

DOI:10.11992/tis.201510017

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20160824.0929.008.html>

# 基于模糊滑模的多机器人系统编队控制

钱殿伟

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

**摘要:**针对多机器人编队控制问题,提出了一种滑模控制与模糊逻辑相结合的控制方法。运用领航—跟随法,建立机器人系统的动力学模型。该模型具有不确定性,在不确定性上界未知的假设条件下,运用模糊逻辑,设计模糊补偿器,以逼近系统的不确定性部分。基于 Lyapunov 理论,证明所设计的模糊滑模编队控制系统具有渐近稳定性,同时模糊补偿器的逼近误差是收敛的。仿真结果表明,该方法可使多机器人系统迅速地形成所期望的队形,并在运动中保持该队形。

**关键词:**多机器人;编队控制;不确定性;滑模控制;模糊逻辑

**中图分类号:**TP242.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2016)05-0641-07

**中文引用格式:**钱殿伟.基于模糊滑模的多机器人系统编队控制[J].智能系统学报,2016,11(5):641-647.

**英文引用格式:**QIAN Dianwei. Formation control of multi-robot systems in a fuzzy sliding mode [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2016, 11(5): 641-647.

## Formation control of multi-robot systems in a fuzzy sliding mode

QIAN Dianwei

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** To resolve the formation problem resulting from a swarm of robots, a control scheme is proposed based on sliding mode control and fuzzy logic. A formation dynamic model is established utilizing the leader - follower approach. The model is subject to uncertainties. If the upper bounds of these uncertainties are unknown, then a fuzzy compensator can be adopted to approximate the uncertainties. From an Lyapunov approach, not only is the sliding-mode-based formation control system asymptotically stable, but the approximate error of the fuzzy compensator is also convergent. The simulation results demonstrate that the robots can rapidly form and maintain the desired specified geometrical shapes during movement.

**Keywords:** multi-robot; formation control; uncertainties; sliding model control; fuzzy logic

多机器人编队系统相比复杂单机器人系统具有诸多优点,在工业制造、地理勘测、太空探索等领域具有广泛的应用前景,目前已成为研究的热点问题之一。多机器人编队控制方法主要有行为法<sup>[1]</sup>、虚拟结构法<sup>[2]</sup>、领航—跟随法<sup>[3-4]</sup>及人工势场法<sup>[5]</sup>等。其中,领航—跟随法因其控制简单,易于实现分布式控制,可将整个编队控制问题简化为若干独立的轨迹跟踪控制问题,在多机器人编队控制方面应用广泛。采用领航—跟随法,常用的控制算法有反馈线

性化<sup>[6]</sup>、预测控制<sup>[7]</sup>、滑模控制<sup>[8-9]</sup>及智能控制<sup>[10-11]</sup>等。

就模型而言,多机器人编队控制分为基于运动学模型的控制和基于动力学模型的控制。在实际应用中,多机器人编队系统受到负载变化、参数摄动、测量噪声、摩擦、传动系统的非线性及外部扰动等不确定性的影响<sup>[3]</sup>。基于模型的控制方法难以克服不确定的影响,需要探寻更加有效的控制策略。

滑模控制具有不变性的特点,因其鲁棒性强、响应快速和易于实现等特点被广泛地研究<sup>[6, 10]</sup>。在滑模控制器设计中,为保证控制系统的稳定性,通常要假设已知不确定性的上界。就多机器人编队控制问题而言,这个假设在实际中可能难以满足。模糊

收稿日期:2015-10-22. 网络出版日期:2016-08-24.

基金项目:国家自然科学基金项目(60904008).

通信作者:钱殿伟.E-mail: dianwei.qian@ncepu.edu.cn.

逻辑具有以任意精度逼近非线性连续函数的能力<sup>[10]</sup>,是估计系统中不确定性的可行方法。

针对未知上界的不确定性,本文结合滑模控制和模糊逻辑,研究了多机器人系统编队控制问题。首先,根据跟随者与领航者的相对位置与相对相角,建立编队系统的动力学模型;然后,采用模糊推理系统逼近系统中的不确定性,设计滑模控制器稳定相对位置与相对相角,应用 Lyapunov 条件证明控制系统的稳定性和逼近误差的收敛性;最后,通过仿真实验验证所提出方法的有效性。

## 1 系统描述

本文以半径为  $r$  的圆形非完整轮式移动机器人为对象,其理想运动学和动力学模型见文献[9]。采用领航-跟随者编队方法,在一组由  $n$  个非完整移动机器人组成的编队系统中,选机器人  $i$  为领航者,剩余  $n-1$  个为跟随者。在跟随者中,选择跟随者  $k$  与领航者  $i$  组成编队控制模型,其结构如图 1 所示。

在图 1 中,跟随者  $k$  与领航者  $i$  的相对相角和相对距离分别为

$$\psi_{ik} = \pi + \zeta_{ik} - \theta_i \quad (1)$$

$$l_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k - r \cos \theta_k)^2 + (y_i - y_k - r \sin \theta_k)^2} \quad (2)$$

式中:  $\zeta_{ik} = \arctan \frac{y_i - y_k - r \sin \theta_k}{x_i - x_k - r \cos \theta_k}$ 。

$$P_1 = -(\pi_{ix} - \pi_{kx}) \cos(\psi_{ik} + \theta_i) - (\pi_{iy} - \pi_{ky}) \sin(\psi_{ik} + \theta_i) + r \pi_{k\theta} \sin \phi_{ik}$$

$$P_2 = \frac{[(\pi_{ix} - \pi_{ky}) \sin(\psi_{ik} + \theta_i) - (\pi_{iy} - \pi_{kx}) \cos(\psi_{ik} + \theta_i) + r \pi_{k\theta} \cos \phi_{ik} - l_{ik} \pi_{i\theta}]}{l_{ik}}$$

$$F_1 = \dot{\psi}_{ik}^2 l_{ik} + 2 \dot{\psi}_{ik} \dot{\theta}_i l_{ik} + \dot{\theta}_i^2 l_{ik} - r \cos \phi_{ik} \dot{\theta}_k^2 - (\dot{y}_k \dot{\theta}_k - \dot{y}_i \dot{\theta}_i) \cos(\psi_{ik} + \theta_i) - (\dot{x}_i \dot{\theta}_i - \dot{x}_k \dot{\theta}_k) \sin(\psi_{ik} + \theta_i)$$

$$F_2 = \frac{[-(\dot{y}_k \dot{\phi}_{ik} - \dot{\psi}_{ik} \dot{y}_i) \sin(\psi_{ik} + \theta_i) - (\dot{x}_k \dot{\phi}_{ik} - \dot{\psi}_{ik} \dot{x}_i) \cos(\psi_{ik} + \theta_i) - r \dot{\theta}_k \dot{\phi}_{ik} \sin \phi_{ik}]}{l_{ik}} +$$

$$\frac{[\dot{l}_{ik}((\dot{y}_i - \dot{y}_k) \cos(\psi_{ik} + \theta_i) - (\dot{x}_i - \dot{x}_k) \sin(\psi_{ik} + \theta_i) - r \dot{\theta}_k \cos \phi_{ik})]}{l_{ik}^2}$$

式中:  $\pi_{kx}, \pi_{ky}, \pi_{k\theta}, \pi_{ix}, \pi_{iy}$  和  $\pi_{i\theta} \in \mathbb{R}^1$  分别为领航者和跟随者的不确定性。

建模中主要假设为:领航者与跟随者之间无通讯延迟;领航者与跟随者均可知自身位置和速度;领航者通过通讯将其位置和速度传递给跟随者。

## 2 控制系统设计及稳定性分析

### 2.1 模糊补偿器的设计

模糊推理系统(FIS)的数学本质是从集合  $U \in \mathbb{R}^m$  到  $V \in \mathbb{R}^n$  的非线性映射,其结构图如图 2 所

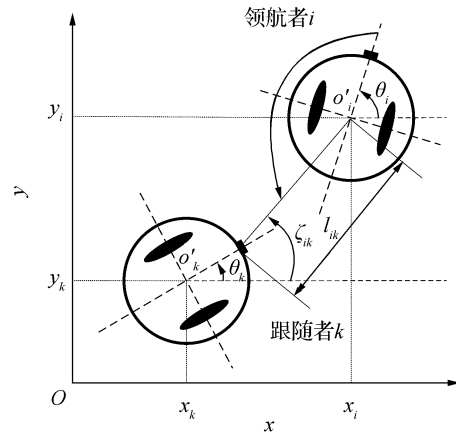


图 1 跟随—领航者编队控制模型

Fig.1 Leader-follower formation of multiple robots

对相对相角(1)和位置(2)求二阶导,令  $\mathbf{x}_{ik} = [\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2]^T = [l_{ik} \psi_{ik}]^T$ ,得到跟随-领航者编队控制的动力学模型的状态空间表达式为

$$\ddot{\mathbf{x}}_{ik} = \mathbf{G}_{ik} \mathbf{u}_k + \mathbf{d}_{ik}(\mathbf{x}_{ik}, \dot{\mathbf{x}}_{ik}, t) \quad (3)$$

令  $\varphi_{ik} = \psi_{ik} + \theta_i - \theta_k$ ,各参数矩阵描述如下

$$\mathbf{d}_{ik}(\mathbf{x}_{ik}, \dot{\mathbf{x}}_{ik}, t) = \mathbf{G}_{ik} \Delta_k \mathbf{u}_k + \mathbf{L}_{ik}(\mathbf{I}_2 + \Delta_i) \mathbf{u}_i + \mathbf{F}_{ik} + \mathbf{P}_{ik}$$

$$\mathbf{G}_{ik} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{ik} & r \sin \varphi_{ik} \\ -\frac{\sin \varphi_{ik}}{l_{ik}} & \frac{r \cos \varphi_{ik}}{l_{ik}} \end{bmatrix}; \mathbf{L}_{ik} = \begin{bmatrix} -\cos \psi_{ik} & 0 \\ \frac{\sin \psi_{ik}}{l_{ik}} & -1 \end{bmatrix};$$

$\mathbf{I}_2$  是  $2 \times 2$  单位矩阵;  $\mathbf{F}_{ik} = [F_1 F_2]^T$ ;  $\mathbf{P}_{ik} = [P_1 P_2]^T$ ;  $\Delta_k$  和  $\Delta_i$  是  $2 \times 2$  扰动矩阵;

示。在图 2 中,输入向量  $\mathbf{a} = [a_1 a_2 \cdots a_m]^T \in U$ ,输出向量  $\mathbf{b} = [b_1 b_2 \cdots b_n]^T \in V$ ,第  $l$  条模糊规则为

$$R_l: \text{If } a_1 \text{ is } A_1^l, a_2 \text{ is } A_2^l, \cdots \text{ and } a_m \text{ is } A_m^l, \\ \text{then } b_1 \text{ is } B_1^l, b_2 \text{ is } B_2^l, \cdots \text{ and } b_n \text{ is } B_n^l.$$

式中:  $A_p^l (p=1, 2, \cdots, m)$  和  $B_q^l (q=1, 2, \cdots, n)$  分别为第  $l$  条规则中语言变量的模糊集合。采用单值模糊器、乘积模糊机和中心平均解模糊器,则 FIS 的第  $q$  个输出为

$$b_q = \sum_{l=1}^M \bar{b}_q \xi_l(\mathbf{a}) = \Theta_q^T \xi(\mathbf{a}) \quad (4)$$

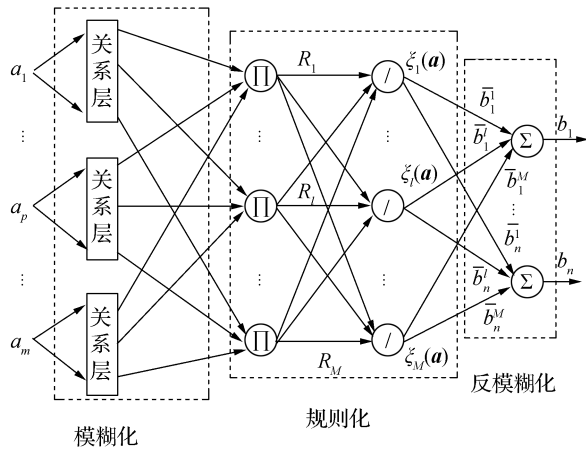


图2 模糊推理系统结构图

Fig.2 Structure of the FIS

式中:  $\xi(a) = [\xi_1(a) \ \xi_2(a) \ \dots \ \xi_M(a)]^T$ ,  $\Theta_q = [\bar{b}_q^1 \ \bar{b}_q^2 \ \dots \ \bar{b}_q^M]^T$ , 且  $\Theta_q$  为参数矩阵  $\Theta_{M \times n}$  的第  $q$  列,  $M$  为模糊规则总数。 $\xi(a)$  是模糊基函数向量, 其中的第  $l$  个元素可表示为

$$\xi_l(a) = \frac{\prod_{p=1}^m \mu_{A_p^l}(a_p)}{\sum_{l=1}^M (\prod_{p=1}^m \mu_{A_p^l}(a_p))} \quad (5)$$

式中  $\mu_{A_p^l}(a_p)$  为高斯型隶属函数。

$$\mu_{A_p^l}(a_p) = \exp\left(-\frac{(a_p - c_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (6)$$

式中  $c_p$  和  $\sigma_p$  分别代表此隶属函数的中心和宽度。

针对多机器人编队设计 FIS, FIS 的输入为  $a = [l_{ik} \ \psi_{ik} \ \dot{l}_{ik} \ \dot{\psi}_{ik}]^T$ , FIS 的输出为不确定性的逼近值, 即  $b = \hat{d}_{ik}(x_{ik}, \dot{x}_{ik}, t)$ 。

FIS 的输入与输出变量均模糊化为负大(NB), 负小(NS), 零(ZO), 正小(PS)和正大(PB)5个模糊子集, 即  $A_p^l = B_p^l = \{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ 。所设计的 FIS 第  $l$  条模糊规则如下:

$$R_l: \text{If } l_{ik} \text{ is } A_1^l, \psi_{ik} \text{ is } A_2^l, \dot{l}_{ik} \text{ is } A_3^l \text{ and } \dot{\psi}_{ik} \text{ is } A_4^l, \\ \text{then } b_1 \text{ is } B_1^l \text{ and } b_2 \text{ is } B_2^l.$$

根据式(4), 不确定性的逼近值可描述为

$$\hat{d}_{ik}(x_{ik}, \dot{x}_{ik} | \Theta) = \begin{bmatrix} \hat{d}_{ik,1}(x_{ik}, \dot{x}_{ik} | \Theta) \\ \hat{d}_{ik,2}(x_{ik}, \dot{x}_{ik} | \Theta) \end{bmatrix} = \quad (7)$$

$$\Theta^T \xi(x_{ik}, \dot{x}_{ik}) = \begin{bmatrix} \Theta_1^T \xi(x_{ik}, \dot{x}_{ik}) \\ \Theta_2^T \xi(x_{ik}, \dot{x}_{ik}) \end{bmatrix}$$

式中: 参数矩阵  $\Theta \in \mathbf{R}^{625 \times 2}$ ,  $\xi(x_{ik}, \dot{x}_{ik}) \in \mathbf{R}^{625 \times 1}$ 。

设  $\Theta$  存在最优参数矩阵  $\Theta^*$ , 且  $\Theta^*$  满足

$$\Theta^* = \underset{\Theta \in \mathcal{X}_0}{\operatorname{argmin}} [\sup \|\hat{d}_{ik}(x_{ik}, \dot{x}_{ik} | \Theta) - d_{ik}(x_{ik}, \dot{x}_{ik}, t)\|] \quad (8)$$

式中  $\mathcal{X}_0$  为包含  $\Theta$  的有界集合。

定义逼近误差的最小值向量为

$$\rho = \hat{d}_{ik}(x_{ik}, \dot{x}_{ik} | \Theta^*) - d_{ik}(x_{ik}, \dot{x}_{ik}, t) \quad (9)$$

式中:  $\rho = [\rho_1 \ \rho_2]^T \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$ 。

针对多机器人编队设计的 FIS 是一个 4 输入 2 输出系统, 输入变量具有 5 个模糊子集, 所以 FIS 的规则库有 54 条模糊规则, 即  $M=625$ 。

## 2.2 滑模控制器的设计

定义滑模面

$$s_{ik}(t) = \dot{x}_{eik} + \lambda x_{eik} \quad (10)$$

式中:  $s_{ik}(t) = [s_{ik,1}(t) \ s_{ik,2}(t)]^T \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$ ,  $x_{eik} = x_{ik} - x_{dik} \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$  为跟踪误差向量,  $x_{dik}$  为期望轨迹向量,  $\lambda$  为一个  $2 \times 2$  的正定矩阵。

定义参考向量

$$\delta(t) = \dot{x}_{dik}(t) - \lambda x_{eik}(t) \quad (11)$$

设计滑模控制律

$$u_k = -G_{ik} [\hat{d}_{ik}(x_{ik}, \dot{x}_{ik} | \Theta) - \delta + \kappa s_{ik} + \eta \operatorname{sign}(s_{ik})] \quad (12)$$

式中:  $\kappa$  和  $\eta$  均为  $2 \times 2$  的对角矩阵, 即  $\kappa = \operatorname{diag}(\kappa_1, \kappa_2)$ ,  $\eta = \operatorname{diag}(\eta_1, \eta_2)$ , 其中  $\kappa_1, \kappa_2, \eta_1$  和  $\eta_2$  为设计参数;  $\operatorname{sign}(s_{ik}) = [\operatorname{sign}(s_{ik,1}) \ \operatorname{sign}(s_{ik,2})]^T$ ,  $\operatorname{sign}(\cdot)$  为符号函数。

## 2.3 稳定性证明

**定理 1** 对于机器人编队系统式(5), 设计模糊补偿器式(7)和滑模控制律式(12)。如定义参数自适应律为

$$\dot{\Theta}_q = \Gamma_q^{-1} s_{ik,q} \xi(x_{ik}, \dot{x}_{ik}) \quad (13)$$

式中:  $\Gamma_q > 0 \in \mathbf{R}^1$ ,  $\kappa_q > 0$ ,  $\eta_q > |\rho_q|$  ( $q=1, 2$ ), 那么多机器人编队控制系统式(5)是渐近稳定的。

**证明** 选取李雅普诺夫函数:

$$V(t) = \frac{1}{2} (s_{ik}^T s_{ik} + \sum_{q=1}^2 \tilde{\Theta}_q^T \Gamma_q \tilde{\Theta}_q) \quad (14)$$

式中:  $\tilde{\Theta}_q = \Theta_q^* - \Theta_q$ ,  $\Theta_q^*$  代表最优参数矩阵  $\Theta^*$  的第  $q$  列向量。对式(14)求一阶导可得

$$\dot{V}(t) = s_{ik}^T \dot{s}_{ik} + \sum_{q=1}^2 \tilde{\Theta}_q^T \Gamma_q \dot{\tilde{\Theta}}_q \quad (15)$$

由式(10)和式(11)可知

$$\dot{s}_{ik} = \ddot{x}_{ik} - \dot{\delta} \quad (16)$$

将式(3)和式(16)依次代入式(15)可得

$$\dot{V}(t) = s_{ik}^T [G_{ik} u_k + d_{ik}(x_{ik}, \dot{x}_{ik}, t) - \delta] + \sum_{q=1}^2 \tilde{\Theta}_q^T \Gamma_q \dot{\tilde{\Theta}}_q \quad (17)$$

将式(9)和式(12)代入式(17)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & -s_{ik}^T [\hat{d}_{ik}(x_{ik}, \dot{x}_{ik} | \Theta) + \rho - \hat{d}_{ik}(x_{ik}, \dot{x}_{ik} | \Theta^*) + \\ & \kappa s_{ik} + \eta \text{sign}(s_{ik})] + \sum_{q=1}^2 \tilde{\Theta}_q^T \Gamma_q \dot{\tilde{\Theta}}_q = \\ & -s_{ik}^T [\rho + \kappa s_{ik} + \eta \text{sign}(s_{ik}) - \\ & \tilde{\Theta}^T \xi(x_{ik}, \dot{x}_{ik})] + \sum_{q=1}^2 \tilde{\Theta}_q^T \Gamma_q \dot{\tilde{\Theta}}_q = \\ & -s_{ik}^T \rho - s_{ik}^T \kappa s_{ik} - s_{ik}^T \eta \text{sign}(s_{ik}) + \\ & \sum_{q=1}^2 [\tilde{\Theta}_q^T \Gamma_q \dot{\tilde{\Theta}}_q + \tilde{\Theta}_q^T s_{ik}^T \xi(x_{ik}, \dot{x}_{ik})] \end{aligned} \quad (18)$$

将参数自适应律式(13)代入式(18)可得

$$\dot{V}(t) = -s_{ik}^T \rho - s_{ik}^T \kappa s_{ik} - s_{ik}^T \eta \text{sign}(s_{ik}) \quad (19)$$

考虑  $\eta_q > |\rho_q|$ , 将其代入式(19)可得

$$\dot{V}(t) \leq -s_{ik}^T \kappa s_{ik} < 0 \quad (20)$$

因此,基于滑模和模糊补偿器的编队控制系统具有渐近稳定性。

### 3 仿真结果

根据上文设计的控制器进行仿真实验,验证该方法的有效性。采用模糊补偿器和滑模控制器的控制方法结构图如图3所示。

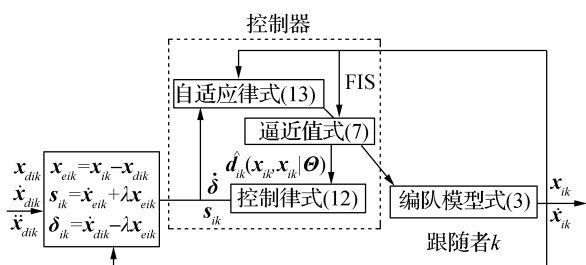


图3 控制方法结构图

Fig.3 Structure of control scheme

设圆形机器人的半径  $r=0.05$  m;选择 15% 的参数波动  $\Delta_i = \Delta_k = \text{diag}(\text{rand}, \text{rand})$ , 式中  $\text{rand}$  表示一个在闭区间  $[-0.15, 0.15]$  上均匀分布的随机数;考虑如下周期性外部扰动  $\pi_{ix} = \pi_{iy} = \pi_{i\theta} = 0.5 \sin(2\pi t)$ ;  $\pi_{kx} = \pi_{ky} = \pi_{k\theta} = 0.2 \sin(\pi t)$ 。

设领航者  $i=1$ , 跟随者  $k=2, 3$ 。选取控制器参数:高斯型隶属函数方差  $\sigma_n = \sqrt{2} \pi/8$ , 均值  $c_n$  取

$-\pi/2, -\pi/4, 0, \pi/4, \pi/2$ ; 自适应律参数  $\Gamma_1 = \Gamma_2 = 0.000\ 05$ ;此外  $\lambda = \text{diag}(2.3, 2)$ ,  $\kappa = \text{diag}(5, 15)$ ,  $\eta = \text{diag}(0.5, 0.5)$ 。

仿真实验的给定编队任务,3 个机器人从初始位置,先完成直线编队,然后保持队形跟踪圆形轨迹。初始位置设置为  $\tau_1 = [0.5\text{ m} \ 0\text{ m} \ \pi/2\text{ rad}]^T$ ,  $\tau_2 = [0.8\text{ m} \ -0.4\text{ m} \ 0\text{ rad}]^T$ ,  $\tau_3 = [1\text{ m} \ -0.5\text{ m} \ \pi\text{ rad}]^T$ 。领航者跟踪圆形轨迹的线速度  $v_1^d = 0.5\text{ m/s}$ , 角速度  $w_1^d = 1\text{ rad/s}$ 。领航者与 2 个跟随者期望距离和相角分别为  $x_d^{12} = [0.13\text{ m} \ \pi/2\text{ rad}]^T$ ,  $x_d^{13} = [0.26\text{ m} \ \pi/2\text{ rad}]^T$ 。编队效果如图4所示,图中的实心圆点表示初始位置,空心圆点表示动态过程中的位置。

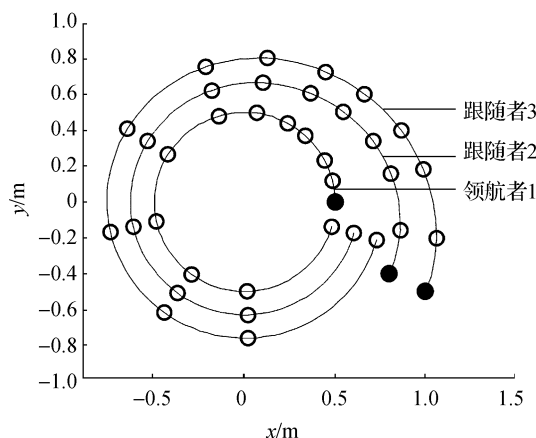


图4 直线编队跟踪圆形轨迹

Fig.4 Line formation while moving in a circle

采用文[12]中一阶滑模控制方法和二阶滑模控制方法与本文所提出模糊补偿器与滑模控制器相结合的控制方法进行对比实验,仿真结果如图5~8所示。从图5看出,在不确定性上界未知的假设条件下,带模糊补偿器的滑模控制方法可以使3个机器人迅速地收敛到期望队形,并以较高的跟踪精度保持期望队形运动;滑模控制方法的动态响应时间较长,且由于不确定性的影响在编队形成后存在明显波动。

滑模控制的不连续性导致了控制器输出存在抖振现象,如图6和图7,用饱和函数替换式(12)中的符号函数可以改善这种现象。从图8看出,当编队系统进入滑动模态后,由于不确定性的影响会使系统在滑模面附近产生抖动,但此时  $l_{ik}$  和  $\psi_{ik}$  已进入平衡点邻域内,故系统保持局部渐近稳定。由图9可知,模糊补偿器可以有效地跟踪编队系统的未知的不确定项。

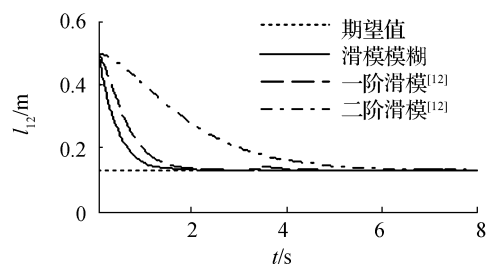
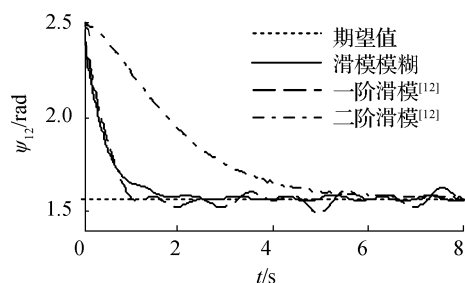
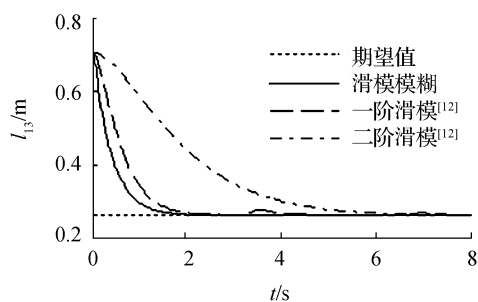
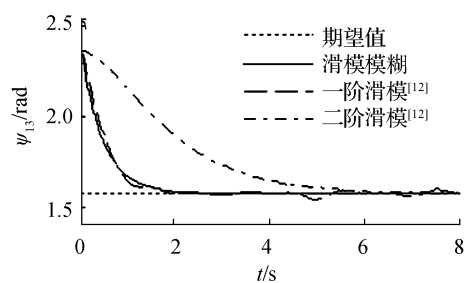
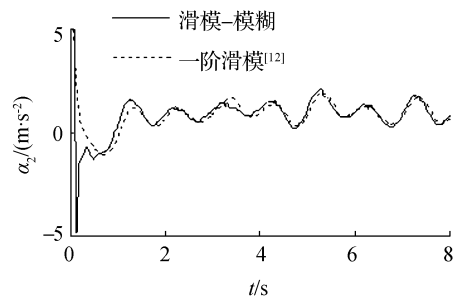
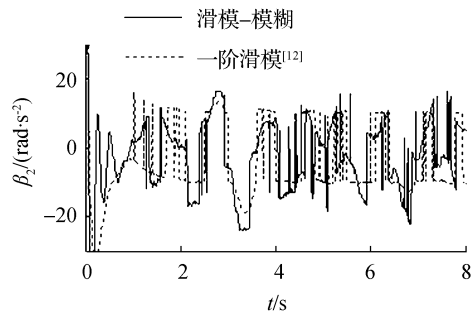
(a) 相对距离  $l_{12}$ (b) 相对相角  $\psi_{12}$ (c) 相对距离  $l_{13}$ (d) 相对相角  $\psi_{13}$ 

图5 状态轨迹

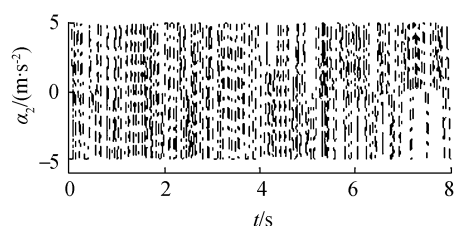
Fig.5 State trajectories



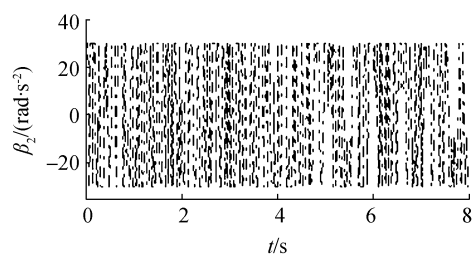
(a) 本方法与一阶滑模



(b) 本方法与一阶滑模



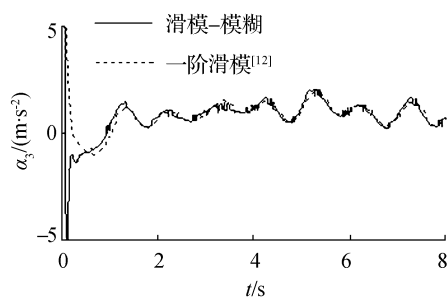
(c) 二阶滑模



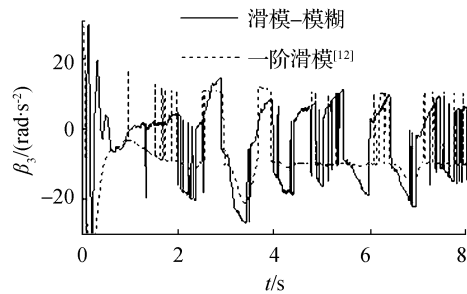
(d) 二阶滑模

图6 跟随者2的控制量

Fig.6 Control variables of follower 2



(a) 本方法与一阶滑模



(b) 本方法与一阶滑模



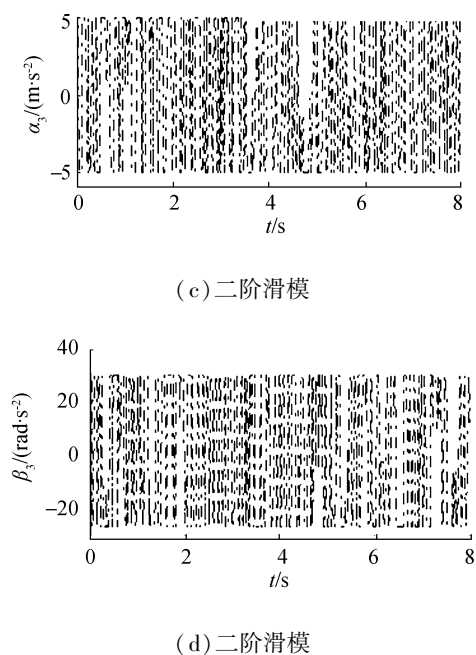


图7 跟随者3的控制量

Fig.7 Control variables of follower 3

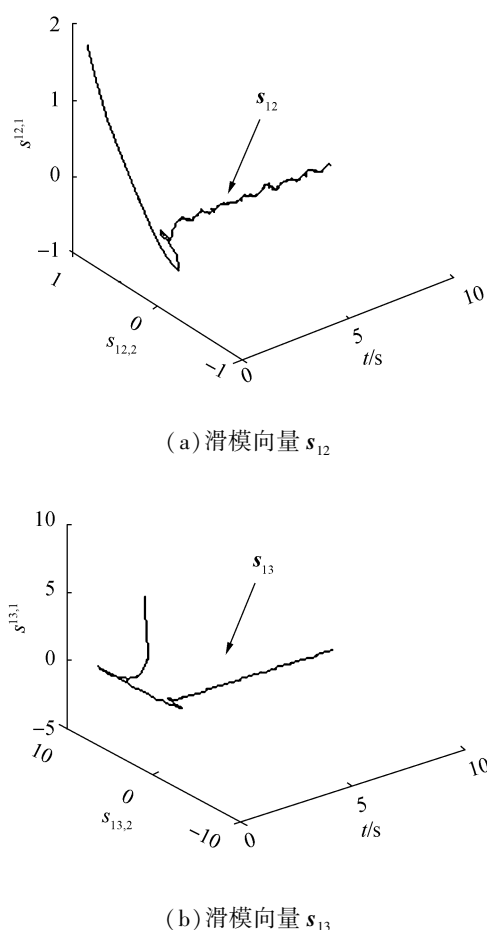


图8 滑模面向量的三维图

Fig.8 3 D plots of the sliding surfaces vector

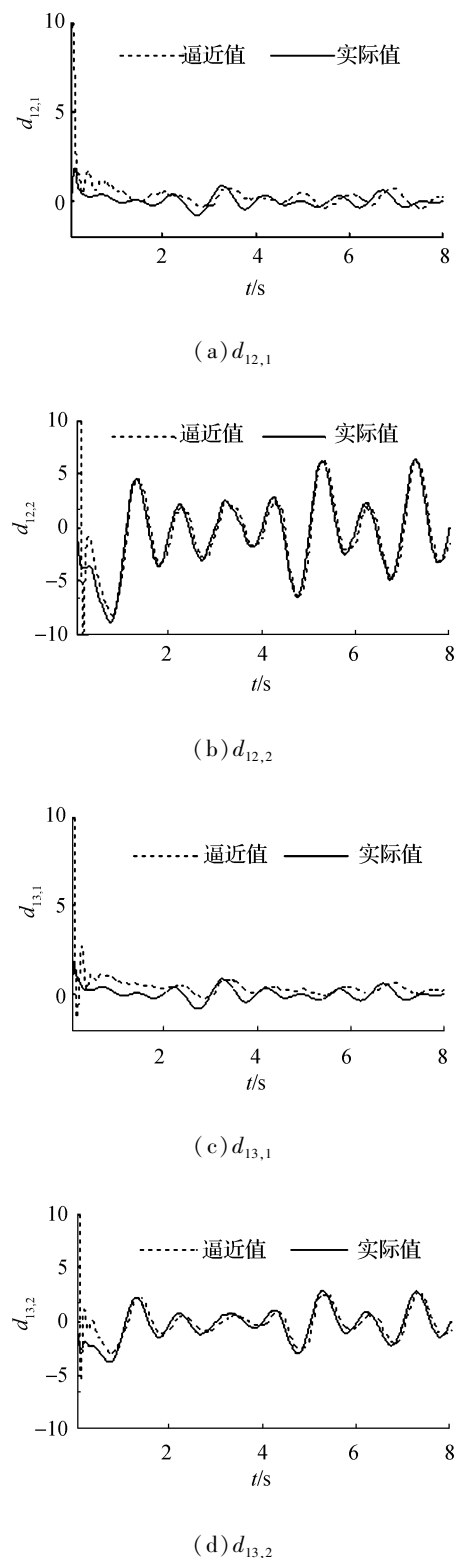
图9 不确定项  $d_{ik}$  及其逼近值

Fig.9 The uncertain term and its approximations

## 4 结束语

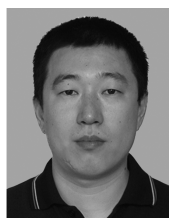
本文针对多机器人编队控制问题,提出了一种模糊补偿器与滑模控制器相结合的控制方法。运用领航—跟随法建立系统动力学模型,将整个编队控

制问题转化为若干跟随者的轨迹跟踪问题。利用模糊逻辑和滑模控制方法对跟随者设计模糊补偿器和滑模控制器,并证明系统的稳定性。仿真结果与滑模编队控制方法进行对比,验证了本文所提出的控制方法可以有效的克服未知上界的不确定性对编队系统的影响;实现多机器人编队在期望队形下对指定轨迹的跟踪。

## 参考文献:

- [1] HUDA M N, YU Hongnian, CANG Shuang. Behaviour-based control approach for the trajectory tracking of an underactuated planar capsule robot[J]. IET control theory & applications, 2015, 9(2): 163-175.
- [2] SADOWSKA A, VAN DEN BROEK T, HUIJBERTS H, et al. A virtual structure approach to formation control of unicycle mobile robots using mutual coupling[J]. International journal of control, 2011, 84(11): 1886-1902.
- [3] 杨丽, 曹志强, 谭民. 不确定环境下多机器人的动态编队控制[J]. 机器人, 2010, 32(2): 283-288.  
YANG Li, CAO Zhiqiang, TAN Min. Dynamic formation control for multiple robots in uncertain environments[J]. Robot, 2010, 32(2): 283-288.
- [4] WANG Jinliang, WU Huaining. Leader-following formation control of multi-agent systems under fixed and switching topologies[J]. International journal of control, 2012, 85(6): 695-705.
- [5] 王奎民, 赵玉飞, 侯恕萍, 等. 一种改进人工势场的UUV 障碍航物规避方法[J]. 智能系统学报, 2014, 9(1): 47-52.  
WANG Kuimin, ZHAO Yufei, HOU Shuping, et al. Dynamic obstacle avoidance for unmanned underwater vehicle based on an improved artificial potential field[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2014, 9(1): 47-52.
- [6] ZHAO Weihua, GO T H. Quadcopter formation flight control combining MPC and robust feedback linearization[J]. Journal of the franklin institute, 2014, 351(3): 1335-1355.
- [7] GUILLET A, LENAIN R, THUILOT B, et al. Adaptable robot formation control: adaptive and predictive formation control of autonomous vehicles[J]. IEEE robotics & automation magazine, 2014, 21(1): 28-39.
- [8] LIU Hui, LI Junfeng. Terminal sliding mode control for spacecraft formation flying[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2009, 45(3): 835-846.
- [9] QIAN Dianwei, TONG Shiwen, GUO Jinrong, et al. Leader-follower-based formation control of nonholonomic mobile robots with mismatched uncertainties via integral sliding mode[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part I: journal of systems and control engineering, 2015, 229(6): 559-569.
- [10] 袁媛, 焦继乐, 曹志强, 等. 基于模糊控制协调策略的多自主机器人围捕[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(S2): 328-331.  
YUAN Yuan, JIAO Jile, CAO Zhiqiang, et al. Fuzzy control coordination based hunting of multiple autonomous robots[J]. Journal of Huazhong university of science and technology: natural science edition, 2011, 39(S2): 328-331.
- [11] 王雪松, 高阳, 程玉虎, 等. 知识引导遗传算法实现机器人路径规划[J]. 控制与决策, 2009, 24(7): 1043-1049.  
WANG Xuesong, GAO Yang, CHENG Yuhu, et al. Knowledge-guided genetic algorithm for path planning of robot[J]. Control and decision, 2009, 24(7): 1043-1049.
- [12] DEFOORT M, FLOQUET T, KOKOSY A, et al. Sliding-mode formation control for cooperative autonomous mobile robots[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2008, 55(11): 3944-3953.

## 作者简介:



钱殿伟,男,1980年生,副教授,博士,主要研究方向为变结构控制理论与应用、智能机器人技术、欠驱动机器人控制。