

doi:10.13682/j.issn.2095-6533.2026.05.014

图拓扑和改进人工势场法结合的多机器人 编队避障算法

屈军锁, 梁柯, 刘威, 蔡星

(西安邮电大学 人工智能学院、自动化学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 针对多机器人编队与避障问题,以两轮差速移动机器人模型为基础,提出一种结合图拓扑和改进人工势场法的多机器人编队避障算法。结合纯跟踪算法,实现了多机器人的编队避障及路径跟踪。同时,改进了传统人工势场法中的斥力场函数,有效解决了局部最优和目标不可达的问题。仿真结果表明,机器人的线速度在3~5 s内快速收敛至稳态值,稳态跟踪误差趋近于零,瞬态最大超调量不超过 $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,所提编队控制方法在有无障碍物的环境下均表现出优异的路径跟踪性能,相较于传统编队控制算法,具有更强的环境适应性和更高的编队稳定性。能有效解决多机器人编队中的避障问题,并显著提升复杂环境下的协同能力,为多机器人系统在实际应用中的编队与避障任务提供了可靠的解决方案。

关键词: 多机器人系统;编队控制;人工势场法;路径规划;编队变换

中图分类号: TP242;TP18

文献标志码: A

文章编号: 2095-6533(2026)05-0147-12

Graph topology and improved artificial potential field method for multi-robot formation obstacle avoidance algorithm

QU Junsuo, LIANG Ke, LIU Wei, CAI Xing

(School of Artificial Intelligence, School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications,
Xi'an 710121, China)

Abstract: A multi-robot formation and obstacle avoidance algorithm, which combines graph topology and an improved artificial potential field (APF) method, is proposed based on a two-wheeled differential-drive mobile robot model. By integrating pure tracking algorithms, the proposed method achieves both formation obstacle avoidance and path tracking for multiple robots. Meanwhile, the repulsive field function in the traditional APF method is improved, effectively addressing the issues of local optima and unreachable targets. Simulation results show that the linear velocities of the robots converge rapidly to steady-state values within 3 to 5 seconds, with the steady-state tracking error approaching zero and the maximum transient overshoot not exceeding $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The proposed formation control method exhibits excellent path tracking performance in both obstacle-free and obstructed environments. Compared to traditional formation control algorithms, it exhibits superior environmental adaptability and higher formation stability. It effectively resolves the obstacle avoidance challenge in multi-robot formations, significantly enhancing collaborative performance in complex environments, and provides a reliable solution for the formation and obstacle avoidance tasks of multi-robot systems in practical applications.

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 西安市科技局协同创新专项计划项目(24KGDW0022)

引文格式: 屈军锁, 梁柯, 刘威, 等. 图拓扑和改进人工势场法结合的多机器人编队避障算法[J]. 西安邮电大学学报, 2026, 31(5): 147-158.

QU Junsuo, LIANG Ke, LIU Wei, et al. Graph topology and improved artificial potential field method for multi-robot formation obstacle avoidance algorithm[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2026, 31(5): 147-158.

Keywords: multi-robot system; formation control; artificial potential field method; path planning; formation transformation

近年来,随着计算机技术的发展,单一机器人已经无法满足一些复杂多样的工作场景。因此多机器人系统应运而生,多机器人编队避障是机器人领域中的主要研究方向,其在协同工作中具有广泛的应用前景。多机器人控制技术相比于单个机器人具有鲁棒性强、可扩展性好、应用领域广的优点。

在多机器人领域,研究的热点主要包括多机编队^[1]、路径规划^[2-4]和编队避障^[5]。近年来,需要研究致力于解决多机器人系统在动态环境中的编队控制和避障问题。例如文献[6]通过 Backstepping 方法构建了一个非线性机器人编队系统,确保系统在面对动态环境时的稳定性和鲁棒性,具有较强的抗干扰能力和良好的跟踪性能。然而,该方法在复杂环境中存在计算量大、参数调节困难等问题。Bono 等^[7]提出了一种基于群体的分布式模型预测控制方案,每个车可以根据局部信息做出决策,避免传统集中式控制方案中可能出现的通信问题,但是其计算复杂度高,尤其是在大规模编队系统中,可能出现数据延迟丢包的可能。Bai 等^[8]提出了一种基于机器学习的多机器人队形控制方法,结合避障功能,在复杂环境中实现多机器人协同工作。该方法利用深度强化学习来优化机器人队形控制策略,同时考虑了动态障碍物的避让问题。通过学习算法,机器人能够自适应调整其位置和速度,保证队形稳定性并有效避免碰撞。在多机器人编队控制研究中,Huang 等^[9]提出了一种基于虚拟参考中心的分布式优化算法,可以通过局部通信实现机器人间的协作,具有较好的分布式特性和鲁棒性。Zhu 等^[10]提出了一种基于航线规划指导的人工势场方法用于船舶避碰,该方法对于复杂动态环境中的高频变化(如风浪、急转弯等)的适应性较差。文献[11]提出了基于虚拟结构和人工势场方法的多集群障碍物避障技术。该方法能够有效应对动态障碍物并提高集群的协作能力。然而,该方法的缺点在于当集群规模较大时,计算量和算法复杂度显著增加,可能导致实时性问题。李正平^[12]提出了一种基于虚拟结构法的多无人机编队控制方法。该方法通过将多无人机系统建模为一个虚拟刚体结构,利用虚拟结构中的位置关系和相对运动约束,设计了一种鲁棒控制器。控制器能够保证在存在外部扰动和系统不确定性的情况下,无人机团队能够稳定地保持编队,并对动态环境中的变化具有良好的适应性。肖献强等^[13]通过对比几种经典的路径跟踪方法,如比例-积分-微分

(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制、滑模控制和纯跟踪算法,研究分析了各自的优缺点,并提出了适用于轮式移动机器人的改进策略。改进后的控制方法在动态环境下具有较高的跟踪精度和稳定性,能够有效应对复杂路径的变化。该方法的缺点在于对于环境中的高频噪声和外部扰动较为敏感,可能导致控制精度下降。在机器人编队避障领域,范玉龙^[14]通过改进传统人工势场法将静态障碍物和动态障碍物分别处理,并在此基础上设计了一种修正的势场算法,以提高路径规划的效率和精度。克服了传统人工势场法中容易陷入局部最小值的问题,提高了小车在复杂环境中的路径规划能力。Zhuang 等^[15]提出了一种基于改进人工势场法的无人水面艇(Unmanned Surface Vehicle, USV)动态路径规划方法,旨在应对复杂环境下的路径规划问题。通过改进势场函数,该方法有效避免了传统人工势场法中存在的局部最小值问题,提升了 USV 在恶劣环境中的路径规划能力^[16]。文献[17]提出了一种新的分布式控制策略,通过虚拟结构法将多机器人系统转化为类似于单一机器人的动态系统,从而简化了控制设计。利用预测控制方法,考虑了系统的动态约束和预测信息,实现了机器人之间的协调与协作。Zhang 等^[18]提出了一种基于自适应神经网络的二阶非线性多智能体系统多组队形跟踪控制策略。能够确保多个智能体在不同组中实现预定队形跟踪,同时处理非线性动力学和外部干扰。提高了鲁棒性和稳定性^[19]。文献[20]结合虚拟结构和路径规划算法,增强了多机器人编队的导航能力,缺点是算法计算所需要的资源较大。

在前人研究的基础上,提出了一种基于两轮差速移动机器人运动学模型^[21]的多机器人编队控制方法,结合纯跟踪法和有向图领航跟随法实现多机器人编队控制。该方法的创新之处在于,通过改进斥力场函数对人工势场的局部最优和目标不可达问题,使得机器人能够在更复杂的动态环境中稳定避障。并将该算法用于机器人编队的局部避障中。最后通过仿真验证了该方法在多机器人编队形成、编队控制以及在路径跟踪中的稳定性。

1 移动机器人的数学模型

随着多机器人系统在复杂环境中的广泛应用,如何实现机器人之间的协同运动与高效避障成为

一个重要的研究方向。人工势场法通过将机器人和障碍物视作产生吸引力和排斥力的物体,来引导机器人走向目标并避免碰撞。该方法简单直观且计算效率较高,因此被广泛应用于多机器人编队的路径规划与避障任务中。

机器人系统采用差分驱动轮式机器人^[22],机器人的质心坐标 x, y , 航向角 θ 。 V_l 和 V_r 表示移动机器人左右轮的线速度, d 为左右轮轴中心之间的距离, ω 为质心的角速度, V 为质心的线速度, 移动机器人差分运动学模型^[23]如图 1 所示。

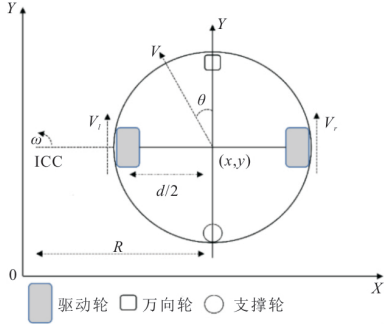


图 1 移动机器人差分运动学模型

假设机器人以 ω 的角速度向左转弯, 则移动机器人相邻两时刻的位姿关系如图 2 所示。

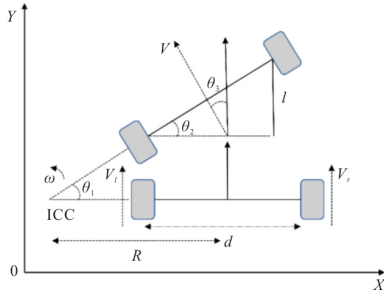


图 2 移动机器人相邻两时刻位姿关系

由图 2 可得

$$V = \frac{V_r + V_l}{2} \quad (1)$$

式中: V_r 与 V_l 分别为机器人右轮和左轮的线速度

当两个相邻的时间差 Δt 很小, θ_2 也很小时, 可得

$$\theta_2 \approx \sin(\theta_2) = \frac{l}{d} = \frac{(V_r - V_l)\Delta t}{d} \quad (2)$$

式中: d 为机器人左右轮轴中心之间的距离; Δt 为极其微小的时间间隔; θ_1 与 θ_2 为机器人在该时间间隔内转过的微小角度(其中 θ_2 为基于微元法的几何近似角); l 为单侧车轮在相应时间内相对于中心点的位移差。

机器人质心的角速度为

$$\omega = \frac{\theta_1}{\Delta t} = \frac{V_r - V_l}{d} \quad (3)$$

移动机器人进行圆弧运动时的转弯半径为

$$R = \frac{V}{\omega} = \frac{d(V_r + V_l)}{2(V_r - V_l)} \quad (4)$$

现设机器人的速度为 $V(t)$, 机器人在时刻的航向角(即车体与轴的夹角)为 $\theta(t)$, 机器人在 $t=0$ 时刻的初始位姿为 $(0, 0, 0)$, 因此可得移动机器人的位姿关系为

$$\begin{cases} x(t) = \int_0^t V(t) \cos[\theta(t)] dt \\ y(t) = \int_0^t V(t) \sin[\theta(t)] dt \\ \theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt \end{cases} \quad (5)$$

式中: $x(t)$ 与 $y(t)$ 为移动机器人在 t 时刻质心所在的世界坐标系位置; $\omega(t)$ 为机器人在 t 时刻的瞬时角速度。

由此可得机器人在 $t + \delta t$ 的位姿为

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ \theta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + V \cos \theta \delta t \\ y + V \sin \theta \delta t \\ \theta + \omega \delta t \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $[x^* \ y^* \ \theta^*]^T$ 为经过控制周期 δt 后机器人的预期目标位姿向量; x, y 与 θ 为机器人当前时刻的全局坐标和航向角; δt 为系统的离散控制步长或采样周期。

将式(1)和式(3)代入式(6)可得

$$\begin{cases} x(t) = \frac{1}{2} \int_0^t [V_r(t) + V_l(t)] \cos[\theta(t)] dt \\ y(t) = \frac{1}{2} \int_0^t [V_r(t) + V_l(t)] \sin[\theta(t)] dt \\ \theta(t) = \frac{1}{d} \int_0^t [V_r(t) - V_l(t)] dt \end{cases} \quad (7)$$

式中: $V_r(t)$ 与 $V_l(t)$ 分别为机器人在 t 时刻右轮和左轮的瞬时线速度。

同理为

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ \theta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + \frac{1}{2} [V_r + V_l] \cos \theta \delta t \\ y + \frac{1}{2} [V_r + V_l] \sin \theta \delta t \\ \theta + \frac{1}{d} [V_r - V_l] \delta t \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过式(8)可知, 通过控制机器人的左右轮的速度 V_l 和 V_r 就可以控制机器人的运动轨迹^[24]。

2 多机器人编队控制

2.1 基于图论的编队控制

引入通信拓扑图来表述机器人编队系统的

动力学问题^[25]。提出了一种结合纯跟踪法和领航跟随法的多机器人编队控制方法。纯跟踪算法是基于机器人运动学约束的横向控制算法,认定机器人在运行的过程中不会出现滑移,并根据选取的预瞄距离来控制机器人的角速度和线速度从而达到路径跟踪的目的。

在编队过程中,通过通信拓扑图来表述机器人编队系统的动力学问题^[26]。假设该机器人编队系统由 n 个差分移动机器人组成,该系统用有向图表示为 $G=(X,E)$, $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为 n 个智能体形成的节点集^[27], E 为边集合,系统采用 5 个机器人进行编队,其通信拓扑结构如图 3 所示。

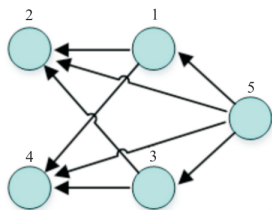


图 3 通信拓扑结构

图 3 中箭头方向表示信息的传递方向,在基于上述图通信拓扑结构的情况下,采用一致性算法来实现机器人系统的编队控制^[28]。设编队系统中机器人的一阶连续动力学模型为

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t), i = \{1, 2, \dots, N\} \quad (9)$$

$\dot{\mathbf{x}}_i(t)$ 、 $\mathbf{u}_i(t)$ 分别表示节点机器人 i 的状态信息和控制输入,对于一阶多智能体来说,其一致性控制算法为

$$\mathbf{u}_i(t) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)) \quad (10)$$

式中: a_{ij} 为邻接矩阵元素; $\mathcal{N}_i$ 为成员 i 的邻居集合。通过式(9)和式(10)可以看出如果在 t 时刻系统中所有机器人的状态信息相同,则说明在 t 时刻下是一致的。将式(9)代入式(10)同时引入全局状态向量 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$ 可得到全局动态关系为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = -\mathbf{D}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{L}\mathbf{x}(t) \quad (11)$$

由于拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L}$ 的特征值均为非负,因此 $-\mathbf{L}$ 特征值均位于复左半平面,系统能够收敛一致^[29],最终状态值为

$$\mathbf{c} = \sum_{i=1}^N p_i \mathbf{x}_i(0) \quad (12)$$

在离散时间下

$$\mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{u}_i(k) \quad (13)$$

因此,在离散时间下通过一致性控制算法设计编队中跟随者的控制输入为

$$\mathbf{u}_i(k) = \epsilon \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{x}_i(k) - \mathbf{r}_{ij}(k)) \quad (14)$$

式中: $\epsilon > 0$; $\mathbf{r}_{ij}(k)$ 表示在 k 时刻机器人 i 和 j 之间的相对位置误差。领航者的控制算法为

$$\mathbf{u}_n(k) = \mathbf{m} + \kappa \mathbf{D}(k) + \sum_{j \in \mathcal{N}_n} a_{nj} \mathbf{r}_m(k) \quad (15)$$

式中: $\mathbf{m}$ 和 κ 为常数; $\mathbf{r}_m(k)$ 表示在 k 时刻领航者机器人与其他跟随机器人之间的相对位置误差; $\mathbf{D}(k)$ 表示 k 时刻领航者到下一个预瞄点做需要的输入信息。从式(15)中可以看出,领航者的状态会同时受到跟随机器人和预瞄点的影响^[30]。通过李雅普诺夫函数对上述编队算法进行稳定性分析,该系统指数型收敛于原点,说明在该通信拓扑的结构下系统是稳定的^[31]。

2.2 局部环境下的编队避障

上述通过通信拓扑图完成了机器人的编队控制问题,本节主要解决机器人的局部避障问题,针对传统人工势场法的缺陷^[32],通过改进障碍物的斥力函数以解决移动机器人在行驶过程中出现的局部最优和目标不可达的问题^[33],改进后的斥力函数为

$$\begin{cases} F_1 = \epsilon_2 \left(\frac{1}{\varphi(q, q_0)} - \frac{1}{\phi_0} \right) \frac{\varphi_g^n}{\varphi^2(q, q_0)} \\ F_2 = \frac{n}{2} \epsilon_2 \left(\frac{1}{\varphi(q, q_0)} - \frac{1}{\phi_0} \right)^2 \phi_g^{n-1} \end{cases} \quad (16)$$

式中: F_1 是障碍物和机器人之间的斥力; F_2 是目标点和机器人之间的斥力^[34],即障碍物对机器人不仅会产生斥力,还会给机器人一个指向目标点的斥力。即以这个新产生的作用力,来解决原本人工势场法所具有的缺陷^[35]。

将改进的人工势场法加入到基于图理论基础的多机器人编队系统的过程如下,首先假设机器人自身携带有能探测周围环境信息的传感器并能检测出障碍物^[36],则在 k 时刻机器人 x_j 的斥力函数 $\mathbf{R}_j(k)$ 可表示为

$$\mathbf{R}_j(k) = \sum_{l=1}^M a_l (\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{x}_{ol}) \quad (17)$$

式中: M 为障碍物的个数; a_l 为障碍物的负斥力梯度函数; x_o 是障碍物位置坐标; $(\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{x}_{ol})$ 为机器人与障碍物的横坐标或者纵坐标差值。此时避障响应函数 $\mathbf{R}_j(k)$ 会对机器人的速度产生一定的影响。在加入了改进的人工势场后,编队中对领航者的控制模型为

$$\mathbf{U}_N(k) = \mathbf{m} + \kappa \mathbf{D}(k) + \sum_{j \in \mathcal{N}_N} a_{Nj} \mathbf{r}_{Nj}(k) + \beta \mathbf{R}_N(k) \quad (18)$$

式中: β 为一个常系数。同理,编队中对跟随者的控制模型为

$$U_i(k) = \varepsilon \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{x}_i(k) - \mathbf{r}_{ij}(k)) + \beta \mathbf{R}_i(k) \quad (19)$$

加入了人工势场算法后的机器人编队可以在最大程度上保持这原本的编队队形的同时有效躲避途中出现的障碍物,机器人受到的斥力会随着与障碍物距离的变近而增大,以此来保证多机器人编队的安全性。改进算法的伪代码如下。

算法:改进后的人工势场法

输入:机器人数量 N , 初始位置 (x_i, y_i) ; 目标位置 $(x_{\text{target}}, y_{\text{target}})$; 障碍物位置 $(x_{\text{obs}}, y_{\text{obs}})$

输出: return 所有机器人最终到达目标位置的轨迹

1: 图拓扑 G = 创建图拓扑(机器人数量 N)

2: for $i=1$ to N do

3: 初始化机器人 i 的初始目标位置和初始速度

4: end for

5: while (所有机器人都未到达目标) do

6: for $i=1$ to N do

7: 计算引力 $\mathbf{F}_{\text{att}} = f_{\text{att}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{\text{target}, i})$

8: $\mathbf{F}_{\text{排斥}} = 0$

9: for $j = 1$ to N , 且 $j \neq i$ do

10: 累加邻斥力 $\mathbf{F}_{\text{rep}} = \mathbf{F}_{\text{rep}} + f_{\text{rep}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$

11: end for

12: 初始化障碍排斥力: $\mathbf{F}_{\text{obs}} = 0$

13: for $k=1$ to M do(M 为障碍物数量)

14: 累加障碍斥力: $\mathbf{F}_{\text{obs}} = \mathbf{F}_{\text{obs}} + f_{\text{obs}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{\text{ok}})$

15: end for

16: 计算合成总力: $\mathbf{F}_{\text{total}} = \mathbf{F}_{\text{att}} + \mathbf{F}_{\text{rep}} + \mathbf{F}_{\text{obs}}$

17: 更新机器人速度: $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i + \mathbf{F}_{\text{total}} \Delta t$

18: 更新机器人位置: $\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i + \mathbf{v}_i \Delta t$

19: if $\mathbf{x}_i$ 不满足队形约束 then

20: 调用编队函数

21: end if

22: end for

23: for $i=1$ to N do

24: 根据图拓扑 G 规划的路径调整行驶方向

25: end for

26: end while

3 多机器人编队避障仿真

3.1 基于图论的编队仿真

为验证上述基于图通信拓扑的编队算法的可行性,首先假设领航者在一个空环境下进行编队控制,该编队系统由 1 个领航机器人和 4 个跟随机器

人组成。假设机器人编队的初始位置如表 1 所示。

表 1 编队初始位置

坐标	机器人 1	机器人 2	机器人 3	机器人 4	领航者
x 轴	-1	-3	-2	-3	0
y 轴	-1.5	-1.5	-3	-4	0

机器人编队的初始位置在 Matlab 上仿真如图 4 所示,其中黄色代表机器人 1 的位置,蓝色代表机器人 2 的位置,绿色代表机器人 3 的位置,淡蓝色代表机器人 4 的位置,红色代表领航机器人 5 的位置。

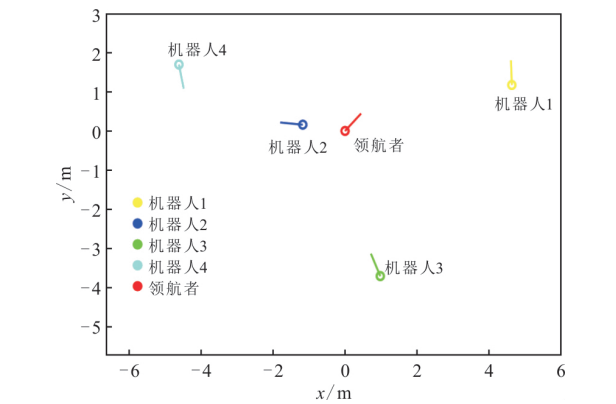


图 4 编队初始位置

机器人编队的相对位置误差设置如表 2 所示。

表 2 编队相对位置误差

坐标	机器人 1	机器人 2	机器人 3	机器人 4	领航者
x 轴	-1.5	-3	0	0	0
y 轴	0	0	-1.5	-3	0

设领航机器人 5 的目标位置(20,20),机器人 5 会在启动时向着目标点运动,跟随机器人根据一阶编队的协同原理,通过领航和跟随之间的误差信息所计算出的速度信息运动。

图 5 为机器人编队从开始位置到队形初步形成的过程。由图 5 可知 5 个机器人从起点开始,在机器人编队的通信拓扑图、终点以及相对距离误差等参数的作用下产生初始速度,并且向着想要形成的编队位置的方向运动。

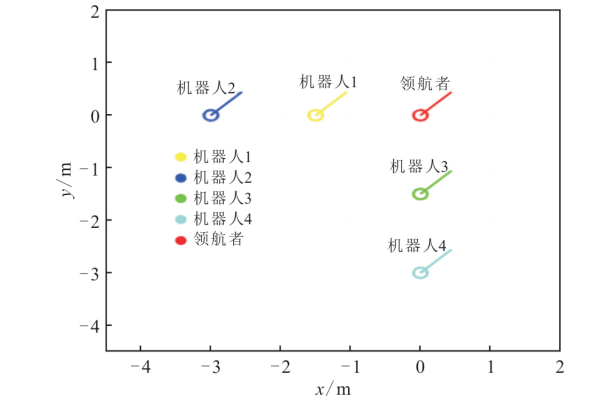


图 5 编队形成过程

3.2 纯跟踪算法下的路径追踪

上述工作完成了基于图论的多机器人编队稳定性仿真。在此基础上,将纯跟踪(Pure Pursuit)算法与机器人编队控制算法相结合。领航机器人5将采用纯跟踪算法,以 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的线速度对给定路径进行跟踪;其他 4 个跟随机器人将在编队控制算法的指导下,协同完成路径跟踪任务。5 个机器人的运行轨迹如图 6 所示。

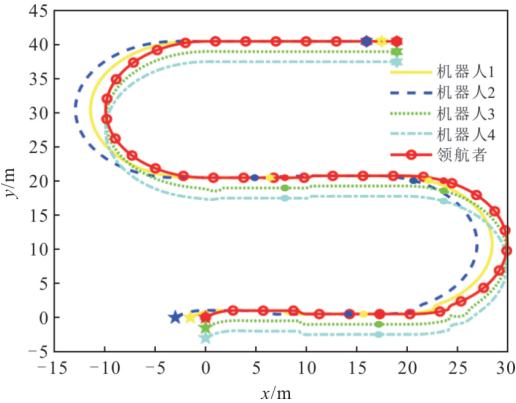


图 6 路径追踪编队轨迹

图 6 所示为结合图结构的编队控制算法与纯跟踪算法相结合的机器人编队轨迹图,从图中可以看出,尽管纯跟踪算法对编队队形产生了一定影响,但机器人仍基本保持了预定的队形,并成功完成了路径跟踪任务。

3.3 基于图论的编队避障

上述工作完成了基于图论的多机器人编队算法的仿真验证,并结合纯跟踪算法对编队的稳定性进行了测试。在此基础上,通过改进传统的人工势场法,完成了编队机器人避障功能的测试。改进后的人工势场函数分别作用于领航机器人和跟随机器人。目标位置对领航机器人施加引力,驱动机器人编队朝目标移动,障碍物为所有机器人施加斥力,以避免与障碍物发生碰撞。基于图理论和改进人工势场法的多机器人编队避障仿真轨迹如图 7 所示。

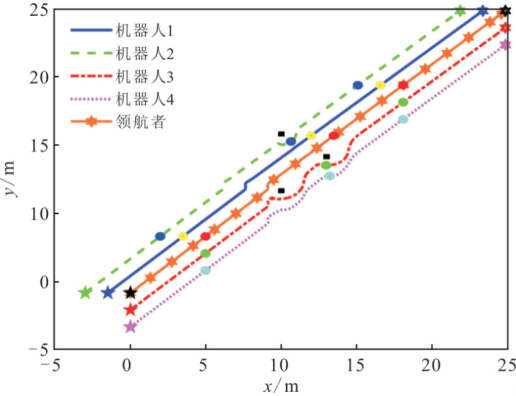


图 7 编队避障轨迹

该机器人编队系统中每个跟随机器人所产生的误差曲线如图 8 所示。

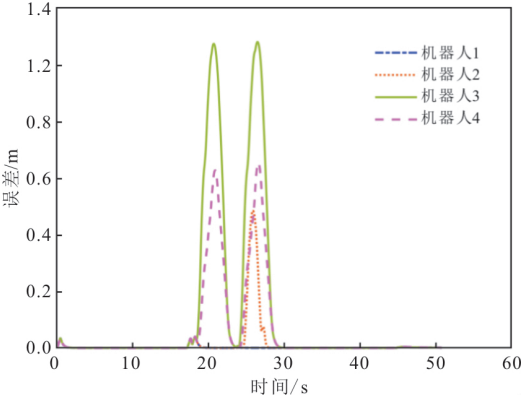


图 8 编队误差曲线

从图 7 中可以清晰看到机器人编队中所有机器人的避障行为,而图 8 则进一步验证了编队在避障过程中会出现与预定队形的轻微偏差,但在避障完成后,编队会迅速恢复到原有队形。表明,将图论基础的编队算法与人工势场法结合具有良好的可行性和稳定性。

通过上述实验可以看出,改进后的人工势场法在机器人编队中对路径附近零散障碍物具有良好且稳定的避障效果。为了验证编队在面对连续障碍物时的避障能力,我们在路径中引入了连续障碍物,并结合路径跟踪算法进行测试。加入纯跟踪算法后的多机器人编队避障轨迹如图 9 所示。

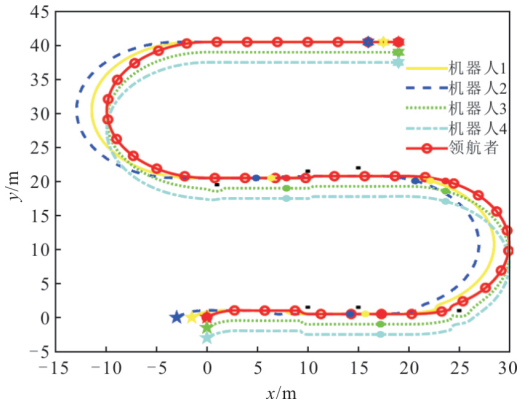


图 9 改进人工势场法的路径跟踪轨迹

从图 9 可以看出,加入改进的人工势场法后,机器人编队基本沿着原规划路线运动。遇到连续障碍物时,编队的行驶轨迹会出现一定的偏移,但整个编队在运行过程中表现出良好的稳定性和避障能力,验证了该算法的可行性。结合图结构的编队控制算法与纯跟踪算法相结合,在实际应用中能在保证编队形态不变的基础上,提高路径跟踪的精度,并增强系统对外部扰动的鲁棒性。

3.4 基于领航跟随法的多机器人编队

与其他编队控制方法相比,领航跟随法的控制策略更为简单,更适合在实体机器人上进行部署。该策略的核心在于,选定编队中的某一个机器人作为领航者,而其它机器人则作为跟随者。在编队控制器的作用下,领航者和跟随者按照设定的距离或者角度要求,协同完成编队动作。领航者向目标点运动的过程中,将自身的位置和速度信息发送给其余跟随机器人,跟随机器人获取到领航者的位姿信息后,按照设定的距离和角度进行编队运行。使用 Matlab 完成了领航跟随法编队控制的运动仿真,机器人运行轨迹如图 10 所示。机器人的运行误差如图 11 所示。

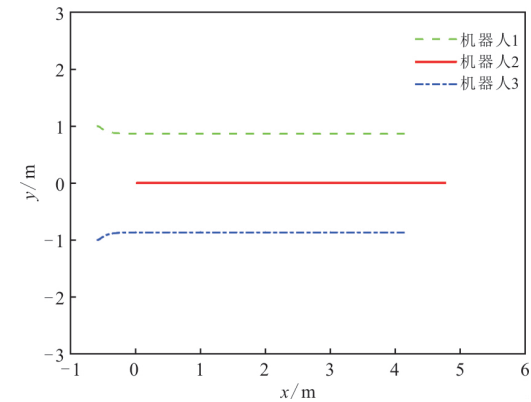


图 10 领航跟随法运行轨迹

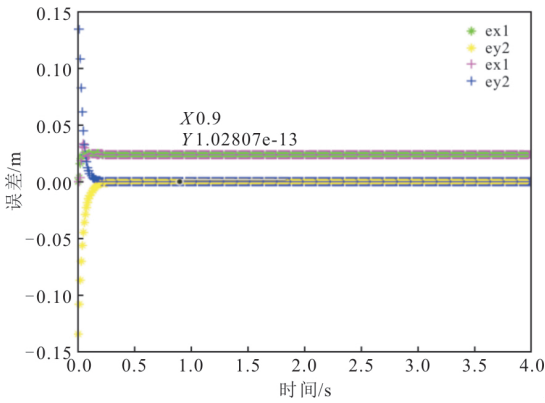


图 11 领航跟随法运行误差

采用领航跟随法实现了多机器人的编队运行和误差分析,其中设置了一个领航机器人和两个跟随机器人,仿真结果表明,在编队控制器的作用下,机器人能够成功保持队形,避免碰撞。

3.5 Gazebo 仿真实验

为了对改进和优化的算法进行验证,使用 Gazebo 完成仿真环境的搭建,通过编写 Xacro 文件来生成机器人的三维模型,并将其导入到 Gazebo 中进行显示。设计的机器人小车 Gazebo 模型如图 12 所示。

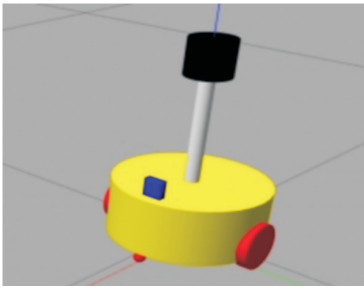
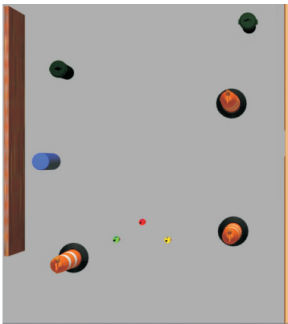
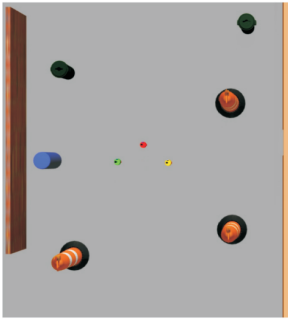


图 12 小车的 Gazebo 模型

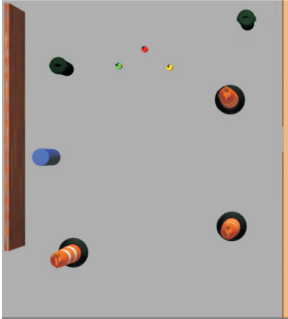
1)使用 Gazebo 完成 3 台机器人的三角形编队。为验证设计算法的有效性,在 Gazebo 中构建仿真环境,对上文提到的编队控制算法进行仿真验证。编队机器人中的领航者机器人 1 以 $v=0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度匀速运动,且在运动的过程中,角速度保持不变。跟随者机器人 2 和机器人 3 在编队控制器的作用下,始终与领航者机器人 1 保持稳定的距离和角度编队运行,设定跟随机器人的期望距离为 1.5 m,期望角度是 120° 。机器人编队运行过程如图 13 所示。



(a) 机器人编队位置1



(b) 机器人编队位置2



(c) 机器人编队位置3

图 13 机器人编队运行过程

使用 rosbag 工具对机器人的运动过程进行记录,得到机器人的运动数据如图 14 所示。

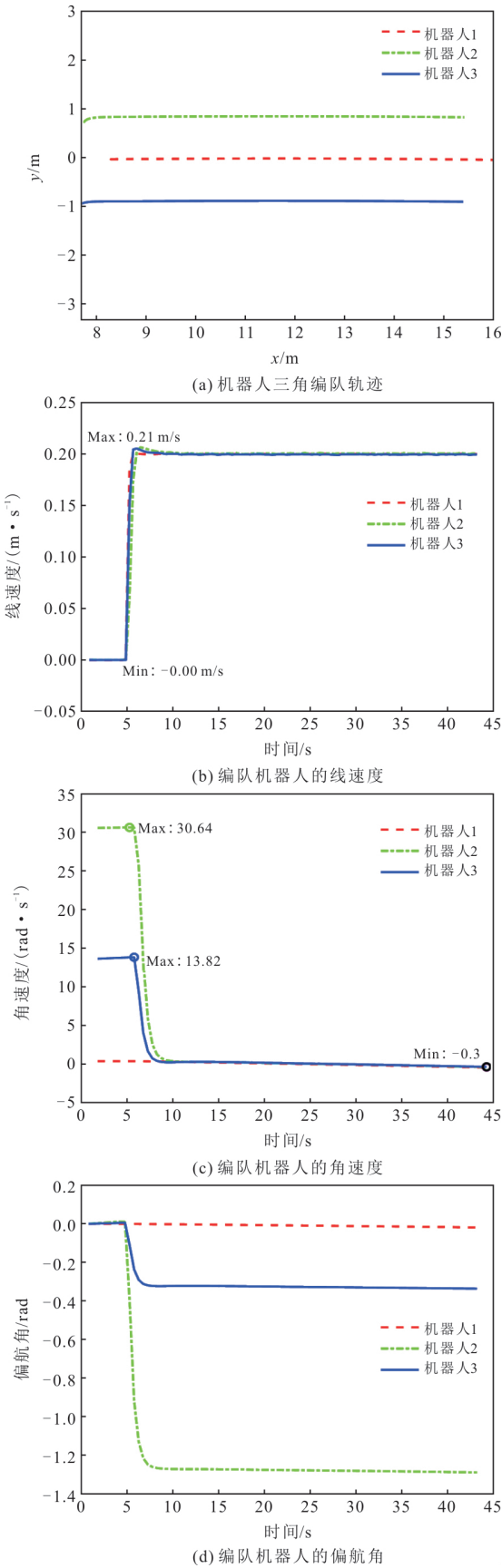


图 14 机器人的运行数据

2)使用 Gazebo 完成 3 台机器人的一字形编队机器人编队运行过程如图 15 所示。

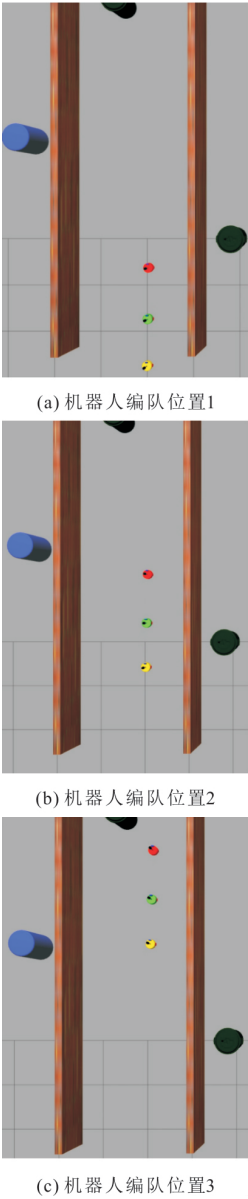
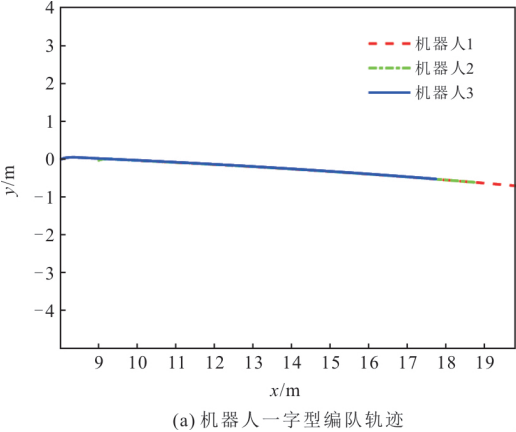


图 15 机器人编队运行过程

使用 rosbag 工具对机器人的运动过程进行记录,得到机器人的运动数据如图 16 所示。



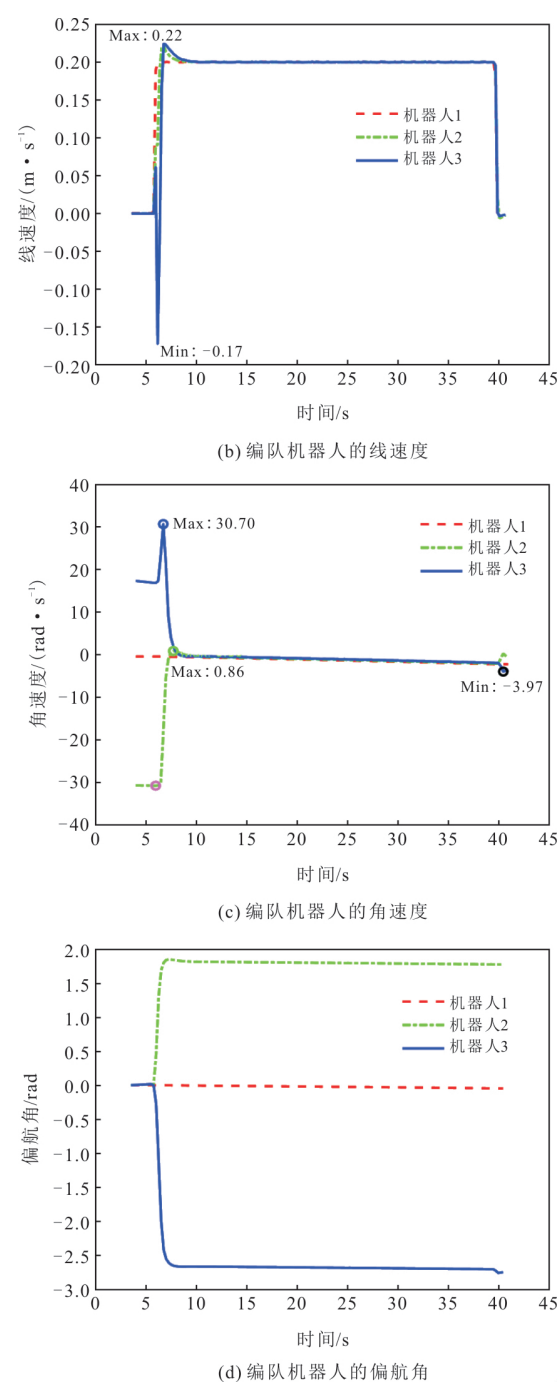


图 16 机器人的运行数据

实验结果表明,在控制器的作用下,机器人编队系统可以顺利完成三角形和一字形编队的运行。从图中的速度变化曲线可观察到,3 台机器人的线速度在约 3~5 s 左右达到稳定状态,小车的角速度和偏航角变化趋势与理论分析结果一致。系统在初始阶段的速度变化较大,经过一段时间的调整后,控制器能够有效地将机器人的速度稳定在一个理想值。此外,从角速度和偏航角的变化趋势来看,仿真结果与理论分析相符,证明了控制器在调整机器人姿态和方向上的有效性。

3)使用 Gazebo 完成 3 台机器人的编队避障机

器人编队运行过程如图 17 所示。

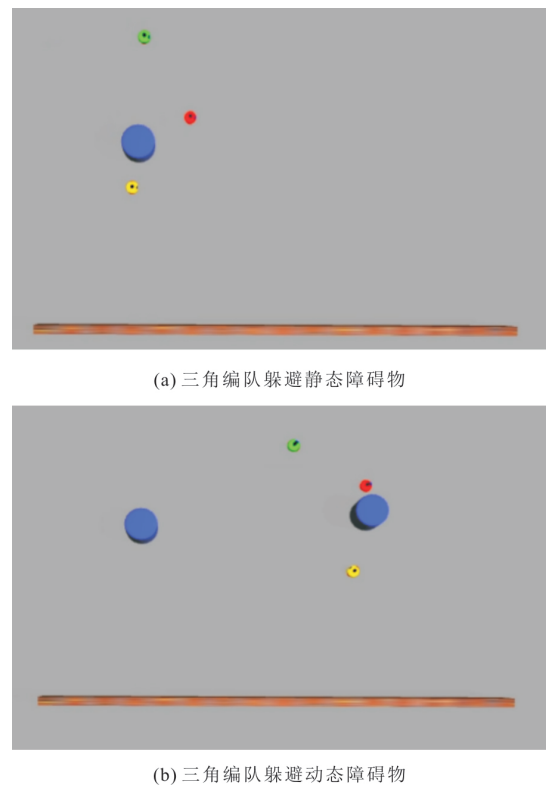
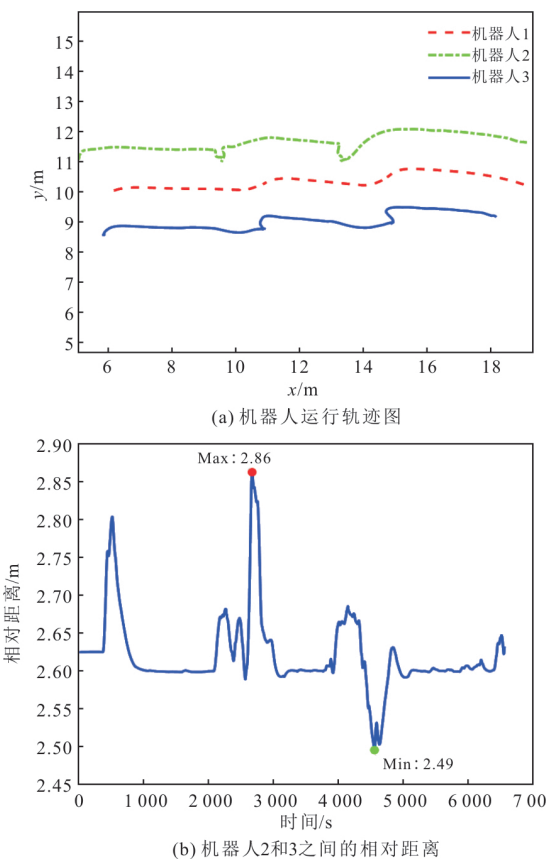


图 17 机器人编队运行过程

使用 rosbag 工具对机器人的运动过程进行记录,得到机器人的运动数据如图 18 所示。



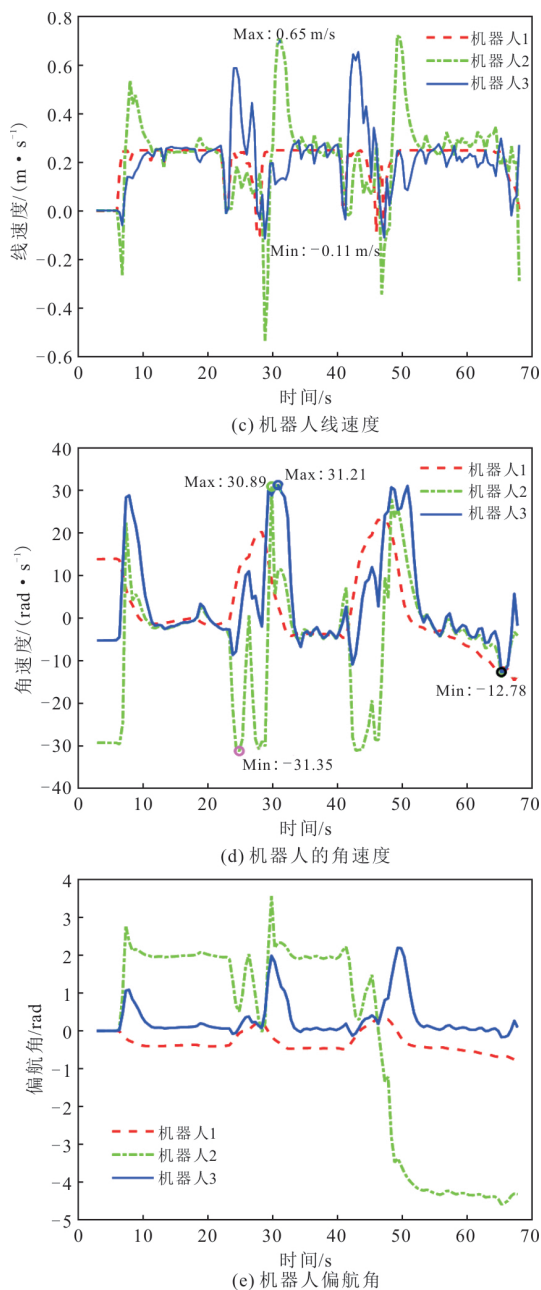


图 18 机器人的运行数据

通过对仿真结果进行分析,领航者机器人在进行路径调整时,所产生的误差较小,并且能够迅速恢复,保持了较高的轨迹跟踪精度。机器人编队系统具有较强的适应性和控制能力,能够在动态环境中快速调整其运动轨迹,确保编队的稳定性和协调性。

4 结语

为解决多机器人的编队避障问题,以差分移动机器人运动学模型为基础,提出了一种基于图拓扑和改进人工势场法的编队避障控制算法,并结合纯

跟踪算法完成了多机器人的编队轨迹追踪实验。

通过理论分析建立了两轮差分驱动机器人的运动学模型,并基于图拓扑结构设计了一阶编队控制算法,以实现机器人间的协同运动。图拓扑结构为机器人之间的相对位置提供了清晰的描述,从而保证了机器人在执行编队任务时能够维持稳定的相对位置关系。结合纯跟踪算法,进一步验证了该编队控制方法在实际应用中的稳定性与有效性。为了有效解决多机器人编队中的避障问题,对传统人工势场法进行了改进,重点优化了障碍物的斥力函数。传统的人工势场法存在着容易陷入局部最优解和目标不可达的问题,而改进后的斥力函数通过引入全局信息以及局部规划机制,有效避免了这些问题,提高了避障过程中的灵活性和有效性。同时将所设计改进的编队控制算法与传统的领航跟随法进行对比,通过构建图拓扑优化机器人间的通信与协作,使得在动态环境中机器人能够更高效地避开障碍物,同时保持稳定的队形,而改进的人工势场法能够实时调整机器人的运动轨迹,避免局部最小值问题,提高避障效果。

实验结果表明,改进后的人工势场法在复杂环境下具有优异的避障效果,结合图拓扑编队控制的多机器人系统能够在复杂环境中保持较好的稳定性和避障能力,证明了该算法在多机器人编队避障中的可行性和实用性。

参 考 文 献

- [1] 朱玺. 考虑行进避障的巡检机器人编队队形自动控制方法[J]. 电子设计工程, 2023, 31(24): 118-121.
Zhu Xi. Automatic control method of patrol robot formation considering moving obstacle avoidance[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(24): 118-121.
- [2] 贺兴时, 陈慧园. 基于避障寻优改进蚁群算法的机器人路径规划[J]. 西安工程大学学报, 2024, 38(3): 100-108.
He Xingshi, Chen Huiyuan. Robot path planning based on obstacle avoidance optimization and improved ant colony algorithm[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2024, 38(3): 100-108.
- [3] 何舟, 刘思羽. 带时间窗的多机器人系统复杂任务路径规划[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2024, 44(2): 83-90.
He Zhou, Liu Siyu. Path planning for multi-robot systems with complex tasks and time windows[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2024, 44(2): 83-90.

- [4] 薛翔,朱其新,朱永红.改进蚁群算法的机器人路径规划[J].西安工程大学学报,2024,38(6):59-66.
Xue Xiang, Zhu Qixin, Zhu Yonghong. Robot path planning based on improved ant colony optimization [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2024, 38(6): 59-66.
- [5] 黄宸希,韩韬,吴雪琼,等.基于改进A*算法的机器人路径规划与避障技术[J].电子设计工程,2024,32(1):24-28.
Huang Chenxi, Han Tao, Wu Xueqiong, et al. Robot path planning and obstacle avoidance technology based on improved A* algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(1): 24-28.
- [6] 于美妍,杨洪勇,孙玉娇.基于Backstepping的三轮机器人编队控制[J].复杂系统与复杂性科学,2021,18(3):28-34.
Yu Meiyen, Yang Hongyong, Sun Yujiao. Formation control of three wheeled robots based on backstepping [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2021, 18(3): 28-34.
- [7] Bono A, Fedele G, Franzè G. A swarm-based distributed model predictive control scheme for autonomous vehicle formations in uncertain environments[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(9): 8876-8886.
- [8] Bai C C, Yan P, Pan W, et al. Learning-based multi-robot formation control with obstacle avoidance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 11811-11822.
- [9] Huang J Y, Zhou S Y, Tu H, et al. Distributed optimization algorithm for multi-robot formation with virtual reference center[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(4): 732-734.
- [10] Zhu Z X, Wu P Y, Liu Y L, et al. A novel route-planned artificial potential field method for ship collision avoidance: Modeling, integration and test[J]. Ocean Engineering, 2023, 288: 116088.
- [11] Zhang K X, Li Z J, Wang Y Q, et al. Privacy-preserving dynamic average consensus via state decomposition: Case study on multi-robot formation control[J]. Automatica, 2022, 139: 110182.
- [12] 李正平,鲜斌.基于虚拟结构法的分布式多无人机鲁棒编队控制[J].控制理论与应用,2020,37(11):2423-2431.
Li Zhengping, Xian Bin. Robust distributed formation control of multiple unmanned aerial vehicles based on virtual structure[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(11): 2423-2431.
- [13] 肖献强,程亚兵,王家恩,等.轮式移动机器人路径跟踪控制方法研究[J].机械设计与制造,2021(1):256-258.
Xiao Xianqiang, Cheng Yabing, Wang Jia'en, et al. Research on path tracking control method for wheeled-mobile robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(1): 256-258.
- [14] 范玉龙,黄波,周仟,等.基于改进人工势场法的小车避障路径规划研究[J].软件导刊,2021,20(7):38-42.
Fan Yulong, Huang Bo, Zhou Qian, et al. Research on vehicle obstacle avoidance path planning based on improved artificial potential field method[J]. Software Guide, 2021, 20(7): 38-42.
- [15] Zhuang Y F, Dong H R, Huang H B, et al. Dynamic path planning of USV based on improved artificial potential field method in harsh environment[C]//2022 China Automation Congress. Xiamen: IEEE, 2022: 5391-5396.
- [16] Lin X, Wang Z Q, Chen X Y. Path planning with improved artificial potential field method based on decision tree[C]//2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg: IEEE, 2020: 1-5.
- [17] 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(5):1273-1280.
Liu Andong, Qin Dongdong. Distributed predictive control of multiple mobile robots based on virtual structure method[J]. Control and Decision, 2021, 36(5): 1273-1280.
- [18] Zhang S W, Li T, Cheng X M, et al. Multi-group formation tracking control for second-order nonlinear multi-agent systems using adaptive neural networks [J]. IEEE Access, 2021, 9: 168207-168215.
- [19] Mwaffo V, DeLellis P, Humbert J S. Formation control of stochastic multivehicle systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 29(6): 2505-2516.
- [20] Rahaman M F, Li X Y, Zakaria K M, et al. Enhancing multi-robot formation control and navigation using virtual structures and improved path planning algorithms[C]//2024 4th International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology. FEZ:IEEE, 2024: 1-8.
- [21] Wang X Y, Liu W M, Wu Q W, et al. A modular optimal formation control scheme of multiagent systems with application to multiple mobile robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9331-9341.

[22] Moritz J, Musa M, Wejinya U. Design and modeling of a two-wheeled differential drive robot[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2024, 22(7): 2273-2282.

[23] Hassan I A, Abed I A, Al-Hussaibi W A. Path planning and trajectory tracking control for two-wheel mobile robot[J]. Journal of Robotics and Control (JRC), 2023, 5(1): 1-15.

[24] Yang S T, Pang H, Liu L, et al. A RISE-based asymptotic prescribed performance trajectory tracking control of two-wheeled self-balancing mobile robot[J]. Nonlinear Dynamics, 2024, 112(17): 15327-15348.

[25] Pan Z H, Zhang C X, Xia Y Q, et al. An improved artificial potential field method for path planning and formation control of the multi-UAV systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(3): 1129-1133.

[26] Sang H Q, You Y S, Sun X J, et al. The hybrid path planning algorithm based on improved A* and artificial potential field for unmanned surface vehicle formations [J]. Ocean Engineering, 2021, 223: 108709.

[27] Li L H, Gan J, Qu X, et al. A novel graph and safety potential field theory-based vehicle platoon formation and optimization method[J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 958.

[28] Ebel H, Eberhard P. A comparative look at two formation control approaches based on optimization and algebraic graph theory[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 136: 103686.

[29] Zhang T R, Xu J N, Wu B K. Hybrid path planning model for multiple robots considering obstacle avoidance[J]. IEEE Access, 2022, 10: 71914-71935.

[30] Cao J J, Wang Y J, Liu Y, et al. Multi-robot learning dynamic obstacle avoidance in formation with information-directed exploration[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2022, 6(6): 1357-1367.

[31] Qi J T, Guo J J, Wang M M, et al. Formation tracking and obstacle avoidance for multiple quadrotors with static and dynamic obstacles[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 1713-1720.

[32] Zhou M, Wang Z H, Wang J, et al. A hybrid path planning and formation control strategy of multi-robots in a dynamic environment[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2022, 26(3): 342-354.

[33] Yan Y Z, Li X X, Qiu X Y, et al. Relative distributed formation and obstacle avoidance with multi-agent reinforcement learning[C]//2022 International Conference

on Robotics and Automation. Philadelphia: IEEE, 2022: 1661-1667.

[34] Hu Y F, Fu J J, Wen G H. Decentralized robust collision-avoidance for cooperative multirobot systems: A Gaussian process-based control barrier function approach[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2023, 10(2): 706-717.

[35] Jin X, Dai S L, Liang J J, et al. Multirobot system formation control with multiple performance and feasibility constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(4): 1766-1773.

[36] 鲍久圣, 张牧野, 葛世荣, 等. 基于改进 A* 和人工势场算法的无轨胶轮车井下无人驾驶路径规划[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1347-1360.

Bao Jiusheng, Zhang Muye, Ge Shirong, et al. Underground driverless path planning of trackless rubber tyred vehicle based on improved A* and artificial potential field algorithm[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1347-1360.

[作者简介]



屈军锁(1968—),男,陕西澄城人,西安邮电大学教授,主要研究方向为工业互联网、人工智能。E-mail: qujunsuo@xupt.edu.cn



梁柯(1997—),男,陕西咸阳人,西安邮电大学硕士研究生,主要研究方向为机器人工程。E-mail: 1932619970@qq.com



刘威(1999—),男,山东聊城人,西安邮电大学硕士研究生,主要研究方向为机器人工程。E-mail: 2799177701@qq.com



蔡星(1996—),男,河南信阳人,西安邮电大学硕士研究生,主要研究方向为通信工程。E-mail: 1394101932@qq.com