

1-2-2019

## Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller with Predictive Control for Redundant Manipulators with Variable Payload

He Jun

*1.School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China,Hefei 230026, China; ;2.Institute of Advanced Manufacturing Technology, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China;*

Minzhou Luo

*2.Institute of Advanced Manufacturing Technology, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China;*

Jianghai Zhao

*2.Institute of Advanced Manufacturing Technology, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China;*

Linsen Xu

*2.Institute of Advanced Manufacturing Technology, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller with Predictive Control for Redundant Manipulators with Variable Payload

## Abstract

**Abstract:** This paper presents an adaptive fuzzy sliding mode controller with Kalman predictive control (AFSMCK) for the redundant robotic manipulator handling a variable payload to achieve a precise trajectory tracking in the task space. This approach could be applied to solve the problems caused by the variable payload and model uncertainties. *A Kalman predictive controller using the recursive algorithm is presented for an accurate prediction of a variable payload. The adaptive fuzzy logic algorithm is designed to approximate the parameters of the sliding mode controller to avoid chattering in real time.* Lyapunov theory is applied to guarantee the stability of the proposed closed-loop robotic system. The effectiveness of the proposed control approach and theoretical discussion are proved by comparative simulation on a seven-link robot.

## Keywords

robot control, fuzzy logic, adaptive control, redundant manipulators, Kalman predictive control

## Authors

He Jun, Minzhou Luo, Jianghai Zhao, Linsen Xu, and Li Tao

## Recommended Citation

He Jun, Luo Minzhou, Zhao Jianghai, Xu Linsen, Li Tao. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller with Predictive Control for Redundant Manipulators with Variable Payload[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 994-1001.

# 冗余度机器人变负载预测模糊自适应滑模控制

贺军<sup>1</sup>, 骆敏舟<sup>2</sup>, 赵江海<sup>2</sup>, 徐林森<sup>2</sup>, 李涛<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽 合肥 230026; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院先进制造技术研究所, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 提出了基于变负载卡尔曼预测模糊自适应滑模控制算法(AFSMCK), 该算法可实现冗余度机器人在变负载情况下的精确控制。该方法有效的解决了机器人因模型不确定以及末端变负载对机器人系统的影响, 实现机器人的稳定控制。设计出一个基于迭代算法的卡尔曼预测控制器可精确预测变负载的大小。采用自适应模糊逻辑算法, 逼近滑模控制器中的切换增益, 消除滑模控制的抖动问题。根据李亚普洛夫理论设计了滑模控制律和自适应控制律, 进一步保证了闭环系统的稳定性。提出的理论和控制方法通过仿真实验进一步得到了验证。

**关键词:** 机器人控制; 模糊逻辑; 自适应控制; 冗余度机器人; 卡尔曼预测控制

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 03-0994-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803028

## Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller with Predictive Control for Redundant Manipulators with Variable Payload

He Jun<sup>1,2</sup>, Luo Minzhou<sup>2</sup>, Zhao Jianghai<sup>2</sup>, Xu Linsen<sup>2</sup>, Li Tao<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** This paper presents an adaptive fuzzy sliding mode controller with Kalman predictive control (AFSMCK) for the redundant robotic manipulator handling a variable payload to achieve a precise trajectory tracking in the task space. This approach could be applied to solve the problems caused by the variable payload and model uncertainties. A Kalman predictive controller using the recursive algorithm is presented for an accurate prediction of a variable payload. The adaptive fuzzy logic algorithm is designed to approximate the parameters of the sliding mode controller to avoid chattering in real time. Lyapunov theory is applied to guarantee the stability of the proposed closed-loop robotic system. The effectiveness of the proposed control approach and theoretical discussion are proved by comparative simulation on a seven-link robot.

**Keywords:** robot control; fuzzy logic; adaptive control; redundant manipulators; Kalman predictive control

## 引言

冗余度机器人是指机器人末端在任务空间

自由度大于它的独立坐标数, 冗余度机器人的自由运动特性和非冗余度机器人相比, 拥有得良好的可靠性和灵活性<sup>[1-4]</sup>。然而其高非线性和强耦合等特点在动力学系统中面临着诸多不确定性因素。鲁棒性控制器被大量用来解决冗余度机器人的非线性和耦合问题<sup>[1,5]</sup>。Zergerogl 等<sup>[5]</sup>设计了一个非线性控制器实现了冗余度机械臂的连杆位置和任务空间的精确跟踪。Tatlcioglu 等<sup>[6]</sup>设计了一个线性化



收稿日期: 2016-02-25 修回日期: 2016-04-08;  
基金项目: 国家自然科学基金(51405469), 国家科技支撑计划(2015BAK06B02), 江苏省科技支撑计划(BE2013003);

作者简介: 贺军(1986-), 男, 陕西, 博士生, 研究方向为双臂机器人及嵌入式系统; 骆敏舟(1973-), 男, 安徽, 博士, 博导, 研究员, 研究方向为机电一体化等。

<http://www.china-simulation.com>

• 994 •

反馈自适应控制器提高了冗余度机器人轨迹跟踪和系统稳定性。

滑膜控制器(SMC)具有强鲁棒性以及快速相应等特点,是一种理想的工具被来处理非线性系统的不确定性<sup>[7]</sup>,离散的非线性<sup>[8]</sup>,以及混合系统的耦合性<sup>[9]</sup>。然而滑膜控制过程分为连续部分和非连续部分,非连续部分使的滑膜控制过程中会发生抖动。文献[10-11]为了处理这个问题,对边界层进行限制可以减小滑膜表面的抖动问题,但控制器的跟踪精度将会降低<sup>[12]</sup>。但是在时变系统中参数和扰动上界通常是未知的,因此为了保证系统的稳定性,切换增益将需要足够大。近期的研究成果表明自适应模糊逻辑控制器被用来逼近任意精度的函数并且有效的降低了系统的抖动<sup>[13-14]</sup>。

在机器人实际应用中,扰动观测器可以实时估算末端负载的变化并且可取得良好的效果<sup>[14]</sup>。其缺点是只能观测缓慢的力的变化。另一方法是通常在机器人的末端安装腕关节装力/力矩传感器,力传感器实时检测负载的变化,为机器人实时控制提供可靠的数据。相对于基于观测器估计力的变化,传感器测量值有一定的延时。卡尔曼滤波器是递归滤波器,是一种状态序列估计算法,利用系统以前的状态序列对下一个状态作最优估计,在机器人控制中得到了广泛应用。

本文提出了基于冗余度机器人变负载预测模糊自适应滑模控制器(AFSMCK),滑膜控制用于非线性系统的非模型控制,自适应模糊逻辑可实时更新滑膜切换增益。腕关节力传感器测量负载的变化,通过卡尔曼滤波器可以预测负载的变化,把该预测值作为滑模控制器的输入参数可提高控制精度。本文提出了一种新的控制器可有效解决因变负载以及机器人动力学模型不确定性对机器人系统控制精度影响和稳定性影响的问题。最后该算法的有效性通过仿真实验的到验证。

## 1 冗余度机器人系统模型

机器人运动学可以表示如下

$$x(t) = \phi(q) \quad (1)$$

$x(t) \in \mathbb{R}^6$ ,  $q(t) \in \mathbb{R}^7$  分别是笛卡尔坐标系下的机器人末端位置,关节空间中各个关节位置。

$\phi(q) \in \mathbb{R}^6$  为正向运动学函数,式(1)对时间求导,得到机器人末端的线速度及角速度向量

$$\dot{x}(t) = J(q)\dot{q} \quad (2)$$

式中  $J(q) = \frac{\partial \phi(q)}{\partial q} \in \mathbb{R}^{6 \times 7}$  是雅可比矩阵,式(2)

对时间求导,得到机器人末端加速度向量

$$\ddot{x}(t) = \dot{J}(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q} \quad (3)$$

由式(1)~(3),关节空间速度和加速度可以得到。

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} + (I - J^+ J)v \quad (4)$$

$$\ddot{q} = J^+ \ddot{x}_a + (I - J^+ J)v \quad (5)$$

$J^+ = J(JJ^T)^{-1} \in \mathbb{R}^{6 \times 7}$  为雅可比矩阵  $J(q)$  的伪逆矩阵,其中  $\ddot{x}_a = \ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q} \in \mathbb{R}^6$ , 向量  $v \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  为任意向量。

机器人关节空间动力学模型可表示如下

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - J^T f(t) \quad (6)$$

式中:  $\ddot{q}\dot{q}q \in \mathbb{R}^7$  分别为关节加速度,速度,位置,  $M(q) \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$  正定质量惯性矩;  $C(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathbb{R}^7$  科氏力和向心力矩;  $G(q) \in \mathbb{R}^7$  重力矩;  $\tau \in \mathbb{R}^7$  关节输入扭矩;  $f(t) \in \mathbb{R}^6$  外力负载。  $M(q)$  为有界的对称正定矩阵。  $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$  为斜对称矩阵[13], 并且有  $x^T [\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})]x = 0$ , 其中  $x$  是  $n \times 1$  非零向量。  $G(q)$  是关于  $q$  的有界函数。  $M(q)$ ,  $C(q, \dot{q})$ , 和  $G(q)$  可以分别简写为  $M$ ,  $C$ ,  $G$ 。并且动力学模型只有部分已知。这样可以定义  $M = \hat{M} + \Delta M$ ,  $C = \hat{C} + \Delta C$ ,  $G = \hat{G} + \Delta G$ , 符号( $\cdot$ )表示变量( $\cdot$ )中的已知部分,符号( $\Delta$ )表示变量的不确定部分。

动力学的外部变力和不确定项可表示为

$$f_e = J^T f(t) \quad (7)$$

$$\tilde{f}_i = \Delta M\ddot{q} + \Delta C\dot{q} + \Delta G \quad (8)$$

结合式(8)到式(6)中

$$\hat{M}\ddot{q} + \hat{C}\dot{q} + \hat{G} + \tilde{f}_i = \tau - f_e \quad (9)$$

式中:  $\tilde{f}_i, f_e \in \mathbb{R}^6$  为动力学不确定项和外部变力。

## 2 机械臂末端变力卡尔曼预测

由于力传感器以及数据采集卡对力信息处理

具有一定的延时性,使得系统响应具有滞后性。所以有必要对变力信息进行预测,弥补数据延时性。卡尔曼滤波器能够通过一系列的状态预测出下一状态。引入一个离散状态方程对其进行描述

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + Q_{k-1} \\ y_k = Hx_k + R_k \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $k$  为第  $k$  个时刻;  $x_k$  为系统状态;  $u_{k-1}$  为系统输入;  $y_k$  为测量值;  $Q_{k-1}$ ,  $R_k$  为测量噪声和系统状态噪声;  $H$  为观测矩阵。卡尔曼滤波器以最小化预测值与实际值之差为目标,通过最小二乘法来实现优化其系统方程与测量方程更新如下

$$\begin{cases} K_k = P_k^p H^T (HP_k^p H^T + Q_{k-1}) \\ \hat{x}_k = \hat{x}_k^p + K_k (y_k - H\hat{x}_{k-1}) \\ P_k = (I - K_k H) P_k^p \\ \hat{x}_k^p = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \\ P_k^p = AP_{k-1}A^T + Q_{k-1} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $K_k$  是卡尔曼增益矩阵;  $I$  单位矩阵;  $\hat{x}_k^p$  为预测的  $k$  时刻的状态;  $\hat{x}_{k-1}$  为  $k-1$  时刻的状态;  $P_k^p$  为预测  $k$  时刻的协方差;  $p_{k-1}$  为  $k-1$  的时刻协方差。

文中  $u_{k-1}=[0; 1]$ ;  $A=\begin{bmatrix} 1 & 0.05 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ;  $H=[1; 0]$ ;

$B=[0.0005; 0.05]$ ;  $I=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

### 3 冗余度机器人的滑模控制

机器人控制系统框图如图 1 所示,该控制框图由滑模控制器,自适应模糊逻辑系统,以及预测控

制构成。传感器检测到的外力信号通过卡尔曼实时预测之后输入到滑模控制器中,自适应模糊逻辑被用来实时更新滑模控制的切换增益。控制目标是驱动机器人末端到达想要的位置并且使机器人的运动过程中更加稳定。

定义滑模面

$$s = \dot{e} + ce \quad (12)$$

此式中  $c = \text{diag} \{ \varsigma_1, \varsigma_2, \varsigma_3, \varsigma_4, \varsigma_5, \varsigma_6, \varsigma_7 \}$   $\varsigma_i$  是正常数。式(12)对时间求导

$$\dot{s} = \ddot{e} + c\dot{e} \quad (13)$$

定义机械臂的参考状态如下

$$\begin{cases} \dot{q}_r = \dot{q} - s = \dot{q}_d - ce \\ \ddot{q}_r = \ddot{q} - \dot{s} = \ddot{q}_d - c\dot{e} \end{cases} \quad (14)$$

根据式(6)结合式(7), (12)~(14) 得到

$$M(q)\dot{s} + f_e + C(q, \dot{q})(\dot{q}_r + s) + G(q) + M(q)\ddot{q}_r = \tau \quad (15)$$

同理根据式(15)结合  $M = \hat{M} + \Delta M$ ,  $C = \hat{C} + \Delta C$ ,

$G = \hat{G} + \Delta G$  以及式(7)(14)得到

$$M(q)\dot{s} = \tau - \hat{M}\ddot{q}_r - \hat{C}\dot{q}_r - \hat{G} - f_i - f_e - \frac{1}{2}\dot{M}s \quad (16)$$

李亚普洛夫函数取为

$$V_1 = \frac{1}{2}s^T Ms \quad (17)$$

式(17)对时间求导 可得

$$\dot{V}_1 = s^T Ms + \frac{1}{2}s^T \dot{M}s \quad (18)$$

结合式(16)(18), 可得

$$\dot{V}_1 = s^T (\tau - \hat{M}\ddot{q}_r - \hat{C}\dot{q}_r - \hat{G} - f_e - f_i) \quad (19)$$

根据式(19), 滑模控制器的控制律定义如下

$$\tau = \hat{M}\ddot{q}_r + \hat{C}\dot{q}_r + \hat{G} + f_e - \gamma_i \text{sgn}(s_i) \quad (20)$$

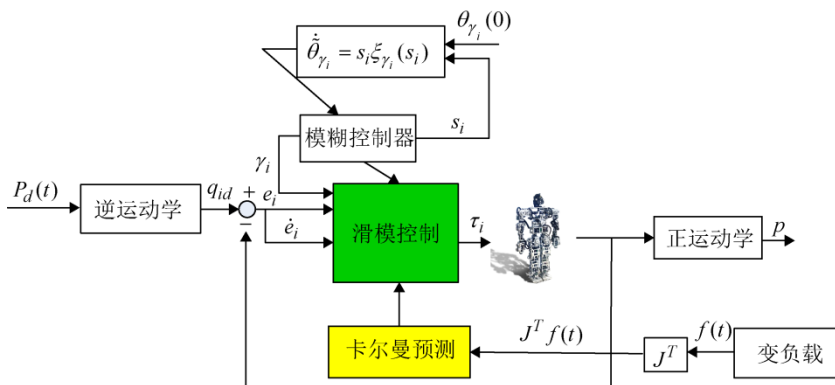


图 1 冗余度机器人控制框图

Fig. 1 The control block diagram of redundant manipulator

在滑模控制中, 滑模控制过程可以分为两个过程, 一个是接近滑模面, 另一个是滑动状态。滑模控制的切换频率限制了接近状态到达滑模面的时间。 $\gamma_i$  是滑模控制的斜坡面。如果斜坡面很大, 系统将会更加稳定但是系统到达平衡点的时间将会很长。当斜坡面很小, 系统可以快速的到达平衡点, 但是系统稳定性很差。因此利用模糊逻辑特点, 可以在线更新切换增益消除滑模系统的抖动。

### 3.1 自适应控制律设计

自适应控制被用来确定模糊系统的随机部分(向量  $\theta_{\gamma_i}^T$ ) 并且自适应控制被用来逼近切换增益和消除滑模控制的抖动。Lyapunov 函被用来设置自适应控制率从而保证系统的稳定性。结合式(9)、(14)、(18), 可得到

$$\dot{M}s = -\hat{C}s + \tilde{f}_i - \gamma_i \operatorname{sgn}(s_i) \quad (21)$$

定义机械臂的参考状态

$$\tilde{\theta}_{\gamma_i} = \theta_{\gamma_i} - \hat{\theta}_{\gamma_i} \quad (22)$$

式中:  $\hat{\theta}_{\gamma_i}$  是对  $\theta_{\gamma_i}$  的估计值,  $\tilde{\theta}_{\gamma_i}$  为估计误差且结合式(22)可得到

$$\gamma_i(s_i, \theta) = \theta_{\gamma_i}^T \xi_{\gamma_i}(s_i) = \tilde{\theta}_{\gamma_i}^T \xi_{\gamma_i}(s_i) + \hat{\theta}_{\gamma_i}^T \xi_{\gamma_i}(s_i) \quad (23)$$

设计一个模糊控制器  $\hat{\gamma}_i(s_i, \theta)$  估计滑膜控制的切换增益  $\gamma_i(t)$

$$\hat{\gamma}_i(s_i, \theta) = \hat{\theta}_{\gamma_i}^T \xi_{\gamma_i}(s_i) \quad (24)$$

定义 Lyapunov 函数

$$V_2 = \frac{1}{2} s^T M s + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^7 \tilde{\theta}_{\gamma_i}^T \tilde{\theta}_{\gamma_i} \quad (25)$$

式(25)对时间求导, 并且结合式(21)可得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= s^T [Ds + Cs]s + \sum_{i=1}^7 \tilde{\theta}_{\gamma_i}^T \dot{\tilde{\theta}}_{\gamma_i} \\ &= \sum_{i=1}^7 s_i [\tilde{f}_i - \hat{\gamma}_i \operatorname{sgn}(s_i)] + \\ &\quad \sum_{i=1}^7 \tilde{\theta}_{\gamma_i}^T (\dot{\tilde{\theta}}_{\gamma_i} - |s_i| \xi_{\gamma_i}(s_i)) \end{aligned} \quad (26)$$

为了使不等式  $\dot{V}_2 \leq 0$ , 自适应率被设置为

$$\dot{\tilde{\theta}}_{\gamma_i} = |s_i| \xi_{\gamma_i}(s_i) \quad (27)$$

结合式(26)、(27), 可得

$$\dot{V}_2 = \sum_{i=1}^7 s_i [\tilde{f}_i - \hat{\gamma}_i \operatorname{sgn}(s_i)] \quad (28)$$

$$\dot{V}_2 = \sum_{i=1}^7 s_i \tilde{f}_i - \hat{\gamma}_i |s_i| \leq \sum_{i=1}^7 (s_i \tilde{f}_i - \hat{\gamma}_i s_i)$$

为了保证  $\dot{V}_2 \leq 0$ ,  $\hat{\gamma}_i s_i$  应该大于零, 且当  $|s_i|$  的值很大时,  $|\hat{\gamma}_i|$  的值应该足够大保证  $\dot{V}_2 \leq 0$ 。同理当  $|s_i|$  很小时,  $|\hat{\gamma}_i|$  的值应该足够的小。由于  $V_2(0)$  有界, 且  $V_2(t)$  是非曾有界函数, 因此  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \sum_{i=1}^7 |s_i|$  是有界的。根据 Barbalat 引理,  $s_i(t)$  和  $\tilde{\theta}_{\gamma_i}^T$  将会渐进收敛到零。

### 3.2 模糊逻辑系统

根据式(28)分析, 模糊系统的模糊规则可以设置如下, 模糊逻辑由一个输入( $s_i$ ) 和一个( $\gamma_i$ )。模糊系统如表 1 所示。

表 1 模糊逻辑规则  
Tab. 1 Fuzzy logic rules

$s_i$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$\gamma_i$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB

Rule  $i$ : IF  $s_i$  is  $A_i^m$ , THEN  $\gamma_i$  is  $B_i^m$

其中  $i=1, 2, \dots, 7$   $s_i$  和  $\gamma_i$  分别为输入和输出的变量。 $m$  表示规则数量。 $A_i^m$  和  $B_i^m$  都被定义为高斯隶属函数。

$$\mu_A(s_i) = \text{gaussian}(s_i, \alpha, \sigma) = \exp \left[ - \left( \frac{s_i - \alpha}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (29)$$

式中:  $\alpha$  为隶属函数的中心点;  $\sigma$  是隶属函数的宽度, 其中 NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB 为 7 个模糊集, 分别表示负大, 负中, 负小, 0, 正小, 正中, 正大。

模糊函数的输出为:

$$\gamma_i = \theta_{\gamma_i}^T \xi_{\gamma_i}(s_i) \quad (30)$$

式中  $\theta_{\gamma_i}^m = [\theta_{\gamma_i}^1, \theta_{\gamma_i}^2, \dots, \theta_{\gamma_i}^7]$  更新参数  $\xi_{\gamma_i}(s_i) = [\phi_{\gamma_i}^1(s_i), \phi_{\gamma_i}^2(s_i), \dots, \phi_{\gamma_i}^7(s_i)]^T$  为参数向量的权重。

$$\phi_{\gamma_i}^m(s_i) = \frac{\prod_{i=1}^7 \mu_{A_i^m}(x_i^*)}{\sum_{i=1}^7 \prod_{i=1}^7 \mu_{A_i^m}(x_i^*)} \quad (31)$$

## 4 闭环系统稳定性分析

Lyapunov 函数如下

$$V = V_1 + V_2 \quad (32)$$

式中  $V$  由滑模控制, 自适应控制构成。式(32)对时间求导

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \quad (33)$$

根据式(26),  $\dot{V}_2 \leq 0$ , 结合式(19)和式(20)得到

$$\dot{V}_1 = s^T (\hat{f}_e - f_e - \gamma_i \operatorname{sgn}(s_i)) = s^T (\tilde{f}_e - \gamma_i \operatorname{sgn}(s_i)) \quad (34)$$

假定估计误差是有界的, 切换增益可设计如下

$$\gamma_i \geq |\tilde{f}_e|_{bound} \quad (35)$$

结合式(34) (35), 可得

$$\dot{V}_1 \leq |s^T| |\tilde{f}_e| - \gamma_i |s^T| \leq -|s^T| (\gamma_i - |\tilde{f}_e|) \leq 0 \quad (36)$$

由于  $\dot{V} \leq 0$ , 根据李亚普洛夫函数, 系统是稳定的。滑模控制系统, 自适应控制系统分别是稳定系统, 所以整个机器人闭环系统是稳定的。

### 5 仿真实验

如图 2 所示该机器人本体为 7 自由度串联机械臂, 每个关节均为旋转关节。在传统 6 自由度串联机械臂的基础上增加了 1 个冗余自由度, 增强了单臂和双臂系统的功能, 灵活性和可靠性。仿真实验在 matlab2014 机器人工具箱中进行, 验证在冗余机械臂末端具有变负载干扰的情况下, 利用本文提出的控制策略提高机器人末端的跟踪精度和保证系统稳定性。在仿真实验中机器人的采样平率设置为 0.005 s。表 1, 表 2 分别冗余度机械臂的运动学参数和动力学参数。各个关节的传动比为  $i_1=100$ ,  $i_2=100$ ,  $i_3=100$ ,  $i_4=100$ ,  $i_5=160$ ,  $i_6=160$ ,  $i_7=160$ 。

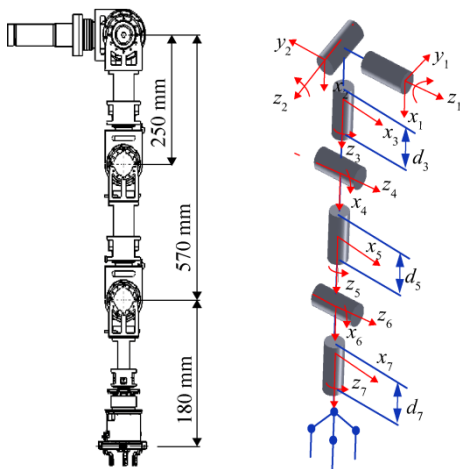


图 2 机器人 CAD 模型及 D-H 模型  
Fig. 2 The CAD mode and D-H mode of the manipulator

表 2 7 自由度机械臂 D-H 参数

Tab. 2 7-DOF manipulator D-H parameters

Link[#]	d[m]	a[m]	Alpha(rad)[θ]
L1	0	0	$-\pi/2$
L2	0	0	$-\pi/2$
L3	0.25	0	$-\pi/2$
L4	0	0	$\pi/2$
L5	0.32	0	$-\pi/2$
L6	0	0	$-\pi/2$
L7	0.18	0	$\pi/2$

表 3 7 自由度机械臂动力学参数

Tab. 3 7-DOF manipulator dynamics parameters

Link [#]	Mass [kg]	Motor inertia [Jm, kg.m <sup>2</sup> ]	viscous friction [B, N m/rad]
L1	4.5	200e-4	1.480e-3
L2	4.5	200e-4	1.817e-3
L3	2.5	200e-4	1.380e-3
L4	2.5	33e-4	71.20e-4
L5	1.7	33e-3	82.60e-4
L6	1.7	33e-3	36.70e-4
L7	1.5	33e-3	36.70e-4

利用摆线函数来对机器人笛卡尔坐标系进行轨迹规划如式(37)所示。

$$\begin{cases} x(t) = a \times \sin\left(\theta + 2\pi \sin^2\left(\frac{\pi t}{2T}\right)\right) \forall t \in [0, T] \\ y(t) = b \times \cos\left(\theta + 2\pi \sin^2\left(\frac{\pi t}{2T}\right)\right) \forall t \in [0, T] \\ z(t) = 0 \quad \forall t \in [0, T] \\ \theta = \arctan \arctan\left(\frac{x_0}{y_0}\right) \end{cases} \quad (37)$$

式中:  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  分别表示机械臂末端沿着  $x$ ,  $y$ ,  $z$  轴的位移。参数  $a$  和  $b$  表示椭圆的  $x$  轴半径和  $y$  轴半径。 $T$  为起始点到终止点的运动时间,  $x_0$ ,  $y_0$  表示机器人末端的起始点的  $x$ ,  $y$  坐标值。在仿真过程中, 机械臂各个关节的初始位置为  $[0, -0.4, 0, 1.97, 0, -2.7, 0]$ rad。考虑到机械臂的工作空间限制, 在仿真环境中设定各个参数为  $a=0.45$  m,  $b=0.45$  m,  $T=16$  s。为了对比不同的控制器性能, 滑模控制器的参数设为同一值。 $\gamma_i = \operatorname{diag}\{20, 20, 20, 20, 20, 20, 20\}$ 。因为模型的不确定, 假定系统模型的不确定部分为估计模型乘以一个矩阵因子。例,

$\hat{M} = 0.9 \times M$ ,  $\hat{C} = 0.9 \times C$ ,  $\hat{G} = 0.9 \times G$ 。自适应模糊逻辑参数(式 29)  $\alpha = \pi/12$   $\sigma = \pi/24$  初始值  $\dot{\theta}_{yi} = 0$  (式(30))。作用在机器人末端沿着  $z$  方向的负载设置为  $F_z = 5 + 2 \times \sin(2 \times t)$ 。如图 3 所示预测值比测量值相位上超前 0.2 s, 精确的预测了力的变化。

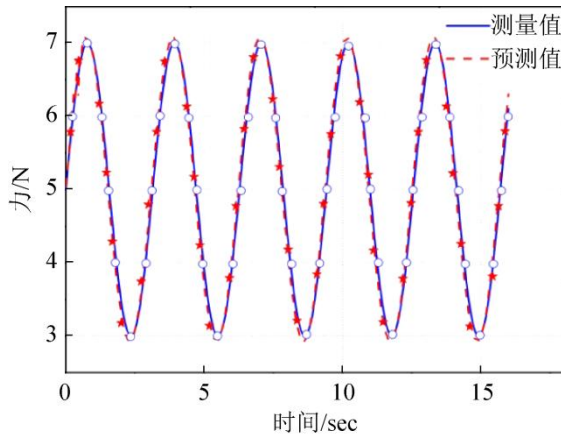


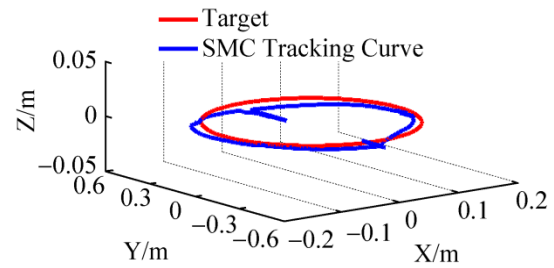
图 3 变力的测量值和预测值

Fig. 3 Variable force values and predicted values

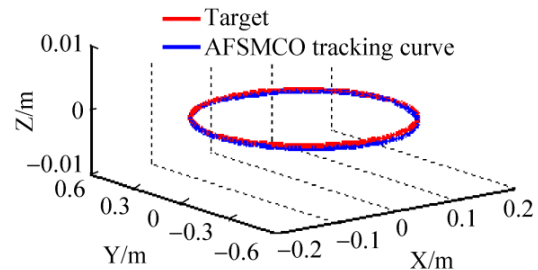
图 4 展示了冗余度机械臂分别在基于力传感器反馈的滑模控制器(SMC), 基于力传感器反馈的自适应滑模控制器(AFSMCO), 基于卡尔曼预测的力反馈自适应滑模控制器(AFSMCK)下的轨迹和目标轨迹(式(36))的比较。图 5 显示了这个 3 种控制器产生的轨迹与目标轨迹的误差。结合图 4, 图 5 我们提出的基于卡尔曼预测的力反馈自适应滑模控制器具有更高的跟踪精度。

以一个关节的输入力矩为例, 图 6 显示了冗余度机器人第一关节的力矩输入, 基于力传感器反馈的滑模控制器(SMC)采用的是固定切换增益, 控制率抖动大, 当采用自适应控制策略实时计算控制增益时, 滑模控制率变化比较平稳, 消除了抖动问题。当采用 AFSMCK 控制算法时, 关节角  $\theta_1$  的输入扭矩变化平稳。由图 6 所示, AFSMCK 算法通过预测变力的大小, 使得系统响应提前处理外力的变化。进一步优化了基于力传感器反馈的自适应滑模控制(AFSMCO)的性能, 使得关节输入扭矩保持在  $\pm 20$  N m 范围内。且结合图 5~6 提出的 AFSMCK 算法使得机器人的位置跟踪误差保持在  $\pm 0.2$  mm 以

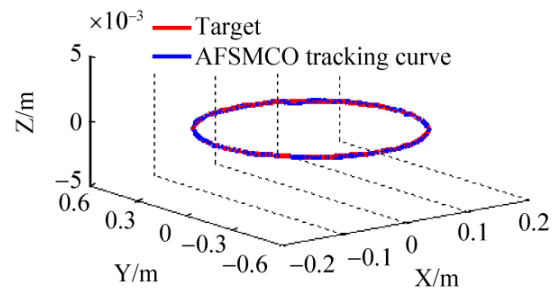
内, 相比滑膜控制和 AFSMCO 控制算法, AFSMCK 算法具有更高的跟踪精度和强鲁棒性。



(a) 基于力传感器反馈的滑模控制(SMC)



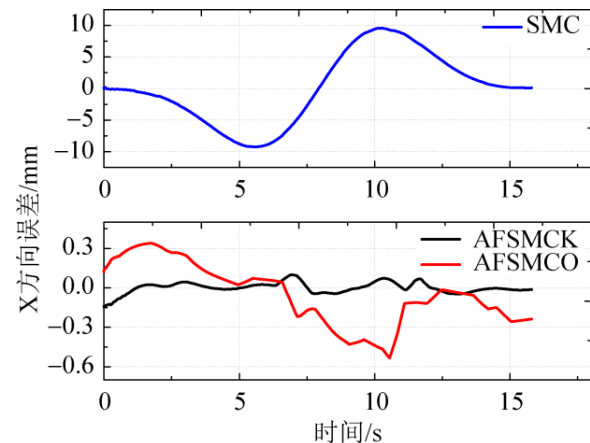
(b) 基于力传感器反馈的自适应滑模控制(AFSMCO)



(c) 于卡尔曼预测的力反馈自适应滑模控制(AFSMCK)

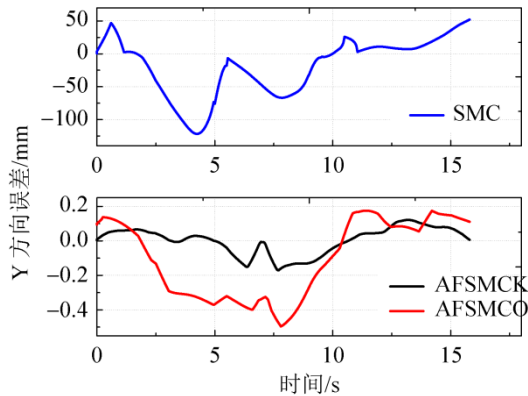
图 4 机械臂末端跟踪比较曲线

Fig. 4 The trajectory tracking comparison of manipulator end-effector

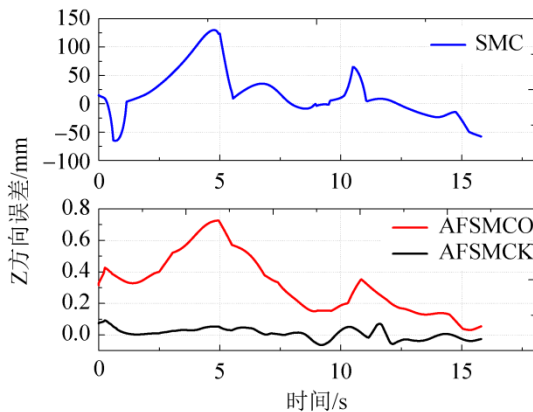


(a) x 方向的误差比较





(b) y 方向的误差比较



(c) z 方向的误差比较

图5 机械臂末端误差比较曲线

Fig. 5 The trajectory tracking errors comparasion of manipulator end-effector

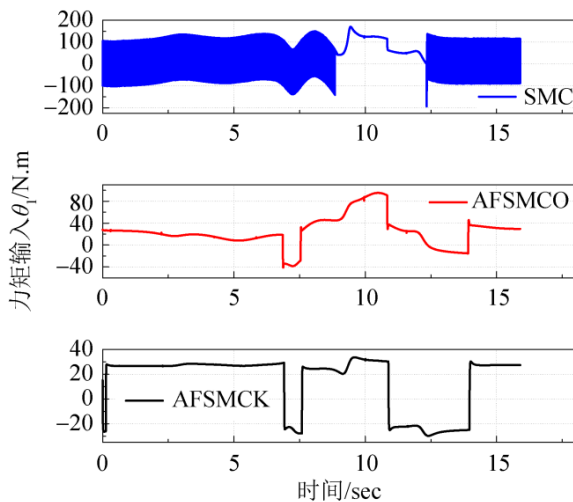


图6 三种控制器关节1输入力矩

Fig. 6 Join 1 inputting toque for three kinds of controller

## 6 结论

提出了基于变负载卡尔曼预测模糊自适应滑

模控制算法(AFSMCK),该算法可实现冗余度机器人在变负载情况下的精确控制。利用卡尔曼滤波器来获得变负载的变化,该预测值直接输入进滑模控制器中可有效的提高机械臂的跟踪精度。自适应模糊逻辑通过迭代计算了滑模控制的切换增益且有效消除了滑膜控制的抖动问题。在仿真实验中轨迹跟踪曲线、误差曲线、以及关节输入力矩曲线清晰的显示了控制策略有效性。本文的方法有效解决了因机器人模型不确定以及末端变负载对机器人动力学系统影响下,机器人稳定控制的问题。

## 参考文献:

- [1] 申浩宇, 吴洪涛, 陈柏, 等. 冗余度双臂机器人协调避障算法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 356-340.  
Shen Haoyu, Wu Hongtao, Chen Bai, et al. Obstracle Avoidance Algorithm for Coordinated Motion of Redundant Dual-arm Robot[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 356-340.
- [2] Christian Ota, Alexander Dietricha. Prioritized multi-task compliance control of redundant manipulators [J]. Automatic(S0005-1098), 2015, 53(1): 416-423.
- [3] Daachi B, Benallegue A. A Neural Network Adaptive Controller for End-effector Tracking of Redundant Robot Manipulators [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems(S0921-0296), 2006, 46(3): 245-262.
- [4] Boubaker Daachi, Tarek Madani, Abdelaziz Benallegue. Adaptive neural controller for redundant robot manipulators and collision avoidance with mobile obstacles [J]. Neurocomputing(S0925-2312), 2012, 79(3): 50-60.
- [5] Erkan Zergeroglu, Darren D Dawson. Nonlinear Tracking Control of Kinematic ally Redundant Robot Manipulators [J]. IEEE Transaction on Mechatronics (S1083-4435), 2004, 9(1): 129-132.
- [6] Tatlicioglu E, Braganza D, Burg T C, et al. Adaptive Control of Redundant Robot Manipulators with SubTask Objectives [J]. Robotica (S0263-5747), 2009, 27(1): 873-881.
- [7] Khan Q, Iqbal A, Iqbal B M. Dynamic integralsliding mode control for SISO uncertain nonlinear systems [J], International Journal of Innovative Computing, Information and Control(S1349-4198), 2012, 8(7): 4621-4633.

(下转第 1007 页)