

文章编号: 1671-5896(2018)06-0639-09

# 移动机器人路径规划算法综述

霍凤财<sup>1a, 1b</sup>, 迟金<sup>1a</sup>, 黄梓健<sup>1a</sup>, 任璐<sup>2</sup>, 孙勤江<sup>3a</sup>, 陈建玲<sup>3b</sup>

(1. 东北石油大学 a. 电气信息工程学院; b. 黑龙江省网络化与智能控制重点实验室, 黑龙江, 大庆 163318;

2. 海洋石油工程股份有限公司 设计公司, 天津 300461;

3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 a. 工程建设中心; b. 渤海石油研究院, 天津 300452)

**摘要:** 为提高机器人路径规划的搜索速度, 缩短搜索时间, 总结归纳移动机器人在路径规划问题上的算法及其特点。首先回顾移动机器人发展历史, 并对路径规划技术进行概述; 其次对移动机器人路径规划进行分类总结, 并从移动机器人对环境掌握情况的角度出发, 将移动机器人路径规划分成全局规划和局部规划两类, 然后对全局规划和局部规划的相关算法进行综述, 同时对相关算法发展现状及优缺点进行总结。最后指出机器人路径规划技术在改进算法、混合算法、多机器人协作、复杂环境以及多维环境下进一步深入研究的未来发展趋势。

**关键词:** 移动机器人; 路径规划; 全局路径规划; 局部路径规划

中图分类号: TP39 文献标识码: A

DOI:10.19292/j.cnki.jdxp.2018.06.007

## Review of Path Planning for Mobile Robots

HUO Fengcai<sup>1a, 1b</sup>, CHI Jin<sup>1a</sup>, HUANG Zijian<sup>1a</sup>, REN Lu<sup>2</sup>, SUN Qinjiang<sup>3a</sup>, CHEN Jianling<sup>3b</sup>

(1a. School of Electrical Engineering and Information; 1b. Key Laboratory of Heilongjiang Provincial Networking and Intelligent Control ,

Northeast Petroleum University , Daqing , 163318 , China; 2. Offshore Oil Engineering Company Limited

Design Company , Tianjin 300461 , China; 3a. Project Construction Center; 3b. Bohai Oil Research Institute ,

Tianjin Branch of China National Off Shore Oil Corp ( CNOOC ) Limited , Tianjin 300452 , China)

**Abstract:** In order to improve the search speed and shorten the search time of robot path planning , the characteristics of various algorithms is summarized. First , the history of mobile robot development and outline the key technologies of path planning are reviewed. Secondly , the mobile robot path planning is classified and summarized. From the perspective of the mobile robot's grasp of the environment , the mobile robot path planning is divided into two categories: global planning and local planning. Then the related algorithms of global planning and local planning are reviewed , and the development status , advantages and disadvantages of related algorithms are summarized. Finally , the future development trend of robot path planning technology in further research , hybrid algorithm , multi-robot collaboration , complex environment and multi-dimensional environment is pointed out.

**Key words:** mobile robot; path planning; global path planning; local path planning

## 0 引言

机器人技术作为多年研究热门的技术学科, 它综合了多个学科的技术, 机器人技术的发展就是高端

收稿日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 61374127; 51404073); 国家自然科学基金优秀青年科学基金资助项目( 61422301); 中国博士后科学基金资助项目( 2014M550180); 黑龙江省教育厅科学技术研究基金资助项目( 12541090); 东北石油大学青年基金资助项目( 2013NQ105); 黑龙江省杰出青年科学基金资助项目( JC2015016)

作者简介: 霍凤财( 1976— ) , 男, 黑龙江安达人, 东北石油大学副教授, 硕士生导师, 主要从事智能算法、图像处理研究, ( Tel) 86-459-6503373( E-mail) 83362370@qq.com。

科技发展的前沿。它作为人类的新型工具,在某些特定的工作环境下,可有效减轻劳动强度,提高生产率,把人从危险、恶劣的工作环境下解放出来。移动机器人涉及到许多重要技术,这些技术关乎移动机器人性能的优劣,一般有以下几部分:多传感器融合技术,在机器人系统中融合多个先进的传感器感知外界的各种物理量,作为控制的依据;GPS(Global Positioning System)导航技术,主要完成机器人的位置控制;操控机器人策略,常常通过某些算法最大限度实现移动机器人的智能化;路径规划包含了多传感器技术、导航定位技术和智能控制技术,三者有机结合最终实现了机器人的运动路径规划,路径规划是机器人控制技术的一项关键内容。智能机器人的路径规划就是机器人使用自身传感器收集周围环境的信息,通过算法快速准确的选择一条路线,从而保障机器人更有效率地完成工作。

笔者首先简述移动机器人的研发历程,然后针对路径规划展开研究,并将移动机器人路径规划技术总结为以下两种:全局路径规划和局部路径规划;其次针对目前最新研究成果,分别对这两类方法中的常用算法进行介绍、总结与分析;最后对移动机器人路径规划做出总结,并且对其未来的发展方向做出展望。

## 1 移动机器人的发展历史

在20世纪60年代,科学家逐渐开始对移动机器人进行研究。在1960年,由斯坦福大学研究所研发的机器人Shakey问世。它是一种经典的自主移动机器人,可在复杂的环境下识别目标,进行自我判断,实现路径的规划以及控制等功能。70年代末,伴随计算机技术及传感器技术的发展,广大学者对移动机器人的研究表现出更大的热情。80年代初,由美国国防部支持,CMU(Carnegie Mellon University)、斯坦福大学和麻省理工大学等单位研发的ALV(Autonomous Land Vehicle)成功运行。在90年代,经过多年的发展,移动机器人更加实用,涉及领域更加广泛、智能。21世纪以来,智能机器人技术已经成为衡量一个国家科技创新水平的关键标志,同时也是一个国家高端制造业水平的表现。智能机器人技术得到了世界各国的高度关注,发达国家陆续将发展智能机器人技术提高为国家战略,而智能机器人技术逐渐成为制造业竞争优势的关键手段,同时这些国家对机器人研究起步较早,发展较为完善,各国根据自身发展的需求,研发了大量各种功能的智能机器人。在2010年,美国推行了“先进制造业伙伴计划”,其中,明确表示必须通过发展工业机器人使美国制造业重新振兴,同时凭借信息技术优势,研发新一代智能机器人。在2013年美国发布的机器人发展路线报告里表明将智能机器人与互联网定义为同等重要的产业。而欧盟启动了全球最大民用机器人研发计划。该计划预计截止到2020年,共投入28亿欧元,使24万人得以就业。共有200多家公司的1.2万研发人员参加该计划,并且它设计的领域十分广泛,包括制造业、农业、健康、交通、安全和家庭等。德国为保证其在基础制造业上的领先地位,提出了“工业4.0计划”,该计划同样把智能机器人技术作为新一轮工业革命的关键切入点。与此同时日本也制定了智能机器人技术长期发展战略,把智能机器人产业列入“新产业发展战略”中7个关键扶持产业。

20世纪70年代,我国开始对智能机器人产业进行开发研究,并在90年代开展了对室外智能移动机器人的研发。近年来随着科技的迅猛发展以及国家政策的重点扶持,我国对移动机器人技术的研发获得了重大进展,与之相应的智能机器人产品已经投入到实体产业中。目前我国的一些户外移动机器人的某些关键技术已经达到或接近世界的最高水准。我国对移动机器人的研发主要集中在一些科研机构 and 高校,如清华大学、中科院和哈工大等,研究成果主要有:清华大学“八五”期间自主开发室外移动机器人实验平台THMR-Ⅲ,并于2002年在此基础上研究开发THMR-V型机器人;中科院沈阳自动化研究所的“‘CR-01’6 000米无缆自治水下机器人”,近年研制开发的纳米操作机器人、反恐防暴机器人,以及2017年首次亮相的具有自主知识产权的新型地震应急搜索机器人;浙江大学的机器人研究不断取得创新,2013和2014年两夺机器人世界杯RoboCup总冠军的小型足球机器人都诞生在浙大,此外浙江大学在2016年第三届世界互联网大会期间亮相的“赤兔”四足智能机器人,也摘取国际学生设计重要赛事桂冠。2015年哈工大集团迎宾机器人“威尔”在国家会议中心世界机器人大会的现场亮相。目前,移动机器人的主要研究内容有路径规划、目标跟踪定位、制图等方向,涉及反恐防暴,服务娱乐,应急救援,体育竞技等诸多领域。

## 2 移动机器人路径规划

路径规划是移动机器人技术研发的关键技术之一。机器人的路径规划技术,其实是参照某一个参数的指标(如工作代价值最低,选择路径最短,运算时间消耗最短等),在任务区域选择出一条可从起点连接到终点的最优或次优的避障路径。其本质是在几个约束条件下得到最优或可行解的问题。路径规划结果的优劣,将直观地对机器人完成任务的实时性及结果优劣造成影响。机器人路径规划的研究始于20世纪70年代,至今各机器人研发大国仍对其进行研究,而成果同样显著。根据所研究环境的信息特点,路径规划可分为离散域范围路径规划和连续域范围路径规划。根据路径规划算法发现先后,可分为传统算法路径规划和现代智能算法路径规划。笔者根据移动机器人对其工作区域信息的理解层次,将机器人路径规划分为两类:基于部分区域信息理解的路径规划(又称局部路径规划)和基于完整区域信息理解的路径规划(又称全局路径规划)。局部路径规划是在机器人执行任务过程中根据自身携带传感器采集到的局部环境信息进行的实时动态路径规划,具有较高的灵活性和实时性。但由于依靠的是局部环境特征,其获得的路径可能只是局部最优而非全局最优,甚至是目标不可达路径。全局路径规划首先需要根据已知的全局环境信息,建立抽象的全区域环境地图模型,然后在全区域地图模型上使用寻优搜索算法获取全局最优或较优路径,最终引导移动机器人在真实情况下向目标点安全的移动。其主要涉及两部分内容:一是环境信息理解及地图模型构建,二是全局路径搜索及机器人引导。在移动机器人路径规划中,需要融合兼用全局和局部路径规划,前者旨在寻找全局优化路径,后者旨在实时避障。移动机器人的路径规划中最关键部分就是选取算法,一个优秀的算法对路径规划起到至关重要的作用。下面笔者将分别从全局和局部路径规划两方向给出一些常用算法。

## 3 全局路径规划

全局路径规划属于静态规划(又称为离线路径规划),一般应用于机器人运行环境中已经对障碍信息完全掌握的情况下。目前用于全局路径规划常用方法主要有遗传算法、快速随机搜索树算法和蜂群算法等。当然,还有很多与此类算法相类似的启发式算法,例如粒子群算法、可视图法、链接图法、拓扑法等。其算法的改进方式与这些算法相似,这里不再赘述。

### 3.1 遗传算法

遗传算法(GA: Genetic Algorithm)是一种全局优化搜索算法。受达尔文进化思想启发,该算法主要针对自然选择和遗传时发生的交叉、变异及遗传现象进行仿真,融合优胜劣汰的自然法则,根据结果得出每一代的候选解,最终从得出的候选解中得出最优解。该算法最大的优点是在充分发挥自身迭代优势的情况下,可以很好地与其他算法融合使用,拥有优秀的自组织性和自学习性、在路径规划中对最优路径有优秀的搜索能力,同时保证了很好的全局优化性。遗传算法实现简单、受外在影响很小。不足是实时运算速度慢,搜索效率低、易于陷入局部最优解,算法在运行时,一些不需要的种群会为后续计算提升难度,从而使运行效率低下,收敛速度慢存在早熟现象,并不适合于在线路径规划。使用遗传算法对移动机器人路径规划受到了国内外学者的广泛研究。2003年刘国栋等<sup>[1]</sup>在针对移动机器人动态路径问题上,研发了一种改进遗传算法,使用二维转换一维的实数编码方式。把分别满足路径在约束条件之内、能实时避障、路径最优这3个准则下的适应度函数结合在一起,提出一个具有明确物理意义的适应度函数,以加快实时的运算速度和提高运算精度。2008年王洲等<sup>[2]</sup>在传统遗传算法基础上提出一种改进遗传算法,使用序号编码和与此编码机制相适应的遗传算子,同时加入了更多新变异算子、插入算子以及删除算子,提高了最优保存策略,最终提高了算法运行速度,增强了搜索过程中的避障能力。2011年石铁峰等<sup>[3]</sup>针对传统遗传算法早熟收敛速度慢的问题,提出一类基于遗传模拟退火算法,用于移动机器人路径规划。首先对编码长度和工作路径编码方式进行了简化,其次对基于遗传算法在生成初始种群后的各路径的适应度函数值进行评估。使用遗传算法对其进行多次交叉、变异,同时借助Metropolis算法的随机移动标准制定了效率更高的更新函数,最终得出一条最优路径。2016年Wang等<sup>[4]</sup>针对解决焊接机器人最短无碰撞问题,提出了双全局优化遗传算法-粒子群优化算法(OGA-PSO: Optimization Genetic

Algorithm-Particle Swarm Optimization Algorithm), 并与其他算法结合的方式, 优化了传统算法, 提高算法运行效率, 解决了路径规划难以得到最优解的问题。2017 年王雷等<sup>[5]</sup> 在使用移动机器人进行路径规划时, 对于遗传算法的缺陷, 提出了自适应交叉和变异概率方法, 通过混合选择优化了传统遗传算法, 提高了遗传算法的收敛速度和进化效率。

### 3.2 快速随机搜索树

快速随机搜索树(RRT: Rapidly-exploring Random Tree) 是一种基于采样的搜索算法, 适用于高维非欧空间搜索。快速随机搜索树算法可以处理在多维空间内的不完整性约束问题。它是基于以下设想提出: 将路径规划的起点定为搜索树的根节点, 按照规定准则确定搜索树上一个已有节点, 然后根据路径规划的约束条件, 对该节点进行扩展得出一个全新节点, 存入搜索树, 重复上述方法直到找到终点。该算法既要使得随机采样可以令机器人向未被探查过的空间进行探索, 又要在探索过程中逐渐完善搜索树。快速随机搜索树算法作为一种快速搜索算法, 近年来得到了广泛的关注与应用, 该算法优点是速度快、搜索能力强、对地图的预处理没有要求。其缺点是搜索时盲目性大尤其在多维环境下或动态环境中耗时长、计算复杂度高、易陷入死区和存在局部最小值问题。2005 年李双艳<sup>[6]</sup> 针对 RRT 算法计算复杂度高的缺陷, 提出了一种 RRT 算法与滚动路径规划法思想, 用于引导移动机器人进行在线避障。这种方法减小了传统 RRT 算法的复杂性, 可以作为实时的规划方法, 尤其对高维的机器人系统, 效果明显。在此基础上, 引入了选择性参数 BIAS 改进传统算法中的统一概率, 加快了 RRT 算法的收敛速度, 能使算法进行路径规划时具有更强的目标性。2009 年康亮等<sup>[7]</sup> 提出将改进的 RRT 算法融入基于滚动窗口改进的路径规划算法, 该算法既保持了 RRT 算法随机搜索特性的同时, 又使用启发估价收敛标准函数引导搜索树生长, 减少了算法的运算时间。针对容易产生局部最小问题, 使用回归分析法筛选新的节点, 保留了算法智能趋近终点的特性, 同时也提高了算法探索未知空间的趋势。2015 年 Kim 等<sup>[8]</sup> 提出一种快速随机搜索树的高自由度关节移动机器人的路径规划方法。为实现在高维空间中的路径规划, 其首先描述一种根据路径复杂性选择的机器人主题, 然后选定所涉及的机器人关节, 即配置空间与采样自适应维度的路径规划。最后引入自适应快速随机搜索树算法, 通过自适应选择主体, 在自适应三维空间中逐步增加 RRT。2015 年潘思雨等<sup>[9]</sup> 针对传统快速搜索随机树算法收敛速度慢的问题, 提出一种将结合多约束条件的改进算法, 该算法结合了环境约束、车辆自身约束和运动学约束, 舍弃了传统算法的贪心思想, 使用启发式方法对节点进行采样, 提高了路径规划的速度和质量。2015 年 Gîrbacia 等<sup>[10]</sup> 为降低路径规划计算的复杂度, 提出一种虚拟环境下改进快速随机搜索树算法的车型机器人路径规划。通过设置虚拟环境中可行路径中障碍之间最大和最小距离, 以减少仿真时间和删除周围环境中没有避开障碍的路径, 减少仿真的复杂性, 使最优路径更容易找到。2017 年贾李红<sup>[11]</sup> 提出一种将人工势场法与 RRT 算法结合的改进算法, 首先使用人工势场法在路径规划时对初始环境预测出一条路径, 若有新的障碍点出现并且阻挡该路径时, 使用 RRT 算法规划当前的局部路径。该算法有效的解决了 RRT 算法容易造成局部最小值问题, 大幅度的改善且提高了规划效率。

### 3.3 人工蜂群算法

人工蜂群算法(ABC: Artificial Bee Colony Algorithm) 于 2005 年为优化代数问题而提出。该算法是对大自然中蜜蜂集体采蜜行为进行模仿的一种智能优化方法, 其本质是群体智能思想的一个具体实现, 它不用了解问题的特定信息, 只用对问题进行优劣的比较, 通过单独工蜂个体的局部寻优方式, 汇总一起最终在群体中使全局最优值突显出来, 收敛速度快。蜜蜂是群居昆虫, 单个蜜蜂的采蜜行为极其简单, 但由大量个体组成的群体行为却表现出了极其复杂的效果。自然中真实的蜂群能在任何不同环境下, 以极高的效率从花丛中采集花蜜, 并且他们的环境适应能力极强。由此衍生出的蜂群算法的模型包含 3 个基本组成因素: 食物源、被雇佣的蜜蜂(Employed Foragers) 和未被雇佣的蜜蜂(Unemployed Foragers)。人工蜂群算法最为基本的模型分为: 为当前最优食物源召集(Recruit) 蜜蜂和为当前较差食物源进行放弃(Abandon)。通过以上的介绍, 可总结出该算法有以下优点: 算法结构简单、易实现, 是一种启发式算法, 种群内部分工协作, 角色可以互换, 并且拥有较强的鲁棒性, 无需先验知识, 根据概率以及随机选取的方法对个体进行搜索。其缺点是开发能力差、同类蜜蜂之间没有交流, 没有充分地利用已有个体的信

息;在进化过程收敛速度会因为接近最优解<sup>[12]</sup>(全局最优或局部最优)时而减缓,可能陷入局部最优解,在处理复杂问题时,耗时长、精度低。蜂群算法需要的数学基础十分简单,而且缺少强有力的理论支持。对ABC算法的理论研究长久以来都是科研人员研究蜂群算法的热点和难点。近年来,大量的科研人员对传统蜂群算法进行了优化与改进。2010年暴励等<sup>[13]</sup>针对传统蜂群算法容易陷入局部最优解的缺陷,提出了一种可自动适应搜索空间的混沌蜂群算法(Chaos Artificial Bee Colony Algorithm),其主要思想是在当前搜索空间的基础上,参照每次搜索的最优结果自动更改下一次的搜索空间,将搜索区域逐渐减小,最后根据混沌变量基本特性使得算法跳出局部最优解,获得全局最优解。2014年Luo等<sup>[14]</sup>为帮助蜂群算法跳出局部最优解,提出一种混沌人工蜂群算法,该算法基于传统蜂群算法和混沌机制帮助算法寻找最优参数。2015年Contreras-Cruz等<sup>[15]</sup>提出了一种基于传统蜂群算法进行改进的移动机器人路径规划方法。该方法结合人工蜂群算法作为局部搜索过程,并利用进化规划算法细化由一组局部解找到的可行路径。从而提高算法精度缩短时间。2017年马乃琦等<sup>[16]</sup>针对人工蜂群算法处理复杂优化问题时,原始蜂群算法耗时长且精度低的问题,提出了一种改进的蜂群算法。该算法根据粒子群算法的思想完善了跟随蜂的局部搜索过程,同时改进引领蜂的位置更新方式,将分段搜索策略融入其中,最终提高算法的收敛速度和精度。

## 4 局部路径规划

局部路径规划属于动态规划(又称为在线规划),局部动态路径规划只需要由传感器实时采集环境信息,确定环境地图信息,然后得到当前所在地地图的位置及其局部障碍物分布情况,从而可以获取当前节点到某一子目标节点的最优路径。局部路径规划常用算法主要包括:人工势场法、模糊算法、A\*算法等。除笔者详细阐述的这些算法外,还有人工免疫算法、D\*算法、滚动窗口法、事例学习法等。

### 4.1 人工势场法

人工势场法(Artificial Potential Field)是一种虚拟力场法,其基本思想是把机器人所在的工作环境虚拟成一个存在力的地方,将这种力分成引力和斥力两种,由目标点产生的力为机器人所受引力,这种力随着目标点与机器人距离减小而增大。由障碍物生出的力为机器人所受的斥力,并随机器人与障碍物间距的减小而增大,整个势场由引力和斥力的矢量叠加而成。机器人的运动由引力与斥力所产生的合力控制,从而避开障碍物到达目标点找到路径。这种方法结构简单,便于底层的实时控制,可节省大量计算工作和计算时间,并能自动生成相对光滑的路径。但同时该方法也存在一些缺陷,如存在陷阱区域,在通过狭窄通道时会有摆动,在障碍物附近震荡;当障碍物附近存在目标点时,目标不可达,存在一些局部最优解,使机器人未到达目标点前停滞在局部最优解上,求出的路径可能不是最优路径。人工势场法的优点是结构简单,有利于实时控制,在机器人避障和轨迹平滑方向上具有广泛的应用,但同时也有一定缺陷,该方法容易陷入局部最小值,并且不适用于机器人在自由度较高的情况下进行规划,在满足机器人约束方向上效果不理想。为了解决该问题,众多学者做出了大量研究。2003年王奇志<sup>[17]</sup>针对人工势场法容易陷入局部最小值问题,提出一种改进的人工势场法,该改进方法采用了限定范围的方法,即考虑距机器人一定范围内的机器人为障碍物。当机器人处在势能为零的地方(即陷入局部最小值)时,通过首先计算在这一区域里排除一个距离机器人最远的障碍物,然后在这一斥力相反方向加同等力的方法,达到在多障碍物情况下,机器人运动规划可以快速、实时、避障。2006年刘义等<sup>[18]</sup>同样针对人工势场法容易陷入局部最小值问题,通过修改斥力场函数对人工势场法做出改进,虽然针对问题与文献[17]相同,但该方法主要针对当机器人靠近目标时,终点引力变小而障碍斥力不断增强的情况下所导致的机器人不能到达目标点问题。首先引入目标点和机器人的相对位置,并将原有的斥力场函数乘以一个因子,最终达到目标位置处斥力为0的要求,并且终点仍然是整个势场的最优点。该方法简单,规划成功率高,有效的解决了传统算法中容易陷入局部最小值的问题。2017年Matoui等<sup>[19]</sup>提出一种分散体系结构,自主轮式移动机器人在一个动态的路径规划工作环境中,将机器人系统视为具有分散架构的机器人网络,每个机器人根据实际位置、其他机器人位置、障碍物位置及目标点的位置规划路径。因此每个机器人可直接进行交互,而且其路径规划都是基于人工势场法进行的路径规划。通过更新与每个机器人关

联的系统方程实时反应工作空间的变化,通过该方法可有效避免机器人和障碍物之间的碰撞以确保移动机器人的安全。2018年Zhang<sup>[20]</sup>针对传统人工势场法在陷阱区域以及通过狭窄通道时会有摆动的问题,采用潜在函数作为目标函数,将移动机器人的运动方向作为控制变量,将改进的人工势场法与混沌优化算法结合,从而提出一种基于混沌人工势场法的机器人路径规划新方法。

## 4.2 模糊算法

模糊集的概念是1965年由Zadeh首先提出的<sup>[21]</sup>。其基本思想是把普通集合中的绝对隶属关系变得灵活化,使元素对集合的隶属度从原来只能取 $\{0,1\}$ 中的值扩充到可以取 $[0,1]$ 区间中的任一数值。因此该方法适合针对传感器信息的不确定性的问题进行描述及处理。近年人们研究发现,随着环境复杂度的不断增加,调整描述系统行为的隶属度函数及模糊规则变得十分繁琐,而建立移动机器人路径规划避障过程中精确的数学模型十分困难,因而国内外学者将关注点投向模糊算法。模糊算法将模糊控制本身具有的鲁棒性与基于生理学的“感知-动作”相结合,为移动机器人在复杂环境下的路径规划带来了新的思考方向。该方法避免了传统算法中对环境信息依赖性强等缺陷,在针对复杂环境下的移动机器人路径规划问题,显示出极大的优越性和较强的实时性。国内外涌现许多优秀的改进方案,2010年李宝霞<sup>[22]</sup>针对模糊系统的隶属度函数确定过程繁琐问题,将遗传算法结合到模糊系统中,对模糊算法进行改进生成了模糊遗传算法。首先,对所优化对象进行编码,确定运行参数,随机建立讨论的初始种群。其次将问题中所有可行解编码成有限位的字符串,然后根据编码方法重新定义一个适应度函数,用该函数测量和评价各个解的性能。最后确定遗传算法各参数取值以及所使用的各个参数取值,如群体规模、交叉及变异概率。由遗传算法寻找最佳串。最后给出实际问题的最优解。2015年Hesamoddin等<sup>[23]</sup>提出一种基于模糊局部搜索的广义智能水滴算法,以加快求解最优解的时间。该方法将地图划分为相等的几部分,并将每部分中路径与其他部分路径利用模糊推理算法进行比较。将模糊数分配给每部分,这个模糊因子决定了一个区间中解的值。对该值较低的路径进行改进,并在需要改进的部分中使用了新的启发因子。2016年Fakoor等<sup>[24]</sup>提出一种基于模糊马尔可夫决策过程的仿人机器人路径规划方法。通过混合马尔可夫决策过程和模糊推理系统进行改进,在没有精确估计障碍物的距离和形状的情况下,计算了奖励函数并用数值迭代法实时求解贝尔曼方程。该方法可有效避免碰撞并达到快速收敛的目的。因为模糊控制与生理学的有效结合,从而减小了对环境信息的依赖性,具有良好的鲁棒性和实效性的优点。

## 4.3 A\* 算法

A\* 算法(A-Start)是一种启发式算法,它利用启发信息寻找最优路径。A\* 算法需要在地图中搜索节点,并设定适合的启发函数进行指导。通过评价各个节点的代价值,获取下一需要拓展的最佳节点,直至到达最终目标点位置。A\* 算法优点在于对环境反应迅速,搜索路径直接,是一种直接的搜索算法,因此被广泛应用于路径规划问题。其缺点是实时性差,每一节点计算量大、运算时间长,而且随着节点数的增多,算法搜索效率降低。近年来,在基于A\* 算法实现移动机器人路径规划问题上,国内外学者们积累了丰富的研究成果。2012年高庆吉等<sup>[25]</sup>针对A\* 算法搜索速度慢、效率低的缺点,提出了两点改进方法,首先对估价函数加权处理以保证估价函数的可靠性;其次将在栅格化环境中,构造与某一点相邻的点的集合,成为该点的8毗邻点集,当点集中含有障碍物点时,将此点定义成“不可信点”,对此点不再进行搜索。2014年Františ等<sup>[26]</sup>针对计算时间长的问题提出一种基于改进A\* 算法的移动机器人路径规划方法,在传统A\* 算法上进行Basic Theta\*,Phi+\*和RSR,JPS的修改。并分析在各种场景以及环境复杂度不同的情况下,适用哪种改进算法。通过对比试验证明在快速查找路径方面JPSA\* 算法最佳,但不足是当需要寻找路径过长时,所搜索的路径不是最短路径,因而适合在需要快速寻找路径时应用。如果对计算时间要求不高而要求路径最短时,则Theta\* 算法更适用,Theta\* 的这种能力在低对称环境下尤其突出。2015年Peng等<sup>[27]</sup>针对A\* 算法遍历OPEN表和CLOSED表花费时间长的缺点,提出一种改进A\* 存储数组的方法,存储的方式通过每次访问指定元素时查找数量排序访问数组元素,可通过一次操作完成,而原始的A\* 算法需要遍历多个节点才能找到指定元素。这一方法有效保留算法的优点,提升运行效果。2016年Guruji等<sup>[28]</sup>为达到缩短A\* 算法的计算时间,提出一种时间效率A\* 算法的移动机器人路径规划。该改进A\* 算法在碰撞阶段前确定启发式函数的值,而不是初始化阶段,在处理时间上具有

较高的速度。2018年王维等<sup>[29]</sup>针对复杂室内环境下移动机器人路径规划中存在实时性差的问题提出了一种改进A\*算法。对当前节点及其父节点的估计路径代价进行指数衰减的方式加权,使该算法在距离目标点远时快速向目标点靠近,而在近目标点位置时完成局部细致搜索,保证目标点附近障碍复杂且多的时候目标可达。并通过实验证明该改进算法具有良好的适应性和实时性。

## 5 路径规划的发展趋势

机器人技术随着科学技术日新月异的发展而不断深入,虽然伴着计算机、传感器技术以及人工智能的蓬勃发展,路径规划技术早已取得大量的研究成果,但相比之下在具体的路径规划算法设计中,每种算法均有它们的不足之处和局限性,还有很多理论与方法需要在今后的研究中不断的改进。从当前的发展方向看,路径规划技术还有以下几个方向值得关注。

1) 已有优秀路径规划算法的改进。在实际应用的过程中,任何一种算法都会面对许多困难,尤其是自身局限性所导致的问题。而在具体应用方向做出针对性的改进,可以快速有效的提升算法的性能,同时解决实际问题。

2) 混合算法。路径规划的混合算法即各个算法之间的有效结合。任何一个单独的算法,都不足以解决实际问题中的所有路径规划问题,尤其是在针对一些交叉学科中出现的新问题。创造出新的算法难度大,而路径规划算法之间的优势互补可以有效提供一种解决问题的新思路。一些职能算法如群体智能算法、强化学习算法、模糊控制、神经网络等渐渐引入到路径规划问题中。这种互补式的混合算法促使了各种方法的融合发展,通过取长补短,从而产生出一系列更为优秀的算法。而将人工智能的方法、新的数理方法、仿生算法之间相结合具有一定的发展前景。

3) 多机器人协调合作的路径规划方法。随着机器人作业范畴的不断扩展以及作业任务日益复杂化,单个机器人已经很难完成人们制定的任务,这时则需要多个机器人之间通过协调合作,在保障工作效率的同时,解决因为作业环境发生变化或者机器人系统出现一些局部故障时所造成的工作停滞问题。单机器人在某些环境下已经无法达到使用要求,这时就需要多机器人进行协调合作。当然多机器人也同样存在一些问题,相比单机器人,多机器人的路径规划要复杂得多,由于障碍物,机器人数目等增加,所以极大的提高了路径规划难度,因此,这也引起国内外学者的广泛兴趣。

4) 复杂环境及多维环境中移动机器人路径规划的研究。针对于具体的研究对象,移动机器人路径规划多数为了解决陆地作业环境下智能机器人的路径规划研究,例如扫地机器人,迎宾机器人,反恐防爆机器人等;而针对空中的飞行机器人和 underwater 机器人的研究就相对较少。随着空间探测的发展需要,移动机器人的研究也开始将关注点放在崎岖地形和存在大量障碍物的复杂环境中。从路径规划的环境描述方向上看,针对二维平面环境的路径规划研究相对较多,而三维环境下的路径规划则一般较少。但是,仍然有许多移动机器人作业环境是处于三维环境空间中进行的,例如飞行器,仿生鱼类机器人等。陆地机器人多数处于环境稳定的陆地中,而飞行机器人,仿生鱼类机器人所处的环境相较于陆地机器人所处的环境要恶劣的多,所以对传感器的要求更加苛刻,同时还会面临许多不确定的危险因素。故而,对飞行器及仿生鱼类机器人的研发更加困难。综上所述,增强对现实环境中机器人路径规划的研发是针对实际应用无可避免的问题,同时也是路径规划技术未来的一条重要研发方向。

## 6 结 语

对移动机器人路径规划的研究一直是国内外智能机器人研究的关键内容之一。其本质上,两种路径规划并没有区别,有很多算法对于两种路径规划都适用。但无论哪种方法都会分为环境建模和搜索路径两步。笔者首先简述移动机器人的研发历程,其次针对路径规划展开研究,对现今路径规划的应用领域及其常用方法进行了分类总结,并结合其应用算法进行了综述。最后展望并指出了路径规划算法的未来研究方向,对移动机器人路径规划技术的研究以及发展具有一定的参考意义。随着科学的进步,路径规划将使用在更多更广泛的领域上,而路径规划技术也会使人工智能渐渐融入到人们的日常生活当中。



## 参考文献:

- [1] 刘国栋, 谢宏斌, 李春光. 动态环境中基于遗传算法的移动机器人路径规划的方法 [J]. 机器人, 2003(4): 327-330 343.  
LIU Guodong, XIE Hongbin, LIE Chunguang. Path Planning of Mobile Robot Based on Genetic Algorithm in Dynamic Environment [J]. Robot, 2003(4): 327-330 343.
- [2] 王洲, 张毅, 杨锐敏. 基于遗传算法的移动机器人路径规划 [J]. 微计算机信息, 2008(26): 187-189.  
WANG Zhou, ZHANG Yi, YANG Ruiming. Genetic Algorithm Based Path Planning for Mobile Robots [J]. Microcomputer Information, 2008(26): 187-189.
- [3] 石铁峰. 改进遗传算法在移动机器人路径规划中的应用 [J]. 计算机仿真, 2011, 28(4): 193-195 303.  
SHI Tiefeng. Application of Improved Genetic Algorithm in Path Planning of Mobile Robots [J]. Computer Simulation, 2011, 28(4): 193-195 303.
- [4] WANG Xuewu, SHI Yingpan, DING Dongyan, et al. Double Global Optimum Genetic Algorithm-Particle Swarm Optimization-Based Welding Robot Path Planning [J]. Engineering Optimization, 2016, 48(2): 299-316.
- [5] 王雷, 李明. 改进自适应遗传算法在移动机器人路径规划中的应用 [J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2017, 41(5): 627-633.  
WANG Lei, LI Ming. Application of Improved Adaptive Genetic Algorithm in Path Planning of Mobile Robots [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2017, 41(5): 627-633.
- [6] 李双艳. 移动机器人动态环境下的路径规划研究 [D]. 长沙: 中南大学信息学院, 2005.  
LI Shuangyan. Research on Path Planning of Mobile Robot under Dynamic Environment [D]. Changsha: College of Information, Central South University, 2005.
- [7] 康亮, 赵春霞, 郭剑辉. 未知环境下改进的基于 RRT 算法的移动机器人路径规划 [J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(3): 337-343.  
KANG Liang, ZHAO Chunxia, GUO Jianhui. Improved RRT Algorithm-Based Path Planning for Mobile Robots in Unknown Environment [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2009, 22(3): 337-343.
- [8] KIM DONGHYUNG, CHOI YOUNSUNG, KIM SANGHO, et al. Adaptive Rapidly-Exploring Random Tree for Efficient Path Planning of High-Degree-of-Freedom Articulated Robots [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(18): 203-210.
- [9] 潘思宇, 徐向荣. 基于改进 RRT\* 的移动机器人运动规划算法 [J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2017, 40(2): 244-254.  
PAN Siyu, XU Xiangrong. Mobile Robot Motion Planning Algorithm Based on Improved RRT\* [J]. Journal of Shanxi University: Natural Science Edition, 2017, 40(2): 244-254.
- [10] GÎRBACIA TEODORA, MOGAN GHEORGHE. An Improvement of the Rapidly-Exploring Random Tree Method for Path Planning of a Car-Like Robot in Virtual Environment [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 772: 471-476.
- [11] 贾李红. 基于 GPS 的双向搜索路径的研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学计算机学院, 2017.  
JIA Lihong. Research on Two-Way Search Path Based on GPS [D]. Huainan: College of Computer Science and Engineering, Anhui University of Science & Technology, 2017.
- [12] 柏静. 基于多种混合策略的人工蜂群算法改进研究 [D]. 济南: 山东师范大学信息科学与工程学院, 2016.  
BAI Jing. Research on Improvement of Artificial Bee Colony Algorithm Based on Multiple Hybrid Strategies [D]. Jinan: College of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, 2016.
- [13] 暴励, 曾建潮. 自适应搜索空间的混沌蜂群算法计算机应用研究, 2010, 27(4): 1330-1334.  
BAO Li, ZENG Jianchao. Research on Computer Application of Chaotic Bee Colony Algorithm in Adaptive Search Space, 2010, 27(4): 1330-1334.
- [14] LUO Qinan, DUAN Haibin. Chaotic Artificial Bee Colony Approach to Step Planning of Maintaining Balance for Quadruped Robot [J]. International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 2014, 7(2): 175-191.
- [15] CONTRERAS-CRUZ M A, AYALA-RAMIREZ V, HERNANDEZ-BELMONTE U H. Mobile Robot Path Planning Using Artificial Bee Colony and Evolutionary Programming [J]. Applied Soft Computing Journal, 2015, 30: 319-328.
- [16] 马乃琦, 吕蕾, 刘一良. 复杂场景下面向群体路径规划的改进人工蜂群算法 [J]. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2017, 32(4): 16-23.



- MA Naiqi, LÜ Lei, LIU Yiliang. Improved Artificial Bee Colony Algorithm for Group Path Planning Under Complex Scene [J]. Journal of Shandong Normal University: Natural Science Edition, 2017, 32(4): 16-23.
- [17]王奇志. 基于改进人工势场法的多障碍机器人运动控制 [C]//中国智能自动化会议. 青岛: [s. n.], 2003: 4.  
WANG Qizhi. Multi-Obstacle Robot Motion Control Based on Improved Artificial Potential Field Method [C]// China Intelligent Automation Conference. Qingdao [s. n.], 2003: 4.
- [18]刘义, 张宇. 基于改进人工势场法的移动机器人局部路径规划的研究 [J]. 现代机械, 2006(6): 48-49, 53.  
LIU Yi, ZHANG Yu. Research on Local Path Planning of Mobile Robot Based on Improved Artificial Potential Field Method [J]. Modern Machinery, 2006(6): 48-49, 53.
- [19]MATOUI F, BOUSSAID B, METOUI B, et al. Abdelkrim. Path Planning of A Group of Robots with Potential Field Approach: Decentralized Architecture [J]. IFAC Papers on Line, 2017, 50(1): 11473-11478.
- [20]ZHANG Cheng. Path Planning for Robot Based on Chaotic Artificial Potential Field Method [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 317(1): 12-56.
- [21]陈卫东, 李宝霞, 朱奇光. 模糊控制在移动机器人路径规划中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(31): 221-223.  
CHEN Weidong, LI Baoxia, ZHU Qiguang. Application of Fuzzy Control in Path Planning of Mobile Robots [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(31): 221-223.
- [22]李宝霞. 基于模糊算法的移动机器人路径规划 [D]. 秦皇岛: 燕山大学信息科学与工程学院, 2010.  
LI Baoxia. Fuzzy Robot Based Path Planning for Mobile Robots [D]. Qinhuangdao: College of Information Science and Engineering, Yanshan University, 2010.
- [23]HESAMODDIN MONFARED, SOHEILAS SALMANPOUR. Generalized Intelligent Water Drops Algorithm by Fuzzy Local Search and Intersection Operators on Partitioning Graph for Path Planning Problem [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015, 29(2): 1519-1531.
- [24]FAKOOR MAHDI, KOSARI AMIRREZA, JAFARZADEH MOHSEN. Humanoid Robot Path Planning with Fuzzy Markov Decision Processes [J]. Journal of Applied Research and Technology, 2016, 14(5): 300-310.
- [25]高庆吉, 于咏生, 胡丹丹. 基于改进 A\* 算法的可行性路径搜索及优化 [J]. 中国民航大学学报, 2005, 23(4): 42-45.  
GAO Qingji, YU Yongsheng, HU Dandan. Feasible Path Search and Optimization Based on Improved A\* Algorithm [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2005, 23(4): 42-45.
- [26]FRANTIŠEK DUCHOŇ, ANDREJ BABINEC, MARTIN KAJAN, et al. Path Planning with Modified a Star Algorithm for a Mobile Robot [J]. Procedia Engineering, 2014(96): 59-69.
- [27]PENG J, HUANG Y, LUO G. Robot Path Planning Based on Improved A\* Algorithm [J]. Cybernetics & Information Technologies, 2015, 15(2): 171-180.
- [28]GURUJI A K, AGARWAL H, PARSEDIYA D K. Time-Efficient A\* Algorithm for Robot Path Planning [J]. Procedia Technology, 2016, 23: 144-149.
- [29]王维, 裴东, 冯璋. 改进 A\* 算法的移动机器人最短路径规划 [J]. 计算机应用, 2018, 38(5): 1523-1526.  
WANG Wei, PEI Dong, FENG Zhang. Shortest Path Planning of Mobile Robot Based on Improved A\* Algorithm [J]. Computer Applications, 2018, 38(5): 1523-1526.

(责任编辑: 张洁)