

多自由度机械臂三维空间多障碍物避障与路径规划算法研究

李星宇¹

LI Xingyu

摘要

现有方法在规划机械臂避障路径时缺乏对障碍物运动趋势的预测,无法提前规避潜在碰撞风险,导致规划性能下降。因此,文章提出了一种多自由度机械臂在三维空间中对多障碍物避障的路径规划算法,建立机械臂坐标系的齐次变换矩阵,定位末端位姿,实现机械臂正运动学建模;运动过程中根据机动性能、制动距离、碰撞条件等多重综合约束,制定优先级约束实现避障;对满足约束条件的代价函数进行评估,建立代价函数;完成初步代价筛选同时对动态障碍物避障,运用 D* Lite 算法筛选避障最优路径。实验表明,机械臂可以提前预测环境中存在的障碍物,保证避障距离。路径曲率较小,规划路径更为稳定、舒适,证明了该方法的有效性。

关键词

多自由度机械臂;多障碍物;三维空间;路径规划算法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.11.042

0 引言

随着工业对人机协作、复杂环境适应性的需求激增,服务机器人及空间探索技术的快速发展,多自由度机械臂已成为高维复杂空间中任务执行的核心载体。从柔性制造车间的人机协作装配,到航天器舱外的在轨服务,再到手术室内的微创机器人手术,机械臂需在三维非结构化环境中实现自主避障与动态路径规划。

蔡泽平等^[1]采用激光扫描的方式获得障碍物的参数,基于表面点的障碍物感知和斥力生成避障算法,提出一种安全避障策略。但该算法采集的数据过于庞大,运算复杂难以

求出抖动时的准确路径。黄帅等人^[2]设计了无人驾驶矿卡局部避障路径规划算法。引入 Frenet 坐标系简化障碍物和参考路径信息,采用边界转换策略将避障路径规划中的非凸约束转换为凸约束,构建二次规划模型;求解优化函数,实现了避障路径规划。该方法未考虑到地面风险因素对路径规划的影响,设计路径非最优路径,算法避障精度不高。因此本文提出一种多自由度机械臂三维空间多障碍物避障与路径规划算法,实现低成本的运行轨迹自动规划。

1 多自由度机械臂多障碍物避障与路径规划设计

1.1 机械臂运动建模

多自由度机械臂依靠关节变量的变化来驱动其末端执行器实现各种运动。在建模过程中,通常采用 DH (de-

1. 江苏师范大学机电工程学院 江苏徐州 221116

[8] 刘烨,李帆,郑泽晨.基于上下文编码器网络的油气曲线图像脱敏方法研究[J].计算机应用与软件,2024,41(2):216-221.

[9] 袁梦真,许潇,张彦豪.基于人工智能的非结构化数据脱敏方法研究[J].网络安全与数据治理,2023,42(S1):184-190.

[10] 滑中豪,李宁,王啸,等.GNSS 观测数据的数据脱敏算法及质量验证[J].导航定位学报,2023,11(5):164-171.

【作者简介】

田钺(1996—),男,贵州施秉人,本科,工程师,研究方向:电力行业数字化技术、数据运营。

吴漾(1984—),男,贵州贵阳人,硕士,工程师,研究方向:数据资产管理、电力行业数字化、数据标准。

董若烟(1995—),女,贵州贵阳人,硕士研究生,工程师,研究方向:大数据、人工智能。

孔庆波(1982—),男,贵州贵阳人,本科,工程师,研究方向:大数据、人工智能。

方继宇(1978—),男,贵州贵阳人,本科,高级工程师,研究方向:大数据、人工智能。

(收稿日期:2025-06-13 修回日期:2025-11-05)

navit-hartenberg) 法来构建坐标系。具体而言, 会沿着关节的平移方向确定 Z 坐标轴, 沿着相邻关节轴线的公垂线方向确定 X 坐标轴, 坐标原点则设定为 Z 轴与 X 轴的交点位置, 并且依据右手定则来确定 Y 坐标轴的方向^[3]。在进行机械臂参数测量时, 需要获取的关键参数包括连杆长度 L 、连杆扭角 θ 、关节偏移量 d 以及关节角度 θ' 。根据参数计算相邻坐标系的齐次变换矩阵为:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n) dL\theta\theta' \quad (1)$$

式中: a_i 代表机械臂关节坐标系的第一次变换; a_n 代表从关节 $i-1$ 到关节 i 的齐次变换矩阵, $i = 1, 2, \dots, n$ 。机械臂的末端执行器位姿可通过多级齐次坐标变换矩阵的级联运算公式为:

$$A = (A_1, A_2, \dots, A_n) \quad (2)$$

式中: A 代表机械臂末端位置; A_1 代表机械臂末端最初位置; A_n 代表机械臂末端最后位置。

为了验证机械臂末端位置正确性, 将末端位姿使用逆运动学计算关节变量^[4]。若不符合机械臂关节变量, 则末端执行器失去自由度, 需引入正则化项 λ 改进奇异数改进传统正逆法, 正则化项的调整结合条件数与误差反馈为:

$$\lambda = \beta A\gamma \quad (3)$$

式中: β 代表自由度条件数; γ 代表末端位姿误差反馈。调整后的正则化项代入机械臂末端位姿, 优化公式为:

$$B = A / \lambda \quad (4)$$

式中: B 代表改进后的机械臂末端位置, 末端位置改进后, 对应的齐次变换矩阵减小了接近奇异数时矩阵求逆的不稳定性。

由此建立关节变量与末端位姿的唯一映射, 确保机械臂运动的可预测性。完成机械臂正运动学建模, 为后续的轨迹规划和控制提供基础。

1.2 制定约束条件

(1) 机动性能约束

机械臂建模后进行运动, 运动受关节加速度与旋转角速度的限制, 以及驱动器动态特性约束, 导致其可达速度空间呈现有界性特征。基于准加速度假设, 构建关节空间的速度与角速度联合约束为:

$$V = vB(C_{c_1} + D_{d_1})e \quad (5)$$

式中: V 为速度界限; v 代表机械臂此时速度; e 代表机械臂加速度值; C 代表机械臂速度的最大加减速性能; c_1 代表机械臂关节加速度的上限; d_1 代表机械臂关节角速度的上限; D 代表机械臂角速度的最大加减速性能。由此得到速度界限, 在运动控制领域, 机械臂的动态制动性能受限于关节驱动器的加速度等参数的动态响应能力。本文以速度边界为约束对

下述制动距离求解。

(2) 制动距离约束

为确保机械臂在避障过程中满足安全制动条件, 需在运动学层面构建基于最大减速能力的速度约束, 在减速性能下约束速度区间 V_1 为:

$$V_1 = VB(C_{c_1} + D_{d_1})e / E \quad (6)$$

式中: E 代表该路径上机械臂与障碍物的最短距离。计算出最大减速性能下约束速度区间, 为下文碰撞条件约束做基础。

(3) 目标位姿约束

机械臂在三维空间进行多障碍物避障的同时, 必须到达目标位置和指定姿态, 实际目标位置和指定姿态的差值如下所示:

$$\Delta F = F_1 - F_2, \quad \Delta F \leq \delta \quad (7)$$

式中: F_1 代表末端实际位姿; F_2 代表目标位姿; ΔF 代表位姿差值, 取值 0.01 m; δ 代表容差, 取值 0.01 rad。当位姿差值小于容差, 则机械臂末端执行器到达指定位置与姿态。选取大于容差的 ΔF , 获得目标位姿^[5]。

(4) 碰撞条件约束

基于障碍物运动状态预测特定时间内障碍物动态运动轨迹, 并判断机械臂与障碍物是否发生碰撞, 其避障条件约束为:

$$G = F_2 / V_1 + A_3 / H_1 H_2 \quad (8)$$

式中: G 代表碰撞条件下可以选取的轨迹速度集合; A_3 代表约束速度区间内的机械臂坐标点位置; H_1 代表机械臂运动轨迹; H_2 代表障碍物在同一时刻运动轨迹, 假定其直行。判断其发生碰撞条件为:

$$h = G(F_2) \cap V(A_3) < 0 \quad (9)$$

式中: h 代表碰撞条件, 其值不能大于 0 否则发生碰撞。本文算法优先执行避障处理, 再进行合理路径规划, 故设定优先避障规划。

(5) 优先级约束

在多任务冲突时, 避障优先于其他任务, 对避障任务进行优先级分配。通过多目标加权求和与优先级依赖的权重分配, 将优先级约束转化为单目标优化问题, 加权代价函数用公式表示为:

$$I = \sum h(G, F_2) I_2 \quad (10)$$

式中: I 代表机械臂避障路径的综合优化权重, 值越大表示对碰撞条件关注度越高; I_2 代表满足约束条件的目标轨迹。由此制定机械臂运动的约束条件, 完成碰撞约束的优先分配。

1.3 代价函数选取

为兼顾机械臂运动规划中的目标精度与能效约束, 对满足约束条件的目标轨迹基于代价函数进行评价, 建立代价函

数^[6]。使得机械臂能够在到达指定目标位姿的前提下, 尽量接近实际路径, 并以较快的速度与较小的关节改变量移动。选取包含目标轨迹的代价函数为:

$$J(I_2) = \phi(I)\varepsilon(\theta_1)/G_1 \quad (11)$$

式中: $J(I_2)$ 代表选取满足代价函数满足约束条件的目标轨迹集合; ϕ 代表代价因子; ε 代表代价因子; G_1 代表目标轨迹末端方向; θ_1 代表目标之间的角度差。

为了消除选取的代价函数的路径量纲差异, 将该代价值进行归一化, 归一化处理为:

$$S_{h\Delta F} = J(I_2)/K_{V1} + S_{\min}/V \quad (12)$$

式中: S 代表全部目标路径距离归一化之后的平均代价值; K 代表所有目标路径的重合情况; $S_{\min}$ 代表在轨迹与最近的障碍物之间的距离。由此, 实现了具有约束条件限制的代价函数选取。

1.4 筛选最优避障路径

基于上述运动学与动力学分析, 机械臂避障路径规划问题可形式化为多约束联合优化代价函数求解问题, 由此进行初步代价筛选, 用公式表示为:

$$u < S \quad (13)$$

式中: u 代表目标路径的代价值。

选取低于目标总路径的代价平均值的路径代价, 考虑到动态障碍物具有实时性, 障碍物移动时机械臂在满足避障条件下需重新规划最优路径^[7]。因此, 在目标局部窗口内使用 D* Lite 算法更新路径, 再次进行筛选。以机械臂当前位置为中心, 建立半径为 R_{local} 的动态窗口, 窗口外障碍物视为静态^[8]。窗口内障碍物通过实时传感器获取点云数据, 并通过体素网格 (Voxel Grid) 进行空间离散化, 划分栏栅格, 分辨率为 0.05 m。栏栅格为一个节点, 以避障最短路径为最优路径, 在满足上述动态避障功能时, 同时实现距离最短路径的规划。终点到当前节点位置的估计最小代价, 其计算方式为:

$$\text{rhs} = U/u \quad (14)$$

式中: rhs 代表终点到当前节点位置的估计最小代价; U 代表从起点到当前节点的避开动态障碍物的实际路径代价。对从当前位置到终点的理论最小代价进行一致性判断, 判断为:

$$\text{rhs} = m \quad (15)$$

式中: m 代表目标路径的避障预测代价, 此时节点代价最优, 可以计算实际最短路径为:

$$N = (q+m)/p \quad (16)$$

式中: N 为从当前节点到终点的实际避障最短路径; p 为节点到目标点的欧氏距离结合动态障碍物预测轨迹的膨胀路径; q 为避障最短路径的曲率。其中 q 通过 LSTM 预测动态障碍物运动后动态调整, 取较小值。当障碍物运动导致窗口

内 q 状态变化较大时, 标记该栅格为“需重新计算” (RAISE/LOWER 操作)。通过 D* Lite 算法的优先队列仅对受影响节点进行代价更新, 避免全局重规划^[9-10]。利用长短期记忆网络 (LSTM) 学习障碍物运动规律, 预测未来 T_{pred} 时间内的最优避障轨迹, 并将预测结果融入 D* Lite 的启发式函数中, 实现主动避障完成最优避障路径的筛选。

2 实验分析

2.1 避障仿真

实验仿真实验设置参数: 利用自主研发的机械臂进行避障实验。机械臂伸展长度为 17.0 m, 横向跨度为 12.0 m, 最大平移速度为 15 m/s, 持续作业航时约为 4 h; 初始平移速率为 1 m/s, 初始关节角速率为 30 rad/s; 平移速度区间为 10~30 m/s, 关节角速率区间为 0~50 rad/s; 空间坐标定位: 起始点 (1,1) m, 目标点 (15, 15) m; 路径代价权重为 0.2, 能耗代价权重为 0.3; 平移加速度为 0.2 m/s², 角加速度为 20 rad/s²。实验环境如图 1 所示。

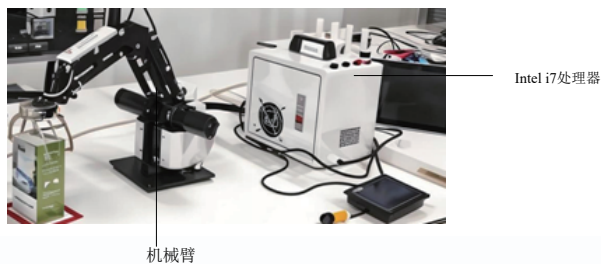


图 1 实验室环境

机器人机械臂避障轨迹自动规划的测试中, 设置机器人机械臂由起始点到达目标点位的障碍物为两个, 一个静态障碍物, 一个动态障碍物。均按照障碍物的最大半径进行等效, 在机械臂运动规划框架下, 障碍物相对于本体坐标系 (BCS: body-centric coordinate system) 的空间状态参数如表 1 所示。

表 1 障碍物状态量表

障碍标号	距离 /m	半径 /m	最大角速度 rad/s	速度 m/s
1	100	5	0.3	10
2	200	10	0	0

2.2 障碍物距离控制

机器人机械臂运行过程中, 机械臂与障碍物距离控制关系到机器臂运行轨迹的调整空间。机械臂与障碍物距离控制越小, 那么机械臂的运行轨迹调整空间越大, 可供机械臂进行避障轨迹自动轨迹规划的空间也越大。

设计基于人工势场的复杂障碍物避障算法为方法 1; 无人驾驶矿卡局部避障路径规划算法为方法 2。

将本文使用 D* Lite 算法进行多类型障碍物环境下机器

人机械臂避障路径规划与方法1和方法2进行比较。比较研究所提方法的障碍物距离控制水平,比较结果如图2所示。

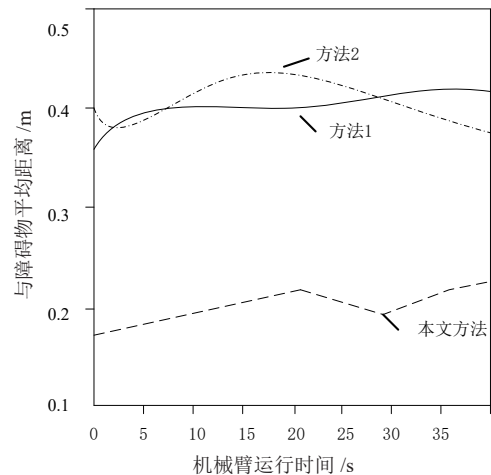


图2 机械臂避障平均距离

由图2可知,3种避障路径规划过程中,随着机器人机械臂运行时间的增加,本文避障距离整体较低。由于本文方法制定机械臂制动距离约束条件,选取带有约束的代价函数进行筛选目标路径。因此本文研究的机器人机械臂避障路径自动规划方法,机器人机械臂与障碍物的平均距离低于0.2 m,且平均避障距离随时间变化不大。证明本文方法能够提前预测环境中存在的障碍物,保证避障距离,为运行路径预留足够的调整空间。

2.3 避障路径曲率

机器人的机械臂通过障碍物碰撞检测实现运行轨迹避障,保证无碰撞到达目标点位。在多障碍物的直道和弯道工况下,车辆均能安全避开障碍物,为避障过程的路径曲率图如图3所示。

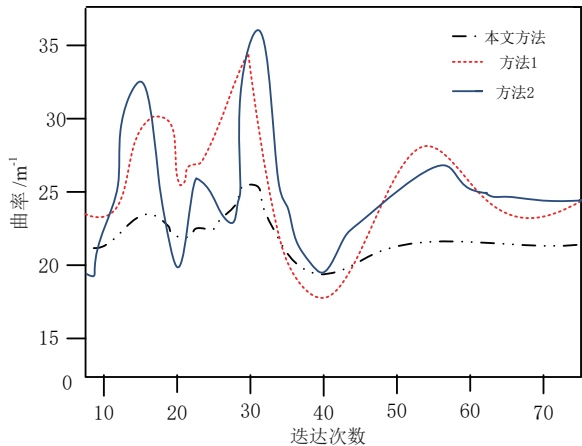


图3 避障过程的路径曲率图

由图3可知本文方法规划的路径曲率波动较小,其他两种方法波动剧烈且存在阶跃式突变。而本文所用方法使用LSTM预测动态障碍物运动,在D* Lite算法更新路径,筛

选最优避障路径,路径曲率较小。因此本文考虑三维空间多障碍物避障的规划路径更为稳定、舒适,证明了该方法的有效性。

3 结语

本文通过机械臂关节齐次变换矩阵确定末端位姿,完成机械臂正运动学建模。机械臂运动建模后根据机械臂制动距离、碰撞条件约束等多种约束,设定优先约束条件。将满足约束条件的轨迹进行代价函数选取,消除代价函数的路径量纲差异,提取目标路径,在目标路径的局部窗口内使用D* Lite算法更新路径。目标路径需满足最短路径规划,由此设计出避障且最优规划路径。

参考文献:

[1] 蔡泽平,梁家海,闫冠宇,等.基于人工势场的复杂障碍物避障算法[J].北部湾大学学报,2024,39(6):70-79.

[2] 黄帅,王佳,黄佳德,等.无人驾驶矿卡局部避障路径规划算法研究[J].控制与信息技术,2024(6):19-26.

[3] 艾高航,李春涛.基于视野和自适应半径的无人机集群避障算法[J].系统仿真学报,2024,36(12):2945-2959.

[4] 黄骏.多类型障碍物环境下机器人机械臂避障轨迹自动规划研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2024,42(7):73-76.

[5] 李卫国.基于变频器控制的自主导航机器人路径避障规划研究[J].电器工业,2024(7):72-77.

[6] 李念.基于凸优化的移动机器人避障路径规划[J].科技创新与应用,2024,14(18):37-40.

[7] 李宗刚,王治平,夏广庆,等.基于动态避障风险区域的仿生机器鱼路径规划方法[J].机器人,2024,46(4):488-502.

[8] 樊丽,杨宏.基于改进PRM算法的体育运动路径避障控制系统[J].信息技术,2024(4):44-51.

[9] 毛飞鸿,冀晓春,黄开启,等.考虑障碍物尺寸信息的机械臂避障路径学习方法[J].机电工程技术,2024,53(10):136-142.

[10] 朱敏,陈思源,陈杰.基于改进APF引导的双向RRT机械臂路径规划算法研究[J].现代制造工程,2025(2):1-9.

【作者简介】

李星宇(2006—),男,江苏盐城人,本科在读,研究方向:机械设计及其自动化。

(收稿日期:2025-05-19 修回日期:2025-11-11)