



文章编号:1003-8728(2006)07-0764-03

基于6维力/力矩传感器的并联机器人惯性参数辨识方法

杨建新,余跃庆

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院,北京 100022)

杨建新

摘要:提出了基于6维力/力矩传感器的并联机器人惯性参数辨识新方法,这种方法不需要了解关节摩擦和驱动器动力学特性的精确模型,推导了一般并联机器人的惯性参数辨识模型,分析了并联机器人的基惯性参数,提出了并联机器人惯性参数辨识轨迹的选择原则,并给出了两种新型空间并联机器人的分析实例。

关键词:并联机器人;惯性参数;辨识

中图分类号:TP242 文献标识码:A

A Six-axis Force/Torque Sensor Method for the Inertial Parameter Identification of a Parallel Manipulator

Yang Jianxin, Yu Yueqing

(Institute of Mechanical Engineering and Applied Electronic Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

Abstract: The paper proposes a new method for identifying the inertial parameters of the parallel manipulator with a six-axis force/torque sensor. The method does not require an accurate model for knowing the joint friction and dynamics of actuators. The inertial parameter identification model is derived and its base inertial parameters are analyzed. The trajectory selection schemes are suggested for the inertial parameter identification and analysis instances are provided for two novel spatial parallel manipulators.

Key words: parallel manipulator; inertial parameter; identification

与串联机器人相比,并联机器人具有高速度、高加速度、高刚度等优点,已经被广泛应用到金属加工机床、飞行模拟器、坐标测量机等领域^[1]。为了提高并联机器人的运动精度,需要采用各种基于动力学模型的控制算法来提高控制器的稳定性和响应速度,而这些控制算法的性能在很大程度上依赖于动力学模型中各个惯性参数的精度。由于各运动构件的质量分布不均,其惯性参数往往很难通过直接计算或测量得到精确值,因此必须采用系统辨识的方法来获得^[2]。

目前并联机器人惯性参数辨识的研究较少,主要采用测量驱动关节力/力矩的方法。Honegger等人^[3]应用非线性自适应控制算法对Hexaglide并联机床的惯性参数进行了实时辨识;Wiens^[4]推导了Stewart平台的惯性参数辨识模型,分析了一般6-SPS并联机器人的基惯性参数,通过实验辨识出Hexapod并联机床的惯性参数;Grotjahn等人^[5]基于Jourdain原理推导了一般并联机器人的惯性参数辨识

模型,通过实验辨识出PaLiDA并联机器人的惯性参数并应用于该机器人的前向控制算法中。这种辨识方法需要在驱动关节安装力/力矩传感器,其测量精度受未知关节摩擦和驱动器动力学特性的影响较大。

本文首先提出了测量基座反作用力/力矩的并联机器人惯性参数辨识新方法,这种方法不需要了解关节摩擦和驱动器动力学特性的精确模型^[6-7],基于该方法推导了一般并联机器人的惯性参数辨识模型,分析了并联机器人的基惯性参数,提出了并联机器人惯性参数辨识轨迹的选择原则,并给出了两种新型空间并联机器人的分析实例。

1 并联机器人惯性参数辨识模型

对于空间并联机器人中的各运动构件*i*,其惯性参数包括质量 M_i ,质量与质心在连体坐标系中位置的乘积 $MS_i = [MX_i, MY_i, MZ_i]^T$,在连体坐标系中表示的主惯性矩 XX_i, YY_i, ZZ_i 和惯性积 XY_i, YZ_i, XZ_i 共10个,令 $\Phi_i = [M_i, MX_i, MY_i, MZ_i, XX_i, XY_i, XZ_i, YY_i, YZ_i, XZ_i]^T$ 。这些参数与在基础坐标系中表示的惯性参数具有以下转换关系

$$\begin{cases} MS_i = {}^0R_i^c MS_i \\ I_i = {}^0R_i^c I_i^c R_i^c{}^T \end{cases} \quad (1)$$

式中: ${}^0R_i^c$ 为构件*i*的姿态变换矩阵; I_i^c 为构件相对于连体

收稿日期:2005-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(50375003)和北京市自然科学基金项目(3012003)资助

作者简介:杨建新(1977-),男(汉),山西,博士后
E-mail: yangjx@bjut.edu.cn

坐标系原点的惯性张量,且有

$${}^i I_i = \begin{bmatrix} XX_i & XY_i & XZ_i \\ XY_i & YY_i & YZ_i \\ XZ_i & YZ_i & ZZ_i \end{bmatrix}$$

给定空间并联机器人动平台的位姿随时间变化的规律 (q, \dot{q}, \ddot{q}) , 由每条支链与动平台连接点的位置关系求解出该支链各关节变量的解析形式 $q_i(q)$, 进一步推导出支链各运动构件的速度 $v_i(q, \dot{q})$ 、加速度 $\dot{v}_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 、角速度 $\omega_i(q, \dot{q})$ 和角加速度 $\dot{\omega}_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 的解析形式。

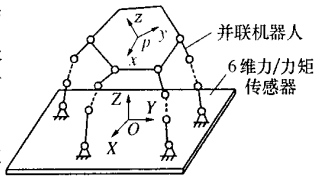


图1 安装在力/力矩传感器上的并联机器人

将并联机器人安装在一个基座6维力/力矩传感器上,如图1所示。当并联机器人进行操作时,由牛顿-欧拉方法可知,基座传感器测量得到的6维力旋量为 w

$$w = \sum_{i=1}^m \begin{bmatrix} M_i(g - \dot{v}_i) - \dot{\omega}_i \times MS_i - \omega_i \times (\omega_i \times MS_i) \\ MS_i \times (g - \dot{v}_i) - I_i \dot{\omega}_i - \omega_i \times (I_i \omega_i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: m 为并联机器人中运动构件的数目。

公式(2)可以转化为以下形式

$$w = \sum_{i=1}^n K_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) \Phi_i \quad (3)$$

式中: $K_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in R^{6 \times 10}$ 为构件 i 所有惯性参数的观测系数矩阵,且有

$$K_i = \begin{bmatrix} g - \dot{v}_i & -(\dot{\omega}_i + \dot{\omega}_i \hat{\omega}_i)^0 R_i & 0 \\ 0 & (-\ddot{g} + \ddot{v}_i)^0 R_i & -(\hat{\omega}_i \hat{\omega}_i \hat{\omega}_i) \end{bmatrix}$$

$$\hat{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_z & \omega_y & \omega_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_x & 0 & \omega_y & \omega_z & 0 \\ 0 & 0 & \omega_x & 0 & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix}$$

由公式(3)可知,基座传感器测量得到的6维力旋量 w 与并联机器人各运动构件的惯性参数 Φ_i 成线性关系。并联机器人动平台的位姿随时间变化的规律 (q, \dot{q}, \ddot{q}) 一般是事先设定的,也可以通过内部测量^[5]或外部测量^[7]的方法得到。

并联机器人的惯性参数由支链运动构件和动平台的惯性参数组成,可以分为独立可辨识参数、组合可辨识参数(例如6自由度UPS支链的上、下部分具有相同的转角、角速度和角加速度,它们的惯性张量在 $K_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 矩阵中对应的观测向量相同,只能以惯性张量之和的形式被辨识)和不可辨识参数(例如Delta并联机器人的动平台为三维平动,其惯性张量在 $K_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 矩阵中对应的观测向量为0)。其中独立可辨识参数和组合可辨识参数,构成了并联机器人的基惯性参数集合 $\Phi \in R^{n \times 1}$ 。由于并联机器人中运动构

件数目较多,其基惯性参数集合 Φ 的维数一般是很大的,例如一般6-UPS并联机器人的基惯性参数就有 $6 \times 14 + 10 = 94$ 个。通过符号法^[8]或数值法^[9],可以得到缩减后的并联机器人惯性参数辨识模型为

$$w = k(q, \dot{q}, \ddot{q}) \Phi \quad (4)$$

式中: $k(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in R^{6 \times n}$ 为并联机器人惯性参数辨识的观测系数矩阵。

在并联机器人惯性参数辨识实验中,往往会得到足够的 p 组 ($p \gg n$) 数据观测点 $(w_i, q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)$, 将其代入并联机器人的惯性参数辨识模型会形成以下矛盾方程组

$$\Gamma = K \Phi \quad (5)$$

式中: $\Gamma \in R^{6p \times 1}$, $K \in R^{6p \times n}$ 。因此必须对方程组(5)进行数据拟合,得到并联机构惯性参数的最佳估计值。一般采用曲线拟合的最小二乘法对实验数据进行处理,由于 $\text{rank}(K) = n$, 根据求解矛盾方程组的方法方程组方法,计算得到辨识后的并联机器人惯性参数为

$$\Phi = (K^T K)^{-1} K^T \Gamma \quad (6)$$

如果法方程组出现病态时,也可以直接从矛盾方程组(5)入手,采用超松弛迭代法或共轭梯度法等迭代算法,改善方程组(5)的最小二乘解。这里可以采用从并联机器人各运动构件的三维CAD模型中得到的惯性参数作为初始向量进行迭代。

2 辨识轨迹选择原则

在并联机器人惯性参数辨识过程中,为了减少测量的噪声干扰和提高最小二乘法求解的精度,需要选择合理的辨识轨迹。也就是动平台位姿随时间变化的规律 (q, \dot{q}, \ddot{q}) 。

辨识轨迹上的各数据点首先必须满足 $\text{rank}(K) = n$, 并联机器人的基惯性参数才是完全可辨识的,此时并联机构各支链的运动构件以及动平台之间均存在相对运动。一些特殊构型的并联机器人,例如6-PUS构型的Hexaglide并联机床,当动平台及各条支链沿滑块移动方向以相同的速度和加速度运动时,只能辨识到各运动构件的总质量参数。

并联机器人的动力学模型由各运动构件的惯性力、惯性力矩、离心力、科氏力、重力等各项组成,各类惯性参数对6维力旋量 w 各项分量的贡献,对于不同的辨识轨迹是不同的。当动平台做低加速度运动时,与重力项相关的惯性参数贡献较大,与惯性力和惯性力矩相关的惯性参数的贡献较小。当动平台做高加速度运动时,与惯性力和惯性力矩相关的惯性参数的贡献对6维力旋量 w 的影响较大,其它惯性参数的贡献较小。因此为了准确地辨识各类惯性参数,需要选择不同工况下(低速度、高速度、低加速度、高加速度等等)的辨识轨迹。

对于串联机器人,各支链关节的运动是独立的,可以通过移动某些关节而固定其它关节的方法,达到简化惯性参数辨识过程的目的。而并联机器人各支链关节的运动与动平台的运动之间是非线性映射的关系,各支链关节的运动是强耦合的,因而不可能采取与串联机器人类似的方法,但可以采用串联机器人惯性参数辨识轨迹的评价指标^[2]来

