

6-20-2023

Multi-robot Formation Control Based on Improved Virtual Spring Model

Yimei Chen

*College of Electrical Engineering and Automation, Tiangong University, Tianjin 300387, China,
chenplum0301@163.com*

Xiaofan Shi

*College of Electrical Engineering and Automation, Tiangong University, Tianjin 300387, China,
sxfholly@163.com*

Baoquan Li

College of Electrical Engineering and Automation, Tiangong University, Tianjin 300387, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi-robot Formation Control Based on Improved Virtual Spring Model

Abstract

Aiming at multi-robot system being difficult to avoid obstacles and maintain formation in unknown environment, a cooperative formation obstacle avoidance control algorithm based on the improved virtual spring model is proposed. *The virtual spring model is introduced on the basis of leader-follower formation approach, which solves the problems of easy touch and out of formation. The attractive elastic force formula between the robot and the target point is established, and the virtual spring model of the obstacle with adjustable damping is designed to complete the obstacle avoidance behavior of robot. Aiming at some complex concave obstacles, the concept of additional rotational force field is introduced to reduce the blindness of decision-making, and solve the problems of unreachable target points and local minima in formation process.* The simulation results and physical experiments verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords

multi-robot, formation control, collision avoidance, virtual spring, additional rotational force field

Recommended Citation

Yimei Chen, Xiaofan Shi, Baoquan Li. Multi-robot Formation Control Based on Improved Virtual Spring Model[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1235-1244.

基于改进虚拟弹簧模型的多机器人编队控制

陈奕梅, 石小凡*, 李宝全

(天津工业大学 控制科学与工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对多机器人系统在未知环境中难以有效避障和保持队形的问题, 在改进虚拟弹簧模型的基础上, 提出了一种协同编队避障控制算法。在结合领航者-跟随者方法的基础上引入了虚拟弹簧模型调节, 解决了编队中易碰、脱离队形的问题; 建立机器人与目标点的牵引力公式, 设计可调节阻尼的障碍物虚拟弹簧模型, 完成机器人的避障行为; 对一些复杂的凹形障碍物, 通过引入附加旋转力场的概念, 降低了决策的盲目性, 解决了编队过程中产生的目标点不可达和局部最优问题。通过仿真与实物实验验证了所提方法的有效性。

关键词: 移动机器人; 编队控制; 避障; 虚拟弹簧; 附加旋转力场

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2023)06-1235-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0197

引用格式: 陈奕梅, 石小凡, 李宝全. 基于改进虚拟弹簧模型的多机器人编队控制[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(6): 1235-1244.

Reference format: Chen Yimei, Shi Xiaofan, Li Baoquan. Multi-robot Formation Control Based on Improved Virtual Spring Model[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1235-1244.

Multi-robot Formation Control Based on Improved Virtual Spring Model

Chen Yimei, Shi Xiaofan*, Li Baoquan

(College of Electrical Engineering and Automation, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Aiming at multi-robot system being difficult to avoid obstacles and maintain formation in unknown environment, a cooperative formation obstacle avoidance control algorithm based on the improved virtual spring model is proposed. The virtual spring model is introduced on the basis of leader-follower formation approach, which solves the problems of easy touch and out of formation. The attractive elastic force formula between the robot and the target point is established, and the virtual spring model of the obstacle with adjustable damping is designed to complete the obstacle avoidance behavior of robot. Aiming at some complex concave obstacles, the concept of additional rotational force field is introduced to reduce the blindness of decision-making, and solve the problems of unreachable target points and local minima in formation process. The simulation results and physical experiments verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: multi-robot; formation control; collision avoidance; virtual spring; additional rotational force field

0 引言

以人工智能为基础的多机器人编队系统因其

在军事、民用等领域的广泛应用, 已成为国内外研究的热点^[1-3]。随着科技的日益进步, 对多机器

收稿日期: 2022-03-10 修回日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61973234)

第一作者: 陈奕梅(1972-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为机器人控制技术。E-mail: chenplum0301@163.com

通讯作者: 石小凡(1998-), 女, 硕士, 研究方向为机器人控制技术。E-mail: sxholly@163.com

人编队避障系统提出了更高的要求, 如何使机器人在复杂环境下避免机间自撞的基础上避开未知的静态与动态障碍物^[4], 以及避障后队形保持稳定且达到一致性的效果已然成为研究的热点。因此, 设计一种有效且合理的多机器人编队避障算法对多机器人协同控制技术的实际应用有重要意义。

目前, 编队控制方法大致分为以下几种: 基于行为法、领航-跟随法、虚拟结构法、模型预测控制方法、图论法、人工势场法^[5]和动态窗口法等。研究最为广泛的是根据以上方法的优缺点将其中2种或3种编队方法相结合实现队形控制^[6]。Dong等^[7]将虚拟结构法、人工势场法和领航-跟随法相结合, 设计控制器使每一个机器人定向地追踪一个虚拟的领航者, 并使每个机器人局限在一定的运动范围内保持队形的稳定, 但它局限于简单的工作环境, 对环境信息的依赖太大, 遇到障碍物无法保持稳定。由于缺乏全局信息, 现有局部路径规划方法都存在自身局限性, 例如, 人工势场法被认为是局部路径规划中比较有效的一种^[8], 假设机器人在一种虚拟力场下运动, 其存在的问题主要表现为局部极小和目标点不可达, 常见的解决方法有设置虚拟目标点^[9]、沿墙行走^[10]、随机搜索等。为了使机器人编队队形得到保持, Shucker等^[11]使用虚拟弹簧网格来提供既灵活又容错的全分布式控制, 并设计每个机器人的虚拟弹簧控制律, 评估了几种基于虚拟弹簧网格的控制算法, 并给出仿真结果, 证明了虚拟弹簧网络算法的可行性。高申勇等^[12]提出了一种基于虚拟弹簧模型的局部路径规划算法, 创建弹簧力学模型使机器人完成避障, 解决路径规划中出现的局部极小问题, 该方法仅在单个机器人中使用, 暂未考虑多机器人编队运动的情况。Wiech等^[13]提出了一个通过虚拟弹簧阻尼网络进行非完整机器群体自组织的方案, 通过群体机器人的自组织模仿了蚂蚁等的一些自然行为。结果表明, 引入机器人间作用力的控制方法可以形成相对稳定的有序群结构, 但该方法未涉及避障问题。Pan等^[14]提出了一种高效的多机器人路径规划和编队控制的虚拟弹簧算法, 并建立了

描述网络逻辑和物理拓扑的交互动态模型, 引导机器人规划最优路径并引导跟随机器人到达目标, 但该方法所涉及的控制律是基于质点作用而未考虑到机器人模型, 算法暂未应用到真实机器人当中, 会使机器人在复杂环境中存在碰撞隐患。

为解决上述算法存在的问题, 本文在改进虚拟弹簧模型的基础上提出了一种既能安全避障, 又能实现队形稳定保持的多机器人编队控制算法(improved virtual spring model, IVSM)。

1 改进虚拟弹簧模型

虚拟弹簧模型对跟随目标运动有鲁棒性强和自适应性好的特点, 在多机器人系统中可以有效地协作, 容错性高。根据每个机器人连接到虚拟弹簧的数量, 使用K-spring拓扑网络模型。虚拟弹簧表示机器人之间的物理连接和无线通信, 机器人*i*和机器人*j*通过虚拟弹簧 S_{ij} 相连, $S_{ij} \in S, i, j = 1, 2, \dots, n$, 2个机器人通过虚拟弹簧相互通信。图1列出了 $K=2$ 、 $K=3$ 、 $K=6$ 的3种多机器人网络拓扑动态模型。

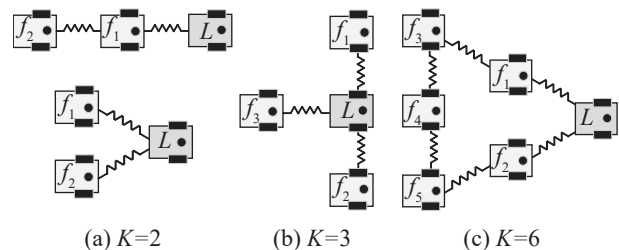


图1 虚拟弹簧拓扑模型
Fig. 1 Virtual spring topology model

虚拟弹簧模型融合领航-跟随控制^[15]方法, 完成多机器人路径规划中队形变换的问题。领航机器人 R_1 由虚拟弹簧连接跟随机器人 $R_{fi}, i=1, 2, \dots, n$ 保持预定的队形运动, 虚拟弹簧有3种状态: 放松、压缩和拉伸。因此, 虚拟弹簧在机器人 f_i 和 f_j 的弹簧松紧状态为

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & l_0 < l_{rij} \\ 0, & l_0 = l_{rij} \\ -1, & l_0 > l_{rij} \end{cases} \quad (1)$$

式中: l_0 为机器人之间弹簧自然状态下的长度; l_{ij} 为弹簧实际的长度。

为了防止机器人间发生碰撞, 在机器人间设置安全距离 d_1 并增加虚拟弹簧的动态阻尼系数 k_f 。结合胡克定律, 机器人间虚拟弹簧受力 F_{ij} 可以表示为:

$$F_{ij} = \begin{cases} s_{ij} k_f |l_0 - l_{ij}|, & l_0 \geq l_{ij}, \\ s_{ij} k_f |l_0 - l_{ij}| \frac{1}{(l_{ij} - d_1)^2}, & d_1 < l_0 < l_{ij}, \end{cases} \quad (2)$$

$$k_f = \frac{1}{\ln(l_{ij} + 1)} k_0 \quad (3)$$

式中: k_0 为弹簧的弹性系数; k_f 为虚拟弹簧的动态阻尼系数, 虚拟弹簧的动态阻尼系数与虚拟弹簧的物理距离负相关, 即机器人与目标的距离越近, 虚拟弹簧的动态阻尼系数越大, 机器人间的改进虚拟弹簧模型如图2所示。

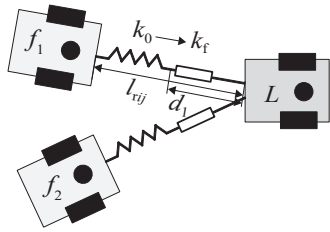


图2 机器人之间的改进虚拟弹簧模型

Fig. 2 Improved virtual spring model between robots

此时, f_i 和 f_j 之间的弹簧夹角计算式为

$$\theta_{ij} = \begin{cases} a \sin \frac{y_i - y_j}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}, & y_i \geq y_j, \\ 2\pi - a \sin \frac{y_i - y_j}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}, & y_i < y_j, \end{cases} \quad (4)$$

通过控制弹簧夹角 θ_{ij} 使得跟随机器人朝向领航机器人。

为了评价机器人之间的编队效果, 引入能量函数 E 。 E 的取值越小, 编队效果越好。

$$E = \sum_{j \in ni} \sum_{i \in K} \frac{1}{2} k_f (l_{ij} - l_0)^2 \quad (5)$$

2 多机器人编队控制算法

2.1 路径规划方法

本文考虑在未知环境下, 机器人的初始位姿与终点为已知条件, 环境中的障碍物信息未知, 针对两轮差速驱动机器人, 机器人的线速度与角速度为控制信号, 仅考虑其前向和旋转运动。编队过程中, 领航者进行路径规划, 负责驶向目标、避障和引导编队运动, 跟随机器人在队形力与障碍物虚拟弹簧力的“合力”作用下, 跟随领航者向虚拟领航者位置移动。若没有障碍物, 多机器人会保持预定的队形, 当遇到障碍物时, 机器人切换避障模式, 跟随者改变与领航者的期望角度和距离, 使用改进的虚拟弹簧法避开障碍物。假设领航机器人通过拉伸弹簧连接到目标, 目标可以产生弹性牵引力 F_{att} , 随着机器人接近目标而单调递减。

当障碍物在目标点附近, 虚拟弹簧法像人工势场法一样会出现目标点不可达的问题, 基于此种情况, 在原有目标点拉力公式的基础上进行修正, 根据障碍物的影响范围 ρ_0 和目标点与障碍物距离的关系引入 λ , 使机器人处于障碍物的影响范围之内, 弹簧牵引力大于障碍物的弹性排斥力, 从而保证机器人可以到达目标点。

改进的目标弹簧牵引力公式为

$$F_{att}(q) = \begin{cases} k_g \left(f(q - q_t) + \frac{2\lambda}{f(q - q_t)^3} \right), & f(q - q_t) > 0 \\ 0, & f(q - q_t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda = \begin{cases} 1, & f(q_0 - q_t) < \rho_0 \\ 0, & f(q_0 - q_t) \geq \rho_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: k_g 为目标虚拟弹簧的正比例因子; q_t 为目标位置; $f(q_0 - q_t)$ 为障碍物距目标点的欧式距离。假设障碍物周围存在许多自然长度的虚拟弹簧, 如图3所示, 若障碍物形状不规则, 可将其视为包含障碍物的最小圆。当机器人离障碍物足够近时, 障碍物会产生弹性排斥力, 它与机器人和障碍物之间的距离成反比, 并且指向远离障碍物的方

向,改进的虚拟弹簧算法考虑到了环境中障碍物的弹簧阻尼系数 k_r 。改进后的障碍物斥力公式为

$$F_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} k_r |l_1 - f(q - q_o)|, & 0 < f(q - q_o) < l_1 \\ 0, & f(q - q_o) > l_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$k_r = \frac{1}{f(q - q_o)^2} k_o \quad (9)$$

式中: $f(q - q_o)$ 为机器人和障碍物之间的距离; l_1 为障碍物的最大撞击距离。

领航机器人合力表示为

$$F = \begin{cases} F_{\text{att}} + \sum_{oi=1}^n oi F_{\text{rep}}, & f(q - q_t) > 0 \\ 0, & f(q - q_t) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

存储在领航者虚拟弹簧中的势能为

$$E = E_{ij}(q) + E_t(q) + E_o(q) = \frac{1}{2} k_f (l_0 - l_{rij})^2 + \frac{1}{2} k_g f(q - q_t)^2 + \frac{1}{2} k_r \sum_{i=1}^n f(q - q_{oi})^2 \quad (11)$$

式中: $E_{ij}(q)$ 为机器人间的虚拟弹簧的势能; $E_t(q)$ 为领航机器人和目标之间的虚拟弹簧的势能; $E_o(q)$ 是机器人和障碍物之间的虚拟弹簧的势能。

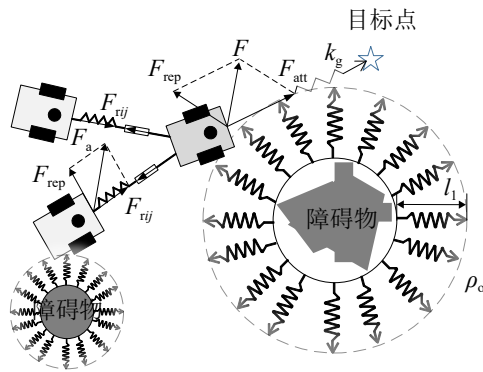


图3 障碍物在目标点附近的改进虚拟弹簧模型

Fig. 3 Improved virtual spring model of obstacle near target

每个采样时刻,领航机器人的速度与角速度依据下式求出:

$$v = \begin{cases} k_v |F|, & v \leq v_{\text{lim}} \\ v_{\text{lim}}, & v > v_{\text{lim}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\omega = \begin{cases} k_\omega (\theta_f - \theta_1), & \omega \leq \omega_{\text{lim}} \\ \omega_{\text{lim}}, & \omega > \omega_{\text{lim}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: k_v 和 k_ω 为增益系数; v_{lim} 和 ω_{lim} 为速度和角速度的上限; θ_f 和 θ_1 为领航机器人合力的方向角与当前运动的朝向角。当机器人不在障碍物影响范围并朝目标点运动时,忽略障碍物弹簧斥力,目标点的虚拟弹簧拉力起主导作用奔向目标点。

改进的虚拟弹簧模型考虑到了跟随者的避障功能,当跟随机器人运动到障碍物影响范围内时,将受到式(9)障碍物的斥力 F_{rep} ,跟随者将在排斥力的驱使下避开障碍物向虚拟领航者位置移动,此时跟随者合力为

$$F_a = \begin{cases} F_{rij} + \sum_{oi=1}^n oi F_{\text{rep}}, & l_0 \neq l_{rij} \\ F_{rij}, & l_0 = l_{rij} \end{cases} \quad (14)$$

每个采样时刻,跟随机器人的速度与角速度依据下式求出:

$$v = \begin{cases} k_{fv} |F_a|, & v \leq v_{\text{lim}} \\ v_{\text{lim}}, & v > v_{\text{lim}} \end{cases} \quad (15)$$

$$\omega = \begin{cases} k_{f\omega} (\theta_a - \theta_f), & \omega \leq \omega_{\text{lim}} \\ \omega_{\text{lim}}, & \omega > \omega_{\text{lim}} \end{cases} \quad (16)$$

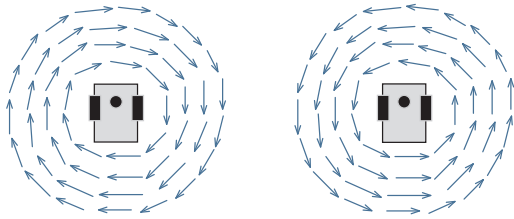
式中: k_{fv} 和 $k_{f\omega}$ 为跟随机器人的增益系数; θ_a 和 θ_f 分别为跟随机器人合力的方向角与当前运动的朝向角。

2.2 局部极小点的解决方法

领航机器人追踪目标点位置信息,机器人遇到障碍物可通过弹簧的排斥力避开,当某一时刻目标点牵引力和障碍排斥力大小相等方向相反,即达到受力平衡时,机器人将卡在原地无法前进,陷入“死锁”状态,除非有外力打破这种平衡,否则这种状态将一直持续下去。为了解决这个问题,提出了采用附加旋转力场^[16]的思想对控制器进行改进,如图4所示。

首先定义机器人在运行过程中的2种基本行为:Go-to-goal和Avoid-obstacles。其中Go-to-goal行为描述了移动机器人正常状态下的路径规划,即应用改进的虚拟弹簧法使机器人绕开障碍物并抵达目标位置。如图5所示,当机器人被困在复杂障碍物(如U形障碍物或长墙)时,即陷入局部极

小状态, 机器人便切换至 Avoid-obstacles 行为, 此时附加旋转力场被激活, f_i^r 将找到一条新的路径逃离局部极小状态。



(a) 顺时针旋转力场 (b) 逆时针旋转力场

图 4 旋转力场

Fig. 4 Rotational force field

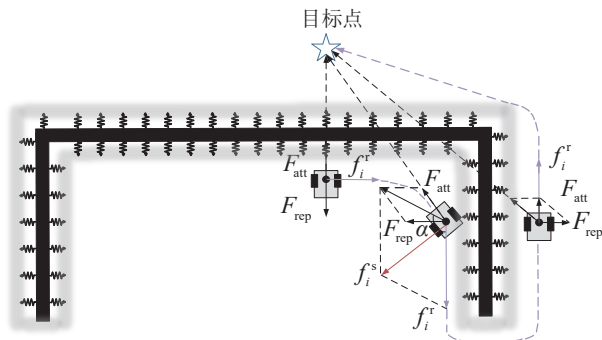


图 5 跳出局部极小的避障描述

Fig. 5 Obstacle avoidance description of jumping out of local minima

附加旋转力为

$$f_i^r = \tau \varphi n_i^r \quad (17)$$

其中,

$$\tau = \begin{cases} 1, & f(q - q_o) \leq \rho_o \\ 0, & f(q - q_o) > \rho_o \end{cases} \quad (18)$$

即旋转力限制在障碍物虚拟弹簧影响范围内, n_i^r 为机器人压缩障碍物最短弹簧垂直方向的单位向量。

$$n_i^r = c_i^r ((q_i^y - q_o^y)/f(q - q_o), -(q_i^x - q_o^x)/f(q - q_o))^T \quad (19)$$

其中, c_i^r 用于定义旋转力的方向, 找出距离机器人最近位置障碍物边缘点, 记作最近点, 确定旋转力的方向。如果旋转力是顺时针方向 $c_i^r = 1$, 逆时针方向则 $c_i^r = -1$ 。

正增益因子 φ 被用作驱动机器人快速逃离障碍物的控制要素, 因此, 设计该控制函数使得机器人上的总力在其旋转方向上, 确保机器人始终

沿旋转力的方向移动。

$$\varphi = (1 + \gamma) \left(\|F_{att}\| + \left\| \sum_{oi=1}^n oi F_{rep} \right\| \right) \cdot \frac{F_{att} \left(\sum_{oi=1}^n oi F_{rep} \right)^2}{\left\| F_{att} \left(\sum_{oi=1}^n oi F_{rep} \right)^2 \right\| \cdot \|F_{att}\|} \quad (20)$$

γ 的取值取决于合力与 n_i^r 之间的夹角 α 。

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_1, & \alpha < \pi/2 \\ \gamma_2, & \alpha \geq \pi/2 \end{cases} \quad (21)$$

其中, $-1 < \gamma_1, 0 < \gamma_2, \gamma_1 < \gamma_2$, 旋转力场被激活后, 机器人控制律的总矢量为

$$f_i^s = f_i^r + F_{att} + \sum_{oi=1}^n oi F_{rep} \quad (22)$$

根据式(18)和(21)可知, $\|f_i^r\| = \varphi$, 当 $\alpha \geq \pi/2$, $\|f_i^r\| = \varphi > \left\| F_{att} + \sum_{oi=1}^n oi F_{rep} \right\|$, f_i^s 与 n_i^r 之间的夹角永远小于 $\pi/2$, 如图 5 所示, 机器人将沿着旋转力场的逆时针方向避开障碍物。

此时, 机器人处于 Avoid-obstacles 状态的控制律为

$$v = \begin{cases} k_v^{(0)} |f_i^s|, & v \leq v_{lim} \\ v_{lim}, & v > v_{lim} \end{cases} \quad (23)$$

$$\omega = \begin{cases} k_\omega^{(0)} (\theta_F - \theta_1) + k_\omega^{(2)} (f(q - q_o) - l_1), & \omega \leq \omega_{lim} \\ \omega_{lim}, & \omega > \omega_{lim} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $k_v^{(0)}$ 、 $k_\omega^{(0)}$ 和 $k_\omega^{(2)}$ 为增益系数。当机器人脱离局部极小状态, 机器人的控制律便切换为 Go-to-goal 状态时的控制律。

3 仿真研究

3.1 算法实现

为验证本文算法的有效性, 对数个机器人在不同环境下进行单机路径规划和多机编队控制仿真。编队过程使用本文算法进行路径规划, 受力流程如图 6 所示, 编队运动前, 领航机器人与跟

随机器人通过虚拟弹簧物理拓扑模型形成初始编队，领航机器人负责路径规划，分别计算领航机器人与跟随机器人所受到的虚拟弹簧合力及控制律，运动过程中如果陷入局部极小情况，则采用附加旋转力的方式使其脱离，待领航机器人到达目标点，判断此时所受合力情况，若合力为0，代表跟随机器人也到达目标点停止运动；若不为0，则继续计算跟随机器人的控制律直至到达成队位置，结束任务。

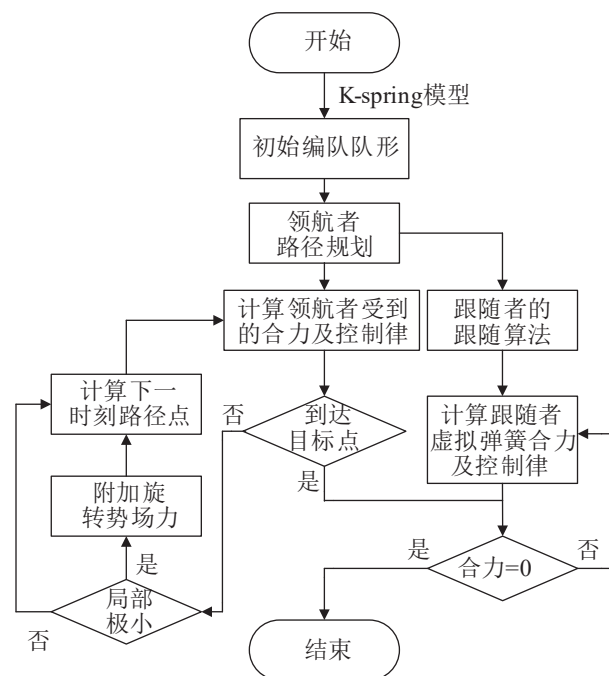


图6 IVSM算法流程

Fig. 6 Flow chart of IVSM algorithm

3.2 单机器人路径规划

仿真1 文献[8]将模糊控制思想引入到移动机器人的路径规划中来，对移动机器人的偏转角进行控制，但该文献仅对简单的圆形障碍物进行仿真。如图7(a)所示，当目标点距离障碍物过近时，机器人在内墙环境无法通过偏转角来判断目标点的位置而过早结束沿墙运动，证明该算法不具有普适性。图中的S代表起点，T代表终点。本文在机器人达到受力平衡时通过附加旋转力使机器人沿墙逆时针转出，从而完成路径规划。文献[9]通过改进斥力势场函数来解决目标点不可达问

题，当目标在障碍物附近时，通过选择虚拟目标点来脱离陷阱。如图7(c)所示，当环境设置为包围形状的直角边界障碍物时，机器人通过选择虚拟目标点的计划失败，一直在障碍物内部绕圈，灵活性差。图7(b)、(d)分别描述了相同环境下使用IVSM算法的仿真结果。可见，本文提出的方法在一些复杂环境下更加可靠，普适性更强。图7(e)改变障碍物环境，验证在目标点上方增加障碍物机器人是否可达，可见机器人无须试错，可以高效地选取最优路径进行规划到达目标点。图7(f)通过增大障碍物环境的复杂度，验证了IVSM算法在不同复杂障碍物环境下的有效性，说明了改进虚拟弹簧模型算法相对于已有算法具有高普适性。

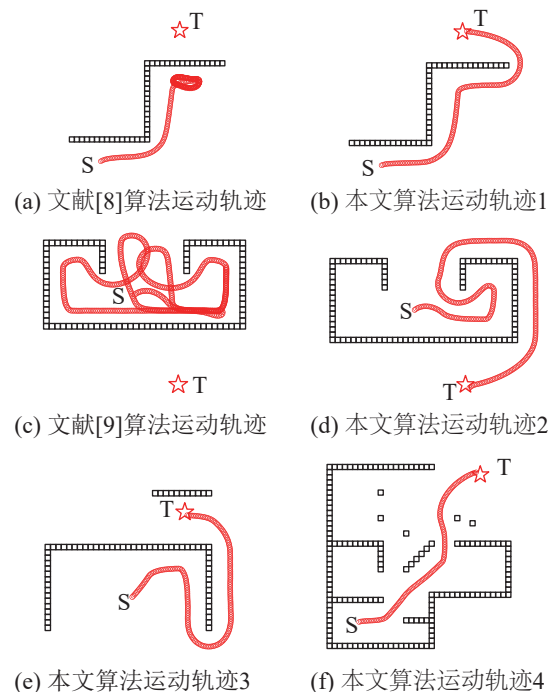


图7 领航机器人路径规划轨迹图

Fig. 7 Path planning trajectory of leader robot

3.3 多机器人路径规划

仿真2 多机编队运动前，领航机器人与跟随机器人通过虚拟弹簧物理拓扑模型形成初始队形，编队任务完成时，先判断领航者是否到达终点，再判断各个跟随机器人是否到达终点成队位置。文献[14]将机器人作为质点，基于网

络模型, 设计了虚拟弹簧路径规划, 图8(a)实验环境为 30×14 的二维空间, 障碍物设置为随机圆形障碍物。采用 $K=6$ 的虚拟弹簧模型, 实验中将参数分别设置: 目标的弹簧引力系数 $k_g=2$; 障碍物虚拟弹簧斥力系数 $k_r=2$; 虚拟弹簧系数 $k_0=20$; 设障碍物影响范围 $\rho_0=1.5$; 障碍物虚拟弹簧自然状态 $l_1=1$, 各个机器人之间的虚拟弹簧长度根据队形排列分别设置, 当领航机器人与目标距离 ≤ 0.1 则认为机器人到达目标点, 机器人编队恢复初始编队队形, 终止运动。图8(b)为使用本文算法进行编队仿真的结果。在配置以上参数后, 在相同的复杂环境下, 验证2种算法的性能。从图8(a)可以看出, 在机器人运动到8 m

时, f_2 与 f_4 的轨迹均与领航机器轨迹重合并且和 f_1 、 f_3 运动轨迹贴近, 运用到实际情况中容易造成碰撞。图8(b)中的机器人整体运动轨迹较为分散, 说明改进的虚拟弹簧进行调节效果好的同时避免了机间碰撞。改进的虚拟弹簧法轨迹长度与文献[14]相当, 轨迹耗时更少, 安全性更高。说明本文算法可以更高效、安全地穿越稠密障碍物。

由图9可以看出, 采用IVSM算法所用步数更少, 弹簧调节能力更强。在虚拟弹簧拉伸或压缩的时候, 虚拟弹簧能量波动幅度大, 恢复队形时虚拟弹簧能量变成零。在机器人到达终点的过程中, 机器人虚拟弹簧总能量不断衰减直至零, 整体趋于稳定。

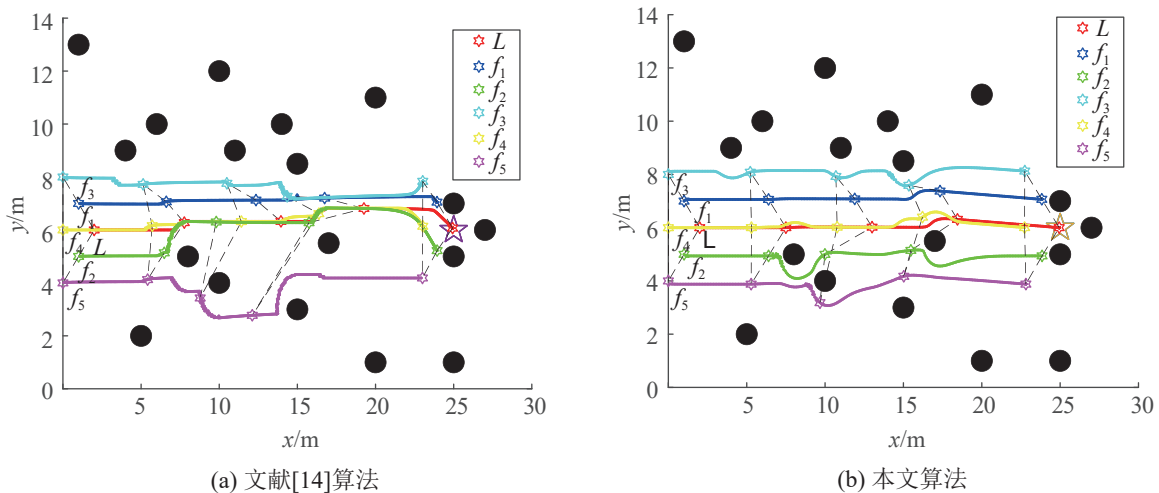


图8 与文献[14]算法轨迹对比

Fig. 8 Comparison with reference [14] algorithm trajectory

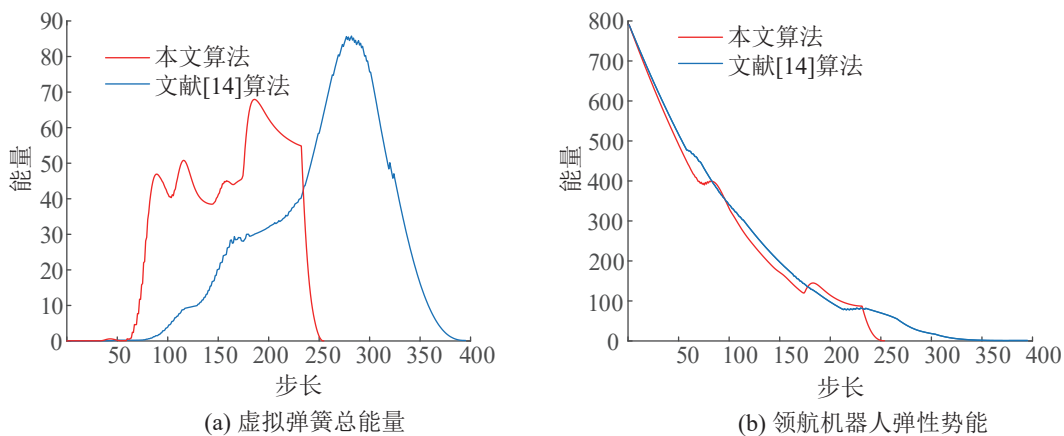


图9 机器人能量变化

Fig. 9 Robot energy variation

仿真3 此仿真基于专业仿真软件机器人操作系统(robot operating system, ROS)中的Gazebo平台进行仿真分析,考虑未知障碍物(凹形障碍和离散障碍)环境中的3个机器人编队。环境模型如图10所示,机器人以三角形成队,领航机器人在面对大型凹形障碍选择最优侧沿边移动,和领航机器人一侧运动的跟随机器人在虚拟弹簧的作用下跟领航者保持安全距离无冲突避障,没有产生局部极小的现象,在较窄通道内进行压缩,通过后能够拉伸队形至合理间距,在到达目标点后未受到一旁的障碍物影响并结束编队,可见整个运动过程中各跟随者均能保证安全,运动轨迹如图11所示。

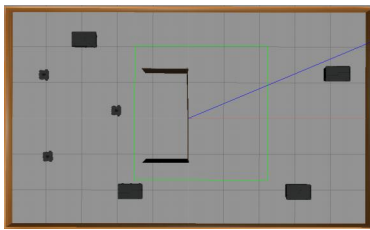


图10 Gazebo中的环境模型
Fig. 10 Environment model in Gazebo



图11 Rviz中的运动轨迹
Fig. 11 Trajectory in Rviz

4 实物验证

为了进一步检验算法的可行性,实验选用了3个281 mm×306 mm×141 mm的Turtlebot3(Waffle Pi)机器人并搭建了4.2 m×5.2 m的环境,4个20 cm×20 cm×30 cm的长方形障碍物散落放置在实验场地中。如图12所示,系统选用搭载树莓派3的控制器OpenCR通过USB与LDS01激光雷达感知环境信息,完成建图、导航以及避障任务,360°激光雷达的测距范围在120~3 500 mm之间。实验选择安全距

离 $l_1=0.25$ m,机器人所允许的最大线速度和角速度分别为0.26 m/s、1.82 rad/s,本实验设置峰值参数为 $v_{\max}=0.23$ m/s、 $\omega_{\max}=1.5$ rad/s。首先在Gazebo平台进行仿真分析,然后通过Gmapping算法对实际环境进行了SLAM建图,应用Rviz软件实时显示环境信息。实验过程中先让3个机器人形成 $K=2$ 的K-spring虚拟弹簧模型,再通过IVSM算法让3个机器人实现编队避障。避障轨迹如图13所示,可以看出机器人在行进过程中一直保持三角形的环形结构,在靠近障碍物时受到了来自障碍物的斥力使得机器人在中间位置偏离了一定角度,避开障碍物后3个机器人继续保持稳定的三角形结构,最后到达预期终点。图14展示的是3个机器人实验场景图,实验中的线速度、角速度信息通过Matlab进行离线绘制,如图15所示。从实际规划的轨迹可以看出,机器人在真实环境下成功绕过障碍,将实验结果与相对的仿真结果相比,可见编队基本达到了所预期的效果,至此,本文算法的有效性得到验证。

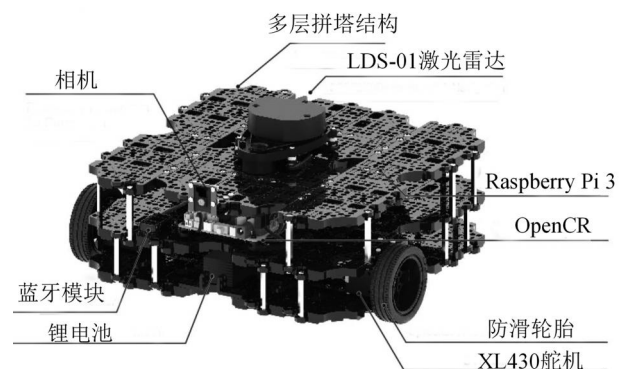


图12 Turtlebot3移动机器人平台
Fig. 12 Mobile robot platform of Turtlebot3

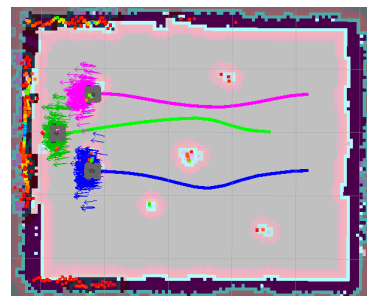


图13 Rviz中的运动轨迹
Fig. 13 Trajectory in Rviz

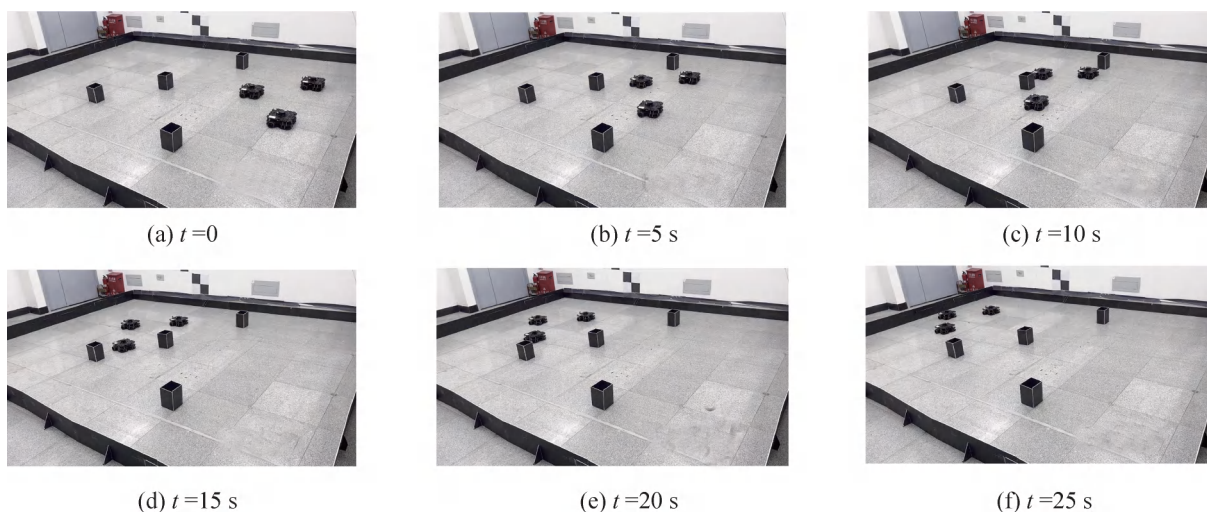


图 14 实验场景图
Fig. 14 Experimental scene

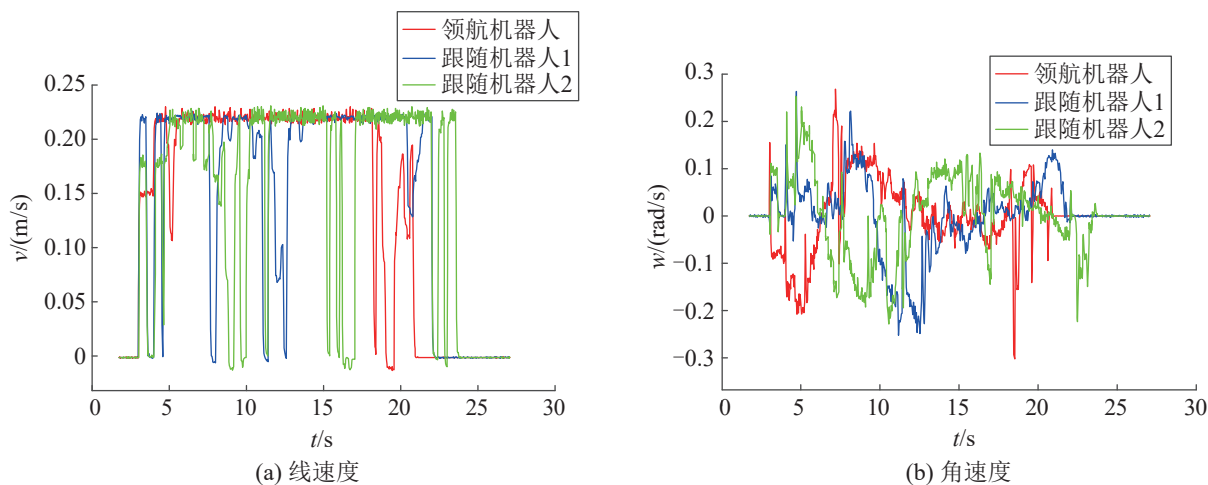


图 15 实物实验中的速度曲线图
Fig. 15 Velocity curve in physical experiment

5 结论

本文针对多机器人系统在未知环境中难以有效避障和保持队形的问题, 在改进虚拟弹簧模型的基础上提出了一种既能安全避障, 又能实现队形稳定保持的机器人编队控制算法。将虚拟弹簧概念引入编队控制器中, 在结合领航-跟随法的基础上引入虚拟弹簧模型调节, 解决了编队中的易碰、脱离队形的问题; 建立机器人与目标点的牵引力公式, 设计可调节阻尼的障碍物虚拟弹簧模型, 完成了机器人的避障行为; 针对编队过程中

产生的局部最小问题, 通过引入附加旋转力场的概念, 降低了决策的盲目性, 合理地避免了编队过程中产生的决策冲突。与一些现有算法相比, 本文提出的方法不但对环境有普适性, 而且在平均路径规划的时间与路径长度方面也有较大优势, 未来在规模上可扩充更多的机器人执行任务, 增强编队控制算法的有效性。

参考文献:

[1] Yang Ziwen, Zhu Shanying, Chen Cailian, et al. Leader-follower Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots with Bearing-only Measurements[J]. Journal of

- the Franklin Institute, 2020, 357(3): 1628-1643.
- [2] Wang Yuanzhe, Wang Danwei, Yang Shuai, et al. A Practical Leader-follower Tracking Control Scheme for Multiple Nonholonomic Mobile Robots in Unknown Obstacle Environments[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(4): 1685-1693.
- [3] Jiang Chao, Chen Zhuo, Guo Yi. Multi-robot Formation Control: A Comparison between Model-Based and Learning-based Methods[J]. Journal of Control and Decision, 2020, 7(1): 90-108.
- [4] 张玉超, 蒋沅, 代冀阳. 三阶多机器人协同编队动态避障控制[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(8): 1762-1774.
Zhang Yuchao, Jiang Yuan, Dai Jiyang. Dynamic Obstacle Avoidance Control of Three-order Multi-robot Cooperative Formation[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(8): 1762-1774.
- [5] Khatib O. Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[M]. New York: Springer, 1986: 396-404.
- [6] Alonso-Mora J, Baker S, Rus D. Multi-robot Formation Control and Object Transport in Dynamic Environments via Constrained Optimization[J]. The International Journal of Robotics Research, 2017, 36(9): 1000-1021.
- [7] Dong Longfei, Chen Yangzhou, Qu Xiaojun. Formation Control Strategy for Nonholonomic Intelligent Vehicles Based on Virtual Structure and Consensus Approach[J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 415-424.
- [8] 刘翰培, 王东署, 汪宇轩, 等. 移动机器人路径规划的模糊人工势场法研究[J]. 控制工程, 2022, 29(1): 33-38.
Liu Hanpei, Wang Dongshu, Wang Yuxuan, et al. Research of Path Planning for Mobile Robots Based on Fuzzy Artificial Potential Field Method[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(1): 33-38.
- [9] Zhang H, Li M, Wu Z. Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Method[C]//33rd Chinese Control and Decision Conference. China: IEEE, 2021: 4922-4925.
- [10] 徐胜, 邢强, 王浩. 解决势场法路径规划中局部极小问题的角度累积法[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 1997-2007.
Xu Sheng, Xing Qiang, Wang Hao. Angle Accumulation Method for Solving Local Minimum Problem in Path Planning with Potential Field Method[J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 1997-2007.
- [11] Shucker B, Bennett J K. Virtual Spring Mesh Algorithms for Control of Distributed Robotic Macrosensors[R]. Boulder, USA: University of Colorado at Boulder, 2005: 136.
- [12] 高申勇, 许方镇, 郭鸿杰. 基于弹簧模型的移动机器人路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 796-803.
Gao Shenyong, Xu Fangzhen, Guo Hongjie. Research on Mobile Robots' Path Planning Based on a Spring Model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 796-803.
- [13] Wiech J, Eremeyev V A, Giorgio I. Virtual Spring Damper Method for Nonholonomic Robotic Swarm Self-organization and Leader Following[J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2018, 30(5): 1091-1102.
- [14] Pan Zhenhua, Wang Di, Deng Hongbin, et al. A Virtual Spring Method for the Multi-robot Path Planning and Formation Control[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2019, 17(5): 1272-1282.
- [15] Liang Xinwu, Wang Hesheng, Liu Yunhui, et al. Leader-following Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots with Velocity Observers[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(4): 1747-1755.
- [16] Dang A D, La H M, Nguyen T, et al. Formation Control for Autonomous Robots with Collision and Obstacle Avoidance Using a Rotational and Repulsive Force-based Approach[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(3): 1729881419847897.