

冗余度机械臂避障路径规划研究综述

贾照丽, 邱洁玉, 题园园, 陈晓颖, 胡威

(广州工程技术职业学院, 广东 广州 510925)

摘要: 冗余度机械臂由于具有大于其完成任务所需的自动度, 其在工作时表现出更高的适应性, 其工作时具有较高的灵活性, 该特性使得机械臂在复杂的工况情况下被应用的越来越多。为了减少冗余度机械臂在避障路径规划时所消耗的时间, 提高避障路径规划运动的精确度, 首先归纳总结了冗余度机械臂在避障路径规划算法方面的方法及特点。然后对冗余度机械臂的避障路径规划策略和方法进行概述, 并分类讨论不同避障规划方法的优缺点。最后, 展望了未来冗余度机械臂的研究方向和发展趋势。

关键词: 避障路径规划; 冗余度机械臂; 路径规划

中图分类号: TP183; TP242 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)06-0001-04

Review of Obstacle Avoidance Path Planning for Redundant Manipulator

JIA Zhao-li, QIU Jie-yu, TI Yuan-yuan, CHEN Xiao-ying, HU Wei

(Guangzhou Institute of Technology, Guangzhou 510925, China)

Abstract: Redundant manipulator is more and more used in complex working environment because of its high flexibility. To enhance the efficiency of redundant manipulators in obstacle avoidance path planning and to increase the precision of such planning, we summarize the algorithms and characteristics associated with redundant manipulators in this context. The methods for obstacle avoidance path planning and strategies for redundant manipulators are summarized, followed by a classification and discussion of the advantages and disadvantages of these obstacle avoidance planning methods. Finally, the emerging trends and research focuses regarding redundant manipulators are examined.

Keywords: obstacle avoidance path planning; redundant manipulator; path planning

0 引言

冗余度机械臂在避障路径规划中, 需要在设定的障碍物环境、起点与终点的前提下, 选择一条能够使得冗余度机械臂安全、无碰撞的从起始位置到目标位置的路径。在该过程中, 机械臂会根据某些评价指标, 如路径最短、时间最短、跟随误差最小等来选择最优的路径, 使其符合给定的任务要求^[1]。在冗余度机械臂避障路径规划的研究中, 重点是通过一定策略使得冗余度机械臂自主地规避障碍物并完成给定的任务。从运行方式上可以将冗余度机械臂的避障路径规划分为冗余度机械臂和移动式机器人。冗余度机械臂运动灵活性高, 移动机器人的作业范围更大, 二者各具优势。

冗余度机械臂的避障方法主要是探讨机械臂在运动空间中关节角度、角速度和加速度之间的相互关系。最

初研究者是通过施加机械臂线性约束来求解优化问题, 随着研究的深入, 在线运动规划逐渐取代了伪逆运动优化算法。

本文主要介绍冗余度机械臂避障路径规划方面的应用, 与移动机器人的避障路径规划相比较, 冗余度机械臂的具有更多的空间维数, 该特性使其在进行避障路径规划时, 所需的计算量相对比较大, 导致规划时间比较长, 但是避障规划方法是通用的。

基于冗余度机械臂避障规划算法的特性, 可将其规划算法分为全局规划算法和局部规划算法。

1 全局规划算法

全局规划算法是一种非实时的规划算法(即离线规划), 此算法需要对机械臂的工作环境进行全面了解^[2], 根据环境的信息进行路径规划。该算法依赖于全局的环境信息, 当环境中出现未识别的障碍物时, 可能导致机械臂无法完成预定的任务。该算法对实时性要求相对较低。当前应用广泛的全局规划算法主要有: A*算法, 快速随机树(rapid-exploration random tree, RRT)算法和粒子

*基金项目: 广东省教育厅2021年度广东高校科研项目(青年创新人才类项目: 自然科学)(2021KQNCX200); 2020年广东省高职院校产教融合创新平台(2020CJPT026)

收稿日期: 2024-02-20

群优化算法等。

1.1 A*算法及其改进算法

A*算法是一种利用智能启发策略来寻找在静态网络中最短路径的搜索机制。该算法的代价函数定义为 $f(x)=g(x)+h(x)$,其中 $f(x)$ 为起点到某一个目标点的成本预测函数; $g(x)$ 为开始到当前节点的估计函数; $h(x)$ 为当前节点到目标点的距离。在寻找最优路径的过程中,A*算法的核心在于对启发式函数 $h(x)$ 的合理选择。如果 $h(x) \leq d(x)$ ($d(x)$ 为当前节点到目标点的距离),尽管算法可能会找到最优解,但由于搜索节点数较多,导致效率低下;如果 $h(x) > d(x)$,搜索节点数变少,效率得到提高,然而这可能会导致无法找到最优解^[4]。因此,A*算法能够在避障路径规划中得到最优解,但是在处理冗余度机械臂节点的最短路径时,计算量比较大,实时处理能力较差。

贾庆轩等^[5]通过分析计算机械臂各个杆件与障碍物之间的碰撞条件,进而识别出机械臂在空间中无碰撞的可通行区域。在此基础上,他们采用A*算法进行无碰撞路径搜索,尽管该算法可以有效规划机械臂的避障路径,但是在应用过程中会存在计算量大等问题。为了解决A*算法的不足之处,汪首坤等^[6]提出了一种改进的A*算法,采用变步长搜索方法来解决机械臂在工作空间遇到的障碍物问题。在该方法中,圆柱体包络碰撞方法被引入用来检测障碍物,变步长分段搜索机制有助于减少大量的搜索计算。林宁等^[7]提出了一种改良的A*算法,此算法在保证路径最短的基础上,优先选择路径夹角中最小的点作为起点,从而有效提高路径规划的平滑度。

1.2 RRT算法

快速扩展随机树(RRT)的方法是通过在任务空间内进行随机采样来形成一个导航集合,并在这个导航集合中寻找一个完整且可行路径。该算法基本思想将状态空间中的初始出发点作为树的根节点,之后在一定约束条件下逐渐扩大叶子节点,以此生成新的树结构。在该过程中,若新生成的节点与障碍区域产生冲突,则需丢弃该节点并进行新的选择。将当前点与最近点进行连接,创建一条可行的路径,当随机生成的树中的节点包含目标节点时,树的扩展过程结束,从而形成一条从起始位置到目标位置的避障路径。RRT算法适合多维空间的避障路径规划,但是在全局空间下搜索存在时间花费多、资源浪费严重等问题,同时其实时处理能力较弱,随机样本的生成缺乏稳定性,结果可能不是最佳路径。

针对RRT算法存在的问题,刘晓倩等^[8]将该算法结合目标偏向策略,同时在度量函数的选择过程中加入了角度的影响因素,通过仿真验算RRT在路径规划中的可行性。

代彦辉等^[9]机械臂的起始点设置为根节点,为了降低节点的随机生成性,采用基准向量来确定节点扩展的方向,从而实现叶节点的增殖。曹毅等^[10]在RRT算法中引入了平面墙和窗口函数机制,将环境的限制要素英语该算法结合,实现机械臂的避障路径规划。

1.3 粒子群优化算法

粒子群优化算法(particle swarm optimization,PSO)是一种根据鸟类捕食规律发明的一种启发式算法^[11-12]。粒子群优化算法模拟了鸟类在寻找食物时的集体行为,每只鸟都将其视为一个具有速度和位置属性的粒子,当一个粒子找到食物后,会将最近的路径分享给群体中的粒子,同时将这一路径与从其他粒子中得到的路径进行比较,从而确定最优的进餐路线。经过多轮次的迭代,整个群体最终能够识别出最佳的路径。在此背景下,陈少斌等^[13]结合神经网络与粒子群优化算法,致力于动态环境下移动机器人避障路径规划问题。首先使用神经网络对移动机器人的工作环境进行动态信息的构建,并将待规划的路径转化为一维格式,最后利用粒子群优化算法来寻找最佳的避障路径。

1.4 遗传算法

遗传算法(genetic 算法)是一种搜索策略,灵感来源于自然选择和生物演化。其算法流程如图1所示。

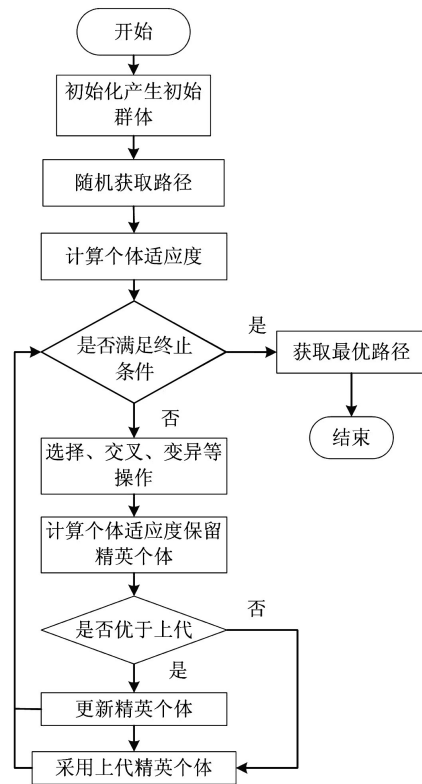


图1 遗传算法的流程

这种算法在进行避障路径规划过程时,将每一个从

起点到目标点的无碰撞路径作为一个独立个体,并把这些个体集合成为种群。接着,设计适当的适应度函数来挑选优秀个体,并对这些个体进行复制、交叉突变等操作。通过遵循遗传算法的优胜劣汰原则,不断筛选出更为优越的个体,直到满足终止条件,此时保留下的个体便代表了最佳的避障路径。选择遗传算法来解决机械臂避障路径规划问题,可以有效简化复杂的理论推导过程。但是,该算法计算效率较低,并且在进化阶段需要消耗大量的存储空间和时间。

1.5 蚁群优化算法

蚁群算法是一种基于蚂蚁觅食行为而形成的只能优化模型,这种算法可视为一种正向反馈机理的搜索算法。其运行机理为:当蚂蚁在觅食过程中移动时,会在所

经过的路径上会释放信息素,这些信息素会吸引其他新的蚂蚁经过。随着越来越多的蚂蚁经过该条路径,路径上的信息素浓度会逐渐增加,从而会进一步提高新蚂蚁选择这条路线的概率,最终它们能够识别出食物源到巢穴的最短路径。该算法在进行避障路径规划时,具有一定的适应性,但也常常容易陷入局部最优解的情况。

为了解决蚁群算法中存在的若干问题,许多研究者提出了新颖的改进方案。张强等^[14]发明了一种新的改进的蚁群算法,该算法解决空间机械臂末端避障规划的问题。该算法以起始点与目标点之间的最短距离作为适应度函数的核心,并对搜索策略及信息素更新方法进行了改进,最终通过优化的蚁群算法了最佳避障路径的搜索。

表1给出了上述几种全局优化算法的优缺点的对比。

表1 常用全局优化方法优缺点对比

算法	机制	优点	缺点
A*算法	寻找当前节点到目的地的最小距离	计算简单,规划速度快	全局优化能力有限,仅适合在静态环境中
RRT算法	类似树的生长,不断向四周扩散	可以处理多条约束条件,鲁棒性好	路径最优性差
粒子群优化算法(PSO)	个体与群体信息共享和协助	鲁棒性好,收敛速度快	在处理局部最优问题时容易出现问题,避障能力不足
遗传算法(GA)	通过交叉变异产生新的种群	路径最优性好	需要大量的运算时间和存储空间
蚁群优化算法(ACO)	蚂蚁朝着信息素浓度高方向移动来实现搜索	初始路线要求较低,鲁棒性好	收敛速度慢,容易导致局部最优解的情况

2 局部方式

局部避障路径规划也可视为一种动态规划技术(在线规划),该技术利用传感器实时获取周边的环境数据,并基于算法在当前位置的基础上,推算出下一目标位置。局部算法包括:人工势场和Q-Learning算法等^[15];

2.1 人工势场

人工势场(artificial potential field, APF)是一种虚拟里方法,该方法是美国科学家Khatib在20世纪80年代提出来的^[16-18]。该方法的核心在于,通过在目标位置和障碍物之间配置虚拟的引力和斥力,利用引力和斥力的合力来驱动机器人运动,使其朝着至目标点前进。该模型的构建相对简单,且计算量较小。该方法的最大特点在于,机器人能够在执行任务的同时实时计算出其可行的避障路径,这一特点在未知的环境中展现出极强的适应力。该方法运用合力原理,使机器人在运动时能够朝着目标前进,同时避开路径上的各种障碍物,但是在实际的应用中,往往会遇到目标无法达到的情况以及易于陷入局部最小值的困境。

Conn R等^[19]将人工势场应用到动态环境中,在该算法中,将时间最为动态的一维参量,障碍物看成静态的模型。该算法通过静态的路径规划的方法实现对动态的路径规划的需求。不过,在该方案但中假设机器人的路径

轨迹是已知的,这在现实中难以得到应用。

2.2 Q-Learning 算法

Q-Learning是一种在线学习算法,其原理是机械臂通过与环境进行交互,对机械臂动作作出奖励和惩罚,进而学习找到合适的路径。许多研究人员运用Q-Learning方法对机械臂进行避障路径规划,郭新兰^[20]为了能够实现机械臂在避障路径规划中机械臂的实际轨迹趋近于理想轨迹,提出了利用BP神经网络算法提高模型的逼近能力,并在这个过程中不断对Q函数进行迭代更新,可以有效实现机械臂在完成避障后同轨迹偏差较低的目的。王健等^[21]提出了一种动态调整的Q-Learning策方法,该方法通过衡量机器人在环境中的成功探索率,评估其对环境的理解程度,从而优化其探索行为,最终确定最佳的避障路径。

3 机械臂避障路径规划发展趋势

机械臂避障路径规划随着科技的发展应用和研究不断优化和深入,形成了很多比较具有代表性的成果^[22]。但是,在具体的避障路径规划中,每种算法依然存在一定的缺陷与局限性,这些成果在具体的避障路径规划中,因此未来的研究仍需要进一步的优化和深入。目前,有几个方向可以作为未来的研究重点:

(1) 通过对现有的有些具有代表性进行调整和优化,每种算法都有其内在的局限性。可以针对应用场景不同,对这些算法进行具体的改进,以增强其可操作性。

(2) 将几种算法混合应用,不同算法之间可以进行互补操作,取长补短,混合应用效果好。

(3) 随着对复杂环境中的多机械臂的路径规划研究的深入,机械臂在此环境中的运行效率吸引越来越多的研究者。因此,提升机械臂适应复杂现实环境的能力显得尤为重要,现实复杂环境中机械臂的路径规划是未来的一个重要的研究方向。

4 结束语

冗余度机械臂的避障路径规划一直是国内外的研究的重点。根据环境对算法的不同需求,分为全局规划算法和局部规划算法以及一些智能算法。在这一背景下,对常见的算法进行了分类,并对算法结合其应用进行了概述,最后展望了冗余度机械臂未来的发展方向,对相关领域的研究提供了参考价值。

参考文献:

- [1] 徐亚之. 冗余机械臂运动避障与路径规划[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [2] 张广林, 胡小梅, 柴剑飞, 等. 路径规划算法及其应用综述[J]. 现代机械, 2011(5): 85-90.
- [3] 刘佳, 王杰. 无人水面艇避障路径规划算法综述[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(8): 1-10, 20.
- [4] 刘玄冰, 周绍磊, 肖支才, 等. 无人机避障方法研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(5): 40-47.
- [5] 贾庆轩, 陈钢, 孙汉旭, 等. 基于A*算法的空间机械臂避障路径规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 109-115.
- [6] 汪首坤, 邸智, 王军政, 等. 基于A*改进算法的机械臂避障路径规划[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(11): 1302-1306.
- [7] 李宁, 邢丽娟, 徐珂, 等. 改进A*算法在磁导引AGV路径规划中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(7): 5-8.
- [8] 刘晓倩, 张辉, 王英健. 基于改进RRT的路径规划算法[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(5): 96-100.
- [9] 代彦辉, 梁艳阳, 谢钢. 基于RRT搜索算法的六自由度机械臂避障路径规划[J]. 自动化技术与应用, 2012, 31(10): 31-37.
- [10] 曹毅, 郭梦诗, 刘海洲. 基于改进RRT算法的串联机械臂避障空间路径规划[J]. 机床与液压, 2018, 46(18): 70-76.
- [11] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. IEEE, 1995.
- [12] Xue M, Xu H C, Wang S. Path planning of unmanned vehicle based on particle swarm optimization algorithm[J]. China Science and Technology Information, 2018(24): 69-70.

[13] 陈少斌, 蒋静坪. 基于神经网络和粒子群优化算法的移动机器人动态避障路径规划[J]. 系统仿真技术, 2006(4): 192-197.

[14] 张强, 周东生, 王兰. 一种基于蚁群算法的空间机械臂末端器避障路径规划的方法[P]. CN104199292A. 2014-12-10.

[15] 刘文金. 六自由度机械臂避障路径规划技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.

[16] 史亚飞, 张力, 刘子焯, 等. 基于速度场的人工势场法机械臂动态避障研究[J]. 机械传动, 2020, 44(4): 38-44.

[17] 董炫良, 赵桂清. 人工势场引导蚁群算法的机器人导航路径规划[J]. 机械设计与制造, 2021(6): 169-173.

[18] 张殿富, 刘福. 基于人工势场法的路径规划方法研究及展望[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(6): 88-95.

[19] Conn R A, Kam M. Robot motion planning on N-dimensional star worlds among moving obstacles[J]. IEEE Trans on Robotic Automation, 1998, 14(2): 320-325.

[20] 郭新兰. Q-learning算法下的机械臂轨迹规划与避障行为研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(9): 57-61, 66.

[21] 王健, 赵亚川, 赵忠英, 等. 基于Q(λ)-learning的移动机器人路径规划改进探索方法[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(11): 39-41, 67.

[22] 毛永明, 张东伟, 阚凤龙. 机器人路径规划算法的发展[C]//第十一届沈阳科学学术年会暨中国汽车产业集聚区发展与合作论坛论文集(信息科学与工程技术分册), 2014: 495-498.

作者简介: 贾照丽(1986—), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 机械臂的路径规划。