

# 控制与决策

Control and Decision

未知异构非线性多智能体系统的无模型自适应编队控制

金尚泰, 李澈, 任叶, 侯忠生

引用本文:

金尚泰, 李澈, 任叶, 等. 未知异构非线性多智能体系统的无模型自适应编队控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1519–1524.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1368>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于虚拟领队的 uncertain 轮式移动机器人自适应编队控制](#)

Adaptive control of wheeled mobile robot formation with uncertainties based on virtual leader

控制与决策. 2017, 32(7): 1203–1209 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0481>

[基于事件触发的时变拓扑多智能体系统编队控制](#)

Formation control of multi-agent systems with time-varying topology based on event-triggered mechanism

控制与决策. 2017, 32(6): 1103–1108 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0398>

[基于预测控制的时滞多机器人编队脉冲控制](#)

Impulsive control for multi-robot formation with communication delay based on predictive control

控制与决策. 2016, 31(8): 1453–1460 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0564>

[轨迹跟踪级联机器人编队控制方法](#)

Trajectory tracking cascade robot formation control

控制与决策. 2016(2): 317–323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1676>

[基于轨迹跟踪车式移动机器人编队控制](#)

Formation control for car-like mobile robots based on trajectory tracking

控制与决策. 2015(1): 176–180 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1277>

# 未知异构非线性多智能体系统的无模型自适应编队控制

金尚泰<sup>1†</sup>, 李 澈<sup>1</sup>, 任 叶<sup>1</sup>, 侯忠生<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 青岛大学 自动化学院, 山东 青岛 266071)

**摘 要:** 研究一类未知异构非线性多智能体的编队控制问题. 首先, 利用全格式动态线性化 (full form dynamic linearization, FFDL) 方法将未知非线性智能体转化为含有时变参数的数据模型, 并给出时变参数的估计方法; 然后, 基于该数据模型设计一种分布式无模型自适应多智能体编队控制方案; 最后, 为验证所提出的无模型自适应编队控制方案的有效性, 利用 3 台 NAO 机器人开发基于 Python 的多智能体编队控制实验平台. 实验比较结果表明, 通过所提出的控制方案可使 3 台机器人仅利用局部信息就能有效完成编队控制任务, 控制性能优于基于 PID 的编队控制方法.

**关键词:** 多智能体系统; 无模型自适应控制; 图论法; 编队控制; NAO 机器人

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Model-free adaptive formation control for unknown heterogeneous nonlinear multi-agent systems

JIN Shang-tai<sup>1†</sup>, LI Che<sup>1</sup>, REN Ye<sup>1</sup>, HOU Zhong-sheng<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The formation control problem is considered for a class of unknown heterogeneous nonlinear multi-agent systems. Firstly, the unknown nonlinear agent is transformed into a data model with time-varying parameters by using the full form dynamic linearization (FFDL) method. The estimation method of time-varying parameters is given. Then, a distributed model-free adaptive multi-agent formation control scheme is designed based on the FFDL data model. Finally, the effectiveness of the proposed model-free adaptive formation control scheme is verified. A multi-agent formation control experimental platform based on Python is developed by using three Nao robots. The experimental comparison results show that, using the proposed control scheme, the three robots can effectively complete the formation control task only by using local information. The control performance is better than the PID based formation control method.

**Keywords:** multi-agent systems; model-free adaptive control; graph theory method; formation control; NAO robot

## 0 引 言

智能体的概念可以定义为用来完成某类任务、能作用于自身和环境、有生命周期的一个物理的或抽象的计算实体<sup>[1]</sup>. 多智能体系统能完成单个智能体无法完成的任务, 具有许多优势, 成员相互协作可以增加冗余度、消除失效点、增加解决方案的鲁棒性<sup>[2]</sup>. 因此近年来, 多智能体系统协同控制一直是国内外学者研究的热点, 而多智能体系统的编队控制问题作为多智能体系统协同控制中的一个典型研究方向, 针对其进行的研究更是层出不穷. 编队控制问题属于多智能体系统的几何问题, 即由多个智能体组成的团体在向某个目标或方向运动过程中彼此保持

固定的空间关系(即队形), 同时适应环境约束的控制问题<sup>[3]</sup>. 编队控制问题的主要研究方法有跟随-领航法<sup>[4]</sup>、基于行为的方法<sup>[5]</sup>、虚拟结构法<sup>[6]</sup>和基于图论的方法<sup>[7-8]</sup>. 以上 4 种方法各有优缺点, 并且随着基于图论法的不断发展和成熟, 其他 3 种方法都与基于图论的方法有所融合.

针对编队控制问题, 国内外学者提出了许多编队控制算法. 文献[9]针对不确定模型的线性系统, 提出了一种 PD 型 (proportional-derivative-type) 迭代学习控制算法, 使有向图中所有智能体能够在有限时间区间内实现理想编队; 文献[10]针对存在固定拓扑结构的线性多智能体系统, 引入虚拟领导者, 提出了一

收稿日期: 2018-10-09; 修回日期: 2019-01-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573054, 61433002, 61833001); 北京市自然科学基金项目(4182068).

责任编辑: 解学军.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: shtjin@bjtu.edu.cn.

种分布式迭代学习控制算法;文献[11]针对具有非线性动力学多智能体系统的二阶一致性问题,考虑了各代理的通信时延并引入虚拟领导者的速度信号;文献[12]针对不确定严格反馈非线性智能体系统,利用模糊逻辑系统的近似逼近能力,提出了一种自适应逻辑观测器设计方法,可以精确地确定和调整最终跟踪误差的精度;文献[13]通过滚动时域控制策略,结合虚拟结构法,设计了一种跟随者智能体在耦合输入约束情形下的编队控制律.现有文献针对线性或非线性的多智能体系统编队控制策略进行了研究,但针对异构非线性多智能体系统的研究较少.此外,多智能体编队控制的研究多集中于理论或仿真研究,实际应用较少.

无模型自适应控制(model-free adaptive control, MFAC)是一种典型的在线数据驱动控制方法<sup>[14-16]</sup>.通过在每个工作点处建立与非线性系统等价的动态线性数据模型,并利用被控系统的I/O数据在线估计系统参数,从而实现未知非线性系统的无模型自适应控制<sup>[14]</sup>.MFAC方法结构简单、计算量小,有利于实际应用.截至目前,无模型自适应控制已被应用于化工系统<sup>[17]</sup>、广域电力系统<sup>[18]</sup>、自动泊车系统<sup>[19]</sup>以及多自由度机器人外骨骼控制系统<sup>[20]</sup>等领域.

本文针对未知异构非线性多智能体系统的编队控制问题,利用全格式动态线性化(full form dynamic linearization, FFDL)方法将每个未知非线性智能体转化为线性时变数据模型,并基于该数据模型设计了一种分布式无模型自适应编队控制方案.该方案针对未知复杂系统,无需建立复杂动力学模型,结构简单高效.另外,本文利用3台NAO机器人搭建多智能体系统实验平台,研究编队在已知某一合理拓扑结构下的控制问题.实验结果表明,所提出的编队控制方法比基于PID的编队控制方法效果更好.

## 1 问题描述

### 1.1 图论基础

多智能体系统通过通信网络、感知网络或两种网络的结合进行信息交互,因此通常用有向图表示智能体之间的通讯拓扑模型.对于一个包含1个虚拟领导者和 $n$ 个跟随者的多智能体系统,用有向图 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$ 表示其通讯拓扑模型,其中 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n\}$ 为有限非空节点集合.对于智能体通信问题,可以用参数 $w_i$ 表示虚拟智能体0是否可以与某一跟随者智能体进行通信,如果可以,则 $w_i = 1$ ,否则 $w_i = 0$ .假设有向图 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$ 至少包含一棵生成树,节点0为

根节点. $E \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 为有序节点之间边的集合,边 $(i, j)$ 表示智能体 $j$ 可以获取智能体 $i$ 的信息.定义节点 $i$ 的邻居集合为 $N_i = \{j \mid (i, j) \in E\}$ . $A = [a_{i,j}] \in R_{n \times n}$ 为有向图 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$ 的邻接矩阵,当 $(a_{i,j}) \in E$ 时,定义 $a_{i,j} = 1$ ;当 $(a_{i,j}) \notin E$ 时,定义 $a_{i,j} = 0$ .

### 1.2 多智能体系统编队

本文将多智能体系统的期望轨迹 $y_0(k)$ 看作是虚拟领导者,将其编号为0.跟随者智能体可由如下非线性离散时间系统描述<sup>[14]</sup>:

$$\begin{aligned} y_i(k+1) &= f_i(y_i(k), y_i(k-1), \dots, y_i(k-n_y)), \\ u_i(k), u_i(k-1), \dots, u_i(k-n_u), \\ i &\in \{1, 2, \dots, n\}. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $u_i(k)$ 、 $y_i(k)$ 分别为第 $i$ 个智能体在 $k$ 时刻的输入和输出, $n_u$ 、 $n_y$ 为未知正整数, $f_i(\cdot)$ 为未知非线性函数.

跟随者智能体与虚拟领导者的期望编队距离描述如下:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} y_i(k) = y_0(k) + d_i(k), \quad (2)$$

其中 $d_i(k)$ 为智能体 $i$ 和智能体0的期望编队距离.

对于系统中任意两个智能体 $i$ 和 $j$ ,由于它们与跟随虚拟智能体0的相对位置分别为 $d_i(k)$ 和 $d_j(k)$ ,可知智能体 $i$ 与智能体 $j$ 之间的相对位置为

$$d_{i,j}(k) = d_i(k) - d_j(k). \quad (3)$$

当智能体 $i$ 无法获取虚拟领导者智能体新信息时,可通过控制相邻智能体之间的距离 $y_i(k) - y_j(k)$ 跟踪 $d_{i,j}(k)$ ,最终实现多智能体系统编队变换队形的目的.

## 2 全格式无模型自适应编队控制算法

本节首先利用文献[14]中的全格式动态线性化方法将异构非线性多智能体(1)转化为含时变参数的数据模型,然后设计时变参数的估计算法,最后给出无模型自适应编队控制方法.

### 2.1 全格式动态线性化

全格式动态线性化是在以下假设条件下完成的.

**假设1**  $f_i(\cdot)$ 关于各个变量都存在连续偏导数.

**假设2** 系统(1)是广义Lipschitz的,即对于 $k_1 \neq k_2, k_1, k_2 \geq 0, H_i(k_1) \neq H_i(k_2)$ ,有

$$|y_i(k_1+1) - y_i(k_2+1)| \leq b \|H_i(k_1) - H_i(k_2)\|. \quad (4)$$

其中: $i = 0, 1, \dots, n; b > 0$ 为一个常数; $H_i(k)$ 为第 $i$

个智能体的输入信号与输出信号组成的向量,即

$$H_i(k) = [y_i(k), \dots, y_i(k - L_y + 1), u_i(k), \dots, u_i(k - L_u + 1)]^T. \quad (5)$$

其中:伪阶数  $L_y, L_u (0 \leq L_y \leq n_y, 1 \leq L_u \leq n_u)$  为正整数.

**定理1**<sup>[14-15]</sup> 对于满足假设1和假设2的非线性系统(1),给定  $0 \leq L_y \leq n_y$  和  $1 \leq L_u \leq n_u$ ,当  $\|\Delta H_i(k)\| \neq 0$  时,一定存在一个被称为伪梯度(pseudo gradient, PG)的有界时变参数向量  $\Phi_i(k)$ ,使得系统(1)可转换为如下FFDL数据模型:

$$\Delta y_i(k + 1) = \Phi_i^T(k) \Delta H_i(k). \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi_i(k) &= [\phi_{i,1}(k), \dots, \phi_{i,L_y}(k), \phi_{i,L_y+1}(k), \dots, \phi_{i,L_y+L_u}(k)]^T, \\ \Delta H_i(k) &= H_i(k) - H_i(k - 1), \\ \Delta y_i(k + 1) &= y_i(k + 1) - y_i(k). \end{aligned}$$

### 2.2 伪梯度估计算法

PG向量估计准则函数为

$$J(\Phi_i(k)) = |y_i(k) - y_i(k - 1) - \Phi_i^T(k) \Delta H_i(k - 1)|^2 + \mu \|\Phi_i(k) - \hat{\Phi}_i(k - 1)\|^2, \quad (7)$$

其中  $\mu > 0$  为权重因子. 根据最优条件对式(7)关于  $\Phi_i(k)$  求极值,并利用矩阵求逆引理,可得PG的估计算法

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_i(k) &= \hat{\Phi}_i(k - 1) + \frac{\eta \Delta H_i(k - 1)(y_i(k) - y_i(k - 1))}{\mu + \|\Delta H_i(k - 1)\|^2} - \\ &\frac{\eta \Delta H_i(k - 1) \hat{\Phi}_i^T(k - 1) \Delta H_i(k - 1)}{\mu + \|\Delta H_i(k - 1)\|^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\hat{\Phi}_i(k)$  为  $\Phi_i(k)$  的估计值. 加入的步长因子  $\eta \in [0, 2]$ ,使控制算法设计具有更大的灵活性.

### 2.3 编队控制律设计

考虑如下控制输入准则函数:

$$J(u_i(k)) = \lambda \Delta u_i^2(k) + \left| \sum_{j \in N_i} a_{i,j} (y_j(k) - y_i(k + 1) + d_{i,j}(k)) + w_i (y_0(k + 1) - y_i(k + 1) + d_i(k + 1)) \right|^2, \quad (9)$$

其中  $\lambda > 0$  是权重因子.

$$\text{定义 } c_i(k) = \frac{\left( \sum_{j \in N_i} a_{i,j} + w_i \right) \hat{\phi}_{i,L_y+1}(k)}{\lambda + \left( \sum_{j \in N_i} a_{i,j} + w_i \right)^2 |\hat{\phi}_{i,L_y+1}(k)|^2}.$$

将FFDL数据模型(6)代入准则函数(9),对  $u(k)$  求导,令其等于0,并加入步长因子  $\rho_l$ ,可得

$$\begin{aligned} u_i(k) &= u_i(k - 1) + c_i(k) \rho_{L_y+1} \sum_{j \in N_i} a_{i,j} (y_j(k) - y_i(k) + d_{i,j}(k)) + c_i(k) \rho_{L_y+1} w_i (y_0(k + 1) - y_i(k) + d_i(k + 1)) - c_i(k) \left( \sum_{j \in N_i} a_{i,j} + w_i \right) \sum_{l=1}^{L_y} \rho_l \hat{\phi}_{i,l}(k) \Delta y_i(k - l + 1) - c_i(k) \left( \sum_{j \in N_i} a_{i,j} + w_i \right) \sum_{l=L_y+2}^{L_y+L_u} \rho_l \hat{\phi}_{i,l}(k) \Delta u_i(k + L_y - l + 1). \end{aligned} \quad (10)$$

其中:步长因子  $\rho_l \in (0, 1], l = 1, 2, \dots, L_y + L_u$ .

基于全格式的无模型自适应编队控制(FFDL based model free adaptive formation control, FFDL-MFAFC)方案由式(8)与(10)构成.

FFDL-MFAFC方案可在模型未知的情况下,根据估计的系统阶数,选择尽量小的伪阶数,得到计算量较小的控制器.另外,FFDL-MFAFC方案可实现在线更新PG向量,因此具有较大的可调自由度和更好的设计灵活性.

## 3 NAO机器人平台实物验证

### 3.1 实验平台介绍

图1所示的NAO机器人是一款法国Aldebaran Robotics公司生产的双足机器人,它配有一个加速度传感器和一个陀螺仪,每个脚上有4个压力传感器.NAO机器人与计算机以及其他机器人可通过wifi无线网络进行通信.

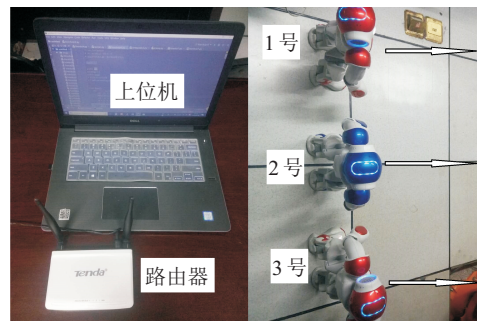


图1 机器人编队行走的工程实现

NAO机器人本身是一个高阶复杂系统,难以建立精确模型,因此难以使用传统依赖精确建模控制的控制算法实现编队.

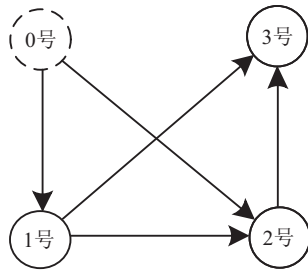


图2 NAO机器人编队曲线行走实验有向图

本文基于Python开发平台搭建了3台NAO机器人组成的多智能体编队控制系统.如图1所示,上位机为虚拟机器人0号,用于给定期望轨迹 $y_0(x_0)$ ;其他机器人命名为1号机器人、2号机器人和3号机器人.本文机器人编队可适用于含有一棵生成树的拓扑结构,可以选取任意一种合理的通信拓扑结构进行曲线行走的实验,本文选取如下通信拓扑结构:1号机器人可获得0号机器人的位置信息,2号机器人可获得0号和1号机器人的位置信息,3号机器人可获得1号和2号机器人的位置信息.实验中多智能体系统的

有向图如图2所示,邻接矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

### 3.2 控制器参数设置

多智能体系统期望轨迹为

$$y_0 = \sqrt{0.25(1 - (x_0 - 1)^2)}, 0 < x_0 < 1.95 \text{ m}, \quad (11)$$

其中 $x_0$ 和 $y_0$ 为二维坐标.编队队形为一字型, $y$ 轴方向智能体之间保持恒定间隔0.2 m.

3台机器人分别应用FFDL-MFAFC方法,根据获得的虚拟机器人或邻居机器人信息,通过调节自身线速度实现编队控制任务.

3台机器人的FFDL-MFAFC方法参数均设置为 $L_y = 2, L_u = 1, \eta = 0.8, \mu = 1, \phi_{i,1} = 2980, \phi_{i,2} = 200, \phi_{i,3} = 0.11, \lambda = 11, \rho_1 = 0.1, \rho_2 = 0.1, \rho_3 = 0.1$ .

### 3.3 实验结果

PID编队控制算法的参数采用虚拟参考反馈法整定<sup>[21]</sup>,得到 $k_p = 0.9, k_d = 0.5, k_i = 0.0018$ ,其实验结果如图3~图5所示.其中:图3为虚拟机器人0以及3台跟随者机器人的行走轨迹,图4为3台跟随者机器人的 $x$ 轴和 $y$ 轴线速度,图5为 $x$ 轴和 $y$ 轴方向的编队误差.

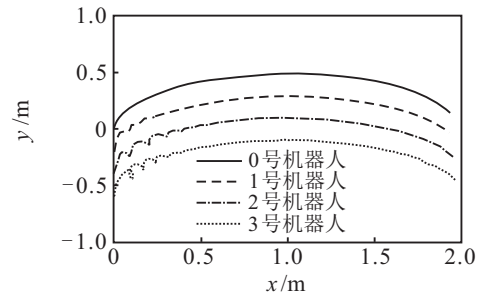
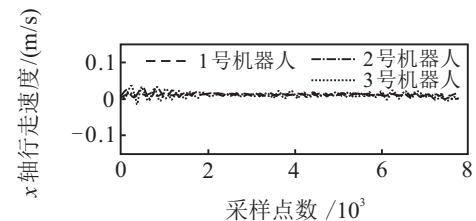
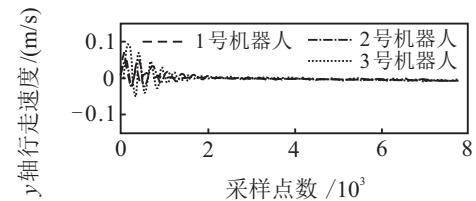


图3 PID算法中机器人行走轨迹

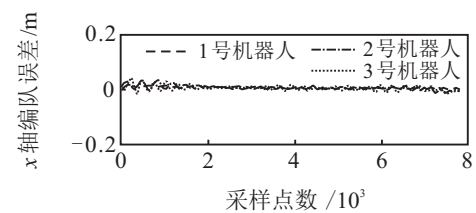


(a) 机器人 $x$ 轴行走速度

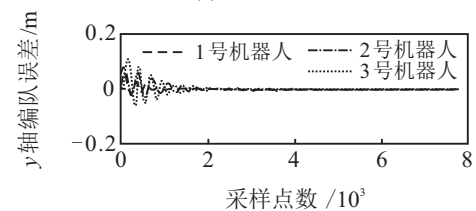


(b) 机器人 $y$ 轴行走速度

图4 PID算法中机器人在 $x$ 轴、 $y$ 轴的行走速度



(a)  $x$ 轴编队误差



(b)  $y$ 轴编队误差

图5 PID算法的 $x$ 轴、 $y$ 轴编队误差

应用FFDL-MFAFC进行编队的实验结果如图6~图8所示.

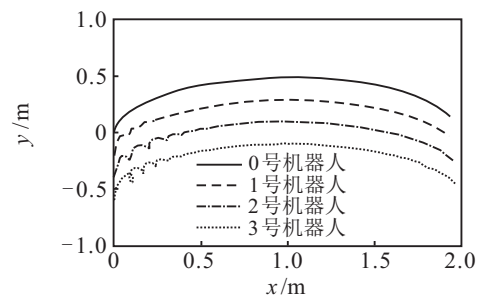


图6 FFDL-MFAFC算法中机器人行走轨迹

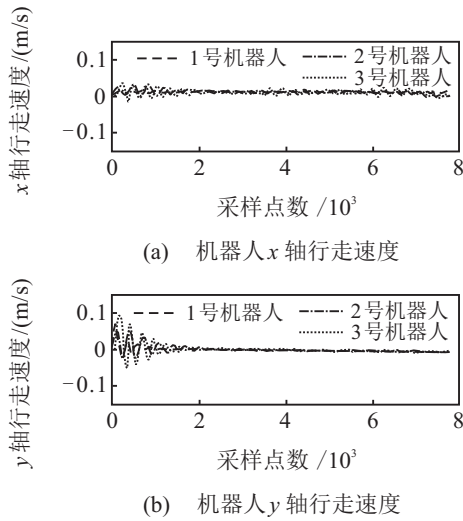


图7 在FFDL-MFAFC算法中机器人在x轴、y轴的行走速度

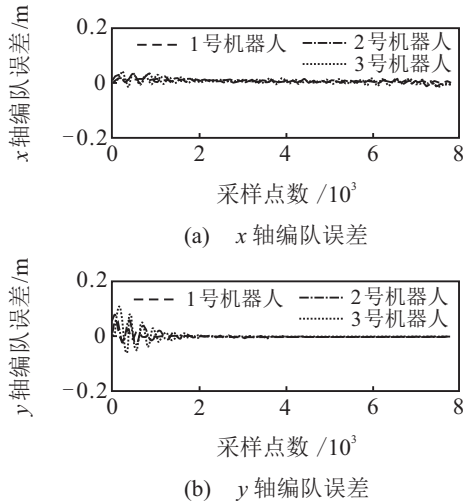


图8 FFDL-MFAFC算法的x轴、y轴编队误差

从图6中FFDL-MFAFC的控制效果可以看出,NAO机器人编队保持一字队形跟随了一条时变二维曲线轨迹,FFDL-MFAFC方法在编队队形控制上起到了良好的效果,不仅可以较好地跟踪时变函数曲线,而且可以快速保持稳定.从图3和图6可以看出:相较于PID编队控制方法,在FFDL-MFAFC控制下,机器人编队行走更稳定.

### 3.4 实验结果分析

定义机器人*i*的均方误差MSE<sub>*i*</sub>为

$$MSE_i = \frac{\sum_{k=1}^N \varepsilon_i^2(k)}{N} \quad (12)$$

其中: $\varepsilon_i(k)$ 为机器人*i*在*k*时刻的编队误差,*N*为机器人*i*编队误差的采样点总数.

两种编队控制方法的均方误差比较结果如表1所示.从表1中可以直观地看出,FFDL-MFAFC算法的控制效果整体优于PID算法的控制效果,在FFDL-

MFAFC编队控制方法下机器人编队误差更小,控制精度更高、更准确.

表1 PID算法与MFAC算法控制效果对比

均方误差	FFDL-MFAFC( <i>x</i> \y)	PID( <i>x</i> \y)
1号机器人	2.12e-05\7.93e-05	2.35e-05\1.04e-04
2号机器人	1.05e-04\1.08e-04	1.9e-04\1.31e-04
3号机器人	1.49e-04\3.53e-04	3.0e-04\4.9e-04

## 4 结论

本文针对异构非线性的多智能体系统提出了一种新型的分布式无模型自适应多智能体编队控制方案.该方案对于复杂未知系统有良好效果,无需直接建模,利用系统输入输出数据可以很好地控制智能体按预设曲线完成编队行走任务,控制精度高.搭建了一个含有1个虚拟领导者和3个NAO机器人跟随者的多智能体系统作为实验平台,验证了所提出的FFDL-MFAFC方法的有效性.今后将进一步对提高队形灵活性和多样性以及完善多智能体系统的通信规则等方面进行研究.

### 参考文献(References)

- [1] 陈杰,方浩,辛斌.多智能体系统的协同集群运动控制[M].北京:科学出版社,2017:1-5.  
(Chen J, Fang H, Xin B. Cooperative cluster motion control of multi-agent system[M]. Beijing: Science Industry Press, 2017: 1-5.)
- [2] 蔡自兴,陈白帆,刘丽珏,等.多移动机器人协同原理与技术[M].北京:国防工业出版社,2011:1-5.  
(Cai Z X, Chen B F, Liu L Y, et al. Synergy principles and technologies of multi-mobile robots[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 1-5.)
- [3] 原魁,李园,房立新.多移动机器人系统研究发展近况[J].自动化学报,2007,33(8):785-794.  
(Yuan K, Li Y, Fang L X. Multiple mobile robot systems: A survey of recent work[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(8): 785-794.)
- [4] Wang J L, Wu H N. Leader-following formation control of multi-agent systems under fixed and switching topologies[J]. International Journal of Control, 2012, 28(6): 695-705.
- [5] Arrichiello F, Chiaverini S, Indiveri G, et al. The null-space based behavioral control for mobile robots with velocity actuator saturations[J]. International Journal of Robotics Research, 2010, 29(10): 1317-1337.
- [6] Lewis R, Tan K. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. Autonomous Robots, 1997, 4(4): 387-403.

- [7] 王祥科, 李迅, 郑志强. 多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1601-1613. (Wang X K, Li X, Zheng Z Q. Survey of developments on multi-agent formation control related problems[J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1601-1613.)
- [8] Desai J, Ostrowski J, Kumar V. Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(6): 905-908.
- [9] Meng D Y, Jia Y M. Formation control for multi-agent systems through an iterative learning design approach[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2014, 24(2): 340-361.
- [10] 伍巧凤, 刘山. 初始误差修正的多智能体一致性迭代学习控制[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(1): 29-35. (Wu Q F, Liu S. Iterative learning control of multi-agent consensus with initial error correction[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(1): 29-35.)
- [11] Qian Y F, Wu X Q, Lu J A. Consensus of second-order multi-agent systems with nonlinear dynamics and time delay[J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 78(1): 495-503.
- [12] Chen W S, Ge S S, Wu J, et al. Globally stable adaptive backstepping neural network control for uncertain strict-feedback systems with tracking accuracy known a priori[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(9): 1842-1854.
- [13] Sun Z, Xia Y. Receding horizon tracking control of unicycle-type robots based on virtual structure[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2016, 26(17): 3900-3918.
- [14] Hou Z S, Jin S T. Model free adaptive control-theory and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013: 45-118.
- [15] Hou Z S, Wang Z. From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective[J]. Information Sciences, 2013, 235: 3-35.
- [16] Hou Z S, Chi R H, Gao H J. An overview of dynamic linearization based data-driven control and applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 4076-4090.
- [17] Coelho L D S, Coelho A A R. Model-free adaptive control optimization using a chaotic particle swarm approach[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 41(4): 2001-2009.
- [18] Lu C, Zhao Y, Men K, et al. Wide-area power system stabiliser based on model-free adaptive control[J]. IET Control Theory and Applications, 2015, 13(9): 1996-2007.
- [19] 侯忠生, 董航瑞, 金尚泰. 基于坐标补偿的自动泊车系统无模型自适应控制[J]. 自动化学报, 2015, 41(4): 823-831. (Hou Z S, Dong H R, Jin S T. Model-free adaptive control with coordinates compensation for automatic car parking systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(4): 823-831.)
- [20] Wang X F, Li X, Wang J H, et al. Data driven model-free adaptive sliding mode control for the multi degree-of-freedom robotic exoskeleton[J]. Information Sciences, 2016, 327: 246-257.
- [21] 王丹娜. 无模型自适应控制器参数整定方法及应用研究[D]. 北京: 北京交通大学电子信息工程学院, 2018: 45-50. (Wang D N. Parameter tuning of model-free adaptive controller and its application[D]. Beijing: School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, 2018: 45-50.)

### 作者简介

金尚泰 (1976—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事数据驱动控制等研究, E-mail: shtjin@bjtu.edu.cn;

李澈 (1991—), 女, 硕士生, 从事机器人控制的研究, E-mail: 17125105@bjtu.edu.cn;

任叶 (1990—), 男, 博士生, 从事数据驱动控制的研究, Email: 14111048@bjtu.edu.cn;

侯忠生 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事数据驱动控制等研究, Email: zhshhou@bjtu.edu.cn.

(责任编辑: 闫妍)