

# 基于优化 ADRC 的单臂机器人轨迹跟踪研究

陈 壮<sup>1</sup>, 王宪伦<sup>2</sup>, 陈 闪<sup>3</sup>

(1. 芯恩(青岛)集成电路有限公司, 山东 青岛 266000; 2. 青岛科技大学机电工程学院, 山东 青岛 266061; 3. 青岛滨海学院机电工程学院, 山东 青岛 266555)

**摘 要:** 针对机器人在不确定环境下受到内外界扰动的影响, 末端执行器不能跟踪已规划的轨迹运行, 以 Kinova MICO2 机器人为例, 研究轨迹自抗扰跟踪模型。建立了机器人关节空间运动模型, 根据扰动特点构造了二阶 ADRC 框架模型, 解决了末端执行器偏离规划轨迹的问题。分析了机器人 ADRC 参数对轨迹跟踪的意义, 为了确保系统跟踪的动态稳定性, 建立 GA-RBF 网络优化了原始 ADRC。最后分析轨迹跟踪前后的离散点绝对误差, 验证机器人轨迹跟踪的可靠性。实验结果表明, GA-RBF 优化的 ADRC 使得机器人实际轨迹能较好收敛于理想的规划轨迹, 为工业应用中对轨迹要求较高的任务提供算法参考。

**关键词:** 轨迹规划; 自抗扰控制器; 神经网络; 单臂机器人

**中图分类号:** TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2257(2020)10-0077-04

## Study on Trajectory Tracking of Single-arm Robot Based on Optimized ADRC

CHEN Zhuang<sup>1</sup>, WANG Xianlun<sup>2</sup>, CHEN Shan<sup>3</sup>

(1. SiEn (Qingdao) Integrated Circuits Co., Ltd., Qingdao 266000, China;  
2. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;  
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Binhai University, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** Aiming at the robot is affected by the internal and external deflections in the uncertain environment, the end effector can't track the planned trajectory. Kinova MICO2 robot is used as an example to study the trajectory self resistant tracking model. Firstly, the spatial motion model of the robot joint is established, and the second-order ADRC frame model is constructed according to the characteristics of the torsion, which solves the problem that the end effector deviates from the planned trajectory. Secondly, the significance of ADRC parameters to trajectory tracking is analyzed. In order to ensure the dynamic stability of system tracking, GA-RBF network is established to optimize the original ADRC. Finally, the absolute error of discrete points before and after trajectory tracking is analyzed, and the reliability of robot trajectory tracking is verified by analyzing the error. The experimental results show that the ADRC optimized by GA-RBF makes the actual trajectory of the robot converge to the ideal planning trajectory, which provides algorithm reference for the tasks with high trajectory requirements in industrial applications.

**Key words:** trajectory planning; ADRC; neural network; single-arm robot

## 0 引言

机器人抓取物体的工作看似简单, 实际上是多

耦合的非线性轨迹解算过程<sup>[1]</sup>。对于机器人末端执行器的轨迹规划, 一般将末端执行器的笛卡尔坐标系由运动学算法映射到关节空间中, 解算并拟合得

收稿日期: 2020-04-29

作者简介: 陈 壮 (1995—), 男, 山东青岛人, 硕士, 工程师, 研究方向为机器人视觉及运动控制, 通信作者; 王宪伦 (1978—), 男, 山东青岛人, 博士, 副教授, 研究方向为机器人视觉及人工智能; 陈 闪 (1986—), 女, 山东青岛人, 工程师, 研究方向为煤矿智能机器人。

到理想的抓取角位移轨迹和角加速度,将关节变量转换成脉冲值发送给伺服电机完成各轴的协同动作。但是实际上机器人常处于微振动的环境中,不可避免地受到自身共振和地面振动的不确定扰动,导致抓取轨迹与拟合的轨迹偏离。为了使机器人高精度跟踪抓取轨迹,需要在已知机器人的运动学和动力学模型的前提下构造轨迹跟踪控制系统。

Yu 等<sup>[2]</sup>为了减轻内外部的干扰耦合对无人直升螺旋桨操控的影响,建立了 ADRC 自抗扰模型,对比 PID 控制算法,提高了系统的动态稳定性。Wang 等<sup>[3]</sup>将自抗扰模型应用于交流电,估计逆变器的周期性负载扰动。廖薇等<sup>[4]</sup>构造了 ADRC 模型使得海洋绞车适用于不同线缆直径和重量的工况,即使当环境变化时,控制器也能保持良好的动态性能,对比了 PID 控制器,证明了 ADRC 有较快的响应速度和抗干扰能力。

自抗扰控制(ADRC)算法是在 PID 控制理论基础上延伸发展而来的<sup>[5]</sup>,能自主抵抗机器人内外部的各类干扰,具备高精度的轨迹跟踪能力,并且其关键参数也可以根据实际跟踪能力进一步优化。

## 1 关节空间动力学模型

实验用的是加拿大 Kinova 公司研发的 MICO2 仿人六轴串联机器人,在关节空间下对应位置和时间

$$\tau = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (1)$$

$\tau$  为六关节轴驱动力矩向量,  $\tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_4 \quad \tau_5 \quad \tau_6]^T$ ;  $q$  为六关节轴角位移矢量,  $q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5 \quad q_6]^T$ ;  $\dot{q}$  和  $\ddot{q}$  分别为速度矢量和加速度矢量;  $M(q)$  为六阶质量矩阵;  $V(q, \dot{q})$  为科氏力和离心力矢量;  $G(q)$  为重力矢量。

引入扰动辅助函数  $f(q, \dot{q}, \omega, t)$ , 其表达式为

$$f(q, \dot{q}, \omega, t) = -M^{-1}(q)[V(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \omega] \quad (2)$$

设计 ADRC 算法时,读取拟合后的六关节轴角位移矢量  $q$  和速度矢量  $\dot{q}$ 。则加速度  $\ddot{q}$  跟踪控制器非线性模型为

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)\tau + f(q, \dot{q}, \omega, t) \quad (3)$$

## 2 建立 ADRC 模型

标准二阶 ADRC 由微分跟踪器(TD)、非线性状态误差反馈(NLSEF)和扩张状态观测器(ESO)独立的 3 部分组成,如图 1 所示。变量  $q$  为机器人

各关节轴输出的角位移,设定变量  $q_c$  为机器人关节拟合轨迹的任意位置,变量  $q_{c1}$  为输入轨迹  $q_c$  的跟踪信号,  $q_{c2}$  为输入轨迹  $q_c$  微分后速度的跟踪信号,它们由 ESO 实时提取跟踪值  $q_{c1}$  和  $q_{c2}$ ,从而确保跟踪值的稳定性。 $\kappa$  为系统内外的不确定干扰; $\tau$  为考虑内外干扰引入的系统补偿量。

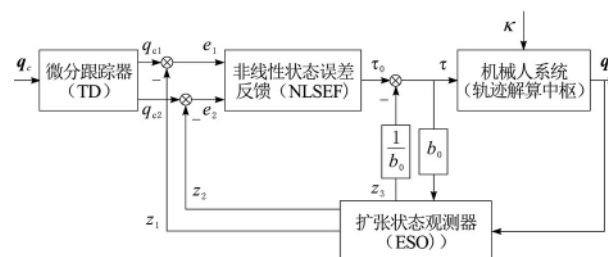


图 1 二阶 ADRC 框架模型

跟踪值  $q_{c1}$  和  $q_{c2}$  的二阶非线性跟踪微分器 TD 函数形式为

$$\begin{cases} q_{c1} = q_{c1} + hq_{c2} \\ q_{c2} = q_{c2} + hk \end{cases} \quad (4)$$

$k = f_h(q_{c1} - q, q_{c2}, r_0, \mu)$ ,  $r$  为跟踪速度控制因子,一般  $|k| \leq r$ ;  $r_0$  为  $r$  的整数倍,一般按实际控制需求选择合适的倍数;  $h$  为轨迹采样周期,  $\mu$  为噪声滤波控制因子,一般为  $h$  的 20 倍;  $f_h$  为控制反馈跟踪函数。

ESO 是自抗扰控制器的核心,用于跟踪变量,估计并补偿不确定扰动以消除系统噪声,这也是 PID 没有的功能。设变量  $z_1$  为  $q_{c1}$  的估计值,变量  $z_2$  为  $q_{c2}$  的估计值,变量  $z_3$  为扩张变态变量。 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  为 ESO 内部参数,构建 ESO 算法为

$$\begin{cases} e = z_1 - q \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_1 e) \\ z_2 = z_2 + h(z_3 - \beta_2 e + b_0 \tau) \\ z_3 = z_3 + h(-\beta_3 e) \end{cases} \quad (5)$$

$b_0$  为已知的预设常数;  $\beta_1 = \frac{1}{h}, \beta_2 = \frac{1}{3h^2}, \beta_3 = \frac{1}{32h^3}$ 。

至此,已经通过 ESO 估计了机器人内外不确定扰动,为了使扰动的抵消变得可控,引入非线性状态误差反馈(NLSEF)。NLSEF 是自抗扰控制器特有的组成部分,流程如图 2 所示,用于调整增益限制系统扰动,调节速度在较小的范围内波动从而避免超调。已知 TD 跟踪得到的角位移  $q_{c1}$  和速度  $q_{c2}$ ,以及 ESO 得到轨迹估计值  $z_1$  和速度估计值  $z_2$ 。对应数值做差法运算得到跟踪误差  $e_1$  和  $e_2$ 。结合控制反馈跟踪函数  $f_h$ ,得到 NLSEF 表达式为

$$\begin{cases} e_1 = q_{c1} - z_1 \\ e_2 = q_{c2} - z_2 \\ \tau_0 = -f(e_1, ce_2, r, \mu) \\ \tau = \tau_0 - \frac{z_3}{b_0} \end{cases} \quad (6)$$

$c$  为阻尼系数。

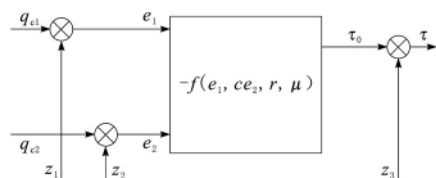


图2 NLSEF 计算流程

### 3 轨迹跟踪仿真

外部干扰对轨迹的影响,主要体现在末端执行器角位移变量的瞬时幅值存在噪声且角加速度响应延迟<sup>[6-7]</sup>。选择 Kinova MICO2 的第3关节轴跟踪已规划的关节角位移变量  $q$  为例,验证二阶 ADRC 设计的可行性。ADRC 跟踪结果如图3所示。由图3可知,当存在干扰时,第3关节轴反馈的实际关节角位移受噪声干扰的影响较明显,明显偏离理想的规划轨迹,而经过 ADRC 估计并补偿扰动后使得跟踪控制的角位移能够近似向规划的轨迹趋近。

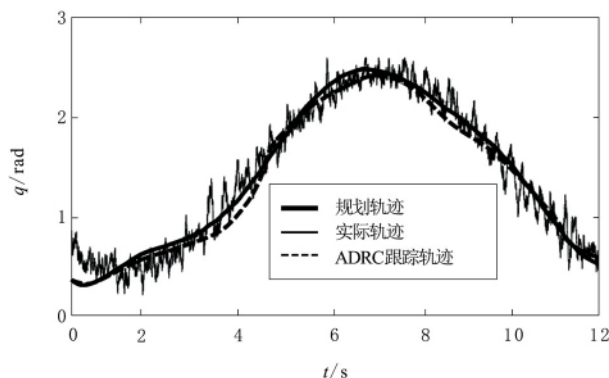


图3 第3关节角位移轨迹

### 4 ADRC 参数优化

ADRC 算法在运算效率和跟踪干扰等方面都优于 PID 算法,甚至不依赖于数学模型。各部分参数的优化起着至关重要的作用。考虑到闭环系统的动态特性,为了避免因数据量较大而造成误差信号时滞现象,需要根据误差补偿值动态微调 ESO 的内部参数  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  以及 NLSEF 的参数  $k_p$ 。参数  $k_p$  的选取影响着目标值跟踪精度,过大会出现超调现象,因此需要从非线性控制率层面抑制系统超调,减小振荡。

进一步解算  $k_p$  的最优解,设计了一种基于遗传算法优化径向基网络算法 (GA - RBF) 实时优化 ADRC。RBF 神经网络能精准快速逼近设定值,同时由遗传算法 (GA) 的强鲁棒性并行搜索优化径向基函数 (RBF) 的网络权值并避免局部极小值,尽可能完善 RBF 神经网络<sup>[8-9]</sup>。RBF 高斯逼近激活函数为

$$y_o = \sum_{i=1}^n g_{io} \phi(\|x - u_i\|^2) \quad o = 1, \dots, p \quad (7)$$

隐含层激活函数  $\phi(\|x - u_i\|)$  一般为

$$\phi(\|x - u_i\|) = \exp(-\|x - u_i\|^2 / \sigma^2) \quad (8)$$

$\|x - u_i\|$  为基函数与输入矩阵的差向量;  $g$  矩阵为权值;  $\sigma$  为函数宽度阈值参数,影响 RBF 径向范围;  $p$  为神经元数量;  $u_i$  为第  $i$  个节点的聚类中心。

通常采用 GA 并行全局搜索 RBF 的最优解。GA 优化 RBF 网络的权值流程如图4所示。设定二进制编码,迭代种群规模为  $N$ ,借鉴生物繁殖理念,选择过程则以评价染色体的方式择优交叉组合产生新的后代,交叉概率和变异概率则跟随适应度改变。当满足迭代阈值时,停止迭代并输出此时种群中最大适应度的个体作为最优权值。网络权值预测数值变化情况如图5所示。

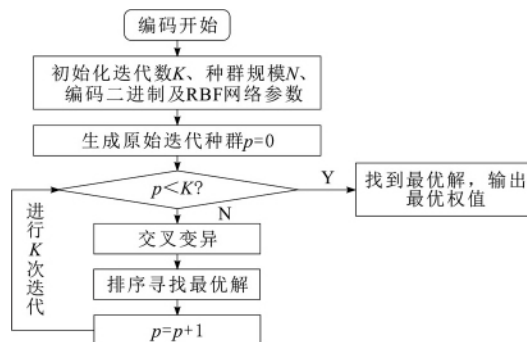


图4 GA 优化 RBF 网络的权值流程

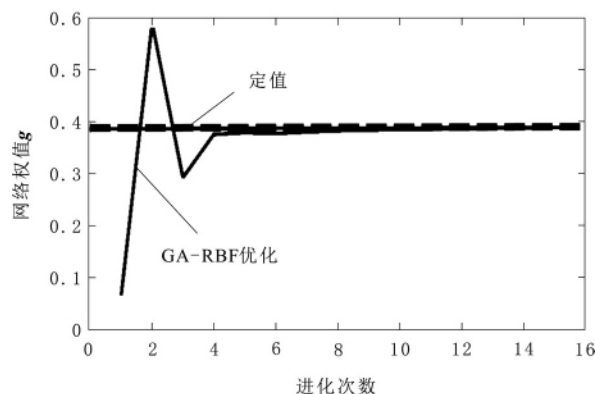


图5 网络权值预测数值变化

由图5可知,在迭代初期,RBF 的网络权值  $g$  有较大的波动,使得预测值不可靠,随着迭代进化

次数的增加使得权值预测值逐步趋于稳定。这也意味着 GA 预测的最小误差也跟随迭代进化次数的增加逐步收敛至 0。使得在当前 ADRC 跟踪模型下,预测了合适的 RBF 网络权值  $g$ ,通过 RBF 网络优化了 NLSEF,微调参数  $k_p$ ,最终实现更高的逼近精度。

## 5 实验误差分析

第 3 关节角位移变量  $q$  由 GA-RBF 优化后的 ADRC 跟踪结果与规划轨迹作差,得到绝对误差偏移量  $\delta$ ,如图 6 所示。通过偏移幅值清楚地看出该关节的各离散点的跟踪误差临界波动较小,角位移绝对误差偏移量  $\delta$  基本上能控制在  $-0.25 \sim 0.25$  rad 范围内,且误差可控。从而将算法映射到机器人的 6 个关节轴,各轴协同工作使得机器人末端执行器实时跟随已规划的轨迹工作。

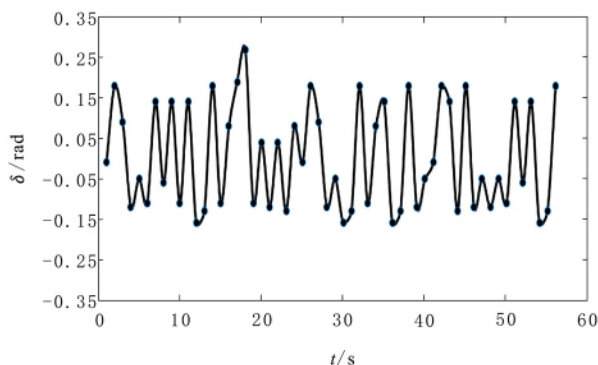


图 6 ADRC 跟踪误差

## 6 结束语

机器人普遍存在来自内外界的不确定性干扰,为了使得机器人更好地遵循规划好的轨迹运行。本文以 Kinova MICO2 为例,在关节空间下建立了

ADRC 关节角位移跟踪模型。为了确保 ADRC 适用于各类复杂环境,保证其闭环误差跟踪稳定性。建立 GA-RBF 网络进一步优化了 NLSEF 参数  $k_p$ ,控制角位移跟踪误差在一定时间内稳定在可接受的范围内,表明 GA-RBF 优化的 ADRC 使机器人实际工作轨迹向着规划轨迹收敛。

### 参考文献:

- [1] 李杰,齐晓慧,万慧,等.自抗扰控制:研究成果总结与展望[J].控制理论与应用,2017,34(3):281-295.
- [2] YU B, KIM S, SUK J. Robust control based on ADRC and DOBC for small-scale helicopter[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019,52(12):140-145.
- [3] WANG Z, YAN Y D, YANG J, et al. Robust voltage regulation of a DC-AC inverter with load variations via a HDOBC approach[J]. IEEE Transactions on circuits and systems II: express briefs, 2019,66(7):1172-1176.
- [4] 廖薇,赵延明,刘德顺,等.电驱动海洋绞车主动升沉补偿自抗扰控制系统[J].中国机械工程,2018,29(24):2999-3008.
- [5] 李殿起,段勇.用跟踪微分器实现机器人自抗扰控制[J].兵工学报,2016,37(9):1721-1729.
- [6] MELINGUI A, MERZOUKI R, MBEDE J B, et al. Qualitative approach for inverse kinematic modeling of a Compact Bionic Handling Assistant trunk[J]. IFAC Proceedings volumes, 2014,47(3):9353-9358.
- [7] LIU X, YANG C G, CHEN Z G, et al. Neuro-adaptive observer based control of flexible joint robot[J]. Neurocomputing, 2018,275:73-82.
- [8] 李颢,李语心,杨振,等.基于 ADRC 的液压支护机器人自适应控制[J].机械与电子,2018,36(4):71-75.
- [9] 赵翔宇.六自由度机械臂及其控制系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.

(上接第 76 页)

- [7] 赵卓峰,丁维龙,韩燕波.基于云架构的交通感知数据集成处理平台[J].计算机研究与发展,2016,53(6):1332-1341.
- [8] 李巍巍.基于云计算的大数据统一分析平台设计与应用[J].自动化与仪器仪表,2016(8):195-197.
- [9] 刘超,唐郑望,姚宏,等.云平台下图数据处理技术[J].计算机应用,2015,35(1):43-47.
- [10] 王德文.基于云计算的电力数据中心基础架构及其关键技术[J].电力系统自动化,2012,36(11):72-76,112.

- [11] 李敏,倪少权,邱小平,等.物联网环境下基于上下文的 Hadoop 大数据处理系统模型[J].计算机应用,2015,35(5):1267-1272.
- [12] 陈锐忠,魏理豪,梁哲恒,等.基于 Hadoop 的海量数据处理模型研究和应用[J].电子设计工程,2016,24(14):101-103,106.
- [13] 李聪颖,王瑞刚,梁小江.基于 Hadoop 的交互式大数据分析查询处理方法[J].计算机技术与发展,2016,26(8):134-137,142.
- [14] 崔英杰.云网络架构的大数据分析平台研究[J].电子设计工程,2020,28(5):98-102.