

丁思敏, 王刚, 孙立辉. 多智能体系统编队控制技术研究综述[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(10): 50-55. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.241006

## 多智能体系统编队控制技术研究综述

丁思敏<sup>1\*</sup>, 王刚<sup>2\*</sup>, 孙立辉<sup>1</sup>

(1 吉林化工学院 信息与控制工程学院, 吉林 吉林 132022; 2 吉林交通职业技术学院 机械工程学院, 长春 130015)

**摘要:** 随着智能体技术的快速发展, 单智能体由于自身限制已无法满足需求的发展, 多智能体编队控制技术在实际应用中的作用日益凸显, 目前已成为人工智能控制领域的研究热点。本文根据国内外学者多年来的研究成果, 首先, 介绍了多智能体系统的研究背景和意义; 其次, 从编队形成控制和避障控制两个方向出发, 详细阐述了各种常见算法的核心思想, 分析了各算法的优劣性和发展趋势; 然后, 总结了常用控制算法, 并针对算法劣势分析了融合算法的可行性; 最后, 针对现有控制算法问题, 展望未来对智能体编队的研究方向, 提供可行的解决方案。

**关键词:** 多智能体系统; 编队形成控制; 避障控制; 全局规划避障; 局部规划避障

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)10-0050-06

## Review of formation control techniques for multi-agent systems

DING Simin<sup>1\*</sup>, WANG Gang<sup>2\*</sup>, SUN Lihui<sup>1</sup>

(1 School of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, Jilin, China;

2 School of Mechanical Engineering, Jilin Communications Polytechnic, Changchun 130015, China)

**Abstract:** With the rapid development of intelligent agent technology, single agent is no longer able to meet the development needs due to their own limitations. The role of multi-agent formation control technology in practical applications becomes increasingly prominent, and has become a research hotspot in the field of artificial intelligence control. Based on the research achievements of domestic and foreign scholars for many years, this paper firstly introduces the research background and significance of multi-agent system; secondly, starting from the two directions of formation control and obstacle avoidance control, the core ideas of various common algorithms are introduced in detail, meanwhile the advantages, disadvantages and development trends of the algorithms are analyzed; Then, the common control algorithms are summarized by using the list, and the feasibility of the fusion algorithm is analyzed according to the disadvantages of the algorithm. Finally, in view of the existing control algorithm problems, the future research direction of agent formation is prospected, and the feasible solution is provided.

**Key words:** multi-agent system; formation control; obstacle avoidance control; global planning for obstacle avoidance; local planning for obstacle avoidance

## 0 引言

随着科技的进步和研究的深入, 机器人、无人机等智能体技术得到了飞速的发展。单智能体虽然在特定条件下可以执行基本的任务, 但是由于自身软硬件条件的限制, 无法满足复杂且具有挑战性的任务。分析可知, 当面临复杂任务时, 多智能体协同编队可以将总任务拆分, 各单智能体可携带不同的设

备独立完成系统分配的任务, 解决单智能体时间、空间等层面的弊端, 提高任务执行效率<sup>[1]</sup>。

多智能体编队控制是指多智能体在执行任务过程中, 为适应环境变化和任务需求而形成特定几何构型的控制技术<sup>[2]</sup>。多智能体编队控制技术可分为编队形成、编队队形保持、编队避障以及编队队形重构等技术方向, 其中编队形成是指多智能体按任务需要从初始状态转化成一定形状的过程; 编队避

基金项目: 吉林省自然科学基金(20220101138JC, YDZJ202301ZYTS420); 吉林省教育厅科研项目(JJKH20241142KJ)。

作者简介: 丁思敏(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 多智能体编队控制; 孙立辉(1976-), 男, 教授, 主要研究方向: 多智能体编队控制, 智能控制系统。

通讯作者: 王刚(1981-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 多智能体编队控制, 图像与视频处理, 机器人与系统控制。Email: Wgzh198081@163.com(共同第一作者)

收稿日期: 2024-05-11

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

障是指编队成员在执行任务中必须能够避开障碍物的同时避免编队成员间的碰撞<sup>[3-5]</sup>。本文从多智能体编队形成控制和编队避障控制技术出发,比较分析各算法的优劣性,并对多智能体编队控制进行总结和展望,为后续多智能体编队控制研究提供切实可行的思路 and 方案。

## 1 编队形成控制技术分析

多智能体编队形成控制需要编队各成员根据其他成员的情况,适时调整自身速度、航向和位姿以满足编队系统协调运动完成指定任务。目前,主流的编队形成控制算法包括领航者-跟随者法、虚拟结构法、基于行为法和强化学习法<sup>[6]</sup>。

### 1.1 领航者-跟随者法

领航者-跟随者法<sup>[7-9]</sup>(Leader-Follower)应用最为广泛,其算法核心思想是:在多智能体系统中,某个或某几个智能体被指定为领航者,其他智能体被指定为跟随者,领航者的运动位置、速度等信息通过约定的通信方式传递给跟随者,跟随者根据相对于领航者的位置误差与速度误差进行编队形成控制<sup>[10]</sup>。该方法优劣鲜明,优势体现在:领航者在多智能体编队系统中起主导作用,仅需确定领航者的运动状态就可以控制整个系统的行为,相比于其他算法明显简化了控制过程;其劣势体现在:领航者和跟随者的信息传递是单向的,领航者获取跟随者的反馈信息,领航者和跟随者相对独立,一旦领航者发生错误行为或者无法与跟随者正常通讯,整个系统就会出现控制紊乱存在出现崩溃的风险<sup>[11]</sup>。为解决上述问题,国内外学者从不同的角度对领航者-跟随者算法进行改进优化。李娟等学者<sup>[12]</sup>在路径跟踪的控制基础上,设计了一种编队协调控制器,将领航者与跟随者的位置误差控制转化为跟随者的速度误差控制,使跟随者能够快速到达期望位置,提高编队系统的工作效率。周俊杰等学者<sup>[13]</sup>将传统领航者-跟随者法与基于行为法相结合,前者确定跟随者期望位置,后者使跟随者向期望点运动,提升了编队系统的高效性和稳定性。Zhou 等学者<sup>[14]</sup>研究了基于半全局领航者-跟随者共识方法的多智能体系统的队列控制问题,利用低增益反馈设计技术,构造了分布式静态控制协议和分布式自适应控制协议,有效地解决了传统领航者-跟随者方法鲁棒性低的问题。薛多锐<sup>[15]</sup>在虚拟领航者<sup>[16-17]</sup>思想的基础上,结合欧拉-拉格朗日误差系统无源性提出了一种基于领航者-跟随者的制导-控制结构多 AUV

编队轨迹跟踪控制方法,将领航者视为虚拟参考点参与编队控制,不会影响整个系统,明显提高了编队系统的可靠性。

### 1.2 虚拟结构法

虚拟结构法<sup>[18-20]</sup>于 1997 年由 Lewis 提出,这是将智能体编队看成一个虚拟刚体,各编队成员被设定在该虚拟刚体固定的位置上,即智能体之间相对位置没有变化,使得整个智能体系统保持固定的队形运动<sup>[21]</sup>。该方法相比传统领航者-跟随者算法存在系统信息的反馈控制,因而有着较高的系统稳定性。但该方法将编队系统看成一个不可变化的刚体结构,在布设了障碍物的环境中,缺乏灵活性和队形变化性,易造成系统崩溃。为此,江涛<sup>[22]</sup>提出一种虚拟结构法和虚拟领航者相结合的编队控制方法,使用队形向量实现了编队系统的队形变换。吕永申等学者<sup>[23]</sup>将人工势场法与虚拟结构法相结合,通过设计特定人工势场使得编队沿虚拟结构点的轨迹向目标点运行,完成编队任务。符小卫等学者<sup>[24]</sup>在切换拓扑网络中采用一种新的柔性协同策略来构建分布式虚拟环境下基于合作博弈的无人智能体系统,较好地解决了虚拟结构法下编队系统避障困难的问题。

### 1.3 基于行为法

基于行为法<sup>[25]</sup>中,将智能体编队的行为分解为跟踪、避障、队形保持等,在不同环境下根据行为权重的大小来选择行为方式,使得每个智能体都具备根据环境变化协同其他编队成员完成编队任务的能力<sup>[26]</sup>。基于行为法是一种存在信息反馈的,易得出控制方案的编队控制方法,相比于其他方法更有利于实现实时控制。同时,智能体个体兼顾多种行为规则,可实现多种行为功能。但对于行为准则的模糊定义也增加了系统不稳定的因素,复杂环境下无法达到控制预期。基于鸽群行为,段海滨等学者<sup>[27]</sup>提出了一种编队控制算法,可利用图论和势场函数对智能体中的主从关系进行定义,实现了对无人机编队系统紧密飞行的任务控制。周子为等学者<sup>[28]</sup>设计了一种基于雁群行为的编队变拓扑重构方法,利用雁群上洗气流节约体力的优点,以较少的能源损耗完成编队控制任务。

### 1.4 强化学习法

强化学习法<sup>[29-31]</sup>的主要思想是在传感器获取环境信息后,通过神经网络处理并分析这些信息,再通过反馈机制不断地优化智能体的行为,使得智能体的行为决策是当前环境下最好的。该类算法可实现对编队的精确控制或对大规模集群的持续稳定控

制,但需要一定数量和规模的智能体集群作为数据集进行训练,需要一定的样本数量做支撑。洪志鹰<sup>[32]</sup>针对智能体在不同场景下编队的问题,通过分散执行、集中训练和强化学习的概念使得智能体能够完成编队以及队形切换等复杂任务,验证了强化学习在智能体编队方向的有效性和优越性。Xu 等学者<sup>[33]</sup>提出使用重力感知深度  $Q$  网络执行特定条件下编队避障任务,与传统方法相比,该方法具有优秀的鲁棒性和效率。

## 2 编队避障控制技术

编队避障是编队任务执行过程中常需解决的问题,主要包括环境障碍物避障和编队内部防碰的问题。避障算法可分为全局规划避障算法和局部规划避障算法。

### 2.1 全局规划避障算法

全局规划避障算法从全局角度出发,其主要思想是寻找一条从起点出发,避开途中所有障碍物,到达目标点的安全路径。该类算法主要适用于运行环境已知且实时性要求高的系统,障碍物对象多为静态障碍物。全局规划避障算法主要包括  $A^*$  搜索算法、粒子群算法、遗传算法和快速扩展随机树算法等<sup>[34]</sup>。

#### 2.1.1 $A^*$ 搜索算法

1968 年, Nils 等学者在 Dijkstra 算法<sup>[35]</sup>的基础上引入启发式函数,提出了  $A^*$  搜索算法<sup>[36-37]</sup>。算法通过评价当前节点到下一节点的代价,选择一条成本最低的最优路径。该算法相比于 Dijkstra 算法引入了启发式信息进行辅助决策,不需遍历整个地图即可快速搜索出一条起点到目标点的最优路径,减小了时间损耗。但代价函数的选择对算法的优劣影响较大,如果选择不合理,算法可能输出一条非最优解,适得其反。张新艳等学者<sup>[38]</sup>在传统的  $A^*$  搜索算法基础上进一步引入时间因子,并结合时间窗与优先级策略,使得智能体编队系统可以在避免内部碰撞冲突的情况下,减少转弯次数,获得代价最小的规划路径。Chen 等学者<sup>[39]</sup>结合自适应扩展方法和方向约束最优节点扩展方法,提出了一种方向约束自适应扩展双向  $A$  算法,相比传统  $A^*$  搜索算法,获得了更优的搜索时间和更短的路径长度。

#### 2.1.2 粒子群算法

粒子群算法<sup>[37,40]</sup>于 1995 年被 Eberhart 和 Kennedy 提出,模仿鸟类的信息交流,该算法的基本原理是通过个体与群体的信息共享,以当前寻获的最优值来寻获全局最优值。与其他启发式算法相

比,该算法易于实现且不易陷于局部最优点,但收敛速度比较慢,所得到的规划路径欠平滑。为解决上述问题,彭慕蓉等学者<sup>[41]</sup>引入线性递减惯性权重改进粒子群算法,进而提出时间乘误差绝对值积分准则与误差占比相结合的变化适应度函数,有效地提高了粒子群算法的收敛速度。Song 等学者<sup>[42]</sup>在传统粒子群算法的基础上使用高次贝塞尔曲线以及自适应分数阶速度来增加智能体的运动路径的平滑性,减少代价损耗。

#### 2.1.3 遗传算法

基于自然进化和遗传学原理,遗传算法<sup>[43-44]</sup>在 20 世纪 70 年代由 John Holland 提出。在智能体避障过程中,智能体的移动路径和路径的节点分别可以看做染色体和基因,通过模拟自然的进化和遗传过程,选择交叉和变异等操作,产生下一代潜在解或优化解,逐步优化最终的结果,实现搜索优化。遗传算法引入生物学思想,优点表现为搜索能力强,通过变异机制避免陷入局部最优点。但这种算法策略较为复杂,需要设定大量参数,耗费巨大的计算资源。为解决上述问题, Liu 等学者<sup>[45]</sup>考虑以最大限度减少智能体任务时间和编队个体数量,提出了多自适应遗传算法,得到了智能体调度领域中最好的遗传算法。Zhou 等学者<sup>[46]</sup>针对智能体运行空间狭小的问题,将拥塞系数引入自适应函数,在较少编队间冲突的同时,也降低了系统在拥塞条件下的计算难度,减少能源消耗。

#### 2.1.4 快速搜索随机树算法

2017 年, Steven 提出了快速搜索随机树算法<sup>[47-48]</sup> (Rapidly-exploring Random Tree, RRT), 其核心思想是通过在状态空间中构建一棵随机树来搜索最优路径,这里节点表示状态空间中的不同位置,边表示连接这些位置的运动轨迹。RRT 算法能够有效处理多种类型的环境和运动约束,在复杂环境下也能找到较优路径,具有较好的自适应性和鲁棒性。但该算法随机性较大,并非得到当前条件下的最优路径。陈敏等学者<sup>[49]</sup>将最短路径作为距离度量引入 RRT 算法,明显加快规划速度并缩短了路径距离,减少了能源和时间损耗。Guo 等学者<sup>[50]</sup>提出的反馈快速搜索树算法具有数据驱动和反馈模块,可以约束随机数的生长并进行偏离调整,控制了算法过度随机。王乐乐等学者<sup>[51]</sup>同时考虑多智能体协同避障和空间建模等问题,改进 RRT 算法,实现了多智能体编队协同避障。



2.2 局部规划避障算法

不同于全局规划避障算法,局部规划避障算法不需要知道起点和目标点的信息,智能体通过自身配备的环境感知器探测周围障碍物,根据当前环境情况实时避障,选择当前环境下的最优路径。常用的局部规划避障包括人工势场法和动态窗口法<sup>[52]</sup>。

2.2.1 人工势场法

人工势场法<sup>[53-55]</sup> (Artificial Potential Field approach, APF) 于 1986 年由 Khatib 提出。该方法在空间内构造一个人工势场,智能体在运行过程中同时受到目标点的引力作用和障碍物的斥力作用,智能体朝向所受的合力方向运行,到达目标点。APF 算法原理和结构简单,计算量小,可实现实时避障。但该算法路径震荡不圆滑,且容易陷入局部最优解导致目标不可达的问题。针对上述问题,王迪<sup>[56]</sup>提出了一种模糊势场的思想,将虚拟目标点和有限状态机相结合,改进后的 APF 算法能够适应多种复杂环境,智能体一定程度上可避免陷入局部最优点。桂雪琪等学者<sup>[57]</sup>为解决局部最小值问题,将极限环与人工势场相结合构造避障速度引导项,避免了集群避障分群困难、避障犹豫的问题。为更好地解决多智能体编队控制避障,杨洋等学者<sup>[58]</sup>将人工势场法与虚拟领航者算法相结合,避免了编队系统在避障过程中路径震荡,能耗加大的问题,同时也加快了编队系统趋于稳定的时间。

2.2.2 动态窗口法

动态窗口法<sup>[59-60]</sup> (Dynamic Window Approach, DWA) 的原理是智能体根据当前时刻下环境情况进行采样,通过评价函数对采样点进行评价,选择下一时刻最为合适的动作状态。DWA 算法具有一定的采样限制,且只会考虑安全的轨迹,轨迹空间小,计算复杂度低。但该算法仍存在以下问题:

(1) 采样窗口比较保守,导致智能体在障碍物和目标点附近运行缓慢。

(2) 传统的评价函数机理存在一定的缺陷,导致一些更优的轨迹被评价函数舍弃掉。

针对以上问题,王旭扬等学者<sup>[61]</sup>修改传统评价函数,用动态参考点替代末端参考点,参与采样点评价,引入辐射函数指导智能体后续运行轨迹,优化和丰富了评价函数机理,使智能体运行轨迹更接近理想轨迹,速度状态更平稳。针对多智能体编队避障问题,常路等学者<sup>[62]</sup>将领航者-跟随者法与基于行为法相结合,改进传统 DWA 算法的评价函数,高效实现了多智能体编队系统的安全避障与队形保持。

3 编队控制算法对比分析

多智能体编队控制是多智能体系统对周围环境的感知与适应、系统内部成员的协调与合作实现的,不同的编队控制算法具有不同的优势和劣势。根据以上分析,本文将主流编队形成算法与避障算法的优劣进行归纳总结,详见表 1 和表 2。

表 1 常见编队形成算法优劣汇总表

Table 1 A summary table of the advantages and disadvantages of common formations algorithms

算法	优势	劣势
领航者-跟随者法	结构简单,扩展性好	过于依赖领导者,鲁棒性低
虚拟结构法	具有反馈机制,系统稳定性高	系统灵活性较低
基于行为法	编队成员可进行多种行为	行为准则的模糊性增加了系统的不稳定性
强化学习法	可实现对编队的精确控制	需要一定数量的集群进行训练

表 2 常见避障算法优劣汇总表

Table 2 A summary table of the advantages and disadvantages of common obstacle avoidance algorithms

算法	优势	劣势
全局规划避障算法		
A* 搜索算法	计算方式简单,规划路径短	计算量大,拐点较多
粒子群算法	易于实现且不易陷于局部最优点	收敛速度比较慢
遗传算法	渐进优化性强,克服局部最优	运算速率低,内存占用大
快速搜索随机树算法	具有较好的自适应性和鲁棒性	随机性较大,并非得到当前条件下的最优路径
局部规划避障算法		
人工势场法	原理结构简单,计算量小	算法路径震荡不圆滑,且容易陷入局部最优解
动态窗口法	轨迹空间小,计算复杂度低	规划路径非最优

综上所述,不同的算法在各自应用领域具有不同的优劣性。迄今为止,不少学者致力于将不同的算法进行结合,提升控制算法的能力。Kownacki 等学

者<sup>[63]</sup>将领航者-跟随者算法、虚拟结构法以及基于行为法相结合,使得编队成员之间的通信效率明显提高,提升了编队系统的稳定性和鲁棒性。也有研究将

DWA 算法和 A\* 搜索算法相结合,扩展 DWA 算法的评价函数,有效提升了算法的避障能力和效率,解决了差分轮式移动机器人的编队避障问题。因此,在实际编队控制过程中,适时地将不同的算法进行融合,取长补短,可以使多智能体系统完成更高难度的编队形成和避障任务。

## 4 结束语

本文根据多年来国内外学者对多智能体编队控制技术的研究成果,从编队形成控制和避障控制的方向出发,阐述了关键的编队控制技术,分析了各算法的优劣性。未来还需进一步深入研究,解决复杂的编队控制问题。在理论研究层面,可针对以下问题进行分析解决:

(1) 三维空间编队控制研究。现有编队控制技术通常将智能体看做二维空间上的一个点,很少考虑三维空间内的编队控制。相比二维空间,三维空间更具复杂性,现有多数研究成果扩展到三维空间将无法发挥作用。未来,针对三维空间内的编队控制问题将是一个非常值得关注的研究方向。

(2) 异构多智能体编队控制研究。现有研究多只针对具有相同运动学模型的同构多智能体编队问题,实际上,多智能体编队中的各成员需要分工完成不同的任务,相同的运动模型已无法满足要求,异构多智能体编队控制研究将是一个重要的研究方向。

(3) 动态障碍避障算法研究。现有智能体避障算法多针对静态障碍物,静态障碍物处于静止状态,不会干扰智能体避障。而动态障碍物处于运动状态,甚至会攻击多智能体编队,需要各智能体适时调整避障策略,安全高效地完成避障任务。现有研究无法直接解决动态避障问题,需要进行后续的研究探索。

(4) 密集障碍物避障算法研究。多智能体编队的密集障碍物的避障问题存在各种不可避免的干扰,甚至短时间需要拆分编队、切换通信拓扑,易造成编队系统混乱,导致任务失败。对于密集障碍物的编队避障问题将是亟需解决的问题。

## 参考文献

[1] 周磊磊,康宇航,万兵. 多无人机协同编队控制的研究现状与发展前景[J]. 飞航导弹,2016(1):78-83.  
[2] 沈林成,牛铁峰,朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2013.  
[3] 赵攀. 基于虚拟领航员的无人机编队与避障控制系统设计[D]. 成都:电子科技大学,2021.  
[4] 陈亚青,张智豪,李哲. 无人机避障方法研究进展[J]. 自动化技术与应用,2020,39(12):1-6.

[5] 王梦健. 未知环境下基于强化学习的编队避障机制研究[D]. 南京:南京邮电大学,2023.  
[6] 杨洋,王征,胡致远,等. 无人水下航行器编队控制研究现状及技术综述[J]. 舰船电子工程,2022,42(2):1-7,94.  
[7] CHEN J, SUN D, YANG J, et al. Leader-follower formation control of multiple non-holonomic mobile robots incorporating a receding-horizon scheme[J]. International Journal of Robotics Research, 2010, 29(6):727-747.  
[8] GUO Jing, LIN Zhiyun, CAO Ming, et al. Adaptive leader-follower formation control for autonomous mobile robots[C]//Proceedings of the 2010 American Control Conference. Baltimore, USA; IEEE,2010:6822-6827.  
[9] LI Xiaohai, XIAO Jizong, CAI Zijun. Backstepping based multiple mobile robots formation control[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, Canada;IEEE, 2005:887-892.  
[10] ROUT R, SUBUDHI B. A backstepping approach for the formation control of multiple autonomous underwater vehicles using a leader-follower strategy[J]. Journal of Marine Engineering and Technology, 2016, 15(1):38-46.  
[11] 师五喜,王栋伟,李宝全. 多机器人领航-跟随型编队控制[J]. 天津工业大学学报,2018,37(2):72-78.  
[12] 李娟,袁锐锐,张宏瀚. 基于领航跟随法的多 AUV 编队控制算法研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(6):237-246.  
[13] 周俊杰,史志富. 基于改进领航-跟随法的无人机集群编队飞行控制方法研究[C]//2019年(第四届)中国航空科学技术大会论文集. 沈阳:中国航空学会,2019:755-765.  
[14] ZHOU Panpan, CHEN B M. Semi-global leader-following consensus-based formation flight of unmanned aerial vehicles[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(1):31-43.  
[15] 薛多锐. 基于虚拟领航者的多 AUV 混杂编队控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.  
[16] LEONARD N E, FIORELLI E. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups[C]//Proceedings of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228). Orlando, USA;IEEE,2001,3:2968-2973.  
[17] 刘建华. 基于虚拟领航者的多 UUV 协调编队控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.  
[18] LEWIS M A, TAN K. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. Autonomous Robots, 1997, 4(4):387-403.  
[19] BEARD R W, LAW J, HADAEGH F Y. A coordination architecture for spacecraft formation control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(6):777-790.  
[20] LAWTON J R T, BEARD R W, YOUNG B J. A decentralized approach to formation maneuvers[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation,2003,19(6):933-941.  
[21] 袁健,唐功友. 采用一致性算法与虚拟结构的多自主水下航行器编队控制[J]. 智能系统学报,2011,6(3):248-253.  
[22] 江涛. UUV 编队模糊控制方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018.  
[23] 吕永申,刘力嘉,杨雪榕,等. 人工势场与虚拟结构相结合的无人集群编队控制[J]. 飞行力学,2019,37(3):43-47.  
[24] 符小卫,潘静. 无人机集群规避动态障碍物的分布式队形控制[J]. 系统工程与电子技术,2022,44(2):529-537.  
[25] BALCH T, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multi-robot teams[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6):926-939.

- [26] 雷艳敏,冯志彬,宋继红. 基于行为的多机器人编队控制的仿真研究[J]. 长春大学学报,2008,18(4):40-44.
- [27] 段海滨,范彦铭. 基于鸽群行为机制的多无人机自主编队[J]. 控制理论与应用,2015,32(10):1298-1304.
- [28] 周子为,段海滨,范彦铭. 仿雁群行为机制的多无人机紧密编队[J]. 中国科学:技术科学,2017,47(3):230-238.
- [29] WANG Chao, WANG Jian, ZHANG Xudong. A deep reinforcement learning approach to flocking and navigation of UAVs in large-scale complex environments [C]//IEEE Global Conference on Signal and Information Processing. Anaheim, USA; IEEE,2018:1228-1232.
- [30] SALIMI M, PASQUER P. Deep reinforcement learning for flocking control of UAVs in complex environments[C]//2021 6<sup>th</sup> International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). Dalian,China; ICRAE,2021:344-352.
- [31] YAN Chao, WANG Chang, XIANG Xiaojia, et al. Deep reinforcement learning of collision-free flocking policies for multiple fixed-wing UAVs using local situation maps [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021,18(2):1260-1270.
- [32] 洪志鹰. 基于深度强化学习的多智能体编队问题研究[D]. 南京:东南大学,2020.
- [33] XU Z, WANG Q, KONG F, et al. A gravity aware DQN based UAV path planning algorithm [C]//2022 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). Guangzhou,China; IEEE,2022:1215-1220.
- [34] 方洋旺,欧阳楚月,符文星,等. 无人机编队避障与控制技术研究现状及发展趋势[J]. 无人系统技术,2019,2(2):32-38.
- [35] DIJKSTRA E W, HEISE W, PERLIS A J, et al. ALGOL sub-committee report-extensions [J]. Communication of the ACM, 1959, 2(9):24.
- [36] SZCZERBA R J, GLICKSTEIN I S, TERNULLO N, et al. Robust algorithm for realtime route planning [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2000,36(3):869-878.
- [37] LOONG W Y, LONG L Z, HUN L C. A star path following mobile robot [C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Mechatronics. Kuala Lumpur, Malaysia; IEEE, 2011:1-7.
- [38] 张新艳,邹亚圣. 基于改进 A\* 算法的自动导引车无碰撞路径规划[J]. 系统工程理论与实践,2021,41(1):240-246.
- [39] CHEN Jiqing, LI Mingyu, SU Yousheng, et al. Direction constraints adaptive extended bidirectional A\* algorithm based on random two-dimensional map environments [J]. Robotics and Autonomous Systems,2023,165:104430.
- [40] FANG Qun, XU Qing. 3D route planning for UAV based on improved PSO algorithm [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2017,35(1):66-73.
- [41] 彭慕蓉,肖本贤. 采用粒子群算法的 AGV 路径跟踪控制研究[J]. 机械设计与制造,2020(6):20-23.
- [42] SONG Baoye, WANG Zidong, ZOU Lei. An improved PSO algorithm for smooth path planning of mobile robots using continuous high-degree Bezier curve! [J]. Applied Soft Computing,2021,100:106960.
- [43] MA Y H, ZHOU D Y. A chaotic genetic algorithm for UAV path planning[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006,24(4):468-471.
- [44] YANG Xue. Mobile Robot Path Planning with a non-dominated sorting genetic algorithm [J]. Applied Sciences, 2018, 8(11):2253.
- [45] LIU Yubang, JI Shouwen, SU Zengrong, et al. Multi-objective AGV scheduling in an automatic sorting system of an unmanned (intelligent) warehouse by using two adaptive genetic algorithms and a multi-adaptive genetic algorithm [J]. PloS One, 2019, 14(12):e0226161.
- [46] ZHOU W, QIN S, ZHOU C. AGV Path planning based on improved adaptive genetic algorithm [C]//International Conference on Artificial Intelligence and Computer Information Technology (AICIT). Yichang, China; dblp,2022:1-4.
- [47] URMSOON C, SIMMONS R. Approaches for heuristically biasing RRT growth [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, USA; IEEE,2003,2:1178-1183.
- [48] 路引,郭昱津,王道波. 基于 RRT 算法的某型无人机航路在线规划设计[J]. 兵器装备工程学报,2016,37(12):18-21.
- [49] 陈敏,李笑,武交峰,等. 基于距离度量学习的智能车辆路径规划[J]. 计算机仿真,2020,37(7):163-167.
- [50] GOU Jun, XIA Wei, HU Xiaoxuan, et al. Feedback RRT algorithm for UAV path planning in a hostile environment [J]. Computers & Industrial Engineering,2022,174:108771.
- [51] 王乐乐,睦泽智,蒲志强,等. 一种改进 RRT 的多机器人编队路径规划算法[J]. 电子学报,2020,48(11):2138-2145.
- [52] 李晓旭,马兴录,王先鹏. 移动机器人路径规划算法综述[J]. 计算机测量与控制,2022,30(7):9-19.
- [53] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance system for manipulators and mobile robots [J]. The International Journal of Robotics Research,1986,5(1):90-98.
- [54] SFEIR J, SAAD M, SALIAH H. An improved artificial potential field approach to real-time mobile robot path planning in an unknown environment [C]//IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE). Montreal, Canada; IEEE,2011:208-213.
- [55] CHEN G X, ZHANG Z A, HUANG X G, et al. Research on path planning of improved artificial potential field method in unknown environments [J]. Journal of Mechanics and Electronics, 2021, 39(5):74-80.
- [56] 王迪. 基于人工势场法的移动机器人局部路径规划[D]. 淄博:山东理工大学,2021.
- [57] 桂雪琪,李春涛. 基于视野和速度引导的无人机集群避障算法[J]. 系统仿真学报,2024,36(3):545-554.
- [58] 杨洋,王征,周帅,等. 改进虚拟领航者在多 AUV 队形控制中的应用[J]. 电光与控制,2023,30(2):19-23,30.
- [59] LIN H X, XIANG D, OUYANG J, et al. Review of research on path planning algorithms for mobile robots [J]. Computer Engineering and Applications,2021,57(18):38-48.
- [60] KISS D, TEVESZ G. Advanced dynamic window based navigation approach using model predictive control [C]//International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics. Miedzyzdroje, Poland; IEEE,2012:148-153.
- [61] 王旭扬,梁志伟,高翔,等. 基于改进 DWA 算法的足球机器人局部轨迹规划[J]. 国外电子测量技术,2023,42(8):1-9.
- [62] 常路,单梁. 未知环境下基于改进 DWA 的多机器人编队控制[J]. 控制与决策,2022,37(10):2524-2534.
- [63] KOWNACKI C. Multi-UAV fight using virtual structure combined with behavioral approach [J]. Acta Mechanica et Automatica, 2016,10(2):92-99.