

3-15-2024

Formation Strategy of Hybrid Obstacle Avoidance Algorithm for Multiple Mobile Robots

Fulin Liu

College of Software, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China, fulinliuer@163.com

Qingxin Li

Key Laboratory of Networked Control Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China, 2533439838@qq.com

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. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Formation Strategy of Hybrid Obstacle Avoidance Algorithm for Multiple Mobile Robots

Abstract

Abstract: For the obstacle avoidance problem of multiple mobile robots in the unknown static obstacle environment, this paper proposed a formation strategy of a hybrid obstacle avoidance algorithm for multiple mobile robots, ensuring that multiple mobile robots do not collide during operation, can maintain the formation to the maximum extent in the unknown static obstacle environment for effective obstacle avoidance, and can reach the designated target point in a short time. Based on the leader-follower method and artificial potential field (APF) method, the formation strategy divided the robots in the system into the leader robot and the follower robot. According to the differences in their roles and tasks, the APF method with different improved methods was adopted to avoid obstacles, forming a hybrid obstacle avoidance algorithm. The leader APF (LAPF) obstacle avoidance algorithm was proposed for the leader robot, which improved the repulsive force function of the traditional APF method, solved the problem that the traditional APF method is easy to fall into the local extrema dilemma, and effectively reduced the time for obstacle avoidance. In order to ensure that the formation can be restored, and the stability of the system can be maintained during system operation and after obstacle avoidance, the formation strategy used the consistency model to control the speed of the robot so that the states of the leader robot and the follower robot tend to be consistent, and then the formation can be maintained. Simulation results verify the effectiveness of the LAPF algorithm and the formation strategy of a hybrid obstacle avoidance algorithm for multiple mobile robots.

Keywords

multiple mobile robots, consistent formation, leader-follower method, artificial potential field (APF), obstacle avoidance

Recommended Citation

Liu Fulin, Li Qingxin. Formation Strategy of Hybrid Obstacle Avoidance Algorithm for Multiple Mobile Robots[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 726-734.

多移动机器人混合避障算法的编队策略

刘福琳^{1,3}, 李庆鑫^{2,3,4*}

(1. 沈阳工业大学 软件学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
3. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 4. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169)

摘要: 针对多移动机器人系统在未知静态障碍物环境下的编队避障问题, 提出了一种多移动机器人混合避障算法的编队策略, 使多移动机器人系统在整个运行过程中保证系统内不发生碰撞, 并且在未知静态障碍物环境中能最大程度地保持队形进行有效避障, 以及能够在较短时间到达指定目标点。该编队策略基于领航跟随法和人工势场法, 将系统内机器人划分为领航机器人及跟随机器人, 并根据各自角色任务的差异, 对其采用了不同改进方法的人工势场法进行避障, 形成一种混合避障算法, 其中针对领航机器人提出了LAPF (leader artificial potential field) 避障算法, 该算法改进了传统人工势场法的斥力函数, 解决了传统人工势场法极易陷入局部极值困境的问题, 并有效缩短了避障过程所用时间。为保证整个系统运行过程及避障行为之后能够恢复队形保持系统稳定性, 该编队策略利用一致性模型控制机器人的速度, 使领航机器人与跟随机器人的状态趋于一致, 进而保持队形。仿真结果验证了LAPF算法及该多移动机器人混合避障算法编队策略的有效性。

关键词: 多移动机器人; 一致性编队; 领航跟随法; 人工势场法; 避障

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2024)03-0726-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1249

引用格式: 刘福琳, 李庆鑫. 多移动机器人混合避障算法的编队策略[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(3): 726-734.

Reference format: Liu Fulin, Li Qingxin. Formation Strategy of Hybrid Obstacle Avoidance Algorithm for Multiple Mobile Robots[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 726-734.

Formation Strategy of Hybrid Obstacle Avoidance Algorithm for Multiple Mobile Robots

Liu Fulin^{1,3}, Li Qingxin^{2,3,4*}

(1. College of Software, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. Key Laboratory of Networked Control Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
4. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

Abstract: For the obstacle avoidance problem of multiple mobile robots in the unknown static obstacle environment, this paper proposed a formation strategy of a hybrid obstacle avoidance algorithm for multiple mobile robots, ensuring that multiple mobile robots do not collide during operation, can maintain the formation to the maximum extent in the unknown static obstacle environment for effective obstacle avoidance, and can reach the designated target point in a short time. Based on the leader-follower method and artificial potential field (APF) method, the formation strategy divided the robots in the system into the leader robot and the follower robot. According to the differences in their roles and tasks, the APF method with different improved methods was adopted to avoid obstacles, forming a hybrid

收稿日期: 2022-10-19 修回日期: 2022-12-27

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1705104)

第一作者: 刘福琳(1998-), 女, 硕士生, 研究方向为多移动机器人编队控制。E-mail: fulinliuer@163.com

通讯作者: 李庆鑫(1988-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为机器人控制。E-mail: 2533439838@qq.com

obstacle avoidance algorithm. The leader APF (LAPF) obstacle avoidance algorithm was proposed for the leader robot, which improved the repulsive force function of the traditional APF method, solved the problem that the traditional APF method is easy to fall into the local extrema dilemma, and effectively reduced the time for obstacle avoidance. In order to ensure that the formation can be restored, and the stability of the system can be maintained during system operation and after obstacle avoidance, the formation strategy used the consistency model to control the speed of the robot so that the states of the leader robot and the follower robot tend to be consistent, and then the formation can be maintained. Simulation results verify the effectiveness of the LAPF algorithm and the formation strategy of a hybrid obstacle avoidance algorithm for multiple mobile robots.

Keywords: multiple mobile robots; consistent formation; leader-follower method; artificial potential field (APF); obstacle avoidance

0 引言

随着科技的进步发展, 移动机器人已经应用到社会的各个行业, 然而, 单个机器人在一些行业中已经承担不了太过复杂的作业任务。由此, 诞生了多智能体系统的概念, 系统内的各机器人之间用自己拥有的信息进行交换, 达到相互依赖又相互竞争的对立统一, 从而完成单个机器人难以完成的、大量而复杂的任务^[1]。其中多智能体系统的编队控制指系统在向目标点运动的过程中, 多智能体之间既要保持稳定的队形, 又要适应环境约束的控制问题^[2]。多移动机器人系统 (multi-mobile robot system, MMRS) 是多智能体系统的重要应用之一。

传统的多移动机器人编队算法有图论法、领航跟随法^[3]、基于行为法^[4]、人工势场法 (artificial potential field, APF)^[5]、虚拟结构法、一致性编队^[6]等。领航跟随法规则简单, 系统的行为和姿态均由领导者进行决策, 跟随者们只负责跟随, 因此跟随者之间没有通信反馈机制。而图论法采用图的结构来抽象描述系统中各机器人间的通信联系, 用图中的顶点代表 MMRS 中的机器人, 并依据相关理论分析系统编队, 得到编队控制策略^[7]。基于图论的一致性算法主要研究系统中个体的内部状态, 当系统处于一些特殊环境中, 个体之间在约束条件下依然保持一定的几何结构^[8]。随着研究的发展, 为了使 MMRS 中的机器人达到指定运行状态, 与领航跟随法融合, 渐渐引入了领导者和跟

随者概念, 形成领导跟随一致性研究, 使所有机器人状态达到一致的同时, 其最终状态与领导者状态相同^[9]。APF 是常用的较成熟、原理简单且对随机障碍环境适应性强的避障算法。APF 假设环境是一个虚拟势场, 以目标点为中心的引力场及以障碍物为中心的斥力场相互叠加而成, 机器人受其合力沿着势能下降的方向运动, 但易陷入局部最小值情况^[10]。

本文提出了一种多移动机器人混合避障算法的编队策略, 基于领航跟随一致性研究, 采用 APF 进行避障。首先本文针对传统人工势场法陷入极值的问题, 提出了一种改进的人工势场法 LAPF (leader APF) 避障算法, 改进了传统的斥力场函数, 将机器人与目标点的距离作为斥力影响因子, 根据机器人所在障碍物影响范围的不同, 改变影响因子的影响程度, 使机器人更好地进行避障。其次, 根据领航者与跟随者任务条件的不同, 对其采用不同的避障算法, 最后利用一致性模型控制机器人的速度, 实现编队系统在未知环境中能安全避障且在避障后恢复初始队形。该编队策略有效缩短了编队过程中避障所用的时间, 从而使得多移动机器人系统实现以较短时间到达指定的目标点。

1 多移动机器人混合避障算法

1.1 传统的人工势场法

传统 APF 的算法思想是把机器人抽象成势场

作用下的点，该势场由以目标点为中心的引力场和以障碍物为中心的斥力场叠加而成，机器人根据在环境中受到的势场力引导着到达目标点^[11]，但传统APF存在易陷入局部极小值的问题，机器人在某一点恰好所受势场力为0，此时到达了环境中势场最小点，从而停滞或在此处震荡^[12]，无法到达指定目标点。对于引力而言，离目标点越近引力越大，斥力则是离障碍物越近斥力越大。传统APF的模型如下：

(1) 引力场势场函数

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2} k_{att} |q - q_g|^2 \quad (1)$$

$$F_{att}(q) = -\nabla U_{att}(q) = k_{att} |q - q_g| \quad (2)$$

式中： $U_{att}(q)$ 为引力势场函数； $F_{att}(q)$ 为引力函数； k_{att} 为引力场增益系数； $|q - q_g|$ 为当前时刻机器人与目标点的距离。

(2) 斥力场势场函数

$$U_{re}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{obs} \left(\frac{1}{|q - q_{obs}|} - \frac{1}{\mu} \right)^2, & |q - q_{obs}| \leq \mu \\ 0, & |q - q_{obs}| > \mu \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{re}(q) = -\nabla U_{re}(q) = \begin{cases} k_{obs} \left(\frac{1}{|q - q_{obs}|} - \frac{1}{\mu} \right) \left(\frac{1}{|q - q_{obs}|} \right)^2 \cdot \frac{\partial |q - q_{obs}|}{\partial q}, & |q - q_{obs}| \leq \mu \\ 0, & |q - q_{obs}| > \mu \end{cases} \quad (4)$$

式中： $U_{re}(q)$ 为斥力势场函数； $F_{re}(q)$ 为斥力函数； k_{obs} 为斥力场增益系数； μ 为障碍物的最大影响范围，超出该影响范围，机器人不受其影响； $|q - q_{obs}|$ 为当前时刻机器人与障碍物之间的距离。

(3) 总势场

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{re}(q) \quad (5)$$

$$F(q) = F_{att}(q) + F_{re}(q) \quad (6)$$

式中： $U(q)$ 为机器人受到的总势场函数； $F(q)$ 为机器人受到的合力。

机器人在环境中某一点受到了大小相等方向相反的总引力和总斥力，所受合力为0，机器人此

时陷入局部最小值点，如图1所示，其中 F_{re1} 、 F_{re2} 分别为机器人受到障碍物1和障碍物2的斥力， F_{re} 、 F_{att} 分别为机器人受到的总斥力和总引力，且 $F_{re} = F_{att}$ 。

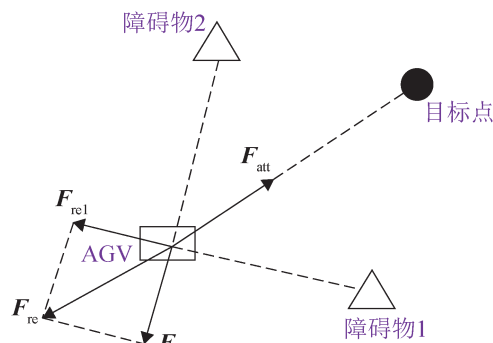


图1 局部最小值情况受力示意图
Fig. 1 Force under local minimum value

1.2 优化斥力场函数的LAPF避障算法

本节针对领航者提出了LAPF避障算法，该算法改进了传统算法中的斥力势场函数。首先，引入机器人与目标点的距离作为影响因子，为机器人增加一个在目标点方向的新斥力，与原总斥力 F_{re} 方向相反，从而使机器人受力不平衡，可以继续向目标点运动，在运动过程中避免陷入局部极值的情况；其次，根据机器人所处的障碍物影响范围不同，以 $\mu/2$ 、 μ 为界限，引入不同次幂的影响因子，对原斥力产生不同的影响程度，使机器人实现更好的避障效果。

当机器人陷入图1的情况时，采用本文改进算法后，机器人受力情况如图2所示， F'_{re2} 为加入的目标点方向的新斥力， F'_{re} 为新的总斥力，此时， $F_{re} \neq F_{att}$ ，改变了机器人的受力情况，使其可以沿目标点方向运动。

当机器人在运动过程中未陷入局部极值时，机器人受力情况如图3所示， F 、 F' 分别为加入新斥力 F'_{re2} 前后所受的合力。即使机器人未陷入局部极值的情况，在加入新斥力后，其受力方向也比先前更加靠近目标点，有着更好的避障效果。

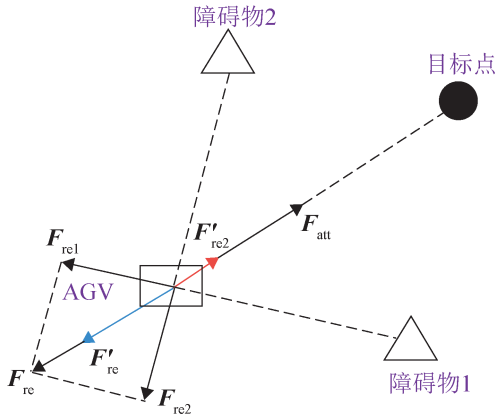


图2 改进后局部最小值时机器人受力示意图

Fig. 2 Force of improved robot under local minimum value

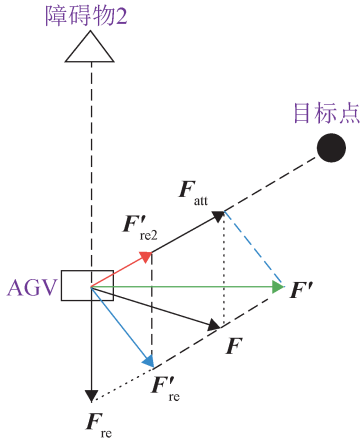


图3 改进后机器人运动时受力示意图

Fig. 3 Force of improved robot during movement

改进的斥力场势场函数及斥力函数表达式如下:

$$U'_{re}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{obs} \left(\frac{1}{|q - q_{obs}|} - \frac{1}{\mu} \right)^2 |q - q_g|^{\frac{1}{2}}, & |q - q_{obs}| < \frac{\mu}{2} \\ \frac{1}{2} k_{obs} \left(\frac{1}{|q - q_{obs}|} - \frac{1}{\mu} \right)^2 |q - q_g|^2, & \frac{\mu}{2} \leq |q - q_{obs}| \leq \mu \\ 0, & |q - q_{obs}| > \mu \end{cases} \quad (7)$$

$$F'_{re}(q) = \begin{cases} F_{re11} n_{oq} + F_{re12} n_{qg}, & |q - q_{obs}| < \mu/2 \\ F_{re21} n_{oq} + F_{re22} n_{qg}, & \mu/2 \leq |q - q_{obs}| \leq \mu \\ 0, & |q - q_{obs}| > \mu \end{cases} \quad (8)$$

$$F_{re11} = k_{obs} \left(\frac{1}{|q - q_{obs}|} - \frac{1}{\mu} \right) \left(\frac{1}{|q - q_{obs}|} \right)^2 |q - q_g|^{\frac{1}{2}} \frac{\partial |q - q_{obs}|}{\partial q} \quad (9)$$

$$F_{re12} = \frac{k_{obs}}{4} \left(\frac{1}{|q - q_{obs}|} - \frac{1}{\mu} \right)^2 |q - q_g|^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial |q - q_{obs}|}{\partial q} \quad (10)$$

$$F_{re21} = k_{obs} \left(\frac{1}{|q - q_{obs}|} - \frac{1}{\mu} \right) \left(\frac{1}{|q - q_{obs}|} \right)^2 |q - q_g|^2 \frac{\partial |q - q_{obs}|}{\partial q} \quad (11)$$

$$F_{re22} = k_{obs} \cdot \left(\frac{1}{|q - q_{obs}|} - \frac{1}{\mu} \right)^2 |q - q_g| \frac{\partial |q - q_{obs}|}{\partial q} \quad (12)$$

式中: $U'_{re}(q)$ 为改进后的斥力势场函数; $F'_{re}(q)$ 为改进后的斥力函数; F_{re11} 、 F_{re21} 为机器人在障碍物方向受到的分斥力; F_{re21} 、 F_{re22} 为机器人在目标点方向受到的引力; n_{oq} 、 n_{qg} 分别为障碍物指向机器人方向与机器人指向目标点方向的单位向量。

当 $|q - q_{obs}| > \mu$ 时, 机器人不在障碍物影响范围内, 此时所受斥力为 0; 当 $\mu/2 \leq |q - q_{obs}| \leq \mu$ 时, 机器人受到障碍物方向的斥力且与障碍物之间还有大于 $\mu/2$ 的距离, 此时引入 $|q - q_g|^2$, 对机器人产生一个目标点方向的斥力; 当 $|q - q_{obs}| < \mu/2$ 时, 机器人与障碍物之间距离变得更小, 那么与目标点的距离就会变大, 若再引入 $|q - q_g|^2$, 那么所受的总斥力可能过大, 使机器人所受斥力大于目标点的引力, 不能顺利避障, 因此引入 $|q - q_g|^{\frac{1}{2}}$, 减小其影响程度, 保证机器人更好地进行避障。

1.3 基于速度修正的跟随者避障算法

在整个 MMRS 协同运行的过程中, 跟随者全程跟着领航机器人向目标点运动, 由于多机器人系统中的跟随机器人需要将目标点作为障碍物, 受到斥力作用, 故不适用于上一节提出的 LAPF 算法。当跟随者处于局部极值停滞或发生震荡, 不能继续向目标点运动时, 其与领航者之间的距

离会越来越远，因此，通过判断跟随者与领航者之间距离是否超过设定的最大距离限度，以及跟随者此时的速度是否过小(本文仿真实验以小于0.1 m/s作为速度过小的标准)，若跟随者与领航者之间的距离超过最大限度且跟随者速度过小，则将跟随者的速度进行赋值修正，使其能够继续向目标点运动。本文通过多次仿真实验测试得出跟随者的速度修正为式(13)、(14)的效果最好。

$$v_x = 1 + 2\varepsilon \quad (13)$$

$$v_y = 1 + 2\varepsilon \quad (14)$$

式中： v_x 、 v_y 为机器人分别在 x 、 y 方向上的速度； ε 为随机误差，且 $0 < \varepsilon < 1$ 。

在整个编队运行过程中，对跟随者存在斥力作用的障碍物包括静态障碍物、其他机器人、目标点。

2 多移动机器人编队模型构建

本文用简单有向图描述MMRS之间的通信联系。根据图论知识，一个拓扑图可记为 $G=(V,E)$ ， E 为图中边的集合， V 为节点的集合， $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。在多机器人系统中，每个点代表一个机器人，点与点之间存在边代表机器人之间有通信联系^[13]。在编队中， (v_i, v_j) 代表从机器人 v_j 到机器人 v_i 的一个信息流。

为保持编队系统的稳定性，本文采用基于图论的一致性模型控制机器人的速度，使领航者与跟随者的状态趋于一致，从而保持编队队形。

编队系统一阶一致性模型^[14]为

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{u}_i \quad (15)$$

式中： \mathbf{x}_i 、 \mathbf{u}_i 分别对应有向图中节点 i 的状态量及输入量。

$$\mathbf{u}_i = \sum_{j \in N_i} v_{ij} (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) \quad (16)$$

式中： N_i 为通信结构图中节点 i 的相邻节点集合，节点 j 为节点 i 的邻居， v_{ij} 为通信图邻接矩阵中的元素。

机器人控制模型^[15]为

$$\mathbf{R}_r(t) = \sum_{m=1}^M \alpha (\mathbf{x}_r(t) - \mathbf{x}_{\text{obs}}^m) \quad (17)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{d_r^m(t)} - \frac{1}{d_\mu^m} \right) / \delta d_r^m(t) \quad (18)$$

式中： $\mathbf{R}_r(t)$ 表示在 t 时刻机器人的速度受到障碍物的斥力作用； M 为障碍物数量， $M=1,2,\dots,m$ ； α 为斥力场的增益系数； $\mathbf{x}_r(t)$ 为机器人在 t 时刻的坐标； $\mathbf{x}_{\text{obs}}^m$ 为第 m 个障碍物的坐标； $d_r^m(t)$ 为在 t 时刻机器人与第 m 个障碍物的距离； d_μ^m 为探测距离， δ 为常数。

领航机器人和跟随机器人在 t 时刻的控制输入量分别为：

$$\mathbf{u}_l(t) = n + k d_l + \sum_{j \in N_l} v_{lj} r_{lj}(t) + \beta \mathbf{R}_l(t) \quad (19)$$

$$\mathbf{u}_f(t) = \tau \sum_{j \in N_f} v_{fj} (\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_f(t) - r_{fj}(t)) + \beta \mathbf{R}_f(t) \quad (20)$$

式中： n 、 k 、 β 、 τ 均为常数， $\tau > 0$ ； d_l 为 t 时刻领航者与目标点的距离； $r_{lj}(t)$ 为 t 时刻领航者与机器人 j 之间的相对位置； $r_{fj}(t)$ 为 t 时刻跟随者与机器人 j 之间的相对位置。

3 仿真分析

3.1 LAPF算法仿真分析

本节对提出的LAPF算法进行两组仿真实验，分别验证算法的有效性及其避障高效性。

仿真1：在相同数量的静态障碍物环境中，对传统APF算法与LAPF算法进行仿真实验。规定机器人起始坐标为(0,0)，目标点坐标为(10,10) m，一次规划200 s，步长10 cm，障碍物最大影响距离 $\mu=1$ m，设置9个障碍物，在Matlab中进行传统算法与改进算法的仿真结果如图4~5所示。图4表明机器人陷入局部极值时，无法到达指定目标点；图5为算法改进之后，在与图4相同障碍物分布的环境下，机器人顺利避障到达目标点，有效避免了陷入局部极值的困境。

仿真2：在Matlab中模拟随机障碍物环境，对传统APF(法1)、文献[16]中提出的对传统APF

易陷入局部极值点缺陷的改进算法(法2)及本文的LAPF(法3)分别进行了200次的实验测试, 结果见表1。

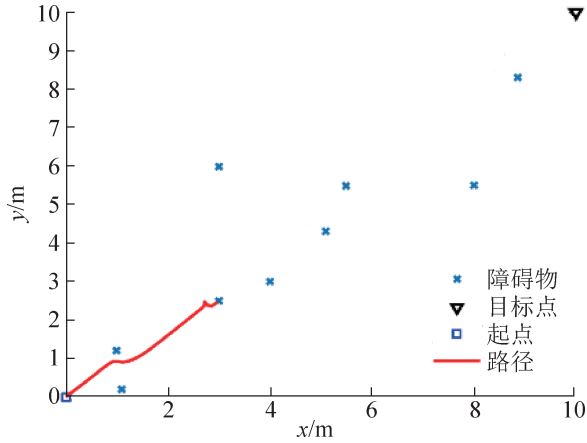


图4 传统APF算法避障结果

Fig. 4 Obstacle avoidance results of traditional APF algorithms

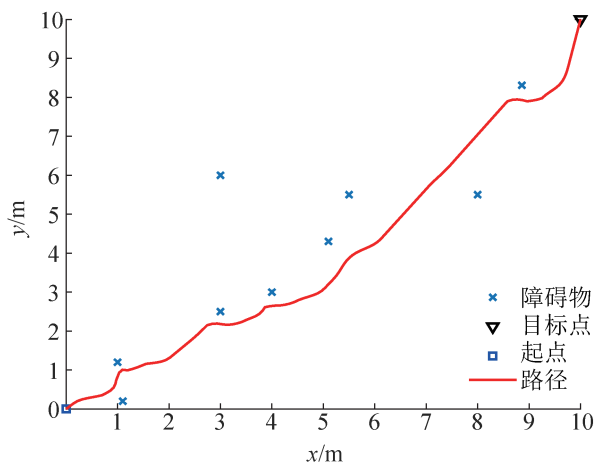


图5 LAPF算法避障结果

Fig. 5 Obstacle avoidance result of LAPF algorithm

表1 仿真实验结果

Table 1 Simulation experiment results

障碍物数量	成功率/%			平均运行时间/s		
	法1	法2	法3	法1	法2	法3
0	100	100	100	0.062	0.062	0.062
5	85	82	88	0.063	0.089	0.084
9	80	83.5	95	0.063	0.086	0.082

表1中的数据表明, 在障碍物数量相等的场景中, 传统APF算法的运行时间最短, 本文改进的算法次之; 但随着障碍物量的增多, 传统算法的编队成功率呈现下降趋势, 而本文改进算法的编队

成功率不减反增。在环境中存在障碍物时, 本文的LAPF算法相比于传统APF法以及文献[16]论文中的算法, 编队避障成功率明显更高; 对比同样改进传统APF易陷局部极值问题的法2, 本文LAPF算法的平均运行时间更短, 从而证明了本文算法具有更高成功率的同时具备更高效的避障效果。

3.2 多移动机器人混合避障算法的编队策略仿真分析

本节仿真验证多移动机器人混合避障算法的编队策略的有效性。

选用6个机器人进行编队避障仿真, 通信结构如图6所示, 其中节点6表示领航者, 节点1~5表示跟随者, 箭头表示两者之间的信息流, 箭头方向为信息流方向。机器人初始位姿为式(21), 目标点位置(12,12) m, 障碍物最大影响范围 $\mu=1$ m, 静态障碍物分布为式(22), 初始速度均为0 m/s, 机器人半径均为0.25 m。

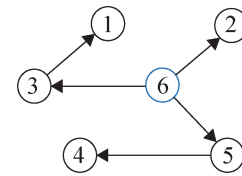


图6 通信拓扑图

Fig. 6 Communication topology

$$X_0 = [X^T \quad Y^T \quad \theta^T] =$$

$$\begin{bmatrix} -4 & -1.5 & 0 \\ -2 & -2.5 & \pi/2 \\ -6 & -2.4 & -\pi/2 \\ -2.5 & -4 & \pi/4 \\ -1 & -4.5 & -\pi/4 \\ -2.5 & -3 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$obs = [X^T \quad Y^T] = \begin{bmatrix} 0.65 & 7.68 \\ 1.64 & 9.22 \\ 6.72 & 7.16 \\ 7.95 & 5.78 \\ 4.41 & 2.58 \\ 7.52 & 2.29 \end{bmatrix} \quad (22)$$

由于3.1节分析的本文算法是混合算法, 故设计两种组合算法进行仿真对比:

(1) 组合一(多移动机器人混合避障算法): 领

航机器人采用本文改进后的人工势场算法(法3)进行避障；跟随机器人采用 1.3 节中的速度修正法(法4)进行避障。

(2) 组合二(单一避障算法组合)：领航机器人、跟随机器人均采用速度修正法(法4)进行避障。

仿真结果见图 7~10 和表 2。图 7, 8 分别为组合一和组合二算法的各机器人运动轨迹图，其中标明了初始队形、队形形成、过程避障、到达目标点 4 个时间点的系统队形；图 9, 10 为组合一与组合二运动轨迹区别之处的放大示意图，并标注了在第 300 次循环时各机器人的坐标位置及队形形状；表 2 为两种组合算法完成相同任务的运行时间。

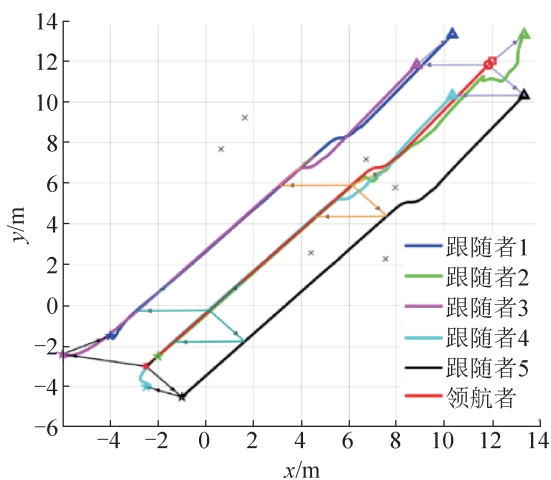


图 7 组合一运动轨迹示意图
Fig. 7 Motion trajectory of combination 1

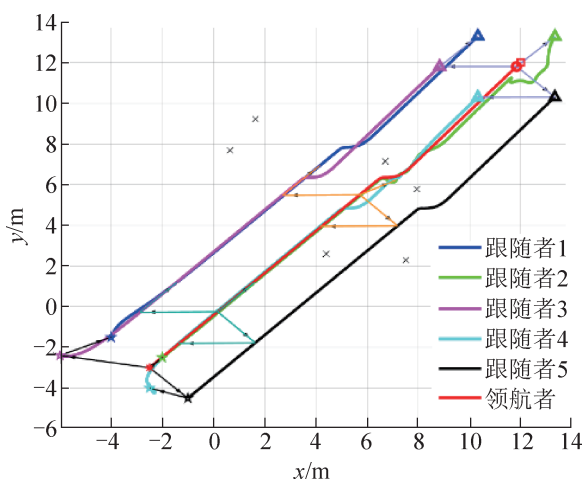


图 8 组合二运动轨迹示意图
Fig. 8 Motion trajectory of combination 2

由图 7~8 可以看出，两种组合算法在相同的条件下均能完成编队避障任务，运行轨迹基本相似。图 9~10 显示，在进行避障时，由于两种组合算法采用的避障算法不同，在相同时刻的各机器人坐标位置不同，组合一算法中机器人位置更接近目标点，从而造成了两种算法运行时间上的差异。表 2 中的数据更直接地说明了本文采用的组合一算法能更高效地完成作业，验证了本文提出的混合编队算法的有效性。在实际工作环境中，能更加迅速地到达目标点并维持编队的稳定对完成作业有着很大的意义。

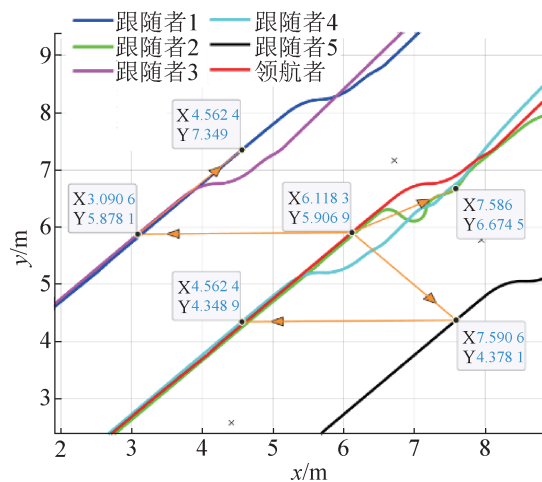


图 9 组合一运动轨迹局部放大图
Fig. 9 Local magnification of motion trajectory of combination 1

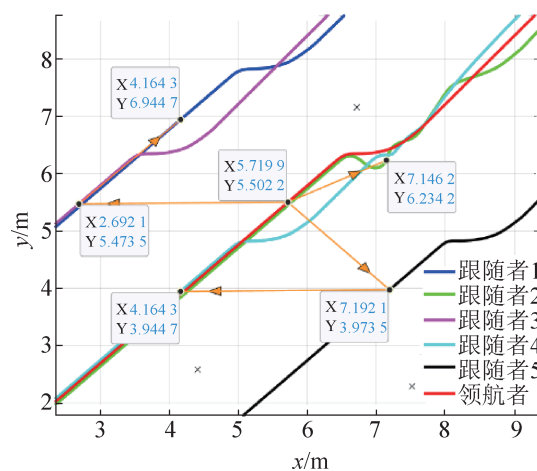


图 10 组合二运动轨迹局部放大图
Fig. 10 Local magnification of motion trajectory of combination 2

表2 两种组合算法运行时间
Table 2 Running time of two combined algorithms

组合算法	运行时间
一	97.81
二	116.83

4 结论

本文针对多移动机器人系统在未知的静态障碍物环境下, 进行编队避障到达指定目标点的过程进行了研究, 得出以下结论:

(1) 针对传统APF法易陷入局部极值点的缺陷, 提出一种改进的人工势场法LAPF, 将传统方法中的斥力引入了机器人与目标点的距离这一影响因子, 对机器人产生一个新的斥力, 并通过判断所处的不同障碍物影响范围, 采用不同的斥力计算公式。仿真结果表明, 该算法有效解决了易陷入局部极值的问题, 且具有较高的避障成功率, 有效缩短了算法时间, 提高了避障效率。

(2) 本文提出的多移动机器人混合避障算法的编队策略, 根据领航者和跟随者的任务不同, 采用了不同的避障算法, 并基于一致性模型设计了编队系统模型, 使机器人在最大程度保持原有队形的基础上能够有效躲避障碍物。仿真结果表明, 与单一的避障算法相比, 本文提出的多移动机器人协同编队避障算法, 可使系统编队过程运行时间缩短, 系统整体的运行轨迹也相对平稳, 尽可能地保证了队形的稳定。

参考文献:

- [1] 师五喜, 王健. 多移动机器人的协同编队控制[J]. 天津工业大学学报, 2020, 39(1): 63-68.
Shi Wuxi, Wang Jian. Cooperative Formation Control for Multiple Mobile Robots[J]. Journal of Tiangong University, 2020, 39(1): 63-68.
- [2] 禹鑫焱, 何燕琳, 欧林林, 等. 多智能体系统的队形控制方法及应用综述[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(7): 1-7, 15.
Yu Xinyi, He Yanlin, Ou Linlin, et al. Research on Formation Control Method and Application of Multi-agent Systems[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(7): 1-7, 15.

- [3] Miao Zhiqiang, Liu Yunhui, Wang Yaonan, et al. Distributed Estimation and Control for Leader-following Formations of Nonholonomic Mobile Robots[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(4): 1946-1954.
- [4] Balch T, Arkin R C. Behavior-based Formation Control for Multirobot Teams[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 926-939.
- [5] Perdereau V, Passi C, Drouin M. Real-time Control of Redundant Robotic Manipulators for Mobile Obstacle Avoidance[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 41(1): 41-59.
- [6] 李珣, 何晶晶, 赵征凡, 等. 基于一致性改进模型的多机器人编队运动规划方法[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(3): 44-53, 59.
Li Xun, He Jingjing, Zhao Zhengfan, et al. Multi-robot Formation Motion Planning Method Based on Improved Consistency Model[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2021, 35(3): 44-53, 59.
- [7] 梁旭东. 多机器人系统编队一致性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
Liang Xudong. Research on Formation Consensus of the Multi-robot System[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [8] 吴晋, 张国良, 曾静, 等. 多机器人编队离散模型及队形控制稳定性分析[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(3): 293-301.
Wu Jin, Zhang Guoliang, Zeng Jing, et al. Discrete-time Modeling for Multirobot Formation and Stability of Formation Control Algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(3): 293-301.
- [9] 许剑鑫. 基于一致性算法的移动机器人编队控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
Xu Jianxin. Research on Formation Control of Mobile Robot Based on Consensus Algorithm[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [10] 牛秦玉, 李美凡, 赵勇. 改进人工势场法的AGV路径规划算法研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(17): 19-24.
Niu Qinyu, Li Meifan, Zhao Yong. Research on Improved Artificial Potential Field Method for AGV Path Planning[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(17): 19-24.
- [11] 王翼虎, 王思明. 基于改进人工势场法的机器人实时路径规划[J]. 兰州交通大学学报, 2020, 39(3): 60-66.
Wang Yihu, Wang Siming. Real-time Path Planning of Robot Based on Improved Artificial Potential Field Method[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2020, 39(3): 60-66.
- [12] 张铠翔, 姜文刚, 薛慧. 改进人工势场法的室内移动机

- 器人的局部规划研究[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(5): 989-994, 1034.
- Zhang Kaixiang, Jiang Wengang, Xue Hui. Research on Local Planning of Indoor Mobile Robot with Improved Artificial Potential Field Method[J]. Computer & Digital Engineering, 2022, 50(5): 989-994, 1034.
- [13] 杨立伟, 付丽霞, 李萍. 多智能体系统编队控制发展综述[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 18-27.
- Yang Liwei, Fu Lixia, Li Ping. Summary of Development of Multi-agent System Formation Control [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(24): 18-27.
- [14] Ren Wei, Beard R W. Consensus Seeking in Multiagent Systems Under Dynamically Changing Interaction Topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(5): 655-661.
- [15] Li Yushan, He Jianping, Chen Cailian, et al. Learning-based Intelligent Attack Against Formation Control with Obstacle-avoidance[C]//2019 American Control Conference (ACC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 2690-2695.
- [16] 魏丁丁. 动态环境下多机器人编队路径规划研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.
- Wei Dingding. The Research on Multi-robot Formation and Path Planning in Dynamic Environment[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2017.