

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107593

基于快速动力学辨识的机器人力/位混合 控制碰撞检测研究*

张春涛^{1,2}, 王勇¹, 穆春阳², 李家旺³, 刘正士¹

(1. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 23000; 2. 北方民族大学机电工程学院 银川 750021;
3. 北京灵思创奇科技有限公司 北京 10000)

摘要:针对机器人力/位混合控制时发生异常碰撞所导致的安全问题,提出一种基于快速动力学辨识的碰撞检测方案。首先,建立机器人快速动力学的辨识模型,基于拉格朗日法整理出机器人关节重力矩的最简三角函数回归矩阵,运用连续摩擦模型建模关节摩擦力;然后,采用最小二乘法分别辨识出机器人关节的重力矩最简参数集和连续摩擦模型参数集;最后,为验证提出方法的有效性,设计并完成机器人快速动力学辨识和碰撞检测实验。结果表明:提出的方法能够快速有效地辨识机器人的动力学参数,可实时检测机器人位置控制方向上 $4\text{ N}\cdot\text{m}$,力控制方向 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 以上的异常碰撞,有效保障操作人员和设备的安全,具有一定的工程参考价值。

关键词: 机器人力/位混合控制;连续摩擦模型;重力辨识;碰撞检测

中图分类号: TP242.2 TH113.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.5030

Collision detection for robot force/position hybrid control based on fast dynamics identification

Zhang Chuntao^{1,2}, Wang Yong¹, Mu Chunyang², Li Jiawang³, Liu Zhengshi¹

(1. College of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 23000, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China;
3. Beijing Lingsichuangqi Technology, Ltd., Beijing 10000, China)

Abstract: Aiming at safety problems caused by abnormal collisions during robot force/position hybrid control, a collision detection scheme based on rapid dynamics identification is proposed. Firstly, a rapid robot dynamics identification model is formulated. The simplest trigonometric function regression matrix of the robot joint gravity moment is sorted based on Lagrangian method, and the continuous friction model is used to model the joint friction. Then, both the minimum parameter set of the gravity moment and the parameter set of the continuous friction model of the robot joint are identified by least square method. Finally, rapid dynamic identification and collision detection experiments of the robot are designed and completed to evaluate the effectiveness of the proposed method. Results show that the proposed method can quickly and effectively identify the dynamic parameters of the robot. The abnormal collisions above $4\text{ N}\cdot\text{m}$ in position control and $8\text{ N}\cdot\text{m}$ in force control can be detected in real time, which effectively guarantees the safety of operators and equipment and has certain engineering reference value.

Keywords: robot force/position hybrid control; continuously friction model; gravity recognition; collision detection

0 引 言

随着机器人技术的快速发展,机器人已经应用到很

多高精度加工的场景,例如采用工业机器人完成自动焊接、柔性装配、打磨^[1-3]等任务,而随之而来需要重点考虑的是机器人的功能安全问题。根据工业机器人的应用环境与功能需求,人与机器人共存环境下的碰撞检测是确

收稿日期:2021-03-10 Received Date: 2021-03-10

* 基金项目:国家自然科学基金(U1713210)、宁夏自然科学基金(2019AAC03121,2020AAC03201)项目资助

保人机交互安全和设备自身安全的基础性课题。Haddadin 等^[4]提出将人机物理交互行为的发生流程分为预碰撞、碰撞检测、分离、识别、分类、响应以及碰撞后处理 7 个步骤。其中,依靠机器人自身传感器而无需外部传感的碰撞检测、分离、识别等已成为当前人机安全交互技术的热点^[5],其难点问题在于机器人动力学模型参数的有效辨识,现有方法可分为 3 类:

第 1 类为动力学模型参数的完整性辨识。采用一次性辨识全部惯性参数的方法得到机器人的动力学参数。Taghbalout 等^[6]利用逆动力学模型和最小二乘法对机器人动力学参数进行基本辨识。为避免预测力矩出现误差峰值,徐建明等^[7]采用优化的激励轨迹辨识机器人动力学参数。Tao 等^[8]提出一种改进的带交叉变异函数的粒子群优化算法估计机器人的动态参数。Urrea 等^[9]对最小二乘法、扩展卡尔曼滤波、自适应神经网络、递归神经网络和遗传算法等的对机器人动力学参数辨识的方法进行讨论。第 1 类方法随着关节参数的增多,符号表达式就越复杂,进而导致辨识轨迹的优化难度加大,辨识精度降低。

第 2 类基于 CAD 模型参数估计辨识。根据机器人的三维模型获取机器人的模型参数,再对摩擦参数进行辨识。Li 等^[10]通过计算机辅助设计建立模型获得机器人的动态参数,采用 Stribeck 摩擦模型描述传统工业机器人的关节摩擦。文献[11]中通过机器人三维模型计算获得动力学参数,再采用静态 LuGre 模型辨识和补偿关节摩擦力。张铁等^[12]提出一种改进的库仑-黏性摩擦力模型,进行分步辨识,采用机器学习算法对模型的位置依赖项等进行处理。第 2 类方法依赖于机器人厂商提供相应的机器人参数,并需要对机器人的每个零件进行精确的建模,其辨识过程相对繁杂且不具有通用性。

第 3 类是快速模型参数辨识。根据工业机器人的特殊应用场景以及需求,简化动力学模型,快速辨识机器人的重要模型参数。Cao 等^[13]简化动力学模型,建立快速动力学模型,采用动态阈值实现机器人灵敏碰撞检测。文献[14]中根据机器人的速度和位置,简化动力学模型,减轻计算的负担,实现快速动力学参数辨识。Li 等^[15]提出一种多自由度机器人动力学建模的拉格朗日方程简化计算方法,通过仿真验证算法的快速性和可行性。第 3 类快速求解动力学参数的方法,忽略了部分动力学参数的影响,会导致计算力矩和实际力矩之间的偏差较大,需要根据机器人的具体应用做出进一步分析和处理。

以上研究大多采用机器人在自由工作空间下验证算法的效果,较少考虑到机器人在打磨、抛光、柔性装配等与外界有力交互过程中的碰撞检测。当机器人处于力/位混合控制约束下时,力控制关节摩擦的建模问题变得

更加复杂,导致基于动力学模型的碰撞检测效果不佳^[16]。基于此,本文基于拉格朗日方法建立重力矩最简参数集,采用连续摩擦模型建立关节摩擦模型,实现快速动力学模型参数辨识,再分别开展力控制和位置控制方向关节碰撞检测实验,验证算法的有效性和实用性。

1 基于动力学模型的碰撞检测

对于 n 自由度的多关节串联型工业机器人,定义驱动关节的电机转矩常数 $k_m \in \mathbf{R}^{n \times 1}$,电机驱动电流 $i_m \in \mathbf{R}^{n \times 1}$,电机输出的角度和力矩分别为 $\theta_m \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 、 $\tau_m \in \mathbf{R}^{n \times 1}$,减速器的减速比为 $G_m \in \mathbf{R}^{n \times 1}$,经减速器变换后的关节端角度和力矩分别为 $q_i \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 、 $\tau_i \in \mathbf{R}^{n \times 1}$,有以下变换:

$$\tau_m = k_m i_m \quad (1)$$

$$\tau_i = G_m \tau_m \quad (2)$$

$$q_i = G_m^{-1} \theta_m \quad (3)$$

假定机械臂关节为完全刚性关节,在机器人运动过程中与环境发生意外的碰撞,对机器人施加一个外力 $F_{ext} \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$,通过机器人碰撞点的雅可比矩阵 $J \in \mathbf{R}^{6 \times n}$ 计算到各关节的等效力矩为 τ_{ei} ,如式(4)所示。

$$\tau_{ei} = J^T F_{ext} \quad (4)$$

根据以上碰撞情况,采用拉格朗日法建立机器人刚体动力学方程如式(5)所示。

$$M(q_i) \ddot{q}_i + C(q_i, \dot{q}_i) + f(\dot{q}_i) + G(q_i) = \tau_i - \tau_{ei} \quad (5)$$

式中: $M(q_i) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 表示机器人的惯性系数矩阵; $C(q_i, \dot{q}_i) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为离心力和哥氏力矩阵; $f(\dot{q}_i) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为摩擦力项; $G(q_i) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为重力项。由式(5)可得外部的碰撞力矩,如式(6)所示。

$$\tau_{ei} = \tau_i - \{M(q_i) \ddot{q}_i + C(q_i, \dot{q}_i) + f(\dot{q}_i) + G(q_i)\} \quad (6)$$

若机器人在力/位控制过程中发生意外碰撞,采用最直接的方法是检测碰撞力矩。碰撞检测的方程如式(7)所示。

$$CD = \begin{cases} \text{no}, & \forall i: |\tau_{ei}| < \psi_i \\ \text{no}, & \exists i: |\tau_{ei}| > \psi_i \quad \text{or} \quad m < n \\ \text{yes}, & \exists i: |\tau_{ei}| > \psi_i \quad \text{and} \quad m \geq n \end{cases} \quad (7)$$

定义碰撞检测标志为 CD (collision detection), 设定阈值为 $\psi_i \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$, 设定碰撞检测的持续有效采样周期为 n , 该参数设置不能过小或者过大, 过小会导致碰撞检测太灵敏而失灵, 过大会导致碰撞检测迟钝而失效。定义实际的碰撞检测的采样周期为 m , 根据对比计算出外部的碰撞力矩的绝对值和设定的阈值的结果, 以判断外部碰撞检测是否发生。

2 动力学快速辨识

2.1 快速动力学模型建立

将式(5)中的动力学方程可进一步表达为线性形式:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \boldsymbol{\pi} \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{\tau}$ 可以由式(1)、(2)通过关节电流进行估计; \mathbf{q} 和 $\dot{\mathbf{q}}$ 可以由式(3)获得; $\ddot{\mathbf{q}}$ 可以通过速度差分求得; 而 $\boldsymbol{\pi}$ 代表的是包括惯性张量、连杆质量、摩擦力等的机器人动力学参数集向量; 矩阵 $\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ 为回归矩阵。而在机器人实际应用工况中, 部分参数对于机器人关节动力学模型并不产生作用或者作用较小, 可以忽略不计, 可考虑对动力学参数集进行适当地简化。

机器人力/位混合控制下一般处于中低恒速运行, 机器人各关节惯性力、哥氏力及向心力做简化处理, 可忽略不计。因此, 其动力学模型中由重力矩和摩擦力起主要作用, 按照式(6)可简化为:

$$\boldsymbol{\tau}_{ci} = \boldsymbol{\tau}_i - \{\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}_i) + \mathbf{G}(\mathbf{q}_i)\} \quad (9)$$

由式(9)可知, 若能较好的辨识出 $\mathbf{G}(\mathbf{q}_i)$ 和 $\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}_i)$, 可实现机器人力/位混合控制应用的碰撞检测。根据机器人动力学特性, 在无外力作用下控制机器人某关节, 在运动区间 $[-Q, Q]$ 内进行 n 次正、反方向的来回梯形速度规划运动, 截取关节匀速部分, 分别采集 n 组关节力矩、关节角度和关节速度, 可得式(10)、(11):

$$\sum_{i=1}^n [G(+q(i)) + f(+\dot{q}(i))] = \sum_{i=1}^n \tau^+(i) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n [G(-q(i)) + f(-\dot{q}(i))] = \sum_{i=1}^n \tau^-(i) \quad (11)$$

式中: $G(+q(i))$ 和 $G(-q(i))$ 分别为关节进行第 i 次正、反方向的等效重力矩值, 运动过程中同一位置的重力矩为: $G(+q(i)) = G(-q(i))$ 。 $f(+\dot{q}(i))$ 和 $f(-\dot{q}(i))$ 分别为关节进行第 i 次正、反方向的等效摩擦力, 运动过程正反速度的摩擦力为: $f(+\dot{q}(i)) = -f(-\dot{q}(i))$, 将式(10)和(11)分别进行相加、相减可得式(12)、(13):

$$\sum_{i=1}^n G(q(i)) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\tau^+(i) + \tau^-(i)) = \sum_{i=1}^n \tau_{G_i} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n f(\dot{q}(i)) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\tau^+(i) - \tau^-(i)) = \sum_{i=1}^n \tau_{f_i} \quad (13)$$

再分别将式(12)、(13)中的每项提出来, 有:

$$\mathbf{R}_1 = \{(\mathbf{q}_1, \tau_{G1}), (\mathbf{q}_2, \tau_{G2}), \dots, (\mathbf{q}_i, \tau_{Gi}), \dots, (\mathbf{q}_n, \tau_{Gn})\} \quad (14)$$

$$\mathbf{R}_2 = \{(\dot{\mathbf{q}}_1, \tau_{f1}), (\dot{\mathbf{q}}_2, \tau_{f2}), \dots, (\dot{\mathbf{q}}_i, \tau_{fi}), \dots, (\dot{\mathbf{q}}_n, \tau_{fn})\} \quad (15)$$

由式(14)、(15)可建立起机器人各关节角度与关节重力矩、各关节速度与摩擦力之间对应的数据组集合。若是已知机器人重力矩和摩擦力矩的数学函数、对应的关节驱动力矩和机器人运动学参数, 则可通过数值处理的方法辨识出机器人的重力矩和摩擦力。

2.2 $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 辨识

完整的动力学参数辨识, 既需要推导复杂的符号表达形式, 还需要根据某些优化指标精心设计激励轨迹。为减少计算量, 文献[15]简化拉格朗日方程计算方法, 求解得到重力矩表达式。甘亚辉等^[17]忽略哥氏力及向心力影响, 采用逐次动力学辨识方法获得重力矩。本文根据拉格朗日法建立动力学方程, 提取出关于关节 i 的重力矩表达式为:

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}_i) = [g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ g_5 \ g_6]^T \quad (16)$$

$$g_i = - \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{g}^T \frac{\partial {}^0\mathbf{A}_j}{\partial q_i} \mathbf{r}_{c_j}^j; \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (17)$$

式中: m_j 为连杆 j 的质量; \mathbf{g} 定义为 $[g \ 0]^T$; g 为重力加速度矢量在基坐标系中的坐标表达式; q_i 为关节 i 的角度; ${}^0\mathbf{A}_j$ 表示关节 j 相对于基坐标的齐次变换矩阵; $\mathbf{r}_{c_j}^j$ 为连杆 j 的质心在坐标系 j 中表示。将关节位置为 q_i 相关的机器人重力项表述为如下线性形式:

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}_i) = \mathbf{H}_c(\mathbf{q}_i) \boldsymbol{\pi}_{G_i} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{G}(\mathbf{q}_i)$ 为关节重力矩; $\mathbf{H}_c(\mathbf{q}_i)$ 为将质量、质心、连杆长度等剔除, 由所有包含关节角度变量的三角函数组成的元素重新整理为重力表达式后的回归矩阵, 且为一维行向量。 $\boldsymbol{\pi}_{G_i}$ 为包含关节的质量、质心、连杆长度等有序组合而成的重力参数集, 并非单个的重力矩参数, 且为一维列向量。回归矩阵的参数元素数量与重力参数集的元素数量是对应相等的, 若整理的回归矩阵元素越少, 则重力参数集元素也越少。因关节 1 的重力矩为 0, 因此根据式(17)建立关节 2 ~ 4 的重力矩表达式, 分析整理合并后只包含关节角度变量的三角函数回归矩阵形式式(19) ~ (21) 所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_c(\mathbf{q}_2) = & [\sin(q_2); \cos(q_2); \cos(q_2 + q_3); \\ & \sin(q_2 + q_3); \sin(q_2 + q_3) \cdot \cos(q_5); \\ & \sin(q_2 + q_3) \cdot \sin(q_5); \cos(q_2 + q_3) \cdot \cos(q_4); \\ & \cos(q_2 + q_3) \cdot \sin(q_4); \sin(q_2 + q_3) \cdot \sin(q_5); \\ & \cos(q_2 + q_3) \cdot \cos(q_4) \cdot \cos(q_5); \\ & \cos(q_2 + q_3) \cdot \cos(q_4) \cdot \sin(q_5)]^T \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_c(\mathbf{q}_3) = & [\sin(q_2 + q_3); \cos(q_2 + q_3); \\ & \sin(q_2 + q_3) \cdot \cos(q_5); \sin(q_2 + q_3) \cdot \sin(q_5); \\ & \cos(q_2 + q_3) \cdot \cos(q_4); \cos(q_2 + q_3) \cdot \sin(q_4); \\ & \cos(q_4) \cdot \sin(q_5) \cdot \cos(q_2 + q_3); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cos(q_4) \cdot \cos(q_5) \cdot \cos(q_2 + q_3); \\ & \sin(q_2 + q_3) \cdot \sin(q_5)]^T \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_c(\mathbf{q}_4) &= [\sin(q_2 + q_3) \cdot \cos(q_4); \\ & \sin(q_2 + q_3) \cdot \sin(q_4); \sin(q_2 + q_3) \cdot \sin(q_4) \cdot \sin(q_5); \\ & \sin(q_2 + q_3) \cdot \sin(q_4) \cdot \cos(q_5)]^T \end{aligned} \quad (21)$$

为提高辨识精度,采用 MATLAB 在离线方式下通过非线性最小二乘法解决重力矩最简参数集曲线拟合问题。将式(18)中的未知参数重新整理为回归形式如式(22):

$$\hat{\boldsymbol{\pi}}_{G_i} = \mathbf{H}_G^+(\mathbf{q}_i) \mathbf{G}(\mathbf{q}_i) \quad (22)$$

其中, $\hat{\boldsymbol{\pi}}_{G_i}$ 为拟合的最简参数集, $\mathbf{H}_c(\mathbf{q}_i) = [\mathbf{H}_c(\mathbf{q}_i(t_1)), \mathbf{H}_c(\mathbf{q}_i(t_2)), \dots, \mathbf{H}_c(\mathbf{q}_i(t_N))]$ 为包含关节角度的回归矩阵; 经过化解计算的驱动力矩 $\mathbf{G}(\mathbf{q}_i) = [\tau_c(t_1), \tau_c(t_2), \dots, \tau_c(t_N)]^T$, $\mathbf{H}_c^+(\dot{\mathbf{q}}_i)$ 为 $\mathbf{H}_c(\dot{\mathbf{q}}_i)$ 的伪逆矩阵, 即可估计重力最简参数集。

2.3 $f(\dot{\mathbf{q}})$ 辨识

当前机器人动力学参数中主流的摩擦模型包括: 库仑-黏性摩擦模型、LuGre 模型等, 而至今没有合适的模型能够较精确地描述工业机器人中的摩擦过程。Makkar 等^[18]提出的连续摩擦模型可描述包括库仑摩擦、静摩擦、Stribeck 现象、迟滞等摩擦特性。文献[19]提出基于径向基神经网络的连续摩擦建模与补偿方法, 对关节 1 进行实验, 跟踪效果较好。文献[20]采用连续摩擦模型, 通过实验结果反推出系统的摩擦力特性, 修正了关节扭矩。针对机器人进行力/位混合控制应用时, 关节摩擦建模时会忽略速度过零时摩擦突变的问题, 本文引入连续摩擦模型开展机器人关节摩擦力建模和补偿, 其表示如式(23)所示。

$$f(\dot{\mathbf{q}}) = \gamma_1(\tanh(\gamma_2\dot{\mathbf{q}}) - \tanh(\gamma_3\dot{\mathbf{q}})) + \gamma_4\tanh(\gamma_5\dot{\mathbf{q}}) + \gamma_6\dot{\mathbf{q}} \quad (23)$$

其中, $\gamma_i \in R, \forall_i = 1, 2, \dots, 6$ 为摩擦模型的系数。连续摩擦模型中, 具有以下特征。 $\gamma_1 + \gamma_4$ 可近似表示静摩擦系数, $\gamma_4\tanh(\gamma_5\dot{\mathbf{q}})$ 代表库仑摩擦, $\gamma_6\dot{\mathbf{q}}$ 代表粘滞摩擦力; $\tanh(\gamma_2\dot{\mathbf{q}}) - \tanh(\gamma_3\dot{\mathbf{q}})$ 可表示原点附近 Stribeck 模型。因此, 式(23)可分解为 3 种摩擦力:

$$\begin{cases} f(\dot{\mathbf{q}}) = f_1 + f_2 + f_3 \\ f_1 = \gamma_1(\tanh(\gamma_2\dot{\mathbf{q}}) - \tanh(\gamma_3\dot{\mathbf{q}})) \\ f_2 = \gamma_4\tanh(\gamma_5\dot{\mathbf{q}}) \\ f_3 = \gamma_6\dot{\mathbf{q}} \end{cases} \quad (24)$$

当 $\gamma_1 = 1.81, \gamma_2 = 7.56, \gamma_3 = 0.12, \gamma_4 = 7.27, \gamma_5 = 6.74, \gamma_6 = 0.02$, 绘出 $f(\dot{\mathbf{q}})$ 、 f_1 、 f_2 、 f_3 的函数曲线如图 1 所示。由图 1 可知原点附近有突变, 由 f_1 表示的 Stribeck 模型和 f_2 表示的库仑摩擦模型共同构成静摩擦

力作用; 克服静摩擦力后, f_1 作用下摩擦力处于低速下随速度的增加而减小, 接着在 f_2 作用下, 摩擦力趋于稳定; 最后由 f_3 表示的粘滞摩擦作用, 摩擦力随着速度线性增加。因此, 由 f_1 、 f_2 、 f_3 构成的 $f(\dot{\mathbf{q}})$ 可较好的描述连续性的摩擦模型。

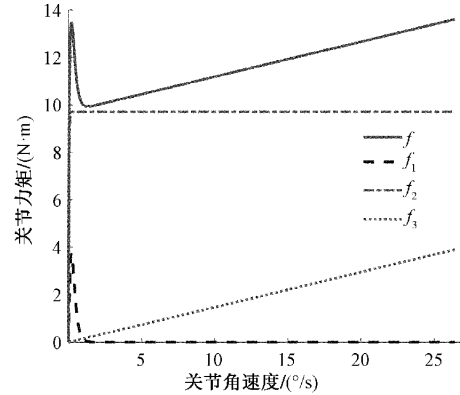


图 1 连续摩擦模型

Fig. 1 Continuous friction model

为提高摩擦力的辨识精度,与重力 $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 的数值处理方法类似,采用 MATLAB 在离线方式下通过非线性最小二乘法解决摩擦曲线拟合问题。将式(23)中的未知参数重新整理为回归形式如式(25)所示。

$$f(\dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{H}_f(\dot{\mathbf{q}}) [\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6]^T \quad (25)$$

$\mathbf{H}_f(\dot{\mathbf{q}}) = [\mathbf{H}_f(\dot{\mathbf{q}}(t_1)), \mathbf{H}_f(\dot{\mathbf{q}}(t_2)), \dots, \mathbf{H}_f(\dot{\mathbf{q}}(t_N))]$, 为包含关节速度的回归矩阵; 经过化解计算的驱动力矩: $\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) = [\tau_f(t_1), \tau_f(t_2), \dots, \tau_f(t_N)]$, $[\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6]^T$ 为连续摩擦模型未知的参数集向量。进一步变换为式(26):

$$[\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6]^T = \mathbf{H}_f^+(\dot{\mathbf{q}}) \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) \quad (26)$$

$\mathbf{H}_f^+(\dot{\mathbf{q}})$ 为 $\mathbf{H}_f(\dot{\mathbf{q}})$ 伪逆矩阵, 即可估计关节摩擦力的模型参数, 可进一步辨识出摩擦力大小。

2.4 快速动力学辨识效果验证

1) 实验平台

开展验证实验的机器人实验平台如图 2 所示, 机器人的伺服驱动与工控机之间使用 EtherCAT 总线进行通讯, 控制系统采用的是半实物仿真控制平台(北京灵思创奇 LinksRT)。工控机每 2 ms 读取机器人关节位置、电流值及发送驱动器控制指令、传感器数据值等。实验采用 SRI 六维力传感器进行机器人力/位混合控制下的力反馈检测。实验开发设计的算法可直接在 Simulink 编译通过, 并生成 C 代码下载到工控机运行程序功能。

2) $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 辨识效果

以关节 2~4 为例, 采用 2.2 中的方法进行机器人重

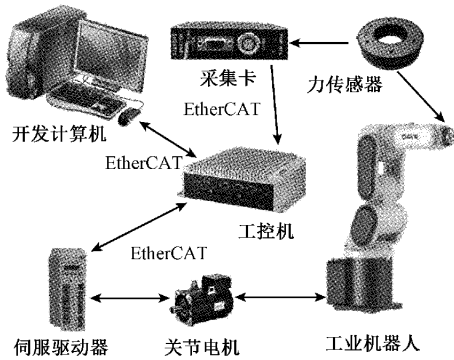


图 2 机器人实验平台

Fig. 2 Robot experimental platform

力矩参数辨识实验。分别控制 3 个关节在大范围区间内进行正、反运动,其他关节随机大范围运动,并采样不同角速度下的输出力矩。为避免惯性力矩和离心力影响辨识结果,本文截取匀速部分进行数据处理和拟合,根据式(19)~(21)只包含关节角度变量的三角函数回归矩阵,采用最小二乘法拟合结果获得的关节 2~4 重力矩的最简参数集如表 1 所示。再分别进行关节 2~4 重力矩的曲线拟合,拟合效果如图 3 所示。

表 1 机器人重力矩最简参数集

Table 1 The simplest parameter set of robot gravity moment

关节(i)	$H_c(q_i)$	π_{Gi}
2	$H_c(q_2)$	$[-0.134\ 2; 2.701\ 8; 0.270\ 4; -0.916; -0.025\ 5; -0.007\ 0; -0.085\ 0; 0.104\ 5; -0.007\ 0; 0.013\ 0; 0.057\ 6]$
3	$H_c(q_3)$	$[-1.938\ 1; 0.677\ 8; 0.141\ 4; -0.008; -1.076\ 2; 0.212\ 2; 0.272\ 8; 1.450\ 6; -0.007\ 7]$
4	$H_c(q_4)$	$[0.180\ 3; 0.035\ 1; 0.086\ 3; 0.089\ 8]$

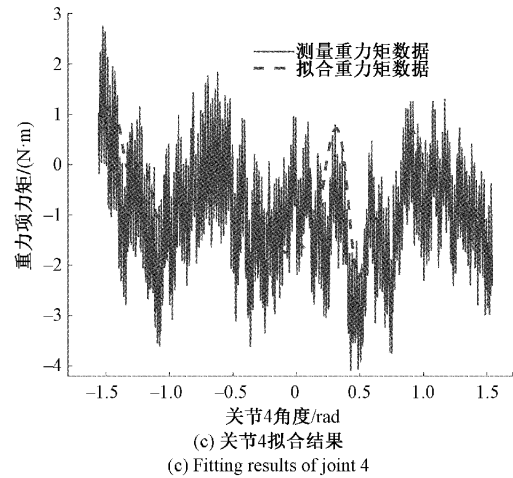
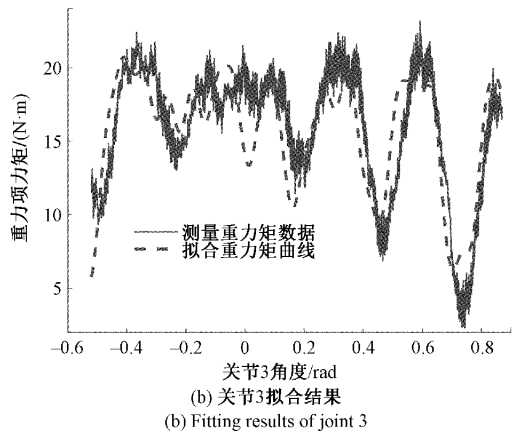
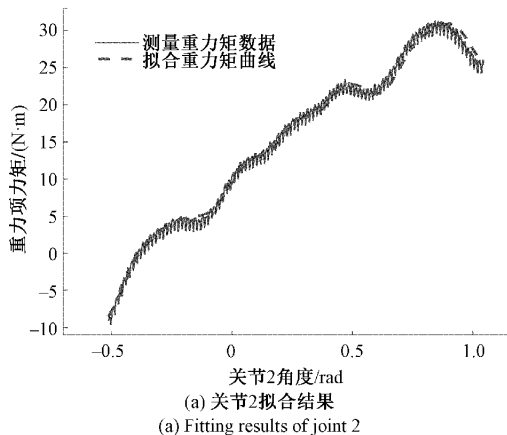


图 3 关节 2~4 的重力矩-角度拟合效果

Fig. 3 Gravity moment-angle fitted curve of joints 2~4

为验证重力矩辨识方法的有效性,采用厂家提供的各连杆质量与质心数据等,利用澳大利亚 PETER C 开发的逆动力学迭代牛顿欧拉方程(迭代 RNE 方法)进行对比验证实验。随机生成机器人关节角度 10 000 次,分别采用两种方法计算关节 2~4 的重力矩,求得迭代 RNE 方法与本文提出的重力矩求解方法的偏差结果如图 4 所示,关节 2~4 重力矩偏差平均值分别为 0.358 6 N、0.568 3 N、0.696 3 N,表明本文提出的重力矩辨识方法效果总体较好。

3) $f(\dot{q})$ 辨识效果

以关节 1~3 为例,分别控制 3 个关节在区间 $[-30^\circ, 30^\circ]$ 进行正、反运动,采样不用角速度下的输出力矩进行摩擦参数辨识。为避免惯性力矩和离心力影响辨识结果,本文截取 60 段匀速部分进行数据处理和拟合,获得 30 组数据点,根据最小二乘法拟合关节 1~3 的参数如表 2 所示。摩擦力-速度的拟合曲线效果如图 5 所示,由图可知拟合效果较好。本文引入最小二乘法的拟合残差平方和 ε 作为摩擦力模型拟合程度的量化指标, ε 的值越接近 0,说明拟合效果越好。分别对比连续

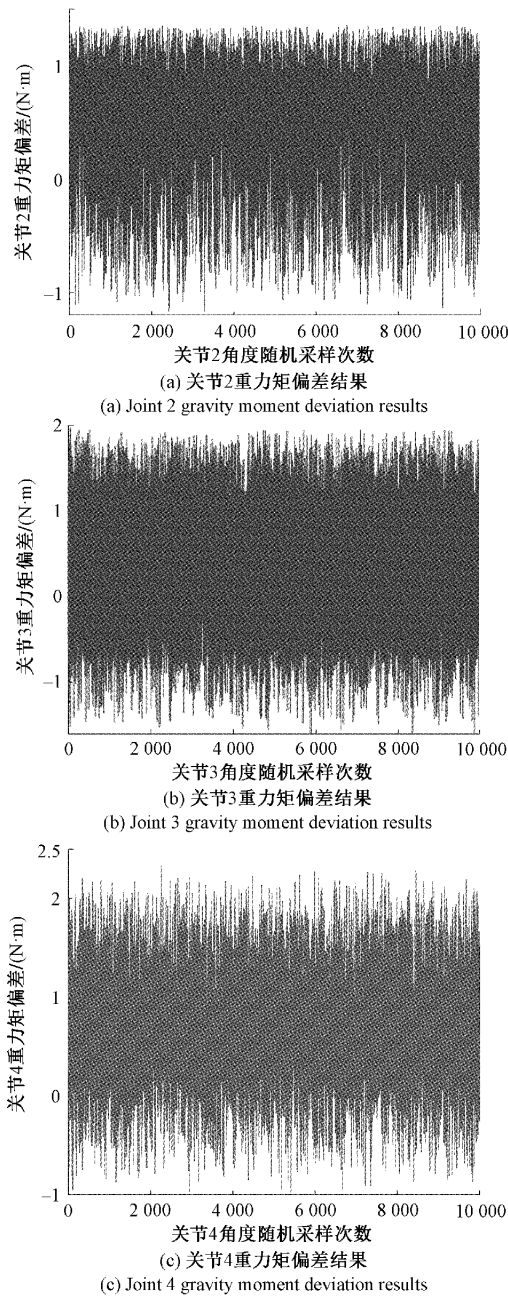


图4 关节2~关节4的重力矩偏差
Fig. 4 Gravity moment deviation of joint 2-4

摩擦模型、LuGre 摩擦模型^[11] 和库仑-粘性模型^[12] 对关节1~3的拟合结果如表3所示,结果表明连续摩擦模型的拟合效果最佳。

表2 连续摩擦模型拟合结果

Table 2 Fitting results of continuous friction model

关节(<i>i</i>)	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6
1	9.37	9.37	-0.03	-1.35	0.76	0.06
2	5.67	2.98	-0.06	-0.81	-19	0.60
3	1.38	-17.7	-0.12	13.0	3.72	0.26

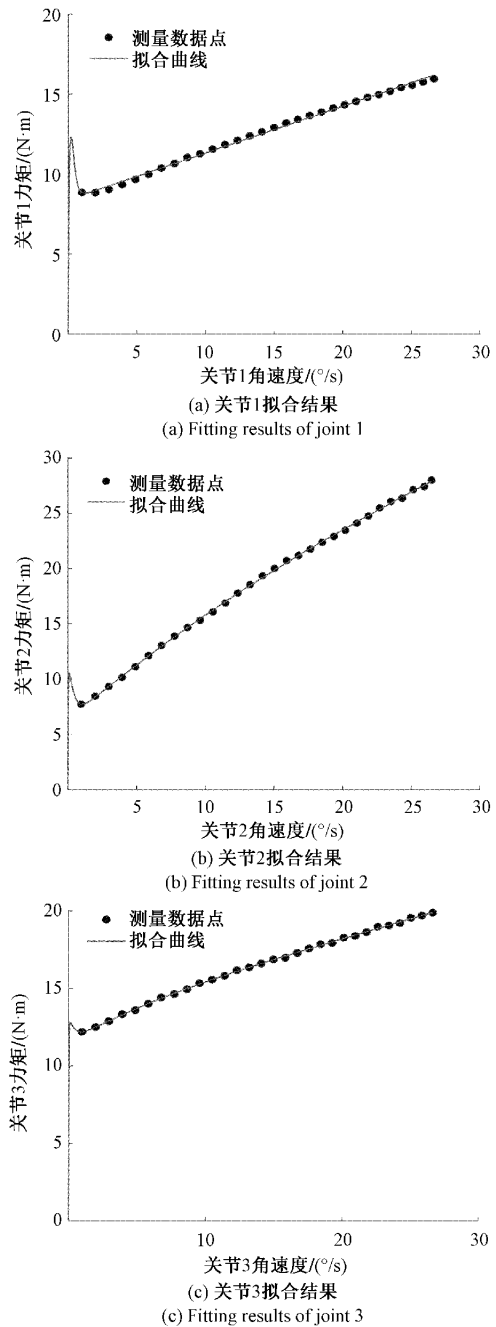


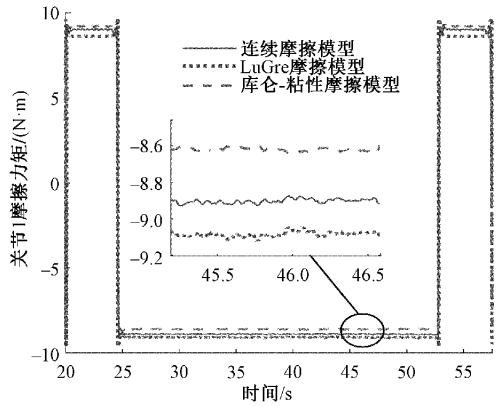
图5 关节1~3的摩擦-速度拟合效果
Fig. 5 Friction-velocity fitted curve of joint 1~3

表3 不同摩擦模型的 ε 值对比结果

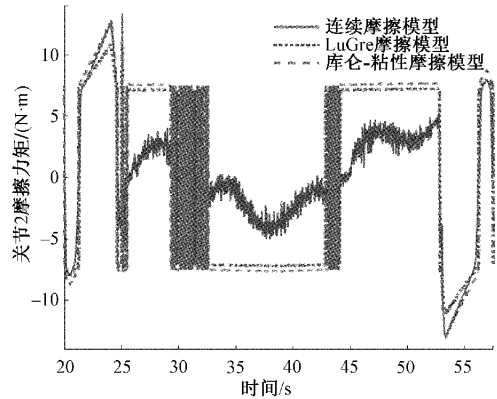
Table 3 Comparison results of ε value under different friction models

关节(<i>i</i>)	连续摩擦模型	LuGre 摩擦模型	库仑-粘性摩擦模型
1(ε)	0.421 9	0.458 0	0.481 0
2(ε)	0.376 0	4.866 2	4.866 2
3(ε)	0.075 6	0.999 1	0.999 1

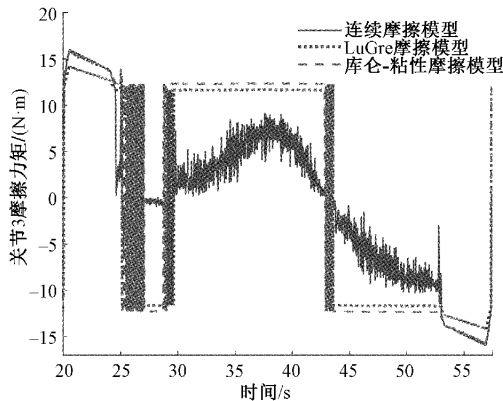
然而系统的摩擦模型参数会随着润滑、温度以及外部干扰等条件的改变而发生变化,其有效性需进一步验证。在某种机器人力/位混合控制应用中对比连续摩擦模型、LuGre 摩擦模型^[11]与库仑-粘性摩擦模型^[12]的补偿效果如图 6 所示。



(a) 关节1补偿结果
(a) Compensation results of joint 1



(b) 关节2补偿结果
(b) Compensation results of joint 2



(c) 关节3补偿结果
(c) Compensation results of joint 3

图 6 不同摩擦模型补偿效果

Fig. 6 Compensation results of different friction models

图 6 中,关节 1 进行机器人位置控制,运动速度连续稳定,3 种摩擦模型均能较好跟踪摩擦力;而关节 2 和关

节 3 进行机器人的力控制时, LuGre 摩擦模型和库仑-粘性模型摩擦的补偿结果出现正负的冲击和突变等,补偿效果较差,而连续摩擦模型能较好地实现机器人力控制关节的摩擦力补偿。

3 基于快速动力学模型的机器人力/位混合控制碰撞检测

3.1 机器人力/位混合控制碰撞检测方案

为实现机器人力/位混合控制的有效碰撞检测,需根据机器人的运动状态、动力学模型、力传感器数据等建立碰撞检测方案。建立的控制方案详细框图如图 7 所示,将控制方案分为 3 个控制流程:位置控制流程、力控制流程和碰撞检测流程,具体的流程如下:

1) 位置控制流程。为获得机器人末端期望的控制位置,根据机器人轨迹规划运动的时间函数,采用时序控制器 1 将机器人运动状态分为 3 段时序,分别为机器人末端与力控制对象未接触 t_1 时序段、力控制接触 t_2 时序段、力控制脱离接触 t_3 时序段。根据机器人力/位混合控制需求,规划运动轨迹,接着通过运动学模块将末端位置 x_d 转换到关节空间 q_d ,进一步转化为关节速度信号 \dot{q}_d ,从而建立起机器人工具末端位置和关节空间速度的关系。

2) 力控制流程。为获得机器人末端输出期望的控制力,需设定控制力输出,采用时序控制器 2 完成期望的控制力的输出,控制时序段为 t_c 。用六维力传感器测量末端力控外力的大小,得到在传感器坐标系下的测量值 F_s ,进一步消除 F_s 受零点偏移和末端工具重力的影响得到 F_c ,然后采用静力学方法坐标变换到工具坐标系为 $\{F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z\}$,传感器标定过程可参考方法^[21]。其中 F_z 与期望的控制力 F_d 作差可得 F_{err} ,通过 PID 控制器输出为 F_c ,再由导纳控制转变为末端的速度 \dot{x}_r ,通过雅各比矩阵的逆变换为关节的速度输入 \dot{q}_r ,与 \dot{q}_d 共同输入关节速度控制器。为保证机器人力控的安全性,则 t_c 应满足式(27)要求:

$$t_1 < t_c < t_1 + t_2 \quad (27)$$

3) 碰撞检测流程。为保障机器人末端力/位控制过程的安全性,当机器人处于力/位控制阶段,根据传感器标定后采集末端受力 $\{F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z\}$,由雅各比矩阵转置后补偿到各关节为 τ_s ,采集关节运动状态信息 $\{q, \dot{q}\}$ 由快速逆动力学模型得出机器人关节控制的理论力矩 τ_r ,以上两者再与机器人返回的实际力矩 τ 进行比较得到外力的估计为 τ_e ,再通过设计的碰撞检测算法分析 τ_e 的结果,从而实现碰撞检测。

力控制方向为基坐标系 z 方向,设定力控制输出为: $27.8 \text{ N} + 5\sin(t) \text{ N}$,时序控制器 2 控制时序段 t_c 为 $25.1 \text{ s} \sim$

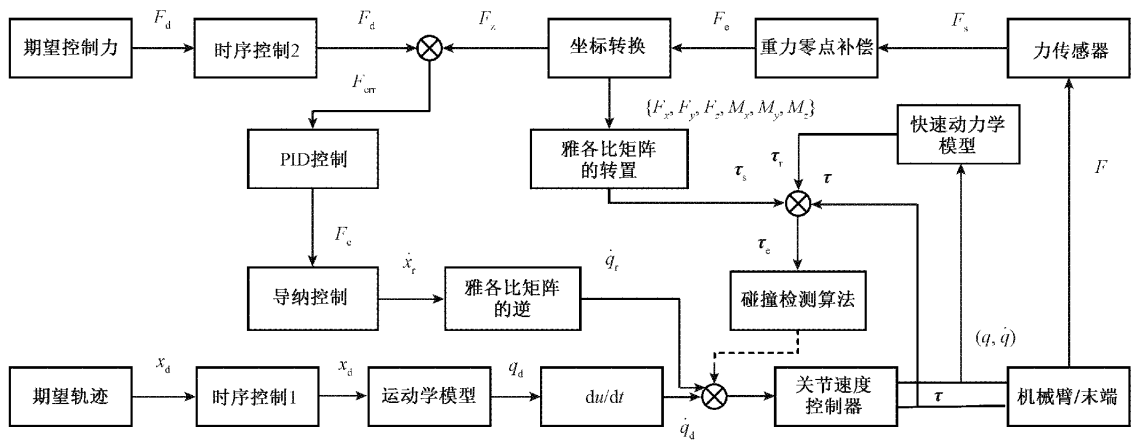


图7 机器人力/位混合控制碰撞检测方案

Fig. 7 Robot force/position hybrid control collision detection

52.9 s, PID 控制器的参数为 {5, 0.003, 1}, 导纳控制器的参数为 0.002, 设定碰撞检测的有效采样周期 $n = 25$ ms。因机器人末端执行器控制输出力与打磨平面的反作用力的大小相等, 采用六维力传感器检测机器人控制输出力的大小, 具体如图 8 所示。由图可知力控制刚开始时产生一定的冲击, 检测输出控制力的数据有一定波动, 随着机器人力/位混合有效控制, 检测数据围绕期望的控制力上下波动并趋于稳定, 设计的机器人力/位混合控制效果较好。

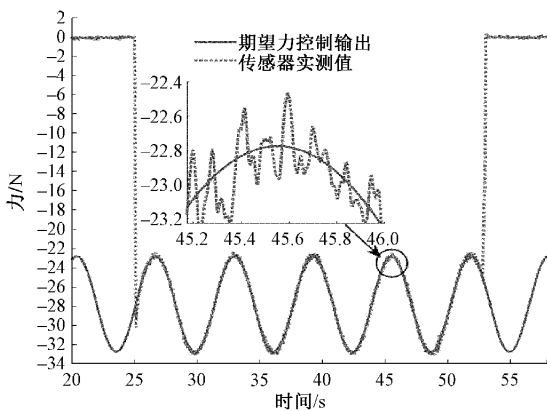


图8 传感器检测力控制效果

Fig. 8 Control effect of sensor detection force

然后采集机器人正常力/位混合控制下各关节的角度和角速度变化曲线如图 9、10 所示。

由图可知关节 1、关节 6 在力/位控制过程中速度和角度变化较大, 属于机器人位置方向的控制。而关节 2~5 的角度几乎没有变化, 关节角速度出现正负交替微弱变化, 属于机器人力方向的控制。根据机器人力控制关节和位置关节的不同, 实验将在机器人力/位混合控制过程中分别开展位置控制方向的碰撞检测和力控制方向的碰撞检测。

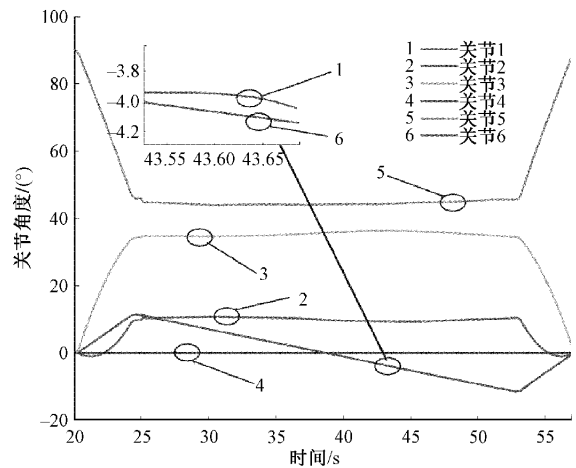


图9 机器人关节角度变化曲线

Fig. 9 Variation curve of robot joint angle

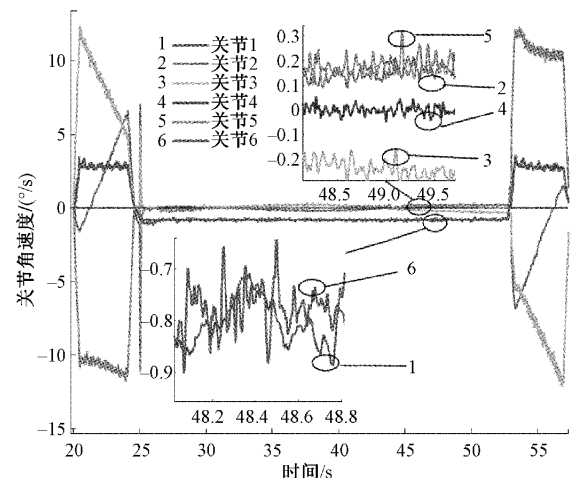
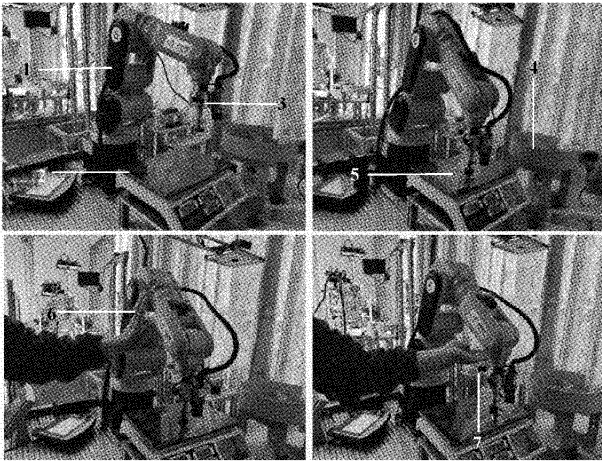


图10 机器人关节速度变化曲线

Fig. 10 Variation curve of robot joint speed

3.2 机器人力/位混合控制碰撞检测

实验设定控制力为 $27.8 \text{ N} + 5\sin(t) \text{ N}$, 以机器人位置控制关节 1、力控制关节 2 和关节 3 为例, 验证碰撞检测方法的有效性。机器人关节 1、关节 2 和关节 3 的碰撞检测阈值分别为 $\psi_1 = 4 \text{ N}$ 、 $\psi_2 = 8 \text{ N}$ 、 $\psi_3 = 8 \text{ N}$, 开展机器人力/位控制下碰撞检测实验过程如图 11 所示, 碰撞检测结果如图 12 所示。由图 11、12 可知, 首先进行机器人位置控制方向上的碰撞检测, 碰撞检测时间约 34.5 s, 关节 1 能够检测到碰撞检测, 而关节 2、关节 3 的阈值有微弱波动, 但效果不明显。最后开展机器人力控制方向上的碰撞检测, 碰撞检测的时间约 44.5 s, 关节 2、关节 3 能够较好地检测到碰撞检测, 而关节 1 阈值有微弱波动, 检测效果不明显。

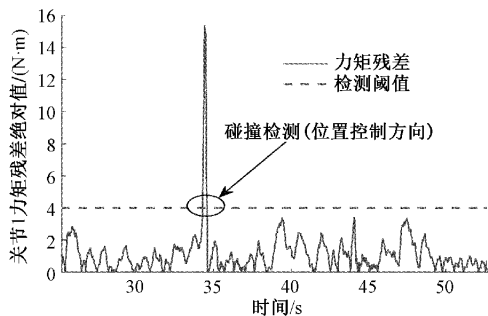


1. 机器人 2 打磨平台 3. 末端执行器 4. 力控制方向
5. 位置控制方向 6. 碰撞方向 7. 碰撞方向

图 11 机器人力/位混合控制碰撞检测实验过程

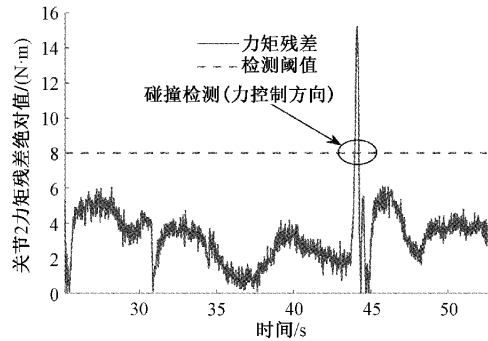
Fig. 11 Experimental process of robot force/position hybrid control collision detection

因此, 在对机器人相关重要动力学参数进行有效辨识的基础上, 针对机器人力/位混合控制时碰撞的方向, 需要分别检测位置控制关节和力控制关节上的力矩变化。而力控制关节由于承担着机器人的力控制输出, 与外界存在力交互导致能量有损耗, 力控制方向的检测阈值需要设置较大一些, 才能有效的实现碰撞检测。



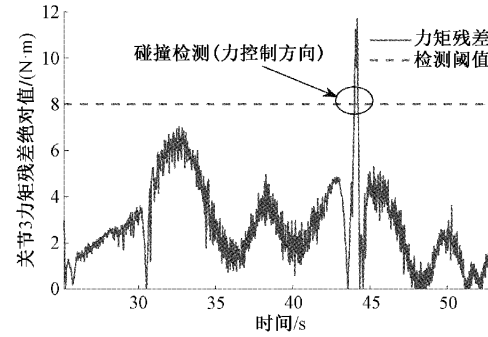
(a) 关节1碰撞检测结果

(a) Collision detection results of joint 1



(b) 关节2碰撞检测结果

(b) Collision detection results of joint 2



(c) 关节3碰撞检测结果

(c) Collision detection results of joint 3

图 12 机器人力/位混合控制碰撞检测结果

Fig. 12 Collision detection results of robot force/position hybrid control

4 结 论

本文提出的快速动力学辨识方法能够实现机器人力/位混合控制时的有效碰撞检测。该方法无需安装机器人关节力矩传感器, 对比计算出外部的碰撞力矩的绝对值和设定的阈值的结果, 判断机器人力/位混合控制的运行状况。本文方法主要解决以下问题: 1) 根据机器人力/位混合控制的需求, 建立快速动力学辨识模型, 减少数学符号推导和简化模型难度; 2) 提出基于拉格朗日法的最简重力矩参数集, 采用连续摩擦模型建模关节摩擦力, 实现机器人动力学参数的快速有效辨识; 3) 针对机器人力/位混合应用的复杂性, 分别监控力控制关节和位置控制关节力矩变化, 实现有效的异常碰撞检测, 保障操作人员和设备的安全。后续, 将开展机器人碰撞检测动态阈值跟踪检测等研究, 进一步分析与验证机器人力/位混合控制的安全性能。

参考文献

[1] 韦溟, 张丽艳. 机器人自动钻铆系统的现场快速自定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 66-75.

WEI M, ZHANG L Y. Fast on-site self-positioning method for robot automatic drilling and riveting

- system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 66-75.
- [2] 贾林,王耀南,何静,等.自由曲面打磨机器人非奇异终端滑模阻抗控制[J].电子测量与仪器学报,2020, 34(5):89-96.
JIA L, WANG Y N, HE J, et al. Non-singular terminal sliding mode impedance control of free-form surface grinding robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5):89-96.
- [3] 罗坚铭,陈新度,吴磊.移动机器人高精度上下料的研究[J].电子测量与仪器学报,2018, 32(11): 187-193.
LUO J M, CHEN X D, WU L. Research on high precision loading and unloading of mobile robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11):187-193.
- [4] HADDADIN S, LUCA A DE, ALBU-SCHAFFER A. Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(6):1292-1312.
- [5] 贾计东,张明路.人机安全交互技术研究进展及发展趋势[J].机械工程学报,2020,56(3):16-30.
JIA J D, ZHANG M L. Research progress and development trend of the safety of human-robot interaction technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3):16-30.
- [6] TAGHBALOUT M, ANTOINE J F, ABBA G. Experimental dynamic identification of a YuMi collaborative robot [J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(13):1168-1173.
- [7] 徐建明,赵帅.工业机器人动力学参数辨识与自适应控制方法研究[J].浙江工业大学学报,2020,48(4): 375-383+391.
XU J M, ZHAO SH. Research on dynamic parameter identification and adaptive control method of industrial robot [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2020, 48(4):375-383+391.
- [8] TAO J, YE B, TANG X, et al. Dynamic modeling and load identification of industrial robot using improved particle swarm optimization [C]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), IEEE, 2018:75-80.
- [9] URREA C, PASCAL, JOSE. Design, simulation, comparison and evaluation of parameter identification methods for an industrial robot [J]. Computers & Electrical Engineering, 2016: 791-806.
- [10] LI ZH J, YE J H, WU H B. Robot collision detection and distinction based on convolution filtering dynamic model [J]. Sensors and Materials, 2019, 31(12): 4113-4133.
- [11] 李智靖,叶锦华,吴海彬.基于卷积力矩观测器与摩擦补偿的机器人碰撞检测[J].浙江大学学报(工学版), 2019,53(3):427-434.
LI ZH J, YE J H, WU H B. Robot collision detection with convolution torque observer and friction compensation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019,53(3):427-434.
- [12] 张铁,李秋奋,邹焱飏.轻载机器人动力学参数辨识中的关节摩擦力辨识[J].润滑与密封,2020,45(7): 1-7.
ZHANG T, LI Q F, ZOU Y B. Joint friction identification in dynamic identification of light-load industrial robots [J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(7):1-7.
- [13] CAO P F, GAN Y H, DAI X ZH. Model-based sensorless robot collision detection under model uncertainties with a fast dynamics identification [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(3), DOI:10.1177/1729881419853713.
- [14] DU J, LOU Y. Simplified dynamic model for real-time control of the delta parallel robot [C]. IEEE International Conference on Information & Automation, 2016: 1647-1652.
- [15] LI X, WANG X, WANG J, et al. A kind of Lagrange dynamic simplified modeling method for multi-DOF robot[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2016, 31(4):2393-2401.
- [16] 吴晓敏,刘墩东,贺苗,等.机器人关节摩擦建模与补偿研究[J].仪器仪表学报,2018,39(10):44-50.
WU X M, LIU T D, HE M, et al. Research on friction modeling and compensation of robot manipulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10), 44-50.
- [17] 甘亚辉,曹鹏飞,戴先中.基于快速动力学辨识的免外部传感器机器人碰撞检测[J].控制理论与应用, 2019,36(9):1509-1519.
GAN Y H, CAO P F, DAI X ZH. Sensorless robot collision detection with a fast dynamics identification [J]. Control Theory & Applications, 2019,36(9):1509-1519.
- [18] MAKKAR C, DIXON W E, SAWYAR W G, et al. A new continuously differentiable friction model for control

systems design [C]. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2005: 600-605.

- [19] 贺苗,吴晓敏,邵桂芳,等. 基于RBFNN的机器人关节摩擦建模与补偿研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11):278-284.

HE M, WU X M, SHAO G F, et al. Research on friction modeling and compensation of robot joint based on RBFNN[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11):278-284.

- [20] 田斯慧,唐晓强,代海林,等. 基于摩擦力的机械臂零重力系统卸载性能[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019,59(10):831-837.

TIAN S H, TANG X Q, DAI H L, et al. Unloading ratio of a zero-g simulation system based on the friction of a space manipulator [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019,59(10):831-837.

- [21] 刘运毅,黎相成,黄约,等. 基于极大似然估计的工业机器人腕部6维力传感器在线标定[J]. 机器人, 2019,41(2):216-221+231.

LIU Y Y, LI X CH, HUANG Y, et al. Online calibration for the 6-axis force sensor in the wrist of industrial robot based on maximum likelihood estimation [J]. Robot, 2019,41(2):216-221+231.

作者简介



张春涛,2011年于北方民族大学获得学士学位,2014年于北方民族大学获得硕士学位,现为合肥工业大学博士研究生,主要研究方向为传感与测量技术。

E-mail: 15809584030@139.com

Zhang Chuntao received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from North Minzu University in 2011 and 2014, respectively. He is currently a Ph. D. candidate at Hefei University of Technology. His main research interest is sensor technology and its application.



王勇(通信作者),分别在1998年和2008年于合肥工业大学获得硕士学位和博士学位,现为合肥工业大学教授,主要研究方向为机械设计、传感与测量技术。

E-mail: simenkouwang@sina.com

Wang Yong (Corresponding author) received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Hefei University of Technology in 1998 and 2008, respectively. He is currently a professor at Hefei University of Technology. His main research interests include mechanical design, sensing and measuring technology.