 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i8.7030

A Review of Full Coverage Path Planning Algorithms Based on Metaheuristic Algorithm

Jiahao He Ting Yang*

Xuzhou Medical University, Xuzhou, Jiangsu, 221000, China

Abstract

The Fully Coverage Path Planning (CCPP) algorithm currently serves as a core technology in autonomous driving, cleaning robots, and agricultural production. This paper provides a systematic review of CCPP algorithms based on meta-heuristic approaches, aiming to organize existing meta-heuristic algorithms and outline their main principles along with improved variants. First, it clarifies the current status of fully coverage path planning algorithms based on meta-heuristics, categorizing them into two types: conventional meta-heuristics and enhanced meta-heuristics. Second, it focuses on analyzing the advantages and limitations of genetic algorithms and particle swarm optimization, while examining improvement strategies for ant colony optimization, firefly optimization, and grey wolf optimization. Finally, it looks forward to future enhancements of CCPP algorithms based on meta-heuristics, providing references for subsequent theoretical research and practical applications of CCPP algorithms.

Keywords

Meta-heuristic algorithms; Fully coverage path planning algorithms; Genetic algorithms; Robot mobility; Simulation algorithms

基于元启发式算法的全覆盖路径规划算法综述

何佳濠 杨婷*

徐州医科大学，中国 · 江苏 徐州 221000

摘 要

全覆盖路径规划(CCPP)算法目前是自动驾驶、清洁机器人以及农业生产等领域的核心技术。本文对基于元启发式算法的CCPP算法研究进行系统性综述，旨在整理现有的元启发式算法，并概述其主要原理和改进算法。首先，明确基于元启发式算法的全覆盖路径规划算法的现状，将全覆盖路径规划算法分为常见的元启发式算法以及改进后的元启发式算法两类。其次，重点分析了遗传算法、粒子群算法的利与弊，蚁群算法、萤火虫算法、灰狼算法的改进方案。最后展望未来对基于元启发式算法的CCPP算法做出进一步改善，为后续CCPP算法的理论研究及实际应用提供参考。

关键词

元启发式算法；全覆盖路径规划算法；遗传算法；机器人移动；模拟算法

1 引言

全覆盖路径规划 (Complete Coverage Path Planning) 算法，简称 CCPP 算法，其主要是一类针对包括地面机器人在内的移动机器人决策算法，它的核心目标是在给定的二维或三维工作空间中，规划出一条可使机器人遍历所有可达区域或指定目标区域的途径。元启发式算法通过模拟自然现象或生物行为，为解决复杂全覆盖路径规划问题提供了有效途径。文献 [1] 指出目前的路径规划算法大致分为四类即传统算法、基于采样的方法、类元启发式算法、人工智能算法。

【作者简介】何佳濠（2005–），男，中国江苏南通人，本科，从事全覆盖路径规划算法研究。

【通讯作者】杨婷（1985–），女，中国山东日照人，博士，讲师，从事路径规划算法研究。

常见的元启发式算法如遗传算法 (Genetic Algorithm)、粒子群算法 (Particle Swarm Optimization)、蚁群算法 (Ant Colony Optimization) 等借助群体智能协同寻找全局最优解，对全覆盖路径规划展现出良好的应用潜力。本文旨在系统综述基于元启发式算法的全覆盖路径规划算法研究进展，对不同算法的特点与优势进行分类阐述，展望该领域未来的发展方向，为相关研究提供参考。

2 基于常见元启发式算法的全覆盖路径规划研究

2.1 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithm,GA) 是由美国的 John holland 于 20 世纪 70 年代提出，是一种基于生物进化理论的元启发式优化算法，其核心思想是模拟自然界中生物“物竞天择、适者生存”的进化过程，通过模拟基因的选择、交叉、变异等操作，在解空间中迭代搜索最优解。算法流程如图 1[2] 所示；

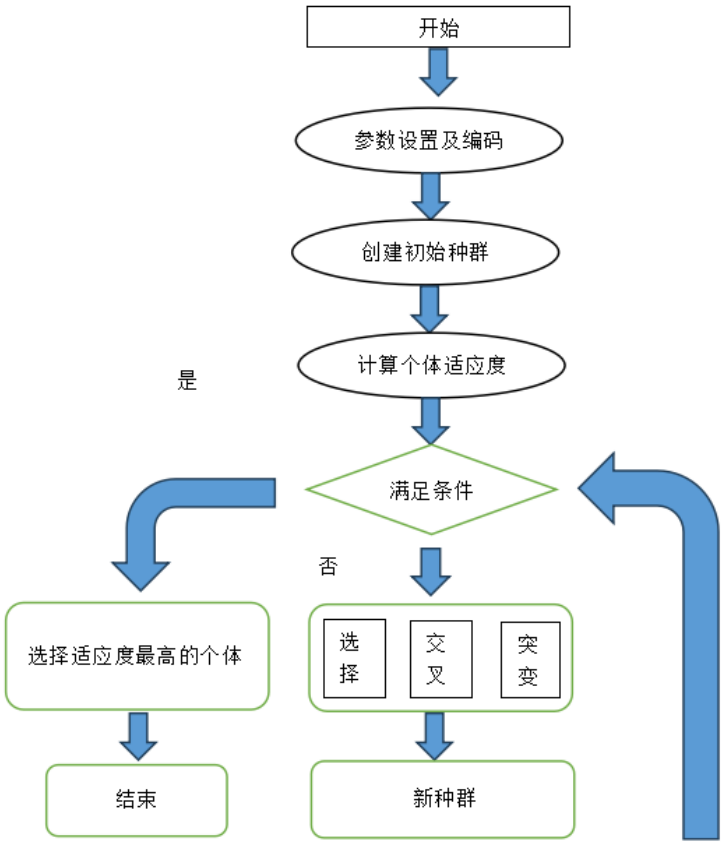


图 1 遗传算法流程图

此算法全局搜索能力强，在复杂函数优化中，传统算法可能陷入局部最优，而遗传算法通过选择、交叉、变异等操作，能在解空间中广泛探索，更容易找到全局最优解。

2.2 粒子群算法

粒子群算法（Particle Swarm Optimization，简称 PSO）由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种基于群体智能的优化算法，灵感来源于鸟群觅食时的群体行为。其核心思想是把优化问题的每个可能解看作一个“粒子”，多个粒子组成一个群体在解空间中进行搜索。粒子通过两种信息调整自己的运动：一是自身历史找到的最优解，二是整个群体找到的最优解，不断迭代逼近问题的最优解。Han 等在文献 [3] 中提出了一些优化粒子群算法的想法，对于粒子群算法结构简单、前期收敛速度快及全局并行寻优能力好等优点，将粒子群分群，丰富了搜索方式的多样性，减少了算法陷入局部最优的可能性。

3 基于改进元启发式算法的全覆盖路径规划研究

3.1 蚁群算法

蚁群算法（Ant Colony Optimization, ACO）是一种受自然界蚂蚁觅食行为启发的启发式优化算法，由意大利学者 Marco Dorigo 于 1992 年提出。其核心思想是模拟蚂蚁在寻找食物时会在路径上留下信息素，路径越优，信息素浓度越高，同时，信息素会随时间自然挥发，避免算法陷入局部最优。其机理如 Wang 在文献 [4] 中的图 2 所示；

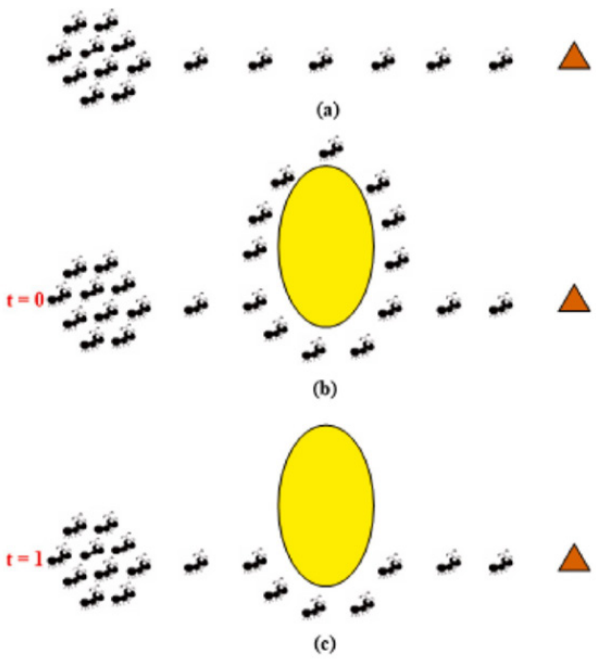


图 2 蚁群行为演示图

蚂蚁可以感知被释放的信息素簇，并在进食时会表现出一定的智能行为，如图所示，蚂蚁在碰到障碍物时会随机爬到路径的任意一侧，经过一段时间后，由于短路径上的信息素比长路径上的信息素多，蚂蚁可以根据信息素强度的不

同，找到一条到达食物的最短路径。Guo 等在文献 [5] 中提到了一种反向学习思想应用于改进蚁群算法中，使 ACO 算法不再局限于局部最优解，避免了过早收敛并提高了其性能。Yuan 在文献 [6] 中提出，在进行蚁群算法时，信息素在每次迭代结束后会进行更新，致使蚁群来不及利用迭代过程中产生的最优路径，从而影响后续蚂蚁的路径选择质量，其使用奖罚机制来对信息素更新策略进行改进，从而提高了算法收敛度。

3.2 萤火虫算法

萤火虫算法（Firefly Algorithm, FA）是一种基于自然界萤火虫发光行为的启发式优化算法，由英国剑桥大学学者 Xin-She Yang 于 2008 年提出。其核心思想是模拟萤火虫通过发光吸引同伴的自然现象，将优化问题中的潜在解比作萤火虫，通过“亮度”和“吸引力”两个关键指标引导搜索过程，其亮度对应解的质量，亮度越高表示解越优。Guo 等在文献 [7] 中提出了一种反馈式步长萤火虫算法（FBFA），其主要采用了 Tent 映射处理初始种群，改善初始种群分布不均的问题，利用反馈式步长策略，在算法运行的不同阶段动态调整步长因子，并引入标准柯西分布对陷入局部最优的个体进行扰动，使个体有逃出局部最优的机会。Wei 在文献 [8] 中提出了一种基于 GA 与 FA 的混合算法 GFA 针对萤火虫算法在路径规划中存在收敛速度过慢、容易陷入局部最优解等问题，将局部最优的萤火虫视为一个群体在遗传算法中进行二次优化，并通过一些改进方法来防止算法过早收敛，从而得到最优的萤火虫个体。

3.3 灰狼算法

灰狼优化算法（Grey Wolf Optimizer，GWO）是一种受灰狼群体捕食行为为启发的元启发式优化算法，由 Seyedali 和 Mirjalili 等人于 2014 年提出，该算法凭借着结构简洁性、低参数依赖性等特征在全覆盖路径规划等领域展现出良好的全局寻优能力而被广泛关注。其核心思想是模拟灰狼群体社会的等级结构和狩猎机制，设灰狼群体分为 α、β、γ、δ4 个等级，如图 3[9] 所示狼群 α 领导狼群 β、γ、δ，狼群 β 领导狼群 γ、δ，依次往下，根据这 4 类等级，狼群在进行路径规划过程中进行的搜索、避障、寻求路径最优解，这 4 类狼群寻找出的最优解也被称为 4 种最优解 [10]。该算法缺点在于局部开发能力较差，算法后期种群多样性下降，易陷入局部最优解。对此 Guo 等人在文献 [11] 中由于在复杂环境下灰狼优化算法可能会陷入局部最优解、计算量过大等问题，提出了一种引入混沌序列增加智能机器人路径规划过程中搜索的多样性、全局搜索能力并能提高算法收敛速度的启发式混沌算子灰狼优化算法。通过对初始数学模型进行优化，利用 GA 算法、差分进化算法（DE）、PSO 算法改进灰狼优化算法，利用 GA 算法的群体演化思想去优化灰狼算法的搜索空间，使算法近似最优。

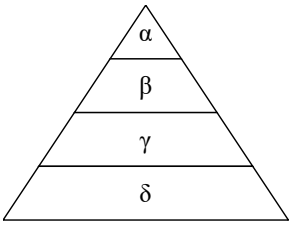


图 3 灰狼算法层级图

4 归纳

本文对于基于启发式算法的全覆盖路径规划算法进行了简单的整理介绍和归纳，并指出了各算法的工作原理、改进措施以及优点和局限性，结果如表 1 所示。

表 1 元启发式算法原理、优缺点及改进措施表

算法名称	工作原理	优点	局限性	改进措施
遗传算法 (GA)	通过模拟自然界“适者生存”的思想来寻求最优解	全局搜索能力强，适合处理复杂的非线性问题； 有并行性，可对多个解同时搜索； 鲁棒性好，受影响较少	局部搜索能力较弱，收敛速度慢； 难以避免搜索过程中出现过早收敛现象	将遗传算法和混沌算法的局部算法相融合，并采用种群的迁移机制替代算子筛选机制
蚁群算法 (ACO)	通过学习蚂蚁分泌并感知信息素这一特点，找出路径规划问题的最优解	适用于组合优化类问题； 具有分布式计算特点，与其他算法具有较好相容性； 鲁棒性较强于其他算法	收敛速度慢，初期难以在信息素缺乏的情况下搜索； 易陷入局部最优	调整并优化算法中的自适应机制； 对信息素限制优化参数进行增强
粒子群算法 (PSO)	痛过群体协作和共享信息找到最优解	具有较好的全局搜索能力； 易理解，计算成本低； 收敛快，适合连续优化等问题	后期收敛速度较慢，不够精确； 易在高维复杂问题上陷入局部最优	适当调节学习因子； 采用混沌序列初始化代替随机初始化粒子的种群
萤火虫算法 (FA)	通过模拟萤火虫发光吸引同伴来来找寻路径规划中的最优解	全局搜索能力强，适用于多峰函数优化问题； 有自适应性，可通过控制荧光素浓度调整搜索行为	算法参数较多，难以调节，对参数的设置较为敏感； 计算复杂度高，收敛速度慢	动态调整荧光素衰减系数以及吸引力系数； 引入距离权重因子，减少无效搜索
灰狼优化算法 (GWO)	通过模拟自然界中狼群的领导机制寻找路径规划最优解	全局搜索能力较强，收敛速度快； 易理解，参数少，易实现； 不依赖初始值	局部搜索能力较弱，易陷入局部最优； 面对复杂问题，收敛精度不足	引入一些反向学习方法； 调整算法中参数问题，尽量避免陷入局部最优

5 结语

目前对基于元启发式算法的全覆盖路径规划算法而言，近年整体呈现出多技术融合、注重实时性及有效性、追求高质量等发展趋势，从以下两方面可见：

1）算法优化及智能系统增强：通过引入混沌机制等新型机制来优化算法，增强了算法的全局搜索能力，避免了算法陷入局部最优，又通过智能系统，使算法具备更强的自主学习能力，更好处理复杂动态环境问题。

2）适应更复杂的环境：通过对多算法的优势融合，面对复杂多变的环境，基于元启发式算法的全覆盖路径规划算法实现了路径选择的动态调整，提高了对复杂环境的适应能力，对于一些传统算法所无法克服的困难，进行对应方案处理。

综上，基于元启发式算法的路径规划算法正面向着智能化、动态适应化和高效计算方向发展，在将来有待在更复杂的应用场景中发挥关键作用。

参考文献

[1] 刘清云,游雄,张欣,等. 移动机器人路径规划算法综述[J].计算机科学,2025,52(S1):159-168.

[2] 陈旭.基于遗传算法的移动机器人路径规划研究综述[J].科技和产业,2023,23(08):274-278.

[3] 韩颜,于淼. 粒子群算法在机器人路径规划中应用的综述[J].制造技术与机床,2024,(07):85-90.

[4] Wang L, Zhu D, Pang W, et al. A survey of underwater search for multi-target using Multi-AUV: Task allocation, path planning, and formation control[J]. Ocean Engineering, 2023, 278: 114393.

[5] 郭城成,田立勤,武文星. 蚁群算法在求解旅行商问题中的应用综述[J].计算机系统应用,2023,32(03):1-14.

[6] 苑俊辉,王晓东,马盈仓. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划[J/OL].南通大学学报(自然科学版),1-9[2025-08-14].

[7] 郭志军,王远,王丁健,等. 移动机器人反馈式步长萤火虫算法全覆盖路径规划研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2025,39(04):148-156.