

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.042

基于直插补模型的柔性机械臂末端运动轨迹规划方法

靳爱青¹, 李凯勇²

(1. 东光县职业技术教育中心, 河北 沧州 061399; 2. 青海民族大学 物理与电子信息工程学院, 青海 西宁 810007)

摘 要: 柔性机械臂在运动过程中会发生弹性变形, 导致末端轨迹规划目标函数原始的 Pareto 解中包含不连续或不平滑的轨迹段, 而直插补模型可以通过修正来提高轨迹的连续性, 因此提出基于直插补模型的柔性机械臂末端运动轨迹规划方法。采用视觉定位方法识别运动目标, 获取运动目标的三维空间坐标。根据空间坐标采用最小外接矩形方法计算机械臂末端位姿角, 构建机械臂末端运动轨迹规划函数, 求取目标函数的初始 Pareto 前端解。采用直插补模型在离散的 Pareto 初始解点之间生成平滑过渡的轨迹, 修正初始 Pareto 前端解以提高机械臂末端运动轨迹的平滑性。实验结果表明: 所提方法具有较高的运动目标定位成功率, 运动轨迹与最优轨迹的误差最小。

关键词: 直插补模型; 柔性机械臂; 末端运动轨迹; 位姿角; Pareto 前端解

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0228-04

Flexible Robot Arm End Motion Trajectory Planning Method Based on Direct Interpolation Model

JIN Aiqing¹, LI Kaiyong²

(1. Dongguang County Vocational and Technical Education Center, Cangzhou 061399 China;

2. School of Physics and Electronic Information Engineering, Qinghai Minzu University, Xining 810007, China)

Abstract: Flexible robotic arms undergo elastic deformation in motion, leading to discontinuous or uneven trajectory segments in the original Pareto solution of the end effector trajectory planning objective function. The direct interpolation model, however, can improve the continuity of the trajectory through modification. Therefore, a flexible robotic arm end effector motion trajectory planning method based on the direct interpolation model is proposed. Visual localization methods are employed to identify moving targets and their three-dimensional spatial coordinates are obtained. According to the spatial coordinates, the minimum bounding rectangle method is used to calculate the pose angle of the end effector of the robotic arm, construct the trajectory planning function for the end effector movement of the robotic arm, and obtain the initial Pareto front end solution of the objective function. Using a direct interpolation model to generate smooth transition trajectories between discrete Pareto initial solution points, and the initial Pareto front-end solution is corrected to improve the smoothness of the end effector motion trajectory of the robotic arm. The experimental results show that the proposed method has a high success rate in locating moving targets, and the error between the motion trajectory and the optimal trajectory is minimized.

Keywords: direct interpolation model; flexible robotic arm; end point motion trajectory; posture angle; Pareto front-end solution

0 引言

随着机器人技术的飞速发展, 柔性机械臂^[1-2]因其轻质、灵活和适应性强等特点, 从而在自动化装配、精密操作、空间探索和医疗手术等领域展现出巨大的应用潜力。然而, 柔性机械臂的弹性变形和动态不稳定性也给末端运动轨迹规划带来了严峻挑战^[3-4]。因此, 开发适用于柔性机械臂的末端运动轨迹规划方法, 成为提升机器人操作精度和效率的关键技术之一。

宋勇等^[5]研究了复杂场景下机械臂运动轨迹规划方法, 该方法在采样过程中引入概率目标与随机采样的策略, 并采用人工势场法检测碰撞区域。删除冗余点后, 构建运动轨迹目标规划模型。但是, 该方法引入的随机采样策略容易导致轨迹规划结果存在不一致性, 从而使机械臂无法准确到达预定位置。李扬等^[6]提出基于改进 RRT 结合 B 样条的机械臂运动轨迹规划方法, 引入偏执阈值对传统 RRT 算法进行改进, 采用三次 B 样条函数对规划的运动轨迹进行拟合优化。但是, 引

基金项目: 青海省重点研发与转化计划项目 (2022-QY-205)

第一作者简介: 靳爱青 (1972—), 女, 河北吴桥人, 正高级讲师, 双本科, 研究方向为机械教学、机械设计, 2096351036@qq.com。

入偏执阈值会导致搜索过程偏向于某些特定的区域,这可能会限制搜索的全面性。王红莉等^[7]提出基于 PS-RRT 算法的机械臂运动轨迹规划方法,采用 PS-RRT 算法规划初始运动轨迹,检测路径中碰撞情况,在考虑碰撞约束的情况下进行运动轨迹的二次规划。将初始路径与二次路径进行拼接与剪裁,从而完成运动轨迹的规划。PS-RRT 算法在规划初始轨迹时依赖于随机采样,这容易导致初始轨迹的质量不稳定。崔靖凯等^[8]提出基于改进灰狼算法的冗余机械臂最优轨迹规划方法,融合强化学习与灰狼优化算法,使用 5 阶多项式精确生成机器人机械臂动态轨迹。优化关键参数以提高机械臂运动效率与平滑度,搜索的解由运行时间以及中间点的关节位置、速度、加速度组成,从而实现冗余机械臂的最优轨迹规划。但是,改进灰狼算法与强化学习的双重嵌套优化机制导致求解过程需要大量迭代计算,尤其当机械臂自由度增加时,计算时间呈指数级增长。

为了解决当前研究普遍存在的问题,提出基于直插补模型的柔性机械臂末端运动轨迹规划方法。

1 目标三维定位

目标定位是实现精确控制的前提,确保机械臂能够准确到达预定的工作位置,从而满足高精度作业的要求。通过视觉传感器获取目标对象的图像信息,并通过几何模型提取其空间坐标信息^[9],从而完成目标的空间定位^[10-11]。单目视觉定位模型如图 1 所示。

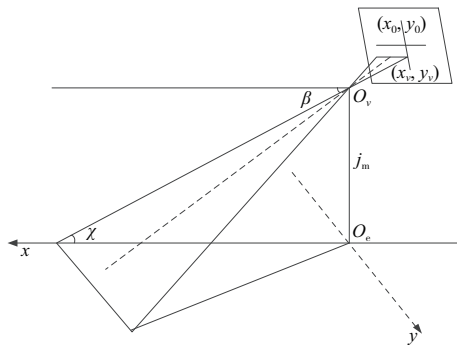


图 1 单目视觉定位模型

图 1 中 j_m 表示目标高度。

基于视觉的目标定位,需先建立机械臂空间坐标系 O_e ,通过小孔透视模型建立实际空间与成像平面的三维映射关系,进而实现目标视觉定位,并根据实际目标高度推导出机器人空间坐标下的

三维坐标^[12],推导出相对于运动目标图像中心的坐标 (x_v, y_v) :

$$\begin{cases} x_v = (x - x_0)f_x \\ y_v = (y - y_0)f_y \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x_0, y_0) 表示目标位置中心在成像平面上的坐标; (x, y) 表示目标质心在成像平面的中心坐标; f_x, f_y 分别表示 x 轴、 y 轴方向上相机的尺度因子。

接下来对目标定位图像^[13-14]展开阈值分割处理,以提高图像检测边缘质量,目标质心在成像平面的中心坐标 (x, y) 为

$$\begin{cases} x = \frac{\sum [x_v \cdot P(x_p, y_p)]}{\sum P(x_p, y_p)} \\ y = \frac{\sum [y_v \cdot P(x_p, y_p)]}{\sum P(x_p, y_p)} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $P(x_p, y_p)$ 表示二值化处理后目标图像像素坐标。

目标图像像素 x 轴坐标值 x_m ,其公式表示如下:

$$x_m = \frac{j_m}{\tan\left(\beta - \tan^{-1}\left(\frac{y - y_0}{Lf_y}\right)\right)} \quad (3)$$

式中: β 表示拍摄角与 x 轴角度; L 表示焦距。

同理得到 y 轴坐标值 y_m ,其公式表达如下:

$$y_m = \frac{(x - x_0)j_m}{\sqrt{\frac{L^2}{f_y^2} + (y - y_0)^2 \sin^2 \chi}} \quad (4)$$

式中 χ 表示拍摄角与 y 轴角度。

最后整合 x_m, y_m 以及 j_m 推导出目标的三维空间坐标 $M(x_m, y_m, j_m)$ 。

2 初步位姿 Pareto 前端解坐标的直接获取

依据目标的三维空间定位结果,构建柔性机械臂末端运动轨迹规划的目标函数,并初始计算位姿 Pareto 前端解坐标^[15]。采用最小外接矩形 MBR 方法直接获取运动轨迹的 Pareto 前端解坐标,快速生成一系列非支配解,以确保轨迹的适应性。

根据目标的三维定位结果 $M(x_m, y_m, j_m)$,获取运动目标的最小包围矩形,并计算柔性机械臂末端位姿角 ϑ 。位姿角计算示意图如图 2 所示。

机械臂末端最优位姿角 ϑ 的计算公式为

$$\vartheta = \begin{cases} \arctan M \frac{B_y - A_y}{B_x - A_x} & t_1 < t_2 \\ \arctan M \frac{C_y - A_y}{C_x - A_x} & t_1 > t_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: t_1 、 t_2 分别表示长轴和短轴长度; (A_x, A_y) 、 (B_x, B_y) 、 (C_x, C_y) 分别表示图 2 中 A、B、C 3 点坐标。

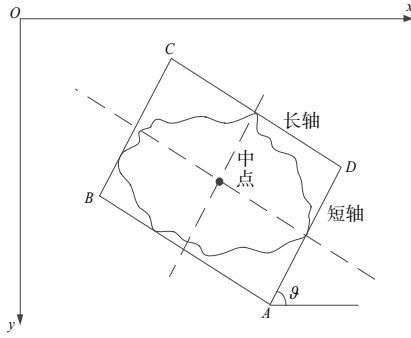


图 2 位姿角计算示意图

根据位姿角的计算结果,构建柔性机械臂末端执行器运动轨迹规划目标函数,可以避免柔性机械臂在运动过程中与其他物体发生碰撞^[16-17]。运动轨迹规划目标函数为

$$f = -O_x \sin \vartheta + O_y \cos \vartheta \quad (6)$$

式中 (O_x, O_y) 表示机械臂的移动轨迹坐标点空间坐标系中某一点坐标。

推导出机械臂运动轨迹规划目标函数的 Pareto 前端解 R 为

$$R_k = (O_{xk}, O_{yk}) = (O_{x0} + d \cdot \tan \vartheta, O_{y0} + d \cdot \tan \vartheta) \quad (7)$$

式中: (O_{x0}, O_{y0}) 表示机械臂的初始空间位置; d 表示沿轨迹方向的位移; $\tan$ 表示正切函数。

3 Pareto 前端解直插补修正

Pareto 前端解往往是离散的,无法直接满足机械臂运动的连续性需求。而直插补模型通过在离散的 Pareto 解点之间生成平滑过渡的轨迹,确保了机械臂运动过程的连续性和平滑性^[18-19]。机械臂运动轨迹直线拟合过程如图 3 所示。

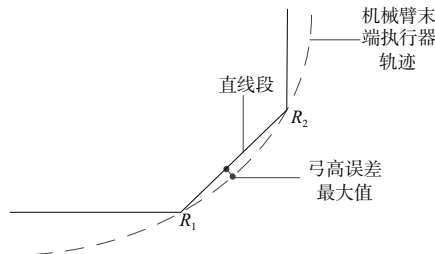


图 3 直线拟合过程

直线插补过程以坐标 Pareto 前端解 R_1 点为起点、 R_2 点为终点,设定速度 v ,取线段 R_1R_2 上一点 R_l 为精插补点, R_{l+1} 为下一插补点,拟合机械臂轨迹曲线。 x 轴与 y 轴上平行进给参数用 Δx 、 Δy 表示,得到两个插补点距离 ΔC 公式表达如下:

$$\Delta C = \Delta x + \Delta y \quad (8)$$

线段 R_1R_2 的长度公式表达如下:

$$F = n \Delta C \quad (9)$$

式中 n 表示直线分段数量。

线段 R_1R_2 的轨迹拟合 $g(x, y)$ 公式表达如下:

$$g(x, y) = \frac{(y_{R_2} - y_{R_1})(x_{R_2} - x_{R_1})}{x_{R_2} - x_{R_1} + y_{R_2}} \cdot F \quad (10)$$

式中 (x_{R_1}, y_{R_1}) 、 (x_{R_2}, y_{R_2}) 分别表示点 R_1 和点 R_2 的坐标。

进一步推导出第 q 个坐标 Pareto 前端解精插补点 R_q 的坐标 (x_q, y_q) :

$$\begin{cases} O_{xq} = x_{R_1} + qg(x, y) \\ O_{yq} = y_{R_1} + qg(x, y) \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)计算出的 (O_{xq}, O_{yq}) 代入式(7),作为新的空间坐标系点坐标^[20],完成柔性机械臂运动目标坐标 Pareto 前端解的修正处理。

4 实验与分析

4.1 参数设置

实验环境:室内实验室环境,温度 25 ℃,湿度 50%,照明强度 500 Lux。

实验设备:蔬菜种植柔性机械臂系统,包括 6 自由度机械臂、电动抓取器、激光扫描仪等。

目标物体:农作物,直径约 4 cm,质量约 20 g。

实验参数:机械臂运动参数为关节角度范围 $\pm 120^\circ$,最大速度 2 m/s,最大加速度 5 m/s²。激光扫描仪参数为扫描范围 100 cm × 100 cm,扫描精度 ± 1 mm。

实验现场如图 4 所示。



图 4 实验现场图

4.2 目标定位成功率

目标定位成功率直接反映了柔性机械臂在执行任务时的核心性能,即能否准确地将末端执行

器移动到预定位置。采用所提方法、文献[5]方法、文献[6]方法进行机械臂运动目标的定位,测试3种方法的定位成功率,结果如图5所示。

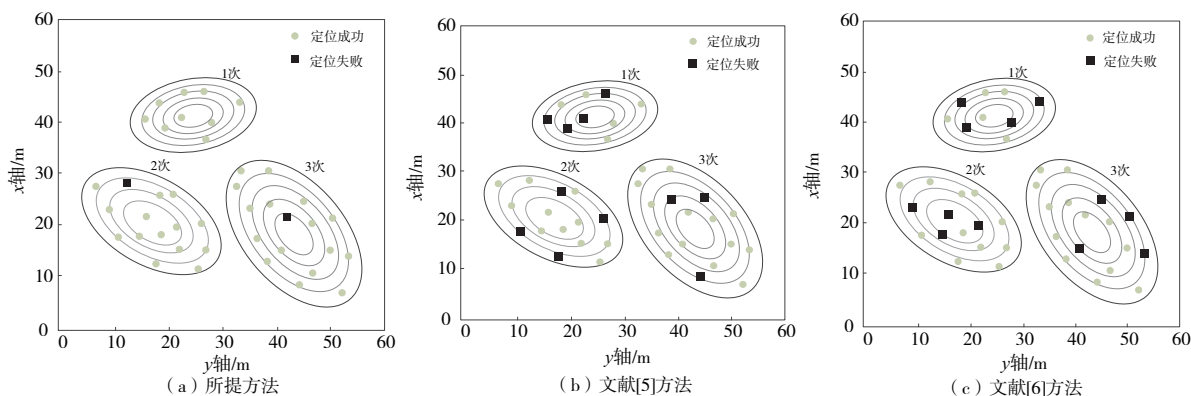


图5 定位成功率结果

从图5所示的定位成功率结果中可以看出,3次目标定位下,所提方法仅在第2次和第3次测试中分别出现1次定位失败。而文献[5]与文献[6]方法在任意1次测试中均出现了3次以上的定位失败情况,说明本文方法能够对机械臂的运动目标进行精准定位。

4.3 最优轨迹贴近度

最优轨迹贴近度测试是评估轨迹规划方法性能的重要指标,它能够量化机械臂末端执行器实际运动轨迹与理论最优轨迹之间的接近程度。因此,以最优轨迹贴近度为指标,将所提方法与文献[5]、文献[6]方法进行对比测试,3种方法的最优轨迹贴近度结果如图6所示。

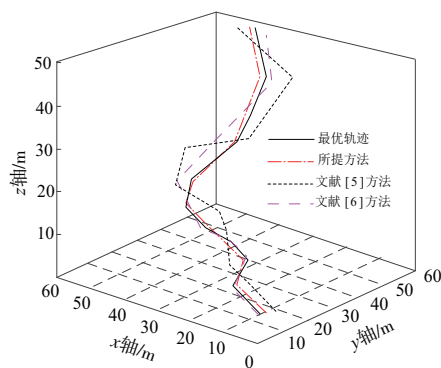


图6 最优轨迹贴近度结果

从图6中可以看出,文献[5]方法在机械臂整个运动过程中的轨迹始终与最优轨迹相差较大,文献[6]方法虽然在运动初期的轨迹与最优轨迹较为接近,但是轨迹偏差逐渐增大。而所提方法规划的运动轨迹始终与最优轨迹较为接近,

因此所提方法规划的运动轨迹较优。

5 结语

此次研究深入探讨了基于直插补模型的柔性机械臂末端运动轨迹规划方法,该方法在现代自动化和机器人技术领域中扮演着至关重要的角色。通过对 Pareto 前端解的直插补修正,不仅确保了机械臂运动轨迹的连续性和平滑性,还显著提升了轨迹的控制精度和机械臂的动态性能,这种创新的方法为柔性机械臂在复杂环境中的精确操作提供了强有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 尚东阳,李小彭,尹猛,等. 采用模糊补偿滑模控制器的空间柔性机械臂振动抑制方法[J]. 振动与冲击, 2024,43(7):175-185,204.
- [2] 陈崇,楼旭阳,崔宝同. 基于扰动观测器的柔性机械臂鲁棒边界控制[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(12):2269-2276.
- [3] 徐向阳,广永川,杨宝军,等. 考虑关节间隙的柔性机械臂动力学模型及特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2023,57(8):138-147.
- [4] 张晓光. 体育器材用多自由度机械臂运动轨迹控制方法[J]. 机械制造与自动化, 2023,52(2):157-161.
- [5] 宋勇,张蕾,田荣,等. 复杂多场景下机械臂避障运动规划方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2023,41(3):500-509.
- [6] 李扬,张蕾,李鹏飞,等. 基于改进 RRT 结合 B 样条的机械臂运动规划方法[J]. 计算机集成制造系统, 2023,29(1):254-263.

(下转第 261 页)

- synchronous generator-based wind energy conversion system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(3): 65-82.
- [11] WEI C M, MA B, SU T T. Research on the wind-induced vibration coefficient of transmission tower-line system[J]. Physics Procedia, 2012, 24: 149-154.
- [12] DE LIMA D M, LÓPEZ-YÁÑEZ P A, PEREIRA M A. Vibration control device for steel tubular towers of horizontal axis wind turbines [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2019, 16(6): e200.
- [13] QIN L, YUAN J J, LI W. Random wind-induced response analysis of transmission tower-line system[J]. Energy Procedia, 2012, 16: 1813-1821.
- [14] TIAN L, WANG Q, YU Q Q, et al. Wind-induced vibration optimal control for long span transmission tower-line system [J]. The Open Civil Engineering Journal, 2013, 7(1): 159-163.
- [15] 王肇民. 电视塔结构 TMD 风振控制研究与设计[J]. 1994(5): 2-13.
- [16] 胡松. 大跨越输电线路的风振反应分析及振动控制研究[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [17] 曹枚根, 周福霖, 徐忠根, 等. 大跨越输电塔线体系减震控制分析研究[J]. 2007(14): 45-51.

收稿日期: 2025-10-10

(上接第 231 页)

- [7] 王红莉, 向国菲, 朱雨琪, 等. 基于 PS-RRT 算法的机械臂避障路径规划[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(1): 42-46.
- [8] 崔靖凯, 王凯, 范正奇, 等. 基于改进灰狼算法的冗余机械臂最优轨迹规划[J]. 控制与决策, 2025, 40(5): 1457-1466.
- [9] 李淦, 牛洛第, 陈路, 等. 融合视觉特征增强机制的机器人弱光环境抓取检测[J]. 计算机应用, 2023, 43(8): 2564-2571.
- [10] 贾清玉, 常亮, 杨先一, 等. 面向机械臂操作的视觉信息实时重建方法[J]. 计算机应用, 2023, 43(4): 1255-1260.
- [11] 李磊磊, 张哲, 杨伊菲, 等. 基于点线视觉/惯性 SLAM 和目标检测的测距方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(3): 237-244.
- [12] 孟月波, 王宙, 韩九强, 等. 虚实坐标智能匹配与自适应三维轨迹规划[J]. 控制工程, 2024, 31(8): 1468-1477.
- [13] 沈微微, 姜晓燕, 张兵, 等. 机器人抓取视觉传感目标精确定位方法[J]. 传感技术学报, 2023, 36(5): 763-768.
- [14] 余涛, 熊盛武. 农业场景下移动机器人的双目视觉定位与地图构建方法[J]. 计算机科学, 2023, 50(12): 185-191.
- [15] 孙茂琳, 秦建军, 曹钰, 等. 面向非结构化坡面的四足机器人位姿优化方法[J]. 机床与液压, 2024, 52(21): 43-51.
- [16] 张建华, 任宝珍, 赵岩, 等. 基于二分试探的平面冗余机械臂碰撞检测与避障[J]. 机械工程学报, 2023, 59(1): 113-122.
- [17] 刁慧, 陈桂, 曹飞虎, 等. 基于碰撞检测的双机械臂避障路径规划[J]. 机床与液压, 2024, 52(15): 43-49.
- [18] 李美强, 马庆禄, 闫浩, 等. 多自由度机械臂关节运动控制研究[J]. 机械强度, 2025, 47(2): 147-158.
- [19] 任金超, 李佳昌, 王平江, 等. 基于双插补轨迹控制的七关节机械臂避障[J]. 工程科学学报, 2023, 45(12): 2085-2094.
- [20] 朱峰刚. 关节速度约束下六轴机械臂空间运动轨迹规划方法[J]. 机械与电子, 2023, 41(3): 44-49.

收稿日期: 2024-06-13