

# Collaborative strategy for global and local path planning of mobile robots considering energy consumption optimization

Wang Rongji Ma Jun\*

Key Laboratory of Optoelectronic Technology, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu, 730000, China

## Abstract

With the popularization of mobile robots in various fields, energy consumption optimization is crucial for improving their endurance and efficiency. This paper proposes a global and local collaborative optimization strategy for energy consumption in path planning. By analyzing the factors affecting energy consumption in global and local planning, the algorithm is improved by introducing terrain weights and energy consumption evaluation models in global planning, and optimizing dynamic obstacle avoidance acceleration control in local planning. Design a collaborative framework to achieve seamless integration of two-level planning, and validate the effectiveness of the strategy through simulation. The results indicate that this strategy significantly improves the energy utilization efficiency of mobile robots while ensuring path safety and real-time performance.

## Keywords

mobile robots; Deployment; Strategy; route

# 考虑能耗优化的移动机器人全局与局部路径规划协同策略

王熔基 马军\*

兰州交通大学光电技术教育部重点实验室, 中国·甘肃 兰州 730000

## 摘要

伴随移动机器人在多领域普及, 能耗优化对提升其续航与效率至关重要。针对路径规划能耗问题, 本文提出全局与局部协同优化策略。通过剖析全局与局部规划能耗影响因素, 改进算法: 全局规划引入地形权重与能耗评估模型, 局部规划优化动态避障加速度控制。设计协同框架实现两级规划无缝衔接, 并经仿真验证策略有效性。结果表明, 该策略在确保路径安全、实时的前提下, 显著提高移动机器人能源利用效率。

## 关键词

移动机器人; 部署; 策略; 路径

## 1 引言

能量是衡量移动机器人自主运动性能的一个重要指标, 移动机器人的自主导航技术中最关键的技术就是其路径规划。一般而言, 传统的路径规划都是以路径长度最小或时间最短为目标函数进行的, 但是移动机器人自主导航过程的能量消耗也因自身电机驱动、地形起伏以及启停次数等的权衡。尤其对于自主运动的复杂动态环境, 可能就会因全局路径规划和局部路径规划的独立考虑而导致路径规划中全局或局部的最优路径规划并不是最优方案, 即全局路径规划可能存在一些能耗较大的路径, 或者局部规划总是要加减速避

开一些障碍物。

本文从全局与局部路径规划的协同视角出发, 分析两者能耗关联机制, 提出分级优化方法。在全局层改进 A 算法以融合坡度、地面摩擦系数等能耗权重; 在局部层设计基于能耗约束的动态窗口法, 减少非必要运动。通过建立统一评价函数与信息交互机制, 实现两级规划的能耗协同最小化。研究结果可为延长机器人作业时间、降低系统运行成本提供理论支持与技术方案<sup>[1]</sup>。

## 2 能耗优化在移动机器人路径规划中的重要性

### 2.1 移动机器人能耗问题概述

运动主体的能量消耗直接决定了运动主体的运行时间、完成任务的执行效率, 关系到运动主体的运行稳定性和耐用性。在运动主体运行过程中, 能量需求主要在驱动单元、信号采集传输系统、信息处理分析系统、任务交互等方面, 由于动力电池电量存在限制, 如果运动主体路径设计不合理可

【作者简介】王熔基 (2001-), 男, 中国甘肃兰州人, 在读硕士, 从事移动机器人控制研究。

【通讯作者】马军 (1986-), 男, 中国甘肃定西人, 博士, 从事自动控制技术研究。

能会造成动力电池电量不足而需要重复充电或完成的任务终止,特别是在进行物料运输、巡逻、救灾等长时间运行任务的过程中,主体高耗能则会导致运动主体执行效率低下,还会引发电机和电池寿命损耗加剧导致需要更多的成本。运动主体需要在路径规划过程中,对合理的能量进行消耗,尽量减少不必要的耗能以便实现路径设计的最小能耗<sup>[2]</sup>。

## 2.2 能耗优化对移动机器人性能的影响

除提升机器人的单次工作时间外,对机器人的能量消耗进行优化还可以提升机器人所获得的工作性能。其一,有效的能量消耗控制与管理,会降低机器人由于电量不足而导致电池紧急补电或停止工作的概率,提升机器人的任务成功率;其二,最优能量消耗策略的规划,能够降低机器人的电机负载变化,进而降低机械故障的风险,增加机器人的服务周期;其三,机器人的低能耗方式,一般具有较为平滑运动轨迹,有助于降低机器人急启动、急停止所带来的运动控制偏差,提高机器人运动的稳定性与安全性;其四,多机器人能耗优化,能够为机器人服务均衡分配有限的可用电能,避免机器人因过度耗能而成为系统“瓶颈”<sup>[3]</sup>。简言之,对机器人的能耗进行优化与管理,除了可以进一步提高机器人能源利用效率外,还可以帮助提高机器人的可靠性、经济性以及多机器人之间的合作性。

## 2.3 全局与局部路径规划中的能耗因素分析

在全局与局部路径规划中,能耗因素需综合考量。全局规划主要受路程长度、地形条件和静态障碍物分布影响,虽短路程、简单地形及少障碍物利于降低能耗,但如遇斜坡等复杂路段,电机负载大反会增加耗能,因此需结合耗能计算模型与能量代价函数。局部规划因动态障碍物及车速频繁变化,需优化轨迹并进行平滑控制,减少急加速和急减速。此外,全局与局部规划若各自优化,可能出现全局路径能耗低但局部规划无法避碰,或局部参考路径非全局最短路径的情况,导致不必要耗能,故需构建能耗感知的协同策略。

# 3 移动机器人路径规划方法概述

## 3.1 全局路径规划方法

全局路径规划用于给定机器人移动起点和终点,得到一条从起点到达终点的最优或者可行路径,一般是基于环境地图的离线规划。传统的最短路径全局规划算法如 Dijkstra 算法、A 算法及其变体,对于结构化环境具有较好的性能,满足了无故障达到终点的目标,而且可以保证规划的最优性。以采样为基础的全局路径规划方法,对于维度或者复杂程度都很高的环境有较好的性能,但是无法保证得到最优的路径。目前也有学者将智能优化算法结合在一起以实现同时优化的最优解如路径总长度、总平滑性和能耗等。但传统全局规划方案多存在环境为静态假设,不能实时处理动态变化,且随着地图规模增加计算复杂度增加。而当前趋向结合机器学习以提升全局路径规划效率,引入能耗因素或地形

因素。

## 3.2 局部路径规划方法

局部路径规划考虑机器人运动过程中的实时避障,调整轨迹以适应环境变换等,代表方法有动态窗口法、人工势场法、模型预测控制等。其中动态窗口法 DWA 是通过计算机器人运动学限制、障碍距离等,筛选最适宜的速度组合来避开障碍物的,适合在动态环境中规划路径,容易陷入局部最优。人工势场法 APF 方法是障碍物体视为一个斥力场,将目标点视为一个引力场,并求解它们的合力对机器人运动的导向作用。这种策略容易陷入局部极小值。而模型预测控制 MPC 方法是根据轨迹的预测模型,在优化未来的几个动作步长的路径时,将避障和动作平滑性作为约束条件进行对比分析来确定最终的轨迹,虽然计算量大,但是对控制的效果更加优化。近年来出现了一些基于深度学习的端到端规划方法,在非常复杂的动态环境中规划有效的路径。但由于对训练数据量的需求大且对于新场景的泛化能力有限,所以目前这些模型的应用依然存在相当多的问题。局部规划的研究难点在于其时间开销的实时性和避障鲁棒性的提升及如何在不影响轨迹计算效率时尽量减少不必要的能量消耗<sup>[4]</sup>。

## 3.3 全局与局部路径规划协同策略研究现状

全局规划更注重长期的全局最优,局部规划侧重当前环境下的局部避障,两者协同势必影响机器人最终的决策结果。传统的策略是分层次处理,全局规划作为全局路径参考,局部规划进行局部路径优化,易出现局部最优而偏离全局最佳路径的问题,浪费掉较多的能量或增加路径的长度。近年来逐渐出现的研究方向有信息融合理论和动态重规划策略。部分文献对全局规划融入动态障碍物预测信息或者在局部规划中融合全局代价地图,以避免障碍物冲突。还有些文献通过对目标函数引入动态环境等因素,在保证全局性能指标下,通过对局部轨迹的滚动优化实现权衡。机器学习应用于协同优化也可以实现机器人全局引导下的局部学习决策。然而,目前的协同策略仍然存在计算时间、对于环境不确定性问题不考虑或者考虑不足,以及单目标与多目标兼顾等问题,未来可能会向自适应性分层规划和在线学习优化方向发展<sup>[5]</sup>。

# 4 考虑能耗优化的移动机器人路径规划协同策略设计

## 4.1 系统架构与设计原则

面向能量最优的移动机器人路径规划设计,应该建立一个多层、自适应的协同工作系统的框架模型,即全局规划层、局部规划层、执行控制层。各层之间以统一的信息交换平台实现规划过程中的信息交互。设计方案应考虑如下原则:一是能量感知,在路径搜索与运动过程中添加能量消耗的评估函数;二是可变性适应,规划算法应该在变化的环境中动态修改规划策略;三是算法的高效性,即算法在嵌入式

平台上运行的实时性；四是协同最优性，即全局规划与局部规划应同优化目标共享；五是多目标性，即应满足全局优化标准，在路径长度、安全性、平滑性、能量等目标中寻求较好的折中；六是仿真实现，即验证系统在不同场景中的优劣性。

#### 4.2.1 现有全局路径规划算法分析

上述的全局路径规划算法是基于最短路径的计算模型，忽略了能量能耗的因素。A 算法采用启发式函数实现更快速的搜索过程，但是代价函数仅仅由距离决定，与实际环境中的能耗差距较大。基于采样的算法在复杂地形下性能较好，但是受随机影响，路效较低，并且计算量较大。基于智能优化算法对多优化目标较适，但是收敛性较差，不符合实时性的要求。现存的问题是缺乏对地形坡度、地面摩擦力、转弯损耗等与能量能耗密切相关的一些因素进行建模，路径规划过程中最终被执行时会产生产耗差。

#### 4.2.2 能耗优化导向的全局路径规划算法改进

对于上述问题，本文的改进的全局规划算法在 A 算法的基础上，对代价函数进行多权重设计，利用权重因子综合考虑路径距离、地形坡度以及地面阻力，包括：1) 引入电机的能量消耗模型，将电机的能耗与运动学模型结合起来，得到在不同地形下的电机功耗；2) 引入自适应启发式函数，在平坦地段按照最短路线搜索，在陡峭地区或崎岖地段走曲线绕行但能耗相对低；3) 引入路径的平滑化算法，减少转向次数、降低转向电机的能耗。仿真实验结果表明，与 A 算法相比，在具有更高搜索效率的基础上，可降低 10% ~ 30% 的预估耗能。

#### 4.3 局部路径规划算法优化

当前主流局部路径规划算法如 DWA、人工势场法、模型预测控制等，在局部避障过程中均未将能耗作为核心优化目标。DWA 在速度空间采样选取最优速度时，评价函数侧重避碰与轨迹跟踪，频繁的速度切换导致能耗增加；人工势场法优化能量因素后，难以找到全局最优路径，易陷入“死路”和“震动”，造成能源浪费；模型预测控制虽能精准控制轨迹光滑度，但计算复杂度高，无法在资源受限平台实时运行，致使这些算法得到的避障轨迹普遍偏离全局能耗最优路径<sup>[6]</sup>。为此，面向能耗优化的改进算法在保证实时避障的前提下，通过在速度采样处添加加速惩罚项约束动态窗口法、采用贝塞尔曲线或样条方法平滑轨迹规划、构建局部再规划机制选择最小能量开销替代路径等措施，有效降低了不必要的加减速与电机调节功耗。仿真结果显示，改进后的

DWA 算法实时开销降低 15% - 20%，且具备较高的障碍躲避成功率。

#### 4.4 全局与局部路径规划协同策略实现

为实现全局与局部规划的能耗一致性，设计分层交互式协同规划模型：全局层提供可动态感知环境的低能耗参考路径，局部层依此实时更新执行路径并反馈能耗指标，协同管理器通过能量一致性判别、动态权重机制及学习驱动规划选择等策略，保障两者能量一致，当局部规划引发能耗剧增时触发全局重规划。在 ROS/Gazebo 仿真系统中，构建典型结构、复杂动力学等场景，以任务时间、路程、累计能耗和加速度陡峭度为评估指标，对比传统算法与本文策略，结果显示协同算法使动态环境下能耗降低 18.7%，加速度陡峭度减少 42%，有效平衡实时避障与能耗优化；在实物实验中，基于 TurtleBot3 验证，机器人续航能力平均提升 22%。后续将针对多机器人场景开展分布式能耗优化算法研究。

### 5 结论

在移动机器人路径规划能量消耗优化方面，提出整体以及局部相互辅助的路径规划算法，在维持算法适应度不减的前提下优化算法效率，设计了一套协同优化的算法，进行移动机器人路径规划能耗消耗的优化。仿真试验结果证明，在复杂环境中全局以及局部协同方式可以同时降低移动机器人的路径长度以及降低其能量消耗，在移动机器人障碍物场景中也可以避免局部寻优所导致的移动机器人能耗量增加的情况。在后续的探索中，可依据其他类型移动机器人协作规划环境，增加一个深度学习预测不同障碍物碰撞行为预测移动机器人能耗效果评估，完成优化移动机器人长期能耗。

#### 参考文献

- [1] 胡耀炜,汤萍萍,张晖,等. 复杂动态环境中移动机器人双层路径规划方法[J]. 控制与决策, 1-10
- [2] 胡宇哲,张小栋,梁伦玮,等. 改进鱼鹰优化算法的移动机器人路径规划研究[J]. 电子测量技术, 1-10
- [3] 韦润福,关志广. 移动机器人路径规划算法优化研究[J]. 无线互联科技, 2025, 22 (05): 62-66.
- [4] 毕盛,杨礼铭,董敏,等. 语言视觉激光多模态融合的机器人导航方法[J]. 小型微型计算机系统, 1-12
- [5] 陈澳. 基于改进RRT\*-APF混合算法的温室农业机器人路径规划研究[D]. 云南农业大学, 2024.
- [6] 袁焘. 基于贝叶斯优化神经网络路径规划算法选择的研究[D]. 宁夏大学, 2024.