

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514504

# 基于 IMU 与分段多项式曲率模型的连续体机器人 形状感知研究\*

齐 飞, 刘先军, 葛奕玮, 孙 露, 郑宏儒

(常州大学机械与轨道交通学院 常州 213000)

**摘 要:**连续体机器人由于其运动建模误差大、形状复杂多变且易受外界动态干扰等影响,控制精度低,安全性差,难以满足复杂狭小环境中的精准操作和环境安全交互需求。为此,提出了一种基于惯性传感器(IMU)与分段多项式曲率模型(PPC)的连续体机器人形状自感知方法,实现对其三维弯曲形状的检测和重构。首先,设计了一种由多个 IMU 布局的连续体机器人形状检测系统,并基于分段多项式曲率模型进行运动学建模分析,实现对连续体非均匀弯曲变形的精确描述。为实现对机器人弯曲形态和末端位置的检测,提出了一种基于 PPC 模型和 IMU 数据融合的连续体机器人形状自感知方法,通过有限个姿态观测点来求解连续体每段弯曲曲率的模态系数,从而重建其完整三维形态。最后搭建了连续体机器人形状检测实验平台并通过理论仿真和多组实验进行验证,结果表明:所提出的形状检测方法在不同弯曲角度和负载条件下表现良好,整体形状重构平均误差约为 2.5 mm,负载工况下的平均偏差不超过 3 mm。此外,动态弯曲实验进一步验证了该方法在连续运动过程中具有良好的实时性与形状跟踪能力,末端位置平均误差约为 2.57 mm。由此验证了所建运动模型和所提形状检测方法的有效性和正确性,为连续体机器人在受限环境中的精确操作与闭环控制提供可靠的形状感知基础。

**关键词:**连续体机器人;形状感知;分段多项式曲率模型;IMU

**中图分类号:** TP242 TH712 TH165 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

## Research on shape perception for continuum robots based on IMU and piecewise polynomial curvature

Qi Fei, Liu Xianjun, Ge Yiwei, Sun Lu, Zheng Hongru

(School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213000, China)

**Abstract:** Continuum robots suffer from low control accuracy and poor safety performance due to large modeling errors, complex and variable shapes, and susceptibility to external dynamic disturbances, which makes it challenging to achieve precise operations and safe interactions in confined or complex environments. To address these issues, a self-sensing approach for continuum robot shape estimation based on IMU measurements and a piecewise polynomial curvature model is proposed, enabling the detection and reconstruction of their three-dimensional curved shapes. First, a shape detection system is designed by deploying multiple IMUs along the continuum robot, and the PPC model is employed for kinematic modeling and analysis to accurately characterize non-uniform bending deformations. To estimate the robot's bending profile and end-effector position, a self-sensing approach for shape estimation that fuses IMU measurements with a PPC model is introduced. In this framework, the modal coefficients of each curvature segment are determined from a limited number of attitude observations, thereby reconstructing the overall shape of the robot. Finally, an experimental platform for shape detection is established, and the proposed method is validated through theoretical simulations and multiple experiment trials. The results demonstrate that the proposed approach achieves reliable performance under various bending angles and loading conditions, with an average reconstruction error of approximately 2.5 mm and a deviation below 3 mm under loaded scenarios. In addition, dynamic bending experiments further validated the proposed method's real-time capability and shape tracking performance during continuous motion, with an average end-effector position error of approximately 2.57 mm. This validates the effectiveness and accuracy of the constructed motion

收稿日期:2025-09-15 Received Date: 2025-09-15

\* 基金项目:国家自然科学基金项目(52305092)资助

model and proposed shape detection method, providing a reliable shape sensing foundation for precise operation and closed-loop control of continuum robots in constrained environments.

**Keywords:** continuum robotics; shape sensing; piecewise polynomial curvature model; IMU

## 0 引 言

相比于传统刚性机器人在狭窄空间、高交互性等复杂场景中的应用逐渐受限,受象鼻、章鱼触手等生物启发的柔性连续体机器人<sup>[1-3]</sup>凭借其超强的弯曲变形能力及无限自由度的结构特点,在复杂受限环境中展现出独特的柔顺性和环境适应性,得到了广泛关注和持续研究但同时连续体柔性结构固有的非线性和高冗余性特点,也将导致连续体机器人的弯曲形态及末端位置的难以感知和估计,严重影响机器人的运动控制性能及环境交互性。为此,亟需研究一种结构紧凑、成本低廉且检测精准的连续体机器人形状自感知方法,以提高机器人在狭小未知环境中的安全性与可靠性。

目前,连续体机器人的形状感知方法主要依赖于视觉、光纤光栅、电磁及惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)等技术。其中,视觉感知技术作为最早发展的手段,通过外部图像处理实现对机器人形状的重构。如 Hannan 等<sup>[4]</sup>最早提出通过计算机视觉从连续体机器人的外部图像中提取各段关节的曲率,从而重构整体形状。其他研究人员相继开发出多种基于双目<sup>[5-7]</sup>、三目视觉<sup>[8]</sup>及超声波成像<sup>[9]</sup>等增强型视觉方案,以提升机器人形状感知的空间分辨率与测量精度。但该方法易受到环境光照、视野遮挡及复杂背景等动态干扰,计算量大,实时性差。

为克服视觉技术的局限性,光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感技术因其高精度特性受到广泛关注。孙广开等<sup>[10]</sup>提出了一种基于多芯光纤的三维形状感知方法,通过解调光栅波长偏移并结合几何重构算法,实现了连续体机器人的形状重建,但存在参数标定误差与环境干扰等不足,测量精度有待提升。Amirkhani 等<sup>[11]</sup>提出了一种速度依赖型 FBG 形状感知模型,该模型利用速度-曲率校准函数对传感器滑动引起的动态误差进行修正,从而提高连续体机器人形状重构精度,但未充分考虑非线性校准与多传感器协同问题。电磁传感技术与连续体机器人系统集成方面展现出独特的优势。Bian 等<sup>[12]</sup>提出了一种融合电磁传感器与 Bézier 曲线的支气管镜机器人形状检测方法,实现了对其弯曲形状与末端接触力的同步感知,但未充分建模驱动摩擦与迟滞效应,复杂接触下精度受限。Baaij 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于多磁传感器与运动学融合连续体机器人三维形状自感知方法,通过神经网络构建磁场强度与机器人构型间的

非线性映射关系,实现机器人三维形状的重建,但该方法对磁传感器布局与外部磁场干扰较为敏感,且在动态环境下稳定性仍有待提升。Yousefi 等<sup>[14]</sup>提出了一种基于 Cosserat-Rod 理论和磁定位系统的连续体机器人三维形状与力估计方法,通过将磁定位获取的离散点位置作为输入,利用 Cosserat 模型反推机器人的整体形状与接触力分布,实现了在无接触力信息情况下弯曲形状与接触力的同步估计,但存在对标记点数量和分布敏感、磁定位精度低于视觉方法等不足。

而惯性测量单元凭借其抗视觉与电磁遮挡能力强、体积小且易于集成等独特优势,已成为连续体机器人形状检测领域的研究热点。Peng 等<sup>[15]</sup>提出了一种基于多 IMU 融合的腱驱动连续体机器人形状估计方法,通过 IMU 实时感知姿态并融合常曲率模型,实现在负载变化和外部干扰下的精确形状估计,但该方法过于依赖常曲率模型假设,且在大变形或非平面弯曲情况下测量精度有限。Guo 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于勾股速端-贝塞尔曲线(pythagorean hodograph-Bézier)与 IMU-视觉融合连续体机器人形状重构方法,通过结合末端位姿传感与几何曲线进行拟合,在无需全局图像的情况下实现了对部分遮挡场景下的形状高精度估计,但该方法在弯曲角度超过 90°时精度显著下降,且依赖传感器确定末端位姿。Cheng 等<sup>[17]</sup>提出了一种基于多项式曲率的连续体机器人形状感知方法,通过安装在机器人特定位置上的方向传感器获取姿态信息,实现对连续体机器人的形状估计,但在高阶近似及外部力作用明显时精度仍有待提升。

为此,提出了一种基于 IMU 及分段多项式曲率模型(piecewise polynomial curvature, PPC)的连续体机器人形状自感知方法,实现对其弯曲形状的检测和反馈,以提高机器人的控制精度和可靠性。首先建立了基于分段多项式曲率模型的连续体机器人运动学模型,实现对非均匀弯曲等复杂形态的精准描述。而后针对现有方法在成本、集成度及精度间的平衡难题,提出一种基于 PPC 模型与多个 IMU 数据融合的连续体机器人形状感知方法,实现对其弯曲形状的重构和检测。最后通过搭建连续体机器人形状检测实验平台对所建运动模型及形状重构方法进行验证。所提方法不仅突破了传统常曲率假设的限制,还具有良好的通用性和可扩展性等优势,为连续体机器人的精确控制提供了成本低廉、高效可靠的感知基础。

# 1 连续体机器人形状感知系统及其运动学建模

## 1.1 连续体机器人结构设计及传感布局

如图1所示,所设计的柔性检测机器人主要由连续体机器人本体、绳索驱动/传动系统、伺服控制系统及形状感知系统组成。其中连续体本体由多个结构和功能相

同的弯曲单元串联而成,每个弯曲单元均采用矩形激光一体化切割镂空结构,以有效减小传统组装式机构所带来的加工装配误差和扭转变形影响。单节连续体机器人长度为150 mm,外径为30 mm,内径为20 mm,缝宽为8 mm。其驱动方式为四绳驱动,绳孔直径为1 mm,均匀分布于直径为26 mm的圆周上。相邻连续体单元之间通过厚度为2 mm的连接环过渡,以保证整体结构的柔顺性和稳定性。

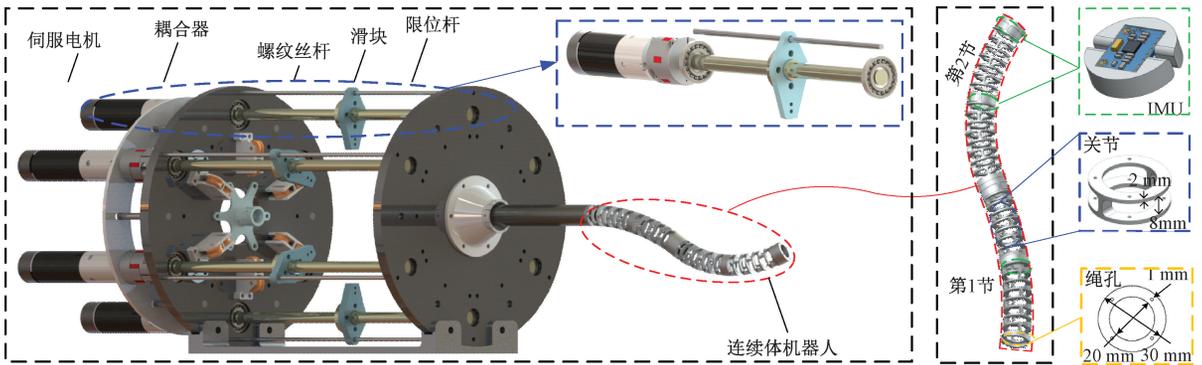


图1 连续体机器人结构与IMU传感器布设示意图

Fig. 1 The illustration of the continuum robot structure and IMU sensor placement

机器人伺服控制系统由伺服电机、耦合器、螺纹丝杆及滑块组件构成。伺服电机通过耦合器与精密螺纹丝杆相连,将电机的旋转运动转换为滑块的高精度直线运动。滑块与驱动绳索末端固定连接,通过协调控制4个电机的运动,可实现对驱动绳索长度的精确调节,从而驱动连续体各模块的弯曲姿态与运动轨迹。

为使连续体机器人本身具有形状感知能力,考虑到连续体结构特点及形状重构对姿态信息的需求,在每节连续体弯曲模块中部(75 mm处)与末端(150 mm处)分别嵌入两个IMU,用于测量机器人弯曲变形过程中的姿态信息。该传感器布局不仅保证了姿态感知精度,又最大限度地减少对连续体运动变形的干扰,为后续研究基于分段多项式曲率模型的形状感知提供了可靠数据支持。

## 1.2 柔性连续体机器人运动学建模

传统刚性机器人常采用D-H法<sup>[18-20]</sup>进行运动学建模分析,但由于连续体机器人在理论上具有无限自由度和连续变形的结构特点,其结构展现出高度的非线性和耦合性,难以直接应用。同时有些研究者<sup>[21]</sup>常采用理想化模型(如分段常曲率等)进行近似描述,其建模简单,计算方便,但模型误差大,控制精度低。同时在实际工况下的传动摩擦、重力分布及材料变形等非线性因素会导致连续体机器人的形变偏离理想常曲率模型,产生较大的建模误差。针对这一问题,Della Santina等<sup>[22]</sup>在控制研究中引入了一种多项式曲率模型,有效解决了非恒定

曲率分布的建模难题。基于这一研究思路,提出一种基于分段多项式曲率模型的连续体机器人运动学建模方法,该模型在保留分段结构优势的同时,允许各段曲率随弧长按低阶多项式变化,以提高机器人运动学建模精度。如图2所示,分段多项式曲率模型首先将连续体划分为若干段,并使每段内的曲率随归一化弧长呈低阶多项式变化,通过多项式系数描述各段的弯曲形状,再结合坐标变换将各段模型串联,从而来构建连续体机器人的运动学模型。该建模方法能够在保持常曲率模型几何简洁性的同时,还扩展了传统常曲率假设理论,使其能够描述非均匀弯曲等复杂形态,从而更加准确地反映连续体柔性变形的结构特性,具有较高的计算效率和形状拟合精度。

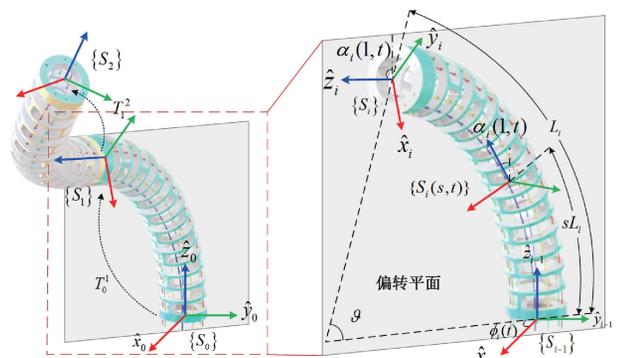


图2 连续体机器人运动学建模示意图

Fig. 2 The illustration of kinematic modeling for continuum robots

为方便建模,假设连续体弯曲形态由归一化弧长参数  $s \in [0, 1]$  表示,其中  $s=0$  对应连续体弯曲段的底部,  $s=1$  对应连续体弯曲段的顶部。定义曲率函数  $q_i(s, t)$  用于描述第  $i$  段在弯曲平面中的局部姿态变化,可将其描述为关于  $s$  的多项式,即:

$$q_i(s, t) = \sum_{k=0}^{\infty} \theta_{i,k}(t) \cdot s^k \quad (1)$$

式中:  $\theta_{i,k}(t)$  为  $t$  时刻第  $k$  阶曲率模态系数。

然后对曲率函数(1)沿弧长  $s$  进行积分,可得该段在弯曲平面中任意位置处的偏转角  $\alpha_i(s, t)$ ,以描述弯曲单元从起点到弧长位置  $s$  的累积转角,即:

$$\alpha_i(s, t) = \int_0^s q_i(\xi, t) d\xi = \sum_{k=0}^{\infty} \theta_{i,k}(t) \frac{s^{k+1}}{k+1} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_i(s, t)$  表示时刻  $t$  第  $i$  段  $s$  位置在偏转平面上的偏转角。

将  $\alpha_i(s, t)$  映射至笛卡尔坐标系中,并对曲线进行积分,即可得到该段在弯曲平面内任意位置的二维投影坐标,即:

$$\begin{cases} r_i(s, t) = L_i \int_0^s \sin(\alpha_i(s, t)) ds \\ z_i(s, t) = L_i \int_0^s \cos(\alpha_i(s, t)) ds \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $r_i(s, t)$  与  $z_i(s, t)$  分别为该段在  $xoy$  平面和平行于  $z$  轴方向的投影位置;  $L_i$  为该段的物理长度。

假设每一段在任意时刻的弯曲均处于固定平面内(即连续体无扭转变形),则连续体机器人第  $i$  段在位置  $s$  处的空间坐标可表示为其在局部坐标系  $\{S_{i-1}\}$  下的形式,如式(4)所示。

$$\begin{cases} x_i(s, t) = r_i(s, t) \cos(\phi_i) \\ y_i(s, t) = r_i(s, t) \sin(\phi_i) \\ z_i(s, t) = z_i(s, t) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\phi_i$  为该段弯曲平面在三维空间中的旋转角,用以描述其法向轴与全局坐标系间的旋转关系。

基于上述几何关系,并结合偏转角  $\alpha_i(s, t)$  和旋转角  $\phi_i(s, t)$ ,可得该段在位置  $s$  和时刻  $t$  的齐次变换矩阵,即:

$$\mathbf{T}_{i-1}^i(s, t) = \mathbf{R}_a(\phi_i(t)) \begin{bmatrix} \mathbf{R}_a(\alpha_i(s, t)) & \begin{bmatrix} x_i(s, t) \\ y_i(s, t) \\ 0 \end{bmatrix} \\ [0 \ 0 \ 0] & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R}_a(-\phi_i(t)) \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{T}_{i-1}^i(s, t)$  描述了局部坐标系  $\{S_{i-1}\}$  到  $\{S_i(s, t)\}$  的位姿变换,包含旋转和平移分量。

在实际应用中,为兼顾计算效率与拟合能力,通常采用有限阶多项式对曲率函数(式(1))进行近似,如式(6)所示。

$$q_i(s, t) \approx \sum_{k=0}^m \theta_{i,k}(t) \cdot s^k \quad (6)$$

当  $m=0$  时,该模型退化为经典的常曲率模型;当  $m>0$  时,该模型可描述更复杂的曲率变化,拟合能力更强。

为求解模态系数  $\{\theta_{i,k}(t)\}_{k=0}^m$ ,需在连续体弯曲单元的第  $i$  段选取  $m+1$  个离散位置点,即:

$$s = [s_0, \dots, s_m]^T \quad (7)$$

其中,  $0 \leq s_0 < s_1 < \dots < s_m \leq 1$ 。

假设在时刻  $t$  时,所选取的离散位置点处的偏转角  $\alpha_i(s_k, t)$ ,则根据式(2)可得:

$$\alpha_i(s_k, t) = L_i \cdot \int_0^{s_k} q_i(\xi, t) d\xi = L_i \cdot \sum_{j=0}^m \theta_{i,j}(t) \cdot \frac{s_k^{j+1}}{j+1} \quad (8)$$

整理可得关于模态参数  $\{\theta_{i,k}(t)\}_{k=0}^m$  的线性方程组,即:

$$\begin{bmatrix} s_0^1 & \frac{s_0^2}{2} & \dots & \frac{s_0^{m+1}}{m+1} \\ s_1^1 & \frac{s_1^2}{2} & \dots & \frac{s_1^{m+1}}{m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_m^1 & \frac{s_m^2}{2} & \dots & \frac{s_m^{m+1}}{m+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_{i,0}(t) \\ \theta_{i,1}(t) \\ \vdots \\ \theta_{i,m}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{L_i} \begin{bmatrix} \alpha_i(s_0, t) \\ \alpha_i(s_1, t) \\ \vdots \\ \alpha_i(s_m, t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

为简便起见,可将式(9)简化为:

$$\mathbf{A}_i \cdot \boldsymbol{\theta}_i(t) = \mathbf{B}_i(t) \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{A}_i \in \mathbb{R}^{(m+1)(m+1)}$  为由位置点  $s_k$  构造的系数矩阵,  $\boldsymbol{\theta}_i(t) = [\theta_{i,0}(t), \theta_{i,1}(t), \dots, \theta_{i,m}(t)]$  为待求模态参数向量,  $\mathbf{B}_i(t)$  为归一化后的偏转角观测值向量。由于位置点  $\{s_k\}_{k=0}^m$  互异,矩阵  $\mathbf{A}_i$  为满秩方阵,方程有唯一解。

根据式(10)可求解出曲率函数的模态系数,然后通过式(2)和(3)即可得到连续体机器人任意位置  $s \in [0, 1]$  处的偏转角和空间位置,从而来描述机器人的弯曲形状。该方法建立了离散姿态输入与整段形状之间的函数映射关系,具有良好的建模通用性与可扩展性,尤其适用于低成本传感器布局下的柔性结构形状感知需求。

## 2 连续体机器人弯曲形状感知方法

连续体机器人形状感知和检测是实现精确控制与路径规划的基础。为此,在以上研究基础上,提出一种基于IMU与分段多项式曲率运动学模型的连续体机器人形状感知方法。该方法通过有限数量的姿态观测点来求解每节弯曲单元曲率的模态系数,从而重建出整个连续体机器人在三维空间中的完整形态,其整体算法流程如图3所示,主要包括传感器布局设计、连续体机器人末端姿态信息提取、弯曲单元曲率模态参数求解及连续体机器人三维形状重构4个步骤。

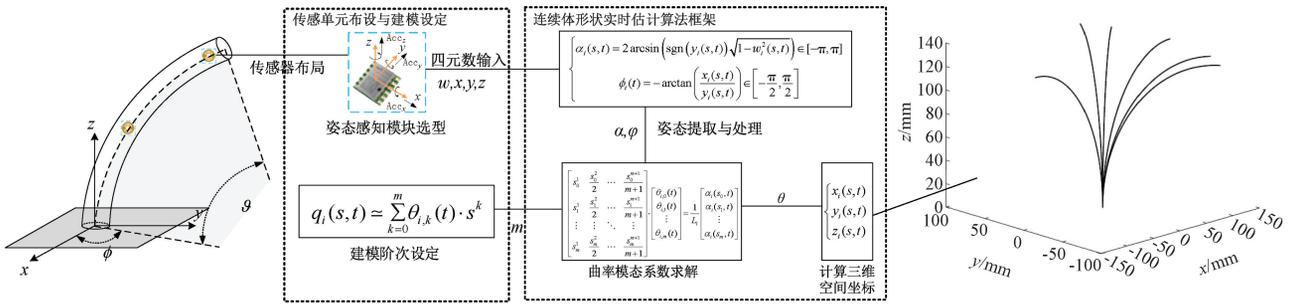


图3 基于IMU和PPC模型的机器人形状感知算法流程

Fig. 3 Algorithm flowchart for robot shape perception based on IMU and PPC models

如图1所示,在机器人本体的关键位置设置多个IMU传感器,用于实时采集各测量点的姿态信息。为提高数据采集的稳定性和精度,采用姿态融合算法对原始传感器输出进行处理,并以四元数形式表示姿态,即:

$$\mathbf{q}(t) = [q_0(t), q_1(t), q_2(t), q_3(t)]^T \quad (11)$$

由上文所建的PPC运动学模型,将连续体机器人划分为若干个弯曲单元段,每一段的曲率沿弧长方向按低阶多项式进行描述。对于第*i*段,在任意时刻*t*和位置*s*处,其姿态由旋转角 $\phi_i(t)$ 和偏转角 $\alpha_i(s, t)$ 共同描述。该姿态可视为绕与本段轴线垂直的旋转轴 $n_{i-1}$ 旋转角度 $\alpha_i(s, t)$ ,最后用四元数表示为:

$$\mathbf{q}_i(s, t) = \left[ \cos\left(\frac{\alpha_i(s, t)}{2}\right), -\sin\left(\frac{\alpha_i(s, t)}{2}\right), \sin\phi_i(t), \sin\left(\frac{\alpha_i(s, t)}{2}\right) \cdot \cos\phi_i(t), 0 \right]^T \quad (12)$$

其中,四元数分量满足归一化条件 $w_i^2 + x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 = 1$ 。

在已知四元数的情况下,可通过求逆得到连续体机器人的偏转角 $\alpha_i(s, t)$ :

$$\begin{cases} \alpha_i(s, t) = 2\arcsin(\operatorname{sgn}(y_i(s, t)) \times \\ \sqrt{1 - w_i^2(s, t)}) \in [-\pi, \pi] \\ \phi_i(t) = -\arctan\left(\frac{x_i(s, t)}{y_i(s, t)}\right) \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为取符号运算。

将上述由IMU传感器得到的偏转角代入到式(1)和(2)中,即可得到一个关于模态参数 $\theta_{i,j}(t)$ 的线性方程组,然后求解其模态系数后,即可获得整段的曲率函数,即在任意位置*s*处的偏转角与坐标值。最后结合齐次变换矩阵(式(5)),即可逐段描述连续体机器人每个局部坐标系间的空间位姿变换,实现机器人完整形状的重建。

### 3 仿真验证

本章对上述所建的连续体机器人运动学模型及所提的形状感知方法进行验证。首先通过建模软件构建出一

组标准的空间曲线作为参考对象,在不同弯曲角度下通过对比分析基于PPC模型的形状重构方法与基于传统常曲率模型的性能差异来验证所提形状重构方法的正确性和有效性。传统常曲率模型广泛应用于连续体机器人运动学建模中,其核心是假设整个连续体中心曲线在二维平面内以固定曲率均匀弯曲。为便于对比分析,在仿真环境中首先利用建模软件生成一组等曲率弯曲轨迹,作为参考曲线,其弯曲角度范围设置为 $10^\circ \sim 90^\circ$ ,并以 $10^\circ$ 为间隔逐渐增加,如图4所示。

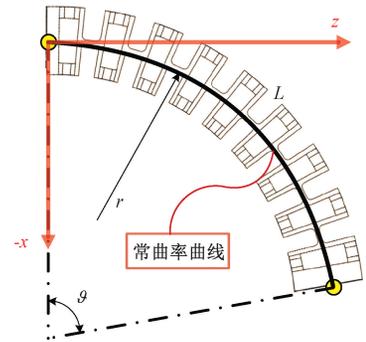


图4 常曲率假设下的参考曲线

Fig. 4 Reference curve under constant curvature assumption

在不同弯曲角度下分别采用传统常曲率模型与所提的PPC模型对上述标准曲线进行形状曲线重构与拟合,仿真结果如图5所示。图5中的两条曲线分别描述了在 $90^\circ$ 弯曲角度变换范围内两种不同建模方法的形状重构曲线示意图。由图中结果可知,基于PPC模型而重构的形状曲线与基于常曲率模型的结果在等曲率场景下基本保持一致,但仍存在一定的偏差。而PPC建模方法在保持连续体机器人几何结构特性的同时,能够达到与常曲率模型相当的精度,由此验证了所提的基于PPC模型的机器人运动学模型的正确性。

图6分别描述了在不同弯曲角度下基于PPC模型而重建出的机器人形状曲线与理论参考曲线间的末端位置偏差。由图中结果可知,连续体机器人末端位置误差

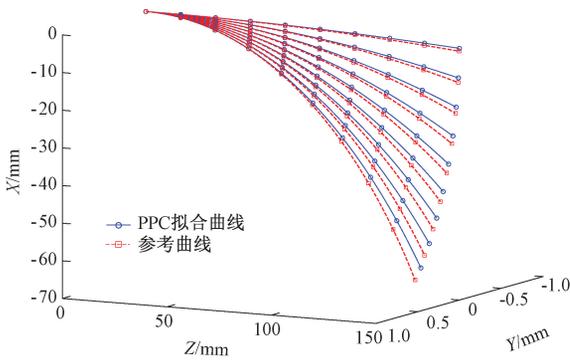


图 5 常曲率与 PPC 模型在 90°变化内的拟合效果对比  
Fig. 5 Comparison of fitting performance between constant curvature and PPC models within a 90° change

随弯曲角度的增加而增大,在 10°弯曲时,机器人末端误差仅为 0.770 mm,而在 90°弯曲时其误差增至最大值 4.347 mm,造成该误差的主要来源可能是基于 PPC 方法在建模过程中需依赖于机器人末端姿态变化而进行拟合重构。当机器人实际弯曲曲率较大时,相对角度估计误差在积分运算中逐步累积增大,从而导致机器人末端位置偏差变大。但在极端弯曲条件下,机器人末端平均误差仍处于可接受范围内,由此验证了该方法在大曲率变形下具备较高的建模精度与稳定性。

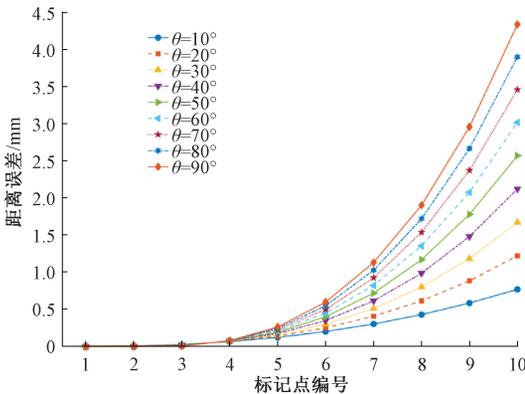


图 6 PPC 模型在不同弯曲角度下的形状曲线误差  
Fig. 6 Shape curve error of the PPC model at different bending angles

表 1 给出了不同弯曲角度下机器人弯曲形状平均误差与末端点误差。由表中结果表明,基于 PPC 模型的形状重构方法在小角度弯曲条件下其形状曲线误差极小且在大角度下依然保持较高的弯曲形状曲线还原能力。综上所述,所提出的基于 PPC 方法的形状重构模型能够在等曲率场景下保持与传统常曲率模型相当的精度,同时非等曲率建模中具备更高的几何表达能力。该特性为连续体机器人在复杂任务环境下的三维形状感知与闭环控制奠定了更加精确的建模基础。

表 1 不同弯曲角度的位置误差

Table 1 Position error at different bending angles

角度/(°)	平均误差/mm	末端点误差/mm
10	0.243	0.770
20	0.346	1.223
30	0.448	1.674
40	0.551	2.124
50	0.653	2.572
60	0.756	3.019
70	0.858	3.463
80	0.959	3.904
90	1.060	4.347

## 4 连续体机器人形状感知的实验验证

### 4.1 实验平台与传感器配置

为验证所提连续体形状检测方法的正确性和有效性,搭建了如图 7 所示的连续体机器人形状感知实验平台。柔性检测机器人本体为单节绳驱动连续体结构,采用 3D 打印技术制作而成,总长度为 150 mm,主体材料选用尼龙,外径为 30 mm。机器人采用一组 4 根高强度尼龙绳作为驱动和传动方式,并通过精密伺服电机 (Vishan ECG2248S) 及其配套驱动器实现绳索的收放控制,从而完成弯曲姿态的精确调节。实验平台配置了一台额定电压为 24 V 的直流稳压电源,为电机驱动器及传感器系统提供稳定电能。电机驱动模块与伺服电机相连,实现对 4 根驱动绳的独立精确控制,保证了连续体机器人在实验中的运动可控性与重复性。为实现形状检测,在机器人中部(75 mm 处)和末端(150 mm 处)分别集成一个小型高精度惯性测量单元 (JY901S),用于实时采集机器人弯曲运动中的姿态四元数信息。传感器通过串口通信模块与上位机进行数据交互,上位机运行基于 MATLAB 编写的数据处理与形状重构程序,将采集的姿态信息作为 PPC 模型的输入,并基于 PPC 重构模型实现对连续体弯曲形状的检测。

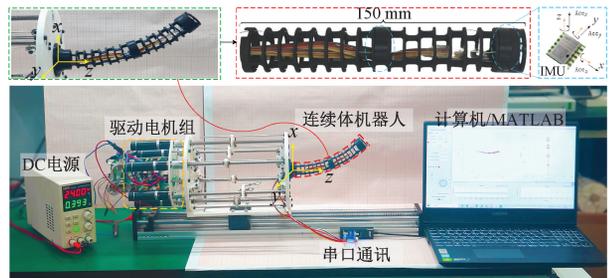
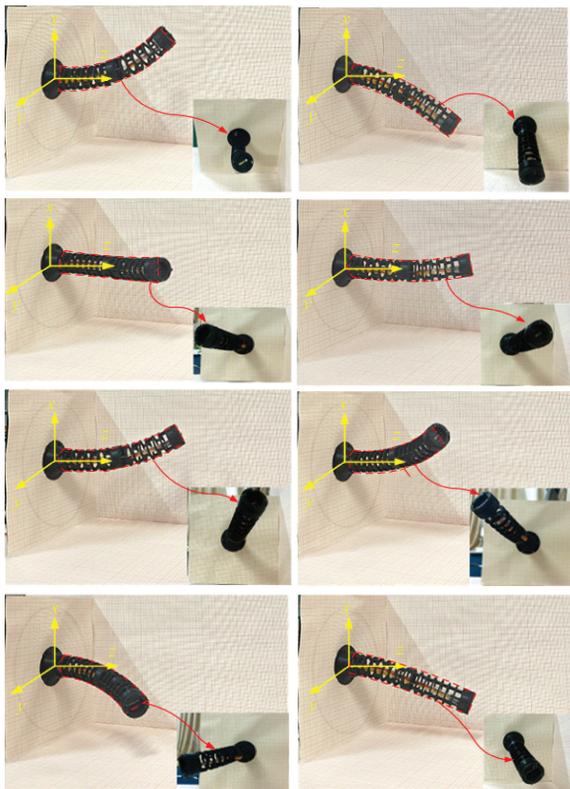


图 7 连续体机器人形状感知实验平台

Fig. 7 Shape perception experiment platform for continuum robots

### 4.2 机器人弯曲形状重构实验

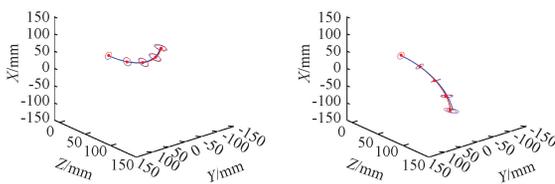
为验证上述所提的基于分段多项式曲率模型的形状感知方法的正确性和有效性,下面进行单节连续体机器人的空间弯曲形状重构实验。首先使连续体机器人的弯曲到  $60^\circ$  保持恒定不变,然后控制机器人以  $45^\circ$  的旋转角为间隔从  $0^\circ$  增加至  $360^\circ$  进行空间旋转运动,在运动过程中通过 IMU 采集不同状态下的机器人姿态信息,并通过上述所提的形状感知方法来获取机器人空间弯曲形状,并与实际弯曲形状进行对比来验证所提方法的正确性。不同旋转角度下机器人的空间运动过程及弯曲形状结果如图 8(a) 和 (b) 所示。由图中结果可知,在不同旋转角度下所提的形状重构方法能够准确的描述连续体机器人的运动变形过程及弯曲形状,且在端点位置与弯曲曲线趋势上均与实际情况保持一致,由此验证了上述所提的连续体机器人形状重构模型及方法的正确性。



(a) 多姿态形状重构实验

(a) Multi-posed shape reconstruction experiment

—○— PPC模型拟合值      —●— 真实值



(b) 不同构型下的形状重构对比

(b) Comparison of shape reconstruction under different configurations

图 8 连续体机器人形状重构实验结果对比

Fig. 8 Shape reconstruction results of continuum robot

为进一步分析连续体机器人形状重构精度,选取机器人末端位置误差作为主要评价指标,其误差结果如图 9 所示。由图中结果可知,在不同弯曲方向下机器人末端位置误差在  $x, y$  方向上呈现对称分布且变换幅度较小,表现出较好的稳定性;而在  $z$  轴方向上其误差波动相对较为明显,这表明机器人在该轴向上存在一定误差累积。总体而言,连续体机器人末端综合误差均处于毫米量级,最大值不超过  $7\text{ mm}$ ,且平均误差始终控制在  $3\text{ mm}$  以内,由此验证了所提的机器人形状重构方法有效性,同时该方法不仅能够保持较高形状还原精度,还能够有效适应不同的弯曲方向的变化。

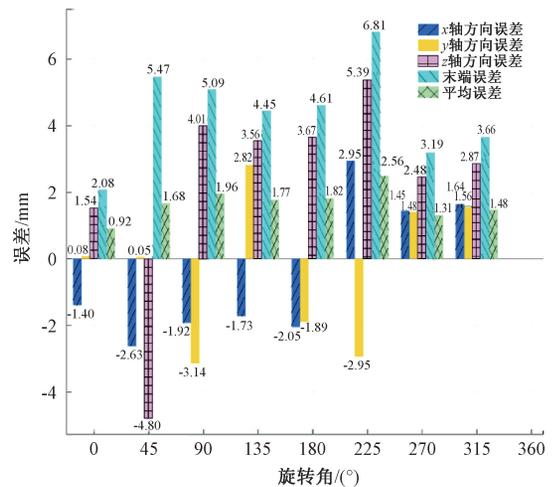
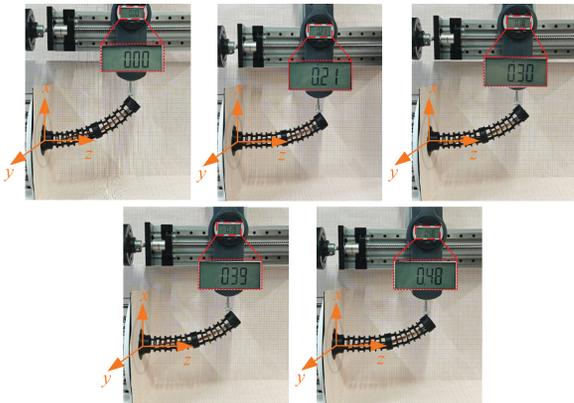


图 9  $x, y, z$  方向、末端位置的重构误差

Fig. 9 Reconstruction error maps for  $x, y, z$  directions and end-point positions

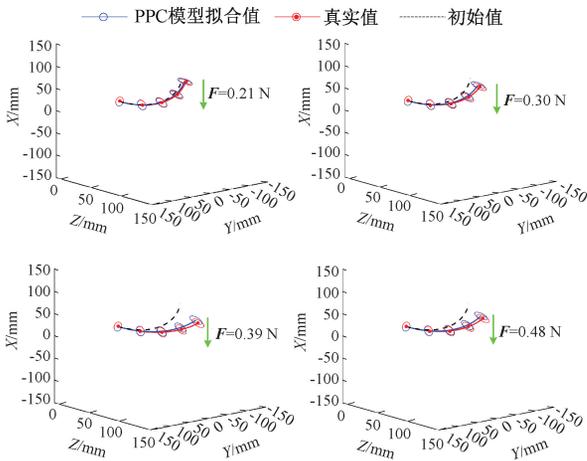
### 4.3 不同末端负载作用下的形状重构实验

为验证所提出形状感知方法在外载荷作用下的适用性与抗干扰性,下面进行不同末端负载下连续体机器人形状重构实验,其实验过程如图 10(a)所示。首先在机器人末端分别施加不同末端负载,然后通过上述所提的机器人形状感知方法对弯曲形状进行重构,来分析不同负载是否对机器人弯曲形状重构造成影响。图 10(b)分别展示了不同负载条件下连续体机器人实际弯曲形状与基于 PPC 模型的重构形状的对比示意图。由图中结果可知,所提出的形状感知方法能够较为准确地描述机器人在不同外部载荷作用下弯曲变形特征。



(a) 不同负载下的形状重构实验

(a) Shape reconstruction experiments under different loads



(b) 不同负载条件下真实形状与重构形状对比

(b) Comparison between actual and reconstructed shapes under different load conditions

图 10 不同负载条件下的机器人形状重构实验结果

Fig. 10 Shape reconstruction results of the robot under different load conditions

图 11 为机器人弯曲形状重构曲线与真实曲线间的误差。由图中实验结果可知:随着机器人末端负载的不断增大,其末端位置误差也随之变大,即在 0.21 N 负载时,机器人末端位置误差平均值为 1.04 mm,其末端最大

位置误差为 2.55 mm;在 0.30 N 负载时,平均误差为 1.65 mm,最大误差为 4.41 mm;当负载增大至 0.48 N 时,机器人末端位置误差的最大值和平均值分别为 6.59 mm 和 2.36 mm。即在较大负载(0.48 N)作用时机器人末端平均位置误差仍保持 3 mm 以内,能够满足柔性连续体机器人精确控制的需求,由此验证了不同负载下所提形状重构方法的正确性和稳定性。而根据机器人末端位置误差分布特征表明,其最大误差主要出现在连续体变形最显著的末端区域,这与理论模型的边界效应预期相符。综上所述,提出的机器人形状感知方法能够有效适用于不同负载条件下的形状检测需求,为连续体机器人在实际工程应用中的形状反馈和精确控制提供了可靠的支撑。

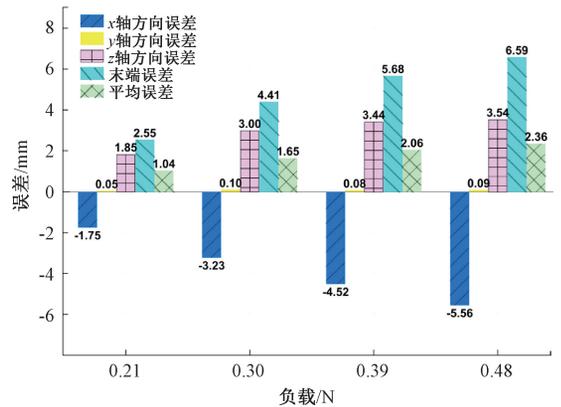


图 11 不同负载下机器人形状重构误差示意图

Fig. 11 Shape reconstruction error of robot under different loads

### 4.4 动态响应下的机器人形状重构实验

为进一步验证所提出基于分段多项式曲率(PPC)模型的形状感知方法在连续体机器人动态运动过程中的实时性与适用性,开展了动态弯曲响应实验。首先,连续体机器人由初始直线状态开始,在伺服驱动系统的持续收绳作用下实现连续、平滑的弯曲过程。驱动输入保持恒速变化,使连续体机器人在约 10 s 内由直线逐渐过渡至稳定弯曲状态。整个过程能够较好地模拟机器人在连续操作中受控驱动下的柔性变形响应,便于分析形状感知方法在动态过程中的实时性与稳定性。

图 12 给出了连续体机器人动态弯曲实验的装置与执行过程,图 13 展示了在不同时间帧下的机器人形状重构结果。可以看出,重构曲线能够连续、平滑地反映机器人由直线向弯曲状态的过渡过程,未出现明显的跳变或失真,表明该方法在动态输入下具有较好的连续性与稳定性。为进一步分析动态响应性能,提取了弯曲过程中各时刻的末端位置,并计算其相对于基准形状的偏差,得到如图 14 所示的误差变化曲线。由图中结果可知:连续

体机器人在动态弯曲过程中形状平均误差约为 1.94 mm,末端位置平均误差约为 2.57 mm。误差波动主要来源于惯性传感器在快速姿态变化阶段的短时漂移与滤波延迟,但整体趋势与实际弯曲轨迹一致。结果表明,基于 PPC 模型的形状感知方法在低速连续运动条件下具有良好的动态适应性与实时形状跟踪能力。

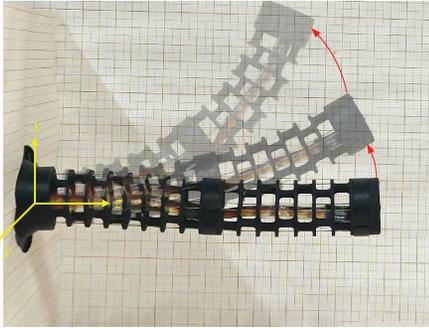


图 12 连续体机器人动态弯曲形状重构实验

Fig. 12 Dynamic bending shape reconstruction experiments of the continuum robot

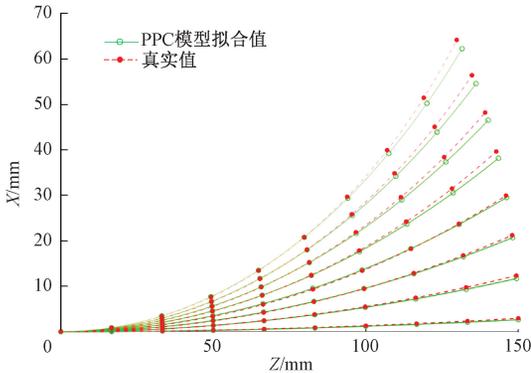


图 13 动态弯曲过程中机器人在不同时间帧的形状重构结果

Fig. 13 Shape reconstruction results of the robot at different time frames during the dynamic bending process

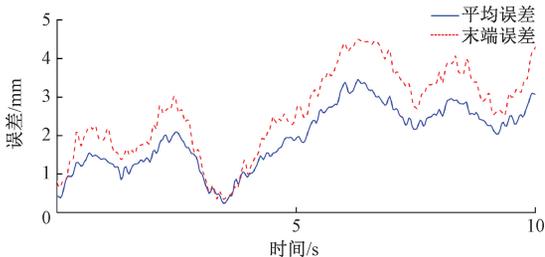


图 14 动态弯曲过程中机器人末端位置误差和平均误差变化

Fig. 14 Variation in end-effector position error and average error of the robot during dynamic bending

## 5 结 论

本研究提出了一种基于分段多项式曲率模型与 IMU 融合连续体机器人形状感知方法,通过系统的理论分析、仿真验证和实验研究,得出以下结论:

1) 针对连续体机器人非均匀弯曲形状的描述问题,构建了基于分段多项式曲率的连续体机器人运动学模型。该模型通过低阶多项式来描述机器人弯曲曲率变化特性,有效解决了传统常曲率模型在非均匀变形情况下的精度不足问题,为连续体机器人的精确形状感知提供了理论基础。

2) 提出了一种基于 PPC-IMU 融合的机器人形状重构算法,通过 IMU 实时获取的姿态信息来求解机器人弯曲曲率模态参数,从而实现机器人三维形状的重构。结果表明,在  $10^{\circ} \sim 90^{\circ}$  弯曲范围内,机器人末端平均位置误差为 1.060 mm,最大末端误差不超过 4.347 mm,有效满足了机器人的精准操作需求。

3) 搭建了连续体机器人形状感知实验平台,通过多组实验验证了所提方法的准确性和可靠性。实验结果表明:在不同弯曲平面下机器人末端平均误差  $< 3$  mm,且在不同负载 (0.21 和 0.48 N) 作用下,机器人末端最大误差分别为 2.55 和 6.59 mm。此外,动态响应实验进一步表明,该方法在连续运动过程中仍能保持较好的形状跟踪能力,末端位置平均误差约为 2.57 mm,验证了其在动态情况下的适用性。由此验证了所提机器人形状重构方法的可靠性和正确性,为连续体机器人形状反馈控制和精密操作奠定理论基础和实验经验。

## 参考文献

- [1] RUSSO M, SADATI S M H, DONG X, et al. Continuum robots: An overview[J]. Advanced Intelligent Systems, 2023, 5(5): 2200367.
- [2] YANG ZH SH, YANG L H, SUN Y, et al. A novel contact-aided continuum robotic system: Design, modeling, and validation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2024, 40: 3024-3043.
- [3] ZHANG J Y, FANG Q, XIANG P Y, et al. A survey on design, actuation, modeling, and control of continuum robot[J]. Cyborg and Bionic Systems, 2022: 9754697.
- [4] HANNAN M W, WALKER I D. Real-time shape estimation for continuum robots using vision[J]. Robotica, 2005, 23(5): 645-651.

- [ 5 ] CHEN C L, TAI C L, LIO Y F. Virtual binocular vision systems to solid model reconstruction[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 35(3): 379-384.
- [ 6 ] CROOM J M, RUCKER D C, ROMANO J M, et al. Visual sensing of continuum robot shape using self-organizing maps[C]. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010: 4591-4596.
- [ 7 ] MANAKOV R A, KOLPASHCHIKOV D Y, DANILOV V V, et al. Visual shape and position sensing algorithm for a continuum robot [ C ]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021, 1019(1): 012066.
- [ 8 ] XU W F, YAN P H, WANG F X, et al. Vision-based simultaneous measurement of manipulator configuration and target pose for an intelligent cable-driven robot[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 165: 108347.
- [ 9 ] YIN ZH P, HONG Y, SUN X Y, et al. A miniature continuum robot with integrated piezoelectric beacon transducers and its ultrasonic shape detection in robot-assisted minimally invasive surgeries [ C ]. 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2022: 5945-5950.
- [ 10 ] 孙广开, 张兴硕, 何彦霖, 等. 面向连续体机器人精密操作的多芯光纤三维形状与位置测量误差研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(3): 68-82.  
SUN G K, ZHANG X SH, HE Y L, et al. Measurement error of 3D shape and position of multi-core optical fiber for precision operation of continuum robots[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(3): 68-82.
- [ 11 ] AMIRKHANI G, LIU X R, ARMAND M. Shape sensing of continuum manipulators with fiber Bragg grating sensor arrays: Accounting for actuator velocity effects[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(11): 19231-19241.
- [ 12 ] BIAN G B, ZHANG M Y, YE Q, et al. Accurate shape and tip-contact-force estimation of multisegment continuum-robotic tubular bronchoscopes[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2025, DOI: 10.1109/TMECH.2024.3523971.
- [ 13 ] BAAIJ T, HOLKENBORG M K, STÖLZLE M, et al. Learning 3D shape proprioception for continuum soft robots with multiple magnetic sensors[J]. *Soft Matter*, 2023, 19(1): 44-56.
- [ 14 ] YOUSEFI M, JAMSHIDIAN GHALESHAHI M, NEJAT PISHKENARI H, et al. Model-aided 3D shape and force estimation of continuum robots based on Cosserat rod theory and using a magnetic localization system [ J ]. *Intelligent Service Robotics*, 2023, 16(4): 471-484.
- [ 15 ] PENG R, WANG Y, LU P. A tendon-driven continuum manipulator with robust shape estimation by multiple IMUs[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(4): 3084-3091.
- [ 16 ] GUO H, JU F, BAI D M, et al. Shape reconstruction for continuum robot based on Pythagorean Hodograph-Bézier curve with IMU and vision sensors [ J ]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(8): 8535-8544.
- [ 17 ] CHENG H, SHANG H J, LAN B, et al. Orientation to pose: Continuum robots shape sensing based on piecewise polynomial curvature model [ J ]. *ArXiv preprint arXiv: 2103.05150*, 2021.
- [ 18 ] 乔贵方, 蒋欣怡, 高春晖, 等. 基于多目标优化的工业机器人位置与姿态精度提升方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(12): 217-224.  
QIAO G F, JIANG X Y, GAO CH H, et al. Method for improving position and attitude accuracy of industrial robots based on multi-objective optimization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(12): 217-224.
- [ 19 ] 齐飞, 张恒, 孙杰, 等. 考虑驱动耦合的绳驱动外肢体机器人运动建模及控制研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6): 21-34.  
QI F, ZHANG H, SUN J, et al. Modeling and control of cable-driven supernumerary robotic limbs motion considering drive coupling[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6): 21-34.
- [ 20 ] 耿鹏, 何彦霖, 杨溢, 等. 软体机械臂控制方法研究现状及展望[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(11): 85-98.  
GENG P, HE Y L, YANG Y, et al. Research status and prospects of control methods for soft robotic arms [ J ].

Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 85-98.

- [21] 齐飞, 余世刚, 高书苑, 等. 考虑非线性摩擦的绳驱动连续体机器人动力学研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 375-383, 401.

QI F, SHE SH G, GAO SH Y, et al. Dynamic of cable-driven continuum robot with nonlinear friction model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 375-383, 401.

- [22] DELLA SANTINA C, RUS D. Control oriented modeling of soft robots: The polynomial curvature case[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 5(2): 290-298.

## 作者简介



齐飞(通信作者), 2013年于新乡学院获得学士学位, 2016年于江南大学获得硕士学位, 2019年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为常州大学副教授, 主要研究方向为绳驱动连续体机器人及柔性外肢体机器人。

E-mail: qifei224@cczu.edu.cn

**Qi Fei** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xinxiang College in 2013, received his M. Sc. degree from Jiangnan University in 2016, and Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2019. He is currently an associate professor at Changzhou University. His main research interests include rope-driven continuum robots and flexible external-limb robots.