

基于高阶扰动观测器的机器人碰撞检测算法

Robot collision detection algorithm based on high order disturbance observer

陈一豪^{1,2}, 李毅^{1,2}, 朱明超^{1*}CHEN Yi-hao^{1,2}, LI Yi^{1,2}, ZHU Ming-chao^{1*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 协作机器人在人机协作过程中有发生碰撞的可能, 如果碰撞发生会对机器人或操作人员造成较大的伤害。为了提高机器人在协作过程中的安全性, 提出了一种基于高阶扰动观测器的碰撞检测算法, 提出的高阶扰动观测器比一阶扰动观测器具有更好的实时性和鲁棒性。在高阶扰动观测器给出的外力矩基础上提出了接触危险系数的碰撞阈值用于检测是否发生碰撞, 通过数值仿真模型对高阶扰动观测器及碰撞检测阈值进行了仿真验证。最后在机器人上进行了碰撞检测实验, 实验结果表明该碰撞检测算法具有良好的检测效果, 能够实现碰撞的实时检测, 提高了机器人的人机协作安全性。

关键词: 机器人; 碰撞检测; 扰动观测器**中图分类号:** TP242**文献标志码:** A**文章编号:** 1009-0134(2022)06-0143-05

0 引言

机器人可以在复杂环境中替代人类高效地完成许多重复性工作, 在其工作过程中, 很可能与环境中的的人和物体发生碰撞而造成严重的后果^[1]。在复杂的任务环境中, 通常需要机器人与人协作完成特定的工作, 在这种情形下机器人的安全性就显得尤为重要^[2]。安全性的提高需要机器人具有感知危险的能力, 在发生碰撞的情况下能够做出规避动作以保证操作人员与机器人自身的安全。最常见的提高机器人安全性的方法是碰撞检测^[3], 利用碰撞检测技术可以在碰撞发生时检测到由碰撞产生的外力, 并执行保护措施避免产生伤害。

最常见的碰撞检测方法是采用机器人末端安装的六维力传感器^[4]感知外部碰撞, 这种方法可以精确的检测到传感器后端的外部碰撞力, 无法检测传感器前端发生的碰撞; 采用关节力矩传感器^[5]可以检测到所有能对机器人关节力矩产生影响的碰撞, 力矩传感器的安装增加了关节的质量和体积并且提高了机器人的应用成本; 机器人表面覆盖敏感皮肤进行检测^[6], 可以精确的检测到碰撞发生的位置和碰撞力的大小, 但是需要在所有接触表面覆盖敏感皮肤, 成本较高且会使机器人的布线难度增大。以上有传感器检测的方法存在传感器成本高, 需要修改机器人结构等缺点。因此也有学者提出了无需增加额外传感器的碰撞检测方法, 利用伺服电机返回的关节实时电流、位置和速度等信息, 通过选取合适的观测量也能够准确判断碰撞的发生。目前在该方向已有较多的研究成果, 赵汉杰^[7]提出了

基于电机电流变化率的动态阈值检测方法, 通过对不同速度下的电机电流变化率进行标定得到了较好的碰撞检测效果; 李智靖等^[8]提出了一种基于卷积力矩观测器和摩擦补偿的碰撞检测算法, 减小了系统的观测误差; Xu等^[9]利用碰撞中的力会引起速度变化提出了基于优化速度偏差的检测算法, 将碰撞引起的速度变化与目标速度的差值作为观测量, 也能较好的检测到机器人的碰撞; Han等^[10]设计了动量观测器进行双臂机器人的碰撞检测, 避免了计算机器人关节的加速度。

机器人在发生碰撞时外力急剧变化, 需要碰撞检测系统具有很好地实时性, 也需要碰撞检测系统具有良好的抵抗噪声能力。钱琮伟等^[11]用基于广义动量的扰动观测器检测碰撞, 但系统的实时性不够理想。吴海彬等^[12]设计了基于动量偏差观测器的碰撞检测算法, 并通过性能调整函数使观测器的实时性得到了较大提高, 系统的实时响应在20ms左右, 但是在系统输入存在噪声时外力观测结果受到的干扰较大。本文设计了高阶扰动观测器用于机器人的碰撞检测, 在保证碰撞检测系统实时性的同时提高了系统的抵抗噪声能力。通过搭建计算机仿真系统验证观测器的实时性和鲁棒性, 最后在机器人平台上进行了碰撞实验。

1 基于扰动观测器的碰撞检测

1.1 高阶扰动观测器设计

串联机器人与外部发生碰撞时机器人的动力学方程可表示如式(1)所示。

收稿日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金 (62173047)

作者简介: 陈一豪 (1997-), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 研究方向为机器人动力学及碰撞检测。

通讯作者: 朱明超 (1980-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士, 研究方向为领域为机器人运动学、动力学与控制。

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

式(1)中: $q, \dot{q}, \ddot{q}$ 分别为机器人系统的关节位置、速度、加速度矢量; $M(q)$ 为机器人的惯性矩阵; $C(q, \dot{q})$ 包含了科氏力和离心力项; $g(q)$ 为机器人各关节承受的重力矢量; τ 为机器人关节驱动力矩, 表示机器人所受外力在各关节的等效外力矩。机器人在运动过程中发生碰撞时有外力作用于机器人的关节, 关节的等效外力矩 τ_{ext} 不为零。

机器人的广义动量定义为:

$$p = M\dot{q} \quad (2)$$

对机器人广义动量进行求导得为:

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

已知 $\dot{M} - 2C$ 为反对称矩阵^[13], 即:

$$\dot{M} = C + C^T \quad (4)$$

将公式和代入, 得到广义动量的导数为:

$$\dot{p} = \tau - \tau_{ext} + C^T\dot{q} - g \quad (5)$$

机器人的运动由每个关节的旋转运动组成, 由公式可知各关节的广义动量等于作用在该关节所有力矩之和的积分, 机器人关节的广义动量与关节所受外力矩间具有解耦性, 可以基于该性质设计扰动观测器估计关节所受外力矩的大小。设计的扰动观测器结构可表示为:

$$r = \int_0^t \{-K_1 r - \int_0^t [K_2 r + K_3(p - \hat{p})] dt\} dt \quad (6)$$

式(6)中: r 为观测器观测得到的外力值; $k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0$ 为增益矩阵; $\hat{p}$ 为动量估计值, 其导数的表示为:

$$\dot{\hat{p}} = \tau + C^T\dot{q} - g - r \quad (7)$$

将 $\hat{p}$ 的表达式代入可得到扰动观测器具体的表达式如式(8)所示:

$$r = \int_0^t \{-K_1 r - \int_0^t [K_2 r + K_3(p - \int_0^t (\tau + C^T\dot{q} - g - r) dt) dt] dt\} dt \quad (8)$$

在仅使用上式作为观测器时观测结果的实时性较差, 为了提升观测器的动态性能, 构造 f_e 作为前馈调整项加入观测器, 如式(9)所示:

$$f_e = \int_0^t \left(\int_0^t [\tau + C^T\dot{q} - g] dt - p \right) dt \quad (9)$$

调整后的观测器结构可表示为:

$$r = \int_0^t \{-K_1 r - \int_0^t [K_2 r + K_3(p - \hat{p})] dt\} + K_3 K_4 f_e \quad (10)$$

将 $\hat{p}$ 和 f_e 代入式(10)可得到观测器结构表示为:

$$r = \int_0^t \left\{ K_3 K_4 \left[\int_0^t (\tau + C^T\dot{q} - g) dt - p \right] - K_1 r - \int_0^t [K_2 r + K_3(p - \int_0^t (\tau + C^T\dot{q} - g - r) dt) dt] \right\} dt \quad (11)$$

式(11)中 $k_4 > 0$ 为前馈调整项增益矩阵。

调整后的高阶扰动观测器的结构如图1所示。图中: $H(q, \dot{q}) = C^T\dot{q} - g$, 其余各项的含义与前文中的公式一致。

1.2 碰撞检测阈值

在以外力矩信息为依据判断碰撞发生时, 通常对外力矩设置大于模型误差固定阈值即可判断是否有碰撞发生, 但是当模型误差较大时检测碰撞的实时性受影响较大。实

际碰撞发生时, 通常外力矩变化速度较快, 通过对外力矩的变化速度设置阈值也能检测到碰撞发生, 但是在机器人以较慢速度接触弹性物体时无法准确检测碰撞。

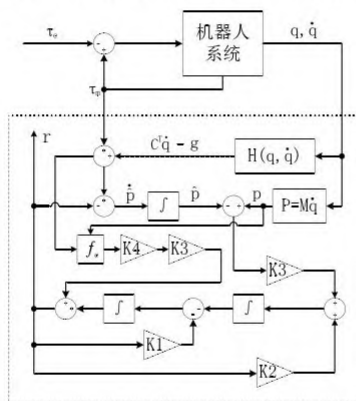


图1 高阶扰动观测器结构图

为了提高碰撞检测的实时性而又不漏检碰撞的发生, 本节以外力矩和外力矩变化速度为基础提出了接触危险系数用于判断是否有碰撞发生。

关节 i 的接触危险系数定义为:

$$E_i = K_{Eti} r_i + K_{Evi} \dot{r}_i \quad (12)$$

式(12)中: r_i 为观测器得到的关节 i 的外力矩大小; $\dot{r}_i$ 为外力矩变化速度大小, 由 r_i 差分得到; K_{Eti} 、 K_{Evi} 分别为关节 i 的力矩危险系数和力矩变化速度危险系数, 单位为 Nm^{-1} 和 $(Nm/s)^{-1}$ 。

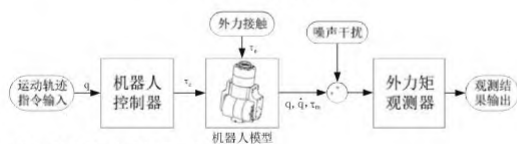
无碰撞发生时, 关节 i 的接触危险系数存在如式的关系, 其中 E_{lim} 为关节 i 的碰撞检测阈值, 即不满足该条件时判断碰撞发生。

$$|E_i| < E_{lim} \quad (13)$$

2 碰撞检测算法仿真验证

为了验证该高阶扰动观测器的性能, 通过在Simulink中搭建仿真环境进行仿真验证, 并与一阶扰动观测器进行对比。仿真系统组成如图2所示, 运动轨迹为已知的任意轨迹, 机器人控制器负责将输入的位置指令转化为关节实际的驱动力大小, 机器人模型在关节电机驱动和外力的作用下运动, 外力矩观测器采集机器人的运动信息并输出外力矩的观测结果, 其中观测器采集到的运动信息有一定的噪声干扰。

图2 仿真系统



2.1 观测器仿真结果对比

仿真条件设置为, 关节1受到幅值为15Nm频率为5rad/s的正弦规律变化的外力, 关节2受到大小为±20Nm持续时间为1s的阶跃型外力。通过对实际机器人系统传感器噪声统

计特性的分析, 设定关节位置噪声幅值为 0.02° , 速度噪声幅值为 $0.3^\circ/\text{s}$, 关节输出力矩噪声幅值为 2Nm 。

在以上设定的外力及噪声条件下, 高阶扰动观测器的仿真结果如图3所示, 图中, τ_1 、 τ_2 为关节1和关节2所受实际外力大小, r_1 、 r_2 为高阶扰动观测器的观测结果, r_{1d} 、 r_{2d} 为一阶扰动观测器的观测结果。由图3中的仿真结果可知, 本文的高阶扰动观测器的观测结果与实际外力间的延迟明显优于一阶扰动观测器, 并且观测结果中噪声的幅值也有明显的降低, 表明设计的高阶扰动观测器与一阶扰动观测器相比具有一定的性能提升。

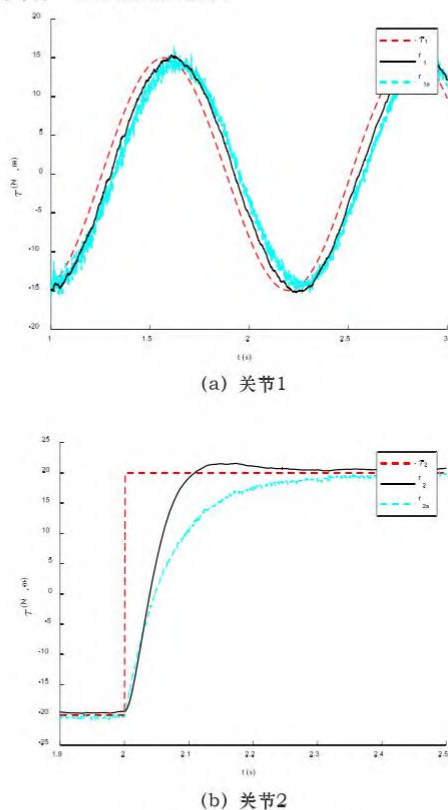


图3 扰动观测器仿真结果

2.2 碰撞检测阈值仿真验证

前文提出了接触危险系数, 并在接触危险系数的基础上设定了碰撞检测条件, 本节在仿真系统中进行碰撞检测阈值的对比测试, 确定其是否具有比简单的外力矩阈值更好的检测效果。

以关节2为例在仿真系统中进行测试, 模拟实际环境中机器人与外界的不同碰撞情况, 对比接触危险系数与固定阈值的检测结果。仿真过程中在2s、4s、5.5s、和8.5s共发生四次外部接触, 其中1s至3s期间模拟机器人由于模型存在的观测误差, 在5.5s时的接触为预期的主动接触。结果如图4所示, 图4(a)为关节1所受外力矩, 图4(b)为关节1的接触危险系数。表1展示了两检测阈值在仿真的四次碰撞下检测到碰撞的时间, 未标出时间的即为未检测到碰撞发

生。由表中数据可知, 在2s的第一次碰撞时, 由于碰撞的力较小外力矩阈值并未成功检测到碰撞发生, 第三次主动的预期接触在外力矩阈值下被误判为碰撞, 其余两次二者均能正常检测到碰撞发生, 在这两次碰撞中接触危险系数检测到碰撞的时间均早于外力矩阈值给出碰撞检测结果。

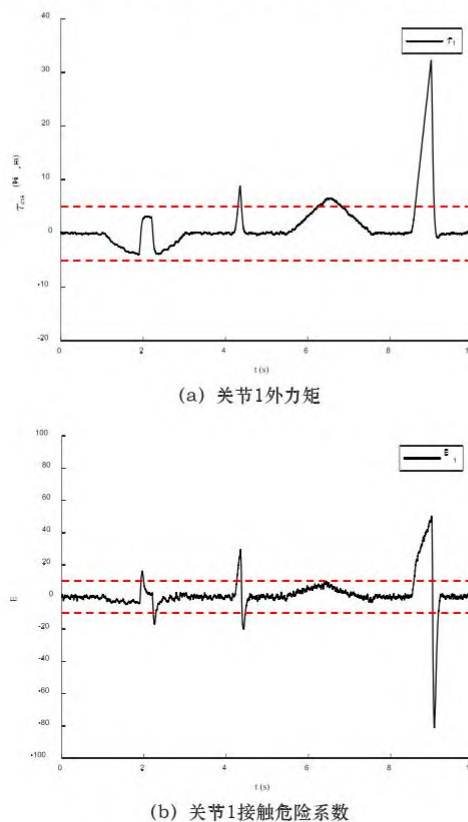


图4 关节1碰撞检测阈值仿真结果

表1 碰撞检测结果

接触开始时刻	外力矩阈值	接触危险系数
1.9s	—	1.92s
4.2s	4.31s	4.27s
5.5s	6.38s	—
8.5s	8.61s	8.57s

注: —表示未检测到碰撞发生

由以上仿真结果可知, 本文提出的接触危险系数在检测碰撞的过程中表现出更好的碰撞检测实时性和准确性, 具有预期的碰撞检测效果。

3 碰撞实验

3.1 实验平台

利用本实验室自主研发的模块化机器人的两个关节搭建了两自由度碰撞检测实验平台进行算法的验证, 实验平台组成如图5所示。两个关节均为转动关节, 关节1为水平转动关节, 直接固定在实验平台上; 关节2为垂直转动关节, 通过连杆与关节1的末端相连; 各关节由永磁同步电机

驱动, 关节内置谐波减速器, 减速比均为160。实验装置末端采用六维力/力矩传感器反馈末端所受力和力矩信号, 通过雅可比矩阵可以将机器人末端的六维力信息转换为各关节受到的等效外力矩。

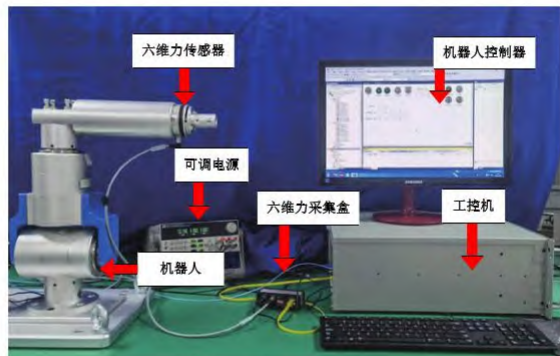


图5 碰撞检测实验平台

3.2 高阶扰动观测器实验

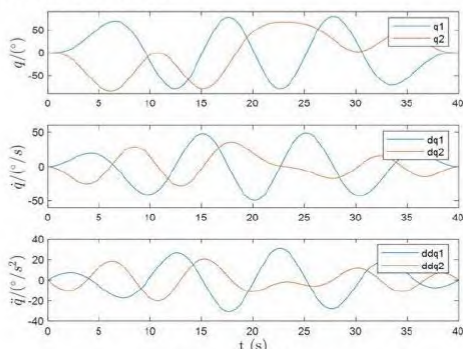
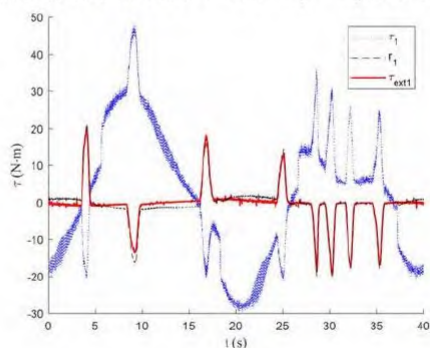


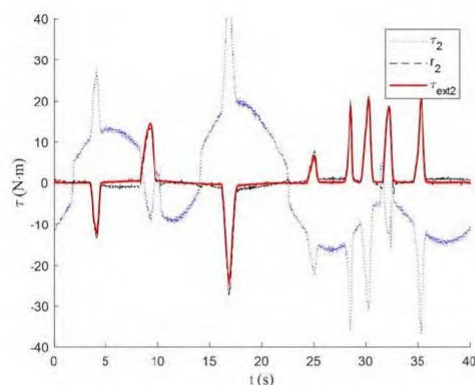
图6 机器人关节运行轨迹

碰撞实验基于前文所述实验平台进行, 机器人按图6中所示轨迹由初始位置开始在 -85° 到 80° 内作周期性运动, 运动速度从 $-49^{\circ}/s$ 到 $50^{\circ}/s$, 加速度从 $-30^{\circ}/s^2$ 到 $31^{\circ}/s^2$, 实验条件覆盖较广, 可以充分地证明该观测器的实际观测结果的可靠性。

首先在试验平台上验证提出的高阶扰动观测器性能, 机器人按照设定运行轨迹持续运行, 在机器人运行过程中记录观测力矩与六维力感知的等效外力矩的数据。实验过程中采集的数据如图7所示, 图中 τ_1 , τ_2 是关节的输出力



(a) 关节1



(b) 关节2

图7 高阶扰动观测器实验

矩, r_1 , r_2 为观测器输出的观测外力矩, τ_{ext1} 、 τ_{ext2} 为末端六维力传感器获取的关节等效外力矩。

图7为扰动观测器实验结果, 在实验过程中在机器人末端施加多次随机外力模拟实际环境中的碰撞。观察六维力传感器给出的关节实际外力矩和高阶扰动观测器给出的观测外力矩数据曲线, 可知在有外部接触时高阶扰动观测器能快速检测到实际外力矩并给出实际外力矩的大小, 且无外部接触时仅有很小的观测误差。由以上实验结果可以确定本文提出的高阶扰动观测器在实际系统发生碰撞时能快速检测到外力变化且外力观测的数值与实际外力矩一致, 仅存在较小的模型误差, 且当噪声较大时观测结果基本不受影响, 因此该扰动观测器的实时性和鲁棒性较高。

3.3 实际碰撞检测实验

碰撞检测是为了在机器人发生碰撞时快速检测到碰撞发生并使机器人做出相应的碰撞响应以减小由碰撞造成的损失, 因此本节在该实验平台上进行碰撞实验验证本文提出的碰撞检测算法能提高机器人的安全性。

实验过程中机器人仍按照图6中的给定轨迹运行, 在机器人末端的运行轨迹上放置障碍物, 机器人运动到该点时与障碍物发生碰撞, 观察机器人在碰撞后是否能准确检测到碰撞发生, 并采取相应措施。本实验中机器人在检测

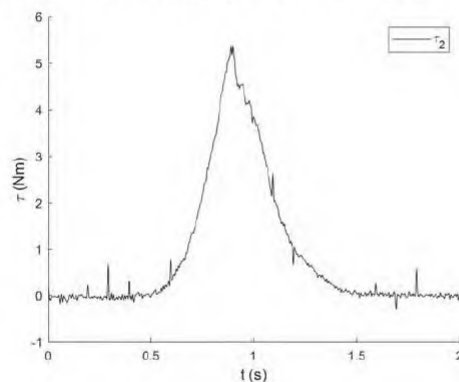


图8 碰撞检测实验

到碰撞后向碰撞力的方向运动以远离碰撞发生点作为碰撞保护措施。

试验结果如图8所示,图中为关节2在碰撞过程中的外力矩变化曲线。通过图中外力矩的变化曲线可知,在0.5s时机器人与障碍物发生接触,约0.4s后检测到碰撞发生,开始向远离碰撞的方向运动,由碰撞引起的外力逐步减小至零。在碰撞过程中末端力传感器的实际接触力最大为18.2N。参照协作机器人安全规范ISO/TS 15066-2016中的人体模型,对外部接触耐受程度最低的脸部在接触力为65N时会受到伤害,在碰撞过程中的最大接触力远小于能对人体造成伤害的水平。

以上实验结果表明,本文提出的高阶扰动观测器在实际碰撞中能够实时检测碰撞发生,在增加对应碰撞响应后能保证机器人在碰撞过程中不会对人体产生伤害,提高了机器人的人机协作安全性。

4 结语

为了提高机器人在人机协作环境中的安全性,提出了一种基于高阶扰动观测器的碰撞检测算法。高阶扰动观测器在保证观测结果实时性的同时能提供较好的鲁棒性,减小了系统噪声对观测结果的影响。且提出的基于接触危险系数的碰撞检测阈值能够比外力矩阈值更快的检测碰撞。通过数值仿真验证了提出的高阶扰动观测器和碰撞检测阈值具有更好的检测效果。利用自主研发的模块化机器人搭建了实验平台完成了碰撞实验,实验结果表明高阶扰动观测器具有良好的实时性和鲁棒性,在使用接触危险系数判断碰撞时能实时检测到碰撞发生,使机器人碰撞的接触力远小于能对人体造成伤害的标准,提高了机器人的人机协作安全性。

参考文献:

- [1] ROBLA-GOMEZ S, BECERRA V M, LLATA J R, et al. Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments [J]. IEEE Access, 2017, 5: 26 754-73.
- [2] 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): 15.
- [3] HADDADIN S, DE LUCA A, ALBU-SCHAEFFER A. Robot Collisions: A Survey on Detection, Isolation, and Identification [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(6): 1292-312.
- [4] SIM O, OH J, LEE K K, et al. Collision detection and safe reaction algorithm for non-backdrivable manipulator with single force/torque sensor [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2018, 91(3): 403-12.
- [5] HADDADIN S. Towards Safe Robots [electronic resource]: Approaching Asimov's 1st Law/by Sami Haddadin [J].
- [6] CIRILLO A, FICUCIELLO F, NATALE C, et al. A conformable force/tactile skin for physical human-robot

interaction [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2015, 1(1): 41-8.

- [7] 赵汉杰. 机械臂的碰撞检测研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2017.
- [8] 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(03): 427-34.
- [9] WENZHONG X, XI X, XINJIAN J. Sensorless robot collision detection based on optimized velocity deviation; proceedings of the 2017 Chinese Automation Congress (CAC), F, 2017 [C]. IEEE.
- [10] HAN L, XU W, LI B, et al. Collision Detection and Coordinated Compliance Control for a Dual-Arm Robot Without Force/Torque Sensing Based on Momentum Observer [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(5): 2261-72.
- [11] 钟琮玮, 项基, 韦巍, 等. 基于扰动观测器的机械手碰撞检测与安全响应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(06): 1115-21.
- [12] 吴海彬, 李实懿, 吴国魁. 基于动量偏差观测器的机器人碰撞检测算法[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(05): 97-104.
- [13] MURRAY R M, SHASTRY S, LI Z, et al. A mathematical introduction to robotic manipulation [J]. CRC Press, Inc, 2018.