

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.01.019

非完整移动机械臂的自适应模糊滑模控制研究^{*}

郑耿峰

(福建省特种设备检验研究院, 福建 福州 350008)

摘要:针对四轮二连杆非完整移动机械臂的轨迹跟踪问题,设计了一种结合自适应模糊控制和滑模控制的控制策略。首先建立了系统包含未知动力学模型不确定性和外部扰动的动力学控制模型,然后基于反演技术设计了控制器;采用了模糊控制来逼近系统未知时变总体不确定性,并采用了自适应机制动态优化模糊系统控制参数,进一步采用了指数趋近律滑模控制消除模糊逼近误差的影响。研究表明:该控制器对系统总体不确定性进行了有效补偿,保证了移动机械臂在复杂不确定环境下的良好轨迹跟踪性能。

关键词:轮式移动机械臂;非完整系统;自适应模糊控制;滑模控制;不确定系统

中图分类号:TP242

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)01-0096-07

Adaptive fuzzy sliding mode control for nonholonomic mobile manipulators

ZHENG Geng-feng

(Fujian Special Equipment Inspection and Research Institute, Fuzhou University, Fuzhou 350008, China)

Abstract: Aiming at the trajectory tracking problem of a four-wheel two-link nonholonomic mobile manipulator, a control strategy combining adaptive fuzzy control and sliding mode control was proposed. Firstly, a dynamic control model including uncertainties of unknown dynamic model and external disturbances was established, and then the controller was designed based on the backstepping. Fuzzy control was used to approximate the unknown time-varying global uncertainties of the system, and adaptive mechanism was used to dynamically optimize the control parameters of the fuzzy system. Further, the exponential reaching law sliding mode control was used to eliminate the influence of the fuzzy approximation error. The results indicate that the controller can effectively compensate the overall system uncertainties, and the good trajectory tracking performance of the mobile manipulator in complex uncertain environment is guaranteed.

Key words: wheeled mobile manipulators; nonholonomic systems; adaptive fuzzy control; sliding mode control; uncertain systems

0 引言

移动机械臂通常由移动平台和机械臂构成。对于非完整移动机械臂,其移动平台受非完整约束,所以移动机械臂是非完整系统^[1]。移动机械臂既具有移动平台的机动性,又具有机械臂的操作灵活性,因此其应用前景广阔^[2-3]。

由于系统的高度非线性 and 强耦合性,并且在实际应用中,系统会受到外界干扰及参数不确定的影响,给

系统的控制带来困难。从控制目标的角度,移动机械臂的控制主要可分为轨迹跟踪和点镇定两类。其中,轨迹跟踪最具有实际意义,因而得到了国内外学者的十分关注。文献[4]研究移动机械臂末端与地面接触时的状态镇定,给出了避免翻车的控制策略;文献[5]基于微分平坦方法动态规划运动轨迹,实现了移动机械臂的动力学轨迹跟踪;文献[6]将移动机械臂分解为轮式移动平台和两连杆平面移动机械臂两部分,独立设计轨迹跟踪控制器。

收稿日期:2019-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605093);国家工程部和智能制造综合标准化项目(GXSP20181001);国家科技部质检公益性行业专项项目(201410139);福建省质量技术监督局科技项目(FJQI2018031)

作者简介:郑耿峰(1983-),男,福建泉州人,博士,主要从事特种机器人方面的研究。E-mail:gf.zheng83@qq.com

上述研究仅考虑了系统的理想模型,但在系统受到外界干扰或精度要求较高的场合,其适用性有限。近年来,包含不确定性的移动机械臂系统轨迹跟踪控制问题成为研究热点。文献[7]基于滑模控制,设计了可变性轮式移动机械臂的鲁棒姿态镇定控制器;文献[8]针对存在不确定性和干扰的全向轮式移动机械臂,提出了基于鲁棒神经网络的滑模轨迹跟踪控制器;文献[9]提出了采用一种自适应递归神经网络轨迹控制器,处理未建模的移动机械臂系统;陈杰等^[10]设计了一种结合模糊控制和非奇异终端滑模控制的六轴臂履带式移动机械臂轨迹跟踪控制器;董玉明等^[11]研究了非完整移动机械臂的自适应滑模轨迹跟踪控制,且不需要不确定性的上界信息。

本文针对包含动力学系统不确定性的双独立驱动四轮两连杆移动机械臂,提出一种结合自适应模糊控制和滑模控制的轨迹跟踪控制器。

1 移动机械臂的运动学和动力学模型

典型的移动机械臂由四轮非完整移动平台和二连杆机械臂构成,后两轮采用独立执行器驱动,同侧两轮通过内部连接可同步转动,如图1所示。

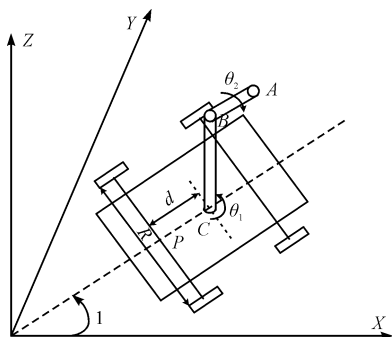


图1 四轮两连杆移动机械臂

根据拉格朗日方程和罗兹动力学方程,并考虑移动平台与连杆之间的耦合关系,可得其运动学和动力学方程^[12]:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \bar{S}\dot{X} \\ M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \Psi + f(q, \dot{q}, t) + \tau_d &= \\ &= B(q)\tau + A(q)^T\lambda \\ q &= [x_c \ y_c \ \varphi \ \theta_1 \ \theta_2]^T \\ X &= [x_A \ y_A \ x_C \ y_C]^T \\ \bar{S} &= S(q)J^{-1}(q) \\ \Psi &= \Delta M(q)\ddot{q} + \Delta V(q, \dot{q})\dot{q} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $J^{-1}(q)$ —雅克比矩阵, $J^{-1}(q) \in R^{4 \times 4}$; $S(q)$ — $A(q)$ 零空间的一组基, $S(q) \in R^{5 \times 4}$; $M(q)$ —对称正定惯性矩阵, $M(q) \in R^{5 \times 5}$; $V(q, \dot{q})$ —离心力

和哥氏力矩阵, $V(q, \dot{q}) \in R^{5 \times 5}$; $G(q)$ —重力矢量, $G(q) \in R^{5 \times 1}$; $\Delta M, \Delta V(q, \dot{q})$ —未知的动力学系统误差模型, $\Delta M \in R^{5 \times 5}$, $\Delta V(q, \dot{q}) \in R^{5 \times 5}$; τ_d —扰动项, $\tau_d \in R^{5 \times 1}$; $f(q, \dot{q}, t)$ —摩擦项, $f(q, \dot{q}, t) \in R^{5 \times 1}$; $B(q)$ —输入转换矩阵, $B(q) \in R^{5 \times 4}$; τ —系统输入力矩矢量, $\tau \in R^{4 \times 1}$; $A(q)^T$ —与约束有关的矩阵, $A(q)^T \in R^{5 \times 1}$; λ —拉格朗日乘子, $\lambda \in R^{1 \times 1}$ 。

为了消除式(2)中的拉格朗日乘子项约束力项,考虑非完整轮式移动机械臂系统的零空间特性,有:

$$A(q)S(q) = 0 \quad (3)$$

对式(1)求导,并代入式(2),再用 $\bar{S}^T(q)$ 左乘式(2),可得到:

$$\bar{M}(q)\ddot{X} + \bar{V}(q, \dot{q})\dot{X} + \bar{M}(q)\bar{F}(q, \dot{q}, t) = \bar{B}(q)\tau \quad (4)$$

其中, $\bar{M}(q) = \bar{S}^T M(q) \bar{S}$, $\bar{B}(q) = \bar{S}^T B(q)$, $\bar{V}(q, \dot{q}) = \bar{S}^T V(q, \dot{q}) \bar{S} + \bar{S}^T(q) M(q) \dot{\bar{S}}(q)$ 。

系统有界的总体不确定性为: $\bar{F}(q, \dot{q}, t) = \bar{M}^{-1}(q)\bar{S}^T[G(q) + \Psi + f(q, \dot{q}, t)]$ 。

式(3)满足如下性质:(1) $\bar{M}(q)$ 为有界对称正定矩阵;(2) $\dot{\bar{M}}(q) - 2\bar{V}(q, \dot{q})$ 为斜对称矩阵。

定义状态空间变量: $x_1 = X, x_2 = \dot{X}$,则式(4)的移动机械臂系统可描述为如下状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \bar{M}^{-1}(q)[\bar{B}(q)\tau - \bar{V}(q, \dot{q})x_2] - \bar{F}(q, \dot{q}, t) \end{cases} \quad (5)$$

2 控制器设计与稳定性分析

本文设计模糊自适应滑模控制器,使得移动机械臂系统可跟踪给定的期望轨迹,消除系统不确定性的影响。

控制器结构图如图2所示。

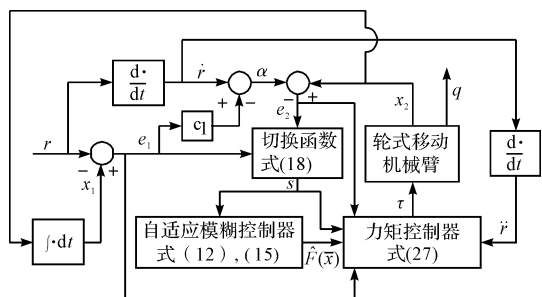


图2 控制器结构图

借助于Lyapunov稳定性分析框架和反演设计方法,本文控制器设计按以下步骤进行。

首先将跟踪误差定义为:

$$e_1 = x_1 - r \quad (6)$$

式中: $\mathbf{r}$ — 给定参考轨迹。

定义虚拟控制量为:

$$\boldsymbol{\alpha} = -\mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1 + \dot{\mathbf{r}} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{c}_1$ — 对角正定常数矩阵, $\mathbf{c}_1 \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 。

定义虚拟误差为:

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \boldsymbol{\alpha} \quad (8)$$

选择正定 Lyapunov 函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2} \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1 \quad (9)$$

对式(9) 求导, 并将式(6 ~ 8) 代入可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \mathbf{e}_1^T \dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{e}_1^T (\mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{r}}) = \\ &\mathbf{e}_1^T (\mathbf{e}_2 - \mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1) = -\mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_2 \end{aligned} \quad (10)$$

显然, 当 $\mathbf{e}_2 = 0$ 时, $V_1 = -\mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1 \leq 0$, 此时系统是全局渐近稳定的, 并且误差 $\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{r}$ 渐近收敛到 0。为了让 $\mathbf{e}_2$ 能收敛到 0, 且消除系统(5) 中不确定性的影响, 需要进行反演设计。

首先引入模糊控制系统, 用来近似和补偿未知的不确定性。系统(5) 中, 总体不确定性 $\bar{\mathbf{F}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ 是一个包含移动机械臂未知动态模型的非线性函数, 本文设计一种模糊系统来逼近 $\bar{\mathbf{F}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ 。

模糊逻辑控制系统是由模糊化、模糊规则库、模糊推理机制和反模糊化 4 部分组成, 其中, 模糊系统的规则用如下 If - then 语句来描述:

规则 j : if $\bar{x}_1$ is μ_1^j and $\dots \bar{x}_n$ is μ_n^j then y is $B^j (j = 1, 2, \dots, N)$ 。

采用乘积推理机、单值模糊器和中心平均解模糊器, 则模糊系统的输出为:

$$F(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_i \prod_{j=1}^n \mu_j^i(\bar{x}_j)}{\sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^n \mu_j^i(\bar{x}_j)} \quad (11)$$

式中: μ_j^i — 系统输入 $\bar{x}_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 的隶属度函数; θ_i — 待设计参数, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

式(11) 可改写为:

$$F(x) = \boldsymbol{\xi}^T \boldsymbol{\theta} \quad (12)$$

其中: $\boldsymbol{\xi} = [\xi_1(\bar{\mathbf{x}}) \quad \xi_2(\bar{\mathbf{x}}) \quad \dots \quad \xi_N(\bar{\mathbf{x}})]^T$, $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_N]^T$ 。

向量 $\boldsymbol{\xi}$ 的第 i 个元素为:

$$\xi_i(\bar{\mathbf{x}}) = \frac{\prod_{j=1}^n \mu_j^i(\bar{x}_j)}{\sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^n \mu_j^i(\bar{x}_j)} \quad (13)$$

定义最优参数为:

$$\boldsymbol{\theta}^* = \operatorname{argmin}[\sup |f^*(x) - F^*|] \quad (14)$$

式中: F^* — 待逼近函数。

定义最小逼近误差为:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\xi}^T(\bar{\mathbf{x}}) \boldsymbol{\theta}^* - F^* \quad (15)$$

本文使用自适应律来确定一个调节机理, 让参数误差绝对值达到最小, 从而减小逼近误差, 即:

$$\dot{\bar{\boldsymbol{\theta}}}_i = \bar{\boldsymbol{\theta}}_i - \bar{\boldsymbol{\theta}}_i^* \quad (16)$$

进一步引入滑模控制, 定义正定 Lyapunov 函数为:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \mathbf{s} + \sum_{i=1}^4 \frac{1}{2} \bar{\boldsymbol{\theta}}_i^T \beta_i^{-1} \bar{\boldsymbol{\theta}}_i \quad (17)$$

式中: β_i — 正的常数; $\mathbf{s}$ — 滑模面。

$\mathbf{s}$ 定义为:

$$\mathbf{s} = \boldsymbol{\lambda} \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 \quad (18)$$

式中: $\boldsymbol{\lambda}$ — 正定常数矩阵, $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 。

对式(18) 求导, 并将式(5) 代入得:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} &= \boldsymbol{\lambda} \dot{\mathbf{e}}_1 + \dot{\mathbf{e}}_2 = \boldsymbol{\lambda} (\mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{r}}) + (\dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\boldsymbol{\alpha}}) = \\ &(\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{c}_1) (\mathbf{e}_2 - \mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1) + \bar{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{q}) [\bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}) \boldsymbol{\tau} - \\ &\bar{\mathbf{V}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{X}}_2] - \bar{\mathbf{F}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) - \ddot{\mathbf{r}} \end{aligned} \quad (19)$$

由性质 1 和性质 2 可知:

$$\mathbf{s}^T \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \mathbf{s} = \mathbf{s}^T \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{s}} \quad (20)$$

$$\mathbf{s}^T [\dot{\bar{\mathbf{M}}}(\mathbf{q}) - 2\bar{\mathbf{V}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})] \mathbf{s} = 0 \quad (21)$$

对式(17) 求导, 并将式(16, 19 ~ 21) 代入可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -\mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_2 + \frac{1}{2} [\mathbf{s}^T \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \mathbf{s} + \mathbf{s}^T \dot{\bar{\mathbf{M}}}(\mathbf{q}) \mathbf{s} + \\ &\mathbf{s}^T \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{s}}] - \sum_{i=1}^4 (\bar{\boldsymbol{\theta}}_i^T \beta_i^{-1} \dot{\bar{\boldsymbol{\theta}}}_{ii}) = -\mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_2 + \\ &\mathbf{s}^T \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{s}^T \bar{\mathbf{V}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{s} - \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\beta_i} \bar{\boldsymbol{\theta}}_i^T \dot{\bar{\boldsymbol{\theta}}}_i = -\mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1 + \\ &\mathbf{s}^T \left[\frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|^2} \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_2 + \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) (\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{c}_1) (\mathbf{e}_2 - \mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1) + \right. \\ &\left. \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}) \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\Theta}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) - \ddot{\mathbf{r}} \right] - \sum_{i=1}^4 (\bar{\boldsymbol{\theta}}_i^T \beta_i^{-1} \dot{\bar{\boldsymbol{\theta}}}_{ii}) \end{aligned} \quad (22)$$

其中:

$$\boldsymbol{\Theta}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = \bar{\mathbf{V}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) (\dot{\mathbf{X}}_2 - \mathbf{s}) - \bar{\mathbf{F}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) \quad (23)$$

将模糊系统逼近项式(15), 并代入式(22) 有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -\mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1 + \mathbf{s}^T \left[\frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|^2} \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_2 + \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) (\boldsymbol{\lambda} + \mathbf{c}_1) (\mathbf{e}_2 - \right. \\ &\left. \mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1) + \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}) \boldsymbol{\tau} - (\mathbf{F}(\bar{\mathbf{x}}) - \boldsymbol{\varepsilon}) - \ddot{\mathbf{r}} \right] - \sum_{i=1}^4 (\bar{\boldsymbol{\theta}}_i^T \beta_i^{-1} \dot{\bar{\boldsymbol{\theta}}}_{ii}) \end{aligned} \quad (24)$$

其中: $\mathbf{F}(\bar{\mathbf{x}}) = [F_1(\bar{\mathbf{x}}) \quad F_2(\bar{\mathbf{x}}) \quad F_3(\bar{\mathbf{x}}) \quad F_4(\bar{\mathbf{x}})]^T$,

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3 \quad \varepsilon_4]^T。$$

假设 1: $|\varepsilon_1| \leq \Omega$, Ω 为正的常数。设计模糊系统参数自适应律如下:

$$\dot{\bar{\boldsymbol{\theta}}}_i = \beta_i \boldsymbol{\xi}_i(\bar{\mathbf{x}}) s_i, i = 1, 2, 3, 4 \quad (25)$$

$$\bar{F}(q, \dot{q}, t) = \begin{bmatrix} 2\dot{x}_A + \dot{y}_A + \sin t \\ \dot{x}_A + 2\dot{y}_A + 2\sin t \\ 2\dot{x}_C + \dot{y}_C + 3\sin t \\ \dot{x}_C + \dot{y}_C + \sin t \end{bmatrix}$$

移动机械臂初始位姿取:

$$q(0) = \left[0.25 \text{ m} \quad -0.1 \text{ m} \quad 0 \text{ rad} \quad \frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad \frac{\pi}{6} \text{ rad} \right]^T。$$

移动机械臂的相关参数设置如表 1 所示。

表 1 移动机械臂结构参数设置

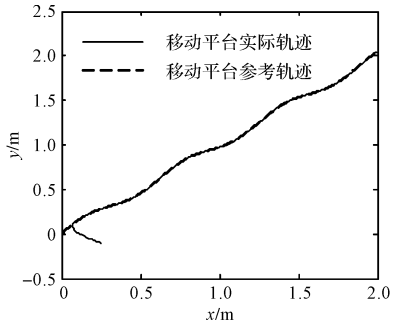
参数含义	参数数值	单位
移动平台质量 m_0	50	kg
连杆 1 质量 m_1	4	kg
连杆 2 质量 m_2	3.5	kg
平台总惯量 J_0	1.417	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
连杆 1 总惯量 J_1	0.03	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
连杆 2 总惯量 J_2	0.036	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
车轮直径 r	0.1	m
轮轴距离 R	0.3	m
质心距离 d	0.2	m
连杆 1 长度 L_1	0.5	m
连杆 2 长度 L_2	0.35	m

模糊自适应滑模控制器参数取: $\lambda = \text{diag}(14, 14, 14, 14)$, $\mathbf{p} = \text{diag}(8, 8, 8, 8)$, $\mathbf{c}_1 = \text{diag}(4, 4, 4, 4)$, $\beta_i = 50$, $k_i = 20$ 。

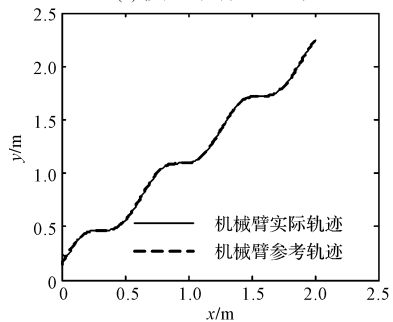
定义模糊系统的输入、输出的模糊集合均为 $\{\text{NB}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PB}\}$, 对应的模糊变量分别为 $\{\text{负大}, \text{负小}, \text{零}, \text{正小}, \text{正大}\}$ 。各模糊集合对应的隶属函数分别为:

$$\mu_j^1(\bar{x}_i) = \exp[-((\bar{x}_i + \pi/6)/(\pi/24))^2], \mu_j^2(\bar{x}_i) = \exp[-((\bar{x}_i + \pi/12)/(\pi/24))^2],$$

$$\mu_j^3(\bar{x}_i) = \exp[-(\bar{x}_i/(\pi/24))^2],$$



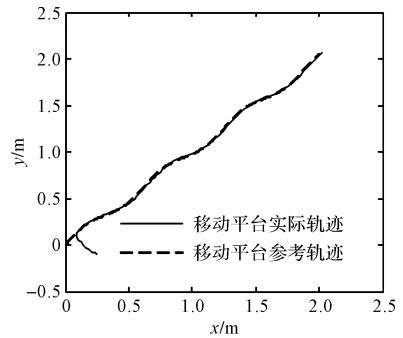
(a) 移动平台轨迹跟踪结果



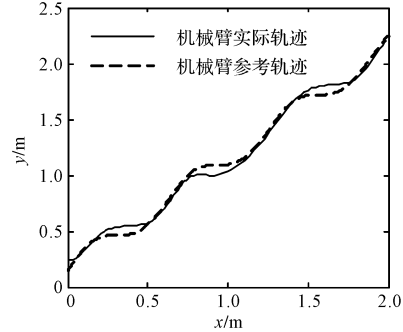
(b) 机械臂轨迹跟踪结果

$\mu_j^4(\bar{x}_i) = \exp[-((\bar{x}_i - \pi/12)/(\pi/24))^2]$,
 $\mu_j^5(\bar{x}_i) = \exp[-((\bar{x}_i - \pi/6)/(\pi/24))^2]$ 。模糊系统采用这 25 条模糊规则逼近不确定非线性函数 $\Theta(q, \dot{q}, t)$ 。

本文首先使用不包含模糊系统的滑模控制器进行轨迹跟踪实验。仅滑模控制器的轨迹跟踪情况如图 4 所示。



(a) 移动平台轨迹跟踪结果

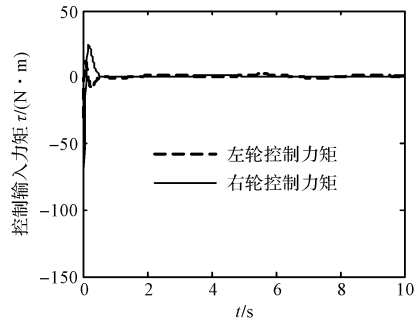


(b) 机械臂轨迹跟踪结果

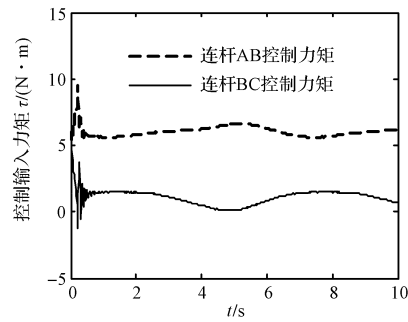
图 4 仅滑模控制器的轨迹跟踪情况

由图 4 知,一般滑模控制器无法完全消除系统不确定性带来的不利影响,因此轨迹跟踪误差较大。

文中控制器轨迹跟踪情况如图 5 所示。



(e) 左右轮控制力矩变化情况



(f) 连杆控制力矩变化情况

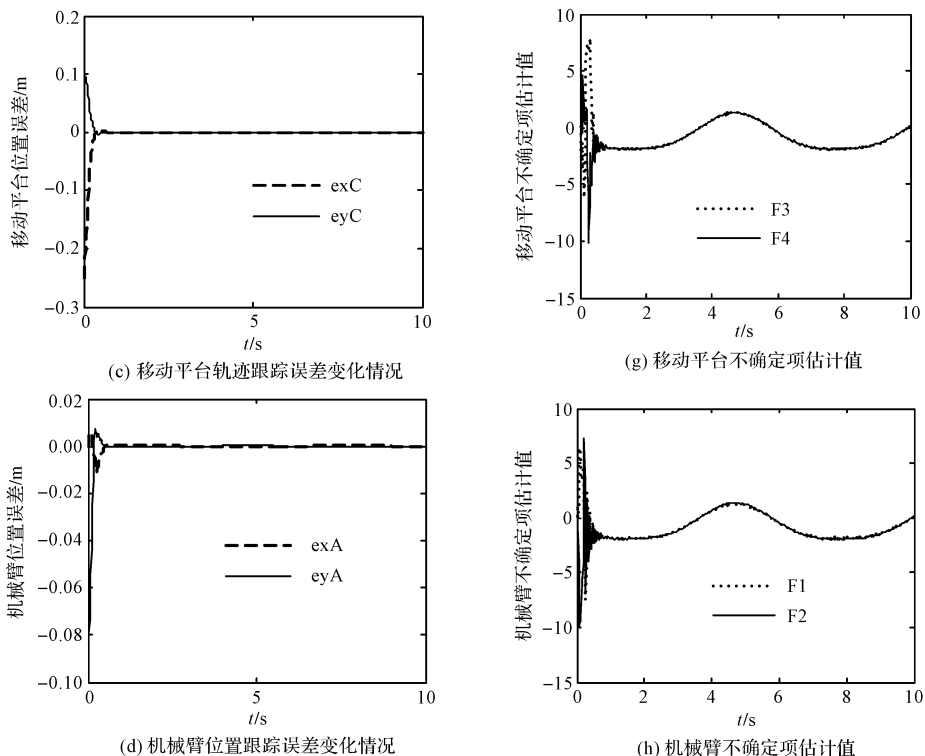


图5 本研究中控制器轨迹跟踪情况

由图5知:控制器取得了较好的控制效果,移动机械臂的姿态跟踪误差较小,且响应速度快,控制输入变化也较为平稳。可见,通过将自适应模糊补偿和滑模鲁棒抑制相结合,可以有效抵御系统复杂时变动力学参数不确定性和外界干扰,提高移动机械臂在复杂环境下的应用能力。

4 结束语

针对由四轮移动平台和二连杆机械臂构成的非完整系统,考虑其动力系统模型不确定性和外界扰动,本文设计了基于反演法且联合滑模控制、自适应模糊控制的复合控制器。该控制器利用自适应模糊控制最优逼近系统未知不确定性,采用滑模控制对逼近误差进行进一步抑制,提高了系统受复杂不确定性影响下的控制性能。

仿真结果表明:与常规鲁棒控制器相比,在存在复杂时变多变量不确定性时,该控制器仍能精确地跟踪参考轨迹,且控制输入平稳、响应速度快、鲁棒性好和适应性强,可以满足复杂场合下移动机械臂的轨迹跟踪应用需求。

参考文献 (References):

[1] JARZEBOWSKA E M. Advanced programmed motion tracking control of nonholonomic mechanical systems[J]. *IEEE*

Transactions on Robotics, 2008, 24(6):1315-1328.

- [2] 任书楠,杨向东,王国磊,等. 大部件喷涂中的移动机械臂站位规划[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2016, 46(6):1995-2002.
- [3] 谢宇坤,吴青聪,陈 柏,等. 基于单目视觉的移动机械臂抓取作业方法研究[J]. *机电工程*, 2019, 36(1):71-76.
- [4] GARCIA C J M, MEDINA R I J, GARCIA C A, et al. Improving the static stability of a mobile manipulator using its end effector in contact with the ground[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2015, 13(10):3228-3234.
- [5] RYU J C, AGRAWAL S K. Planning and control of under-actuated mobile manipulators using differential flatness[J]. *Autonomous Robots*, 2010, 29(1):35-52.
- [6] WHITE G D, BHATT R M, TANG C P, et al. Experimental evaluation of dynamic redundancy resolution in a nonholonomic wheeled mobile manipulator [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, 14(3):349-357.
- [7] FUKUSHIMA H, MURO K, MATSUNO F. Sliding-mode control for transformation to an inverted pendulum mode of a mobile robot with wheel-arms[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(7):4257-4266.
- [8] XU D, ZHAO D, YI J, et al. Trajectory tracking control of omnidirectional wheeled mobile manipulators: robust neural network-based sliding mode approach[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B Cybernetics A Publication of the IEEE Systems Man & Cybernetics Society*, 2009, 39(3):788-799.

- [9] WANG Z P, ZHOU T, MAO Y, et al. Adaptive recurrent neural network control of uncertain constrained nonholonomic mobile manipulators[J]. **International Journal of Systems Science**, 2014, 45(2):133-144.
- [10] 陈 杰,莫 玮.履带式移动机械臂的自适应模糊滑模控制[J]. 吉林大学学报:工学版,2015,45(3):892-898.
- [11] 董玉明,俞 立,朱俊威.基于自适应滑模的移动机械臂跟踪控制[J]. 控制工程,2019,26(1):43-49.
- [12] 吴玉香,胡跃明.轮式移动机械臂的建模与仿真研究[J]. 计算机仿真,2006,23(1):147-151.
- [13] SLOTINE J E, LI W P. Applied nonlinear control[M]. Ney Jersey: Prentice-Hall, 1991.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

郑耿峰.非完整移动机械臂的自适应模糊滑模控制研究[J]. 机电工程,2020,37(1):96-102.

ZHENG Geng-feng. Adaptive fuzzy sliding mode control for nonholonomic mobile manipulators[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(1):96-102.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第 95 页)

- [2] 董 振.基于脉冲流体特性的深孔加工高效排屑及实时监控技术研究[D]. 太原:中北大学机械与动力工程学院,2016.
- [3] 马 腾,沈兴全,高伟佳,等.深孔加工变负压抽屑装置的设计与研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(9):129-131,134.
- [4] 邵振宇,李 哲,张德远,等.钛合金旋转超声辅助钻削的钻削力和切屑研究[J]. 机械工程学报,2017,53(19):66-72.
- [5] 张 园,康仁科,刘津廷,等.超声振动辅助钻削技术综述[J]. 机械工程学报,2017,53(19):33-44.
- [6] 董伟康,关世玺,郭镇豪,等.负压排屑装置楔形结构优化设计与仿真[J]. 中国机械工程,2018(17):1-4.
- [7] 李忠秋,沈兴全,张继明,等.深孔加工多级曲面负压抽屑系统的设计与研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(1):134-136.
- [8] 张继春,李兴虎,杨建国,等.壁面函数对进气歧管 CFD 计算结果的影响[J]. 农业机械学报,2008,39(7):47-51.
- [9] 吕 田,陈晓玲.超疏水性圆管湍流减阻的数值模拟[J]. 上海交通大报,2009,43(8):1280-1283.
- [10] 张兰丁.用分形几何理论研究圆管糙率及其实用意义[J]. 水利学报,2016,47(8):1054-1061.
- [11] JOHN D, ANDERSON J R. 计算流体力学入门[M]. 1 版. 北京:清华大学出版社出版社,2010.
- [12] JOHN D, ANDERSON J R. 计算流体力学入门[M]. 1 版. 北京:清华大学出版社,2010.
- [13] 章梓雄,董曾南.黏性流体力学[M]. 1 版. 北京:清华大学出版社,2011.
- [14] 杨湘隆,黄社华,熊 渊.圆管弯道内部流动数值模拟及湍流模式比较研究[J]. 西安理工大学学报,2010,26(1):116-120.
- [15] 赵平辉,叶桃红,朱旻明,等.圆形射流湍流场的大涡模拟研究[J]. 工程热物理学报,2012,33(3):529-532.
- [16] 赵 磊,张楚华,刘 波.压力修正算法的并行实现方法研究[J]. 工程热物理学报,2012,33(12):2092-2095.
- [17] 陈文创,张 蕊,张文远,等.复杂非对称岔管数值模拟中湍流模型的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,2018(8):752-760.
- [18] 武 瑞,沈兴全,任丽娟,等.一种具有射流孔的 BTA 深孔加工钻头[P]. 中国:2018210658054,2019-04-02.

[编辑:周昱晨]