

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.01.042

柔性多关节移动机器人非线性控制轨迹的二次模糊逼近

牛星星

(商洛职业技术学院 师范教育系, 陕西 商洛 726099)

摘要:针对柔性多关节移动机器人在非线性控制轨迹下控制精度不高的问题,提出一种非线性控制下的模糊逼近方法。建立机器人动力学模型,根据动力学特性设置矢量参数,对误差扰动动态修正。将矢量参数作为初始输入值,采用加权平均和乘积推理法,使得矢量符合自适应规律,通过模糊逼近函数对控制器的输出值实行状态逼近,直至符合初始设定值;凭借李亚普诺夫函数对控制输出值二次实施稳定模糊逼近,完成非线性轨迹控制。以B样条曲线轨迹为例做控制实验,实验数据证明:该二次逼近控制方法在非线性的控制精度较高,控制器输出力矩稳定,实用性能较强。

关键词:柔性多关节;移动机器人;非线性控制;误差扰动;模糊逼近函数;控制器;B样条曲线

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)01-0209-05

Quadratic Fuzzy Approximation of Nonlinear Control Trajectory of Flexible Multi-joint Mobile Robot

NIU Xingxing

(Normal Education Department, Shangluo Vocational And Technical College, Shangluo 726099, China)

Abstract: In order to improve the low control accuracy of flexible multi-joint mobile robot under nonlinear control trajectory, a fuzzy approximation method under nonlinear control is proposed. The dynamic model of the robot is established, and the vector parameters are set according to the dynamic characteristics to dynamically correct the error disturbance. The vector parameters are taken as the initial input value and the weighted average and product reasoning method is adopted to make the vector conform to the adaptive law. The output value of the controller is approximated by the fuzzy approximation function until it conforms to the initial setting value. The control output value is approximated by the Lyapunov function twice to complete the nonlinear trajectory control. Taking the trajectory of B-spline curve as an example, the experimental data show that this quadratic approximation control method has high control accuracy under nonlinear trajectory, stable output torque of the controller and strong practical performance.

Keywords: flexible multi-joint; mobile robot; nonlinear control; error disturbance; fuzzy approximation function; controller; B-spline curve

0 引言

柔性关节机械臂能够高度模拟人体手臂的功能,并可采用位置、电阻和阻抗等多种控制方法,在某些应用领域替代人类操作。但在实际的运行过程中,对非线性轨迹控制存在不确定性因素以及外界干扰,使机器人内部原本的数学轨迹模型受到干扰,容易发生控制误差大的问题。为提高柔性多关节移动机器人在非线性轨迹控制中的适应性和自主控制能力,需要贴合机器人的结构参数,制定精准的非线性控制方案,使机器人在不确定的情况下实现自适应处理,保证安全

和工作质量。

当前的研究大部分集中在线性轨迹控制领域,例如:文献[1]采用迭代学习算法实现控制,通过机器人动力学模型求解线性变化参数,结合机器人控制受限因素对参数优化,并建立自适应控制函数,解决控制问题,但该方法提出的求解函数忽略机器人的动态参数变化影响,导致控制误差较大。文献[2]根据机器人的动力特点,设计动力学控制器,利用流技术改善机器人轨迹点跟踪跳变问题,将动力观测参数与控制器结合完成控制。以上常规方法运用到非线性控制领域时,由于机器人动力变化距离、角度等参数影响较大,

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划项目(20JK0118)

作者简介:牛星星(1987—),女,陕西商洛人,讲师,硕士,研究方向为物流管理、财务管理、信息化、自动化控制, nxx78457@yeah.net。

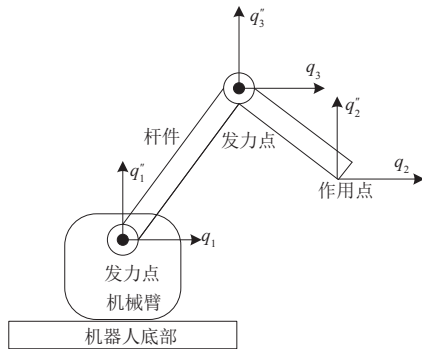
且二者之间存在差异,未分别求解导致控制算法存在误差,稳定性较差。

综上所述,本文提出针对柔性多关节移动机器人非线性控制的二次模糊逼近方法,采用 Lagrange 法构建动力学模型,基于 HJI 理论建立自适应控制器,采用加权平均和乘积推理法使得自适应规律符合矢量参数,使控制算法无限贴近真实的运动规则,采用李亚普诺夫函数对控制函数增加稳定性二次逼近,通过自适应值状态调整,使其符合最佳的稳定输出情况。经实验验证,经过本文控制后的角度变动范围明显较低,稳定性增强,角度变化在 $5^\circ \sim -5^\circ$ 之内,符合初始设定标准。

1 柔性多关节移动机器人动力学模型

为避免在实际运行中,移动机器人受到不确定性因素以及外界干扰,首先对柔性多关节移动机器人动力学模型系统进行分析,为下一步非线性控制提供数据参考,有效降低误差。

采用 Lagrange 法构建动力学模型^[3],机器人的动力学模型如图 1 所示。



多关节机器人的动力学模型表达式为

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\mathbf{q}'' + \mathbf{C}(\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}')\mathbf{q}'' + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}(\mathbf{q}) + \mathbf{X}_n(\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}') = \mathbf{X}_n \quad (1)$$

式中： $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ 表示机器人对称惯性定律^[4]矩阵，

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & \cdots & h_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & \cdots & h_{nn} \end{bmatrix}, h_{na} \text{ 表示惯性参数; } \mathbf{q}, \mathbf{q}' \text{ 分}$$

别表示关节在水平和垂直^[5]方向的位置， $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]$ ， n 表示不为 0 的正整数； $\mathbf{C}(\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}')$ 表示离心力^[5]矩阵； $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 表示重力矩阵； $\mathbf{F}(\mathbf{q})$ 表示动态摩擦^[6]矩阵； $\mathbf{X}_n(\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}')$ 表示环境中存在的误差扰动项。

为保证机器人运动的稳定性和收敛性,动力学方程^[7]需要满足以下结构特性:

$\mathbf{H}(\mathbf{q})$ 属于对称正矩阵规律^[8], 即

$$0 < \lambda_m(\mathbf{H}) \leq \|\mathbf{H}(\mathbf{q})\| \leq \lambda_m(\mathbf{H}) \quad (2)$$

式中 $\lambda_m(\mathbf{H})$ 表示标准对称正矩阵的特征值。

设置一个矢量参数,使机器人的惯性定律矩阵 $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ 、离心力矩阵 $\mathbf{C}(\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}')$ 、重力矩阵 $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 以及动态摩擦矩阵 $\mathbf{F}(\mathbf{q})$ 之间满足线性关系^[9]:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\theta + \mathbf{C}(\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}')\rho + \mathbf{F}(\mathbf{q}) = (\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}' \cdot \rho \cdot \theta^2) \quad (3)$$

式中： θ 表示线性正相关参数； ρ 表示线性负相关参数。

2 柔性多关节移动机器人非线性控制模糊逼近方法

2.1 一次模糊逼近原则下的控制器设计

为确保非线性控制算法在实际环境中的高效应用,避免不确定性因素以及外界干扰,上述过程给出的动力学特征参数为参考基础,基于 HJI 理论建立自适应控制器。Hamilton-Jacobi 不等式理论表述为给定任意一个正数 C , 如果存在一个正定且可微的函数 $F \geq 0$, 则满足鲁棒条件, 控制器设计过程如下。

1) 模糊自适应规则^[10]。将上述过程求得的矢量参数作为初始输入值,采用加权平均和乘积推理法使得自适应规律符合矢量参数,使控制算法无限贴近真实的运动规则,保证机器人的合理运动。在此之上,还通过约束控制器内部参数的权重值^[11],达到控制点和目标点的高度适应环境,提高控制精准度的同时还能为进一步的稳定性约束提供重要帮助,表达式为

$$h(x) = h(x | \boldsymbol{\xi}) = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_i \left(\prod_{l=1}^n \mu_{A_l^i}(x_l) \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{l=1}^n \mu_{A_l^i}(x_l) \right)} = \boldsymbol{\xi}^T \boldsymbol{\xi}(x) \quad (4)$$

式中： $\boldsymbol{\xi}_i$ 为可调节的参数向量； $\boldsymbol{\xi} = [\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^n]$ ； i 表示不为 0 的正整数； $\mu_{A_l^i}$ 表示第 A_l^i 个控制规则的隶属度函数^[12]； x_l 表示第 l 条模糊自适应规则的输出向量值； $\boldsymbol{\xi}^T$ 表示前向函数向量； $\boldsymbol{\xi}(x)$ 表示前向条件函数。该条件函数 $\boldsymbol{\xi}(x)$ 可对自适应规则参数约束,公式为

$$\boldsymbol{\xi}(x) = \sum_{i=1}^n \mu_{A_l^i}(x_l) / \sum_{i=1}^n \left(\prod_{l=1}^n \mu_{A_l^i}(x_l) \right) \quad (5)$$

对于模糊自适应规则中的初始矢量输入值,判定存在 n 个输入时,有 n^2 个数值输出,其中 n^2 可以看作是上述规则的重叠。

为保证控制算法可以有效满足预先设定条件,确保控制器的输出值和期望值^[13]高度相符,采用模糊逼近定理规整控制函数,使得控制输出值不断接近期望值。上述过程说明了模糊逼近定理可以很好地应用在自适应规则中,系统能以任意精度逼近控制数据集上的目标连续函数。因此,可巧妙运用该定理对多关节机器人的判定误差和不确定干扰因素详细辨识。模糊自适应控制设计如式(6)所示模糊系统中的自适应规律, $0 = f(x)$,使模糊系统随着被控对象的变化而变化。

根据上述过程给出的动力学方程(4),采用滑模公式将控制信号设定为

$$\tau = u_0 + u_1 + u_2 \quad (6)$$

当系统达到稳定点时,即 u_0, u_1, u_2 3项控制器输出值存在:

$$u_0 = M_0(w)w_r + C_0(w, w_r)w_r + G_0(w) \quad (7)$$

$$u_1 = -M_0(w)a_e - (w/w_r)M_0(w_r)a_e - C_0(w, w_r) \quad (8)$$

$$u_2 = [-h_1(s_1), -h_2(s_2), \dots, -h_n(s_n)] \quad (9)$$

式中: u_0, u_1, u_2 分别表示控制器中3项非线性控制稳定输出值; M_0 表示控制器的初始质量输出; w, w_r 分别表示初始控制权重和稳定控制后的权重; C_0 表示控制器的初始离心力输出; G_0 表示控制器的初始重力输出; a_e 表示自适应率^[14]; h_n 表示自适应控制器的模糊输出值; s_n 表示自适应的平均参数。

设机器人的标准非线性控制器的输出表达式为

$$h_i(s_i) = r_i s_i \beta(s_i) \quad (10)$$

式中 β 表示自适应系数。

2.2 二次逼近的稳定性优化控制

为保证控制器对多关节机器人非线性轨迹控制的精准性和稳定性,采用李亚普诺夫函数对控制函数增加稳定性二次逼近,通过自适应值状态调整^[15],使其符合最佳的稳定输出情况。

李亚普诺夫稳定性的判定定理为:若存在一个连续性的微正定函数 $V(x)$,那么其导出函数值一定为半负定函数 $V'(x)$,原点则稳定。根据该原理,控制器的稳定性优化表达式为

$$V(y) = \frac{1}{2} y^t y \quad (11)$$

式中: y 和 y^t 分别表示稳定性输入、输出参数。根

据上述过程建立的非线性控制器可知,控制算法的稳定性输出参数 y^t 可以不断逼近期望参数,需要预先对扰动因素识别修正,即

$$|(K^{-1}\epsilon_d)_i - \eta_{nzi} \kappa_i| \leq \varphi_i \quad (12)$$

则

$$\eta_{nzi} \kappa_i \geq |(K^{-1}\epsilon_d)_i| - \varphi_i \quad (13)$$

式中: K^{-1} 表示逼近矩阵中的角元素; ϵ_d 表示控制函数中的第 d 个向量值; η_{nzi} 表示李亚普诺夫系数; κ_i 表示修正系数; φ_i 表示扰动量。

从公式中可以看出, $\varphi_i \leq 0$ 为已知条件,通过不迭代寻优来修正最佳稳定参数。

3 控制方法性能的实验测试

3.1 测试背景

为验证文中提出方法的有效性,以 MOTOMAN GP225 柔性多关节移动机器人作为本次实验对象,以 B 样条曲线轨迹控制为非线性控制测试样例。机器人存在抓取角度误差、抓取距离误差、抓取力大小、关节控制力矩以及路径选择长短等多个测试方面,为保证实验数据的说服力,选择其中最为重要抓取角度误差和关节控制力矩进行测试。机器人的详细物理参数如表 1 所示。

表 1 柔性多关节移动机器人结构详细参数

参数名称	数值
质量/kg	300
距给定分拣物初始距离/m	2.5
距给定分拣物初始角度/(°)	东偏向角 35
路径曲率	0.05
测试关节数量/个	2
机械臂重力/N	500
最大抓取力/N	200

柔性多关节移动机器人结构如图 2 所示。



图 2 柔性多关节移动机器人结构示意图

由图 2 可知,关节 1 和关节 2 位置抓取移动的幅度大小不同,关节 1 位置运动幅度较小,角度

变化也就较小;关节 2 位置幅度较大,角度值同时也就相对大一些。设置分拣物的位置为距机器人 5 m,东南角 5°~ -5°内。

3.2 实验参数设置

为保证实验质量,对测试环境中存在的不确定干扰因素和建模误差,采用高斯扰动函数约束,表达公式为:

$$\begin{cases} \tau_d = [\tau_{d1}, \tau_{d2}, \tau_{d3}]^T \\ \tau_{d1} = a_1 \exp[-(t-c_1)^2/2b_1^2] \\ \tau_{d2} = a_2 \exp[-(t-c_2)^2/2b_2^2] \\ \tau_{d3} = a_3 \exp[-(t-c_3)^2/2b_3^2] \end{cases} \quad (14)$$

式中: τ_{d1} 、 τ_{d2} 、 τ_{d3} 分别表示与噪声干扰量 a_1 、摩擦干扰量 a_2 、磁场信号干扰量 a_3 对应的高斯约束量; c_1 、 c_2 、 c_3 分别表示机器人机械臂的建模误差值; b_1^2 、 b_2^2 、 b_3^2 分别表示干扰方差。

3.3 角度误差控制效果判定

跟踪自适应控制前和控制后的抓取轨迹,通过角度抓取轨迹值来判定文中算法的控制角度误差,抓取轨迹越平稳,代表控制效果越佳。具体实验结果如图 3 所示。

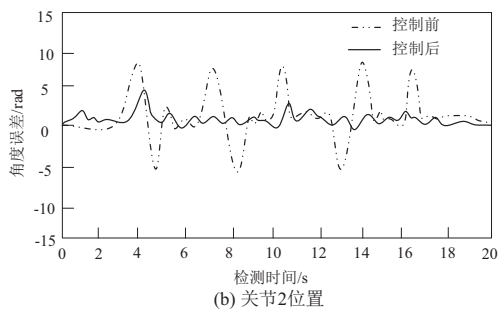
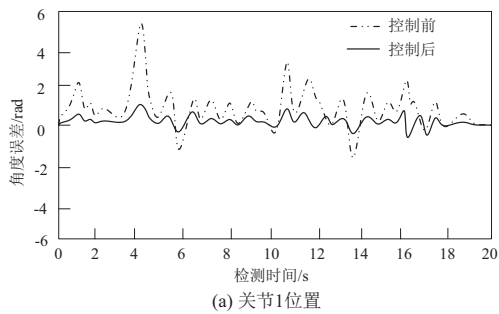


图 3 机器人关节 1 和关节 2 位置跟踪控制判定

从图 3 中可以看出,未自适应控制前,机器人关节 1 和关节 2 位置的角度变化范围都相对较大。这说明控制前机械臂的轨迹变化存在过度扰动现象,稳定性差且鲁棒性低,目标点和预判抓取位置的控制轨迹存在误差,导致控制角没有按照

预先规定路线,影响分拣抓取的精准度。其中,由于关节臂摆动幅度大小的影响,关节 2 的抓取角度误差要明显大于关节 1 的抓取角度误差。而经过本文控制后的角度变动范围明显较低,稳定性增强,整体变化更符合线性变动,角度变化在 5°~ -5°之内,符合初始设定标准。说明经过控制后抓取误差下降,目标点与抓取轨迹吻合度较高,算法鲁棒性强,应用价值较高。

3.4 基于控制器输出力矩的控制结果对比分析

控制器的输出力矩更能展现机器人自适应控制效果,输出力矩越稳定,控制效果越佳,与基于迭代的机器人控制算法、基于模糊干扰观测器的滑模跟踪控制算法对比分析,结果如图 4—图 6 所示。

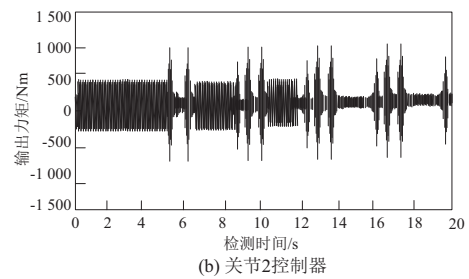
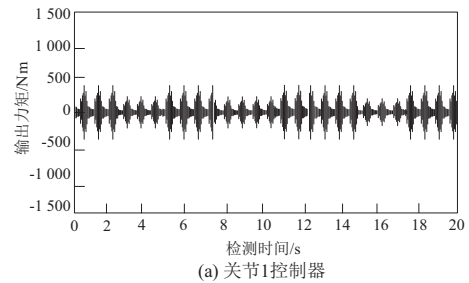


图 4 迭代学习法关节 1 和关节 2 控制器输出力矩

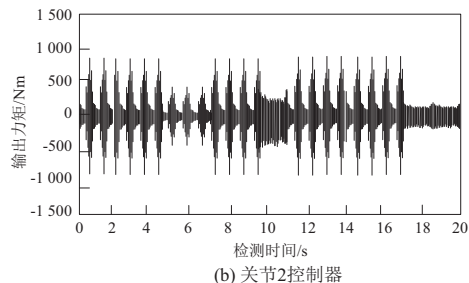
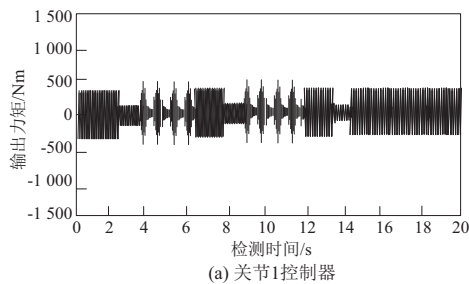


图 5 模糊干扰法关节 1 和关节 2 控制器输出力矩

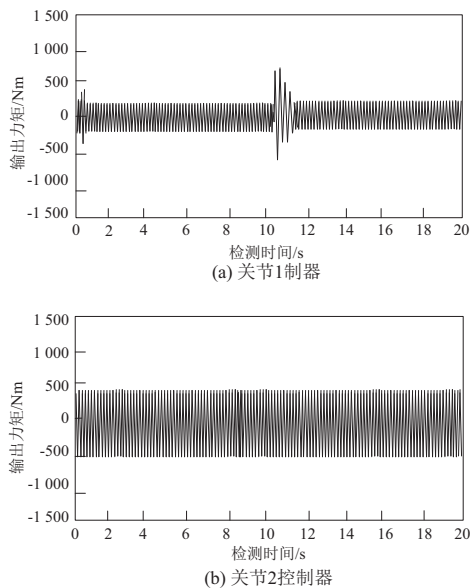


图6 本文方法关节1和关节2控制器输出力矩

从图4—图6中可以看出,3种方法中经过本文方法控制后,机器人的输出力矩最为平稳,不仅消除了因机械臂不稳定导致的力矩抖振现象,还提高了机器人的系统性能。从图6中还可看出,在整个检测时间内,关节2控制器的输出力矩保持稳态收敛现象,关节1也只出现了小部分的不稳定波动。这是因为,对于幅度较小的模量来说,控制算法需要在短时间内精准控制,难度较大,所以,出现小部分的控制难度属于正常现象,对整体影响不大。

反观图4、图5另外两种方法的控制结果,无论是小关节还是大关节都存在大范围的紊乱波动现象,稳定性很差且力矩抖振现象严重。说明二者没有实现精准有效的控制,同时也反映出机器人可能出现非线性控制量与实际量不匹配或是控制点查找错误等现象。整体控制效果较差,会使机器人出现错误抓取和二次抓取现象,耗用较高,效率较低,实际应用效果欠佳。

4 结语

本文针对柔性多关节移动机器人动力特征变动较大及环境干扰量较多的问题,提出一种二次逼近算法实现有效控制。非线性轨迹控制是机器人系统中的难题,本文方法针对不确定性因素具有较好的鲁棒性,通过自适应规律和线性动力学模态特征捕捉,提高控制算法与实际控制参数之间的关联性,确保数据间的高度统一,提高精准度。本文充分利用二次逼近函数的优点并结合稳

态的矢量函数在最大程度上保证控制的精准度和稳定性。经过本文方法控制后,机器人的输出力矩最为平稳,不仅消除了因机械臂不稳定导致的力矩抖振现象,还提高了机器人的系统性能。实验数据也进一步证明了本文方法的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 席万强,宋莹,宋长坡,等. 基于迭代学习的机器人自适应滑模控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(9):111-116.
- [2] 郭文东,魏莹,李振阳,等. 基于模糊干扰观测器的移动机器人自适应滑模跟踪控制[J]. 科学技术与工程, 2021,21(36):15529-15536.
- [3] 胡国喜,王超,刘宇珩. 基于改进光滑滑模阻抗控制的水果分拣机器人夹持机构控制方法[J]. 食品与机械, 2021,37(2):130-134.
- [4] 付晓东,陈力. 基于WNN的全弹性空间机器人自适应非奇异快速终端滑模控制算法[J]. 中国惯性技术学报, 2021,29(5):672-679.
- [5] 江浩斌,冯张棋,洪阳珂,等. 应用于车辆纵向控制的无模型自适应滑模预测控制方法[J]. 汽车工程, 2022,44(3):319-329.
- [6] 杨明博,周紫阳. 基于滑模自适应控制的双关节机械手轨迹跟踪[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(6):81-84.
- [7] 蒋一辰,陈刚. 融合自适应曲线预瞄的驾驶机器人转向操纵粒子群优化滑模控制[J]. 西安交通大学学报, 2021,55(3):175-185.
- [8] 姜尚,田福庆,孙世岩,等. 多约束导引控制一体化的自适应鲁棒滑模设计方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020,52(12):74-83.
- [9] 刘冠喜,张永顺. 基于HJI理论的双半球胶囊机器人姿态非线性控制方法[J]. 机电工程技术, 2021, 50(11):26-29,90.
- [10] 陈刚,张介,李旭,等. 无人驾驶机器人机械腿非线性模糊自适应反演滑模控制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020,50(3):570-579.
- [11] 单杰,关丙火. 井下履带式探测机器人及其运动抗扰控制研究[J]. 工矿自动化, 2022,48(2):100-106,146.
- [12] 魏惠芳,王丽梅. 永磁直线同步电机自适应模糊神经网络时变滑模控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4):861-869.
- [13] 梁进榜,赵涛. 基于量子粒子群的斜坡上两轮移动机器人的广义二型模糊控制[J]. 计算机应用与软件, 2022,39(3):31-39,74.
- [14] 占红武,厉晟,胥芳. 非完整移动机器人路径跟踪的快速非线性模型预测控制方法[J]. 高技术通讯, 2021,31(4):405-416.
- [15] 杨超,张铭钧,吴珍臻,等. 作业型水下机器人纵、横倾姿态自适应区域控制方法[J]. 机器人, 2021, 43(2):224-233.

收稿日期:2022-08-01