

控制与决策

Control and Decision

基于未知系统动态估计的机器人预设性能控制

那靖, 张超, 王娴, 高贯斌

引用本文:

那靖, 张超, 王娴, 等. 基于未知系统动态估计的机器人预设性能控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(5): 1040–1048.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1219>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1059–1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

有限频域线性重复过程的动态迭代学习控制

Dynamic iterative learning control for linear repetitive processes over finite frequency ranges

控制与决策. 2021, 36(3): 599–608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0873>

带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制

Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints

控制与决策. 2021, 36(2): 387–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

基于免疫优化的平面Acrobot线性自抗扰鲁棒镇定

Robust stabilization of planar Acrobot using linear active disturbance rejection control with immune optimization

控制与决策. 2020, 35(12): 3053–3058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0289>

凸优化与A*算法结合的路径避障算法

Convex optimization and A-star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

基于未知系统动态估计的机器人预设性能控制

那靖, 张超, 王娴[†], 高贯斌

(昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650500)

摘要: 针对含有未知系统动态和外部干扰的机器人系统, 提出一种不依赖于函数逼近器且能保证瞬态和稳态性能的控制算法. 设计未知系统动态估计器可重构机器人系统的未知动态(向心力、重力)和外部干扰, 与其他方法相比, 该估计器结构简单, 只需调节一个参数, 且引入滤波操作可避免使用加速度信号, 有利于在实际机器人控制中的运用. 控制器设计中引入描述收敛速率、最大超调量和稳态误差的预设性能函数, 使机器人系统跟踪误差限制在预先规定边界内, 保证机器人系统的性能和安全性. 通过李雅普诺夫稳定性理论证明闭环系统的稳定性, 并通过数值仿真和实验结果验证所提出方法的有效性.

关键词: 机器人系统; 机器人控制; 未知动态估计; 预设性能控制; 外部干扰; 瞬态性能

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1219

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 那靖, 张超, 王娴, 等. 基于未知系统动态估计的机器人预设性能控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1040-1048.

Unknown system dynamics estimator for prescribed performance control of robotic systems

NA Jing, ZHANG Chao, WANG Xian[†], GAO Guan-bin

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In this paper, a prescribed performance controller is proposed for robotic systems with unknown system dynamics and external disturbances, where the widely-used function approximation can be avoided, and both the transient and steady-state performances can be retained. The unknown system dynamics (e.g., coriolis/centripetal force, gravity torque) and external disturbances are estimated simultaneously via an unknown system dynamics estimator. The salient feature of the estimator over other schemes is that its structure is simple and only one parameter needs to be tuned. Moreover, the joint accelerations are avoided by introducing filter operations, making the estimator suitable for practical robotic control application. By employing a performance function that characterizes the convergence rate, maximum overshoot and steady-state error, the tracking error of the robotic system can be retained within a prescribed bound. The stability of the closed-loop control system is proved via Lyapunov theory. Simulations and experiments are carried out to validate the effectiveness of the proposed schemes.

Keywords: robotic systems; robot control; unknown system dynamics estimator; prescribed performance control; external disturbances; transient performances

0 引言

在过去几十年里, 机器人被广泛地应用在各种工业领域, 如汽车焊接、电子装配、快递分拣等. 随着机器人技术的急速发展和市场要求的不断变化, 机器人逐渐在重复或具有危险性的工作中替代人类. 然而, 由于机器人本身结构的复杂性和工作环境的不确定性, 需要合理的控制方式来保证其有效且安全地工

作^[1-2], 因此针对机器人系统提出了很多控制方法, 如鲁棒控制^[3]、自适应控制^[4-9]和滑模控制^[10-12]等.

机器人控制难点之一在于系统本身的未知动态和外部干扰^[13]. 机器人部分物理参数在建模中不能精确测量, 如杠臂质量等, 且机器人系统动力学普遍存在建模误差, 如关节摩擦力等难以精确建模, 机器人实际运行中还存在不可避免的外部干扰, 如负载

收稿日期: 2019-08-28; 修回日期: 2019-11-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61922037, 61873115).

责任编委: 张国山.

[†]通讯作者. E-mail: wanglywxian@163.com.

变化等. 这些未知动态和外部干扰会降低控制系统的性能, 甚至会引起系统不稳定^[14-16]. 为补偿系统动态的影响, 文献[1]提出了计算转矩控制, 但其假设机器人动力学模型完全已知, 这在实际机器人运行中难以满足. 文献[10-12]针对有界不确定性或干扰, 提出滑模控制, 但其控制信号中的抖振问题难以避免. 文献[4-7]则将机器人系统进行线性参数化处理, 设计了自适应控制方法. 为放松线性化假设条件, 神经网络^[17-18]、模糊逻辑系统^[19-20]等也被引入机器人控制中以补偿未知动态, 但神经网络或模糊逻辑系统会带来计算量过大、在线学习收敛时间慢、系统响应迟缓等问题, 且自适应控制难以找到统一的参数调节方法, 参数调节多依赖工作人员的经验.

为快速补偿未知系统动态, 还提出通过设计干扰观测器对外部干扰进行估计, 然后在控制器设计中进行补偿^[21-22], 然而早期提出的干扰观测器主要适用于线性系统. 文献[23]针对机器人提出一类非线性干扰观测器并证明估计误差全局收敛, 但该方法需要在线计算机器人惯性矩阵的逆. 文献[24]提出扩张状态估计器用于处理系统的集总不确定性. 虽然基于干扰估计器或者拓展状态估计器的控制方法已在实际系统中使用, 但所构建的观测器结构一般较为复杂, 且可调参数过多, 因此, 急需发展一种针对机器人的结构简单、参数调节少的估计器, 以估计和补偿未知系统动态和外部干扰的影响.

另一方面, 现有机器人控制器一般仅能保证稳态性能(即保证跟踪误差收敛), 但瞬态性能(如误差收敛速率、超调量等)难以定量分析, 而较差的瞬态误差收敛会降低机器人的控制精度, 甚至造成系统失控. 针对控制系统瞬态性能改善的问题, 先后提出了Funnel控制^[25-26]、约束李雅普诺夫函数控制^[27-28]等. 文献[29-30]提出了一类新的预设性能控制方法, 该方法同时保证系统稳态性能和瞬态性能, 且引入的预设性能函数可定量描述误差收敛速率、超调量和稳态误差边界. 该方法性能指标可预先设定, 且能保证系统控制误差不超过预先设置的范围. 因此近年被推广到其他系统^[31-32]. 值得注意的是, 该方法主要针对严格反馈系统, 而针对含未知动态和干扰的机器人系统则需进一步研究.

本文针对含有未知动态和外部干扰的机器人跟踪控制问题, 提出一种仅需惯性矩阵且避免使用加速度信号的估计器实现对系统未知动态和外部干扰的估计. 与其他估计器相比, 仅需系统的惯性矩阵信息即可实现对未知动态(如向心力、重力)和外部干扰

的同时估计, 且不依赖于加速度信号, 结构简单、参数调节容易(只需调节一个参数), 适合在实际机器人控制中应用. 在得到未知动态和外部干扰估计的基础上, 设计预设性能控制器确保机器人跟踪误差的超调量、收敛速率和稳态误差严格保持在预先规定边界范围内. 通过李雅普诺夫理论证明了闭环系统的稳定性, 最后通过数值仿真和对比实验验证了所提出方法的有效性.

1 系统描述

含 n 个自由度非线性机器人动力学模型为

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

其中: $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 分别为关节位置、速度和加速度, $\tau \in R^n$ 为控制力矩, $M(q) \in R^{n \times n}$ 为正定对称的惯性矩阵, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 为科氏力和离心力矩阵, $G(q) \in R^n$ 为重力矢量, $d \in R^n$ 为外部干扰.

性质1^[1] 机器人系统(1)满足如下性质:

$$\underline{m}I \leq M(q) \leq \bar{m}I, \quad \forall q \in R^n. \quad (2)$$

其中: \underline{m} 和 \bar{m} 分别为惯性矩阵 $M(q)$ 的最小和最大特征值, I 为 $n \times n$ 维单位矩阵.

假设1 外部干扰 d 及其导数有界, 即 $\|d\| \leq \bar{h}$, $\|\dot{d}\| \leq \zeta$, $\bar{h} > 0, \zeta > 0$.

注1 假设1已被广泛应用在干扰估计器设计中^[21]. 针对机器人系统, 在控制器设计中一般需已知准确的机器人模型, 如惯性矩阵 $M(q)$ 、向心力或科氏力矩阵 $C(q, \dot{q})$ 、重力矢量 $G(q)$ 和外部干扰 d . 但在实际机器人应用中, 质量、杆长等物理参数存在测量误差, 摩擦力、转动惯量等亦存在建模误差, 导致机器人模型不准确, 影响控制系统精度. 尽管神经网络和模糊逻辑系统可有效处理这些未知动态和外部干扰, 但计算量较大, 参数调节困难, 限制了其实用性. 此外, 大部分控制算法需要在线计算惯性矩阵 $M(q)$ 的逆和测量机器人关节加速度信号, 仅能保证机器人稳态控制性能, 而瞬态控制性能(如超调量、误差收敛速率等)难以保证.

本文旨在针对机器人系统(1)设计一个简单、有效的未知系统动态估计器(仅需要惯性矩阵 $M(q)$)在线准确估计未知动态 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 、 $G(q)$ 和外部干扰 d , 并引入到控制器设计中补偿其影响, 实现对机器人轨迹跟踪的精准控制, 保证跟踪超调量、误差收敛速率等在预规定范围内.

2 未知系统动态估计器

本节将设计未知系统动态估计器重构系统未知动态 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 、 $G(q)$ 和干扰 d . 考虑系统模型(1)可知, 加速度信号 \ddot{q} 主要由第1项 $M(q)\ddot{q}$ 引入, 为避免使用

加速度信号,对机器人系统模型(1)描述如下:

$$\begin{cases} F(q, \dot{q}) = M(q)\dot{q}, \\ H(q, \dot{q}) = -\dot{M}(q)\dot{q}, \\ \xi = d - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q). \end{cases} \quad (3)$$

其中: $F(q, \dot{q}), H(q, \dot{q}) \in R^n$ 为不含加速度信号 \ddot{q} 的向量, ξ 为包含不确定性项 $C(q, \dot{q})\dot{q}, G(q)$ 和外部干扰 d 的集总未知动态.

机器人系统(1)可通过式(3)转换成

$$\dot{F}(q, \dot{q}) + H(q, \dot{q}) = \tau + \xi, \quad (4)$$

其中 $\dot{F}(q, \dot{q}) = d[M(q)\dot{q}]/dt$ 为 $F(q, \dot{q})$ 的导数. 可见, 加速度信号 \ddot{q} 包含在 $F(q, \dot{q})$ 的导数 $\dot{F}(q, \dot{q})$ 中, 为避免在估计 ξ 中使用加速度信号 \ddot{q} , 通过滤波操作避免直接使用 $\dot{F}(q, \dot{q})$. 根据式(4), 定义 $F_f(q, \dot{q}), H_f(q, \dot{q}), \tau_f, \xi_f$ 的滤波变量 $F_f(q, \dot{q}), H_f(q, \dot{q}), \tau_f, \xi_f$ 如下:

$$\begin{cases} k\dot{F}_f(q, \dot{q}) + F_f(q, \dot{q}) = F(q, \dot{q}), & F_f(q, \dot{q})|_{t=0} = 0; \\ k\dot{H}_f(q, \dot{q}) + H_f(q, \dot{q}) = H(q, \dot{q}), & H_f(q, \dot{q})|_{t=0} = 0; \\ k\dot{\tau}_f + \tau_f = \tau, & \tau_f|_{t=0} = 0; \\ k\dot{\xi}_f + \xi_f = \xi, & \xi_f|_{t=0} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

其中 $k > 0$ 为一个标量滤波常数.

由式(4)和(5), 可得

$$\frac{F - F_f}{k} + H_f = \tau_f + \xi_f. \quad (6)$$

引理1 考虑系统(4)和滤波操作(5), 对于任意正定常数 $k, Z = (F - F_f)/k + H_f - \tau_f - \xi$ 为不变流形, 且 $\lim_{k \rightarrow 0} \{ \lim_{t \rightarrow \infty} [(F - F_f)/k + H_f - \tau_f - \xi] \} = 0$.

证明 由式(4)和(5)计算 Z 的导数, 有

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= \frac{\dot{F} - \dot{F}_f}{k} + \dot{H}_f - \dot{\tau}_f - \dot{\xi} = \\ & \frac{1}{k} \left[\dot{F} - \frac{F - F_f}{k} + H - H_f - (\tau - \tau_f) + k\dot{\xi} \right] = \\ & \frac{1}{k} \left(-\frac{F - F_f}{k} - H_f + \tau_f + \xi + k\dot{\xi} \right) = \\ & -\frac{1}{k} (Z + k\dot{\xi}). \end{aligned} \quad (7)$$

由假设1可知, 机器人集总未知动态 ξ 有界且满足 $\|\dot{\xi}\| < \eta, \eta > 0$. 选取李雅普诺夫函数 $V_Z = Z^T Z/2$, 求其导数得

$$\begin{aligned} \dot{V}_Z &= -\frac{1}{k} Z^T Z + Z^T \dot{\xi} \leq \\ & -\frac{1}{k} Z^T Z + \frac{1}{2k} Z^T Z + \frac{k}{2} \dot{\xi}^T \dot{\xi} \leq \\ & -\frac{1}{k} V_Z + \frac{k}{2} \eta^2. \end{aligned} \quad (8)$$

解式(8)可得 $V_Z(t) \leq e^{-t/k} V_Z(0) + k^2 \eta^2/2$, 故有 $V_Z(t)$ 和 $Z(t)$ 有界, 且 $Z(t)$ 指数收敛到紧集

$$\|Z(t)\| = \sqrt{2V_Z(t)} \leq \sqrt{Z^2(0)e^{-t/k} + k^2 \eta^2},$$

其上界由滤波系数 k 和集总动态 ξ 边界确定.

由上述分析可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} [\lim_{k \rightarrow 0} Z(t)] = 0$, 即 $Z = 0$ 为不变流形, 且当 $k \rightarrow 0$ 时 $Z \rightarrow 0$. \square

根据引理1所示, 变量 F, F_f, H_f, τ_f 和集总动态 ξ 之间存在映射关系, 可设计如下未知系统动态估计器:

$$\hat{\xi} = \xi_f = \frac{F(q, \dot{q}) - F_f(q, \dot{q})}{k} + H_f(q, \dot{q}) - \tau_f. \quad (9)$$

定理1 对机器人系统(1), 应用未知系统动态估计器(9)估计包含机器人动态 $C(q, \dot{q})\dot{q}, G(q)$ 和外部干扰 d 的未知动态 ξ , 则其估计误差 $\tilde{\xi}$ 一致最终有界, 且指数收敛到零点附近邻域内, 即对于任意有限的 k , 有 $\|\tilde{\xi}(t)\| \leq \sqrt{\tilde{\xi}^2(0)e^{-t/k} + k^2 \eta^2}$ 成立, 且当 $k \rightarrow 0$ 时 $\hat{\xi} \rightarrow \xi$.

证明 由式(4)和(9), 可得估计误差为

$$\tilde{\xi} = \xi - \hat{\xi} = \xi - \frac{F(q, \dot{q}) - F_f(q, \dot{q})}{k} - H_f(q, \dot{q}) + \tau_f.$$

求得估计误差导数 $\dot{\tilde{\xi}}$ 为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\xi}} &= \dot{\xi} - \dot{\hat{\xi}} = \dot{\xi} - \frac{\dot{F} - \dot{F}_f}{k} - \dot{H}_f + \dot{\tau}_f = \\ & \dot{\xi} - \frac{1}{k} (\dot{F} - \dot{F}_f + H - H_f - \tau + \tau_f) = \\ & \dot{\xi} - \frac{1}{k} (\xi - \dot{F}_f - H_f + \tau_f) = -\frac{1}{k} \tilde{\xi} + \dot{\xi}. \end{aligned} \quad (10)$$

选取李雅普诺夫函数 $V_1 = \tilde{\xi}^T \tilde{\xi}/2$, 求导得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -\frac{1}{k} \tilde{\xi}^T \tilde{\xi} + \tilde{\xi}^T \dot{\xi} \leq -\frac{1}{k} \tilde{\xi}^T \tilde{\xi} + \frac{\tilde{\xi}^T \tilde{\xi}}{2k} + \frac{k}{2} \dot{\xi}^T \dot{\xi} \leq \\ & -\frac{1}{k} V_1 + \frac{k}{2} \eta^2. \end{aligned} \quad (11)$$

进而可得估计误差 $\tilde{\xi}$ 收敛边界为

$$\|\tilde{\xi}(t)\| = \sqrt{2V_1(t)} \leq \sqrt{\tilde{\xi}^2(0)e^{-t/k} + k^2 \eta^2}.$$

故当 $k \rightarrow 0$ 时 $\hat{\xi} \rightarrow \xi$. \square

注2 通过重构机器人系统模型(1)为系统(4), 并对 $\dot{F}(q, \dot{q})$ 引入滤波操作(5)可知, 未知系统动态估计器(9)中 $[F(q, \dot{q}) - F_f(q, \dot{q})]/k$ 并未包含加速度信号 \ddot{q} , 且未知系统动态估计器实现只需要机器人惯性矩阵 $M(q)$, 而 $C(q, \dot{q})\dot{q}, G(q)$ 和外部干扰 d 可被同时估计, 降低了对模型的依赖. 估计器中仅需选择一个标量滤波系数 k , k 设置过大会造成估计器相位滞后, k 过小会导致估计器对噪声过于敏感, 所以 k 的选取需考虑鲁棒性和收敛速度, 一般选为较小的一个常数.

3 预设瞬态性能控制器设计

在获得系统未知动态 ξ 在线估计后, 可将该估计值引入到控制器设计中, 实现未知动态精准补偿. 为确保良好的稳态和瞬态控制性能, 保证机器人控制系统的安全性, 将未知系统动态估计器和预设性能函数

设计控制器进行结合.

$$e^{2z} = \frac{\delta + \lambda}{\bar{\delta} - \lambda}, \quad (18)$$

3.1 预设性能函数

为提升瞬态控制性能,引入预设性能函数对跟踪误差进行限制,使其始终保持在预规定边界范围内. 定义机器人跟踪误差为

$$e = q - q_d, \quad (12)$$

其中 q_d 为给定参考信号.

引入正定递减光滑性能函数 $\mu(t) : R^+ \rightarrow R^+$ 为

$$\mu(t) = (\mu_0 - \mu_\infty)e^{-\alpha t} + \mu_\infty. \quad (13)$$

可知 $\mu(t)$ 满足如下条件:

- 1) $\lim_{t \rightarrow 0} \mu(t) = \mu_0, \lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t) = \mu_\infty;$
- 2) $\mu(0) = (\mu_0 - \mu_\infty)e^{-\alpha \cdot 0} + \mu_\infty = \mu_0.$

其中: $\mu_0 > \mu_\infty > 0$ 和 $\alpha > 0$ 为设计者设定的预设性能参数, μ_0 为预设性能函数的初始值, μ_∞ 为稳态误差最大边界, α 为误差收敛速度.

通过预设性能函数,跟踪误差可限制在如下预规定边界内:

$$-\underline{\delta}\mu(t) < e(t) < \bar{\delta}\mu(t), \quad \forall t > 0. \quad (14)$$

其中: 边界参数 $\underline{\delta} > 0$ 和 $\bar{\delta} > 0$ 由设计者设定, $-\underline{\delta}\mu(t)$ 为跟踪误差下超调的边界, $\bar{\delta}\mu(t)$ 为跟踪误差上超调的边界.

由式(13)和(14)可知,通过调节参数 $\delta, \bar{\delta}, \alpha, \mu_0$ 和 μ_∞ 可保证机器人跟踪误差的瞬态性能和稳态性能.

预设性能控制器设计思想^[29-30]是将跟踪误差(12)和限制条件(14)转化为一个非限制性问题. 为方便设计控制器,引入一个转化误差 $z \in R$ 的严格单调递减光滑函数 $S(z)$, 具有如下性质^[31]:

- 1) $-\underline{\delta} < S(z) < \bar{\delta}, \forall z \in L_\infty;$
- 2) $\lim_{z \rightarrow +\infty} S(z) = \bar{\delta}, \lim_{z \rightarrow -\infty} S(z) = -\underline{\delta}.$

根据 $S(z)$ 的性质,条件(14)可写成

$$e(t) = \mu(t)S(z), \quad (15)$$

本文选择 $S(z)$ 为

$$S(z) = \frac{\bar{\delta}e^z - \underline{\delta}e^{-z}}{e^z + e^{-z}}. \quad (16)$$

根据 $S(z)$ 可计算转化误差 z 为

$$z = S^{-1}[\lambda(t)] = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\delta + \lambda}{\bar{\delta} - \lambda} \right], \quad (17)$$

其中 $\lambda(t) = e(t)/\mu(t)$ 为等价跟踪误差.

引理 2^[25-27] 若等价误差 $z = S^{-1}[\lambda(t)]$ 能够被控制为有界,即 $|z| \leq z_m, z_m > 0$, 则跟踪误差(12)可保持在预规定边界内,满足 $-\underline{\delta}\mu(t) < e(t) < \bar{\delta}\mu(t), \forall t > 0$.

证明 由等价误差定义(17)可得

进一步推导得到

$$-\underline{\delta} < \frac{e^{-2z}\bar{\delta} - \underline{\delta}}{e^{-2z} + 1} = \lambda \leq \lambda \leq \bar{\lambda} = \frac{e^{2z}\bar{\delta} - \underline{\delta}}{e^{2z} + 1} < \bar{\delta}. \quad (19)$$

由 $\lambda(t)$ 的定义可知 $-\underline{\delta}\mu(t) < e(t) < \bar{\delta}\mu(t)$ 成立. \square

引理 2 表明,通过误差等价转化得到 z , 并设计控制器使 z 有界,可将机器人跟踪误差 e 控制在预规定的边界(14)内,即机器人系统(1)的预设性能跟踪控制问题可转变成等价误差系统(17)的镇定问题.

注 3 在实际预设性能控制器设计中,预设瞬态性能函数的选择需使系统初始状态满足 $|e(0)| \leq \min\{\underline{\delta}, \bar{\delta}\}\mu_0$, 故在参数调节中可先设置较大的 $\mu_0, \underline{\delta}$ 和 $\bar{\delta}$, 然后逐渐减小参数.

3.2 含未知系统动态估计的预设性能控制器

为方便设计控制器,计算等价误差 z 的导数为

$$\dot{z} = \frac{\partial S^{-1}}{\partial \lambda} \dot{\lambda} = r \left(\dot{e} - \frac{e\dot{\mu}}{\mu} \right). \quad (20)$$

其中 $r = (1/2\mu)[1/(\lambda + \underline{\delta}) - 1/(\lambda - \bar{\delta})]$ 为有界变量, 满足 $0 < r \leq r_m, r_m > 0$. r 的导数为

$$\dot{r} = -\frac{\dot{\mu}}{2\mu^2} \left[\frac{1}{\lambda + \underline{\delta}} - \frac{1}{\lambda - \bar{\delta}} \right] - \frac{\dot{e}\mu - e\dot{\mu}}{2\mu^3} \left[\frac{1}{(\lambda + \underline{\delta})^2} + \frac{1}{(\lambda - \bar{\delta})^2} \right]. \quad (21)$$

进一步可得

$$\ddot{z} = \dot{r} \left(\dot{e} - \frac{e\dot{\mu}}{\mu} \right) + r \left[\ddot{e} - \frac{\dot{e}\dot{\mu}}{\mu} - \frac{e\ddot{\mu}}{\mu} + \frac{e\dot{\mu}^2}{\mu^2} \right]. \quad (22)$$

定义误差滑模面为

$$s = \Lambda z + \dot{z}, \quad (23)$$

其中 $\Lambda > 0$ 为常数. 可知 z 随 s 的收敛而收敛, 进一步计算 s 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{s} &= (\Lambda r + \dot{r}) \left(\dot{e} - \frac{e\dot{\mu}}{\mu} \right) + r \left[\ddot{e} - \frac{\dot{e}\dot{\mu}}{\mu} - \frac{e\ddot{\mu}}{\mu} + \frac{e\dot{\mu}^2}{\mu^2} \right] = \\ &= (\Lambda r + \dot{r}) \left(\dot{e} - \frac{e\dot{\mu}}{\mu} \right) + r \left[M^{-1}(\tau + d - C\dot{q} - G) - \right. \\ &\quad \left. \ddot{q}_d - \frac{\dot{e}\dot{\mu}}{\mu} - \frac{e\ddot{\mu}}{\mu} + \frac{e\dot{\mu}^2}{\mu^2} \right]. \end{aligned} \quad (24)$$

根据式(24)设计含未知动态估计的预设性能控制器为

$$\begin{aligned} \tau &= -\hat{\xi} + M \left(\ddot{q}_d + \frac{\dot{e}\dot{\mu}}{\mu} + \frac{e\ddot{\mu}}{\mu} - \frac{e\dot{\mu}^2}{\mu^2} - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{r} \left[(\Lambda r + \dot{r}) \left(\dot{e} - \frac{e\dot{\mu}}{\mu} \right) + Ks \right] \right), \end{aligned} \quad (25)$$

其中 $K > 0$ 为控制增益系数.

将式(25)代入(24),可得

$$\dot{s} = -Ks + rM^{-1}\tilde{\xi}. \quad (26)$$

注 4 控制器(25)只含机器人系统(1)惯性矩阵

$M(q)$, 包含外部干扰 d 和 $C(q, \dot{q})\dot{q}$, $G(q)$ 的集总未知动态 ξ 可由未知系统动态估计器补偿. 通过调节预设性能参数 μ_0 、 μ_∞ 、 α 和边界参数 $\underline{\delta}$ 、 $\bar{\delta}$ 可对跟踪误差的超调量、收敛速度和稳态最大误差进行预先规定, 保证机器人控制系统的瞬态和稳态性能.

4 稳定性分析

定理2 考虑机器人系统(1)、未知系统动态估计器(9)和预设性能控制器(25), 当初始状态满足 $-\underline{\delta}\mu(0) < e(0) < \bar{\delta}\mu(0)$ 时, 跟踪误差可保持在预规定的边界(14)内, 且所有闭环信号有界.

证明 选取李雅普诺夫函数

$$V_s = \frac{1}{2}s^T s + \frac{1}{2}\tilde{\xi}^T \tilde{\xi}. \quad (27)$$

由式(26)和(10), 对 V_s 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &= s^T \dot{s} + \tilde{\xi}^T \dot{\tilde{\xi}} = \\ &-s^T K s + s^T r M^{-1} \tilde{\xi} - \frac{1}{k} \tilde{\xi}^T \tilde{\xi} + \tilde{\xi}^T \dot{\tilde{\xi}} \leq \\ &-\nu_1 s^T s + r_m \nu_2 \|s^T \tilde{\xi}\| - \frac{1}{k} \tilde{\xi}^T \tilde{\xi} + \tilde{\xi}^T \dot{\tilde{\xi}} \leq \\ &-\alpha V_s + \beta. \end{aligned} \quad (28)$$

其中: $\nu_1 = \lambda_{\min}(K)$ 为增益矩阵 K 的最小特征值, $\nu_2 = \lambda_{\max}(M^{-1})$ 为惯性矩阵 M^{-1} 的最大特征值, $\alpha = \min\left(2\nu_1 - r_m \nu_2, \frac{1}{k} - r_m \nu_2\right)$, $\beta = k\eta^2/2$. 当 $\nu_1 > \frac{1}{2}r_m \nu_2$, $k < \frac{1}{r_m \nu_2}$ 时 α 、 β 均为正数. 求解式(28)得到 $V_s(t) \leq e^{-\alpha t} V_s(0) + \beta/\alpha$, 故 s 和 $\tilde{\xi}$ 指数收敛到集合

$$\begin{aligned} \Omega_1 &:= \{S \mid \|S\| \leq \sqrt{2e^{-\alpha t} V_s(0) + k\eta^2/\alpha}\}, \\ \Omega_2 &:= \{\tilde{\xi} \mid \|\tilde{\xi}\| \leq \sqrt{2e^{-\alpha t} V_s(0) + k\eta^2/\alpha}\}. \end{aligned}$$

根据误差变量定义(23)可知, 转化误差 z 有界, 进而根据引理2可知, 跟踪误差控制在预规定边界(14)内. \square

5 仿真实验

使用两自由度 SCARA 机器人模型作为仿真实例验证所提出算法的有效性. SCARA 机器人(结构如图1所示)为实验室建造的实验平台, 将在下一节进行实验测试. 机器人系统模型的相关参数见表1. 系统模型(1)中矩阵 $M(q)$ 、 $C(q, \dot{q})$ 、 $G(q)$ 分别为

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} a + b + c + 2f + I_1 + I_2 & c + f + I_2 \\ c + f + I_2 & c + I_2 \end{bmatrix}, \\ G &= 0, \quad C = \begin{bmatrix} -2h\dot{q}_2 & -h\dot{q}_2 \\ -h\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (29)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= m_1 l_{q_1}^2, \quad b = m_2 l_1^2, \quad c = m_2 l_{q_2}^2, \\ f &= m_2 l_1 l_{q_2} \cos(q_2), \quad h = m_2 l_1 l_{q_2} \sin(q_2). \end{aligned}$$

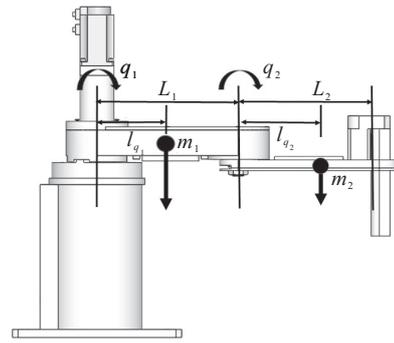


图1 两自由度 SCARA 机器人结构

表1 机器人模型参数

参数	物理意义	数值
m_1 / kg	关节1 质量	9.387
m_2 / kg	关节2 质量	1.729
l_1 / m	连杆1 长度	0.25
l_2 / m	连杆2 长度	0.25
l_{q_1} / m	质心1 距关节1 长度	0.053
l_{q_2} / m	质心2 距关节2 长度	0.170
I_1 / (kg · m ²)	关节1 转动惯量	0.1190
I_2 / (kg · m ²)	关节2 转动惯量	0.0652

仿真中, 为验证所提出控制方法的有效性, 对以下控制方法进行对比仿真.

M1: 所提出的控制方法 (USDE-PPF). 包含预设性能控制器(25)和未知系统动态估计器(9), 预设性能函数选为 $\mu(t) = (3 - 0.1)e^{-2t} + 0.1$, 边界参数设为 $\underline{\delta} = \bar{\delta} = 1$, 控制增益为 $K = 4$, $\Lambda = 2$, 未知系统动态估计器的滤波系数为 $k = 0.001$.

M2: 文献[1]计算转矩控制方法 (CTC). 控制器为 $\tau = M(q)(\ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e) + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$, $e = q - q_d$, 控制增益参数为 $K_p = \text{diag}\{-10\}_{2 \times 2}$, $K_v = \text{diag}\{-5\}_{2 \times 2}$.

M3: 传统 PD 控制方法 (PD). 控制器为 $\tau = k_v \dot{e} + k_p e$, $e = q - q_d$, 控制增益参数为 $k_p = -10$, $k_v = -5$.

对 SCARA 机器人的两个关节进行控制, 关节1参考轨迹设为 $q_{d1} = 2\pi \sin(0.2\pi t)$, 外部干扰为 $d_1 = 0.8 \sin(3t)$. 关节2参考轨迹设为 $q_{d2} = 2 \sin(0.4\pi t)$, 外部干扰为 $d_2 = 0.3 \sin(2t)$. 仿真结果如图2~图5所示. 由图2可见, 方法M1在存在外部干扰的情况下具有较好跟踪效果. 方法M2控制器中使用未知动态 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 、 $G(q)$, 故采用较大的控制增益也不能抑制外部干扰的影响, 尤其是关节2在跟踪频率较高的参考信号 q_{d2} 时, 实际轨迹与参考轨迹存在较大偏离. 方法M3控制器中虽未使用未知动态 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 、 $G(q)$, 但采用较高的控制增益也难以抑制干扰的影响, 故存

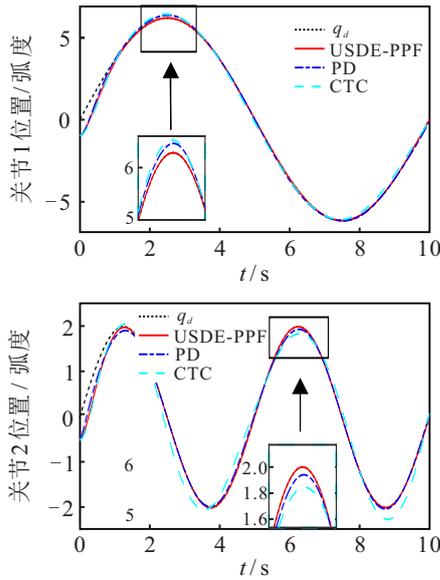


图2 机器人位置跟踪

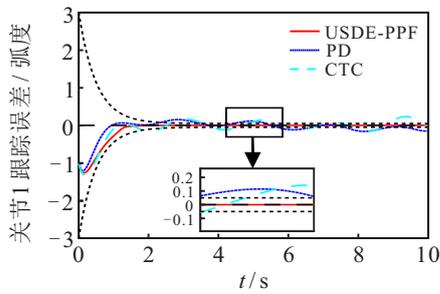


图3 机器人关节1跟踪误差

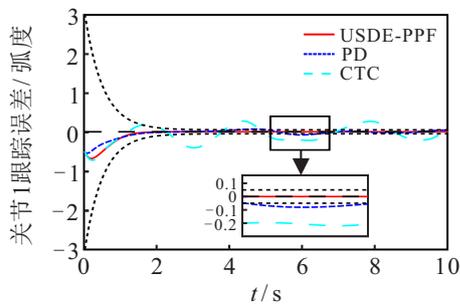
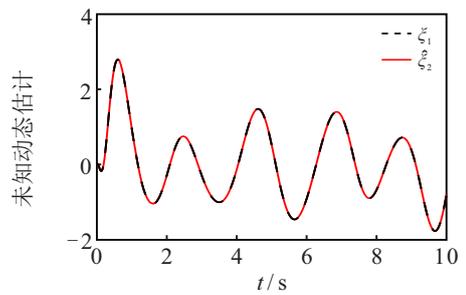


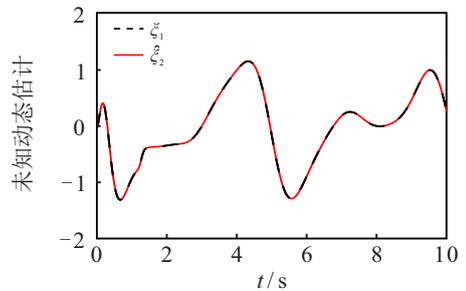
图4 机器人关节2跟踪误差

在较大的跟踪误差. 图3和图4给出的跟踪误差也表明, 所提出方法跟踪误差较小, 且能确保误差始终保持在预规定的边界内, 提升了机器人控制的瞬态性能和稳态性能. 方法M2和M3获得的跟踪误差均超出预先规定的边界.

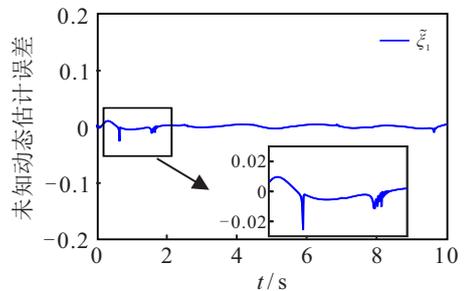
如图5所示, 提出的未知系统动态估计器实现了对系统集总未知动态 ξ 的准确估计, 估计出的集总未知动态 ξ 包含向心力或科氏力 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 、重力矢量 $G(q)$ 和外部干扰 d . 将估计出的集总未知动态补偿到预设性能控制器中, 避免了使用不确定项 $C(q, \dot{q})\dot{q}, G(q)$, 同时有效抑制了外部干扰 d 的负面影响, 在降低系统建模难度的同时提高了机器人控制系



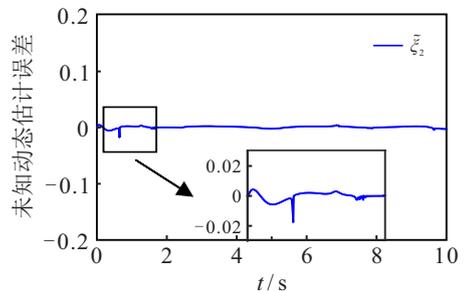
(a) 关节1集总未知动态估计



(b) 关节2集总未知动态估计



(c) 关节1集总未知动态估计误差



(d) 关节2集总未知动态估计误差

图5 机器人集总未知动态估计

统的鲁棒性.

6 实验验证

为验证所提出控制算法的实用性, 采用SCARA机器人平台进行实验, 控制系统如图6所示. 平台包括计算机主机、STM32F407IG控制板、数模转换电路、光电编码器、两个三菱伺服电机和伺服驱动器以及SCARA机器人本体. 实验中, 伺服电机驱动方式设置为转矩控制模式, 编码器分辨率为4000 plus/r. 控制算法用C语言软件编写, 实现SCARA机器人转动跟踪给定的位置参考信号 q_d , 控制系统的采样频率设为 $T_s = 0.02$ s. 机器人系统的物理参数如表1所示.

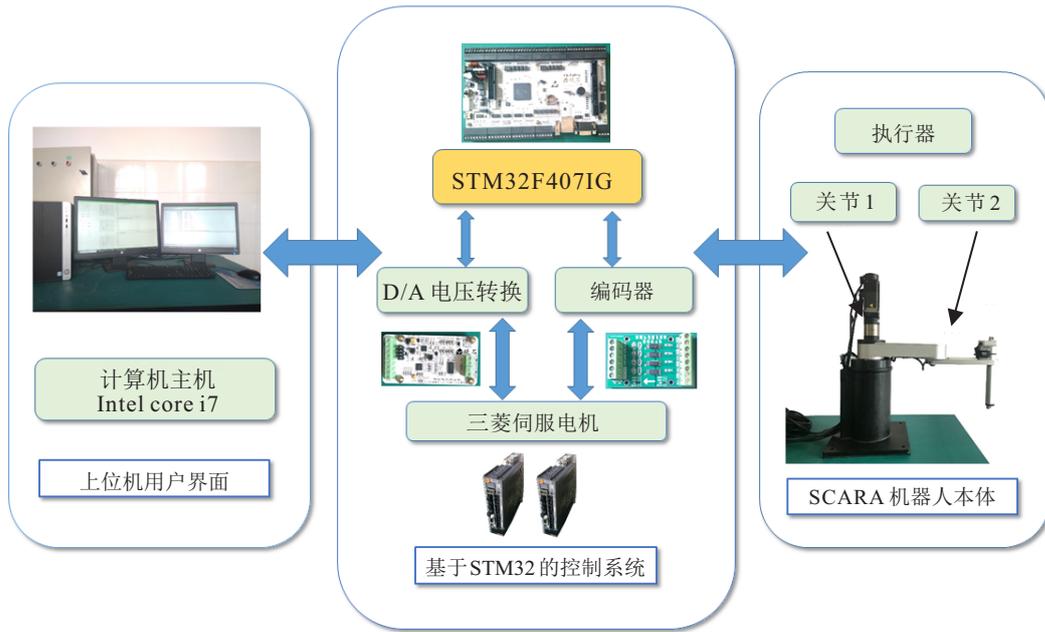


图6 SCARA机器人控制系统

为了比较3种控制方法的性能,SCAR机器人两关节的参考信号设置为不同幅值、不同周期的正弦信号 $q_{d1} = 4.3 \sin\left(\frac{2\pi}{15}t\right)$, $q_{d2} = 4.5 \sin\left(\frac{2\pi}{10}t\right)$, 且添加不同频率的干扰信号 $d_1 = 0.2 \sin\left(\frac{2\pi}{2.5}t\right)$, $d_2 = 0.2 \sin\left(\frac{2\pi}{5}t\right)$ 到系统量测中。

M1: 所提出控制器法(USDE-PPF). 预设性能函数为 $\mu(t) = (5 - 0.3)e^{-t} + 0.3$, 边界参数为 $\underline{\delta} = \bar{\delta} = 1$, 控制增益 $K = 2$, $\Lambda = 2$, 未知系统动态估计器的滤波系数为 $k = 0.1$.

M2: 计算转矩控制器(CTC). 控制增益参数为 $K_p = \text{diag}\{-5\}_{2 \times 2}$, $K_v = \text{diag}\{-2\}_{2 \times 2}$.

M3: PD控制器(PD). 增益为 $k_p = -2$, $k_v = -1$.

实验结果如图7~图10所示。从图7和图8可见, 所提出控制算法M1具有更好的跟踪效果, 跟踪误差比M2和M3小。M2和M3都存在较大跟踪误差, 与M3相比, M2受外部干扰频率的影响较小, M3同时受到外部干扰和系统未知动态的影响, 跟踪误差波动剧烈。图9为机器人系统集总未知动态估计, 与计算转矩直接使用未知动态模型(具有建模误差)相比, 所提出控制算法M1通过对未知动态和外部干扰进行估计, 可有效补偿其对机器人控制系统的影响, 能够取得较好跟踪效果。图10为所提出控制算法的控制电压信号。

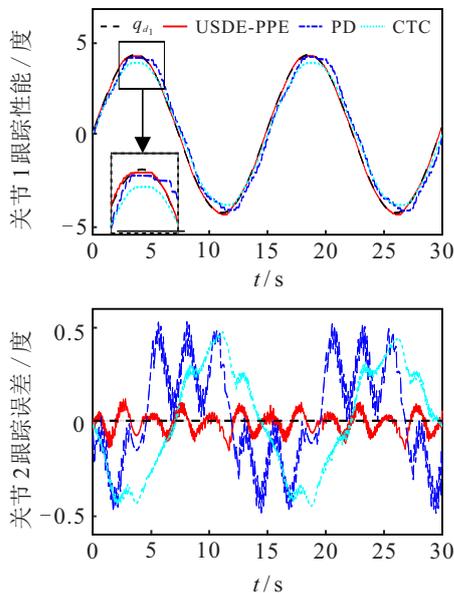


图7 干扰情况下机器人关节1跟踪性能

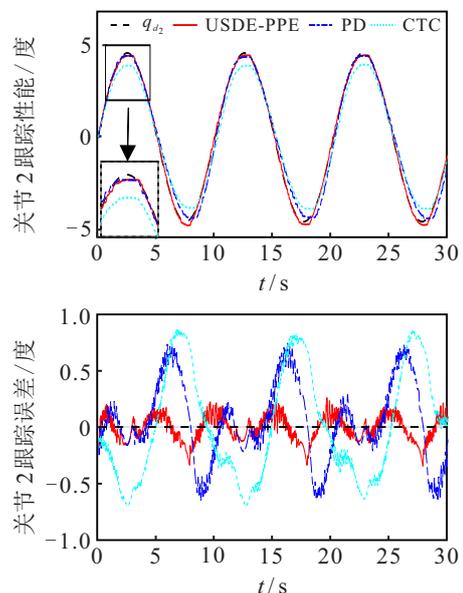


图8 干扰情况下机器人关节2跟踪性能

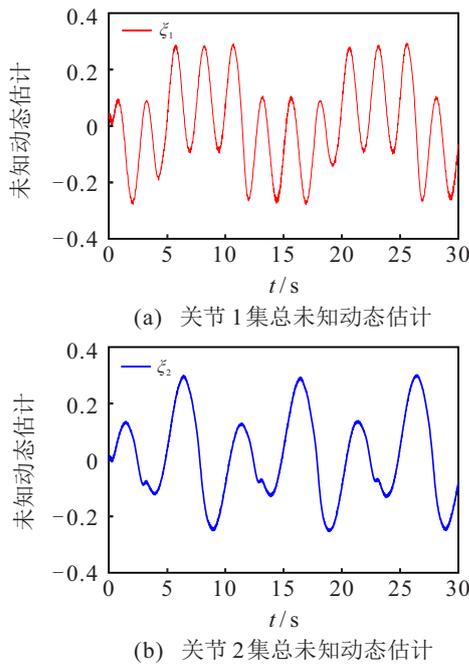


图9 集总未知动态估计

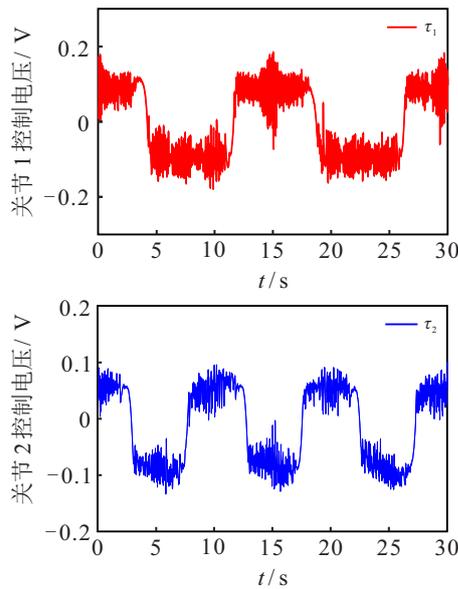


图10 干扰情况下USDE-PPF控制信号

7 结 论

针对含有未知动态的机器人系统,传统估计器需调节的参数过多且需在线计算机器人惯性矩阵的逆,导致控制器结构复杂、计算量大,造成实际应用困难.本文设计一种不依赖于加速度信号和系统模型的未知系统动态估计器对机器人向心力或科氏力、重力和外部干扰实现在线估计,进而补偿到控制器设计中,并引入预设性能函数保证跟踪误差的瞬态性能和稳态性能.所提出方法降低了控制器对系统模型的依赖,减少了建模工作量,且估计器只需调节一个参数,便于实际机器人系统实现.最后,对比PD控制和计算转矩控制的仿真和实验结果表明,所提出方法能够获得更好的稳态和瞬态性能,且能有效抑制外部干

扰的不利影响.

参考文献(References)

- [1] Lewis F L, Dawson D M, Abdallah C T. Robot manipulator control: Theory and practice[M]. New York: CRC Press, 2003.
- [2] Sciacivco L, Siciliano B. Modelling and control of robot manipulators[M]. London: Springer Verlag, 2012.
- [3] Spong M W. On the robust control of robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(11): 1782-1786.
- [4] Slotine J J E, Li W P. Composite adaptive control of robot manipulators[J]. Automatica, 1989, 25(4): 509-519.
- [5] Na J, Mahyuddin M N, Herrmann G, et al. Robust adaptive finite-time parameter estimation and control for robotic systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2015, 25(16): 3045-3071.
- [6] Yang C G, Jiang Y M, He W, et al. Adaptive parameter estimation and control design for robot manipulators with finite-time convergence[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10): 8112-8123.
- [7] 顾万里, 胡云峰, 宫洵, 等. 考虑参数不确定性的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(1): 81-88.
(Gu W L, Hu Y F, Gong X, et al. Trajectory tracking control of mobile robot with parameter uncertainties[J]. Control and Decision, 2019, 34(1): 81-88.)
- [8] 陈强, 楼成林, 南余荣, 等. 一类不确定非线性系统的自适应支持向量回归建模与动态面控制[M]. 控制与决策, 2019, 34(1): 63-71.
(Chen Q, Lou C L, Nan Y R, et al. Adaptive support vector regression modeling and dynamic surface control of a class of uncertain nonlinear systems[J]. Control and Decision, 2019, 34(1): 63-71.)
- [9] 陈强, 钱宁, 南余荣. Buck型变换器固定时间自适应控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1183-1190.
(Chen Q, Qian N, Nan Y R. Fixed-time Adaptive Control for Buck Converters[J]. Control and Decision, 2020, 35(5): 11783-1190.)
- [10] Islam S, Liu X P. Robust sliding mode control for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2444-2453.
- [11] Chen Q, Xie S Z, Sun M X, et al. Adaptive nonsingular fixed-time attitude stabilization of uncertain spacecraft[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(6): 2937-2950.
- [12] 田慧慧, 苏玉鑫. 机器人系统终端滑模重复学习轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2014, 29(7): 1291-1296.
(Tian H H, Su Y X. Terminal sliding mode repetitive learning tracking control of robotic manipulators[J]. Control and Decision, 2014, 29(7): 1291-1296.)

- [13] Wang S B, Ren X M, Na J, et al. Extended state observer based funnel control for nonlinear servomechanisms with prescribed tracking performance[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 14(1): 98-108.
- [14] Na J, Chen A S, Herrmann G, et al. Vehicle engine torque estimation via unknown input observer and adaptive parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(1): 409-422.
- [15] Na J, Yang J, Wang S B, et al. Unknown dynamics estimator based output-feedback control for nonlinear pure-feedback systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2019, 1627: 1-12.
- [16] Na J, Li Y P, Huang Y B, et al. Output feedback control of uncertain hydraulic servo systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(1): 490-500.
- [17] 张文辉, 齐乃明, 尹洪亮. 自适应神经变结构的机器人轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2011, 26(4): 597-600. (Zhang W H, Qi N M, Yin H L. Neural-variable structure-based adaptive trajectory tracking control of robot manipulators[J]. Control and Decision, 2011, 26(4): 597-600.)
- [18] 吴玉香, 杨梅, 王聪. 从机器人输出反馈自适应神经控制中学习[J]. 控制与决策, 2012, 27(11): 1740-1744. (Wu Y X, Yang M, Wang C. Learning from output feedback adaptive neural control of robot[J]. Control and Decision, 2012, 27(11): 1740-1744.)
- [19] 郑艳, 郑秀萍, 褚俊霞, 等. 基于T-S模型的体操机器人系统模糊变结构控制[J]. 控制与决策, 2006, 21(1): 34-37. (Zheng Y, Zheng X P, Chu J X, et al. Fuzzy variable structure control for acrobot Based on T-S model[J]. Control and Decision, 2006, 21(1): 34-37.)
- [20] 阮晓钢, 胡敬敏, 蔡建美, 等. 一种基于模糊控制理论的独轮机器人控制算法[J]. 控制与决策, 2010, 25(6): 862-866. (Ruan X G, Hu J M, Cai J X, et al. Control algorithm of unicycle robot based on the fuzzy control theory[J]. Control and Decision, 2010, 25(6): 862-866.)
- [21] Chen W H, Yang J, Guo L, et al. Disturbance observer based control and related methods — An overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1083-1095.
- [22] Ohishi K, Nakao M, Ohnishi K, et al. Microprocessor-controlled DC motor for load-insensitive position servo system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1987, 34(1): 44-49.
- [23] Chen W H, Ballance D J, Gawthrop P J, et al. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 932-938.
- [24] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [25] Ilchmann A, Ryan E P. Performance funnels and tracking control[J]. International Journal of Control, 2009, 82(10): 1828-1840.
- [26] Wang S B, Ren X M, Na J, et al. Extended-state-observer-based funnel control for nonlinear servomechanisms with prescribed tracking performance[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(1): 98-108.
- [27] Ngo K B, Mahony R, Jiang Z P. Integrator backstepping using barrier functions for systems with multiple state constraints [C]. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE, 2005: 8306-8312.
- [28] 张天平, 王宁宁, 夏梅珍. 具有未建模动态和输出约束系统的自适应输出反馈控制[J]. 控制与决策, 2017, 32(1): 55-62. (Zhang T P, Wang N N, Xia M Z. Adaptive output feedback control for systems with unmodeled dynamics and output constraint[J]. Control and Decision, 2017, 32(1): 55-62.)
- [29] Bechlioulis C P, Rovithakis G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(9): 2090-2099.
- [30] Bechlioulis C P, Rovithakis G A. Adaptive control with guaranteed transient and steady state tracking error bounds for strict feedback systems[J]. Automatica, 2009, 45(2): 532-538.
- [31] Na J, Chen Q, Ren X M, et al. Adaptive prescribed performance motion control of servo mechanisms with friction compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(1): 486-494.
- [32] Na J, Huang Y B, Wu X, et al. Active adaptive estimation and control for vehicle suspensions with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(6): 2063-2077.

作者简介

那靖(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制、参数估计、非线性控制及应用等研究, E-mail: najing25@163.com;

张超(1995—), 男, 硕士生, 从事机器人控制、自适应控制的研究, E-mail: zhangchao_1398@163.com;

王娴(1975—), 女, 副教授, 从事机电一体化系统控制等研究, E-mail: wanglywxian@163.com;

高贯斌(1979—), 男, 教授, 博士, 从事精密测量与控制、机器人运动学标定、参数辨识与误差补偿等研究, E-mail: gbgao@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)