

惯性参数未知双臂空间机器人自适应模糊控制

陈志侃¹, 张国良¹, 原磊², 吴戈¹

(1. 第二炮兵工程大学, 西安 710025; 2. 中航飞机股份有限公司研发中心适航技术所, 陕西 阎良 710000)

摘要: 惯性参数未知将导致空间机器人系统的模型不精确,使得常用的关节运动轨迹跟踪控制方法失效。针对该问题,提出一种基于自适应模糊算法的关节运动轨迹跟踪控制方法。基于模糊系统的万能逼近特性,利用参数自适应调节方法在线辨识空间机器人系统模型,解决空间机器人不具有惯性参数的先验知识和惯常线性性质的问题;设计自适应模糊控制器,实现对双臂空间机器人系统的关节空间轨迹跟踪控制;通过构造李亚普诺夫函数证明了该模糊控制系统的稳定性。数值仿真实验结果验证了所提控制方案的有效性。

关键词: 自适应模糊控制; 惯性参数未知; 双臂空间机器人; 万能逼近特性

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)11-0089-06

Adaptive Fuzzy Control for Dual-Arm Space Robot System with Unknown Inertial Parameters

CHEN Zhi-kan¹, ZHANG Guo-liang¹, YUAN Lei², WU Ge¹

(1. The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. Airworthiness Technology Department of AVIC Aircraft Company R&D Center, Yanliang 710000, China)

Abstract: The unknown inertial parameters will result in inaccurate space robot system model and make making the common joint movement trajectory tracking control method become invalid. To solve the problem, a new joint movement trajectory tracking control method based on adaptive fuzzy algorithm is proposed. Based on the universal approximation property of fuzzy system, a parameter adaptive regulation method is used to identify the space robot system model online, solving the problems that space robot does not possess the prior knowledge of inertial parameters and usual linear properties. An adaptive fuzzy controller is designed, to realize joint space trajectory tracking control for dual-arm space robot system; and Lyapunov function is constructed to prove the stability of this fuzzy control system. The numerical simulation result verifies the validity of the proposed control method.

Key words: adaptive fuzzy control; inertial parameters unknown; dual-arm space robot; universal approximation property

0 引言

相比于单臂空间机器人系统,双臂空间机器人系统由其所处的微重力环境带来的强耦合及非线性增强,导致其运动规划、动力学控制问题更为复杂。但该系统具有承载能力大、抓取载荷稳、定位精度高等优点,引起了国内外研究人员的广泛关注^[1-5]。

文献[6]给出了双臂空间机器人关节运动的非线

性反馈控制规律,实现了双臂空间机器人关节运动控制,但该方法需要预先精确地获得系统的参数且对模型精度要求较高;文献[7]针对系统参数不确定情况,设计了一种自由漂浮双臂空间机器人系统惯性空间轨迹跟踪的鲁棒混合自适应控制方法,克服了空间机器人系统控制方程关于惯性参数的非线性问题,但该方法建模过程复杂,计算量较大;文献[8]针对存在外部扰动和未知系统惯性参数的情况,设计了一种基于模糊基函数网络的自适应调节控制方案,但该方案仅针对姿态受控的双臂空间机器人。

针对上述问题,考虑空间环境下机器人惯性参数未知的情况,利用模糊系统的万能逼近特性,通过调节

自适应参数在线辨识获得空间机器人系统模型,进而提出一种基于自适应模糊算法的自由漂浮双臂空间机器人控制方法,该方法克服了空间机器人系统控制方程关于惯性参数的非线性问题。

1 动力学建模

考虑双臂两连杆平面自由漂浮空间机器人系统,系统结构如图1所示。

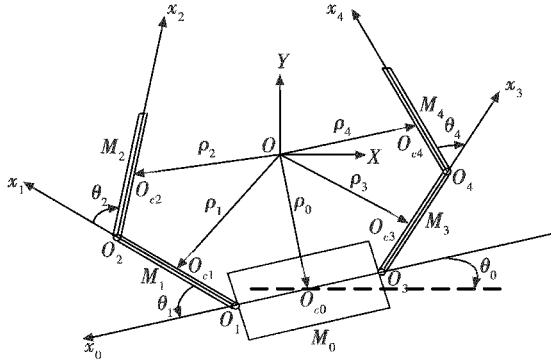


图1 双臂空间机器人系统

Fig. 1 Dual-arm space robot system

设该系统由一个自由漂浮基座 M_0 及4个机械臂 M_1, M_2, M_3, M_4 组成,建立各分体 $M_i (i=0, 1, 2, 3, 4)$ 的主轴坐标系 (O_i-x_i, y_i) , 并设 $e_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为 x_i 轴的基矢量,其中 O_0 与 M_0 的质心 O_{c0} 重合; O_1, O_2, O_3, O_4 分别为连接 M_1 与 M_0, M_2 与 M_1, M_3 与 M_0, M_4 与 M_3 的转动幅中心; $x_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为机械臂的对称轴。设 O_0 在 O_0e_0 轴上与 O_1 的距离为 $l_0, M_i (i=0, 1, 2, 3, 4)$ 沿轴 $e_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的长度为 $l_i (i=1, 2, 3, 4)$; 质心 O_{ci} 在轴 e_i 上与 O_i 的距离为 $a_i (i=1, 2, 3, 4)$; 各分体的质量和中心惯量张量分别为 m_i 和 $J_i, M = \sum m_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为系统总质量; O 为系统总质心。

忽略微弱的重力梯度,由系统的动量守恒关系及 Lagrange 第二类方程,可导出载体姿态、位置均不受控制的情况下,自由漂浮双臂空间机器人系统的动力学方程^[9]为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = \tau \quad (1)$$

式中: $M(q)$ 为系统对称、正定质量矩阵, $M(q) \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$; $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 为包含哥氏力和离心力的广义力矢量, $C(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathbf{R}^{4 \times 1}$; τ 为机械臂4个关节幅的控制力矩组成的4维列矢量, $\tau = (\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4)^T$; q 为系统坐标组成的列矢量, $q = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)^T$ 。

2 问题分析

由式(1)中 $M(q)$ 为系统对称、正定质量矩阵,可将空间机器人动力学模型转化为非线性系统描述形式

$$\ddot{q} = F(q, \dot{q}) + G(q)\tau \quad (2)$$

其中

$$F(q, \dot{q}) = (f_1(q, \dot{q}) \cdots f_p(q, \dot{q}))^T = -M^{-1}(q) \cdot C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} \quad (3)$$

$$G(q) = \begin{pmatrix} g_{11}(q) & \cdots & g_{1p}(q) \\ \vdots & & \vdots \\ g_{p1}(q) & \cdots & g_{pp}(q) \end{pmatrix} = M^{-1}(q) \quad (4)$$

定义

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (5)$$

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \quad (6)$$

$$v(t) = \ddot{q}_d(t) + \lambda \dot{e}(t) \quad (7)$$

式中: $q_d(t)$ 为关节运动的期望轨迹; $q(t)$ 为关节运动的实际轨迹。

联立式(2)、式(5)和式(6)可得

$$\dot{s}(t) = \ddot{e}(t) + \lambda \dot{e}(t) = \ddot{q}_d(t) - \ddot{q}(t) + \lambda \dot{e}(t) = v(t) - F(q, \dot{q}) - G(q)\tau \quad (8)$$

当非线性函数 $F(q, \dot{q})$ 和 $G(q)$ 已知时,可设计线性控制律为

$$\tau_c = G^{-1}(q)(-F(q, \dot{q}) + v + K_0 s) \quad (9)$$

由式(1)及式(9)可以看出,精确模型的建立是控制器设计的前提条件,而建模过程中惯性矩阵 $M(q)$ 和 $C(q, \dot{q})$ 的获取十分依赖于诸如机器人基座及连杆的质量、长度、惯量张量等惯性参数。然而,在空间环境下的机器人惯性参数往往难以精确测量,且存在诸多不确定因素,即非线性函数 $f_i(q, \dot{q})$ 和 $g_{ij}(q)$ 是未知的,这导致上述控制方法失效。此外,双臂空间机器人系统所处的微重力环境使得其具有动力学与运动学的强耦合及非线性特点,导致其动力学方程不满足关于惯性参数的线性函数关系。因此,即便精确获得惯性参数,也会使得针对地面机械臂的控制方法失效。

针对该问题,模糊控制能够将人类的操作经验结合到控制器中,是一种相对较为成熟的控制方法,并且已经在工程中实际使用,具有较好的理论和实践基础。当被控对象的模型不确定或无法用数学方法对系统建模时,可以采用模糊方法来设计控制器。而自适应模糊控制把模糊逻辑系统的万能逼近能力和自适应方法的学习能力结合起来,以保证非线性、高阶、时变复杂系统的稳定性。

3 基于惯性参数未知的自适应模糊控制器设计

3.1 模糊系统逼近原理分析

模糊系统的万能逼近特性使得模糊逻辑系统能够在任意精度上一致逼近任何定义在一个致密集上的非

线性函数^[10]。

假设模糊系统是由 $U \subseteq \mathbf{R}^n$ 到 \mathbf{R} 的映射, $U = U_1 \times \dots \times U_n, U_i \subset \mathbf{R}, i = 1, 2, \dots, n$ 。第 l 条模糊规则可表示为

$$R^{(l)}: \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l, \\ \text{THEN } y^l \text{ is } C^l \quad l = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

式中: $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in U, y \in V \subset \mathbf{R}$ 分别为模糊系统的输入和输出。

采用单值模糊器、乘积推理机和重心平均反模糊器来设计模糊系统, 则模糊系统的输出为

$$y(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)} \quad (11)$$

式中: l 为所选择的隶属度函数的个数; n 为输入量的个数; M 为模糊规则的总条数; \bar{y}^l 是隶属度 u_c^l 为最大值所对应点的值, $u_c^l(\bar{y}^l) = 1$ 。

相应的模糊基函数定义为

$$\xi_l(\mathbf{x}) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)} \quad (12)$$

则式(12)可表示为

$$y(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\xi}^T(\mathbf{x}) \boldsymbol{\theta} \quad (13)$$

式中: $\boldsymbol{\theta} = (y^1, \dots, y^M)^T$ 为参数向量; $\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) = (\xi_1(\mathbf{x}), \dots, \xi_M(\mathbf{x}))^T$ 为回归向量。

可见, 一个模糊基函数对应一条模糊 IF-THEN 规则, 且不同的模糊逻辑系统具有不同形式的模糊基函数, 其相应的隶属度函数可以取高斯形、三角形、梯形等多种形式。文献[11-12]利用 Stone-Weierstrass 定理证明了形式如式(11)的高斯型模糊逻辑系统具有万能逼近特性。

3.2 自适应模糊控制器设计

针对惯性参数未知问题, 利用模糊逻辑系统的万能逼近特性, 依据形式如式(13)的高斯型模糊逻辑系统, 采用 $\hat{F}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_f)$ 和 $\hat{G}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g)$ 逼近式(9)中的 $F(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 和 $G(\mathbf{q})$ 。

由于 $F(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 是关于关节角速度 \mathbf{q} 以及速度变化率 $\dot{\mathbf{q}}$ 的函数, $G(\mathbf{q})$ 是仅关于关节角速度 \mathbf{q} 的函数, 因此分别选取 $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$ 作为模糊基函数向量 $\boldsymbol{\xi}_f(\mathbf{x})$ 的输入量, 选取 \mathbf{q} 作为模糊基函数向量 $\boldsymbol{\xi}_g(\mathbf{x})$ 的输入量。

按照式(12)分别构造模糊基函数向量 $\boldsymbol{\xi}_{f_i}(\mathbf{x}), \boldsymbol{\xi}_{g_j}(\mathbf{x})$, 其中, 模糊系统的输入量为 $\mathbf{x} = (q_1, q_2, q_3, q_4, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4), n_1 = 8, n_2 = 4, l = 3, M_1 = 3^8, M_2 = 3^4, \mu_{F_i^l}(x_i)$ 为模糊系统高斯型隶属度函数, 具体设计为

$$\begin{cases} \mu_{F_1^l}(x_i) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i + 1.25}{0.6}\right)^2\right) \\ \mu_{F_2^l}(x_i) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i}{0.6}\right)^2\right) \\ \mu_{F_3^l}(x_i) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - 1.25}{0.6}\right)^2\right) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (14)$$

由此得到模糊逼近系统的具体表达形式为

$$\hat{F}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_f) = (\hat{f}_1(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_{f_1}) \quad \dots \quad \hat{f}_n(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_{f_n})) \quad (15)$$

$$\hat{G}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g) = \begin{pmatrix} \hat{g}_{11}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_{g_{11}}) & \dots & \hat{g}_{1n}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_{g_{1n}}) \\ \vdots & & \vdots \\ \hat{g}_{n1}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_{g_{n1}}) & \dots & \hat{g}_{nn}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_{g_{nn}}) \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\hat{f}_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_{f_i}) = \boldsymbol{\xi}_{f_i}^T(\mathbf{x}) \boldsymbol{\theta}_{f_i} \quad i = 1, \dots, n \quad (17)$$

$$\hat{g}_{ij}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_{g_{ij}}) = \boldsymbol{\xi}_{g_{ij}}^T(\mathbf{x}) \boldsymbol{\theta}_{g_{ij}} \quad i = 1, \dots, n \quad (18)$$

式中, $\boldsymbol{\theta}_{f_i}$ 和 $\boldsymbol{\theta}_{g_{ij}}$ 是自适应调节参数向量。

进而, 利用模糊逼近所得的非线性函数 $\hat{F}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_f)$ 和 $\hat{G}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g)$, 设计控制律为

$$\boldsymbol{\tau}_c = \hat{G}^{-1}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g) [-\hat{F}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_f) + \mathbf{v} + \mathbf{K}_0 \mathbf{s}] \quad (19)$$

考虑 $\hat{G}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g)$ 可能存在非奇异, 采用广义逆 $\hat{G}^T(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g) [\xi_0 \mathbf{I}_p + \hat{G}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g) \hat{G}^T(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g)]^{-1}$ 代替 $\hat{G}^{-1}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g)$, 则控制律变为

$$\boldsymbol{\tau}_c = \hat{G}^T(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g) [\xi_0 \mathbf{I}_p + \hat{G}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g) \hat{G}^T(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g)]^{-1} \cdot (-\hat{F}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_f) + \mathbf{v} + \mathbf{K}_0 \mathbf{s}) \quad (20)$$

式中: ξ_0 为任意小的正实数; \mathbf{I}_p 为单位阵。

为了抑制建模误差扰动, 引入鲁棒控制项 $\boldsymbol{\tau}_r$, 则控制律为

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_c + \boldsymbol{\tau}_r \quad (21)$$

$$\boldsymbol{\tau}_r = \frac{\mathbf{s} |\mathbf{s}^T| (|\bar{\boldsymbol{\xi}}_f + \bar{\boldsymbol{\xi}}_g| |\boldsymbol{\tau}_c| + |\boldsymbol{\tau}_0|)}{\sigma_0 \|\mathbf{s}\|^2 + \delta} \quad (22)$$

$$\boldsymbol{\tau}_0 = \xi_0 [\xi_0 \mathbf{I}_p + \hat{G}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g) \hat{G}^T(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_g)]^{-1} \cdot (-\hat{F}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_f) + \mathbf{v} + \mathbf{K}_0 \mathbf{s}) \quad (23)$$

式中, δ 为一个时变参数。

自适应控制律为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{f_i} = -\eta_{f_i} \boldsymbol{\xi}_{f_i}(\mathbf{x}) s_i \quad (24)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_{g_{ij}} = -\eta_{g_{ij}} \boldsymbol{\xi}_{g_{ij}}(\mathbf{x}) s_i \tau_{ij} \quad (25)$$

$$\dot{\delta} = -\eta_0 \frac{|\mathbf{s}^T| (|\bar{\boldsymbol{\xi}}_f + \bar{\boldsymbol{\xi}}_g| |\boldsymbol{\tau}_c| + |\boldsymbol{\tau}_0|)}{\sigma_0 \|\mathbf{s}\|^2 + \delta} \quad (26)$$

式中: $\boldsymbol{\xi}_{f_i}(\mathbf{x})$ 和 $\boldsymbol{\xi}_{g_{ij}}(\mathbf{x})$ 为最小模糊逼近误差, 且最小逼近误差有界, 即 $|\boldsymbol{\xi}_{f_i}(\mathbf{x})| < \bar{\boldsymbol{\xi}}_{f_i}, |\boldsymbol{\xi}_{g_{ij}}(\mathbf{x})| < \bar{\boldsymbol{\xi}}_{g_{ij}}, \bar{\boldsymbol{\xi}}_{f_i}, \bar{\boldsymbol{\xi}}_{g_{ij}}$ 为已知常量; $\eta_{f_i} > 0, \eta_{g_{ij}} > 0, \eta_0 > 0, \delta(0) > 0$ 。

由此设计基于惯性参数未知的自由漂浮双臂空间

机器自适应模糊控制系统如图2所示。

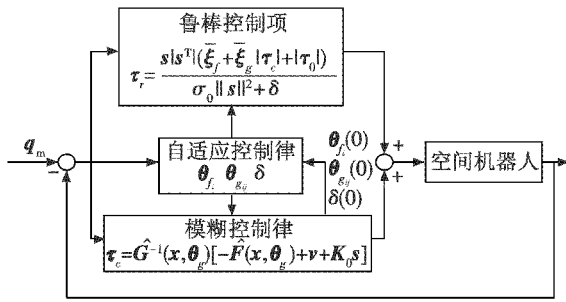


图2 自适应模糊控制系统

Fig.2 Adaptive fuzzy control system

4 稳定性分析

选取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} s^T s + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p \frac{1}{\eta_f} \tilde{\theta}_f^T \tilde{\theta}_f + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \frac{1}{\eta_{g_s}} \tilde{\theta}_{g_s}^T \tilde{\theta}_{g_s} + \frac{1}{2\eta_0} \delta^2 \quad (27)$$

则

$$\dot{V} = s^T \dot{s} - \sum_{i=1}^p \frac{1}{\eta_f} \tilde{\theta}_f^T \dot{\tilde{\theta}}_f - \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \frac{1}{\eta_{g_s}} \tilde{\theta}_{g_s}^T \dot{\tilde{\theta}}_{g_s} + \frac{1}{\eta_0} \delta \dot{\delta} \quad (28)$$

由式(6)和式(8)可得

$$s^T \dot{s} = -s^T K_0 s - \sum_{i=1}^p \xi_f^T(x) \tilde{\theta}_f s_i - \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \xi_{g_s}^T(x) \tilde{\theta}_{g_s} s_i \tau_{oj} - s^T G(x) \tau_r + s^T \tau_0 - s^T \xi_f(x) \tau_c - s^T \xi_g(x) \tau_c \quad (29)$$

则有

$$\dot{V} = -s^T K_0 s + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \quad (30)$$

式中:

$$\dot{V}_1 = - \sum_{i=1}^p \tilde{\theta}_f^T (\xi_f(x) s_i + \frac{1}{\eta_f} \dot{\tilde{\theta}}_f) - \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \tilde{\theta}_{g_s}^T (\xi_{g_s}(x) s_i \tau_{oj} + \frac{1}{\eta_{g_s}} \dot{\tilde{\theta}}_{g_s}) ; \quad (31)$$

$$\dot{V}_2 = -s^T G(x) \tau_r + s^T \tau_0 - s^T \xi_f(x) \tau_c - s^T \xi_g(x) \tau_c + \frac{1}{\eta_0} \delta \dot{\delta} \quad (32)$$

将式(24)、式(25)代入式(31)得

$$\dot{V}_1 = 0 \quad (33)$$

由式(4)可知, $G(x)$ 为正定矩阵, 且存在实数 $\sigma_0 > 0$, 满足 $G(x) \geq \sigma_0 I_p$, 则可推出 $s^T G(x) s \geq \sigma_0 \|s\|^2$, 并由式(22)得

$$s^T G(x) \tau_r = s^T G(x) \frac{s |s^T |(\bar{\xi}_f + \bar{\xi}_g | \tau_c | + | \tau_0 |)|}{\sigma_0 \|s\|^2 + \delta} \geq \sigma_0 \|s\|^2 |s^T |(\bar{\xi}_f + \bar{\xi}_g | \tau_c | + | \tau_0 |)| \frac{1}{\sigma_0 \|s\|^2 + \delta} = (\sigma_0 \|s\|^2 + \delta - \delta) |s^T |(\bar{\xi}_f + \bar{\xi}_g | \tau_c | + | \tau_0 |) \cdot$$

$$\frac{1}{\sigma_0 \|s\|^2 + \delta} = |s^T |(\bar{\xi}_f + \bar{\xi}_g | \tau_c | + | \tau_0 |) - \frac{\delta |s^T |(\bar{\xi}_f + \bar{\xi}_g | \tau_c | + | \tau_0 |)}{\sigma_0 \|s\|^2 + \delta} \quad (34)$$

由式(32)得

$$\dot{V}_2 \leq -s^T G(x) \tau_r + |s^T |(\bar{\xi}_f + \bar{\xi}_g | \tau_c | + | \tau_0 |) + \frac{1}{\eta_0} \delta \dot{\delta} \quad (35)$$

将式(34)代入式(35)可得

$$\dot{V}_2 \leq \frac{\delta |s^T |(\bar{\xi}_f + \bar{\xi}_g | \tau_c | + | \tau_0 |)}{\sigma_0 \|s\|^2 + \delta} + \frac{1}{\eta_0} \delta \dot{\delta} \quad (36)$$

将式(26)代入式(36)可得

$$\dot{V}_2 \leq 0 \quad (37)$$

从而

$$\dot{V} \leq -s^T K_0 s = - \sum_{i=1}^p k_{0i} s_i^2 \quad (38)$$

由此得出结论: \dot{V} 负半定, $V \in L_\infty$, 即为非递增函

数且有界, 则信号 $s_i(t)$, $\tilde{\theta}_f(t)$, $\tilde{\theta}_{g_s}(t)$ 有界, 从而 $\theta_f(t)$, $\theta_{g_s}(t)$, x , τ 和 $\dot{s}_i(t)$ 有界。

对式(38)积分, 得

$$\int_0^\infty \sum_{i=1}^p k_{0i} s_i^2(t) dt \leq V(0) - V(t) < \infty \quad (39)$$

式(39)表明, $s_i(t) \in L_2$, 且由上述分析又可知 $s_i(t) \in L_2 \cap L_\infty$, 又由于 $\dot{s}_i(t) \in L_\infty$, 则根据自适应系统的稳定性引理^[13], 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s_i(t) \rightarrow 0$ 。即闭环系统的所有信号有界, 且当 $t \rightarrow \infty$ 时 $e_i^{(j)}(t) \rightarrow 0, i=1, \dots, p, j=1, \dots, r_i-1$ 。

因此, 由式(21)~式(23)控制律以及式(24)~式(26)自适应律设计的自适应模糊控制方法, 能够在双臂空间机器人系统惯性参数未知的情况下, 控制机械臂各关节渐近稳定地完成期望轨迹的关节运动。

5 仿真算例

以图1所示的做平面运动的自由漂浮双臂空间机器人系统为例。假定系统的初始模型参数分别为: $m_0 = 400.0 \text{ kg}, m_1 = m_3 = 10.0 \text{ kg}, m_2 = m_4 = 7.0 \text{ kg}, l_0 = 1.0 \text{ m}, l_1 = l_3 = 1.5 \text{ m}, l_2 = l_4 = 2.0 \text{ m}, a_1 = a_3 = 0.75 \text{ m}, a_2 = a_4 = 1.0 \text{ m}, J_0 = 180.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_1 = J_3 = 4.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_2 = J_4 = 3.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

仿真过程中, 假设双臂空间机器人系统的惯性参数是未知的。设双臂空间机器人系统机械臂各关节在关节空间的期望运动规律为

$$\begin{cases} q_{1d} = -0.7 \cos t - 0.5 \sin 2t + \pi/5 \\ q_{2d} = 0.7 \cos t + 0.5 \sin 2t + \pi/3 \\ q_{3d} = -0.7 \cos t - 0.5 \sin 2t + \pi/4 \\ q_{4d} = 0.7 \cos t + 0.5 \sin 2t + \pi/3 \end{cases} \circ$$

系统运动的初始值为： $x_0(0) = 0 \text{ m}, y_0(0) = 0 \text{ m}, q_0(0) = \pi/3 \text{ rad}, q_1(0) = \pi/5 \text{ rad}, q_2(0) = \pi/4 \text{ rad}, q_3(0) = \pi/3 \text{ rad}, q_4(0) = \pi/6 \text{ rad}。$

采用式(21) ~ 式(23)控制律以及式(24) ~ 式(26)自适应律,根据实际操作经验和主观感知,选取高斯型函数如式(14)作为模糊系统的隶属度函数,其函数图如图 3 所示。

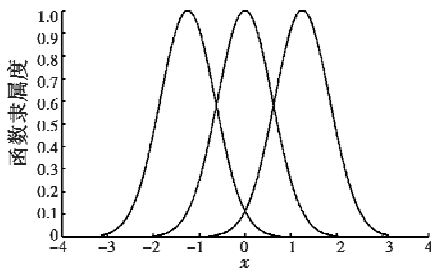


图 3 x_i 的隶属度函数

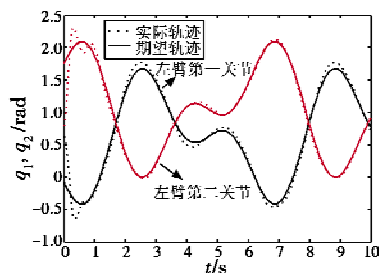
Fig. 3 Membership function degree of x_i

选取系统中其他控制参数为： $\lambda_1 = 30, \lambda_2 = 30, K_0 =$

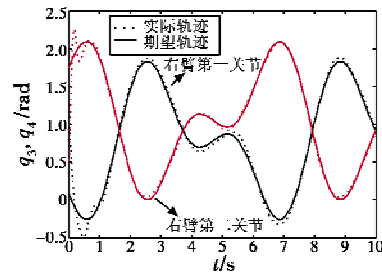
$$5I_4, \xi_0 = 0.1, \eta_f = 0.5, \eta_{\xi_f} = 0.5, \eta_0 = 0, \bar{\xi}_{\xi} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \end{pmatrix}, \lambda_1 = 30, \bar{\xi}_f = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.2 \\ 0.2 \\ 0.2 \end{pmatrix}^T \circ$$

整个追踪过程耗时 $t = 10.0 \text{ s}$ 。在关节空间中,自由漂浮双臂空间机器人左、右机械臂,各关节实际运动轨迹(虚线)与期望运动轨迹(实线)的比较情况如图 4 所示,其对应的各关节轨迹跟踪误差如图 5 所示。

由图 4a 和图 4b 可以看出,左、右臂各关节角度在 1 s 内,基本上实现了对期望轨迹的跟踪;同时,图 5 也体现了所设计控制器对系统干扰的抑制能力,系统跟踪的误差保持在 $\pm 0.01 \text{ rad}$ 的范围内,可以满足实际的工程需要。仿真结果表明,本文所设计的自适应模糊控制器,能够在惯性参数未知的前提下,对自由漂浮双臂空间机器人关节空间的轨迹进行有效的跟踪控制。



a 左臂各关节



b 右臂各关节

图 4 左、右臂各关节的实际与期望运动轨迹

Fig. 4 Actual and desired trajectory of left/right arm in joint space

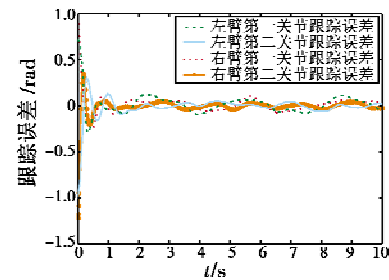


图 5 左、右臂各关节的轨迹跟踪误差图

Fig. 5 Trajectory tracking error of left/right arm in joint space

6 结束语

本文针对惯性参数未知状态下自由漂浮双臂空间机器人关节运动控制问题,提出一种基于自适应模糊算法的自由漂浮双臂空间机器人控制方法,并通过数值仿真,验证了该方法的有效性。然而要指出的是,该控制器设计需要知道空间机器人模型的最小有界逼近误差,对于最小逼近误差上界未知情况下的轨迹跟踪控制问题,需做进一步研究。

参考文献

- [1] FLORES-ABAD A, MA O, PHAM K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing [J]. Aerospace Sciences, 2014, 68:1-26.
- [2] MONTEMERLO M. 25 years of space automation and robotics at NASA: an historical perspective [C]//Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space; Quebec, Canada; Canadian Space Agency, 2001:192-197.
- [3] EVANS L. Canadian space robotics on board the international space station [C]//CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines, and Mechatronics. Montreal, Canada; Canadian Space Agency, 2005:47-53.
- [4] 甘亚辉,戴先中. 多机械臂协调控制研究综述[J]. 控制

- 与决策, 2013, 28(3):380-384. (GAN Y H, DAI X Z. Survey of coordinated multiple manipulator control[J]. Control and Decision, 2013, 28(3):380-384.)
- [5] 朱建军, 黄樊. 空间机器人姿态稳定方法研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(7):177-180. (ZHU J J, HUANG F. Attitude stabilization method of space robot[J]. Computer Simulation, 2011, 28(7):177-180.)
- [6] 葛景华, 陈力. 双臂空间机器人系统动力学与关节运动的非线性反馈控制[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2006, 34(3):370-374. (GE J H, CHEN L. Dynamics and nonlinear feedback control of joint motion for the dual-arm space robot[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2006, 34(3):370-374.)
- [7] 唐晓腾, 陈力. 双臂空间机器人惯性空间轨迹跟踪的鲁棒混合自适应控制[J]. 工程力学, 2008, 25(12):229-234. (TANG X T, CHEN L. Robust and adaptive composite control of space robot system with dual-arm [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12):229-234.)
- [8] 黄登峰, 陈力. 双臂空间机器人协调运动的模糊基函数网络控制[J]. 工程力学, 2012, 29(8):50-56. (HUANG D F, CHEN L. Fuzzy basis function network control for coordinated motion of a dual-arm space robot[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8):50-56.)
- [9] 葛景华. 双臂空间机器人运动学、动力学及控制[D]. 福州:福州大学, 2005. (GE J H. The kinematics, dynamics and control of dual-arm space robot system [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.)
- [10] 石如冬. 自适应模糊控制算法研究及其实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008. (SHI R D. Study on adaptive fuzzy control algorithm and its implementation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.)
- [11] 王立新. 自适应模糊系统与控制—设计与稳定性分析[M]. 北京:国防工业出版社, 1995. (WANG L X. Adaptive fuzzy system and control—design and stability analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.)
- [12] WANG L X. Design and analysis of fuzzy identifiers of nonlinear dynamic systems[J]. IEEE Transactions Automatic Control, 1995, 40(1):11-23.
- [13] NARENDRA K S, ANNASWAMY A M. Stable adaptive systems[M]. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1989.

(上接第 71 页)

- [2] ROY R, KAILATH T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques [J]. IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing, 1989, 37(7):984-995.
- [3] JIN M H, LEE J H, LEE H H, et al. Performance comparison of 2D MUSIC and root-MUSIC algorithms for anti-jamming in GPS receiver[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2011, 60(11):2131-2138.
- [4] ZHUANG J, LI W, MANIKAS A. An IDFT-based root-MUSIC for arbitrary arrays [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Dallas, 2010:2614-2617.
- [5] HAARDT M, NOSSEK J A. Unitary ESPRIT; how to obtain increased estimation accuracy with a reduced computational burden [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(5):1232-1242.
- [6] FRANCSCO B, WIM V R, PETER H. 2D-MUSIC technique applied to a coherent FMCW MIMO radar [C]//IET International Conference on Radar Systems, Glasgow, 2012:1-6.
- [7] KURODA T, KIKUMA N, INAGAKI N. DOA estimation and pairing method in 2D-ESPRIT using triangular antenna array [J]. Electronics and Communications in Japan, Part I: Communications, 2003, 86(6):59-68.
- [8] KITADA T, OZAWA J, CHENG J, et al. DOA estimation based on 2D-ESPRIT algorithm with multiple subarrays in hexagonal array [C]//Processing of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Suzou, 2010:1-6.
- [9] HAARDT M, MICHAEL D. 2D Unitary ESPRIT for efficient 2D parameter estimation [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Detroit, 1995:2096-2099.
- [10] 杨涛, 喻晓红, 甘露. 一种用于二维 DOA 估计的新颖 Unitary ESPRIT 算法 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(15):123-128. (YANG T, YU X H, GAN L. New 2-D Unitary ESPRIT algorithm for DOA estimation [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(15):123-128.)
- [11] 张远安, 董国, 张艳艳. 基于 Unitary-ESPRIT 算法的二维 DOA 估计 [J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(5):109-116. (ZHANG Y A, DONG G, ZHANG Y Y. 2-D DOA estimation based on Unitary-ESPRIT algorithm [J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(5):109-116.)