

# 超冗余柔性臂在狭小空间内改进 RRT 算法轨迹规划

陈师宽<sup>1</sup>, 罗汉武<sup>1</sup>, 李文震<sup>1</sup>, 陶鑫<sup>1</sup>, 宋屹峰<sup>2,3</sup>, 吕鹏<sup>2,3</sup>

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古 通辽 010010;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;

3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110169)

**摘要:** 为清理变电站联排变压器狭小空间内的异物, 设计了一种超冗余多关节机械臂; 根据机械臂的运动学特性在机器人工具箱建立了运动学模型, 利用正运动学分析了万向节角度和驱动绳长, 并利用蒙特卡洛法建立了机器人的工作空间; 为缩短轨迹路线、减少随机树点数目, 提出了基于改进后的 RRT 算法的轨迹规划方法, 利用贪心算法进行轨迹优化, 仿真结果显示路径长度减少 20% 且规划时间提高 60%; 利用多阶贝塞尔曲线进行轨迹平滑, 降低轨迹路线曲率; 改进后的 RRT 算法可以有效避免, 且轨迹更为精确、曲率较小、处理速度更快, 可以快速有效地完成异物清理工作。

**关键词:** 异物清理轨迹规划; 超冗余柔性机械臂; RRT 算法; 贪心算法

## Improved RRT Algorithm in Trajectory Planning for Super Redundant Flexible Arm in Narrow Space

CHEN Shikuan<sup>1</sup>, LUO Hanwu<sup>1</sup>, LI Wenzhen<sup>1</sup>, TAO Xin<sup>1</sup>, SONG Yifeng<sup>2,3</sup>, LÜ Peng<sup>2,3</sup>

(1. East Inner Mongolia Electric Power Company Limited, Tongliao 010010, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

**Abstract:** To remove foreign objects in the narrow space of interconnection transformers in substations, a super redundant multi-joint robotic arm is designed. According to the kinematic characteristics of the robotic arm, the kinematic model is established in the robot toolbox, the positive kinematics is used to analyze the angel of gimbal and length of drive rope, a Monte Carlo approach is used to build the workspace of the robot. In order to shorten the trajectory route and decrease the number of random tree points, a trajectory planning approach based on the enhanced rapidly-exploring random tree (RRT) algorithm is proposed, and the trajectory optimization is carried out using the greedy algorithm, the simulation results show that the path length decreases by 20% and the plan time improves by 60%. A multi-order Bessel curve is adopted to smooth the trajectory and reduce the slope of the trajectory path. The improved RRT algorithm can effectively avoid obstacles, and the trajectory has the characteristics of more precise, smaller curvature, and faster processing speed. It can successfully and rapidly clean up foreign objects.

**Keywords:** foreign object cleaning for trajectory planning; super redundant flexible robotic arm; RRT algorithm; Greedy algorithm

## 0 引言

随着电力工业的不断发展, 变电站的异物清理工作需求日益增加, 保障电力稳定、高质传输是社会稳定发展的重要基础。变电站的变电器成排放置, 中间间隙过小, 且中间设有其他电力设备, 容易悬挂异物。当前对于变电站异物清理多以人工为主, 但是变电站的工作空间较小, 不利于人工维护。此外, 变电站会产生辐射, 长期工作会对人体造成不可逆转的严重损害, 造成不可挽回的损失。

由于结构复杂、自由度受限及灵活性差等问题, 目前的刚性机器臂不能直接投入到农业生产过程中。因为自由度多和动态性能好等优势, 如医院的微创手术、飞机油箱完整性检测、核工业管道异物探测及航空机械的发动机叶片故障检测等领域。超冗余机器臂通常采用模仿蛇、章鱼触角、象鼻等具有柔性的变形特点的生物结构, 能够通过生物独特结构来进行弯曲变形, 从而适应多变狭窄、曲折复杂的非结构化环境。

收稿日期: 2023-07-04; 修回日期: 2023-08-21。

作者简介: 陈师宽(1987-), 男, 硕士研究生, 高级工程师。

通讯作者: 宋屹峰(1984-), 男, 副研究员, 硕士生导师。

引用格式: 陈师宽, 罗汉武, 李文震, 等. 超冗余柔性臂在狭小空间内改进 RRT 算法轨迹规划[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 294-300.

近年来, 针对于超冗余机器臂的研究, 研究者们大多致力于通过改变机械结构的自由度的方式, 从而提高机器臂本身在非结构化空间的工作能力。因此, 目前在柔性结构的研究方面已经取得了较大进展。在进行变电站的异物清理工作时, 在狭小空间内的机器人的工作稳定性和灵活适应的能力是机器人发展的重要的方向<sup>[1-2]</sup>。对于狭小空间内的灵活避障, 文献 [3] 的研究人员为了解决传统刚性机械臂难以在狭小空间进行工作, 设计了一种由 12 个关节段构成的柔性机械臂, 并提出一种适应狭小环境的自反馈算法, 该算法可同时规划出多条轨迹<sup>[3]</sup>。文献 [4] 提出的超冗余机器人仿真蛇进行设计, 关节模仿蛇的脊骨连接而成, 每个关节可旋转 180°, 利用多项式插值法进行轨迹规划, 可以在狭窄的空间里完成作业<sup>[4]</sup>。文献 [5] 提出了一种两阶段机械臂, 基座采用刚性结构臂体采用柔性关节, 利用柔性关节的自适应能力满足自由度需求, 采用粒子群算法融合多项式插值法进行轨迹跟踪<sup>[5]</sup>。文献 [6] 提出了基于五次多项式插值的改进后轨迹规划方法, 针对柔性机械臂提出了逆运动学的逆推关节角度, 从末端关节逆求各个关节角度, 从而确定机械臂的轨迹<sup>[6]</sup>。文献 [7] 采用原始模型, 基于深度学习的视觉算法对障碍物识别, 实现对障碍物的准确识别, 利用改进后的快速扩展随机树算法进行轨迹跟踪, 实现了机器臂在狭小空间内的避障轨迹规划<sup>[7]</sup>。文献 [8] 设计了 MARIS 7080 水下机械臂。此机械臂具有七自由度, 机械臂的最大承重为 8 kg, 臂体长度最长为 1 米。这款机械臂具备高精度、密灵活度高等特点, 适合在复杂水域下的工作<sup>[8]</sup>。文献 [9] 设计了 Light-Weight Arm 5E 的水下电动机机械臂, 此机械臂长 1 米, 具有四自由度, 重量接近 30 kg, 可以常搭载在低速运动的水下机器底盘上。机械臂末端配置多功能转接口, 可以根据实际作业要求来更换末端执行器<sup>[9]</sup>。文献 [10] 设计了 ABB IRB2600 机械臂该机械臂的承载能力为 20 kg, 末端执行器的定位精度最高能够控制在 1 mm 内<sup>[10]</sup>。中国自主研发的“海龙号”, 该机器人配置两个多关节机械臂 (五功能机械手十七功能机械手), 操作者可对机械臂进行遥控操作和上臂协调作业, 可以实现在水下的多方位的灵活抓取。文献 [11] 设计“核电站微小型水下机器人”, 该机器人主要用于核废水中的巡查工作, 机器人搭载的机械臂能够实现多方位拾取作业。该机械臂比较简单, 主要目的是实现水中较小体积的异物打捞工作, 从而解决人工在高辐射环境下的手动打捞作业的问题<sup>[11]</sup>。文献 [12] 设计的核辐射环境打捞机器臂, 该机器臂的伸展速度可达 8.3 m/min, 最大伸展角度为 25.4°, 通过试验测定能够抓取 2.4 kg 的物体。该机械手功能比较单一, 只能完成比较简单的抓取小异物的作业<sup>[12]</sup>。郭锐等人设计了一款水下六自由度机械臂, 配置了更精确可靠的控制系统。在传统的 PID 控制的基础上, 通过加入优化算法, 改进为模糊 PID 控制器, 在保证电机控制精度的同时, 确保了控制系统的鲁棒性。

RRT 算法是一种通过随机采点的规划算法, 通过随机

采集生成的父节点, 最后形成轨迹。由于父节点是随机产生的, 所以最终生成的轨迹具有轨迹平滑度较差和冗余点较多等缺点。研究人员针对 RRT 算法的不足, 进行了不同方式的优化。对于规划轨迹曲率过大, 平滑度差和收敛速度慢的问题, 文献 [13] 提出了一种改进后的二阶 RRT 算法 (TSRRT), 改进后的算法对生成轨迹的相邻父节点曲率进行优化, 但生成轨迹复杂且算法规划时间较长<sup>[13]</sup>。对于 RRT 算法收敛过慢的问题, 文献 [14] 等提出了一种 RRT 算法, 采用 RRT 算法从出发点目标点结合分级随机采样, 缩短了求解时间, 提高了处理速度<sup>[14]</sup>; 文献 [15] 等提出了基于深度学习 Q 网络的改进 RRT-Connect 算法, 提高了算法规划路径的成功率<sup>[15]</sup>; 文献 [16] 等提出一种动态规避 RRT 算法, 通过植入出发点并约束父节点的采集策略, 增强随机父节点子集点生成的方向性<sup>[16]</sup>。但是改进后算法生成的依然存在轨迹的父节点子集点过多和曲率较大的问题。对于轨迹中的避障问题, 文献 [17] 将 RRT 算法与人工势场结合, 将障碍物在仿真中植入斥力, 使采集的父节点由于斥力影响, 远离障碍物, 使形成的轨迹避开障碍物<sup>[17]</sup>。上述算法分别对 RRT 算法中某一缺点进行了优化, 但改进后算法仍存在一定不足。本文为有效解决 RRT 算法搜索路径的平滑性较差、搜索效率低以及搜索路径冗长等缺点, 在保留 RRT 算法的基本框架和优点下, 使用贪心算法对生成的路径进行优化处理, 然后采用贝塞尔曲线平滑路径, 产生符合超冗余柔性机械臂需求的轨迹。

本文基于改进后的 RRT 算法对柔性超冗余机械臂进行避障规划, 实现变电站联排变电器狭小空间的异物清理任务。第 1 节分析了变电站联排变电器的环境特点, 并设计了异物清理机器人的机械机构; 简述改进后的 RRT 算法; 第 2 节利用 D-H 参数法进行机械臂建模, 并利用正运动学求解机械臂的角度问题和驱动绳的长度; 第 3 节介绍了改进后的 RRT 算法, 进行了贪心算法和多阶贝塞尔曲线的轨迹优化, 验证了算法的正确性和过障碍物规划的可能性。第 4 节总结了论文, 并讨论了未来的发展环境描述和机器人机理分析

## 1 环境与机器人分析

### 1.1 环境分析

根据变电站的清理任务要求, 异物清理机器人需要在变电器外侧维护道移动, 寻找变电器和狭小空间的异物, 然后通过机器人本身的视觉导航系统运动到清理工作的具体地点, 然后通过机械臂自动越障能力, 将异物清理。

变电站的工作环境非常复杂, 有变压器、高压断路器、隔离开关、母线、避雷器、电容器、电抗器等电力设备。变电站环境如图 1 所示。变电站中变电器附近有很多障碍物, 如避雷器、电容器和输电线等。当其中悬挂异物时, 需要尽快处理, 保证输电的稳定性。变电站的变电器成排放置, 中间间隙过小, 且中间设有其他电力设备, 可供处理异物的空间狭小。

为了完成清理任务, 机器人的机械臂必须能够绕过变



图 1 变电站环境示意图

电器间隔间的障碍物。目前的机器人只能清理表面的异物，狭小空间内的障碍物只能人工清理。这种清理方法的效率低，而且对清理人员有害。在本研究中，设计了一种超冗余多关节柔性机械臂，可以在狭小空间内完成清理工作。另外还利用改进后的 RRT 算法，进行机械臂的轨迹规划，可以实现对变电站的高效、安全的检查。

### 1.2 机械结构

图 2 为机器人的机构示意图。机器人的行走方式采用履带式，可以自动沿着维护轨道自动运行，并且平稳通过不平路段。

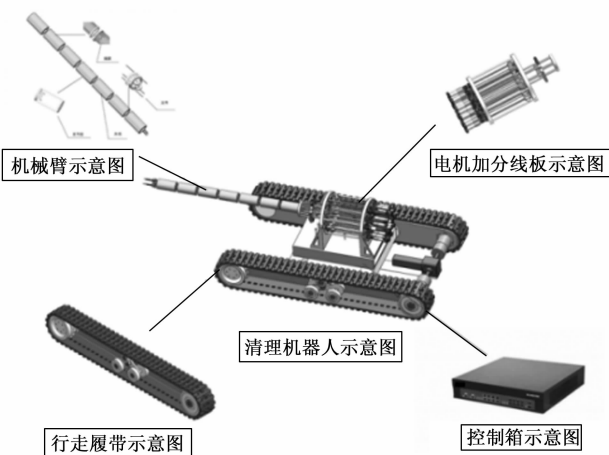


图 2 清理机器人示意图

该机器人由两个独立的运动单元，包括一个履带行走机构和柔性机械臂清理机构。履带行走机构包括行走履带，高度调节履带，控制箱。在清理机器人通过不平坦路面时，调节履带调节机构夹角缩小，履带张紧度变小，履带通过障碍物时，履带不会因为障碍物发生翘起或者侧翻的情况，保证运行的稳定性；控制箱里包含视觉、导航和反馈模块；柔性机械臂清理机构分为两层：动力层和引导层。基座动力层用于安装电动机和减速器，并通过滚珠丝杠副连接引导层的绳索，引导层依靠分线盘和基座将绳索连接臂体部分。臂体部分由椎节和万向节构成，椎节为刚性结构，构成超冗余机械臂的“骨架”。万向节用于连接各段椎节，并保证相邻椎节间的 2 自由度正交转动。超冗余机械臂由 9 个椎节构成，具有 18 个转动自由度，由电机牵引钢丝绳驱动。

### 1.3 基于改进后 RRT 算法轨迹规划

RRT 算法是一种通过规划空间的随机点，通过点的选

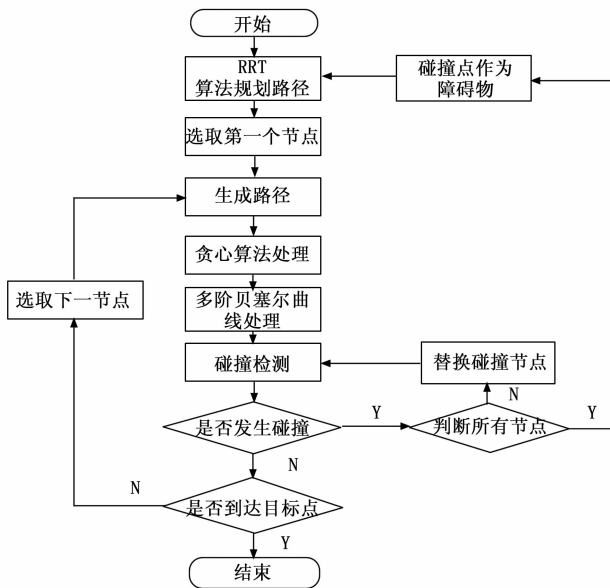


图 3 算法执行流程图

取，在规划空间形成一条从起始点到目标点的规划路径。但是现有的 RRT 算法搜索路径的平滑性较差、搜索效率低和搜索路径冗长，本文在基于 RRT 算法的基本框架和优点，使用贪心算法对生成的路径进行优化处理，采用多阶贝塞尔曲线加的方法平滑轨迹，产生符合超冗余机械臂需求的轨迹。如图 3 所示，路径规划开始时，轨迹规划模块启动。首先，定义机械臂末端执行器为起点，将视觉图像通过三维坐标转换，将电器件作为障碍物进行工作空间设定，将异物作为目标点，形成路径，通过贪心算法进行点的选取，形成初步轨迹，在经过多阶贝塞尔曲线进行曲线的平滑度处理，再通过碰撞检测，形成最终轨迹。

## 2 运动学建模

### 2.1 运动模型

关节空间到任务空间的映射称为正运动学，可以根据已知的关节角度求解机械臂末端的位姿。本文设计的超冗余机械臂利用标准 D-H 方法进行建模。建立超冗余机械臂的运动学模型，首先需要在工作空间建立坐标系。本文的超冗余机械臂共 9 个椎节段，每个相邻的椎节间有一个旋转关节。坐标系建立完成之后，根据已建立的坐标系列出 D-H 参数表，如表 1 所示。

表 1 D-H 参数表

Link	$\theta_i(^{\circ})$	$\alpha_i(^{\circ})$	$d_i(m)$	$a_i(m)$
1	0	-90	0	0
2	0	90	0	L
3	0	-90	0	0
4	0	90	0	L
...	...	...	...	...
8	0	-90	0	0
9	0	90	0	L

已知标准 D-H 方法下的相邻连杆坐标间的齐次变换矩阵<sup>i-1</sup>T<sub>i</sub>, 可以推导出各个相邻连杆间的转换矩阵。

$$A_n = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

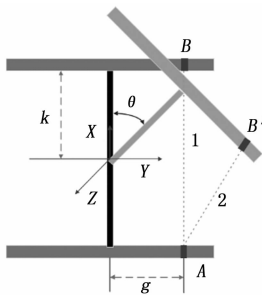
式中,  $s\theta_i = \sin(\theta_i)$ ,  $s\alpha_i = \sin(\alpha_i)$ ,  $c\alpha_i = \cos(\alpha_i)$

对于串联机器人, 末端坐标位姿可以利用各个其次变换矩阵相乘得到

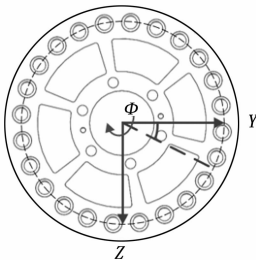
$${}^0T_9 = {}^1T_0 {}^2T_1 {}^3T_2 \cdots {}^9T_7 = f(\theta_1, \theta_2, \theta_3 \cdots \theta_9) \quad (2)$$

### 2.2 关节空间到驱动空间的映射

关节空间到驱动空间的映射指: 已知关节角度时, 逆解求得每根绳索长度。首先, 我们对一个关节臂的一根绳索进行分析, 由于椎节内的绳长是固定的, 只需要考虑万向节的绳长变化。如图 4 所示, 其中 AB、AB' 是绳索, k 是万向节中心到椎节下板的距离, g 为过线孔组成大圆的半径, φ 为所选钢丝绳对应的过线孔与坐标轴之间的夹角。在示意图 4 (a) 中, 绳 AB 缩短, 关节转动, 点 B 移动到 B', 由于绳索的单向受力特性, AB' 之间的绳索依然是笔直状态, 现在我们需要求解角度 θ 和 (AB-AB') 之间的换算关系。



(a) 绳长变化示意图



(b) φ 角示意图

图 4 关节坐标系

由几何关系我们可以求得点 A、B 的坐标分别为  $(-k, g \times \cos(\varphi), g \times \sin(\varphi))$  和  $(k, g \times \cos(\varphi), g \times \sin(\varphi))$ , B' 的坐标可以通过点 B 绕 Z 轴进行旋转求得。

关节 i 的齐次坐标的变换矩阵为对应两个轴的齐次变换矩阵的乘积, 由公式可以计算得出, 关节 i 的齐次坐标的变换矩阵如式所示, 其中 i 的取值范围为 [1, 9] 分别代表 9 个关节臂段,  $\theta_{2i}$  和  $\theta_{2(i-1)}$  表示对应关节绕 Z 轴和 Y 轴的旋转

角度。

$${}^{2(i-1)}T_{2i} = {}^{2(i-1)}T_{2i-1} {}^{2i-1}T_{2i} = \begin{bmatrix} {}^{2(i-1)}R_{2i} & {}^{2(i-1)}r_{2i} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  ${}^{2(i-1)}R_{2i}$  和  ${}^{2(i-1)}r_{2i}$  分别为关节的旋转矩阵和位移矩阵。则任意关节 B' 的坐标如公式所示:

$$B_i^T = {}^{2(i-1)}R_{2i} \times B_i^T = \begin{bmatrix} c\theta_{2i-1} c\theta_{2i} & -s\theta_{2i-1} c\theta_{2i} & c\theta_{2i-1} s\theta_{2i} & -k \\ s\theta_{2i-1} c\theta_{2i} & c\theta_{2i-1} c\theta_{2i} & s\theta_{2i-1} s\theta_{2i} & g \times \cos(\bar{\omega}_j) \\ -s\theta_{2i} & 0 & c\theta_{2i} & g \times \sin(\bar{\omega}_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -k \\ g \times \cos(\bar{\omega}_j) \\ g \times \sin(\bar{\omega}_j) \end{bmatrix} = f(\theta_{2i-1}, \theta_{2i}, \bar{\omega}_j) \quad (4)$$

其中,  $\varphi_j$  表示此绳索与坐标绕 X 轴形成的夹角的角度, 对于同一组的三根绳, 它们的角度分别是  $(\varphi_j, \varphi_j + 2\pi/3, \varphi_j + 4\pi/3)$

由此, 通过长度累加, 可以推断出机械臂各关节处的总绳长:

$$\begin{cases} L_{i-1} = f(\theta_1, \theta_2, \varphi_j) + f(\theta_3, \theta_4, \varphi_j) + \cdots + f(\theta_{2i-1}, \theta_{2i}, \varphi_j) \\ L_{i-2} = f(\theta_1, \theta_2, \varphi_j + \frac{2\pi}{3}) + f(\theta_3, \theta_4, \varphi_j + \frac{2\pi}{3}) + \cdots + f(\theta_{2i-1}, \theta_{2i}, \varphi_j + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{i-3} = f(\theta_1, \theta_2, \varphi_j + \frac{4\pi}{3}) + f(\theta_3, \theta_4, \varphi_j + \frac{4\pi}{3}) + \cdots + f(\theta_{2i-1}, \theta_{2i}, \varphi_j + \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (5)$$

### 3 基于机器人工具箱运动学仿真

本文首先基于机械臂正运动学创建了机械臂模型, 如图 5 所示。

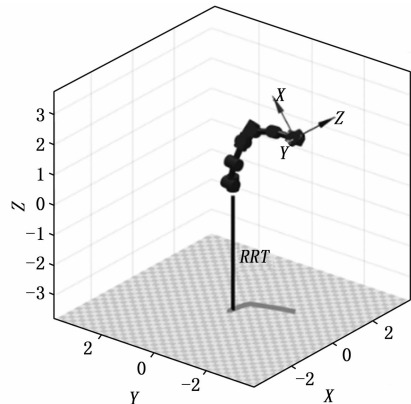


图 5 机械臂运动学模型

机械臂的工作空间指机械臂末端可以到达的空间范围, 主要取决于万向节角度限位、椎节长度和椎节数目, 是一个衡量机械臂工作空间的重要指标。采用数值法基于正运动学求解, 采用优点较为突出的方法蒙特卡洛法。蒙特卡洛法, 迭代次数越多工作空间越接近真实情况, 且速度较快, 设定参数 10 万次, 测试结果如图 6 所示。机械臂的工作空间可达 120°, 可以满足在狭小空间转向的需求, 且运

动范围较大。

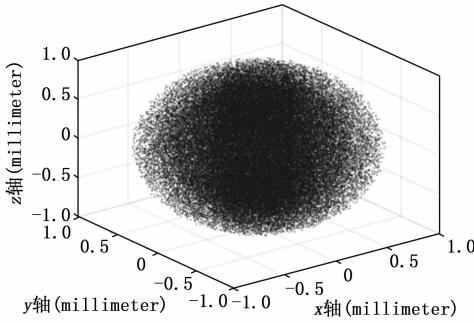


图 6 蒙特卡洛法工作域分析

### 3.1 基于改进的 RRT 算法避障轨迹规划

为解决变电站清理机械人在障碍物杂乱、分布随机的非结构环境下完成机械臂的轨迹规划的问题，利用先设定清理引导点的机械臂的轨迹规划是一种稳定可靠的方法。针对非结构的环境下变电站的机械臂的轨迹规划，Xiong 等<sup>[18]</sup>提前设定了多个位置点作为引导点来帮助完成机械臂作业，包括设定机械臂的初始位置点、最终形态位置点、障碍物位置点、机械臂回收位置点；Sepúlveda 等<sup>[19]</sup>设定了，机械臂首先移动到工作位置的水平位置点，然后调整末端执行器的姿态完成作业；张勤等<sup>[20]</sup>在机械臂规划路线上加入了多个位置点来引导机械臂快速进入最优轨迹规划路线，完成工作要求。

基于机器人工具箱进行轨迹规划，在机器人工具箱内，建立机械臂模型后，建立工作空间设定障碍物，进行原始 RRT 算法轨迹规划，如图 7 所示。

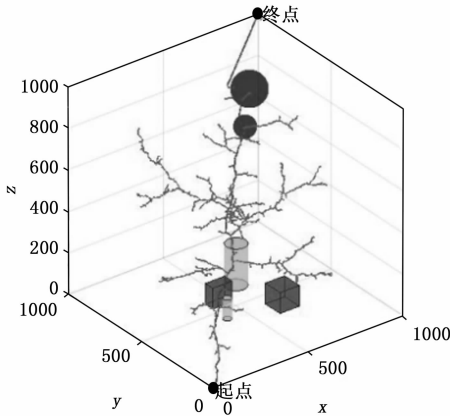


图 7 RRT 算法轨迹优化

图 8 中可以看出 RRT 算法规划出的轨迹的平滑性较差、搜索路径冗长以及取点范围大。首先进行贪心算法的优化，主要针对算法的轨迹和成功率进行优化。贪心算法没有固定的框架，本文采取的方法起始点与目标点形成轨迹，然后检测是否有碰撞。若发生碰撞，证明从上级父节点到该子节点中间不可选取，直接返回上一级父节点；若没有发生碰撞，证明从上级父节点到该子节点中间可选取，直接将点加入随机树，通过不断迭代直至形成完整轨迹。

RRT 算法生成轨迹具有随机性，如果障碍物过多，可

能需要经过两次运算得出轨迹，贪心算法在规划前进行目标点和起始点的标定，保证轨迹规划的稳定性，避免二次或多次规划，提高算法规划成功率。经过贪心算法处理后的轨迹可以明显看出，轨迹路线更短，随机树上的点更少，轨迹路线更为精确。

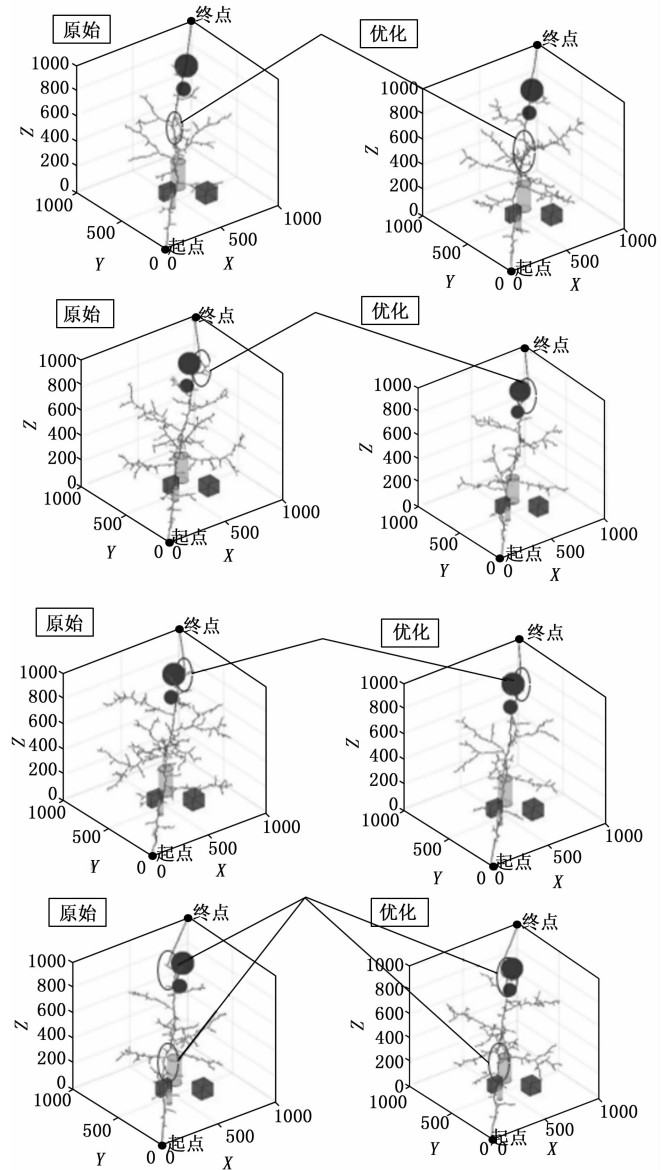


图 8 贪心算法处理后 RRT 算法轨迹规划对比

经过贪心算法改进后的 RRT 算法的轨迹可以看出，路线的平滑度不够，在避障时轨迹曲线曲率过大，对机械臂的角度要求过高；另外如果避障轨迹曲线曲率过大，可能会与障碍物发生摩擦或者碰撞，影响机械臂的正常工作，所以本文采用多阶贝塞尔曲线的方式进行再次优化。

由于机械臂工作环境较为复杂，所以可以选取三阶贝塞尔曲线或者五阶贝塞尔曲线。如图，在二维空间内展示 RRT 轨迹曲线通过贪心算法和多阶贝塞尔曲线优化效果。

如图 9 所示，如图 9 (a) 所示，原始 RRT 算法在二维空间内的轨迹规划，取点范围广，路线较为曲折，轨迹尖

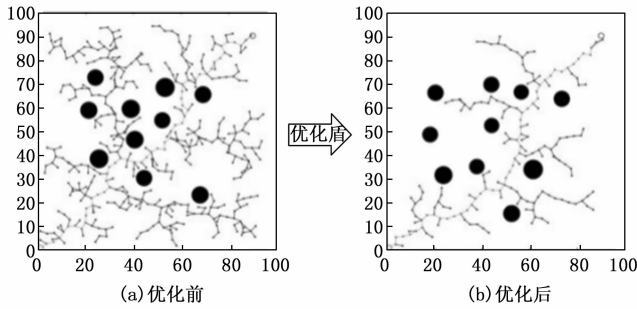


图 9 优化对比图

锐。如图 9 (b) 所示, 经过贪心算法和多阶多项式改进后的 RRT 算法轨迹规划, 取点范围较小, 路线曲率小、轨迹更短, 路径减少 20% 且规划时间提高 60%。

表 2 不同算法比较

算法	迭代次数	时间	成功率/%	路径成本
RRT	693	3.27	60	811
改进后 RRT	223	1.52	92	754

根据比较, RRT 算法在寻找初始路径是还存在一定的局限性, 不给定引导点, 会增加检测时间, 大量的寻找目标节点导致产生了大量的无用节点, 导致最终清理机器臂的路径优化结果不理想, 路径较为曲折, 且并不是最优的轨迹, 并且在变电站上下均具有不同的障碍等复杂环境的情况下, 该算法的收敛性不强成功率较低, 单次路径规划的平均成功率仅为 60%。加入引导点进行模拟测试, 可有效提高 RRT 算法的迭代速度和准确性, 从而提高探索非结构化环境下的区域的能力, 路径规划的成功率得到了一定程度的提升。但是机械臂的路径探索还是存在局限性、迭代次数多、操作复杂、探索非结构化环境区域产生重叠和不准确的问题。利用贪心算法和多阶贝塞尔曲线并植入预清理引导点的改进后的 RRT 算法大幅度提高了非结构化环境下的路径规划的探索的准确性和收敛速度, 路径规划成功率提高到 96%, 并且达到了实现局部最优轨迹的要求。相较于原始的 RRT 算法, 改进后的 RRT 算法的平均规划成功率提高了约 32%, 找到初始路径的平均时间减少了约 60%, 生成最终路径的平均时间减少了约 60%。

如图 10 (a) 所示, 为三阶贝塞尔曲线的规划参数信息; 如图 10 (b) 所示, 为五阶贝塞尔曲线的规划参数信息。对比三阶贝塞尔曲线和五阶贝塞尔曲线的结果可知, 三阶贝塞尔曲线的角度和速度与五阶贝塞尔基本一致, 且都不存在突变, 但是三阶贝塞尔曲线的加速度在初始时刻和终止时刻, 不连续、突变的, 会存在规划中冲击。而五阶贝塞尔的曲线加速度是连续的, 可解决掉三阶贝塞尔曲线存在的问题。

### 3.2 机械臂碰撞检测

碰撞检测是机械臂的轨迹规划的重要衡量指标。碰撞算法是一个可实现各种碰撞检测的开源项目, 采用 MoveIt! 默认使用的碰撞检测组件。MoveIt! 可以检测规划场景内

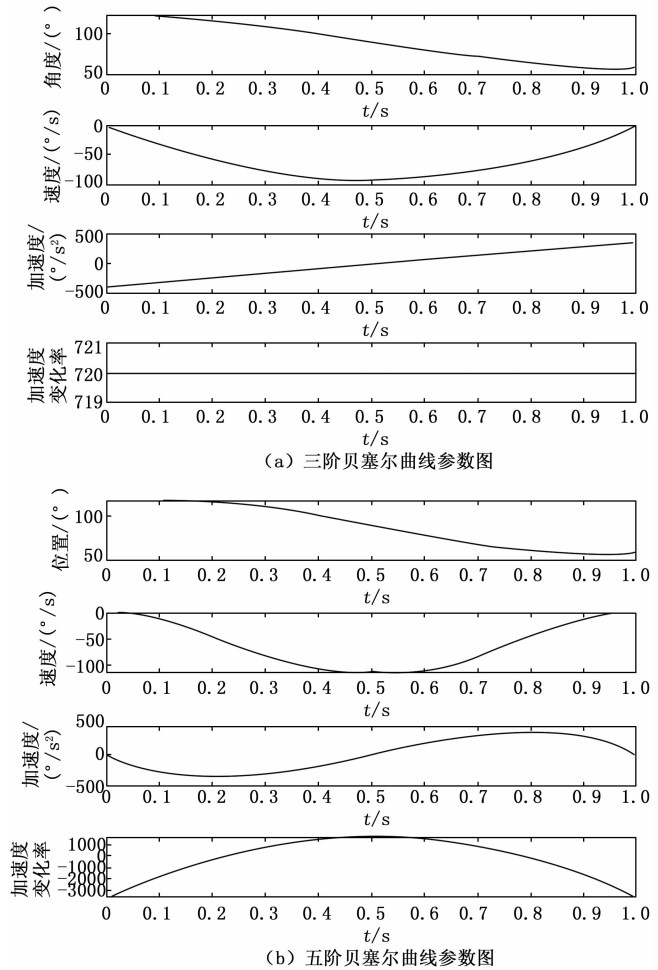


图 10 多阶贝塞尔曲线对比图

的所有碰撞, 包含如网格、基本形状 (圆柱体和立方体) 等各种对象。与轨迹一样, 碰撞检测的运算过程是十分复杂的。为实现清理机械臂在非结构环境下顺利清理避障, 需要为此碰撞检测算法设置合适分辨率。MoveIt! 中默认使用碰撞检测分辨率为 0.005, 碰撞检测的分辨率通常用试验方法来确定, 如果设置得太大, 机械臂会忽略较小的障碍物, 反之, 碰撞检测就会损耗大量的规划时间。所以通过仿真试验来确定最佳的碰撞检测分辨率。在仿真环境中分别以 0.005、0.004、0.003、0.002、0.001 等 5 种碰撞检测分辨率设置做规划试验, 每组使用 RRT 算法进行了 100 次运动规划, 不同碰撞检测分辨率下规划的成功率和规划耗时数据如表 3 所示。

表 3 不同分辨率下规划的成功率和规划耗时

分辨率	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
成功率/%	55	64	76	89	100
平均时间	0.223	0.345	0.657	0.712	0.923

由数据结果表 3 可知, 分辨率越小, 规划避障成功率越高, 但是会消耗更多时间。在非结构环境下, 障碍物分布复杂多变, 较高的规划成功率有利于采摘机械臂完成避

障, 减少碰撞, 故选取碰撞检测分辨率为 0.001。

### 4 结束语

本文基于改进后的 RRT 算法对柔性机械臂进行避障规划, 实现变电站联排变电器狭小空间的异物清理任务。根据变电站联排变电器环境特点, 首先设计了异物清理机器人的机构; 其次利用 D-H 参数法进行机械臂建模, 并利用正运动学求解机械臂的角度问题和驱动绳的长度, 满足了在狭小空间内的机器臂的运动学约束。针对 RRT 算法存在的搜索路径过于冗长和搜索路径过于曲折等问题, 提出了一种结合贪心算法和五次多项式的轨迹优化方法。贪心算法进行起始点和目标点之间的引导式采样搜索, 减少算法取点范围, 减少算法搜索时间和缩短路径长度; 同时, 加入多阶贝塞尔曲线优化, 减少规划路径的曲率, 使生成的路径满足机械臂的运动约束。本文提出的改进后的 RRT 算法在规划时间上比原 RRT 的算法提高 60%, 并且规划出的轨迹路径平均减少 20%, 同时规划路径曲率连续, 能够让机械臂平稳的按照轨迹运行, 最后通过仿真验证了算法的正确性和过障碍物规划的可能性。

由于机械臂轨迹规划的工作环境需要更为准确, 本文采用的模型较为简单, 在后续的研究中需要更为复杂的环境模型。另外本文的机器人机构如若投入使用在后续也需要不断修改完善。

### 参考文献:

[1] 徐 锋, 訾 斌, 袁京然, 等. 喷涂机器人矩形喷枪建模分析与迷彩图案全覆盖路径规划 [J]. 机器人, 2023, 45 (2): 139 - 155.

[2] 李 洋, 徐 达. 基于引力自适应步长 RRT 的双臂机器人协同路径规划 [J]. 机器人, 2020, 42 (5): 606 - 616.

[3] PALMER D, AXINTE D. Active uncoiling and feeding of a continuum arm robot [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56: 107 - 116.

[4] MATSUNO F, SATO H. Trajectory tracking control of snake robots based on dynamic model [C] // Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005: 3029 - 3034.

[5] AKIRA A. Trajectory planning for residual vibration suppression of a two-link rigid-flexible manipulator considering large deformation [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44

(9): 1627 - 1639.

[6] 邹双全. 气动柔性机械臂的三维形状检测与运动轨迹规划方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

[7] MA J T, XU H B, WANG Y, et al. Research and experiment on obstacle avoidance of citrus harvesting robot arm based on 3D reconstruction [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22 (7): 90 - 98.

[8] MARANI G, SONG K C, YUH J. Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs [J]. Ocean Engineering, 2009, 36 (1): 15 - 23.

[9] SANTHAKUMAR M, JINWHAN K. Coordinated motion control in task space of an autonomous underwater vehicle-manipulator system [J]. Ocean Engineering, 2015, 104: 155 - 160.

[10] ANDREW G, GRYNIEWSKI M, Campbell T. AARM: A robot arm for internal operations in nuclear reactors [C] // International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, Montreal, QC, Canada, 2010: 1 - 5.

[11] 黄晓辰. 核反应堆水下异物打捞机器人系统分析与实验研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2016.

[12] 多功能水下智能检查机器人通过鉴定 [J]. 传感器世界, 2012, 18 (12): 45.

[13] 罗 辉, 蒋 涛, 周 楠, 等. 改进 RRT 的二阶段平滑搜索算法 [J]. 计算机工程与应用, 2022, (12): 74 - 84.

[14] 郑 维, 王 昊, 王洪斌. 动态环境下基于自适应步长 Informed-RRT\* 和人工势场法的机器人混合路径规划 [J]. 计量学报, 2023, 44 (1): 26 - 34.

[15] 李昭莹, 欧一鸣, 石若凌. 基于深度 Q 网络的改进 RRT 路径规划算法 [J]. 空天防御, 2021, 4 (3): 17 - 23.

[16] 陈良剑, 赵文龙, 姜嘉骏. 基于 RRT 的动态规避轨迹规划算法 [J]. 现代计算机, 2021, (22): 72 - 76

[17] 江 洪, 蒋潇杰. 基于 RRT 改进的路径规划算法 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2021, 35 (7): 10 - 16.

[18] XIONG Y, PENG C, GRIMSTAD L, et al. Development and field evaluation of a strawberry harvesting robot with a cable-driven gripper [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 392 - 402

[19] SEPÚLVEDA D, FERNÁNDEZ R, NAVES E, et al. Robotic aubergine harvesting using dual-arm manipulation [J]. IEEE Access, 2020, 8: 121889 - 121904.

[20] 张 勤, 刘丰溥, 蒋先平, 等. 番茄串收机械臂运动规划方法与试验 [J]. 农业工程学报, 2021, 37 (9): 149 - 156.

[20] DIMPAL J, KULDEEP S, SANDEEP K, et al. Hierarchical Cooperative LSTM-Based Spectrum Sensing [J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27 (3): 866 - 870.

[21] 葛磊蛟, 赵 康, 孙永辉, 等. 基于孪生网络和长短时记忆网络结合的配电网短期负荷预测 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (23): 41 - 50.

[22] 孙 健, 黄鹏程, 赵军伟, 等. 多源降雨数据在重庆市中小流域短期水文预报中的应用 [J]. 水电能源科学, 2023, 41 (6): 9 - 12.

(上接第 293 页)

[17] 王 磊, 王志凌. 基于物联网的分布式水文动态监测及预警系统 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2022 (1): 55 - 59.

[18] 刘春芳, 王攀攀, 曹 菲. 基于 PSO-DE-BP 的光伏发电功率短期预测 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (5): 180 - 186.

[19] 王万良, 胡明志, 张仁贡, 等. 改进时间卷积网络和长短时记忆网络的泸水河流域月径流量预测模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (11): 3558 - 3575.