

基于动力学降噪模型的蛇形臂机器人 末端轨迹跟随算法

张志刚¹ 靳勇利¹ 王栋银¹ 付志军¹ 秦国栋^{2*}

1. 郑州轻工业大学河南省机械装备智能制造重点实验室, 郑州, 450002

2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥, 230026

摘要: 针对超冗余蛇形机器臂在狭小受限空间的运动规划问题, 提出了一种基于等效多连杆动力学降噪模型的末端轨迹跟随算法。将蛇形臂视作关节约束在末端无碰撞轨迹曲线上运动的多连杆系统, 基于虚功原理推导了该刚柔耦合系统的动力学方程。臂节的长度条件由连杆的轴向刚度保证, 并通过模型降噪方法从模型层面滤除高频分量影响, 使常规显式算法可用于等效多连杆系统方程的高效求解。采用所提算法可以指定蛇形臂末端或基座的速度规律, 进而实现蛇形臂沿末端轨迹的运动规划。由于蛇形臂关节被严格限制在可行性轨迹曲线上运动, 因此可以实现狭小深腔环境下的避障运动规划。通过求解平面和空间典型数值算例可知, 采用所提算法进行蛇形机械臂运动规划具有足够的计算精度和效率。

关键词: 蛇形臂机器人; 运动规划; 末端轨迹跟随; 模型降噪; 刚柔耦合

中图分类号: TP242

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Tip-trajectory Following Algorithm for Snake-arm Robots Based on Dynamics Denoising Model

ZHANG Zhigang¹ JIN Yongli¹ WANG Dongyin¹ FU Zhijun¹ QIN Guodong^{2*}

1. Henan Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Mechanical Equipment, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, 450002

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230026

Abstract: Based on dynamics model smoothing formulation of equivalent multi-link system, a tip-trajectory following algorithm was proposed for motion planning of hyper-redundant SARs in narrow and confined spaces. Regarding SAR as a multi-link system of joint points constrained to move on collision-free trajectory curve of tip, and the dynamics equation of rigid-flexible coupling system was derived using virtual work principle. The length conditions of robot arm segments were guaranteed by axial stiffness of connecting rods, and the influences of high-frequency components were filtered out from the model level by employing model denoising method, so that the conventional explicit algorithm might be used to calculate the solution of equation of equivalent multi-link system efficiently. The proposed algorithm may specify the velocity law of tip or base of snake-arms, and realize the motion planning of SAR along tip-trajectory. Due to the strictly limited joint points of SAR moving on feasible trajectory curve, obstacle avoidance motion planning may be achieved in narrow and deep cavity environments. After solving typical numerical examples in planar and spatial cases, the results show that the proposed algorithm has sufficient computational accuracy and efficiency for the motion planning of SARs.

Key words: snake-arm robot(SAR); motion planning; tip-trajectory following; model denoising; rigid-flexible coupling

0 引言

基于“仿生肌腱”设计的蛇形臂机器人

(snake-arm robot, SAR)结构质量小、运动灵活性高,且臂长范围无电子元件,特别适于高危、高辐射及狭小深腔作业环境需求,是近年来机器人前沿技术领域的研究热点之一^[1]。

蛇形臂机器人的超长串联结构和超冗余自由度使其具备极好的环境适应性,实现狭小受限空

收稿日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(12305251); 河南省科技攻关项目(232102221036, 242102241049); 河南省外籍科学家工作室项目(GZS2023011)

间内的避障运动是其运动规划的核心问题。广泛应用于冗余机械臂逆运动学求解的雅可比矩阵伪逆法^[2]以关节整体运动量最小为优化目标,以机械臂末端运动为约束来确定关节角,实施过程没有考虑避障要求。在此基础上提出的梯度投影法^[3],可添加避障作为附加优化目标,将梯度投影到雅可比矩阵的零空间中,利用零空间的性质,在保证跟踪机械臂末端位姿的前提下进行避障运动规划。然而对于超冗余度机器人,这类方法往往耗时过长,并且会出现奇异值问题而造成关节速度陡增和运动方向的不明确。

此外,人工势场法^[4]、模糊逻辑算法^[5]、遗传算法^[6]及神经网络算法^[7]等也被用于冗余机器人避障规划,但上述研究大多基于开放空间和单一或少数规则障碍物场景,对于狭小受限空间、多连续障碍,如复杂管道、深腔环境等避障路径连续性工况,普遍存在计算量大、实时性弱、稳定性及灵活性差等不足。

针对超冗余蛇形臂机器人在复杂受限环境下的运动规划问题,WILLIAMS 等^[8]提出了一种末端轨迹跟随方法(follow-the-leader approach)。该方法的核心思想是在受限空间规划出一条无碰撞路径轨迹的基础上,控制蛇形臂末端沿该轨迹运动,而其余机械臂关节则跟随末端的运动轨迹,使运动中的蛇形臂尽可能逼近路径曲线,从而实现避障目标。

末端轨迹跟随方法在实施上有两个关键:①多障碍受限环境下的无碰撞轨迹规划;②蛇形臂关节在可行性轨迹上位置的快速确定。无碰撞轨迹可采用 A* 算法^[9]、蚁群算法^[10]等自动路径规划算法在线或离线生成,而蛇形臂沿轨迹曲线运动时关节位置的更新是该方法的核心。为此,PALMER 等^[11]以蛇形臂末端位置误差和路径偏移量为目标函数,采用优化方法对运动关节位置参数进行解算,但存在计算量大、末端位置跟踪精度不高等问题。为了提高求解效率,王俊刚等^[12]提出基于迭代步长顺序查找来实现机械臂关键点与离散路径曲线快速匹配,并通过线性插值优化方法减小因路径离散处理引起的误差。但这类方法仍仅从位置信息出发,本质上仍是反复迭代求解关于各个关节位置的非线性方程组。

为了提高蛇形机械臂在受限空间上避障运动规划问题的计算效率,本文提出了一种基于动力学模型的末端轨迹跟随运动规划方法,并对两个典型算例进行了仿真求解。

1 超冗余蛇形机械臂的运动学描述

本文研究的蛇形机械臂由驱动基座、直线导轨、标准臂节、钢丝绳缆和万向节组成。基座可沿直导轨运动,臂节间通过十字轴万向节串联,并通过钢丝绳进行驱动,其整体结构如图 1 所示。

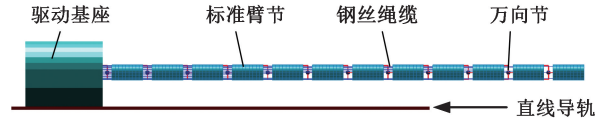


图 1 蛇形臂机器人结构图

Fig.1 Structure diagram of SAR

为了对蛇形臂运动学进行描述,在各臂节质心 $r_c^{(i)}$ 处建立连体坐标系 $[e_1^{(i)} \ e_2^{(i)} \ e_3^{(i)}]$,其中 $e_1^{(i)}$ 指向臂节长度方向, $e_2^{(i)}$ 和 $e_3^{(i)}$ 分别沿臂节两端万向节转轴方向。相邻 $i-1$ 与 i 号臂节间的运动学关系如图 2 所示。

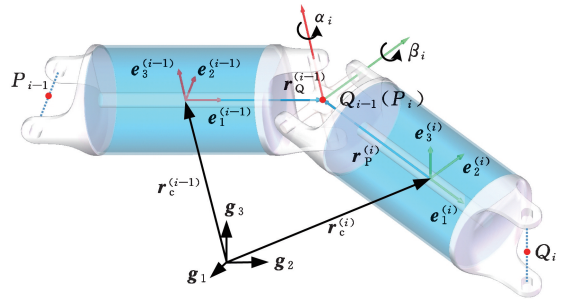


图 2 相邻臂节运动学关系

Fig.2 Kinematic relationship of adjacent segments

臂节 i 姿态矩阵 $A_i = [e_1^{(i)} \ e_2^{(i)} \ e_3^{(i)}]$ 可由臂节 $i-1$ 姿态矩阵 $A_{i-1} = [e_1^{(i-1)} \ e_2^{(i-1)} \ e_3^{(i-1)}]$ 表示为

$$A_i = A_{i-1} R_i \tag{1}$$

其中转动矩阵 R_i 为

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \beta_i & -\sin \alpha_i & \cos a \sin \beta_i \\ \cos \beta_i \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & \sin a \sin \beta_i \\ -\sin \beta_i & 0 & \cos \beta_i \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中: α_i 、 β_i 分别为万向节依次绕转轴 $e_1^{(i)}$ 和 $e_2^{(i)}$ 的转角。

相邻臂节间质心矢径 $r_c^{(i-1)}$ 与 $r_c^{(i)}$ 的传递关系可以表示为

$$r_c^{(i)} = r_c^{(i-1)} + A_{i-1} \bar{r}_Q^{(i-1)} - A_i \bar{r}_P^{(i)} \tag{3}$$

式中: $\bar{r}_Q^{(i-1)}$ 和 $\bar{r}_P^{(i)}$ 分别为万向节铰点在 $i-1$ 和 i 号臂节中的局部坐标。

2 末端无碰撞轨迹的三次样条插值

采用末端轨迹跟随方法进行超冗余蛇形机械臂的运动规划,可先借助自动路径规划算法通过在线或离线方式生成无碰撞轨迹离散点,然后插值形成足够光滑的末端轨迹曲线。鉴于三次样条具有二阶导数连续、能够保证运动平顺性等优势,

$$\dot{\mathbf{q}}_s^{(i)} = [\dot{s}_j^{(i)} \quad \dot{s}_j^{(i+1)}]^T \quad \mathbf{N}_B^{(i)} = [(1-\zeta)\mathbf{r}_{j,s}^{(i)} \quad \zeta\mathbf{r}_{j,s}^{(i+1)}]$$

$$\mathbf{r}_{j,s}^{(i)} = \partial \mathbf{r}(s_j^{(i)})/\partial s \quad \mathbf{r}_{j,s}^{(i+1)} = \partial \mathbf{r}(s_j^{(i+1)})/\partial s$$

对式(12)再求一次导数可得加速度

$$\ddot{\mathbf{r}}_B^{(i)}(\bar{s}) = \mathbf{N}_B^{(i)}\ddot{\mathbf{q}}_s^{(i)} + \dot{\mathbf{N}}_B^{(i)}\dot{\mathbf{q}}_s^{(i)} \quad (13)$$

等效连杆 B_i 的惯性力虚功率为

$$\delta p_{\text{ine}}^{(i)} = m_B \int_0^1 (\delta \dot{\mathbf{r}}_B^{(i)})^T \ddot{\mathbf{r}}_B^{(i)} d\zeta =$$

$$(\delta \dot{\mathbf{q}}_s^{(i)})^T (\mathbf{M}_r^{(i)} \ddot{\mathbf{q}}_s^{(i)} + \mathbf{F}_r^{(i)}) \quad (14)$$

式中: m_B 为连杆质量, 质量阵 $\mathbf{M}_r^{(i)} = m_B \int_0^1 (\mathbf{N}_B^{(i)})^T \mathbf{N}_B^{(i)} d\zeta$, 惯性力列阵 $\mathbf{F}_r^{(i)} = m_B \int_0^1 (\mathbf{N}_B^{(i)})^T \dot{\mathbf{N}}_B^{(i)} d\zeta \dot{\mathbf{q}}_s^{(i)}$.

由柔性多连杆组成的刚柔耦合系统的动力学方程表现明显为刚性特征, 就算采用刚性微分方程数值解法的计算效率也不高, 因此, 有效解决这一问题也是本文方法成功实施的关键。

近年来提出模型降噪方法^[13] 通过将弹性内力在一小段时间域 h 内平均, 进而从模型层面滤除高频分量影响, 使显式微分方程数值解法也能高效应用于传统刚性问题的求解。根据模型降噪方法, 可将等效连杆的内力虚功率表示为

$$\delta p_{\text{str}}^{(i)} = L_B \int_0^1 \delta \varepsilon_B^{(i)} EA (a_h \ddot{\varepsilon}_B^{(i)} + b_h \dot{\varepsilon}_B^{(i)} + \varepsilon_B^{(i)}) d\zeta \quad (15)$$

$$a_h = h^2/6 \quad b_h = h/2$$

式中: E 为等效连杆的弹性模量; A 为等效连杆的截面积; $\varepsilon_B^{(i)}$ 为轴向应变; a_h, b_h 为与降噪因子 h 相关的系数。

连杆 B_i 的轴向应变可以表示为

$$\varepsilon_B^{(i)}(\bar{s}) = \Delta L_B/L_B = (\mathbf{e}_1^{(i)})^T (\mathbf{r}_j^{(i+1)} - \mathbf{r}_j^{(i)})/L_B - 1 \quad (16)$$

其中, ΔL_B 为等效连杆 B_i 的长度增量; $\mathbf{e}_1^{(i)}$ 为杆长方向单位基矢量:

$$\mathbf{e}_1^{(i)} = (\mathbf{r}_j^{(i+1)} - \mathbf{r}_j^{(i)}) / \|\mathbf{r}_j^{(i+1)} - \mathbf{r}_j^{(i)}\|$$

对式(16)求导可得轴向应变速率为

$$\dot{\varepsilon}_B^{(i)}(\bar{s}) = (\mathbf{e}_1^{(i)})^T (\dot{\mathbf{r}}_j^{(i+1)} - \dot{\mathbf{r}}_j^{(i)})/L_B = \mathbf{N}_\varepsilon^{(i)} \dot{\mathbf{q}}_s^{(i)} \quad (17)$$

$$\mathbf{N}_\varepsilon^{(i)} = (1/L_B) [-(\mathbf{e}_1^{(i)})^T \mathbf{r}_{j,s}^{(i)} \quad (\mathbf{e}_1^{(i)})^T \mathbf{r}_{j,s}^{(i+1)}]$$

对式(17)再求导可得轴向应变的二阶时间导数为

$$\ddot{\varepsilon}_B^{(i)}(\bar{s}) = \mathbf{N}_\varepsilon^{(i)} \ddot{\mathbf{q}}_s^{(i)} + \dot{\mathbf{N}}_\varepsilon^{(i)} \dot{\mathbf{q}}_s^{(i)} \quad (18)$$

将式(16)~式(18)代入式(15), 可得连杆 B_i 的内力虚功率

$$\delta p_{\text{str}}^{(i)} = (\delta \dot{\mathbf{q}}_s^{(i)})^T [a_h \mathbf{K}^{(i)} \ddot{\mathbf{q}}_s^{(i)} + (a_h \dot{\mathbf{K}}_c^{(i)} + b_h \mathbf{K}_c^{(i)}) \dot{\mathbf{q}}_s^{(i)} + \mathbf{F}_s^{(i)}] \quad (19)$$

其中, 广义节点力 $\mathbf{F}_s^{(i)} = EAL_B \int_0^1 (\mathbf{N}_\varepsilon^{(i)})^T \varepsilon_B^{(i)} d\zeta$,

矩阵 $\mathbf{K}^{(i)}$ 和 $\dot{\mathbf{K}}_c^{(i)}$ 分别为

$$\mathbf{K}^{(i)} = EAL_B \int_0^1 (\mathbf{N}_\varepsilon^{(i)})^T \mathbf{N}_\varepsilon^{(i)} d\zeta$$

$$\dot{\mathbf{K}}_c^{(i)} = EAL_B \int_0^1 (\mathbf{N}_\varepsilon^{(i)})^T \dot{\mathbf{N}}_\varepsilon^{(i)} d\zeta \quad (20)$$

等效连杆 B_i 的外力虚功率可以表达为

$$\delta p_{\text{exp}}^{(i)} = (\delta \dot{\mathbf{q}}_s^{(i)})^T \mathbf{F}_e^{(i)} \quad (21)$$

其中, $\mathbf{F}_e^{(i)}$ 为等效连杆 B_i 所受到的广义外力列阵。

对于由 n 个臂节组成的蛇形机械臂, 由关节铰点在轨迹曲线上的弦长坐标组成的系统参数列阵为 $\mathbf{q}_s = [s_j^{(1)} \quad s_j^{(2)} \quad \cdots \quad s_j^{(n+1)}]^T$, 则等效连杆 B_i 的弦长参数可以表示为 $\mathbf{q}_s^{(i)} = \mathbf{T}_i \mathbf{q}_s$, 其中 \mathbf{T}_i 为定位布尔矩阵。

蛇形臂等效连杆系统的虚功率方程可表示为

$$\sum_{i=1}^n (\delta p_{\text{ine}}^{(i)} + \delta p_{\text{str}}^{(i)} - \delta p_{\text{exp}}^{(i)}) = 0$$

将式(14)、式(19)和式(21)代入, 并由虚变分 $\delta \dot{\mathbf{q}}_s$ 的独立性可得

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}}_s = \mathbf{F} \quad (22)$$

式中: 系统质量阵 $\mathbf{M} = \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i^T (\mathbf{M}_r^{(i)} + a_h \mathbf{K}^{(i)}) \mathbf{T}_i$; 系统阻尼矩阵 $\mathbf{C} = \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i^T (a_h \dot{\mathbf{K}}_c^{(i)} + b_h \mathbf{K}_c^{(i)}) \mathbf{T}_i$; 系统广义外力列阵

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i^T (\mathbf{F}_e^{(i)} - \mathbf{F}_r^{(i)} - \mathbf{F}_s^{(i)}).$$

3.2 末端跟随运动的速度控制

蛇形臂沿末端轨迹运动时, 通常有两种速度控制方式: ① 指定驱动基座沿直线导轨的速度; ② 指定蛇形臂末端沿规划轨迹曲线的速度。

被控关节铰点的弦长坐标可以表达为时间 t 的已知函数, 将其记作 $s_j^{\text{ctl}}(t)$, 除此之外其余铰点的弧长坐标组集为列阵 $\mathbf{s}_a = \mathbf{q}_s - \mathbf{s}_j^{\text{ctl}}$, 相应地将式(22)进行重新分块表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{cc} & \mathbf{M}_{ca} \\ \mathbf{M}_{ac} & \mathbf{M}_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{s}}_j^{\text{ctl}} \\ \dot{\mathbf{s}}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{cc} & \mathbf{C}_{ca} \\ \mathbf{C}_{ac} & \mathbf{C}_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{s}}_j^{\text{ctl}} \\ \dot{\mathbf{s}}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_c \\ \mathbf{F}_a \end{bmatrix} \quad (23)$$

据此可以求得

$$\dot{\mathbf{s}}_a = \mathbf{M}_{aa}^{-1} (\mathbf{F}_a - \mathbf{M}_{ac} \dot{\mathbf{s}}_j^{\text{ctl}} - \mathbf{C}_{ac} \dot{\mathbf{s}}_j^{\text{ctl}} - \mathbf{C}_{aa} \dot{\mathbf{s}}_a) \quad (24)$$

对式(24)积分便可以得到各关节沿轨迹曲线的运动规律, 得到各时刻关节铰点曲线参数 $s_j^{(i)}$, 进而由式(9)得到各关节铰点的位置矢量 $\mathbf{r}_j^{(i)}$ 。

3.3 机械臂关节转角的反解

在得到各时刻关节铰点位置 $\mathbf{r}_j^{(i)}$ 的基础上, 可以通过反解各万向节对应铰坐标 α_i, β_i , 进而确定蛇形臂姿态。由于驱动基座只沿直线导轨运动, 其姿态不变, 故万向节关节角的求解可以从与驱动基座连接的1号臂节开始依次进行。

在臂节 $i-1$ 姿态 $(\mathbf{e}_1^{(i-1)}, \mathbf{e}_2^{(i-1)}, \mathbf{e}_3^{(i-1)})$ 已递推求得的情况下, 由图4可知臂节 i 相对于臂节 $i-1$ 的转角 β_i 满足关系 $\cos(\pi/2 + \beta_i) = \mathbf{e}_1^{(i)} \cdot \mathbf{e}_3^{(i-1)}$, 因此转角 β_i 为

$$\beta_i = \arccos(\mathbf{e}_1^{(i)} \cdot \mathbf{e}_3^{(i-1)}) - \pi/2 \quad (25)$$

记基矢量 $\mathbf{e}_1^{(i)}$ 与 $\mathbf{e}_1^{(i-1)}$ 的夹角为 γ_i , 根据三余

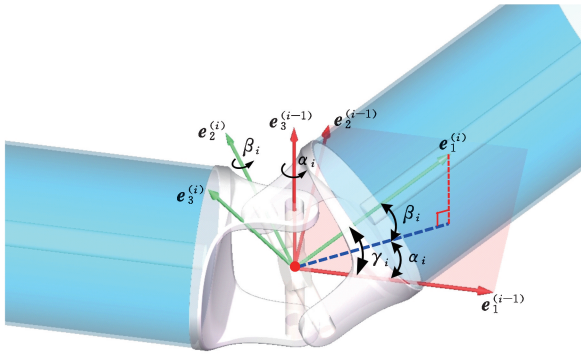


图4 万向节关节角的反解

Fig.4 Inverse solution of universal joint angles

弦定理有 $\cos \gamma_i = \cos \alpha_i \cos \beta_i$, 其中 $\cos \gamma_i = e_1^{(i-1)} \cdot e_1^{(i)}$ 。因此绕 $e_3^{(i-1)}$ 轴的转角 α_i 为

$$\alpha_i = \arccos(\cos \gamma_i / \cos \beta_i) \quad (26)$$

按照这个流程依次递推求解便可得到全部十字轴万向节的转角 α_i, β_i , 进而确定蛇形臂姿态。

4 仿真算例

为了验证本文提出算法的有效性,在 MATLAB 中编写了相应程序,并采用其显式常微分方程求解器 ode45 仿真求解。本节算例中蛇形臂共有 12 个标准臂节,单臂节长 104 mm,直径 40 mm,驱动基座最大进给距离 1248 mm。为了保证臂节长度条件,设等效连杆系统的连杆抗拉刚度 $EA = 1 \times 10^9$ N。本节算例的仿真计算均在 CPU 为 Intel Core i7-12650H、内存为 16GB 的笔记本电脑上完成。

4.1 平面轨迹跟随

在平面问题算例中,蛇形臂机器人需要穿过特定间隙并绕过直径为 160 mm 的圆形障碍。据此任务,规划出了直径为 200 mm 的圆弧形可行性路径曲线,如图 5 中黑色曲线所示。

不失一般性,这里设置驱动基座沿直线导轨的运动规律为

$$\dot{s}_j^{\text{pl}}(t) = \begin{cases} 0.5v[1 + \sin((t + 3/2)\pi)] & 0 \leq t \leq 1 \\ v & 1 < t \leq 9 \\ 0.5v[1 + \sin((t - 17/2)\pi)] & 9 < t \leq 10 \end{cases} \quad (27)$$

其中,匀速运动阶段 $v = 0.12$ m/s。采用本文算法仿真得到的蛇形臂进行平面轨迹跟随运动的结果如图 5 所示。

在用 ode45 进行计算求解时,设定仿真时间为 10 s,绝对误差限为 $\epsilon_a = 1.0 \times 10^{-6}$,相对误差限为 $\epsilon_r = 1.0 \times 10^{-3}$ 。根据文献[14]推荐,对于蛇形臂这类刚度极大问题,取模型降噪因子 $h = 0.1$,采用 MATLAB 非刚性求解器 ode45 仅需 3.19 s 就

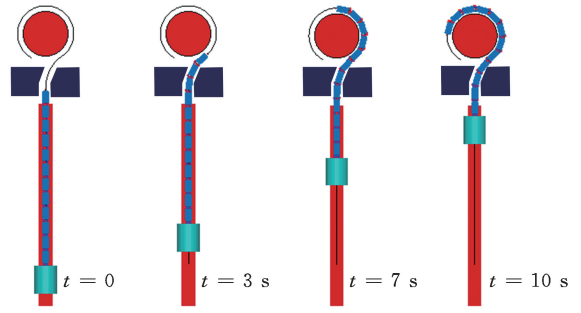


图5 平面末端轨迹跟随

Fig.5 Planar tip-trajectory following

可以完成仿真计算。相比之下,当取 $h = 0$ (即不进行模型降噪),由于该系统方程刚性问题突出,导致非刚性常微分方程求解器 ode45 无法完成仿真计算。即便采用基于隐式算法的 MATLAB 刚性方程求解器 ode15s,完成 10 s 仿真所耗费机时也达到了 823.88 s。这也进一步证明了本文提出算法具有较高的计算效率。图 6 给出了蛇形臂第 3、6、9 及 12 号万向节关节转角随时间的变化曲线。

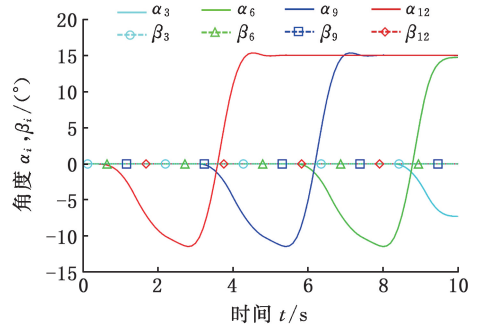


图6 平面工况的关节角

Fig.6 Joint angles in planar case

将求得的转角代入正向运动学模型可解得蛇形臂末端位置,图 7 给出了末端位置与期望路径曲线的偏差距离。分析可知,蛇形臂末端的最大偏差小于 0.005 mm,具有非常高的跟踪精度。

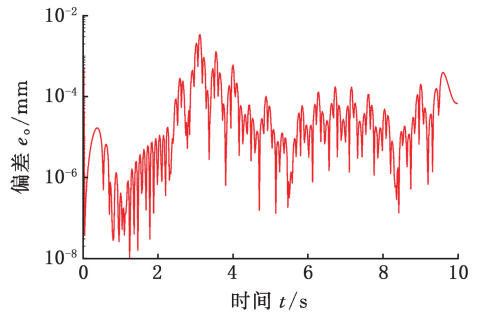


图7 平面算例的末端轨迹偏差

Fig.7 Deviation of tip-trajectory in planar case

图 8 对比了驱动基座与蛇形臂末端速度,从中可以看出,两者存在明显差异。这是由于当蛇形臂进入曲线段运动时,臂节会产生角速度,臂节上两端铰点必然产生由角速度不为零带来的速度

差。因此,要实现蛇形臂末端运动速度的进一步控制,就需要对所采用方法有更严苛要求。本文所提方法可以轻易实现对基座或末端的速度控制,这一点将在接下来算例中进一步说明。

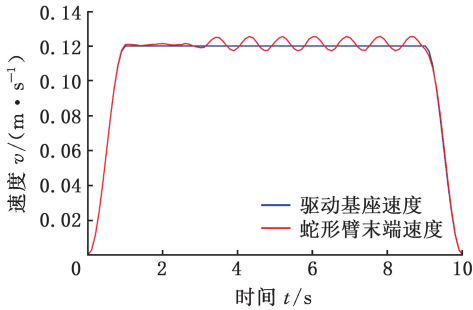


图 8 平面算例的基座与末端速度

Fig.8 Velocities of the base and tip in planar case

4.2 空间轨迹跟随

在空间问题算例中,模拟蛇形臂穿过飞机机翼油箱内部狭小空腔进行检修任务。这里油箱的整体尺寸为 $1200\text{ mm} \times 800\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,并由隔板将其分隔为四个储油仓,如图 9 所示。

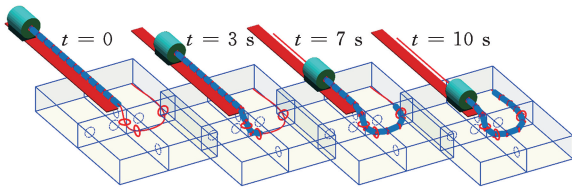


图 9 空间算例的末端轨迹跟随

Fig.9 Tip-trajectory following in spatial case

在这个算例中,指定蛇形臂末端速度满足式(27)的运动规律。仿真时间仍为 10 s ,同样采用非刚性求解器 ode45,误差限设置与上一个算例相同。同样设置磨光因子 $h=0.1$,在相同配置台式机上完成计算仅需耗时 2.85 s ,表明本文方法具有极高的计算效率。图 9 给出了采用本文算法仿真得到的蛇形臂进入机翼油箱进行三维空间轨迹跟随运动的情形。

图 10 给出了蛇形臂驱动基座与末端的速度对比。利用基座驱动规律便可以实现蛇形臂末端速度大小的精准控制。这也是本文方法相较于现

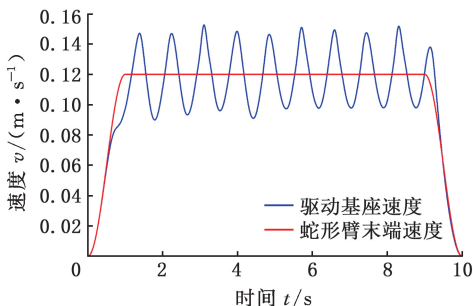


图 10 空间算例的基座与末端速度

Fig.10 Velocities of the base and tip in spatial case

有末端轨迹跟随算法所具有的独特优势。

图 11 给出了蛇形臂沿规划路径进入机翼油箱狭小空间过程中,第 3、6、9 和 12 号万向节转角随时间的变化曲线。

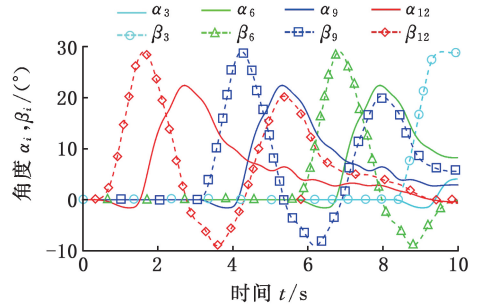


图 11 空间算例的关节角

Fig.11 Joint angles in spatial case

图 12 给出了蛇形臂末端位置与期望路径曲线的偏差距离,从中可知在进行空间轨迹跟踪过程中最大偏差小于 0.018 mm ,这再次证明了本文方法具有很高的跟踪精度。

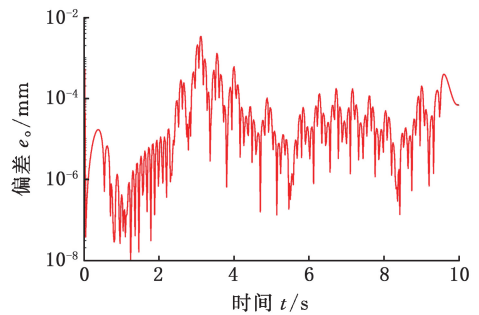


图 12 空间算例的末端轨迹偏差

Fig.12 Deviation of tip-trajectory in spatial case

5 结论

基于等效多连杆动力学降噪模型提出了一种适用于超冗余蛇形臂机器人狭小受限环境运动规划的末端跟随运动规划算法。首先,利用路径规划算法得到无碰撞轨迹离散点,并采用三次样条插值得到满足连续性和光滑性要求的蛇形臂末端轨迹曲线。其次,将蛇形臂机器人视作关节铰点沿末端轨迹曲线运动的等效多连杆,利用虚功原理推导了该刚柔耦合系统的动力学方程。为了降低刚柔耦合系统方程求解的难度,采用模型降噪方法从模型层面滤除了高频分量,使得常规显式算法可以高效求解系统动力学方程。最后,求解了蛇形臂机器人在平面和空间狭小空间上的运动规划问题典型算例,验证了所提方法的精度和效率。

参考文献:

[1] HUANG Long, LIU Bei, ZHANG Leiyu, et al.

- Equilibrium Conformation of a Novel Cable-driven Snake-arm Robot under External Loads [J]. *Micromachines*, 2022, 13(7):1149.
- [2] JAIN T, JAIN J K, ROY D. Joint Space Redundancy Resolution of Serial Link Manipulator; an Inverse Kinematics and Continuum Structure Numerical Approach [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 38:423-431.
- [3] 李亚昕, 王国磊, 张剑辉, 等. 基于碰撞反馈的冗余机器人避障规划算法 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(3):408-415.
LI Yaxin, WANG Guolei, ZHANG Jianhui, et al. Obstacle Avoidance Algorithm for Redundant Robots Based on Collision Feedback [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(3):408-415.
- [4] 万俊, 孙薇, 葛敏, 等. 基于含避障角人工势场法的机器人路径规划 [J]. *农业机械学报*, 2024, 55(1):409-418.
WAN Jun, SUN Wei, GE Min, et al. Robot Path Planning Based on Artificial Potential Field Method with Obstacle Avoidance Angles [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(1):409-418.
- [5] YAN Fei, WANG Yaoyao, JU Feng, et al. Adaptive Time Delay Control for Cable-driven Manipulators Using Fuzzy Logic Algorithm [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, 235(6):898-913.
- [6] 马宇豪, 梁雁冰. 一种基于六次多项式轨迹规划的机械臂避障算法 [J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(2):392-400.
MA Yuhao, LIANG Yanbing. An Obstacle Avoidance Algorithm for Manipulators Based on Six-order Polynomial Trajectory Planning [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(2):392-400.
- [7] ZHANG Zhijun, ZHENG Lunan, CHEN Zhuoming, et al. Mutual-collision-avoidance Scheme Synthesized by Neural Networks for Dual Redundant Robot Manipulators Executing Cooperative Tasks [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, 32(3):1052-1066.
- [8] WILLIAMS R L, TAMASI G. Follow-the-leader Control for the Payload Inspection and Processing System [C] // *Proceedings of ASME 1996 Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference*. Irvine, 1996: V02BT02A057.
- [9] DAI Xiaolin, LONG Shuai, ZHANG Zhiwen, et al. Mobile Robot Path Planning Based on Ant Colony Algorithm with A* Heuristic Method [J]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2019, 13:15.
- [10] LIU Yiyang, HOU Zheng, TAN Yuanyuan, et al. Research on Multi-AGVs Path Planning and Coordination Mechanism [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 213345-213356.
- [11] PALMER D, COBOS-GUZMAN S, AXINTE D. Real-time Method for Tip Following Navigation of Continuum Snake Arm Robots [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62(10):1478-1485.
- [12] 王俊刚, 汤磊, 谷国迎, 等. 超冗余度机械臂跟随末端轨迹运动算法及其性能分析 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(3):18-25.
WANG Jungang, TANG Lei, GU Guoying, et al. Tip-following Path Planning and Its Performance Analysis for Hyper-redundant Manipulators [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(3):18-25.
- [13] 张志刚, 周翔, 毛红生, 等. 绝对节点坐标方法的模型降噪研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(11):139-146.
ZHANG Zhigang, ZHOU Xiang, MAO Hongsheng, et al. Model Denoising Based on Absolute Node Coordinate Method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(11):139-146.
- [14] 齐朝晖, 曹艳, 王刚. 多柔体系统数值分析的模型降噪方法 [J]. *力学学报*, 2018, 50(4):863-870.
QI Zhaohui, CAO Yan, WANG Gang. Model Smoothing Methods in Numerical Analysis of Flexible Multibody Systems [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(4):863-870.

(编辑 王旻玥)

作者简介:张志刚,男,1984年生,博士、副教授。研究方向为多体系统动力学与控制。E-mail:zhigangzhang@foxmail.com。
秦国栋* (通信作者),男,1991年生,博士、助理研究员。研究方向为聚变堆遥控操作维护机器人系统设计。E-mail:gdqin@ipp.ac.cn。

本文引用格式:

张志刚,靳勇利,王栋银,等.基于动力学降噪模型的蛇形臂机器人末端轨迹跟随算法 [J]. *中国机械工程*, 2025, 36(3):407-413.
ZHANG Zhigang, JIN Yongli, WANG Dongyin, et al. Tip-trajectory Following Algorithm for Snake-arm Robots Based on Dynamics Denoising Model [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(3):407-413.