

基于改进型积分终端滑模控制方法的移动机器人轨迹跟踪设计与实验

王雪闯,王会明,赵振华

引用本文:

王雪闯,王会明,赵振华. 基于改进型积分终端滑模控制方法的移动机器人轨迹跟踪设计与实验[J]. 控制与决策, 2023, 38(10): 2881-2887.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0246

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft 控制与决策. 2021, 36(5): 1049-1058 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968

磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor 控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064

直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor 控制与决策. 2021, 36(3): 693-698 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774

四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV 控制与决策. 2021, 36(2): 379-386 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller 控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650

基于改进型积分终端滑模控制方法的移动机器人 轨迹跟踪设计与实验

王雪闯1, 王会明1†, 赵振华2

(1. 重庆邮电大学 自动化学院,重庆 400065; 2. 南京航空航天大学 自动化学院,南京 211106)

摘 要:为了使移动机器人获得高精度和快速收敛的跟踪性能,设计一种基于积分终端滑模和滑模观测器的轨迹 跟踪控制方法.首先,考虑到移动机器人在实际运动过程中会受到地面湿滑、摩擦等原因引起的侧滑扰动的影响, 建立其在该扰动影响下的运动学模型;然后,利用该动态模型设计滑模观测器来估计系统受到的扰动;接着,将估 计的扰动值前馈至反馈控制器,用来抑制扰动对系统控制性能的影响,从而达到削弱抖振的目的;同时,基于跟踪 误差设计积分终端滑模面,并结合滑模面和扰动估计设计新型积分终端滑模控制器;最后,基于Lyapunov稳定性 理论对整个闭环系统进行稳定性分析.仿真实验结果表明,所设计的控制器具有更高的跟踪精度和更强的鲁棒性. 关键词:积分终端滑模控制;滑模观测器;轨迹跟踪;移动机器人;运动学模型;Lyapunov

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0246

引用格式: 王雪闯,王会明,赵振华. 基于改进型积分终端滑模控制方法的移动机器人轨迹跟踪设计与实验[J]. 控制与决策, 2023, 38(10): 2881-2887.

Trajectory tracking design and experiment of mobile robot based on improved integral terminal sliding mode control approach

WANG Xue-chuang¹, WANG Hui-ming^{1†}, ZHAO Zhen-hua²

School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
 School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To achieve the performance of high-precision and fast convergence for the trajectory tracking of a mobile robot, a trajectory tracking control method based on the integral terminal sliding mode and sliding mode observer (SMO) is addressed. Firstly, considering that the mobile robot would be affected by the side-sliding disturbance caused by the wet ground and frictions in the actual moving process, the kinematic model under the influence of the disturbance is established. Then, a sliding mode observer is developed using the dynamic model to estimate the disturbance of the system, and the estimated disturbance value is passed to the feedback controller to suppress the influence of the disturbance on the control performance of the system, so as to achieve the purpose of weakening the chattering. At the same time, an integral terminal sliding mode surface is devised on the basis of the tracking error, and integrating the sliding mode surface and disturbance estimations, a new integral terminal sliding mode controller is constructed. Finally, the stability of the whole closed-loop system under the present control method is also guaranteed using the Lyapunov stability theory. Simulation and experimental results show that the recommended controller has higher tracking accuracy and stronger robustness.

Keywords: integral terminal sliding mode control (ITSMC); sliding mode observer; track tracking; mobile robot; kinematic model; Lyapunov

0 引 言

近年来,随着机器人在科研、国防、工业、民用、仓 储等领域的应用日益广泛,移动机器人逐渐成为机器 人领域研究的热点^[1-2].不同于传统的工业机器人,移动机器人在一些特殊工作环境中具有较复杂的不确定性^[3],比如模型的参数不确定性和由于路面潮湿、

责任编委:陈虹.

收稿日期: 2022-02-13;录用日期: 2022-06-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61803059,61903192); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202200626); 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0142); 江苏省自然科学基金项目(BK20190402).

[†]通讯作者. E-mail: wanghm@cqupt.edu.cn.

结冰、凹凸不平等情况引起的轮子侧向滑动^[4].另外, 由于移动机器人是一个多变量强耦合且具有非完整 约束性质的非线性系统^[5],近年来专家和学者们用了 多种非线性控制方法设计移动机器人的轨迹跟踪控 制器,如状态反馈线性化控制^[6]、反演控制^[7-8]、模型 预测控制^[9-10]、滑模控制^[11-12]等.

在上述提及的控制方法中,滑模控制因其对系统 扰动/不确定性具有较强的鲁棒性而在移动机器人系 统中得到了大量应用. 文献[13]针对两轮差速驱动 移动机器人,提出了一种基于事件触发的滑模控制 方法来跟踪目标轨迹;文献[14]针对三轮全向移动机 器人的摩擦补偿问题,提出了一种基于降阶扩展状态 观测器的滑模控制方案;文献[15]研究了具有模型参 数不确定性和外界干扰的自主水下机器人编队跟踪 控制问题,提出了一种基于主动跟踪的固定时间滑模 控制方法,实现了随动车辆对前驱车辆的跟踪,然而, 传统的滑模控制由于其控制律的不连续容易引起抖 振现象,从而影响轨迹跟踪精度[16].因此,研究者们 提出了很多抑制抖振的方法. 如自适应滑模控制[17], 该方法可以通过自适应机制调节控制增益来减少抖 振. 又如基于观测器的滑模控制[18-19],其中观测器用 于估计系统未知扰动,并将估计得到的扰动值前馈至 滑模控制器进行干扰补偿,从而减小系统稳态波动并 提升系统的扰动抑制能力.

基于上述分析,为了进一步提高移动机器人系统 的抗干扰性和轨迹跟踪精度,本文设计一种结合滑模 观测器的积分终端滑模控制器.首先建立移动机器 人在受到侧滑扰动影响下的运动学模型;然后利用 该模型设计滑模观测器来估计系统扰动;接着基于 跟踪误差来设计积分终端滑模面;最后根据滑模面 和扰动估计设计积分终端滑模距;最后根据滑模面 和扰动估计设计积分终端滑模控制器,并给出了稳定 性分析过程.仿真和实验结果表明,移动机器人在所 提出的控制方法的驱动下具有更高的跟踪精度和更 强的抗扰性能.

针对移动机器人的轨迹跟踪控制问题,本文贡献 主要有3点:1)基于系统在侧滑扰动下的运动学模型, 设计了一种基于滑模观测器的积分终端滑模控制方 法;2)给出了包括控制器和观测器在内的整个机器 人闭环系统的详细稳定性证明;3)仿真和实验测试 验证了所提出控制方法的优越性.

1 移动机器人运动学模型

在非完整移动机器人的实际运动过程中,由于地 面湿滑、摩擦等原因引起的侧滑扰动的影响,其非完 整约束方程被描述为

$$\dot{x}\sin\theta - \dot{y}\cos\theta + d\dot{\theta} = -\eta.$$
(1)

其中:(*x*, *y*, *θ*)表示移动机器人的位置和方向; *η*表示 移动机器人侧向滑移线速度; *d*表示从机器人质心到 几何中心的距离,其中几何中心表示两个驱动电机之 间距离的中点.

定义 $q = [x, y, \theta]^{T}$,约束方程(1)可重写为以下矩 阵形式:

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} = \eta, \tag{2}$$

其中 $A(q) = [-\sin\theta, \cos\theta, -d].$ 定义矩阵 $J(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0\\ -d\sin\theta & d\cos\theta & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, 使得$ J(q)满足A(q)J(q) = 0,则受到侧滑扰动影响的移 动机器人运动学模型可以写成如下形式:

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{z} + \boldsymbol{\rho}(\boldsymbol{q},\boldsymbol{\eta}). \tag{3}$$

其中: $\boldsymbol{z} = [v, \omega]^{\mathrm{T}}, v \pi w \mathcal{H} \mathcal{H}$ 动机器人线速度 和角速度, $\boldsymbol{\rho}(\boldsymbol{q}, \eta) = [\rho_1, \rho_2, 0]^{\mathrm{T}}, \rho_1 = -\eta \sin \theta, \rho_2 = \eta \cos \theta.$

2 运动学控制器设计与稳定性分析

定义

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \rfloor^{m_i} = [\lceil x_1 \rfloor^{m_1}, \lceil x_2 \rfloor^{m_2}, \lceil x_3 \rfloor^{m_3}, \dots, \lceil x_n \rfloor^{m_n}]^{\mathrm{T}} = \\ [\operatorname{sgn}(x_1) |x_1|^{m_1}, \dots, \operatorname{sgn}(x_n) |x_n|^{m_n}]^{\mathrm{T}}.$$

其中: $\boldsymbol{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, 0 < m_i < 1, \text{sgn} 是标准$ 的符号函数.

令 $p_r = [x_r, y_r]^T$ 为移动机器人的参考位置, $p = [x, y]^T$ 为移动机器人的实际位置,则移动机器人的轨迹跟踪误差可定义为

$$\boldsymbol{e}_0 = [\boldsymbol{x}_e, \boldsymbol{y}_e]^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{p}_r - \boldsymbol{p}. \tag{4}$$

2.1 运动学控制器设计

基于前面的模型推导过程可知,本文所研究的移动机器人系统是一个微分平坦系统,根据微分同胚映射理论,航向角θ可以由系统的平坦输出(*x*, *y*)来表示^[20],因此只要保证实际位置(*x*, *y*)能够跟踪上参考位置(*x*_r, *y*_r),航向角θ就可以在一定范围内跟踪上参考信号θ_r,则基于式(3)可得

$$\dot{\boldsymbol{o}} = \bar{\boldsymbol{J}}\boldsymbol{z} + \boldsymbol{\varphi}.$$
 (5)

其中 $\bar{J} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -d\sin\theta \\ \sin\theta & d\cos\theta \end{bmatrix}, \varphi = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{bmatrix}$. 需要注意的 是,由于d不为0,矩阵 \bar{J} 是可逆的. 基于系统模型(5),可设计滑模观测器如下:

$$\begin{split} \dot{\hat{p}}_1 &= h_1 + \hat{\rho}_1 - \lambda_{11} \lceil \hat{p}_1 - p_1 \rfloor^{\gamma_1}, \\ \dot{\hat{p}}_2 &= h_2 + \hat{\rho}_2 - \lambda_{12} \lceil \hat{p}_2 - p_2 \rfloor^{\gamma_2}, \end{split}$$

$$\dot{\hat{\rho}}_1 = -\lambda_{01} \operatorname{sgn}(\hat{p}_1 - p_1),$$

 $\dot{\hat{\rho}}_2 = -\lambda_{02} \operatorname{sgn}(\hat{p}_2 - p_2).$ (6)

其中: p_1, p_2 分别表示移动机器人的位置 $x, y; \hat{p}_1, \hat{p}_2$ 分别表示 p_1, p_2 的估计值; $\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2$ 分别为 ρ_1, ρ_2 的估计 值; $\lambda_{01} = \lambda_{02} = 1.1L, \lambda_{11} = \lambda_{12} = 1.5L^{1/2}, L$ 为观测 器参数且 $L > 0; \gamma_1, \gamma_2$ 为观测器参数且 $0 < \gamma_1, \gamma_2 < 1; h_1, h_2$ 为观测器输入.

定义观测器估计误差为 $e_{\varphi} = \hat{\varphi} - \varphi$.其中 $\hat{\varphi}$ 为 φ 的估计值.根据文献[21]中定理5,滑模观测器(6) 选择合适的参数后是有限时间稳定的,则有:1) $\forall t \leq T_0, e_{\varphi}$ 有界,即存在一个正的常数 k_{φ} ,使得 $\|e_{\varphi}\| \leq k_{\omega}; 2$) $\forall t > T_0, e_{\varphi} = 0$.其中 T_0 为时间常数.

结合式(4)和(5),可设计积分终端滑模面

$$\begin{cases} s_1 = x_e + c_1 \int_0^t \left\lceil x_e \right\rfloor^{\alpha_1} \mathrm{d}\tau, \\ s_2 = y_e + c_2 \int_0^t \left\lceil y_e \right\rfloor^{\alpha_2} \mathrm{d}\tau. \end{cases}$$
(7)

其中: $c_1, c_2, \alpha_1, \alpha_2$ 为滑模面参数, 且 $0 < \alpha_1, \alpha_2 < 1$.

基于滑模观测器的扰动估计值,可设计推荐的积 分终端滑模控制律为

$$\begin{cases} h_1 = \dot{x}_r + c_1 [x_e]^{\alpha_1} + k_1 \operatorname{sgn}(s_1) - \hat{\rho}_1, \\ h_2 = \dot{y}_r + c_2 [y_e]^{\alpha_2} + k_2 \operatorname{sgn}(s_2) - \hat{\rho}_2. \end{cases}$$
(8)

其中 k_1 和 k_2 为控制器增益. 根据 $z = \bar{J}^{-1}[h_1, h_2]^{\mathrm{T}}$ 可得式(3)中的v和w.

图1为所提出的控制方法下的移动机器人控制 结构图,主要包括基于运动学模型的控制器和移动机 器人两部分.



图 1 移动机器人控制结构

(9)

2.2 稳定性分析

定义 $h = \overline{J}z$,其中 $h = [h_1, h_2]^T$,则式(5)可重写 为 $\dot{p} = h + \varphi$.

接下来给出移动机器人系统(5)在推荐控制方法 (8)下的详细稳定性分析,证明过程共分为3步.

step 1: 证明滑动变量有限时间内收敛.

定义 $\mathbf{s} = [s_1, s_2]^{\mathrm{T}}, \mathbf{c} = \operatorname{diag}(c_1, c_2), \mathbf{\alpha} = \operatorname{diag}(\alpha_1, \alpha_2), \mathbf{k} = \operatorname{diag}(k_1, k_2).$ 对式(7)求导,然后将式(8)和 $\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{h} + \mathbf{\varphi}$ 代入,可得

$$egin{aligned} \dot{s} &= \dot{e}_0 + oldsymbol{c} | oldsymbol{e}_0]^lpha = \ \dot{p}_r - oldsymbol{h} - arphi + oldsymbol{c} [oldsymbol{e}_0 |^lpha = -oldsymbol{k} \mathrm{sgn}(s) + oldsymbol{e}_arphi. \end{aligned}$$

考虑函数
$$V_s = (1/2)s^{\mathrm{T}}s$$
,对其求导有
 $\dot{V}_s = s^{\mathrm{T}}\dot{s} = s^{\mathrm{T}}(-k\mathrm{sgn}(s) + e_{\varphi}) =$
 $-k\|s\| + s^{\mathrm{T}}e_{\varphi} \leq -\underline{k}\|s\| + \|s\|k_{\varphi} =$
 $-(\underline{k} - k_{\varphi})\|s\| = -\sqrt{2}(\underline{k} - k_{\varphi})V_s^{1/2}.$ (10)

其中: $\underline{k} = \min(k_1, k_2)$, 根据上述不等式, 当 $\underline{k} > k_{\varphi}$ 时,

滑模面s将在有限时间内收敛至零^[22].

step 2: 证明系统状态有限时间内有界. 构造有限时间有界函数 $V_b = \frac{1}{2}s^{T}s + \frac{1}{2}e_0^{T}e_0$,对 V_b 求导有

$$\dot{V}_b = \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}} \dot{\boldsymbol{s}} + \boldsymbol{e}_0^{\mathrm{T}} \dot{\boldsymbol{e}}_0 \leqslant \boldsymbol{e}_0^{\mathrm{T}} \dot{\boldsymbol{e}}_0.$$
(11)

结合式(8)和 $\dot{p} = h + \varphi$,可得 \dot{e}_0 为

$$e_{0} = \dot{p}_{r} - \dot{p} = \dot{p}_{r} - h - \varphi = - c \lceil e_{0} \rfloor^{\alpha} - k \operatorname{sgn}(s) + e_{\varphi}.$$
(12)

因存在不等式 $\|\boldsymbol{x}\|^m < n + \sum_{i=1}^n m |x_i| < n + \|\boldsymbol{x}\|,$ 其中 0 < m < 1, $\boldsymbol{x} \in R^n$. 由式(12)可得

$$\|\dot{\boldsymbol{e}}_0\| \leq \bar{c}(2 + \|\boldsymbol{e}_0\|) + \bar{k}\|\boldsymbol{s}\| + k_{\varphi}.$$
 (13)

其中 $\bar{c} = \max(c_1, c_2).$

$$\dot{V}_b < \|\boldsymbol{e}_0\|(\bar{k}\|\boldsymbol{s}\| + \bar{c}(2 + \|\boldsymbol{e}_0\|) + k_{\varphi}) \leq$$

step 3: 证明跟踪误差有限时间内收敛.

由 step 1 证明可知,存在一个有限时间 T_s,使得滑动变量 s 在有限时间 T_s 内收敛于零,也就是

$$\boldsymbol{s} = \boldsymbol{e}_0 + \boldsymbol{c} \int_0^t \left[\boldsymbol{e}_0 \right]^{\boldsymbol{\alpha}} \mathrm{d}\tau = \boldsymbol{0}. \tag{15}$$

令 $T = \max{T_0, T_s}, 则当t > T$ 时,根据式(15)可得

$$\dot{\boldsymbol{e}}_0 + \boldsymbol{c} \lceil \boldsymbol{e}_0 \rfloor^{\boldsymbol{\alpha}} = \boldsymbol{0}.$$
 (16)

求解式(16)可得^[23] $T = \|e_0\|^{1-\alpha_i}/c_i(1-\alpha_i)$. 其中 $c_i \in c, \alpha_i \in \alpha$. 则跟踪误差 e_0 将在有限时间T内收敛到**0**,即轨迹p将在有限时间内跟踪上参考轨迹 p_r . 证明完毕.

3 仿真与实验分析

为了验证推荐控制方法的优势,本文给出其与传统积分终端滑模控制方法的仿真和实验对比结果,测试中用到的积分终端滑模控制器设计如下:

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \bar{\boldsymbol{J}}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_r + c_1 \lceil x_e \rfloor^{\alpha_1} + b_1 \operatorname{sgn}(s_1) \\ \dot{y}_r + c_2 \lceil y_e \rfloor^{\alpha_2} + b_2 \operatorname{sgn}(s_2) \end{bmatrix}.$$
 (17)

3.1 Simulink 仿真结果分析

移动机器人参考轨迹的初始位姿设定为 ($x_r(0)$, $y_r(0), \theta_r(0)$) = (0,0,0),实际起始位姿为 (x(0), y(0), $\theta(0)$) = (-0.1, -0.1, 0). 当移动机器人运行至15 s时, 施加一个时变扰动 [ρ_1, ρ_2]^T = [-0.1 sin $t, 0.1 \cos t$]^T. 滑模控制器的参数设置为: $c_1 = 0.9, c_2 = 0.9, k_1 = k_2 = 0.001, b_1 = b_2 = 0.1, \alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = 0.7, L = 0.1, \gamma_1 = \gamma_2 = 0.5, 仿真步长设置为0.001 s, 参考轨迹$ 为(<math>t单位: s)

$$x_r(t) = \begin{cases} 0.13t, \ 0 \le t < 10; \\ 1.3, \ 10 \le t < 20; \\ 1.3 - 0.13(t - 20), \ 20 \le t < 30; \\ 0, \ 30 \le t < 40. \end{cases}$$
$$y_r(t) = \begin{cases} 0, \ 0 \le t < 10; \\ 0.13(t - 10), \ 10 \le t < 20; \\ 1.3, \ 20 \le t < 30; \\ 1.3 - 0.13(t - 30), \ 30 \le t < 40. \end{cases}$$
$$(f = \frac{1}{2} \text{ the set } x = \frac{1}$$



2885

出了在推荐控制和传统积分终端滑模控制下移动机 器人的轨迹跟踪结果、跟踪误差、航向角、线速度和 角速度的对比图.图2(e)是滑模观测器对干扰的估计 曲线.由图2(b)可以看出,与传统积分终端滑模控制 相比,施加干扰后,推荐控制方法下的移动机器人具 有更快的收敛速度和更小的跟踪误差,表明所提出的 控制方法具有更好的跟踪性能和更强的抗干扰能力.

3.2 实验结果分析

为了进一步验证所提出控制策略的有效性,在 如图3所示的移动机器人平台上进行了实验验证.机 器人配备2台无刷直流电机、一台车载计算机、2个 1024线光电旋转编码器、1块电池、1个9轴惯性测量 单元. 通过IMU和编码器数据融合得到机器人的位 姿.在计算机上实现了基于C++语言的融合算法.运 动控制器的执行周期为0.02s,采用C++语言编写,运 行在Ubuntu 20.04服务器的主机上,控制过程如下: 首先,上位机通过CAN总线向车载计算机发送请求, 接收机器人的真实姿态信息;然后,通过CAN总线将 运动控制器获取的线速度和角速度等控制命令发送 到车载计算机;接下来,车载计算机将接收到的指令 转换为左右发动机的速度;最后,由车载计算机中的 电机调速控制器负责无刷直流电机的速度跟踪.实 验过程中,机器人跟踪的参考轨迹、实际起始位置、控 制器参数以及在运行15s时施加的时变干扰均与仿 真一致.



图 3 移动机器人实验平台

实验结果如图4所示,图4中(a)和(b)分别给出 了两种控制方法下的轨迹跟踪对比和轨迹跟踪误差 对比曲线,图4中(c)和(d)分别表示移动机器人的航 向角对比以及线速度和角速度曲线,图4(e)是施加的 干扰以及滑模观测器对扰动的估计曲线.从图4(b) 的跟踪误差结果可以看出,推荐控制方法下的移动机 器人在施加干扰后的跟踪误差明显小于积分终端滑 模控制方法下的跟踪误差,表明推荐控制具有更高的 跟踪精度和更强的抗干扰能力.



4 结 论

为了使移动机器人具有更强的抗干扰性和更高的轨迹跟踪精度,本文设计了一种基于滑模观测器的积分终端滑模控制器.首先建立移动机器人 在受到侧滑扰动影响下的运动学模型;然后利用该 模型设计滑模观测器来估计系统扰动;接着基于轨 迹跟踪误差设计了积分终端滑模面;最后结合滑模 面和扰动估计值设计积分终端滑模控制器,并基于 Lyapunov稳定性理论证明了系统稳定性.仿真和实 验结果表明:所设计的控制器具有更高的跟踪精度 和更强的抗干扰性能.下一步将在基于饱和限幅的 滑模控制方法方面展开研究工作.

参考文献(References)

- [1] Dian S Y, Fang H W, Zhao T, et al. Modeling and trajectory tracking control for magnetic wheeled mobile robots based on improved dual-heuristic dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(2): 1470-1482.
- [2] Wang H M, Zhang Y, Chen X L, et al. On the disturbance rejection control of flexible-joint robot: A GPIO-based approach[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(8): 2910-2920.
- [3] 于欣波, 贺威, 薛程谦, 等. 基于扰动观测器的机器人 自适应神经网络跟踪控制研究[J]. 自动化学报, 2019, 45(7): 1307-1324.

(Yu X B, He W, Xue C Q, et al. Disturbance observer-based adaptive neural network tracking control for robots[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(7): 1307-1324.)

- [4] Wang H M, Peng W W, Tan X, et al. Robust output feedback tracking control for flexible-joint robots based on CTSMC technique[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(6): 1982-1986.
- [5] 姜玉涛,刘忠信,陈增强.带扰动的多非完整移动机器 人分布式有限时间一致性控制[J].控制理论与应用, 2019, 36(5): 737-745.
 (Jiang Y T, Liu Z X, Chen Z Q. Distributed finite-time consensus algorithm for multiple nonholonomic mobile robots with disturbances[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(5): 737-745.)
- [6] Song G, Tao G. A partial-state feedback model reference adaptive control scheme[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(1): 44-57.
- [7] Valasek J, Akella M R, Siddarth A, et al. Adaptive dynamic inversion control of linear plants with control position constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(4): 918-933.

- [8] Lai Y C, Le T Q. Adaptive learning-based observer with dynamic inversion for the autonomous flight of an unmanned helicopter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(3): 1803-1814.
- [9] Shen C, Buckham B, Shi Y. Modified C/GMRES algorithm for fast nonlinear model predictive tracking control of AUVs[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(5): 1896-1904.
- [10] Yue M, An C, Li Z J. Constrained adaptive robust trajectory tracking for WIP vehicles using model predictive control and extended state observer[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 48(5): 733-742.
- [11] 高志伟,代学武,郑志达.基于运动控制和频域分析的 移动机器人能耗最优轨迹规划[J].自动化学报,2020, 46(5):934-945.

(Gao Z W, Dai X W, Zheng Z D. Optimal energy consumption trajectory planning for mobile robot based on motion control and frequency domain analysis[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(5): 934-945.)

- [12] Jeong S, Chwa D. Sliding-mode-disturbance-observerbased robust tracking control for omnidirectional mobile robots with kinematic and dynamic uncertainties[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(2): 741-752.
- [13] Nath K, Yesmin A, Nanda A, et al. Event-triggered sliding-mode control of two wheeled mobile robot: An experimental validation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2021, 2(3): 218-226.
- [14] Ren C, Li X H, Yang X B, et al. Extended state observer-based sliding mode control of an omnidirectional mobile robot with friction compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12): 9480-9489.
- [15] Gao Z Y, Guo G. Fixed-time sliding mode formation control of AUVs based on a disturbance observer[J].
 IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(2): 539-545.
- [16] Yang X, Yan J, Hua C C, et al. Trajectory tracking control of autonomous underwater vehicle with unknown parameters and external disturbances[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(2): 1054-1063.
- [17] 杨亮,陈勇,刘治. 基于参数不确定机械臂系统的 自适应轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2485-2490.
 (Yang L, Chen Y, Liu Z. Adaptive trajectory tracking control for manipulator with uncertain dynamics and kinematics[J]. Control and Decision, 2019, 34(11):

2485-2490.)

- [18] Shen H H, Pan Y J, Ahmad U, et al. Pose synchronization of multiple networked manipulators using nonsingular terminal sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(12): 7497-7509.
- [19] 杨俊起,高煜欣,陈滟涛,等.基于干扰观测器的不确定非线性系统终端滑模控制器设计[J]. 控制与决策,2020,35(1):155-160.
 (Yang J Q, Gao Y X, Chen Y T, et al. Disturbance

observer-based terminal sliding mode controller design for uncertain nonlinear systems[J]. Control and Decision, 2020, 35(1): 155-160.)

- [20] Ryu J C, Agrawal S K. Differential flatness-based robust control of mobile robots in the presence of slip[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(4): 463-475.
- [21] Levant A. Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control[J]. International Journal of

Control, 2003, 76(9/10): 924-941.

- [22] Wang H M, Li S H, Lan Q X, et al. Continuous terminal sliding mode control with extended state observer for PMSM speed regulation system[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2017, 39(8): 1195-1204.
- [23] Bhat S P, Bernstein D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751-766.

作者简介

王雪闯(1998-), 男, 硕士生, 从事移动机器人控制系统 设计与应用的研究, E-mail: xuechuangwang@gmail.com;

王会明(1983-), 男, 副教授, 博士, 从事抗干扰控制 理论及其在机电系统中的应用等研究, E-mail: wanghm@ cqupt.edu.cn;

赵振华(1988-), 男, 讲师, 博士, 从事无人系统自主控制、多源干扰估计与抑制理论等研究, E-mail: zzh@nuaa. edu.cn.

下 期 要 目

电力巡检机器人路径规划技术及应用综述 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	旭,	等
移动目标防御综述: 脆弱性分析及新场景应用 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	倩,	等
基于Q学习的多任务多目标粒子群优化算法 ····································	.桂,	等
产品族设计与延迟制造过程决策的主从关联优化 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	军,	等
基于知识引导的自适应动态多模态差分进化算法 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	李,	等
基于多代理辅助多目标进化优化的建筑节能智能设计方法 ····································	勇,	等
基于单网络评判学习的非线性系统鲁棒跟踪控制 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	煜,	等
基于改进近端策略优化算法的草酸钴合成过程优化 ····································	达,	等
基于注意力引导空域图卷积SRU的动态手势识别 ····································	琦,	等
完全在线的双目直接法视觉SLAM算法 ······ 贾嫣	晗,	等
基于自适应遗传学习粒子群算法的多无人机协同任务分配 ····································	银,	等
移动机器人动态避障的调节发育学习 王东	署,	等
基于B-RRT*FND算法的移动机器人路径规划 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	龙,	等
针对动态目标的多无人机协同组合差分进化搜索方法 ····································	翔,	等
随机饱和与测量缺失下非线性系统的分布式状态估计	伟,	等