

片簧型柔顺并联机器人运动规划与轨迹跟踪技术*

田浩 余跃庆 吕强

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要: 针对柔顺关节并联机器人系统存在的误差因素,为提高系统整体性能,开展运动规划及轨迹跟踪研究。根据性能要求,设计柔顺关节的结构参数,分析柔顺关节特性,建立机器人系统的分析模型并推导运动学方程。针对柔顺关节轴心漂移引起的杆长误差,提出一种机器人主动杆和从动杆实际杆长的计算方法,修正主动杆关节角的期望轨迹。为补偿系统振动及参数摄动误差,基于径向基(RBF)神经网络设计模型逼近控制算法,跟踪期望轨迹。基于SolidWorks、ANSYS、ADAMS及Matlab/Simulink建立机器人系统的虚拟仿真模型。仿真结果表明,提出的运动规划和控制方法将未补偿柔顺关节误差时的机器人末端轨迹误差降低了84%以上,能够有效提高柔顺关节并联机器人系统的运行精度。

关键词: 柔顺关节 并联机器人 运动规划 轨迹跟踪 虚拟仿真模型

中图分类号: TH112; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0372-07

Motion Planning and Trajectory Tracking of Parallel Robot with Leaf Compliant Joint

Tian Hao Yu Yueqing Lü Qiang

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at the errors of compliant parallel robot, a study on the motion planning and trajectory tracking of robot system was presented to improve the overall performance. According to the performance requirements, the structural parameters of compliant joint were designed. The characteristics of compliant joint were analyzed. The analysis model and the kinematic equation were obtained. Aiming at the length errors of links made by axis drift, a numerical method for determining the actual length of drive and driven links was proposed. Based on the radial basis function (RBF) neural network, a model approximation control method was designed to compensate the vibration and the parameter perturbation errors of parallel robot system for tracking the desired trajectory. The virtual simulation model of compliant joint parallel robot system was established by SolidWorks, ANSYS, ADAMS and Matlab/Simulink. The simulation results show that the errors of end-effector trajectory without compensation of compliant joint errors can be reduced by 84% based on the proposed motion planning and control method, which is effective to improve the operating accuracy of compliant joint parallel robot system.

Key words: Compliant joints Parallel robot Motion planning Trajectory tracking Virtual simulation model

引言

柔顺关节并联机器人是一种利用柔顺关节弹性

变形实现运动和能量传递的并联机器人。因其部分替换甚至完全替换了机器人系统中的刚性运动副,从而可以有效降低运动副间隙、摩擦、冲击等误差因

收稿日期: 2014-12-21 修回日期: 2015-01-17

* 国家自然科学基金资助项目(51175006)

作者简介: 田浩, 博士生, 主要从事柔顺关节并联机器人规划及控制研究, E-mail: tankthwd@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 余跃庆, 教授, 博士生导师, 主要从事机构学及机器人学研究, E-mail: yqyu@bjut.edu.cn

素对机器人系统运行精度的影响。

并联微动机器人是一种高精度的柔顺关节并联机器人,能实现微纳米级的定位分辨率,受到了国内外研究者的高度关注,并已在生物医疗及微细操作等领域获得应用^[1]。文献[2-8]开展了构型综合、运动学及动力学等方面的研究,为并联微动机器人的实际应用提供了理论基础。可是微动系统多由压电陶瓷驱动,柔顺关节的变形范围较小,很难实现宏观尺度的运动,一定程度上限制了此类柔顺并联机器人的应用。

针对柔顺关节仅可以实现微小变形的不足,文献[9-10]设计出能实现大范围运动的柔顺关节;文献[11]设计了具有宏观尺度变形特征的片簧型柔顺关节,并将其应用于并联机器人,验证了柔顺关节替换刚性运动副的可行性;文献[12]和文献[13]分别设计了扭簧型和开槽型柔顺关节,改善了关节的运动学性能。文献[9-13]主要侧重于柔顺关节的构型设计及运动效果分析,较少考虑柔顺关节对系统整体性能的影响。

柔顺关节因其自身结构特点,虽然可以避免间隙、摩擦等误差因素,但也存在轴心漂移及弹性振动等误差因素。在微动系统中,柔顺关节的变形较小,轴心漂移问题不明显,并且系统运行速度降低,弹性振动非常微弱。但在宏观运动领域,柔顺关节的误差因素就会变得较为突出。文献[14]建立了机器人的实际被控模型,将误差因素考虑为综合扰动,设计了趋近律滑模控制策略,实现了机器人系统的轨迹跟踪,但该研究以开槽型柔顺关节作为研究对象,轴心漂移误差对系统运行精度的影响较小。针对更为一般的片簧型柔顺关节,文献[15]提出了初始弯曲梁双1R伪刚体模型,能够较准确地模拟柔顺关节的变形轨迹,但建模过程复杂,求解难度较大。为提高柔顺关节并联机器人的整体性能,有必要研究柔顺关节的误差因素,并对其进行有效补偿。

本文以片簧型柔顺关节并联机器人为研究对象,首先给出柔顺关节结构参数的设计方法并分析柔顺关节特性,然后建立机器人系统的分析模型,推导运动学方程,针对柔顺关节的轴心漂移问题,设计一种主从动杆实际杆长的计算方法,修正主动杆关节角的期望轨迹,基于神经网络设计模型逼近控制算法,跟踪期望轨迹,最后建立机器人系统的虚拟仿真模型,进行仿真试验,验证本文方法的有效性。

1 柔顺关节设计及系统建模

1.1 柔顺关节设计

研究的平面三自由度柔顺关节并联机器人系统

的机构示意图如图1a所示,图1b为机器人系统使用的片簧型柔顺关节,该柔顺关节主要在存在冲击、振动及变应力的环境下,利用材料自身的弹性形变吸收和释放能量,实现运动的传递。

图1b中标出了柔顺关节的主要结构参数,其设计方法如下:

(1) 关节材料:满足柔顺关节的工作环境,保证其变形能力和刚度性能。

(2) 圆弧角度 θ :使用柔顺关节连接主动杆和从动杆后,机器人的初始位姿与使用刚性关节连接保持一致。

(3) 圆弧半径 r :半径越小,主动杆和从动杆间的轴心漂移越小,运行精度越高;但半径越小,关节的刚度越大,变形范围越小,影响关节的运动性能。

(4) 截面宽度 b :与主从动杆宽度相同。

(5) 截面厚度 h :影响柔顺关节的刚度及变形范围。

根据柔顺关节并联机器人系统的性能要求^[12],选取柔顺关节材料为65Mn,结构参数分别为 $\theta = 78^\circ$, $r = 20\text{ mm}$, $b = 26\text{ mm}$, $h = 0.5\text{ mm}$ 。

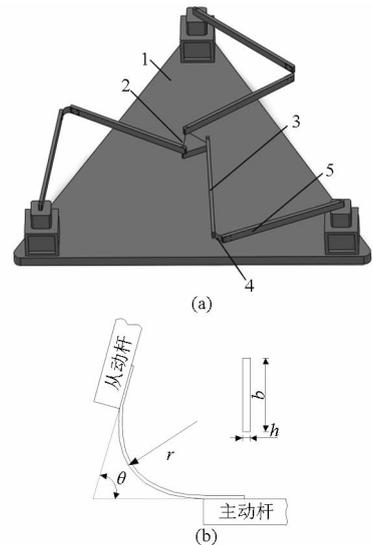


图1 平面三自由度柔顺关节并联机器人示意图

Fig. 1 Mechanism of planar 3-DOF parallel robot with compliant joints

(a) 机构 (b) 柔顺关节

1. 定平台 2. 动平台 3. 从动杆 4. 柔顺关节 5. 主动杆

1.2 柔顺关节特性

1.2.1 轴心漂移

理想刚性转动副绕其转动中心自由旋转;对于本文研究的片簧型柔顺关节,没有实际意义的转动中心,研究中将与柔顺关节相连两杆连线的交点定义为转动中心。当柔顺关节运动时,转动中心会随着转角的变化而发生偏移,产生了轴心漂移。图2中 B_i 和 B'_i 为柔顺关节在不同转角时的转动中心,

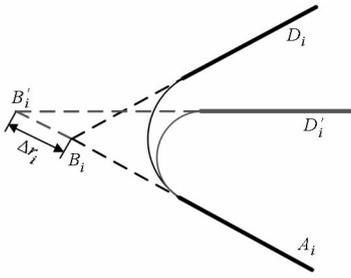


图2 柔顺关节轴心漂移示意图

Fig.2 Sketch of axis drift of compliant joint

Δr_i 即为轴心漂移。

柔顺关节的转角随机器人位姿的改变而时刻变化,相应的其转动中心也在不断变化。受轴心漂移影响,柔顺关节并联机器人主动杆和从动杆的实际杆长为时变量。

1.2.2 弹性振动

柔顺关节并联机器人的运动过程伴随着有柔顺关节自身弹性势能的储存及释放,这一转换形式避免了传统运动副传动过程中的误差因素。可是柔顺关节为了实现大范围运动,结构设计中要求其功能方向具有较大的柔度,与之相对的关节刚度就会随之降低,在运动过程中会产生弹性振动,影响系统运行精度。

使用柔顺关节替换刚性运动副,可以避免运动副间隙、轴间摩擦、磨损、冲击等误差因素;但由于其自身结构特点,也引入了误差。为提高柔顺关节机器人系统性能,充分体现柔顺关节替换刚性运动副的性能优势,本文将通过规划及控制的方法,提高机器人系统的轨迹跟踪性能。

1.3 系统运动学模型

柔顺关节的转动中心在机器人运动过程中是不断变化的。但对于运动过程中的任意瞬时,其位置是确定的,建立柔顺关节并联机器人系统的分析模型如图3所示,其中 B_i 点为柔顺关节在该瞬时的转动中心,使用刚度系数与柔顺关节相等的扭簧表征柔顺关节弹性势能的储备及释放过程。

图3中机器人的机构包括:定平台 $A_1A_2A_3$ 、动平台 $D_1D_2D_3$ 和与二者相连接的3条结构相同的运动支链,各运动支链由主动杆 A_iB_i 、从动杆 B_iD_i 和柔顺关节组成。定平台和动平台为等边三角形。绝对坐标系 OXY 建立在定平台上,原点 O 在 A_1 点, X 轴沿 A_1A_2 方向;在动平台上建立相对坐标系 $O_1X_1Y_1$,原点 O_1 在动平台的几何中心, X_1 轴平行于 D_1D_2 。根据系统结构参数可以确定 A_i 点的位置矢量 0A_i , B_i 点的位置矢量为

$${}^0B_i = {}^0A_i + r_{i1} \begin{bmatrix} \cos\theta_{i1} \\ \sin\theta_{i1} \end{bmatrix} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

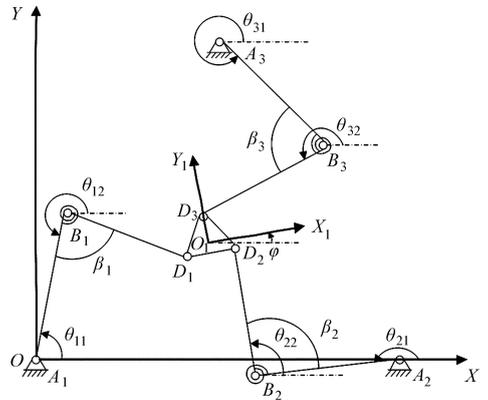


图3 系统分析模型

Fig.3 System analysis model

式中 r_{i1} ——主动杆杆长

θ_{i1} ——主动杆关节角位移

$O_1X_1Y_1$ 系中, D_i 点的位置矢量为 ${}^{01}D_i$, 将其转换到 OXY 系中为

$${}^0D_i = R^{01}D_i + {}^0O_1 \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

其中 $R = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$

式中 0O_1 ——相对坐标系原点在绝对坐标系中的位置矢量

φ ——动平台姿态角

根据 $\|{}^0B_i - {}^0D_i\| = r_{i2}$, 展开可得机器人的运动学方程为

$$\begin{cases} f_1(x, y, \varphi, \theta_{11}, r_{11}, r_{12}, h_d, a) = 0 \\ f_2(x, y, \varphi, \theta_{21}, r_{21}, r_{22}, h_d, a) = 0 \\ f_3(x, y, \varphi, \theta_{31}, r_{31}, r_{32}, h_d, a) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 x, y ——动平台位置

r_{12}, r_{22}, r_{32} ——从动杆杆长

h_d, a ——动平台和定平台边长

整理可得机器人主动杆的关节角位移为

$$\theta_{i1} = 2\arctan \frac{-e_{1i} \pm \sqrt{e_{1i}^2 + e_{2i}^2 - e_{3i}^2}}{e_{3i} - e_{2i}} \quad (4)$$

式中 e_{1i}, e_{2i}, e_{3i} ——机器人结构参数及动平台位姿的函数

2 运动规划

柔顺关节存在轴心漂移,使得与之相连的机器人主动杆及从动杆的杆长为时变量,以往考虑机器人杆长为常数的规划方法很难直接应用。本文将解析计算与仿真模型相结合,提出一种主从动杆实际杆长的计算方法,以此为基础,规划主动杆的期望关节角位移,补偿轴心漂移。

柔顺关节并联机器人的机构示意图如图4,图中 B_i 为柔顺关节的转动中心。

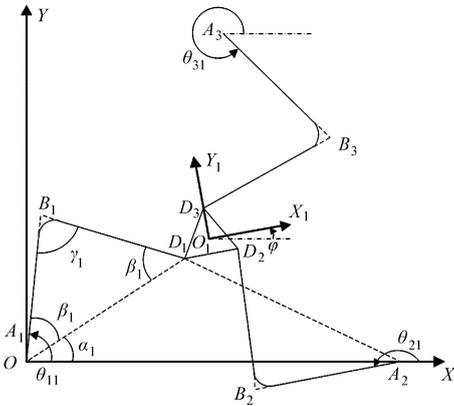


图4 柔顺关节并联机器人示意图

Fig. 4 Sketch of compliant joint parallel robot

已知动平台位姿,根据几何关系可以确定 D_i 点的位置矢量,由于 A_i 点位置矢量已知,可以求得 $\triangle A_1D_1A_2$ 的各边长度,内角 α_1 可以通过余弦定理求得

$$\alpha_1 = \arccos \frac{l_{A_1D_1}^2 + l_{A_1A_2}^2 - l_{A_2D_1}^2}{2l_{A_1D_1}l_{A_1A_2}}$$

图1a中设计各运动链主动杆及从动杆的原始杆长相等,根据柔顺关节的运动特性,与柔顺关节相连两杆的杆长变化量一致^[15]。所以在 $\triangle A_1B_1D_1$ 中,主动杆和从动杆的实际杆长 r_{11} 和 r_{12} 相等,已知主动杆角位移 θ_{11} ,根据正弦定理得到

$$r_{11} = r_{12} = l_{A_1B_1} = l_{B_1D_1} = \frac{l_{A_1D_1}}{\sin \gamma_1} \sin \beta_1 \quad (5)$$

其中 $\beta_1 = \theta_{11} - \alpha_1$ $\gamma_1 = \pi - 2\beta_1$

使用同样的方法可以确定主动杆 r_{21} 、从动杆 r_{22} 、主动杆 r_{31} 及从动杆 r_{32} 的实际杆长。

该方法的关键在于如何确定机器人的动平台位姿及主动杆角位移 θ_{1i} ,直接应用解析方法较难实现。本文基于 SolidWorks、ANSYS 及 ADAMS 建立机器人的虚拟仿真模型,以此模型反馈机器人的动平台位姿及相应的主动杆角位移,从而可以应用本文方法计算主动杆和从动杆的实际杆长,进而规划主动杆关节角的期望轨迹,补偿轴心漂移,保证机器人的运动学精度。

3 轨迹跟踪

3.1 问题描述

柔顺关节并联机器人由于柔顺关节的使用在系统运行过程会发生振动,而该振动形式是非线性的,精确建立其振动模型较为复杂;在实际控制系统中,很难准确获得机器人的惯性参数,使用名义惯性参数建立的系统模型将产生模型误差。本文设计一种具有模型逼近能力的控制算法,补偿系统的误差因素,提高跟踪精度。

基于拉格朗日方程,建立柔顺关节并联机器人系统的动力学模型为^[14]

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + K(\theta) = \tau + \tau_d \quad (6)$$

式中 $M(\theta)$ ——系统惯性矩阵

$C(\theta, \dot{\theta})$ ——系统离心力哥氏力矩阵

$K(\theta)$ ——系统刚度

τ, τ_d ——驱动力矩和振动扰动项

动力学模型具有如下性质:惯性矩阵 $M(\theta)$ 为正定对称矩阵; $\dot{M}(\theta) - 2C(\theta, \dot{\theta})$ 为斜对称矩阵。

定义滑模函数为

$$s = \dot{e} + \delta e \quad (7)$$

其中 $e = \theta_d - \theta$ $\dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}$ $\delta = \delta^T > 0$

根据式(7),得到

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_s - s \quad (8)$$

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_s - \dot{s} \quad (9)$$

其中 $\dot{\theta}_s = \dot{\theta}_d + \delta e$ $\ddot{\theta}_s = \ddot{\theta}_d + \delta \dot{e}$

将式(8)、(9)代入式(6),得到

$$M(\theta)\ddot{\theta}_s + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}_s + K(\theta) - \tau_d - \tau = M(\theta)\dot{s} + C(\theta, \dot{\theta})s \quad (10)$$

定义 $f = M\ddot{\theta}_s + C\dot{\theta}_s + K - \tau_d$ 。由于机器人系统的振动特性未知,同时受惯性参数摄动影响,很难确定 f 的准确值。

3.2 模型逼近控制算法

将 f 考虑为模型不确定项,使用径向基(RBF)神经网络对其进行逼近。RBF神经网络具有强大的不确定性逼近能力,在紧集范围内,该神经网络算法能以任意精度逼近连续非线性函数。神经网络的理想输出为

$$f = W^{*T}h(x) + \eta \quad (11)$$

其中 $h(x) = (h_1, h_2, \dots, h_m)$

$$h_i = \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

式中 $h(x)$ ——高斯基函数

x ——神经网络输入值

m ——隐含层节点个数

c_i, σ_i ——中心矢量和基宽参数

W^* ——理想神经网络权值

η ——逼近误差

RBF神经网络的实际输出为

$$\hat{f} = \hat{W}^T h(x) \quad (12)$$

式中 \hat{W} ——理想神经网络权值的估计

设计控制律为

$$\tau = \hat{f} + K_s s + K_r \text{sgn}(s) \quad (K_r \geq \|\eta\|_\infty) \quad (13)$$

式中 K_s ——正定对称矩阵

K_r ——适当取定的正常数

将式(11)~(13)代入式(10),整理得到

$$M\dot{s} + Cs = \widehat{W}^T h(x) - K_r s + \eta - K_r \text{sgn}(s) \quad (14)$$

其中 $\widehat{W} = W^{*T} - \widehat{W}$

定义李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} s^T Ms + \frac{1}{2} \text{tr}(\widehat{W}^T F^{-1} \widehat{W}) \quad (15)$$

式中 F ——适当取定的正定对称矩阵

方程两边求导,根据机器人动力学模型特性,整理得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T (M \dot{s} + Cs) + \text{tr}(\widehat{W}^T F^{-1} \dot{\widehat{W}}) = \\ & s^T (\widehat{W}^T h + \eta - K_r \text{sgn}(s) - K_r s) + \text{tr}(\widehat{W}^T F^{-1} \dot{\widehat{W}}) = \\ & s^T \eta - K_r \|s\| - s^T K_r s + \text{tr}(\widehat{W}^T (hs^T + F^{-1} \dot{\widehat{W}})) \end{aligned} \quad (16)$$

自适应律 $\dot{\widehat{W}} = Fhs^T$, 得到 $\dot{\widehat{W}} = -Fhs^T$, 代入式(16)得到

$$\dot{V} \leq -s^T K_r s \leq 0$$

根据 Barbalat 引理,可证系统渐进稳定。

该控制算法不依赖机器人模型,且神经网络待调整参数少,计算效率高。以补偿轴心漂移的主动杆关节角位移作为期望轨迹,利用模型逼近控制算法补偿振动及参数摄动误差,跟踪期望轨迹,从而实现了柔顺关节并联机器人的轨迹跟踪。

4 仿真

为实现和验证运动规划及轨迹跟踪方法,建立柔顺关节并联机器人的虚拟仿真模型,进行仿真实验,分析机器人系统的动态特性。虚拟仿真模型的建立过程如下:

(1) 柔顺关节建模:根据柔顺关节结构参数,应用三维建模软件 SolidWorks 建立柔顺关节的刚性模型,保存为 parasolid 格式。

(2) 柔顺关节柔性化:将柔顺关节模型导入 ANSYS 中,定义材料属性和单元类型,划分网格,建立 interface nodes(用于导入 ADAMS 后与其他构件连接),生成模态中性文件。

(3) 机器人系统建模:在 ADAMS 中建立机器人的主动杆、从动杆及动平台模型,导入柔性化后的柔顺关节,添加约束和驱动,建立柔顺关节并联机器人的仿真模型(因定平台不参与运动,所以将其略去),如图 5。

(4) 控制仿真模型建模:针对步骤(1)~(3)建立的机器人 ADAMS 机械系统模型,对其添加外部

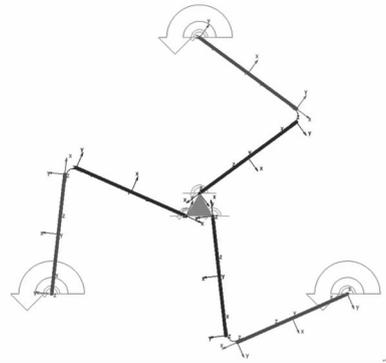


图 5 柔顺关节并联机器人仿真模型

Fig. 5 Simulation model of compliant joint parallel robot

载荷及相关约束;根据控制算法,在 Matlab/Simulink 环境中,建立控制系统;使用 ADAMS/Control 模块将机械系统和控制系统连接,利用 Matlab/Simulink 输出控制信号,驱动机器人的机械系统,ADAMS 实时将机器人的位姿、速度及加速度信息反馈给控制系统,实现闭环控制。使用 S 函数实现对期望轨迹和控制算法的描述。ADAMS 和 Matlab 的数据交换过程及联合控制仿真模型如图 6、7。

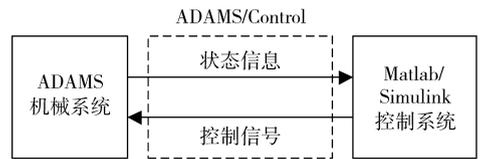


图 6 ADAMS 和 Matlab 的数据交换过程

Fig. 6 Data exchange process between ADAMS and Matlab

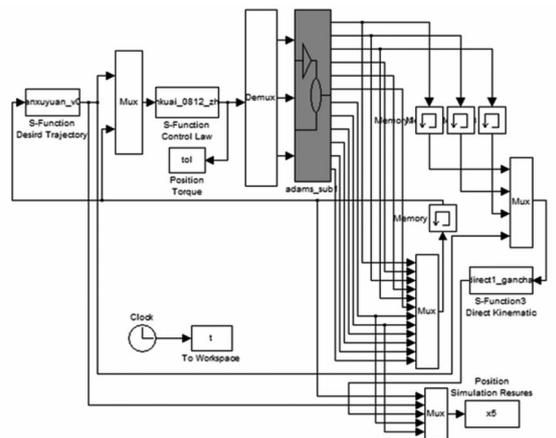


图 7 联合控制仿真模型

Fig. 7 Joint control simulation model

动平台期望轨迹(单位:m):动平台从 $Q_1(0.45, 0.26)$ 点沿直线轨迹运动到 $Q_2(0.55, 0.26)$ 点;以 Q_2 点为起点, Q_1 点为圆心,作半径为 0.1 的圆轨迹,返回 Q_2 点;从 Q_2 点沿直线轨迹返回 Q_1 点。

期望轨迹用于研究系统对于直线轨迹和圆轨迹的跟踪性能,共分为 3 段,每段轨迹视为点到点的运动,两点间轨迹为直线或圆,采用 S 型曲线进行速度规划。

机器人的规划及跟踪流程如图 8 所示。

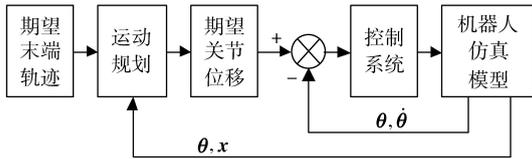


图 8 运动规划及轨迹跟踪流程图

Fig. 8 Flow chart of motion planning and trajectory tracking

控制参数为：

$\delta = \text{diag}[20, 20, 20]$, $K_s = \text{diag}[10, 10, 10]$, $F = \text{diag}[50, 50, 50]$, $v_{\max} = 0.0833 \text{ m/s}$, $a_{\max} = 20 \text{ m/s}^2$, $v_s = 0, v_e = 0$; RBF 神经网络中, 输入信号 $x = (e, \dot{e}, \theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d)$, 高斯基函数中心矢量按照网络输入的范围选取, 基宽 $b = 3$; 为消除抖振, 采用饱和函数 $\text{sat}(s)$ 代替符号函数 $\text{sgn}(s)$ ^[16], 边界层厚度取 0.4; 并联机器人的主要惯性参数如表 2 所示。

表 2 并联机器人惯性参数

Tab. 2 Inertia parameters of parallel robot

构件	长度/m	质量/kg	转动惯量 / (kg·m ²)
驱动杆	0.366	0.2306	2.6×10^{-3}
从动杆	0.366	0.2306	2.6×10^{-3}
动平台	0.08	0.5405	2.8825×10^{-4}
定平台	0.9		

图 9 为轨迹跟踪前后机器人的末端轨迹。其中未补偿轨迹表示未补偿柔顺关节误差因素时的机器人末端轨迹, 跟踪轨迹为根据图 8 所示规划及跟踪

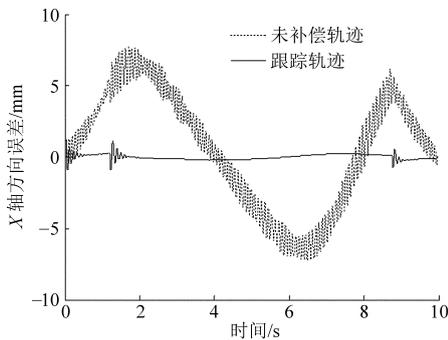


图 10 末端轨迹沿 X 轴和 Y 轴方向的误差曲线

Fig. 10 Error curves of end-effector trajectory in X and Y axes

表 3 误差统计

Tab. 3 Statistics of errors

参数	控制方法	mm	
		X	Y
最大误差	未补偿轨迹	7.8	8.4
	跟踪轨迹	1.2	1.2
标准差	未补偿轨迹	4.1	4.0
	跟踪轨迹	0.20	0.23
均方根误差	未补偿轨迹	5.8	
	跟踪轨迹	0.31	

流程得到的机器人末端轨迹。从图中可以看出, 未补偿轨迹明显偏离期望轨迹, 误差较为明显, 并且存在高频低幅振动; 而跟踪轨迹与期望轨迹的吻合度较高, 轨迹运行平稳。

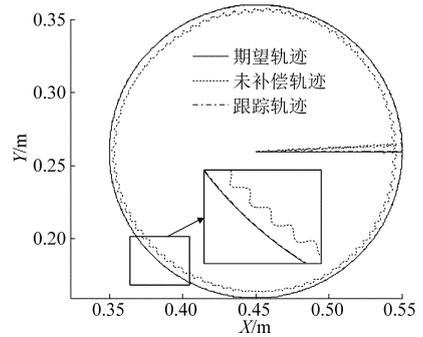


图 9 末端轨迹曲线对比

Fig. 9 Curves comparison of end-effector trajectory

为使结果更为直观, 图 10 给出了未补偿轨迹和跟踪轨迹沿 X 轴和 Y 轴方向的误差, 表 3 对末端误差进行了统计分析。可以看出, 未补偿轨迹在运动过程中始终存在明显的高频误差波动, 误差较大; 跟踪轨迹仅在轨迹段切换时由于位移及速度方向发生改变, 产生了较大误差, 其余轨迹部分的误差幅值较小且变化平缓。从表 3 可以看出, 使用本文方法进行运动规划和轨迹跟踪后, 机器人的各项误差统计值均降低了 84% 以上, 有效保证了跟踪精度。表明本文设计的轴心漂移实时补偿运动规划算法及神经网络模型逼近控制策略, 能够有效补偿柔顺关节的误差因素, 提高柔顺关节并联机器人系统的性能。

5 结束语

给出了柔顺关节结构参数的设计方法并分析其特性, 建立了柔顺关节并联机器人的运动学模型。提出柔顺关节轴心漂移的实时补偿运动规划算法和神经网络模型逼近控制策略, 补偿系统的误差因素, 跟踪期望轨迹。基于 SolidWorks、ANSYS、ADAMS 及 Matlab/Simulink 建立了柔顺关节并联机器人的虚拟仿真模型。仿真试验结果表明, 本文提出的运

动规划及控制方法将未补偿柔顺关节误差时的机器人末端轨迹误差降低了84%以上,误差补偿效果明显,能够有效保证柔顺关节并联机器人系统的运行精度,提高系统的整体性能。

参 考 文 献

- 1 贲远,徐青松,李杨民. 并联微操作机器人技术及应用进展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 12-23.
Yun Yuan, Xu Qingsong, Li Yangmin. Survey on parallel manipulators with micro/nano manipulation technology and applications [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 12-23. (in Chinese)
- 2 Yi B, Chung G B, Na H Y, et al. Design and experiment of a 3-DOF parallel micromechanism utilizing flexure hinges[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(4): 604-612.
- 3 Yao Q, Dong J, Ferreira P M. Design, analysis, fabrication and testing of a parallel-kinematic micropositioning XY stage[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(6): 946-961.
- 4 Li Y, Xu Q. Modeling and performance evaluation of a flexure-based XY parallel micromanipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(12): 2127-2152.
- 5 贾晓辉,田延岭,张大卫. 3-PRR 柔性并联机构动力学分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 199-203.
Jia Xiaohui, Tian Yanling, Zhang Dawei. Dynamics analysis of 3-PRR compliant parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 199-203. (in Chinese)
- 6 Yue Y, Gao F, Jin Z, et al. Modeling and experiment of a planar 3-DOF parallel micromanipulator[J]. Robotica, 2012, 30(2): 171-184.
- 7 Tian Y, Shirinzadeh B, Zhang D. Design and dynamics of a 3-DOF flexure-based parallel mechanism for micro/nano manipulation [J]. Microelectronic Engineering, 2010, 87(2): 230-241.
- 8 刘平安. 柔性关节及3-DOF微动平面并联机器人设计与分析[D]. 北京:北京交通大学, 2008.
Liu Ping'an. Design and synthesis of flexure hinges and 3-DOF micro-motion planar parallel manipulators[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- 9 赵山杉. 大变形环形柔性铰链性能分析与设计方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2010.
Zhao Shanshan. Research on performance analysis and design method of large-deflection annulus-shaped flexure hinges [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- 10 杨启志,朱小兵,马履中,等. 大变形柔性转动副结构设计与柔度分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 209-212.
Yang Qizhi, Zhu Xiaobing, Ma Lüzhong, et al. Structural design and flexibility analysis of new compliant revolute pair with macro-scale deformation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 209-212. (in Chinese)
- 11 余跃庆,崔忠炜,赵鑫,等. 柔顺关节并联机器人设计与实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 274-278.
Yu Yueqing, Cui Zhongwei, Zhao Xin, et al. Design and experiment of parallel robot with compliant joints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 274-278. (in Chinese)
- 12 崔忠炜. 柔顺铰链的结构设计、仿真及实验研究[D]. 北京:北京工业大学, 2013.
Cui Zhongwei. On the structural design, simulation and experiment of compliant joints [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 13 余跃庆,马兰,崔忠炜,等. 并联机器人开槽薄壁柔顺关节设计与实验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 284-290.
Yu Yueqing, Ma Lan, Cui Zhongwei, et al. Design and experiment of open thin-walled flexure joints of parallel robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 284-290. (in Chinese)
- 14 田浩,余跃庆. 柔顺关节并联机器人动力学建模与控制研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 278-283.
Tian Hao, Yu Yueqing. Dynamics and control of parallel robot with compliant joints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 278-283. (in Chinese)
- 15 Li Y, Yu Y. Dynamic modeling for a high-speed 3-DOF parallel robot with compliant joints[C] // International Conference on Mechanical Design, Manufacture and Automation Engineering, 2014: 224-229.
- 16 Slotine J J, Sastry S S. Tracking control of non-linear systems using sliding surfaces, with application to robot manipulators[J]. International Journal of Control, 1983, 38(2): 465-492.