

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003775

基于摩擦模型的机器人力/位安全控制方法研究^{*}

张春涛¹ 王 勇¹ 李家旺²
(1. 合肥工业大学 机械工程学院 合肥 230000; 2. 北京灵思创奇科技有限公司 北京 100000)

摘 要:针对机器人力/位控制应用的安全问题,提出一种基于动力学模型的快速实用机器人碰撞检测算法。首先,设计机器人力/位安全控制方案,建立基于动力学的碰撞检测数学模型;然后,基于静态 LuGre 摩擦模型辨识和补偿机器人关节摩擦力,设计简化的机器人力/位控制碰撞检测模型;最后,以轻型工业机械臂为实验平台,让机器人执行力/位控制与人类发生碰撞以验证算法的有效性。实验结果表明,提出方法可检测机器人各连杆发生 4 N·m 以上的异常碰撞,能够有效地实现机器人力/位安全控制,具有一定的工程参考价值。

关键词: LuGre 摩擦模型;动力学模型;力/位控制;碰撞检测

中图分类号: TN06;TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

Research on robot force/position safety control method based on friction model

Zhang Chuntao¹ Wang Yong¹ Li Jiawang²
(1. College of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230000, China;
2. Beijing Lingsichuangqi Technology, LTD Beijing 100000, China)

Abstract: Aiming at the safety problem of robot force/position control application, a fast and practical robot collision detection algorithm based on a dynamic model is proposed. Firstly, design the robot force/position safety control program, establish a dynamics-based collision detection mathematical model. Then, based on the static LuGre friction model to identify and compensate the robot joint friction, design a simplified robot force/position control collision detection model. Finally, using a light industrial robotic arm as an experimental platform, the robot executes force/position control to collide with human to verify the algorithm. The experimental results show that the proposed method can detect abnormal collisions of more than 4 N·m between the connecting rods of the robot, and can effectively realize the safety control of the robot force/position, which has a certain engineering reference value.

Keywords: LuGre friction model; kinetic model; force/position control; collision detection

0 引 言

随着机器人技术的快速发展,工业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进行钻削、装配、打磨^[1-3]等。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保人机交互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的行为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。

而其中依靠机器人自身传感器而无需外部传感的碰撞检测已成为当前人机安全交互技术的研究热点^[5-7]。

基于动力学模型的碰撞检测是实现机器人无传感器碰撞检测最常用的方法,目前已经有了许多研究成果^[8-10],其主要的难点在于动力学模型参数的有效辨识。而机器人的关节运动通过减速机机构实现,其关节摩擦力的不确定性较强,对于动力学建模的结果影响较大,目前还处于研究阶段。文献[11]在机器人碰撞检测中考虑了摩擦的影响,采用简单的阻尼-库伦模型对关节摩擦进行补偿。甘亚辉等^[12]采用库伦-粘滞摩擦模型辨识关节

外力 $\mathbf{F}_{ext} \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 通过机器人碰撞点的雅可比矩阵 $\mathbf{J}_2 \in \mathbf{R}^{6 \times n}$ 计算到各关节的等效力矩 $\boldsymbol{\tau}_{ei}$, 如式(3)。

$$\boldsymbol{\tau}_{si} = \mathbf{J}_1^T \mathbf{F}_i \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{ei} = \mathbf{J}_2^T \mathbf{F}_{ext} \quad (3)$$

根据以上碰撞情况,采用牛顿欧拉法或者拉格朗日法建立机器人刚体动力学方程:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}_i) \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{C}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}_i) + \mathbf{G}(\mathbf{q}_i) = \boldsymbol{\tau}_i - \boldsymbol{\tau}_{si} - \boldsymbol{\tau}_{ei} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{q}_i \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, $\dot{\mathbf{q}}_i \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, $\ddot{\mathbf{q}}_i \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 分别为关节 i 的参考关节角度、关节角速度和关节加速度, $\boldsymbol{\tau}_i$ 为机械臂连杆杆端的实际关节驱动力矩, $\mathbf{M}(\mathbf{q}_i) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是机器人关节的惯性系数矩阵, $\mathbf{C}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为关节的离心力和哥氏力矩阵, $\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}_i) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为关节的摩擦力项, $\mathbf{G}(\mathbf{q}_i) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为连杆重力力矩。

通过式(4)可变换为求外部的碰撞力矩为:

$$\boldsymbol{\tau}_{ei} = \boldsymbol{\tau}_i - \boldsymbol{\tau}_{si} - \{\mathbf{M}(\mathbf{q}_i) \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{C}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}_i) + \mathbf{G}(\mathbf{q}_i)\} \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\tau}_i$ 通过关节电流进行估计, $\boldsymbol{\tau}_{si}$ 通过机器人末端传感器检测后有雅各比矩阵转置换算出, $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ 由电机编码器以及速度差分求得, 机器人的动力学参数可根据机器人厂商提供机器人的数据从三维模型中获取, 而 $\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}})$ 不能模型中直接获得, 因此需要对机器人的关节摩擦力进行有效地辨识。

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 (collision detection, CD) 的数学模型如式(6)。

$$CD = \begin{cases} \text{no}, \forall i: |\boldsymbol{\tau}_{ei}| < \gamma_i \\ \text{no}, \exists i: |\boldsymbol{\tau}_{ei}| > \gamma_i \text{ or } m < n \\ \text{yes}, \exists i: |\boldsymbol{\tau}_{ei}| > \gamma_i \text{ and } m \geq n \end{cases} \quad (6)$$

设定阈值为 $\gamma_i \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$, 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以判断外部碰撞检测是否发生。

2 静态 LuGre 摩擦模型的关节摩擦力辨识

2.1 建立摩擦力模型

机器人动力学模型中的惯性参数、重力矩等可由机器人的三维模型中获取, 而摩擦力项作为动力学模型中最复杂的一项, 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, 当前主流的摩擦模型包括库仑-黏性摩擦模型、Stribeck 模型、LuGre 模型等^[19]。考虑

到机器人关节一般包含电机、谐波减速器和输出连杆等部分, 机器人关节摩擦用简单的黏性阻尼来表征并不合适, 特别对于是机器人从静态到运动的转换过程, 用线性阻尼表征摩擦往往会导致碰撞检测的误判。为减小不当的摩擦模型对关节力矩估计的影响, 采用静态 LuGre 摩擦模型对关节摩擦力模型进行补偿。静态 LuGre 模型描述了实验中观测到的大部分摩擦现象, 如 Stribeck、预滑动和可变最大静摩擦力等。模型假设接触面在微观上是不规则粗糙的, 有部分接触, 并且假设这两个刚性体通过一些弹性鬃毛相接触。模型的建立基于鬃毛的平均行为, 鬃毛的平均变形用 z 表示, 可建模为:

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{\sigma_0}{f(v)} z |v| \quad (7)$$

式中: v 指的是关节运行的速度; σ_0 为鬃毛刚度系数; $f(v)$ 通常描述 Stribeck 效应。而摩擦力矩由鬃毛的挠曲产生, 描述为:

$$f_m = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (8)$$

式中: f_m 为关节所受到的摩擦力矩; σ_1 微观的阻尼系数; σ_2 为粘性摩擦系数。关节运动克服静摩擦力后, 摩擦力在低速下先随速度的增加而减小, 然后才上升而产生的负斜率摩擦现象, 可建立 Stribeck 模型:

$$f(v) = f_c + (f_s - f_c) e^{-(v/v_s)^\sigma} \quad (9)$$

式中: f_c 为库伦摩擦力矩; f_s 为最大静摩擦力矩; v_s 是 Stribeck 速度, σ 为与接触表面几何形状相关的参数, v_s 和 σ 都是经验常数(通常取 $\sigma = 1$ 或 2)。当 $\sigma = 1$ 时为 Tustin 模型; $\sigma = 2$ 时为 Gauss 指数模型, 并与 Lorentzian 模型近似等效^[20]。

联立式(7)~(9), 并设定鬃毛的平均变形为常数, 速度为输入、摩擦力矩为输出的单输入单输出非线性系统的静态 LuGre 摩擦模型为:

$$f_m = (f_c z + f_s e^{-(v/v_s)^\sigma}) \text{sgn}(v) + \sigma_2 v \quad (10)$$

$$\text{令 } \sigma = 1, f_c z = A, f_s = B, \frac{1}{v_s} = C, \sigma_2 = D, \text{ 式(10)}$$

简化为:

$$f_m = A + B e^{(-Cv)} + Dv \quad (11)$$

2.2 摩擦力的参数辨识

为了获得摩擦力参数, 采用控制机器人每一个单关节以不同的速度运动, 提取关节不同速度值, 辨识单连杆关节的摩擦力。考虑机器人模型偏差、连杆重力和运动惯性等对关节摩擦力测量的影响, 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 次不同速度的正、反方向的来回梯形速度规划运动, 仅提取匀速部分进行数据分析。则其关节运动的加速度为 0, 相应的 $\{\mathbf{M}(\mathbf{q}_i) \ddot{\mathbf{q}}_i, \mathbf{C}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)\}$ 为 0, 式(4)的动力学方程简化为:

$$f(\dot{q}_i) + G(q_i) = \tau \tag{12}$$

进一步,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,建立方程有:

$$\sum_{i=1}^n [G(+q(i)) + f(+\dot{q}(i))] = \sum_{i=1}^n \tau^+(i) \tag{13}$$

$$\sum_{i=1}^n [G(-q(i)) + f(-\dot{q}(i))] = \sum_{i=1}^n \tau^-(i) \tag{14}$$

式中: $G(+q(i))$ 和 $G(-q(i))$ 分别为关节进行*i*次正、反方向的等效重力值,运动过程中同一位置的 $G(+q(i))=G(-q(i))$, $f(+\dot{q}(i))=-f(-\dot{q}(i))$,将式(13)和(14)分别相减可得:

$$\sum_{i=1}^n f(\dot{q}(i)) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\tau^+(i) - \tau^-(i)) = \sum_{i=1}^n \tau_f \tag{15}$$

将式(15)中的每一项提出来:

$$R_2 = \{(\dot{q}_1, \tau_{f1}), (\dot{q}_2, \tau_{f2}), \cdots, (\dot{q}_i, \tau_{fi}), \cdots, (\dot{q}_n, \tau_{fn})\} \tag{16}$$

由式(16)可建立起机器人的不同关节速度与摩擦力对应的数据组集合。根据式(11)静态 LuGre 摩擦简化模型,采样 N 组实验数据(关节力矩、关节速度),利用最小二乘对摩擦力模型进行拟合。将式(11)中的未知参数重新整理为回归形式如下:

$$\tau_{fn} = H(\dot{q})[A, B, C, D]^T \tag{17}$$

$H(\dot{q}) = [H(\dot{q}_1), H(\dot{q}_2), \cdots, H(\dot{q}_n)]$ 为包含关节角速度的回归矩阵, $\tau_{fn} = [\tau_{f1}, \tau_{f2}, \cdots, \tau_{fn}]$ 关节输出的驱动力矩, $[A, B, C, D]^T$ 为静态 LuGre 摩擦模型未知的参数向量集。将式(17)进一步变换为:

$$[A, B, C, D]^T = H(\dot{q})^+ \tau_{fn} \tag{18}$$

式中: $H(\dot{q})^+$ 为 $H(\dot{q})$ 伪逆矩阵,即可估计摩擦力模型参数,辨识出关节的摩擦力。

3 实验结果

3.1 实验平台

实验平台采用的是轻型 6 轴工业机器人,其外观以及控制系统结构如图 2 所示,相应的 D-H 参数如表 1 所示。控制系统采用的是半实物仿真控制平台(北京灵思创奇:LinksRT),运行 VxWork 实时操作系统。工控机控制系统的采样周期 T 为 2 ms,与六维力传感器、机器人伺服驱动之间采用 EtherCAT 总线进行数据通信。实验采用 SRI 扭矩传感器获取机器人的力/位控制下的力反馈信息,并配置 M8128 采集卡预处理传感器数据。设计的机器人控制算法可直接采用 Simulink 编译生成 C 代码下载到嵌入式工控机中运行程序功能。



图 2 机器人实验平台

Fig. 2 Robot experiment platform

表 1 机器人 D-H 参数

Table 1 The D-H parameters of the robot

关节 i	$\theta_i / (^\circ)$	d_i / m	a_i / m	$\alpha_i / (^\circ)$
1	θ_1	0.320 0	0.049 9	$-\pi/2$
2	θ_2	0	0.270 0	0
3	θ_3	0	0.070 4	$-\pi/2$
4	θ_4	0.299 1	0	$\pi/2$
5	θ_5	0	0	$-\pi/2$
6	θ_6	0.078 5	0	0

3.2 关节摩擦参数辨识实验

为精确的对关节摩擦参数进行辨识,采取图 3 所示的关节角度、角速度和力矩信息,分别控制 6 个关节在区间 $[-30^\circ, 30^\circ]$ 进行关节往返运动。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 个数据点,根据 2.2 节方法计算出 6 个关节的参数向量集如表 2 所示。6 个关节摩擦力的拟合曲线效果如图 4 所示,由图 4 可知,静态 LuGre 摩擦模型的辨识效果较好。

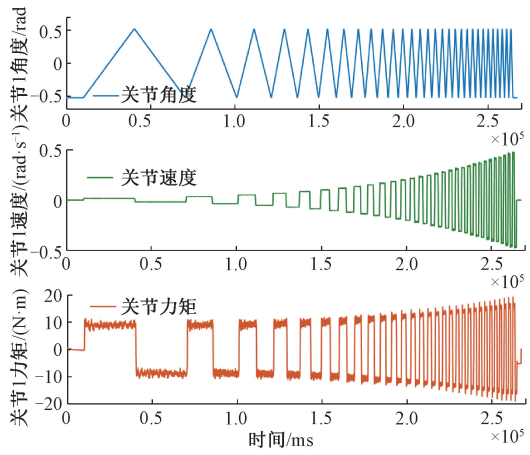


图 3 机器人关节角度、速度和力矩输出

Fig. 3 Robot angle, joint speed and torque output

表2 静态 LuGre 摩擦辨识结果

关节 <i>i</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
1	7.099 8	2.536 1	0.458 9	0.296 0
2	-0.127 7	7.222 8	0.005 4	0.613 7
3	5.807 3	5.807 3	0	0.214 8
4	17.877 9	3.994 7	0.627 4	0.281 4
5	4.729 0	4.670 6	0.001 5	0.193 6
6	3.959 5	3.959 5	0	-0.024 3

3.3 机器人力/位控制碰撞检测

1) 实验方案

根据机器人力/位安全控制的方案,控制机器人的末端沿着某光滑平面进行打磨,力控制方向为基坐标系 z 方向,位置控制方向由 x 轴和 y 轴构成的平面。机器人位置时序控制器1的控制时序 t_1 为20~25 s、力控制接触 t_2 为25~53 s、脱离接触 t_3 为53~57.5 s。设定时序控制器2控制时段 t_c 为25.1~52.9 s。

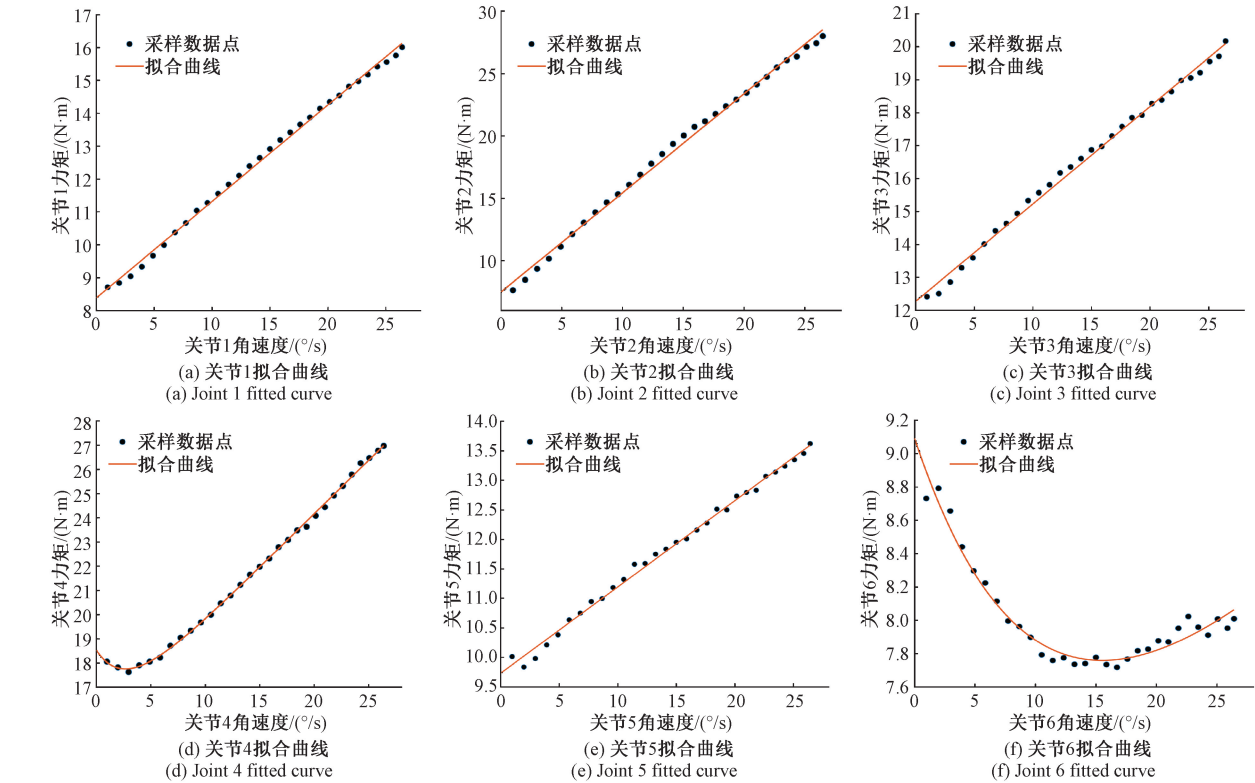


图4 静态 LuGre 模型拟合曲线
Fig.4 Static LuGre model fitting curve

开展碰撞检测实验前采集机器人正常力/位控制下6个关节的角度和角速度变化曲线如图5、6所示。图中关节1、关节6在力/位控制过程中速度和角度变化较大,而关节2~5的角度几乎未变化,关节角速度出现正负交替微弱变化,可以判定机器人的关节1、关节6执行位置控制,关节2~5主要执行力控制。而关节2~5的持续换向,速度变化正负交替频繁,现有的摩擦模型不能较好的进行建模。为保障机器人力/位控制的安全性,本文简化机器人的机构模型,将力控制关节的连杆2~5等效为一个连杆,在力/位控制过程中通过随机碰撞关节2~5连杆,检测相连接的位置控制关节1的实际力矩变化量来验证碰撞效果。

2) 碰撞检测结果

根据实验方案,设定力控制输出为恒力27.8 N,碰撞

检测阈值 γ_1 为4 N·m,有效采样周期 $n=25$ ms,开展机器人力/位控制下碰撞检测实验过程如图7所示。机器人恒力/位检测实验结果见图8,对比理论计算的力矩与实际力矩的平均差值在1 N·m,表明采用静态 LuGre 模型对关节摩擦进行补偿效果较好。分别在28、38 s人为的对机器人连杆3进行位置控制方向的碰撞,当外力矩超过4 N·m,持续时间超过25 ms,机器人控制器判断发生了异常碰撞。

为进一步验证算法的有效性,设定机器人的控制力为 $27.8\text{N}+5\sin(t)\text{N}$, $\gamma_1=4\text{N}\cdot\text{m}$, $n=25\text{ms}$,开展碰撞检测实验结果如图9所示。分别在第29和41 s人为的对机器人的关节4进行位置控制方向的碰撞,机器人同样能较好的检测到异常碰撞。

以上实验结果表明提出的简化力控制关节连杆机

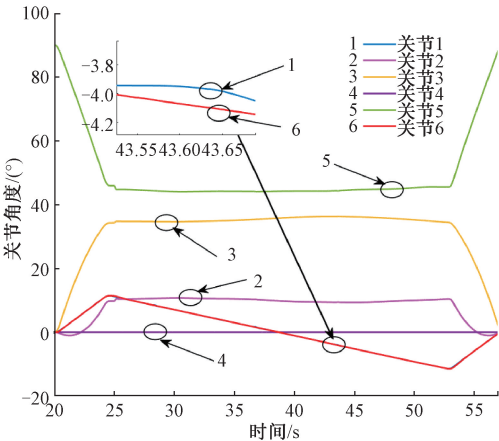


图 5 关节角度曲线
Fig. 5 Joint angle curve

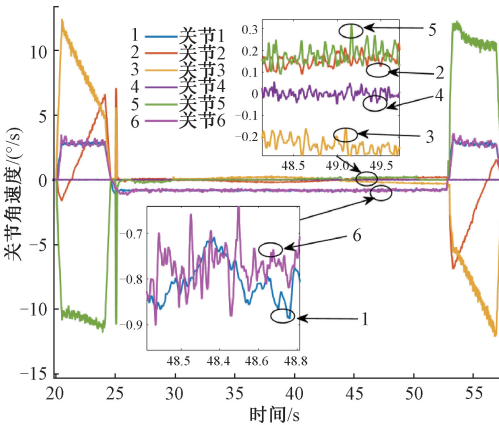
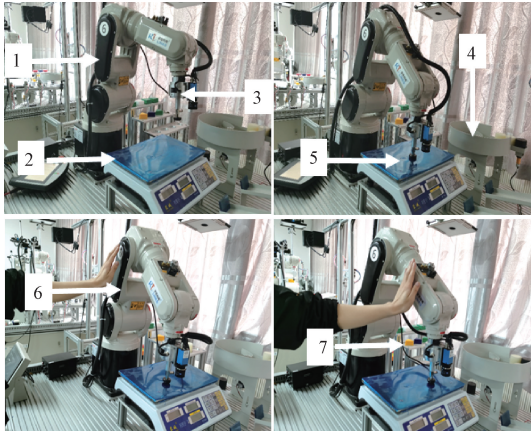


图 6 关节角速度曲线
Fig. 6 Joint angular velocity curve



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. 人为碰撞; 7. 人为碰撞
图 7 机器人力/位控制下碰撞检测实验截图
Fig. 7 Screenshot of collision detection experiment
under robot force/position control

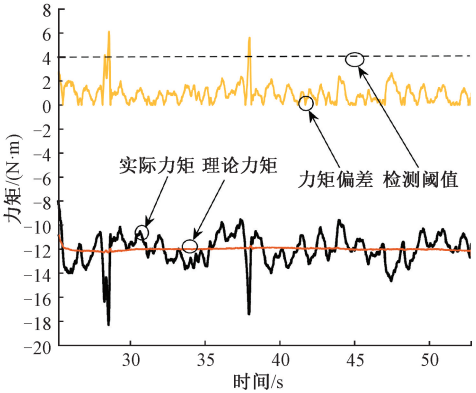


图 8 机器人恒力/位控制碰撞检测效果
Fig. 8 Robot constant force/position control
collision detection effect

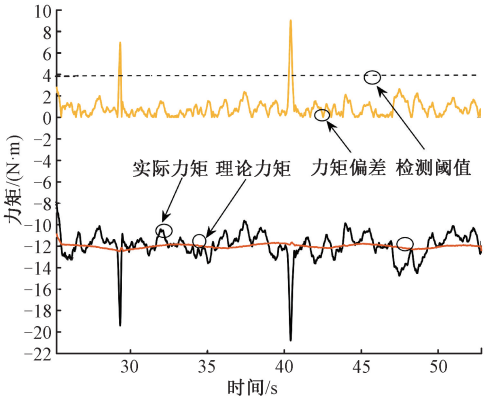


图 9 机器人变力/位控制碰撞检测效果
Fig. 9 Robot variable force/position control
collision detection effect

构, 监控相连的位置控制关节的力矩变化量的方法是可行的, 可快速有效地实现机器人力/位控制应用的碰撞检测。

4 结 论

本文提出一种基于动力学模型快速实用机器人碰撞检测算法。设计可行适用的机器人力/位安全控制方案, 采用静态 LuGre 模型对关节摩擦进行补偿, 提高动力学模型辨识的效果, 提出简化力控制关节连杆机构, 监控相连的位置控制关节力矩变化量的方法, 避免了力控制关节动力学建模困难的问题, 较好地实现了机器人力/位控制的有效碰撞检测, 在实际工况下的安全生产有一定的工程参考价值。后续, 将进一步研究机器人力/位控制应用下的动力学建模问题, 并在机器人力/位控制应用中探究人机协作的安全特性。

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] 董恣,张立建,易旺民,等. 基于动力学前馈的空间机器人多销孔装配力柔顺控制[J]. 机械工程学报, 2019, 55(4): 207-217.
DONG Q, ZHANG L J, YI W M, et al. Force compliance control of multi-peg-in-hole assembling by space robot based on dynamic feed forward[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(4): 207-217.
- [3] 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.
- [4] HADDADIN S, LUCA A D E, 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] ZHANG T, JING D H. Collision detection method for industrial robot based on envelope-like lines[J]. The Industrial Robot, 2019, 46(4): 510-517.
- [7] HOU Y C, SAHARI K, HOW D. A review on modeling of flexible deformable object for dexterous robotic manipulation[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(3): 172988141984889.
- [8] CAO P, GAN Y, DAI X. Model-based sensorless robot collision detection under model uncertainties with a fast dynamics identification[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(3): 72988141985371.
- [9] LI Z, YE J, WU H. Robot collision detection and distinction based on convolution filtering dynamic model[J]. Sensors and Materials, 2019, 31(12): 4113-4133.
- [10] REN T, DONG Y, WU D, et al. Collision detection and identification for robot manipulators based on extended state observer[J]. Control Engineering Practice, 2018, 79: 144-153.
- [11] CHEN S X, LUO M Z, HE F. A universal algorithm for sensorless collision detection of robot actuator[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 10(1): 1-10.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 孙晓军,宋代平,王薪宇. 机器人碰撞观测器设计与实现[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(10): 1483-1488.
SUN X J, SONG D P, WANG X Y. Design and implementation of robot collision observer[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(10): 1483-1488.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 张立建,胡瑞钦,易旺民. 基于六维力传感器的工业机器人末端负载受力感知研究[J]. 自动化学报, 2017, 43(3): 439-447.
ZHANG L J, HU R Q, YI W M. Research on force sensing for the end-load of industrial robot based on a 6-axis force/torque sensor[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(3): 439-447.
- [18] 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.
- [19] 吴晓敏,刘瞰东,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.
- [20] 丁千,翟红梅. 机械系统摩擦动力学研究进展[J]. 力学进展,2013,43(1):112-131.
- DING Q, ZHAI H M. The advance in researches of friction dynamics mechanical systems [J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(1):112-131.

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、机器人控制技术。

E-mail:15809584030@139.com

Zhang Chuntao received his B. Sc. degree in 2011 from North Minzu University, received his M. Sc. degree in 2014 from

North Minzu University. Now he is a Ph. D. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include sensor technology and its application, robot control technology.



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、服务机器人。

E-mail:simenkouwang@sina.com

Wang Yong (Corresponding author) received M. Sc. and Ph. D. from Hefei University of Science and Technology in 1998 and 2008, respectively. Now he is a professor at Hefei University of Technology. His main research interests include mechanical design, sensing and measuring technology, service robot.



李家旺, 2016 年于长江大学获得学士学位, 2019 年于集美大学获得硕士学位, 现为北京灵思创奇科技有限公司工程师, 主要研究从事方向为机器人运动控制技术。

E-mail:1981700046@qq.com

Li Jiawang received his B. Sc. degree from Changjiang University in 2016 and M. Sc. degree from Jimei University in 2019. Now he is an engineer of Beijing Lingsi Chuangqi Technology Co., Ltd., and his main research interest includes robot motion control technology.