**机器人路径规划算法研究综述**

方盛俊

南京大学（人工智能学院，201300035@smail.nju.edu.cn）

**摘要：**

路径规划是当下包括机器人领域在内的许多技术研究领域的一个热点，也是实现机器人自主导航的一个关键技术，当前的发展目标是提高移动机器人路径规划的搜索速度，缩短搜索时间，并应用于更为复杂的环境。本文分别针对国内和国外的路径规划算法和应用进行总结，将移动机器人路径规划分为全局规划和局部规划两类，从算法类别和时间顺序两个角度出发，分析了一系列路径规划算法的原理，例如栅格法、Voronoi图算法、蚁群算法、人工势场法、模糊算法和人工智能轨迹规划算法。本文还涉及了近几年的有代表性的算法的发展趋势，并对相关算法的发展现状和优缺点进行简单的总结。最后对移动机器人路径规划在混合算法、多机器人协作、结合新一代网络技术和复杂多为环境方面的未来发展趋势进行展望，为移动机器人路径规划研究提供一定的思路。

**关键词：**路径规划；移动机器人；全局路径规划；局部路径规划

**1 引言（Introduction）：**

由计算机性能的提升和通信网络的发展，机器人的智能化和自动化的进一步提升有了新的可能；也由于社会的发展，人力成本越来越高，人们对生活水平的追求也越来越高，各个领域愈发需要机器人的参与，如今的机器人甚至深入了人们的日常生活中，例如扫地机器人这类应用于家庭或直接服务人的（家政）服务机器人[1]，已经出现在了许多人的家庭当中，并且越来越受欢迎。这类机器人的一个关键任务是，在工作场所规划出一条能够从初始位置到目标位置的有效且高效的路径[2]，其中就包括了快捷、安全且能躲开静止甚至是移动障碍物的要求[3]。移动机器人应该具备一定的计算能力，用以实时计算当前用时最短且最安全的路径，以节省时间和能量。

移动机器人的路径规划，就是机器人使用其拥有的传感器获取周边的信息，通过路径规划算法找到一条从初始状态到目标状态的移动路径的技术，其中又包含了多传感器技术、导航定位技术和智能控制技术等技术。常见的在高新技术领域的应用有无人机的避障飞行、城市道路规划、通信领域的路由问题、巡航导弹躲避雷达搜索等。而除了自动化和机器人CAD设计等常见的机器人学领域，路径规划也被应用于数字动画、电子游戏[4]、建筑结构和生物分子学[5]。

文本会从国内外的两个角度出发，总结哪些人和哪些机构开展了哪些方面的研究，还有其中的优势和不足，对常见算法进行介绍、总结和分析。最后对移动机器人路径规划做出总结，并对其未来的发展方向进行展望。

1. **国内外研究进展与现状（Literature Review）**
2. **国外（International）：**

路径规划技术的发展离不开移动机器人的发展。在1960年，斯坦福大学研究所研发出机器人Shakey，它能够在复杂的环境下识别目标，并通过自主决策，来实现轨迹规划和控制功能，是一代经典的移动机器人[6]。80年代末，美国国防部、CMU、麻省理工和斯坦福大学等单位联合研发的ALV（Autonomous Land Vehicle）[7]。今天，智能机器人的发展也已经成为了衡量一个国家科技创新的重要指标，是制造业拥有更强竞争力的重要手段，因此许多国家都将智能机器人技术的提高作为重要目标。美国的“先进制造业伙伴计划”和德国的“工业4.0计划”都将智能机器人产业视为关键扶持产业。

路径规划技术有着不同的方向，也有着不同的特点。一种常见的分类方法可以是根据智能机器人对环境信息的了解程度来划分，可以分为两类：环境信息完全已知的全局路径规划，也被称为静态路径规划；环境信息完全未知或部分未知，需要不断地使用传感器动态地对工作环境进行探测，以获取障碍物信息的局部路径规划，又称为动态路径规划。

常见的全局路径规划算法有基于栅格法的Dijkstra算法或A\*算法、基于可视图的Voronoi图算法和模仿生物的蚁群算法（Ant Colony Optimization，ACO）等。栅格法将空间划分为一系列的单元，并附上不同的标记，以表示该空间单元是否有障碍物，是否可以经过。分解成一个个小单元后，就可以使用启发式的算法在空间中搜索一条可行的路径，使用一些算法甚至能找到最优的路径。单元划分的方法也有一定的讲究，最简单的单元分解方法是生成等大小单元，但是这种方法生成的单元数较多，搜索时间较长；也可以使用四叉树或八叉树来进行生成，这样占用空间较小，但是增加了图的联通复杂性，需要进行取舍。

在栅格化的基础上，就可以应用Dijkstra 算法或A\*算法。其中A\*算法会使用启发式的评估函数依据扩展结点选择当前“代价”最低的单元进行下一步探索，直至搜索到终点。其中，A\*的评估函数可表示为：

(1)

其中， 是关于目的地 的评估函数， 是当前代价，即从起点到到目的地 的最短路径值； 是预估代价，即机器人当前位置到目的地 的最短路径的启发函数值。Yogang Singh 等在传统A\*算法的基础上，加入了一些针对海洋场景的限制条件，成功使其应用于海洋环境的自动机器人身上，并且可以躲避动态障碍物和海洋洋流[8]。

Voronoi 图是关于空间临近关系的一种数据结构。其使用一些基本图形来划分空间，这些图形被称为元素，以每两点之间的中垂线来确定元素的边，也就是通过障碍物边界上的相邻两点的等距点构造出区域的边界线，最终把整个空间划分为结构紧凑的Voronoi图，如图1的Voronoi图。最后运用算法对多边形的边所构成的路径网进行最优搜索，移动机器人沿着子区域的边界线进行移动，规划出一条从起始点到目标点的路径。Voronoi图的优点是可以把障碍物把障碍物包围在元素中，能有效实现避障；缺点是控制过程中如果产生位置误差，就极有可能与障碍物发生碰撞，并且由于图的重绘比较消耗时间，因而很难应用于大型的动态环境。近几年，Ayawli 等[9]对于移动机器人在复杂且动态的环境下进行的路径规划问题，提出了一种可以有效判定动态的碰撞威胁障碍物，可以避免不必要的重新规划计算的Voronoi图路径规划算法。Mauro Candeloro 等[10]也成功使用了动态的Voronoi图规划算法对欠驱动船舶船的路径进行了规划。

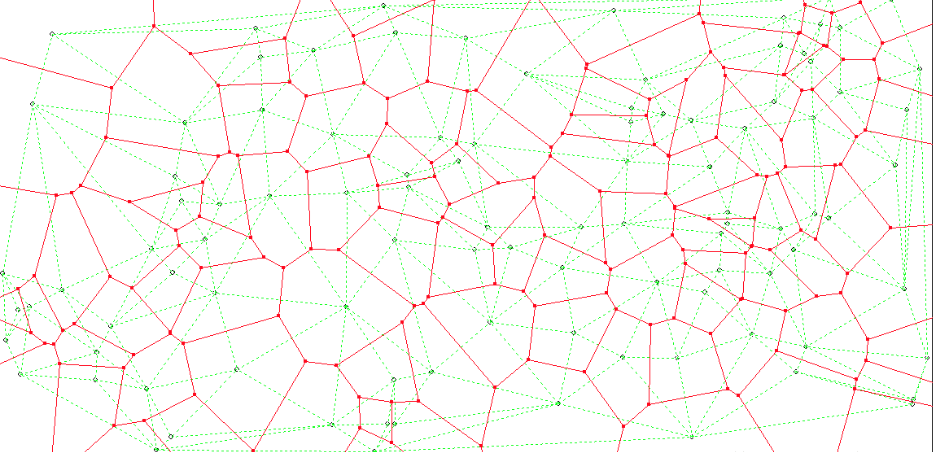


图1 Voronoi图

蚁群算法（Ant Colony Optimization，ACO）是1992年由意大利学者Dorigol提出的算法[11]。其思想来自于对蚁群觅食行为的探索，因为蚂蚁在觅食的时候，会在道路上留下信息素，其可以向同伴传递信息，而相同时间中较优路径蚂蚁遍历的次数较多而信息素浓度高，使得接下来的蚂蚁也更多地走这条路径，也留下一定的信息素，以达到正反馈的效果。蚁群算法使用迭代的方式实现，也可以很容易地变为并行算法，通过多处理器并行计算。不过缺点是要重复地迭代计算，因此计算量很大，而且容易陷入局部最优解。陷入局部最优解的问题可以通过加入精英蚁等方式缓解，但是仍然会存在这个问题。Ajeil F H等[12]使用了老化算法，对蚁群算法进行了改良，使其更好地适应了静态乃至动态的障碍物环境。

在移动机器人领域中，局部路径规划（也称为动态路径规划）更为常用。局部路径规划需要用传感器实时采集环境信息以确定地图信息，获取当前场景中的障碍物分布情况和运动情况，从而获取从当前位置到达一个子目标位置的最优路径。局部路径规划常用的算法有人工势场法、模糊算法和基于人工智能的Q-Learning和深度学习算法（Deep Learning）等。

人工势场法（Artificial Potential Fifield，APF）是由Khaib[13]在1986年提出的一种虚拟力法，主要用于实时避障。它模仿引力和斥力下的物体的运动，目标点和物体间为引力，运动体和障碍物之间为斥力，按各个障碍物和目标位置产生人工势能的总和，取极小值的决策运动路径，就如图2所示。因为路径是沿着势场的负梯度方向搜索的，所以势场必须可微。人工势场法的优势是结构简单，无需大量的预计算，能够生成比较光滑的路径。由于只是用了局部的信息，所以可以实时进行计算，实现动态的路径规划。缺点是容易陷入局部最小点，也有可能在本可以直线行走的路径不断地振荡前进。对于三维空间无人机与地面协同合作的问题，Jayaweera等[14]提出了一种能够与跟踪目标保持距离的动态人工势场路径规划的技术，该技术能够使得无人机避开轨迹上的障碍物，紧紧跟随着目标。

模糊算法的思想是把普通集合中的取值变得灵活化，例如原来只能取0和1，而模糊系统可以取 [0, 1] 区间中的任意一个数值，就较为适合处理不确定性的问题。基于模糊逻辑的路径规划参考了人的驾驶经验，可以将生理上的感知和动作相结合，根据实时的传感器信息，通过查表获取规划信息，从而实时地进行路径规划[15]。模糊逻辑算法较为符合人类思维习惯，也能够在动态变化的未知环境中进行实时规划，但是模糊隶属函数的设计和规则的确定需要靠人的经验，而一旦确定模糊规则后，在线调整就较为困难了。2016年Fakoor等[16]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。在没有精确的障碍物信息的情形下，可以通过混合马尔可夫决策和模糊推理系统进行改进，使用数值迭代的方式来实时求解贝尔曼方程，且可以有效避免碰撞且快速收敛。2020年Precup R E等将Grey Wolf Optimizer（GWO）算法的应用融入了基于模糊控制器的路径规划算法中。

近几年来，由于人工智能领域的发展，基于人工智能的路径规划算法也大放异彩。人工智能路径规划是让移动机器人从环境中获取信息，然后通过人工智能算法进行机器学习和自主学习，以实现移动机器人的自主路径规划。人工智能领域中的强化学习与移动机器人的路径规划不谋而合，拥有着许多的共通之处，因此也有许多人从强化学习中的Q-learning入手进行路径规划学习。Q-learning是一种著名的在线学习算法，会实时根据机器人与环境的交互与反馈来做出评分，以达到奖励或惩罚的效果，是目前强化学习中最有效的路径规划算法，就如图3所示。2019年Soong等[18]对于Q-learning收敛速度慢的问题，利用花授粉算法对Q-learning进行改进，通过适当初始化Q值加快了Q-learning的收敛速度。同样是2019年，Bae等[19]提出了一种结合了卷积神经网络（CNN）的Q-learning路径规划算法，使得多个移动机器人能够在复杂环境下协同规划出路径，并高效的完成任务。

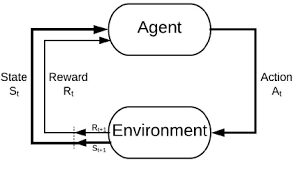
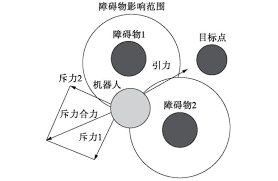


图2 人工势场法机器人受力图 图3 Q-Learning原理图

1. **国内（China）：**

除了国外的进展，国内的学者也对移动机器人的路径规划算法有着许多的贡献。2021年刘子豪等[20]提出了反向搜索策略和跳跃点搜索理论结合的改进A\*算法，剔除了不需要的节点以减少运算时间，并对路径进行处理以加强光滑性，解决了A\*算法冗余点过多且存在许多拐点的问题。Hu等[21]也对于动态环境的多个移动机器人问题，提出了一种基于Voronoi图的协同探索策略和基于强化学习的无碰撞算法，利用动态Voronoi分区减少了重复探索的区域，减少了时间消耗和能量损耗。

对于人工势场法的路径过长与存在局部极小点这些缺点，国内学者也进行了相应的探索，努力寻找了一系列的解决方案。2020年李军等[22]对于路径势场不完善的问题，提出了一种新的人工势场模型，这类模型可以保证行驶的稳定性。同样是2020年，Liu等[23]提出了一种双势场融合的自适应路径规划系统，以让移动机器人适应不同障碍物和不同速度下路径规划的问题。

而在新兴的人工智能路径规划领域，国内学者也提出了许多优秀的算法。2020年Zhao等[24]针对Q-learning算法收敛速度慢的问题，提出了一种基于当前状态节点最短距离连续更新的经验记忆学习（EMQL）算法，通过在一次迭代中多次更新，在收敛速度上胜于原来的Q-learning算法。而近几年最火热的深度学习，也在路径规划算法中有着一定的应用场景。Gao等使用了一种新的增量训练方法，将深度学习算法中的双延迟深度确定性与概率路线图相融合，提出了一种新的融合算法用于移动机器人的路径规划。

1. **未来展望（Future work）：**

（1）将不同路径规划算法进行融合，即混合算法。由于没有免费午餐（NFL）定理，任何一个单一的路径规划算法都不能够解决实际应用中路径规划的所有问题。尤其是面对新的交叉学科的新问题时，研究新的路径规划算法难度较高，而此时将不同的路径规划算法融合起来使用，往往就会有不错的效果[26]。

（2）多机器人协调合作进行路径规划。当今社会机器人的作业范畴不断扩大，作业难度也日益复杂，单个机器人已经很难独自完成人们所需的任务，而需要多个机器人共同协调参与一项任务才能够保证工作效率，例如在物流行业中，快递件的移动和快递分拣就需要多个机器人协同合作。多机器人协调合作可以解决由于作业环境变化或部分机器人故障这类问题所造成的工作停滞问题。但是多机器人协调合作也带来了一系列问题，其中一个很重要的问题就是多机器人应该如何进行路径规划，如何达到互相协调、互不影响的效果。由于机器人数目增多，提高了路径规划的难度，因此也吸引了国内外学者的兴趣，近几年许多学者也是从这方面入手对路径规划算法进行研究[27]。

（3）结合网络技术、物联网技术这类新一代信息技术进行路径规划。现阶段的移动设备的传感器都十分丰富，并且物联网等网络技术也在不断发展。例如无人驾驶汽车就能依靠其高速的计算模块，借助传感器的丰富信息并结合网络技术，实时地分析路况信息，并进行自动驾驶。网络协同和物联网等技术能够很好地获取到更丰富的环境信息，还能将本地获取到的信息发送到云端，使用云服务结合云服务器的高精地图和大量分布式的传感器数据计算出一条更为安全的无碰撞路径，从而更好地进行路径规划[28]。但是这种方案也存在着网络稳定性不好、数据容易丢失等致命问题，需要在后面进一步地寻找更好地优化方案。

（4）对更为复杂及多维的环境进行路径规划研究。目前许多移动机器人的路径规划都是针对二维平面展开的，只能在平整的地面上进行路径规划，如扫地机器人和迎宾机器人这类常见的移动机器人。但是由于科技的发展和人们安全意识的提高，学者们开始研究如何在空中和海洋这类复杂的三维的空间环境进行路径规划，以便于移动机器人帮助人类进入一些较为危险的环境中探索。无人机在空中如何避开树枝，甚至是飞行中的鸟类这类移动障碍物，是一个非常重要的研究方向[29]；仿生鱼类机器人也需要在有着复杂洋流的险象环生的海洋环境中进行路径规划，这对于传感器的要求也更为苛刻，也需要更优秀的路径规划算法[30]。

**4 参考文献（References）：**

1. International Federation of Robotics. Service robots [EB/OL]. [2013-06-09]. <http://www.ifr.org/service.robots/>
2. 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, 2015, 30: 319-328.
3. AJEIL F H, IBRAHEEM I K, AZAR A T, et al. Grid based mobile robot path planning using aging-based ant colony optimization algorithm in static and dynamic environments[J]. Sensors，2020, 20(7).
4. 毕静. 一种适合网络游戏的多 NPC 协同运动策略[J]. 计算机工程, 2011, 37(7): 181-183.
5. Steven M. LaValle. Planning Algorithms. Cambridge University Press. ISBN 978-1-139-45517-6.
6. Lozano-Pérez, Tomás; Wesley, Michael A. An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles[J]. Communications of the ACM, 22 (10): 560–570.
7. Matthew A. Turk, Keith D. Gremban, Martin Marra. VITS – A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(3): 342-361.
8. Yogang Singh, Sanjay Sharma, Robert Sutton. A constrained A\* approach towards optimal path planning for an unmanned surface vehicle in a maritime environment containing dynamic obstacles and ocean currents[J]. Ocean Engineering, 2018, 169(1): 187-201.
9. AYAWLI B, MEI X, SHEN M, et al. Mobile robot path planning in dynamic environment using voronoi diagram and computation geometry technique[J]. IEEE Access, 2019, 7: 86026-86040.
10. Mauro Candeloro, Anastasios M. Lekkas, Asgeir J. Sørensen. A Voronoi-diagram-based dynamic path-planning system for underactuated marine vessels. Control Engineering Practice, 2017, 61: 41-54.
11. DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Positive feedback as a search strategy[C]. Technical Report: 91-016, 1999.
12. Ajeil F H, Ibraheem I K, Azar A T, et al. Grid-based mobile robot path planning using aging-based ant colony optimization algorithm in static and dynamic environments[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1880.
13. KHATIB O. Real-time obstacle avoidance system for manipulators and mobile robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
14. JAYAWEERA H M, HANOUN S. A dynamic artificial potential field (D-APF) UAV path planning technique for following ground moving targets[J]. IEEE Access, 2020, 9: 192760-192776.
15. Bakdi A, Hentout A, Boutami H, et al. Optimal path planning and execution for mobile robots using genetic algorithm and adaptive fuzzy-logic control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 89: 95-109.
16. FAKOO Ｒ 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.
17. Precup R E, Voisan E I, Petriu E M, et al. Grey wolf optimizer-based approaches to path planning and fuzzy logic-based tracking control for mobile robots[J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2020, 15(3).
18. SOONG L E, PAULINE O, CHUN C K. Solving the optimal path planning of a mobile robot using improved Q-learning[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 115: 143-161.
19. BAE H, KIM G, KIM J, et al. Multi-robot path planning method using reinforcement learning[J]. Applied Sciences, 2019, 9(15): 3057.
20. 刘子豪, 赵津, 刘畅, 等. 基于改进A\*算法室内移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(2): 186-190.
21. HU J, NIU H, CARRASCO J, et al. Voronoi-based multirobot autonomous exploration in unknown environments via deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14413-14423.
22. 李军, 李古月. 基于改进人工势场的路径规划与跟踪控制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(9): 25-30.
23. LIU Z, YUAN X, HUANG G, et al. Two potential fields fused adaptive path planning system for autonomous vehicle under different velocities[J]. ISA Transactions, 2020, 112: 176-185.
24. ZHAO M, LU H, YANG S, et al. The experience-memory Q-learning algorithm for robot path planning in unknown environment[J]. IEEE Access, 2020, 8: 47824-47844.
25. GAO J, YE W, GUO J, et al. Deep reinforcement learning for indoor mobile robot path planning[J]. Sensors, 2020, 20(19): 5493.
26. 金飞虎, 郭琦. 基于蚁群算法的 Hopfield 神经网络在多空间站路径规划的应用研究[J].计算机应用研究, 2010(1): 51-53.
27. Nazarahari M, Khanmirza E, Doostie S. Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced genetic algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 115: 106-120.
28. Wan S, Lu J, Fan P, et al. Toward big data processing in IoT: Path planning and resource management of UAV base stations in mobile-edge computing system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 7(7): 5995-6009.
29. Phung M D, Ha Q P. Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization[J]. Applied Soft Computing, 2021, 107: 107376.
30. Yu Z, Tao J, Xiong J, et al. Neural-Dynamics-Based Path Planning of a Bionic Robotic Fish[C]//2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2019: 1803-1808.

**5 英文标题**

**Review of Path Planning Algorithms for Robots**

**Shengjun Fang**

**Nanjing University, Institute for Artificial Intelligence , 201300035@smail.nju.edu.cn**

**Abstract：**

Path planning is one of the hot research topics of mobile robot, and it is also one of the key technology to realize autonomous navigation of robot. The current target of path planning algorithms is to improve the search speed, shorten the search time of robot path planning and apply it in more complex environment. In this review, we will summarize path planning algorithms and their applications international and in China. The path planning algorithms are divided into two categories, global path planning and local path planning, and then we analyze theory of these path planning algorithms, like Grid-based Algorithm, Voronoi Graph Algorithm, Ant Colony Optimization Algorithm, Artificial Potential Fifield, Fuzzy Algorithm and Artificial Intelligence Algorithm, from perspectives of algorithm category and timeline. This review also considers the representative research results in recent years and analyzes the advantages and disadvantages of various planning algorithms. Finally, we forecast the future development trend of robot path planning technology in further research, hybrid algorithm, multi-robot collaboration, internet of things, complex and multi-dimensional environment, which provides some ideas for the research of robot path planning.

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