

文章编号:1008-1542(2020)05-0408-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 基于粒子群优化算法的绳驱动连续体 机器人轨迹规划

王会肖<sup>1,2</sup>, 郑天江<sup>2</sup>, 沈雯钧<sup>2,3</sup>, 甄存合<sup>1,2</sup>, 方灶军<sup>2</sup>, 张苏英<sup>1</sup>

(1.河北科技大学电气工程学院,河北石家庄 050018;2.中国科学院宁波材料技术与工程研究所浙江省机器人与智能制造装备技术重点实验室,浙江宁波 315201;3.中国科学院大学材料科学与光电技术学院,北京 100049)

**摘要:**为提高绳驱动连续体机器人运动的平滑性和稳定性,在关节空间和笛卡尔空间研究了基于样条函数和粒子群算法的轨迹规划问题。首先,采用双参数局部指数积公式建立连续体机器人的运动学模型;其次,根据牛顿-拉夫森迭代方法进行逆运动学求解;最后,基于自适应惯性权重的粒子群时间最优化算法结合五次 B 样条函数,分别实现了连续体机器人在关节空间和笛卡尔空间的轨迹规划。仿真结果表明:在相同的条件下,两种方法均可得到连续体机器人末端的连续轨迹,速度均小于 10 mm/s,加速度均小于 20 mm/s<sup>2</sup>;基于关节空间规划出的关节位移、速度、加速度曲线更为平滑,关节空间规划用时 9.219 3 s,笛卡尔空间规划用时 10.604 6 s。基于粒子群优化算法的绳驱动连续体机器人轨迹规划研究,提高了连续体机器人的运动性能,可为绳驱动连续体机器人的位姿规划提供参考。

**关键词:**机器人控制;连续体机器人;轨迹规划;笛卡尔空间;关节空间;粒子群优化算法

中图分类号:TP242 文献标识码:A doi:10.7535/hbkd.2020yx05004

## Trajectory planning of a cable-driven continuum robot based on particle swarm optimization algorithm

WANG Huixiao<sup>1,2</sup>, ZHENG Tianjiang<sup>2</sup>, SHEN Wenjun<sup>2,3</sup>, ZHEN Cunhe<sup>1,2</sup>,

FANG Zaojun<sup>2</sup>, ZHANG Suying<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Robotics and Intelligent Equipment Technology, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering of Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315201, China; 3. College of Materials Science and Opto-Electronics Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

收稿日期:2020-07-16;修回日期:2020-09-02;责任编辑:张士莹

基金项目:国家自然科学基金(51705510);NSFC-浙江两化融合联合基金(U1909215);中科院创新研究院资助项目(C2018005);宁波市科技创新 2025 重大专项(2018B10069)

第一作者简介:王会肖(1998—),女,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事绳驱动连续体机器人方面的研究。

通讯作者:郑天江高级工程师。E-mail:zhengtianjiang@nimte.ac.cn

王会肖,郑天江,沈雯钧,等.基于粒子群优化算法的绳驱动连续体机器人轨迹规划[J].河北科技大学学报,2020,41(5):408-415.

WANG Huixiao, ZHENG Tianjiang, SHEN Wenjun, et al. Trajectory planning of a cable-driven continuum robot based on particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2020, 41(5): 408-415.

**Abstract:** In order to improve the smoothness and stability of the motion of the cable-driven continuum robot, the trajectory planning methods based on spline function and particle swarm optimization algorithm were proposed for the cable-driven continuum robot in its joint space and Cartesian space respectively. Firstly, the kinematic model was established by applying the local product-of-exponential (POE) formula with two parameters. Secondly, the inverse kinematics was solved by Newton Raphson iterative method. Finally, the particle swarm time optimization algorithm based on adaptive inertia weight combing with the quintic B-spline function was used to realize the trajectory planning of the continuum robot in joint space and Cartesian space respectively. The simulation results show that continuous trajectories can be obtained both in joint space and Cartesian space under the same conditions, the obtained velocities are less than 10 mm/s, and the accelerations are less than 20 mm/s<sup>2</sup>. The joint displacement, velocity and acceleration curves are smoother in joint space, which takes 9.219 3 s, while it takes 10.604 6 s in Cartesian space. The research on trajectory planning of a cable-driven continuum robot based on particle swarm optimization algorithm improves the kinematic performance of the continuum robot and provides references for pose planning of the cable-driven continuum robots.

**Keywords:** robot control; continuum robot; trajectory planning; Cartesian space; joint space; particle swarm optimization (PSO) algorithm

刚性机械臂虽然广泛用于较多场景,但随着机器人技术的进步,其工作环境变得越来越复杂,对安全性和柔顺性的要求也越来越高,很难再采用传统的刚性机械臂进行作业。与传统刚性机械臂相比,连续体机器人具有结构轻量化、柔顺性高、环境适应性好等优点,可被广泛应用在狭窄空间的探索检测、医疗服务机器人以及抢险救援等领域<sup>[1-3]</sup>。

连续体机器人是一类仿照生物、可实现连续变形特征的机器人。目前,连续体机器人的主要驱动方式有形状记忆合金<sup>[4]</sup>、导电聚合物<sup>[5]</sup>、气压驱动<sup>[6]</sup>、绳索驱动<sup>[7-9]</sup>等。现有研究中,针对连续体的研究较多。例如:HANNAN等<sup>[10]</sup>研究了由2组对抗绳驱动类象鼻连续体操作臂;耿仕能等<sup>[11]</sup>开发了以超镍钛合金为柔性支撑骨架的绳驱动可变刚度连续操作臂;隋立明等<sup>[12]</sup>设计了一种基于气动软体驱动器的爬行机器人,用来模仿环节动物的纵向肌与环肌功能等。连续体机器人通常采用柔性骨架材料,由于大部分材料具有各向同性,导致其在无需变形的方向上也会产生一定的变形,降低了控制精度,因此,现有连续体机器人的研究主要集中在新型连续体机器人机构的设计方面,很少涉及轨迹规划方面的研究。

刚性机器人和移动机器人轨迹规划的方法较多。文献[13]和文献[14]分别基于三次和五次B样条曲线,实现了两种机器人的工作要求;文献[15]和文献[16]分别利用遗传算法和粒子群算法优化给定任务;王俊刚等<sup>[17]</sup>提出一种迭代步长顺序查找法匹配机械臂的关键点与空间离散路径曲线,由于缺乏准确的形状传感器,使得该方法在实际操作时较为困难;TANG等<sup>[18]</sup>提出了预测查找和插值算法来匹配路径,但需要建立较为庞大的数据库,规划出来的路径连续性不佳。由于连续体机器人往往像刚性机器人那样,具有大的速度、加速度以及频繁切换方向等特征,因此,在进行轨迹规划时,其性能容易受最大速度、加速度以及时间等参数的约束,如何将这些参数综合考虑是轨迹规划的关键。

本文以一种能够实现拉/压、扭转刚度大而弯曲刚度小的柔性骨架作为绳驱动机器人的支撑骨架,设计了能够实现连续变形的8自由度绳驱动连续体机器人,在兼顾关节速度和关节加速度的约束下,提出了一种基于五次B样条的自适应惯性权重粒子群优化算法,实现了在约束条件下的连续体机器人最优化轨迹规划,分别得到了绳驱动连续体机器人在关节空间和笛卡尔空间的连续轨迹,提高了连续体机器人的运动性能。

## 1 8 自由度连续体机器人

本文研究的绳驱动连续体机器人由4个连续体机器人关节模块串联组成,每个关节模块均由基座、动平台、柔性骨架和4根绳索组成。柔性骨架连接在动平台和基座的中间,采用具备拉/压、扭转刚度大而弯曲刚度小的液压软管;动平台由绳索驱动,可实现2个自由度的弯曲运动;4根驱动绳索在动平台和基座上的连接点相隔90°。由4个关节模块组成连续体机器人,可实现8自由度弯曲运动。绳驱动连续体机器人样机如图1所示。

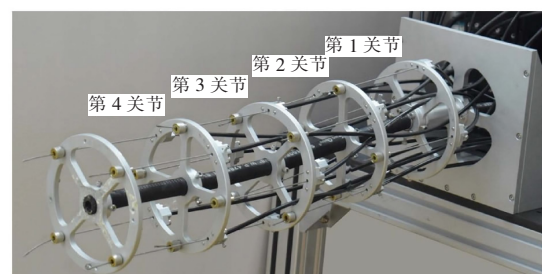


图1 绳驱动连续体机器人样机  
Fig.1 Prototype of cable-driven continuum robot

## 2 运动学建模

### 2.1 正运动学模型

图2所示为本文设计的绳驱动连续体机器人的关节模块。当动平台随着绳索驱动变化时,动平台相对于基座的运动具有2个弯曲自由度,可以用2个参数来描述。图中旋转角用 $\alpha$ 表示,弯曲角用 $\theta$ 表示,骨架的长度用 $L$ 表示,绳子的长度用 $l$ 表示,绳子与基座的连接点用 $B$ 表示,与动平台的连接点用 $p$ 表示,关节模块基座的中心点用 $O$ 表示,关节模块动平台的中心点用 $C$ 表示。

利用几何关系,推导出绳长与关节角的关系为

$$l_{ij} = 2 \frac{L}{\theta_i} \sin\left(\frac{\theta_i}{2}\right) - 2r \cos \beta_j \sin\left(\frac{\theta_i}{2}\right),$$

$$\beta_j = \alpha_j + (j-1) \frac{2}{3}\pi, \quad i, j = 1, 2, 3, 4.$$

式中: $i$ 表示第 $i$ 个关节; $j$ 表示第 $j$ 根绳索; $r$ 表示动平台和基座的半径。

对于一组给定的绳索长度,关节变量可以表示为

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{l_{i4} - l_{i2}}{l_{i3} - l_{i1}}\right),$$

$$\theta_i = 2 \arcsin\left(\frac{\sqrt{(l_{i4} - l_{i2})^2 + (l_{i3} - l_{i1})^2}}{4r}\right).$$

图2中,建立第 $i$ 个关节模块的动平台和基座的坐标系,采用局部指数积公式对上述建模,可表示为<sup>[19]</sup>

$$T_{(i-1),i}(\alpha_i, \theta_i) = e^{\hat{\xi}_i \theta_i} T_{(i-1),i}(0).$$

式中: $T_{(i-1),i}(\alpha_i, \theta_i)$ 为第 $i$ 个关节的动平台相对于基座的位姿; $T_{(i-1),i}(0)$ 是第 $i$ 个关节的坐标系 $\{i\}$ 相对于第 $(i-1)$ 个关节的坐标系 $\{i-1\}$ 的初始位姿:

$$T_{(i-1),i}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

由于连续体机器人的旋转角和弯曲角均是变量,因此与传统的指数积不同。在这里, $\hat{\xi}$ 是弯曲角度 $\alpha_i$ 的函数, $e^{\hat{\xi}_i \theta_i} \in SE(3)$ 是绕转轴 $\hat{\xi}$ 的刚体运动。根据李群李代数,有:

$$e^{\hat{\xi}_i \theta_i} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega}_i \theta_i} & ((I - e^{\hat{\omega}_i \theta_i}) \hat{\omega}_i + \omega_i \omega_i^T \theta_i) v_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式中: $\omega_i = [-\sin \alpha_i \quad \cos \alpha_i \quad 0]^T$ ;  $v_i = \left(-\frac{L}{2}\right) \cdot \left[\cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i \quad \text{ctg}\left(\frac{\theta_i}{2}\right) - \frac{2}{\theta_i}\right]^T$ 。

本文所提及的绳驱动机器人,采用4个关节模块串联形式,其正向运动学可表示为

$$T_{0,4}(\Phi) = T_{0,1}(\Phi_1) T_{1,2}(\Phi_2) T_{2,3}(\Phi_3) T_{3,4}(\Phi_4) = e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} T_{0,1}(0) e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} T_{1,2}(0) e^{\hat{\xi}_3 \theta_3} T_{2,3}(0) e^{\hat{\xi}_4 \theta_4} T_{3,4}(0),$$

式中: $\Phi_i = [\alpha_i, \theta_i]^T$ 。

### 2.2 逆运动学模型

当多个串联的绳驱动机器人关节模块叠加时,其逆运动学很难推导出解析解,而在基于笛卡尔空间轨迹的规划时,需要利用末端姿态,计算出相应的关节角度。因此,考察关节空间轨迹的连续性,借鉴串联机器人的处理方法,本文采用了牛顿-拉夫森迭代方法<sup>[20]</sup>求解逆运动学。本文提及的绳驱动机器人关节模块的雅可比矩阵可写为<sup>[21]</sup>

$$J_j = \begin{bmatrix} J_{j1} & J_{j2} \\ J_{j3} & J_{j4} \end{bmatrix},$$

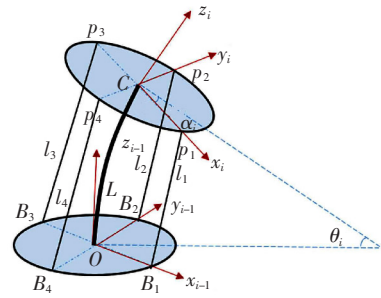


图2 关节模块运动学模型

Fig.2 Kinematics model of joint module

$$\begin{aligned} J_{j1} &= \frac{\omega L}{\theta}(\cos \theta - 1), \\ J_{j2} &= \frac{L}{\theta^2}(\omega'(1 - \cos \theta) + \hat{\omega}\omega'(\theta - \sin \theta)), \\ J_{j3} &= \omega' \sin \theta + \hat{\omega}\omega'(1 - \cos \theta), \\ J_{j4} &= \omega. \end{aligned}$$

式中:  $\omega'$  是  $\omega$  的导数;  $\omega'_i = [-\cos \alpha_i \quad -\sin \alpha_i \quad 0]^T$ ;  $\hat{\omega}$  为  $3 \times 3$  的反对称矩阵,  $\hat{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix}$ 。

根据关节模块,可求得机械臂的雅可比矩阵及空间速度关系<sup>[19]</sup>:

$$\mathbf{V}^S = [\mathbf{J}_1 \quad \mathbf{Ad}_{T_{0,1}} \mathbf{J}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{Ad}_{T_{0,(n-1)}} \mathbf{J}_n] \dot{\Phi} = \mathbf{J}^S \dot{\Phi}. \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{Ad}_{T_{0,(i-1)}}$  是伴随矩阵。

由式(1)导出末端位姿的微分变化  $dX$  与关节角微分变化  $d\Phi$  的关系为

$$dX = \mathbf{J}^S(\Phi) d\Phi.$$

绳驱动连续体机器人的逆运动学求解步骤如下:

- 第 1 步: 给定机器人末端的期望位姿  $T_d$ ;
- 第 2 步: 给定初始解  $\Phi_0$ ;
- 第 3 步: 计算每次迭代增加的角度  $d\Phi$ ;
- 第 4 步: 更新角度  $\Phi$ ;
- 第 5 步: 计算误差  $dx$ ;
- 第 6 步: 判断误差是否在允许范围内,若在,结束迭代,否则返回第 3 步。

### 3 绳驱动连续体机器人的轨迹规划

机器人的轨迹规划,通常可以在笛卡尔空间规划,也可以在关节空间规划。在笛卡尔空间进行轨迹规划的优点是可直接得到机器人末端笛卡尔空间的位置、速度和加速度,但是由于以笛卡尔空间的连续性为目标,因此将轨迹规划的结果换算到关节空间时,容易遇到关节空间速度、加速度等参数超过机器人实际系统的能力问题,如电机无法达到规划出的最大加速度等情况,从而使得在实际机器人运动过程中出现抖动情况。直接在关节空间中进行轨迹规划可以很好地保证机器人关节运动的连续性,但是机器人末端速度、加速度等参数是各个关节模块的叠加,因此无法预知机器人末端运动轨迹的连续性。为了保证绳驱动连续体机器人在实际运行时的平稳性,本文分别在关节空间和笛卡尔空间对绳驱动连续体机器人进行了轨迹规划,并对得到的关节位移、速度、加速度进行对比分析,比较了两种轨迹规划方法在绳驱动连续体机器人应用时的优劣。

与传统的刚性机器人臂不同,绳驱动连续体机器人通常很难高速及高加速度运动,也不太适合于频繁高速的往复运动,因此需要在轨迹规划时就考虑这一特性,以避免机器人运动时的抖动。为此,本文提出了以整体运行时间  $t$  作为目标函数,以关节速度、关节加速度作为约束条件,采用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法<sup>[22]</sup>优化时间,并运用五次 B 样条拟合给定轨迹点,分别在关节空间和笛卡尔空间进行轨迹规划。

本文建立的目标函数数学模型如下:

$$f_1 = \min \sum_{i=0}^{n-1} h_i = \min \sum_{i=0}^{n-1} (t_{i+1} - t_i) = t.$$

式中:  $h_i = t_{i+1} - t_i$  为优化变量,代表各段的插值时间间隔。

约束条件为

$$\begin{aligned} v_j(t) &| \leq V_{\max}, \quad j = 1, 2, 3, 4, \\ a_j(t) &| \leq A_{\max}, \quad j = 1, 2, 3, 4. \end{aligned}$$

式中:  $V_{\max}$  为关节允许的最大速度;  $A_{\max}$  为关节允许的最大加速度。

根据 B 样条曲线的凸包特性, 在每一个节点处的边界约束条件可以用各个控制顶点的边界约束条件来替换<sup>[22]</sup>。由五次 B 样条曲线定义式(2), 求得其边界条件如式(3)所示:

$$P(u) = \sum_{i=0}^n d_i N_{i,5}(u), \quad u \in [0,1], \quad i = 0,1,2,\dots,n. \quad (2)$$

$$\begin{cases} v_1 = p'(u_5) = \sum_{j=1}^5 d_j^1 N_{j,4}(u_5), \\ v_2 = p'(u_{n+5}) = \sum_{j=n}^{n+4} d_j^1 N_{j,4}(u_{n+5}), \\ a_1 = p''(u_5) = \sum_{j=2}^5 d_j^2 N_{j,3}(u_5), \\ a_2 = p''(u_{n+5}) = \sum_{j=n+1}^{n+3} d_j^2 N_{j,3}(u_{n+5}). \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $u$  表示节点矢量;  $d_i$  表示控制点;  $N(u)$  表示 B 样条的基函数。

另外, 在运用粒子群算法优化时间时, 考虑到传统的粒子群算法易使粒子陷入局部最优的情况, 为防止粒子陷入局部最优, 本文采用自适应惯性权重的粒子群算法, 自适应惯性权重可表示为

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{i - N}{\omega_{\max} - \omega_{\min}}$$

式中:  $\omega_{\max} = 0.8$ ;  $\omega_{\min} = 0.4$ ;  $N$  为粒子群规模;  $i$  为当前迭代次数。

在关节空间规划时, 将绳驱动连续体机器人末端的位姿矩阵通过运动学逆解运算, 得到各个关节的关节角  $(\alpha_i, \theta_i)$ , 以此为变量, 作为五次 B 样条的轨迹点, 通过增加边界条件反算出控制点, 并基于自适应惯性权重的粒子群算法, 找到最优的时间组合, 在关节速度和关节加速度的约束下, 对运动时间进行优化。在笛卡尔空间规划时, 直接以机器人末端位置为变量, 再利用粒子群算法和 B 样条规划轨迹。由此基于五次 B 样条和粒子群优化算法的连续体机器人在关节空间以及笛卡尔空间规划轨迹的流程图如图 3 所示。

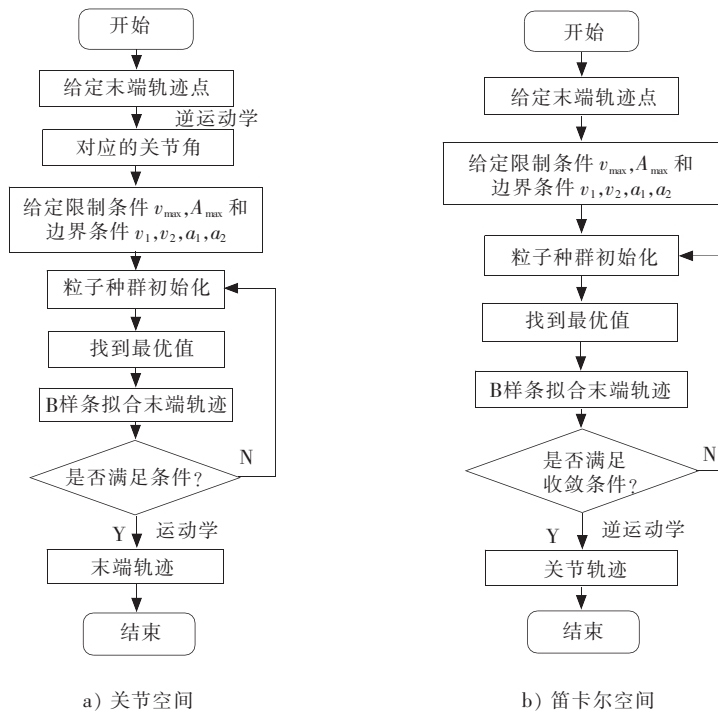


图 3 基于五次 B 样条和粒子群优化算法的笛卡尔空间以及关节空间的轨迹规划流程

Fig.3 Trajectory planning process of Cartesian space and joint space based on quintic B-spline and particle swarm optimization

### 4 仿真与分析

为了验证所提算法的有效性,以 MATLAB 为平台进行了绳驱动连续体机器人分别在笛卡尔空间和关节空间的轨迹规划及优化仿真。通过对笛卡尔空间轨迹规划和关节空间轨迹规划的优缺点进行分析,以及实际工作中对轨迹末端的要求,优先考虑在笛卡尔空间进行轨迹规划。在笛卡尔空间规划时,保持姿态  $R$  不变,只对位置进行拟合。末端通过的轨迹点位置如表 1 所示。以 4 个关节的旋转角  $\alpha$  为例,运行结果如图 4 所示。初始时间间隔  $h_i = 3$  s,边界条件  $v_1 = 0, v_2 = 0, a_1 = 0, a_2 = 0$ ;约束条件  $V_{\max} = 10$  mm/s,  $A_{\max} = 20$  mm/s<sup>2</sup>;骨架长度  $L = 120$  mm,姿态  $R$  为

$$R = \begin{bmatrix} 0.540 3 & 0.000 7 & -0.841 5 \\ 0.000 7 & 1.000 0 & 0.001 3 \\ 0.841 5 & -0.001 3 & 0.540 3 \end{bmatrix}。$$

表 1 末端通过的轨迹点位置

Tab.1 Track points passed by the end

项目	轨迹点 1/mm	轨迹点 2/mm	轨迹点 3/mm	轨迹点 4/mm	轨迹点 5/mm
$x$	-199.68	-191.27	-191.29	-174.46	-160.99
$y$	0.367 8	-9.630 9	-39.630 9	-39.628 2	-39.626 1
$z$	414.48	419.08	419.11	428.30	435.66

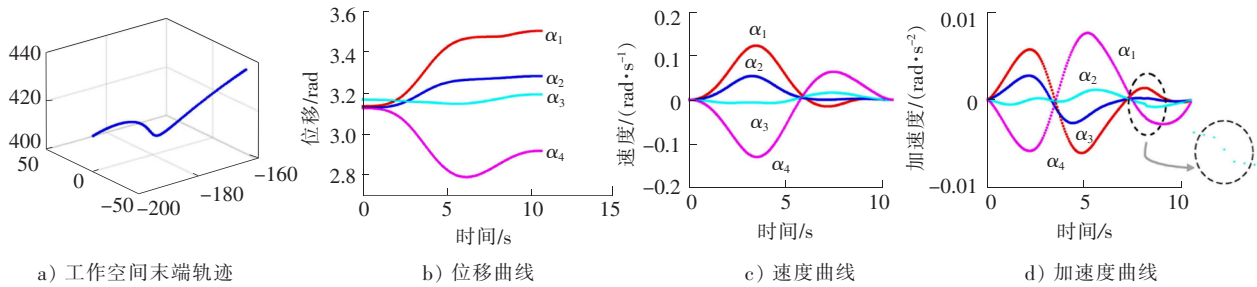


图 4 笛卡尔空间规划轨迹

Fig.4 Trajectory of Cartesian spatial planning

从图 4 d)可以看出,  $\alpha$  的加速度曲线有一部分存在波动大的情况,可能会导致关节的抖动。由于绳驱动连续体机器人是冗余的机械臂,在进行运动学逆解运算时会存在多解情况,所以在笛卡尔空间求得末端位姿后,求解关节角时会因为关节限制而出现关节加速度不连续的情况。为避免在笛卡尔空间规划产生的这些问题,采用同样的末端轨迹点,在关节空间对连续体机器人进行轨迹规划。经运动学逆解求得各关节对应的关节角如表 2 所示。同样以 4 个关节的旋转角  $\alpha$  为例,仿真结果如图 5 所示。

表 2 各关节对应的关节角

Tab.2 Joint angles corresponding to each joint

项目	轨迹点 1/mm	轨迹点 2/mm	轨迹点 3/mm	轨迹点 4/mm	轨迹点 5/mm
$\alpha_1$	3.134 6	3.223 6	3.449 3	3.474 1	3.481 7
$\alpha_2$	3.127 0	3.167 5	3.272 8	3.289 8	3.388 3
$\alpha_3$	3.166 1	3.153 3	3.112 5	3.152 7	3.125 7
$\alpha_4$	3.124 5	3.035 4	2.817 2	2.870 0	2.923 1
$\theta_1$	0.200 1	0.191 4	0.241 7	0.236 8	0.231 8
$\theta_2$	0.199 9	0.177 3	0.146 3	0.091 7	0.087 3
$\theta_3$	0.300 0	0.292 9	0.254 2	0.219 1	0.116 1
$\theta_4$	0.300 1	0.341 3	0.393 8	0.486 8	0.597 3

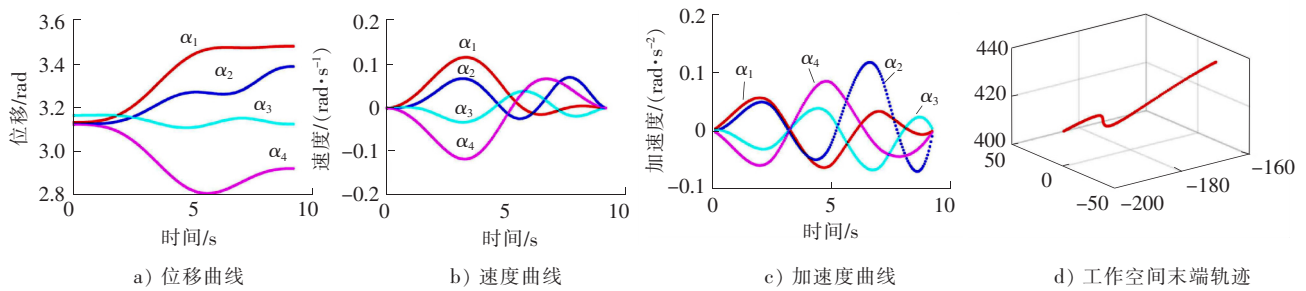


图5 关节空间规划轨迹

Fig.5 Trajectory of joint space planning

为了更好地对比两种空间规划的结果,采用相同的限制条件。初始时间间隔  $h_i = 3$  s,边界条件  $v_1 = 0, v_2 = 0, a_1 = 0, a_2 = 0$ ;约束条件  $V_{\max} = 10$  mm/s,  $A_{\max} = 20$  mm/s<sup>2</sup>;骨架长度  $L = 120$  mm。

由图5可以看出,关节空间规划得到的末端轨迹与笛卡尔空间规划得到的末端轨迹几乎一致,而关节空间得到的4个关节旋转角 $\alpha$ 的位移、速度、加速度曲线均平滑且连续,解决了在笛卡尔空间规划时出现的加速度不连续的问题,总运行时间由原来的12 s缩短为9.219 3 s,关节速度小于10 mm/s,关节加速度小于20 mm/s<sup>2</sup>,都在限制范围内,说明此方法适合应用于绳驱动连续体机器人。

## 5 结 语

1)本文提出了一种基于五次B样条函数和自适应惯性权重粒子群算法相结合的绳驱动连续体机器人轨迹规划研究方法。利用粒子群优化算法,在关节速度、关节加速度约束条件下实现了对连续体机器人时间最优规划轨迹;利用五次B样条算法,保证了轨迹规划的连续性。

2)仿真结果表明,两种空间下的规划方法均可应用于绳驱动连续体机器人的轨迹规划,速度均小于10 mm/s,加速度均小于20 mm/s<sup>2</sup>,都在给定的限制范围内。

3)在关节空间规划时,经过粒子群优化后关节轨迹运行时间从12 s降低至9.219 3 s;在笛卡尔空间规划时,规划时间从12 s减少至10.604 6 s。

4)在笛卡尔空间进行轨迹规划时,出现了加速度突变情况,可能会导致机器人臂末端的抖动;而在关节空间直接进行规划轨迹时,可以有效解决这一现象,得到更加平滑连续的关节位移、速度、加速度曲线。

5)本文仅考虑了绳驱动机器人位置的轨迹规划,未来尚需解决对位置和姿态同时进行规划的难题,以适应更为复杂的作业要求。

## 参考文献/References:

- [1] ANSCOMBE R, BRYANT A, BUCKINGHAM R, et al. Snake-arm robots: A new approach to aircraft assembly[J]. SAE Technical Paper, 2008. doi:10.4271/2007-01-3870.
- [2] BOGUE R. Robots in the nuclear industry: A review of technologies and applications[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2011, 38(2): 113-118.
- [3] WOLF A, CHOSET H H, BROWN B H, et al. Design and control of a mobile hyper-redundant urban search and rescue robot[J]. Advanced Robotics, 2005, 19(3): 221-248.
- [4] 邹娇. 基于形状记忆合金的软体爬行机器人结构设计及性能研究[D]. 镇江:江苏大学, 2019.  
ZOU Jiao. Design and Performance of SMA-Based Soft Crawling Robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [5] SHEN Q, TRABIA S, STALBAUM T, et al. A multiple-shape memory polymer-metal composite actuator capable of programmable control, creating complex 3D motion of bending, twisting, and oscillation[J]. Scientific Reports, 2016. doi: 10.1038/srep24462.
- [6] 龚道雄, 何睿, 于建均, 等. 一种气动肌肉拮抗驱动机器人关节的类人运动控制方法[J]. 机器人, 2019, 41(6): 803-812.  
GONG Daoxiong, HE Rui, YU Jianjun, et al. A human-like motion control method for robotic joint actuated by antagonistic pneumatic muscles[J]. Robot, 2019, 41(6): 803-812.
- [7] 孙定阳, 沈浩, 郭朝, 等. 绳驱动柔性上肢外骨骼机器人设计与控制[J]. 机器人, 2019, 41(6): 834-841.  
SUN Dingyang, SHEN Hao, GUO Zhao, et al. Design and control of the cable driven compliant upper limb exoskeleton robot[J]. Robot, 2019, 41(6): 834-841.

- [8] 王从浩. 绳索驱动的仿人机器人下肢设计与研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.  
WANG Conghao. Design and Research of the Lower Limbs of Humanoid Robot with Rope Drive[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [9] 方旭. 基于绳驱动的机械臂创新设计与研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.  
FANG Xu. Innovation Design of the Cable-driven Manipulator[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [10] HANNAN M W, WALKER I D. Analysis and experiments with an elephant's trunk robot[J]. *Advanced Robotics*, 2001, 15(8): 847-858.
- [11] 耿仕能, 王友渔, 陈丽莎, 等. 变刚度连续型机械臂设计与控制[J]. *宇航学报*, 2018, 39(12): 1391-1400.  
GENG Shineng, WANG Youyu, CHEN Lisha, et al. Design and control of a continuum arm with variable stiffness[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, 39(12): 1391-1400.
- [12] 隋立明, 刘亭羽, 席作岩. 气动软体爬行机器人驱动方式的分析与实验[J]. *液压与气动*, 2018(11): 99-103.  
SUI Liming, LIU Tingyu, XI Zuoyan. Analysis and experiment of actuating method for pneumatic soft crawling robot[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2018(11): 99-103.
- [13] 郑天江, 李俊杰, 陈庆盈, 等. 基于三次 B 样条的移动机器人实时轨迹规划研究[J]. *制造业自动化*, 2017, 39(5): 4-7.  
ZHENG Tianjiang, LI Junjie, CHEN Qingying, et al. A study of robot motion controller based on pure network[J]. *Manufacturing Automation*, 2017, 39(5): 4-7.
- [14] 马国庆, 刘丽, 梁巍, 等. 工业机器人抓取作业轨迹规划研究[J]. *制造业自动化*, 2020, 42(4): 79-82.  
MA Guoqing, LIU Li, LIANG Wei, et al. Research on trajectory planning of industrial robots[J]. *Manufacturing Automation*, 2020, 42(4): 79-82.
- [15] 郑先鹏, 王雷. 面向作业车间调度问题的遗传算法改进[J]. *河北科技大学学报*, 2019, 40(6): 496-502.  
ZHENG Xianpeng, WANG Lei. Improved genetic algorithm for job shop scheduling[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2019, 40(6): 496-502.
- [16] 甄然, 司超, 吴学礼, 等. 基于改进粒子群算法的飞行器冲突解脱方法研究[J]. *河北科技大学学报*, 2016, 37(5): 491-496.  
ZHEN Ran, SI Chao, WU Xueli, et al. Study of the aircraft conflict resolution method based on modified particle swarm optimization [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2016, 37(5): 491-496.
- [17] 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.
- [18] TANG L, ZHU L M, ZHU X Y, et al. Confined spaces path following for cable-driven snake robots with prediction lookup and interpolation algorithms[J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, 63(2): 255-264.
- [19] 于靖军. 机器人机构学的数学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [20] 王宪, 杨国梁, 张方生, 等. 基于牛顿-拉夫逊迭代法的 6 自由度机器人逆解算法[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(10): 116-118.  
WANG Xian, YANG Guoliang, ZHANG Fangsheng, et al. An inverse kinematics algorithm of the general 6-DOF robot based on Newton-Raphson iteration[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(10): 116-118.
- [21] ZHANG Z, YANG G, YEO S H, et al. Design optimization of a cable-driven two-DOF joint module with a flexible backbone[J]. *IEEE/ASME International Conference Advanced Intelligent Mechatronics*, 2010(6): 385-390.
- [22] 江鸿怀, 金晓怡, 邢亚飞, 等. 基于粒子群优化算法的五自由度机械臂轨迹规划[J]. *机械设计与研究*, 2020, 36(1): 107-110.  
JIANG Honghuai, JIN Xiaoyi, XING Yafei, et al. Five-degree-of-freedom manipulator trajectory planning based on PSO particle algorithm[J]. *Machine Design & Research*, 2020, 36(1): 107-110.