

月面采样机械臂刚度建模与误差补偿

张运动¹, 刘传凯^{2,3}, 黄开启¹, 苏建华⁴, 陈钢⁵, 张宽^{2,3}

(1. 江西理工大学机电工程学院, 赣州 341000; 2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094; 3. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094; 4. 中国科学院自动化研究所, 北京 100190; 5. 北京邮电大学自动化学院, 北京 100876)

摘要: 针对在月面采样任务中, 表取采样机械臂受臂杆和关节柔性影响, 呈现出低刚度特性导致其控制精度降低的问题, 提出了一种基于机械臂柔性变形估计的末端操作误差补偿方法, 通过分析关节柔性、臂杆柔性和自重等因素对机械臂末端位姿的联合影响关系, 构建了多自由度机械臂的整体刚度模型, 进一步通过有限元分析和真实变形对比等方法, 对机械臂整体刚度模型的误差计算精度进行评估定界, 给出了机械臂在不同构型条件下末端位置估计的误差边界。在此基础上设计了机械臂末端操作的一次性补偿控制方法, 可将机械臂末端的最大控制偏差从35 mm降低到1 mm以内, 极大提高了表取采样机械臂模拟系统的绝对定位精度。

关键词: 月面采样机械臂; 末端刚度分析; 误差补偿; 有限元分析

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)02-0169-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220096

引用格式: 张运动, 刘传凯, 黄开启, 等. 月面采样机械臂刚度建模与误差补偿[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(2): 169-177.

Reference format: ZHANG Y D, LIU C K, HUANG K Q, et al. Stiffness analysis and error compensation of lunar sampling manipulator[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(2): 169-177.

引言

地外天体表取采样是研究星球表面土壤成分和完成将样品带回地球的重要手段^[1]。为满足较大范围采样、单次采样量尽量多、整臂有严格重量限制等要求, 机械臂被设计为“长杆型”, 并配备较大的采样器^[2-3]。美国“凤凰号”(Phoenix)、“勇气号”(Spirit)和中国“嫦娥五号”(CE-5)等皆配备细长机械臂。由于机械臂具有细长结构, 在进行大跨度采样作业时, 其末端变形特性将使得精细化操作难以实现^[4]。为此有必要研究机械臂在不同构型条件下的变形特性, 以支撑地外天体表面机械臂的精细操作与精准控制^[5-6]。

细长机械臂在进行表取采样时, 其低刚度特性是影响末端操作精度的首要因素。一方面机械臂受到自身重力影响, 会表现出一定的臂杆和关节柔性特性; 另一方面机械臂末端采样器与土壤发生接触和交互时, 受到外力也会使其发生形变, 导致采样机械臂的操作精度降低^[7]。在此条件下, 研究机械臂刚度建模和相应的误差补偿技术尤为关键。

针对柔性机械臂刚度建模问题, 国内外学者做了

大量研究^[8-10]。当前常用的方法是虚关节法, 即假设机械臂中所有类型的柔性都采用虚拟弹簧来进行刚度建模^[11]。其中应用最广泛的是Salisbury等^[12]提出的考虑制动器柔性的传统刚度模型和Chen等^[13]基于传统刚度模型考虑外部负载变化提出的增强型刚度模型。此类建模方法较为简单有效, 但在分析机械臂整体刚度问题上过于粗略, 等效精度不高。为此面向工程应用, 学者们进一步研究了关节、连杆和平台变形等因素对机械臂刚度的影响。Klimchik等^[14]综合考虑臂杆和关节柔性, 解决了工业机器人柔性校准问题; Wang等^[15]将有限元法和虚关节法相结合, 使用有限元法对臂杆进行刚度分析, 建立了部件刚度与质量之间的刚度-质量模型, 并利用此模型进行机械臂优化设计; Xu等^[16]提出了一种考虑关节/连杆柔性、连杆重量和重力补偿器的重型工业机械臂刚度建模方法, 建立了外力、连杆质量和重力补偿器与末端变形间的映射关系。

上述研究主要分析的是地面工业机械臂各部件对末端刚度的影响, 鲜有对地外天体表取采样机械臂的研究。以“嫦娥五号”采样机械臂为例, 其臂杆长达3.7 m, 但厚度仅1.4 mm, 是典型的细长杆机械臂。其

收稿日期: 2022-11-02 修回日期: 2022-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61972020, 62003025); 航天飞行动力学技术重点实验室基金(6142210200307, XTB6142210210302)

在进行月球表面取样操作时, 关节、机械臂等各部分柔性将与月球表面的微重力耦合, 使得对大跨度采样作业精细化控制难以实现^[17]。

为解决机械臂因低刚度导致的控制精度下降问题, 部分学者提出考虑结构变形的运动学补偿模型, 即通过修正运动学参数提升定位精度。刘志等^[18]通过分析机器人臂杆变形, 提出了考虑结构变形的运动学补偿模型, 并结合参数标定获得了较好的误差补偿效果; 陈钢等^[19]分析杆件和关节柔性变形, 通过结合几何和柔性误差建立综合模型, 用参数标定方法提升了机械臂的绝对定位精度。但参数标定的方法仅测得测量构型关节之间的静态几何关系, 并不能保证机器臂整个工作空间内均有较好的定位精度, 而且测量价格昂贵, 精度易受到环境等因素的影响。而基于虚关节法建立的刚度模型不仅可以分析各因素对末端变形的贡献, 还可以展示整个工作空间的误差分布。因此, 本文利用刚度模型作为理论依据进行误差补偿, 提出的算法具有无需迭代、计算速度快的特点。

为提高表取采样机械臂的控制精度, 本文研究了采样机械臂的刚度建模和误差补偿方法, 通过结合机械臂细长臂杆的结构特点, 综合分析关节柔性、臂杆柔性和机械臂自重对末端定位精度的影响, 建立整体刚度模型, 并在此基础上提出误差补偿方法, 实现了对机械臂末端的误差估计与校正控制, 并通过试验验证刚度模型的正确性和误差补偿方法的有效性。

1 表取采样机械臂构型与刚度建模

本节首先介绍机械臂构型及运动特性, 然后分析关节柔性、臂杆柔性和和机械臂自重对机械臂末端变形的影响, 最后建立整体刚度模型, 提出误差补偿方法。

1.1 表取机械臂构型及运动特性

表取采样机械臂为4自由度旋转关节机械臂, 由1个偏航关节和3个俯仰关节构成。根据机械臂结构, 建立机械臂DH坐标系(图1), 对应的DH参数表如表1所示。

根据DH参数建模, 得到表取采样机械臂的正运动学模型。机械臂基坐标系到末端坐标系的变换为

$${}^0\mathbf{T} = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot {}^2\mathbf{T}_3 \cdot {}^3\mathbf{T}_4 \quad (1)$$

其中:

$${}_{i-1}^i\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

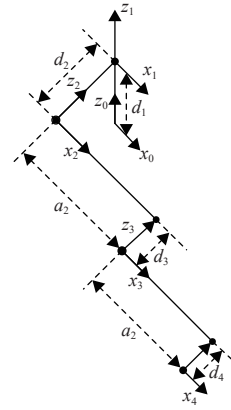


图1 表取采样机械臂DH坐标系

Fig. 1 DH coordinate system of surface mining robot arm

表1 表取采样机械臂DH参数表

Table 1 DH parameters of surface mining robot arm

i	$\theta_i / (^\circ)$	d_i / mm	a_{i-1} / mm	$\alpha_{i-1} / (^\circ)$
1	θ_1	d_1	0	0
2	θ_2	$-d_2$	0	$-\pi/2$
3	θ_3	$-d_3$	a_2	0
4	θ_4	$-d_4$	a_3	0

机械臂末端刚度不仅取决于自身结构和材料特性还与雅可比矩阵有关。根据矢量积方法^[20], 求解表取采样机械臂的雅可比矩阵为

$$\mathbf{J}(\theta) = \begin{bmatrix} z_1 \times ({}^0R^1 p_4) & z_2 \times ({}^0R^2 p_4) & z_3 \times ({}^0R^3 p_4) & z_4 \times ({}^0R^4 p_4) \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

机器臂雅可比矩阵随位姿的变化而变化, 机械臂末端变形不仅与受力大小有关, 还与其位姿有关。因此, 对运动学分析是对机械臂进行刚度建模的基础, 为机械臂柔性变形分析提供支撑。

1.2 柔性关节刚度建模

机械臂关节的柔性主要来源于减速器和其它传动元件。在实际建模中, 将机械臂的各个关节视为虚拟弹簧, 通过文献[21]计算关节刚度的方法可以得到表取采样机械臂各个关节的刚度为

$$\mathbf{K}_\theta = \text{diag}[K_{\theta_1}, K_{\theta_2}, K_{\theta_3}, K_{\theta_4}] \quad (4)$$

机械臂增强型刚度模型为

$$\mathbf{k} = (\mathbf{J}^T)^+ (\mathbf{K}_\theta - \mathbf{K}_c) \mathbf{J}^+ \quad (5)$$

其中: \mathbf{J} 为雅可比矩阵, 因为 \mathbf{J} 不是方阵, 所以计算雅可比矩阵的逆时使用伪逆 $\mathbf{J}^+ = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T$ 。

\mathbf{K}_c 为补充刚度矩阵

$$\mathbf{K}_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{J}^T}{\partial \theta_1} F & \frac{\partial \mathbf{J}^T}{\partial \theta_2} F & \frac{\partial \mathbf{J}^T}{\partial \theta_3} F & \frac{\partial \mathbf{J}^T}{\partial \theta_4} F \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: F 为机械臂末端负载。

将表取采样机械臂抓取采样罐产生的末端负载代入式 (6), \mathbf{K}_c 相对于 \mathbf{K}_θ 非常小, 因此忽略该项^[2], 使用传统刚度模型进行计算

$$\mathbf{k} = (\mathbf{J}^T)^+ \mathbf{K}_\theta \mathbf{J}^+ \quad (7)$$

式 (7) 刚度模型需计算雅可比矩阵的逆, 将会引入计算误差, 特别是当机械臂接近奇异点时误差越大, 为避免这个问题, 采用柔度矩阵进行关节柔性变形计算。利用柔度矩阵建立关节柔度和机械臂末端变形关系为

$$\Delta \delta_\theta = \mathbf{C} \mathbf{F} \quad (8)$$

其中: \mathbf{C} 为柔度矩阵, $\mathbf{C} = \mathbf{k}^{-1}$; $\Delta \delta_\theta$ 为机械臂末端的广义位移; \mathbf{F} 为末端广义力。

1.3 表取采样机械臂臂杆柔性变形分析

本文机械臂臂杆为碳纤维材质的空心圆柱体, 连杆结构细长, 受力时不可避免会产生变形, 因此必须对臂杆变形进行分析。将臂杆简化为 Euler-Bernoulli 梁模型, 综合表取采样机械臂转动关节处的力矩, 可计算出臂杆受力时的柔性变形^[23]。连杆柔性变形包括拉伸、弯曲和扭转, 连杆受力产生变形如图 2 所示。连杆末端受到的力和力矩在连杆末端坐标轴上的分量分别为 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z , 均布载荷 q 可分解为 q_x 、 q_y 、 q_z 。

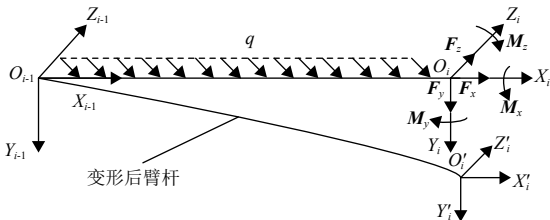


图 2 柔性连杆受力变形简图

Fig. 2 Deformation diagram of flexible connecting rod under force

在已知连杆材料参数和连杆末端受力情况时, 可根据 Hook 定律, 计算出连杆受力、力矩引起的拉伸、弯曲、扭转变形为

$$\delta_{li} = \begin{bmatrix} \Delta x_{li} \\ \Delta y_{li} \\ \Delta z_{li} \\ \Delta \alpha_{li} \\ \Delta \beta_{li} \\ \Delta \theta_{li} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_x l_i}{EA_i} + \frac{q_x l_i^2}{2EA_i} \\ \frac{F_y l_i^3}{3EI_i} + \frac{q_y l_i^4}{8EI_i} + \frac{M_z l_i^2}{2EI_i} \\ \frac{F_z l_i^3}{3EI_i} + \frac{q_z l_i^4}{8EI_i} - \frac{M_y l_i^2}{2EI_i} \\ \frac{M_x l_i}{GI_p} \\ \frac{GI_p}{EI_p} \\ \frac{F_z l_i^2}{2EI_i} + \frac{M_y l_i}{EI_i} - \frac{q_z l_i^3}{6EI_i} \\ \frac{F_y l_i^2}{2EI_i} + \frac{M_z l_i}{EI_i} + \frac{q_y l_i^3}{6EI_i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: l_i 是连杆长度; EI_i 为连杆的抗弯刚度; GI_p 为抗扭刚度; EA_i 是连杆拉伸强度。

利用 DH 法求解机械臂末端在基坐标中位姿的前提模型是刚性的。但是机械臂连杆受力时因为柔性的存在会发生变形, 理论位姿和实际位姿会产生一定偏差。考虑连杆变形时, 转换矩阵 ${}^i T^*$ 为

$${}^i T^* = \text{Rot}(x, \alpha_{i-1} + \Delta \alpha_{li}) \text{Trans}(x, a_{i-1} + \Delta x_{li}) \\ \text{Rot}(z, \theta_i + \Delta \theta_{li}) \text{Trans}(z, d_i + \Delta z_{li}) \\ \text{Rot}(y, \beta_{li}) \text{Trans}(y, \Delta y_{li}) \quad (10)$$

根据新的转换矩阵, 连杆末端在基坐标系中的位姿为

$${}^0 T^* = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 {}^4 T^* \quad (11)$$

设 ΔT 为坐标系理论末端位姿到实际末端位姿的微分变换

$$\Delta T = {}^0 T^{-1} \cdot {}^0 T^* \quad (12)$$

$$\Delta T = \begin{bmatrix} \Delta n_x & \Delta o_x & \Delta a_x & \Delta p_x \\ \Delta n_y & \Delta o_y & \Delta a_y & \Delta p_y \\ \Delta n_z & \Delta o_z & \Delta a_z & \Delta p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

利用等效转角可求得理论末端位姿到实际末端位姿的扭转变形^[24], 机械臂的臂杆变形在末端引起的误差为

$$\Delta \delta_i = [\Delta p_x \quad \Delta p_y \quad \Delta p_z \quad \Delta \delta_x \quad \Delta \delta_y \quad \Delta \delta_z] \quad (14)$$

1.4 机械臂自重对末端变形影响分析

机械臂自重对关节产生的力矩一直存在, 如图 3 所示。表取采样机械臂由 4 个旋转关节和 2 个细长杆组成, 关节 1 为偏航关节、关节 4 为末端关节, 2 个关节所受力矩较小, 在这里不考虑其受自重影响, 只对关节 2、3 进行分析。 L_{c2} 是臂杆 2 的重心到关节 2 转动轴线的距离, L_2 是臂杆 2 的杆长, L_{c3} 是臂杆 3 重心到关节 3 转动轴线的距离, L_3 是臂杆 3 的杆长, G_2 臂杆 2 的重力, G_3 臂杆 3 的重力, G_m 末端关节和执行器的重力。 θ_2 和 θ_3 是机械臂相对于零位的转角。

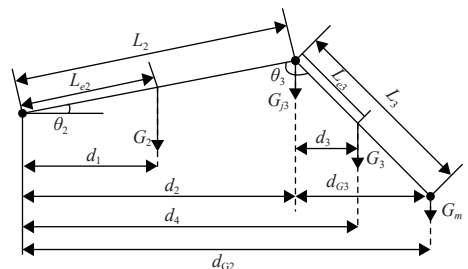


图 3 表取采样机械臂自重受力分析

Fig. 3 Self-weight force analysis of robot arm

表取采样机械臂关节2、3受臂杆重力产生的力矩为

$$\tau_2 = G_2 d_1 + G_j d_2 + G_3 d_4 + G_m d_{G2} \quad (15)$$

$$\tau_3 = G_3 d_3 + G_m d_{G3} \quad (16)$$

其中: $d_1 = L_{C2} \cos \theta_2$; $d_2 = L_2 \cos \theta_2$; $d_3 = L_{C3} \cos(\pi - \theta_2 - \theta_3)$; $d_4 = d_2 + d_3$; $d_{G2} = d_2 + d_{G3}$; $d_{G3} = L_3 \cos(\pi - \theta_2 - \theta_3)$ 。

表取采样机械臂自重对关节造成的力矩为

$$\tau_g = [0 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad 0]^T \quad (17)$$

根据虚功原理, 表取采样机械臂自重在末端映射为

$$F_g = (J^T)^+ \tau_g \quad (18)$$

表取采样机械臂自重产生的末端变形为

$$\Delta \delta_g = J(q) K_\theta^{-1} \tau_g \quad (19)$$

由图3可知, 当表取采样机械臂处于水平构型时, 自重对关节2、3的力矩最大, 自重引起的误差达到最大值, 此时 $\theta_2 = 0$, $\theta_3 = 180$ 。

1.5 机械臂末端刚度计算与误差补偿

表取采样机械臂末端误差是由机械臂关节柔性、臂杆柔性和自重共同引起的。因为3个因素引起的变形都较小, 所以整体误差根据线性叠加原理得到总变形

$$\Delta \delta = \Delta \delta_\theta + \Delta \delta_g + \Delta \delta_l \quad (20)$$

机械臂末端受到的外力 f 和力矩 m 组成6维矢量 F 。已知表取采样机械臂末端的广义力为

$$F = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z] \quad (21)$$

根据刚度定义, 表取采样机械臂的整体刚度为

$$K = \frac{F}{\Delta \delta} \quad (22)$$

基于式(22)整体刚度模型可计算出机械臂末端的变形, 为误差补偿提供理论基础。因为表取采样机械臂可控制的变量只有关节转动角, 所以只能根据实际误差去调节各个关节的转动角进行误差补偿。

表取采样机械臂在执行任务时, 理论关节角为 θ_i , 理论位置为 P_i , 由于机械臂的低刚度特性, 末端位置会产生相应的误差, 实际位置为 P 。根据误差补偿原理, 先规划出表取采样机械臂的任务路径并离散成若干个点, 利用机器人运动学逆解求得各个关节的转动角, 然后在各关节转动角的基础上进行关节角补偿, 补偿量 $\Delta \theta$ 为

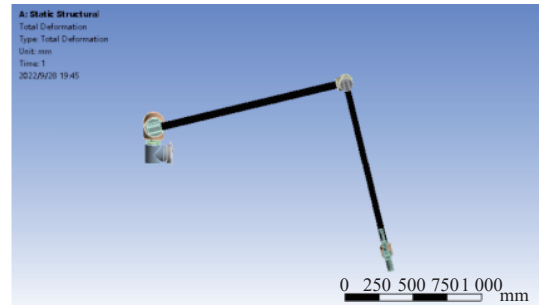
$$\Delta \theta = J^+ \Delta \delta \quad (23)$$

2 仿真和实验验证

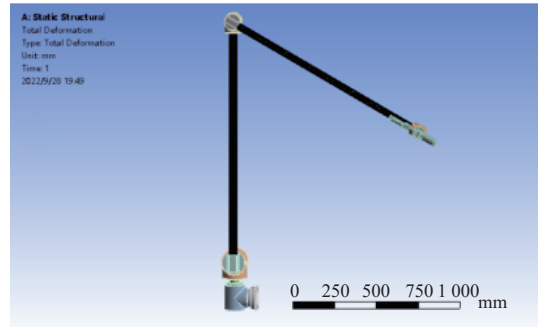
为验证上述刚度模型的正确性, 本节基于有限元仿真软件和真实机械臂对表取采样机械臂不同构型下的误差变形进行评估定界, 并对误差补偿效果进行仿真实验验证。

2.1 基于有限元软件的仿真比对验证

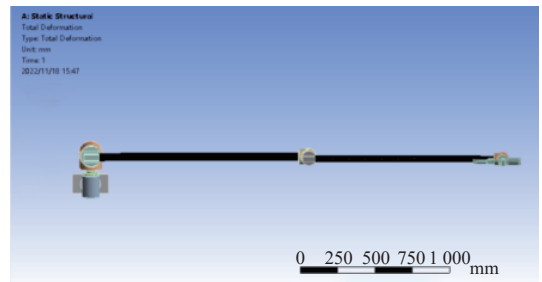
本节使用有限元仿真软件对表取采样机械臂因自重及臂杆柔性产生的末端变形进行仿真实验验证, 将仿真变形量和理论计算变形量进行对比, 验证理论分析的正确性。有限元仿真软件仿真环境为地球重力, 验证构型分为采样构型、抓取采样罐放罐构型和水平构型如图4所示。



(a) 采样构型 $(0, -\pi/12, \pi/2, 0)$



(b) 放罐构型 $(0, -\pi/2, 2\pi/3, 0)$



(c) 水平构型 $(0, 0, 0, 0)$

图4 有限元仿真软件仿真构型图

Fig. 4 Finite element simulation software simulation configuration diagram

在进行理论模型计算时, 仅考虑表取采样机械臂自重产生的重力方向静态误差, 以水平构型为零位, 关节转动顺正逆负, 关节1、4的转角对机械臂末端变形没有影响, 进行置零处理, 验证构型关节角如表2所示。表2中各构型相对应的理论计算和有限元仿真结果如表3所示。

表 2 5组仿真构型

Table 2 Five groups of simulated configurations

位姿	关节角2/rad	关节角3/rad
采样构型	0	1.571
	-0.262	1.571
放罐构型	-1.571	1.571
	-1.571	2.094
水平构型	0	0

表 3 理论建模和有限元的变形结果对比

Table 3 Comparison of deformation results of theoretical modeling and finite elements

方法	构型				
	采样构型		放罐构型		水平构型
有限元/mm	2.350	3.548	3.337	2.575	9.885
理论法/mm	2.558	3.419	3.276	2.320	9.196
误差/%	8.8	3.6	1.8	9.9	6.9

由表3可知, 理论计算值和有限元仿真得到的变形量之间有一定误差。这是由于虚拟机械臂是按照真实机械臂的结构, 利用Solidworks绘制并导入有限元仿真软件中进行仿真。在理论分析时, 忽略了连接件等结构, 理论分析和仿真模型间会有一些的差别, 但平均绝对误差仅6.2%, 验证了理论模型的正确性。结合表2可知, 表取采样机械臂伸展角变大, 机械臂末端变形量也随之增加, 当机械臂处于水平状态时, 由自重和臂杆柔性引起的变形量超过了9 mm。因此, 在建立表取采样机械臂刚度模型时, 需分析机械臂自重、臂杆柔性和关节柔性的综合影响。

2.2 基于实物实验平台的试验验证

表取采样机械臂在月球表面会受到月球重力的影响产生柔性变形, 在地球环境下进行模拟验证具有一定的借鉴意义。因此, 为验证整体刚度模型对真实物理样机的适用性, 实验室自制4自由度月面采样机械臂如图5所示。

机械臂关节2、3刚度分别为 $3.1 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 、 $0.7 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 、碳纤维臂杆弹性模量161 Gpa, 机械臂质量参数如表4所示, 实验测量设备为千分表, 精度0.001 mm。



图 5 表取采样机械臂末端变形实验
Fig. 5 Robotic arm end deformation experiment

表 4 表取采样机械臂参数

Table 4 Surface mining robotic arm parameters

部件	质量/kg	长度/mm
上臂	2.57	1 450
下臂	1.77	1 300
关节2	8.48	—
关节3	2.80	—
关节4+执行器	2.83	—

为验证刚度模型的适用性, 从采样构型、水平构型和放罐构型中, 共选取10组位姿进行测量实验。通过在末端添加负载的方法, 使用千分表测量表取采样机械臂末端重力方向的变形值。首先机械臂转动至选定构型, 将千分表置于机械臂末端并将读数置0, 然后在机械臂末端添加1 kg负载, 记录千分表读数。为减小测量误差, 同一位姿重复测量10次, 取其平均值。

以表取采样机械臂水平构型为零位, 关节转动方向顺正逆负, 关节1、4对末端变形无影响, 进行置零处理。10组测量构型的关节角如表5所示, 与表5对应的10组测量构型理论计算值和实验测量值对比结果如图6所示。

表 5 真实机械臂测量实验构型

Table 5 Experimental configurations of real robotic arm measurements

位姿	关节2/rad	关节3/rad
1	-0.524	2.094
2	-0.785	2.094
3	0	1.571
4	-0.262	1.571
5	0	1.047
6	0	0.785
7	0	0
8	-0.471	2.094
9	-1.571	2.618
10	-1.571	2.094

由图6可以看出, 试验测量值和理论计算值的变化趋势基本一致。结合表5中各位姿关节角可知, 机械臂

末端变形随着机械臂臂展变大而增加，水平构型时末端变形最大，达到了7 mm。虽然大多数位姿的理论值和测量值之间误差较小，但存在个别位姿差距较大的现象。这主要是因为理论计算时，例如臂杆和关节刚度等参数难以准确获得，和实际测量之间会存在一定的误差，且建立刚度模型时对一些零件做了简化处理，如忽略臂杆连接件和紧固件等，所以理论模型和真实模型之间有一定误差，但理论值和测量值的平均绝对误差为13.97%，且变化趋势一致，证明了本文的刚度模型对真实表取采样机械臂的适用性。

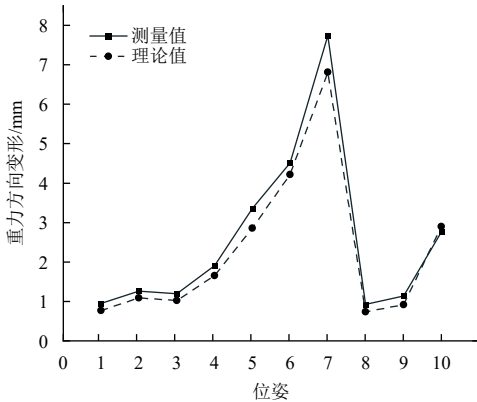


图6 实验和理论计算结果
Fig. 6 Experimental and theoretical calculation results

2.3 误差补偿实例验证

表取采样机械臂执行采样罐转移任务时，机械臂末端受力是已知的，且沿重力方向竖直向下。因此利用式(23)可以一次性计算出满足控制精度的补偿值，具体计算流程如图7所示。

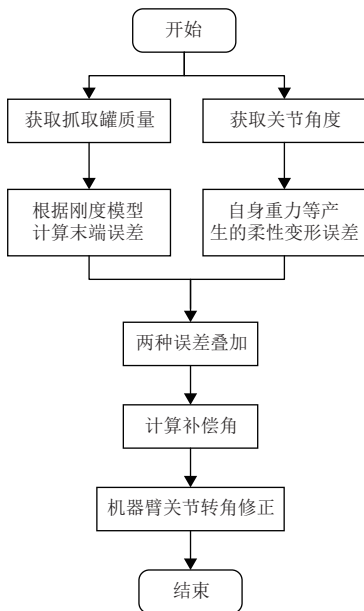


图7 表取采样机械臂误差补偿流程图
Fig. 7 Flowchart of error compensation of table mining robot arm

为验证误差补偿效果，使用Matlab机器人工具箱规划表取采样机械臂从水平构型(0, 0, 0, 0)运动至采样构型(0, -π/6, π/2, 0)，规划路径如图8所示，并根据此段路径进行数值仿真。

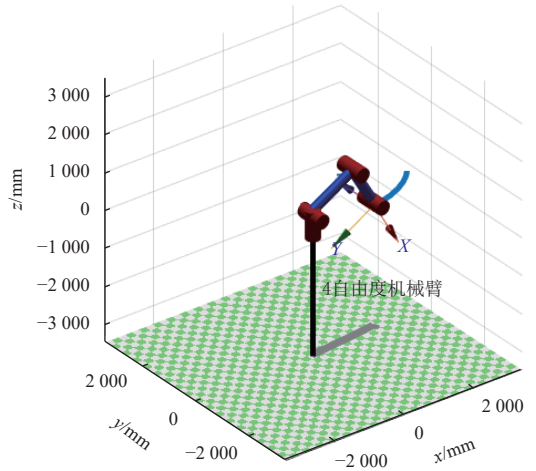
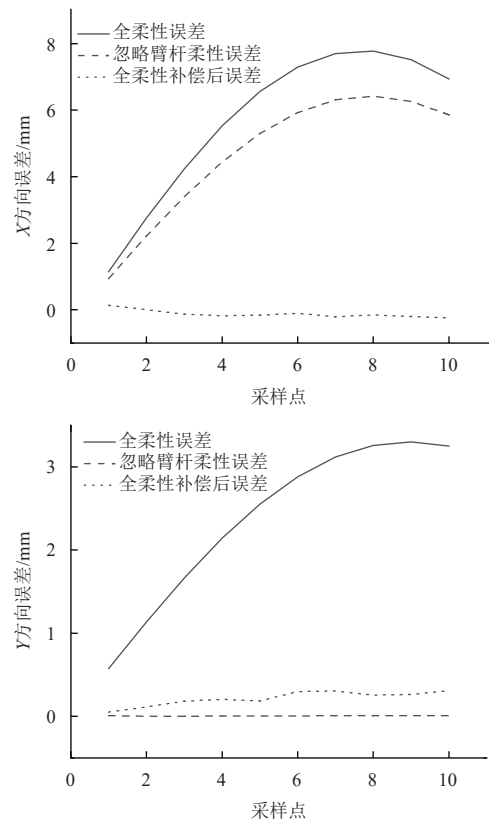


图8 水平构型至采样构型路径
Fig. 8 Horizontal conformation to sampled conformation path

规划时仅考虑2、3关节，将各关节转动角度平均离散成10个点位，输出关节角。根据图7中的流程对各个关节角进行误差补偿，并将补偿后的实际路径和规划的理想路径进行对比，补偿前后的误差如图9所示。



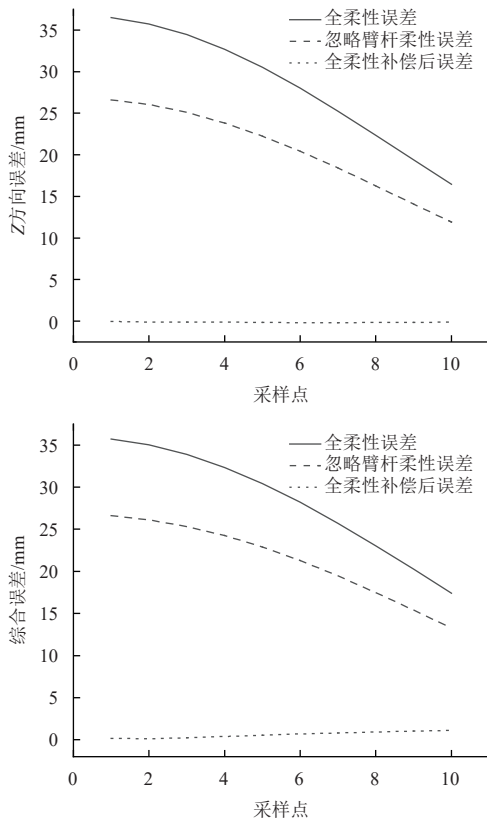


图9 误差补偿结果
Fig. 9 Error compensation results

从图9中可知,臂杆柔性对机械臂定位误差的影响是不可忽略的。机械臂在水平构型时,因低刚度特性产生的误差对 x 轴方向的影响较小,由于臂杆的放大作用,重力方向的误差对 x 轴的影响随着机械臂的转动先增大后减小,最大误差值达到了8 mm; y 方向全柔性误差在水平构型时最小,因为机械臂扭转误差较小,在水平构型时表现不明显,随着机械臂的转动,因臂杆的放大作用, y 方向误差逐渐增大; z 方向全柔性误差补偿前达到35 mm,开始即为最大值是因为初始构型为水平构型,此时受自重等因素产生的重力方向误差最大,随着机械臂由水平构型运动至采样构型,重力方向的误差逐渐减小。经补偿后 x 、 y 、 z 3个方向误差和综合误差大小均在1 mm以下,验证了补偿方法的有效性。

3 结论

本文针对表取采样机械臂存在的低刚度问题,分析了机械臂自重、连杆柔性和关节柔性等因素对机械臂末端位姿的影响,建立了多自由度机械臂整体刚度模型。在此基础上,设计了机械臂在不同构型下的有限元仿真实验和真实机械臂试验,验证了刚度模型的正确性。通过该模型可以评估关节柔性、臂杆柔性

末端载荷对末端变形的影响。

为解决机械臂低刚度特性引起的控制精度下降问题,本文基于整体刚度模型,提出了机械臂柔性变形的误差补偿方法,经数值仿真实验验证了补偿方法的有效性。表取采样机械臂在地球和月球环境下都会受到重力影响,因此对其具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 叶培建,于登云,孙泽洲,等. 中国月球探测器的成就与展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(4): 323-333.
YE P J, YU D Y, SUN Z Z, et al. Achievements and prospects of Chinese lunar probes[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 323-333.
- [2] 张宽,于天一,胡晓东,等. 月面表层无人采样控制技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(2): 173-182.
ZHANG K, YU T Y, HU X D, et al. Control technology for unmanned sampling of lunar surface [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 173-182.
- [3] 韩亮亮,陈萌,张崇峰,等. 月面服务机器人研究进展及发展设想[J]. 载人航天, 2018, 24(3): 313-320.
HAN L L, CHEN M, ZHANG C F, et al. Research progress and development conception of lunar service robot[J]. Manned Spaceflight, 2018, 24(3): 313-320.
- [4] 马如奇,姜水清,刘宾,等. 月球采样机械臂系统设计与试验验证[J]. 宇航学报, 2018, 39(12): 1315-1322.
MA R Q, JIANG S Q, LIU B, et al. Design and verification of a lunar sampling manipulator system[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(12): 1315-1322.
- [5] 杨成,李贵良,冯晓萌,等. 月面采样机械臂遥操作仿真验证技术[J]. 中国科学:技术科学, 2021, 51(12): 1480-1491.
YANG C, LI G L, FENG X M, et al. Simulation and verification technology for lunar sampling manipulator control[J]. China Science: Technical Science, 2021, 51(12): 1480-1491.
- [6] 胡晓东,张宽,谢圆,等. “嫦娥五号”月面采样机械臂路径规划[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(6): 564-571.
HU X D, ZHANG K, XIE Y, et al. Path planning of lunar surface sampling manipulator for Chang'E-5 mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(6): 564-571.
- [7] 吴锦辉,陶友瑞. 工业机器人定位精度可靠性研究现状综述[J]. 中国机械工程, 2020, 31(18): 2180-2188.
WU J H, TAO Y R. Review on research status of positioning accuracy reliability of industrial robots[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(18): 2180-2188.
- [8] BRUNETE A, GAMBAO E, KOSKINEN J, et al. Hard material small-batch industrial machining robot[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 54: 185-199.
- [9] LIAN B, SUN T, SONG Y, et al. Stiffness analysis and experiment of a novel 5-DoF parallel kinematic machine considering gravitational effects[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 95: 82-96.
- [10] ALICI G, SHIRINZADEH B. Enhanced stiffness modeling, identification and characterization for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(4): 554-564.

- [11] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1987, 109(4): 310-318.
- [12] SALISBURY J K. Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates[C]//Proceedings of the 19th IEEE conference on decision and control including the symposium on adaptive processes. [S. l.]: IEEE, 1980: 95-100.
- [13] CHEN S F, KAO I. Conservative congruence transformation for joint and cartesian stiffness matrices of robotic hands and fingers[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2000, 19(9): 835-847.
- [14] KLIMCHIK A, FURET B, CARO S, et al. Identification of the manipulator stiffness model parameters in industrial environment[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 90: 1-22.
- [15] WANG X, ZHANG D, ZHAO C, et al. Optimal design of lightweight serial robots by integrating topology optimization and parametric system optimization[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 132: 48-65.
- [16] XU P, YAO X, LIU S, et al. Stiffness modeling of an industrial robot with a gravity compensator considering link weights[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 161: 104331.
- [17] 唐玲, 梁常春, 王耀兵, 等. 基于柔性补偿的行星表面采样机械臂控制策略研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(11): 97-103.
TANG L, LIANG C C, WANG Y B, et al. Research on flexible compensation control strategy for planetary surface sampling manipulator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(11): 97-103.
- [18] 刘志, 赵正大, 谢颖, 等. 考虑结构变形的机器人运动学标定及补偿[J]. *机器人*, 2015, 37(3): 376-384.
LIU Z, ZHAO Z D, XIE Y, et al. Kinematic calibration and compensation for a robot with structural deformation[J]. *Robotics*, 2015, 37(3): 376-384.
- [19] 陈钢, 孙丰磊, 李彤, 等. 考虑弹性变形的月面表取机械臂精度补偿方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2021, 53(1): 1-10.
CHEN G, SUN F L, LI T. Accuracy compensation for a lunar sampling manipulator with elastic deformation[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 53(1): 1-10.
- [20] 熊有伦, 李文龙, 等. 机器人学: 建模、控制与视觉[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018: 135-162.
- [21] 林文忠, 廖小平, 曾剑. 6R喷涂机器人操作臂末端刚度的分析[J]. *广西大学学报: 自然科学版*, 2011, 36(2): 234-240.
LIN Y Z, LIAO X P, ZENG J. Analysis of arm end stiffness for a 6R-spraying robot[J]. *Journal of Guangxi University: Natural Science Edition*, 2011, 36(2): 234-240.
- [22] DUMAS C, CARO S, GARNIER S, et al. Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(4): 881-888.
- [23] 高鹏宇. 打捞机器人误差补偿方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
GAO P Y. Research on error compensation method of the salvage robot [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [24] 张永贵, 刘文洲, 高金刚. 切削加工机器人刚度模型研究[J]. *农业机械学报*, 2014(8): 321-327.
ZHANG Y G, LIU W Z, GAO J G. Stiffness model of a machining robot[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2014(8): 321-327.
- 作者简介:
张运动(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器人操作与控制。
E-mail: 13225609552@163.com
刘传凯(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 机器人操作与控制、机器视觉、遥操作。**本文通信作者**。
通信地址: 北京市海淀区北清路26号院(100094)
E-mail: ckliu2005@126.com

Stiffness Analysis and Error Compensation of Lunar Sampling Manipulator

ZHANG Yundong¹, LIU Chuankai^{2,3}, HUANG Kaiqi¹, SU Jianhua⁴, CHEN Gang⁵, ZHANG Kuan^{2,3}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

3. The Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100194, China;

4. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

5. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In the lunar surface sampling mission, the lunar sampling manipulator, due to the flexibility of its boom and joints, has low stiffness, which leads to the reduction of manipulator control accuracy. To address the above problem, in this paper, an end-operation error compensation method was proposed based on the estimation of flexible deformation of the manipulator, and an overall stiffness model of the multi-degree-of-freedom manipulator was constructed by analyzing joint flexibility, arm rod flexibility and self-weight and other factors on joint flexibility of the end position of the manipulator. The error bounds for the end position estimation of the manipulator under different configuration conditions were given. On this basis, a one-time compensation control method for the end operation of the manipulator was designed, which can reduce the maximum control deviation of the end of the robotic arm from 35 mm to less than 1 mm, greatly improving the absolute positioning accuracy of the lunar sampling manipulator simulation system.

Keywords: lunar sampling manipulator; stiffness analysis of EOF; error compensation; finite element analysis

Highlights:

- The effects of joint flexibility, arm bar flexibility and manipulator self-weight on the end error of the lunar sampling manipulator were analyzed.
- The stiffness model of the lunar sampling manipulator is established.
- A stiffness model-based error compensation method for the lunar sampling manipulator is proposed.
- The proposed method solves the problem of control accuracy degradation caused by flexible deformation of the lunar sampling manipulator.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]