

一种 KUKA 工业机器人抗扰动控制方法设计

柳静[†], 吴华芹

(河南应用技术职业学院, 河南 郑州 450042)

摘 要: KUKA 工业机器人在执行任务时, 复杂的任务决策会受到多种扰动因素的影响。为了抵抗这种干扰, 把平移和旋转两种状态合并为一种, 导致关节坐标在两种不同状态下需要容忍一定的集中干扰误差, 这种误差会使其运行轨迹和机械臂摆角与预先设定的路线产生较大偏差, 进而影响控制精度。因此, 提出一种 KUKA 工业机器人抗扰动控制方法。在得到 KUKA 工业机器人位姿矩阵后, 对其展开运动学分析, 明确平移和旋转两种状态下的机器人关节坐标。基于运动学分析的结果, 构建 KUKA 工业机器人抗扰动控制模型。模型由微分控制器、自适应鲁棒滑模控制器、线性扩张状态观测器组成, 完成对集中干扰的补偿和控制后, 在有限时间内将速度误差收敛至 0。经过实验测试后得出结论: 所提方法控制 KUKA 工业机器人位移轨迹非常接近期望轨迹, 有效抵抗扰动因素对机器人的影响, 使其横摆角和转向角控制在合理范围内, 不会使机器人产生角度突变。

关键词: KUKA 工业机器人; 抗扰动控制技术; 线性扩张状态观测器; 级联控制结构

中图分类号: TP246

文献标识码: A

Design of a Disturbance Resistant Control Method for KUKA Industrial Robots

LIU Jing[†], WU Huaqin

(Henan Technical Institute, Zhengzhou, Henan 450042, China)

Abstract: When KUKA industrial robots perform tasks, complex task decisions are affected by various disturbance factors. In order to resist this interference, the translation and rotation states are merged into one, resulting in joint coordinates needing to tolerate a certain degree of concentrated interference error in the two different states. This error will cause significant deviation between its operating trajectory and the predetermined path of the robotic arm swing angle, thereby affecting control accuracy. Therefore, a KUKA industrial robot disturbance resistant control method is proposed. After obtaining the KUKA industrial robot pose matrix, perform kinematic analysis on it and clarify the robot joint coordinates in both translation and rotation states. Based on the results of kinematic analysis, construct a disturbance resistant control model for KUKA industrial robots. The model consists of a differential controller, an adaptive robust sliding mode controller, and a linear extended state observer. After compensating and controlling for concentrated disturbances, the speed error converges to 0 within a finite time. After experimental testing, it was concluded that the proposed method controls the displacement trajectory of KUKA industrial robot very close to the expected trajectory, effectively resisting the influence of disturbance factors on the robot, and controlling its lateral and steering angles within a reasonable range, without causing sudden angle changes in the robot.

Key words: KUKA industrial robot; anti disturbance control technology; linear extended state observer; cascade control structure

收稿日期: 2024-04-02

基金项目: 河南应用技术职业学院青年骨干教师资助项目(2023-GGJS-X001); 2021 年度河南省重点研发与推广专项科技攻关项目(212102210430); 2022 年河南省职业教育和继续教育课程思政示范课程(2022195)

作者简介: 柳静 (1983—), 女, 河南信阳人, 本科, 讲师, 研究方向: 软件开发, 大数据。

[†] 通信联系人, E-mail: llf54545@yeah.net

KUKA 工业机器人作为一种功能强大、应用广泛的串联型机器人,被广泛使用于各种复杂任务的执行中。然而,尽管 KUKA 工业机器人拥有多自由度、多关节的机械臂和先进的控制系统,但在实际应用中却常常受到外部和内部干扰的影响,导致机器人的运动轨迹和精度偏差较大,从而影响了任务的准确性和效率。因此,研究旨在针对 KUKA 工业机器人控制系统,展开抗扰动研究,以提高机器人的控制稳定性和准确性,降低干扰对机器人系统性能的影响,并促进其在不同领域的应用。

吴晓燕等^[1]针对工业机器人提出快速连续非奇异终端滑模控制策略。利用拉格朗日方程建立工业机器人动力学模型,得到输入与输出之间的关联情况。采用非线性扰动观测器对机器人总的干扰作出估计和补偿,并以此构建快速连续非奇异终端滑模控制器。该方法通过使用非线性扰动观测器对机器人的干扰进行估计和补偿,但在长时间工作过程中,会出现模型不匹配情况,导致控制器的性能下降。熊蕊^[2]则提出一种自适应神经网络反步控制方法。对工业机器人机械臂构建数学模型,引入瞬态性能函数,对机械臂的运行轨迹和转速进行双重控制;同时,利用神经网络得到工业机器人的自适应律,进而实现抗扰动控制。对于复杂的任务决策和多种扰动因素影响下的工业机器人,该方法未充分考虑了这些因素的影响,导致对机器人扰动控制效果不佳。Hu 等^[3]对线性自抗扰控制器作出部分改进,用于机器人的抗扰动控制中。通过利用比例微分(PD)控制器和常规线性自抗扰控制器确定机器人的参数扰动、摩擦扰动以及外部扰动等,利用改进后的线性自抗扰控制器对其进行控制。该方法利用 PD 控制器和线性自抗扰控制器来处理各种扰动,未考虑状态合并导致精度损失的问题,导致控制器无法良好地适应和抑制扰动。Wang 等^[4]提出一种用于控制机器人扰动的鲁棒连续滑模控制方法。该方法中应用了两个非线性干扰观测器,获取机器人运动学和动力学模型中的所有扰动;构建一种级联控制结构,经过扰动补偿后,提高机器人的抗扰动性能。该方法采用了非线性干扰观测器来获取扰动信息和级联控制结构来处理扰动补偿,未充分考虑不同类型和程度的扰动因素对机器人控制系统的影响,难以保证系统的稳定性和性能。

因此,提出了一种 KUKA 工业机器人抗扰动控制算法。首先,建立 KUKA 工业机器人姿态矩阵,并对平移和旋转两种状态下的关节位置向量进

行分析,进而得到 KUKA 工业机器人运动学模型;然后,建立包含微分跟踪器、自适应鲁棒滑模控制器以及线性扩张状态观测器在内的 KUKA 工业机器人抗扰动控制器,经过对外部干扰和内部干扰的集中控制后,对 Lyapunov 函数进行求导,使机器人速度误差在有限时间内收敛至 0。将所提方法应用在 KUKA6 轴机器人中展开实验测试,结果表明,所提方法可使 KUKA 工业机器人具有较高的估计精度,有效抵抗扰动因素对机器人位移、转向角的影响,确保机器人按照预先设定好的路径执行任务。

1 平移和旋转两种状态下的机器人关节坐标计算

在机器人运动控制中,平移和旋转是两种基本状态。然而,在传统方法中,这两种状态下的机器人关节坐标计算往往没有区分处理。这导致在处理机器人运动时,尤其是在面对外部扰动或关节自身的动力学特性时,关节坐标在不同状态下需要容忍一定的集中干扰误差。这种误差不仅影响了机器人的控制精度,还可能使得其运行轨迹与预设的路线产生较大的偏差。

为了解决这一问题,提出了一种创新的方法,即区分平移和旋转两种状态下的机器人关节坐标计算。这种方法明确地将平移和旋转这两种状态下的运动学和动力学模型进行区分和独立处理。通过这种方式,机器人可以在平移和旋转状态下分别进行精确的控制,从而避免了之前方法中因状态不区分而导致的误差问题。

在实施控制策略之前,需要明确机器人的末端执行器需要达到的位置和姿态^[5]。通过运动学分析,计算出从当前位置到目标位置所需的关节角度变化,为后续的控制策略提供依据,确保机器人能够实现精确、稳定和高效的轨迹跟踪与执行。设定 KUKA 工业机器人的位置向量为:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, P_x 、 P_y 、 P_z 表示点 P 在坐标系 x 轴、 y 轴、 z 轴上的坐标点。

通过三维坐标系的两两夹角余弦来表示 KUKA 工业机器人的位姿,得到位姿矩阵为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{xx} & \cos \theta_{xy} & \cos \theta_{xz} \\ \cos \theta_{yx} & \cos \theta_{yy} & \cos \theta_{yz} \\ \cos \theta_{zx} & \cos \theta_{zy} & \cos \theta_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, θ_{xx} 、 θ_{xy} 、 θ_{xz} 表示 KUKA 工业机器人在坐标系形成的夹角。

KUKA 工业机器人类属于串联型工业机器人,在进行任务分配时通常由自由度进行划分。通过式(2)位姿矩阵得到每个关节的变量和参数。在空间直角坐标系中,KUKA 工业机器人关节轴运动学矩阵通过关节轴坐标^[6]和姿态进行表征。式(3)为 KUKA 工业机器人姿态矩阵:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & c_x & P_x \\ n_y & o_y & c_y & P_y \\ n_z & o_z & c_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, n_x 、 n_y 、 n_z 、 o_x 、 o_y 、 o_z 、 c_x 、 c_y 、 c_z 表示 KUKA 工业机器人在坐标系 x 轴、 y 轴、 z 轴上的单位方向向量,即 KUKA 工业机器人姿态坐标。

KUKA 工业机器人关节运动分为平移和旋转两种模式。当关节为纯平移状态时,其在三维坐标系中的恒定姿态位移为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{E} \text{Trands}(l_x, l_y, l_z) \times \mathbf{Q} \quad (4)$$

式中, l_x 、 l_y 、 l_z 表示 KUKA 工业机器人关节在坐标系 x 轴、 y 轴、 z 轴上的位移。

当关节为纯旋转状态^[7]时,其坐标为:

$$\mathbf{P}^U = \mathbf{T}_R^U \times \mathbf{P}^R \quad (5)$$

式中, $\mathbf{P}^U$ 、 $\mathbf{P}^R$ 分别表示点 P 在参考坐标系 U 、 R 中的坐标点, $\mathbf{T}_R^U$ 表示 U 旋转后得到的位姿矩阵。

通过式(4)和式(5)可以计算出在不同状态下关节的位置和姿态,进一步推导出末端执行器的位置和姿态,其坐标为:

$$\mathbf{P}_{xyz} = \text{Rot}(y, \beta) \times \mathbf{E} \text{Tran}(l_x, l_y, l_z) \times \text{Rot}(x, \eta) \times \mathbf{P} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{P}_{xyz}$ 表示机器人下关节的位置, β 、 η 分别表示关节轴的旋转角度。

2 KUKA 工业机器人抗扰动控制器设计

通过运动学分析,可以精确地计算出机器人关节角度与末端执行器位置之间的关系。这有助于设计出更加精确的控制算法,使机器人在受到扰动时仍能保持较高的轨迹跟踪精度。针对 KUKA

工业机器人设计了基于大数据分析的抗扰动控制器,如图 1 所示,其中包含了微分跟踪器(TD)、自适应鲁棒滑模控制器(ARSC)以及线性扩张状态观测器(LESO)等。TD 用于计算机器人的期望轨迹,ARSC 则提供了强大的鲁棒性,能有效抵抗模型误差和外部扰动,而 LESO 则实时估计并补偿各种扰动对机器人运动的影响。通过这三部分的协同工作,机器人能在有限时间内将速度误差收敛至 0,显著提高其控制精度和鲁棒性。

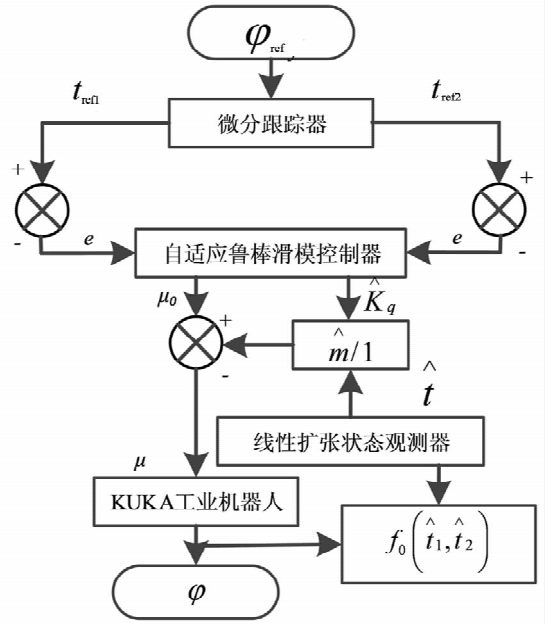


图 1 KUKA 工业机器人抗扰动控制器

图中, φ_{ref} 表示控制目标, φ 表示控制器输出, t_{ref1} 、 t_{ref2} 分别表示 φ_{ref} 的跟踪信号和微分信号, e 为误差, $\hat{K}_q$ 表示不确定参数^[8], $\hat{m}$ 表示常数 m 的估计值, μ 表示控制量, μ_0 表示 ARSC 的输出, $\hat{t}$ 表示对控制器输出微分的估计值, $f_0(\hat{t}_1, \hat{t}_2)$ 表示 KUKA 工业机器人总扰动。

KUKA 工业机器人抗扰动控制实现过程为:

(1) 安排过渡过程

TD 可通过式(7)所示的“安排过渡过程”进行描述:

$$\begin{cases} t_{ref1}(k+1) = P_{xyz} [t_{ref1}(k) + h^0 t_{ref2}(k)] \\ t_{ref2}(k+1) = t_{ref2}(k) + P_{xyz} h^0 \text{fst}[t_{ref1}(k) - \varphi_{ref}, t_{ref2}(k), r, h_0] \end{cases} \quad (7)$$

式中, k 表示 TD 的跟踪步数, h^0 表示积分步长, r 、 h_0 均为可调参数^[9], 前者为速度因子, 后者为滤波因子。

(2) 线性扩张状态观测器设计

对 LESO 的伺服电机反馈速度 $\dot{\omega}_0$ ^[10] 进行分

析,如式(8)所示:

$$\begin{aligned}\bar{\omega}_0 &= \frac{D_o\phi_f i_q}{J_L} - \frac{t_{\text{refl}}(k+1)B\bar{\omega}_o}{J_L} - \frac{T_L}{J_L} = \\ &\frac{D_o\phi_f i_{q_{\text{mf}}}}{J_L} - \frac{t_{\text{refl}}(k+1)B\bar{\omega}_o}{J_L} - \frac{T_L}{J_L} - \\ &\frac{D_o\phi_f}{J_L}(i_{q_{\text{mf}}} - i_q) = \frac{D_o\phi_f i_{q_{\text{mf}}}}{J_L} + s(t)\end{aligned}\quad (8)$$

式中, $s(t)$ 表示 LESO 的时变不确定性干扰, B 表示摩擦系数, D_o 表示电机极对数, ϕ_f 表示转子磁体的磁链耦^[11], J_L 表示总转动惯量, T_L 表示负载转矩, i_q 、 $i_{q_{\text{mf}}}$ 表示电流分量和等效电流分量。

通常情况下, $s(t)$ 可分为三类,分别是外部扰动(噪声扰动和负载突变等)、参数摄变(伺服电机温度^[12]、内阻参数等)以及参数不确定(摩擦系数难以确定等)。正是因为这三类扰动因素的存在, KUKA 工业机器人抗扰动控制器应具备鲁棒性。在实际情况中,上述三类干扰满足“干扰及干扰的有限阶导数一致有界”的条件,用公式表示为:

$$\begin{cases} \bar{\omega}'_0 = \frac{D_o\phi_f i_{q_{\text{mf}}}}{J_L} + s(t) \\ s'_t = s_{t+1} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} s'(t) = 0 \\ s(t) \leq f_0(\hat{t}_1, \hat{t}_2), f_0(\hat{t}_1, \hat{t}_2) > 0 \end{cases}\quad (9)$$

式中, $s'_t = s_{t+1}$ 表示 LESO 新的扩张状态。

LESO 的中心思想为:首先,将时变不确定性干扰归类为集中干扰^[13],并将其看作是 KUKA 工业机器人的一个新状态,通过 LESO 观测机器人原有状态和新状态;然后,设置扩张后的状态阶数比原始阶数高一阶;最后,利用前馈补偿对估计得到的集中干扰进行改善和控制。

将式(8)中的 $s(t)$ 看作是新的扩张状态,并让 $v(t) = s'(t)$, $v_1 = \bar{\omega}_o$, $v_2 = s(t)$, 那么,式(8)即可改写为:

$$\begin{cases} v'_1 = v_2 + \frac{D_o\phi_f i_{q_{\text{mf}}}}{J_L} \\ v'_2 = v(t) \end{cases}\quad (10)$$

那么,LESO 的表达式为:

$$\begin{cases} z'_1 = z_2 - \lambda_2(z_1 - x_1) + \frac{D_o\phi_f i_{q_{\text{mf}}}}{J_L} \\ z'_2 = -\lambda_1(z_1 - x_1) \end{cases}\quad (11)$$

式中, z_1 、 z_2 分别表示 v_1 和 v_2 的观测值, λ_1 、 λ_2 表示 LESO 的系数值。

由式(11)推理得到 KUKA 工业机器人的动态观测误差为:

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - z'_1 \\ e_2 = x_2 - z'_2 \\ e'_1 = e_2 - \lambda_2 e_1 \\ e'_2 = v(t) - \lambda_1 e_1 \end{cases}\quad (12)$$

将 $\bar{\omega}_r$ 定义为伺服电机参考速度^[14], $\bar{\omega}_r$ 与 $\bar{\omega}_o$ 之间的速度跟踪误差为:

$$\begin{cases} e = \bar{\omega}_r - \bar{\omega}_o \\ e' = \bar{\omega}'_r - \frac{D_o\phi_f i_{q_{\text{mf}}}}{J_L} - s(t) \end{cases}\quad (13)$$

定义 ARSC 的滑模面^[15]为:

$$\zeta = \epsilon_0 \text{sign}(e)e^* + e' \quad (14)$$

式中, ϵ_0 表示比 1 小、比 0 大的常数, e^* 表示 ARSC 的控制误差, $\text{sign}(\cdot)$ 表示标准符号函数。

(3)自适应鲁棒滑模控制器设计

ARSC 用于根据 LESO 估计的扰动信息调整控制量,以实现不确定性的鲁棒控制。将 ARSC 设计为:

$$\partial(t) = \frac{D_o\phi_f}{J_L} \left[\bar{\omega}_o + \epsilon_0 \text{sign}(e)e^* + \epsilon_1 \int_0^t \text{sign}(\zeta) dt \right] \quad (15)$$

式中, ϵ_1 表示控制参数。

当干扰 $s(t)$ 的导数有界,且正常数满足 δ_s 条件时,有:

$$s'(t) \leq \delta_s, \quad \forall t \geq 0 \quad (16)$$

当式(12)满足式(16)条件时,在 ARSC 的作用下, $\epsilon_1 > \delta_s$, KUKA 工业机器人的速度误差将在有限时间内收敛为 0。

定义 Lyapunov 函数为:

$$Z = \frac{1}{2} \zeta^2 \quad (17)$$

引入大数据分析思想,对式(17)进行求导,得到:

$$\begin{aligned} Z' &= \zeta\zeta' = -\epsilon_1 \zeta \text{sign}(\zeta) - \zeta s'(t) = \\ &= -\epsilon_1 \zeta - s'(t) \leq -\epsilon_1 \zeta + s'(t) \\ \zeta &= -(\epsilon_1 - s'(t))\zeta \leq -(\epsilon_1 - \delta_s)\zeta = \\ &= -(\epsilon_1 - \delta_s)2Z^{\frac{1}{2}} \end{aligned}\quad (18)$$

由式(18)得知,当 $\epsilon_1 > \delta_s$ 时, KUKA 工业机器人将在有限时间内使 ARSC 滑模面 ζ 的速度误差收敛为 0。

在完成了 KUKA 工业机器人抗扰动控制器的理论设计后,接下来是软件设计部分。软件设计的主要目标是实现上述控制算法,并确保其在实际应用中能够稳定、高效地运行。

软件设计主要包括以下几个关键步骤:

(1)初始化与配置:初始化机器人控制系统,包括配置机器人的通信接口、设定控制器参数(如速度因子、滤波因子、控制参数等)、以及加载或定义相关运动学和动力学模型。

(2)数据采集与处理:通过传感器实时采集机器人的状态数据,包括关节角度、速度、加速度等,并进行滤波和预处理,以消除噪声和干扰。

(3)控制算法实现:根据前面设计的控制算法,实现 TD、ARSC 以及 LESO 的功能。包括计算期望轨迹、估计和补偿扰动、调整控制量等。

(4)实时控制:根据控制算法计算出的控制量,实时输出到机器人的执行机构,实现对机器人的精确控制。

(5)监控与诊断:在控制过程中,对机器人的状态进行实时监控,并设置故障诊断机制,以便在出现问题时能够及时发现并处理。

KUKA 工业机器人抗扰动控制软件实现伪代码如下所示:

```
# 初始化与配置
initialize_robot_system()
set_controller_parameters(velocity_factor, filter_factor, control_parameters)
load_kinematics_and_dynamics_models()
# 主循环
while running:
    # 数据采集与处理
    robot_state = get_robot_state()
    processed_state = filter_and_preprocess(robot_state)
    # 控制算法实现
    expected_trajectory = compute_expected_trajectory(processed_state)
    total_disturbance = estimate_total_disturbance(processed_state)
    control_input = ARSC_control_algorithm(expected_trajectory, total_disturbance, control_parameters)
    # 实时控制
    send_control_input_to_robot(control_input)
    # 监控与诊断
    monitor_robot_status()
    if fault_detected():
        handle_fault()
    # 更新循环
    update_loop()
# 结束程序
shutdown_robot_system()
```

3 实验测试

为了验证所提方法在实际应用中是否可以针对 KUKA 工业机器人实现抗扰动控制,对其展开了实验测试。实验测试平台包含 KUKA6 轴工业机器人、负载、控制柜、宿主机以及目标机,内部包含 4 个伺服电机、6 个驱动器以及 6 个编码器。KUKA 工业机器人实验现场图如图 2 所示。

设置 KUKA 工业机器人的标准 D-H 参数,具体步骤如下:

(1)确定连杆数目和关节数:对于 KUKA6 轴工业机器人,它有 6 个连杆和 6 个关节。

(2)测量连杆长度:使用激光测距仪测量每个连杆的长度 a 。

(3)确定连杆偏距和关节角:连杆偏距 d 表示从连杆的轴线到下一个连杆轴线的垂直距离,通过实际测量获得。关节角 θ 表示相邻连杆之间的夹角,通过实际测量得出。

(4)计算连杆转角 α :通过以下公式计算:
$$\alpha_i = \operatorname{atan} 2(d_i, a_i) - \operatorname{atan} 2(d_{i+1}, a_{i+1}) \quad (19)$$
式中, d_i 和 a_i 分别是第 i 个连杆的偏距和长度。

则标准 D-H 参数如表 1 所示。



图 2 KUKA 工业机器人实验现场图

表 1 KUKA 工业机器人标准 D-H 参数

连杆	d	θ	α	a
1	458	q_1	$\pi/2$	165
2	0	q_2	0	585
3	121	q_3	$\pi/2$	730
4	0	q_4	0	152
5	257	q_5	$\pi/2$	264
6	0	q_6	0	342

表 1 中, d 、 θ 、 α 、 a 分别表示机械臂的连杆偏距、关节角、连杆转角以及连杆长度, $q_1 \sim q_6$ 表示关节角度轨迹,初始时刻,KUKA 工业机器人的关节角度轨迹为 $q_r = [\sin y, \cos y, \sin (0.5y), 0]^T$, π 表示圆周率。

通过实验测试,对比了之前不区分平移和旋转状态下的机器人关节坐标计算方法与所提方法。实验结果如图 3 所示。

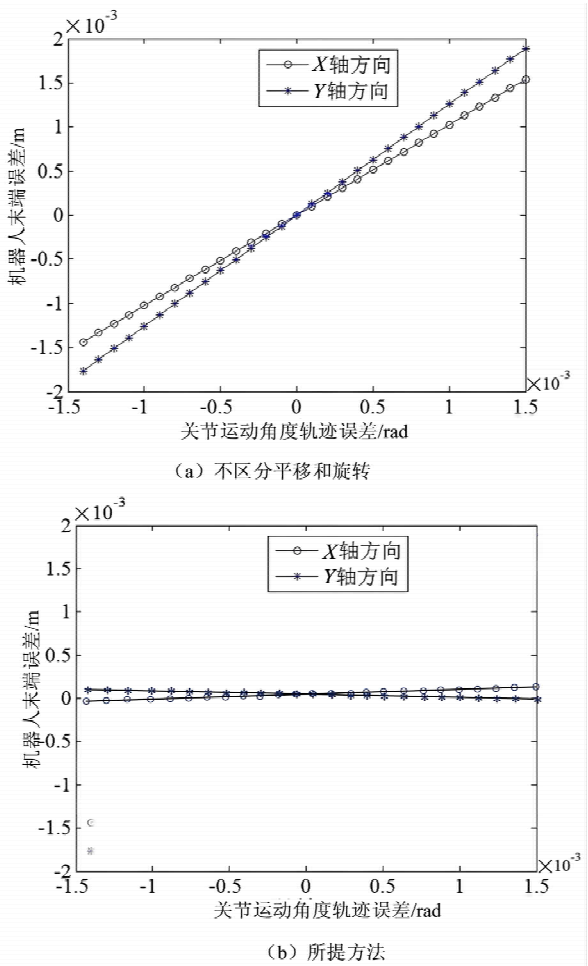


图 3 不同方法下的机器人关节坐标计算误差对比

分析图 3 可知,应用所提方法后,机器人末端误差被有效控制在 -0.5 m 至 0.5 m 之间。相比之下,不区分平移和旋转的方法导致机器人末端误差值波动较大,其误差范围并未得到有效的控制。这一结果表明,所提方法通过明确区分平移和旋转状态下的运动学和动力学模型,并设计相应的控制器,显著提高了机器人的控制精度。这不仅降低了误差,还使机器人能够更精确地完成轨迹跟踪任务。

通过 MATLAB 程序将控制指令和所提方法控制策略发送给目标机,目标机接收到指令后由卡板采集关节角信息并反馈给机器人,随即进行抗扰动测试。

对比应用所提方法前后,KUKA 工业机器人的抗扰动能力。机器人抗扰能力通常用估计精度进行表示,表达式为:

$$\xi = \sum_{i=1}^M (|K_i - H_i|/K_i)$$

(20)

式中, M 表示数据点的长度值, K_i 表示机器人的干扰信号, H_i 表示扰动观测器的估计数值。

应用所提方法前后,KUKA 工业机器人的抗扰动能力如图 4 所示。

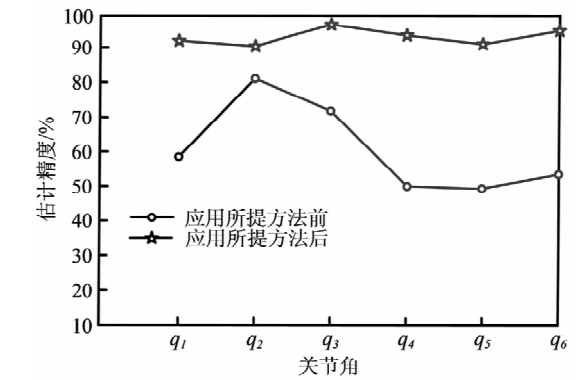
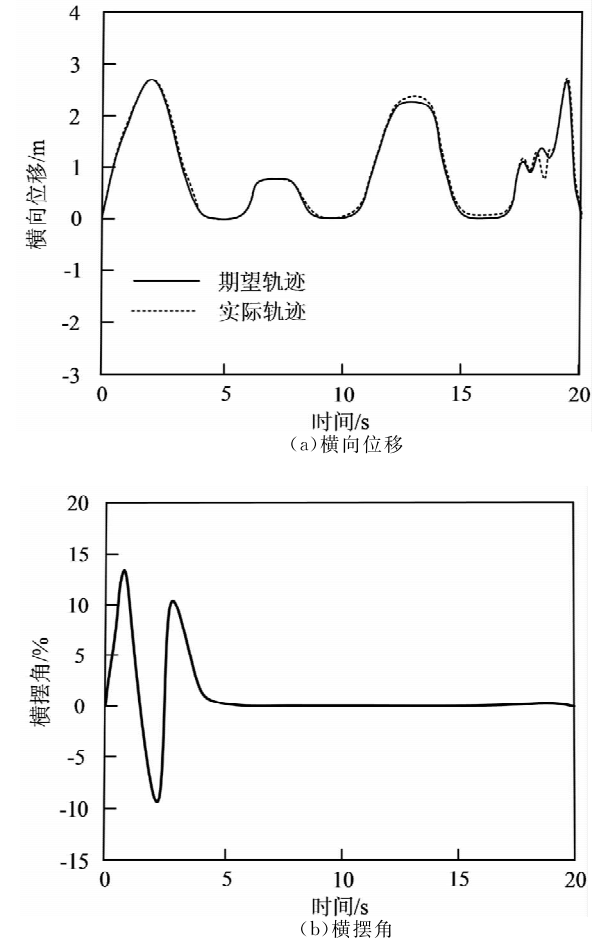


图 4 KUKA 工业机器人应用所提方法前后的估计精度

从图 4 中可以看出,在 KUKA 工业机器人中应用所提方法后,对于机器人控制系统整体的估计精度都有了显著提高,说明所提方法在 KUKA 工业机器人抗扰动方面非常有效。这是由于所提方法设计了包含微分跟踪器、自适应鲁棒滑模控制器以及线性状态扩张观测器在内的抗扰动控制器,从各个角度、不同方面实现对 KUKA 工业机器人的稳定控制。

为了进一步测试所提方法,对应用了所提方法控制器的 KUKA 工业机器人做进一步扰动测试,结果如图 5 所示。



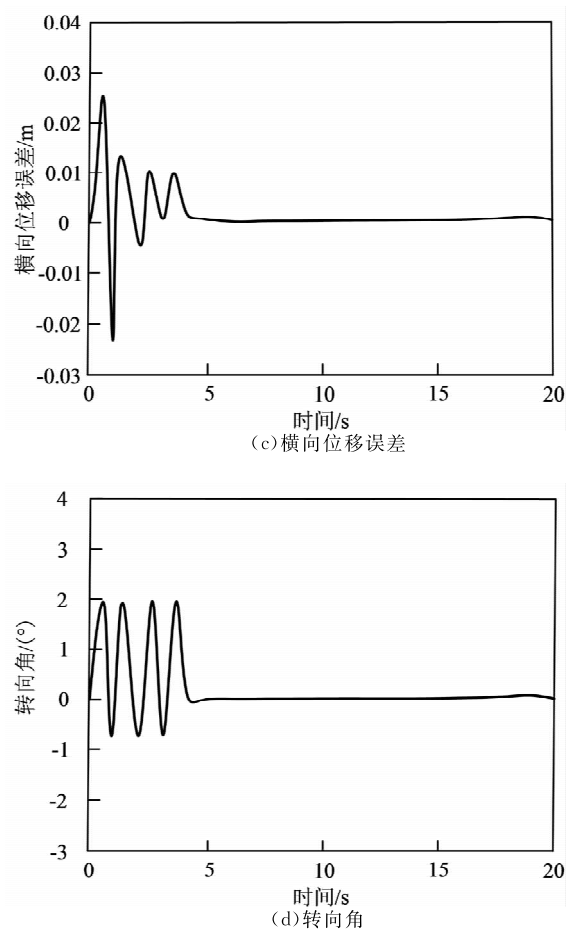


图 5 所提方法控制器扰动测试结果

通过观察图 5 可以看出,应用所提方法设计的抗扰动控制器后,KUKA 工业机器人的横向位移与期望轨迹非常接近,误差控制在 $-0.03 \sim 0.03$ m 之间。另外,横摆角和转向角的角度也在合理范围内,不会使机器人出现较大幅度的摆动。由此得出结论,经由所提方法控制后,机器人消除了扰动影响,使位移轨迹按照期望轨迹运行。这是因为所提方法通过运动学分析、抗扰动控制模型设计和控制器参数优化等方面的改进,充分考虑了机器人执行复杂任务时所面临的扰动和误差因素,从而有效提高了机器人的控制精度和稳定性。

4 结 论

KUKA 工业机器人在执行任务时,易受到外部扰动和内部扰动的双重扰动影响,进而导致工业机器人无法按照预先设定好的轨迹进行运动,偏差的存在也延长了任务执行时间。为此,提出一种 KUKA 工业机器人的平移和旋转状态进行分析后,建立抗扰动控制模型;然后,构建包含微分跟踪

器、自适应鲁棒滑模控制器以及线性扩张状态观测器在内的 KUKA 工业机器人抗扰动控制器,实现有限时间内速度误差的快速收敛。实验测试结果表明,经由所提方法控制后,KUKA 工业机器人的抗扰动能力得到显著提升,使得横向位移、横向位移误差、横摆角以及转向角控制在较小的范围内。

参考文献

[1] 吴晓燕,虞启凯,韩江义. 关节空间内工业机器人抗干扰轨迹跟踪控制[J]. 机床与液压,2021,49(3):52—57.

[2] 熊蕊. 考虑瞬态性能的工业机器人双臂反步控制方法[J]. 现代制造工程,2022(8):53—59.

[3] HU H J, XIAO S G, SHEN H K. Modified linear active disturbance rejection control for uncertain robot manipulator trajectory tracking[J]. Mathematical Problems in Engineering: Theory, Methods and Applications,2021,2021(Pt. 26): 8892032. 1—8892032. 13.

[4] WANG H M,ZHANG Y, WANG X C,et al. Cascaded continuous sliding mode control for tracked mobile robot via non-linear disturbance observer[J]. Computers and Electrical Engineering,2022,97

[5] 张磊,鲁凯,高春侠,等. 基于变增益自抗扰技术的机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 电子学报,2022,50(1):89—97.

[6] 裴艳虎,刘志峰,许静静,等. 面向操作可靠性提升的复合工业机器人运动规划[J]. 制造技术与机床,2022(3):49—54.

[7] 罗宝佳,吴震宇,詹明儒. 工业机器人关节振动的鲁棒扰动观测器双环补偿控制[J]. 机械科学与技术,2022,41(4):530—536.

[8] 李庆中,李静,李开金,等. H 型倾转推进两栖机器人水下姿态自抗扰控制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(7):1—11.

[9] 张玉世,陈东生,宋颖慧. 基于自抗干扰的装配机器人阻抗控制技术[J]. 浙江大学学报(工学版),2022,56(9):1876—1881.

[10] 俞经睿,朱毅成,冉晨阳,等. 基于自抗扰控制的机器人定位策略[J]. 控制理论与应用,2023,40(4):772—779.

[11] 樊开夫,王福杰,李绍宇,等. 具有输入约束的参数不确定机器人自适应控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2021(10):88—92.

[12] 张卉,朱永飞,刘雪飞,等. 基于模糊迭代 Q-学习的冶金工业机器人轨迹跟踪控制研究[J]. 工程设计学报,2022,29(5):564—571.

[13] 周旭,鲁墨武,姜春英,等. 改进的 PSO—BP 算法在工业机器人末端位姿误差补偿中的应用[J]. 信息与控制,2021,50(4):505—512.

[14] 石上瑶,刘家豪,石萱,等. 基于无差扰动跟踪状态观测器的自抗扰控制技术研究[J]. 火力与指挥控制,2023,48(7):7—12+22.

[15] 黄俊豪,杨俊华,陈海峰,等. 基于 PSO 优化的永磁直线同步电机混沌滑模控制[J]. 计算机仿真,2021,38(11):215—220+229.