

本文引用格式: 叶鹏程,毛世鑫,张一超.基于关节外力估计的操作臂自适应力跟踪方法[J].自动化与信息工程,2025,46(1):41-46.
YE Pengcheng, MAO Shixin, ZHANG Yichao. Adaptive force tracking method of manipulator arm based on joint external force estimation[J]. Automation & Information Engineering, 2025,46(1):41-46.

基于关节外力估计的操作臂自适应力跟踪方法*

叶鹏程¹ 毛世鑫² 张一超³

(1.广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

2.九天创新(广东)智能科技有限公司, 广东 佛山 528299

3.工业和信息化部电子第五研究所, 广东 广州 511370)

摘要: 传统的操作臂力跟踪控制主要通过末端六维力传感器和力位混合控制方法实现, 难以适应不确定环境, 易产生力跟踪误差、超调等问题。为此, 提出一种基于关节外力估计的操作臂自适应力跟踪方法。首先, 设计一种结合广义动量和卡尔曼滤波器的扰动卡尔曼外力观测器(DKF), 用于估计接触力; 然后, 提出自适应变导纳力跟踪方法, 根据力误差自动调节导纳参数, 减小力跟踪误差, 提高系统的稳定性。经仿真实验验证: 该文提出的 DKF 相较于广义动量观测器, 估计误差降低约 20%; 自适应变导纳力跟踪方法降低了超调力, 力跟踪误差降低约 27%, 对不确定环境有较强的适应性。

关键词: 操作臂; 外力估计; 力跟踪控制; 扰动卡尔曼外力观测器; 导纳控制

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2025)01-0006-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2025.01.006

开放获取

Adaptive Force Tracking Method of Manipulator Arm Based on Joint External Force Estimation

YE Pengcheng¹ MAO Shixin² ZHANG Yichao³

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006,

China 2.Nine Days Innovation (Guangdong) Intelligent Technology Co., Ltd., Foshan 528299, China

3.Fifth Electronics Research Institute, Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 511370, China)

Abstract: Traditional manipulator arm force tracking control is mainly achieved through end six axis force sensors and force position hybrid control methods, which are difficult to adapt to uncertain environments and prone to problems such as force tracking errors and overshoot. Therefore, a method for tracking the adaptive force of a manipulator arm based on joint external force estimation is proposed. Firstly, design a disturbance Kalman force observer (DKF) that combines generalized momentum and Kalman filter for estimating contact force; Then, an adaptive variable admittance force tracking method is proposed, which automatically adjusts the admittance parameters based on the force error, reduces the force tracking error, and improves the stability of the system. Through simulation experiments, it has been verified that the DKF proposed in this paper reduces the estimation error by about 20% compared to the generalized momentum observer; The adaptive variable admittance force tracking method reduces overshoot force, reduces force tracking error by about 27%, and has strong adaptability to uncertain environments.

Keywords: manipulator arm; external force estimation; force tracking control; disturbance Kalman external force observer; admittance control

0 引言

机器人技术向高端化、智能化发展的同时, 对人

机环境的友好交互提出了更高的要求^[1]。尤其在零力拖动示教、轴孔装配、恒力抛光打磨等场景^[2-3], 为实

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52275011); 广东省科技创新战略专项资金(pdjh2022a0148); 佛山市科技创新团队专项(FS0AA-KJ919-4402-0098)。

现安全稳定的力跟踪控制,需要获取操作臂与环境之间的接触力。若采用末端六维力传感器获取接触力,成本较高。而利用外力估计方法获取接触力,不仅能降低成本,还能提高操作安全性。

外力估计一般通过关节状态信息,采用观测器相关理论,间接获取操作臂与环境之间的接触力。外力估计算法最早由 DE 等^[4]提出,其基于操作臂的动力学模型,利用广义动量观测器(generalized momentum observer, GMO)来避免加速度噪声,广泛应用于碰撞检测领域^[5-6]。文献[6]提出一种二阶前馈的 GMO,其对突变外力更加灵敏,但抗干扰性较差。文献[7]提出一种基于逆动力学的状态观测器,采用局部加权投影回归方法局部学习动力学参数,从而估计接触力,但估计结果存在明显噪声。文献[8]提出一种扩展卡尔曼外力观测器,具有较好的滤波效果,但由于采用加速度信号,模型阶数较高,计算量较大。文献[9]结合卡尔曼滤波器和广义动量,设计了一种降阶的外力观测器,通过仿真验证了其精度比 GMO 更高,但在实际应用中仍存在模型非线性、精度变差等问题。文献[10]基于广义动量提出一种降阶的扩展状态观测器,计算效率较高,但仅在两关节操作臂上进行了验证,且参数整定较为繁琐。

接触力控制一般采用阻抗控制、力位混合控制等方法。但由于环境参数存在不确定性,无法获取准确的环境模型,难以满足精确的力控制。文献[11]提出自适应变阻尼力控制算法,实现了自适应力跟踪,但存在稳态误差。文献[12]提出基于 BP 神经网络在线调节阻抗参数的变阻抗控制器,通过抛光打磨实验验证了其有效性,但模型复杂度较高。文献[13]提出变刚度自适应导纳控制方法,实现接触力的快速柔顺调节,但刚度变化易导致系统不稳定。文献[8]通过关节力结合扩展卡尔曼滤波器直接观测环境刚度,自适应调节阻抗参数,但存在参数收敛速度慢的问题。

为提高操作臂的控制精度和安全性,本文提出一种基于关节外力估计的操作臂自适应力跟踪方法。该方法基于关节力传感器信号,采用扰动卡尔曼外力观测器(disturbance Kalman filter, DKF)估计操作臂与

环境之间的接触力,并利用自适应变导纳力跟踪方法,实现操作臂接触力跟踪控制的稳定性。

1 方法框架

基于关节外力估计的操作臂自适应力跟踪方法框架如图 1 所示。其中,虚线框分别为外力估计方法和自适应变导纳力跟踪方法。

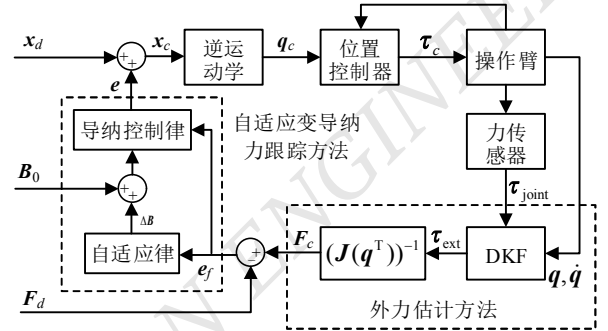


图 1 基于关节外力估计的操作臂自适应力跟踪方法框架

图 1 中, x_d 为期望位置, x_c 为实际控制位置, 通过逆运动学、位置控制器实现操作臂在笛卡尔空间的位置控制; 关节力传感器实时测量操作臂的关节力 τ_{joint} ; 外力估计方法以关节力 τ_{joint} 、关节位置 q 和速度 $\dot{q}$ 为输入, 估计关节空间表示的接触力 τ_{ext} , 再经公式(2)转换为笛卡尔空间表示的接触力 F_c ; 自适应变导纳力跟踪方法以力跟踪误差 e_f 作为反馈, 输出位置变化量 e , 用于控制操作臂运动, 实现自适应力跟踪。

2 操作臂动力学模型

利用拉格朗日法对 n 自由度操作臂进行动力学建模, 其动力学模型为

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

式中: $M(q) \in R^{n \times n}$ 为操作臂的惯量矩阵, n 为操作臂的关节数量; $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 为包含离心力和科氏力的矩阵; $G(q) \in R^{n \times 1}$ 为重力项; τ_{joint} 为操作臂关节输出到连杆的力; τ_{ext} 为关节空间表示的接触力。

笛卡尔空间的接触力 F_c 为

$$F_c = (J(q)^T)^{-1} \tau_{ext} \quad (2)$$

式中: $J(q) \in R^{6 \times n}$ 为操作臂的雅可比矩阵。

利用操作臂的广义动量表示其动力学模型：

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

对广义动量求导，可得

$$\dot{p} = \dot{M}(q)\dot{q} + M(q)\ddot{q} \quad (4)$$

将公式(1)代入公式(4)，由 $\dot{M} = C + C^T$ ，得到

$$\dot{p} = C^T(q, \dot{q})\dot{q} + \tau_{\text{joint}} - G(q) + \tau_{\text{ext}} \quad (5)$$

由公式(5)可知， n 自由度操作臂动力学模型引入动量参数后，得到的动量形式动力学模型仅需要速度 $\dot{q}$ 和位置 q ，不再需要加速度 $\ddot{q}$ 和惯量矩阵 $M(q)$ ，因此该动力学模型是降阶的。

3 DKF

为构建线性的 n 自由度操作臂动力学模型，在公式(5)中引入辅助变量 $\tau_c = C^T(q, \dot{q})\dot{q} + \tau_{\text{joint}} - G(q)$ ，则操作臂的动力学模型可改写为

$$\dot{p} = \tau_c + \tau_{\text{ext}} + \omega_p \quad (6)$$

式中： ω_p 为噪声项，若 n 自由度操作臂动力学模型精确，则噪声项符合分布 $\omega_p \sim \mathcal{N}(0, \Sigma_p)$ 。

接触力 τ_{ext} 采用 m 阶泰勒时间多项式进行局部近似^[14]。对于关节 $i = 1, 2, \dots, n$ ，采用公式(7)的 $(m-1)$ 阶多项式的局部近似模型估计接触力：

$$\dot{z}_i = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(m-1) \times 1} & I^{(m-1) \times (m-1)} \\ 0 & \mathbf{0}^{1 \times (m-1)} \end{bmatrix}}_{L_i} z_i + \omega_{z,i} \quad (7)$$

$$\tau_{i,\text{ext}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}^{1 \times (m-1)} \end{bmatrix}}_{N_i} z_i \quad (8)$$

式中： z_i 为关节 i 的模型状态变量， $\tau_{i,\text{ext}}$ 为关节 i 的接触力， $\omega_{z,i} \sim \mathcal{N}(0, \Sigma_{z,i})$ 为模型的不确定性， L_i 为模型的状态转移矩阵， N_i 为模型的输出矩阵。

合并公式(6)、(8)定义系统状态向量 $\mathbf{x} = [p^T, \tau_c^T, z^T]^T \in R^{(m+2) \times n \times 1}$ ，其中 $\mathbf{z} = [z_1 \dots z_n]^T$ 为接触力模型，得到包含扰动模型的 n 自由度操作臂全阶动力学模型为

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\tau}_c \\ \dot{z} \end{bmatrix}}_{\dot{\mathbf{x}}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I & N \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} p \\ \tau_c \\ z \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_p \\ \omega_{\tau_c} \\ \omega_z \end{bmatrix}}_{\omega} \quad (9)$$

式中： $A \in R^{n(m+2)}$ ， $N = \text{diag}(N_1 \dots N_n)$ ， $L = \text{diag}(L_1 \dots L_n)$ ； ω 为系统过程噪声，其协方差为 $Q = \text{diag}(\Sigma_p, \Sigma_{\tau_c}, \Sigma_z)$ 。

系统输出方程为

$$\underbrace{\begin{bmatrix} p_{\text{meas}} \\ \tau_{c,\text{meas}} \end{bmatrix}}_y = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} p \\ \tau_c \\ z \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} v_p \\ v_{\tau_c} \end{bmatrix}}_v \quad (10)$$

式中： $C \in R^{2n \times (m+2)n}$ ； $v = [v_p^T, v_{\tau_c}^T]^T$ 为测量噪声， $v \sim \mathcal{N}(0, R)$ ，测量噪声协方差矩阵 $R = \text{diag}(\Sigma_{p,o}, \Sigma_{\tau_c,o}) \in R^{2n}$ ， $\Sigma_{p,o}$ 为动量 p 的测量噪声协方差矩阵， $\Sigma_{\tau_c,o}$ 为 τ_c 的测量噪声协方差矩阵。

公式(9)、(10)描述的是线性时不变系统，分析 A 、 C 可得到该系统满足可观性的条件。

利用动量描述操作臂的动力学模型，不需要加速度，通过配置不同的 m ，可实现不同阶次的拟合效果。利用卡尔曼滤波器对公式(9)、(10)描述的系统进行状态观测，接触力的估计值为

$$\tau_{\text{ext}} = [0^{n \times 2n}, N] \cdot x_{t_k} \quad (11)$$

式中： x_{t_k} 为 t_k 时刻的状态变量。

4 自适应变导纳力跟踪方法

导纳控制是一种间接的力控制方法，其内环采用位置控制，稳定性较高。针对不同的工作环境，设计合适的惯量、阻尼、刚度参数，可实现柔顺的控制效果。在笛卡尔空间进行力控制时，各个方向是解耦的，因此本文以一维为例进行推导。接触力的导纳控制模型为

$$M(\ddot{\mathbf{x}}_c - \ddot{\mathbf{x}}_d) + B(\dot{\mathbf{x}}_c - \dot{\mathbf{x}}_d) + K(\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_d) = \mathbf{e}_f \quad (12)$$

式中： $\mathbf{x}_c$ 为实际控制位置，通常在位置模式下操作臂的跟踪误差足够小，其实际位置 $\mathbf{x}_m$ 满足 $\mathbf{x}_m = \mathbf{x}_c$ ； $\mathbf{x}_d$ 为操作臂的期望位置； $\mathbf{e}_f = (F_c - F_d)$ 为力跟踪误差， F_c 为笛卡尔空间下操作臂与环境之间的接触力， F_d 为

操作臂末端的期望接触力； M 、 B 、 K 分别为导纳控制模型的等效惯量、阻尼、刚度。

在操作臂与环境接触时，一般将环境建模为一阶弹簧系统：

$$\mathbf{F}_c = K_e(\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_c) \quad (13)$$

式中： K_e 为环境刚度， $\mathbf{x}_e$ 为环境位置。

接触力的稳态误差为

$$e_{\text{fss}} = \frac{K}{K+K_e} (K_e(\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_r) - \mathbf{F}_d) \quad (14)$$

式中： $\mathbf{x}_r$ 为参考环境位置。

由公式(14)可知，力跟踪误差受环境位置误差和环境刚度的影响。一般设定期望刚度 $K = 0$ ，使稳态误差接近 0。在动态环境中，为提高力跟踪性能，采用自适应变导纳力跟踪方法进一步补偿接触力误差，具体为通过变阻尼的方式实现力跟踪。根据接触力误差的积分，在线调整导纳控制模型的阻尼系数，建立阻尼变化率：

$$B(t) = B_0 + \Delta B(t) \quad (15)$$

$$\Delta B(t) = b_i \int_0^t (\mathbf{F}_c - \mathbf{F}_d)(\epsilon + \dot{\mathbf{x}}_c - \dot{\mathbf{x}}_d)^{-1} \quad (16)$$

式中： B 为时变的阻尼系数， ΔB 为阻尼变化量， b_i 为阻尼变化率的更新系数， ϵ 为一极小量，防止出现除零现象。

由公式(16)可知，阻尼变化率利用接触力误差的积分来动态调整导纳控制模型的阻尼系数，使操作臂能够准确跟踪期望接触力。为便于导纳控制算法的实现，将公式(12)、(16)离散为

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{x}}_c(t) = \ddot{\mathbf{x}}_c(t-1) + M^{-1}(\mathbf{e}_f(t) - B(t)\dot{\mathbf{e}}_x(t)) \\ \dot{\mathbf{x}}_c(t) = \dot{\mathbf{x}}_c(t-1) + \ddot{\mathbf{x}}_c(t) \times T_s \\ \mathbf{x}_c(t) = \mathbf{x}_c(t-1) + \dot{\mathbf{x}}_c(t) \times T_s \end{cases} \quad (17)$$

式中： $\mathbf{e}_x = (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_d)$ 为位置误差， T_s 为控制周期。

5 仿真实验验证

为验证本文提出的基于关节外力估计的操作臂自适应力跟踪方法的有效性，进行仿真验证。利用实验室自研的五自由度操作臂平台（见图 2）验证外力

估计的准确性，以及自适应变导纳力跟踪方法的有效性。

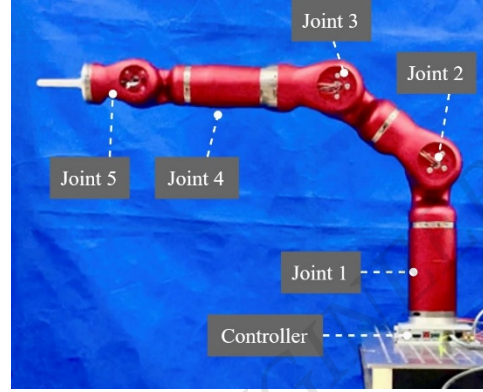


图 2 五自由度操作臂平台

仿真软件采用 MATLAB/Simulink。硬件环境为：64 位 Windows 10，CPU 为 i7-11800H 2.3 GHz，运行内存为 16 GB。仿真实验分为外力估计实验和自适应力跟踪实验两部分。

5.1 外力估计实验

本文利用单摆模型进行外力估计实验。DKF 采用一阶扰动模型 ($m = 2$) 与 GMO 进行仿真对比实验。仿真时，单摆模型按照正弦轨迹从 0 到 $\pi/4$ 进行往复运动，在 1~3 s 施加 0~2 Nm 的斜坡外力， $\mathbf{q}$ 、 $\dot{\mathbf{q}}$ 的测量噪声方差为 1×10^{-5} ，力传感器测量噪声方差为 0.02，控制周期 T_s 为 10 ms，GMO 增益为 15，DKF 参数为 $K_d = 300$ ， $\Sigma_{\dot{\mathbf{q}}} = 1 \times 10^{-5}$ ， $\Sigma_{\mathbf{v}} = 0.02$ ， $\Sigma_p = 1 \times 10^{-5}$ 。仿真得到的外力估计误差曲线如图 3 所示。

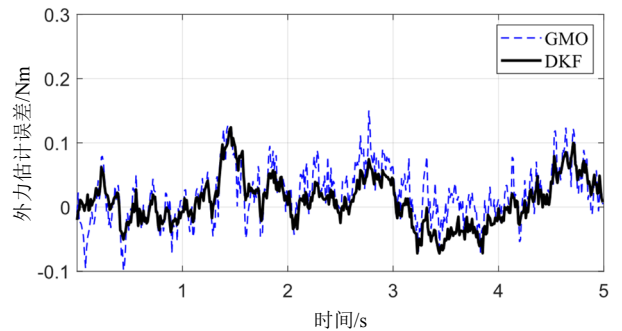


图 3 外力估计误差曲线

由图 3 可知：GMO 对噪声更敏感，外力估计结果包含较大的噪声；DKF 的误差波动较小，具有更好的滤波性能，且在 1 s 时施加外力后，其输出能更快

地收敛到真实值。

本文利用外力估计结果的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 来评估外力估计精度。DKF 的 RMSE (0.034 9 Nm) 比 GMO 的 RMSE (0.043 9 Nm) 减小了约 20%，提高了外力的估计精度。

5.2 自适应力跟踪实验

自适应力跟踪实验利用五自由度操作臂平台进行仿真，将导纳控制方法与自适应变导纳力跟踪方法进行对比分析。环境接触力均由 DKF 获取。导纳控制方法的参数设置为 $M = 50$, $B = 300$, $K = 0$ 。自适应变导纳力跟踪方法的参数设置为 $b_i = 0.1$ ，操作臂初始位置为 $[0.4, 0, 0.305]$ m，环境高度为 0.3 m，环境刚度为 1 000 N/m，操作臂仅沿 z 轴运动， x 、 y 轴保持不变，设操作臂在 5~30 s 时间段内，期望接触力为 10 N，其他时间期望接触力为 0 N。实验结果如图 4 所示。

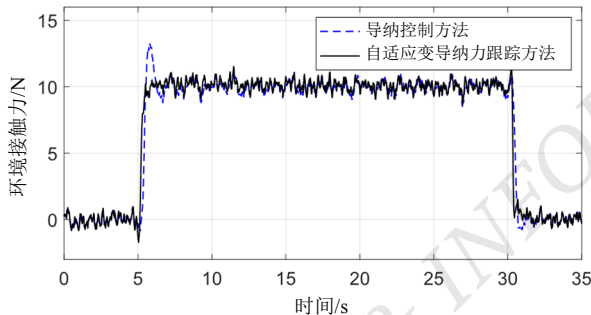


图 4 力跟踪对比实验结果

由图 4 可以看出：操作臂在 5 s 后与环境建立接触关系，其中导纳控制方法出现明显震荡，接触力超调约为 3.2 N；本文提出的自适应变导纳力跟踪方法在与环境接触时，未出现震荡或超调现象，接触力能够快速收敛至期望值，且较为稳定。

导纳控制方法与自适应变导纳力跟踪方法的力跟踪误差对比如表 1 所示。

表 1 力跟踪误差

方法	力跟踪误差范围/N	RMSE/N
导纳控制	$[-1.51, 3.22]$	0.55
自适应变导纳力跟踪	$[-1.32, 1.52]$	0.40

由表 1 可以看出：自适应变导纳力跟踪方法的力跟踪误差范围明显小于导纳控制方法，力波动更小，RMSE 比导纳控制方法降低约 27%，表明本文提出的自适应变导纳力跟踪方法能够有效减少力超调，具有更好的稳定性。

6 结论

本文提出了一种基于关节外力估计的操作臂自适应力跟踪方法。首先，结合广义动量和卡尔曼滤波器，构建线性的 DKF，实现接触力估计；然后，采用自适应变导纳力跟踪方法实现操作臂与环境之间的稳定接触力跟踪。仿真实验结果表明，本文提出的外力估计方法降低了外力估计误差，自适应变导纳力跟踪方法相较于导纳控制方法有效地减少了超调与震荡现象，具有更好的稳定性。未来研究如何提高外力估计精度，进一步加强力跟踪算法自适应能力，并将算法应用于轴孔装配、恒力抛光打磨等基于力控制的场景。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] 刘玲玲, 花放, 张悦, 等. 多国加快机器人产业融合创新发展[N]. 人民日报, 2022-10-31(14).
- [2] JIANG Y, HUANG Z, YANG B, et al. A review of robotic assembly strategies for the full operation procedure: planning, execution and evaluation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 78: 102366.
- [3] SUOMALAINEN M, KARAYIANNIDIS Y, KYRKI V. A survey of robot manipulation in contact[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 156: 104224.
- [4] DE LUCA A, MATTONE R. Actuator failure detection and isolation using generalized momenta[C]//2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (cat. No. 03CH-37422). IEEE, 2003, 1: 634-639.
- [5] 李智靖, 叶锦华, 吴海彬. 机器人带未知负载条件下的碰撞检测算法[J]. 机器人, 2020, 42(1): 29-38.
- [6] 张建华, 蔡灿, 刘璇, 等. 基于二阶前馈外力观测器的机械臂碰撞策略[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7): 1775-1783.

- [7] COLOMÉ A, PARDO D, ALENYÀ G, et al. External force estimation during compliant robot manipulation[C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013: 3535-3540.
- [8] ROVEDA L, PIGA D. Sensorless environment stiffness and interaction force estimation for impedance control tuning in robotized interaction tasks[J]. Autonomous Robots, 2021,45(3): 371-388.
- [9] WAHRBURG A, MORARA E, CESARI G, et al. Cartesian contact force estimation for robotic manipulators using Kalman filters and the generalized momentum[C]//2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2015:1230-1235.
- [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(7):144-153.
- [11] JUNG S, HSIA T C, BONITZ R G. Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004,12(3):474-483.
- [12] 郭万金,于苏扬,田玉祥,等.机器人打磨自适应变阻抗主动柔顺恒力控制[J].哈尔滨工业大学学报,2023,55(12):54-65.
- [13] 周波,刘奕荣,刘会昌,等.基于变刚度自适应导纳机制的机械臂恒力控制[J].控制理论与应用,2023,40(10):1880-1888.
- [14] ROJAS H D, CORTÉS-ROMERO J. On the equivalence between generalized proportional integral observer and disturbance observer[J]. ISA Transactions, 2023,133:397-411.

作者简介:

叶鹏程,男,1999年生,硕士研究生,主要研究方向:协作机器人控制算法开发。E-mail: 912250567@qq.com

毛世鑫,男,1986年生,博士研究生,主要研究方向:机器人规划与控制。E-mail: maosx618@jtcx.cn

张一超(通信作者),女,1984年生,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:机电产品和机器人系统可靠性。E-mail: zhangyichao@ceprei.biz

(上接第40页)

- [11] DENG J, CUMMINS N, HAN J, et al. The university of Passau open emotion recognition system for the multimodal emotion challenge[C]//Pattern Recognition: 7th Chinese Conference, CCPR 2016, Chengdu, China, November 5-7, 2016, Proceedings, Part II 7. Springer Singapore, 2016: 652-666.
- [12] MAO X, SHEN C, YANG Y B. Image restoration using very deep convolutional encoder-decoder networks with symmetric skip connections[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2016,29:1-9.
- [13] MÜLLER A. Integral probability metrics and their generating classes of functions[J]. Advances in Applied Probability, 1997, 29(2):429-443.
- [14] GRETTON A, BORGWARDT K, RASCH M, et al. A kernel method for the two-sample-problem[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2006,19:1-43.
- [15] PUROHIT H, TANABE R, ICHIGE K, et al. MIMII Dataset: Sound dataset for malfunctioning industrial machine investigation and inspection[C]. Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2019 Workshop (DCASE2019), 2019:209-213.
- [16] DONG Yul Oh, II DONG Yun. Residual error based anomaly detection using auto-encoder in SMD machine sound[J]. Sensors, 2018,18(5):1-14.

作者简介:

林朝晖,男,1968年生,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:水处理技术。E-mail: feyln@139.com

廖奕校,男,1992年生,博士研究生,主要研究方向:智能传感与检测。E-mail: yx.liao@giim.ac.cn

招智铭(通信作者),男,1995年生,本科,工程师,主要研究方向:电气自动化技术。E-mail: 960716032@qq.com

万智勇,男,1996年生,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向:智能传感与检测。E-mail: zy.wan@giim.ac.cn

周松斌,男,1978年生,博士研究生,研究员,主要研究方向:智能传感与检测。E-mail: sb.zhou@giim.ac.cn