DOI: 10.3901/JME.2019.05.089

永磁变刚度柔性关节的力学分析与控制器设计*

张明¹ 房立金² 孙凤³ 岡宏一⁴

(1. 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819;

2. 东北大学机器人科学与工程学院 沈阳 110169;

3. 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110819;

4. 高知工科大学智能机械系统工程学科 高知 782-8502 日本)

摘要: 提出一种采用永磁弹簧、绳索驱动、梯形布置的拮抗式变刚度柔性机器人关节,能够根据任务需要,实时调节关节刚度。所述永磁弹簧装置,在绳索提供力矩一定的情况下,增加了关节刚度变化范围,同时减小操作臂的质量与惯量。对提高柔性机器人关节的运动性能具有重要意义。对关节空间与绳索空间的映射关系进行推导并利用雅可比矩阵和模型间静力学关系,得到关节刚度模型,进而实现关节刚度与位置解耦。以轨迹控制为目标,设计了一种双闭环解耦控制器,并进行了试验验证。仿真分析与试验结果共同表明,该柔性关节在较宽刚度调整范围内,都具有较好的位置响应特性和轨迹跟踪能力。上述结构与控制方式同样也适用于多自由度并联柔性机器人关节。

关键词: 绳索驱动; 永磁弹簧; 解耦控制; 变刚度

中图分类号: TH39; TH135

Mechanical Analysis and Controller Design of the Permanent Magnetic Variable Stiffness Flexible Joint

ZHANG Ming¹ FANG Lijin² SUN Feng³ OKA Koichi⁴

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819;

2. Faculty of Robot Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169;

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

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

Abstract: An antagonistic variable stiffness flexible robot joint with magnetic spring, wire-driven and trapezoidal arrangement is proposed, which can adjust the joint stiffness in real time according to the task requirements. The magnetic spring device increases the variable stiffness range of the joint, without increasing the wire tension, while reducing the weight and inertia of the operating arm. It is of great significance to improve the joint performance. The relationship between the joint space and wire space is promoted and Jacobi matrix and static relationship between the models are used to obtain the joint stiffness model, which realize the decoupling of stiffness and position. Based on trajectory control, a double closed-loop decoupling controller is designed, then do experimental verification. The simulation and experimental results show that the joint has good position response and trajectory tracking ability within a wide stiffness range. This configuration and control method is also suitable for multi-degree of freedom parallel joints.

Key words: wire-driven; permanent magnet spring; decoupling control; variable-stiffness

0 前言

变刚度柔性机器人关节与传统刚性机器人关节

的主要不同是:在驱动部件与执行部件间串联或并联刚度可调的弹性环节,其良好的柔顺性和刚度可调特性,可以增强人机安全性和环境适应性,越来越受到学者们的关注^[1-4]。目前已经有很多种设计与方案,主要包括如下几种方案:①电致聚合物类人工肌肉或形状记忆合金等新兴材料技术,实现关节柔性表现出高韧性、高传动应变和内在减震能力,

* 国家自然科学基金(51575092, 51105257)和国家重点研发计划重点专项(2017YFB1300900)资助项目。20180328 收到初稿,20181021 收到修改稿

但存在价格昂贵, 输出力较小, 响应速度不够快等局限性; ② 采用力传感器的阻抗控制, 由于传感器精度, 稳定性和控制系统的带宽的限制, 并没有实现广泛应用^[2]; ③ 采用变刚度部件的机械式变刚度柔性机器人关节, 结构形式灵活多样, 成本低, 易于制造等优点, 受到越来越多的学者关注^[4-6]。

通常可以将机械式变刚度柔性关节可以分为并联和串联两种形式。串联形式中, 变刚度部件位于操作臂上, 增加了操作臂的质量与惯量, 特别是在构建多自由度柔性关节时会进一步限制关节的变刚度能力, 如 HDAU, AWAS, VSJ^[7-9]等。绳索驱动的并联形式, 采用类似骨骼肌的拮抗驱动方式, 如 PVSA, FAS, NST^[10-12], 其中变刚度模块与驱动模块安装可以与操作臂分离, 安装在机身上, 可以很大程度的减少操作臂的质量和惯量, 特别用于多自由度并联柔性机器人关节时, 可以解决传统串联模式, 由于自由度增加引起的刚度变化能力逐级递减的不足。之前学者构建的拮抗式单自由度柔性关节大多是圆盘形关节两侧对称布置变刚度弹簧机构, 但上述变刚度关节的刚度与位置的解耦方式和关节结构并不适用于绳索驱动的多自由并联关节的构建, 本文以并联机器人构型为基础, 采用梯形布局, 构建了一种拮抗式永磁变刚度柔性关节, 此种构型不但适用于单自由度柔性关节也可以用于多自由并联柔性关节构建。在电动机提供力矩一定的情况下, 本文采用的永磁变刚度装置可以实现更大的刚度变化范围。建立了柔性关节刚度模型, 实现了刚度与位置解耦。以轨迹控制为目标, 设计了一种双闭环解耦控制器。进行软件仿真, 并通过试验验证了本方案的可行性。仿真分析与试验结果共同表明, 在较宽刚度调整范围内, 该柔性变刚度关节都具有较好的位置响应特性和轨迹跟踪能力。

1 变刚度装置原理

如图 1 所示, 为永磁变刚度装置结构构成。主要由滑轮绳索单元和永磁弹簧单元组成。磁弹簧单元由一对环形永磁体同磁极反向, 同轴线布置构成, 由滑动轴承的限制, 永磁体间只能沿轴向移动。永磁体间磁力和刚度随着气隙间距的改变呈非线性变化。两个定滑轮中间是一个动滑轮, 三个滑轮间呈等腰三角形布置, 绳索绕在其间, 构成滑轮绳索单元。当绳索上作用一定力时, 绳索带动动滑轮和动永磁环移动, 气隙间距减小, 夹角 α 增加。绳索拉力 ξ 与永磁体间磁力 F 近似关系为 $\xi = F/2\cos\alpha$, 绳索

拉力呈非线性增加。同理可知绳索上表现出的刚度也呈非线性增加。永磁弹簧的非线性和绳索单元的非线性组合使刚度的变化范围增加^[15]。因此, 用永磁弹簧代替传统定刚度金属弹簧^[8]的好处是, 实现同样的刚度变化范围, 绳的拉力就不需要那么大, 进而减小电动机功率。可以根据具体工况, 改变永磁变刚度装置的结构参数, 进而改变拉力和刚度曲线的变化范围和斜率。

图 1 永磁变刚度装置结构图

永磁变刚度装置绳索拉力^[10-11] ξ 可以表示为

$$\xi = \left[\frac{B_r H_c L_m S_m}{K_f (B_r S_m / G_a + H_c L_m)} \right]^2 \cdot \frac{u_0 S_g}{2g^2} \times \frac{1}{\left\{ u_0 \left[S_g / g + 1.632(R_2 - R_1) \right] \right\}^2} \times \frac{1}{2 \cos(\arctan d/g + \arccos 2R'/\sqrt{d^2 + g^2} - \pi/2)} \quad (1)$$

式中, S_g 为环形永磁体截面积, G_a 为磁路总磁导; 剩磁为 B_r , 矫顽力为 H_c , H_m 为工作点磁场强度; H_g 为气隙处的磁场强度; B_g 为气隙处磁通密度; S_g 气隙磁通横截面积; L_g 为气隙处磁路长度; L_m 为磁化方向的有效长度; K_f 为磁路漏磁系数。

动、定滑轮间绳索长度 L_s 可以表示为

$$L_s = 2[\sqrt{g^2 + b^2 + 4r'^2} + 2r'(\pi - \arctan b/g - \arccos 2r'/\sqrt{b^2 + g^2})] \quad (2)$$

式中, $g = h - Z + z$ 。

绳索刚度表示为

$$k = \frac{\partial \xi}{\partial L_s} = \frac{\partial \xi}{\partial g} \cdot \frac{1}{\partial L_s / \partial g} \quad (3)$$

2 柔性关节机械结构

根据拮抗式柔性关节工作原理, 对永磁变刚度柔性机器人关节进行了设计, 模型样机如图 2 所示。柔性机器人关节的内部结构分布如图 2b 所示。绳索通过永磁变刚度装置分别与操作臂和绳索绞盘连接, 上述两套装置对称分布于操作臂两侧, 形成拮抗式结构。操作臂上的绳索固定点 a_1 、 a_2 , 与机身上固定的带 V 形槽滑轮的外轮廓 b_1 、 b_2 点, 和绳索构成梯形布局结构, 此种布置方式, 不但适用于单自由度也可以用于构建多自由柔性关节构建。带 V 形槽滑轮分别设置于永磁变刚度装置和绳索绞盘间, 操作臂和永磁变刚度装置间, 起到绳索导向作用。带 V 形槽滑轮与旋转轴间距 o_0b_1 直接影响操作臂的力学性能, 因此可以根据实际需要调整 o_0b_1 距离。操作臂 9 沿旋转轴 8 旋转, 旋转轴 8 与编码器 10 同轴, 编码器测量操作臂的实时位置, 从而推算输出关节的实时刚度值。

图 2 柔性变刚度机器人模型

1. 绳索 2. 带 V 形槽的滑轮 3. 永磁变刚度装置
4. 带 V 形槽的滑轮 5. 绳索绞盘
6. 带编码器的直流伺服电动机和减速器 7. 机身
8. 旋转轴与薄壁球轴承 9. 操作臂 10. 编码器 11. 固定座

3 关节刚度建模

如图 3 所示, 采用坐标系描述。 a_1 和 a_2 位于操作臂上且对称分布于操作臂两侧, 且 a_1a_2 与 OO_2 垂直。 b_1 和 b_2 与旋转轴位于同一条直线且位于机身上, b_1 和 b_2 对称分布于转轴左右, $a_1a_2b_1b_2$ 呈等腰梯形布置。绳索沿 a_1b_1 和 a_2b_2 方向拉动操作臂沿旋转轴旋转。参考坐标系 $O_0x_0y_0$ 固定在机身上, O_0 为操作臂旋转轴, 坐标系 $O_1x_1y_1$ 和 $O_2x_2y_2$ 分别为操作臂旋转坐标系和操作臂坐标系。忽略绳索弹性变形。采用并联机器人坐标变换关系可以得到操作臂位姿与绳索长度的映射关系, 而绳索长度通过测量驱动电动机的转角可以获得, 如果机器人是刚性很容易实现操作臂的位置控制。本文中所述机器人关节是柔性的, 操作臂与驱动电动机间设置有永磁变刚度装置^[15], 测量得到的绳索长度包含操作臂位姿和变刚度装置的弹性变形两部分, 即存在位置与刚度的耦合。如能建立起操作臂的刚度和位姿, 与变刚度装置刚度的映射关系, 就能实现操作臂的刚度与位姿解耦控制。

图 3 柔性机器人关节模型

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一个静力平衡关系

$$\sum_{j=1}^2 \xi_j \times r_j - mg \times r_g = 0 \quad j=1, 2 \quad (4)$$

一个无穷小的转矩 ΔT 作用在操作臂上引起一个无穷小的转动量 $\Delta \theta$

$$\frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \sum_{j=1}^2 \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial \theta} \times r_j + \xi_j \times \frac{\partial r_j}{\partial \theta} \right) - mg \times \frac{\partial r_g}{\partial \theta} \quad (5)$$

第 j 根绳索的长度变化量为 L_j , $\Delta T/\Delta \theta$ 为操作臂刚度 K_θ , 则 $\partial \xi/\partial \theta$ 为

$$\frac{\partial \xi_j}{\partial \theta} = \frac{\partial \xi_j}{\partial L_j} \eta_j \frac{\partial L_j}{\partial \theta} = k_j \eta_j \cdot z_j \quad (6)$$

式中, η_j 为绳索拉力方向矢量, $z_j = \partial L_j / \partial \theta$, 永磁变刚度装置的刚度为 $k_j = \partial \xi_j / \partial L_j$ 。

操作臂的转动, 绳索长度变化量与绳索拉力存在另外一个静力平衡关系

$$\left[\sum_{j=1}^2 \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial \theta} \times r_j + \xi_j \times \frac{\partial r_j}{\partial \theta} \right) - mg \times \frac{\partial r_g}{\partial \theta} \right] \Delta \theta = - \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial L_1} \eta_1 \times r_1, \frac{\partial \xi_2}{\partial L_2} \eta_2 \times r_2 \right) \begin{pmatrix} \Delta L_1 \\ \Delta L_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

采用并联机器人位置变换关系, 可以得到绳索长度 L 与关节角度 θ 的对应关系, 分别对两端求导得到绳索速度 $\dot{L} = [\dot{L}_1 \quad \dot{L}_2]^T$ 与关节速度 $\dot{\theta}$ 之间的关系

$$\dot{L} = J \dot{\theta} \quad (8)$$

式中, J 为 $\dot{\theta}$ 到 $\dot{L}$ 的雅可比矩阵。

将参数代入上式可以得到

$$J = \begin{bmatrix} \frac{R(r \sin \theta - h \cos \theta)}{\sqrt{R^2 + r^2 + h^2 - 2R(r \cos \theta + h \sin \theta)}} \\ -\frac{R(r \sin \theta + h \cos \theta)}{\sqrt{R^2 + r^2 + h^2 - 2R(r \cos \theta - h \sin \theta)}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$r = |o_2 a_1| = |o_2 a_2| \quad h = |o_2 o| \quad R = |o_1 b_1| = |o_1 b_2|$$

对式(5)、(7)、(8)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

$$K_\theta = J^T \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} J \quad (10)$$

4 动力学分析与控制器设计

4.1 动力学分析

柔性变刚度关节的动力学模型主要分为操作臂、电动机 1 和电动机 2 三部分, 其中操作臂是非线性耦合的, 电动机是线性解耦的。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。

$$\begin{cases} I_M \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_d \xi_1 \\ r_d \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{m1} \\ \xi_{m2} \end{bmatrix} \\ I_L \ddot{\theta} + B_L \dot{\theta} + G(\theta) - J^T \xi = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $G(\theta)$ 为操作臂重力矩矢量, B_L 为操作臂相关阻尼系数, I_L 为操作臂转动惯量, I_M 为驱动单元转动惯量, r_d 为绞盘半径, ϕ 为 2×1 电动机转角位置矢量, ξ 为 2×1 柔索上的拉力矢量, ξ_m 为 2×1 电动机输出转矩矢量。

4.2 控制器设计

本文采用位置与刚度双闭环解耦控制器, 结构框图如图 4 所示, 外环控制器是控制柔性关节稳定位置输出, 输入项是给定的关节旋转角度 θ_d , 输出项是操作臂实际旋转角度 θ , 并采用 PID 控制, 内环控制器是控制电动机转角, 并采用 PD 控制, 输入项是控制操作臂的位置所需电动机转角 $J_1 \Delta \theta_d / r_d$ 和 $J_2 \Delta \theta_d / r_d$, 和控制操作臂刚度所需电动机转角 L_{s1} / r_d 和 L_{s2} / r_d 的和, 输出项是电动机的实际旋转角度 θ_1 和 θ_2 , 这样就实现了位置与刚度的解耦控制。该控制器充分考虑了刚度改变时引起的操作臂柔性的不同, 实现了操作臂位姿准确控制, 也实现了刚度控制。这种方法简单, 容易实现, 实用性强。

图 4 双闭环解耦控制器结构框图

给定操作臂位置 θ_d 和对应刚度 K_θ , 对式(1)、(2)、(3)、(10)构成的非线性方程组采用 Newton 法进行求解, 可以得到对应的 L_{s1} 和 L_{s2} 。

电动机位置实际输入, 为操作臂旋转时, 瞬时半径与旋转微变量 $\Delta \theta_d$ 的积, 和调整关节刚度所需绳索长度变化量 L_{s1} 和 L_{s2} 两部分的和, 如式(12)所示

$$\begin{cases} \theta_{1d} = (J_1 \Delta \theta_d + L_{s1}) / r_d \\ \theta_{2d} = (J_2 \Delta \theta_d + L_{s2}) / r_d \end{cases} \quad (12)$$

$$K_\theta (\theta_d - \theta) + G(\theta) = J^T [\xi_1 \quad \xi_2]^T$$

则有

$$\begin{cases} I_{M1} \ddot{\theta}_{1d} + B_{M1} \dot{\theta}_{1d} + \xi_1 r_d = T_{m1} \\ I_{M2} \ddot{\theta}_{2d} + B_{M2} \dot{\theta}_{2d} + \xi_2 r_d = T_{m2} \\ I_L \ddot{\theta} = K_\theta (\theta_d - \theta) - B_L \dot{\theta} \end{cases} \quad (13)$$

4.2.1 外环控制器设计

外环控制器是用来控制柔性关节稳定位置输出, 输入项是给定关节旋转角度 θ_d , 输出项是操作臂实际旋转角度 θ , 采用 PID 控制, 公式如下

$$I_L \ddot{\theta} = K_\theta \left(k_p (\theta_d - \theta) + k_i \int (\theta_d - \theta) dt + k_d (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) - \dot{\theta} \right) - B_L \dot{\theta} \quad (14)$$

经拉普拉斯变换, 得到闭环传递函数为

$$G_I(s) = \frac{K_\theta k_d s^2 + K_\theta k_p s + K_\theta k_i}{I_L s^3 + (B_L + K_\theta k_d) s^2 + K_\theta (k_p + 1) s + K_\theta k_i} \quad (15)$$

根据劳斯判据可得, 系统稳定条件为

$$B_L + K_\theta k_d > 0 \quad k_p + 1 > 0 \quad k_i > 0$$

4.2.2 内环控制器设计

内环控制器是控制电动机实际转动, 输入项是控制操作臂的位置所需转角和控制操作臂刚度所需转角的和 θ_{1d} 和 θ_{2d} , 输出项是电动机的实际旋转角度 θ_1 和 θ_2 , 采用 PD 控制, 公式如下

$$\begin{cases} I_{M1}\ddot{\theta}_1 + B_{M1}\dot{\theta}_1 + \xi_1 r_d = k_{mp1}(\theta_{1d} - \theta_1) + \\ k_{md1}(\dot{\theta}_{1d} - \dot{\theta}_1) + \xi_1 r_d \\ I_{M2}\ddot{\theta}_2 + B_{M2}\dot{\theta}_2 + \xi_2 r_d = k_{mp2}(\theta_{2d} - \theta_2) + \\ k_{md2}(\dot{\theta}_{2d} - \dot{\theta}_2) + \xi_2 r_d \end{cases} \quad (16)$$

经拉普拉斯变换, 得到闭环传递函数为

$$G_M(s) = \frac{k_d s + k_p}{I_M s^2 + (B_M + k_d)s + k_p} \quad (17)$$

根据劳斯判据可得系统稳定条件为

$$B_M + k_d > 0 \quad k_p > 0$$

5 仿真分析

根据稳定性分析, 确定双闭环解耦控制器参数调节范围。如图 5 所示, 利用 Matlab/Simulink, s-function 函数搭建仿真框图, 进行仿真分析。参数如表 1 所示。

图 5 柔性变刚度关节仿真模型

表 1 柔性关节参数

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
固定平台半径 $ob_1=ob_2/m$	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
操作臂刚度 $K/(N \cdot m/rad)$	5~300

5.1 位置阶跃响应仿真

将本文所述双闭环解耦控制器定义为控制器 2。将柔性关节通常采用的单闭环控制器^[3, 6]并增加解耦环节定义为控制器 1。位置响应特性分析, 首先, 操作臂位于初始平衡位置, 调整关节刚度 $K_\theta=30 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$ 。在 1 s 时, 加载幅值 $\theta_d=10^\circ$ 的位置阶跃信号。操作臂参考输入、操作臂实际输出和两个电动机的调整角度如图 6 所示。

操作臂的位置响应曲线如图 6a 所示, 试验中操作臂刚度设置较小, 采用控制器 1, 操作臂超调量较大, 震荡较明显, 经过多次调整才达到平衡位置。采用控制器 2, 响应速度明显加快, 且超调量减小。

图 6 位置阶跃响应仿真

说明控制器 2 的性能要优于控制器 1。采用控制器 2 时, 加载输入信号, 首先调整关节刚度, 两台电动机同时反向转动, 拉动绳索和非线性永磁弹簧, 使操作臂刚度达到给定值 $K_\theta=30 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$, 操作臂位置

不变。在 1 s 时, 输入位置信号 $\theta_d=10^\circ$, 操作臂输出旋转角增大, 两台控制电动机同时同向转动, 当操作臂实际输出位置大于给定参考位置时, 两台电动机再次反向调整, 直到操作臂达到给定参考位置, 电动机停止转动。操作臂刚度不变。上述调整过程如图 6 所示。

5.2 轨迹跟踪仿真

轨迹跟踪特性分析。操作臂末端无负载, 正弦输入信号幅值为 10° , 周期为 6.4 s。采用本文所述双闭环解耦控制器, 在不同刚度情况下, 进行轨迹跟踪仿真。设定操作臂刚度分别为 $K_1=30 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 和 $K_2=120 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。两个伺服电动机通过绞盘绳索配合, 驱动操作臂做位置正弦摆动。不同刚度情况下, 操作臂输出轨迹如图 7 所示, 操作臂轨迹跟踪能力并没有因为关节刚度降低, 有所下降, 并不像文献[3, 10, 13]所述的柔性关节, 刚度越大, 轨迹跟踪误差越小; 刚度越小, 误差越大。说明采用本文中所述解耦控制器, 在不同刚度情况下, 关节都具有较好的轨迹跟踪能力。

图7 不同刚度轨迹跟踪响应仿真

6 试验验证

搭建永磁变刚度柔性机器人关节样机和控制系统, 如图 8 所示, 相关参数见表 1。驱动器型号为 maxon ESCON70/10, 控制器为 DSpace1103。试验通过与设备配套的 Matlab/Simulink 软件编写程序进行实时控制。

图8 变刚度柔性机器人关节试验系统

6.1 关节位置阶跃响应试验

位置阶跃响应试验, 操作臂首先位于 $\theta=3^\circ$ 的位置, 操作臂末端无负载, 当关节刚度分别为 $K_1=30 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 和 $K_2=120 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 时, 于 0.25 s 时分别给操作臂 1° 的位移阶跃信号。操作臂的位置响应曲线如图 9 所示, 操作臂刚度为 $K_2=120 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 时, 柔性关节只有很小的超调量且调节速度最快, 震荡调节时间小于 0.15 s。操作臂刚度为 $K_2=30 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 时, 柔性关节超调量同样也很小, 调节速度也很快, 震荡时间也很短但是当关节刚度处于不同值时, 关节调整规律还是有区别的, 从图 9 对比可以发现, 当关节刚度较大时, 关节调整更快, 调节能力也更强。

图9 位置阶跃响应试验结果

6.2 关节轨迹跟踪对比试验

轨迹跟踪试验。操作臂末端无负载, 正弦输入信号为 $10^\circ+10^\circ\sin(\omega t)$, $\omega=\pi/3.2$ 。分别调整柔性关节刚度值为 $K_1=30 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $K_2=120 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。采用控制器 1 和本文所述双闭环解耦控制器 2, 进行轨迹跟踪试验。两个伺服电动机通过绞盘绳索配合, 驱动操作臂做正弦摆动, 操作臂轨迹响应曲线如图 10

图10 轨迹跟踪试验结果

所示, 当柔性关节刚度较小时, 采用控制器 1 时, 轨迹跟随误差较大, 增加关节刚度, 跟随误差减小, 采用本文所述控制器 2 时, 柔性关节轨迹跟踪能力并没有随着关节刚度降低, 发生明显改变。说明在关节刚度改变时, 本文所述的控制器调节能力更强, 可以有效提高柔性关节的运动性能。

7 结论

(1) 提出一种采用磁弹簧、绳索驱动、梯形布置的拮抗式变刚度柔性机器人关节, 能够根据任务需要, 实时调节关节刚度。所述磁弹簧装置, 在电动机提供力矩一定的情况下, 增加了关节刚度变化范围。对关节空间与绳索空间的映射关系进行推导, 利用雅可比矩阵和模型间静力学关系, 得到机器人刚度与绳索刚度的对应关系, 实现刚度与位置解耦。

(2) 设计了一种双闭环解耦控制器, 通过动力学建模, 和系统稳定性判据得到系统稳定条件。改善了柔性关节的运动性能。该构型和控制器也可以用于构建多自由度柔性并联机器人关节。

(3) 搭建变刚度柔性关节样机并进行了试验验证, 证明了柔性关节和控制器的性能, 为接下来研究高性能, 如考虑参数摄动的实时控制器奠定基础。

参 考 文 献

- [1] THOMAS R K, WESLEY L S. Robotics and automation handbook[M]. New York: CRC Press, 2005.
- [2] ALBU-SCHAFFER A, OTT C, HIRZINGER G. A unified passivity-based control framework for position, torque, impedance control of flexible joint robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 2007, 26(1): 23-39.
- [3] WANG W, FU X Y, LI Y G, et al. Design of variable stiffness based on modified gear-rack mechanism, Journal of Mechanisms and Robotics[J]. 2016, 8(6): 061008.
- [4] PAINE N, MEHLING J S, HOLLEY J, et al. Actuator control for the NASA-JSC Valkyrie humanoid robot: A decoupled dynamics approach for torque control of series elastic robots[J]. Journal of Field Robotics, 2015, 32(3): 378-396.
- [5] KIM B, SONG J, PARK J. A serial-type dual actuator unit with planetary gear train: Basic design and application[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(1): 108-116.
- [6] 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 Wei, LIU Lidong, WEI Lai, et al. Design and research of rack-based variable stiffness actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(1): 26-32.
- [7] KIM B S, SONG J B. Hybrid dual actuator unit: A design of a variable stiffness actuator based on an adjustable moment arm mechanism[C]// International Conference on Robotics and Automation, 2010, Anchorage, AK, USA. IEEE, 2010: 1655-1660.
- [8] AMIR J, NIKOS G T, DARWIN G C. A novel intrinsically energy efficient actuator with adjustable stiffness[J]. IEEE//ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 355-365.
- [9] CHOI J, HONG S, LEE W, et al. A robot joint with variable stiffness using leaf springs[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 27(2): 229-238.
- [10] NAM K H, KIM B S, SONG J B. Compliant actuation of parallel type variable stiffness actuator based on antagonistic actuation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(11): 2315-2321.
- [11] FRIEDL W, CHALON M, REINECKE J, et al. FAS a flexible antagonistic spring element for a high performance over actuated hand[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011, Piscataway, USA. IEEE, 2011: 1366-1372.
- [12] 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, Piscataway, USA. IEEE, 2010: 378-383.
- [13] NAKANISHI Y, ITO N, SHIRAI T, et al. Design of powerful and flexible musculoskeletal arm by using nonlinear spring unit and electromagnetic clutch opening mechanism[C]// IEEE/ RAS International Conference on Humanoid Robots, 2011, Piscataway, USA. IEEE, 2011: 377-382.
- [14] TAO Y, WANG T M, WANG Y Q, et al. A new variable stiffness robot joint[J]. Industrial Robot: An international Journal, 2015, 42(4): 371-378.
- [15] 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(1): 414-420.
ZHANG Ming, FANG Lijin, SUN Feng, et al. Study on mechanical characteristics of variable-stiffness permanent magnetic mechanism for elastic robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018(1): 414-420.
- [16] SUN F, ZHANG M. Mechanical analysis of a three-degree of same-stiffness permanent magnetic spring[J]. International Journal of Applied Electromagnetic and Mechanics, 2016, 52: 667-675.

- [17] 史延雷, 张小俊, 张明路. 主-被动复合变刚度柔性关节设计与分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 55-62.
SHI Yanlei, ZHANG Xiaojun, ZHANG Minglu. Design and analysis of a active-passive variable stiffness flexible joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 55-62.
- [18] 隋春平, 赵明杨. 3 自由度并联柔索驱动变刚度操作臂的刚度控制[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 205-210.
SUI Chunping, ZHAO Mingyang. Statics and stiffness study on a 3-DOF parallel wire driven flexible manipulator[J]. Chinese Journal of Mechanical

Engineering, 2006, 42(6): 205-210.

作者简介: 张明, 男, 1988 年出生, 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

房立金(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人及自动化控制。

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

孙凤, 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为磁悬浮技术与数控技术。

E-mail: sunfeng@sut.edu.cn

岡宏一, 男, 1958 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为磁悬浮技术与机器人技术。

E-mail: oka.koichi@kochi-tech.ac.jp