

基于轨迹跟踪车式移动机器人编队控制

王保防, 张瑞雷, 李 胜, 陈庆伟

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘要: 针对车式移动机器人的运动学模型特点, 提出一种基于轨迹跟踪多机器人编队控制方法. 首先利用编队结构参数确定队形, 根据编队轨迹和相关参数生成虚拟机器人, 把编队控制转化为跟随机器人对虚拟机器人的轨迹跟踪; 然后运用反步法构造车式移动机器人轨迹跟踪系统的 Lyapunov 函数, 通过使该函数负定, 得到跟随机器人的轨迹跟踪控制器; 最后在 Microsoft robotics developer studio 4 (MRDS4) 中搭建 3D 仿真平台, 设计了 3 组实验, 所得结果表明了所提出方法的有效性.

关键词: 车式移动机器人; 轨迹跟踪; 反步法; 编队控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

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

WANG Bao-fang, ZHANG Rui-lei, LI Sheng, CHEN Qing-wei

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: ZHANG Rui-lei, E-mail: zhangrelay@qq.com)

Abstract: For the characteristic of the car-like mobile robot, the formation control algorithm is proposed based on the trajectory tracking. The shape of formation is determined by the parameter matrix. The virtual robot is generated according the leader robot and related formation parameters, translating the formation control problem into the trajectory tracking problem between the following robot and virtual robot. The Lyapunov function of the trajectory tracking system is constructed by using the backstepping method. The trajectory tracking controller is obtained by making this function negative. Three groups of experiments are designed in the Microsoft robotics developer studio 4. The simulation results show the effectiveness of the presented method.

Keywords: car-like mobile robot; trajectory tracking; backstepping method; formation control

0 引言

近年来, 随着机器人和人工智能技术的发展, 多机器人系统协调问题越来越受到人们的关注^[1]. 多机器人编队控制是一个典型的多机器人协调问题, 在地理勘测、侦查救援、扫雷以及运输等领域有着广阔的应用前景. 目前, 多机器人的编队控制算法主要包括基于行为的方法^[2-3]、虚拟结构法^[4-6]和领航-跟随法^[7-9]等.

基于行为的编队方法实现简单, 适用于不确定环境, 但编队精度差且很难进行精确的数学分析^[2-3]; 虚拟结构法^[4-6]和领航跟随法^[7-9]都分别需要虚拟结构和领航机器人全状态信息, 在此基础上, 设计相关算法策略, 实现编队控制. 文献 [4] 在虚拟结构法和一

致性理论的基础上, 提出了一种统一分布式编队控制结构. 文献 [5] 将虚拟结构法与路径跟踪法相结合, 实现了多机器人的编队控制. 文献 [6] 在此基础上研究了位置传感器和通信等出现故障时, 编队保持的问题. 文献 [7] 对输入受限制的多机器人编队进行了研究. 文献 [8] 提出了基于领航跟随法的队形控制方法, 但其算法实现需要队形满足内三角形的关系. 文献 [9] 在此基础上提出了改进的编队控制算法, 实现了包括线形队形在内的队形控制. 但上述研究多集中于平坦地形环境下两轮差动机器人, 对于常见的车式移动机器人研究则较少. 目前, 针对车式移动机器人的研究大多集中于如何获得精确轨迹跟踪. 如: 文献 [10] 针对车式移动机器人轨迹跟踪这一典型控制任

收稿日期: 2013-09-13; 修回日期: 2014-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074023, 51175266); 江苏省科技支撑计划项目(BE2012175); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13.0207).

作者简介: 王保防(1989—), 男, 博士生, 从事智能系统控制、高精度轨迹跟踪系统的研究; 陈庆伟(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制与智能系统等研究.

务, 提出一种滑模轨迹跟踪控制方法, 实现了机器人有效跟踪参考轨迹, 而且能减小在控制中的抖振现象; 文献[11-12]通过对一类非完整系统的研究, 将其转化为链式系统形式, 应用反步法设计轨迹跟踪控制器, 实现了轨迹跟踪, 但控制器过于复杂, 工程上不易实现; 文献[13]利用一个正则坐标变换, 将误差系统转换为一个非线性串联系统的形式, 然后利用反步法设计车式移动机器人轨迹追踪控制器, 实现了对给定目标的全局渐近追踪。

车式移动机器人对起伏地形等环境适应能力要优于两轮移动机器人。本文针对车式移动机器人的特点, 结合文献[7-9]采用领航跟随法(该方法易于工程实现, 且便于对编队误差进行分析), 应用编队参数生成虚拟机器人, 然后构造跟踪误差系统, 利用反步法设计该系统控制器以实现车式移动机器人的编队控制。设计3组仿真实验, 通过对起伏地形环境下不同曲线的轨迹跟踪和队形变换, 验证了所提出方法的有效性。

1 问题描述

文中的车式移动机器人如图1所示。其中: 后轮与机器人运动方向一致, 前轮绕垂轴转动, 表示前轮与后轮间的轴间距, 机器人的位姿向量为 $p = [x, y, \theta, \phi]^T$ 。

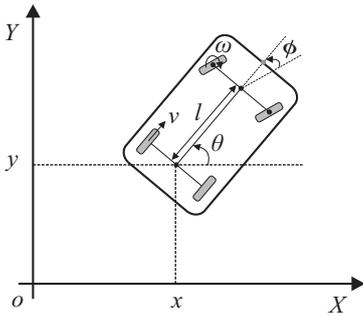


图1 车式移动机器人结构

图1中: $(x, y)^T$ 为后轮轮轴中心坐标, θ 为车身方向与 x 轴的夹角, ϕ 为前轮转向角, $(v, \omega)^T$ 为机器人的控制输入, v 为后轮前进速度, ω 为前轮侧转角速度。该系统的运动学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta, \\ \dot{y} = v \sin \theta, \\ \dot{\theta} = v(\tan \phi)/l, \\ \dot{\phi} = \omega. \end{cases} \quad (1)$$

对于一个领航-跟随编队系统, 编队的主轨迹通常由领航机器人决定。跟随机器人的参考轨迹由领航机器人和结构参数生成的虚拟机器人轨迹决定。一个典型的三角形编队如图2所示, 图中的所有机器人具有相同的运动学模型, 虚拟机器人 R_v 的后轮前进速度

和前轮侧转角速度与领航机器人 R_1 相同, 即 $v_v = v_l$, $\omega_v = \omega_l$ 。

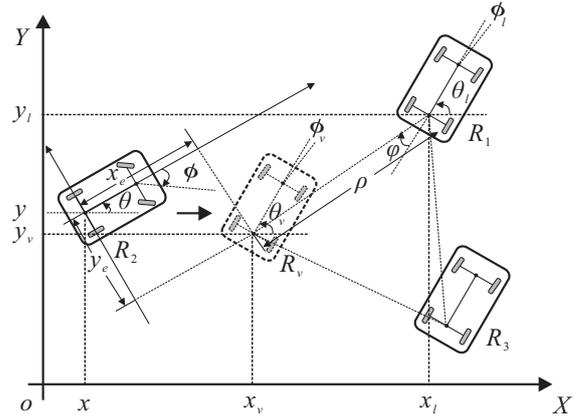


图2 车式移动机器人三角形编队

机器人 R_1 的位姿为 $p_l = [x_l, y_l, \theta_l, \phi_l]^T$, R_2 和 R_3 是 R_1 的跟随机器人。 R_v 是机器人 R_2 需要跟随的虚拟机器人, 位姿为 $p_v = [x_v, y_v, \theta_v, \phi_v]^T$, 与 R_1 保持的期望距离和角度为 $(\rho, \varphi)^T$ 。由 R_1 可得 R_v 的位姿为

$$\begin{cases} x_v = x_l - \rho \cos(\theta_l + \varphi), \\ y_v = y_l - \rho \sin(\theta_l + \varphi), \\ \theta_v = \theta_l, \\ \phi_v = \phi_l. \end{cases} \quad (2)$$

R_2 在 X - Y 坐标系下的跟踪位姿误差为 $(x_v - x, y_v - y, \theta_v - \theta, \phi_v - \phi)$, 通过如下变换, 在机器人 R_2 坐标系下可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \\ \phi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e & 0 & 0 \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_v - x \\ y_v - y \\ \theta_v - \theta \\ \phi_v - \phi \end{bmatrix}. \quad (3)$$

对式(3)求导, 并结合(1)的运动学模型, 可得如下误差系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_e = v_v \cos \theta_e + y_e v_v (\tan \phi)/l - v, \\ \dot{y}_e = v_v \sin \theta_e - x_e v_v (\tan \phi)/l, \\ \dot{\theta}_e = v_v (\tan \phi_v)/l - v (\tan \phi)/l, \\ \dot{\phi}_e = \omega_v - \omega. \end{cases} \quad (4)$$

至此, 编队控制问题便转化为跟随机器人 R_2 对虚拟机器人 R_v 的轨迹跟踪问题, 通过寻求合适的控制率 v 和 ω , 可使式(4)描述的误差系统渐近稳定。

2 控制器设计

为了得到车式移动机器人的全局轨迹跟踪控制器, 首先采用如下变换:

$$\begin{cases} \xi_1 = x_e, \\ \xi_2 = y_e, \\ \xi_3 = \theta_e, \\ \xi_4 = v(\tan \phi)/l - u_1, \end{cases} \quad (5)$$

其中 u_1 为引入的中间变量. 对式 (5) 求导, 并将 (4) 代入其中, 可得

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = v_v \cos \xi_3 + u_1 \xi_2 - v + \xi_2 \xi_4, \\ \dot{\xi}_2 = v_v \sin \xi_3 - u_1 \xi_1 - \xi_1 \xi_4, \\ \dot{\xi}_3 = v_v (\tan \phi_v) / l - u_1 - \xi_4, \\ \dot{\xi}_4 = u_2, \end{cases} \quad (6)$$

这里 $u_2 = (\dot{v} \tan \phi - v \omega / \cos^2 \phi) / l - \dot{u}_1$. 将式 (6) 表示为

$$\begin{cases} \dot{\xi}_i = f_i(\xi, v, u_1) + g_i(\xi) \xi_4, \quad i = 1, 2, 3; \\ \dot{\xi}_4 = u_2. \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\xi = [\xi_1, \xi_2, \xi_3]^T$, $f_1 = v_v \cos \xi_3 + u_1 \xi_2 - v$, $f_2 = v_v \sin \xi_3 - u_1 \xi_1$, $f_3 = v_v (\tan \phi_v) / l - u_1$, $g_1 = \xi_2$, $g_2 = -\xi_1$, $g_3 = -1$. 由式 (7) 可知, 系统是一个通过积分环节串联的非线性系统, 可运用反步法构造系统 Lyapunov 函数, 进行控制器设计.

定理 1 如果 $v_v, \omega_v, \dot{v}_v, \dot{\omega}_v$ 有界且 $v_v > 0$, 则存在控制律 (v, ω) , 使得式 (4) 描述的误差系统渐近稳定.

证明 对于系统 (7) 的第 1 个子系统

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = f_1(\xi, v, u_1), \\ \dot{\xi}_2 = f_2(\xi, v, u_1), \\ \dot{\xi}_3 = f_3(\xi, v, u_1), \end{cases} \quad (8)$$

选取

$$W = \frac{1}{2}(\xi_1^2 + \xi_2^2) + \frac{1 - \cos \xi_3}{k_2}$$

作为系统 (8) 的 Lyapunov 函数. 当取如下控制律时:

$$\begin{cases} v = v_v \cos \xi_3 + k_1 \xi_1, \\ u_1 = v_v (\tan \phi_v) / l + k_2 \xi_2 v_v + (\sin \xi_3) / k_3, \end{cases} \quad (9)$$

其中 k_1, k_2, k_3 是大于零的常数, 有

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \dot{\xi}_1 \xi_1 + \dot{\xi}_2 \xi_2 + \sin(\xi_3 \dot{\xi}_3) / k_2 = \\ &\xi_1 (v_v \cos \xi_3 + u_1 \xi_2 - v) + \\ &\xi_2 (v_v \sin \xi_3 - u_1 \xi_1) + \\ &\sin(\xi_3 (v_v (\tan \phi_v) / l - u_1)) / k_2 = \\ &\xi_1 (v_v \cos \xi_3 - v) + \sin(\xi_3 (v_v (\tan \phi_v) / l + \\ &k_2 \xi_2 v_v - u_1)) = \\ &-k_1 \xi_1^2 - \sin^2 \xi_3 / (k_2 k_3) < 0, \end{aligned}$$

\dot{W} 负定, 因此, $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)^T = 0$ 是系统 (8) 的渐近平衡点. 进一步, 选取

$$V(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4) = W(\xi_1, \xi_2, \xi_3) + \frac{1}{2} \xi_4^2 \quad (10)$$

作为式 (6) 的 Lyapunov 函数. 当取如下控制律时:

$$\begin{cases} v = v_v \cos \xi_3 + k_1 \xi_1, \\ u_2 = (\sin \xi_3) / k_2 - k_4 \xi_4, \end{cases} \quad (11)$$

有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^3 \frac{\partial W}{\partial \xi_i} \dot{\xi}_i + \xi_4 \dot{\xi}_4 = \\ &\sum_{i=1}^3 \frac{\partial W}{\partial \xi_i} f_i + \left(\sum_{i=1}^3 \frac{\partial W}{\partial \xi_i} g_i + u_2 \right) \xi_4 = \\ &-k_1 \xi_1^2 - \sin^2 \xi_3 / (k_2 k_3) + \\ &(-(\sin \xi_3) / k_2 + u_2) \xi_4 = \\ &-k_1 \xi_1^2 - \sin^2 \xi_3 / (k_2 k_3) - k_4 \xi_4^2 < 0, \end{aligned}$$

\dot{V} 负定, 因此在控制律 (11) 作用下, 系统 (6) 渐近稳定. 因为变换 (5) 是正则的, 所以误差系统 (4) 渐近稳定. \square

结合式 (6) 和 (11), 可得

$$(\sin \xi_3) / k_2 - k_4 \xi_4 = (\dot{v} \tan \phi - v \omega / \cos^2 \phi) / l - \dot{u}_1, \quad (12)$$

整理后得到

$$\omega = \frac{((\sin \xi_3) / k_2 - k_4 \xi_4 - \dot{v} (\tan \phi) / l + \dot{u}_1) l \cos^2 \phi}{v_v \cos \xi_3 + k_1 \xi_1}. \quad (13)$$

综上所述, 可得

$$\begin{cases} v = v_v \cos \xi_3 + k_1 \xi_1, \\ \omega = \frac{((\sin \xi_3) / k_2 - k_4 \xi_4 - \dot{v} (\tan \phi) / l + \dot{u}_1) l \cos^2 \phi}{v_v \cos \xi_3 + k_1 \xi_1}. \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} \xi_1 &= x_e, \quad \xi_2 = y_e, \quad \xi_3 = \theta_e, \\ \xi_4 &= v (\tan \phi) / l - u_1, \\ u_1 &= v_v (\tan \phi_v) / l + k_2 y_e v_v + \sin \theta_e / k_3. \end{aligned}$$

3 仿真结果

下面通过 3 组车式移动机器人编队仿真来验证本文算法的有效性. 为了使仿真实验更为真实, 利用 MRDS4 搭建 3D 仿真平台^[4], 仿真中的地形均为起伏地形. 该软件提供了逼真的物理引擎和完备的调试接口, 能够精确模拟真实环境, 也可将仿真数据导入 Matlab 中进行研究和分析. 仿真场景如图 3 所示.

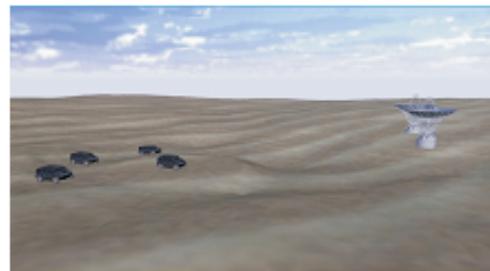


图 3 仿真环境场景

仿真中, 车式机器人的轴距为 $l = 1.9 \text{ m}$, 各控制器的参数为: $k_1 = 1.1, k_2 = 1.3, k_3 = 0.9, k_4 = 1.0$. 机

机器人装配有虚拟传感器, 可以实时获取机器人的位姿等状态信息, R_1 为领航机器人, 其余机器人为跟随机器人。

仿真 1 4 个机器人从初始位置先完成菱形编队, 然后保持编队做螺旋形运动. 各机器人的初始位置、编队参数和运动轨迹如图 4(a) 所示, 各跟随机器人的编队位置误差 ($\sqrt{x_e^2 + y_e^2}$) 和角度误差 ($|\theta_e|$) 如图 4(b) 所示, 其中 R_4 的控制器为文献 [13] 中的方法. 各机器人后轮速度 v 和前轮转向角速度 ω 如图 4(c) 所示. R_1 的后轮速度和前轮转向角速度均为常量, 跟随机器人在外侧时后轮速度较大, 在内侧时后轮速度较小。

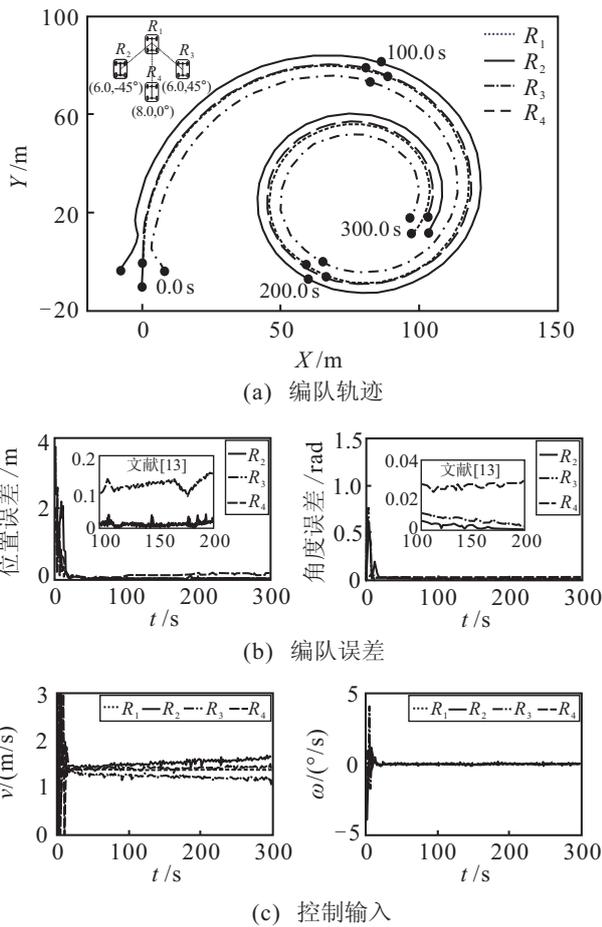


图 4 菱形队形仿真

仿真 2 3 个机器人从初始位置先完成线形编队, 然后保持编队做类正弦形运动. 各机器人的初始位置、编队参数和轨迹如图 5(a) 所示. R_2 、 R_3 的位置误差和角度误差如图 5(b) 所示. 各机器人的后轮速度 v 和前轮转向角速度 ω 如图 5(c) 所示. R_1 的后轮前进速度和前轮转向角速度都是时变的, 但可以看出 R_2 、 R_3 的跟踪误差很小, 编队精度较高。

仿真 3 4 个机器人从初始位置先完成菱形编队, 然后切换为正方形队形, 最后切换为线形队形. 各机

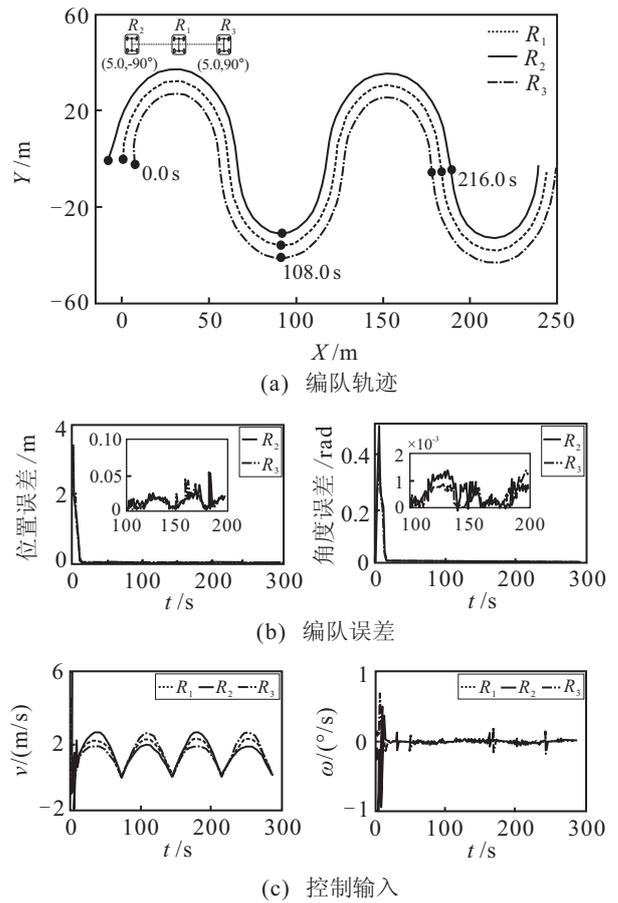


图 5 线形队形仿真

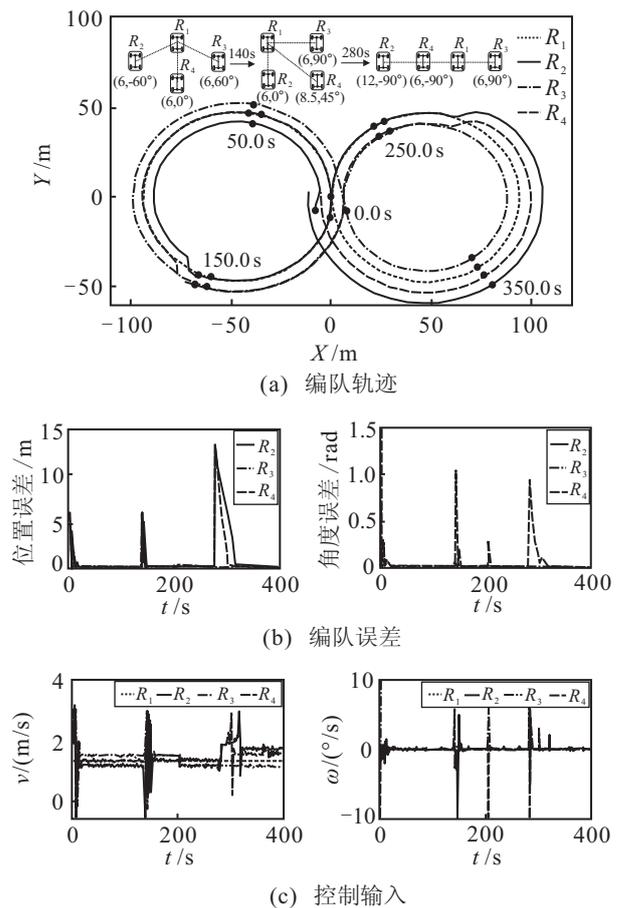


图 6 队形切换仿真

机器人的初始位置、编队参数和运动轨迹如图 6(a) 所示. 编队的位置误差和角度误差如图 6(b) 所示, 机器人在队形切换时由于配置位姿远离当前位姿, 会有较大的误差, 但能在很短时间内平滑地完成队形调整. 各机器人的后轮速度 v 和前轮转向角速度 ω 如图 6(c) 所示.

4 结 论

本文通过对车式移动机器人编队控制问题的研究, 提出了一种基于轨迹跟踪的编队控制方法. 首先, 运用领航-跟随法构造虚拟机器人, 将编队控制问题转化为跟随机器人的轨迹跟踪问题; 然后, 利用反步法设计跟随机器人的轨迹跟踪控制器, 并证明了系统的稳定性; 最后通过仿真实验, 对一组机器人编队跟踪特定曲线以及行进过程中的队形变换, 验证了本文所提出方法的有效性和控制器的良好性能.

参考文献(References)

- [1] Alessandro Farinelli, Luca Iocchi, Daniele Nardi. Multi-robot systems: A classification focused on coordination[J]. IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics: Part B, 2004, 34(5): 2015-2028.
- [2] Tucker Balch, Ronald C Arkin. Behavior-based formation control for multirobot teams[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 926-939.
- [3] Jonathan R T Lawton, Randal W Beard, Brett J Young. A decentralized approach to formation maneuvers[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2003, 19(6): 933-941.
- [4] Wei Ren, Nathan Sorensen. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(4): 324-333.
- [5] Jawhar Ghommam, Hasan Mehrjerdi, Maarouf Saad. Formation path following control of unicycle-type mobile robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58(5): 727-736.
- [6] Hasan Mehrjerdi, Jawhar Ghommam, Maarouf Saad. Nonlinear coordination control for a group of mobile robots using a virtual structure[J]. Mechatronics, 2011, 21(7): 1147-1155.
- [7] Luca Consolini, Fabio Morbidi, Domenico Prattichizzo. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints[J]. Automatica, 2008, 44(5): 1343-1349.
- [8] Shao J, Xie G, Wang L. Leader-following formation control of multiple mobile vehicles[J]. IET Control Theory Application, 2007, 1(2): 545-552.
- [9] 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 L, Cao Z Q, Tan M. Dynamic formation control for multiple robots in uncertain environments[J]. Robot, 2010, 32(2): 283-288.)
- [10] 曹政才, 赵应涛, 付宜利. 车式移动机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 电子学报, 2012, 40(4): 632-635.
(Cao Z C, Zhao Y T, Fu Y L. Trajectory tracking control approach of a car-like mobile robot[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(4): 632-635.)
- [11] Zhong-ping Jiang, Henk Nijmeijer. A recursive technique for tracking control of nonholonomic systems in chained form[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(2): 265-279.
- [12] Umesh Kumar, Nagarajan Sukavanam. Backstepping based trajectory tracking control of a four wheeled mobile robot[J]. Int J of Advanced Robotic Systems, 2008, 5(4): 403-410.
- [13] 李胜, 马国梁, 胡维礼. 基于 Backstepping 方法的车式移动机器人轨迹追踪控制[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(2): 248-252.
(Li S, Ma G L, Hu W L. Tracking control of car-like mobile robot based on Backstepping[J]. J of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(2): 248-252.)
- [14] Nathan Michael, Jonathan Fink, Vijay Kumar. Experimental testbed for large multirobot teams[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2008, 15(1): 53-61.

(责任编辑: 李君玲)