

一种考虑弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构的机器人刚度辨识方法

郭万金^{1,2,3,4*} 李儒¹ 王利斌¹ 郝钦磊¹ 曹雏清² 赵立军^{2,4}

1. 长安大学道路施工技术装备教育部重点实验室, 西安, 710064
2. 长三角哈特机器人产业技术研究院, 芜湖, 241007
3. 埃夫特智能机器人股份有限公司, 芜湖, 241060
4. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统全国重点实验室, 哈尔滨, 150000

摘要:为解决含有弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构的 3T2R 型高灵巧性机器人的刚度辨识问题,提出一种机器人刚度辨识方法。分析机器人紧凑性和经济性复合式构型设计的结构特点及作业姿态调整高灵巧性的运动特点,构建机器人雅可比矩阵,并建立机器人末端变形模型,分析机器人弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构对机器人末端变形的影响;考虑机器人弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构的共同作用影响及机器人弱刚性大变形的结构特征,进行机器人关节刚度辨识,并对移动关节 3 进行变刚度建模。实验结果表明,所提方法比常规刚度辨识方法辨识出的机器人关节 3、关节 4 和关节 5 的刚度分别增大了 146.59%、30.18% 和 36.07%;在所选 6 组机器人位姿处末端综合变形实测值和理论计算值的误差率为 4%~6%,验证了所提刚度辨识方法的有效性。

关键词:刚度辨识;弱刚性关节传动链;柔性杆;机器人末端变形;高灵巧性机器人

中图分类号: TP242.2

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.05.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A Robot Stiffness Identification Method Considering Weakly Rigid Joint Transmission Chain Structures and Flexible Rod Structures

GUO Wanjin^{1,2,3,4*} LI Ru¹ WANG Libin¹ HAO Qinlei¹ CAO Chuqing² ZHAO Lijun^{2,4}

1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, 710064
2. Yangtze River Delta HIT Robot Technology Research Institute, Wuhu, Anhui, 241007
3. EFORT Intelligent Robot Co., Ltd., Wuhu, Anhui, 241060
4. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150000

Abstract: To solve the stiffness identification problem for a 3T2R highly dexterous robot with weakly rigid joint transmission chain structures and flexible rod structures, a robot stiffness identification method was proposed. Firstly, the structural characteristics of the compact and cost-effective hybrid robot configuration design and the motion characteristics for adjusting the high dexterity of operational postures were analyzed. The robot Jacobian matrix was constructed, and the end deformation model of the robot was established to analyze the influences of weakly rigid joint transmission chain structures and flexible rod structures on the robot end deformations. Then, considering the effects of weakly rigid joint transmission chain structures and flexible rod structures, along with the robotic structural characteristics of weak rigidity and large deformation, robot joint stiffness identification was carried out, and the variable stiffness modeling was completed for the mobile joint 3. Experimental results indicate that the proposed method increases the stiffness of joints 3, joint 4 and 5 by 146.59%, 30.18% and 36.07% respectively, compared to conventional stiffness identification methods. The error rates between the measured and theoretical calculation values of the overall end deformations are in 4%~6% at six selected robot poses. The capability of the proposed robot stiffness identification method was verified.

收稿日期: 2024-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(52275005); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2025JC-QYXQ-027); 中央高校基本科研业务费专项资金(300102253201); 中国博士后科学基金(2024M760002); 安徽省博士后科研项目(2023B675, 2022B627); 芜湖市重点研发与成果转化项目(2023yf044)

Key words: stiffness identification; weakly rigid joint transmission chain; flexible rod; robot end deformation; highly dexterous robot

0 引言

随着工业机器人技术的发展,作为重要制造装备的工业机器人广泛应用于航空、航天与汽车制造等领域的磨削、铣削和制孔等加工产线中^[1-3]。与数控机床相比,工业机器人具有优异的空间可达性与操作灵活性,在工业生产中的应用日益广泛^[4-5]。然而,由于机器人的刚性通常弱于数控机床,实际应用中可能因其结构变形而影响工件的加工质量和加工精度^[6-7],因此,开展机器人刚度辨识研究对机器人的刚度优化与加工补偿具有重要意义。

国内外学者对工业机器人刚度辨识通常采用经验建模研究和实验研究。前者利用经验公式计算机器人各组成部分的刚度值,然后将计算的刚度值折算到机器人各关节处得到关节的刚度值^[8-10]。由于工业机器人系统的刚度特性通常受到多个因素的影响,基于经验建模方法确定机器人刚度在准确性和可靠性方面存在一定的局限,相比较而言,基于实验方法确定机器人刚度更加准确和可靠,应用也更为广泛^[11]。采用实验研究方法进行刚度辨识通常先建立机器人的刚度模型,然后通过测量分析机器人变形和受力的关系开展刚度辨识^[12-14]。LI等^[15]结合虚功原理和四元数理论推导机器人关节刚度模型,并提出一种机器人关节刚度辨识算法。XU等^[16]基于频响幅值提出一种机器人关节刚度辨识方法,并通过实验验证了其有效性。孙龙飞等^[17]基于能量法和卡氏定理求取细长连杆和电动缸变形,并实现机器人全域刚度预估。HU等^[18]提出一种有限元结构法与虚拟关节法相结合的机器人刚度辨识方法。

上述采用经验建模方法和实验方法开展的工业机器人刚度辨识研究中,通常认为机器人连杆刚度远大于机器人关节刚度,因此将机器人各连杆视为刚性杆,以简化建模和分析过程。也有如文献^[17-18]将机器人连杆看作柔性杆以辨识机器人关节刚度,但这类研究通常认为连杆变形较小,所建立的刚度辨识模型不适用于连杆较大变形的情况,且这些文献所建立的模型较为复杂,通用性较低。此外,部分学者将机器人连杆看作柔性杆进行考虑,但未进行机器人刚度辨识相关研究^[19-22]。上述机器人刚度辨识方法对这类关节处采用弱刚性传动链结构及存在弱刚性较大变形连

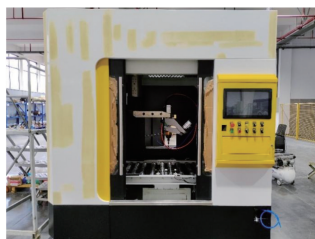
杆结构的工业机器人刚度辨识存在一定的不足。

本文为解决一种含有弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构的3T2R紧凑型复合式高灵巧性机器人的刚度辨识问题,根据机器人弱刚性大变形的结构特点,研究弱刚性关节传动链和柔性杆对末端变形的影响,并建立机器人末端综合变形模型,辨识机器人各关节刚度。

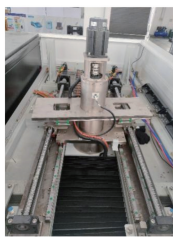
1 机器人结构和末端变形建模

1.1 机器人结构

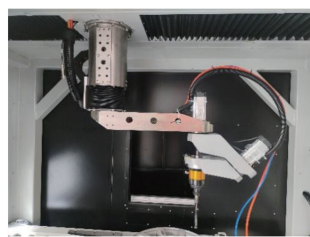
本文以一种3T2R紧凑型复合式高灵巧性工业机器人^[23-24]为研究对象,机器人实验平台和机器人构型分别如图1和图2所示,图2中各参数的含义及取值同文献^[23],其中 $L_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为各杆件几何尺寸。移动关节1和2处伺服电机 M_1 和 M_2 采用并联驱动与差速驱动复合方式,实现机器人末端沿水平面内两个方向的平动;移动关节3处伺服电机 M_3 实现机器人沿竖直方向的平动;旋转关节4和5处伺服电机 M_4 和 M_5 的轴线呈 45° 夹角构型布置。



(a) 整体结构



(b) 关节1和2



(c) 关节3,4和5

图1 3T2R复合式高灵巧性机器人实验平台

Fig.1 3T2R hybrid high dexterity robot experimental platform

当结构尺寸 e 取为0时,可实现末端执行器在上半个完整球面所有姿态可达,使得机器人具备了高灵巧性的可达作业姿态灵活调整能力。当进一步满足末端执行器作业点与旋转关节4和5轴线交点重合时(图2c),末端执行器的位置和姿态相互解耦,此时,机器人末端执行器的位置由电

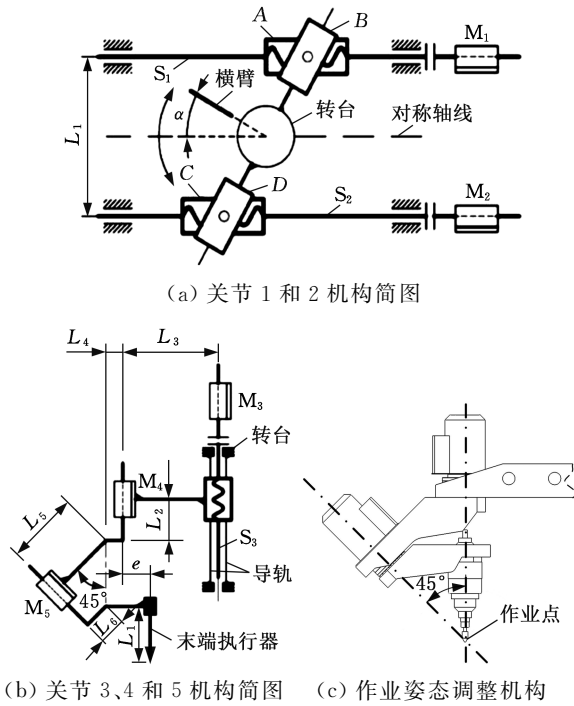


图 2 3T2R 复合式高灵巧性机器人构型

Fig.2 3T2R hybrid high dexterity robot configuration

机 M_1 、 M_2 和 M_3 调节控制,其姿态由电机 M_4 和 M_5 调节控制,机器人末端执行器以作业点为球心,在上半球体内的所有姿态均可达,机器人具备了卓越的作业姿态高度灵巧调整能力。

所研究机器人的移动关节 1~3 为低功率交流伺服电机、联轴器、滚珠丝杠副构成的关节传动链结构,具有较强的弱刚性特征,其关节刚度明显低于传统六自由度串联工业机器人的关节刚度。机器人横臂因轻量化设计使得横臂连杆的结构柔性性与悬臂梁特征较为明显。与传统六自由度串联工业机器人采用高功率伺服电机与 RV 减速器相比,该机器人传动形式简单且具有明显的经济性优势。此外,轻量化设计的横臂结构可减小惯性负载,使机器人具有灵活轻巧的运动特性。然而,所研究机器人在弱刚性关节传动链结构与柔性杆结构的综合作用下,与传统六自由度串联工业机器人相比,具有弱刚性、大变形的特征,当机器人末端受到外部载荷作用时将会产生较大末端变形,导致期望与实际的机器人末端执行器位置及姿态存在一定偏差,严重时甚至将造成机器人无法完成作业任务。因此,有必要分析机器人弱刚性关节传动链和柔性杆与机器人末端变形的关系。

1.2 机器人关节导致的末端变形建模

1.2.1 雅可比矩阵建模

机器人雅可比矩阵常用于描述机器人末端运动与各关节运动的关系,进而开展机器人刚度辨识。雅可比矩阵建模过程中,运动学相关理论模型

采用文献[25]建立的如图 3 所示的 D-H 参考坐标系,关节 1~ 关节 5 的关节角分别记为 $\varphi_1 \sim \varphi_5$ 。

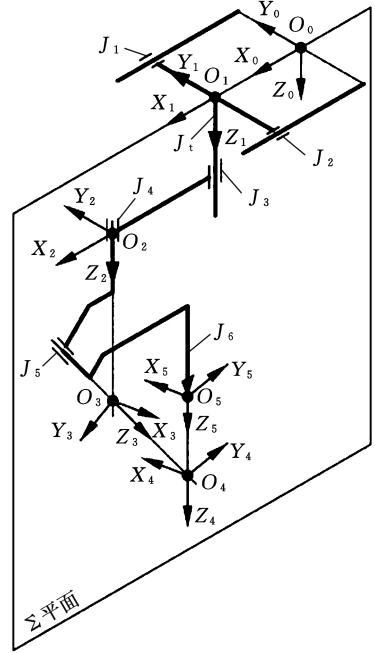


图 3 机器人 D-H 参考坐标系

Fig.3 Robot D-H reference frame

所研究机器人的关节 1 与关节 2 以并联驱动与差速驱动的复合方式实现连杆 1 产生水平面内两个方向的平移运动和绕 Z_1 轴的旋转运动,存在耦合运动关系,不属于单纯的移动或转动关节,故不能利用矢量积法[26] 和微分变换法[27] 等常规方法推导机器人雅可比矩阵。本文利用机器人各连杆间的速度传递关系求解机器人雅可比矩阵。

由关节 1 与关节 2 耦合运动的物理意义可得连杆 1 相对基坐标系 O_0 的速度与角速度:

$$\left. \begin{aligned} {}^0 \mathbf{v}_1 &= [s_x(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)/(4\pi) \quad 0 \quad 0]^T \\ {}^0 \boldsymbol{\omega}_1 &= [0 \quad 0 \quad \dot{\alpha}]^T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\dot{\alpha}$ 为横臂柔性杆转动的角速度, $\dot{\alpha} = 2\pi L_1(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1)/\{s_x[(2\pi L_1/s_x)^2 + (\varphi_2 - \varphi_1)^2]\}$, s_x 为丝杠螺距, $\dot{\varphi}_1$ 和 $\dot{\varphi}_2$ 分别为关节 1 和关节 2 的角速度。

由式(1)可得连杆 1 相对坐标系 O_1 的速度和角速度:

$$\left. \begin{aligned} {}^1 \mathbf{v}_1 &= {}^1 \mathbf{R}_0 {}^0 \mathbf{v}_1 \\ {}^1 \boldsymbol{\omega}_1 &= {}^1 \mathbf{R}_0 {}^0 \boldsymbol{\omega}_1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$${}^1 \mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

当杆 $i+1$ 和杆 i 间的关节 $i+1$ 分别为旋转关节或移动关节时,连杆间的运动传递关系可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} {}^{i+1} \mathbf{v}_{i+1} &= {}^{i+1} \mathbf{R}_i ({}^i \mathbf{v}_i + {}^i \boldsymbol{\omega}_i \times {}^i \mathbf{p}_{i+1}) \\ {}^{i+1} \boldsymbol{\omega}_{i+1} &= {}^{i+1} \mathbf{R}_i ({}^i \boldsymbol{\omega}_i + {}^i \mathbf{z}_i \dot{\theta}_{i+1}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} {}^{i+1}\mathbf{v}_{i+1} &= {}^{i+1}\mathbf{R}_i ({}^i\mathbf{v}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\mathbf{p}_{i+1} + \dot{d}_{i+1} {}^i\mathbf{z}_i) \\ {}^{i+1}\boldsymbol{\omega}_{i+1} &= {}^{i+1}\mathbf{R}_i {}^i\boldsymbol{\omega}_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: ${}^{i+1}\mathbf{R}_i$ 为 O_{i+1} 系在 O_i 系的姿态矩阵; ${}^i\mathbf{v}_i$ 为连杆 i 相对于坐标系 O_i 的速度; ${}^i\boldsymbol{\omega}_i$ 为连杆 i 相对于坐标系 O_i 的角速度; ${}^i\mathbf{p}_{i+1}$ 为 O_{i+1} 点在 O_i 系中的位置矢量; ${}^i\mathbf{z}_i$ 为 O_{i+1} 系的 z 轴单位矢量; \dot{d}_{i+1} 为旋转关节 $i+1$ 的角速度; \dot{d}_{i+1} 为移动关节 $i+1$ 的速度。

机器人关节 3 ~ 5 之间不存在耦合运动关系, 对移动关节 3 采用式(4), 对旋转关节 4 和 5 采用式(3), 即可求解连杆 2 ~ 4 相对于坐标系 $O_2 \sim O_4$ 的速度和角速度。因坐标系 O_5 在坐标系 O_4 中的姿态矩阵始终保持不变, 于是有 ${}^4\boldsymbol{\omega}_5 = {}^4\boldsymbol{\omega}_4$, 进一步可得连杆 5 相对坐标系 O_5 的速度 ${}^5\mathbf{v}_5$ 和角速度 ${}^5\boldsymbol{\omega}_5$ 。再根据机器人姿态矩阵 ${}^0\mathbf{R}_5$ [25] 可得连杆 5 相对基坐标系 O_0 的速度 ${}^0\mathbf{v}_5$ 和角速度 ${}^0\boldsymbol{\omega}_5$:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{v}_5 \\ {}^0\boldsymbol{\omega}_5 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{R}_5 & 0 \\ 0 & {}^0\mathbf{R}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^5\mathbf{v}_5 \\ {}^5\boldsymbol{\omega}_5 \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{J} [\dot{\varphi}_1 \quad \dot{\varphi}_2 \quad \dot{\varphi}_3 \quad \dot{\varphi}_4 \quad \dot{\varphi}_5]^T \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中矩阵 \mathbf{J} 即为所求解的机器人雅可比矩阵, 它为 6×5 矩阵。

1.2.2 关节导致的末端变形建模

在分析机器人关节 1 ~ 3 弱刚性关节传递链和关节 4 及关节 5 对机器人末端变形的影响时, 将每个关节的组成部件等效为一个整体, 并分别以 $k_1 \sim k_5$ 表示关节 1 ~ 5 的整体刚度, 在此简称为关节刚度。机器人笛卡儿刚度矩阵 \mathbf{K} 和关节刚度矩阵 \mathbf{K}_θ 的关系 [28] 为

$$\mathbf{K} = \mathbf{J}^{-T} \mathbf{K}_\theta \mathbf{J}^{-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_\theta = \text{diag}(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5)$$

机器人作业时, 末端受到基坐标系下外力 ${}^5\mathbf{F}$ 的作用, 产生相应的变形 \mathbf{D}_j , 可建立二者关系 [29] 为

$${}^5\mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{D}_j \quad (7)$$

式中: ${}^5\mathbf{F} = ({}^5F_x, {}^5F_y, {}^5F_z, {}^5M_x, {}^5M_y, {}^5M_z)^T$, 分别为外力 ${}^5\mathbf{F}$ 在 x 、 y 和 z 方向的力与力矩; $\mathbf{D}_j = (d_{jx}, d_{jy}, d_{jz}, \delta_{jx}, \delta_{jy}, \delta_{jz})^T$, 分别为变形 \mathbf{D}_j 在 x 、 y 和 z 方向的挠度与转角。

将式(6)代入式(7)中可得机器人末端变形与各关节刚度及末端所受外力的关系:

$${}^5\mathbf{F} = \mathbf{J}^{-T} \mathbf{K}_\theta \mathbf{J}^{-1} \mathbf{D}_j \quad (8)$$

因雅可比矩阵 \mathbf{J} 为 6×5 矩阵, 为了避免雅可比矩阵的求逆计算过程, 将式(8)表示为

$$\mathbf{D}_j = \mathbf{J} \mathbf{K}_\theta^{-1} \mathbf{J}^T {}^5\mathbf{F} \quad (9)$$

1.3 机器人柔性杆导致的末端变形建模

机器人横臂连杆具有明显的结构柔性和悬臂梁特征, 为了使机器人具有灵活、轻巧的运动特性, 对其进行了减重轻量化设计, 以减小惯性负载。然而, 轻量化设计会导致横臂柔性杆在机器

人作业过程中易发生变形, 影响机器人的定位精度, 因此, 开展了机器人柔性杆导致的末端变形建模。有限元方法相对于数值计算方法能够更好地解决复杂结构求解, 具有更广泛的适用性和准确性, 本文采用有限元方法进行机器人柔性杆导致的末端变形建模。

在 ANSYS 软件中建立图 4 所示的柔性杆有限元仿真模型, 设置仿真参数: 密度为 2810 kg/m^3 , 弹性模量为 $72\,000 \text{ N/mm}^2$, 抗剪模量为 $26\,900 \text{ N/mm}^2$, 泊松比为 0.33, 网格大小设置为 5 mm 。在图 4 中的 A 端施加固定约束以模拟柔性杆的固定端, 在 B 端施加负载以模拟柔性杆自由端所受外力。

A Fixd Support
B Force:1N



图 4 柔性杆有限元仿真模型

Fig.4 Finite element simulation model of flexible rod

为准确描述柔性杆在不同外力下的变形, 在图 4 所示 B 点处建立球面坐标系, 使用 ANSYS 软件分析其受到单位力、极角 $\alpha \in [0, \pi)$ 、方位角 $\beta \in [0, 2\pi)$ 所构成半球面不同方向的力对应产生的变形。将极角 α 和方位角 β 在各自取值范围内均匀取 20 个点, 通过仿真分析柔性杆对应变形, 柔性杆在 3 个坐标轴方向的变形与极角和方位角的关系如图 5 所示。

当柔性杆受到外力作用时, 如果外力的夹角恰好位于图 5 中四边形的顶点上, 则可通过图 5 直接读取单位力导致的柔性杆在 3 个坐标轴方向的变形; 如果外力的夹角处于四边形内部时, 则根据图 5 有限元变形仿真结果选择四边形的 4 个顶点进行双线性插值处理, 可得 (α, β) 对应单位力下的 3 个坐标轴方向的变形 d_r :

$$d_r = (1-u)(1-v)d_{r11} + u(1-v)d_{r21} + (1-u)vd_{r12} + uvd_{r22} \quad (10)$$

$$u = \frac{\alpha - \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad v = \frac{\beta - \beta_1}{\beta_2 - \beta_1}$$

式中: (α_1, β_1) 、 (α_1, β_2) 、 (α_2, β_1) 和 (α_2, β_2) 分别为四边形的 4 个顶点; d_{r11} 、 d_{r12} 、 d_{r21} 和 d_{r22} 分别为 4 个顶点相应的变形。

利用图 5 和式(10) 求出柔性杆在单位力作用下的 3 个坐标轴方向的位置变形, 再将相应外力数值乘以该变形结果, 即可得到该外力作用下的位置变形。

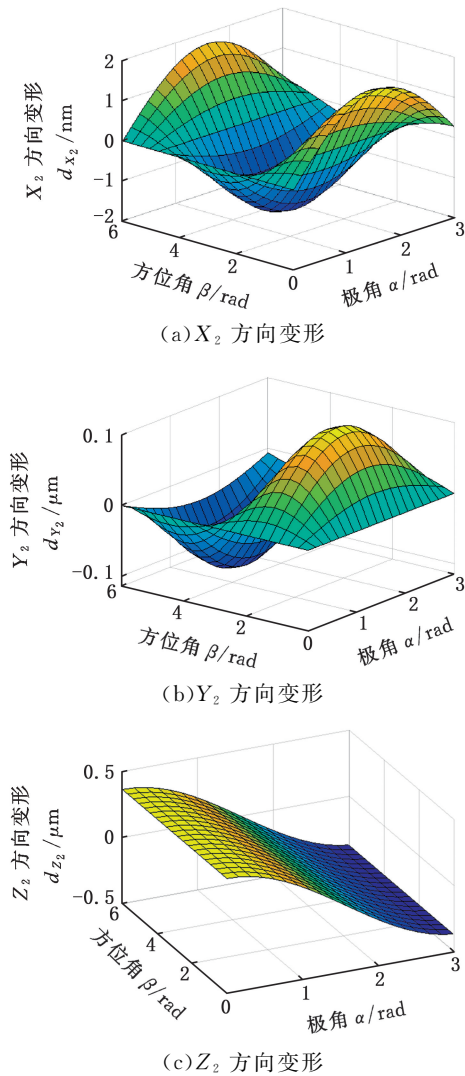


图 5 柔性杆变形与力夹角的关系

Fig.5 Relation between deformation of flexible rod and force angles

当柔性杆受到绕图 3 中 Y_2 轴的单位力矩作用时,有限元仿真设置和沿 Z_2 轴的位置变形结果如图 6 所示。当柔性杆受到绕 Y_2 轴的力矩作用时,只需将相应力矩数值乘以图 6b 中所示的单位力矩作用下的位置变形即可得到该力矩作用下柔性杆沿 Z_2 轴的位置变形。

同理,当柔性杆受到绕图 3 中 Z_2 轴的单位力矩作用时,有限元仿真设置和沿 Y_2 轴的位置变形结果如图 7 所示。当柔性杆受到绕 Z_2 轴的力矩作用时,只需将相应力矩数值乘以图 7b 中所示的单位力矩作用下的位置变形即可得到该力矩作用下柔性杆沿 Y_2 轴的位置变形。

当柔性杆受到绕图 3 中 X_2 轴的单位力矩作用时,由于该力矩为扭转力矩,不会造成柔性杆的位置变形,只会使柔性杆绕 X_2 轴旋转产生姿态变形,有限元仿真设置和绕 X_2 轴的姿态变形结果如图 8 所示。当柔性杆受到绕 X_2 轴的力矩时,只需将力

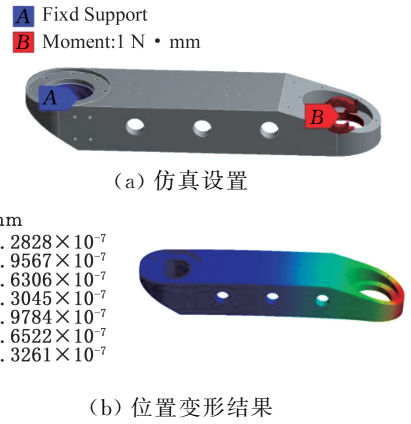


图 6 绕 Y_2 轴单位力矩仿真设置和位置变形结果
Fig.6 Simulation setting and positional deformation results of unit torque around Y_2 axis

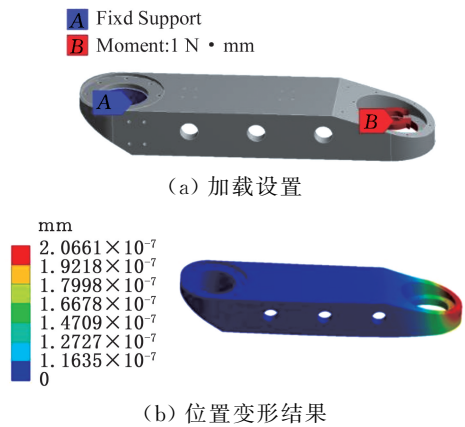


图 7 绕 Z_2 轴单位力矩仿真设置和位置变形结果
Fig.7 Simulation setting and positional deformation results of unit torque around Z_2 axis

矩数值乘以图 8b 中所示的姿态变形即可得到该力矩导致的柔性杆绕 X_2 轴的姿态变形 δ_{rx} 。

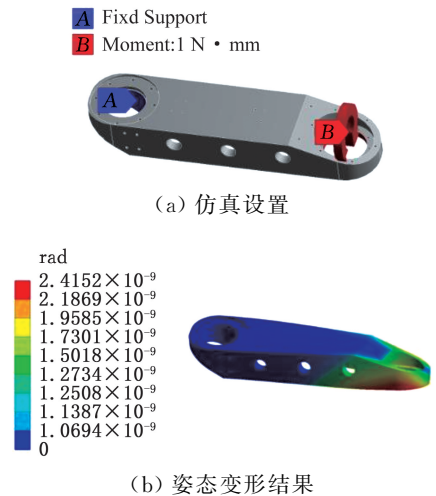


图 8 绕 X_2 轴单位力矩仿真设置和姿态变形结果
Fig.8 Simulation setting and orientational deformation results of unit torque around X_2 axis

将外力和力矩对柔性杆造成的位置变形进行线性叠加,可得柔性杆沿三个坐标轴方向的位置

变形分别为 d_{rx} 、 d_{ry} 和 d_{rz} 。根据柔性杆小变形假设,可得柔性杆绕 Y_2 轴的姿态变形 δ_{ry} 和绕 Z_2 轴的姿态变形 δ_{rz} :

$$\left. \begin{aligned} \delta_{ry} &= \arctan\left(\frac{d_{rx}}{L}\right) \\ \delta_{rz} &= \arctan\left(\frac{d_{ry}}{L}\right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: L 为机器人横臂柔性杆的长度, $L = 580 \text{ mm}$ 。

综上,可得横臂柔性杆末端在受到外力和外力矩时产生的变形:

$$\mathbf{D}_r = (d_{rx}, d_{ry}, d_{rz}, \delta_{rx}, \delta_{ry}, \delta_{rz})^T \quad (12)$$

式中: \mathbf{D}_r 为坐标系 O_2 处的变形。

为了分析柔性杆变形对机器人末端变形的影响,需将 \mathbf{D}_r 转换到基坐标系表示下坐标系 5 处(即机器人末端)的变形 \mathbf{D}_d :

$$\mathbf{D}_d = \begin{bmatrix} {}^5\mathbf{R}_2 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^5\mathbf{R}_2 \end{bmatrix} \mathbf{D}_r = (d_{dx}, d_{dy}, d_{dz}, \delta_{dx}, \delta_{dy}, \delta_{dz})^T \quad (13)$$

本文所研究的柔性杆导致的机器人末端变形建模,可以为实验测试中因各杆件及关节之间变形的高度非线性耦合特征而导致测量不准确或无法测量的问题或不具备实验测试条件情况,提供一种研究柔性杆导致的机器人末端变形的有限元仿真求解方式。

1.4 机器人末端综合变形建模

机器人结构中弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构是导致机器人末端变形的主要因素,此外,弱刚性关节传动链和柔性杆的耦合作用、机器人其他连杆的变形及重力作用等因素也会对机器人末端变形产生影响。在机器人实际作业过程中,后者这些次要因素对机器人末端变形的影响,远小于前者的影响。考虑这些次要因素通常涉及复杂的建模计算,为了简化分析和计算,忽略这些次要因素的影响,将机器人末端变形近似看作只由弱刚性关节传动链结构和横臂柔性杆结构引起。由此可得机器人末端综合变形 \mathbf{D}_{jd} :

$$\mathbf{D}_{jd} \approx \mathbf{D}_j + \mathbf{D}_d = (d_x, d_y, d_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z)^T \quad (14)$$

在式(14)表示的机器人末端综合变形中,弱刚性关节传动链结构主要通过第 1 ~ 3 关节的变形造成较大的末端变形,柔性杆结构主要通过横臂连杆的弯曲和扭转变形造成较大的末端变形,这些变形对机器人末端综合变形具有叠加效应。于是,研究弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构对机器人末端变形的影响,可以提高机器人灵巧运动控制性能和高精度接触作业能力,并为机器人刚度辨识提供理论模型基础。

2 机器人关节刚度辨识

2.1 机器人关节刚度辨识方法

机器人每个关节的刚度都会直接影响机器人整体刚度,且各关节间存在耦合效应,关节间的相互作用会影响机器人的刚度性能。因此,需综合考虑所有机器人关节的刚度特性,以全面评估机器人系统的整体刚度。

由于所研究机器人在末端执行器作业工具作业点与关节 4 和关节 5 轴线交点重合时,机器人末端的位置和姿态相互解耦,所以在刚度辨识实验中需要同时测量机器人末端的位置变形和姿态变形,以分别辨识求解机器人第 1 ~ 3 移动关节刚度和第 4、5 旋转关节刚度。该情况不同于通常的六自由度串联工业机器人的刚度辨识求解,后者只需考虑末端的位置变形和外力的关系即可求解机器人各关节刚度^[30]。

当所研究机器人因结构制造误差和装配误差等因素使得末端执行器作业点与关节 4 和关节 5 轴线交点不重合时,对应的机器人运动特性和六自由度串联工业机器人的运动特性相似,只需测量末端的位置变形即可辨识求解所研究机器人的各关节刚度,不再需要额外测量末端的姿态变形。此时,通过上述同时测量末端位置变形和姿态变形的刚度辨识方式仍具有适用性。

在机器人刚度辨识实验中,所测量的末端变形为机器人弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构共同作用引起的变形 \mathbf{D}_{jd} 。首先,根据式(13)柔性杆末端变形模型求解柔性杆结构引起的机器人末端变形 \mathbf{D}_d ;其次,由式(14)计算获得机器人 5 个关节结构引起的机器人末端变形 \mathbf{D}_j 。由式(9)可得

$$\begin{bmatrix} d_{jx} \\ d_{jy} \\ d_{jz} \\ \delta_{jx} \\ \delta_{jy} \\ \delta_{jz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} \sum_{i=1}^6 (J_{i15} F_i) & \cdots & J_{15} \sum_{i=1}^6 (J_{i15} F_i) \\ \vdots & & \vdots \\ J_{61} \sum_{i=1}^6 (J_{i15} F_i) & \cdots & J_{65} \sum_{i=1}^6 (J_{i15} F_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1^{-1} \\ k_2^{-1} \\ k_3^{-1} \\ k_4^{-1} \\ k_5^{-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: J_{ij} 为雅可比矩阵的第 i 行第 j 列元素; 5F_i 为 ${}^5\mathbf{F}$ 的第 i 个元素。

式(15)可进一步表示为

$$\mathbf{D}_j = \mathbf{A}_j \mathbf{K}_j \quad (16)$$

$$\mathbf{A}_j = \begin{bmatrix} J_{11} \sum_{i=1}^6 (J_{i15} F_i) & \cdots & J_{15} \sum_{i=1}^6 (J_{i15} F_i) \\ \vdots & & \vdots \\ J_{61} \sum_{i=1}^6 (J_{i15} F_i) & \cdots & J_{65} \sum_{i=1}^6 (J_{i15} F_i) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_j = [k_1^{-1} \quad k_2^{-1} \quad k_3^{-1} \quad k_4^{-1} \quad k_5^{-1}]^T$$

其中, \mathbf{K}_j 中元素为关节刚度矩阵 \mathbf{K}_0 主对角线元素的逆。

为消除测量误差、模型误差和噪声的影响, 提高机器人刚度辨识的准确性, 在机器人刚度辨识实验中选取 n 组不同的位姿测量机器人末端的变形及所受外力, 构成 $6n$ 个机器人刚度辨识方程。所研究机器人有 5 个待求解的关节刚度, 于是, 所构成方程组为超定方程组, 各关节刚度不存在精确解。本文采用广义逆方法求解机器人各关节刚度的近似解, 即找到一个 $\mathbf{K}_j = \mathbf{A}_j^\dagger \mathbf{D}_j$, 通过最小化残差二范数 $\|\mathbf{A}_j \mathbf{K}_j - \mathbf{D}_j\|_2^2$, 求解机器人关节刚度的近似解, 如下:

$$\mathbf{K}_j = (\mathbf{A}_j^\top \mathbf{A}_j)^{-1} \mathbf{A}_j^\top \mathbf{D}_j \quad (17)$$

2.2 机器人关节刚度辨识方法流程

所设计的机器人刚度辨识实验布局如图 9 所示。通过钢丝绳悬挂重物的方式施加机器人末端所受外力。末端不同位姿状态下, 通过定滑轮使钢丝绳在定滑轮处构成不同的夹角, 实现对机器人施力方向的改变。利用激光跟踪仪测量反射球加载前后的位置变形, 再通过位置变形和基坐标系 O_0 的变换关系得到反射球处的姿态变形。

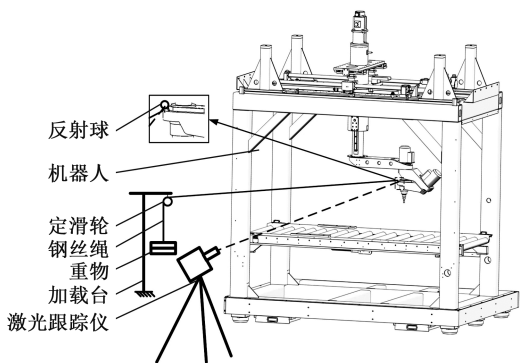


图 9 机器人刚度辨识实验布局示意图
Fig.9 Schematic diagram of robot stiffness identification experiment layout

由 2.1 节所述的机器人关节刚度辨识方法可知, 激光跟踪仪测量反射球处的变形为弱刚性传动链结构和横臂柔性杆结构共同作用的结果。首先通过式(13)求解柔性杆导致的机器人末端变形; 然后通过式(14)求解机器人各关节引起的末端变形; 最后, 采用广义逆求解通过所提机器人关节刚度辨识方法(式(17))辨识求解机器人各关节刚度 $k_1 \sim k_5$ 。

机器人刚度辨识方法对应实验流程如图 10 所示, 主要步骤如下:

- 1) 激光跟踪仪标定机器人基坐标系 O_0 , 建立机器人基坐标系与机器人末端反射球测量坐标系的关系, 后续激光跟踪仪测量的机器人末端位

姿便可通过测量软件自动统一转换至机器人基坐标系下表示的末端位姿。

- 2) 将固定加载台和定滑轮调整到合适位置, 激光跟踪仪测量标定定滑轮的位置。

- 3) 选取适宜测量位置。机器人在上半个完整球面全域内所有可达姿态由关节 4 和关节 5 决定, 在刚度辨识实验中选取一组关节 1 ~ 3 取值, 并将关节 4 和关节 5 分别按一定间隔取值, 分析关节 4 和关节 5 的不同取值对机器人刚度的影响。在此, 共选取 10 个测量位置。

- 4) 机器人运行至初始测量位置。

- 5) 分别测量加载重物前后对应的反射球位置, 并计算相应的位置变形和姿态变形。

- 6) 判断是否所有选取的测量位置已测量完毕, 如果已测量完毕, 则执行步骤 7), 否则, 机器人移至下一个测量位置, 执行步骤 5)。

- 7) 基于每个测量位置处的各关节取值、所受外力和反射球处变形等实验数据, 采用所提出的考虑弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构的机器人刚度辨识方法, 利用式(17)求解机器人各关节刚度。求解完毕后, 机器人刚度辨识结束。

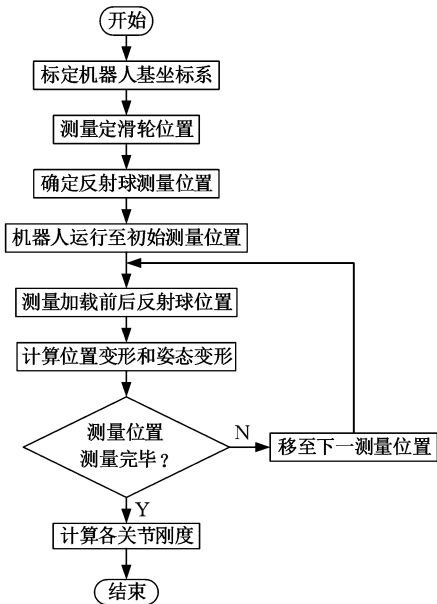


图 10 机器人刚度辨识方法实验流程
Fig.10 Experimental flow of robot stiffness identification method

由图 1 和图 2 所示的机器人结构可知, 移动关节 1 和 2 通过两端支承架与落地式桁架型机架连接, 其部分重力、所受力矩可传递到机架上。当所受外力发生变化时, 移动关节 1 和 2 的整体刚度将会稳定在某个较小范围内, 因此, 可以将二者视为定刚度。旋转关节 4 和 5 的结构与传统六自由度串联工业机器人的结构类似, 可将二者看作定刚度。移动关节 3 会因不同的关节取值而呈现

不同的长度,具有变刚度特性。

为了准确获取移动关节 3 的变刚度关系,需在上述机器人刚度辨识方法实验中,针对移动关节 3 取多组不同值,分别求取其对应的刚度值,并进一步求解关节 3 刚度与对应关节取值的拟合关系,从而提高机器人关节 3 刚度描述的准确性。根据该关节 3 变刚度拟合关系以及某一关节取值,即可求出相应关节刚度。

3 机器人刚度实验

3.1 机器人刚度辨识实验

以自主研发的一种 3T2R 紧凑型复合式高灵巧性机器人为实验平台,如图 11 所示。选用 Leica AT960-MR 绝对激光跟踪仪作为测量设备,质量为 8 kg 的重物作为负载施加机器人末端所受外力,通过定滑轮与钢丝绳构成不同的夹角改变机器人所受外力的方向。经激光跟踪仪测量标定,定滑轮在机器人基坐标系 O_0 中的位置为(552.7817 mm, 1435.4418 mm, 1073.2999 mm)。

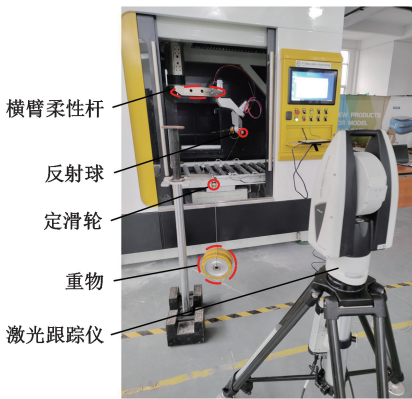


图 11 机器人刚度辨识实验平台

Fig.11 Experiment platform for robot stiffness identification

当关节 3 的取值为 30 rad 时,对应的该组机器人关节取值和反射球处位置变形与姿态变形分别如表 1 和表 2 所示。其中,表 2 中反射球处的变形为弱刚性关节传动链和横臂柔性杆综合影响下的变形 D_{jd} 。

常规机器人关节刚度辨识方法^[14,31-32]通常将机器人连杆视为不发生变形的刚性杆件,不考虑柔性杆变形的影响,仅进行机器人关节刚度辨识。与常规机器人关节刚度辨识方法相比,本文所提机器人关节刚度辨识方法考虑横臂柔性杆变形对机器人末端变形的影响。

采用本文所提机器人关节刚度辨识方法以及常规机器人关节刚度辨识方法^[14,31-32]进行上述刚度辨识实验,得到各关节刚度如表 3 所示。对

表 1 机器人测量位置

Tab.1 Robot measuring position

组别	关节 1	关节 2	关节 3	关节 4	关节 5
1	318.31 mm (100 rad)	318.31 mm (100 rad)	47.75 mm (30 rad)	0 rad	0 rad
2	318.31 mm (100 rad)	318.31 mm (100 rad)	47.75 mm (30 rad)	0 rad	$-\pi/6$ rad
3	318.31 mm (100 rad)	318.31 mm (100 rad)	47.75 mm (30 rad)	0 rad	$-\pi/4$ rad
4	318.31 mm (100 rad)	318.31 mm (100 rad)	47.75 mm (30 rad)	$\pi/4$ rad	$-\pi/6$ rad
5	318.31 mm (100 rad)	318.31 mm (100 rad)	47.75 mm (30 rad)	$\pi/4$ rad	$-\pi/3$ rad
6	318.31 mm (100 rad)	318.31 mm (100 rad)	47.75 mm (30 rad)	$\pi/4$ rad	$-\pi/2$ rad
7	318.31 mm (100 rad)	318.31 mm (100 rad)	47.75 mm (30 rad)	$\pi/3$ rad	$-\pi/4$ rad
8	318.31 mm (100 rad)	318.31 mm (100 rad)	47.75 mm (30 rad)	$\pi/3$ rad	$-\pi/3$ rad
9	318.31 mm (100 rad)	359.69 mm (226 rad)	47.75 mm (30 rad)	$\pi/3$ rad	$-\pi/2$ rad
10	318.31 mm (100 rad)	359.69 mm (226 rad)	47.75 mm (30 rad)	$\pi/2$ rad	$-\pi/2$ rad

表 2 反射球处位置变形和姿态变形测量结果

Tab.2 Measurement results of position deformation and orientation deformation at reflector

组别	d_x /mm	d_y /mm	d_z /mm	δ_x / 10^{-4} rad	δ_y / 10^{-3} rad	δ_z / 10^{-4} rad
1	0.0232	-0.2150	-0.0104	-0.2356	0.2162	0.2328
2	0.0506	-0.2550	-0.0338	-0.8844	0.2508	0.3576
3	0.0673	-0.2437	-0.0077	-0.8500	0.2353	0.1702
4	0.0353	-0.2022	-0.0274	-0.5710	0.2075	0.3407
5	0.0453	-0.2349	-0.0061	-0.6823	0.2356	0.1402
6	0.0878	-0.2453	-0.0489	-0.7309	0.2393	-0.2456
7	0.0521	-0.2068	-0.0234	-0.7026	0.2151	0.3940
8	0.0477	-0.2395	-0.0254	-0.7781	0.2447	0.2174
9	0.0435	-0.2636	-0.0302	-0.5234	0.2564	-0.4327
10	0.0253	-0.2516	-0.0024	-0.3673	0.2539	-0.1502

表 3 机器人关节刚度辨识结果

Tab.3 Results of robot joint stiffness identification

N · m/rad

刚度辨识方法	关节 1	关节 2	关节 3	关节 4	关节 5
本文方法	5.9113	2.6676	2.7946	4.6802×10^3	7.0471×10^3
常规方法	5.6459	2.5764	1.1333	3.5953×10^3	5.1792×10^3

比可知,当采用本文所提方法考虑横臂柔性杆变形进行刚度辨识时,关节 3、关节 4 和关节 5 的刚度增大较多,分别增大了 146.59%、30.18% 和 36.07%。这是由于所研究机器人横臂柔性杆是影响机器人末端变形的一个不可忽视的主要因素,且它主要影响机器人末端沿基坐标系 O_0 的 Z 方向的变形。采用本文所提方法(即使用式(9)所示 D_j 作为机器人末端变形)进行机器人关节刚

度辨识,对应关节的机器人末端变形没有掺杂机器人横臂柔性杆变形影响,辨识得到较大的关节刚度值。而采用常规方法(即使用式(14)总变形 D_{jd} 作为机器人末端变形)进行关节刚度辨识,因将横臂柔性杆自身变形影响也叠加到关节对应的机器人末端变形中,致使辨识得到较小的关节刚度值。因此,本文所提方法相较于常规方法,能更加准确地辨识机器人关节刚度。

此外,由表 3 可知,两种刚度辨识方法所得机器人移动关节 1、2、3 的刚度低于旋转关节 4 和 5 的刚度。移动关节通过伺服电机驱动联轴器与滚珠丝杠副实现旋转运动转换为平移运动,而旋转关节直接由伺服电机和谐波减速器实现旋转运动。由于传动链结构形式和运动转换方式不同,关节 1、2、3 产生较大变形,而关节 4 和 5 仅产生较小变形,于是关节 4 和 5 呈现出较高的刚度。综合考虑机器人 5 个关节进行刚度辨识,有助于全面展示机器人整体刚度特性。

为了准确描述移动关节 3 的变刚度特性关系,针对关节 3 重新开展刚度辨识实验。移动关节 3 取值见表 4,其余关节取值同表 1。经实验测量与计算,得到关节 3 取不同值时对应的关节刚度,如表 4 所示。

表 4 关节 3 不同取值对应刚度值

Tab.4 Stiffness values for different values of joint 3

φ_3/rad	0	15	45	60	75
$k_3/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	3.1222	2.9249	2.7833	2.7893	2.7273
φ_3/rad	90	105	120	135	150
$k_3/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	2.6669	2.5635	2.5038	2.4322	2.3684

将表 3 和表 4 中的关节 3 的关节取值与对应刚度值进行数据拟合,可得图 12 所示的关节 3 的刚度 k_3 与关节取值 φ_3 对应拟合关系。关节 3 刚度的多项式拟合表达式为

$$k_3(\varphi_3) = 1.0658 \times 10^{-5} \varphi_3^4 - 3.5709 \times 10^{-3} \varphi_3^3 + 0.3877 \varphi_3^2 - 18.7258 \varphi_3 + 3121.1797 \quad (18)$$

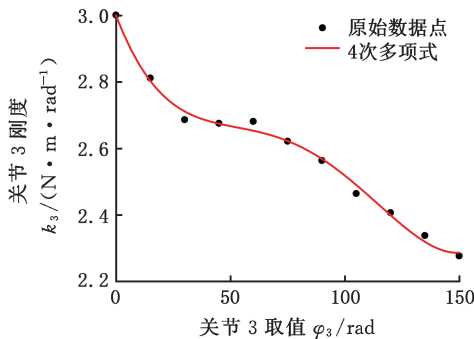


图 12 关节 3 刚度多项式拟合

Fig.12 Polynomial fitting of stiffness for joint 3

由图 12 可知,采用式(18)拟合关节 3 刚度可得到较为准确的拟合结果(决定系数 R^2 为

0.9941,在 11 组实验测量结果中,最大拟合误差为 1.08%)。于是,当关节 3 取不同值时,可根据式(18)求解对应的关节刚度。

3.2 机器人刚度验证实验

为了进一步验证所提出的考虑弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构的机器人刚度辨识方法的有效性,开展机器人刚度验证实验。实验中,在机器人末端悬挂 12 kg 的重物(如图 13 所示),并选取图 14 所示的 6 组具有代表性的典型机器人作业位姿进行实验。使用本文所提刚度辨识方法以及机器人末端综合变形模型(式(14)),开展机器人末端变形的实验测量结果和理论计算结果对比分析。

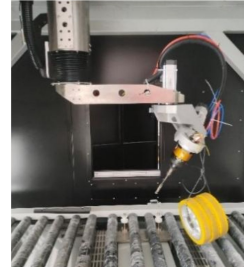
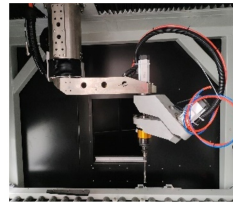
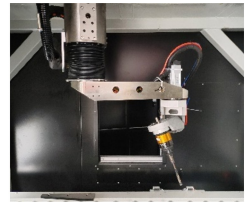


图 13 机器人刚度验证实验(末端悬挂 12 kg 重物)

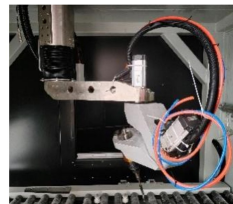
Fig.13 Robot stiffness verification experiment (hanging 12 kg weight at end)



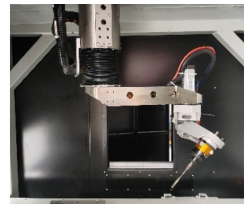
(a) 位姿 1



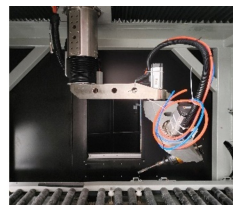
(b) 位姿 2



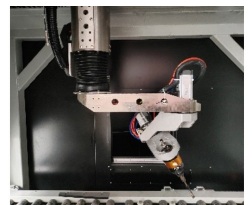
(c) 位姿 3



(d) 位姿 4



(e) 位姿 5



(f) 位姿 6

图 14 机器人 6 组位姿

Fig.14 Robot's 6-group poses

机器人在不同位姿下的末端变形的实验测量结果和理论计算结果如表 5 所示。机器人末端综合位置变形($d_c = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$)的实测值和计算值及变形误差率如图 15 所示。由表 5 可知,机

机器人末端变形在所选 6 组位姿处 X、Y、Z 方向的实测值和计算值较为接近。由图 15 可知,机器人末端实测值和计算值的综合位置变形误差率较小,对应 6 组位姿分别为 4.97%、5.33%、5.24%、5.30%、4.86% 和 5.16%。实验结果表明,所提刚度辨识方法能够较好地表征弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构对所研究机器人末端变形的影响。

表 5 机器人末端变形对比

Tab.5 Comparison of robot end deformations

mm

位姿序号	X 方向变形		Y 方向变形		Z 方向变形	
	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值
1	0.0114	0.0124	0.0145	0.0134	0.1137	0.1082
2	0.0243	0.0262	0.0081	0.0087	0.1609	0.1522
3	0.0045	0.0049	0.0501	0.0522	0.1497	0.1406
4	0.0484	0.0449	0.0108	0.0117	0.2686	0.2552
5	0.0920	0.0975	0.0095	0.0103	0.2819	0.2654
6	0.0183	0.0196	0.0412	0.0453	0.1878	0.1796

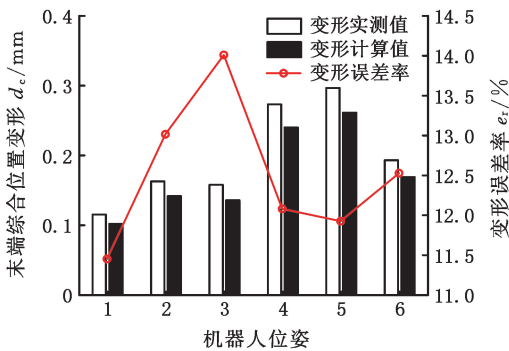


图 15 机器人末端综合位置变形和误差率

Fig.15 Integrated position deformation and error rate of robot end

4 结论

1) 针对一种 3T2R 紧凑型复合式高灵巧性机器人,为解决含有弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构的机器人刚度辨识问题,提出一种考虑弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构的机器人刚度辨识方法,研究弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构对机器人末端变形的影响,辨识机器人各关节刚度。

2) 设计并开展了机器人刚度辨识实验,结果表明,与常规方法相比,所提刚度辨识方法对应的关节 3、关节 4 和关节 5 的刚度分别增大了 146.59%、30.18% 和 36.07%,表明在所研究机器人关节刚度辨识中横臂柔性杆是不可忽略的影响因素。此外,利用 4 次多项式建立机器人关节 3 刚度与关节取值的拟合关系,可提高机器人关节刚度描述的准确性。

3) 选取 6 组典型机器人位姿开展机器人刚度验证实验,对比分析机器人末端变形实验测量结果和理论计算结果的误差率,结果表明,机器人末端综合位置变形误差率分别为 4.97%、5.33%、5.24%、5.30%、4.86% 和 5.16%,末端变形实测值与计算值的误差较小,进一步验证了所提出的考虑弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构的机器人刚度辨识方法的有效性。

参考文献:

[1] 刘伟,刘顺,邓朝晖,等. 工业机器人定位误差补偿技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(17): 1-16.
 LIU Wei, LIU Shun, DENG Zhaohui, et al. Research Progress on Positioning Error Compensation Technology of Industrial Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(17):1-16.

[2] DONG Song, ZHENG Kan, LIAO Wenhe. Stability of Lateral Vibration in Robotic Rotary Ultrasonic Drilling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 145:346-352.

[3] 张俊鑫,陈威,黄斯凯,等. 基于力位混合导向的工业机器人顺槽运动控制策略[J]. 中国机械工程, 2023, 34(6):712-719.
 ZHANG Junxin, CHEN Wei, HUANG Sikai, et al. Control Strategies for Industrial Robot Motion along Slot Based on Force and Position Hybrid Guidances [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(6):712-719.

[4] GUO Kai, ZHANG Yiran, SUN Jie. Towards Stable Milling: Principle and Application of Active Contact Robotic Milling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 182: 103952.

[5] 周健,郑联语,樊伟,等. 工业机器人定位误差在线自适应补偿[J]. 机械工程学报, 2023, 59(5): 53-66.
 ZHOU Jian, ZHENG Lianyu, FAN Wei, et al. Adaptive Online Compensation for Industrial Robot Positioning Error[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(5):53-66.

[6] GAO Ke, ZHOU Xiaoqin, WANG Rongqi, et al. Joint Stiffness Identification Based on Robot Configuration Optimization Away from Singularities[J]. Applied Sciences, 2023, 13(8):4922.

[7] 籍永建,姚利诚. 机器人铣削加工颤振自适应识别方法研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(18):2165-2176.
 JI Yongjian, YAO Licheng. Research on Self-adaptive Chatter Recognition Method for Robotic

- Milling[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(18):2165-2176.
- [8] 陈守欢, 周婷婷, 胡天亮. 六自由度铣削加工机器人刚度建模及误差补偿[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(2):404-418.
CHEN Shouhuan, ZHOU Tingting, HU Tianliang. Stiffness Modeling and Error Compensation Method of 6-DOF Milling Robot[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(2):404-418.
- [9] LIU Zhifeng, XU Jingjing, CHENG Qiang, et al. Rotation-joint Stiffness Modeling for Industrial Robots Considering Contacts[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(8):1-13.
- [10] HE Zhenya, SONG Mingjing, ZHANG Xianmin, et al. A New Prediction Method of Displacement Errors Caused by Low Stiffness for Industrial Robot[J]. *Sensors*, 2022, 22(16):5963.
- [11] KIM S H, NAM E, HA T I, et al. Robotic Machining: a Review of Recent Progress[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, 20(9):1629-1642.
- [12] 毛晨涛, 张翔, 祖洪飞, 等. 工业机器人重载下关节变形补偿[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(4):697-703.
MAO Chentao, ZHANG Xiang, ZU Hongfei, et al. A Joint Deformation Compensation Method for Heavy-load Industrial Robots[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(4):697-703.
- [13] 焦嘉琛, 田威, 张霖, 等. 工业机器人作业误差分级补偿技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(6):1627-1637.
JIAO Jiachen, TIAN Wei, ZHANG Lin, et al. Hierarchical Compensation Technology for Machining Error of Industrial Robots[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(6):1627-1637.
- [14] 郭英杰, 顾钊, 董辉跃, 等. 压脚压紧力作用下的机器人变形预测和补偿[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020(8):1457-1465.
GUO Yingjie, GU Fan, DONG Huiyue, et al. Prediction and Compensation of Robot Deformation under Pressure Force of Pressure Foot[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020(8):1457-1465.
- [15] LI Guozhi, ZHANG Fuhai, FU Yili, et al. Joint Stiffness Identification and Deformation Compensation of Serial Robots Based on Dual Quaternion Algebra[J]. *Applied Sciences*, 2018, 9(1):65.
- [16] XU Kai, WU Xing, LIU Xiaoqin, et al. Identification of Robot Joint Torsional Stiffness Based on the Amplitude of the Frequency Response of Asynchronous Data[J]. *Machines*, 2021, 9(9):204.
- [17] 孙龙飞, 房立金, 梁义勇. 新型工业机器人结构设计及其全域刚度预估方法[J]. *机器人*, 2018, 40(5):673-684.
SUN Longfei, FANG Lijin, LIANG Fengyong. Structure Design and Global Stiffness Prediction Method of a Novel Industrial Robot[J]. *Robot*, 2018, 40(5):673-684.
- [18] HU Mingwei, WANG Hongguang, PAN Xinan, et al. Elastic Deformation Modeling of Series Robots with Consideration of Gravity[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2022, 15(3):351-362.
- [19] GUO Feng, CHENG Gang, WANG Shilin, et al. Rigid-flexible Coupling Dynamics Analysis with Joint Clearance for a 5-DOF Hybrid Polishing Robot[J]. *Robotica*, 2022, 40(7):2168-2188.
- [20] ZHANG Qingyun, ZHAO Xinhua, LIU Liang, et al. Dynamics Analysis of Spatial Parallel Robot with Rigid and Flexible Links[J]. *Mathematical Biosciences and Engineering: MBE*, 2020, 17(6):7101-7129.
- [21] 杜严锋, 王聪. 柔性机械臂残余振动控制[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(7):165-171.
DU Yanfeng, WANG Cong. Residual Vibration Control for a Flexible Manipulator[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(7):165-171.
- [22] 谭月胜, 詹登辉, 张彭豪. 刚柔耦合串联机械臂末端位置误差分析与补偿[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2):416-426.
TAN Yueheng, ZHAN Denghui, ZHANG Penghao. Analysis and Compensation of End Position Error of Rigid-flexible Coupling Serial Manipulator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2):416-426.
- [23] GUO Wanjin, LI Ruifeng, CAO Chuqing, et al. A Novel Method of Dexterity Analysis for a 5-DOF Manipulator[J]. *Journal of Robotics*, 2016, 2016:8901820.
- [24] GUO Wanjin, LI Ruifeng, ZHU Yaguang, et al. A Robotic Deburring Methodology for Tool Path Planning and Process Parameter Control of a Five-degree-of-freedom Robot Manipulator[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(10):2033.
- [25] GUO Wanjin, LI Ruifeng, CAO Chuqing, et al. Kinematics, Dynamics, and Control System of a New 5-degree-of-freedom Hybrid Robot Manipulator[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(11):1-19.
- [26] 梁志强, 石贵红, 杜宇超, 等. 考虑主轴-刀柄结合面特性的机器人铣削系统刀尖频响预测研究[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(1):2-9.

- LIANG Zhiqiang, SHI Guihong, DU Yuchao, et al. Research on Tool Tip Frequency Response Prediction of Robot Milling Systems Considering Characteristics of Spindle-toolholder Interface[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(1):2-9.
- [27] 高贯斌, 张石文, 那靖, 等. 基于标定和关节空间插值的工业机器人轨迹误差补偿[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21):55-67.
- GAO Guanbin, ZHANG Shiwen, NA Jing, et al. Compensation of Trajectory Error for Industrial Robots by Interpolation and Calibration Method in the Joint Space[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(21):55-67.
- [28] 卢远, 国凯, 孙杰. 工业机器人轨迹精度力-位置复合补偿方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(14):181-189.
- LU Yuan, GUO Kai, SUN Jie. Force-position Composite Control Method for Trajectory Accuracy Compensation of Industrial Robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14):181-189.
- [29] 孙宁, 程龙. 串联弹性驱动器设计、建模及在机器人上的应用[J]. 自动化学报, 2021, 47(7):1467-1483.
- SUN Ning, CHENG Long. Design and Modeling of Series Elastic Actuators with Applications in Robot[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(7):1467-1483.
- [30] LEE J H, KIM S H, MIN B K. Posture Optimization in Robotic Drilling Using a Deformation Energy Model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 78:102395.
- [31] 陈钦韬, 殷参, 张加波, 等. 面向铣削任务的工业机器人刚度位姿优化[J]. 机器人, 2021, 43(1):90-100.
- CHEN Qintao, YIN Shen, ZHANG Jiabo, et al. Pose Optimization of Industrial Robots Based on Stiffness for Milling Tasks[J]. Robot, 2021, 43(1):90-100.
- [32] 关立文, 陈志雄, 刘春, 等. 钻铆机器人静刚度建模及优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(9):965-971.
- GUAN Liwen, CHEN Zhixiong, LIU Chun, et al. Static Stiffness Modeling for Optimizing Drilling and Riveting Robots[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(9):965-971.

(编辑 王旻玥)

柔顺控制. E-mail: guowanjin@chd.edu.cn.

本文引用格式:

郭万金, 李儒, 王利斌, 等. 一种考虑弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构的机器人刚度辨识方法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(5):974-985.

GUO Wanjin, LI Ru, WANG Libin, et al. A Robot Stiffness Identification Method Considering Weakly Rigid Joint Transmission Chain Structures and Flexible Rod Structures[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5):974-985.

第十一届先进制造技术与应用材料 国际学术会议顺利召开

2025年4月11—13日,第十一届先进制造技术与应用材料国际学术会议(ICAMMT2025)在中南大学成功举办。会议由中南大学、湖南科技大学及中国机械工程杂志社联合主办,极端服役性能精准制造全国重点实验室、粉末冶金全国重点实验室、中南大学轻合金研究院、中南大学机电工程学院、中南大学粉末冶金研究院承办。来自国内外近300名专家学者齐聚一堂,共同探讨先进制造技术与应用材料领域的最新研究成果与未来发展方向。

4月12日上午的开幕式由大会主席中南大学喻海良教授主持,中南大学副校长郭学益教授和湖南科技大学副校长王进教授分别致辞,粉末冶金全国重点实验室主任周科朝教授宣读了中国有色金属学会和中国机械工程学会发来的贺信。

大会学术报告环节分别由湛利华教授、张斗教授、陈宇强教授和李专教授主持。本次大会邀请到17位来自全球的高水平行业专家和学者作报告,其中包括欧洲科学院院士、西班牙马德里理工大学 Javier Llorca 教授,香港理工大学先进制造研究院副院长、本刊编委傅铭旺教授,清华大学宋成教授,澳大利亚伍伦贡大学工程与信息学部副部长、本刊编委李会军教授,英国布鲁内尔大学冀守勋教授,英国皇家化学会会士、剑桥大学/东北大学 Ali Reza Kamali 教授,俄罗斯诺索夫马格尼托哥尔斯克国立技术大学 Pesin Alexander 教授等。报告内容涵盖了生物医学材料、金属成形技术、磁声耦合技术、数字孪生技术、绿色制造技术等多个热点领域。

4月13日,六个专题分论坛同时开展,主题围绕先进成形制造技术、材料加工等,80余位国内外知名院校专家学者受邀作报告。其中,本社主办的2025年极端应变速率成形制造前沿论坛(《中国机械工程》机械人学堂第7期活动)备受关注,线下80余人、线上1900余人次参与。2024年,《中国机械工程》联合中南大学轻合金研究院组织出版了“轻质薄壁构件极端应变速率成形制造”专题(客座主编:湛利华教授、喻海良教授、崔晓辉研究员)。在专题出版的基础上,本社联合湖南省机械工程学会、湖南省机械工程学会塑性工程分会、中南大学轻合金研究院,共同举办了本次前沿论坛。

(本刊编辑部)