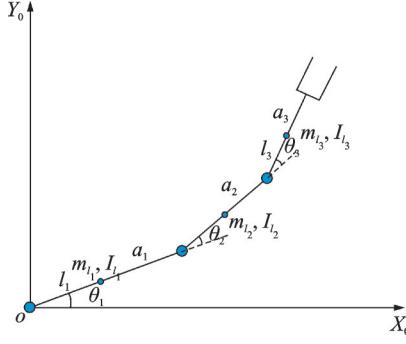


图9 模型简化

Fig.9 Model simplification

首先计算每个连杆质心对应的雅可比矩阵

$$\mathbf{J}_{p_1}^{l_1} = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 \\ l_1 c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{J}_{p_1}^{l_2} = \begin{bmatrix} -a_1 s_1 - l_2 s_{12} \\ a_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{J}_{p_2}^{l_2} = \begin{bmatrix} -l_2 s_{12} \\ l_2 c_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{J}_{p_1}^{l_3} = \begin{bmatrix} -a_1 s_1 - a_2 s_{12} - l_3 s_{123} \\ a_1 c_1 + a_2 c_{12} + l_3 c_{123} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$, $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$, $s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$, $c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ 。

$$\mathbf{J}_{p_2}^{l_3} = \begin{bmatrix} -a_2 s_{12} - l_3 s_{123} \\ a_2 c_{12} + l_3 c_{123} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{J}_{p_3}^{l_3} = \begin{bmatrix} -l_3 s_{123} \\ l_3 c_{123} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

综上所述,可得

$$\mathbf{J}_p^{l_1} = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & 0 & 0 \\ l_1 c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{J}_p^{l_2} = \begin{bmatrix} -a_1 s_1 - l_2 s_{12} & -l_2 s_{12} & 0 \\ a_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{J}_p^{l_3} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{p_{11}}^{l_3} & \mathbf{J}_{p_{12}}^{l_3} & \mathbf{J}_{p_{13}}^{l_3} \\ \mathbf{J}_{p_{21}}^{l_3} & \mathbf{J}_{p_{22}}^{l_3} & \mathbf{J}_{p_{23}}^{l_3} \\ \mathbf{J}_{p_{31}}^{l_3} & \mathbf{J}_{p_{32}}^{l_3} & \mathbf{J}_{p_{33}}^{l_3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \mathbf{J}_{p_{11}}^{l_3} = -a_1 s_1 - a_2 s_{12} - l_3 s_{123} \\ \mathbf{J}_{p_{12}}^{l_3} = -a_2 s_{12} - l_3 s_{123} \\ \mathbf{J}_{p_{13}}^{l_3} = -l_3 s_{123} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{J}_{p_{21}}^{l_3} = a_1 c_1 + a_2 c_{12} + l_3 c_{123} \\ \mathbf{J}_{p_{22}}^{l_3} = a_2 c_{12} + l_3 c_{123} \\ \mathbf{J}_{p_{23}}^{l_3} = l_3 c_{123} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{J}_{p_{31}}^{l_3} = \mathbf{J}_{p_{32}}^{l_3} = \mathbf{J}_{p_{33}}^{l_3} = 0 \end{cases}$$

相对于O点的雅各比矩阵,则可得

$$\mathbf{J}_0^{l_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{J}_0^{l_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{J}_0^{l_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 \\ s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 \\ s_{123} & c_{123} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

由此可计算惯性矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(\mathbf{q}) = & \sum_{i=1}^3 (m_{l_i} (\mathbf{J}_p^{l_i})^\top \mathbf{J}_p^{l_i} + (\mathbf{J}_0^{l_i})^\top \mathbf{R}_i \mathbf{I}_{l_i} \mathbf{R}_i^\top \mathbf{J}_0^{l_i}) = \\ & (m_{l_1} (\mathbf{J}_p^{l_1})^\top \mathbf{J}_p^{l_1} + m_{l_2} (\mathbf{J}_p^{l_2})^\top \mathbf{J}_p^{l_2} + m_{l_3} (\mathbf{J}_p^{l_3})^\top \mathbf{J}_p^{l_3} + \\ & (\mathbf{J}_0^{l_1})^\top \mathbf{R}_1 \mathbf{I}_{l_1} \mathbf{R}_1^\top \mathbf{J}_0^{l_1} + (\mathbf{J}_0^{l_2})^\top \mathbf{R}_2 \mathbf{I}_{l_2} \mathbf{R}_2^\top \mathbf{J}_0^{l_2} + \\ & (\mathbf{J}_0^{l_3})^\top \mathbf{R}_3 \mathbf{I}_{l_3} \mathbf{R}_3^\top \mathbf{J}_0^{l_3}) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (35)$$

在机械手手指常规速度运动下,离心力和科氏力相比于惯性力和重力而言影响较小,一般可以忽略。

对于重力项,有 $\mathbf{g}_0 = [0 \ -g \ 0]^\top$, 重力沿Y轴负方向,可得

$$\begin{cases} \mathbf{g}_1(\mathbf{q}) = -\sum_{j=1}^n m_{l_j} \mathbf{g}_0^\top \mathbf{J}_{p_j}^{l_j}(\mathbf{q}) = m_{l_1} g l_1 c_1 + \\ \quad m_{l_2} g [a_1 c_1 + l_2 c_{12}] + \\ \quad m_{l_3} g [a_1 c_1 + a_2 c_{12} + l_3 c_{123}] \\ \mathbf{g}_2(\mathbf{q}) = -\sum_{j=1}^n m_{l_j} \mathbf{g}_0^\top \mathbf{J}_{p_2}^{l_j}(\mathbf{q}) = m_{l_2} g l_2 c_{12} + \\ \quad m_{l_3} g [a_2 c_{12} + l_3 c_{123}] \\ \mathbf{g}_3(\mathbf{q}) = -\sum_{j=1}^n m_{l_j} \mathbf{g}_0^\top \mathbf{J}_{p_3}^{l_j}(\mathbf{q}) = m_{l_3} g l_3 c_{123} \end{cases} \quad (36)$$

最后可得动力学方程

$$\begin{cases} (b_{11} \ddot{\theta}_1 + b_{12} \ddot{\theta}_2 + b_{13} \ddot{\theta}_3) + \mathbf{g}_1(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_1 \\ (b_{21} \ddot{\theta}_1 + b_{22} \ddot{\theta}_2 + b_{23} \ddot{\theta}_3) + \mathbf{g}_2(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_2 \\ (b_{31} \ddot{\theta}_1 + b_{32} \ddot{\theta}_2 + b_{33} \ddot{\theta}_3) + \mathbf{g}_3(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_3 \end{cases} \quad (37)$$

式(20~27)中: $b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{31}, b_{32}, b_{33}, \mathbf{g}_1(\mathbf{q}), \mathbf{g}_2(\mathbf{q}), \mathbf{g}_3(\mathbf{q})$ 由式(35~36)给出。

3.2 系统的动力学建模

该部分将对三指机械手及被抓物体所构成的系统建立系统动力学模型^[24]。该系统中机械手具有 3 个手指和 11 个自由度^[25], 其多体动力学方程可表示为

$$M_h(\theta)\ddot{\theta} + C_h(\dot{\theta})\dot{\theta} + g_h(\theta, \dot{\theta}) = \tau_m - \tau_f + \tau_e \quad (38)$$

$$M_0(x_0)\ddot{x}_0 + C_0(x_0, \dot{x}_0)\dot{x}_0 + g_0(x_0, \dot{x}_0) = w_e + w_f \quad (39)$$

式中: $M_h(\theta) \in \mathbb{R}^{11 \times 11}$ 为机械手的对称正定惯量矩阵; $M_0(x_0) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 为抓取目标物体的对称正定惯量矩阵; $C_h(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{11}$ 为机械手的离心项; $C_0(x_0, \dot{x}_0) \in \mathbb{R}^6$ 为抓取目标物体的离心力项; $g_h(\theta) \in \mathbb{R}^{11}$ 为机械手的重力项; $g_0 \in \mathbb{R}^6$ 为目标物体的重力项; $\theta = [\theta_{f1}, \theta_{f2}, \theta_{f3}] \in \mathbb{R}^{11}$ 为 3 个手指的广义位置; $x_0 \in \mathbb{R}^6$ 为物体层空间坐标系原点在基座坐标系中的位置; $\tau_m \in \mathbb{R}^{11}$ 为广义驱动器力矩, 即输入控制; τ_e 表示在关节空间的机械手广义外力; $w_e \in \mathbb{R}^6$ 表示施加在被抓取物体之上的广义外力; τ_f 表示手指和物体的广义接触力和力矩; w_f 指施加在被抓物体上的广义接触力。

4 运动学和动力学仿真

为了验证前述精细推导的运动学与动力学模型, 本研究针对 M48 螺钉(图 10)的抓取与旋拧操作开展了多体动力学仿真。在 ADAMS 软件仿真环境中, 通过设定固定副、旋转副及平面副的摩擦参数与刚度特性, 模拟了机械手指与六角螺栓的交互过程。该仿真结果不仅印证了理论模型对实际工况的适应性, 更通过量化接触力变化规律, 为电机制控策略的制定提供了关键数据支撑, 确保在精密装配场景下实现稳定可靠的力觉控制, 模拟了机械手指与六角螺栓的交互过程, 当施加 400 N·mm 驱动力矩时, 固定指及两个旋转指的远指节在完成抓握动作后, 均以 0.332 m/s 的恒定速度参与旋拧, 且各指节速度曲线高度同步, 验证了机构运动的协调性。

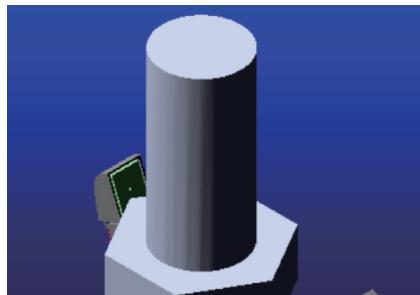


图 10 M48 螺钉示意图

Fig.10 Schematic diagram of M48 screw

为了更好地验证上述精细推导过程, 现采用机械手对 M48 螺钉的操作, 对过程进行仿真^[26]。参数如表 3 所示。

表 3 ADAMS 中各参数设置
Table 3 Parameter settings in ADAMS

连接条件 1	连接条件 2	参数	摩擦力模型和参数
固定副	基座和地面	刚度:	静摩擦系数: 0.3
旋转副	指节和轴	1.0 × 10 ⁵ N/mm	

连接条件 1	连接条件 2	参数	摩擦力模型和参数
平面副	物体和指节	力指数: 1.5	动摩擦系数: 0.2

4.1 运动学仿真

当被抓取的六角螺栓的尺寸为 M48 时, 施加大小为 400 N·mm 的力矩, 分析手指末端的位移、速度曲线图。

当驱动力矩的大小为 400 N·mm, 螺栓尺寸为 M48 时固定指相对于固定坐标系的位置如图 11 所示, 图 11 中位置逐渐增加, 斜率几乎不变。可见过程中速度平稳波动不大。图 12 表示时固定指的远指节在仿真中的速度, 抓握完成后速度趋于固定值 0.332 m/s, 该值表示在旋拧过程中远指节的速度。位置和速度的图像对照发现在 0~0.02 s 有波动, 明显波动较大位置表明此时机械手刚开始运行。

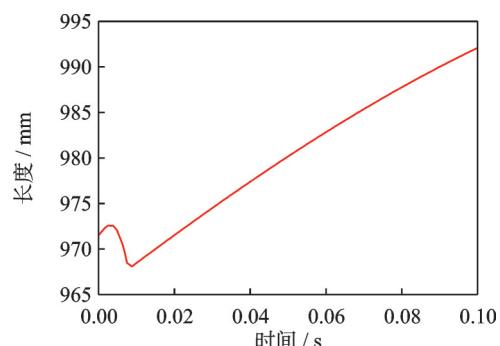


图 11 固定指位置
Fig.11 Position of fixed finger

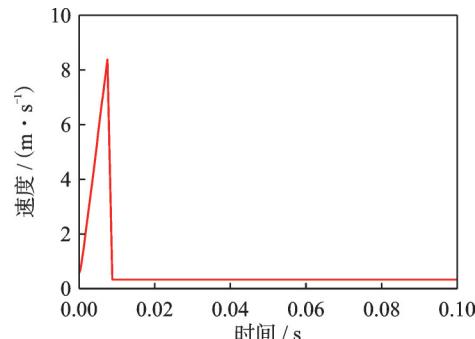


图 12 固定指速度
Fig.12 Velocity of fixed finger

图13表示在整个仿真运动期间旋转指1相对于固定坐标系的位置变化情况,同样在过程后段速度运行较为平缓。由图14可知在运动过程中旋转指1的最大速度,在旋拧过程中远指节的速度与固定指相同都为0.332 m/s。

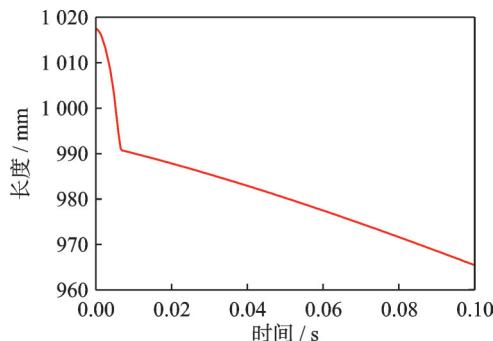


图13 旋转指1位置

Fig.13 Position of moveable finger 1

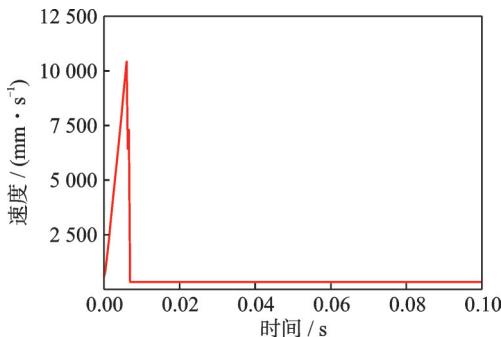


图14 旋转指1速度

Fig.14 Velocity of moveable finger 1

图15表示在整个仿真运动期间旋转指2相对于固定坐标系的位置变化情况。图16则表示在运动过程中旋转指2的远指节速度变化情况,可知最大速度与旋转指1的最大速度相差不大。在旋拧过程中远指节的速度与固定指、旋转指1相同都为0.332 m/s。

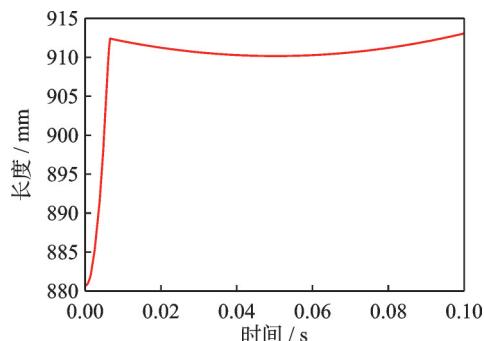


图15 旋转指2位置

Fig.15 Position of moveable finger 2

本文分析了在六角螺栓尺寸一定时驱动力矩下手指远指节位置和速度的变化情况。分析仿真

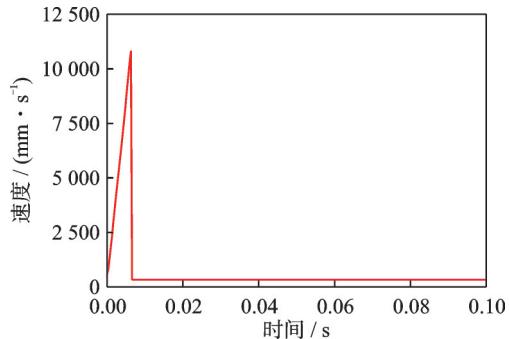


图16 旋转指2速度

Fig.16 Velocity of moveable finger 2

过程中的曲线图可以得到力矩对远指节的位姿变化并没有太大的影响,当完成抓握动作后远指节的运动速度都会和整个机构旋拧时的运动速度相同。

4.2 动力学仿真

在动力学仿真的基础上获得不同驱动力矩下机械手指末端与六角螺栓之间的受力情况。当六角螺栓的尺寸为M48时,分别施加大小为400 N·mm的驱动力矩,分析手指末端接触力曲线图。

当驱动力矩大小为400 N·mm时分析图17~19可以得出:3个手指远指节与六角螺栓直接的接触力是不稳定的,但是3个力的变化范围都是稳定在5~6 N之间的。

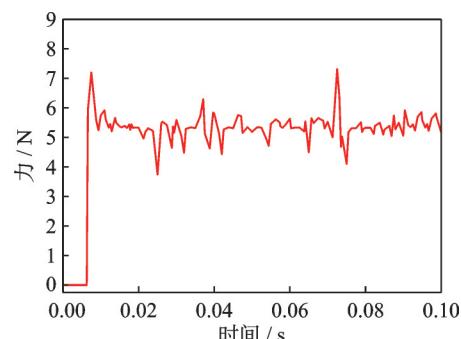


图17 固定指与六角螺栓接触力

Fig.17 Contact force between fixing finger and hexagonal bolt

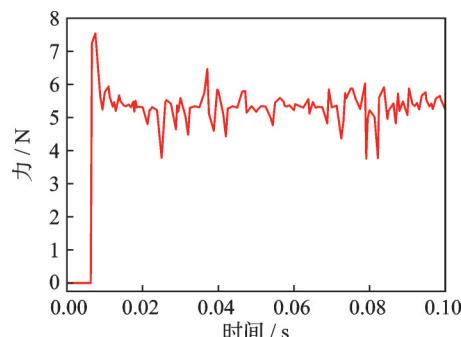


图18 旋转指1与六角螺栓接触力

Fig.18 Contact force between moveable finger 1 and hexagonal bolt

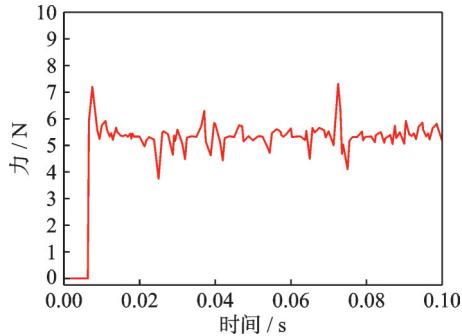


图 19 旋转指 2 与六角螺栓接触力

Fig.19 Contact force between moveable finger 2 and hexagonal bolt

对上述 3 种不同的工况所产生的接触力求平均可以得到:当驱动力矩为 400 N·mm 时 3 个手指远指节与六角螺母之间的接触力为 5.354 N。

在基于所设置的模型信息下,主要分析了在六角螺栓的尺寸确定为 M48 的情况下,分别施加大小分别为 400 N·mm 的驱动力矩,机构在抓握、旋拧六角螺栓时手指远指节与螺栓之间产生的接触力大小的变化情况。分析仿真过程得到的接触力曲线图,由接触力曲线可见接触力在 5 N 附近波动,对电机控制提供了指导作用,确保控制接触力更稳定,有助于操控精密零件。

5 实验验证

在完成以上理论分析后,根据三维建模软件上的模型用 3D 打印机打印出如图 20 所示的电机、指节、外壳、轴承和螺钉螺母等关键的元器件,然后进行组装,将各个元件匹配对应,尤其是将电机与传感器安装到位^[27]。整个机械手的实物包括其中的齿轮、3 个手指、相机、力传感器和位置传感器,轴承^[28]等关键部件,如图 21 所示。



图 20 组装所需的主要零件

Fig.20 Main parts required for assembly

视觉传感器用来采集各个目标图像,距离传感器用来帮助判断工具与目标之间的距离,力传感器用来采集工具与目标之间的接触力。传感器参数设置如表 4~6 所示。

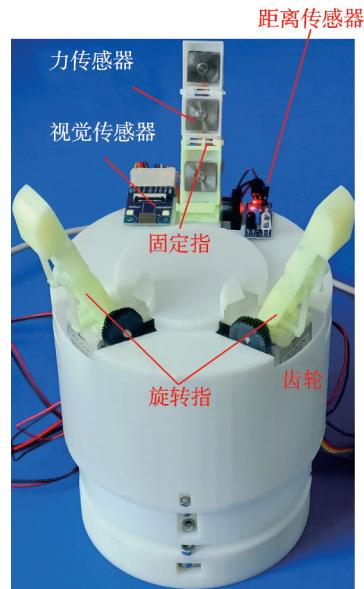


图 21 机构整体模型

Fig.21 Overall model of the institution

表 4 视觉传感器参数

Table 4 Parameters of vision sensor

传感器种类	视觉
型号	OV2640
像素	1 600 × 1 200
镜头焦距/mm	3.6
输入电压/V	3.3
镜头视角/(°)	78

表 5 距离传感器参数

Table 5 Parameters of distance sensor

传感器种类	距离
型号	TOF050C
测距芯片	VL6180
量程/cm	50
输入电压/V	3.3
工作温度/(°)	25

表 6 力传感器参数

Table 6 Parameters of force sensor

传感器种类	力
型号	HYD2
量程	50 N
精度/%	±0.3
输入电压/V	12
响应时间/ms	5

实验室进行了机械手姿态的多次调整,并对一些较为常见的物体进行了抓握训练。如图 22 所示,分别进行对圆柱体、长方体和球体的简单抓握动作,同时也进行了将固定指与两个活动指呈平行位置、3 个指分别相对呈 60° 的位置的调整试验,表现效果良好,均符合预期要求。

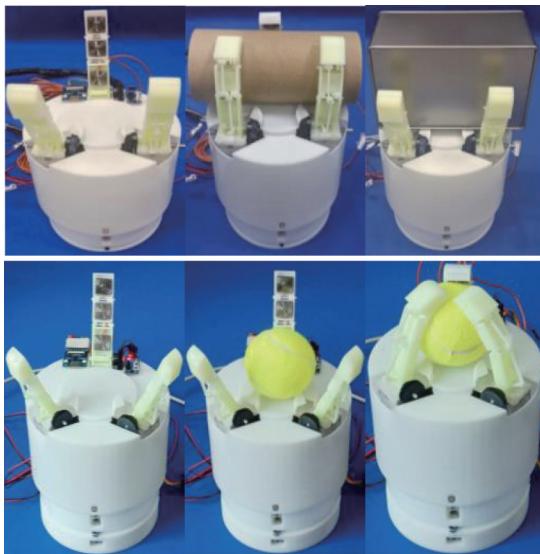


图22 状态调整与操作

Fig.22 Status adjustment and operation

针对多种型号的螺栓夹持试验进行分析,如图23和24所示。



图23 六角螺栓尺寸:M30、M36

Fig.23 Hexagonal bolt dimensions: M30, M36

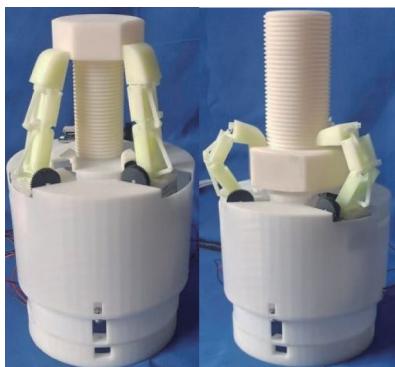


图24 六角螺栓尺寸:M42、M48

Fig.24 Hexagonal bolt dimensions: M42, M48

利用HYD2力传感器对夹紧力和抓取力进行测试,如图25所示。为了验证机械手对图26(a~d)所示不同直径圆柱体的抓取力,将驱动输入设置为距固定指近端轴400 mm。由于每种情况的自适应夹持操作,中间指骨会接触到物体。比较了固定手指中指骨的试验力和模拟力。

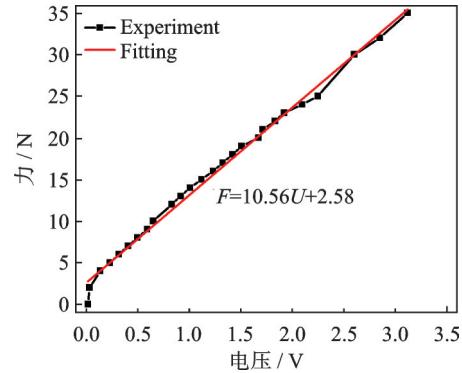


图25 力传感器测试

Fig.25 Force sensor testing

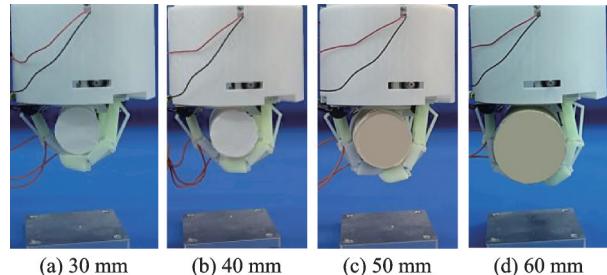


图26 抓握不同直径圆柱体

Fig.26 Grasp cylinders of different diameters

在稳定抓取不同直径的气缸后,固定指中指骨获得的接触力如表7所示。在试验中,传感器的精度为3%,为方便,选用两位有效数字。通过对模拟接触力和试验接触力的结果可以看出,不同直径圆柱形传感器的自适应抓取测得的接触力要小于仿真得到的接触力。由于试验中的摩擦比模拟理想状态下的误差要大,因此两种数据的差异是不可避免的。然而,两者之间的误差小于系统性能的7%,可以认为结果相对准确。

表7 不同直径圆柱体与工具之间的接触力

Table 7 Contact force between cylinders of different diameters and tools

物体直径/mm	仿真力/N	试验力/N
30	6.53	6.12
40	6.13	6.04
50	5.31	5.25
60	4.32	4.12

6 结 论

本文针对空间站复杂任务需求,设计并研发了一种欠驱动自适应三指机械手,通过理论建模、仿真分析与试验验证的系统性研究,形成了具有原创性技术突破和工程应用价值的成果。研究从多学科交叉视角深化了欠驱动机械手的基础理论,并通过高精度建模与验证为空间站末端工具的轻量化、

智能化发展提供了关键技术支撑。主要创新点如下:

(1) 理论建模与方法创新层面,构建了静力学-运动学-动力学一体化分析框架,提出基于虚功原理的接触力分配算法与三维刚度映射模型,实现了关节空间、接触空间与物体直角空间的非线性映射关系解耦。通过拉格朗日动力学方程优化,建立了惯性矩阵与重力项的显式表达式。以 M48 螺栓操作为例,验证了模型在复杂系统中的适用性。当驱动力矩处于 380~420 N·mm 时,系统具有全局渐近稳定性。该判据为空间站机械手的控制参数优化提供了量化指标,突破了传统经验设计局限。

(2) 技术验证与应用拓展层面,集成 ADAMS 多体动力学模块与 MATLAB 控制算法,以驱动力矩 400 N·mm 为典型工况,验证了理论模型在动态抓取场景下的预测精度。在狭小空间螺栓旋拧任务中,机械手实现 0.332 m/s 稳定旋拧速度。

(3) 通过对不同直径圆柱体抓取实验数据与仿真结果,发现接触力实测值较仿真值平均偏低 6.8%,原因为:①理论建模采用理想库伦摩擦模型,而实际工况中存在粘滑摩擦与非线性阻尼效应,导致接触力被低估;②3D 打印构件的表面粗糙度及关节间隙引发附加形变,使实际接触刚度低于设计值;③HYD2 力传感器响应时间导致峰值力捕捉存在滞后,尤其在高速抓取阶段产生测量偏差。实验揭示了接触力误差与物体直径呈负相关规律,当直径从 30 mm 增至 60 mm 时,误差系数从 6.3% 降至 3.6%,这为狭小空间操作时的力控策略提供了重要参考,大尺寸物体需预留更大安全裕量。

上述成果突破了传统末端工具“质量-性能”矛盾,形成的“三维建模-两域验证-平台应用”方法论,可推广至月面采样机械臂、在轨装配机器人等场景,为深空探测任务提供了关键技术支撑。

参考文献:

- [1] WANG X, ZHANG Q, WANG W. Design and application prospect of China's Tiangong space station[J]. Space: Science & Technology, 2023, 3: 1-20.
- [2] 薛智慧,刘金国.空间机械臂操控技术研究综述[J].机器人,2022,44(1): 107-128.
XUE Zhihui, LIU Jinguo. A review of control technology for space robotic arms[J]. Robot, 2022, 44(1): 107-128.
- [3] XUE Z, LIU J, WU C, et al. Review of in-space assembly technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(11): 21-47.
- [4] DING X, WANG Y, WANG Y, et al. A review of structures, verification, and calibration technologies of space robotic systems for on-orbit servicing[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(3): 462-480.
- [5] WANG Y, LI D, HU C, et al. Review of research on the Chinese space station robots[J]. Intelligent Robotics And Applications, 2019, 11743: 423-430.
- [6] HU B, CHEN F, HAN L, et al. Design and ground verification of space station manipulator control method for orbital replacement unit Changeout[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018, 4271035: 20181-20188.
- [7] 刘彦恺,张文增.弹性霍肯连杆直线平夹自适应机器人手研制[J].机械传动,2022,46(8): 162-166.
LIU Yankai, ZHANG Wenzeng. Development of an adaptive robot hand with elastic Hoken connecting rod linear flat clamp[J]. Mechanical Transmission, 2022, 46(8): 162-166.
- [8] 姚宇航,王琨,程博,等.高适应性 3 指变位机械手爪的设计与研究[J].机械设计,2023,40(11): 24-29.
YAO Yuhang, WANG Kun, CHENG Bo, et al. Design and research of highly adaptable 3-finger shifting manipulator claw[J]. Mechanical Design, 2023, 40(11): 24-29.
- [9] 戴景辉,樊绍巍,程明,等.基于耦合自适应连杆机构的欠驱动手指设计及控制[J].哈尔滨工程大学学报,2025,46(9): 1-9.
DAI Jinghui, FAN Shaowei, CHENG Ming, et al. Underactuated finger design and control based on coupled adaptive linkage mechanism[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(9): 1-9.
- [10] 李小彭,郭军强,孙万琪,等.混合工作模式欠驱动手设计及其接触力分析[J].机械工程学报,2021,57(1): 8-18.
LI Xiaopeng, GUO Junqiang, SUN Wanqi, et al. Design of underactuated hand in hybrid working mode and analysis of contact force[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 8-18.
- [11] 雷翔鹏,刘业峰.欠驱动多指机械手抓取能力分析与优化研究[J].控制工程,2022,29(4): 730-737.
LEI Xiangpeng, LIU Yefeng. Analysis and optimization research on the grasping ability of underactuated multi-finger manipulators[J]. Control Engineering, 2022, 29(4): 730-737.
- [12] 王邢波,陆闯,张岩.基于 RBF 神经网络的灵巧手指自适应跟踪控制[J].组合机床与自动化加工技术,2022(5): 75-78.
WANG Xingbo, LU Chuang, ZHANG Yan. Adaptive tracking control of dexterous fingers based on RBF neural network[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(5): 75-78.

- [13] SOMOV Y, BUTYRIN S, SOMOV S. Guidance and control of a space robot-manipulator at approach and capturing a passive satellite[C]//Proceedings of IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. Paris: Elsevier, 2020.
- [14] 李华忠,洪炳熔,杨维萍.空间站大臂机械手遥控与自主共享的控制系统及其仿真[J].计算机应用研究,1999,16(4): 1-4,8.
LI Huazhong, HONG Bingrong, YANG Weiping. The remote control and autonomous sharing control system of the large arm manipulator of the space station and its simulation[J]. Application Research of Computers, 1999, 16(4): 1-4, 8.
- [15] 徐潺潺.自适应/自感知扭线驱动器及其在灵巧手上应用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2024.
XU Chanchan. Research on adaptive/self-aware twisted wire actuators and their application in dexterous hands[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024.
- [16] 王帅军.面向机器人推动与抓取任务的自适应控制算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2024.
WANG Shuaijun. Research on adaptive control algorithm for robot pushing and grasping tasks[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2024.
- [17] 童小宝,熊鹏文,陈志远,等.基于自适应多核稀疏表示的机器人触觉物体感知研究[J].中国科学:技术科学,2023, 53(12): 2053-2065.
TONG Xiaobao, XIONG Pengwen, CHEN Zhiyuan, et al. Research on robot tactile object perception based on adaptive multi-core sparse representation[J]. Science China Technological Sciences, 2023, 53(12): 2053-2065.
- [18] 孟光,韩亮亮,张崇峰.空间机器人研究进展及技术挑战[J].航空学报,2021, 42(1): 1-25.
MENG Guang, HAN Liangliang, ZHANG Chongfeng. Research progress and technical challenges of space robots[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 42(1): 1-25.
- [19] 李青,刘爱芳,王永梅,等.美国空间攻防体系发展与能力研究[J].航天器工程,2018, 27(3): 95-103.
LI Qing, LIU Aifang, WANG Yongmei, et al. Research on the development and capability of the US space attack and defense system[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(3): 95-103.
- [20] 鲍佳蕾.新型三指欠驱动手设计及其抓取规划研究[D].北京:北京交通大学,2020.
BAO Jialei. Research on the design of a new type of three-finger underactuated hand and its grasping planning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [21] 栾铸.通用型欠驱动机械手设计及其控制研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
LUAN Zhu. Research on the design and control of general-purpose underactuated manipulator[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [22] 胡忠华.面向在轨服务的刚柔混合双臂空间机器人协同规划及控制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
HU Zhonghua. Collaborative planning and control of rigid-flexible hybrid dual-arm space robots for in-orbit services[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [23] 孙巍伟,代锟,马飞.空间柔性机械臂建模,控制以及轨迹规划研究综述[J].科学技术与工程,2024, 24(1): 34-60.
SUN Weiwei, DAI Kun, MA Fei. A review of modeling, control and trajectory planning of spatial flexible robotic arms[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(1): 34-60.
- [24] 杜严锋.柔性空间机器人动力学建模及振动控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
DU Yanfeng. Research on dynamic modeling and vibration control of flexible space robots[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [25] 王梦.多自由度串联机器人运动学分析与仿真[D].北京:北京理工大学,2016.
WANG Meng. Kinematic analysis and simulation of multi-degree-of-freedom serial robots[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [26] 周霏.四自由度关节机械臂运动仿真研究[D].南京:南京航空航天大学,2015.
ZHOU Fei. Motion simulation research on four-degree-of-freedom articulated robotic arm[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautic and Astronautic, 2015.
- [27] 沈慧慧.6-DOF波浪补偿平台结构参数的优化设计与验证[D].镇江:江苏科技大学,2022.
SHEN Huihui. Optimal design and verification of Structural parameters for 6-DOF wave compensation platform[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2022.
- [28] 张军飞.双列圆锥滚子轴承的动力学分析模型[D].大连:大连理工大学,2019.
ZHANG Junfei. Dynamic analysis model of double-row tapered roller bearings[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.