

基于 UWB 定位技术的多移动机器人编队控制

郑亚君¹, 薛磊^{1,2}, 董璐^{1,2}, 王庆领^{1,2}

(1. 东南大学, 江苏 南京 210096;
2. 南京云智控产业技术研究院, 江苏 南京 210023)

摘要: 提出了一种基于超宽带 (UWB) 定位系统的多移动机器人编队控制算法及系统。UWB 定位技术是一种较为成熟的技术, 但目前较少应用于编队控制问题中。首先给出了系统框架设计以及机器人的硬件设计, 然后对系统建立数学模型, 根据建立的系统模型, 设计出分布式控制算法, 并且给出系统稳定性的证明, 最后仿真验证了算法的有效性。

关键词: 移动机器人; UWB 定位; 编队控制

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201907

Formation control of mobile robots with UWB localization technology

ZHENG Yajun¹, XUE Lei^{1,2}, DONG Lu^{1,2}, WANG Qingling^{1,2}

1. Southeast University, Nanjing 210096, China
2. Nanjing Academy of Cloud-Intelligence-Control Industries, Nanjing 210023, China

Abstract: In this paper, a novel multi-mobile robots formation control algorithm based on ultra-wideband (UWB) location technology was proposed. UWB location technology is relatively mature but is less applied to formation control problem. The framework of systems and hardware design of mobile multi-robot systems were first presented. Then, the systems model was established and the corresponding distributed control algorithm was proposed. Finally, the stability of multi-robot systems was proved and one simulation example was given to show the effectiveness of the proposed formation control algorithm.

Key words: mobile robot, UWB localization, formation control

1 引言

多移动机器人的编队问题一直是分布式人工智能的研究热点, 也是协同控制中一个重要的研究方向。多移动机器人编队是指多个地面移动机器人按照一定的队形进行自主运动。随着电子技术、导航系统技术、机电技术的发展^[1-2], 多移动机器人有着丰富多样的外形, 常见的移动机器人有履式机器人、轮式机器人等^[3], 更可以搭载多种传感器及定位装置。多移

动机器人的编队应用领域广泛, 如无人驾驶技术^[4]、灾难救援、车联网系统^[5]、军事作战、搬运货物^[1]等。常用的定位系统有 GPS、摄像头定位等。GPS 在室内无法使用, 摄像头定位则适用范围较为局限, 需要进行校准。超宽带 (ultra-wideband, UWB) 定位技术与之相比具有更多优势: 不受室内外限制, 使用简单, 且定位精度高、范围广。

超宽带定位系统有测距和测向两项功能, 具有传输速率高、系统容量大、成本低等特点^[6]。一般

收稿日期: 2019-02-11; 修回日期: 2019-03-11

通信作者: 王庆领, qlwang@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U1713209, No.61803085, No.61806052)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.U1713209, No.61803085, No.61806052)

采用基于距离的定位算法,常用的包括信号到达角度 (angle of arrival, AOA) 定位算法、接收信号强度 (received signal strength, RSS) 分析法、到达时间 (time of arrival, TOA) 定位算法、到达时间差 (time difference of arrival, TDOA) 定位算法等多种定位算法^[7]。UWB 定位技术由于具有良好的性能,可应用于雷达探测、医学成像和室内定位等多个领域^[8]。基于 UWB 定位技术的多移动机器人编队问题已有部分国内外高校、企业机构做了相关研究。文献[9]中基于 UWB 定位技术并通过 LabVIEW 实现了自主跟随机器人的系统开发^[10]。文献[11]中使用 UWB 技术做定位,实现了包括四旋翼和全向机器人的多异构机器人的轨迹跟踪控制。文献[12]中使用 UWB 技术让多移动机器人完成编队,但并未使速度达成一致。本文通过 UWB 技术获取移动机器人的位置,并采用分布式控制算法使机器人能够完成设定的编队队形,使其速度保持一致。

本文的组织结构安排如下:首先给出系统硬件设计,然后建立系统模型,并设计出分布式控制算法,证明算法稳定性,最后给出仿真实例来验证算法有效性。

2 系统设计

多移动机器人编队系统主要由多个移动机器人、UWB 无线传感器网络 and 上位机显示软件构成^[12-14],系统框架示意如图 1 所示。

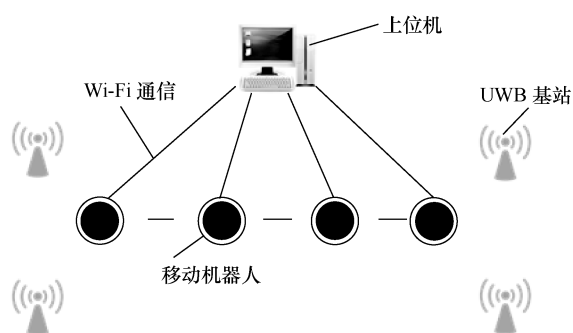


图 1 系统框架

UWB 无线传感器网络包括 4 个基站和标签,通过 TDOA 算法实现移动机器人的定位功能,移动机器人之间的通信通过 Wi-Fi 协议实现,交换彼此的位置和速度,以实现分布式控制。

如图 2 所示,移动机器人上装载 Pixhawk 控制板和树莓派。Pixhawk 控制板连接 UWB 标签和编码器,用于测量移动机器人的位置和速度信息,移

动机器人之间可以用 Wi-Fi 收发彼此的位置和速度。树莓派搭载摄像头,将所拍摄图像通过 Wi-Fi 收发模块传送给上位机显示软件,上位机显示软件可以显示移动机器人所拍摄的图像以及机器人所在的位置,以此达到监控的目的。

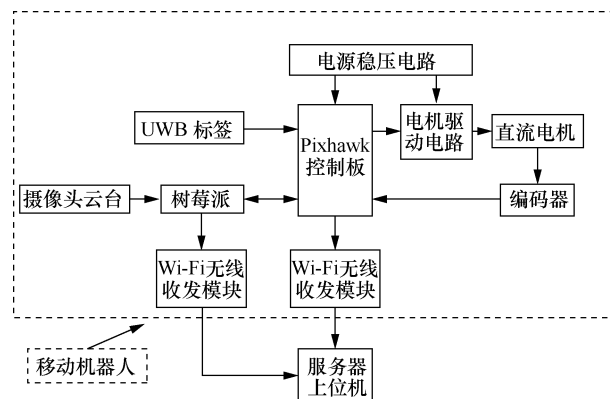


图 2 机器人系统硬件设计

3 编队算法设计

3.1 图论和基本引理

本节介绍一些基本的图论知识和引理^[15]。定义一个有权重的图为 $G=(V, \varepsilon, A)$, 其中 $V=(1, 2, \dots, N)$ 是一个有限非空点集, $\varepsilon \subseteq V \times V$ 是一个边序列, 邻接矩阵 $A=[a_{ij}] \in R^{N \times N}$ 表示图中每条边的权重。在本文中, 若 $a_{ij}=1$, 则 $(i, j) \in \varepsilon$; 若 $a_{ij}=0$, 则 $(i, j) \notin \varepsilon$ 。在无向图中, $a_{ij}=a_{ji}, i \neq j$, 并且 $a_{ii}=0, \forall i$ 。

定义拉普拉斯矩阵 $L=[l_{ij}] \in R^{N \times N}$, 其中
$$l_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}, l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j。$$

在无向图中, L 为对称矩阵。

矩阵 L 有如下性质, $l_{ij} \leq 0, i \neq j, \sum_{j=1}^N l_{ij} = 0, i=1, 2, \dots, N$ 。

引理 1^[16] $x:[0, \infty) \rightarrow R$ 一致连续, 如果 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t x(\tau) d\tau$ 存在且有界, 那么 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ 。

3.2 问题描述

设整个系统共有 N 个移动机器人, 移动机器人的位置由 UWB 技术获得, 速度由移动机器人上所搭载的编码器获取。假设每个移动机器人都为一个刚性质点, 考虑移动机器人的运动学系统

模型, 有

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{p}}(t) &= \boldsymbol{v}_i(t) \\ \dot{\boldsymbol{v}}(t) &= \boldsymbol{u}_i(t)\end{aligned}\quad (1)$$

其中, $i=1,2,\dots,N$, $\boldsymbol{p}_i(t) \in R^2$ 、 $\boldsymbol{v}_i(t) \in R^2$ 、 $\boldsymbol{u}_i(t) \in R^2$ 分别为第 i 个移动机器人的位置、速度和控制输入。

对于该系统, 要达到的控制目标为: 系统中的移动机器人速度达到一致, 位置达到设定的编队队形。设编队队形为 $\boldsymbol{h}_i(t) \in R^2$, $\boldsymbol{h}_i(t)$ 为可微分的连续向量, 且其导数应为常量, 令 $\boldsymbol{h}(t)=[\boldsymbol{h}_1(t), \boldsymbol{h}_2(t), \dots, \boldsymbol{h}_N(t)]^T$ 。

多移动机器人系统的控制目标为

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow \infty} (\boldsymbol{p}_i(t) - \boldsymbol{h}_i(t)) &= 0 \quad (i=1,2,\dots,N) \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (\boldsymbol{v}_i(t) - \boldsymbol{v}_j(t)) &= 0 \quad (i,j=1,2,\dots,N)\end{aligned}\quad (2)$$

3.3 算法设计

在本节中, 首先给出编队控制算法, 然后给出稳定性证明^[17-20]。

设计控制器如下:

$$\boldsymbol{u}_i(t) = k_{i1}(\boldsymbol{h}_i(t) - \boldsymbol{p}_i(t)) - k_{i2} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\boldsymbol{v}_i(t) - \boldsymbol{v}_j(t)) \quad (3)$$

其中, k_{i1} 、 k_{i2} 为第 i 个机器人的两个增益系数, a_{ij} 表示第 i 和 j 个机器人的通信拓扑连接。

定理 1 若 $k_{i1}, k_{i2} > 0$, 移动机器人系统 (1) 可以在控制器 (3) 下完成编队条件 (2)。

证明 设 $\boldsymbol{K}_1 = [k_{11}, k_{21}, \dots, k_{N1}]^T$, $\boldsymbol{K}_2 = [k_{12}, k_{22}, \dots, k_{N2}]^T$, $\boldsymbol{L}$ 为多移动机器人通信拓扑的拉普拉斯矩阵, 令 $\boldsymbol{p}(t) = [\boldsymbol{p}_1(t), \boldsymbol{p}_2(t), \dots, \boldsymbol{p}_N(t)]^T$, $\boldsymbol{v}(t) = [\boldsymbol{v}_1(t), \boldsymbol{v}_2(t), \dots, \boldsymbol{v}_N(t)]^T$, $\boldsymbol{u}(t) = [\boldsymbol{u}_1(t), \boldsymbol{u}_2(t), \dots, \boldsymbol{u}_N(t)]^T$, 由于 $k_{i1} > 0$, $\forall i \in N$, 可以设李雅普诺夫函数为

$$V(t) = \frac{1}{2} \boldsymbol{K}_1 \circ (\boldsymbol{p}(t) - \boldsymbol{h}(t))^T \boldsymbol{L} (\boldsymbol{p}(t) - \boldsymbol{h}(t)) + \frac{1}{2} \boldsymbol{v}^T(t) \boldsymbol{L} \boldsymbol{v}(t) \quad (4)$$

其中, “ $\circ$ ” 表示 Hadamard 积。

令 $\boldsymbol{\delta}_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}(\boldsymbol{v}_i(t) - \boldsymbol{v}_j(t))$, 则 $\boldsymbol{\delta} = [\boldsymbol{\delta}_1, \boldsymbol{\delta}_2, \dots, \boldsymbol{\delta}_N]^T$,

对李雅普诺夫函数 (4) 求导, 可以得到

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= \boldsymbol{K}_1 \circ (\boldsymbol{p}(t) - \boldsymbol{h}(t))^T \boldsymbol{L} (\boldsymbol{v}(t) - \dot{\boldsymbol{h}}(t)) + \boldsymbol{v}^T(t) \boldsymbol{L} \boldsymbol{u}(t) \\ &= \boldsymbol{K}_1 \circ (\boldsymbol{p}(t) - \boldsymbol{h}(t))^T \boldsymbol{\delta} + \boldsymbol{\delta}^T (\boldsymbol{K}_1 \circ (\boldsymbol{h}(t) - \boldsymbol{p}(t)) - \boldsymbol{K}_2 \circ \boldsymbol{\delta}) \\ &= \boldsymbol{K}_1 \circ (\boldsymbol{p}(t) - \boldsymbol{h}(t))^T \boldsymbol{\delta} + \boldsymbol{\delta}^T \boldsymbol{K}_1 \circ (\boldsymbol{h}(t) - \boldsymbol{p}(t)) - \boldsymbol{K}_2 \circ \boldsymbol{\delta}^T \boldsymbol{\delta}\end{aligned}$$

最后可以得到

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= k_{i1}(\boldsymbol{p}_i(t) - \boldsymbol{h}_i(t)) \boldsymbol{\delta}_i + \\ & k_{i1} \boldsymbol{\delta}_i (\boldsymbol{h}_i(t) - \boldsymbol{p}_i(t)) - k_{i2} \boldsymbol{\delta}_i^2 = -k_{i2} \boldsymbol{\delta}_i^2 < 0\end{aligned}$$

由此可以证明控制算法的稳定性。根据引理 1, 可以得出 $\lim_{t \rightarrow \infty} \boldsymbol{\delta}_i(t) = [0 \ 0]^T$, 并且式 (4) 中两项皆为 0, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \boldsymbol{p}_i(t) - \boldsymbol{h}_i(t) = [0 \ 0]^T$, 由此可以得出该算法能够实现控制目标 (2)。

3.4 仿真实例

在本节中, 给出仿真实例来验证算法的有效性。考虑 4 个移动机器人组成的编队系统, 该系统的通信拓扑结构如图 3 所示。系统的邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和拉普拉斯矩阵 $\boldsymbol{L}$ 分别为

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{L} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

系统的初始值和参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

位置初始值	$\boldsymbol{p}(0) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{p}_1^T(0) \\ \boldsymbol{p}_2^T(0) \\ \boldsymbol{p}_3^T(0) \\ \boldsymbol{p}_4^T(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 1 \\ 2 & 2 \\ 1 & 4 \end{bmatrix}$
速度初始值	$\boldsymbol{v}(0) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_1^T(0) \\ \boldsymbol{v}_2^T(0) \\ \boldsymbol{v}_3^T(0) \\ \boldsymbol{v}_4^T(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$
编队参数设定	$\boldsymbol{h}(t) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{h}_1^T(t) \\ \boldsymbol{h}_2^T(t) \\ \boldsymbol{h}_3^T(t) \\ \boldsymbol{h}_4^T(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3t & 3t \\ 3t & 3t+10 \\ 3t+10 & 3t \\ 3t+10 & 3t+10 \end{bmatrix}$
控制参数设定	$\boldsymbol{K}_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ $\boldsymbol{K}_2 = [3 \ 3 \ 3 \ 3]^T$

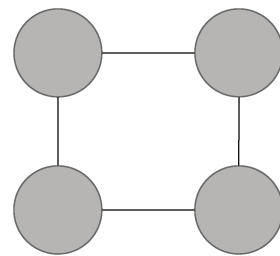


图 3 编队通信拓扑结构

按照定理 1 的设计,设置系统初始值和参数(见表 1),最后可得到仿真实验结果如图 4 和图 5 所示,可以看到 4 个移动机器人的速度逐渐达到一致,队形也设定成正方形编队运行。如图 4 所示,4 个移动机器人的速度从不一致到最后逐渐达到一致,这符合证明结果。如图 5 所示,在运行过程中,移动机器人从初始位置逐渐形成了编队队形。图 5 中特意选取 4 个移动机器人在 $t=10\text{ s}$ 和 $t=20\text{ s}$ 时的编队状态,可以看出移动机器人已经完成了编队,这也与图 4 一致(图 4 中,在 $t=10\text{ s}$ 时,移动机器人基本已经达到速度一致性)。

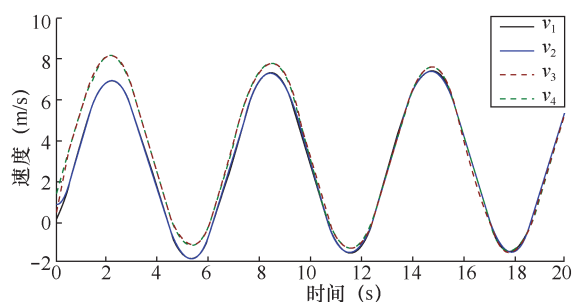


图 4 多移动机器人速度/时间变化曲线

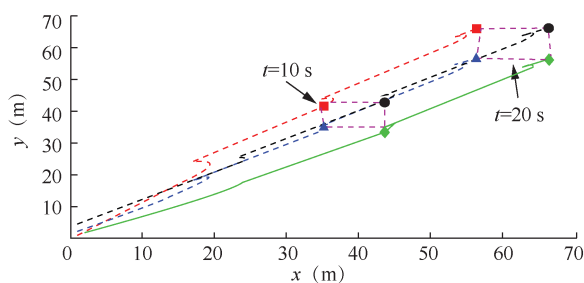


图 5 多移动机器人编队队形

4 结束语

本文首先给出了多移动机器人的硬件框架,并设计了一种基于 UWB 定位技术的多移动机器人编队控制算法,在给出稳定性的证明之后,又通过仿真实验证明了算法的有效性。从仿真实验中可以看出,该算法能够使多机器人系统达成速度一致性,并且能够按照给定轨迹曲线实现编队队形。在未来的工作中,会针对轨迹曲线出现抖动的现象,做进一步的算法优化和研究。

参考文献:

[1] 顾大强, 郑文钢. 多移动机器人协同搬运技术综述[J]. 智能系统学报, 2018, 1-8.

GU D Q, ZHENG W G. Technologies for cooperative transportation by multiple mobile robots[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2018, 1-8.

[2] 杨甜甜, 刘志远, 陈虹, 等. 移动机器人编队控制的现状与问题[J]. 智能系统学报, 2007(4): 21-27.

YANG T T, LIU Z Y, CHEN H, et al. Formation control of mobile robots: the state and open problems[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2007(4): 21-27.

[3] 徐国华, 谭民. 移动机器人的发展现状及其趋势[J]. 机器人技术与应用, 2001 (3): 7-14.

XU G H, TAN M. The development status and trend of mobile robots[J]. RTA, 2001 (3): 7-14.

[4] 姜岩, 赵熙俊, 龚建伟, 等. 简单城市环境下地面无人驾驶系统的设计研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 103-112.

JIANG Y, ZHAO X J, GONG J W, et al. System design of self-driving in simplified urban environments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 103-112.

[5] 要婷婷, 王迎春, 韩双双, 等. 平行车联网——一种新型的车联网管理与控制系统框架及其应用[C]//第九届全国平行控制会议, 大连, 中国, 2017.

YAO T T, WANG Y C, HAN S S, et al. Parallel vehicle networking-a new type of vehicle network management and control system framework and its application[C]// The Ninth National Parallel Control Conference, Dalian, China, 2017.

[6] 肖竹, 王勇超, 田斌, 等. 超宽带定位研究与应用: 回顾和展望[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 133-141.

XIAO Z, WANG Y C, TIAN B, et al. Research and application of ultra-wideband positioning: review and prospect[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 133-141.

[7] ZHU L, SUN S, MENZEL W. Ultra-wideband (UWB) bandpass filters using multiple-mode resonator[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(11): 796-798.

[8] YAN J, YANG X, LUO X, et al. Wireless network based formation control for multiple agents [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2014, 12(2): 415-421.

[9] 方晨晨. 基于 UWB 的自主跟随机器人定位方法[J]. 软件导刊, 2016, 15(9): 127-129.

FANG C C. UWB-based autonomous following robot positioning method[J]. Software Guide, 2016, 15(9): 127-129.

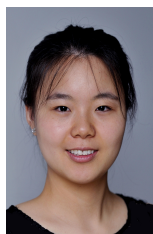
[10] 卫恒, 吕强, 王国胜, 等. 基于超宽带测距的异构移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7): 1461-1471.

WEI H, LV Q, WANG G S, et al. Trajectory tracking control of heterogeneous mobile robot based on ultra-wideband ranging[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7): 1461-1471.

[11] LV Q, WEI H, LIN H C, et al. Formation control of multi robot based on UWB distance measurement[C]//2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2018: 2404-2408.

- [12] 卢靖宇, 余文涛, 赵新, 等. 基于超宽带的移动机器人室内定位系统设计[J]. 电子技术应用, 2017, 43(5): 25-28.
LU J Y, YU W T, ZHAO X, et al. Design of indoor positioning system for mobile robot based on ultra-wideband[J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(5): 25-28.
- [13] MONDAL A, BEHERA L, SAHOO S R, et al. A novel multi-agent formation control law with collision avoidance[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(3): 558-568.
- [14] MAS I. Cluster space framework for multi-robot formation control[D]. Santa Clara: Santa Clara University, 2011.
- [15] ZHENG Y, WANG Q, SUN C. Adaptive consensus tracking of first-order multi-agent systems with unknown control directions[C]// International Symposium on Neural Networks. Springer, Cham, 2018: 407-414.
- [16] 闵颖颖, 刘允刚. Barbalat 引理及其在系统稳定性分析中的应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2007, 37(1): 51-55+114.
MIN Y Y, LIU Y G. Barbalat Lemma and its application in analysis of system stability[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2007, 37(1): 51-55+114.
- [17] DONG X, HAN L, LI Q, et al. Time-varying formation tracking for second-order multi-agent systems with one leader[C]//Chinese Automation Congress (CAC), 2015. IEEE, 2015: 1046-1051.
- [18] WANG Z, YANG C, DONG X, et al. Time-varying formation control for mobile robots: algorithms and experiments[C]//Industrial Electronics Society, IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE. 2017: 7239-7244.
- [19] PENG L, SHI L, CAO X, et al. Optimal attack energy allocation against remote state estimation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017.
- [20] YAN Y, GALIAS Z, YU X, et al. Euler's discretization effect on a twisting algorithm based sliding mode control[J]. Automatica, 2016, 68: 203-208.

[作者简介]



郑亚君(1994-), 女, 安徽人, 东南大学自动化学院博士生, 主要研究方向为多智能体系统、机器人编队控制。



薛磊(1986-), 男, 江苏人, 东南大学自动化学院博士后, 主要研究方向为博弈论、多智能体系统协同控制。



董璐(1990-), 女, 山西人, 东南大学自动化学院讲师, 主要研究方向为自适应动态规划、事件驱动控制。



王庆领(1982-), 男, 河南人, 东南大学自动化学院副教授, 主要研究方向为多智能体协同控制、饱和控制、强化学习等。