

四移动机器人协同搬运刚体目标的领航 — 跟随控制方法与仿真研究

何欣林, 王蔓

重庆工程学院, 重庆 400056

DOI:10.61369/ME.2026050020

摘 要 : 针对四移动机器人协同搬运刚体目标过程中队形误差易受路径曲率变化和跟随滞后影响的问题, 建立二维平面运动学模型和刚体队形几何约束模型。基于领航—跟随结构, 设置纯位置误差反馈、位置—速度误差反馈和期望编队点速度前馈辅助三种控制方法, 并在 MATLAB 中进行直线、圆弧、S形路径和扰动工况仿真。结果表明, 速度前馈辅助方法在各工况下均取得较小队形误差; 在 S 形路径下, 其 RMSE 为 0.0289 m, 低于 LF 方法的 0.3091 m 和 LFPD 方法的 0.3028 m。本文结果基于二维数值仿真, 未考虑真实接触力、夹持机构、地面打滑和实体样机误差。

关 键 词 : 四移动机器人; 协同搬运; 刚体目标; 领航—跟随控制; 队形误差

Leader-Follower Control Method and Simulation Study for Collaborative Transportation of Rigid Body Targets by Four Mobile Robots

He Xinlin, Wang Man

Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 400056

Abstract : Addressing the issue of formation errors in the collaborative transportation of rigid body targets by four mobile robots, which are susceptible to path curvature variations and following lag, this study establishes a two-dimensional planar kinematic model and a geometric constraint model for rigid body formation. Based on the leader-follower structure, three control methods are implemented: pure position error feedback, position-velocity error feedback, and desired formation point velocity feedforward assistance. Simulations are conducted in MATLAB for straight-line, circular arc, S-shaped paths, and disturbance conditions. The results indicate that the velocity feedforward assistance method achieves smaller formation errors under various conditions; on the S-shaped path, its RMSE is 0.0289 m, lower than the 0.3091 m of the LF method and the 0.3028 m of the LFPD method. The results of this paper are based on two-dimensional numerical simulations and do not consider real contact forces, gripping mechanisms, ground slippage, or errors in physical prototypes.

Keywords : four mobile robots; collaborative transportation; rigid body target; leader-follower control; formation error

引言

多移动机器人协同搬运可将单机机器人难以完成的搬运任务分解为多个机器人之间的协调运动问题, 其关键不仅是单机轨迹跟踪, 还包括多机器人相对位姿关系的保持。已有研究指出, 协同搬运任务要求机器人在目标对象移动过程中保持协调操作关系^[1]。因此, 四移动机器人协同搬运刚体目标问题可先抽象为几何队形保持问题进行分析。

编队控制为该问题提供了方法基础。Desai 等将移动机器人编队描述为群体位姿和队形形状变量的组合^[2]; 虚拟结构方法则强调通过统一几何结构约束多个机器人的相对运动^[3]。这些研究表明, 在协同搬运任务中, 维持机器人之间的期望几何关系是保证系统协同运动的重要前提。本文建立四移动机器人矩形队形模型, 比较 LF、LFPD 和 FFLF 三种控制方法在不同路径和扰动工况下的队形误差。本文仅研究二维几何队形保持, 不涉及真实接触力、夹持机构、地面打滑和刚体动力学建模。

基金项目: 2025 年国家级大学生创新创业训练计划项目《孙行者——道路智能救援机器人》(项目编号: 202512608002)。

作者简介:

何欣林 (2006.02—), 男, 汉族, 四川广安人, 重庆工程学院本科在读, 自动化专业;

王蔓 (2004.11—), 女, 汉族, 重庆万州人, 重庆工程学院本科在读, 机器人工程专业。

一、系统建模与控制方法

(一) 模型假设与队形描述

四移动机器人协同搬运几何模型如图1所示。设 R_1 为领航机器人, R_2, R_3, R_4 为跟随机器人。多移动机器人编队通常可通过群体位姿和队形几何关系描述, 对象运输任务中也常将机器人群体抽象为协同运动队形进行分析^[4]。本文基于该思路建立矩形队形模型, 用于比较不同领航—跟随控制结构下的队形误差。

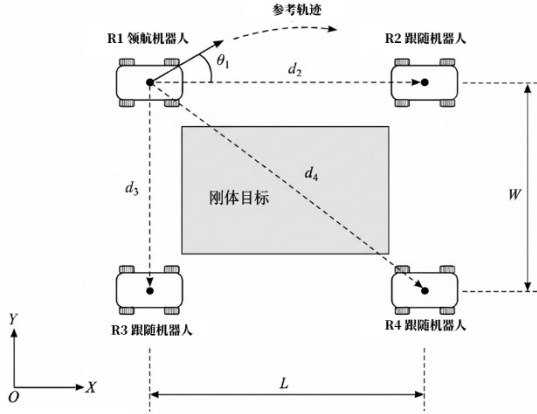


图1 四移动机器人协同搬运几何模型

第 i 个机器人位置为 $p_i = [x_i, y_i]^T$, 其运动模型为:

$$\dot{p}_i = u_i, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

其中 $u_i = [u_{xi}, u_{yi}]^T$, 为速度控制输入。该模型用于分析队形保持误差, 不描述轮胎动力学、地面打滑、真实接触力、夹持机构和刚体目标动力学。

设 d_i 为第 i 个跟随机器人相对于 R_1 的期望固定偏移量。定义为 $d_2 = [L, 0]^T$, $d_3 = [0, -W]^T$, $d_4 = [L, -W]^T$, 其中 L 和 W 表示队形水平和垂向特征尺寸。设队形方向由领航机器人航向角为 θ_1 给出对应旋转矩阵为:

$$R(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix}$$

则跟随机器人的期望位置为:

$$p_i^d = p_1 + R(\theta_1)d_i, \quad i = 2, 3, 4$$

由于 d_i 是领航机器人局部坐标系中的常量, 必须经过 $R(\theta_1)$ 旋转后才能得到全局坐标系下的期望位移。

(二) 领航—跟随控制方法

领航—跟随结构是多移动机器人编队控制中的常见方法, 已有研究也将领航编队策略用于多移动机器人队形保持与队形变换问题^[5]。跟随机器人位置误差定义为:

$$e_i = p_i^d - p_i, \quad i = 2, 3, 4$$

为避免连续形式下的隐式关系, 仿真中 $\dot{e}_i$ 由相邻采样时刻误差差分近似得到。本文比较三种控制方法。

1. 纯位置误差反馈方法 LF 为

$$u_i = K_p e_i, \quad i = 2, 3, 4$$

该方法仅根据位置偏差产生速度指令, 结构简单, 但当期望编队点持续运动时, 跟随机器人容易产生滞后误差。

2. 位置—速度误差反馈方法 LFPD 为

$$u_i = K_p e_i + K_d \dot{e}_i, \quad i = 2, 3, 4$$

其中, $K_p > 0$ 、 $K_d > 0$ 分别为位置误差反馈增益和速度误差反馈增益。该方法用于检验速度误差反馈能否单独改善跟随滞后。

3. 速度前馈辅助领航—跟随方法 FFLF 为

$$u_i = \dot{p}_i^d + K_p e_i + K_d \dot{e}_i, \quad i = 2, 3, 4$$

其中, $\dot{p}_i^d$ 表示第 i 个跟随机器人期望编队点的运动速度, 并非简单复制领航机器人速度, 而是反映跟随机器人自身期望位置的变化趋势。本文将机器人视为理想速度控制对象, 未进一步引入执行器饱和和加速度约束。

(三) 队形误差评价指标

整体队形误差采用三个跟随机器人误差范数的平均值:

$$E_f(t) = \frac{1}{3} \sum_{i=2}^4 \| p_i^d(t) - p_i(t) \|$$

分母取 3, 是因为队形误差只统计三个跟随机器人, 不将领航机器人自身计入跟随误差。进一步采用平均队形误差、最大队形误差和均方根误差评价控制性能, 其中

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N E_f^2(k)}$$

N 为仿真采样点数。平均误差反映整体跟随水平, 最大误差反映极端偏差, RMSE 同时考虑误差幅值和持续时间。

二、仿真实验设计

本文基于 MATLAB 建立四移动机器人二维运动学仿真模型, 采用固定步长更新机器人位置, 并统计队形误差。仿真不考虑接触力、夹持机构、地面打滑、通信延迟和传感器噪声。主要参数如表1所示。

表1 主要仿真参数

参数	符号	数值
机器人数量	(N_r)	4
仿真时间	(T)	40 s
仿真步长	(T_s)	0.05 s
队形水平尺寸	(L)	1.20 m
队形垂向尺寸	(W)	0.80 m
位置增益	(K_p)	1.40
速度增益	(K_d)	0.15
参考速度	(v)	0.20 m/s

仿真设置直线、圆弧、S形路径和扰动四类工况。分别用于

验证基本队形保持、持续转弯跟随、曲率变化下的跟随滞后以及扰动后的误差恢复能力。速度敏感性实验采用固定空间 S 形路径 $y = A\sin(kx)$ ，以避免速度变化同时改变路径几何形状。

三、仿真结果与分析

S 形路径包含连续曲率变化，可用于检验跟随机器人在曲线路径下的滞后误差。该工况下三种控制方法的队形误差变化曲线如图 2 所示。

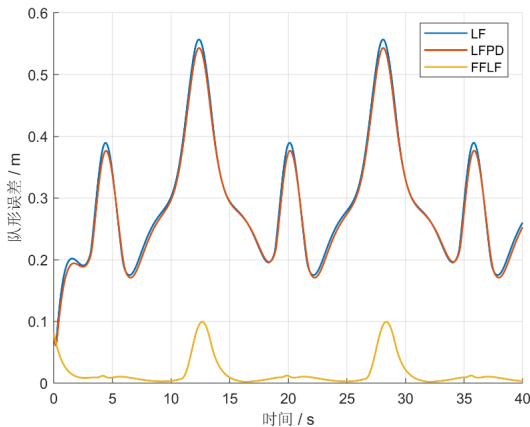


图 2 S 形路径下三种控制方法的队形误差对比

由图 2 可见，LF 与 LFPD 在 S 形路径下均出现明显误差峰值，说明纯反馈结构对曲率变化路径中的运动期望点存在跟随滞后。相比之下，FFLF 的误差曲线整体处于较低水平，峰值约为 0.10 m，表明期望编队点速度前馈能够提前补偿期望位置变化，从而减小曲线路径下的队形误差。

为进一步比较不同工况下三种控制方法的整体性能，表 2 统计了直线、圆弧、S 形路径和扰动工况下的平均队形误差、最大队形误差和 RMSE。

表 2 不同工况下三种控制方法的队形误差统计

工况	方法	平均误差 /m	最大误差 /m	RMSE/m
直线	LF	0.1405	0.1429	0.1409
直线	LFPD	0.1401	0.1429	0.1406
直线	FFLF	0.0017	0.0815	0.0084
圆弧	LF	0.2058	0.2095	0.2066
圆弧	LFPD	0.2051	0.2093	0.206

圆弧	FFLF	0.0024	0.0815	0.0084
S 形	LF	0.2916	0.5569	0.3091
S 形	LFPD	0.2858	0.5432	0.3028
S 形	FFLF	0.0170	0.0994	0.0289
扰动	LF	0.2930	0.5570	0.3103
扰动	LFPD	0.2870	0.5434	0.3038
扰动	FFLF	0.0206	0.1002	0.0312

由表 2 可见，LF 与 LFPD 在各工况下误差接近，说明仅加入速度误差反馈对持续运动期望点的跟随滞后改善有限。FFLF 在四类工况下均取得最低 RMSE。以 S 形路径为例，FFLF 的 RMSE 为 0.0289 m，相比 LF 的 0.3091 m 降低约 90.65%，相比 LFPD 的 0.3028 m 降低约 90.45%。

扰动工况下，FFLF 的 RMSE 为 0.0312 m，低于 LF 的 0.3103 m 和 LFPD 的 0.3038 m，说明该方法在本文设定扰动条件下能够维持较低队形误差。但该结论仅适用于二维数值仿真，不能直接等同于真实系统鲁棒性验证。

固定空间 S 形路径速度敏感性实验表明，当参考速度为 0.15、0.20、0.25 m/s 时，FFLF 的 RMSE 分别为 0.0099、0.0289、0.0937 m，均低于 LF 和 LFPD。该结果说明，速度升高会增大队形误差，但 FFLF 的优势并非只存在于单一速度参数下。

四、结论

本文针对四移动机器人协同搬运刚体目标中的队形保持问题，建立二维运动学模型和刚体队形几何约束模型，并比较 LF、LFPD 和 FFLF 三种领航—跟随控制方法。仿真结果表明，FFLF 在直线、圆弧、S 形路径和扰动工况下均取得最低 RMSE；其中 S 形路径下 FFLF 的 RMSE 为 0.0289 m，低于 LF 的 0.3091 m 和 LFPD 的 0.3028 m，说明期望编队点速度前馈能够减小曲线路径下的跟随滞后。

本文仅基于二维数值仿真，未考虑真实接触力、夹持机构、刚体动力学、通信延迟和传感器噪声，不能等同于实体搬运实验验证。后续应结合接触约束、执行器限幅和实体机器人平台进一步验证。

参考文献

[1]Elio T ,M. H M A ,Otar A .Cooperative Object Transport in Multi-Robot Systems: A Review of the State-of-the-Art[J].Frontiers in Robotics and AI,2018,559-59. DOI:10.3389/frobt.2018.00059.

[2]Desai P J ,Ostrowski P J ,0001 K V .Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots.[J].IEEE Trans. Robotics and Automation,2001,17(6):905-908.

[3]刘安东,秦冬冬.基于虚拟结构法的多移动机器人分布式预测控制[J].控制与决策,2021,36(05):1273-1280.DOI:10.13195/j.kzyjc.2019.1136.

[4]Tobias R ,Malte H ,Annika R .A Comparison of Different Approaches for Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots regarding Object Transport[J].Procedia CIRP,2021,96248-253.DOI:10.1016/J.PROCIR.2021.01.082.

[5]王晨阳,杨丽曼,李运华.基于两级滑模控制的多移动机器人映射领航编队控制策略[J].北京航空航天大学学报,2023,49(11):3108-3114.DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0792.