本文引用格式：薛晨菲,孙瑜,文庆,等.绳驱动超冗余连续体机器人全臂形闭环控制方法[J].自动化与信息工程,2026,47(1):27-36.
XUE Chenfei, SUN Yu, WEN Qing, et al. Whole-body shape closed-loop control method for cable-driven hyper-redundant continuum robots[J]. Automation & Information Engineering, 2026,47(1):27-36.

绳驱动超冗余连续体机器人全臂形闭环控制方法

薛晨菲[1] 孙瑜[1] 文庆[2] 阳淼清[3] 刘洋[4] 陆凌云[5] 陈雪峰[1] 杨来浩[1]

（1.西安交通大学，陕西 西安 710049
2.北方自动控制技术研究所，山西 太原 030006
3.中国航发四川燃气涡轮研究院，四川 绵阳 621000
4.大连长丰实业总公司，辽宁 大连 116200
5.深圳华视内窥镜有限公司，广东 深圳 518100）

摘要：针对绳驱动超冗余连续体机器人臂形控制难题，提出了一种基于角度反馈的全臂形闭环控制方法。通过在机器人各关节段集成关节角度传感器，实时测量关节角度，构建了覆盖整条机械臂的全臂形闭环控制系统，从而实现机器人全臂形的准确操作与控制。同时，设计一款 21 自由度绳驱动超冗余连续体机器人，建立其运动学模型，用于全臂形闭环控制算法验证及模拟飞机油箱的检测任务。实验结果表明，所提全臂形闭环控制方法不仅实现了期望关节角度的高精度跟踪，还实现了机器人全臂形的角度反馈控制，且绳驱动超冗余连续体机器人能够在飞机油箱模拟实验台内灵活穿越，可为相关应用提供理论和技术支撑。

关键词：超冗余连续体机器人；全臂形控制；关节角反馈；运动学模型；飞机油箱检测

中图分类号：TP242　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-2605(2026)06-0003-10

DOI：10.12475/aie.20260103　　开放获取

Whole-body Shape Closed-loop Control Method for Cable-driven Hyper-redundant Continuum Robots

XUE Chenfei[1] SUN Yu[1] WEN Qing[2] YANG Miaoqing[3] LIU Yang[4]
LU Lingyun[5] CHEN Xuefeng[1] YANG Laihao[1]

(1.Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
2.North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China
3.AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621000, China
4.Dalian Changfeng Industrial Corporation, Dalian 116200, China
5.Shenzhen Huashi Videoscope Co., Ltd., Shenzhen 518100, China)

Abstract: Aiming at the issue of shape control for cable-driven hyper-redundant continuum robots, a whole-body shape control method with joint angle feedback is proposed. By integrating joint angle sensors into each segment of the robot, real-time joint angle are measured, and a closed-loop shape control system for the entire manipulator is constructed, thereby achieving accurate adjustment and control of the whole manipulator's shape. Simultaneously, a 21-degree-of-freedom cable-driven hyper-redundant continuum robot is designed, and its kinematic model is established for validating the whole-body shape closed-loop control algorithm and performing inspection tasks in simulated aircraft fuel tanks. Experimental results demonstrate that the proposed whole-body shape closed-loop control method not only achieves high-precision tracking of desired joint angles but also realizes angle feedback control of the whole manipulator's shape. Furthermore, the cable-driven hyper-redundant continuum robot can navigate flexibly within a simulated platform

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

of aircraft fuel tank , providing a solid theoretical foundation and technical support for related applications.

Keywords: hyper-redundant continuum robot; whole-body shape control; joint angle feedback; kinematic model; aircraft fuel tank inspection

0 引言

绳驱动超冗余连续体机器人是一种仿蛇机器人，能够适应复杂狭窄的环境，满足多样化的任务需求[1]。相比于传统的关节型机器人，其凭借大长径比和高冗余自由度，展现出高灵活性和大负载能力，广泛应用于核电站检修[2]、飞机油箱检测[3]、航空发电机原位检测[4-5]、微创手术[6]和灾害救援[7]等领域。然而，受限于超冗余结构与绳驱动传动方式，绳驱动超冗余连续体机器人的控制面临诸多挑战。

绳驱动超冗余连续体机器人的控制器主要分为基于模型、无模型和混合模型三类。其中，基于模型的控制器[8]通过建立机器人的运动学[9]、静力学[10-11]和动力学[12]模型，描述驱动绳长、关节角度、末端位姿之间的关系，从而实现高精度的反馈控制。但传统的建模方法涉及高维矩阵运算，导致计算效率较低且易产生矩阵奇异现象。为此，一些学者提出基于几何的建模方法[13-14]，有效提升了计算效率并规避了矩阵奇异现象；还有学者提出基于步长优化的算法[15]来解决矩阵病态问题。然而，绳驱动超冗余连续体机器人具有较强的非线性，难以精确构建模型，降低了控制精度与稳定性。

为解决上述问题，一些学者提出无模型控制器和混合模型控制器。其中，无模型控制器[16-17]主要通过数据驱动的方法估计机器人的位姿与接触力，并利用神经网络捕捉驱动绳长与关节角度之间的非线性关系[18]，以实现机器人对期望轨迹的精准控制；也有研究将模糊逻辑应用于时变动力学模型，从而实现模糊控制[19]。然而，无模型控制器因“黑盒”特性，缺乏控制稳定性理论证明，且模型训练计算量较大，导致其收敛速度较慢。混合模型控制器[20-22]融合了基于模型的控制器和无模型控制器的优点，既保留了模型的可靠性，又增强了模型处理非线性与时变性的能力，但算法复杂，限制了其在工程实践中的应用推广。

现有控制方法虽然在不同程度上解决了绳驱动超冗余连续体机器人的控制问题，但大多聚焦于末端位姿的精准控制，忽略了机器人全臂形的协调性和精确调节。为此，本文提出一种基于角度反馈的全臂形闭环控制方法，实现绳驱动超冗余连续体机器人全臂形的精确调节与控制，从而为相关应用提供理论和技术支撑。

1 机器人结构设计与运动学建模

绳驱动超冗余连续体机器人需具备足够的长度与灵活性，以穿越核电站、飞机油箱等复杂狭窄空间；还需具备一定的负载能力，以支撑末端携带检测或维修工具。这对机器人的尺寸、自由度、长径比及负载能力均提出了较高要求。同时，为实现全臂形闭环控制，该机器人还需配备关节角度传感器，以实时获取各关节角度数据。

1.1 结构设计

绳驱动超冗余连续体机器人由机械臂、驱动基座和导轨组成，其结构示意图如图 1 所示。

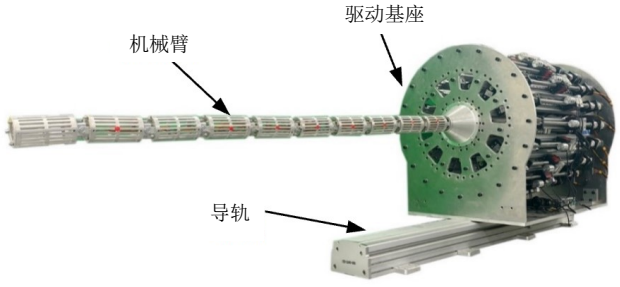
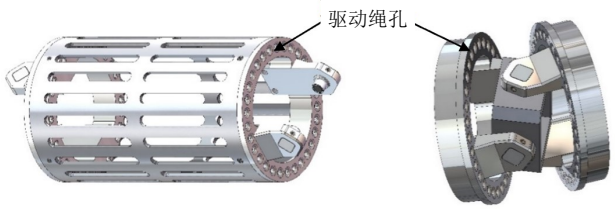


图 1 绳驱动超冗余连续体机器人结构示意图

机械臂由 10 个关节段组成，每个关节段包含 1 个连杆和 1 个万向节，关节段结构示意图如图 2 所示。

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING



(a) 连杆　　(b) 万向节

图 2　关节段结构示意图

万向节位于 2 个连杆之间，机械臂通过万向节连接驱动基座。每个万向节提供俯仰和偏航 2 个自由度，机械臂共有 20 个自由度。驱动绳孔布置在连杆、万向节的圆盘上，用于引导、固定驱动绳。

驱动基座将电机的圆周运动转换为驱动绳的直线运动。由于驱动绳仅能单向传递拉力，为实现俯仰和偏航 2 个自由度的控制，每个关节段至少需要 3 根驱动绳。因此，驱动基座集成了 30 个独立的驱动单元，每个驱动单元为 1 根驱动绳提供动力。每个驱动单元由电机、丝杠和锁线器组成，如图 3 所示。

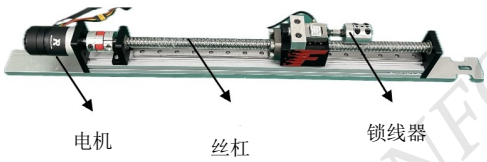


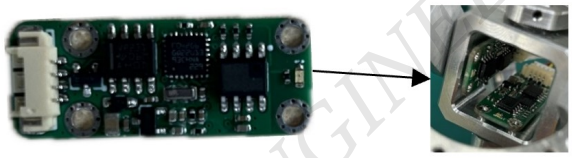
图 3　驱动单元结构图

为提高绳驱动超冗余连续体机器人的灵活性与空间可达性，在驱动基座下方设有导轨，使驱动基座能够沿导轨方向往复运动。因此，该机器人共有 21 个自由度，具体参数如表 1 所示。

表 1　绳驱动超冗余连续体机器人参数

参数名称	参数值
自由度	21
总长度/mm	1 290
驱动绳直径/mm	1.2
机械臂外径/mm	55
负载能力/kg	1.0
最大弯曲角度/(°)	45

关节角度传感器选用 AS5048a 磁编码器，具有 12 位分辨率且支持 I^2C 数字通信接口，并可搭配径向磁铁实现关节角度测量。每个万向节配备 2 个关节角度传感器（安装于万向节内），用于实时测量万向节的关节角度数据。关节角度传感器的数据传输线通过每个关节段的中心孔汇集至驱动基座内。关节角度传感器及安装位置如图 4 所示。



(a) 关节角度传感器　　(b) 安装位置

图 4　关节角度传感器及安装位置示意图

1.2　运动学建模

与传统的关节型机器人运动学建模不同，绳驱动超冗余连续体机器人的运动涉及多级状态空间之间的耦合映射关系，其运动学建模不仅要考虑关节空间与任务空间的映射关系，还要考虑驱动空间与关节空间的映射关系。驱动、关节、任务空间的映射关系如图 5 所示。

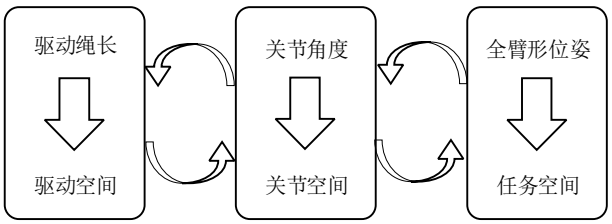


图 5　驱动、关节、任务空间的映射关系

1.2.1　关节空间到任务空间的运动学建模

关节空间到任务空间的正运动学模型反映了机械臂关节角度到全臂形位姿的映射关系。由于绳驱动超冗余连续体机器人为纯刚性结构，其全臂形位姿可由刚体变换表示，因此本文利用齐次坐标变换法建立该机器人关节空间到任务空间的正运动学模型。

绳驱动超冗余连续体机器人的连杆坐标系示意图如图 6 所示。

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

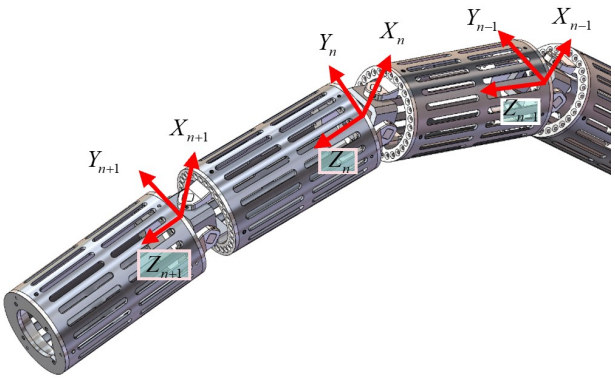


图 6　绳驱动超冗余连续体机器人连杆坐标系示意图

每个连杆坐标系以关节段中心为原点，Z 轴指向下一个关节段中心，X 轴、Y 轴分别为 2 个自由度的旋转轴，其方向由右手螺旋定则确定。相邻 2 个连杆坐标系之间的齐次变换矩阵可表示为

$$ {}^{n-1}_{n}\boldsymbol{T} = \boldsymbol{Trans}(0,0,L)\,\boldsymbol{Rot}(y,\psi_{n-1})\,\boldsymbol{Rot}(x,\varphi_{n-1}) \tag{1} $$

式中：$\boldsymbol{Trans}()$ 为平移矩阵，$\boldsymbol{Rot}()$ 为旋转矩阵，L 为 2 个坐标系原点之间的距离，ψ_n、φ_n 为第 n 个关节段绕万向节 2 个旋转轴的旋转角度。

若以驱动基座为世界坐标系，则与第 i 个关节段中心固连的连杆坐标系在世界坐标系中的位姿可通过公式(2)得到：

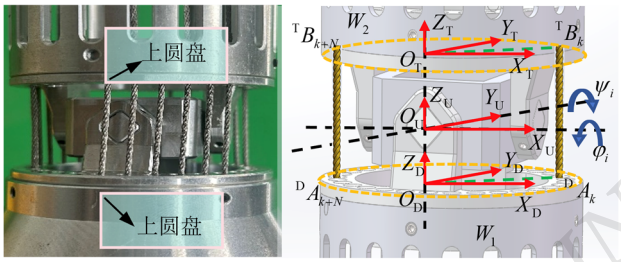
$$ {}^{0}_{n}\boldsymbol{T} = \prod_{i=1}^{n} {}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T} \tag{2} $$

结合公式(1)、(2)，即可根据机械臂关节角度确定每个关节段中心在世界坐标系中的位姿。

1.2.2　驱动空间到关节空间的运动学建模

驱动空间到关节空间的正运动学模型反映了驱动绳长到机械臂关节角度的映射关系，其核心目标是在每个关节段处建立每根驱动绳与万向节 2 个自由度之间的映射方程。绳驱动双自由度万向节的关节坐标系示意图如图 7 所示。

由于绳驱动超冗余连续体机器人所有关节段均为模块化设计，因此只需分析单个关节段的运动即可。



(a)　关节段结构示意图　　(b)　关节坐标系示意图

${}^{D}A_k$ 为下圆盘中第 k 根驱动绳孔在坐标系 O_D 中的位置，${}^{T}B_k$ 为上圆盘中第 k 根驱动绳孔在坐标系 O_T 中的位置。

图 7　绳驱动双自由度万向节的关节坐标系示意图

若将靠近驱动基座的万向节末端圆盘定义为下圆盘，另一个圆盘定义为上圆盘，则关节坐标系由下圆盘坐标系 O_D、上圆盘坐标系 O_T、关节段中心坐标系 O_U 组成。利用公式(1)将 2 根驱动绳孔位置转换到关节段中心坐标系 O_U 下，再计算两点之间的距离，即可得到关节角度与驱动绳长之间的关系为

$$ l_{i,k} = \left\| {}^{U}A_k - {}^{U}B_k \right\|^{1/2} \tag{3} $$

式中：${}^{U}A_k$ 为下圆盘中第 k 根驱动绳孔在关节段中心坐标系 O_U 中的位置，${}^{U}B_k$ 为上圆盘中第 k 根驱动绳孔在关节段中心坐标系 O_U 中的位置。

结合公式(1)、(3)，可得到驱动绳长与关节角度之间的映射关系为

$$ \boldsymbol{l} = f(\boldsymbol{q}) \tag{4} $$

式中：$\boldsymbol{l} \in R^{3n}$、$\boldsymbol{q} \in R^{2n}$ 分别为驱动绳长、关节角度的向量。

2　全臂形闭环控制方法

传统的机器人控制通常仅关注末端位姿的控制精度。但由于绳驱动超冗余连续体机器人结构细长且具有高冗余自由度，仅控制末端位姿无法保证中间臂段不碰撞障碍物。因此，本文采用全臂形闭环控制方法，通过关节角度传感器实时测量绳驱动超冗余连续体机器人全臂形的位姿，并根据角度反馈调整驱动绳拉力或长度，使机器人位姿与期望的几何曲线吻合。

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

2.1 基于角度传感的位姿感知

为实现绳驱动超冗余连续体机器人全臂形闭环控制，需利用关节角度传感器测量机器人位姿。首先，设置该机器人的初始位置（机械臂水平伸直状态），并完成关节角度传感器的初始化（20 个关节角度传感器在机器人初始位置时的角度均为 0°）；然后，通过关节角度传感器测量的关节角度以及机器人关节空间到任务空间的正运动学模型进行机器人位姿重建，即利用公式(2)计算各个关节段中心在机器人基坐标系下的三维坐标。

2.2 全臂形闭环控制器

全臂形闭环控制器的目标是使机械臂所有关节角度达到期望值，这需要推导机械臂关节角速度与驱动绳速度之间的映射关系，通过调节驱动绳速度实现对机械臂关节角度的控制。对驱动绳长与关节角度的关系公式(4)两边求导，可得到驱动绳速度与关节角速度之间的关系为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{l}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}\boldsymbol{q}}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{q}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{J}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{q}}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{J}$ 为关节角速度到驱动绳速度的雅可比矩阵。

设机器人期望位姿的关节角度为$\boldsymbol{q}_d$，在某一时刻关节角度传感器测得的关节角度为$\boldsymbol{q}_a$，则在该时刻的关节角度误差为

$$\boldsymbol{e}=\boldsymbol{q}_d-\boldsymbol{q}_a \tag{6}$$

对公式(6)两边同时求导并将公式(5)代入，可得

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{e}}{\mathrm{d}t}&=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{q}_d}{\mathrm{d}t}-\left(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}+\lambda\boldsymbol{I}\right)^{-1}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{l}}{\mathrm{d}t}\\&=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{q}_d}{\mathrm{d}t}-\boldsymbol{J}^{\dagger}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{l}}{\mathrm{d}t}\end{aligned} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{J}^{\dagger}$ 为雅可比矩阵的伪逆。

为使关节角度误差能够收敛，设计控制律为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{l}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{J}\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{q}_d}{\mathrm{d}t}+k\boldsymbol{e}\right) \tag{8}$$

式中：k 为正增益系数。

结合公式(7)、(8)可得到：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{e}}{\mathrm{d}t}=-k\boldsymbol{e} \tag{9}$$

由公式(9)可推导出关节角度误差为

$$\boldsymbol{e}=\mathrm{e}^{-kt} \tag{10}$$

由公式(10)可以看出，关节角度误差是一个递减的指数函数，即随时间增加，关节角度误差逐渐减小并最终收敛到零，证明全臂形闭环控制器具有稳定性。

将公式(8)计算得到的驱动绳长发送给对应的电机，即可通过角度反馈实现误差补偿。当所有关节角度误差小于预设阈值或达到最大迭代次数时，全臂形闭环控制终止。全臂形闭环控制流程如算法 1 所示。

算法 1：全臂形闭环控制算法

输入：期望关节角度、关节角度误差阈值

输出：驱动绳长、关节角度误差、实际关节角度

1：**for** $n=1,\ldots,N$ **do**
2：更新关节角度误差
3：**if** $\boldsymbol{e}<\boldsymbol{e}_t$ **then**
4：关节角度误差小于预设阈值
5：**Break**
6：**Else**
7：关节角度误差大于预设阈值
8：继续循环
9：**end if**
10：更新 $\Delta\boldsymbol{l}$
11：**return** $\Delta\boldsymbol{l}$
12：**end**
13：**return** $\boldsymbol{q}_a$ 和 $\boldsymbol{e}$

2.3 全臂形闭环控制系统结构

绳驱动超冗余连续体机器人的全臂形闭环控制系统主要由机器人、关节角度传感器、电机电调、控制板、上位机等组成，其硬件结构如图 8 所示。

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

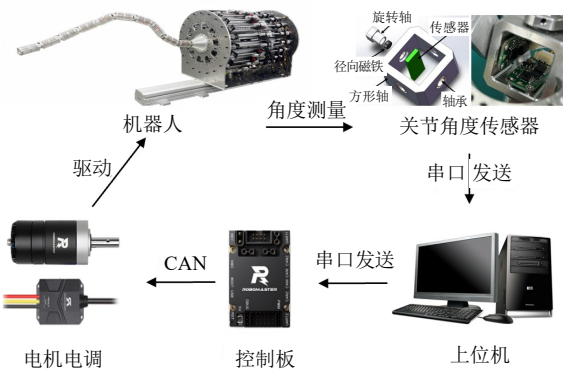


图 8　全臂形闭环控制系统硬件结构图

动力源选用大疆 M3508 电机，并搭配 C620 电调，由 24 V 直流锂电池组供电。全臂形闭环控制系统共使用 31 台 M3508 电机，其中 30 台电机分别用于驱动 30 根驱动绳，1 台电机用于驱动导轨。控制数据的收发由集成了 STM32F407 芯片的大疆 C 型控制板来完成。控制板通过 CAN 总线与电机电调通信，关节角度传感器数据通过串口发送至上位机，上位机计算出所需的驱动绳长后，通过另一串口将控制指令发送至控制板，从而执行全臂形闭环控制流程。

全臂形闭环控制系统采用双闭环架构设计，主要包括外环（基于关节角度传感器的全臂形控制模块）和内环（基于电机编码器的电机驱动控制模块）两部分，其框图如图 9 所示。

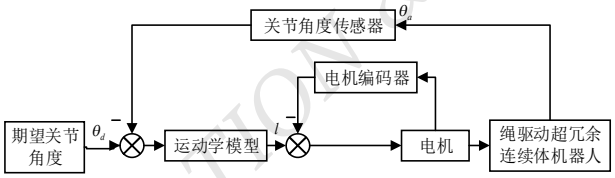


图 9　全臂形闭环控制系统框图

全臂形控制模块先将关节角度传感器实时测量的关节角度与期望关节角度相减得到关节角度误差，再将关节角度误差输入运动学模型，计算所需的驱动绳长，并传输到电机驱动控制模块，使绳驱动超冗余连续体机器人关节角度逐步逼近期望关节角度。

电机驱动控制模块采用经典的 PID 控制算法，对每个 M3508 电机实际转角与目标转角的差值进行比例（P）、积分（I）和微分（D）控制量的加权组合运算。通过合理调节 PID 参数，该模块可使 M3508 电机快速稳定地运动到期望位置，进而带动驱动绳达到期望长度。

3　实验验证

为验证本文提出的全臂形闭环控制方法的有效性，利用绳驱动超冗余连续体机器人进行重复定位精度、负载能力、全臂形控制精度、复杂狭窄环境穿越性能实验。

3.1　重复定位精度实验

重复定位精度直接关系到机器人在大量重复性作业任务中的可靠性。重复定位精度实验使绳驱动超冗余连续体机器人所有关节角度在 5°、−5°时的 2 种位姿以及零位姿（所有关节角度为 0°，伸直状态）之间做 10 次往复运动，如图 10 所示。

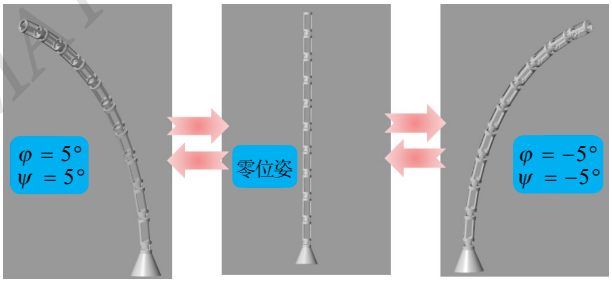


图 10　重复定位精度实验机器人位姿示意图

在机器人每次运动到目标位置时，采用激光跟踪仪测量其末端位姿，并对所得坐标进行重复定位误差分析，结果如表 2 所示。

表 2　重复定位误差分析　　单位：mm

坐标轴	平均重复定位误差	最大重复定位误差
X	0.59	1.24
Y	0.66	1.30
Z	0.71	1.45

由表 2 可知，绳驱动超冗余连续体机器人在 X、Y、Z 轴上的最大重复定位误差均在 1.50 mm 内，表明该机器人具有较高的重复定位精度。

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

3.2 负载能力实验

负载能力决定了绳驱动超冗余连续体机器人在正常工作状态下末端能够携带工具的质量。负载能力实验过程中，机器人的初始、最终位姿如图 11 所示。



(a) 初始位姿　　(b) 最终位姿

图 11 负载能力实验机器人位姿示意图

绳驱动超冗余连续体机器人在初始位姿下逐步增加负载（200、400、600、800、1 000 g 砝码）。受重力影响，负载将引起机器人末端在竖直方向产生位移。利用激光跟踪仪测量机器人末端位置相对于零负载状态下的竖直方向位移，结果如表 3 所示。

表 3 不同负载下机器人末端在竖直方向的位移

负载/g	位移/mm
200	2.15
400	4.61
600	13.11
800	24.56
1 000	38.69

随后，分别利用开环控制、全臂形闭环控制方法使机器人带负载运动至期望位姿，并通过搭载的关节角度传感器测量关节角度，计算关节角度平均误差，结果如表 4 所示。

表 4 机器人带负载运动时关节角度平均误差

负载/g	开环控制关节角度平均误差/(°)	闭环控制关节角度平均误差/(°)
200	0.74	0.32
400	1.02	0.39
600	1.52	0.48
800	2.11	0.81
1 000	2.64	0.86

由表 4 可知：开环控制的关节角度平均误差随负载增加而增大；全臂形闭环控制方法可有效减小关节角度平均误差，但随着负载增加，其关节角度平均误差也会增大，说明该机器人的承受负载能力存在上限（1 kg）。

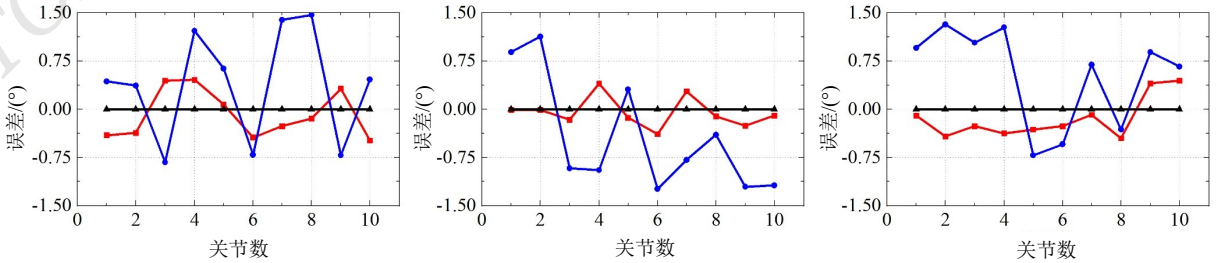
3.3 全臂形控制精度实验

全臂形控制精度实验分为 6 组，每组均设定不同的机器人期望关节角度（俯仰的单独旋转、偏航的单独旋转、俯仰和偏航同时旋转），具体如表 5 所示。

表 5 机器人期望关节角度

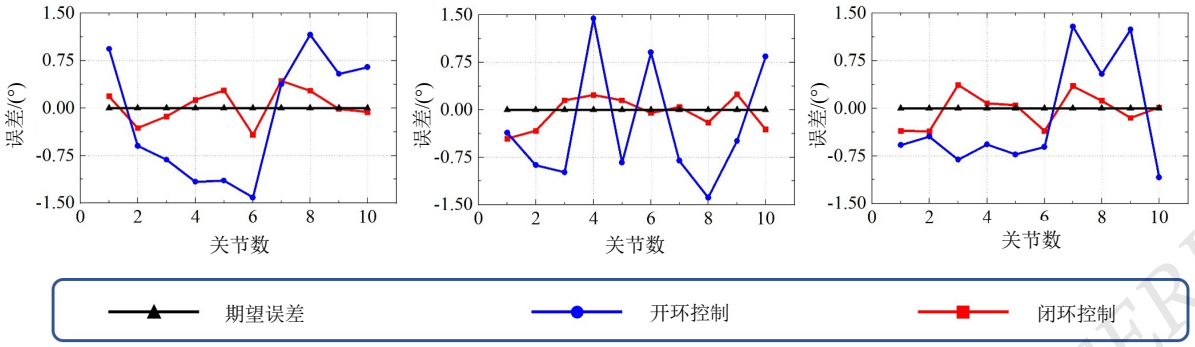
组别	期望关节角度
1	$\varphi_i = 5°,\ \psi_i = 0°$
2	$\varphi_i = -5°,\ \psi_i = 0°$
3	$\varphi_i = 0°,\ \psi_i = 5°$
4	$\varphi_i = 0°,\ \psi_i = -5°$
5	$\varphi_i = 5°,\ \psi_i = 5°$
6	$\varphi_i = -5°,\ \psi_i = -5°$

设定关节角度误差阈值为 0.5°，以保证控制精度和对比有效性。在开环控制、全臂形闭环控制方法下，记录绳驱动超冗余连续体机器人实际关节角度与期望关节角度之间的误差，误差曲线如图 12 所示。



(a) 实验组 1 误差曲线　(b) 实验组 2 误差曲线　(e) 实验组 3 误差曲线

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING



(d) 实验组 4 误差曲线　　(e) 实验组 5 误差曲线　　(f) 实验组 6 误差曲线

图 12　全臂形控制关节角度误差曲线

由图 12 可知：在全臂形闭环控制下，各关节角度均被控制在允许误差范围内；在开环控制下，关节角度误差较大，绳驱动超冗余连续体机器人臂形明显偏离期望姿态，表明全臂形闭环控制方法具有良好的控制精度。

为验证本文提出的全臂形闭环控制方法的优越性，将本文方法与其他 3 种全臂形控制方法（柔顺控制[13]、张力构型控制[21]、张力位置控制[22]）在最大控制误差、自由度两方面进行比较，结果如表 6 所示。

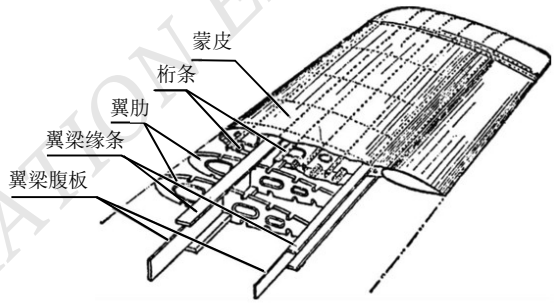
表 6　4 种控制方法效果对比

方法	最大控制误差/(°)	自由度
本文方法	0.5	20
柔顺控制	0.5	10
张力构型控制	0.8	24
张力位置控制	0.6	10

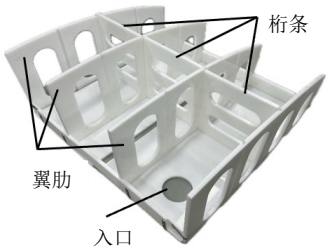
由表 6 可知，本文提出的全臂形闭环控制方法具有更高的控制精度，适用于高自由度绳驱动超冗余连续体机器人的全臂形控制。

3.4　复杂狭窄环境穿越性能实验

为验证本文提出的全臂形闭环控制方法在复杂狭窄环境下的穿越性能，利用绳驱动超冗余连续体机器人进行飞机油箱穿越实验。飞机油箱的结构图及模拟实验台如图 13 所示。



(a) 飞机油箱结构图



(b) 飞机油箱模拟实验台

图 13　飞机油箱的结构图及模拟实验台

由图 13 可知，飞机油箱主要由桁条、翼肋、翼梁缘条等组成，结构复杂，存在各种隔板和管道，传统机器人难以进入。

为模拟真实场景，绳驱动超冗余连续体机器人沿飞机油箱模拟实验台入口进入油箱内部，随后穿越桁条和翼肋，到达检测目标点，穿越过程如图 14 所示。

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

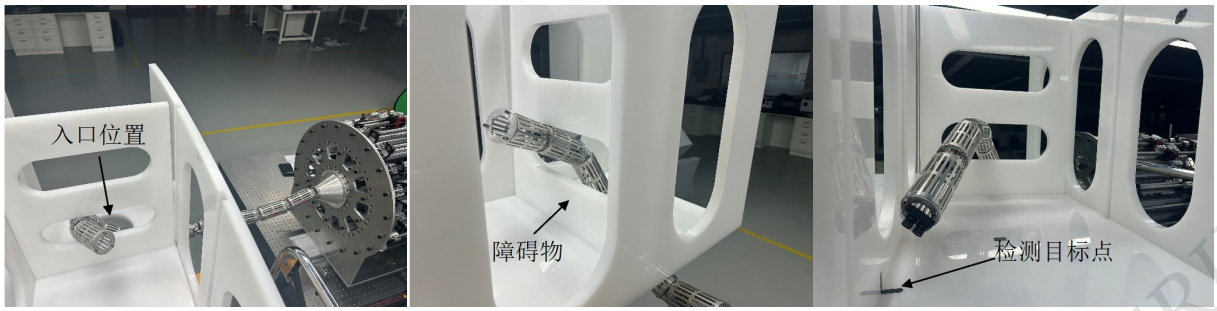


图 14　飞机油箱模拟实验台穿越过程

由图 14 可知，绳驱动超冗余连续体机器人从飞机油箱模拟实验台的入口进入后，能够有效避开桁条、翼肋等障碍物，在不同油箱舱体之间无障碍穿越。在 10 次连续重复穿越实验过程中，机器人的最大关节角度误差为 0.5°，验证了全臂形闭环控制方法的有效性以及利用该机器人实现飞机油箱检测的可行性。

4　结论

本文针对绳驱动超冗余连续体机器人臂形控制难题，提出了一种基于角度反馈的全臂形闭环控制方法。通过在机器人各关节段集成关节角度传感器，实时采集关节角度，构建覆盖整条机械臂的全臂形闭环控制系统；通过关节角度传感器获取机器人的实时位姿，基于关节角度误差计算驱动绳长，实现关节角度误差补偿，从而对机器人全臂形进行精确调节与控制。基于本文设计的 21 自由度绳驱动超冗余连续体机器人，建立运动学模型并进行实验验证。实验结果表明，该全臂形闭环控制方法能够实现期望关节角度的高精度跟踪，关节角度平均误差控制在 0.5°以内，末端最大重复定位精度均在 1.50 mm 内，且在负载能力和复杂狭窄环境穿越性能实验中表现出良好效果。该方法有效提升了绳驱动超冗余连续体机器人的控制精度和稳定性，验证了其在复杂狭窄环境中执行任务的可行性和优势，为绳驱动超冗余连续体机器人的应用提供坚实的理论基础和技术支撑。考虑到驱动绳在套管内的非线性摩擦与迟滞效应对控制性能的影响，后续研究将致力于驱动绳迟滞补偿，探索变增益或自适应补偿算法，以进一步提升机器人在动态作业场景下的全臂形跟踪响应速度与稳态精度。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

参考文献

[1] 赵强,岳永恒.仿生连续体机器人的研究现状和展望[J].机械设计,2009,26(8):1-6.

[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] 高庆吉,王维娟,牛国臣,等.飞机油箱检查机器人的仿生结构及运动学研究[J].航空学报,2013,34(7):1748-1756.

[4] YANG Z, YANG L, SUN Y, et al. A Novel contact-aided continuum robotic system: Design, modeling, and validation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2024,40:3024-3043.

[5] 杨来浩,孙瑜,杨浙帅,等.工业微创手术：航空发动机原位检修连续体机器人技术及应用[J].应用基础与工程科学学报,2026,34(1):1-23.

[6] BURGNER-KAHRS J, RUCKER D C, CHOSET H. Continuum robots for medical applications: A survey[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015,31(6):1261-1280.

[7] WOLF A, BROWN H B, CASCIOLA R, et al. A mobile hyper redundant mechanism for search and rescue tasks[C]. Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)(Cat. No. 03CH37453). IEEE, 2003,3:2889-2895.

[8] XU W, LIU T, LI Y. Kinematics, dynamics, and control of a cable-driven hyper-redundant manipulator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018,23(4):1693-1704.

[9] ZHENG Y, WU B, CHEN Y, et al. Design and validation of cable-driven hyper-redundant manipulator with a closed-loop

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING

puller-follower controller[J]. Mechatronics, 2021,78:102605.

[10] PENG Y, YANG L, SUN Y, et al. Novel claw-type continuum robots: design, modeling, and control[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2025,20(3):18.

[11] YANG Z, YANG L, SUN Y, et al. Comprehensive kineto-static modeling and morphology characterization of cable-driven continuum robots for in-situ aero-engine main-tenance [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2023, 18(3): 40.

[12] LI W, HUANG X, YAN L, et al. Force sensing and compliance control for a cable-driven redundant manipulator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023,29(1): 777-788.

[13] WANG Z, HU D, WAN D, et al. An improved inverse kinematics solution method for the hyper‐redundant manipulator with end‐link pose constraint[J]. Journal of Field Robo-tics, 2024,41(6):1900-1921.

[14] MU Z, YUAN H, XU W, et al. A segmented geometry method for kinematics and configuration planning of spatial hyper-redundant manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018,50(5): 1746-1756.

[15] YANG L, ZHENG Y, SUN Y, et al. Online optimization enhanced closed-loop control of multi-section continuum robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2025,189: 104986.

[16] HAO J, SONG D, HU C, et al. Two-dimensional shape and distal force estimation for the continuum robot based on learning from the proximal sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2023,23(10):10836-10846.

[17] LI M, KANG R, BRANSON D T, et al. Model-free control for continuum robots based on an adaptive Kalman filter[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(1):286-297.

[18] PARK J, JANG S, PARK H, et al. Hysteresis compensation of flexible continuum manipulator using RGBD sensing and temporal convolutional network[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024,9(7):6091-6098.

[19] REN F, WANG X, YU N, et al. Adaptive fuzzy control for tendon-sheath actuated bending-tip system with unknown friction for robotic flexible endoscope[J]. Frontiers in Neuroscience, 2024,18:1330634.

[20] GAO Q, JI G, SUN M, et al. Dynamic hysteresis compensation for tendon-sheath mechanism in flexible surgical robots without distal perception[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2025,41:3703-3721.

[21] ZHU Z, LI Z, PENG Z, et al. Hybrid Tension and configuration control of cable-driven hyper-redundant robots for high accuracy and stability[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025,10(6):5601-5608.

[22] LIANG B, LI W, LIN B, et al. Hybrid tension-position control of cable-driven serial manipulator to improve accuracy and avoid cable slack and breakage[J]. IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics, 2024,30(2):1072-1083.

作者简介：

薛晨菲，男，2001 年生，本科，主要研究方向：绳驱动超冗余机器人。E-mail: xuechenfei@stu.xjtu.edu.cn

孙瑜，女，1985 年生，博士研究生，副教授，主要研究方向：软体机器人与柔性传感。E-mail: yu.sun@xjtu.edu.cn

文庆，男，1990 年生，硕士研究生，高级工程师，主要研究方向：无人系统与自动控制。E-mail: wenqin755@163.com

阳淼清，男，1985 年生，本科，高级工程师，主要研究方向：检验检测技术。E-mail: 272219666@qq.com

刘洋，男，1992 年生，博士研究生，高级工程师，主要研究方向：航空装备智能运维。E-mail: 18145656929@163.com

陆凌云，男，1986 年生，本科，工程师，主要研究方向：工业内窥镜技术。E-mail: info@videoscope.com.cn

陈雪峰，男，1975 年生，博士研究生，教授，主要研究方向：高端装备智能运维。E-mail: chenxf@xjtu.edu.cn

杨来浩（通信作者），男，1989 年生，博士研究生，副研究员，主要研究方向：高端装备智能运维。E-mail: yanglaihao@xjtu.edu.cn

AUTOMATION & INFORMATION ENGINEERING