



基于领航跟随的多机器人编队控制方法

高继勋¹, 黄全振², 赵媛媛³

(1. 河南工程学院计算机学院, 河南 郑州 451191; 2. 河南工程学院电气信息学院, 河南 郑州 451191;
3. 郑州工程技术学院, 河南 郑州 450044)

摘 要: 编队控制是多机器人控制的核心问题之一。该文针对复杂编队控制问题, 提出一种基于领航跟随法的多机器人编队控制策略。通过建立差速驱动机器人运动学模型, 引入“虚拟领航机器人”, 将编队控制分解为跟随机器人与虚拟领航机器人之间期望距离和角速度的控制, 从而完成多机器人之间的编队。通过仿真和实验, 表明在较短时间内, 跟随机器人运动轨迹与期望轨迹误差趋近于 0, 其速度也收敛到 0.8 m/s, 从而证明该机器人编队控制系统有效且稳定。

关键词: 编队控制; 多机器人; 领航跟随法; 差速驱动

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2021)11-0008-06

Multi robot formation control based on leader-follower method

GAO Jixun¹, HUANG Quanzhen², ZHAO Yuanyuan³

(1. School of Computer, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. School of Electrical Information Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 3. Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: Formation control is one of the core problems of multi-robot control. In this paper, the authors propose a multi-robot formation control strategy based on the leader-follower method for complex formation control problems. By establishing a kinematic model of differential drive robot and introducing a “virtual leader robot”, the formation control is decomposed into the control of the desired distance and angular velocity between the follower robot and the virtual leader robot, so as to complete the formation between multiple robots. Through simulations and experiments, it is shown that in a short period of time, the trajectory of the follower robot converges to 0 and its velocity converges to 0.8 m/s, thus proving that the robot formation control system designed in this paper is effective and stable.

Keywords: formation control; multi-robot; leader-follower method; differential drive

收稿日期: 2021-06-10; 收到修改稿日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1804162); 国家自然科学基金项目(62173126); 河南省高校科技创新团队支持计划(21IRTSTHN017); 河南省科技攻关项目(192102210072, 212102310551); 河南省高等学校重点科研项目(19A520008, 20A413002, 22A520011)

作者简介: 高继勋(1980-), 男, 河南洛阳市人, 副教授, 硕士, 研究方向为嵌入式技术、人工智能、图像识别技术。

通讯作者: 黄全振(1979-), 男, 河南驻马店市人, 副教授, 博士, 研究方向为先进智能控制、嵌入式技术。

0 引言

随着人工智能时代的到来, 多机器人的控制已逐渐成为研究热点^[1-6], 其应用场景包括但不限于农业、军事、航空等领域。在多机器人编队的协同控制过程中, 通常所期望队形是可变的, 以便于应对单个机器人无法完成的复杂任务。在极坐标下, 利用线性反馈的方法建立“距离-角度”控制器模型, 完成对多机器人编队控制^[7]。由于奇异点存在, 该控制器存在一定问题。可通过将极坐标投影到笛卡尔坐标系下, 重新建立控制模型解决奇异点问题^[8-9]。钟宜生等^[10]提出, 将多机器人可变编队问题描述为“不变的队形在可变的坐标系中运动”的编队控制问题。在上述基础上, 李清东^[11]提出用多个不变队形互相切换, 以完成编队控制。刘磊^[12]采用以差速轮式机器人为研究对象, 通过仿真验证该控制方法的可行性。

目前对于解决多机器人一般性编队控制问题, 公开文献中尚未见到成熟方案。现阶段主要有人工势场法^[13]、基于行为法^[14]、虚拟结构法^[15]和领航-跟随法^[16]。上述方法各有其优缺点, 相比较而言, 领航-跟随法的控制更简单, 只需调整跟随者与领航者的运动参数即可完成跟踪控制, 具有较好的稳定性和灵活性^[17-20]。

根据上述情况, 本文提出了一种新颖的机器人编队控制方法, 该方法基于领航-跟随法, 引入“虚拟领航机器人”, 将其他机器人作为跟随者, 建立控制模型, 从而将编队问题转化为跟踪控制问题。根据提出的控制算法, 本文设计了跟随误差控制器, 分析跟随误差及其收敛性。通过仿真与实验结果分析, 验证本文提出的改进型领航-跟随控制方法在一致性控制中的有效性与稳定性。

1 问题描述和模型构建

1.1 问题描述

基于领航-跟随法, 可将编队问题转化为跟随机器人对虚拟领航机器人的轨迹跟踪, 该方法只需获得虚拟领航者的运动参数和位姿即可实现跟踪控制, 一定程度上减少相互之间信息冗余及计算量。通过上述方法, 建立虚拟领航机器人与跟随机器人运动模型, 如图 1 所示。

图中, 跟随机器人 R_1 与虚拟领航机器人 R_0 的距离是 ρ_0 , 二者中心线连线与虚拟领航机器人 R_0 轴心线的夹角是 φ_0 。通过虚拟领航者的引入, 将编队

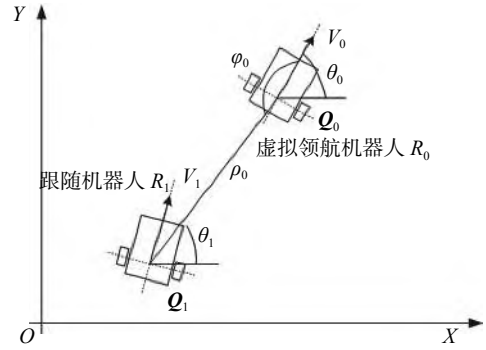


图 1 领航-跟随结构示意图

控制转化为跟随移动机器人 R_1 对虚拟领航机器人 R_0 的轨迹跟踪, 即跟随机器人 R_1 在一定时间内跟随虚拟领航机器人 R_0 运动就可组成相应的编队。

1.2 模型构建

非完整移动机器人的运动学模型^[15]如下式:

$$\dot{q} = S(q)u \quad (1)$$

$$\dot{u} = a \quad (2)$$

其中, $u = [V \ W]^T$ 代表移动机器人中心轴线的线速度和角速度, 是机器人系统待设计控制输出。

由图 1 可知, 当跟随机器人 R_1 与虚拟领航机器人 R_0 之间的位姿(位置和姿态)误差趋近于零, 即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (Q_0 - Q_1) = 0 \quad (3)$$

其中 $Q_0 = [X_0, Y_0, \theta_0]^T$ 和 $Q_1 = [X_1, Y_1, \theta_1]^T$ 分别为跟随机器人的期望位姿和当前位姿。跟随机器人期望位姿由虚拟领航机器人通过自身姿态与期望队形计算所得, 当前位姿由自身传感器测量所得。

假设在 t 时刻, 虚拟领航机器人与期望轨迹运动示意图如图 2 所示。

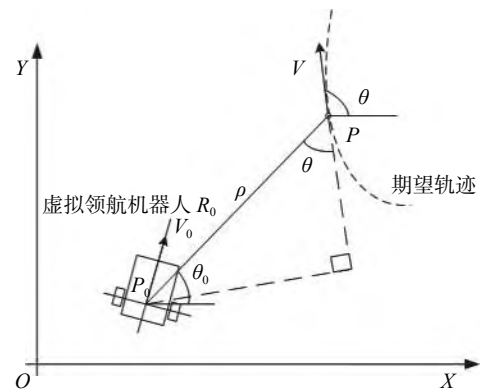


图 2 跟踪位置示意图

其中, V 为期望轨迹上 P 点的运动方向, 与 X 轴正方向夹角为 θ 。 P_0P 为虚拟领航机器人与期望轨迹上 P 点的连线。 P 点状态表示为 (X, Y, θ) 。

虚拟领航机器人与期望轨迹误差参数表示为:

$$\lambda = [\rho'_0 \theta'_0]^T \quad (4)$$

式中: ρ'_0 ——虚拟领航机器人与期望轨迹中 P 点的距离;

θ'_0 —— P_0P 与运动方向 V 的夹角。

通过对参数 λ 的调整, 可完成跟随机器人相对于期望轨迹的控制。

虚拟领航机器人运动学模型可表示为:

$$\dot{Q}_0 = \begin{bmatrix} \dot{X}_0 \\ \dot{Y}_0 \\ \dot{\theta}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & 0 \\ \sin\theta_0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ W_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

跟随机器人参考轨迹模型为:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = V_1 \cos\theta_1 \\ \dot{Y}_1 = V_1 \sin\theta_1 \\ \dot{\theta}_1 = W_1 \end{cases} \quad (6)$$

根据期望轨迹 P 点状态及公式 (4) 可得到虚拟领航机器人位姿, 其数学表达式如下:

$$\begin{cases} X_0 = X - \rho'_0 \sin\left(\theta'_0 - \theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ Y_0 = Y - \rho'_0 \cos\left(\theta'_0 - \theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ \theta_0 = \theta - \theta'_0 \end{cases} \quad (7)$$

2 控制器设计

跟随机器人 R_1 与虚拟领航机器人 R_0 位姿误差为 e_i , 则 e_i 可表示为:

$$e_i = \begin{bmatrix} e_{i1} \\ e_{i2} \\ e_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 - X_1 \\ Y_0 - Y_1 \\ \theta_0 - \theta_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

对于跟随机器人 R_1 , 速度控制输入 $u_1 = [V_1 \ W_1]^T$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $V_1 \rightarrow V_0$, $W_1 \rightarrow W_0$, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} (Q_0 - Q_1) = 0$, 使得系统趋于稳定。给定:

$$u_1 = \begin{bmatrix} V_0 \cos e_{i3} + K_1 e_{i1} \\ W_0 + V_0 (K_2 e_{i2} + K_3 \sin e_{i3}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, K_1, K_2, K_3 为正数。

定义 Lyapunov 函数 V_L 为:

$$V_L = \frac{1}{2} e_{i1}^2 + \frac{1}{2} e_{i2}^2 + \frac{1 - \cos e_{i3}}{K_2} \quad (10)$$

则, \dot{V}_L 可表示为:

$$\dot{V}_L = e_{i1} \dot{e}_{i1} + e_{i2} \dot{e}_{i2} + e_{i3} \frac{\sin e_{i3}}{K_2} = -K_1 e_{i1}^2 - \frac{K_3 \sin^2 e_{i3}}{K_2} \quad (11)$$

由公式 (10) 和 (11) 可知, $V_L \geq 0$ 且 $\dot{V}_L \leq 0$ 。即当输入为 u_1 时, 可使 e_i 趋向于 0。

以上构建了基于领航跟随运动控制方法的控制器, 并且证明了该控制器的稳定性。下面对该方法

进行仿真与实验研究。

3 仿真分析与实验验证

为验证系统及控制算法的正确性和有效性, 利用仿真软件和硬件平台构建模拟/物理实验系统进行验证。仿真采取与期望轨迹重合(追踪)、与期望轨迹保持固定队形(编队)两种情况进行, 便于在不同控制场景下对结果分析。

3.1 仿真分析

仿真研究基于 Gazebo 机器人仿真软件构建的运动学与控制仿真平台。仿真固定参数以实际硬件平台为参考, 其固定参数值如表 1 所示。

表 1 仿真基本参数

参数名	数值
车身长度	45 cm
车轮间距	30 cm
车轮半径	12 cm
差分GPS回传频率	50 Hz
IMU采样频率	50 Hz

设定虚拟领航机器人与期望轨迹追踪, 即 $\lambda = [0 \ 0]^T$ 。假设虚拟领航机器人速度为 0.8 m/s, 角速度为 0。跟踪机器人仿真运动轨迹如图 3 所示。其中, X, Y 为智能体所处二维平面。

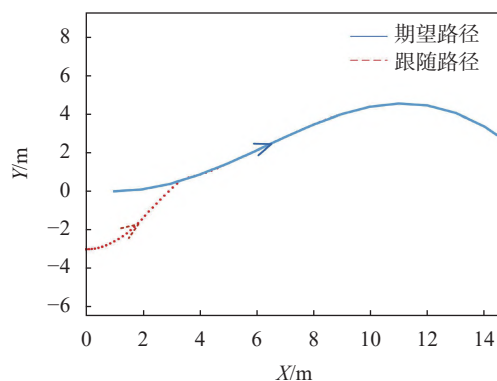
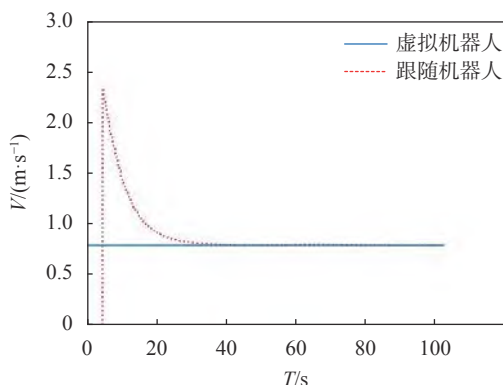


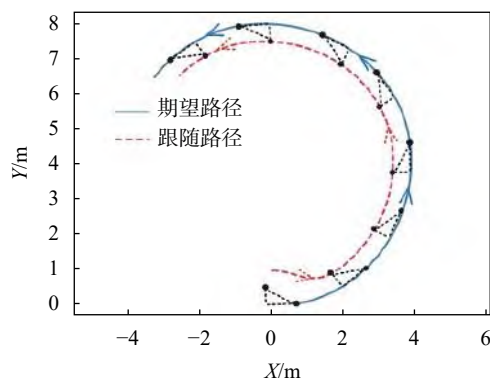
图 3 $\lambda = [0 \ 0]^T$ 跟随机器人仿真运动轨迹

跟随机器人从任意初始位置开始运动, 速度变化曲线如图 4 中虚线所示。由图可以看出, 时间 T 从 5 s 左右速度开始变化, 随后减小; 从 20 s 左右开始, 跟随机器人速度趋于稳定; 30 s 时, 跟随机器人速度稳定在 0.8 m/s。

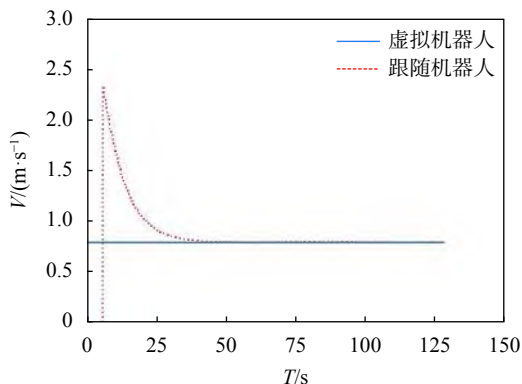
设定虚拟领航机器人与期望路径距离为 0.5 m, 与速度方向夹角为 $\pi/6$, 即 $\lambda = [0.5 \ \pi/6]^T$ 。假设虚拟领航机器人速度为 0.8 m/s, 角速度为 16 rad/s。即

图 4 $\lambda = [0 \ 0]^T$ 跟随机器人仿真速度曲线

在某时刻, 虚拟领航机器人中心线与期望轨迹连线长度为 0.5 m, 与期望轨迹该点切线方向夹角为 $\pi/6$ 。跟随机器人运动轨迹如图 5 所示, 其中, X 、 Y 为机器人所处平面坐标, 三角形为期望结构, 端点为运动轨迹与虚拟机器人期望位置。

图 5 $\lambda = [0.5 \ \pi/6]^T$ 跟随机器人仿真运动轨迹

跟随机器人速度变化曲线如图 6 中虚线所示。当时间 T 从 25 s 开始, 跟随机器人速度趋于稳定; 40 s 时, 跟随机器人速度稳定在 0.8 m/s。

图 6 $\lambda = [0.5 \ \pi/6]^T$ 跟随机器人仿真速度曲线

3.2 实验验证

为移动机器人控制构建物理实验系统。该实验

系统的硬件部分主要由双轮差速驱动底盘、IMU 模块、差分 GPS 定位模块 (RTK) 和主计算机 (Raspberry Pi4B) 组成。

主计算机主要通过传感器模块采集到的数据进行运动状态计算, 并且通过输出控制指令完成对底盘的运动控制; 底盘执行主计算机的控制指令, 按照控制指令完成运动; IMU 模块为九轴惯性测量模块, 用于测量机器人的运动状态, 包括加速度和航向角等; 差分 GPS 定位模块实现机器人的实时定位功能, 具体实现为: 将差分 GPS 移动接收端安装于机器人的底盘上, 通过接收卫星与基准站数据进行差分计算, 从而提高机器人的定位精度。

实验平台示意图及实物图如图 7、图 8 所示。

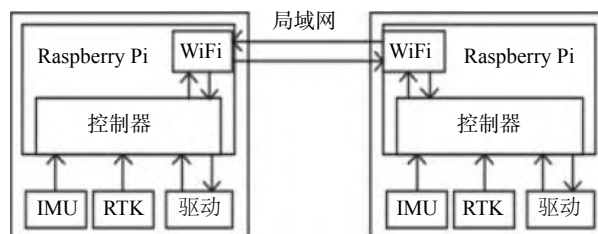


图 7 实验平台示意图



图 8 实验平台实物图

程序流程如图 9 所示。首先对跟随机器人进行状态初始化; 然后根据 GPS 和 IMU 回传数据计算, 并于期望位姿做姿态解算; 通过结算结果, 得到控制输入参数; 最后输出给控制单元, 并实时对跟随机器人状态进行监测, 判断其是否达到预期位姿。

当 $\lambda = [0 \ 0]^T$ 时, 即为跟随机器人对期望轨迹的跟随, 可完成对期望轨迹的逼近。当 $\lambda \neq [\rho'_0 \ \theta'_0]^T$ 时, 跟随机器人只需跟随虚拟领航机器人的轨迹即可完成对固定队形的保持。机器人每执行一步控制指令, 整个系统都要经历如下步骤: 在主计算机中通过差分 GPS 与 IMU 回传数据, 完成对移动机器人当前位姿的计算。

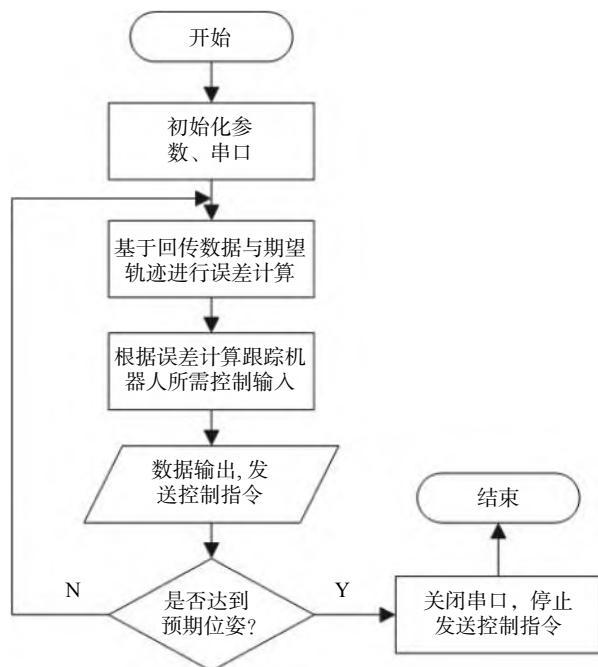
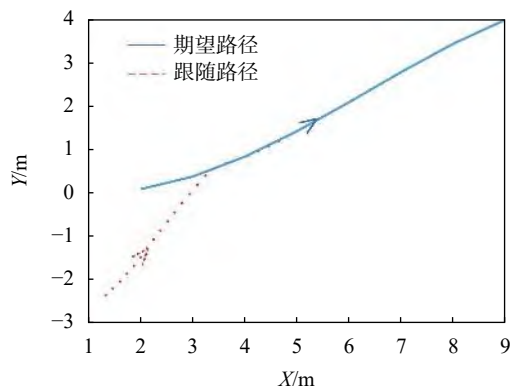


图9 跟随机器人控制实验流程图

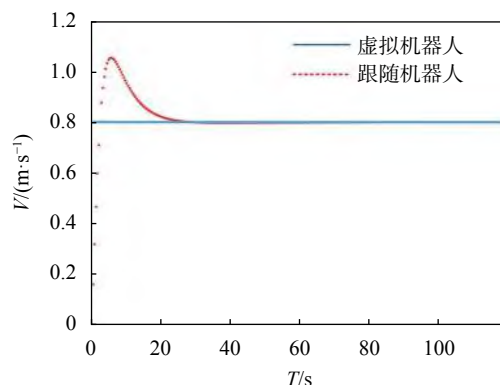
根据预设期望轨迹与虚拟领航机器人的当前位姿误差, 计算跟随机器人所需控制输入参数, 然后通过串口将运动控制指令发送给运动底盘。如此循环。

设定虚拟领航机器人与期望轨迹重合, 即 $\lambda = [0 \ 0]^T$ 。假设任意初始位置, 虚拟领航机器人以速度为 0.8 m/s, 角速度为 0 匀速运动。跟随机器人运动轨迹如图 10 所示。其中, X 、 Y 为机器人所处二维平面。

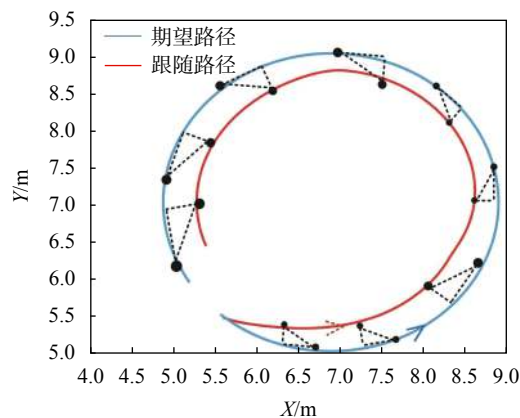
图10 $\lambda = [0 \ 0]^T$ 跟随机器人实验运动轨迹

跟随机器人速度变化曲线如图 11 中虚线所示。当时间 T 从 20 s 开始, 跟随机器人速度趋于稳定; 35 s 时, 跟随机器人速度稳定在 0.8 m/s。

设定虚拟领航机器人与期望路径距离为 0.5 m, 与速度方向夹角为 $\pi/6$, 即 $\lambda = [0.5 \ \pi/6]^T$ 。假设虚拟

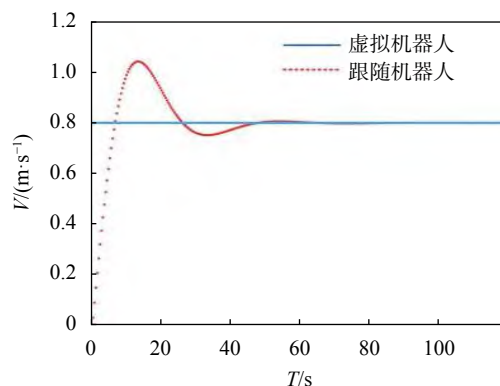
图11 $\lambda = [0 \ 0]^T$ 跟随机器人实验速度曲线

领航机器人速度为 0.8 m/s, 角速度为 16 rad/s。即在某时刻, 虚拟领航机器人中心线与期望轨迹连线长度为 0.5 m, 与期望轨迹该点切线方向夹角为 $\pi/6$ 。跟随机器人运动轨迹如图 12 所示, 其中, X 、 Y 为机器人所处平面坐标, 三角形为期望结构, 端点为运动轨迹与虚拟机器人期望位置。

图12 $\lambda = [0.5 \ \pi/6]^T$ 跟随机器人实验运动轨迹

领航机器人以 0.8 m/s 速度运动时, 跟随机器人变化曲线如图 13 虚线所示。当时间趋于 50 s 时, 跟随机器人速度稳定在 0.8 m/s。

通过对比表 2 及前文中速度曲线可以看出, 跟

图13 $\lambda = [0.5 \ \pi/6]^T$ 跟随机器人实验速度曲线

随机器人速度、位姿误差在仿真中收敛较快。并且, 跟随期望轨迹比保持固定距离收敛耗时较少。

表 2 仿真、实验结果

参数设定	仿真	实验
$\lambda = [0 \ 0]^T$	30 s	40 s
$\lambda = [0.5 \ \pi/6]^T$	35 s	50 s

在一定时间内, 跟随机器人运动速度逐渐收敛至预期, $V_0 - V_1$ 在一定时间内趋于稳定。同时, 跟随机器人与虚拟领航机器人位姿误差也趋近于稳定, 系统达到稳定状态。

4 结束语

本文以轮式差分驱动机器人作为实验对象, 其由两个独立驱动的后轮控制, 完成姿态变化。在此基础上, 通过对差分驱动机器人运动学模型分析, 设计了控制器并生成相应控制算法。利用仿真和硬件实验平台, 在两种不同运动情况下, 完成对控制算法的验证。仿真和实验结果表明: 位姿误差收敛及速度收敛均能满足一般跟随控制需求, 验证了控制算法与控制器的有效性与稳定性。

此外, 本文提出的控制策略易于实现, 只需合理设置 λ 参数即可完成对机器人编队控制状态的调整, 可为多种复杂场合下实际应用提供有益借鉴。

参考文献

- [1] 闵海波, 刘源, 王仕成, 等. 多个体协调控制问题综述[J]. 自动化学报, 2012, 38(10): 1557-1570.
- [2] LIU S, SUN D, ZHU C G. Coordinated motion planning for multiple mobile robots along designed paths with formation requirement[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(6): 1021-1031.
- [3] 余宏旺, 郑毓蕃. 多智能体系统在分布式采样控制下的动力学行为[J]. 自动化学报, 2012, 38(3): 357-365.
- [4] DONG X, YU B, SHI Z, et al. Time-varying time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: theories and applications[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(1): 340-348.
- [5] 韩青, 孙树栋, 智睿瑞. 轨迹跟踪级联机器人编队控制方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(2): 317-323.
- [6] 宋子浩, 吴斌, 周挺. 输入受限情况下的球形机器人轨迹跟

踪控制[J]. *中国测试*, 2020, 46(5): 120-126.

- [7] DESAI J P, OSTROWSKI J, KUMAR V. Controlling formations of multiple mobile robots[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven: IEEE, 1998: 2864-2869.
- [8] LI X H, XIAO J Z, TAN J D. Modeling and controller design for multiple mobile robots formation control[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2004: 838-843.
- [9] LI X, XIAO J, CAI Z. Backstepping based multiple mobile robots formation control[C]//Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on IEEE, 2005: 887-892.
- [10] DONG X W, ZHOU Y, REN Z, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles with switching interaction topologies[J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 46: 26-36.
- [11] WANG R, DONG X W, LI Q D, et al. Distributed adaptive time-varying formation for multi-agent systems with general high-order linear time-invariant dynamics[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2016, 353(10): 2290-2304.
- [12] 刘磊. 多移动机器人编队及协调控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [13] RASEKHIPOUR Y, KHAJEPOUR A, CHEN S K, et al. A potential field-based model predictive path-planning controller for autonomous road vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(5): 1255-1267.
- [14] LEE G, CHWA D. Decentralized behavior-based formation control of multiple robots considering obstacle avoidance[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2018, 11(1): 127-138.
- [15] 潘无为, 姜大鹏, 庞永杰, 等. 人工势场和虚拟结构相结合的多水下机器人编队控制[J]. *兵工学报*, 2017, 38(2): 326-334.
- [16] DESAI J P, OSTROWSKI J P, KUMAR V. Controlling formations of multiple mobile robots[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998.
- [17] 于涛, 王益博, 孙汉旭, 等. 基于干扰观测器的球形移动机器人直线运动控制[J]. *中国测试*, 2019, 45(9): 123-129.
- [18] HAN T, GUAN Z H, CHI M, et al. Multi-formation control of nonlinear leader-following multiagent systems[J]. *ISA Transactions*, 2017, 69: 140-147.
- [19] 黄烨笙, 徐郑攀, 陈远明等. 无人艇自主靠泊控制系统设计[J]. *中国测试*, 2020, 46(10): 111-117.
- [20] 易国, 毛建旭, 王耀南, 等. 非完整移动机器人领航-跟随编队分布式控制[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(9): 2266-2272.

(编辑: 莫婕)