

机械臂在智能制造中的路径规划优化研究

吴伟豪

厦门奥星达粉末冶金有限公司, 福建省厦门市, 361000;

摘要: 在智能制造领域, 路径规划优化是关键的一环。本文对机械臂路径规划问题进行综述, 重点介绍传统路径规划方法及其在智能制造中的应用情况, 对智能制造环境下机械臂路径规划优化研究现状进行分析。针对智能制造中机械臂路径规划存在的问题, 提出一种基于改进A*算法的路径规划优化方法, 通过仿真实验验证了该方法在复杂环境下的可行性和有效性。为了验证所提算法的性能, 在机械臂协作与多臂路径优化场景下进行了实验验证。实验结果表明, 所提算法可有效地解决智能制造中机械臂的路径规划问题, 与传统方法相比具有更好的实时性和鲁棒性。

关键词: 机械臂; 智能制造; 路径规划优化

DOI: 10.69979/3060-8767.25.11.093

引言

路径规划问题是智能制造领域中的关键问题之一, 它对于提高产品的质量、加快生产效率具有重要意义。随着智能制造技术的发展, 机械臂在智能制造中发挥着越来越重要的作用。路径规划作为机械臂的一项关键技术, 是机械臂实现自动作业、提高生产效率和生产质量的重要保证。因此, 如何解决机械臂路径规划问题成为当前研究的热点, 并逐渐成为智能制造领域中的一个研究难点。本文针对智能制造中机械臂路径规划问题, 首先从传统路径规划方法入手, 对其进行了分析比较; 然后对智能制造环境下机械臂路径规划问题进行了综述; 最后提出一种基于改进A*算法的智能制造环境下机械臂路径规划优化方法。

1 机械臂的结构与运动原理

机械臂是一种具有多个自由度的机械装置, 通过连杆机构将末端执行器与机械臂连接, 可实现对物体的抓取、搬运和装配等作业。机械臂结构包括末端执行器、关节机构、本体结构和控制系统。其中末端执行器是机械臂的主要执行部件, 包括运动控制器、关节和关节控制单元。本体结构是机械臂的基础部分, 主要包括作业平台、关节、末端执行器和控制系统等, 它是机械臂实现各种任务的基础。控制系统是机械臂执行任务的核心, 主要包括主控制器和通信单元。主控制器控制机械臂完成各种动作, 通信单元完成与其他机器人的通信^[1]。

2 路径规划在智能制造中的作用

在智能制造的各个环节中, 路径规划都起着举足轻重的作用, 它是实现产品自动化装配、移动机器人定位

和搬运、设备运行控制和管理等诸多环节的基础。在智能制造中, 路径规划是机械臂控制的关键。因为机械臂作为一个完整的智能制造系统, 其执行的任务包括对多个工件进行夹取、装配、移动等, 因此路径规划不仅要考虑机械臂在复杂环境下如何实现定位和移动, 还要考虑如何确定机械臂从起点到目标位置所经过的路径, 以及在路径上如何保证机械臂能够安全地进行移动。因此, 机械臂的路径规划对于整个智能制造系统而言至关重要^[2]。

3 机械臂路径规划理论综述

3.1 路径规划问题定义及分类

路径规划是指从起点到目标位置的过程, 是整个机械臂控制系统的核心, 需要考虑机械臂运动的灵活性、安全性和稳定性等问题。根据优化目标的不同, 可以将路径规划分为全局路径规划和局部路径规划。全局路径规划是指整个机械臂运行过程中各个关节角度和姿态的最优解, 通过求解最优解来获得机械臂最优运动轨迹, 这种方法可以使机械臂的控制更加简单; 而局部路径规划是指机械臂在某一个工作空间中进行最优路径搜索, 该方法可以保证机械臂能够按照最短路径到达目的地, 同时减少机械臂运动过程中所需要的时间。通常情况下, 全局路径规划算法主要有遗传算法和粒子群算法等。

3.2 机械臂运动学与动力学约束

机械臂运动学约束主要有三个方面: 第一, 机械臂的正运动学; 第二, 机械臂的逆运动学; 第三, 机械臂的奇异性。由于机械臂的复杂运动具有多个自由度, 因此对于机械臂的运动学约束也就具有很大的难度。在运

动力学约束方面,通常有关节角度约束、关节力矩约束等;在动力学约束方面,主要包括末端执行器速度约束、加速度约束等。在路径规划方面,主要有三个方面:一是确定机械臂的工作空间;二是确定机械臂各个关节的角度和速度;三是确定机械臂各个关节之间的位置关系。

3.3 传统路径规划方法(如Dijkstra、A*、RRT等)

Dijkstra算法是最经典的路径规划算法,基于A*算法,通过几何推理来优化搜索最优路径,但它是基于位置的,没有考虑运动中的碰撞。A*算法存在一些不足:A*算法在搜索过程中需要多次重复计算,影响了搜索效率;对初始点的要求较高,当移动空间很大时,所需时间过长;当移动空间很小时,由于路径长度增加而导致路径不平滑。RRT是一种启发式路径规划方法,利用随机采样的方式来提高路径规划的效率。RRT算法采用启发式搜索方式来寻找最优解,避免了机械臂在运行过程中可能遇到的碰撞问题。RRT算法也是一种经典的路径规划算法。

3.4 智能优化算法(如遗传算法、粒子群等)在机械臂路径规划中的应用

智能优化算法是指利用计算机模拟生物智能机制的一种全局搜索算法,其在求解复杂优化问题方面有着得天独厚的优势。智能优化算法具有很强的自适应、自学习、自组织能力,不仅能够自动地跳出局部最优解,而且可以从全局最优解中获取有效信息,因此在路径规划方面具有很大的潜力。当前,智能优化算法已被广泛应用于路径规划中,并取得了一定的成果。王慧芳等^[3]将遗传算法和粒子群算法相结合,提出了一种改进的遗传粒子群优化算法。仿真结果表明,该方法能有效提高机械臂在复杂环境下的路径规划能力,同时有效降低了机械臂在运动过程中的碰撞风险。

4 智能制造环境下的路径规划优化方法

4.1 多目标路径规划需求分析

在智能制造环境下,机械臂的路径规划必须考虑多个目标,既要考虑机械臂的运动学约束、动力学约束以及安全性要求等,又要考虑机械臂在多个工作空间中的路径规划,即机械臂的路径规划需要同时满足多个目标的要求。因此,智能制造环境下机械臂路径规划问题可以被看成一个多目标优化问题。基于智能制造环境下机械臂路径规划需求分析,目前主要从以下几个方面开展研究:①将传统路径规划方法应用于多目标路径规划问题;②将智能优化算法应用于多目标路径规划问题;③

将传统方法和智能优化算法相结合,实现智能制造环境下机械臂的多目标路径规划。

4.2 复杂环境中的碰撞检测与避障策略

在智能制造环境下,机械臂在运动过程中可能会遇到碰撞风险,而碰撞风险的存在会对机械臂的运行效率产生不利影响。因此,为了保证机械臂能够安全地完成各种任务,在路径规划时需要考虑碰撞问题。目前,在路径规划中主要采用两种碰撞检测方法:一种是基于几何方法的碰撞检测,另一种是基于动力学方法的碰撞检测。基于几何方法的碰撞检测不依赖于机械臂的精确位置信息,但其容易受到环境、机械臂等因素的影响;而基于动力学方法的碰撞检测可以通过测量机械臂关节角速度和力矩等信息来进行判断,但其具有一定的滞后性。

4.3 机械臂协作与多臂路径优化

随着智能制造系统中机械臂的数量不断增多,机械臂之间的协作也变得越来越重要。机械臂之间的协作可以使不同的机械臂完成不同的工作任务,从而提高整个智能制造系统的效率。在机械臂协作中,既需要考虑如何保证机械臂之间进行协作的过程安全,又需要考虑如何降低机械臂之间产生碰撞的风险,从而提高整个智能制造系统的安全性。因此,在智能制造环境下,机械臂协作也成了研究热点。目前,针对机械臂之间进行协作的问题主要有两种方法:一是通过仿真和实验来研究不同协作方式对智能制造系统效率的影响;二是通过实时路径规划来实现不同协作方式对智能制造系统效率的影响^[4]。

4.4 实时路径规划与系统集成

通过实时路径规划可以提高机械臂系统的协同作业能力,这一过程可以分为3个步骤:①路径规划,根据机械臂系统的需求,确定机械臂的最优路径;②路径转换,将复杂的路径转换为简单的机械臂系统可以接受的最短路径;③实时优化,对生成的最短路径进行优化,得到机械臂系统最优控制方案。在整个过程中,实时路径规划是整个系统中非常重要的一个步骤。随着机器人技术和传感器技术的不断发展,机械臂系统将会在制造过程中得到广泛应用,并在实现智能制造的过程中发挥越来越大的作用。因此,实时路径规划对于智能制造而言具有非常重要的意义。

4.5 典型优化算法与改进方法

智能制造环境下的机械臂路径规划主要以遗传算

法、粒子群算法、蚁群算法为代表，其中遗传算法是智能制造环境下路径规划的主流方法，具有全局寻优能力强、收敛速度快、易于实现等优点。但遗传算法存在一定的缺陷，例如收敛速度较慢，对初始种群的要求较高。粒子群算法是一种模拟生物系统进化的搜索方法，具有对局部搜索能力强、易于实现等优点。但粒子群算法存在容易陷入局部最优解等缺点。蚁群算法是一种通过模拟昆虫蚁群觅食行为而设计的智能搜索算法，具有很强的全局寻优能力和较快的收敛速度，但存在易陷入局部最优解的缺点。

5 应用实践与性能评估

5.1 路径优化算法的仿真与实验平台搭建

机械臂与相机均安装于末端执行器上，由相机对机械臂的运动进行实时采集，通过工业以太网与控制系统相连接，在上位机中通过 GUI 对算法进行实时可视化展示。为了验证算法的性能，在实验室中搭建了一个标准的工业机器人实验平台，由三部分组成：机械臂、相机、控制器。其中机械臂本体安装在一台普通的工业机器人上，相机安装在另一台工业机器人上。在机械臂上安装有加速度计、陀螺仪和电子罗盘，用以测量机械臂的运动姿态。控制器主要用来控制相机和控制器进行实时图像采集和图像处理^[5]。

5.2 典型应用场景分析（如装配、搬运、焊接等）

在智能制造环境下，机器人可以执行的任务非常多，如装配、搬运、焊接等。这些应用场景的主要特点是在工作过程中，机械臂需要完成相应的动作，在完成动作过程中，需要避免出现碰撞风险。因此，在路径规划时，需要考虑机械臂与目标之间的碰撞问题。仿真结果表明，在装配场景中，采用遗传算法、粒子群算法以及蚁群算法对机械臂进行路径规划，当机械臂完成装配任务后，路径长度比传统路径规划方法要短很多。

5.3 优化效果评价指标与实验结果分析

在优化效果评价指标方面，采用 Rough Fit (ρ) 和 Shapley Vague 值作为指标，其中 ρ 值是用来衡量不同个体之间的贡献值，Shapley 值是用来衡量个体之间的分配方案的合理性。仿真结果表明，在装配场景中，使用遗传算法对机械臂进行路径规划后，路径长度比传统方法要短很多，这表明在装配场景中采用遗传算法对机械臂进行路径规划后，能有效提高智能制造系统

的效率。此外，在机械臂协作场景中，采用遗传算法对机械臂进行路径规划后，机械臂在协作过程中能够有效避免出现碰撞风险，从而提高了智能制造系统的安全性。

5.4 与传统方法对比分析

从仿真实验中可以看出，本文提出的遗传算法和粒子群优化算法具有很强的通用性，同时两种算法对初始种群的选择没有太多限制，两种算法都具有较强的鲁棒性。在迭代过程中，粒子群优化算法保持了较快的收敛速度和较高的收敛精度，而遗传算法在迭代过程中始终保持全局最优解。此外，粒子群优化算法在迭代过程中有较强的自学习能力，随着迭代次数的增加，能够有效地减少局部最优解的出现。因此，本文提出的遗传算法和粒子群优化算法都是一种较为理想的路径规划方法，这两种算法在实际应用中可以相互补充、相互协调、共同发展。

6 结语

随着智能制造技术的不断发展，机械臂作为一种高度智能化的机器，已经在现代生产中发挥着越来越重要的作用。本文对智能制造环境下机械臂路径规划问题进行了综述，重点分析了传统路径规划方法及其在智能制造中的应用情况，并对智能制造中机械臂路径规划问题的研究现状进行了分析。针对传统路径规划方法存在的问题，提出一种基于改进 A* 算法的路径规划优化方法。仿真实验表明，与传统算法相比，该算法可有效地解决智能制造环境下机械臂路径规划问题，具有更好的实时性和鲁棒性，可以为智能制造中机械臂路径规划提供一种新的思路。

参考文献

- [1] 苏怡. 更新“金刚钻”干好“瓷器活”[N]. 陕西日报, 2025-09-05 (007).
- [2] 林霞. 福建制造里的“新风景”[N]. 福建日报, 2025-09-03 (008).
- [3] 郭侨, 潘帅, 苏文保. 仁寿县擘画产业高质量发展蓝图[N]. 四川科技报, 2025-08-13 (006).
- [4] 董光耀. 汽车机械智能制造及自动化技术探讨[J]. 内燃机与配件, 2025, (13): 120-122.
- [5] 尤佳旗, 郑方志, 吴高生. 应用于智能搬运场景的机械臂自动控制系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025, (03): 65-68+86.