

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514105

基于混合定位的多移动机器人协作转运控制策略研究*

赵蕾磊¹, 张 琛², 赵孝礼³

(1. 中国航天科工南京晨光集团有限责任公司 南京 210022; 2. 江苏金陵智造研究院有限公司 南京 210022;
3. 南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘 要: 移动机器人作为一种高端物流装备,可提高工业生产自动化及智能化水平,而大型部件生产过程中的运输环节可考虑使用多台移动机器人(MMRs)协作搬运的方式。现有多移动机器人协作相关研究多侧重算法的提出,对实际应用场景下可达到的编队运动效果关注较少,不利于向工程应用推广。该研究针对具体的大负载应用场景,提出了一套基于领航-跟随编队控制方法的多移动机器人协作转运系统。机器人之间使用激光测距解算相对位姿,利用反向传播神经网络(BPNN)对跟随单元速度控制系数进行在线调整,减少相对位姿解算及偏差传递的不利影响,同时可灵活应对输入参数的变动;其次,加入基于二维码传感器的重定位轨迹规划算法以改善组队环节精度。此外,考虑到系统内存在“相对领航单元”及协作定位的近似解等不利因素,试验之前对转运系统进行了仿真计算,验证了相对定位方案的可行性。最后,对多种情况下的单台机器人重定位算法进行了测试,试验结果表明该算法可应对多种工况,使得定位位置偏差在 5 mm 以内、姿态偏差在 1° 以内;使用 4 台移动机器人在负载 3 t 条件下完成协作转运性能测试,试验结果表明,所提出的控制策略可行,达到了位置偏差 15 mm 以内、姿态偏差 1° 以内的控制效果。

关键词: 多机器人系统;协作转运;激光测距仪;编队控制;轨迹规划

中图分类号: TP242 TH165 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 413.1050

Research on cooperative transportation control for multi-mobile robots based on hybrid positioning

Zhao Leilei¹, Zhang Chen², Zhao Xiaoli³

(1. CASIC Nanjing Chenguang Group Co., Ltd., Nanjing 210022, China; 2. Jiangsu Jinling Institute of Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Nanjing 210022, China; 3. Department of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Mobile robots can enhance the level of automation and intelligence in industrial production. The implementation of multiple mobile robot systems (MMRSs) for transporting large components not only enhances transport efficiency but also improves manufacturing flexibility. Most current research on MMRS focuses on algorithms, with less attention paid to the control effects in practical applications, which are not conducive to the promotion of engineering applications. This article proposes a control method based on the leader-follower principle to achieve higher precision in formation control. Three laser distance sensors are utilized to accurately measure the relative positions between a leader and a follower. By considering the variations in input and the error propagation related to relative position solutions, a back propagation neural network (BPNN) is utilized to compute speed control parameters effectively. This approach also contributes to reducing debugging time. A trajectory planning method is proposed that enables precise localization of the robot at target points. In addition, considering the unfavorable factors such as the "a relative leader" and the approximate solution of relative positioning, simulation analysis is implemented on the transportation system. Tests are conducted on the precise localization of a robot under different conditions. Experimental results show that the trajectory planning method can achieve a position deviation of within 5 mm and an attitude deviation of within 1°. Four mobile robots are deployed to test cooperative transportation performance under a load of 3

收稿日期:2025-06-01 Received Date: 2025-06-01

* 基金项目:国家自然科学基金(52205062)、江苏省制造强省建设专项资金“1650”产业体系协同攻关项目资助

tons. Experimental results indicate that the relative position deviation between any two robots is within 15 mm, and the attitude deviations do not exceed 1° .

Keywords: multiple mobile robot systems; cooperative transportation; laser distance sensor; formation control; trajectory planning

0 引言

大型部件,如火箭、飞机、高铁车厢、风电叶片,广泛存在于航空航天、轨道交通和新能源等军用或民用制造领域。移动机器人作为一种高端物流装备,可提高工业生产自动化及智能化水平。让移动机器人参与大型部件成形、加工与装配流程中的搬运环节,可有效解决人工作业存在的效率低、安全性差等问题。但是,面对小批量大型复杂部件仍存在设备通用性差、复用率低等不足。此时,可考虑使用多智能体协同系统。

近年来,随着控制、通信、计算技术的交叉融合,多智能体协同系统获得广泛关注^[1-2]。组成多智能体的对象可以是移动机器人^[3],也可以是无人驾驶飞行器^[4],抑或是地空协同系统^[5],本文重点关注多移动机器人系统。使用多台移动机器人协作转运大型产品,相比单一机器人运输具有更高的灵活性、可扩展性及多产品适应性等优势,还可以降低企业装备成本。对多移动机器人系统的研究,可分为任务分配、定位、控制、通信等方面。任务分配即向各个机器人分配任务并考虑优化系统执行效率、避障等问题^[6-9]。例如文献^[10]将多机器人多站点任务分配问题分为3个部分,使用遗传算法求解各子问题的嵌套迭代解。定位是机器人运动基础而重要的输入,高精度定位是机器人顺利执行任务的关键^[11-14]。机器人定位手段多样,如有学者使用视觉传感器,将神经网络应用于同步定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM),实现机器人更高效的室内定位^[15];也有学者融合无线定位与激光雷达定位,获得了精度更高、稳定性更好的定位数据^[16]。编队控制是典型的协同控制任务,一般的,编队控制方法可分为领航-跟随法,基于行为法和虚拟结构法^[17-19];也有学者根据机器人间交互程度与感知能力将编队控制分为基于位姿的控制、基于位移的控制与基于距离的控制^[20]。为了有效地进行多机器人之间的交流和协商,必须解决信息处理与传输问题,即通信问题^[21-23]。文献^[24]提出了一种在有限带宽条件下机器人通信机制优化策略。考虑到编队任务复杂、数据传输量大,文献^[25]将编队控制信息分为全局信息与局部信息,提出了在有限时间内解决多智能体编队控制问题的方案并给出了系统的分析和证明。

众多学者从不同的学科视角展开了丰富的研究,而研究重点多在控制或定位算法的提出,对实际应用场景下可达到的编队运动效果关注较少,不利于向工程应用

推广。本文在领航-跟随法下,首先建立了一套协作转运系统并基于相对位姿偏差提出了分向控制律;对系统涉及的算法进行模块化处理,领航单元与跟随单元间仅传递必要的控制信息以降低通信压力。其次,考虑到激光测距仪协作定位系统位姿求解的近似性,以及多个移动单元形成编队时不可避免的偏差传递,利用神经网络使速度控制参数可自适应调整并进行了相应的仿真分析。此外,为改善组队环节精度,利用高次多项式实现了机器人在期望点的高精度重定位。最后,使用4台移动机器人在3 t负载条件下进行协作转运试验并获得了较好测试效果。

1 协作转运系统设计

使用多台机器人协作转运大型产品是一个具有约束条件的多机器人系统队形保持问题,该问题的约束条件是参与协作转运的各个机器人的空间相对位置保持不变。设计协作转运系统由多个全向移动机器人组成,全向移动机器人接收相互独立的线速度指令 v_x, v_y 及角速度指令 ω ,可在平面内同时完成任意方向的平移与旋转动作。定义系统内一个移动机器人成员为领航单元,其余为跟随单元,编队控制方法选择将相对位姿关系作为控制输入的领航-跟随法。

设计系统控制框架如图1所示。

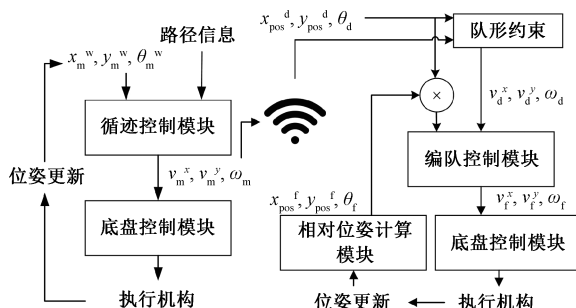


图1 多移动机器人协作转运系统控制框架

Fig. 1 MMRS control framework

领航单元可通过导航传感器获取全局坐标下的定位信息 x_m^w, y_m^w, θ_m^w 及在全局地图中规划的路径信息。比较领航单元当前位姿与路径上目标点,可计算出控制指令 v_m^x, v_m^y 及 ω_m ;该功能由循迹控制模块完成。控制指令经底盘控制模块分解,输出与机器人运动底盘运动特性适配的各驱动轮驱动指令,使领航单元循迹运行。领航单元在运行过程中,也将自身速度信息通过无线网络实时

传递至跟随单元。

跟随单元首先根据期望位姿 $x_{\text{pos}}^d, y_{\text{pos}}^d, \theta_d$ 与领航单元速度信息, 计算自身标准运行速度 v_d^x, v_d^y 及 ω_d ; 之后, 将相对于领航单元的协作定位结果 $x_{\text{pos}}^f, y_{\text{pos}}^f, \theta_f$ 与期望位姿相比求得位姿偏差; 该功能由相对位姿计算模块实现。最后, 标准运行速度结合位姿偏差可求得跟随单元中心速度指令 v_f^x, v_f^y 及 ω_f , 该功能由编队控制模块实现。在该控制框架下, 可达到多台机器人保持队形协作转运的效果。本文重点关注与编队控制相关的相对位姿计算模块与编队控制模块, 其余功能模块不进行讨论。

如图2所示, 使用 $x_m y_m$ 表示领航单元坐标系, $x_d y_d$ 表示跟随单元期望坐标系, $x_{fi} y_{fi}$ 表示某一跟随单元坐标系, i 为跟随单元编号。

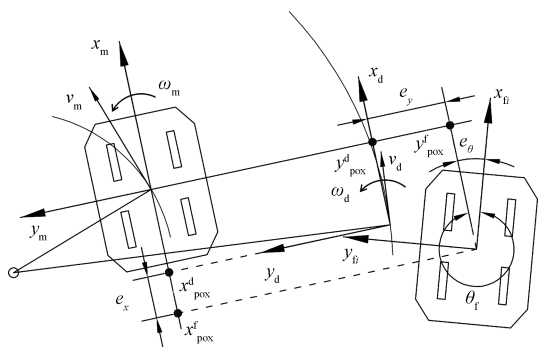


图2 根据相对位姿偏差计算跟踪速度

Fig. 2 Speed commands of a follower are related to the relative position

控制目标为使得坐标系 $x_{fi} y_{fi}$ 与 $x_d y_d$ 重合。坐标系 $x_d y_d$ 的原点 O_d 在坐标系 $x_m y_m$ 中位置为 $[x_{\text{pos}}^d, y_{\text{pos}}^d]$, x_d 轴、 x_m 轴指向一致。设某周期领航单元有中心速度 $\mathbf{v}_m$ 及角速度 ω_m , $\mathbf{v}_m$ 在 x_m 轴分量为 v_m^x , 在 y_m 轴分量为 v_m^y 。在刚体约束下, 可解得跟随单元标准速度 $\mathbf{v}_d$ 与标准角速度 ω_d ; 其中, ω_d 与 ω_m 相等, $\mathbf{v}_d$ 在 x_d 轴分量为 v_d^x 、在 y_d 轴分量为 v_d^y 。以下对跟随单元标准线速度 $\mathbf{v}_d$ 计算方法进行说明。首先根据 $\mathbf{v}_m$ 求解领航单元旋转中心 O_r 在坐标系 $x_m y_m$ 中位置坐标 $x_{\text{rot}}^m, y_{\text{rot}}^m$:

$$\begin{cases} x_{\text{rot}}^m = \pm \frac{R}{\sqrt{k^2 + 1}} \\ y_{\text{rot}}^m = k \cdot x_{\text{rot}}^m \end{cases} \quad (1)$$

其中, R 为领航单元旋转半径, $R = \|\mathbf{v}_m\| / \|\omega_m\|$; k 表示与 $\mathbf{v}_m$ 垂直的直线斜率, k 可解得两解, 应根据 ω_m 方向确认最终解。向量 $\overrightarrow{O_r O_d}$ 的长度即为跟随单元标准旋转半径, 由刚体运动特性:

$$\frac{\|\mathbf{v}_m\|}{R} = \frac{\|\mathbf{v}_d\|}{\|\overrightarrow{O_r O_d}\|} \quad (2)$$

可解得 $\|\mathbf{v}_d\|$ 。使用 $\hat{\mathbf{v}}_d$ 表示 $\mathbf{v}_d$ 的单位向量, $\hat{\mathbf{v}}_d$ 与 $\overrightarrow{O_r O_d}$ 垂直, $\|\mathbf{v}_d\|$ 沿 $\hat{\mathbf{v}}_d$ 分解即可得到 v_d^x, v_d^y 。

设坐标系 $x_{fi} y_{fi}$ 原点在坐标系 $x_m y_m$ 中位置为 $[x_{\text{pos}}^f, y_{\text{pos}}^f]$; 轴 x_m 旋转至 x_{fi} 的夹角为 θ_{fi} 。该时刻下, 坐标系 $x_{fi} y_{fi}$ 与坐标系 $x_d y_d$ 相比, 有位姿偏差 e_x, e_y 及 e_θ :

$$\begin{aligned} e_x &= x_{\text{pos}}^d - x_{\text{pos}}^f \\ e_y &= y_{\text{pos}}^d - y_{\text{pos}}^f \\ e_\theta &= \theta_d - \theta_f \end{aligned} \quad (3)$$

其中, θ_d 为轴 x_m 旋转至 x_d 的夹角, $\theta_d = 0$ 。对跟随单元进行分向控制, 设计分向控制律:

$$\begin{cases} v_f^x = v_d^x + k_x \cdot e_x \\ v_f^y = v_d^y + k_y \cdot e_y \\ \|\omega_f\| = \|\omega_d\| + k_\theta \cdot e_\theta \end{cases} \quad (4)$$

式中: v_f^x 为在领航单元坐标系下, 跟随单元应有中心速度输入在轴 x_m 的速度分量, v_f^y 表示在轴 y_m 的速度分量; ω_f 为跟随单元应有角速度; k_x, k_y, k_θ 分别表示两向线速度及角速度控制参数, 均为正数。构造如下 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} (e_x^2 + e_y^2 + e_\theta^2) \quad (5)$$

对函数 V 关于时间变量求导并将式 (3) 代入, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_x \cdot \dot{e}_x + e_y \cdot \dot{e}_y + e_\theta \cdot \dot{e}_\theta = \\ &= (x_{\text{pos}}^d - x_{\text{pos}}^f) (\dot{x}_{\text{pos}}^d - \dot{x}_{\text{pos}}^f) + (y_{\text{pos}}^d - y_{\text{pos}}^f) (\dot{y}_{\text{pos}}^d - \dot{y}_{\text{pos}}^f) + \\ &= (\dot{x}_{\text{pos}}^d - \dot{x}_{\text{pos}}^f) + (\theta_d - \theta_f) (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_f) \end{aligned} \quad (6)$$

将式 (4) 代入式 (6), 可得:

$$\dot{V} = -k_x \cdot (x_{\text{pos}}^d - x_{\text{pos}}^f)^2 - k_y \cdot (y_{\text{pos}}^d - y_{\text{pos}}^f)^2 - k_\theta (\theta_d - \theta_f)^2 \leq 0 \quad (7)$$

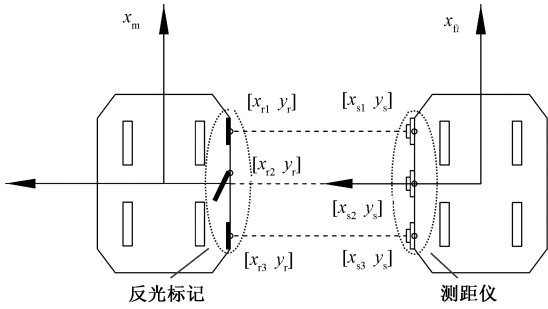
当 $t \rightarrow \infty$ 时, V 将不断减小直至收敛至 0, 因此该控制律可实现领航单元带领下、跟随单元保持标准队形运动的控制目标。

2 参数自适应调整的编队控制

2.1 基于激光测距仪的相对位姿求解

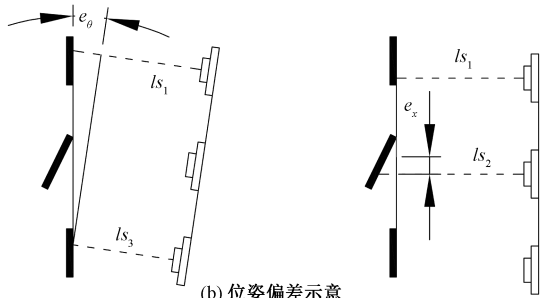
跟随单元与领航单元的相对位姿是求解跟随单元速度指令的重要输入。协作定位选择激光测距仪配合平面反光标记 (反光板) 的方式, 具有测量精度高、行程远的优势。定位需使用 3 台激光测距仪, 测距仪可安装在领航单元, 也可安装在跟随单元, 图3所示为安装在跟随单元的状态。图3(a)中测距仪在跟随单元坐标系中位置使用激光源位置表示, 分别定义为 $[x_{s1}, y_s]$ 、 $[x_{s2}, y_s]$ 、 $[x_{s3}, y_s]$ 。领航单元安装 3 套反光板, 两外侧反光板与轴 x_m 平行, 两者在领航单元坐标系中的位置使用几何中心表示, 分别定义为 $[x_{r1}, y_r]$ 、 $[x_{r3}, y_r]$; 位于中部的反光

板倾斜安装,与轴 x_m 有夹角 θ_r ,该反光板的安装位置使用反光板一端的坐标点,定义为 $[x_{r2}, y_r]$ 。



(a) 测距仪与反光板的坐标表示

(a) Position coordinates of laser distance sensors and reflectors



(b) 位姿偏差示意

(b) Relative pose deviation

图3 使用测距仪进行协作定位

Fig. 3 Three laser distance sensors are used to measure the relative position

如图3(b)所示,3台测距仪测量值分别使用 ls_1 、 ls_2 、 ls_3 表示。当领航单元与跟随单元既无位置偏差、也无姿态偏差时($e_x = 0, e_y = 0, e_\theta = 0$),应有 $ls_1 = ls_3 = ls_{std}$,其中 ls_{std} 表示期望测量值。位于中部的测距仪与位于两侧的相比,存在数值为 $x_{r2} \tan \theta_r$ 的差值,即 $ls_2 = ls_1 + |x_{r2} \tan \theta_r|$ 。当两单元存在位姿偏差时:

$$\begin{cases} \tan e_\theta = \frac{ls_1 - ls_3}{x_{s1} - x_{s3}} \\ e_x = \frac{ls_2 - ls_1}{\tan \theta_r} - x_{r2} \\ e_y = ls_1 - ls_{std} \end{cases} \quad (8)$$

相比于早期研究中使用的激光雷达识别圆柱形反光标记测量相对位姿的方式,激光测距仪测量精度更高,可有效提升协作定位输入质量。但是,由于测距仪激光发射路线固定且反光板宽度有限,机器人系统仅可在直线轨迹运行,对运行过程中位姿偏差要求也更高。另外,式(8)所示求解方法中,当存在姿态偏差 e_θ 时, e_x 、 e_y 的解为近似解,可能会对编队运动性能产生影响。

考虑更多机器人组成编队的情况,如图4所示。跟随单元 $x_{f1}y_{f1}$ 、 $x_{f2}y_{f2}$ 上安装的测距仪可直接测量与领航单元 $x_m y_m$ 的相对位姿,而跟随单元 $x_{f3}y_{f3}$ 仅可测量与跟随单

元 $x_{f1}y_{f1}$ 的相对位姿, $x_{f1}y_{f1}$ 是 $x_{f3}y_{f3}$ 的“相对领航单元”;由于偏差的传递,跟随单元 $x_{f3}y_{f3}$ 可能难以完成协作转运任务。

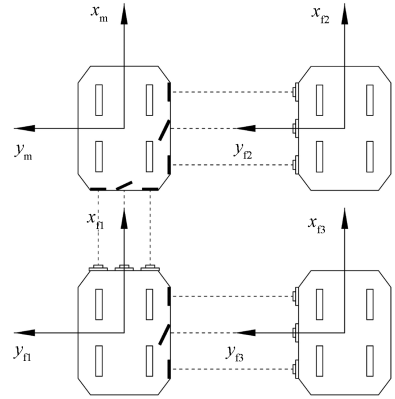


图4 系统内存在“相对领航单元”

Fig. 4 A "relative leader"

2.2 控制参数的在线自适应调整

为提高编队控制精度,减少位姿偏差近似解及偏差传递带来的影响,考虑将神经网络引入编队控制。期望利用神经网络非线性拟合能力与学习能力,使速度控制系数可根据编队运行状态与相对位置关系进行在线自适应调整。选择基于误差反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)并将速度控制系数由单一比例系数扩展为比例、积分、微分3项,将对3项速度控制参数同时进行在线调整。

设计 BPNN 为3层结构,如图5所示。

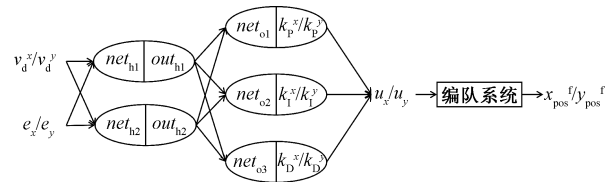


图5 速度控制系数计算

Fig. 5 Control parameters are calculated by using a neural network

对于编队控制的应用场景,跟随单元速度与位置偏差及标准速度相关;因此,设定输入层有两个节点,分别为标准速度与位置偏差。对于轴 x_m 方向的跟踪,标准速度应代入 v_d^x ;对于轴 y_m ,应代入 v_d^y 。类似地,位置偏差可代入 e_x 或 e_y 。设计中间层有两节点、输出层有3节点,3节点分别对应比例、积分、微分3项控制参数 k_p 、 k_i 与 k_d 。由于编队为分向控制,可使用 k_p^x 、 k_i^x 、 k_d^x 及 k_p^y 、 k_i^y 、 k_d^y 进行区分。模型内包含10个权重参数,分别为 $w_1 \sim w_{10}$;本研究中权重参数初始值的设定基于早期使用4台小型轻载移动机器人测试获得的大量试验数据,可减少

迭代次数、快速优化权重数值。使用权重参数与输入层两输入,经中间层激活函数与输出层激活函数,可获得速度控制系数。相比于式(4),跟随单元速度指令可表示为:

$$\begin{cases} v_f^x = v_d^x + u_x = v_d^x + k_p^x \cdot e_x + k_i^x \cdot e_{\text{sum}}^x + \\ k_D^x \cdot (e_x - e_x^o) \\ v_f^y = v_d^y + u_y = v_d^y + k_p^y \cdot e_y + k_i^y \cdot e_{\text{sum}}^y + \\ k_D^y \cdot (e_y - e_y^o) \end{cases} \quad (9)$$

其中, e_{sum}^x 、 e_{sum}^y 表示两个方向位置偏差的累加值, e_x^o 、 e_y^o 表示上一周期的位置偏差。

将总误差表示为:

$$E = \frac{1}{2} (\text{posi}_{\text{std}} - \text{posi}_{\text{out}})^2 \quad (10)$$

式中: posi_{std} 为标准位置,可代入 x_{pos}^d 或 y_{pos}^d ; posi_{out} 为实际位置状态,可代入 x_{pos}^f 或 y_{pos}^f 。如图6所示,负梯度方向是函数值下降最快的方向, BPNN 的原理为使各项权值沿负梯度方向变化,使误差函数有最小值。

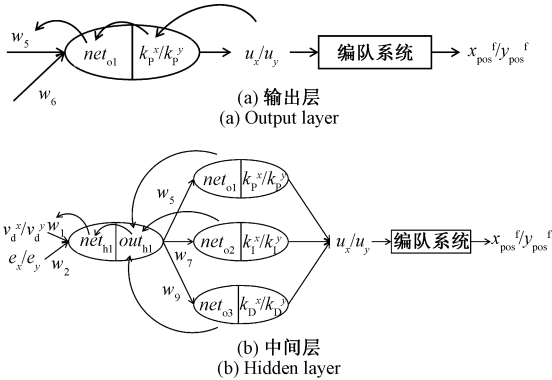


图6 误差反向传递路径

Fig. 6 Scheme of error back-propagation

可按如图6所示路径对偏差值求偏导获取各权重参数的更新,从而达到速度控制系数随编队运动状态在线调整的效果。使用更新后的权值进行下一周期控制参数计算,机器人编队在运行过程中权值也在不断进行迭代,最终达到较好的跟踪精度。

2.3 仿真计算与分析

搭建模型对编队运动性能进行计算分析,保证使用测距仪实现多台机器人编队运动的可行性。本节中,若无特殊说明,涉及长度尺寸、位置坐标、距离测量值等几何参数的单位均为米(m)。如图7所示,建立世界坐标系XY;坐标系XY中有3台机器人,分别为领航单元 $x_m y_m$ 、跟随单元① $x_{f1} y_{f1}$ 及跟随单元② $x_{f2} y_{f2}$ 。

使用测距仪安装在领航单元的测量方式,领航单元测距仪安装在机器人尾部(即轴 x_m 负半轴),输出用于计

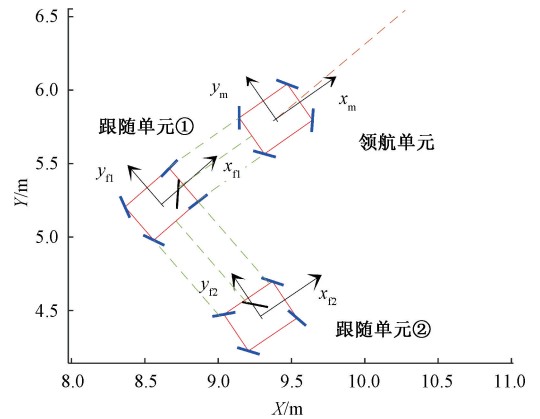


图7 机器人协作转运系统计算模型

Fig. 7 A computational model for cooperative transportation

算领航单元与跟随单元①的相对位姿;跟随单元①测距仪安装在机器人右侧(即轴 y_{f1} 负半轴),输出用于计算跟随单元①与跟随单元②的相对位姿,跟随单元①是②的“相对领航单元”。设计机器人尺寸 0.2×0.15 。坐标系 $x_{f1} y_{f1}$ 原点在坐标系 $x_m y_m$ 的标准位置为 $[-1, 0]$;坐标系 $x_{f2} y_{f2}$ 原点在坐标系 $x_{f1} y_{f1}$ 中标准位置为 $[0, -1]$,在坐标系 $x_m y_m$ 中为 $[-1, -1]$ 。设计领航单元以 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度沿直线轨迹运行,每计算周期为 0.02 s 。

初始时刻,对于跟随单元①,设定坐标系 $x_{f1} y_{f1}$ 原点在坐标系 $x_m y_m$ 中位置为 $[-0.9710, -0.0281]$,轴 x_m 至轴 x_{f1} 有夹角 6° ;此时,有位置偏差 $e_{x1} = -0.0285$ 、 $e_{y1} = -0.0281$,姿态偏差 $e_{\theta1} = -6^\circ$ 。领航单元测距仪测量值分别为 0.589 、 0.612 、 0.558 ,结合测距仪与反光板安装位置,可解得位姿偏差测量值 $e_{x1}^{\text{ls}} = -0.011$ 、 $e_{y1}^{\text{ls}} = -0.027$ 、 $e_{\theta1}^{\text{ls}} = -6^\circ$ 。由于存在姿态偏差,使用测距仪测量值计算得到的位置偏差与实际情况不同。

对于跟随单元②,设定初始时刻坐标系 $x_{f2} y_{f2}$ 原点在坐标系 $x_{f1} y_{f1}$ 中位置为 $[0.009, -1.017]$,轴 x_{f1} 至轴 x_{f2} 有夹角 353° 。此时相对于跟随单元①,有位置偏差 $e_{x2}^{\text{ref}} = -0.009$ 、 $e_{y2}^{\text{ref}} = 0.017$,姿态偏差 $e_{\theta2}^{\text{ref}} = 7^\circ$;而相对于领航单元,则有位姿偏差 $e_{x2} = -0.144$ 、 $e_{y2} = 0.039$ 、 $e_{\theta2} = 1^\circ$ 。跟随单元①测距仪测量值分别为 0.740 、 0.747 、 0.691 ,可解得位姿偏差测量值为 $e_{x2}^{\text{ls}} = -0.049$ 、 $e_{y2}^{\text{ls}} = 0.040$ 、 $e_{\theta2}^{\text{ls}} = 7^\circ$ 。与跟随单元②相关的3组位姿偏差数据各不相同。

共计算350个控制周期。随着计算进程的推进,两个跟随单元逐步靠近各自标准位置,组成中心距为 1×1 的标准队形。测距仪测量值的变化情况如图8所示。3条曲线分别代表3个激光测距仪。测距仪测量值逐步稳定,位于两端的测距仪测量值相互靠近并最终重合;位于中部的测距仪由于测量对象为倾斜放置的反光板,测量值高于另外两组数据。

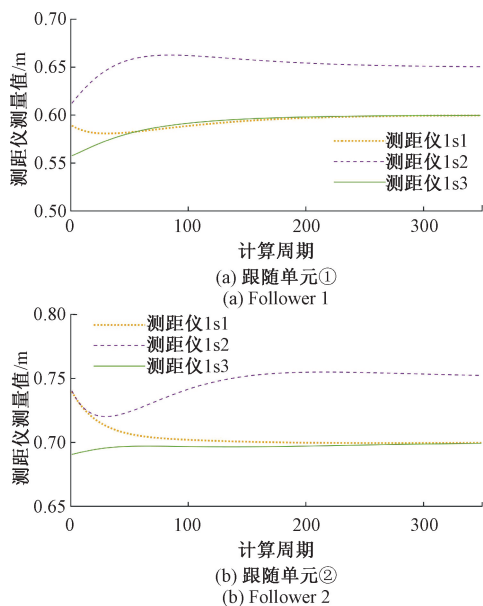


图8 激光测距仪测量值曲线

Fig. 8 Simulation values of measurement results obtained from laser distance sensors

图9(a)所示为跟随单元①调整过程中相对位姿变化曲线,其中各子图有两条曲线,分别为跟随单元①相对领航单元的实际相对位姿(即图例所指“实际值”) e_{x1} 、 e_{y1} 、 $e_{\theta1}$ 与使用测距仪输入计算所得的相对位姿(即图例所指“测量值”) e_{x1}^{ls} 、 e_{y1}^{ls} 、 $e_{\theta1}^{ls}$ 。初始时刻由于姿态偏差的存在, e_{x1} 与 e_{x1}^{ls} 、 e_{y1} 与 e_{y1}^{ls} 在数值上存在差距;随着跟随单元位姿的调整,两条曲线逐步靠近并最终重合。跟随单元①约在第263周期到达稳定状态。

图9(b)为跟随单元②的位姿变化曲线,其中各子图有3条曲线,相比跟随单元①,增加了虚线表示跟随单元②与跟随单元①的相对位姿(即图例所指“实际值-相

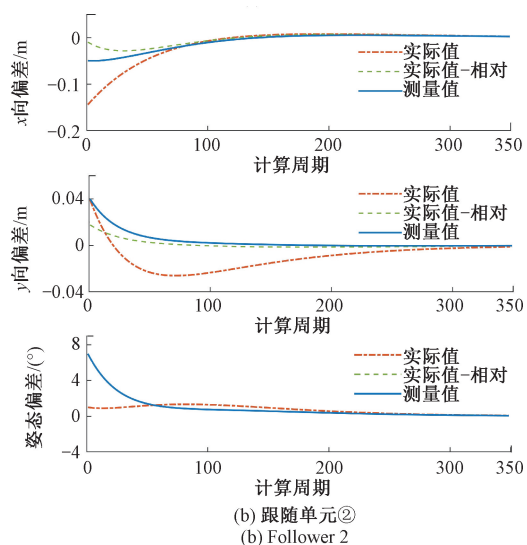


图9 跟随单元相对位姿偏差变化曲线

Fig. 9 Simulation values indicating relative deviations

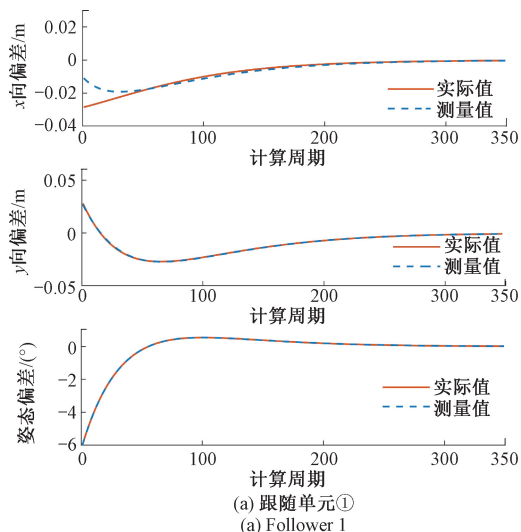
对”) e_{x2}^{ref} 、 e_{y2}^{ref} 、 $e_{\theta2}^{ref}$ 。初始时刻, e_{x2} 、 e_{x2}^{ref} 、 e_{x2}^{ls} 之间差别较大, e_{y2} 、 e_{y2}^{ref} 、 e_{y2}^{ls} 情况类似。随着计算周期数的增加, e_{x2}^{ref} 与 e_{x2}^{ls} 、 e_{y2}^{ref} 与 e_{y2}^{ls} 逐步靠近,但与 e_{x2} 、 e_{y2} 相比仍有较大差距;最后,约在第300周期,跟随单元②相对领航单元的位置偏差曲线与另两条曲线靠近并趋于稳定。跟随单元②到达稳定状态的时间晚于跟随单元①。

3 单台移动机器人的重定位轨迹规划

一般的,在形成编队前,各机器人停止在待命区且运动状态相互独立。为各个机器人从待命区规划路径,使其可依靠全局定位循迹至指定编队点。到达编队点后,测距仪能扫描到对应反光板,获得有效测量值。将这一从待命点运动到指定编队点的过程称为组队。组队时采用SLAM导航技术实现全局定位。SLAM导航定位精度有限。全局循迹运动停止后,相对于目标点常存在不小于20 mm的位置偏差。因此,设计重定位轨迹规划方法使机器人循迹停止后再次对定位进行修正,提高组队质量。

使用二维码与二维码阅读器实现高精度重定位。设计移动机器人底部安装二维码阅读器,该传感器可反馈自身相对于放置在地面的二维码的位置信息。如图10所示,二维码阅读器坐标系使用 $x_s y_s$ 表示,机器人坐标系使用 $x_c y_c$ 表示。

坐标系 $x_s y_s$ 原点在坐标系 $x_c y_c$ 中的位置可表示为 $[x_{ss}^c \ y_{ss}^c]^T$,记作 $\mathbf{p}_{ss-o}^c = [x_{ss}^c \ y_{ss}^c \ 0]^T$;轴 x_c 至轴 x_s 的夹角表示为 θ_{ss}^c 。阅读器识别到二维码后,可反馈其在二维



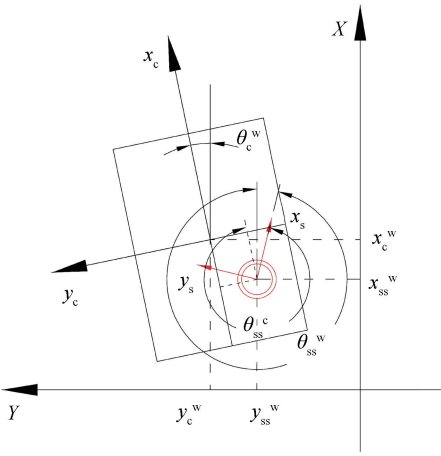


图10 基于二维码重定位的坐标系建立

Fig. 10 A QR code is utilized for precise localization

码坐标系 $x_w y_w$ 的位姿信息,分别为坐标系 $x_s y_s$ 原点在坐标系 $x_w y_w$ 的位置 $[x_{ss}^w \ y_{ss}^w]$ 及轴 x_w 至轴 x_s 的夹角 θ_{ss}^w 。使用向量 $U(t) = [x_{ss}^w(t) \ y_{ss}^w(t) \ \theta_{ss}^w(t)]^T$ 表示读码器在二维码坐标系的位姿状态。设初始时刻位姿状态为 $U_0 = [x_{ss_0}^w \ y_{ss_0}^w \ \theta_{ss_0}^w]^T$ 。控制目标为在 t_s 的时长内,使读码器变换至目标状态 $U_e = [x_{ss_e}^w \ y_{ss_e}^w \ \theta_{ss_e}^w]^T$ 。

运动轨迹规划采用5次多项式。在进行规划前,应先将二维码传感器测量值转化为坐标系 $x_c y_c$ 原点在坐标系 $x_w y_w$ 的位姿信息。此时,将构成新的 $U_0 = [x_{c_0}^w \ y_{c_0}^w \ \theta_{c_0}^w]^T$ 与 $U_e = [x_{c_e}^w \ y_{c_e}^w \ \theta_{c_e}^w]^T$ 。使用 $U(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0$ 表示机器人运动轨迹,其中 $a_0 \sim a_5$ 为待定系数。机器人速度及加速度可表示为 $\dot{U}(t) = 5a_5 t^4 + 4a_4 t^3 + 3a_3 t^2 + 2a_2 t + a_1$, $\ddot{U}(t) = 20a_5 t^3 + 12a_4 t^2 + 6a_3 t + 2a_2$ 。一般调姿过程中,起始和目标时刻机器人均为静止状态,为使方程更具一般性,设起始时刻速度向量为 $\dot{U}_0$ 、目标时刻速度向量为 $\dot{U}_e$ 。调姿过程中有以下约束条件:

$$\begin{cases} U(0) = a_0 = U_0 \\ U(t_s) = a_5 t_s^5 + a_4 t_s^4 + a_3 t_s^3 + a_2 t_s^2 + a_1 t_s + a_0 = U_e \\ \dot{U}(0) = a_1 = \dot{U}_0 \\ \dot{U}(t_s) = 5a_5 t_s^4 + 4a_4 t_s^3 + 3a_3 t_s^2 + 2a_2 t_s + a_1 = \dot{U}_e \\ \ddot{U}(0) = 2a_2 = 0 \\ \ddot{U}(t_s) = 20a_5 t_s^3 + 12a_4 t_s^2 + 6a_3 t_s + 2a_2 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

解以上方程,可得:

$$\begin{cases} U(t) = (-3Bt_s + 6A) \frac{t^5}{t_s^5} + (-7Bt_s - 15A) \frac{t^4}{t_s^4} + (-4Bt_s + 10A) \frac{t^3}{t_s^3} + \dot{U}_0 t + U_0 \\ \dot{U}(t) = (-15Bt_s + 30A) \frac{t^4}{t_s^5} + (-28Bt_s - 60A) \frac{t^3}{t_s^4} + (-12Bt_s + 30A) \frac{t^2}{t_s^3} + \dot{U}_0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, A, B 为简化方程解表达的变量符号, $A = U_e - \dot{U}_0 t_s - U_0$, $B = \dot{U}_e - \dot{U}_0$; 变量 $U(t)$ 描述为了机器人规划的位姿变化状态; $\dot{U}(t)$ 则为对应的各时刻应有线速度与角速度。注意此时线速度指令为表示在坐标系 $x_w y_w$ 的速度向量。进行速度分解前,应先使用坐标系 $x_w y_w$ 至坐标系 $x_c y_c$ 的转换矩阵 R_w^c , 将该速度向量转换至机器人坐标系中。 R_w^c 与 θ_c^w 相关, 随各时刻机器人在坐标系 $x_w y_w$ 中姿态的不同而变化。

设机器人控制周期为 T , 对时间 t 做离散化处理可得各周期控制指令集合:

$$\left\{ \begin{bmatrix} \dot{x}_c^w(T) \\ \dot{y}_c^w(T) \\ \dot{\theta}_c^w(T) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \dot{x}_c^w(2T) \\ \dot{y}_c^w(2T) \\ \dot{\theta}_c^w(2T) \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} \dot{x}_c^w(kT) \\ \dot{y}_c^w(kT) \\ \dot{\theta}_c^w(kT) \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} \dot{x}_c^w(t_s) \\ \dot{y}_c^w(t_s) \\ \dot{\theta}_c^w(t_s) \end{bmatrix} \right\}$$

设置最大线速度 $v_{\max}$ 、最大角速度 $\omega_{\max}$ 、最大加速度 $\ddot{v}_{\max}$ 等约束条件并将指令集合与速度限制对比,若有超出限制的指令应重新设置规划时间 t_s 。为保证规划效率,可使用二分法计算规划时间。

4 试验与分析

4.1 重定位试验

使用由4套麦克纳姆轮(麦轮)驱动的全向移动机器人进行重定位算法性能验证,如图11所示。

机器人外形尺寸约 $1.2 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$, 具有 1 t 的承载能力。试验时限制最大线速度 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、最大角速度 $2^\circ \cdot \text{s}^{-1}$; 相对于目标状态,设置位置偏差允许上限 5 mm 、姿态偏差允许上限 0.5° 。这里位置偏差指合位置偏差,定义为:在坐标系 $x_w y_w$ 中,相对于定位目标,沿轴 x_w 的位置偏差为 e_x^w , 沿轴 y_w 为 e_y^w ; 合位置偏差为 $\sqrt{(e_x^w)^2 + (e_y^w)^2}$ 。



图 11 试验用麦克纳姆轮驱动机器人

Fig. 11 A Mecanum wheel robot

图 12 所示为一种一般工况,初始位姿为 $x_{ss}^w = -4$ mm、 $y_{ss}^w = -73$ mm、 $\theta_{ss}^w = 178^\circ$,目标位姿为 $x_{ss}^w = 10$ mm、 $y_{ss}^w = -10$ mm、 $\theta_{ss}^w = 180^\circ$ 。图 12(a) 为规划指令曲线,线速度及角速度曲线均光滑连续。在该次试验中规划计算执行两次,因此指令曲线可明显分为两段。图 12(b) 为调姿过程中实时采集的传感器测量值,最终达到了 $x_{ss}^w = 8$ mm、 $y_{ss}^w = -13$ mm、 $\theta_{ss}^w = 179^\circ$ 的定位效果。此时,合位置偏差约 3.6 mm,姿态偏差为 0。

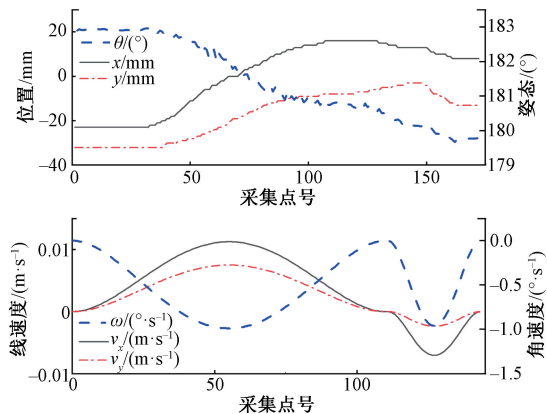


图 12 重定位试验 1:一般工况

Fig. 12 Precise localization test NO. 1: Normal condition

图 13 所示为从初始位姿 $x_{ss}^w = 39$ mm、 $y_{ss}^w = 51$ mm、 $\theta_{ss}^w = 4^\circ$ 到目标位姿 $x_{ss}^w = 0$ 、 $y_{ss}^w = 0$ 、 $\theta_{ss}^w = 358^\circ$ 的指令曲线与位姿变化过程,该试验设置目标姿态越过“0”点,验证算法是否可正确处理特殊情况。最终,机器人达到了 $x_{ss}^w = 0$ 、 $y_{ss}^w = 0$ 、 $\theta_{ss}^w = 358^\circ$ 的调姿效果,与目标位姿一致;姿态从 4° 顺时针变化至 358° ,即越“0”状态得到了正确处理。

图 14 所示为一种近似侧移的调姿工况,初始位姿为 $x_{ss}^w = -4$ mm、 $y_{ss}^w = -73$ mm、 $\theta_{ss}^w = 178^\circ$,目标位姿为 $x_{ss}^w = -5$ mm、 $y_{ss}^w = 5$ mm、 $\theta_{ss}^w = 174^\circ$ 。该次试验中,规划计算

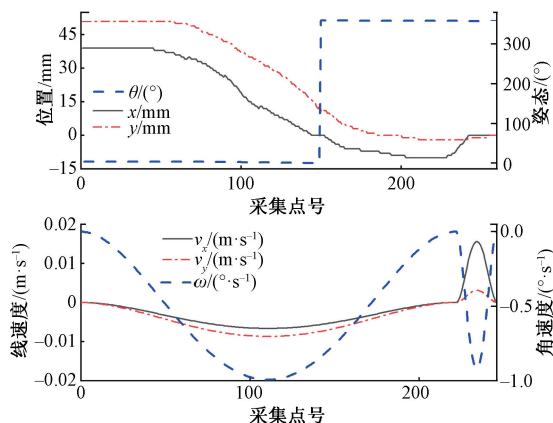


图 13 重定位试验 2:越“0”工况

Fig. 13 Precise localization test NO. 2: Conditions exceeding "0"

执行两次最终达到了 $x_{ss}^w = -6$ mm、 $y_{ss}^w = 7$ mm、 $\theta_{ss}^w = 174^\circ$ 的定位效果,合位置偏差 2.2 mm,姿态偏差为 0。

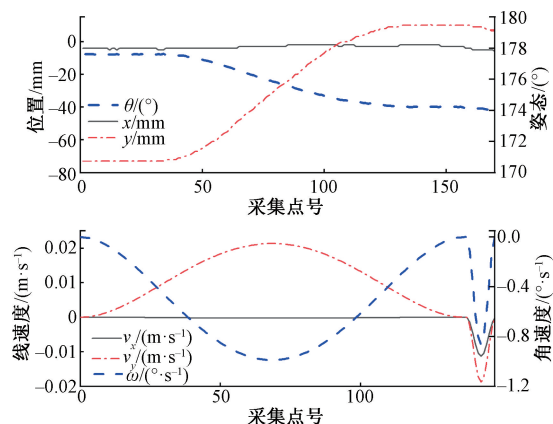


图 14 重定位试验 3:侧移工况

Fig. 14 Precise localization test NO. 3: Lateral movement condition

4.2 协作转运系统试验

模拟实际使用环境,进行大负载条件下机器人协作转运试验。使用 4 台图 11 所示的机器人形成协作转运系统并组成矩形编队,如图 15 所示。

队形标准中心距为 $1.7 \text{ m} \times 1.46 \text{ m}$ 。系统负载质量总计近 3 t,包含 2 个 1 t 的砝码、2 个 200 kg 的砝码及 1 个质量约 600 kg 的支架。设置 1 台机器人为领航单元,其余 3 位成员为跟随单元。领航单元尾部 (x_m 轴负半轴) 及右侧 (y_m 轴负半轴) 各安装 3 块反光板。跟随单元①前部安装 3 套激光测距仪 (型号为倍加福 R1000),测量对象为领航单元尾部反光板;跟随单元①右侧也安装有 3 块反光板。跟随单元②与③左侧均安装 3 套测距仪,跟随单元②测量对象为领航单元右侧反光板,跟随单

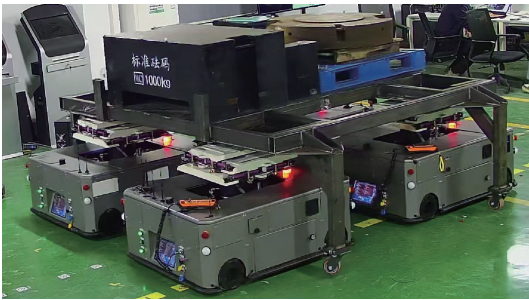


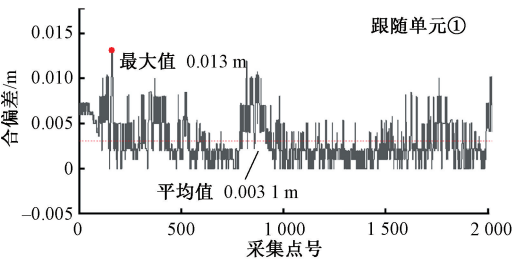
图 15 4 台机器人组成协作转运系统

Fig. 15 Cooperative transportation is conducted with four Mecanum wheel robots

元③测量对象为跟随单元①右侧反光板;跟随单元①是③的“相对领航单元”。机器人间的通信方式为分布式设计,设置有控制终端;控制终端承担向各机器人发送路径、循迹指令、重定位指令等调度功能。各机器人也向控制终端反馈自身运动状态。领航单元的速度信息直接传递至各跟随单元,不经过控制终端。

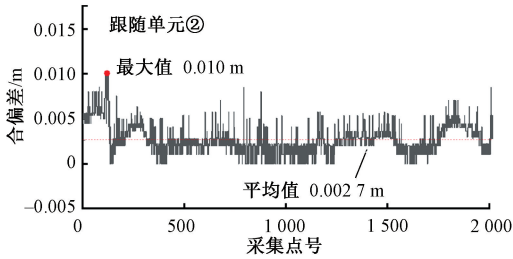
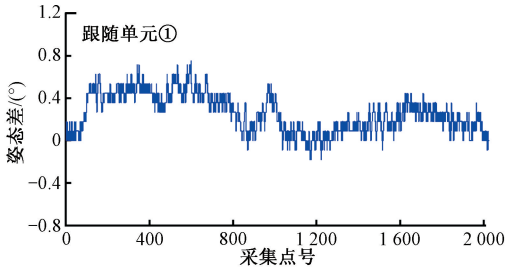
完成组队后,首先控制领航单元以 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度循迹运行,一次试验中激光测距仪反馈的 3 位跟随单元的相对位姿测量结果如图 16 所示。

其中,位置偏差为合位置偏差,定义为:在对应的领航单元坐标系中,当相对期望坐标系有位置偏差 e_x^{ls} 、



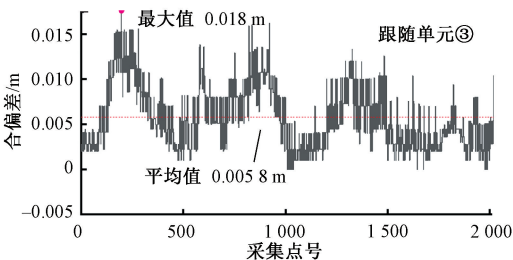
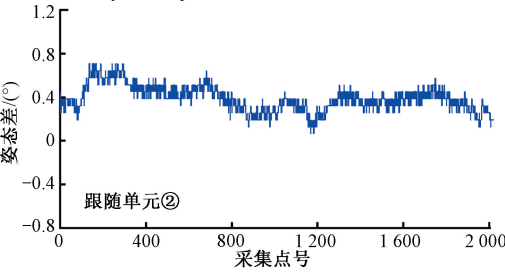
(a) 重载试验跟随单元①位姿偏差

(a) Relative deviations of follower 1 in the heavy load experiment



(b) 重载试验跟随单元②位姿偏差

(b) Relative deviations of follower 2 in the heavy load experiment



(c) 重载试验跟随单元③位姿偏差

(c) Relative deviations of follower 3 in the heavy load experiment

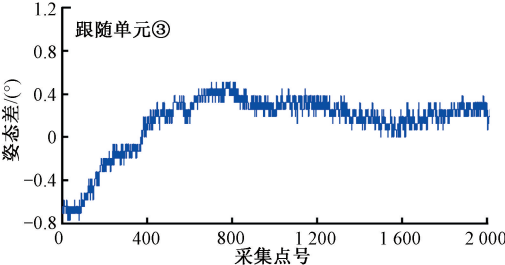


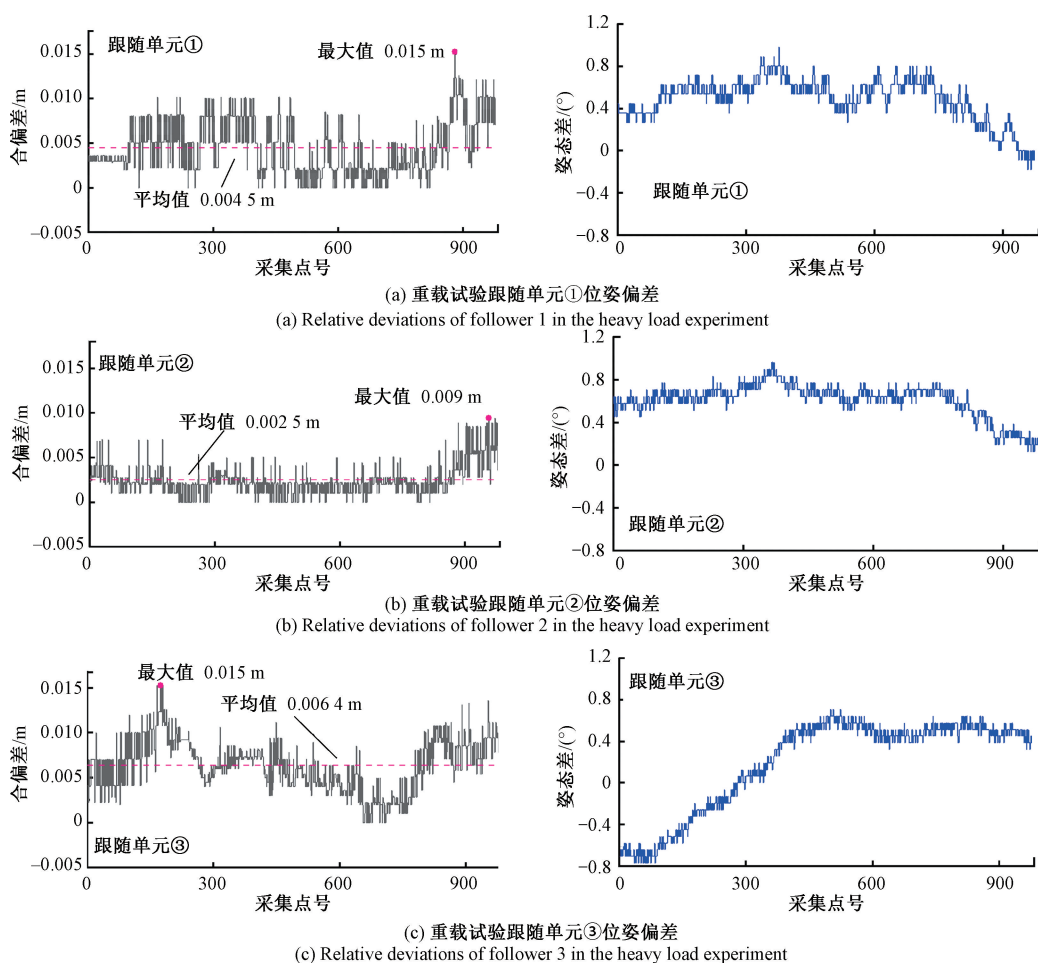
图 16 运行速度 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 位姿偏差曲线

Fig. 16 Curves of position deviations at a speed of $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

e_y^{ls} 时,合位置偏差为 $\sqrt{e_x^{ls} + e_y^{ls}}$ 。该次试验中跟随单元①合位置偏差最大值为 13 mm,均值为 3 mm;跟随单元②合位置偏差最大值 10 mm,均值为 2 mm。跟随单元①与单元②偏差情况相近。跟随单元③由于不能直接对领航单元进行位姿测量,位置偏差曲线整体波动幅度较大,其合位置偏差最大值为 18 mm,均值为 5 mm,高于另外两个

跟随单元。3 位跟随单元姿态偏差波动均可保持在 $-1^\circ\sim 1^\circ$ 范围内,跟随单元①与单元②姿态偏差变动曲线整体平缓,跟随单元③在编队运动起步时姿态偏差较大,之后得到调整并趋于稳定。

控制领航单元以 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度前进运行,一次试验中激光测距仪反馈的 3 位跟随单元相对位姿测量结果如图 17 所示。

图 17 运行速度 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 位姿偏差曲线Fig. 17 Curves of position deviations at a speed of $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

对于跟随单元①,合位置偏差最大值 15 mm,均值为 4 mm;对于跟随单元②,合位置偏差最大值 9 mm,均值为 2 mm。相比于低速运行,跟随单元①位置偏差最大值与均值均小幅度增加,而跟随单元②与低速运行基本一致。对于跟随单元③,合位置偏差最大值 15 mm,均值为 6 mm。跟随单元③的位置偏差波动幅度与均值高于另外两位跟随单元。3 位跟随单元姿态偏差变动情况与低速基本一致,姿态偏差波动范围可保持在 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 。

5 结 论

本文提出了一种多移动机器人编队控制方法,适用于大型产品协作转运场景。该方法基于领航-跟随控制策略,使用测距仪协作定位,对跟随单元线速度进行分向控制。为提高编队运行控制精度,减少相对位姿求解误差及位姿偏差传递带来的影响,将智能控制用于编队控制,实现了 3 项线速度控制系数的在线调整。

为减小移动机器人在组队阶段的位姿偏差,避免激

光测距仪“脱靶”,提出了使用二维码与二维码读码器对机器人进行重定位的轨迹规划方法。该方法不限制二维码读码器安装位置,可自由指定目标状态。试验结果表明,规划指令曲线光滑连续,机器人移动过程平稳;可达到合位置偏差 5 mm 以内、姿态偏差 1° 以内的调整效果。

在对所提出的编队控制方法进行仿真分析,证明可行性的基础上,使用 4 台移动机器人在 3 t 负载条件下进行协作转运试验。试验结果表明,3 位跟随单元位置偏差均值不大于 6 mm,最大值为 18 mm;姿态偏差波动范围可保持在 $-1^\circ \sim 1^\circ$ 。为减小通信压力、降低信息传递延迟,对数据进行分类并使用了分布式通信架构,起步与停止阶段位置偏差未出现明显增大情况。

多移动机器人协作转运可降低单台移动机器人的设计难度与制造成本。机器人编队可根据运输需求变更队形与机器人数量,提升装备多产品适应性与复用性,具有较高的工业应用价值。本研究中试验在试验室条件下进行,后续将针对动态环境、避障等实际场景,对控制策略进行进一步优化。

参考文献

- [1] 张捷, 姚瑶, 王健安, 等. 合作-竞争广义不确定异构多智能体系统的二分输出一致[J]. 自动化学报, 2025, 51(11): 2553-2568.
ZHANG J, YAO Y, WANG J AN, et al. Bipartite output consensus of cooperative-competitive descriptor uncertain heterogeneous multi-agent systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2025, 51(11): 2553-2568.
- [2] ZHAO J N, ZHU K Y, HU H J, et al. Formation control of networked mobile robots with unknown reference orientation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(4): 2200-2212.
- [3] 武星, 余文康, 楼佩煌, 等. 大型部件的多机器人合作搬运协同导引控制[J]. 中国机械工程, 2022, 33(13): 1586-1595.
WU X, YU W K, LOU P H, et al. Coordination guidance control for multi-robot cooperative transportations of large-sized objects[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(13): 1586-1595.
- [4] 刘金鑫, 盛蔚, 张玉民. 基于运动约束的无人机编队一致性优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(1): 230-243.
LIU J X, SHENG W, ZHANG Y M. Optimization algorithm for UAV formation consensus based on motion constraint[J]. System Engineering and Electronics, 2025, 47(1): 230-243.
- [5] MU CH X, YAO J Y, YANG H J, et al. Cooperative control for air-ground systems via bidirectional signal connection in complex environment[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2024, 54(9): 5680-5691.
- [6] 马梓元, 冯鹏宇, 龚华军, 等. 基于改进图神经网络算法的异构多智能体动态任务分配[J]. 控制与决策, 2026, 41(4): 1014-1023.
MA Z Y, FENG P Y, GONG H J, et al. Dynamic task allocation for heterogeneous multi-agent systems based on improved graph neural network algorithm[J]. Control and Decision, 2026, 41(4): 1014-1023.
- [7] 褚晶, 田艺秋, 岳硕, 等. 面向智能仓储的多机器人任务分配及路径规划[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(5): 929-938.
CHU J, TIAN Y Q, YUE Q, et al. Task allocation and path planning for multi-robot systems in intelligent warehousing[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(5): 929-938.
- [8] CLINCH K, WOOD T A, MANZIE C. Auction algorithm sensitivity for multi-robot task allocation[J]. Automatica, 2023, 158: 111239.
- [9] DOOSTMOHAMMADIAN M, AGHASI A, PIRANI M, et al. Survey of distributed algorithms for resource allocation over multi-agent systems[J]. Annual Reviews in Control, 2025, 59: 100983.
- [10] ZHOU B, ZHOU R, GAN Y H, et al. Multi-robot multi-station cooperative spot welding task allocation based on stepwise optimization: An industrial case study[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2022, 73: 102197.
- [11] 解明扬, 俞伟, 陈谋. 融合注意力机制和速度障碍法的多移动机器人端到端自主导航方法[J/OL]. 机器人, 1-13[2026-01-10].
XIE M Y, YU W, CHEN M. End-to-end autonomous navigation approach for multiple mobile robots integrating attention mechanism and velocity obstacle method[J/OL]. Robot, 1-13[2026-01-10].
- [12] 杨金一, 郭妍, 江鹏飞. 稀疏基站条件下基于迭代卡尔曼滤波的协同定位方法[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(12): 2209-2216.
YANG J Y, GUO Y, JIANG P F. Cooperative positioning method based on iterated Kalman filter in sparse-beacon environments[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(12): 2209-2216.
- [13] 姚明辉, 李梦涵, 牛燕, 等. 一种融合算法的多机器人路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(9): 55-64.
YAO M H, LI M H, NIU Y, et al. Path planning for multi-robots based on a fusion algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(9): 55-64.
- [14] 刘小松, 魏昌斌, 单泽涛, 等. 基于扩张状态观测器的里程计定位补偿无人车轨迹跟踪控制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 313-320.
LIU X S, WEI CH B, SHAN Z T, et al. Trajectory tracking control of unmanned vehicles with odometer positioning compensation based on extended state observer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 313-320.
- [15] LAI CH C, SU K L. Development of an intelligent mobile robot localization system using Kinect RGB-D mapping and neural network[J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 67: 620-628.
- [16] 胡钊政, 刘佳惠, 黄刚, 等. 融合WiFi、激光雷达与地图的机器人室内定位[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(8): 2308-2316.
HU ZH ZH, LIU J H, HUANG G, et al. Integration of WiFi, laser, and map for robot indoor localization[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021,

43(8): 2308-2316.

- [17] 王洪亮, 雍健羽, 皮大伟, 等. 基于贝塞尔曲线和多目标优化方法的多车队形切换轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2024, 60(16): 270-279.
WANG H L, YONG J Y, PI D W, et al. Multi-vehicle formation switching trajectory planning based on Bézier curve and multi-objective optimization method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(16): 270-279.
- [18] XIONG T Y, GU ZH. Observer-based adaptive fixed-time formation control for multi-agent systems with unknown uncertainties [J]. Neurocomputing, 2021, 423: 506-517.
- [19] GUO J D, LIU ZH G, SONG Y G, et al. Research on multi-UAV formation and semi-physical simulation with virtual structure[J]. IEEE Access, 2023, 11: 126027-126039.
- [20] OH K K, PARK M C, AHN H S. A survey of multi-agent formation control[J]. Automatica, 2015, 53: 424-440.
- [21] DORIYA R, MISHRA S, GUPTA S. A brief survey and analysis of multi-robot communication and coordination[C]. 2015 International Conference on Computing, Communication & Automation. India, 2015: 1014-1021.
- [22] KANTAROS Y, ZAVLANOS M M. Global planning for multi-robot communication networks in complex environments [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(5): 1045-1061.
- [23] SHEN M H, GAN H P, MA CH Y, et al. MTC-CSNet: Marrying transformer and convolution for image compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2024, 54(9): 4949-4961.
- [24] MARCOTTE R J, WANG X, MEHTA D, et al. Optimizing multi-robot communication under bandwidth constraints[J]. Autonomous Robots, 2020, 44(1): 43-55.
- [25] XIAO F, WANG L, CHEN J, et al. Finite-time formation control for multi-agent systems [J]. Automatica, 2009, 45(11): 2605-2611.

作者简介



赵蕾磊 (通信作者), 2014 年于南京理工大学获得学士学位, 2019 年于南京理工大学获得博士学位, 现为中国航天科工南京晨光集团有限责任公司高级工程师, 主要研究方向为机器人导航与控制、伺服控制。

E-mail: zll_cindy@163.com

Zhao Leilei (Corresponding author) received her B. Eng. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2014, and her Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2019. She is currently a senior engineer at Nanjing Chenguang Group Co., Ltd. Her main research interests include robot navigation and control, and servo control.



张琛, 2014 年于南京航空航天大学获得学士学位, 2022 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为江苏金陵智造研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为机器人自主定位导航、感知决策。

E-mail: 1440157670@qq.com

Zhang Chen received his B. Eng. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2014, and his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2022. He is currently a senior engineer at Jiangsu Jinling Institute of Intelligent Manufacturing Co., Ltd. His main research interests include robot navigation and perception.



赵孝礼, 2021 年于东南大学获得博士学位, 现为南京理工大学副教授, 主要研究方向为机电液装备故障诊断与智能运维、人工智能与数字孪生等。

E-mail: xlzhao@njjust.edu.cn

Zhao Xiaoli received his Ph. D. degree from Southeast University in 2021. He is currently an associate professor at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include fault diagnosis and intelligent maintenance for mechatronic and hydraulic equipment, artificial intelligence and digital twin.