

基于弹性摩擦模型的机器人免力矩传感器拖动示教方法

张 铁¹ 洪景东¹ 刘晓刚²

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510641; 2. 桂林航天工业学院广西高校机器人与焊接重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 基于广义动量的外力观测器和导纳控制方案,采用弹性摩擦模型估计关节摩擦力,并对关节起动阶段的摩擦估计值进行规划,实现了免力矩传感器的机器人拖动示教。基于机器人的动力学模型和运动状态,建立了基于广义动量的机器人外力观测器,观测操作者对机器人施加外力。采用导纳控制方案,根据观测的外力生成关节运动轨迹,实现机器人的拖动示教。采用弹性摩擦模型对关节摩擦进行建模,并在模型中引入 Stribeck 摩擦项,实现关节在低速和静止状态下的摩擦力估计。为解决关节在静止状态下拖动困难的问题,对关节起动阶段的摩擦力估计值进行规划,通过短暂增加关节摩擦的估计值以增加关节驱动力矩,从而实现关节的轻松拖动,且起动规划算法不会对机器人关节的其他运动阶段造成影响。实验表明,采用本文控制方案可有效实现免力矩传感器的工业机器人拖动示教。采用起动规划方案可有效增加关节起动外力和缩短关节起动时间,在起动阶段关节可以短暂产生 26 N·m 以上的估计力矩,相比未使用规划时关节的起动时间至少可减少 70%。同时,关节在起动阶段具有一定的抗干扰能力。

关键词: 工业机器人; 免力矩传感器; 拖动示教; 弹性摩擦模型

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0412-09

Dragging Teaching Method without Torque Sensor for Robot Based on Elastic Friction Model

ZHANG Tie¹ HONG Jingdong¹ LIU Xiaogang²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

2. Guangxi Key Laboratory of Robotics and Welding, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Through the external torque observer based on generalized momentum and the admittance control scheme, the robotic dragging teaching without torque sensor was realized, in which the elastic friction model was used to estimate the joint friction torque, and the friction estimation value of the joint starting stage was planned. Based on the dynamics model and motion information of the robot, an external torque observer based on generalized momentum was established to observe the external torque exerted by the operator on the robot. Admittance control scheme was adopted to generate the joint motion trajectory according to the observed external torque, and the dragging teaching robot was realized. The elastic friction model was used to model the friction of the joint, and the Stribeck friction term was introduced into the model to estimate the friction torque of the joint at low speed and static state. In order to solve the difficulty of dragging in the stationary state of joint, the friction estimation of the joint starting stage was planned, and the joint driving torque was also increased temporarily, so as to realize the easy drag of the joint. Meanwhile, the starting planning scheme did not affect other movement stages of the robot joints. Experiment results showed that the control scheme can effectively realize the dragging teaching of industrial robot without torque sensor. At the same time, the starting planning scheme can effectively reduce the external torque and time of joint starting stage. The estimated torque of more than 26 N·m was generated in the starting stage. The starting time of the joint can be reduced by 70% compared with the unused starting planning scheme. The joint had a certain anti-interference ability in the starting stage.

Key words: industrial robot; torque free sensor; dragging teaching; elastic friction model

收稿日期: 2018-07-24 修回日期: 2018-08-26

基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX04005006)和广东省重大科技专项(2014B090921004, 2014B090920002)

作者简介: 张铁(1968—),男,教授,主要从事机器人技术及工程应用研究, E-mail: merobot@scut.edu.cn

0 引言

目前,工业机器人一般采用示教器进行示教,通过编程的方法规划复杂的运动轨迹。为了缩短机器人示教时间并实现其定位和复杂轨迹的生成,可以采用手动引导机器人运动的方式,即拖动示教。拖动示教对于操作者来说,机器人的使用将变得更为方便,也可以轻松避开环境障碍。工业机器人的拖动示教通常使用力传感器来实现,然而传感器价格昂贵,在工业应用中推广存在困难,所以在免力矩传感器下实现拖动示教是优选方法。

基于机器人动力学模型和运动状态估计机器人关节所受的外力是实现拖动示教的一种常用方法,其中最简单的方法就是将模型计算得到的理论力矩和机器人返回的实际力矩进行求差得到外力的估计值^[1]。文献[2-3]则采用基于机器人广义动量的干扰观测器,在没有使用关节加速度的情况下估计关节外力。文献[4]提出一种将动力学方程和递归最小二乘法相结合的外力估计方法,并与基于广义动量的估计方法进行比较。

免力矩传感器拖动示教的难点在于对关节摩擦的准确辨识,特别是关节在低速运动和静止状态下的关节摩擦力。当机器人处于高速运动时,由于关节摩擦的非线性较低,一般采用库伦+粘性摩擦的静态模型进行建模^[5]。当关节处于低速状态时,摩擦环节的非线性变得突出,并对机器人的运动控制带来较大的影响^[6-7],其中包括由于摩擦形式的转变而导致的 Stribeck 效应^[8]。库伦+粘性摩擦模型未考虑到 Stribeck 效应,且在角速度为零时存在不连续性,不适用于关节在低速和静止状态下的关节摩擦辨识。Leuven 模型^[9]和 GMS 模型^[10-11]既考虑到 Stribeck 效应,又考虑了关节在静止状态下的预滑动位移和摩擦记忆等特性,是两个全面、精细的模型。但由于模型结构复杂且参数较多,具有很高的辨识难度。文献[12]采用一种弹性摩擦模型,该模型既能简单描述关节的动态摩擦现象,又极大地减少了需要辨识的模型参数。

除了关节摩擦的非线性外,关节内部的传动机构等也会给关节的运动引入更加复杂的摩擦^[13]。关节内部的减速器机构、轴承、输入和输出轴等都存在摩擦,既有粘性摩擦,又存在干性摩擦,这使得关节在静止状态下的摩擦变得更加复杂,导致在拖动示教中,操作者往往需要更大的外力才能由静止状态起动关节^[14]。为了解决关节在起动阶段的困难,文献[14]对弹性摩擦模型进行修改,采用变参数的方法调整拖动示教在运动和静止状态下的控制效

果。文献[15]则通过在摩擦模型中引入振动,利用关节微小的高频振动减弱关节摩擦的非线性,但振动会对关节引入不稳定性,加快零件磨损。

本文通过在弹性摩擦模型中引入 Stribeck 摩擦项,提出一种结合弹性摩擦模型的起动规划方法,利用弹性模型的内在变量判断关节在静止状态下的起动意向,并通过短暂增加对摩擦力的估计值,以增加关节的驱动力矩,使关节可以轻松起动。

1 机器人拖动示教控制方案

为实现免力矩传感器下的拖动示教,需根据机器人的动力学模型和运动状态,估计操作者施加在机器人上的关节外力,并将估计的外力转换为机器人的运动指令。本节采用基于广义动量的外力估计^[2-3]方法,在缺少关节角加速度信息下进行外力估计。使用导纳控制方案生成运动指令,并推导了离散状态下的关节目标位置的更新方程。

1.1 基于广义动量的外力估计

采用基于广义动量的外力估计方法,利用机器人的动力学模型和运动状态,对操作者施加在机器人上的外力进行估计。机器人动力学模型为^[4]

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_f = \tau + \tau_{ext} \quad (1)$$

式中 q ——关节转角向量

$M(q)$ ——惯量矩阵

$C(q, \dot{q})$ ——与离心力和科氏力有关的速度项矩阵

$G(q)$ ——重力项 τ_f ——摩擦项

τ ——电机输出力矩

τ_{ext} ——外力矩向量

动力学模型满足

$$\dot{M}(q) = C(q, \dot{q}) + C^T(q, \dot{q}) \quad (2)$$

通过定义机器人的广义动量

$$p = M(q)\dot{q} \quad (3)$$

结合式(1)、(2),对式(3)进行求导可得

$$\dot{p} = \dot{M}(q)\dot{q} + M(q)\ddot{q} = C^T(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) - \tau_f(q, \dot{q}) + \tau + \tau_{ext} \quad (4)$$

建立对 p 的观测量 \hat{p} ,其定义为

$$\dot{\hat{p}} = \hat{C}^T(q, \dot{q})\dot{q} - \hat{G}(q) - \hat{\tau}_f(q, \dot{q}) + \tau + r \quad (5)$$

其中

$$r = K(p - \hat{p}) \quad (6)$$

式中 r ——残差量 K ——比例系数

其中上标代表相应变量的观测值和估计值。由于关节摩擦力的辨识较为重要和困难,本文采用基于弹性摩擦模型的方法得到 $\hat{\tau}_f$,具体将在第 3 节进行讨论,而其他动力项的估计值可参照文献[5]。假设估计量 $\hat{C}^T(q, \dot{q})\dot{q}$ 、 $\hat{G}(q)$ 、 $\hat{\tau}_f(q, \dot{q})$ 与实际值相

比没有误差,结合式(4)、(5)对式(6)进行求导可得

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{K}(\boldsymbol{\tau}_{ext} - \mathbf{r}) \quad (7)$$

将式(7)进行拉普拉斯变换可得

$$R(s) = \frac{K\boldsymbol{\Gamma}_{ext}(s)}{K+s} \quad (8)$$

可见 R 以一阶系统的形式对 $\boldsymbol{\Gamma}_{ext}$ 进行跟踪,在稳态时,有 $R(0) = \boldsymbol{\Gamma}_{ext}(0)$,因此可以使用 \mathbf{r} 作为外力矩 $\boldsymbol{\tau}_{ext}$ 的估计值,即

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}_{ext} = \mathbf{r} \quad (9)$$

值得注意的是,式(8)是在估计量 $\hat{\mathbf{C}}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$ 、 $\hat{\mathbf{G}}(\mathbf{q})$ 、 $\hat{\boldsymbol{\tau}}_f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 没有估计误差时的理想结果,而实际上由于机器人动力学模型和参数的不准确, $\hat{\boldsymbol{\tau}}_{ext}$ 与实际中操作者施加的外力存在误差。

1.2 机器人导纳控制方法

阻抗控制 (Impedance control) 和导纳控制 (Admittance control) 被广泛应用于机器人的力控制算法中。在应用中,阻抗控制通过调整电机力矩响应实现阻抗功能,而导纳控制则是基于位置规划实现^[16]。相比于阻抗控制,导纳控制稳定性高,但灵敏度较低^[17]。本节通过导纳控制,将关节的估计外力转换为关节的运动目标指令,并推导离散空间下的更新方程。

在机器人关节空间,完整的阻抗控制可表示为

$$\boldsymbol{\tau}_{ext} = \mathbf{K}_d(\mathbf{q}_d - \mathbf{q}_r) + \mathbf{D}_d(\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}_r) + \mathbf{M}_d(\ddot{\mathbf{q}}_d - \ddot{\mathbf{q}}_r) \quad (10)$$

式中 K_d ——系统刚度

D_d ——系统阻尼

M_d ——系统质量

q_d ——机器人运动的目标关节角

q_r ——规划的参考轨迹

机器人的目标位置在做关于参考位置的阻抗运动。通过定义参考轨迹: $q_r = q_d, \dot{q}_r = 0, \ddot{q}_r = 0$,可以得到用于机器人拖动示教的导纳控制算法为

$$\ddot{q}_d = \frac{1}{M_d}(\hat{\boldsymbol{\tau}}_{ext} - D_d\dot{q}_d) \quad (11)$$

将机器人的导纳算法进行离散化,且满足前提条件

$$\begin{cases} \frac{\dot{q}_d(i-1) + \dot{q}_d(i)}{2} = \frac{q_d(i) - q_d(i-1)}{T_s} \\ \frac{\ddot{q}_d(i-1) + \ddot{q}_d(i)}{2} = \frac{\dot{q}_d(i) - \dot{q}_d(i-1)}{T_s} \\ \hat{\boldsymbol{\tau}}_{ext}(i) = D_d\dot{q}_d(i) + M_d\ddot{q}_d(i) \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,k) \quad (12)$$

式中 T_s ——时间周期

由式(12)可以得到目标轨迹在离散系统下的更新方程为

$$\begin{cases} \frac{\hat{\boldsymbol{\tau}}_{ext}(k-1) + \hat{\boldsymbol{\tau}}_{ext}(k)}{2} - \left(\frac{D_d}{2} - \frac{M_d}{T_s}\right)\dot{q}_d(k-1) \\ \dot{q}_d(k) = \frac{M_d}{T_s} + \frac{D_d}{2} \\ q_d(k) = T_s \frac{\dot{q}_d(k-1) + \dot{q}_d(k)}{2} + q_d(k-1) \end{cases} \quad (13)$$

将得到的目标跟踪轨迹 q_d 发送到机器人的伺服驱动器,驱动机器人关节跟踪目标轨迹,由此实现免力矩传感器的拖动示教。

2 基于弹性摩擦模型的关节摩擦估计

在第1节的外力估计方法中,外力估计的精度很大程度取决于机器人动力学模型和参数的准确性,其中对关节摩擦力的辨识尤为重要。当关节处于低速状态时,由于 Stribeck 效应的影响,关节的摩擦力会显著上升,这种效应需要在摩擦模型中得到体现。而当关节处于静止状态时,关节的微小转动便可产生较大的摩擦力,即静态摩擦力,同时伴随有预滑动滞后等现象^[19]。为了能够辨识出关节在静止状态下的摩擦力,本节采用弹性摩擦模型对关节摩擦力进行估计,同时在摩擦模型中引入 Stribeck 摩擦项,以提高模型在低速运动下的摩擦估计精度。

弹性摩擦模型的示意图如图1所示。弹性摩擦模型定义了一个弹性摩擦单元,该单元与关节臂存在弹性连接关系,其刚度为 K_c 。弹性摩擦单元位置为 q_c ,关节臂位置为 q ,弹性摩擦单元产生的干性摩擦力为 τ_{fc} 。由于弹性摩擦单元没有质量,所以在力学上满足

$$\tau_{fc} = (q - q_c)K_c \quad (14)$$

干性摩擦力 τ_{fc} 具有上下限,定义为 $\tau_{fc} \in [-F_c, F_c]$,其中 F_c 相当于关节在转动状态下的库伦摩擦力。当关节处于运动状态时, τ_{fc} 恒为 F_c 。同理, $q - q_c$ 也相应地有上下限的约束。

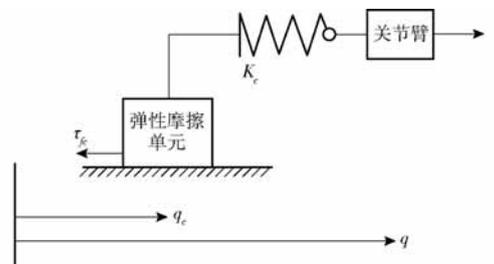


图1 弹性摩擦模型示意图

Fig.1 Schematic of elastic friction model

弹性摩擦模型的摩擦单元在离散状态下的更新方程为^[12]

$$q_c(k) = q(k) - \frac{F_c}{K_c} \text{sat} \left(\frac{K_c q(k) - q_c(k-1)}{1 + T_s \alpha} \right) \quad (15)$$

其中

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} -1 & (x \leq -1) \\ x & (-1 < x < 1) \\ 1 & (x \geq 1) \end{cases} \quad (16)$$

式中 α 定义了一个收敛速度,表示弹性摩擦元件会自行向关节位置靠拢。 F_c 、 K_c 和 α 共同定义了关节的弹性摩擦模型,简单地描述了关节的摩擦特性。

通过差分运算可以得到弹性摩擦单元的运动速度为

$$\dot{q}_c(k) = \frac{1}{T_s}(q_c(k) - q_c(k-1)) \quad (17)$$

当机器人关节在低速下运行时,由于 Stribeck 效应,关节的摩擦力会显著增大。在考虑 Stribeck 效应的情况下, F_c 将不再是一个常系数,而是弹性摩擦单元 \dot{q}_c 的函数,这个函数可表示为^[8]

$$F_c = F_{cc} + (F_{cs} - F_{cc}) \exp\left(-\left|\frac{\dot{q}_c}{V_s}\right|^\gamma\right) \quad (18)$$

式中 F_{cc} ——不考虑 Stribeck 效应时的库伦摩擦力

F_{cs} ——关节存在的最大静摩擦力

V_s ——Stribeck 速度

γ ——经验参数,用于控制曲线的形状

式(18)描述了关节的库伦摩擦力,而对于关节的粘性摩擦力 τ_{fs} 描述为

$$\tau_{fs} = f_s \dot{q}_c \quad (19)$$

式中 f_s ——粘性摩擦系数

由于关节摩擦力等于干性摩擦力和粘性摩擦力之和,故有

$$\hat{\tau}_F = \tau_{fc} + \tau_{fs} \quad (20)$$

式中 $\hat{\tau}_F$ ——关节摩擦力的估计量

式(14)~(20)先是计算考虑 Stribeck 效应下的库伦摩擦力 F_c ,接着对弹性摩擦单元的位置 q_c 和速度 \dot{q}_c 进行更新,并依靠 q_c 和 \dot{q}_c 计算关节中的干性摩擦力 τ_{fc} 和粘性摩擦力 τ_{fs} ,最后对两者求和得到对关节摩擦的估计值 $\hat{\tau}_F$ 。

3 关节摩擦估计的起动规划

弹性摩擦模型可以对关节在静止状态下的摩擦力进行简单估计,但仍无法描述其他更复杂的非线性特性,如关节在预滑动位移阶段的滞回现象等,同时由于关节传动机构间的挤压和摩擦等会引入更加复杂的摩擦力,使得关节在静止状态下的拖动示教变得异常困难^[14-15],操作者往往需要施以更大的外力才能使关节成功脱离静止状态。

为了实现机器人的轻松拖动,本节对关节的起动过程进行规划。利用弹性摩擦模型的内部变量,判断关节在静止阶段是否有起动的意向。当检测到关节的起动意向时,短暂并大幅地增加摩擦估计值。

起动规划算法如图 2 所示。

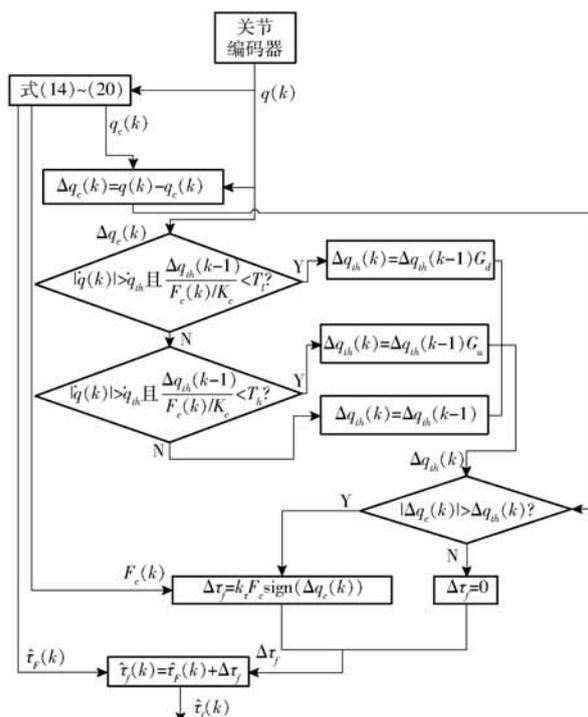


图 2 机器人起动规划算法

Fig. 2 Robotic starting planning scheme

图 2 中, \dot{q}_{th} 为一个极小的正值,用于判断关节是否为静止状态。在关节静止时,由于伺服控制性能以及噪声的影响,从驱动器返回的关节角速度 \dot{q} 值并非严格为零,而是在 0 值附近漂移,因此定义 \dot{q}_{th} 并规定 $|\dot{q}| < \dot{q}_{th}$ 时关节处于静止状态。 $G_d \in [0, 1]$ 为 Δq_{th} 的等比下降速度, $G_u > 1$ 为 Δq_{th} 的等比上升速度。 $T_l \in [0, 1]$ 用于定义 Δq_{th} 的取值下限, $T_h > 1$ 用于定义 Δq_{th} 的取值上限。 Δq_{th} 为一个正值,用于与 $|\Delta q_c|$ 比较来判断操作者是否有起动关节的意向。 k_τ 为一个比例系数,在关节起动阶段有 $\Delta\tau_f = k_\tau F_c \text{sign}(\Delta q_c(k))$ 的摩擦估计补偿值,短暂地提高模型的摩擦估计值 $\hat{\tau}_f$ 。

起动规划算法基本流程为:①根据式(14)~(20)计算弹性摩擦模型的摩擦估计值,定义为 $\hat{\tau}_F$ 。返回弹性模型中摩擦单元的位置 q_c ,并与关节实际位置 q 做差得到 Δq_c 。②更新 Δq_{th} ,当关节处于静止状态,即 $|\dot{q}| < \dot{q}_{th}$ 时, Δq_{th} 不断下降直到其下限值 $T_l \frac{F_c}{K_c}$ 。否则 Δq_{th} 上升直到其上限值 $T_h \frac{F_c}{K_c}$ 。③比较 Δq_{th} 和 $|\Delta q_c|$ 的值,当 $|\Delta q_c| > \Delta q_{th}$ 时表示关节处于起动阶段,此时摩擦估计补偿值 $\Delta\tau_f$ 为 $k_\tau F_c \text{sign}(\Delta q_c(k))$,否则为零。④将弹性摩擦估计值 $\hat{\tau}_F$ 和摩擦估计补偿值 $\Delta\tau_f$ 求和得到规划后的关节摩擦估计值 $\hat{\tau}_f$,由此完成对关节摩擦力的估计。

当关节处于运动状态时,此时 Δq_{th} 保持在其上

限值,即 $\Delta q_{th} = T_h \frac{F_c}{K_c}$, 由于 $T_h > 1$, 所以此时必定 $|\Delta q_c| < \Delta q_{th}$, 摩擦估计补偿 $\Delta\tau_f$ 为零。当关节减速到静止状态, 即 $|\dot{q}| < \dot{q}_{th}$ 时, 可以分为两种情况: ①操作者要进行关节转向。②操作者要让关节静止。第①种情况, 由于操作者会在关节转向时施加较大的外力以保持关节的角加速度, 所以关节停留在静止状态的时间几乎为零, 在转向过程中, Δq_{th} 仍为其上限值, $|\Delta q_c(k)| < \Delta q_{th}(k)$, $\Delta\tau_f$ 为零。第②种情况, 关节在操作者的反向外力下进行静止收敛, 并保持静止状态, 此时 Δq_{th} 等比下降到 $T_l \frac{F_c}{K_c}$, 与此同时 Δq_c 也会收敛到零, 只要合理设定 G_d 和 T_l 的值, 便可保证整个静止过程满足 $|\Delta q_c| < \Delta q_{th}$, $\Delta\tau_f$ 仍然保持为零, 关节可以稳定地保持在静止状态。

当关节在静止状态并且操作者有意图起动关节时, 此时关节受到持续外力作用并脱离静止状态, Δq_{th} 持续等比增大直到上限 $T_h \frac{F_c}{K_c}$, Δq_c 也持续增加直到上限 $\frac{F_c}{K_c}$, 通过调整 G_u , 可保证这段时间内满足

$|\Delta q_c| > \Delta q_{th}$, $\Delta\tau_f$ 的值为 $k_\tau F_c \text{sign}(\Delta q_c(k))$, 此时关节处于起动状态, $\hat{\tau}_f$ 得到增强。由于 $T_h > 1$, 所以在 Δq_{th} 和 Δq_c 上升到最大值时有 $|\Delta q_c| < \Delta q_{th}$, 此后 $\Delta\tau_f$ 为零, 关节进入了运动状态。因此, 在机器人的起动规划算法中, 只有在关节起动阶段有对摩擦的估计值进行补偿, 而其他运动阶段则不会受到影响。

结合外力估计和导纳控制, 机器人拖动示教的控制方案如图3所示。外力观测器通过关节返回的位置 q 、速度 \dot{q} 和力矩 τ 估计关节所受的外力 $\hat{\tau}_{ext}$, 其中关节摩擦力的辨识采用结合起动规划的弹性摩擦模型。关节外力估计 $\hat{\tau}_{ext}$ 经导纳控制生成机器人的目标运动轨迹 q_d , 再经机器人的位置伺服控制生成机器人的驱动力矩 τ_m , 驱动关节运动完成外力作用下的示教运动。通过在关节起动阶段添加补偿值 $\Delta\tau_f$, 可以短暂地提高关节的外力估计 $\hat{\tau}_{ext}$, 进而提高关节的驱动力矩 τ_m , 使关节顺利起动。

4 免力矩传感器的机器人拖动示教实验

4.1 机器人实验平台

使用广州数控 RB08 型机器人进行拖动示教实验, 系统结构如图4所示。使用装载实时控制系统的工控机作为上位机, 并采用 EtherCat 协议进行通信。驱动器的位置参考由上位机计算并发送, 电机关节的力矩测量值采用电流控制器的参考值。控制系统以 1 000 Hz 的频率进行通讯和控制, 即控制周

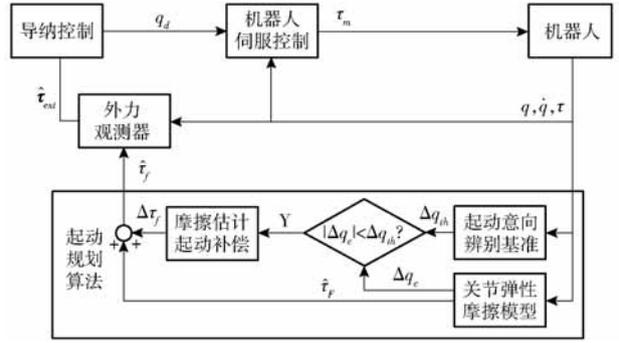


图3 机器人拖动示教控制方案

Fig. 3 Robotic dragging teaching control scheme

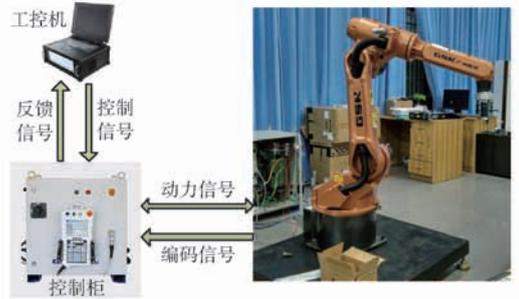


图4 机器人实验平台

Fig. 4 Robotic experimental platform

期 T_s 为 1 ms。由机器人的前3个关节进行拖动示教实验。

4.2 机器人动力学模型

4.2.1 关节 Stribeck 摩擦参数辨识

实验辨识机器人前3个关节在考虑 Stribeck 效应下摩擦参数, 采用摩擦模型^[8]式(18), 可见 F_f 为关节角速度 \dot{q} 的函数, 参数的辨识方法可以参照文献^[8]。辨识结果如表1所示, 辨识的 Stribeck 模型曲线如图5所示。

表1 Stribeck 摩擦模型参数

Tab.1 Parameters of Stribeck friction model

	$f_s /$ ($N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$)	$F_{c0} /$ ($N \cdot m$)	$F_{cs} /$ ($N \cdot m$)	$V_s /$ ($rad \cdot s^{-1}$)	γ
关节1	67.75	27.28	39.44	0.006 067	1
关节2	42.62	19.59	21.88	0.008 249	1
关节3	34.41	18.03	27.15	0.001 504	1

4.2.2 其他动力学参数辨识

机器人的其他动力学参数, 如重力、离心力和科氏力等, 由于存在耦合现象, 只能得到一组最少参数集, 且动力学方程一般写成线性结构^[5]

$$\Gamma = H_b(q, \dot{q}, \ddot{q})\beta \quad (21)$$

式中 Γ ——关节计算力矩

H_b ——与机器人运动状态相关的矩阵

β ——动力学最少参数集

为计算机器人的重力项力矩, 只需把 \dot{q} 和 \ddot{q} 设

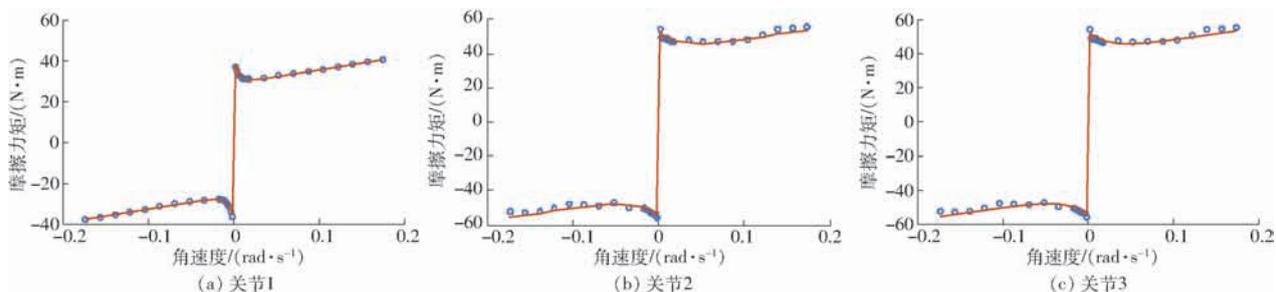


图 5 Stribeck 模型拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of Stribeck model

为 0 再代入式(21),则此时的 Γ 便只有重力项。对于实验的六轴串联机器人,其与前 3 个关节相关的参数的辨识结果(排除摩擦项参数)如表 2 所示,其中对于较长的动力学参数式采用 β_A 表示。该部分动力学参数的建立和辨识方法具体可参照文献[5, 18],辨识用的机器人激励轨迹可参照文献[20]。

表 2 非摩擦项动力学参数

Tab.2 Dynamics parameter set of non-friction term

kg·m ²					
参数	辨识值	参数	辨识值	参数	辨识值
β_1	25.954 0	β_7	27.728 0	β_{13}	-1.519 3
β_2	-19.232 0	l_{2y}	0.006 4	β_{14}	3.938 7
L_{2xy}	6.587 7	β_9	-6.010 6	β_{15}	7.716 5
β_4	0.495 8	β_{10}	-2.599 6	I_{a3}	4.595 5
L_{2yz}	0.694 7	L_{3xz}	-0.830 2		
β_6	5.079 9	L_{3yz}	1.124 5		

通过辨识到的机器人参数和机器人运动状态,便可计算出机器人各动力项的估计值,如 \hat{G} 、 $\hat{\tau}_f$ 等,通过基于广义动量的外力估计方法,根据式(1)~(9)便可求得外力估计值 $\hat{\tau}_{ext}$,其中式(7)中参数 K 的值在 3 个关节的实验中都设为 600。

4.2.3 机器人拖动实验

使用弹性摩擦模型和起动规划算法进行机器人的关节起动实验,机器人前 3 个关节的参数设置如表 3 所示。为提高运动的稳定性, K_c 的设定值都小于实测的摩擦刚度,这使得当关节在低速运动时容易自行减速到静止状态。按照起动规划算法,前 3 个关节的起动拖动实验如图 6~8 所示。只采用

式(20)的输出 $\hat{\tau}_F$ 作为关节摩擦的估计结果时,其实验结果如图 9~11 所示。对比相同关节在两次实验中的结果,关节在起动的瞬间,使用规划算法产生了较大的估计力矩 $\hat{\tau}_{ext}$ 。图 6c 在起动过程中产生了 31.09 N·m 的估计力矩,而图 9c 最高为 2.521 N·m。图 8c 起动阶段产生最大力矩为 26.05 N·m,而图 11c 为 5.881 N·m。在使用起动规划算法时,关节的 Δq_c 在短时间内便可快速上升到最大值。图 6b 中 Δq_c 从 0 上升到最大值需要的时间为 47 ms,而在图 9b 则需要 161 ms,相比减少 70.81%。图 8b 中,关节起动所需时间为 66 ms,而图 11b 则需要 263 ms,相比减少 74.90%。

表 3 起动规划算法参数

Tab.3 Parameter of starting planning

	$K_c/(N \cdot m \cdot rad^{-1})$	α	G_d	G_u
关节 1	250 000	15	0.99	1.04
关节 2	350 000	10	0.99	1.06
关节 3	350 000	10	0.99	1.04
	$\dot{q}_{th}/(rad \cdot s^{-1})$	T_h	k_r	T_l
关节 1	0.002	1.03	0.8	0.02
关节 2	0.002	1.05	0.6	0.02
关节 3	0.002	1.03	0.8	0.02

由于本文是在机器人关节空间上实施导纳控制,且施力点在最后 1 个关节末端上,这使得操作者需要通过关节 3 间接对关节 2 进行施力拖动,导致关节 2 拖动效果并没有关节 1 和关节 3 好。基于机器人笛卡尔空间进行导纳控制的示教方法可以有效解决这个问题。

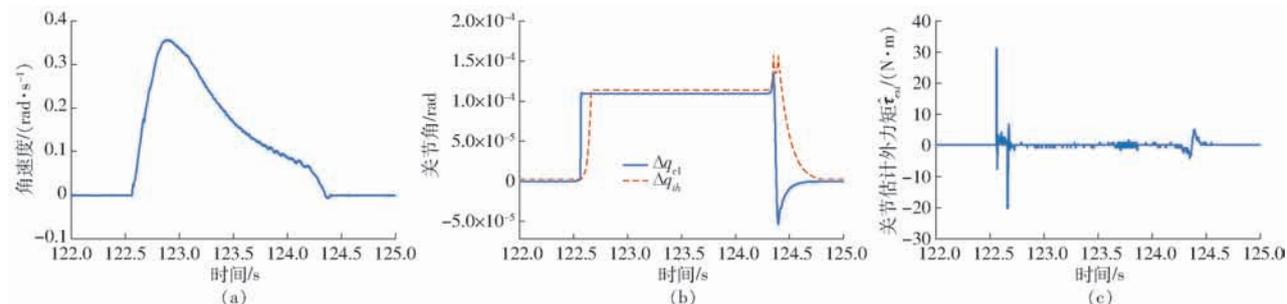


图 6 关节 1 拖动实验(采用起动规划)

Fig. 6 Drag experiment of joint 1 (using starting planning)

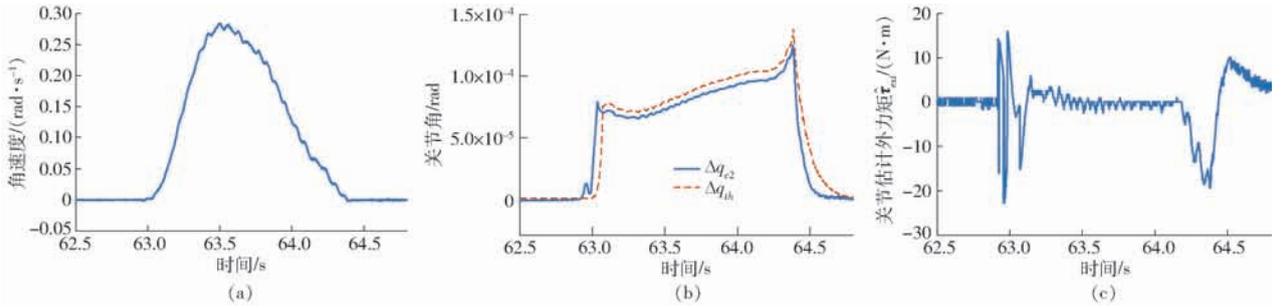


图7 关节2 拖动实验(采用起动规划)

Fig. 7 Drag experiment of joint 2 (using starting planning)

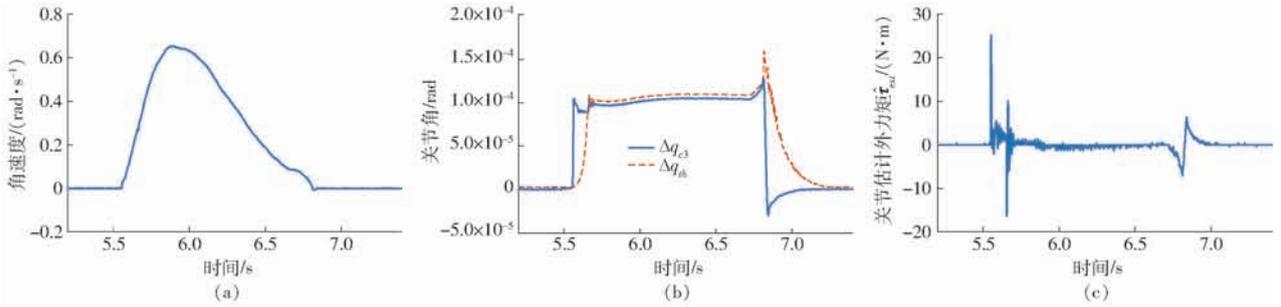


图8 关节3 拖动实验(采用起动规划)

Fig. 8 Drag experiment of joint 3 (using starting planning)

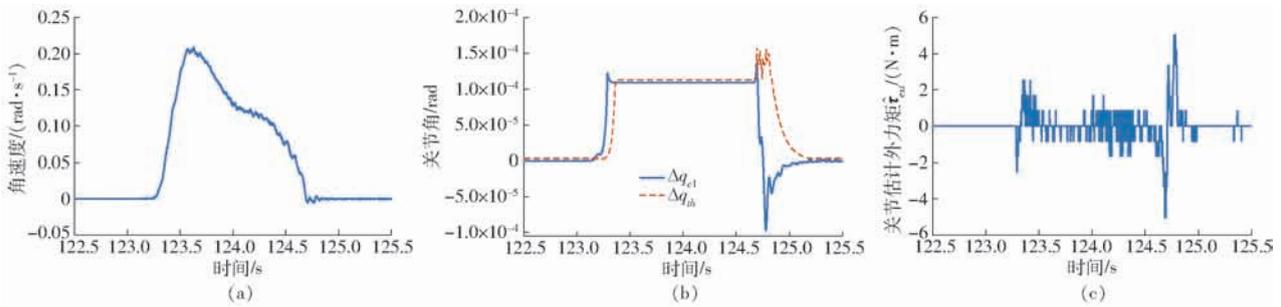


图9 关节1 拖动实验(未采用起动规划)

Fig. 9 Drag experiment of joint 1 (without using starting planning)

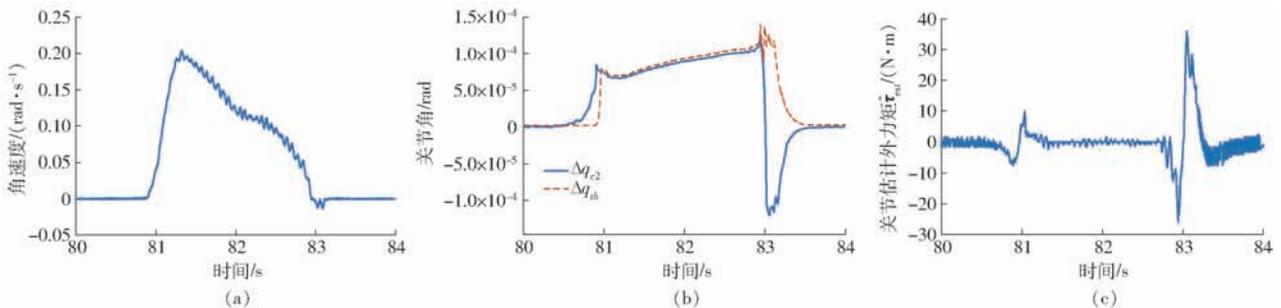


图10 关节2 拖动实验(未采用起动规划)

Fig. 10 Drag experiment of joint 2 (without using starting planning)

起动规划算法生成的摩擦估计补偿是十分短暂的,需要操作者在关节起动阶段不断施加外力才能使得关节进入较高速度的运动状态,否则关节容易减速并回到静止状态。这个特性使得关节在起动阶段具有一定的抗干扰能力。通过对机器人关节3进行连续3次轻敲,实验结果如图12所示。可以发现,虽然在关节起动阶段产生了大幅

的外力估计值,但由于没有持续的外力,关节最终收敛回静止状态。

5 结论

(1) 基于广义动量的外力估计和导纳控制算法,在免力矩传感器的条件下实现对工业机器人的拖动示教。使用弹性摩擦模型对关节的摩擦值进行

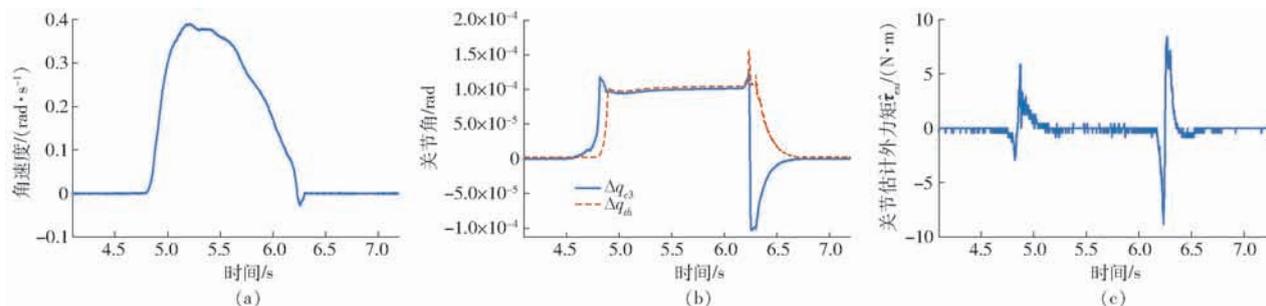


图 11 关节 3 拖动实验(未采用起动规划)

Fig. 11 Drag experiment of joint 3 (without using starting planning)

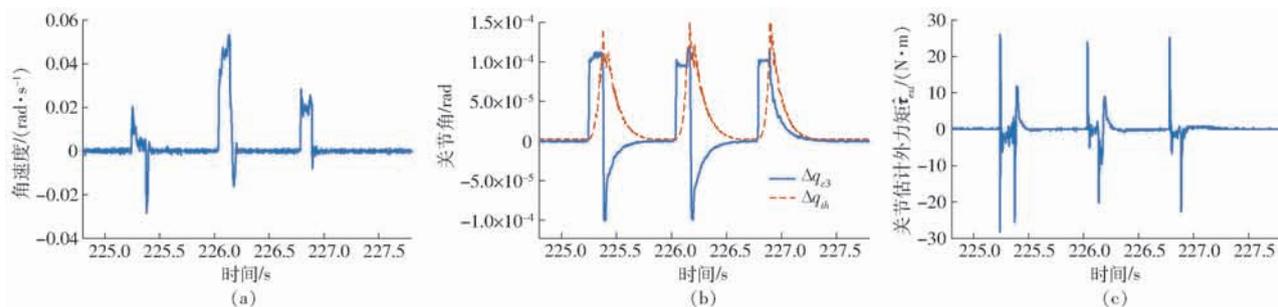


图 12 关节 3 的抗干扰实验

Fig. 12 Anti-interference experiment of joint 3

估计,通过在弹性摩擦模型中引入 Stribeck 摩擦项,提高关节在低速时的摩擦估计精度,实现关节在低速和静止状态下的关节摩擦估计。

(2)提出了一种机器人起动规划方法,结合弹性摩擦模型的内在变量,对关节的起动意向进行判断并增加关节的摩擦估计值,实现关节的轻松起动。起动规划算法不会对机器人的其他运动阶段造成

影响。

(3)实验表明,采用起动规划可以有效增加关节的外力估计值,规划后外力估计力矩可达 $26 \text{ N}\cdot\text{m}$ 以上。使用规划算法可以缩短关节起动的的时间,其中关节 1 减少 70.81%,关节 3 减少 74.90%。同时,机器人的拖动示教方案使得关节在起动阶段具有一定的抗干扰能力。

参 考 文 献

- [1] EOM K S, SUH I H, CHUNG W K, et al. Disturbance observer based force control of robot manipulator without force sensor [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings. IEEE, 1998,4:3012-3017.
- [2] LUCA A D, MATTONE R. Sensorless robot collision detection and hybrid force/motion control [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005:999-1004.
- [3] ALCOCER A, ROBERTSSON A, VALERA A, et al. Force estimation and control in robot manipulators[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2003, 36(17):55-60.
- [4] DAMME M V, BEYL P, VANDERBORGHT B, et al. Estimating robot end-effector force from noisy actuator torque measurements[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2011:1108-1113.
- [5] SOUSA C D, RUI C. Physical feasibility of robot base inertial parameter identification: a linear matrix inequality approach[J]. International Journal of Robotics Research, 2014, 33(6):931-944.
- [6] LIU G, GOLDENBERG A A, ZHANG Y. Precise slow motion control of a direct-drive robot arm with velocity estimation and friction compensation[J]. Mechatronics, 2004, 14(7):821-834.
- [7] MOREL G, IAGNEMMA K, DUBOWSKY S. The precise control of manipulators with high joint-friction using base force/torque sensing[J]. Automatica, 2000, 36(7):931-941.
- [8] LIU L L, WU Z Y. A new identification method of the Stribeck friction model based on limit cycles[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(15):2678-2683.
- [9] SWEVERS J, AL-BENDER F, GANSEMAN C G, et al. An integrated friction model structure with improved presliding behavior for accurate friction compensation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 45(4):675-686.
- [10] AL-BENDER F, LAMPAERT V, SWEVERS J. The generalized Maxwell-slip model: a novel model for friction simulation and compensation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(11):1883-1887.
- [11] 倪风雷,刘宏,介党阳. 基于速度观测器的 GMS 摩擦模型辨识与补偿[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(11):70-75.

- NI Fenglei, LIU Hong, JIE Danyang. GMS friction model identification and compensation based on velocity observer [J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(11):70–75. (in Chinese)
- [12] IWATANI M, KIKUUWE R. An external force estimator using elastoplastic friction model with improved static friction behavior [C]//International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. IEEE, 2017.
- [13] TUTTLE T D, SEERING W P. A nonlinear model of a harmonic drive gear transmission [J]. *IEEE Trans Robotics Autom*, 1996, 12(3):368–374.
- [14] IWATANI M, KIKUUWE R. An elastoplastic friction force estimator and its application to external force estimation and force-sensorless admittance control [C]//IEEE/SICE International Symposium on System Integration. IEEE, 2017.
- [15] IWATANI M, KIKUUWE R. Some improvements in elastoplastic friction compensator [J]. *SICE Journal of Control Measurement & System Integration*, 2017, 10(3):141–148.
- [16] OTT C, MUKHERJEE R, NAKAMURA Y. Unified impedance and admittance control [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2010:554–561.
- [17] 游有鹏, 张宇, 李成刚. 面向直接示教的机器人零力控制 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(3):10–17.
YOU Youpeng, ZHANG Yu, LI Chenggang. Force-free control for the direct teaching of robots [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(3):10–17. (in Chinese)
- [18] 席万强, 陈柏, 丁力, 等. 考虑非线性摩擦模型的机器人动力学参数辨识 [J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(2):393–399. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170253&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.053.
- XI Wanqiang, CHEN Bai, DING Li, et al. Dynamic parameter identification for robot manipulators with nonlinear friction model [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2):393–399. (in Chinese)
- [19] LAMPAERT V, SWEVERS J, AI-BENDER F. Modification of the Leuven integrated friction model structure [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(4):683–687.
- [20] 吴文祥, 朱世强, 靳兴来. 基于改进傅里叶级数的机器人动力学参数辨识 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2013, 47(2):231–237.
WU Wenxiang, ZHU Shiqiang, JIN Xinglai. Dynamic identification for robot manipulators based on modified fourier series [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2013, 47(2):231–237. (in Chinese)