

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.03.005

## 基于变论域模糊补偿的空间机器人自适应控制

韩子航<sup>1</sup>, 陈力<sup>1</sup>, 韩大鹏<sup>2</sup>

(1. 福州大学机械工程及自动化学院, 福州 350108; 2. 浙江大学创新创业研究院, 杭州 310058)

**摘要:** 相比地面环境, 太空环境中机器人系统暴露在宇宙射线中更容易受到外部干扰, 且因难以维护和燃料消耗等原因带来的质量和惯性等系统参数变化使得其更容易存在系统不确定性。针对载体位置不受控的漂浮空间机器人系统存在系统不确定性和外部干扰的问题, 提出了一种基于变论域模糊控制的轨迹跟踪控制方法。在使用计算力矩控制器求解标称系统控制力矩的基础上, 使用变论域模糊控制对系统不确定性和外界干扰带来的误差进行补偿。论域范围的实时变化使变论域模糊控制可以适用于不同时刻的不同误差范围, 从而有效提高了系统的响应速度, 减小了系统的稳态跟踪误差。最后通过李雅普诺夫方法证明控制方案的稳定性, 并通过数值仿真证明了控制方法的有效性。

**关键词:** 空间机器人; 变论域模糊控制; 自适应控制; 外部干扰; 数值仿真

中图分类号: TP241

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)03-0424-08

## Adaptive Control of Space Robot Based on Variable Universe Fuzzy Compensation

HAN Zihang<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>, HAN Dapeng<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Innovation and Entrepreneurship Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Compared with the ground environment, the robot system exposed to cosmic rays in space environment is more susceptible to external interference, and the system parameter changes such as mass and inertia caused by difficult maintenance and fuel consumption make it more prone to system uncertainty. Aiming at the problems of system uncertainty and external interference in a floating space robot system with uncontrolled carrier position, a trajectory tracking control method based on variable universe fuzzy control is proposed. On the basis of calculating torque controller to solve the nominal system control torque, the variable universe adaptive fuzzy controller is used to compensate the errors caused by the system uncertainty and external interference. The real-time change of the scope of the variable domain makes the fuzzy controller applicable to different error ranges at different time, thus effectively improving the response speed of the system and reducing the steady-state tracking error of the system. Finally, the stability of the control scheme is proved by Lyapunov method, and the effectiveness of the control method is proved by numerical simulation.

**Key words:** space robot; variable universe fuzzy control; adaptive control; external interference; numerical simulation

随着空间技术的发展, 空间机器人在空间站建设、设备维护、航天员出舱等在轨任务中发挥着重要作用。良好的控制算法可以提高机器人系统的

稳定性和运动精度, 是机器人适应复杂环境、完成工作任务的重要支撑。空间机器人系统易受太空复杂条件的干扰, 且在缺少维护以及航天器燃料消

收稿日期: 2023-08-28; 修订日期: 2024-03-12

通信作者: 陈力, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: chnle@fzu.edu.cn。

引用格式: 韩子航, 陈力, 韩大鹏. 基于变论域模糊补偿的空间机器人自适应控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(3): 424-431. HAN Zihang, CHEN Li, HAN Dapeng. Adaptive control of space robot based on variable universe fuzzy compensation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(3): 424-431.

耗的情况下难以获得机器人系统的准确参数,即存在系统不确定性。以上因素增加了空间机器人的控制难度,空间机器人的控制问题成为热门问题之一,许多科研工作者投入到该领域中<sup>[1-10]</sup>。

多种智能控制算法被应用于空间机器人的控制中。史玲玲等<sup>[11]</sup>设计了一种可变增益的滑模控制算法,在具有系统不确定性的情形下具有较高的控制精度和收敛速度;付晓东等<sup>[12]</sup>提出了基于小波神经网络和混合轨迹法的自适应快速终端滑模控制算法,对系统不确定性和外界干扰具有鲁棒性;谢箭等<sup>[13]</sup>使用RBF神经网络逼近系统的非线性函数和不确定上界,在保证控制效果的前提下降低了计算量;Zhang等<sup>[14]</sup>在使用神经网络逼近非线性的同时,使用鲁棒控制器消除神经网络和外界干扰带来的误差,其算法具有降低计算量、精度高、响应速度快的特点。相比大多数智能控制算法,变论域模糊控制具有实现简单、计算量小、容错性高的优势。

模糊控制的本质是非线性控制器,其不依赖被控对象的精确数学模型,并具有较强的鲁棒性和容错性。然而,传统模糊控制过程中论域和模糊规则不变,当系统在控制过程中误差逐渐减小或受到外界干扰后模糊控制器无法对系统做出精细的控制。而变论域模糊控制能够通过伸缩因子使论域范围随误差变化而变化,这使得其可以在系统的不同时刻适应不同误差范围,从而提高系统的响应速度、减小系统跟踪误差,同时引入伸缩因子对算法计算量和结构复杂性的影响很小。变论域模糊控制在液压<sup>[15]</sup>、温度<sup>[16]</sup>、流量<sup>[17]</sup>控制等领域<sup>[18-19]</sup>被广泛研究。

本文针对载体位置不受控、姿态受控,且具有系统不确定性和外界干扰的两杆空间机械臂系统,设计了结合计算力矩控制和变论域模糊控制的控制方法。其中变论域模糊控制用于补偿系统不确定性和外界干扰带来的误差。通过数值仿真与传统模糊控制对比,结果显示变论域模糊控制的系统跟踪误差更小,收敛速度更快,稳定性更强。

## 1 漂浮基空间机器人动力学建模

为不失一般性,本文以做平面运动的漂浮基空间机器人为研究对象,其几何模型如图1所示。 $B_0$ 为空间机器人系统的载体, $B_1$ 、 $B_2$ 为两连杆,各分体 $B_i$ 间以转动关节连接。坐标系 $XOY$ 为参考坐标系, $O_0$ 为载体 $B_0$ 的质心,为方便图示其与 $O$ 点暂时重合, $O_1$ 、 $O_2$ 为两转动关节的中心; $L_1$ 、 $L_2$ 为两连杆长度, $L_0$ 为载体质心到 $O_1$ 的距离; $W$ 为系统整体的质心。 $m_i$ 、 $J_i$ 分别为 $B_i$  ( $i=0,1,2$ )的质量和中心转动惯量,系统各分体质量均匀分布, $M$ 为系统

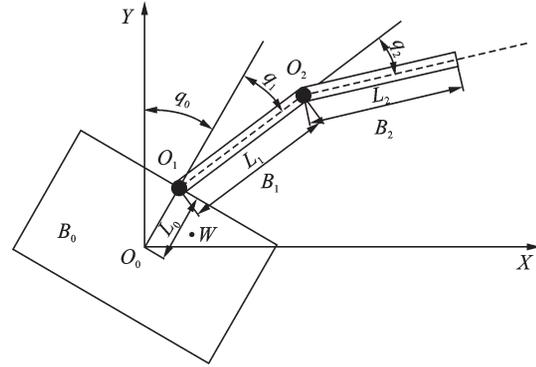


图1 漂浮基空间机器人系统

Fig.1 Floating based space robot system

总质量。 $q_0$ 为运动平面中载体坐标系相对惯性坐标系的转动角度,下文将称之为载体姿态; $q_1$ 、 $q_2$ 为两关节的实际转动角度,下文将称之为关节角。

利用第二类拉格朗日方程和动量守恒关系可推导出载体位置不受控而姿态受控的漂浮基空间机器人动力学方程

$$D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} = \tau \quad (1)$$

式中: $D(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为正定、对称的惯性阵; $H(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 从包含离心力、科氏力的三维列向量中分离而来; $q = [q_0, q_1, q_2]^T$ 为系统广义坐标; $\tau = [\tau_0, \tau_1, \tau_2]^T$ 为系统控制力矩。

## 2 变论域模糊控制

### 2.1 变论域模糊控制基本原理

模糊控制本质上是插值器<sup>[20]</sup>。而变论域则是指在论域的模糊划分不变的条件下,论域随着误差的变化而变化,通过论域的变化,初始规则库变成了更加有效的新规则库。表面上来看模糊规则的数量并没有变化,但是论域收缩会使规则加细,相当于增加规则数,控制精度得以提高<sup>[21]</sup>,论域扩张会使规则粗化,相当于减少规则数,这使得响应速度提高。

对于双输入单输出的机械臂系统,设 $X = [-E, E]$ 、 $Y = [-F, F]$ 为两给定的输入论域,其 $X$ 表示轨迹跟踪误差论域, $Y$ 表示误差变化率论域, $Y$ 受 $X$ 的影响。设 $Z = [-U, U]$ 为输出论域,其表示系统不确定性补偿力矩。 $E$ 、 $F$ 、 $U$ 均为正实数。设 $A = \{A_i\}$  ( $i=1,2,\dots,p$ )、 $B = \{B_i\}$  ( $i=1,2,\dots,p$ )、 $C = \{C_i\}$  ( $i=1,2,\dots,p$ )分别为论域 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 上的隶属度函数,以 $A$ 为例,它的各隶属度函数峰值点 $x_i$ 满足

$$-E = x_1 < x_2 < \dots < x_p = E \quad (2)$$

设 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 的伸缩因子分别为 $\alpha(x)$ 、 $\beta(x, y)$ 、 $\gamma(z)$ , $Y$ 受 $X$ 的影响,故其伸缩因子具有两个输入。伸缩因子可定义为

$$\begin{cases} \alpha(x) = \left(\frac{|x|}{E}\right)^a \\ \beta(x, y) = \left(\frac{1}{2}\left(\frac{|x|}{E} + \frac{|y|}{F}\right)\right)^a \\ \gamma(z) = \left(\frac{|z|}{U}\right)^a \end{cases} \quad 0 < a < 1 \quad (3)$$

论域的伸缩可记为

$$X(x) = \alpha(x)X = [-\alpha(x)E, \alpha(x)E] \quad \forall x \in X \quad (4)$$

论域伸缩的示意可见图2。

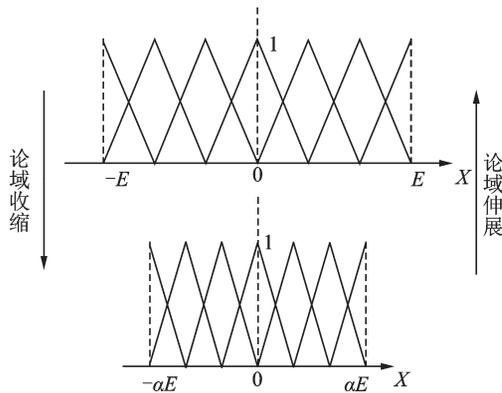


图2 论域的收缩与伸展

Fig.2 Contraction and extension of universe

### 2.2 双输入单输出变论域模糊控制算法

双输入单输出的模糊控制的推理规则可以描述为

$$z = C_{ij}(k) \quad \text{当 } x = A_i(k) \text{ 及 } y = B_j(k) \quad (5)$$

式中： $k$ 为采样时刻， $A(k)$ 、 $B(k)$ 、 $C(k)$ 代表输入输出在 $k$ 时刻的隶属度函数。根据模糊控制的插值机理，上述模糊规则可以变现为一个二元分片插值函数<sup>[20]</sup> $F(x, y, k)$

$$z(x, y, k) = F(x, y, k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_i(x, k) B_j(y, k) C_{ij}(k) \quad (6)$$

设在 $k$ 时刻系统的输入为 $x^k, y^k$ ，其输出为 $z^{k+1}$

$$z^{k+1} = F(x^k, y^k, k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_i(x^k, k) B_j(y^k, k) C_{ij}(k) \quad (7)$$

$$\begin{cases} A(k+1) = \alpha(x^k)A(0) \\ B(k+1) = \beta(x^k, y^k)B(0) \\ C(k+1) = \gamma(z^{k+1})C(0) \end{cases} \quad (8)$$

在 $k$ 时刻，系统的输入输出 $x^k, y^k, z^{k+1}$ 通过伸缩因子和式(8)得到了新的论域及隶属度函数，并在 $k+1$ 时刻使用新的论域和隶属度函数求解，如此循环往复。其中 $A(0)$ 、 $B(0)$ 、 $C(0)$ 表示在初始论域 $E, F, U$ 下的隶属度函数。

对上文所述的双输入单输出变论域模糊控制的隶属度函数选择三角形隶属度函数，其形式可见图2，该隶属度函数描述简洁，应用最为广泛。并设 $X, Y$ 的模糊集均为 $[NB, NS, ZE, PS, PB]$ ，设 $Z$ 的模糊集为 $[NVB, NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB, PVB]$ 。模糊集中各元素代表对输入输出值的模糊描述， $N, P, B, M, S, V$ 分别为英文中负的(Negative)、正的(Positive)、大的(Big)、中间的(Middle)、小的(Small)、非常(Very)的首字母，组合使用时NVB代表“负的很大的数”，PS代表“正的小的数”，其他同理；ZE为英文中零(Zero)的缩写，代表“0”。模糊规则可见表1。解模糊方法采用平均值法，其数学描述可由式(6)体现，各隶属度函数求积后累加的过程即为加权求取平均值的过程。

表1 模糊规则表  
Table 1 Fuzzy rule table

E	F				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PVB	PB	PM	PS	NS
NS	PB	PM	PS	ZE	NM
ZE	PM	PS	ZE	NS	NM
PS	PS	ZE	NS	NM	NB
PB	PS	NS	NM	NB	NVB

### 3 基于变论域模糊补偿的空间机械臂控制器设计

已知空间机器人系统动力学方程为式(1)， $q, \dot{q}, \ddot{q}$ 为机械臂关节角度角速度和角加速度的实际测量值， $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ 为相应的期望值，则跟踪误差可表示为

$$\begin{cases} e(t) = q(t) - q_d(t) \\ \dot{e}(t) = \dot{q}(t) - \dot{q}_d(t) \end{cases} \quad (9)$$

机器人系统标称动力学模型为

$$D_0(q)\ddot{q}_d + H_0(q, \dot{q})\dot{q}_d = \tau_c + \tau_d \quad (10)$$

式中： $D_0(q), H_0(q, \dot{q})$ 为 $D(q), H(q, \dot{q})$ 的估计值， $\tau_d$ 为外界扰动；其关系满足

$$\begin{cases} \Delta D(q) = D_0(q) - D(q) \\ \Delta H(q, \dot{q}) = H_0(q, \dot{q}) - H(q, \dot{q}) \end{cases} \quad (11)$$

当系统不存在系统不确定性和外界扰动时，误差系统有

$$\ddot{e} + K_p e + K_d \dot{e} = 0 \quad (12)$$

式中 $K_p, K_d$ 为待定系数矩阵。忽略外界干扰和系统不确定性，可设计其理想控制律为

$$\tau_c = D(q)[\ddot{q}_d - K_p e - K_d \dot{e}] + H(q, \dot{q})\dot{q}_d \quad (13)$$

结合式(10,11,13)，可以将控制率修正为

$$\begin{cases} \tau = D_0(q) [\ddot{q}_d - K_p e - K_d \dot{e}] + H_0(\dot{q}, q) \dot{q}_d - D_0(q) g \\ g = D_0^{-1}(q) [\Delta D(q) \ddot{q}_d + \Delta H(q, \dot{q}) \dot{q}_d + \tau_d] \end{cases} \quad (14)$$

$g$ 即为系统不确定项,利用变论域模糊控制  $u_f(e, \dot{e})$  逼近系统不确定项  $g$ 。此时有

$$\ddot{e} + K_p e + K_d \dot{e} = g \quad (15)$$

设  $\hat{g}(x)$  为  $g$  的估计量,则其表达式可定义为

$$\hat{g}(x) = \hat{g}(x|\Theta) = \Theta \xi \quad (16)$$

此时可将模糊补偿项  $u_f(e, \dot{e})$  定义为

$$u_f(e, \dot{e}) = -D_0(q) \hat{g}(x) \quad (17)$$

式中:  $\xi$  为由模糊基函数组成的向量,  $\Theta$  为权值向量且当其取最优值  $\Theta^*$  时可使  $\hat{g}$  最为逼近  $g$ 。此时控制律可写为

$$\tau = \tau_c + u_f(e, \dot{e}) \quad (18)$$

其误差系统可写为

$$\ddot{e} + K_p e + K_d \dot{e} = \Theta^* \xi + \epsilon \quad (19)$$

式中  $\epsilon$  为变论域模糊控制存在的逼近误差。设  $x = [e^T, \dot{e}^T]^T$ , 则系统闭环误差的状态空间表达式可

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} [x^T P \dot{x} + \dot{x} P x^T] + \dot{\Theta}^T \tilde{\Theta} = \\ &= \frac{1}{2} [x^T P (Ax + Bg) + (Ax + Bg)^T P x] + \dot{\Theta}^T \tilde{\Theta} = \\ &= \frac{1}{2} [x^T P (Ax + B(\tilde{\Theta}^T \xi + \epsilon)) + (Ax + B(\tilde{\Theta}^T \xi + \epsilon))^T P x] + \dot{\Theta}^T \tilde{\Theta} = \\ &= \frac{1}{2} [x^T P (Ax + B(\tilde{\Theta}^T \xi + \epsilon)) + (x^T A^T + (\tilde{\Theta}^T \xi + \epsilon)^T B^T) P x] + \dot{\Theta}^T \tilde{\Theta} = \\ &= \frac{1}{2} [x^T P A x + x^T A^T P x + x^T P B (\tilde{\Theta}^T \xi + \epsilon) + (\tilde{\Theta}^T \xi + \epsilon)^T B^T P x] + \dot{\Theta}^T \tilde{\Theta} \end{aligned} \quad (25)$$

将式(22)代入可得

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} x^T Q x + \xi^T \tilde{\Theta} B^T P x + \epsilon^T B^T P x + \dot{\Theta}^T \tilde{\Theta} \quad (26)$$

式中: 第一项为二次型, 可知其非正; 第三项中  $\epsilon$  为最小逼近误差, 由模糊控制理论, 其值可以充分小, 即有

$$\dot{V} \leq \xi^T \tilde{\Theta} B^T P x + \dot{\Theta}^T \tilde{\Theta} \quad (27)$$

将自适应律式(23)代入可得

$$\dot{V} \leq \xi^T \tilde{\Theta} B^T P x - (\xi^T P B)^T \tilde{\Theta} = 0 \quad (28)$$

即当自适应控制律取式(23)时,  $\dot{V} \leq 0$ , 表明系统可以稳定地追踪期望轨迹。

### 4 仿真验证

本文使用数值仿真验证所设计的基于变论域模糊控制的补偿方法的有效性。

在设计控制算法时, 设计者只能根据物理模型和参数辨识等手段获取系统的参数估计值, 估计值与实际值往往存在偏差。本文中空间机械臂系统

$$\dot{x} = Ax + Bg \quad (20)$$

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \\ g = \Theta^* \xi + \epsilon \end{cases} \quad (21)$$

取正定对称矩阵  $P$  满足

$$PA + A^T P + Q = 0 \quad Q \geq 0 \quad (22)$$

设  $\tilde{\Theta} = \hat{\Theta} - \Theta^*$ ,  $\hat{\Theta}$  为  $\Theta^*$  的估计值, 取自适应控制律为

$$\dot{\tilde{\Theta}} = -\xi x^T P B \quad (23)$$

取李雅普诺夫函数为

$$V = -\frac{1}{2} x^T P x + \frac{1}{2} \tilde{\Theta}^T \tilde{\Theta} \quad (24)$$

则有

的参数估计值取值为  $L_0 = 1.5 \text{ m}, L_1 = 3 \text{ m}, L_2 = 2 \text{ m}, m_0 = 40 \text{ kg}, m_1 = 2 \text{ kg}, m_2 = 2.5 \text{ kg}, J_0 = 34.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_1 = 1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_2 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

为更真实地模拟空间机器人因燃料消耗和缺少维护产生的系统不确定性, 在参数实际值取值时基体质量和转动惯量有较大减小, 而其他臂杆各参数也有所变化。具体值取值为  $m_0 = 38 \text{ kg}, m_1 = 2.1 \text{ kg}, m_2 = 2.48 \text{ kg}, J_0 = 33 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_2 = 1.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

太空环境中机器人系统易受到外界干扰, 本文在仿真中将干扰体现在关节力矩信号中, 引入了力矩干扰项  $\tau_d$ , 且机器人关节初始角存在偏差。具体取值为

$$\begin{cases} \tau_d = \begin{bmatrix} 0.8 \sin(15t) \\ 0.9 \sin(6t) \\ 0.7 \cos(10t) \end{bmatrix} \\ e(t=0) = \begin{bmatrix} -0.08 \\ 0.05 \\ -0.05 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (29)$$

仿真中设定空间机器人执行对合作目标的辅

助检修任务,要求载体姿态保持为零,机械臂末端按照特定圆形轨迹进行运动

$$\begin{cases} x_d = 2 + \sin(0.8t) \\ y_d = 2 + \cos(0.8t) \end{cases} \quad (30)$$

该方程以空间机器人系统重心为坐标原点。对应地,末端运动轨迹经过运动学相关运算得到关节空间轨迹后在关节空间对机器人载体转动角度和关节角度进行控制,关节空间期望轨迹可见图3。

初始论域大小  $E = 2$ , 控制频率为 100 Hz, 下面分别采取模糊控制和变论域模糊控制两种方法进行仿真对比。模糊控制仿真结果如图4所示。其中,模

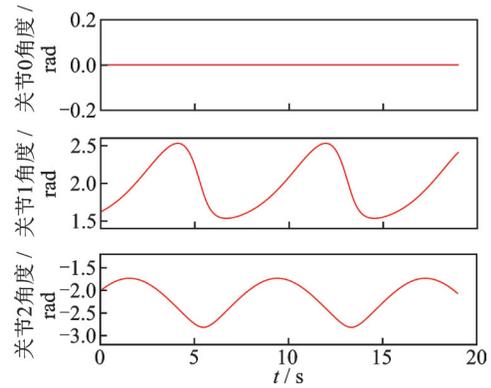


图3 关节空间期望轨迹

Fig.3 Joint spatial expected trajectory

糊控制中模糊控制变量的论域范围始终不变。

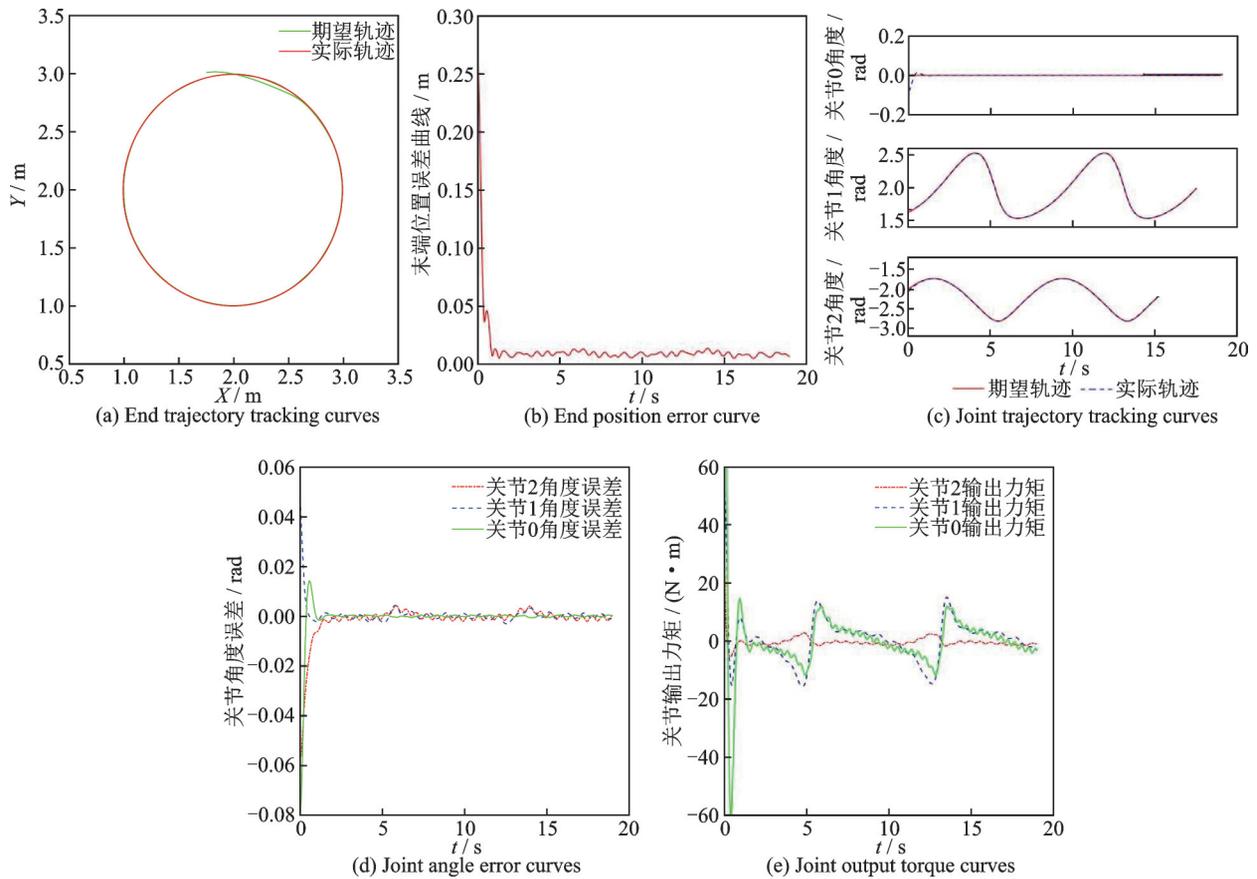


图4 模糊控制仿真结果

Fig.4 Simulation results of fuzzy compensation

本文在伸缩因子指数  $a$  的不同取值下对变论域模糊补偿控制进行了对比仿真验证。指数  $a$  的取值改变了误差变化与论域伸缩之间的关系,对系统控制精度和稳定性带来了不同的影响。其中  $a = 0.6$  时变论域模糊补偿控制仿真结果如图5所示。

通过末端轨迹及关节角度误差曲线来看,变论域模糊控制的调整时间更少,响应速度更快。从关节输出力矩来看,关节0的输出力矩在数值上与关节1的输出力矩相关性很大,这代表载体需要克服

耦合力以保持姿态稳定。为更直观地比较两种控制方法的效果和变论域模糊控制在不同  $a$  值下的控制效果,分别以系统调整时间和稳定后机械臂末端位置均方根误差为指标,列出了表2和表3。

当伸缩因子指数  $a = 0$  时,伸缩因子恒为1,即论域大小不变,此时等价于传统模糊控制。且当  $a$  值较小时论域伸缩变化小,变论域模糊控制效果不明显。

此外,输出论域的伸展可表示为

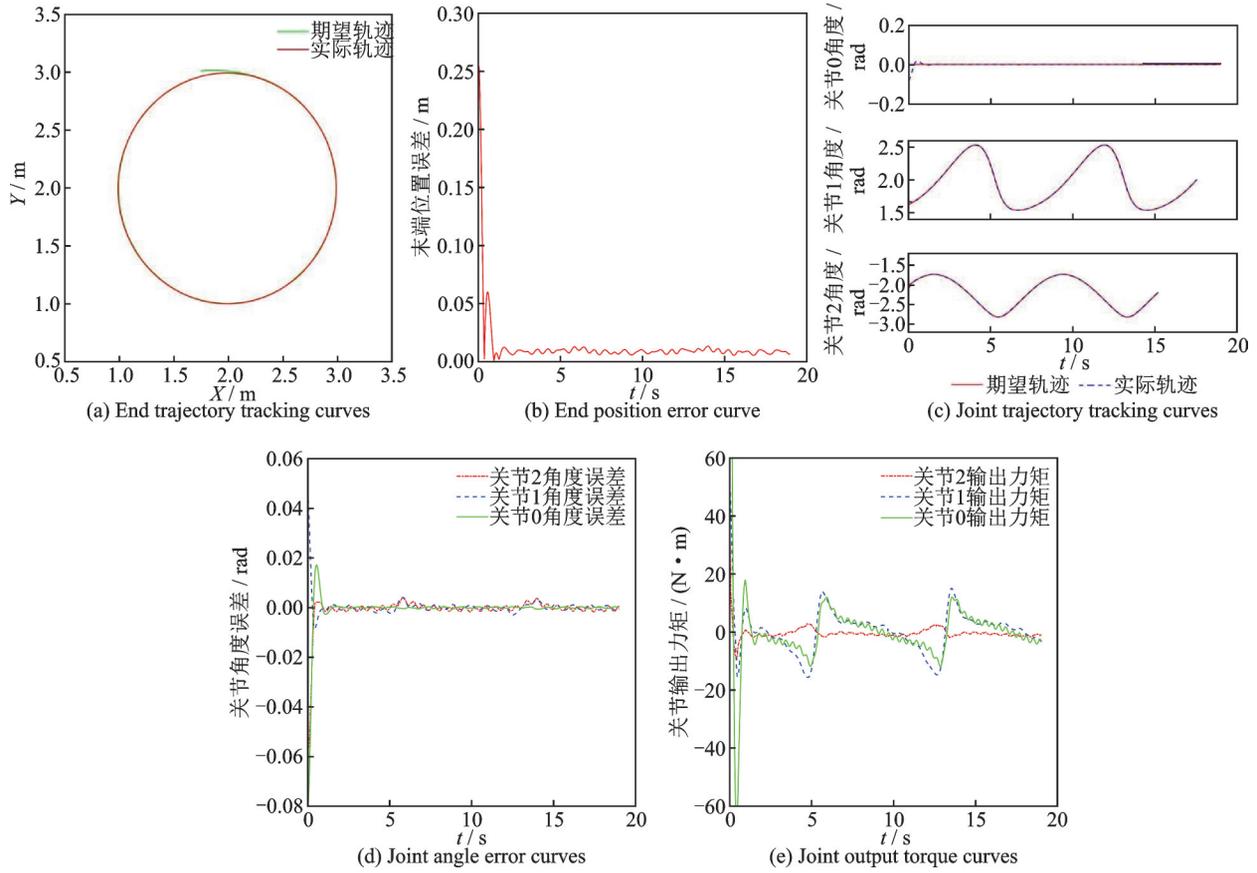


图 5 变论域模糊控制仿真结果( $a=0.6$ )

Fig.5 Simulation results of variable universe fuzzy compensation( $a=0.6$ )

表 2 位移调整时间

Table 2 Displacement adjustment time

控制方式	模糊控制	变论域模糊控制					
		$a=0.2$	$a=0.4$	$a=0.5$	$a=0.6$	$a=0.7$	$a=0.8$
调整时间/s	1.29	1.12	0.91	0.87	0.85	0.86	0.83

表 3 位置均方根误差

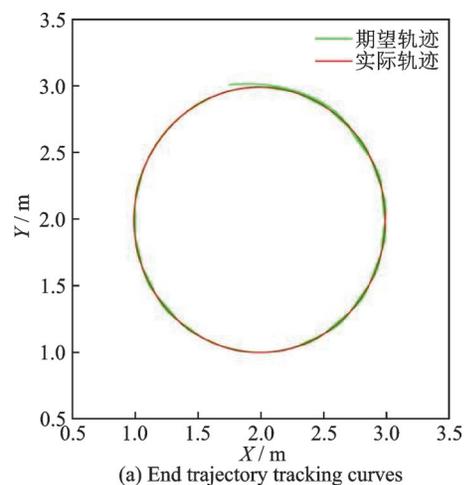
Table 3 Root mean square error of position

控制方式	模糊控制	变论域模糊控制					
		$a=0.2$	$a=0.4$	$a=0.5$	$a=0.6$	$a=0.7$	$a=0.8$
末端/m	0.009 41	0.009 29	0.009 17	0.009 12	0.009 10	0.008 70	0.008 49

$$|z^k| \leq E(k) \quad \forall z^k \text{ 使 } E(k+1) = E\left(\frac{|z^k|}{E}\right) > E(k) \quad (31)$$

当  $a$  接近 1 时,  $|z^k|$  要更接近于  $E(k)$  才能使得论域伸展, 而当  $a=1$  时, 式(31)所述条件无法满足, 论域无法伸展, 输出论域会迅速变为 0, 控制器表现为失去模糊补偿。本文对  $a=1$  时进行了仿真, 其结果如图 6 所示。可见关节角度和末端轨迹受干扰力矩影响明显。经过仿真, 发现此趋势在  $a > 0.85$  后逐渐明显。

由上述可知, 将变论域模糊控制应用于具有外



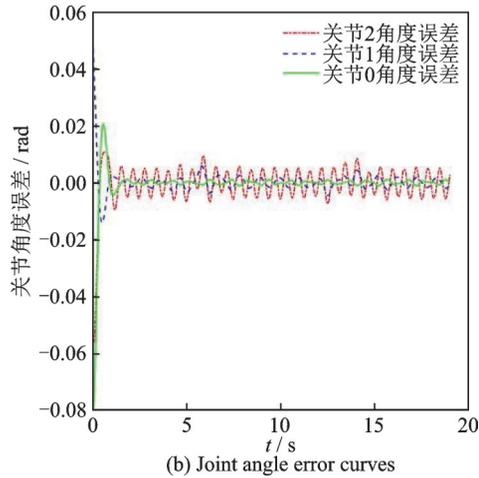


图6 变论域模糊控制仿真结果( $a=1$ )

Fig.6 Simulation results of variable universe fuzzy compensation( $a=1$ )

界干扰和系统不确定性的漂浮基空间机器人系统时,响应速度、控制精度较传统模糊控制均有所提高。且在伸缩因子指数 $a$ 在一定区间内随取值增大,控制效果会更好,但是当其取值超过0.85时,变论域模糊控制会逐渐失效。

## 5 结 论

针对漂浮基空间机器人系统易存在系统不确定性和外界干扰的问题,设计了变论域模糊控制结合算力矩控制器的轨迹跟踪控制方法。使用变论域模糊控制补偿系统不确定性和外界干扰,提高了系统控制精度和响应速度。此外,研究了变论域伸缩因子指数 $a$ 取值对控制效果的影响,从中可得出 $a$ 的最佳取值范围约为0.6到0.8区间。本文使用的变论域模糊控制在传统模糊控制的基础上增加了变论域环节,以少量计算量为代价,使控制器具有了自适应性,提高了性能,具有实现简单、实用性强的特点。

### 参考文献:

[1] 张海博,王大轶,魏春岭. 空间机器人加注机构碰撞力建模与柔顺控制[J]. 中国空间科学技术, 2015, 35(4): 1-9.  
ZHANG Haibo, WANG Dayi, WEI Chunling. Contact dynamics model of refueling device and compliance control for space robots[J]. Chinese Space Science and Technology, 2015, 35(4): 1-9.

[2] 梁斌,杜晓东,李成,等. 空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展[J]. 机器人, 2012, 34(2): 242-256.  
LIANG Bin, DU Xiaodong, LI Cheng, et al. Advanced in space robot on-orbit servicing for non-coop-

erative spacecraft[J]. Robot, 2012, 34(2): 242-256.

- [3] 雷荣华,陈力. 空间机器人执行器部分失效故障的终端滑模容错控制[J]. 中国机械工程, 2019, 30(8): 947-953.  
LEI Ronghua, CHEN Li. Terminal sliding mode fault-tolerant control for space robots under partial loss of actuator effectiveness[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(8): 947-953.
- [4] 刘璟龙,张崇峰,邹怀武,等. 基于干扰观测器的柔性空间机器人在轨精细操作控制方法[J]. 航空学报, 2021, 42(1): 196-206.  
LIU Jinglong, ZHANG Chongfeng, ZOU Huaiwu, et al. On-orbit precise operation control method for flexible joint space robots based on disturbance observer[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(1): 196-206.
- [5] 刘辽雪,洪梦情,顾秀涛,等. 基于固定时间的柔性关节空间机器人阻抗控制[J]. 南京理工大学学报, 2022, 46(4): 379-386.  
LIU Liaoxue, HONG Mengqing, GU Xiutao, et al. Impedance control of space robots with flexible joints based on fixed time[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2022, 46(4): 379-386.
- [6] 梁捷,陈力,梁频. 柔性空间机器人基于关节柔性补偿控制器与虚拟力概念的模糊全局滑模控制及振动主动抑制[J]. 振动与冲击, 2016, 35(18): 62-70.  
LIANG Jie, CHEN Li, LIANG Pin. Adaptive fuzzy global sliding mode control and active hierarchical vibration suppression of space robot with flexible link and flexible-joint[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(18): 62-70.
- [7] 曾晨东,陈力. 一种空间机器人双臂捕获卫星减撞柔顺控制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(4): 543-550.  
ZENG Chendong, CHEN Li. A flexible collision mitigation method for the space robot dual-arm capture satellite[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(4): 543-550.
- [8] 朱战霞,张红文,罗秋月. 自由漂浮空间机器人神经网络自适应控制律设计[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(1): 59-65.  
ZHU Zhanxia, ZHANG Hongwen, LUO Qiuyue. Adaptive neural network control for free-floating space robot[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(1): 59-65.
- [9] SHI Lingling, YAO He, SHAN Minghe, et al. Robust control of a space robot based on an optimized adaptive variable structure control method[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 120: 107267.

- [10] ZHAN Bowen, JIN Minghe, YANG Guocai, et al. Finite-time adaptive control for the dual-arm space robots with uncertain kinematics, dynamics and dead-zone nonlinearities[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(22): 6435-6450.
- [11] 史玲玲,姚鹤,金鑫,等.空间机器人的可变增益滑模控制方法[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(7):99-107,115.  
SHI Lingling, YAO He, JIN Xin, et al. A variable gain sliding mode control method for space robots[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(7): 99-107, 115.
- [12] 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.  
FU Xiaodong, CHEN Li. An adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control algorithm based WNN for flexible-base flexible-joint and flexible-link space robot[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(5): 672-679.
- [13] 谢箭,刘国良,颜世佐,等.基于神经网络的不确定性空间机器人自适应控制方法研究[J].宇航学报,2010,31(1):123-129.  
XIE Jian, LIU Guoliang, YAN Shizuo, et al. Study on neural network adaptive control method for uncertain space manipulator[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1): 123-129.
- [14] ZHANG Wenhui, SHEN Jinmiao, YE Xiaoping, et al. Error model-oriented vibration suppression control of free-floating space robot with flexible joints based on adaptive neural network[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 114: 105028.
- [15] HU Shuang, WANG Lihang, LI Yongquan, et al. Variable universe fuzzy controller for an independent metering system of construction machinery[J]. Processes, 2023, 11(3): 901.
- [16] PAN Haipeng, JIN Dongbin. Design and application of variable universe fuzzy controller based on cat swarm optimization[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 4632064.
- [17] ZHAO Ge, WANG Jian, LI Wei, et al. Master and auxiliary compound control for multi-channel confluent water supply switching control based on variable universe fuzzy PID[J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(22): 7983.
- [18] WU Tiezhou, CHEN Liuliang, XU Yuhong, et al. Balancing method of retired battery pack based on variable domain fuzzy control[J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2023, 20(4): 1-41.
- [19] MODIRROUSTA A, ZEINI S M, BINAZADEH T. Non-linear optimal fuzzy control synthesis for robust output tracking of uncertain micro-electro-mechanical systems[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2017, 39(8): 1146-1160.
- [20] 李洪兴. Fuzzy控制的本质与一类高精度Fuzzy控制器的设计[J]. 控制理论与应用, 1997(6): 868-872.  
LI Hongxing. The essence of Fuzzy control and a kind of fine Fuzzy controller[J]. Control Theory and Applications, 1997(6): 868-872.
- [21] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学E辑:技术科学, 1999(1): 32-42.

(编辑:胥橙庭)