

机械臂非奇异快速终端滑模迭代学习 轨迹跟踪控制研究

陈涛, 李晓娟, 刘建璇, 王立忠

(新疆大学机械工程学院, 830047, 乌鲁木齐)

摘要: 针对机械臂建模参数精准性与扰动不确定性的精确轨迹跟踪控制问题,提出了一种非奇异快速终端滑模控制与迭代学习控制相融合的控制方法。首先,为保证跟踪误差的收敛速度,避免收敛中的奇异性问题,设计采用饱和函数趋近律的非奇异快速终端滑模控制器。其次,为进一步提高轨迹跟踪精度,设计误差迭代学习控制器,并对所设计的控制器进行了收敛性分析。最后,在Simulink软件中搭建所提方法的控制系统,进行迭代控制与对比控制仿真实验,并同步开展机械臂跟踪控制真机实验。结果表明:在迭代实验中,关节最大平均稳态误差提升了72%;在对比实验中,与比例微分(PD)型迭代学习控制和PD型线性滑模控制相比,最大平均稳态误差分别提升了97%、51%,最大响应调整时间分别减少70%、50%;在真机实验中,机械臂跟踪误差稳定在 $[-0.05, 0.05]$ rad区间内。实验结果充分验证了所提控制方法的正确性与有效性,为解决机械臂轨迹跟踪中的不确定性问题提供了一种有效的控制方案。

关键词: 机械臂;迭代学习控制;非奇异快速终端滑模控制;轨迹跟踪

中图分类号: TP241 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202501012 **文章编号:** 0253-987X(2025)01-0125-12

Research on Trajectory Tracking Control of Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Iterative Learning for Robot Manipulators

CHEN Tao, LI Xiaojuan, LIU Jianxuan, WANG Lizhong

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, 830047, Urumqi)

Abstract: In response to the challenge of precise trajectory tracking control for robot manipulators, influenced by the accuracy of modeling parameters and disturbance uncertainties, a novel control approach that combines non-singular fast terminal sliding mode control with iterative learning control is presented. First, to ensure the convergence speed of tracking errors and prevent singularity issues during convergence, a non-singular fast terminal sliding mode controller employing the law of approach to saturation is designed. Second, to further improve trajectory tracking accuracy, an error iterative learning controller is developed, and the convergence of these controllers is analyzed. Finally, the control system based on the proposed method is implemented in Simulink for iterative and comparative control simulation experiments. Additionally, real-machine experiments for robot manipulator tracking control are carried out. The experimental results show that: in the iterative experiment, the maximum average steady-state error in joints increases by 72%; in the

收稿日期: 2024-07-15。 作者简介: 陈涛(1994—),男,博士生;王立忠(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52265003);新疆维吾尔自治区天山雪松青年拔尖人才资助项目(20227SYCCX0061)。

网络出版时间: 2024-09-25

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240925.1105.002>

comparative experiment, compared to PD-type iterative learning control and PD-type linear sliding mode control, the maximum average steady-state error rises by 97% and 51%, respectively, while the maximum response adjustment time decreases by 70% and 50%, respectively; in the real-machine experiment, the robot manipulator tracking error stabilizes within the range of $[-0.05, 0.05]$ rad. These findings thoroughly validate the effectiveness and accuracy of the proposed control method, offering an effective control solution for addressing uncertainties in robot manipulator trajectory tracking.

Keywords: robot manipulators; non-singular fast terminal sliding mode control; iterative learning control; trajectory tracking

近年来,随着材料科学、电子技术和机械工程的迅猛发展,机械臂在工业自动化^[1]、农业采摘^[2]、医疗手术^[3]等领域的应用愈加广泛。随着机械臂的应用场景的不断精细化和复杂化,对机械臂控制精度要求也在不断提升。然而,机械臂系统具有高度非线性和强耦合特性,且受到建模参数精准性和扰动不确定性等因素影响,实现不确定机械臂非线性系统的高精度轨迹跟踪控制,成为控制领域的重要研究问题之一。为此,有必要设计出具有高精度和强鲁棒性的轨迹跟踪控制器,以确保机械臂在各种复杂应用场景中的可靠性能和精准操作。

为提高机械臂的轨迹跟踪精度,国内外学者开展了大量研究,提出了多种控制策略,包括 PID 控制^[4-5]、神经网络控制^[6-7]、滑模控制^[8-9]、迭代学习控制^[10-11]和模糊控制^[12-13]等。其中,滑模控制因其快速响应和强鲁棒性的显著优势,尤其是切换项在抑制扰动和处理不确定参数方面的卓越表现,被广泛应用于机械臂非线性系统控制中^[14-15]。随着滑模控制技术的发展,从线性滑模控制(SMC)^[16],到终端滑模控制(TSMC)^[17],再到非奇异快速终端滑模控制(NFTSMC)^[18],滑模控制不断优化和改进,改善了系统的控制精度和鲁棒性。

考虑到机械臂系统具有强非线性和强耦合性的特点,采用单一的控制方法很难使轨迹跟踪达到满意的效果。因此,研究者们提出了多种融合的控制策略,以期待在应对复杂系统动态行为方面取得更好的效果。Cruz-Ortiz 等^[19]设计了基于分布式状态约束的非奇异终端滑模控制,实现了二轴机械臂在全状态约束下的有限时间轨迹跟踪。Guo 等^[20]提出了一种带有非线性干扰观测器的非矢量终端滑模控制器轨迹跟踪方法,实现了二自由度机械臂的扭矩输出无颤振、平滑,且具有精确的跟踪效果。贾华等^[21]设计了对机械臂进 RBF 神经网络分块逼近的方法,减少了轨迹稳态误差。

综上所述,融合多种控制策略可以提升机械臂的轨迹跟踪性能,而迭代学习控制(ILC)作为一种基于重复性任务的控制方法,利用系统的误差信息不断优化控制输入,提高系统的轨迹跟踪精度和鲁棒性。结合 ILC,研究者们设计了多种融合控制策略,殷春武等^[22]提出了基于时变滑模面的 PID 型闭环迭代学习控制策略,达到二自由度机器人轨迹局部精确跟踪目的。Wu 等^[23]将二阶终端滑模与迭代学习控制相结合,提高了工业机械臂的控制精度。张程琳等^[24]针对多自由度机械臂系统,设计了自适应滑模模糊逻辑迭代学习跟踪控制方法,提高了六自由度工业机械臂系统的鲁棒性。

在上述研究启发下,本文设计了一种机械臂非奇异快速终端滑模迭代学习控制(NFTSMILC)方案。首先,设计非奇异快速终端滑模控制器,实现系统有限时间内快速收敛到滑模面,采用饱和函数的趋近律,增强机械臂系统的抗干扰能力,并能减少系统的抖振。其次,设计迭代学习控制器,对跟踪误差信号进行迭代学习并更新控制变量,以实现期望轨迹的高精度跟踪,改善系统的性能。最后,在 Simulink 软件中对机械臂进行仿真控制实验,并在机械臂实验平台验证了所提控制方案的有效性与优越性。

1 机械臂动力学模型建立

考虑 6 关节不确定机械臂动力学系统,其方程可表示如下

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

式中: $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 分别为关节位置、关节角速度和关节角加速度; $M(q) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 表示惯性矩阵; $C(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 表示离心力和科氏力; $G(q) \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 表示重力; $\tau \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 表示控制输入关节力矩; $\tau_d \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 表示外部未知扰动。

在实际机械臂系统建模过程中,受到建模误差、

物理参数误差等因素的影响,机械臂系统存在模型不确定性,将不确定性表示为

$$\begin{cases} \mathbf{M}(\mathbf{q}) = \mathbf{M}_0(\mathbf{q}) + \Delta\mathbf{M}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \Delta\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{G}_0(\mathbf{q}) + \Delta\mathbf{G}(\mathbf{q}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}_0(\mathbf{q})$ 、 $\mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\mathbf{G}_0(\mathbf{q})$ 为名义模型参数; $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 、 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 为实际模型参数; $\Delta\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 、 $\Delta\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\Delta\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 为名义模型参数的误差。

考虑模型参数误差影响,将式(1)改写为

$$\mathbf{M}_0(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}_0(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau}_d - \Delta\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} - \Delta\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \Delta\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 表示系统的不确定项和外界干扰的集总扰动。

性质 1^[25] 惯性 $\mathbf{M}_0(\mathbf{q})$ 为对称正定矩阵,存在正数 λ_1 、 λ_2 , 满足

$$\lambda_1 \|\mathbf{x}\|^2 \leq \mathbf{x}^T \mathbf{M}_0(\mathbf{q}) \mathbf{x} \leq \lambda_2 \|\mathbf{x}\|^2, \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbf{R}^6 \quad (4)$$

性质 2^[26] $\dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为斜对称矩阵,满足

$$\mathbf{x}^T (\dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \mathbf{x} = 0, \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbf{R}^6 \quad (5)$$

2 控制器设计与收敛性分析

2.1 非奇异快速终端滑模控制器设计

定义 1 为简化分析,定义误差如下

$$\begin{cases} \mathbf{e} = [e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6]^T \\ \text{sgn}(\mathbf{e})^a = |\mathbf{e}|^a \text{sgn}(\mathbf{e}) \end{cases} \quad (6)$$

误差变量 $\mathbf{e}$ 、 $\dot{\mathbf{e}}$ 、 $\ddot{\mathbf{e}}$ 定义为

$$\begin{cases} \mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{e}} = \ddot{\mathbf{q}}_d - \ddot{\mathbf{q}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{q}_d$ 、 $\dot{\mathbf{q}}_d$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}_d$ 分别为期望轨迹、速度、加速度; $\mathbf{q}$ 、 $\dot{\mathbf{q}}$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}$ 分别为实际轨迹、速度、加速度。

综合考虑收敛速度和奇异问题,将 NFTSMC 滑模面设计为

$$\mathbf{s} = \mathbf{e} + \alpha \text{sgn}(\mathbf{e})^{r_1} + \beta \text{sgn}(\dot{\mathbf{e}})^{r_2} \quad (8)$$

式中: α 、 β 为正常数; $1 < r_1 < 2$, $r_2 > r_1$ 。

对滑模函数式(8)求导,可得表达式

$$\dot{\mathbf{s}} = \dot{\mathbf{e}} + \alpha r_1 |\mathbf{e}|^{r_1-1} \text{sgn}(\mathbf{e}) \dot{\mathbf{e}} + \beta r_2 |\dot{\mathbf{e}}|^{r_2-1} \text{sgn}(\dot{\mathbf{e}}) \ddot{\mathbf{e}} \quad (9)$$

将式(3)和式(7)带入式(9),可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} = & \dot{\mathbf{e}} + \alpha r_1 |\mathbf{e}|^{r_1-1} \text{sgn}(\mathbf{e}) \dot{\mathbf{e}} + \\ & \beta r_2 |\dot{\mathbf{e}}|^{r_2-1} \text{sgn}(\dot{\mathbf{e}}) [\ddot{\mathbf{q}}_d - \mathbf{M}_0^{-1}(\boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}_0 \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}_0)] \end{aligned} \quad (10)$$

为了提高系统的抗干扰能力,我们设计等效控制律 $\boldsymbol{\tau}_{eq}$ 以抵消系统已知的动态特性,设计切换控制律 $\boldsymbol{\tau}_{sw}$ 以补偿系统扰动,具体控制律如下

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{eq} + \boldsymbol{\tau}_{sw} \quad (11)$$

令 $\dot{\mathbf{s}} = 0$, 可得等效控制率 $\boldsymbol{\tau}_{eq}$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{eq} = & \mathbf{M}_0(\mathbf{q}) [\ddot{\mathbf{q}}_d + (\beta r_2)^{-1} \text{sgn}(\dot{\mathbf{e}}) |\dot{\mathbf{e}}|^{2-r_2} \\ & (1 + \alpha r_1 |\mathbf{e}|^{r_1-1} \text{sgn}(\mathbf{e}))] + \mathbf{C}_0 \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}_0 \end{aligned} \quad (12)$$

在趋近律的选取中,采用饱和函数的指数趋近律,其表现形式如下

$$\dot{\mathbf{s}} = -\mathbf{k}\mathbf{s} - \mu \text{sat}(\mathbf{s}) \quad (13)$$

其中: $\mathbf{k}$ 、 $\mu > 0$ 为趋近律参数矩阵。

饱和函数 $\text{sat}(\mathbf{s})$ 的表达式为

$$\text{sat}(\mathbf{s}) = \begin{cases} 1, & \mathbf{s} > \boldsymbol{\Theta} \\ \mathbf{s}/\boldsymbol{\Theta}, & |\mathbf{s}| \leq \boldsymbol{\Theta} \\ -1, & \mathbf{s} < -\boldsymbol{\Theta} \end{cases} \quad (14)$$

式中: 边界层厚度 $\boldsymbol{\Theta} > 0$, 在边界层内采用线性化反馈控制,在边界层之外采用切换控制。

等效控制率 $\boldsymbol{\tau}_{sw}$ 为

$$\boldsymbol{\tau}_{sw} = \mathbf{M}_0 [\mathbf{k}\mathbf{s} + \mu \text{sat}(\mathbf{s})] \quad (15)$$

将式(12)和式(15)带入式(11),可得控制率表达式

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} = & \mathbf{M}_0(\mathbf{q}) [\ddot{\mathbf{q}}_d + (\beta r_2)^{-1} \text{sgn}(\dot{\mathbf{e}}) |\dot{\mathbf{e}}|^{2-r_2} (1 + \\ & \alpha r_1 |\mathbf{e}|^{r_1-1} \text{sgn}(\mathbf{e})) + \mathbf{k}\mathbf{s} + \mu \text{sat}(\mathbf{s})] + \mathbf{C}_0 \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}_0 \end{aligned} \quad (16)$$

2.2 迭代学习控制器设计

迭代学习控制通过修正误差来改善控制输入量,实现高精度期望轨迹跟踪。闭环 PD 型迭代利用当次误差进行学习,具有较好的收敛速度,因此,采用 PD 型闭环迭代学习控制律

$$\mathbf{u}_{k+1}(t) = \mathbf{u}_k(t) + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}_{k+1}(t) + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_{k+1}(t) \quad (17)$$

式中: $\mathbf{u}_k$ 为迭代控制输入量; $\mathbf{u}_0(t) = 0$; $\mathbf{K}_d$ 、 $\mathbf{K}_p$ 为正定增益参数矩阵; $\dot{\mathbf{e}}_{k+1}(t) = \dot{\mathbf{q}}_d(t) - \dot{\mathbf{q}}_{k+1}(t)$; $\mathbf{e}_{k+1}(t) = \mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}_{k+1}(t)$ 。

将式(16)融合 PD 型闭环迭代学习控制律后滑模迭代算法的控制律为

$$\mathbf{u}_{k+1}(t) = \mathbf{u}_k(t) + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}_{k+1}(t) + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_{k+1}(t) + \boldsymbol{\tau} \quad (18)$$

若令 $\boldsymbol{\Gamma} = \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}_{k+1}(t) + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_{k+1}(t) + \boldsymbol{\tau}$, 则式(18)可改写为

$$\mathbf{u}_{k+1}(t) = \mathbf{u}_k(t) + \boldsymbol{\Gamma} \quad (19)$$

根据式(3),记第 k 次迭代的机器人动力学系统为

$$\mathbf{M}_0(\mathbf{q}_k) \ddot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{C}_0(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{G}_0(\mathbf{q}_k) = \mathbf{u}_k(t) + \boldsymbol{\Gamma} \quad (20)$$

由此可得,所设计的控制系统整体流程如图1所示。

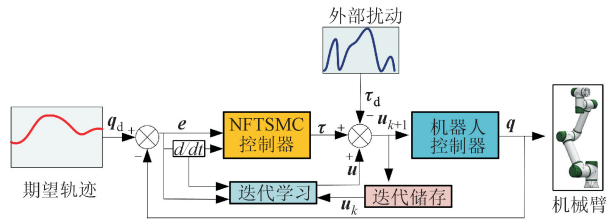


图1 控制系统整体流程示意图

Fig. 1 Overall diagram of the control system

2.3 控制器收敛性分析

构建正定 Lyapunov 函数

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{M}_0 \mathbf{s} > 0 \quad (21)$$

对 \$\mathbf{V}\$ 求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} &= \mathbf{s}^T \mathbf{M}_0 \dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{M}}_0 \mathbf{s} = \\ &\mathbf{s}^T \mathbf{M}_0 \dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T (\dot{\mathbf{M}}_0 - 2\mathbf{C}_0) \mathbf{s} \end{aligned} \quad (22)$$

由性质2可知 \$\mathbf{x}^T (\dot{\mathbf{M}}_0(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \mathbf{x} = 0\$, 则式(22)改写为

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{s}^T \mathbf{M}_0 \dot{\mathbf{s}} \quad (23)$$

将式(7)~式(9)、式(16)带入式(23),可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} &= \mathbf{s}^T (\dot{\mathbf{e}} + \alpha \mathbf{r}_1 | \mathbf{e} |^{r_1-1} \dot{\mathbf{e}} + \beta \mathbf{r}_2 | \dot{\mathbf{e}} |^{r_2-1} \ddot{\mathbf{e}}) = \\ &\mathbf{s}^T \mathbf{M}_0 (-\mathbf{k} \mathbf{s} - \mu \text{sat}(\mathbf{s})) = \\ &-\mathbf{s}^T \mathbf{M}_0 \mathbf{k} \mathbf{s} - \mathbf{s}^T \mathbf{M}_0 \mu \text{sat}(\mathbf{s}) < 0 \end{aligned} \quad (24)$$

由 Lyapunov 稳定性定理可知,本文设计的非奇异快速终端滑模面可使跟踪误差收敛,闭环系统渐进稳定。由式(24)可知, \$\dot{\mathbf{V}}\$ 随着时间是单调递减的,已知 \$\mathbf{M}_0, \mathbf{s}\$ 在整个运行周期内连续且有界,则 \$\mathbf{V}, \dot{\mathbf{V}}\$ 在迭代周期内连续且有界。因此,在 \$k\$ 个迭代周期内有

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{V}_k(t) &= \mathbf{V}_k(t) - \mathbf{V}_{k-1}(t) = \\ &\mathbf{V}_k(0) + \int_0^t \mathbf{V}_k(x) dx - \mathbf{V}_{k-1}(t) \end{aligned} \quad (25)$$

机械臂在迭代周期中,迭代周期结束为下一次迭代周期的开始,此刻机械臂动力学模型与位置信息为相同,即 \$\mathbf{V}_k(0) = \mathbf{V}_{k-1}(t)\$, 因此

$$\Delta \mathbf{V}_k(t) = \int_0^t \mathbf{V}_k(x) dx \quad (26)$$

由式(24)可知 \$\dot{\mathbf{V}} < 0\$, 则式(26)的 \$\Delta \mathbf{V}_k(t) < 0\$, 所以 Lyapunov 函数 \$\mathbf{V}_k(t)\$ 随迭代次数增加而递减。对 \$\Delta \mathbf{V}_k(t)\$ 进行累加,可得

$$\sum \Delta \mathbf{V}_k(t) = \sum \int_0^t \mathbf{V}_k(x) dx \quad (27)$$

已知 \$\mathbf{V}, \dot{\mathbf{V}}\$ 在迭代周期内连续且有界,可得级数 \$\sum \Delta \mathbf{V}_k(t)\$ 有界,又已知 \$\Delta \mathbf{V}_k(t) < 0\$, 则 \$\sum \Delta \mathbf{V}_k(t)\$ 为单调递减且有界。根据数列性质单调有界必有极限及级数收敛的必要条件,可知级数 \$\sum \Delta \mathbf{V}_k(t)\$ 收敛,且可得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_0^t \mathbf{V}_k(x) dx = 0 \quad (28)$$

随着迭代次数的增加,误差 \$\mathbf{e}\$ 在周期满足 \$\mathbf{e} = 0\$。由此说明本文所设计的控制器能实现随着迭代次数的增加,对期望轨迹的精确跟踪。

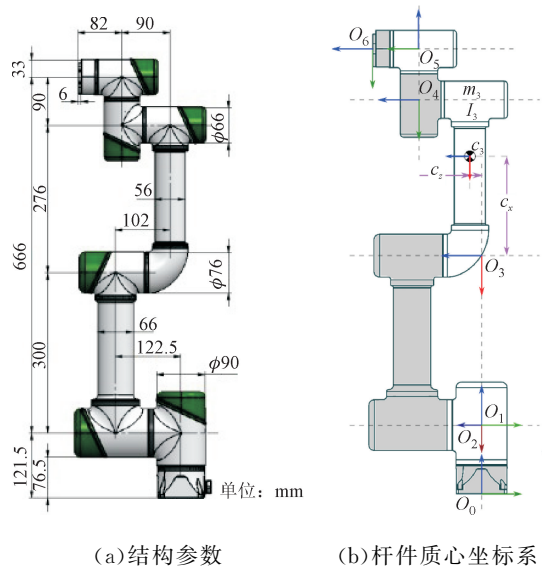
3 实验与分析

定义2 平均稳态误差为周期内稳态误差的平均值,数学表达式为

$$e_{ss} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} e(t) dt \quad (29)$$

式中: \$t_0\$ 是系统稳态的起始时间; \$T\$ 是用于计算平均稳态误差的时间区间的长度。

为验证所提控制方案的有效性与可行性,在 Simulink 软件中搭建控制模型,本文使用六轴机械臂为控制对象,结构如图2所示,各关节动力学参数如表1所示。



(a) 结构参数

(b) 杆件质心坐标系

\$O_0 \sim O_6\$—杆件的关节坐标系; \$C_3\$—杆件的质心在关节3坐标系下的坐标; \$m_3\$—杆件3的质量; \$I_3\$—杆件3在其质心坐标系下的转动惯量。

图2 六轴机械臂结构图

Fig. 2 Structural diagram of six-axis robotic arm

表 1 六轴机械臂动力学参数表

Table 1 Dynamic parameters of six-axis robot arm

参数	数值					
	杆件 1	杆件 2	杆件 3	杆件 4	杆件 5	杆件 6
m/kg	2.568 4	4.715 1	1.757 1	1.084 8	1.084 8	0.143 6
C_x/mm	0.044 4	-119.523 2	-206.273 3	0.105 2	-0.105 2	-0.008 7
C_y/mm	-3.399 8	-0.054 4	0.075 4	-3.904 3	3.904 3	2.478 9
C_z/mm	-10.232 1	112.387 3	24.396 1	-2.332 3	-2.332 3	-15.76 9
$I_{xx}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^2)$	4 855.516 7	66 636.777	2 692.654 5	1 155.810 6	1 155.810 6	108.274 9
$I_{xy}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^2)$	2.929 1	40.785 2	-31.551	5.706 1	5.706 1	-0.000 1
$I_{xz}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^2)$	-0.026 9	-6 2577.475 6	-8 550.931 9	0.777 6	-0.777 6	0.020 9
$I_{yy}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^2)$	4 673.906 4	221 616.510 7	94 654.867 4	603.725 2	603.725 2	97.889 9
$I_{yz}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^2)$	32.279 6	-37.529 4	-1.972 9	7.275 3	-7.275 3	-5.038
$I_{zz}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^2)$	2 762.567 2	159 270.934 1	93 051.655 8	1 118.852 2	1 118.852 2	104.567 8

为了验证所提控制方案的有效性与优越性,设置基本参数、外部干扰、期望轨迹如下所示。

设置外部干扰为

$$\tau_d = \begin{bmatrix} 2(\cos 3t)^3 \\ 2(\sin t)^3 \\ (\cos 2t)^2 \\ 0.5\sin(0.2t) \\ 0.15e^{-t} \\ 0.07\sin\left(\frac{\pi}{100}\right) \end{bmatrix} \quad (30)$$

设置期望轨迹为

$$\boldsymbol{q}_d = \begin{bmatrix} \sin\left(-t + \frac{\pi}{12}\right) \\ 0.1\sin\left(t + \frac{\pi}{6}\right) + e^{-1} \\ 1.4e^{-t} \\ 0.25\cos(0.5t) + 1.4e^{-1} \\ 0.7\sin(0.1t) \\ -\cos\left(\frac{\pi}{15}t\right) \end{bmatrix} \quad (31)$$

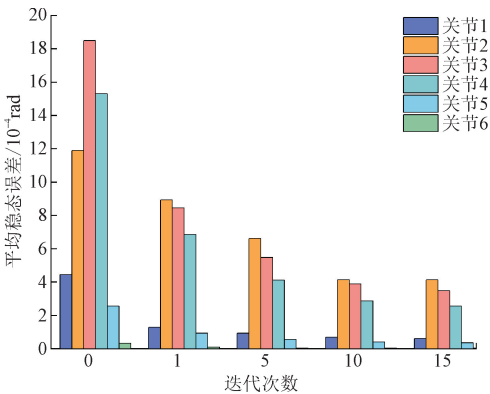
3.1 迭代仿真实验分析

为验证所提控制算法的有效性,在 Simulink 中进行迭代实验。仿真时间设置为 10 s,采样频率为 0.001 s,设置机械臂的初始状态为 0 rad,外部扰动按式(30)设定,期望轨迹按式(31)设定,其他仿真参数详见表 2。对所提算法分别进行 0~15 次迭代计算,轨迹跟踪效果如图 4 所示。为对比不同迭代次数的性能,采用平均稳态误差来评估控制算法的性能,6 个关节对比结果如图 3 所示。

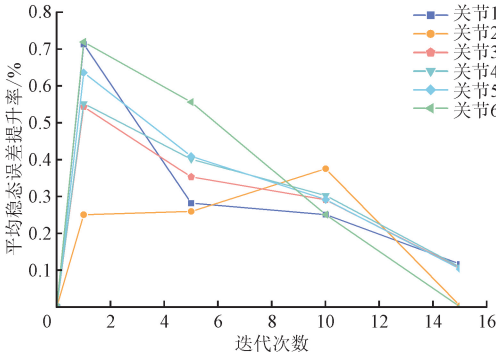
表 2 主要参数取值

Table 2 Main parameter values

参数	数值	参数	数值
μ	diag(0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001)	α	0.5
k	diag(60,60,60,60,60,60)	β	0.5
K_d	diag(60,60,60,60,60,60)	r_1	1.5
K_p	diag(0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1)	r_2	1.05
Θ	diag(0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001)		



(a) 关节平均稳态误差



(b) 关节平均稳态误差提升率

图 3 关节跟踪平均稳态误差

Fig. 3 Average steady-state error of joint angle tracking

从图3可以分析出,在第0次迭代到第15次迭代过程中,随着迭代次数的增加,平均稳态误差逐次减少,轨迹跟踪精度逐步提升。初始控制输入未经过修正时,轨迹跟踪误差较大,各关节受耦合影响明显;第1次迭代后,第1~6关节的平均稳态误差分别减少了约71%、25%、54%、55%、64%、72%;在第5次迭代后,第1~6关节的平均稳态误差分别减少了约28%、25%、35%、40%、41%、55%;在第10次迭代后,第1~6关节的平均稳态误差分别减少了约25%、37%、29%、30%、29%、20%。经过多次迭代学习,系统对耦合效应的抑制能力增强,轨迹跟踪误差显著减少,达到较高精度的轨迹跟踪效果,关节间耦合影响基本被克服。从图3可以看出,第1次

迭代后跟踪效果提升最为明显,其中第6关节平均稳态误差最大减幅为72%;在第5次迭代后,平均稳态误差的改善效果趋于平缓,曲线下降速率变。因此,综合考虑跟踪效果和迭代次数,在后续实验中迭代次数选择为5次,以实现较少迭代次数下的最佳控制效果。

通过对图3的分析,选取第1次、第5次、第10次轨迹跟踪效果进行代表性分析。由图4可知,存在外部干扰的情况下,随着迭代次数的增加,各个关节轨迹跟踪效果显著提升,有效抑制各关节之间的耦合效应。这表明本文所提的控制算法在应对外部干扰时具有良好的适应能力,随着迭代过程的进行,系统能够逐步调整控制误差,从而提高轨迹跟踪的精度。

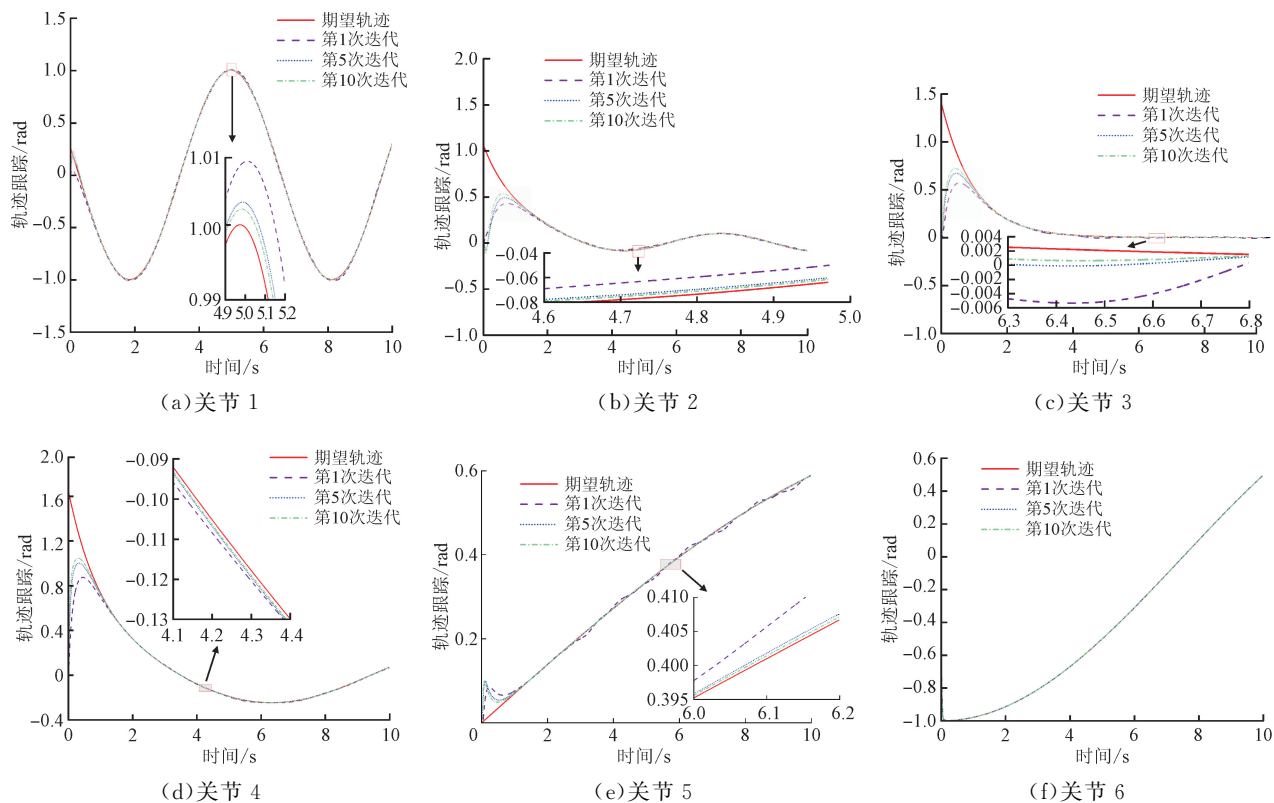


图4 各关节迭代轨迹跟踪的对比

Fig. 4 Comparison of joint iterative trajectory tracking

3.2 无初态对比控制仿真实验分析

为验证所提算法的优越性,设置与PD型迭代学习控制(PDILC)^[25]、PD型线性滑模控制(SMILC)^[24]对比实验。仿真时间设置为10 s,采样频率为0.001 s,设置机械臂的初始状态为0 rad,外部扰动按式(30)设定,期望轨迹按式(31)设定,其他

仿真参数详见表2。设置迭代次数为5次。实验结果如图5~7所示。

PD型迭代学习控制表达式为

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + K_d \dot{e}_{k+1}(t) + K_p e_{k+1} \quad (32)$$

令 s_1 为线滑模面, $c > 0$ 为增益参数,PD型线性滑模控制表达式为

$$\begin{cases} s_1 = ce + \dot{e} \\ u_{k+1}(t) = u_k(t) + M_0(q)[\ddot{q}_d + ks_1 + \mu \text{sat}(s_1)] + C_0 \dot{q} + G_0 \\ c = 2 \end{cases} \quad (33)$$

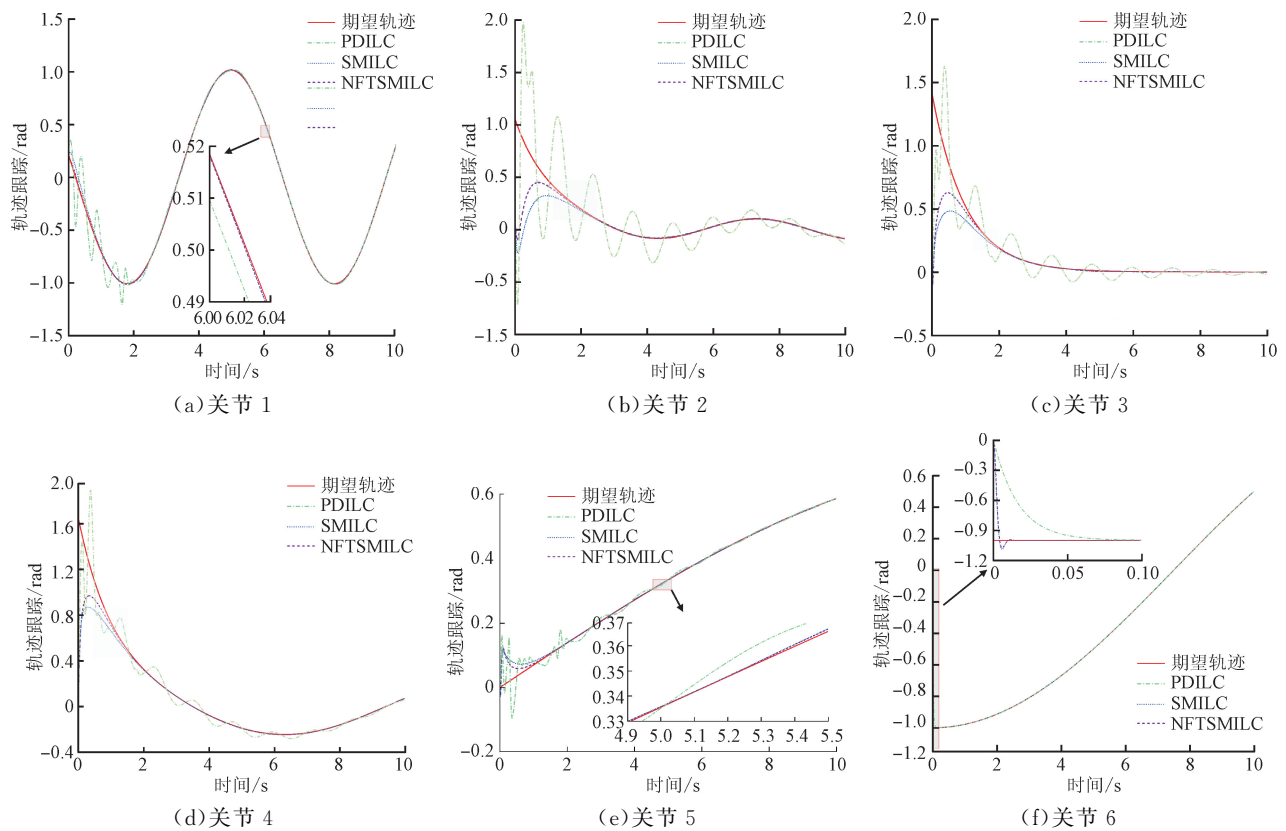


图 5 各关节轨迹跟踪的对比

Fig. 5 Comparison of joint trajectory tracking

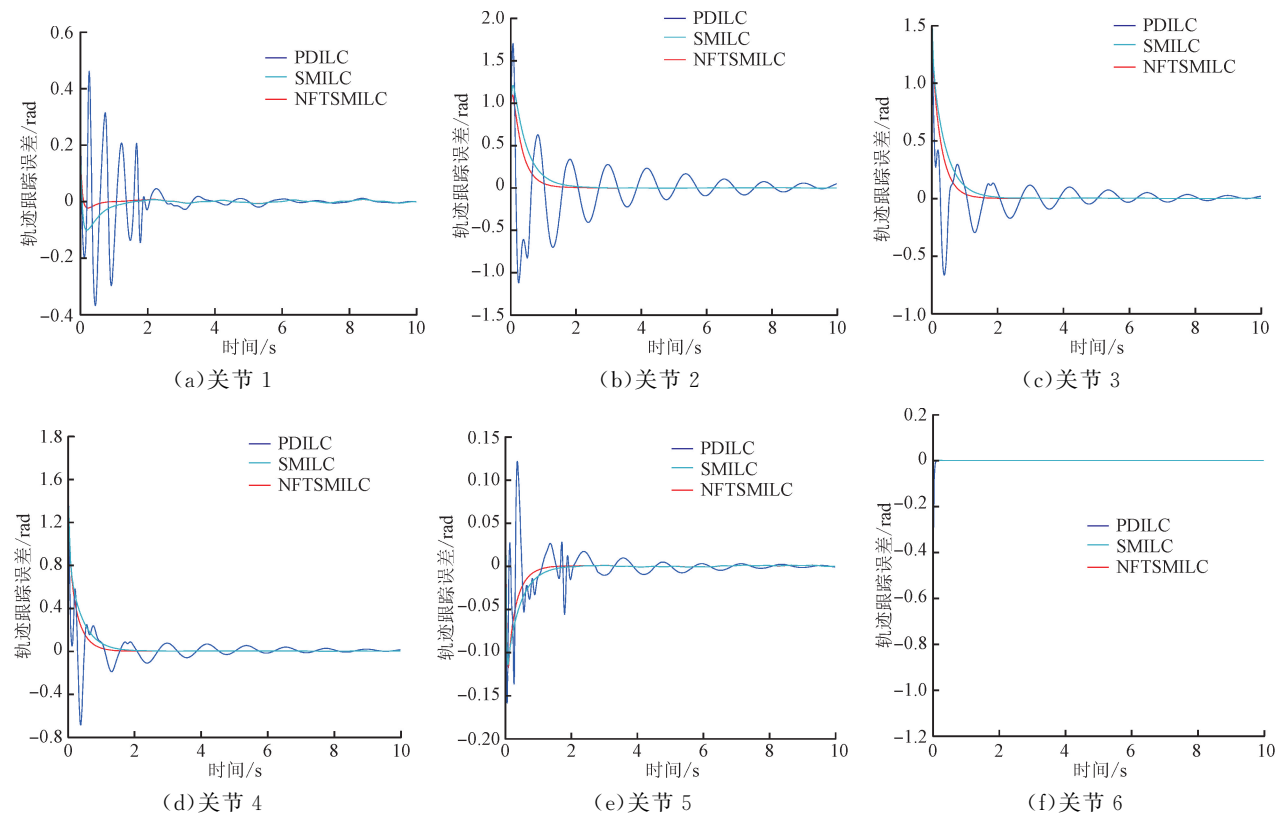


图 6 各关节轨迹跟踪稳态误差的对比

Fig. 6 Comparison of joint trajectory tracking and steady-state error

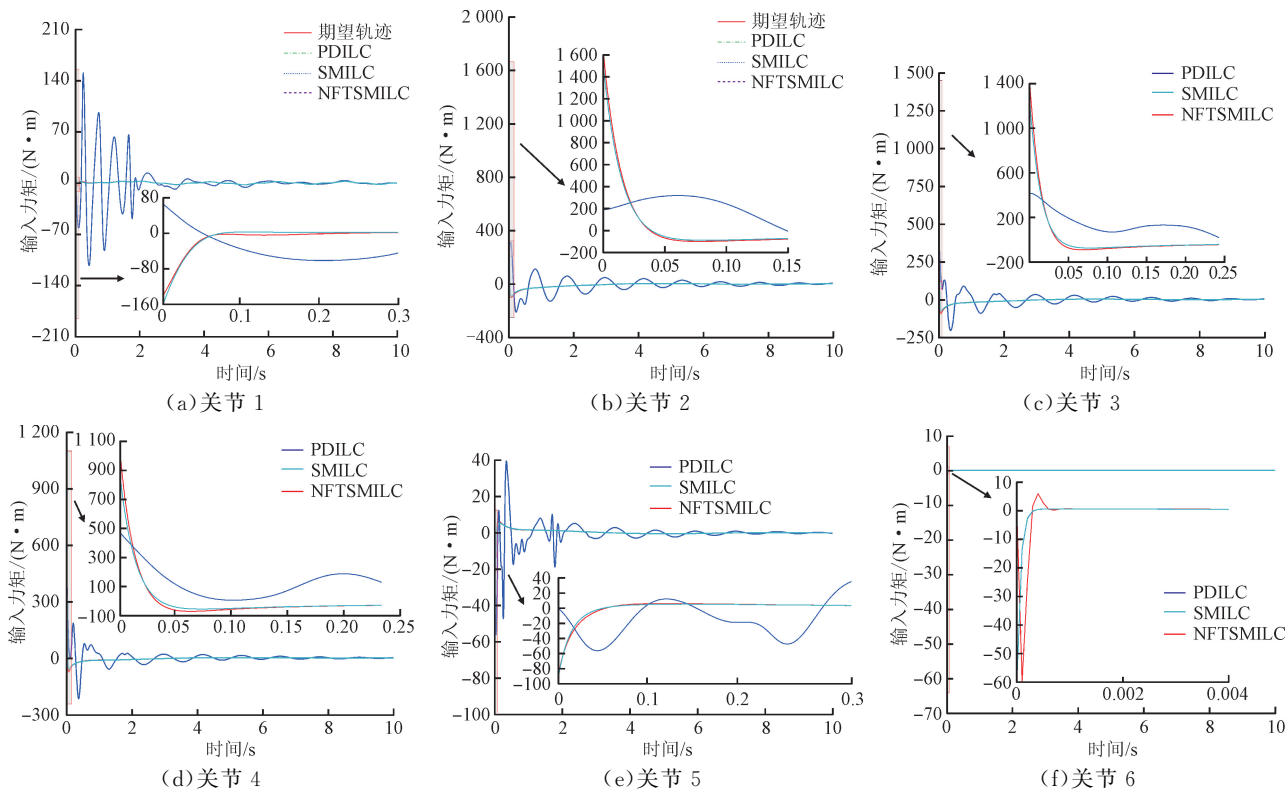


图 7 各关节输入力矩的对比

Fig. 7 Comparison of joint torque control input

分析图 5 与图 6 可知,经过 5 次迭代后 3 种控制算法均可以跟踪上期望轨迹。从跟踪效果上分析,PDILC 的控制精度欠佳,存在明显的超调和波动误差,SMILC 在跟踪精度方面有所改善,而 NFTSMILC 跟踪精度最好。从收敛速度上分析,NFTSMILC 控制算法能实现在很短的时间内保证机械臂完全跟踪上期望轨迹,明显优于其他两种控制算法。通过对 6 个关节的跟踪效果分析发现,在

强耦合的机械臂系统中,本文提出的 NFTSMILC 控制算法在所有关节上均能精确地跟踪期望轨迹,有效克服了耦合效应,显著提高整体系统的控制精度和鲁棒性。

为进一步对比 3 种控制算法的性能,采用关节跟踪的响应调整时间(取误差首次稳定在 0 的时间)、关节跟踪的平均稳态误差来评估控制器的性能,6 个关节的对比结果的仿真数据见表 3 所示。

表 3 不同控制器性能数据

Table 3 Performance data of different controllers

关节	平均稳态误差/ 10^{-4} rad			响应调整时间/s		
	PDILC	SMILC	NFTSILC	PDILC	SMILC	NFTSMILC
1	35.1	8.31	0.92	3.9	1.6	1.2
2	171.0	61.7	6.62	6.0	2.8	1.9
3	75.2	51.1	5.48	6.0	3.6	1.8
4	56.8	38.2	4.11	5.1	2.8	1.7
5	8.97	5.14	55.00	4.2	2.1	1.3
6	1.66	0.04	0.40	0.3	0.3	0.3

分析表 3 中的数据可知,从平均稳态误差与响应调整时间的角度分析,NFTSMILC 的总体性能相比于 PDILC、SMILC 有显著提升。以 1~5 关节进行分析,NFTSMILC 相比于 PDILC,在平均稳态误差方面分别提升了约 97%、96%、92%、93%、94%,

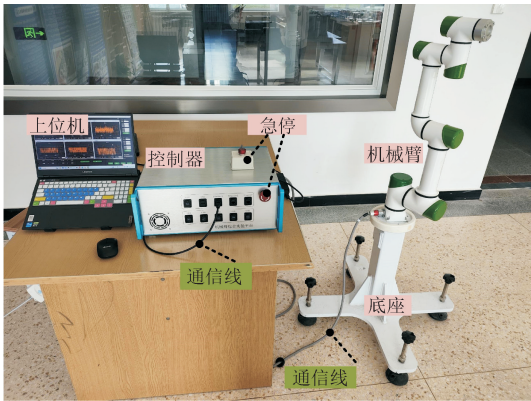
在响应调整时间上分别减少了约 69%、68%、70%、66%、69%;相比于 SMILC,NFTSMILC 在平均稳态误差方面分别提升了约 51%、32%、27%、23%、45%,在响应调整时间上分别减少了约 25%、32%、50%、39%、38%。通过对比分析,可知 NFTSMILC

控制算法在显著提高轨迹跟踪精度的同时,大幅缩短了系统的响应调整时间,验证了 NFTSMILC 算法在保证快速收敛的同时,有效降低了平均稳态误差,提升了系统的控制精度和鲁棒性。

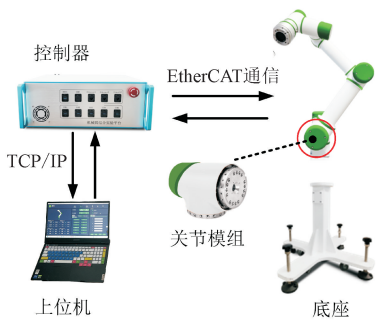
分析图 7 可知,为克服机械臂系统建模参数的不精确性与外部扰动,初始控制输入力矩较大,在控制关节达到期望的位置后,控制输入力矩逐渐趋于稳定,波动幅度显著减小。进一步与 SMILC 和 PDILC 两种控制算法对比,NFTSMILC 在启动时所需的最大力矩较小,能够更快速地收敛到稳定状态,控制力矩曲线更为平滑。这从侧面反映出,NFTSMILC 控制算法在抑制扰动和处理不确定参数方面具有显著优势,更快的收敛速度和更平滑的力矩曲线反映了算法在提高系统控制精度和稳定性方面的优越性能。

3.3 机械臂真机实验

为进一步验证本文所提控制算法在实际应用中的控制性能,搭建机械臂实验平台,如图 8 所示,进行轨迹跟踪实验。机械臂平台硬件系统主要包括六轴机械臂本体、控制器、上位机及底座。上位机用于编译、下发、显示数据;控制器为基于 ARM Cortex-A55 的 CSPACE 半实物仿真平台,用于控制输入、采集、转换及上传数据;机械臂型号为 ROCR6,执行动作及反馈数据信息。在实验中,设置 6 关节的期望轨迹均为 $\sin t$,将 Simulink 仿真控制模型中的反馈输入替换为控制器采集的机械臂实际位置数据,将仿真控制力矩输入模型替换为控制器的输入模块;在 Simulink 中编译整个控制模型,生成可执行文件,并在控制器上运行可执行文件;通过 EtherCAT 通信将控制力矩发送至机械臂关节,以实现机械臂关节轨迹跟踪控制。在运行过程中,通过上位机实时观测机械臂关节跟踪轨迹情况。



(a) 实验平台总体图



(b) 实验平台系统配置

图 8 机械臂综合实验研究平台

Fig. 8 Comprehensive experimental research platform robotic arm

从跟踪效果分析,图 9 中所有关节均能准确跟踪上期望轨迹,尤其第 5 和第 6 关节跟踪效果最佳。从跟踪误差分析,图 10 中机械臂关节跟踪误差大约在 0.5 s 内快速收敛,并稳定在 $[-0.05, 0.05]$ rad 区间内,波动幅度较小;从表 4 数据可知,在轨迹跟踪过程中,本文提出的控制策略能够将跟踪误差控制在较小的范围,验证了控制策略能够在有限时间内迅速收敛,确保机械臂的高精度轨迹跟踪性能。

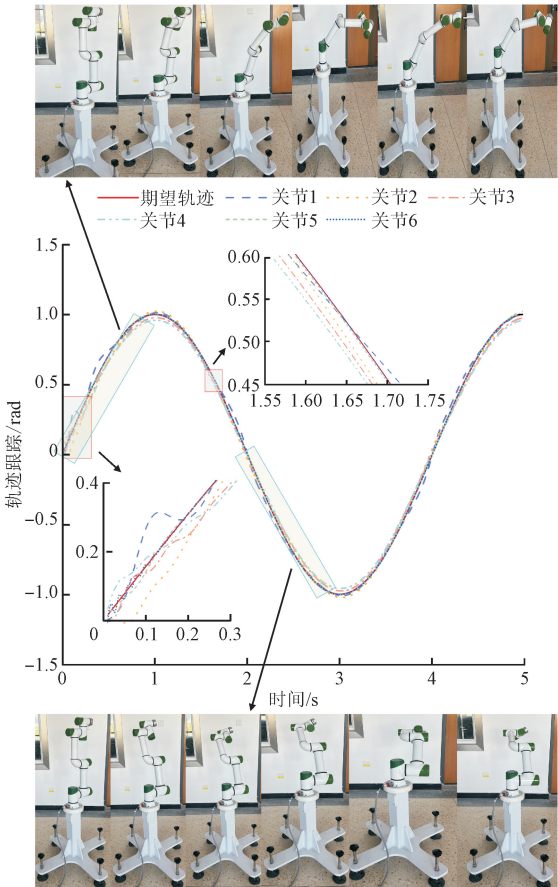


图 9 机械臂各关节轨迹跟踪实验结果

Fig. 9 Experimental results of trajectory tracking of each joint of robotic arm

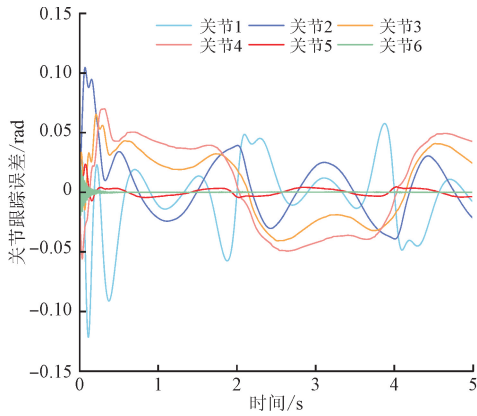


图 10 机械臂各关节跟踪误差实验结果

Fig. 10 Experimental results of trajectory tracking error of each joint of robotic arm

表 4 关节轨迹跟踪稳态误差数据

Table 4 Joint trajectory tracking steady-state error data

关节	误差/ 10^{-4} rad		
	最大值	最小值	平均值
1	1 216	0.000 274	1.060
2	1 046	0.116 119	1.060
3	653	0.740 344	1.350
4	699	1.038 550	1.790
5	234	0.035 800	0.140
6	255	0.000 484	0.016

从控制关节输入力矩分析,图 11 中每个关节的力矩均能够迅速响应并达到稳态,显示出控制策略在不同关节上的良好动态性能,其中第 5 和第 6 关节的力矩曲线波动较小。同时,还分析出关节间的耦合效应差异,第 6 关节处于机械臂末端,可能受到的负载变化和外部干扰较少,因此力矩曲线波动较小;第 2 关节处于较靠近基座的位置,承受较大的力和力矩,且耦合效应更为显著,导致其力矩曲线波动较大。

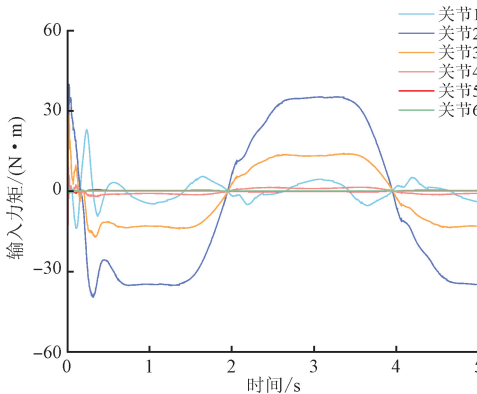


图 11 机械臂各关节的输入力矩

Fig. 11 Input torque of each joint of robotic arm

从仿真实验与真机实验结果可知,本文所提控制算法在实验中展现了优异的轨迹跟踪性能和快速收敛速度,在控制精度和稳定性方面均能满足机械臂控制要求,能够有效应对机械臂系统的非线性、强耦合和外部扰动等复杂情况。

4 结 论

本文提出了一种非奇异快速终端滑模迭代学习控制算法,以解决协作机械臂受不确定外部干扰及自身参数不精确影响的轨迹跟踪问题。非奇异快速终端滑模控制器实现了对机械臂系统扰动和不确定参数的有效抑制,确保了控制误差的快速收敛;迭代学习控制器通过对误差的逐步校正,不断提高对期望轨迹的跟踪精度。经迭代与对比仿真实验,验证了 NFTSMILC 能有效降低平均稳态误差且保证快速收敛,同时在处理非线性和耦合效应方面表现优越;在真机实验中也验证了控制策略的有效性。在接下来的工作中,考虑将控制策略引入采摘场景,通过对控制参数的调整,进一步验证控制策略在复杂环境的控制性能。

参考文献:

[1] BI Z M, LUO Chaomin, MIAO Zhonghua, et al. Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67: 102022.

[2] 杨淑华, 谢晓波, 邴振凯, 等. 基于 HER-TD3 算法的青皮核桃采摘机械臂路径规划 [J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 113-123.

YANG Shuhua, XIE Xiaobo, BING Zhenkai, et al. Path planning of green walnut picking robotic arm based on HER-TD3 algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55 (4): 113-123.

[3] 张文彬, 沙连森, 史文青, 等. 融合远心运动机构与串联机械臂的穿刺手术机器人系统研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(7): 1-8.

ZHANG Wenbin, SHA Liansen, SHI Wenqing, et al. Research on puncture surgery assisting robot system integrating remote center of motion mechanism and serial manipulator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(7): 1-8.

[4] QIAO Lei, ZHAO Min, WU Chao, et al. Adaptive PID control of robotic manipulators without equality/inequality constraints on control gains [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2022,

- 32(18): 9742-9760.
- [5] TUSSET A M, PEREIRA A E B, BALTHAZAR J M, et al. Positioning control of robotic manipulators subject to excitation from non-ideal sources [J]. *Robotics*, 2023, 12(2): 51.
- [6] YANG Xiaohang, ZHAO Zhiyuan, LI Yuntao, et al. Adaptive neural network control of manipulators with uncertain kinematics and dynamics [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 133(Part A): 107935.
- [7] 梁相龙, 姚建勇. 带有输出约束的液压机械臂自适应神经网络力跟踪控制 [J/OL]. *控制理论与应用* (2023-12-14) [2024-07-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20231213.1540.034.html>.
LIANG Xianglong, YAO Jianyong. Adaptive neural network force tracking control of hydraulic manipulators with output constraints [J/OL]. *Control Theory & Applications* (2023-12-14) [2024-07-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20231213.1540.034.html>.
- [8] 付雯, 温浩, 黄俊琿, 等. 基于非线性动力学模型补偿的水下机械臂自适应滑模控制 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2023, 63(7): 1068-1077.
FU Wen, WEN Hao, HUANG Junhui, et al. Adaptive sliding mode control of underwater manipulator based on nonlinear dynamics model compensation [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2023, 63(7): 1068-1077.
- [9] 王宏志, 王婷婷, 兰淼淼, 等. 基于位置跟踪的机械臂多电机新型滑模控制策略 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2024, 54(5): 1443-1458.
WANG Hongzhi, WANG Tingting, LAN Miaomiao, et al. A novel sliding mode control strategy of multi-motor for robot arm based on position tracking [J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2024, 54(5): 1443-1458.
- [10] YANG Lin, LI Yanan, HUANG Deqing, et al. Spatial iterative learning control for robotic path learning [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(7): 5789-5798.
- [11] 陈强, 陈凯杰, 施卉辉, 等. 机械臂变长度误差跟踪迭代学习控制 [J]. *自动化学报*, 2023, 49(12): 2594-2604.
CHEN Qiang, CHEN Kaijie, SHI Huihui, et al. Error-tracking iterative learning control for robot manipulators with iteration varying lengths [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(12): 2594-2604.
- [12] VAN M, SUN Yuzhu, MCLLVANNA S, et al. Adaptive fuzzy fault tolerant control for robot manipulators with fixed-time convergence [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2023, 31(9): 3210-3219.
- [13] 尚东阳, 李小彭, 尹猛, 等. 采用模糊补偿滑模控制器的空间柔性机械臂振动抑制方法 [J]. *振动与冲击*, 2024, 43(7): 175-185.
SHANG Dongyang, LI Xiaopeng, YIN Meng, et al. Vibration suppression method for space-flexible manipulator using fuzzy compensation sliding mode controller [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(7): 175-185.
- [14] ZHOU Weixiang, WANG Yueying, LIANG Yinzhen. Sliding mode control for networked control systems: a brief survey [J]. *ISA Transactions*, 2022, 124: 249-259.
- [15] ZHOU Yujian, SHE Jinhua, WANG Feng, et al. Disturbance rejection for Stewart platform based on integration of equivalent-input-disturbance and sliding-mode control methods [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(4): 2364-2374.
- [16] 王宏, 郑天奇, 纪俐, 等. 基于 T-S 模糊补偿的六轴机械臂的滑模鲁棒控制 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(3): 378-382.
WANG Hong, ZHENG Tianqi, JI Li, et al. Six-axis manipulator's sliding mode robust control based on T-S fuzzy compensation [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2018, 39(3): 378-382.
- [17] DONG Hanlin, YANG Xuebo, GAO Huijun, et al. Practical terminal sliding-mode control and its applications in servo systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(1): 752-761.
- [18] SUN Hongfei, WANG Haoping, TIAN Yang. Model-free non-singular fast terminal sliding mode controller using extended sliding mode observer for series elastic actuator-based robotic arm [C]//2023 International Conference Automatics and Informatics (ICAI). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 295-300.
- [19] CRUZ-ORTIZ D, CHAIREZ I, POZNYAK A. Non-singular terminal sliding-mode control for a manipulator robot using a barrier Lyapunov function [J]. *ISA Transactions*, 2022, 121: 268-283.
- [20] GUO Keyou, SHI Peipeng, WANG Pengshuo, et al. Non-singular terminal sliding mode controller with nonlinear disturbance observer for robotic manipulator [J]. *Electronics*, 2023, 12(4): 849.
- [21] 贾华, 刘延俊, 王雨, 等. 六轴机械臂神经网络自适应终端滑模控制 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(11): 21-30. (下转第 147 页)

Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 22367-22377.

[25] LIU Zhuang, MAO Hanzi, WU Chaoyuan, et al. A ConvNet for the 2020s [C]//2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 11966-11976.

[26] HESSE R, SCHAUB-MEYER S, ROTH S. Content-adaptive downsampling in convolutional neural networks [C]//2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 4544-4553.

[27] GUO Menghao, LU Chengze, LIU Zhengning, et al. Visual attention network [J]. Computational Visual Media, 2023, 9(4): 733-752.

[28] ZHOU Lin, CAI Haoming, GU Jinjin, et al. Efficient image super-resolution using vast-receptive-field attention [C]//Computer Vision-ECCV 2022 Workshops. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland, 2023: 256-272.

[29] ZHAO Hengyuan, KONG Xiangtao, HE Jingwen, et al. Efficient image super-resolution using pixel attention [C]//Computer Vision-ECCV 2020 Workshops. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2020: 56-72.

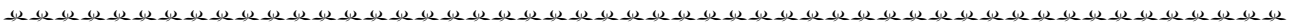
[30] HU Jie, SHEN Li, ALBANIE S, et al. Squeeze-and-excitation networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(8): 2011-2023.

[31] SHANG Jianrun, ZHANG Xue, ZHANG Guisheng, et al. Gated multi-attention feedback network for medical image super-resolution [J]. Electronics, 2022, 11(21): 3554.

[32] ZONG Zhikai, ZHA Lin, JIANG Jiande, et al. Asymmetric information distillation network for lightweight super resolution [C]//2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 1248-1257.

[33] LIU Jie, ZHANG Wenjie, TANG Yuting, et al. Residual feature aggregation network for image super-resolution [C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 2356-2365.

(编辑 武红江)



(上接第 135 页)

JIA Hua, LIU Yanjun, WANG Yu, et al. Adaptive-neural-network-based terminal sliding mode control for six-axis robotic manipulators [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(11): 21-30.

[22] 殷春武, 甘婷, 楚天乐, 等. 基于时变终端滑模的任意迭代初态抑制控制 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40(6): 1105-1112.

YIN Chunwu, GAN Ting, CHU Tianle, et al. Arbitrary iterative initial value suppression control based on time-varying terminal sliding mode [J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(6): 1105-1112.

[23] WU Shaohua, WU Aiguo, DONG Na, et al. Adaptive iterative learning control of robotic manipulator with second-order terminal sliding mode method [C]//2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 1488-1493.

[24] 张程琳, 桑文闯, 孙宁, 等. 多自由度机器人自适应滑模迭代学习跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1819-1828.

ZHANG Chenglin, SANG Wenchuang, SUN Ning, et al. Adaptive sliding mode iterative learning tracking control of multi-degree-of-freedom robots [J]. Control and Decision, 2024, 39(6): 1819-1828.

[25] 刘金琨. 机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真: 基本设计方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.

[26] 朱玉强, 刘振, 朱全民, 等. 不确定机械臂系统的模糊滑模有限时间容错控制 [J/OL]. 控制理论与应用. (2024-06-11) [2024-07-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20240607.1011.012.html>.

ZHU Yuqiang, LIU Zhen, ZHU Quanmin, et al. Fuzzy sliding mode finite-time fault-tolerant control for uncertain manipulator systems [J/OL]. Control Theory & Applications. (2024-06-11) [2024-07-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20240607.1011.012.html>.

(编辑 杜秀杰)