

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.048

基于外力估计的并联机器人柔顺控制策略研究

倪涛¹ 孙旭¹ 李东² 赵亚辉¹ 张泮虹¹ 邓英杰³

(1. 燕山大学车辆与能源学院, 秦皇岛 066004; 2. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 长春 130022;

3. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 针对并联机器人在作业过程中的位置精确控制及柔顺控制问题, 提出了基于外力估计的并联机器人柔顺控制策略, 实现并联机器人在作业过程中位置和力的高性能动态交互。基于外力估计的柔顺控制实现过程中, 考虑到接触力传感器成本较高, 提出一种无传感器外力估计的方法。首先建立并联机器人以及伺服运动系统动力学模型, 利用所建立的动力学模型和电机的电流反馈值来估算外力作用时机器人关节力的变化。其次根据估算的并联机器人关节力, 设计基于位置的阻抗控制, 使并联机器人末端执行器与环境柔性接触, 确保并联机器人的作业精度与柔顺度。最后选取合适的阻抗控制参数, 对所提出的柔顺控制策略进行仿真分析并且在搭建的实验平台上进行了实验验证, 实验结果表明所提出的方法可以实现并联机器人的精确柔顺作业。

关键词: 并联机器人; 柔顺控制; 外力估计; 阻抗控制

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)08-0443-09

OSID:



Compliance Control Strategy of Parallel Robot Based on External Force Estimation

NI Tao¹ SUN Xu¹ LI Dong² ZHAO Yahui¹ ZHANG Panhong¹ DENG Yingjie³

(1. College of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2. College of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

3. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Aiming at the problem of precise position control and compliance control of parallel robot in the process of operation, a compliance control strategy of parallel robot based on external force estimation was proposed. The compliance strategy can realize the high-performance dynamic interaction between position and force of parallel robot in the process of operation. In the implementation of compliance control based on external force estimation, considering the high cost of contact force sensor, a sensorless external force estimation method was proposed. Firstly, the dynamic model of parallel robot and the dynamic model of servo motion system were established, and the changes of robot joint force under external force were estimated by using the established dynamic model and the current feedback value of motor. Secondly, according to the estimated joint force of the parallel robot, the position based impedance control was designed. The position based impedance control can change the rigid contact between the end effector of the parallel robot and the environment into flexible contact, so as to ensure the operation accuracy and compliance of the parallel robot. Finally, the appropriate impedance control parameters were selected to simulate and analyze the proposed compliance control strategy, and the experimental verification was carried out on the built experimental platform. The experimental results showed that the proposed method can realize the accurate, stable and fast compliance operation of the parallel robot.

Key words: parallel robot; compliance control; external force estimation; impedance control

收稿日期: 2021-08-24 修回日期: 2021-10-27

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20200401130GX)

作者简介: 倪涛(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事机器视觉和智能移动机器人技术研究, E-mail: nitao@ysu.edu.cn

通信作者: 邓英杰(1993—), 男, 讲师, 博士, 主要从事非线性系统控制和船舶智能制导研究, E-mail: dyj_dl@126.com

0 引言

随着科学技术的进步,机器人领域发展迅速^[1-3],目前,由于具有承载大负载、位置控制精度高、同时末端的工件惯性小等优点,并联机器人应用越来越广泛,因此很多学者对并联机器人的控制技术进行了研究。

机器人的阻抗控制^[4-5]为经典的机器人柔顺控制策略,其目标是在机器人末端执行器的位置和环境接触力之间建立期望的动态关系^[6]。阻抗控制按其实现方式可分为基于力的阻抗控制和基于位置的阻抗控制。基于位置的阻抗控制策略^[7]由内部位置控制环和外部力反馈环组成,接触力信息用于修改末端执行器的期望位置,从而实现末端执行器位置的柔顺控制。基于力的阻抗控制策略^[8]由内部力控制环和外部位置反馈环组成,位置轨迹的偏差用于修改末端执行器的指令力,从而实现机器人末端力的柔顺控制的作用。BROENINK等^[9]设计了一套基于实时检测的力传感器值的阻抗控制系统用于控制机器人完成作业。CHAN等^[10]提出的阻抗控制策略根据给定的控制移动路径和从环境获得的力传感器值,通过设定的阻抗方程不断地缩小路径偏差和接触力偏差,实现柔顺控制。由于大多数机器人容易配备高精度的位置伺服控制器,基于位置的控制策略可以避免控制器的重新设计。因此基于位置的阻抗控制策略成为一种更受关注的方法。

在力反馈控制方面,近年来国内外学者重点研究基于外力估计控制方式代替使用力传感器测量的方法,并取得了一定成果。YANG等^[11]提出了一种不需要力传感器,只需要获得位置信息的控制策略,该方法通过前置反馈力矩,利用逆运动学推导出机器人的实时控制力矩,并且通过多自由度的机械臂的仿真和实验验证了该控制器可以应用于对未知环境的类人学习。LE等^[12]结合了时间延时估计,并同时利用状态估计,利用机器人的关节力矩估计末端执行器受力。ZHANG等^[13]提出一种通过关节位置误差和关节控制回路的谐波估计外力的方法,基于该方法关联各关节的力矩与角度偏差,利用存在的力矩估计外力的方式计算外力。GUTIERREZ-GILES等^[14]提出了一种基于广义比例积分技术的速度/力观测器,关节速度和接触力仅通过位置测量进行估算,然后用于力/位置控制方案。STOLT等^[15]提出了一种不需要力传感器的控制方法,通过利用关节位置偏差直接估计所受外力。

本文针对机器人在作业过程中,能够实现位置

精度控制及柔顺控制效果,将采用并联机器人基于位置的阻抗控制策略,并在阻抗控制实现过程中,利用基于动力学模型的外力估计方法,检测机器人与环境接触时的作用力并估计其值。

1 理论模型建立

1.1 平台逆运动学分析

Stewart平台结构如图1所示,电动缸下端与固定平台的连接点所在的平面为固定平面,且固定平面的中心点与世界坐标系 B 的原点 O 重合,电动缸的上端与动平台的连接点所在的平面为动平面,且动平面的中心点与动坐标系 P 的坐标原点重合。定义坐标系 B 的 y 轴为下平台短边 b_1b_2 的中垂线,坐标系 P 的 y 轴为上平台长边 a_1a_2 的中垂线,向量 a_i ($i=1,2,\dots,6$)表示上连接点相对于动坐标系的位置,向量 b_i ($i=1,2,\dots,6$)表示固定平面的6个连接点在世界坐标系 B 中的位置。

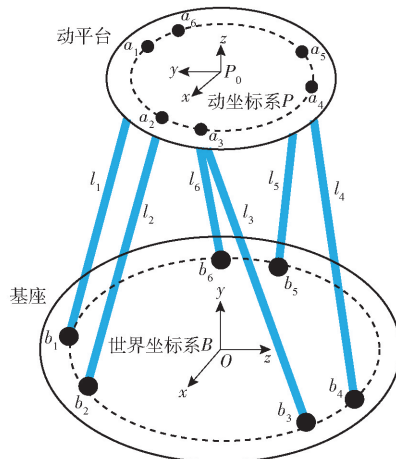


图1 Stewart平台结构简图

Fig. 1 Structure diagram of Stewart platform

由Stewart平台结构中的空间位置关系则可推算出上平台6个连接点在坐标系 P 下的位置,下平台6个连接点在坐标系 B 下的位置^[16]。定义广义坐标向量 $q=(x,y,z,\varphi,\theta,\phi)$,其中 (x,y,z) 表示动坐标系 P 的原点相对于世界坐标系 B 的位置, (φ,θ,ϕ) 表示动坐标系 P 的原点在世界坐标系 B 中的空间姿态。定义平台6个电动缸的上连接点与下连接点之间的距离向量为 $l=(l_1,l_2,l_3,l_4,l_5,l_6)$ 。

采用ZXZ欧拉角的旋转顺序,依次旋转角度 φ,θ,ϕ ,则可得到动坐标系 P 相对于世界坐标系 B 的齐次旋转变化矩阵 ${}^B R_p$,计算公式为

$${}^B R_p = \begin{bmatrix} c\phi c\varphi - c\theta s\varphi s\phi & -s\phi c\varphi - c\theta s\varphi c\phi & s\theta s\varphi \\ c\phi s\varphi + c\theta c\varphi s\phi & -s\phi s\varphi + c\theta c\varphi c\phi & -s\theta c\varphi \\ s\phi s\theta & c\phi s\theta & c\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 c 表示余弦函数, s 表示正弦函数。

利用此变化矩阵与各参数之间的关系可推算出平台6个电动缸的上连接点与下连接点之间的距离向量 $l_i (i=1,2,\dots,6)$, 电动缸速度矢量和动平台速度之间的关系, 以及电动缸的线速度与末端执行器的广义速度之间的关系^[17-18]。

电动缸速度矢量和动平台速度的关系表达式为

$$\dot{l} = J_1^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 x ——动坐标系原点相对于世界坐标系的位置

ω ——上平台相对于坐标系 B 的角速度

J_1^{-1} ——Stewart 平台末端执行器速度(相对于世界坐标系 B)到各关节速度的映射矩阵

电动缸的线速度与末端执行器的广义速度的计算关系为

$$\dot{l} = J_1^{-1} J_2^{-1} \dot{q} = J^{-1} \dot{q} \quad (3)$$

其中

$$J_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\varphi & \sin\varphi\sin\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin\varphi & -\cos\varphi\sin\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

电动缸的线加速度可由电动缸的线速度求导得到。计算公式为

$$\ddot{l} = J^{-1} \ddot{q} + \frac{dJ^{-1}}{dt} \dot{q} \quad (5)$$

其中 $\frac{dJ^{-1}}{dt} = \frac{dJ_1^{-1}}{dt} J_2^{-1} + J_1^{-1} \frac{dJ_2^{-1}}{dt}$ (6)

1.2 平台逆动力学分析

1.2.1 单个电动缸受力分析

如图2所示,以电动缸上下两部分质心为坐标原点分别建立坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 和 $o_2x_2y_2z_2$ 。其中 x_1 、 x_2 方向沿着轴线方向; y_1 、 y_2 方向沿着万向节旋转的轴单位向量 v_i 方向; z_1 、 z_2 的方向由右手定则确定。

由单个电动缸动力学分析,根据力矩平衡关系以及各向量的位置关系,可推算出电动缸的伸缩杆与动平台之间的相互作用力 F ,且可将其分解得到力 F_i^a 和力 F_i^n ,方向分别沿着电动缸的轴线和垂直轴线,则作用力计算公式为

$$F = F_i^a + F_i^n \quad (7)$$

根据力矩平衡建立电动缸的动力学方程,可得出 F_i^n 为

$$F_i^n = \frac{V_i \times n_i - m_{ci} c_i \times n_i}{l_i} \quad (8)$$

其中 $c_i = u_i \times v_i$ (9)

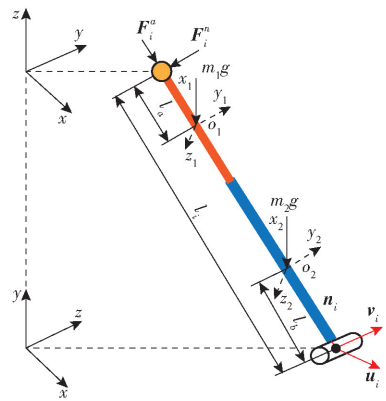


图2 支链动力学分析图

Fig. 2 Branched chain dynamics analysis diagram

$$m_{ci} = \frac{V_i n_i}{c_i n_i} \quad (10)$$

$$V_i = -[m_1(l_i - l_a) + m_2 l_b] n_i \times g + (\bar{I}_{i1} + \bar{I}_{i2}) \alpha_i - (\bar{I}_{i1} + \bar{I}_{i2}) \omega_i \times \omega_i + m_1(l_i - l_a) n_i \times a_{i1} + m_2 l_b n_i \times a_{i2} \quad (11)$$

式中 n_i 、 u_i ——沿 x_1 、 z_1 轴的单位矢量

\bar{I}_{i1} ——电动缸伸缩杆在世界坐标系的转动惯量

\bar{I}_{i2} ——电动缸缸筒部分在世界坐标系中的转动惯量

ω_i ——第 i 个电动缸角速度

α_i ——第 i 个电动缸角加速度

a_{i1} ——第 i 个电动缸伸缩杆质心加速度

a_{i2} ——第 i 个电动缸缸筒质心加速度

m_1 ——第 i 个电动缸伸缩杆质量

m_2 ——第 i 个电动缸缸筒质心质量

l_a ——电动缸伸缩杆质心到电动缸上连接点的距离

l_b ——电动缸缸筒质心到电动缸下连接点的距离

l_i ——第 i 个电动缸上连接点与下连接点之间的距离

g ——重力加速度

由于力 F_i^a 为轴线方向的作用力,所以 F_i^a 的计算公式为

$$F_i^a = f_i^a n_i \quad (12)$$

式中 f_i^a ——轴向力 F_i^a 的大小

1.2.2 动平台受力分析

如图3所示,在没有外力作用时,动平台只受到6个电动缸的作用力 F_i^a 和 F_i^n ,平台重力 $m_p g$ 以及平台惯性力 $m_p \ddot{x}_n$ 。当动平台上有重物时,平台质量为平台自身和重物质量之和,此时质心位置也会发生变化,具体位置根据重物在动平台的位置计算。

在世界坐标系 B 中,根据动平台受力平衡建立方程

$$-\sum_{i=1}^6 f_i^a n_i - \sum_{i=1}^6 F_i^n + m_p g = m_p \ddot{x}_n \quad (13)$$

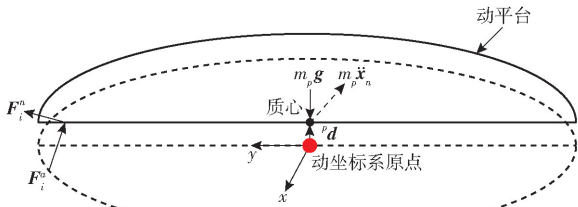


图3 上平台受力图

Fig.3 Upper platform stress diagram

在世界坐标系 B 中,根据动平台力矩平衡建立方程

$$m_p({}^B R_p {}^p d) \times g - \sum_{i=1}^6 f_i^a ({}^B R_p {}^p a_i) \times n_i - \sum_{i=1}^6 ({}^B R_p {}^p a_i) \times F_i^n - \sum_{i=1}^6 m_{ci} c_i = \tilde{I}_p \alpha - \tilde{I}_p \omega \times \omega + m_p [({}^B R_p {}^p d) \times \ddot{x}_n] \quad (14)$$

其中

$$D = \begin{bmatrix} m_p g - m_p \ddot{x}_n - \sum_{i=1}^6 F_i^n \\ m_p ({}^B R_p {}^p d) \times g - \sum_{i=1}^6 ({}^B R_p {}^p a_i) \times F_i^n - \sum_{i=1}^6 m_{ci} c_i - \tilde{I}_p \alpha + \tilde{I}_p \omega \times \omega - m_p [({}^B R_p {}^p d) \times \ddot{x}_n] \end{bmatrix} \quad (16)$$

确定了支撑杆和移动平台之间的相互作用力就可以计算出电动缸的驱动力,利用受力平衡列出方程,可求出作用于电动缸轴向力,计算公式为

$$f_i = m_1 a_{i1} n_i - f_i^n - m_1 g n_i \quad (17)$$

电动缸的伸缩杆驱动力矢量为

$$F = (f_1, f_2, \dots, f_6)^T \quad (18)$$

动平台受力和力矩矢量为

$$\tau = (f_x, f_y, f_z, \tau_\varphi, \tau_\theta, \tau_\phi)^T \quad (19)$$

则 τ 与 F 关系式为

$$\tau = J^{-T} F \quad (20)$$

1.3 伺服运动系统动力学分析

利用平台逆运动学模型可以计算出各个电动缸的伸缩长度以及伸缩速度,需要建立电动缸伸缩长度与电机转角之间的数学模型才能控制平台的运动。电动缸运动系统的控制原理图如图4所示。

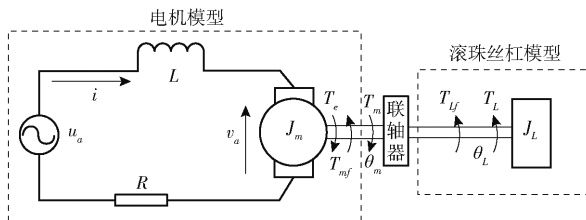


图4 电动缸数学模型

Fig.4 Mathematical model of electric cylinder

图4中左边为电机数学模型,利用电压平衡理论,建立方程

式中 I_p ——动平台自身的转动惯量

\tilde{I}_p ——动平台相对于世界坐标系 B 的转动惯量

${}^p d$ ——动平台的综合质心在动坐标系 P 的位置矢量

x_n ——动平台质心在世界坐标系 B 中的位置矢量

m_p ——动平台质量

${}^p a_i$ ——点 a_i 相对于动坐标系的位置

α ——上平台相对于坐标系 B 的角加速度

联立式(1)~(14)可推导出 Stewart 平台逆动力学方程,计算公式为

$$\begin{bmatrix} f_1^a \\ \vdots \\ f_6^a \end{bmatrix} = J_1^T D \quad (15)$$

$$\begin{cases} u_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + V_a \\ V_a = K_e \frac{d\theta_m}{dt} \end{cases} \quad (21)$$

式中 u_a ——电机电枢电压

i_a ——电机电枢电流

L_a ——电机电枢电感

R_a ——电枢电阻 θ_m ——电机旋转角

V_a ——电机反电动势

K_e ——反电动势系数

交流电机的电磁转矩方程为

$$T_e = K_t i \quad (22)$$

式中 T_e ——电机电磁转矩

K_t ——电机转矩系数 i ——电机电流

包含电机摩擦的电机动力学方程为

$$T_e = J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + T_{mf} + T_m \quad (23)$$

式中 J_m ——电机转动惯量

T_{mf} ——电机摩擦力矩

T_m ——电机轴端输出力矩

如图4所示,右边框图为滚珠丝杠的数学模型,考虑到滚珠丝杠转动时的摩擦,滚珠丝杠动力学方程为

$$T_m = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + T_{Lf} + T_L \quad (24)$$

式中 J_L ——滚珠丝杠的转动惯量
 T_{L_f} ——滚珠丝杠的摩擦力矩
 T_L ——滚珠丝杠的负载力矩
 θ_L ——滚珠丝杠的转动角度

对式(21)~(24)进行拉氏反变换得到

$$\begin{cases} U_a(s) = L_a s I(s) + R_a I(s) + K_e s \theta_m(s) \\ T_e = K_t I(s) \\ T_e = J_m s^2 \theta_m(s) + T_m(s) + T_{m_f}(s) \\ T_m = J_L s^2 \theta_m(s) + T_L(s) + T_{L_f}(s) \end{cases} \quad (25)$$

联立式(25)中的 4 个等式,可以得到以电压 U_a 为输入,电机旋转角 θ_m 为输出的伺服运动系统的传递函数,其计算式为

$$\theta_m(s) = \frac{K_t U_a(s) - (R + Ls)(T_{m_f}(s) + T_{L_f}(s) + T_L(s))}{(L_a s + R_a)(J_m s^2 + J_L s^2) + K_e K_t s} \quad (26)$$

滚珠丝杠的直线位移与电机旋转角有一定的转换关系,数学表达式为

$$l = \frac{P}{2\pi} \theta_m \quad (27)$$

式中 l ——滚珠丝杠的伸缩长度

P ——导程

可以将电机旋转角转换为电动缸的伸缩量,对 Stewart 平台运动位姿和运动速度的控制就可以转换为对电机旋转角和转速的控制。

2 基于外力估计的阻抗控制

2.1 基于动力学模型的外力估计

现有的机器人外力检测方法可以分为两种:①利用机器人自身关节处安装的传感器来检测机器人受到的外力。②将六维力传感器^[19-20]装在机器人的末端关节来检测机器人受到环境的作用力。由于精度较高的力传感器价格很高,因此提出一种无传感器外力估计的方法,利用 Stewart 平台的动力学模型和电机的电流反馈值来估算外力作用时机器人关节力的变化值。电流环处于电机控制系统的最底层,它具有很高的灵敏度,因此利用伺服电机的电流反馈值来估算外力的方法可行。

该方法需要利用 Stewart 并联机器人的动力学模型计算出动平台正常运动时 6 个电动缸的轴力,将电动缸的轴力转换为电机的力矩再加上电动缸的摩擦产生的力矩得到理论力矩。采集电机正常运动时的实际力矩并与理论力矩对比,就可以估算外力产生的力矩,而伺服电机的电流和力矩之间存在数学关系,因此可以利用电机的电流反馈值来估算外力。

已知包含摩擦力的 Stewart 并联机器人的动力学方程为

$$(M_l(l) \ddot{l} + Q_l(l, \dot{l}) \dot{l} + G_l(l)) \frac{P}{2\pi\eta} + \tau_f(l, \dot{l}) = \tau_m \quad (28)$$

式中 $\tau_f(l, \dot{l})$ ——系统摩擦力矩

τ_m ——电机的理论力矩

$M_l(l)$ ——关节空间的惯性矩阵

$G_l(l)$ ——重力/扭矩分量矩阵

$Q_l(l, \dot{l})$ ——关节空间的科里奥利力和离心力/扭矩分量矩阵

η ——滚珠丝杠的传动效率

\ddot{l} ——电动缸线加速度,通过差分计算得到

当有外力作用于 Stewart 平台末端时,实际电机的力矩为

$$\tau_c = \tau_m + \tau_{ext} \quad (29)$$

其中 τ_{ext} 表示外力作用于 Stewart 机器人末端时引起的电机力矩变化值。若 F_c 为 Stewart 平台与环境接触时实际受力,则 τ_c 与 F_c 的转换关系就是滚珠丝杠的轴力和力矩之间的关系

$$\tau_c = 2F_c \pi P \eta \quad (30)$$

则可知

$$\tau_{ext} = \tau_c - \tau_m = 2F_c \pi P \eta - \tau_m \quad (31)$$

所以外力作用导致每个电动缸的轴力增加值可以估算为

$$F_{ext} = \frac{2\pi(\tau_c - \tau_m)\eta}{PK_t} = \frac{2\pi\Delta i \eta}{P} \quad (32)$$

式中 K_t ——电机转矩系数

Δi ——电机电流变化值

机器人在运动过程中会有一定的机械振动,再加上外界噪声的干扰,导致电机采集到的反馈电流波动较大。如果电机电流受外界噪声影响较大会导致机器人感知外力的能力变弱,也可能将噪声引起的电流变化误以为是外力作用引起的。针对这个问题,需要将实际测得的电流通过滤波的方法,减少噪声的干扰,从而让机器人更准确地感知外力作用,就可以减小外力估计的误差。

目前,卡尔曼滤波方法^[21-22]和维纳滤波方法^[23]是最为常用的滤波处理方法。维纳滤波方法的使用环境为频域空间,在处理波动较小的随机信号中使用较多,但是这种方法需要很大的计算量,对计算机的内存要求也高,所以实际应用时有较大局限性。卡尔曼滤波器与大多数滤波器不同的是它是一种纯粹的时域滤波器,直接可以在时域下设计并实现。它利用线性系统的状态方程,不仅能估计和

处理一维的稳定信号,还能对非平稳的、多维的、随机的信号进行估计。此外,还能实现实时的递推滤波,容易使用编程语言实现,所以被广泛应用于信号的降噪处理与最优估计。

采用卡尔曼滤波法对伺服电机的电流反馈信号进行滤波处理。通过对实测的电流进行降噪处理,电机的电流变化会稳定在一个较小的范围,这样外力引起的电流变化会更明显,Stewart 平台就可以很容易感知到外力的作用。

卡尔曼滤波的基本原理就是信息的两个更新过程,一个是时间的更新过程,一个是观测状态的更新过程,卡尔曼滤波器的5个核心公式为:

(1) 预测状态方程,根据第 $k-1$ 次状态获得第 k 次系统状态的估计值,即

$$\mathbf{X}_{k|k-1} = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}\mathbf{U}_k \quad (33)$$

(2) 预测协方差方程,获得预测值 $\mathbf{X}_{k|k-1}$ 的协方差矩阵 $\mathbf{F}_{k|k-1}$,即

$$\mathbf{F}_{k|k-1} = \mathbf{A}\mathbf{F}_{k-1|k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (34)$$

(3) 计算增益方程,根据 k 时刻协方差矩阵的预测值计算卡尔曼增益,即

$$\mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{F}_{k|k-1}\mathbf{H}_k^T}{\mathbf{H}_k\mathbf{F}_{k|k-1}\mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k} \quad (35)$$

(4) 最优值的更新(卡尔曼滤波的输出),利用状态变量的预测值和系统实测值计算 k 时刻状态变量的最优值,即

$$\mathbf{X}_{k|k} = \mathbf{X}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k\mathbf{X}_{k|k-1}) \quad (36)$$

(5) 计算最新的协方差方程,求出当前时刻的协方差,即

$$\mathbf{F}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}_k)\mathbf{F}_{k|k-1} \quad (37)$$

由图5可以看出,电机的实测电流经卡尔曼滤波处理后波动幅度稳定在一个较小的范围。这样可以通过电机的电流反馈检测外力是否作用于Stewart 平台末端,当检测到外力时机器人将停止运动或者进行位姿修正。

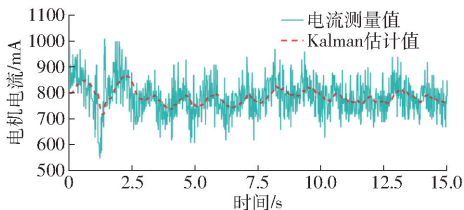


图5 电机电流滤波处理

Fig. 5 Motor current filtering processing

2.2 基于位置的阻抗控制

阻抗控制是一种适用于机械设备相互作用任务的机器人控制方法,可以使机器人的末端执行器与环境的刚性接触变为柔性接触,能够实现位置和力的动态交互。对Stewart 平台采用基于位置的阻抗

控制方法,并设计阻抗控制器。基于位置的阻抗控制的数学模型为

$$\mathbf{M}(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + \mathbf{C}(\dot{x} - \dot{x}_d) + \mathbf{K}(x - x_d) = F_d - F_c \quad (38)$$

式中 \mathbf{M} ——惯性矩阵,为对角矩阵

\mathbf{C} ——阻尼系数矩阵,为对角矩阵

\mathbf{K} ——刚度矩阵,为对角矩阵

F_d ——Stewart 平台与环境接触的期望力

F_c ——Stewart 平台与环境接触时实际受力

x, \dot{x}, \ddot{x} ——Stewart 平台末端的实际位置、速度和加速度

$x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d$ ——Stewart 平台末端的期望位置、速度和加速度

在频域下式(38)表达式为

$$X(s) - X_r(s) = Y(s)\Delta F(s) \quad (39)$$

其中

$$Y(s) = \frac{1}{\mathbf{M}s^2 + \mathbf{C}s + \mathbf{K}} \quad (40)$$

式(40)为阻抗控制器,阻抗控制器其实就是一个线性的二阶系统。二阶系统的固有频率 ω_m 、阻尼比 ξ 、增益 Z 为

$$\begin{cases} \omega_m = \sqrt{\frac{\mathbf{K}}{\mathbf{M}}} \\ \xi = \frac{\mathbf{C}}{2\mathbf{M}\omega_m} \\ Z = \frac{1}{\mathbf{K}} \end{cases} \quad (41)$$

基于位置的阻抗控制方案主要由并联机器人正逆运动学模型、外力估计模型、力反馈阻抗控制模型组成,此方案需要电机工作在位置模式下,电动缸运动过程中的摩擦采用库仑-粘性摩擦模型^[24-26]。首先给定机器人期望末端位姿,利用逆运动学计算出电动缸的长度和运动过程中的速度,将电动缸长度和运动速度换算为电机转角和角速度后发送给驱动器。平台在运动过程中如果受到外界作用力,利用电机的电流反馈可估算出机器人与环境的接触力,将机器人与环境的交互作用力代入导纳控制器可以得到机器人位姿的调整量。图6为基于位置的阻抗控制系统的控制框图,图中 q_d 为机器人期望末端位姿, q_c 为机器人实际末端位姿, l_c 为电动缸实际长度,参数 \mathbf{K} 、 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 是定义在末端的任务空间, s 代表微分, $1/s$ 代表积分。

2.3 阻抗参数选取

Stewart 平台为空间六自由度并联机器人,包括3个平移和3个旋转,所以其矩阵为 6×6 的对角矩阵。矩阵 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 形式为

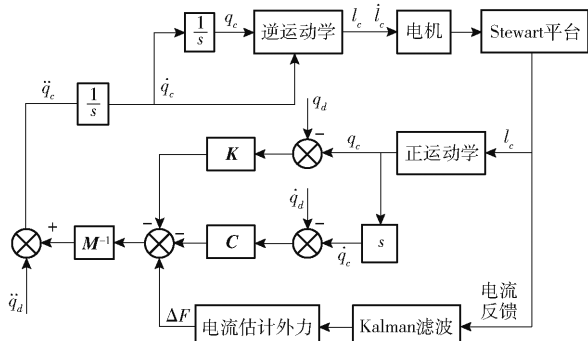


图 6 基于位置的阻抗控制系统框图

Fig. 6 Block diagram of position based impedance control system

$$M = \begin{bmatrix} m_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_\phi \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$C = \begin{bmatrix} b_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_\phi \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_\phi \end{bmatrix} \quad (44)$$

由于阻抗控制模型实际上是一个二阶系统,所以当二阶系统处于临界阻尼状态或过阻尼状态时阻抗参数较理想。首先利用单自由度系统选取阻抗参数, m, b, k 是矩阵 M, C, K 对角线中的元素,由式(41)可知,系统刚度 k 的倒数就是系统增益,所以可以根据期望的增益先确定阻抗参数 k 。由式(41)可知系统的固有频率只与 k 和 m 有关,在确定了 k 后, m 越大系统的频率就越小,也就是系统到达稳定状态的周期就越大。为了使系统快速到达稳定状态可以减小系统的惯性系数 m 。在确定系统的惯性系数 m 和刚度 k 后,可以根据二阶系统的阻尼比选择阻尼系数。

3 仿真

利用 Simulink 搭建阻抗控制模型,加入到动力

学仿真模型中,综合考虑系统的性能,初步选择 M, C, K 对角线中的元素 m 均为 20、 b 均为 300、 k 均为 500 进行阻抗控制仿真。

仿真时,设置仿真时间为 15 s,采样时间 T 为 0.02 s。设定 Stewart 平台沿 Z 轴方向的期望轨迹曲线为 $0.2\sin(0.25\pi t) + 1.6$,则此时期望速度为 $0.05\pi\cos(0.25\pi t)$,期望加速度为 $-0.0125\pi^2 \cdot \sin(0.25\pi t)$ 。仿真时间为 6 s 时施加一沿 X 轴正方向的外力 100 N 和沿 Z 轴负方向的外力 50 N,仿真时间为 8 s 时撤去外力作用,仿真分析外力作用对平台运动轨迹的影响。

由图 7 可以看出,在没有外力作用时,Stewart 仿真平台会沿着期望设定的轨迹运动,在施加外力后,Stewart 上平台沿 Z 轴的实际轨迹会偏离期望轨迹曲线,偏离程度与外力有关。当撤去外力后平台会逐渐恢复到期望设定的轨迹进行运动。

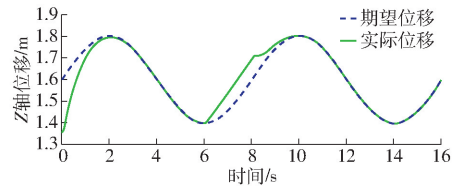


图 7 Z 轴轨迹变化曲线

Fig. 7 Trajectory change curves of Z axis

图 8 为 Stewart 上平台位移变化曲线,可以看出在受到外力作用后上平台会顺着外力的作用方向移动一段距离。撤去沿 Z 轴负向的外力后,平台将沿 Z 轴以设定的轨迹运动;撤去沿 X 轴正向的外力后,平台在 X 轴的位置将恢复到原点。

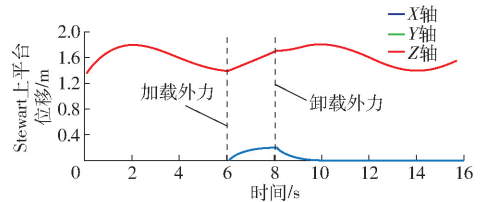


图 8 平台末端位移变化曲线

Fig. 8 End position change curves of platform

仿真结果表明,设计的 Stewart 平台基于位置的阻抗控制模型是正确的,且该控制策略能够使平台在外力作用时实现柔顺控制的效果,撤去外力作用后能够恢复到原来的运动状态。

4 实验

利用实验室搭建的实验平台系统,对提出的 Stewart 平台基于位置的阻抗控制算法进行实验。图 9 为实验系统构成图。

如图 10 所示,设定平台沿 Z 轴正方向的期望轨迹运动,在平台向上运动过程中人为施加外力作用

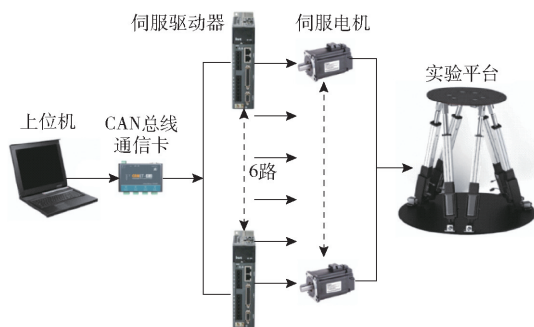


图9 并联机器人实验系统构成图

Fig. 9 General drawing of parallel robot experimental system



(a) 施加外力

(b) 撤去外力

图10 Stewart平台阻抗控制实验图

Fig. 10 Stewart platform impedance control experiment diagrams

于末端执行器,此时电动缸的电流会发生明显改变,通过电流的变化检测到外力作用,将外力的作用解算为每个电动缸的缸长变化量进行平台末端位姿的修正。

如图11所示,为了验证Stewart平台基于位置的阻抗控制的顺应性运动,首先在世界坐标系中施加一个外力,通过上位机控制程序采集电机的力矩变化值和动平台坐标原点在世界坐标系下的位置。

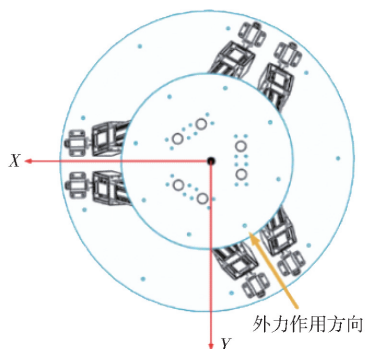
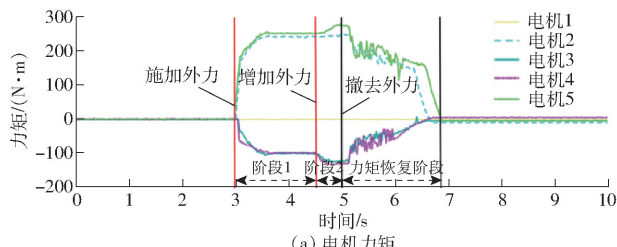


图11 动平台外力作用图

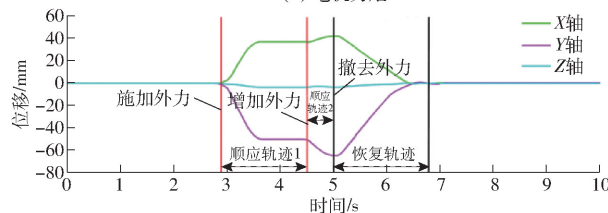
Fig. 11 External force action diagram of moving platform

由图12可以看出,施加一个外力后电机的力矩发生了明显变化,再次施加一个较大的外力后,电机力矩会增大,在撤去外力后电机力矩逐渐恢复到0左右。与此同时,在第1个阶段动平台产生了沿X轴正向和沿Y轴负向的运动。在外力增大后,动平台沿X轴正向产生的位移和沿Y轴负向产生的位移也会增大,此时为顺应轨迹段。在撤去外力作用

后,动平台的位置又会恢复到起始位置,在图中对应的是恢复轨迹段。由图12可得,动平台在外力作用方向产生了顺应性运动,验证了阻抗控制理论模型的可行性。



(a) 电机力矩



(b) Stewart动平台位移

图12 Stewart平台顺应运动验证

Fig. 12 Stewart platform compliance motion verification

由图13可以看出,在位置控制模式下,动平台沿Z轴的位置跟踪误差为0.2~0.5 mm。从图14可以看出,动平台沿X轴的位置跟踪误差为0.1~0.4 mm,由于跟踪距离较小,实际跟踪曲线近似斜直线。

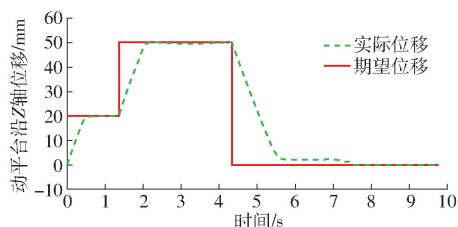


图13 Stewart平台沿Z轴的位置跟踪

Fig. 13 Position tracking of Stewart platform along Z axis

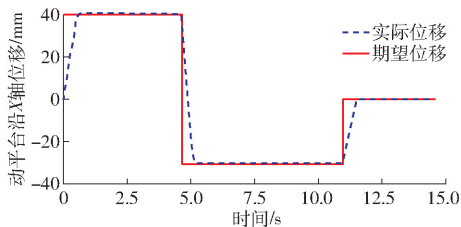


图14 Stewart平台沿X轴的位置跟踪

Fig. 14 Position tracking of Stewart platform along X axis

由实验结果可知,基于位置的阻抗控制方法的位置控制精度高,而且平台受到外力作用后的柔顺控制响应速度也快。

5 结束语

针对并联机器人的柔顺控制问题,提出了无需力传感器的阻抗控制策略。阐述了Stewart并联机器人的动力学模型,并以此为基础提出了利用动力

学模型和电流反馈来估计环境接触力的方法。设计了基于位置的阻抗控制策略,分析了阻抗参数的选取规则。最后进行了 Stewart 平台阻抗控制的仿真

与实验,结果表明基于外力估计的并联机器人阻抗控制方法能够实现精确、稳定、快速的柔顺控制效果。

参 考 文 献

- [1] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报,2013,39(7):963-972.
TAN Min, WANG Shuo. Research progress of robot technology[J]. Journal of Automation, 2013, 39(7):963-972. (in Chinese)
- [2] 王天然. 机器人技术的发展[J]. 机器人,2017,39(4):385-386.
WANG Tianran. Development of robot technology[J]. Robot, 2017, 39(4):385-386. (in Chinese)
- [3] 张青云,赵新华,刘凉,等. 空间柔性闭链机器人动力学建模与振动仿真[J]. 农业机械学报,2021,52(1):401-409.
ZHANG Qingyun, ZHAO Xinhua, LIU Liang, et al. Dynamic modeling and vibration simulation of spatial flexible closed-chain robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1):401-409. (in Chinese)
- [4] NEVILLE H. Impedance control: an approach to manipulation; part I—theory[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1985, 107(1):1-7.
- [5] LI Q, MENG F, YU Z, et al. Dynamic Torso compliance control for standing and walking balance of position-controlled humanoid robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(2):679-688.
- [6] HOGAN N. Stable execution of contact tasks using impedance control[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1987.
- [7] 何银铜. 基于位置的气液伺服阻抗控制系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
HE Yintong. Research on gas-liquid servo impedance control system based on position[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [8] 刘翠翠. 基于力的气液伺服阻抗控制系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
LIU Cuicui. Research on gas-liquid servo impedance control system based on force[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [9] BROENINK J F, TIERNEGO M. Peg-in-hole assembly using impedance control with a 6 DOF robot[C]//Proceedings 8th European Simulation Symposium. IEEE Xplore, 1996.
- [10] CHAN S P, LIAW H C. Impedance control strategy for robotic assembly tasks[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE Xplore, 1995.
- [11] YANG C, GANESH G, HADDADIN S, et al. Human-like adaptation of force and impedance in stable and unstable interactions[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 27(5):918-930.
- [12] LE D P, CHOI J, LEE W, et al. A novel method for estimating external force: simulation study with a 4-DOF robot manipulator[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2015, 16(4):755-766.
- [13] ZHANG H, AHMAD S, LIU G. Torque estimation for robotic joint with harmonic drive transmission based on position measurements[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(2):322-330.
- [14] GUTIERREZ-GILES A, ARTEAGA-PEREZ M A. GPI based velocity/force observer design for robot manipulators[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4):9-29.
- [15] STOLT A, LINDEROTH M, ROBERTSSON A, et al. Force controlled assembly of emergency stop button[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2011.
- [16] HE Z Y, LIAN B B, LI Q, et al. An error identification and compensation method of a 6-DOF parallel kinematic machine[J]. IEEE Access, 2020, 8:119038-119047.
- [17] 赵忠. 基于逆动力学前馈系统的并联机器人控制技术研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
ZHAO Zhong. Research and control of parallel robot based on inverse dynamics feed-forward system[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [18] HARIB K, SRINIVASA N. Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool structures[J]. Robotica Cambridge, 2003, 21(5):541.
- [19] 王志军,刘璐. 基于六维力传感器的机器人动态力补偿研究[J]. 机械设计, 2020(11):76-81. (in Chinese)
- [20] 黄玲涛,王彬,倪水,等. 基于力传感器重力补偿的机器人柔顺控制研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3):393-400.
HUANG Lingtao, WANG Bin, NI Shui, et al. Research on robot compliance control based on force sensor gravity compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):393-400. (in Chinese)
- [21] LEE J C. Kalman filter algorithm[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2020.
- [22] 宋文尧,张牙. 卡尔曼滤波[M]. 北京:科学出版社, 1991.
- [23] NING L I. Image denoising algorithm via doubly local Wiener filtering with windows based on SWT and DTCWT[J]. Computer Engineering & Applications, 2007, 28:44-46, 69.
- [24] KIM Sungmin. Moment of inertia and friction torque coefficient identification in a servo drive system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1):60-70.
- [25] 吴子英. 构件阻尼和运动副摩擦参数辨识的理论及实验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
WU Ziyang. Theoretical and experimental study on parameter identification of component damping and friction of moving Pa [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [26] 赵磊,范梦然,赵新华,等. 柔性并联机器人非线性摩擦动力学建模与速度规划[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5):390-396.
ZHAO Lei, FAN Mengran, ZHAO Xinhua, et al. Nonlinear friction dynamic modeling and velocity planning of flexible parallel robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5):390-396. (in Chinese)