

群体智能算法在无人机路径规划中的应用

王艳辉*, 王冠洲, 何才壮

西京学院计算机学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年12月18日; 录用日期: 2025年1月15日; 发布日期: 2025年1月23日

摘要

随着无人机技术的快速发展, 路径规划作为其核心技术, 面临着复杂多变飞行环境和多样化任务需求的挑战。然而, 传统路径规划算法在特定场景下虽表现出色, 但计算量大、规划时间长且难以适应动态变化, 限制了无人机的广泛应用。针对此, 群体智能算法凭借其全局搜索能力强、鲁棒性好、易于并行化及广泛适用性, 成为无人机路径规划领域的研究热点。本文主要探讨了几种典型的群体智能算法在无人机路径规划中的应用, 并对无人机路径规划的未来研究方向进行展望。

关键词

路径规划, 群体智能, 无人机

Application of Swarm Intelligence Algorithms in Drone Path Planning

Yanhui Wang*, Guanzhou Wang, Caizhuang He

School of Computer Science, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 18th, 2024; accepted: Jan. 15th, 2025; published: Jan. 23rd, 2025

Abstract

With the rapid development of drone technology, path planning, as its core technology, faces the challenges of complex and variable flight environments and diverse task requirements. However, traditional path planning algorithms, although performing well in specific scenarios, have high computational complexity, long planning time, and difficulty in adapting to dynamic changes, limiting the widespread application of drones. In response to this, swarm intelligence algorithms, which are characterized by their strong global search ability, good robustness, easy parallelization, and

*通讯作者。

文章引用: 王艳辉, 王冠洲, 何才壮. 群体智能算法在无人机路径规划中的应用[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(1): 21-27. DOI: 10.12677/csa.2025.151003

wide applicability, have become a research hotspot in the field of drone path planning. This paper mainly explores the application of several typical swarm intelligence algorithms in drone path planning and looks forward to the future research directions of drone path planning.

Keywords

Path Planning, Swarm Intelligence, Drones

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科技的持续进步,无人机技术已成为现代军事与民用领域中不可或缺的关键技术。无人机,特别是无人机群,以其高度的自主性、灵活性、高效性和成本效益,在各类复杂多变的任务执行中展现出了巨大的应用潜力。在军事领域,无人机群被广泛应用于救援搜索、监视侦察等任务;而在民用领域,它们则在气候监测、环境研究等方面发挥着重要作用。然而,无人机群在执行任务时,如何高效、安全地进行路径规划,成为了一个亟待解决的核心问题。

无人机路径规划,即在复杂约束条件下,为每架无人机寻找一条从起始点至目标点的最优或次最优飞行路径。这一问题的复杂性在于,它不仅要考虑无人机的飞行性能、环境障碍、能量消耗等物理约束,还要兼顾任务需求、时间窗口、协同作战等战术要求。传统的路径规划算法,如A* [1]算法、D* [2]算法等,在面对大规模无人机群和动态复杂环境时,往往难以保证计算效率、收敛速度和路径质量。因此,探索新的路径规划算法,以应对无人机群规模的不断扩大和任务场景的日益动态化,成为了当前研究的热点。

在这一背景下,群体智能算法以其独特的优势,为无人机路径规划提供了新的解决方案。群体智能算法[3],如粒子群优化算法(PSO)、蚁群优化算法(ACO)和人工蜂群算法(ABC)等,源于对自然界生物种群智能行为的深入研究。这些算法通过模拟生物种群中的个体行为和交换机制,能够在复杂多变的环境中展现出强大的全局搜索能力和良好的适应性。近年来,这些经典的群体智能算法已被广泛应用于无人机路径规划中,并取得了显著成效。

此外,随着研究的不断深入,一些新兴的群体智能算法,如狼群算法、鸽群算法、萤火虫算法和人工鱼群算法等,也在无人机路径规划领域得到了初步的探索与应用。这些算法在保持群体智能算法基本特性的基础上,通过引入新的搜索策略和机制,进一步提高了路径规划的效率和质量。

然而,尽管群体智能算法在无人机路径规划方面已展现出巨大的应用潜力,但仍存在诸多挑战和问题。因此,本文旨在深入分析无人机路径规划的关键问题,系统综述当前主要的群体智能算法的原理及其在无人机路径规划中的应用现状,并在此基础上,探讨群体智能算法未来的研究趋势。

2. 无人机路径规划及现状分析

无人机路径规划是无人机自主飞行和任务执行中的关键环节,旨在寻找一条从起始点至目标点、速率连续且满足无人机运动约束的可飞行路径。这一过程涉及环境感知、初始路径搜索以及轨迹优化等多个步骤,对无人机的安全性和任务执行效率至关重要。

2.1. 无人机路径规划关键步骤

2.1.1. 环境信息感知

环境信息感知是无人机路径规划的起点，也是群体智能算法得以应用的基础。在这一阶段，无人机通过传感器网络实时采集周围环境数据，包括地形地貌、障碍物分布以及天气条件等。这些信息被整合到全局或局部的环境地图中，为后续路径规划提供精确可靠的依据。对于群体智能算法而言，环境地图的准确性和完整性至关重要，因为它直接影响到算法的搜索效率和路径质量。因此，在构建环境地图时，需充分考虑无人机的飞行特性和任务需求，采用合适的栅格化方法或空间建模技术，确保环境信息的精确表达和高效利用。

2.1.2. 初始可飞行路径搜索

在环境信息感知的基础上，无人机需要搜索一条从起始点到目标点的初始可飞行路径。这一步骤是群体智能算法发挥优势的关键环节。不同于传统的路径规划算法，群体智能算法通过模拟自然生态系统中的生物种群机制，如遗传算法中的基因重组和变异、蚁群算法中的信息素更新等，实现路径的协同探索 and 智能优化。在无人机路径规划中，群体智能算法能够自适应地调整搜索策略，避免陷入局部最优解，从而找到更加优质和鲁棒的初始路径。此外，通过引入并行计算和分布式处理技术，群体智能算法能够显著提高路径搜索的效率和可扩展性，满足大规模无人机群协同作战的需求。

2.1.3. 轨迹优化

初始可飞行路径虽然为无人机提供了基本的导航方向，但往往未考虑无人机的实际飞行特性和动力学约束。因此，轨迹优化成为提升无人机飞行性能的关键步骤。在这一阶段，群体智能算法通过引入先进的轨迹优化模型和算法，如混合整数线性规划(MILP)无碰撞模型和 DMOC 模型等，对初始路径进行平滑处理和动力学约束优化。通过不断迭代和调整，群体智能算法能够找到符合无人机飞行特性的最优轨迹，实现飞行路径的精确控制和高效执行。同时，轨迹优化还能够有效降低无人机的能耗和飞行时间，提高任务执行的效率和成功率。

综上所述，群体智能算法在无人机路径规划中的应用，不仅提高了路径规划的智能化和自动化水平，还为无人机自主导航和协同作战提供了新的解决方案。通过深入解析环境信息感知、初始可飞行路径搜索以及轨迹优化三个关键步骤，我们可以更好地理解群体智能算法在无人机路径规划中的优势和潜力，为未来的研究和应用提供有益的参考和借鉴。

2.2. 无人机路径规划研究现状

在无人机路径规划领域，传统的路径规划算法，如 A 算法、D 算法、RRT 算法以及人工势场法等。这些算法基于确定性模型，在静态和可控环境中展现出强大的路径求解能力，为无人机从起始点到目标点提供了有效的寻路策略。随着无人机技术的快速发展，学者们不断对传统算法进行改进与组合，以适应无人机在飞行效率、避障性能等方面的需求。例如，郭莹婷[4]等人针对无人机传统 RRT 算法存在的随机性强、生长步长固定等局限性，巧妙地融合了引力场理论与动态步长调整策略，有效提升了算法的收敛速度和时间效率，实现了路径的渐近最优性。Kang, T.-W.等人[5]则提出了一种创新的 RRT 后处理方法，该方法在保持与原算法相近规划时间的同时，显著缩短了所得路径的长度。文献[6]介绍了一种改进的人工势场法，该方法通过引入动态调整系数的概念，显著增强了无人机在复杂环境中的避障安全性。此外，该方法还对无人机的飞行路径进行了精细的平滑处理，有效规避了路径规划中常见的局部最小值问题。文献[7]则设计了一种针对三维复杂飞行环境的无人机路径规划算法，该算法综合考虑了飞行高度和航线长度等因素，并引入了权重因子进行优化。同时，算法采用了变步长搜索策略，进一步提高了计

算效率。Ma Jinhong 等人[8]在研究中将人工势场法与 RRT 算法相结合,不仅优化了算法的避障功能,还加入了动力学约束条件,从而实现了路径的更加平滑和有效避免局部最优解的问题。此后,众多研究者开始关注路径形状的优化,旨在更好地满足无人机的特殊能源需求。为了克服 RRT 算法在寻找最优路径方面的不足,KARAMA 等人[9]提出了 RRT 算法,该算法能够生成更接近最优的路径,但相应地,其计算复杂度较高且收敛速度较慢。JEONG 等人[10]在此基础上提出了 Q-RRT 算法,通过引入三角不等性原理来优化重新选择父节点与重布线过程,从而提高了算法的收敛性。J.D. Gammell 等人[11]则进一步提出了 Informed RRT*算法,该算法相较于传统 RRT 算法具有更高的采样效率和更快的收敛速度,但在处理大规模或复杂问题时,其运行时间可能会有所增加。最后,Yaoming ZHOU 等人提出了一种独特的仿生三维空间路径规划算法,该算法灵感来源于植物生长的基本机制,包括向光性、负向地性和分枝性等特性[12],为无人机路径规划领域带来了新的研究视角和思路。

尽管传统路径规划算法在无人机领域取得了显著成就,但其固有的局限性不容忽视。首先,传统算法大多基于静态环境假设,对于动态障碍物的适应性和实时性要求难以满足。其次,随着问题规模的扩大和复杂度的增加,传统算法的计算效率和收敛速度往往受到限制,难以在有限时间内找到最优路径。此外,传统算法在路径平滑性、能源效率优化以及全局最优性方面仍存在不足,容易陷入局部最优解。因此,为了克服这些挑战,研究者们开始探索将群体智能算法应用于无人机路径规划领域。群体智能算法,如遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等,以其强大的全局搜索能力、鲁棒性和自适应性,为无人机路径规划提供了新的解决方案。这些算法通过模拟自然界中生物群体的行为,能够更灵活地应对复杂多变的环境,实现更高效、更智能的路径规划。群体智能算法的引入,不仅有望解决传统算法在动态环境、实时性要求以及能源效率优化等方面的难题,还为无人机路径规划技术的发展开辟了新的研究方向和思路。

3. 群体智能算法

群体智能算法是一类模拟自然界中群体行为(如蚁群、鸟群、狼群等)的优化算法。这些算法通过群体内个体间的信息交流和协作,共同寻找问题的最优解。在无人机路径规划中,群体智能算法能够自适应地调整搜索策略,避免陷入局部最优解,从而找到更加优质和鲁棒的飞行路径。本文主要介绍几种典型的群体智能算法,并通过表 1 总结分析几种算法的优劣。

(1) 灰狼优化算法(GWO)

灰狼优化算法由 Mirjalili 等人于 2014 年提出,模拟灰狼群体的捕食行为。该算法具有较强的收敛性能和简单的结构,通过模拟灰狼社会等级制度和集体狩猎行为,实现局部寻优与全局搜索之间的平衡。然而,灰狼优化算法也存在着易早熟收敛、面对复杂问题时收敛精度不高的问题。为了克服这些缺点,研究者们提出了多种改进策略,如引入动态权重因子、自适应调整搜索步长等。

(2) 粒子群优化算法(PSO)

粒子群优化算法模拟鸟群或鱼群中的群体协作行为,每个粒子代表一个潜在解。该算法简单易实现,收敛速度快,但容易陷入局部最优解。为了解决这个问题,研究者们提出了多种改进策略,如引入模拟退火算法的突跳概率策略、动态调整惯性权重和学习因子等,以提高全局搜索能力。

(3) 遗传算法(GA)

遗传算法由 John Holland 于 1975 年提出,模拟自然界中的遗传和进化过程。该算法通过选择、交叉和变异等操作,对种群中的个体进行优化,从而找到最优解。遗传算法具有全局搜索能力强、易于与其他算法结合等优点,但存在收敛速度慢、早熟收敛等问题。为了改进遗传算法的性能,研究者们提出了多种策略。例如,引入精英保留策略,以保留种群中的优秀个体,防止其被淘汰;采用自适应交叉和变

异概率,根据个体的适应度动态调整交叉和变异操作的强度;以及结合其他优化算法,如模拟退火算法、粒子群优化算法等,形成混合遗传算法,以提高搜索效率和精度。

(4) 差分进化算法(DE)

差分进化算法由 Storn 和 Price 于 1995 年提出,是一种基于种群的全局优化算法。该算法通过差分向量的叠加来更新种群中的个体,具有较强的全局搜索能力和收敛性。差分进化算法简单易实现,适用于连续优化问题,但存在参数设置敏感、计算量大等问题。为了优化差分进化算法的性能,研究者们提出了多种改进策略。例如,引入动态权重因子,以平衡全局搜索和局部搜索的能力;采用自适应调整搜索步长,根据个体的适应度动态调整搜索步长的大小;以及结合其他优化算法,如遗传算法、粒子群优化算法等,形成混合差分进化算法,以提高搜索效率和精度。

(5) 麻雀优化算法(SSA)

麻雀优化算法是一种新兴的群体智能优化算法,模拟麻雀觅食的行为。该算法通过模拟麻雀之间的协作和竞争关系,对种群中的个体进行优化,从而找到最优解。麻雀优化算法具有全局搜索能力强、收敛速度快等优点,但存在参数设置复杂、易陷入局部最优等问题。为了改进麻雀优化算法的性能,研究者们提出了多种策略。例如,引入多样性保持机制,以增加种群中个体的多样性,防止算法过早收敛;采用自适应调整搜索策略,根据个体的适应度动态调整搜索方向和步长;以及结合其他优化算法,如遗传算法、差分进化算法等,形成混合麻雀优化算法,以提高搜索效率和精度。同时,研究者们还在不断探索和优化麻雀优化算法的参数设置和算法结构,以进一步提高其性能和应用范围。

Table 1. Analysis of pros and cons of swarm intelligence algorithms

表 1. 群体智能算法的优劣分析表

算法	优点	缺点
灰狼优化算法	收敛性能强,结构简单,需要调节的参数少	易早熟收敛,面对复杂问题时收敛精度不高
粒子群优化算法	收敛速度快,易于实现	容易陷入局部最优解
遗传算法	全局搜索能力强,鲁棒性好	收敛速度慢,早熟收敛,参数设置复杂
差分进化算法	收敛性好,易于实现	计算量大,参数调整困难,局部搜索能力较弱
麻雀优化算法	全局搜索能力强,收敛速度快,稳定性好	参数设置复杂,适用于特定问题,计算资源消耗大

通过仿真对比实验,设置两种不同的环境,一是简单路径,障碍物较少的路径规划环境;另一个是复杂路径,随机生成的复杂障碍物路径规划环境。通过对比不同算法的收敛速度、路径效率以及适应性,评估各算法在路径规划问题中的表现。实验结果如图 1 简单环境对比分析结果和图 2 复杂环境对比分析结果所示。

实验结果显示,算法均能实现路径优化,但其收敛效果和优化效率存在显著差异。

在简单路径规划环境中,障碍较少,各算法的性能差异显著。差分进化算法以其快速的收敛速度脱颖而出,紧随其后的是灰狼优化算法。粒子群算法、麻雀优化算法和遗传算法则依次排在后面。在能耗优化方面,差分进化算法和灰狼优化算法同样展现出了优势,它们能够在保证路径有效性的同时,最大限度地减少能耗。

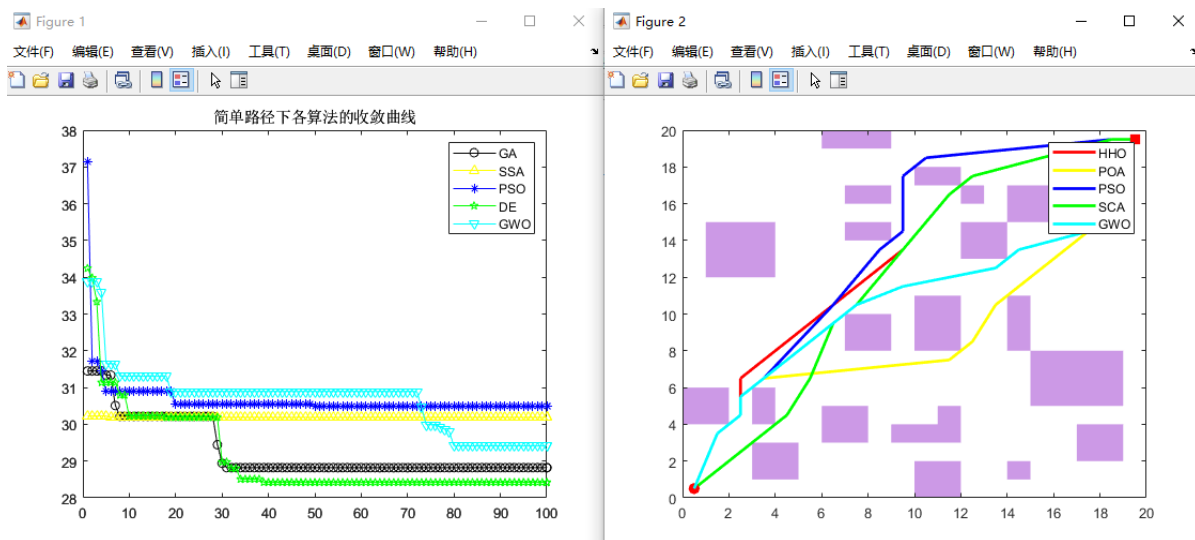


Figure 1. Comparison and analysis results of simple environment

图 1. 简单环境对比分析结果

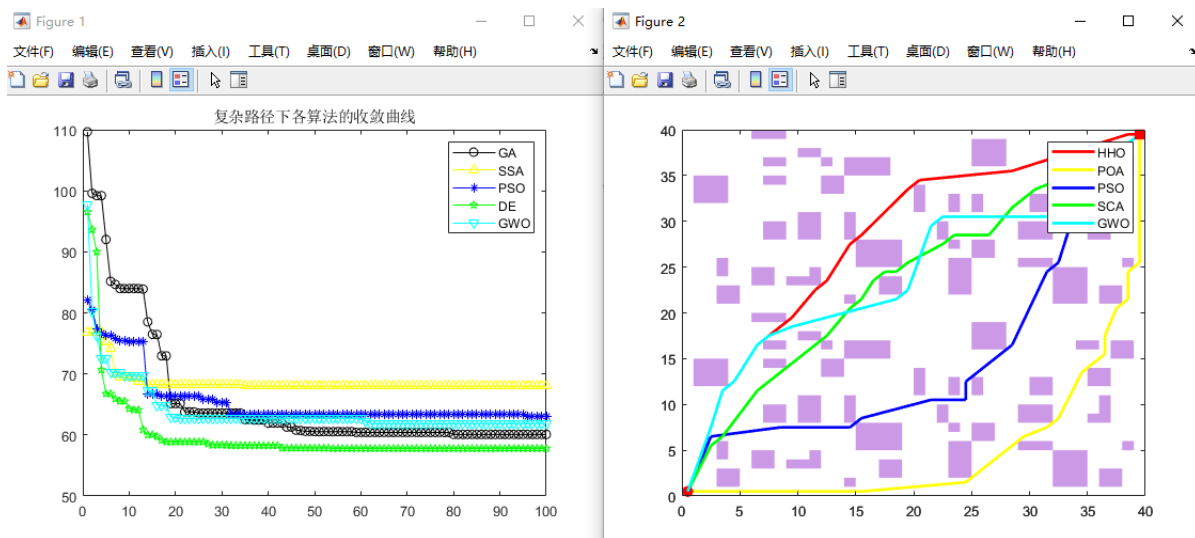


Figure 2. Comparison and analysis results of complex environment

图 2. 复杂环境对比分析结果

当环境变得复杂，即路径规划中包含随机生成的复杂障碍物时，各算法的表现出现了变化。此时，麻雀优化算法和粒子群优化算法凭借其强大的全局搜索能力和对复杂环境的适应性，成为了收敛速度最快的算法。而灰狼优化算法在复杂环境中的收敛速度相对较慢。在能耗优化方面，麻雀优化算法和粒子群优化算法同样表现出色，它们能够巧妙地规避障碍物，确保路径的平滑性和低能耗。

实验不仅验证了五种群体智能算法在无人机路径规划中的性能差异，更为未来的算法研究和应用提供了宝贵的实验依据和理论基础。在简单路径规划中，差分进化算法和灰狼优化算法的优异表现表明，对于障碍较少的场景，这两种算法能够高效地完成路径规划任务，同时保持较低的能耗。而在复杂路径规划中，麻雀优化算法和粒子群优化算法的出色表现则揭示了它们在处理复杂障碍物时的强大适应性。这些结论为无人机路径规划算法的选择和优化提供了重要参考。此外，实验结果还表明，群体智能算法

在无人机路径规划领域具有广阔的应用前景，值得进一步深入研究和探索。

基于实验结果，混合灰狼优化算法[13]的优化策略能够更加高效地规划无人机的路径。混合灰狼优化算法旨在结合其他算法的优点，提高灰狼优化算法在复杂路径规划中的性能。具体策略可以将麻雀优化算法的全局搜索能力和粒子群优化算法的障碍物规避策略融入灰狼优化算法中，以增强其全局探索能力和对复杂环境的适应性。同时，还可以借鉴差分进化算法的差分变异机制和粒子群优化算法的速度更新策略，优化灰狼个体的位置更新方式，提高算法的收敛速度和稳定性。此外，为了保持种群的多样性，避免早熟收敛，还可以引入精英保留策略和自适应变异策略。通过这些改进措施，保证混合灰狼优化算法能够在复杂路径规划环境中展现出更强大的性能，为无人机路径规划领域提供更加高效和可靠的解决方案。这些策略改进不仅为灰狼优化算法的优化提供了新思路，也为其他群体智能算法的研究和应用提供了有益的参考。

4. 未来展望

群体智能算法在无人机路径规划领域具有广阔的应用前景。通过模拟生物群体的协同行为和自适应能力，这些算法可以增强无人机在复杂环境中的路径规划能力。然而，每种算法都有其优缺点，需要根据具体的应用场景和问题特点选择合适的算法。未来，随着人工智能和机器学习技术的不断发展，群体智能算法将实现更高水平的智能化和自主化。通过不断改进算法和引入新的优化策略，未来的无人机将能够在更复杂的环境中自适应飞行，并在多无人机体系中实现更精确的目标识别与跟踪。这将为各领域的任务完成带来革命性的变化，推动行业进一步向智能化和高效化发展。

参考文献

- [1] Chen, X., Chen, X.M. and Zhang, J. (2014) The Dynamic Path Planning of UAV Based on A* Algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, **494**, 1094-1097. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.494-495.1094>
- [2] 张飞, 白伟, 乔耀华, 等. 基于改进 D*算法的无人机室内路径规划[J]. 智能系统学报, 2019, 14(4): 662-669.
- [3] 雷耀麟, 丁文锐, 李雅, 等. 群体智能支撑的无人机航路规划应用综述[J]. 无线电工程, 2023, 53(7): 1509-1519.
- [4] 郭莹婷, 林川. 基于无人机航路规划问题的 RRT 算法综合改进[J]. 电子设计工程, 2022, 30(20): 56-60.
- [5] Kang, T., Kang, J. and Jung, J. (2021) A Bidirectional Interpolation Method for Post-Processing in Sampling-Based Robot Path Planning. *Sensors*, **21**, Article 7425. <https://doi.org/10.3390/s21217425>
- [6] BinKai, Q., Mingqiu, L., Yang, Y. and XiYang, W. (2021) Research on UAV Path Planning Obstacle Avoidance Algorithm Based on Improved Artificial Potential Field Method. *Journal of Physics: Conference Series*, **1948**, Article ID: 012060. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1948/1/012060>
- [7] 马云红, 张恒, 齐乐融, 等. 基于改进 A*算法的三维无人机路径规划[J]. 电光与控制, 2019, 26(10): 22-25.
- [8] Ma, J., Luo, J., Li, H. and Hu, J. (2022) Research on Path Planning of Vehicle Dynamic Obstacle Avoidance Based on Improved RRT Algorithm. *Sixth International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2021)*, Chongqing, 14-16 May 2021, 768-776. <https://doi.org/10.1117/12.2624006>
- [9] Karaman, S. and Frazzoli, E. (2011) Sampling-Based Algorithms for Optimal Motion Planning. *The International Journal of Robotics Research*, **30**, 846-894. <https://doi.org/10.1177/0278364911406761>
- [10] Jeong, I., Lee, S. and Kim, J. (2019) Quick-RRT*: Triangular Inequality-Based Implementation of RRT* with Improved Initial Solution and Convergence Rate. *Expert Systems with Applications*, **123**, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.032>
- [11] Gammell, J.D., Srinivasa, S.S. and Barfoot, T.D. (2014) Informed RRT*: Optimal Sampling-Based Path Planning Focused via Direct Sampling of an Admissible Ellipsoidal Heuristic. 2014 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, 14-18 September 2014, 2998-3004. <https://doi.org/10.1109/iros.2014.6942976>
- [12] Zhou, Y., Su, Y., Xie, A. and Kong, L. (2021) A Newly Bio-Inspired Path Planning Algorithm for Autonomous Obstacle Avoidance of UAV. *Chinese Journal of Aeronautics*, **34**, 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.12.018>
- [13] 王海群, 邓金铭, 张怡, 等. 基于改进混合灰狼优化算法的无人机三维路径规划[J]. 无线电工程, 2024, 54(4): 918-927.