

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904980

绳索驱动式变刚度关节柔顺控制与力补偿方法研究*

房立金¹, 张明², 孙凤³, 岡宏一⁴

(1. 东北大学机器人科学与工程学院 沈阳 110169; 2. 东北大学机械能与自动化学院 沈阳 110819;
3. 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870; 4. 高知工科大学智能机械系统工学科 高知 782-8502)

摘要: 机器人柔顺运动有助于提高机器人交互运动时的安全性与稳定性,越来越受到人们的重视。针对一种绳索驱动式具有主被动柔顺性的柔性机器人关节,提出一种适用于绳索驱动式变刚度关节的刚度与位置解耦控制方式,实现了关节位置控制的同时,又实现了关节柔顺性的统一。利用雅可比矩阵和模型间静力学关系,得到关节刚度模型,并通过优化方法对变刚度装置的力学模型和刚度模型构成的非线性方程组求解,实现变刚度关节刚度与位置的非线性解耦。在解耦控制基础上提出一种力矩观测方法,实现了关节力矩补偿,增强了关节位置控制能力;建立了绳索驱动式变刚度关节样机和控制系统,并通过仿真和实验分析的方式验证了所提柔顺控制方式的可行性和有效性。

关键词: 变刚度关节;解耦控制;柔顺性;力矩补偿

中图分类号: TH39 TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40 510.80

Study on compliant control and torque compensation method of wire-driven variable stiffness joint

Fang Lijin¹, Zhang Ming², Sun Feng³, Koichi Oka⁴

(1. Faculty of Robot Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

4. Department of Intelligent Mechanical System Engineering, Kochi University of Technology, Kochi 782-8502, Japan)

Abstract: The compliant motion of robot helps to improve its safety and stability in interactive motion, which has attracted much more attention in recent years. In this paper, aiming at a wire-driven flexible robotic joint with active and passive compliance, a decoupling compliant control method for the stiffness and position of the wire-driven variable-stiffness joint is proposed, which realizes the joint position control and also achieves the uniformity of joint compliance. The stiffness model of the joint is obtained using the Jacobian matrix and the static relationship between the models. The nonlinear equations composed of the mechanical model and stiffness model of the variable stiffness device are solved with optimization method to realize the nonlinear decoupling of the stiffness and position of the variable-stiffness joint. Based on the decoupling control, a torque observation method is proposed to realize the torque compensation of the joint and enhance the joint position control ability. The prototype and control system of the wire-driven variable-stiffness joint were built, and simulation and experiment analysis verify the feasibility and effectiveness of the above compliant control method.

Keywords: variable stiffness joint; decoupling control; compliance; torque compensation

0 引言

机器人柔顺性,可以很大程度地提高人机安全性和

环境适应能力,已经成为机器人发展的重要方向^[1-6]。通常机器人柔顺性可以分为被动柔顺性和主动柔顺性。被动柔顺性,通常是利用弹性器件增加机器人与环境作用时的安全性或提高运动性能,但由于弹性装置本身不具

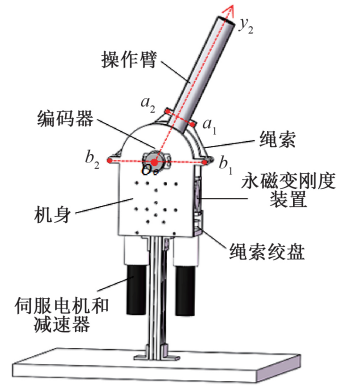
有控制能力, 很难在实现精确定位的同时又实现力的控制。主动柔顺性, 通常是通过力反馈方式控制接触力和接触位移之间的关系^[6-8], 实现机器人主动安全性。按照控制方式的不同, 通常可以分为阻抗控制、力/位混合控制、自适应控制和智能控制等。但上述控制方式都或多或少存在一定局限性, 如计算复杂、适用范围有限等, 特别是随着机器人与使用者的物理性人机交互的增加, 机器人所需刚度持续降低, 力矩传感器灵敏度不断增加, 导致系统不稳定几率也随之增加。

机械式变刚度关节可以很好地解决上述问题, 受到越来越多的重视^[9-17], 通常可以分为并联和串联两种形式。串联形式中, 变刚度部件和刚度驱动电机通常位于关节输出端, 增加了关节输出端的质量与惯量, 特别是在构建多自由度变刚度关节时会进一步限制关节的刚度变化能力。并联形式, 采用类似骨骼肌的拮抗驱动方式, 其中变刚度模块与驱动模块安装可以与关节输出端分离, 安装在输入端, 可以很大程度地减少输出端的质量和惯量。之前学者设计的绳索驱动并联变刚度关节结构大多是圆盘形关节两侧对称布置变刚度弹簧机构^[10-11], 由于其力学特性不随关节位置改变而改变, 因此其位置与刚度的解耦控制方式并不适用于仿生或多自由并联关节。本文针对一种绳索驱动式具有主被动柔顺性的变刚度关节, 以并联机器人构型为基础, 利用雅可比矩阵和模型间静力学关系, 得到机器人关节刚度模型, 并通过优化方法对变刚度装置的力学模型和关节刚度模型构成的非线性方程组求解, 实现关节的刚度与位置的非线性解耦。既实现了关节位置控制的同时, 又实现了关节柔顺性一致。此种方式可以实现力学关系随着关节的位置改变而改变的变刚度关节的解耦控制。本文在解耦控制的基础上提出一种力矩观测方法, 实现了柔性变刚度关节的力矩补偿, 增强了柔性变刚度关节位置跟踪能力, 解决了在不同刚度条件下, 外载荷对柔性变刚度关节位置精度影响大的缺陷。

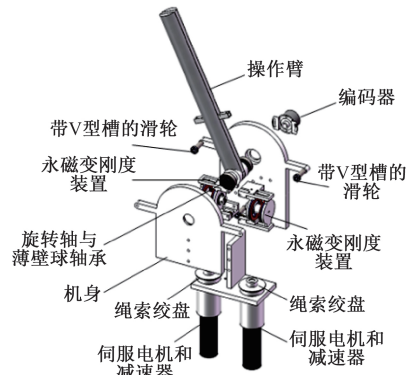
1 关节机械结构

绳索驱动式柔性变刚度机器人关节的三维模型如图 1(a) 所示, 变刚度关节的内部结构如图 1(b) 所示。该绳索驱动式柔性变刚度关节以拮抗式关节构型为基础。以绳索、永磁变刚度部件、带绳索绞盘的直流伺服电机作为柔性驱动单元。期间设置有带 V 形槽滑轮, 起到绳索导向的作用, 关节两侧对称布置有两组柔性驱动单元。编码器与关节旋转轴同轴, 用于反馈柔性关节实时位置和关节实时刚度计算。其与传统圆盘形柔性变刚度关节^[10-11], 主要不同之处是操作臂上力的作用点 a_1 、 a_2 和关节上力的施加点 b_1 、 b_2 , 形成梯形结构。拉力 a_1b_1 和

a_2b_2 作用于关节上的力臂是随着关节的位置改变而改变的。因此本文提出的关节刚度模型和解耦方式同样也适用于绳索驱动的多自由并联柔性变刚度关节^[18-19]。另外一个不同之处是本文采用的变刚度装置为文献[13]中所述的永磁变刚度装置, 在驱动电机提供同样力矩情况下, 可以增加刚度变化范围, 因此可以减小关节质量、惯量和体积。



(a) 三维结构
(a) 3-D structure diagram



(b) 机构爆炸示意图
(b) Mechanical explosion diagram

图 1 柔性变刚度机器人关节模型

Fig.1 Model of the flexible variable stiffness robot joint

2 关节刚度建模

图 2 所示为本文建立的变刚度关节的坐标系描述。参考坐标系 Ox_0y_0 与关节旋转坐标系 Ox_1y_1 同旋转轴, 其中参考坐标系固定在机身上。操作臂坐标系 $O_2x_2y_2$ 位于操作臂末端。

图 2 中, 绳索上的拉力为 $\xi_j (j=1, 2)$; 绳索拉力方向的瞬时力臂为 $r_j (j=1, 2)$; 操作臂重力为 mg ; 重力方向的瞬时力臂为 r_g 。

操作臂重力与绳索拉力存在如下静力平衡关系:

$$\sum_{j=1}^2 \xi_j \times r_j - mg \times r_g = 0, j=1, 2 \quad (1)$$

假定在操作臂上作用一个无穷小的转矩 ΔT 引起操

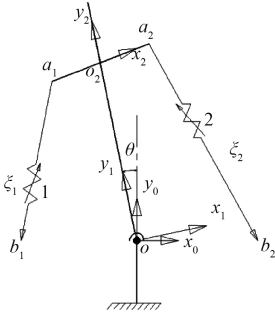


图2 柔性变刚度机器人关节坐标系

Fig.2 Coordinate system of the flexible variable-stiffness robot joint

作臂一个无穷小的转动 $\Delta\theta$ 。

$$\frac{\Delta T}{\Delta\theta} = \sum_{j=1}^2 \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial \theta} \times r_j + \xi_j \times \frac{\partial r_j}{\partial \theta} \right) - mg \times \frac{\partial r_g}{\partial \theta} \quad (2)$$

式中: $\Delta T/\Delta\theta$ 为操作臂刚度 K_θ 。

绳索伸长量 L 与关节转角 θ 的对应关系可以通过刚性并联机器人位置变换得到。对位姿变化两端求导,可以得到绳索速度 $\dot{L} = [L_1 \quad L_2]^T$ 与关节速度 $\dot{\theta}$ 对应关系。

$$\dot{L} = J\dot{\theta} \quad (3)$$

式中: J 为 $\dot{\theta}$ 到 \dot{L} 雅可比矩阵。将参数代入上式得到:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{R'(r\sin\theta - H\cos\theta)}{\sqrt{R'^2 + r^2 + H^2 - 2R'(r\cos\theta + H\sin\theta)}} \\ -R'(r\sin\theta + H\cos\theta) \\ \frac{R'(r\sin\theta - H\cos\theta)}{\sqrt{R'^2 + r^2 + H^2 - 2R'(r\cos\theta - H\sin\theta)}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $r = |o_2a_1| = |o_2a_2|$; $R = |o_1b_1| = |o_1b_2|$; $H = |o_2o|$ 。

对式(2)~(4)进行整理,可以得到操作臂刚度 K_θ 与两个变刚度装置的刚度 k_1 和 k_2 的关系。

$$K_\theta = J^T \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} J \quad (5)$$

对文献[9]中永磁变刚度装置的力学模型进行线性拟合得到本文用的绳索拉力与绳索伸长量的关系。

$$\tau(\Delta l) = 0.002 \ 2\Delta l^4 - 0.019 \ 8\Delta l^3 + 0.093 \ 2\Delta l^2 + 0.320 \ 4\Delta l + 1.554 \ 1 \quad (6)$$

式中: $\tau(\Delta l)$ 是绳索拉力; Δl 是绳索伸长量。

3 主动柔顺控制器设计与分析

变刚度关节主动柔顺控制器设计与分析的基础是建立准确的变刚度关节动力学模型,如式(7)所示。

$$\begin{cases} I_M \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_d \xi_1 \\ r_d \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{m1} \\ \xi_{m2} \end{bmatrix} \\ I_L \ddot{\theta} + B_L \dot{\theta} + G(\theta) - J^T \xi = 0 \end{cases} \quad (7)$$

变刚度关节的动力学模型主要分为操作臂,驱动电动机1、2两部分,其中操作臂部分是非线性耦合的,电动机部分是线性解耦的。系统的弹性变形是永磁变刚度装置引起的,忽略绳索的弹性变形^[18-19]。

3.1 系统控制器设计

本文采用位置与刚度解耦柔顺性控制器,结构如图3所示,给定变刚度机器人关节操作臂的位置输入量 θ_d ,采用刚性并联机器人位姿变换关系,可以得到由变刚度机器人关节操作臂位姿变化引起的绳索长度变化量 $f_1(\theta_d)$ 和 $f_2(\theta_d)$ 。

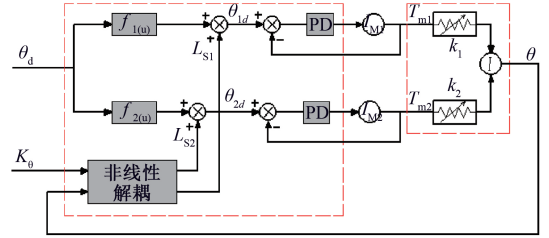


图3 解耦柔顺控制器

Fig.3 Decoupling compliant controller

$$f_1(\theta_d) = \left(\sqrt{R^2 + r^2 + h'^2 - 2Rr - \sqrt{R^2 + r^2 + h'^2 - 2R \cdot (r\cos\theta_d + h'\sin\theta_d)}} \right) \quad (8)$$

同理可以得到对应的 $f_2(\theta_d)$ 。

由安装在关节上的编码器得到操作臂实时位置 θ ,给定操作臂对应刚度 K_θ ,并将上述已知量代入式(1)、(5)、(6)构成的非线性方程组,采用Newton法进行求解,得到控制操作臂刚度所需绳长变化量 L_{s1} 和 L_{s2} 。那么此时两条绳索长度调整量的和就为 $f_1(\theta_d) + L_{s1}$ 与 $f_2(\theta_d) + L_{s2}$,这样就实现了变刚度机器人关节操作臂位置与刚度的解耦独立控制。两个伺服电机的控制方式是PD位置控制。位置与刚度解耦柔顺性控制器充分考虑了刚度改变时引起关节操作臂的柔顺性不同,实现了变刚度关节操作臂的柔顺性和位置独立控制。由于上述非线性方程组已经考虑了重力的影响,于是可以得到 $J^T [\xi_1 \quad \xi_2]^T - G(\theta) = K_\theta(\theta_d - \theta)$ 。则系统的等效运动状态方程变为:

$$\begin{cases} I_M \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_d \xi_1 \\ r_d \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{mp1}(\theta_{1d} - \theta_1) + k_{md1}(\dot{\theta}_{1d} - \dot{\theta}_1) \\ k_{mp2}(\theta_{2d} - \theta_2) + k_{md2}(\dot{\theta}_{2d} - \dot{\theta}_2) \end{bmatrix} \\ I_L \ddot{\theta} + B_L \dot{\theta} = K_\theta(\theta_d - \theta) \end{cases} \quad (9)$$

接下来进行关节柔顺性分析,当系统受到外力矩 T_{ext} 后,系统的动力学方程变为:

$$I_L \ddot{\theta} + B_L \dot{\theta} + T_{ext} = K_\theta(\theta_d - \theta) \quad (10)$$

则系统的最终的稳态形式变为:

$$T_{ext} = K_\theta(\theta_d - \theta) \quad (11)$$

由系统的最终稳定形式可以看出, 只要实现系统的刚度控制准确, 就可以实现系统的柔顺量的准确调整。

当系统受到外力矩时, 与绳索拉力、操作臂重力构成新的平衡关系为:

$$\sum_{j=1}^2 \xi_j \times r_j - mg \times r_g = T_{\text{ext}}, j = 1, 2 \quad (12)$$

对式(5)、(6)和(12)构成的新非线性方程组求解, 得到新绳长变化量 L_{s1} 和 L_{s2} , 不仅实现了重力的补偿, 也实现了外力矩的补偿, 如图 4 所示。这样做的好处是位置控制时存在误差或是操作臂受到外力发生形变时, 都可以由编码器实时检测, 然后代入非线性方程组解耦计算, 这样就可以保证关节位置发生变化时, 关节柔顺性的准确一致, 同时也实现了重力和外力矩补偿。

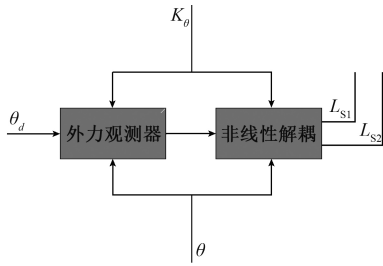


图 4 力补偿的实现方式

Fig.4 Implementation of torque compensation

3.2 系统仿真分析

建立变刚度关节仿真框图进行仿真分析。关节结构参数如表 1 所示。仿真框图采用 MATLAB/Simulink 搭建, 变刚度关节非线性动力学模型采用 s-Function 函数直接编写。

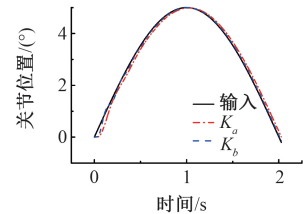
表 1 柔性机器人关节参数

Table 1 Flexible robot joint parameters

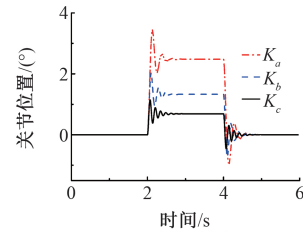
参数	数值
动平台半径 $oa_1 = oa_2/m$	0.024
动静平台间距 oo_2/m	0.072
静平台半径 $ob_1 = ob_2/m$	0.08
绞盘半径 r_d/m	0.02
绞盘转动惯量 $I_M/(kg \cdot m^2)$	0.000 2
操作臂惯量 $I_L/(kg \cdot m^2)$	1.2
操作臂重量 m/kg	0.3
操作臂长 L/m	0.25

给变刚度关节一个正弦输入信号, 幅值为 5° , 周期为 4 s, 关节位置响应曲线如图 5(a) 所示, 变刚度关节刚度 $K_a = 30 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时, 变刚度关节轨迹跟随曲线如点划线所示, 变刚度关节刚度 $K_b = 60 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时, 变刚度关

节轨迹跟随曲线如虚线所示。由仿真结果可以看出关节刚度较小时, 关节位置跟踪误差较大, 随着关节刚度增加, 位置跟踪误差减小。随着时间的推移, 轨迹控制的准确性增加, 这是由于初始阶段关节惯性较大造成的, 同时可以看出随着关节刚度增加, 惯性引起的位置跟踪误差得到抑制。保持变刚度关节位置不变, 在 2~4 s 的时间段里作用于变刚度关节一个 $0.52 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的外力矩, 关节的柔顺性仿真如图 5(b) 所示, 变刚度关节刚度 $K_a = 30 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时, 变刚度关节位置变化曲线如点划线所示, 变刚度关节刚度 $K_b = 60 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时, 变刚度关节位置变化曲线如虚线所示, 变刚度关节刚度 $K_c = 120 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时, 变刚度关节位置变化曲线如实线所示。通过关节位置变化和关节刚度变化的关系分析可以发现, 关节的刚度控制可以较好地实现关节柔顺性的改变, 关节刚度越小, 关节柔顺能力越强。



(a) 位置控制仿真
(a) Simulation of position control



(b) 柔顺性控制仿真
(b) Simulation of compliance control

图 5 柔性变刚度机器人关节仿真结果

Fig.5 Simulation results of the flexible variable-stiffness robot joint

4 实验验证

构建绳索驱动式变刚度机器人关节样机和控制系统如图 6 所示。驱动器型号为 Escon70/10, 控制器为 DSpace1103, 并以 1 kHz 的频率对两个电机 (M1 和 M2) 的运动进行调节。

4.1 位置响应分析

变刚度关节的参考位置输入是幅值为 10° 的阶跃信号。变刚度关节刚度为 30 和 $120 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时, 关节的位置输出响应曲线分别如图 7 所示。变刚度关节刚度为 $120 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 时, 关节的位置超调量较小且调节速度较快, 其中位置超调量最大值约为 4.478° , 调整时间约为

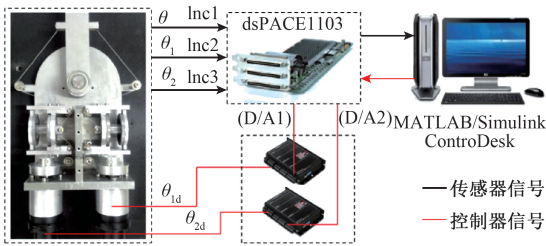


图6 柔顺变刚度机器人关节控制系统

Fig.6 The flexible variable-stiffness robot joint control system

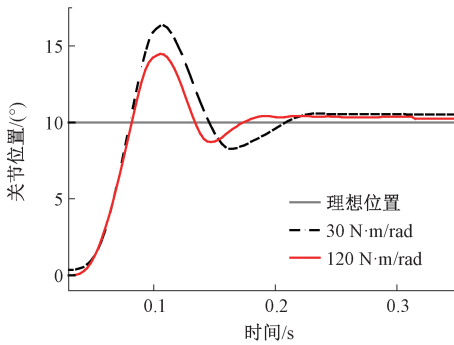


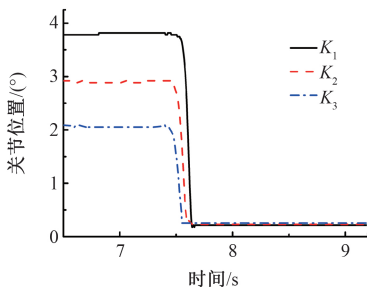
图7 位置阶跃响应

Fig.7 Position step response

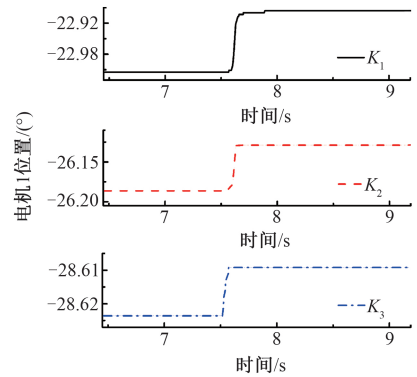
0.2 s。变刚度关节刚度为 $30 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 时,关节的超调量和震荡明显增加,其中位置超调量最大值约为 6.344° ,调整时间约为 0.3 s。通过实验数据对比分析可以发现变刚度关节位置超调量和调整时间随着关节刚度的增加而降低,此规律即为变刚度关节位置响应随关节刚度变化的一般规律。

4.2 柔顺性分析

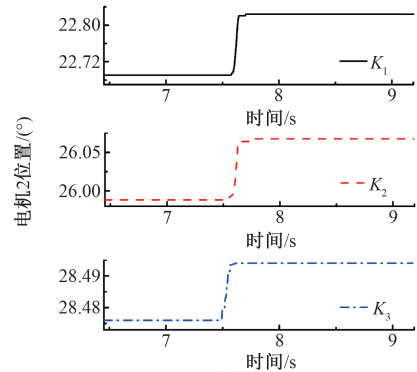
变刚度关节位于水平位置,忽略重力的影响。分别改变变刚度关节的刚度 $K_1 = 30 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}, K_2 = 40 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}, K_3 = 60 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。然后在操作臂末端作用 8 N 的力,之后取消这个力。变刚度关节的弹性变形情况,如图 8(a) 所示。关节的刚度为 K_1 时,变形角为 3.566° ;关节的刚度为 K_2 时,变形角为 2.652° ;关节的刚度为 K_3 时,变形角为 1.835° 。



(a) 关节位置
(a) Joint position



(b) 电机1对应位置
(b) Position of motor 1



(c) 电机2对应位置
(c) Position of motor 2

图8 柔顺控制实验结果

Fig.8 Flexible control experiment results

关节刚度越小,关节弹性变形越大,关节越柔顺。两个调整电机的转角变化情况如图 8(b) 和 (c) 所示。由关节变形角和电机对应转角变化情况可以看出,电机转角可以根据变刚度关节位置变化自主调整,以保证关节位于不同位置时柔顺性的一致。变刚度关节受到相同力矩时,关节越柔顺,关节变形角越大,为了保证关节柔顺性一致,两个电机转角变化也越明显。变刚度关节实际位置由编码器检测得到,变刚度关节所受外力矩是已知量,因此可以计算出变刚度关节实时刚度,由计算结果可知,关节控制刚度平均误差为 4.63% 以内,基本满足关节柔顺性控制要求。当作用于操作臂末端外力矩取消时,变刚度关节并没有回到初始位置,而有 0.23° 左右的误差,这是由于变刚度关节系统存在间隙、摩擦等因素造成的。

4.3 外力补偿的实现

变刚度关节操作臂从水平位置向上运动 3° ,控制关节刚度 $K_0 = 30 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$,在 2 s 时,操作臂末端加载质量为 0.8 kg 的重物,对比采用外力补偿方式和不采用外力补偿方式,操作臂位置变化情况,如图 9 所示。其中图 9(a) 为关节位置变化情况,图 9(b) 和 9(c) 为两个电机对应转角变化情况。采用带外力补偿环节控制器时,

关节受到本文所述外载荷时,引起的关节变形角为 0.496° 。采用无外力补偿控制器时,关节受到本文所述外载荷时,引起的关节变形角为 3.828° 。采用带外力补偿环节控制器时外载荷引起的关节位置变化明显小于无外力补偿控制器的位置变化,说明变刚度关节的位置跟踪能力明显增强。电机的调整角度也明显大于无补偿控制器的电机调整角度,这也同样证明了带外力补偿环节的控制器的位置调整能力更强。

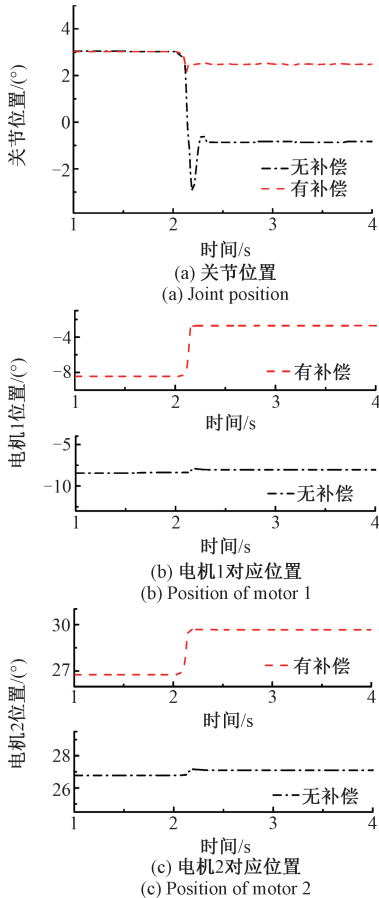


图 9 位置控制能力增强

Fig.9 Enhanced position control capacity

5 结 论

针对使用者与机器人物理性人机交互稳定性与安全性问题,本文提出一种适用于绳索驱动式具有主被动柔性的变刚度机器人关节位置与刚度解耦控制方法,实现了机器人关节柔顺性控制的同时,又实现了关节的位置控制。利用雅可比矩阵和模型间静力学关系,得到关节刚度模型,并通过优化方法对变刚度装置的力学模型和关节刚度模型构成的非线性方程组求解,实现关节的刚

度与位置的非线性解耦。

在解耦控制的基础上提出一种力矩观测方法,实现了绳索驱动式柔性变刚度机器人关节力矩补偿,同时增强了柔性变刚度机器人关节位置跟踪控制能力。建立了绳索驱动式柔性变刚度机器人关节样机和控制系统,并通过仿真和实验分析验证了上述柔顺控制和外力补偿方式的可行性和有效性。为今后考虑动态建模与扰动不确定性的实时控制系统奠定了一定的基础。

参考文献

- [1] 王颜, 房立金. 机械式仿骨骼肌肉变刚度机构原理及设计[J]. 机器人, 2015, 37(4): 507-511.
WANG Y, FANG L J. Principle and design of mechanically musculoskeletal variable-stiffness mechanism[J]. Robot, 2015, 37(4): 507-511.
- [2] JALANI J, MAHYUDDIN N, HERRMANN G, et al. Active robot hand compliance using operational space and integral sliding mode control [C]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2013: 1749-1754.
- [3] 王伟, 刘立冬, 魏来, 等. 柔性齿条式变刚度关节驱动器设计与研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(1): 26-32.
WANG W, LIU L D, WEI L, et al. Design and research of rack-based variable stiffness actuator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(1): 26-32.
- [4] 姜礼杰, 张方双, 任刚跃, 等. 一种同/异步四肢联动康复机器人的研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2381-2390.
JIANG L J, ZHANG F H, REN G Y, et al. Research on a synchronous or asynchronous rehabilitation robot with linkage of limbs [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2381-2390.
- [5] 郑悦, 景晓蓓, 李光林. 人机智能协同在医疗康复机器人领域的应用[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2373-2380.
ZHENG Y, JING X B, LI G L. Application of human-machine intelligence synergy in the field of medical and rehabilitation robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2373-2380.
- [6] PETIT F, CHALON M, FRIEDL W, et al. Bidirectional

- antagonistic variable stiffness actuation; analysis, design & implementation[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010; 4189-4196.
- [7] IBRAHIM K, ALI A S. Development a force feedback control of robot manipulator [C]. 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics, 2016; 34-37.
- [8] KAZEMI M, VALOIS J S, J. ANDREW B. Human-inspired force compliant grasping primitives [J]. Autonomous Robots, 2014, 37(2): 209-225.
- [9] ZHANG M, FANG L J, SUN F, et al. Realization of flexible motion of robot joint with a novel permanent magnetic spring [C]. IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics, 2018;331-336.
- [10] TONIETTI G, SCHIAVI R, BICCHI A. Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005;526-531.
- [11] VITIELLO N, CATTIN E, ROCCELLA S, et al. The NEURARM: Towards a platform for joint neuroscience experiments on human motion control theories [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007;1852-1857.
- [12] 隋春平, 张波, 赵明杨, 等. 一种 3 自由度并联柔索驱动柔性操作臂的建模与控制[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6):60-65.
- SUI CH P, ZHANG B, ZHAO M Y, et al. Modeling and control of a 3-DOF parallel wire driven flexible manipulator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6):60-65.
- [13] 张明, 房立金, 孙凤, 等. 永磁变刚度机构柔性机器人力学特性研究 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 414-420.
- ZHANG M, FANG L J, SUN F, et al. Study on mechanical characteristics of variable-stiffness permanent magnetic mechanism for elastic robots [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(1):414-421.
- [14] SUN F, ZHANG M, JIN J J, et al. Mechanical analysis of a three-degree of same-stiffness permanent magnetic spring [J]. International Journal of Applied Electromagnetic and Mechanics, 2016, 52 (1- 2): 667-675.
- [15] OSADA M, ITO N, NAKANISHI Y, et al. Realization of flexible motion by musculoskeletal humanoid “Kojiro” with add-on nonlinear spring units [C]. IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, 2010; 378-383.
- [16] WANG W, FU X Y, LI Y G, et al. Design of variable stiffness based on modified gear-rack mechanism [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2016, 8 (6): 061008.
- [17] MIGLIORE S A, BROWN E A, DEWEERTH S P. Novel nonlinear elastic actuators for passively controlling robotic joint compliance [J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129(4): 401-406.
- [18] 张明, 房立金, 孙凤, 等. 永磁变刚度柔性关节力学分析与控制器设计 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 89-96.
- ZHANG M, FANG L J, SUN F, et al. Mechanical analysis and controller design of the permanent magnetic variable stiffness flexible joint [J]. Journal of the Mechanical Engineering, 2019, 55(5):89-96.
- [19] 张明, 房立金, 孙凤, 等. 变刚度柔性机器人关节的设计与解耦控制方法 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23(7): 120-128.
- ZHANG M, FANG L J, SUN F, et al. Design and decoupling control of variable-stiffness flexible robot joint [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(7): 120-128.

作者简介



房立金(通信作者), 1988 年于西安交通大学获得学士学位, 1996 年于俄罗斯圣彼得堡国立技术大学获得博士学位, 现为东北大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机器人仿生控制、高精度机器人、攀爬移动机器人等。

E-mail: ljfang@mail.neu.edu.cn

Fang Lijin (Corresponding author) received his B. Sc. degree

from Xi'an Jiaotong University in 1988, and Ph. D. degree from Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia in 1996. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor at Northeastern University. His main research interests include robot bionic control, high precision robot, climbing mobile robot and etc.



张明, 分别在 2010 年和 2015 年于沈阳工业大学获得学士学位和硕士学位, 现为东北大学博士研究生, 主要研究方向为柔性机器人技术与磁悬浮技术。

E-mail: zm201234@hotmail.com

Zhang Ming received his B. Sc degree and M. Sc degree both from Shenyang University of Technology in 2010 and 2015, respectively. Now, he is a Ph. D. candidate at Northeastern University. His main research interest is flexible robotics and magnetic levitation technology.



孙凤, 分别在 2002 年和 2005 年于沈阳工业大学获得学士学位和硕士学位, 2010 年于日本高知工科大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机械系统多元驱动及其控制技术。

E-mail: sunfeng@sut.edu.cn

Sun Feng received his B. Sc degree and M. Sc degree both from Shenyang University of Technology in 2002 and 2005, received his Ph. D. degree from Kochi University of Technology, Japan in 2010, respectively. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Shenyang University of Technology. His main research interests include multiple driving and control technology of mechanical system.



岡宏一, 1983 年于日本京都大学获得硕士学位, 1997 年于东京大学获得博士学位, 现为高知工科大学教授, 主要研究方向为磁悬浮系统、机电一体化、机器人等。

E-mail: oka.koichi@kochi-tec.ae.jp

Koichi Oka received his M. Sc degree from Kyoto University, Japan in 1983 and Dr. Eng. degree from University of Tokyo, Japan in 1997. Now, he is a professor at Kochi University of Technology. His main research magnetic levitation system, mechatronics, robotics and etc.