

一类有序化多移动机器人集群运动控制系统

程 磊¹, 俞 辉², 吴怀宇¹, 王永骥³

(1. 武汉科技大学 冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430081;

2. 三峡大学 非线性与复杂系统研究所, 湖北 宜昌 443002; 3. 华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 群集运动控制(flocking control)是一种新型的多移动机器人运动协调控制, 目前的研究多集中于无leader模式下群集运动控制器的设计. 为此, 本文阐述了一类多移动机器人有序化群集运动系统控制方案及其性能评价方法. 首先, 在前人的研究基础上, 本文介绍了基于Agent的有序化编队控制机制; 然后, 运用非完整约束下移动机器人的动力学原理, 设计了由Agent到移动机器人的控制转化方法; 并进一步提出了基于“最小稳定时间”的群集运动分析法, 可对有序化群集运动系统进行分析; 最后, 运用仿真实例, 描述了多移动机器人有序化群集运动的控制及分析过程. 实验结果验证了此控制方案的有效性.

关键词: 群集运动; 多智能体; 移动机器人; 有序化

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

A sequential flocking control system for multiple mobile robots

CHENG Lei¹, YU Hui², WU Huai-yu¹, WANG Yong-ji³

(1. Engineering Research Center of Metallurgical Automation and Measurement Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430081, China;

2. Institute of Nonlinear and Complex Systems, Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China;

3. Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Flocking control is a new type of control which coordinates the motions among multiple mobile robots. Current researches focus their attention on leaderless flocking controller design. We, in this paper, present the design of a sequential flocking control for multiple mobile robots, and put forward the corresponding performance evaluation method. Firstly, we briefly review the existing theories of agent-based sequential formation control; and then, transfer the agent-based flocking control strategy to the design of overall control algorithm for mobile robots, by considering the dynamics of nonholonomic mobile robot. To analyze the sequential flocking system, a flocking performance analysis method based on the least stability time(LST) is proposed. Simulations of real problems illustrate the processes of control and analysis of a multiple mobile robots sequential flocking system. The simulation results demonstrate the efficacy of our proposed procedure.

Key words: flocking; multi-agent; mobile robots; sequential

1 引言(Introduction)

群集运动控制(flocking control)是模拟自然界中生物聚合运动的新型分散式控制方法. Reynolds于1987年正式提出了群集运动的形式化定义^[1]. 立足于此概念, Tanner等人构建了基于Agent的群集运动基本控制律, 并分析了多个Agent在群集运动过程中的稳定性问题^[2~4]. Saber和Murray则提出在大量障碍物存在的前提下, 运用动态图理论解决Agent的群集问题^[5]. 在上述文献中, 主要论述了基于Agent的无leader模式群集运动理论, 即各个Agent之间的地位是平等的, 整体的运动表现出一

定的随机性. 无leader模式群集运动在数学上是最基本的群集运动形式, 但在自然界中, 大多数种群都会有一个或多个leader作为领航者, 以之作为群体运动的向导与核心. 有序化(sequential)群集运动的基本含义就是引入leader领航机制的群集运动, 这种群集运动模式是无leader群集运动模式的发展和补充.

群集运动思想来源于生物群体自组织行进现象的启发, 具有稳定性好、容错性强、可扩展性高等显著特点. 该控制理念非常适合于多个移动机器人的集体导航与协作勘察, 而此正是多移动机器人运动协调控制的研究重点, 但在此方向的研究目前还较

为欠缺. 基于上述研究背景, 本文引入了一类有序化多移动机器人集群运动控制算法, 可完成多移动机器人的有序化集群运动控制; 并提出了基于“最小稳定时间”的群集运动性能分析法, 可对群集运动系统进行一定的性能分析与优化设计.

2 基于 Agent 的有序化群集运动(Agent-based sequential flocking)

在这种模式中, 群集运动可分为leader的运动与followers的运动. leader的运动是自主的, 属于单Agent控制问题; 而为了构造稳定的群集运动系统, followers需要服从相应的有序化群集运动控制律. 考虑一个包含 N 个follower的群(本节中follower均表示follower Agent, leader Agent简记为leader, 下同), follower在绝对坐标系下的动力学方程为

$$\dot{r}_i = v_i, \quad (1a)$$

$$\dot{v}_i = u_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1b)$$

其中: $r_i = (x_i, y_i)^T$ 表示follower i 的位置矢量, $r_{ij} = r_i - r_j$, $v_i = (\dot{x}_i, \dot{y}_i)^T$ 表示速度矢量, $u_i = (u_x, u_y)^T$ 表示加速度控制矢量输入. leader的状态由 (r_L, v_L, u_L) 进行描述. follower i 相对于leader的位置矢量表示为 $\hat{r}_i = r_i - r_L$, 速度矢量表示为 $\dot{\hat{r}}_i = v_i - v_L$. follower i 与任意Agent j 之间的相对位置矢量亦可写为: $\hat{r}_{ij} = \hat{r}_i - \hat{r}_j$. follower 相对于leader的运动学方程可写为

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{r}_i \\ \dot{\hat{r}}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\hat{r}}_i \\ u_i - v_L \end{pmatrix}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

follower i 的总势函数 $V_i = \sum_{j \in N_i} V_{ij}(\|r_{ij}\|)$, 有

$$V_i = \chi_{N_L}(i) V_{iL}(\|r_{iL}\|) + \sum_{j \in N_i, j \neq L} V_{ij}(\|r_{ij}\|), \quad (3)$$

$\chi_{N_L}(i) = \begin{cases} 1, & i \in N_L \\ 0, & i \notin N_L \end{cases}$, N_L 表示leader的邻接集, N_i 表示follower i 的邻接集.

进而, 有序化Agent群集运动控制律 u_i 可定义为^[6]

$$u_i = - \underbrace{\sum_{j \in N_i} \nabla r_i V_{ij}}_{a_i} - \underbrace{\dot{\hat{r}}_i + v_L}_{\alpha_i}. \quad (4)$$

其中: α_i 为平衡Agent之间速度的控制矢量项, a_i 为控制Agent之间距离的控制矢量项.

定理 1 考虑由 N 个follower组成的群, 跟随1个leader进行运动, follower动力学特性由式(1)描述, follower控制律由式(4)描述. 假设由Agent(leader和followers)组成的群的邻接图 G 是连通的, 那么互连的Agent之间可以实现避碰, 并且所有Agent的速度

将渐近地收敛于leader的速度, 群内部的总势能将达到最小, 群形状将趋于稳定.

应用LaSalle不变性原理可证明定理1, 证明过程见文献[6].

引理 1 在式(4)中, 若

$$V_{ij} = A \cdot \left(\frac{L^2}{\|r_{ij}\|^2} + \log\|r_{ij}\|^2 \right),$$

则

$$\nabla r_i V_{ij} = \frac{\partial V_{ij}}{\partial r_{ij}} = A \cdot \left(-\frac{2L^2}{\|r_{ij}\|^3} + \frac{2}{\|r_{ij}\|} \right). \quad (5)$$

当 $\|r_{ij}\| = L$ 时, $\nabla r_i V_{ij} = 0$, 此时 V_{ij} 达到最小值, 系统进入稳态. L 定义为结构系数, $L > 0$. A 定义为势场调整系数, 以均衡 α_i 和 a_i 的作用效果, $A > 0$.

3 由Agent到移动机器人的控制转化方法(Control law transformation: from Agents to mobile robots)

由Agent到移动机器人的控制转化方法的基本原理是: 将Agent的直接控制量输入 u_i , 转化为移动机器人的直接控制量输入 v_i 和 ω_i . u_i 可被认为是作用于移动机器人上的所有虚拟力的合力.

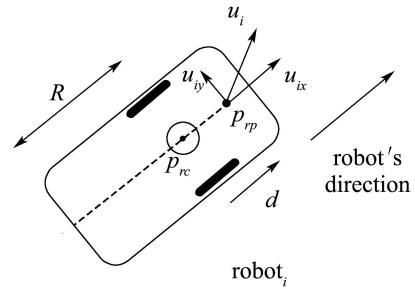


图1 u_i 控制下的机器人“受力”分析图

Fig. 1 The force diagram of robot controlled by u_i

在图1中: R 为移动机器人的半径, p_{rp} 为移动机器人的参考点, p_{rc} 为移动机器人的自旋转中心, p_{rp} 与 p_{rc} 之间的位移为 d , 其正方向为移动机器人的前进方向. 移动机器人采样得到的定位位姿为 $(x_{p_{rc}}, y_{p_{rc}}, \theta_i)$, θ_i 为机器人的方位角. u_i 在全局坐标系中的夹角为 β_i . u_{ix} 的正方向为移动机器人的前进方向, u_{iy} 的正方向为以 p_{rc} 为圆心取逆时针方向. 由图1:

$$u_{ix} = u_i \cdot \cos(\beta_i - \theta_i), \quad (6a)$$

$$u_{iy} = u_i \cdot \cos(\beta_i - \theta_i - \pi/2), \quad (6b)$$

$$x_i = x_{p_{rp}} = x_{p_{rc}} + d \cdot \cos\theta_i, \quad (6c)$$

$$y_i = y_{p_{rp}} = y_{p_{rc}} + d \cdot \sin\theta_i. \quad (6d)$$

考虑到 u_i 是作用于机器人上的虚拟力, 运用动力学方程, 有

$$a_{v_i} = \frac{u_{i_x}}{m_i}, \quad (7a)$$

$$a_{r_i} = \frac{d \cdot u_{i_y}}{I_i}. \quad (7b)$$

其中: a_{v_i} 为移动机器人的平动加速度控制输入, a_{r_i} 为移动机器人的转动加速度控制输入. m_i 定义为移动机器人虚拟质量, I_i 定义为移动机器人虚拟转动惯量. 由物理学动量公式得

$$f \Delta t = m v(t + \Delta t) - m v(t). \quad (8)$$

若 Δt 为一个很短的脉冲时间, 可近似认为

$$u_{i_x}(t) \Delta t = m_i v_i(t + \Delta t) - m_i v_i(t), \quad (9a)$$

$$u_{i_y}(t) \Delta t = m_i \omega_i(t + \Delta t) d - m_i \omega_i(t) d. \quad (9b)$$

综合式(6)~(10), 有

$$v_i(t + \Delta t) = \frac{u_i \cos(\beta_i - \theta_i)}{m_i} \Delta t + v_i(t), \quad (10a)$$

$$\omega_i(t + \Delta t) = \frac{u_i \sin(\beta_i - \theta_i) d}{I_i} \Delta t + \omega_i(t). \quad (10b)$$

基于此公式, 可实现由Agent到移动机器人的运动控制转化.

4 基于“最小稳定时间”的群集运动性能分析(Flocking performance analysis based on Least Stability Time)

定义 1 (群集中心) 考虑包含 N 个Agent的1个群, 其网络拓扑关系由邻接图 G 描述, 群的位置矢量由矢量集 $\{r_i | i \in [1, N]\}$ 描述, 群集中心 $r_c = \sum_{i=1}^N r_i / N$.

可以利用个体与群集中心之间距离的集合 F , 概略描述任意时刻 t 时群集系统的形状. 同时, 可以利用 t 时刻与 $t - \Delta t$ 时刻群集形状向量 $F(t)$ 与 $F(t - \Delta t)$ 之间的距离 F_δ , 概略描述任意时刻 t 时群集系统的形变:

$$F = (\|r_i - r_c\|)^T, \quad i = 1, \dots, N, \quad (11)$$

$$F_\delta(t) = \|F(t) - F(t - \Delta t)\|_2. \quad (12)$$

F_δ 可以描述群集系统的动态变化情况: 当 F_δ 值较大且处于波动状态时, 系统处于不稳定的振荡状态, 系统较难或不能收敛. 当 $F_\delta \rightarrow 0$ 时, 表明群集系统基本不发生变化, 系统趋于稳定.

定义 2 (群集系统最小稳定时间) 假定一个群在 t_0 时刻的形变量为 $F_\delta(t_0)$, 若 $F_\delta(t_0) = 0$, 则称群在 t_0 时刻是瞬时稳定的, 若 $F_\delta(t) \equiv 0, t \in [t_0, +\infty)$, 则称群在 t 时刻是持续稳定的, 其稳态初始时间 t_0 定

义为群集系统最小稳定时间 t_{fs} .

性能评价准则 在群集系统最小稳定时间出现之前, 可能有一部分个体已经进入稳态. 但只要有一个个体未进入稳态, 群系统都不能称为进入稳态, 这是与单体控制系统的区别. 因此, 群系统的最小稳定时间, 实际上是其内部成员的最大稳定时间. 可以利用最小稳定时间 t_{fs} 评价1个群集系统的优劣: 当1个群集系统在初始位置和个体数目相同的情况下, 如果拥有更小的 t_{fs} , 则表明系统的动态过渡过程较短, 从而拥有更好的动态特性.

5 仿真(Simulations)

仿真过程如下所述:

5.1 初始设置(Initial setting)

假设leader机器人向某个设定目标点 p_d 进行运动, 在任意时刻, leader服从如下控制律:

$$\begin{aligned} \dot{v}_L(t) = & 10 \|l(t)\| \cos(\angle l(t)) \cos \theta_L(t) + \\ & 10 \|l(t)\| \sin(\angle l(t)) \sin \theta_L(t) - 6 v_L(t). \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $\|l(t)\|$ 为 t 时刻leader机器人与目标点之间的距离, $\angle l(t)$ 为 t 时刻leader机器人与目标点之间的夹角.

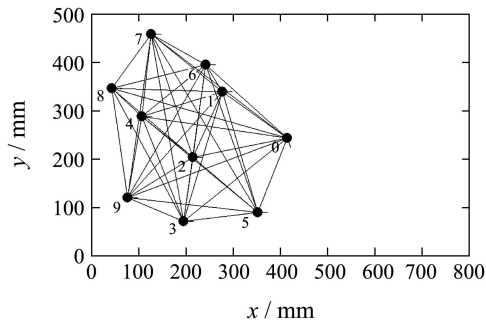
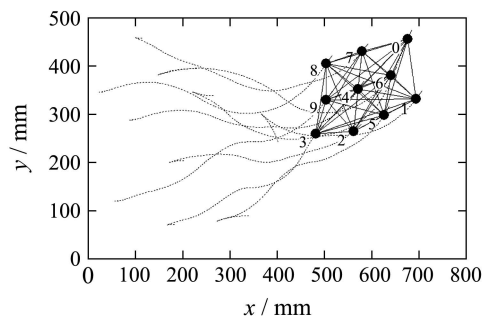
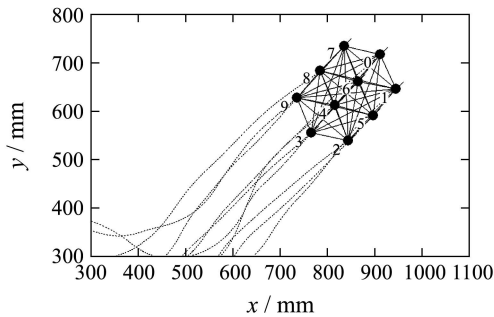
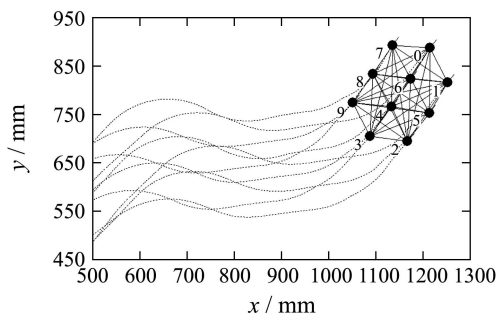
设定followers最大平动速度 $v_{\max} = 100 \text{ mm/s}$, leader最大平动速度为followers的1/2, $\omega_{\max} = 18^\circ/\text{s}$, $d = 2 \text{ mm}$, $m_i = 0.1$, $I_i = 0.2$, $A = 1000$, $\Delta t = 0.01 \text{ s}$, $L = 100 \text{ mm}$, 移动机器人半径 $R = 10 \text{ mm}$; 设定leader的序号为0, 其余序号的机器人为followers. 考虑到移动机器人的最大平动速度和最大转动速度的限制, 对式(11)作如下修正:

$$v_i = \begin{cases} v_{\max}, & v_i(t + \Delta t) > v_{\max}, \\ v_i(t + \Delta t), & \text{其他}, \\ -v_{\max}, & v_i(t + \Delta t) < -v_{\max}. \end{cases} \quad (14a)$$

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_{\max}, & \omega_i(t + \Delta t) > \omega_{\max}, \\ \omega_i(t + \Delta t), & \text{其他}, \\ -\omega_{\max}, & \omega_i(t + \Delta t) < -\omega_{\max}. \end{cases} \quad (14b)$$

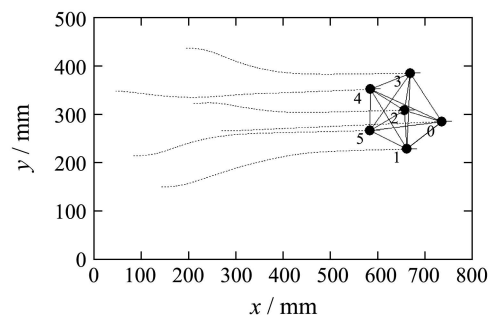
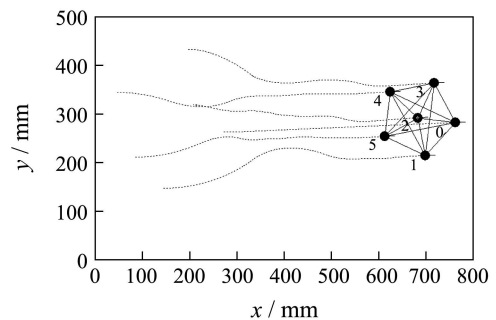
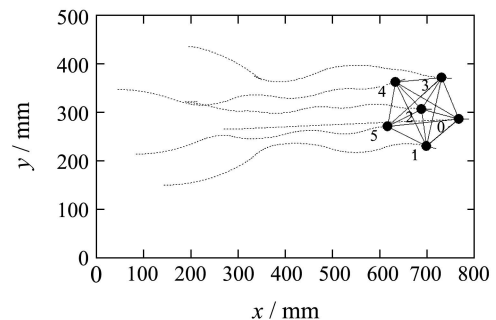
5.2 仿真结果(Simulation results)

图2~图5显示了10台移动机器人进行群集运动的仿真过程, 图2描述了1个任意散布的机器人群的初始位置和位姿; 图3显示系统在群集控制律的作用下开始收敛, 形成紧密队形的情形, 此时各个follower的迎角也开始趋近于leader的迎角. 图4显示系统运动到目标点附近, 此时, 群集系统已收敛到稳定状态, 各机器人之间的距离和迎角差已基本不发生变化. 图5显示leader的目标点改变后, followers跟随leader作变曲线运动时良好的队形保持能力, 该结果表明群集控制律作用下, 多机器人运动协调系统相当稳定.

图2 运动轨迹($t = 0.0$ s)Fig. 2 Motion tracks($t = 0.0$ s)图3 运动轨迹($t = 9.8$ s)Fig. 3 Motion tracks($t = 9.8$ s)图4 运动轨迹($t = 17.2$ s)Fig. 4 Motion tracks($t = 17.2$ s)图5 运动轨迹($t = 30.5$ s)Fig. 5 Motion tracks($t = 30.5$ s)

势场调整系数 A 是一个关键参数,它均衡了 α_i 和 a_i 的作用效果.通过“最小稳定时间”指标,可以对不同的群集过程进行分析和比较,以选取合适的 A 值,进而获得较优的群集系统动态性能.

图6~图8分别为 $A = 500, 3000, 7000$ 时的有序化群集运动轨迹,其“最小稳定时间”分别为 $t_{fs} = 27.14$ s, 12.11 s, 20.14 s. 通过计算 t_{fs} ,可以发现:当 $A < 1000$ 时,系统“形变”较小而导致过渡过程较长,当 $A > 5000$ 时,系统“形变”较大亦导致过渡过程较长.在对不同初始位置、不同数目的多机器人有序化群集运动系统进行多次实验后发现,当 $1000 < A < 5000$ 时, t_{fs} 可以取得极小值.根据这一定量分析结果,可以确定 A 的优化值($1000 < A < 5000$),以之作为有序化群集运动控制律的基准参数.

图6 运动轨迹($A = 500$)Fig. 6 Motion tracks($A = 500$)图7 运动轨迹($A = 3000$)Fig. 7 Motion tracks($A = 3000$)图8 运动轨迹($A = 7000$)Fig. 8 Motion tracks($A = 7000$)

(下转第1127页)

- [6] 李春文, 冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [7] WEI J D, SUN C T. Constructing hysteretic memory in neural networks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2000, 30(4): 601 – 609.
- [8] HOYAKIMYAN N, NANDI F, CALIS A. Adaptive output feedback control of uncertain nonlinear systems using single-hidden-layer neural networks[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2002, 13(6): 1420 – 1431.
- [9] CALIS A, HOYAKIMYAN N, IDAN M. Adaptive output feedback control of nonlinear systems using neural networks[J]. *Automatica*, 2001, 37(6): 1201 – 1211.
- [10] LI C T, TAN Y H. Adaptive output feedback control of systems preceded by the Preisach-type hysteresis[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2005, 35(1): 130 – 135.

附录(Appendix):

需要 $v_{ad} \mapsto \hat{f}$ 为压缩映射, 即

$$\left| \frac{\partial \hat{f}}{\partial v_{ad}} \right| < 1 \Rightarrow \left| \frac{\partial(F - \hat{f})}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial v_{ad}} \right| < 1 \Rightarrow \left| \frac{\partial(F - \hat{f})}{\partial v} \left(\frac{\partial \hat{f}}{\partial v} \right)^{-1} \right| < 1 \Rightarrow$$

$$\left| \frac{\partial F}{\partial v} - 1 \right| < 1 \Rightarrow \left| \frac{\frac{\partial F}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial v}}{\frac{\partial \hat{f}}{\partial v}} - 1 \right| < 1.$$

上式等价于

$$\operatorname{sgn} \frac{\partial F}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial v} = \operatorname{sgn} \frac{\partial \hat{f}}{\partial v} \quad \left| \frac{\partial \hat{f}}{\partial v} \right| > \frac{1}{2} \left| \frac{\partial F}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial v} \right| > 0,$$

即文中的式(21)(22).

作者简介:

赵新龙 (1977—), 男, 博士, 目前研究方向为非线性系统的智能控制、动态系统建模等, E-mail: zhaoxinlong@hotmail.com;

谭永红 (1958—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制、非线性系统建模与控制、故障诊断等, E-mail: tany@guet.edu.cn;

董建萍 (1964—), 女, 副教授, 1987年硕士毕业于中南工业大学工业自动化专业, 目前研究方向为非线性系统建模与控制.

(上接第1120页)

7 结论(Conclusion)

本文介绍了一类有序化移动机器人集群运动控制算法, 该算法可使集群运动成为有序化控制行为; 本文还提出了基于“最小稳定时间”的集群运动分析法, 可以对有序化集群运动进行性能分析. 该算法主要考虑的是简单环境下的机器人集群行为, 若考虑到所处环境的复杂性对机器人的影响, 则可以通过“将集群运动模式同基于行为的仿生控制模式相结合”之方式加以处理, 而这种新的多模态有序化集群运动控制方法将是笔者今后的研究重点.

参考文献(References):

- [1] REYNOLDS C. Flocks, birds, and schools: a distributed behavior model[J]. *Computer Graphics*, 1987, 21(4): 25 – 34.
- [2] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Stable flocking of mobile agents, part I: fixed topology[C]//*Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway: IEEE Press, 2003, 2: 2010 – 2015.
- [3] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Stable flocking of mobile agents, part II: dynamic topology[C]//*Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway: IEEE Press, 2003, 2: 2016 – 2021.

- [4] TANNER H G. Flocking with obstacle avoidance in switching networks of interconnected vehicles[C]//*Proceedings of IEEE Internet Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE Press, 2004, 3: 3006 – 3011.
- [5] SABER R O, MURRAY R M. Flocking with obstacle avoidance: cooperation with limited communication in mobile networks[C]//*Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway: IEEE Press, 2003, 2: 2022 – 2028.
- [6] 俞辉, 王永骥, 程磊. 稳定的有领航者的多移动Agent集群运动控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(8): 56 – 58. (YU Hui, WANG Yongji, CHENG Lei. Control of stable flocking motion of multiply-agent with a leader[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2005, 33(8): 56 – 58.)

作者简介:

程磊 (1976—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为多机器人系统, E-mail: chenglei@wust.edu.cn;

俞辉 (1967—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为多智能体协调控制, E-mail: yuhui@ctgu.edu.cn;

吴怀宇 (1961—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为微小型机器人及光机电一体化系统, E-mail: whyjwc@163.com;

王永骥 (1955—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为神经网络、智能控制及机器人控制, E-mail: wangyjch@hust.edu.cn.