

基于 A* 引导与协作势场的无人车集群自主避障方法

张钢 解维河 李晓芳

海军大连舰艇学院

DOI:10.32629/acair.v4i3.21361

[摘要] 针对传统人工势场法在无人车集群避障中易出现局部极小、目标不可达、轨迹震荡和编队失稳等问题,提出一种基于A*全局引导与协作势场的集群自主避障方法。该方法首先利用A*搜索获得全局可行路径,为局部运动提供方向约束;随后在人工势场框架内引入距离相关的动态权重,增强目标邻域的吸引作用;同时构建车辆间协作势场,用弹性约束维持安全间距与队形结构;当检测到势场平衡状态时,生成与运动方向正交的扰动分量,引导车辆脱离局部极小。仿真实验表明,所提方法能够降低目标邻近障碍场景下的震荡收敛现象,改善多车绕障时的路径连续性和编队保持能力,为复杂环境下无人车集群协同避障提供了一种结构简洁、实时性较好的解决方案。

[关键词] 无人车集群; A*算法; 人工势场法; 动态权重; 协作势场; 自主避障

中图分类号: S754.3 **文献标识码:** A

A Method for Autonomous Obstacle Avoidance of Unmanned Vehicle Platoon Based on A* Guidance and Collaborative Potential Field

Gang Zhang Weihé Xie Xiaofang Li

Dalian Naval Academy

[Abstract] To address local minima, unreachable targets, path oscillations and formation instability in unmanned vehicle swarms, this paper proposes an improved artificial potential field method integrating A* global guidance, dynamic attraction weighting, cooperative formation forces and orthogonal disturbance. Simulations show that the method improves trajectory continuity, velocity stability and formation maintenance in dense-obstacle scenarios.

[Key words] unmanned vehicle swarm; A*; artificial potential field; dynamic weighting; cooperative potential field

引言

无人车集群依靠多平台协同感知、分布式决策与容错执行能力,能够完成单车难以承担的运输巡检、应急搜索、军事侦察和环境监测等任务。与单无人车相比,集群系统不仅要保证个体安全到达目标,还要在运动过程中保持合理间距和队形结构,因此避障问题同时具有路径规划、局部安全和队形协同三重属性。人工势场法因模型直观、计算量小和实时性强,被广泛用于移动机器人与无人车局部避障。然而,在障碍物密集、目标点附近存在障碍或多个车辆共享相近通道时,传统势场模型容易出现引力和斥力相互抵消、车辆在障碍边缘往返震荡、目标不可达以及多车通道争用等问题,影响集群任务的稳定执行。

现有研究主要从斥力函数修正、随机扰动、一致性控制、模型预测控制以及群体协同约束等方面改进人工势场法。这些方法在特定场景中能够缓解局部极小和路径抖动,但仍存在三方面不足:其一,单纯局部势场缺少全局拓扑信息,容易把车辆引入不可行通道;其二,目标邻域的引力通常随距离减小而衰减,若目标附近存在障碍,斥力可能在终端阶段占据主导;其三,多

车之间若缺少显式协作约束,容易发生拥挤、队形破坏或局部碰撞风险。为此,本文提出一种融合A*全局引导、动态权重、协作势场和正交扰动的无人车集群避障方法,在保持人工势场实时性的同时提高全局可达性和队形协同能力。

本文的主要贡献体现在三个方面。第一,将A*路径节点引入局部势场,使车辆在宏观上沿可行走廊运动,降低由障碍拓扑造成的误导。第二,针对目标附近障碍导致的终端震荡,设计距离相关动态权重,使吸引力在接近目标时不再简单衰减。第三,将车间弹性协作力与正交扰动相结合,使集群既能保持队形,又能在局部极小状态下获得脱困方向。上述机制均可嵌入常规势场计算流程,具有较好的实时实现基础。

1 问题描述

设二维工作空间中存在静态障碍物集合、目标点以及由N辆无人车构成的集群。每辆车采用质点运动模型,位置和速度受环境边界、安全距离和最大速度约束。集群任务是在从初始区域到达目标区域的过程中,避开障碍物和其他车辆,同时尽量维持期望队形。该问题可分解为三个目标:一是全局可达,即车辆应获

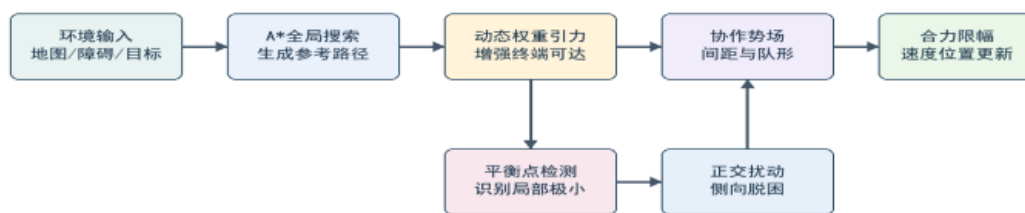


图1 A*引导与协作势场融合避障框架

得绕开大尺度障碍拓扑的可行引导；二是局部安全，即车辆在运动过程中始终与障碍和邻车保持安全距离；三是编队协同，即车辆在绕障、转向和终端收敛过程中保持可接受的相对位置偏差。

传统人工势场法将目标点视为吸引源、障碍物视为排斥源，并由二者合力决定车辆运动方向。该方法适合实时控制，但其作用范围主要局限于局部几何关系。当车辆处于引力与斥力大小接近、方向相反的位置时，合力可能趋近于零，车辆进入局部极小；当目标邻近障碍时，终端引力衰减导致目标不可达；当多车采用相同势场策略时，车辆可能同时选择同一势场下降通道，形成拥挤和队形失稳。因此，需要在传统势场模型之外增加全局路径引导、终端吸引增强和车间协作约束。

从控制目标看，理想避障策略应同时满足稳定性、连续性和可扩展性。稳定性要求车辆不因局部势场突变而产生长时间振荡；连续性要求速度和航向变化平滑，避免执行机构频繁饱和；可扩展性要求方法在车辆数量增加时仍能通过局部邻接关系完成协同。本文将上述要求转化为力场设计原则：全局引导提供低频方向约束，障碍斥力提供高频安全响应，动态权重修正终端收敛趋势，协作势场负责多车空间分配。

2 集群避障方法

本文方法由四个模块组成：A*全局引导模块、动态权重引力模块、协作势场模块和正交扰动模块。A*全局引导用于生成可行路径与局部参考方向，以弥补局部势场缺少全局拓扑信息的不足；动态权重引力在目标邻域增强吸引作用，从而缓解目标不可达和终端震荡问题；协作势场约束车间距离并恢复队形，以降低通道争用和队形失稳风险；正交扰动则在平衡状态提供侧向脱困分量，有效突破局部极小和势场滞止。各模块协同配合，共同提升路径规划的整体性能与鲁棒性。

(1) A*搜索在栅格化或节点化地图上生成从起点到目标的全局可行路径，为车辆提供宏观运动方向和阶段性参考点。局部控制阶段不再仅以目标点直线方向作为吸引方向，而是结合A*路径的局部切向或下一参考节点，使车辆沿可行走廊运动，从而降低进入封闭势场区域的概率。在具体实现中，全局路径并不直接替代局部控制，而是作为势场目标的动态参考。当车辆距离当前参考节点小于给定阈值时，参考点自动切换到下一节点；当局部障碍造成短时偏航时，A*路径仍为车辆提供回归方向。这样既避免了全局路径过度离散带来的控制突变，也避免了单一目标吸引导致的穿障倾向。

(2) 动态权重引力模块用于解决目标邻域吸引不足问题。在传统模型中，引力常随车辆接近目标而减小；若目标附近存在障

碍，斥力可能使车辆在目标外围形成震荡。本文根据车辆与目标的距离设计非线性权重：车辆远离目标时，权重保持平缓，避免过度加速；车辆进入目标邻域后，权重自适应增大，使吸引项能够抵消局部斥力干扰，保持合力方向朝向目标。这一设计使车辆在终端阶段具有更强的收敛趋势，同时不破坏远距离运动的平滑性。

障碍斥力仍采用有限作用半径思想：当车辆位于障碍影响范围外时，斥力为零；进入影响范围后，斥力随距离减小而增强，并沿远离障碍物的法向方向作用。为减少斥力突变，可对障碍距离进行平滑处理，或对合力进行限幅。动态权重与斥力共同作用时，远离目标阶段优先保障安全绕障，接近目标阶段则提高目标吸引的相对权重，使车辆不被障碍边界长期阻滞。

(3) 协作势场模块用于描述车辆间相互作用。对任意相邻车辆，若实际距离小于期望间距，则产生排斥作用以避免碰撞；若实际距离大于期望间距，则产生吸引作用以防止队形离散。该作用可理解为弹性约束，能够使集群在绕障时进行有限伸缩和侧向错位，并在通过障碍后恢复预设编队。为避免终端阶段车辆因保持队形而难以同时收敛，方法设置编队释放阈值：当编队中心接近目标区域时，逐步减弱协作约束，使车辆平滑解编并完成最终到达。

协作势场并非要求队形刚性不变，而是允许在安全范围内弹性变形。对于窄通道或障碍密集区，车辆可以按相对位置自动产生避让顺序；当外部障碍影响减弱后，弹性项推动队形回到期望几何关系。与集中式编队规划相比，该机制只依赖邻近车辆状态，通信负担较低，适合集群规模变化的场景。

(4) 正交扰动模块用于处理局部极小和平衡滞止。算法实时计算车辆运动方向与障碍斥力方向的一致性，并结合合力大小判断是否进入势场平衡状态。当一致性系数超过阈值且合力接近零时，系统判定车辆可能被困。此时根据当前运动方向构造正交扰动分量，为车辆提供短时侧向运动趋势；若参考轴与运动方向接近平行，则切换参考轴以保证扰动有效。扰动仅在触发条件满足时加入，因此不会长期改变全局路径，只用于帮助车辆跨出局部平衡环带。

3 算法流程

算法流程如下：首先读取环境地图、障碍物位置、车辆初始状态和目标点信息；其次执行A*搜索，得到全局参考路径；然后在每个控制周期内，依次计算路径引导力、障碍斥力、动态权重修正项、协作编队力和必要的正交扰动动力；再对合力进行限幅处理，更新车辆速度和位置；最后判断车辆是否进入目标区域，若全部车辆满足到达条件，则结束任务。该流程形成了“全局规划—局部势场—协作调节—扰动脱困”的闭环结构，既保留了人工势场法

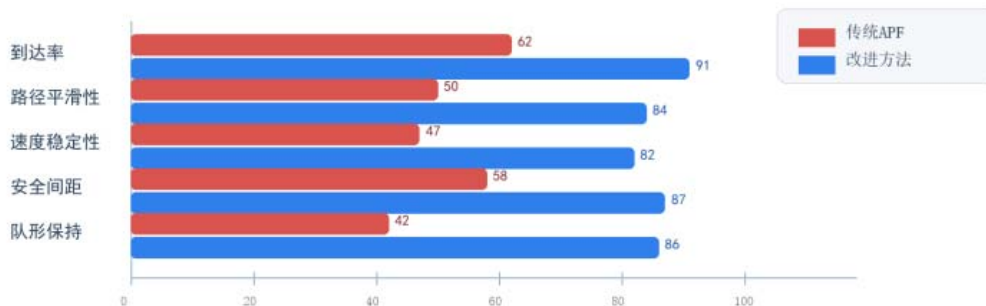


图2 传统人工势场法与改进方法性能对比示意

的实时响应能力,又补足了其全局性和群体协同性不足。

为保证工程实现稳定,算法还需设置三个关键阈值:障碍影响半径用于限定斥力作用范围,平衡点判定阈值用于触发扰动,编队释放阈值用于终端阶段解编。上述阈值可根据车辆尺寸、最大速度和控制周期进行整定。若环境地图更新频率较高,可周期性重规划A*路径;若地图变化较小,则只需在偏离全局路径过大或局部绕障失败时重新规划,从而降低计算负担。

4 仿真实验与分析

为验证方法有效性,在 $12\text{m} \times 12\text{m}$ 二维区域内进行仿真实验。场景中设置若干圆形静态障碍物,半径约为 0.4m ;三辆无人车初始位置分别为 $(1, 1)$ 、 $(1, 2)$ 和 $(2, 2)$,目标点为 $(10, 10)$,最大速度为 0.5m/s ,初始队形为三角形。实验围绕三类典型问题展开:局部平衡点、目标邻近障碍和编队绕障,传统APF方法与改进方法对比如图2所示。

在局部平衡点实验中,传统人工势场法下车辆接近障碍密集区后,部分个体的引力与斥力相互抵消,轨迹在障碍边缘出现徘徊,速度曲线呈周期性波动。加入正交扰动后,车辆在检测到平衡状态时获得侧向脱困分量,能够越过原有势场平衡环带并继续沿全局引导方向运动,轨迹连续性明显改善。

在目标邻近障碍实验中,传统势场模型因终端吸引力减弱,车辆在目标外围容易出现微幅往返和震荡收敛。引入动态权重后,目标邻域的吸引项被增强,合力方向更加稳定地指向目标,车辆能够穿越障碍稠密带并完成收敛。该结果说明动态权重可以有效缓解目标不可达问题。

在编队绕障实验中,若不引入协作势场,三辆车倾向于选择相近通道,容易造成路径重合和车间距离剧烈变化。加入协作势场后,车辆在狭窄区域形成有限错位,通过障碍后逐步恢复三角队形;在终端阶段,编队释放机制减少了不必要的相互牵制。综合来看,所提方法在路径平滑性、速度稳定性和队形保持方面均优于传统人工势场法。

从评价指标看,可重点关注到达率、平均路径长度、速度波动幅值、最小安全距离和平均队形误差。传统人工势场法在局部平衡点附近会延长路径并增加速度波动;动态权重可降低终端震荡,正交扰动可提高到达率,协作势场则主要改善最小车间距离和队形误差。由于本文实验仍以二维静态障碍为主,所得结果主要验证方法机理,后续还需在动态障碍、传感误差和通信受

限条件下进一步评估鲁棒性。

5 结论

本文针对无人车集群避障中的局部极小、目标不可达、路径震荡和编队失稳问题,提出一种基于A*引导与协作势场的改进人工势场方法。该方法利用A*搜索提供全局可行引导,通过动态权重增强目标邻域可达性,借助协作势场维持车间安全距离和队形结构,并以正交扰动帮助车辆脱离局部平衡。仿真结果表明,该方法能够在多障碍环境中改善集群轨迹连续性、速度稳定性和编队协同性。与复杂优化类方法相比,本文方法结构较为清晰,计算过程以局部力场叠加为主,便于嵌入实时控制程序。其不足在于参数阈值仍需结合场景整定,对高速动态障碍和非完整约束车辆的适应性尚未充分验证。后续研究可进一步考虑动态障碍预测、通信延迟、执行器约束以及实车平台验证,以提高方法在复杂真实环境中的适用性。

[参考文献]

- [1]马飞,刘耀,张亮,等.无人机集群编队及其避障控制关键技术研究[J].系统仿真学报,2022,34(10):2241-2250.
- [2]张鹏飞,何印,马振博,等.无人机集群协同控制技术综述[J].兵器装备工程学报,2024,45(4):1-9.
- [3]张旭东,李少波,李传江,等.无人机集群综述:技术、挑战与未来[J].无线电工程,2023,53(7):1487-1501.
- [4]Zheng L, Yu W J, Li G X, et al. Particle swarm algorithm path planning method for mobile robots based on artificial potential fields[J]. Sensors, 2023, 23(13):6082-6088.
- [5]He Z B, Chu X M, Liu C G, et al. A model predictive artificial potential field based ship motion planning method considering COLREGs for complex encounter scenarios[J]. ISA Transactions, 2023, 134:58-65.
- [6]张钟元,戴炜,李光明,等.基于改进人工势场和一致性协议的协同避障算法[J].计算机应用,2023,43(8):2644-2650.
- [7]黎少东,李杰,李辉.基于改进人工势场法的多无人机协同路径规划[J].计算机系统应用,2025,34(9):200-212.
- [8]艾高航,李春涛.基于视野和自适应半径的无人机集群避障算法[J].系统仿真学报,2024,36(12):2945-2959.

作者简介:

张钢(1992—),男,汉族,山东潍坊人,博士,讲师,研究方向为兵器科学。