

结肠镜弯曲部运动学和静力学仿真及实验研究*

潘旭东, 陈翔宇, 李跃峰, 霍红, 齐天飞

(哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨, 150001)

摘要 建立结肠镜弯曲部的仿真模型可为实现镜体弯曲部形态的精准控制打下理论基础,改进结肠镜镜体的操控性。首先,针对结肠镜弯曲部基于常曲率假设建立了弯曲部的位置运动学模型;其次,考虑到位置运动学模型对于结肠镜弯曲部在人体肠道内受力复杂的情况下假设不成立,将弯曲部等效为末端受点距的细长梁,基于欧拉伯努利梁理论推导了弯曲部二维平面下受力的静力学模型,给出大变形情况下弯曲部的弯曲形态;最后,搭建了基于双目视觉的测量装置进行实验,验证了仿真模型的可靠性。研究结果为提升内窥镜应用性能及内镜弯曲部结构的参数化设计提供帮助,为手术提供指导,并为相关工程训练医工结合项目建设提供技术支持。

关键词 结肠内窥镜;运动学;静力学;双目视觉;工程训练

中图分类号 TH77;G642

引言

结肠镜的操控性体现于对结肠镜镜体经自然腔道伸入人体到达病变位置,并完成拍摄、手术等一系列操作的精准控制。在手术中,操控性能好的结肠镜能大大减少医生的工作强度和患者痛苦,提高手术成功率^[1]。医生对于结肠镜镜体末端位置及方向的操控主要依靠旋钮来对弯曲部弯曲形态进行调节,因此需要对结肠镜弯曲部建立可靠的模型来描述弯曲部弯曲形态与各个变量之间的关系。

结肠镜弯曲部由多个串联的蛇骨环和包裹在外侧的金属编网及弹性树脂层组成,属于柔性薄壁管组合机构作为支撑的连续体结构^[2]。研究人员针对类似结构为基础的连续体机器人开拓了许多建模方法。连续体结构的建模方法可按采用的运动学理论和力学理论进行划分^[3]。向立清等^[4]基于D-H参数法对其设计绳驱动连续体机器人建立了运动学模型。文献[5-6]基于常曲率假设建立了绳驱动连续体机器人的模型。Jung等^[7]基于集总参数法建立了连续体机器人的模型。Zheng等^[8]利用离散弹簧近似连续体结构的方式建立了连续体机器人的力学模型。文献[9-10]基于能量法推导了连续体机器人的模型。文献[11-15]分别运用欧拉伯努利梁、Kirchhoff杆、Cosserat杆等经典力学理论建立了连续体机器人的力学模型。

国内外在连续体结构建模方面的研究为结肠镜弯曲部的建模提供了参考,具体的建模方法需要结合弯曲部实际结构进行分析。笔者与开立生物科技股份有限公司校企协同进行工程创新,对其公司生产的一款内窥镜产品建立表征弯曲部弯曲形态的位置运动学和静力学模型,获得弯曲部弯曲形态与牵引绳绳长变化量、牵引绳拉力及旋钮旋转角度之间的关系,并通过实验验证了仿真模型的可靠性。仿真模型有助于医生熟悉内镜使用,为手术提供指导,并为内镜弯曲部结构的参数化设计提供帮助。

1 弯曲部位置运动学模型的建立

结肠镜由插入部、操作部及导光部组成。插入部包括头端部、弯曲部及插入管。手术时医生通过转动操作部两个旋钮,可以实现弯曲部两自由度弯曲运动。弯曲部在仅受旋钮作用下其弯曲曲线近似恒曲率,牵引绳在导向环约束下呈现与弯曲部同样的形状。结肠镜弯曲部结构如图1所示。

1.1 基于常曲率假设的位置运动学模型

假设弯曲部弯曲时其形态和内部牵引绳的形态可拟合为总长度不变的常曲率连续曲线,设结肠镜弯曲部长为 l ,以弯曲部起点为原点、弯曲部初始方

* 高等教育教学改革重点委托资助项目(SJGZ20200047)

收稿日期:2023-03-20;修回日期:2023-08-22

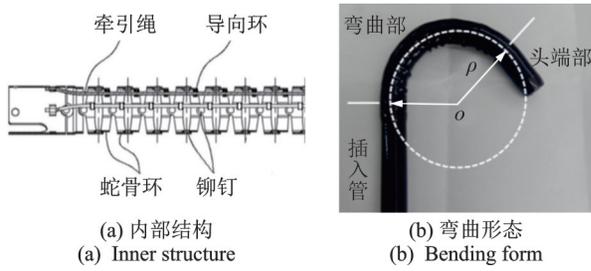


图 1 结肠镜弯曲部结构

Fig.1 Internal structure of bending part of colonoscope

向为 z 轴建立基座坐标系,其在空间中的位置可以用其中心的 1 条曲线来描述。弯曲部简化模型如图 2 所示。

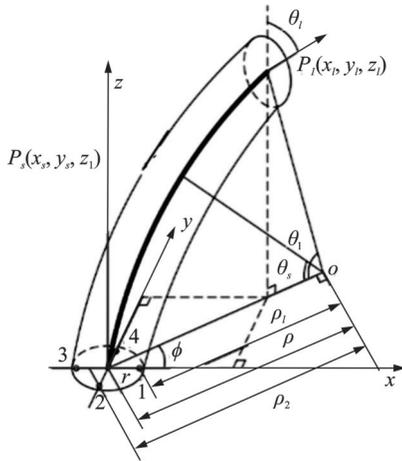


图 2 弯曲部简化模型

Fig.2 Simplified model of bending part

若已知弯曲部的末端弯曲角 θ_l 和扭转角 ϕ , 由常曲率假设可推得弯曲部任意长度 s 处的位置坐标 (x_s, y_s, z_s) 为

$$\begin{cases} x_s = \frac{l}{\theta_l} (1 - \cos \theta_s) \cos \phi \\ y_s = \frac{l}{\theta_l} (1 - \cos \theta_s) \sin \phi \\ z_s = \frac{l}{\theta_l} \sin \theta_s \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\theta_s = \frac{s}{l} \theta_l$

弯曲部弯曲时,有如下关系

$$\begin{cases} \Delta l_1 = (\rho - \rho_1) \theta_l = r \theta_l \cos \phi \\ \Delta l_2 = (\rho - \rho_1) \theta_l = r \theta_l \cos(\phi + \frac{\pi}{2}) \\ \Delta l_3 = -\Delta l_1 = -r \theta_l \cos \phi \\ \Delta l_4 = -\Delta l_2 = -r \theta_l \cos(\phi + \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (2)$$

设 R 为旋钮控制链轮的半径, φ_1 和 φ_2 为镜体大

旋钮和小旋钮对应的转角,可得到绳长变换与操作部旋钮转角之间的关系为

$$\begin{cases} \Delta l_1 = -\Delta l_3 \\ \Delta l_2 = -\Delta l_4 \\ |\Delta l_1| = |\Delta l_3| = R \varphi_1 \\ |\Delta l_2| = |\Delta l_4| = R \varphi_2 \end{cases} \quad (3)$$

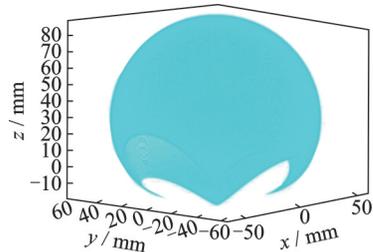
经过整理,可得到镜体位置坐标与旋钮转动角度之间的关系为

$$\begin{cases} x_s = \frac{l}{\theta_l} (1 - \cos \theta_s) \cos \phi \\ y_s = \frac{l}{\theta_l} (1 - \cos \theta_s) \sin \phi \\ z_s = \frac{l}{\theta_l} \sin \theta_s \end{cases} \quad (4)$$

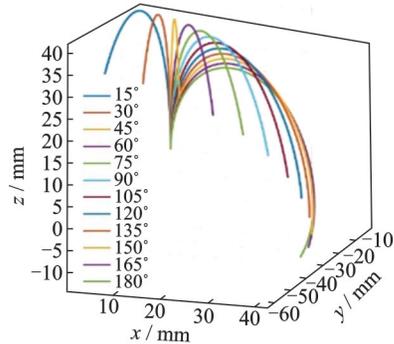
其中: $\phi = \arctan(-\frac{\varphi_2}{\varphi_1})$; $\theta_l = \frac{R \varphi_1}{r \cos \phi}$; $\theta_s = \frac{s}{l} \theta_l$

1.2 位置运动学模型仿真分析

设定该内窥镜参数 $R=5 \text{ mm}$, $r=5 \text{ mm}$, $l=90 \text{ mm}$, 旋钮转角 φ_1 和 φ_2 为变量,代入式(4),其中 s 从 0 取到 l ,可求出拟合曲线上各点坐标。取 $\varphi_1 \in [-\pi, \pi]$, $\varphi_2 \in [-8\pi/9, 8\pi/9]$, 绘制工作空间图,根据一系列旋钮转角 φ_1 和 φ_2 , 绘制弯曲部弯曲形态。位置运动学模型仿真结果如图 3 所示。可看出,弯曲部工作空间近似分布于一个缺口的球面上。



(a) 工作空间图
(a) Workspace diagram



(b) 弯曲部形态仿真($\varphi_2=6\pi/9$)
(b) Shape simulation of bending part ($\varphi_2=6\pi/9$)

图 3 位置运动学模型仿真结果

Fig.3 Simulation results of position kinematics model

2 弯曲部静力学模型

2.1 弯曲部静力学分析

对于结肠镜弯曲部在人体肠道内受力复杂的情况下,位置运动学模型假设不成立,故需要对弯曲部建立静力学模型。

根据文献[12],对于肌腱驱动连续体机器人在二维平面内的受力,可简化为末端受纯点距的细长梁模型。因此,将弯曲部变形特征近似于细长梁,其在二维情况下受牵引绳拉力的作用效果等效为末端受纯弯矩的作用。当结肠镜手术时,将弯曲部受外力作用的情况等效为其末端额外受到一个附加弯矩和力的受力情况。弯曲部受力图如图4所示,可基于欧拉-伯努利梁理论求其解。

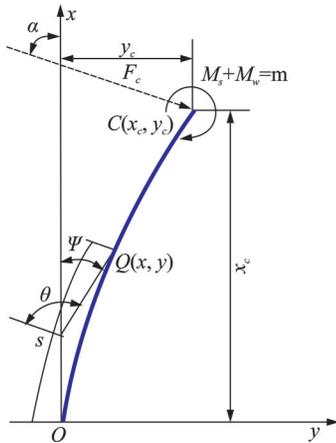


图4 弯曲部受力图

Fig.4 Bending force diagram

直角坐标系下 $Q(x, y)$ 处的变形方程为

$$M = EI \frac{d\psi}{ds} = -EI \frac{d^2 y/dx^2}{[1 + (dy/dx)^2]^{3/2}} \quad (5)$$

其中: $d\psi/ds$ 为曲率。

弯曲部所受力矩之和为

$$M = F_c [\sin \alpha (x_c - x) + \cos \alpha (y_c - y)] + M + M_c \quad (6)$$

将式(5)代入式(6),两边对 s 求导得

$$EI \frac{d^2 \psi}{ds^2} = -F_c (\sin \alpha \cos \psi + \cos \alpha \sin \psi) = -F_c \sin(\alpha + \psi) \quad (7)$$

设 $u = s/l, \theta = \alpha + \psi$,其中 $u \in [0, 1], \theta \in [\alpha, \alpha + \psi_l]$,对式(7)进行如下变量替换: $\frac{d\psi}{ds} = \frac{1}{l} \frac{d\theta}{du}, \frac{d^2 \psi}{ds^2} = \frac{1}{l^2} \frac{d^2 \theta}{du^2}$,可以获得非线性二阶微分方程表示的弯曲

部变形模型,即

$$\begin{cases} \theta'' = f(u, \theta, \theta') & (0 \leq u \leq 1) \\ \theta(0) = \alpha \\ \theta'(1) = (M_c + M)/EI \end{cases} \quad (8)$$

其中: $f(u, \theta, \theta') = -\frac{F_c l^2}{EI} \sin \theta$ 。

获得弯曲部受力变形后的形态为

$$\begin{cases} x(u_0) = l \int_0^{u_0} \cos \psi du \\ y(u_0) = l \int_0^{u_0} \sin \psi du \end{cases} \quad (9)$$

其中: u_0 为0到1任意数值;点 $(x(u_0), y(u_0))$ 为在弯曲部长 $s = u_0 l$ 处的坐标。

2.2 静力学模型数值求解

对式(8)采用数值积分的方式,利用bvp5c求解器进行求解。取 $EI = 10^5 \text{ N}\cdot\text{mm}^2, F_c = 50 \text{ N}, M = 300 \text{ N}\cdot\text{mm}, \alpha = \pi, l = 90 \text{ mm}, M_c = 50 \text{ N}\cdot\text{mm}$,先求解出 $\theta(u)$ 的数值解,利用三次多项式对其进行拟合,将结果代入式(9)中,求得弯曲部受外力作用下的几何图像。静力学模型仿真结果如图5所示。

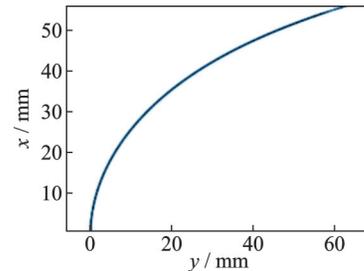


图5 静力学模型仿真结果

Fig.5 Static model simulation results

将外界条件改为 $F_c = 1 \text{ N}, M = 1 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 的小变形情况,将方程计算结果与材料力学简化情况结果进行比较,误差在0.1%以下,可认为微分方程数值求解结果可靠。

3 弯曲部仿真模型验证实验

3.1 实验方案及测量装置的搭建

为了验证弯曲部仿真模型,对结肠镜弯曲部和其内部结构蛇骨进行相关实验。运动学模型需要验证常曲率假设及各变量间对应关系的准确性,静力学模型需要证明牵引绳拉力与弯曲角成线性关系。

仿真模型验证装置如图6所示。其中,基于双目视觉的弯曲部形状检测装置和蛇骨测量装置如

图6(a,d)所示,前者拍摄弯曲部,经过处理获得标记点的三维坐标,用空间圆进行拟合,来获取弯曲部的弯曲形态,三维坐标点测量精度在0.5 mm以内。相机拍摄照片和处理得到的三维点展示如图6(b,c)所示,后者利用数显标尺和拉力计测量牵引绳的拉力和位移。

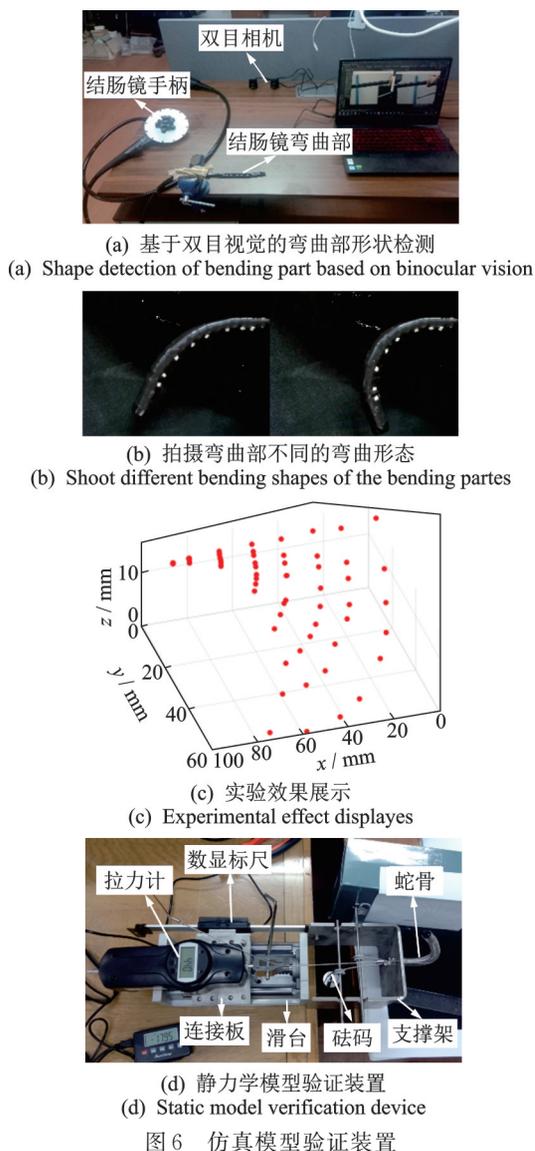


Fig.6 Simulation model verification device

3.2 高校工训项目实验

为深化创新创业人才培养体制机制改革,实现实践教学体系与创新更好的对接,培养医工交叉的复合型人才,以3.1节所设计的验证实验为例,探索高校工训教育的创新与改进方向。本实验可以作为一个虚拟仿真的工程训练项目,以基于双目视觉的弯曲部形状检测实验为例,通过编程、软件处理数据和具体实验的过程,逐步了解双目视觉测量装置及

内窥镜的工作原理,通过仿真模型和实验结果掌握内窥镜的工作状态。该实验的特色在于“医工结合”,注重“工为医用”,从面向临床需求且具有创新性的科学问题出发,通过实际实验证明理论分析和仿真的正确性。

3.3 位置运动学模型验证实验

运动学模型验证实验结果如图7所示。当一旋钮转角为0时,利用3.1节中所述装置测量弯曲部弯曲角与另一旋钮转角的对应关系,如图7(a)所示。当一组牵引绳位于初始状态时,弯曲部内部结构蛇骨弯曲角度与另一组牵引绳位移的关系如图7(b)所示。

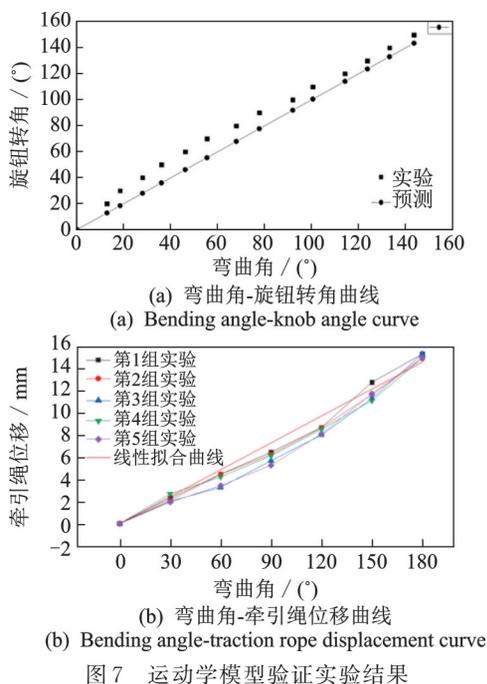


Fig.7 Kinematic model verifies experimental results.

所得实验数据中,由弯曲部上的标记点坐标最小二乘拟合出的平面的圆整度误差,以及在平面中拟合出来的空间圆圆度误差都小于0.4 mm,说明对于标记点数据处理的处理误差满足要求,弯曲部的弯曲形态符合常曲率假设。

图7(a)中旋钮转角随弯曲角线性增大,但实际转角比预估的转角偏大。图7(b)中利用蛇骨测量牵引绳位移和弯曲角间的关系,曲线线性拟合相关系数 $R^2=0.99$,原模型预测斜率与拟合斜率相对误差为6.8%。

实验结果表明,位置运动学模型可以近似描述结肠镜弯曲部旋钮转角、牵引绳位移和弯曲角之间的变化关系。实验值与预估值存在偏差主要是因为

用于约束牵引绳的蛇骨导向环以及长约1 m插入部中的弹簧管与牵引绳间存在间隙,牵引绳位移时有冗余绳长影响,使得模型预估值与实验值有一定偏差。实际应用当中,可以根据具体情况对位置运动学模型进行修正。

3.4 静力学模型验证实验

静力学模型验证实验结果如图8所示。对待测牵引绳以外的3根牵引绳悬吊钩码,分别施加1 N的张紧力,记录蛇骨弯曲角与待测牵引绳张力的关系,结果如图8(a)所示。对于蛇骨弯曲角度较小的区间(0° , 105°),用线性函数进行最小二乘拟合,拟合效果如图8(b)所示,曲线拟合相关系数 $R^2=0.93$ 。各组数据存在一定偏差,这是因为蛇骨弯曲时牵引绳在导向环的间隙和重力使得蛇骨弯曲时的方向有略微差异,导致牵引绳对弯曲部的作用效果不完全一致。

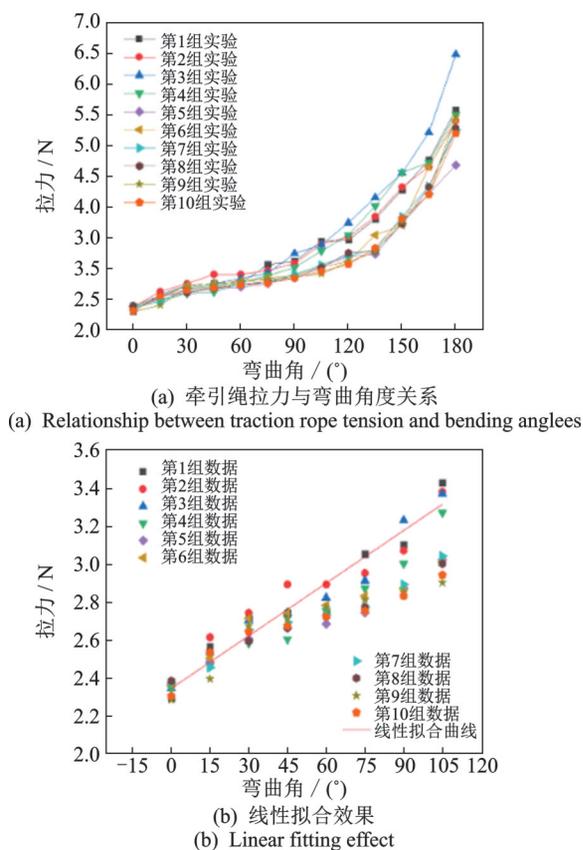


图8 静力学模型验证实验结果

Fig.8 Static model verifies the experimental results

实验结果表明,在蛇骨弯曲角度较小的区间(0° , 105°),可以近似看作弯曲角度随牵引绳张力线性增大,此时可用静力学模型求解其弯曲形态,测出给定弯曲角度区间内一处弯曲角的等效力矩后,可

以推出等效细长梁的弯曲刚度,则确定了等效模型的参数。当弯曲部或带金属编网蛇骨在给定弯曲角度区间内受其他外力产生力变形时,其弯曲形态就可以用等效模型进行进一步计算。因此,当弯曲角度小于 105° 时,静力学模型近似成立;当弯曲角度大于 105° 之后,蛇骨环内摩擦力影响不可忽视,此时可考虑用其他模型进行计算。

4 结论

1) 基于常曲率假设建立了结肠镜弯曲部的位置运动学模型,绘制出弯曲部的工作空间图,以及给定旋扭转角下的弯曲部弯曲形态。

2) 对于弯曲部在受外界力作用下不符合常曲率假设的情况,将弯曲部等效为细长梁简化为末端受纯弯矩和力的模型,给出微分方程表示的弯曲部形态,并利用数值求解的方法求出其在大变形下的弯曲形态。

3) 搭建实验装置进行实验,验证了弯曲部位置运动学和静力学模型的可靠性。结果表明,位置运动学模型可以近似描述旋扭转角与弯曲角的关系,但牵引绳在导向环和弹簧管内位移的冗余绳长会影响模型的准确度,在弯曲部弯曲角度较小时,静力学模型近似成立。

参 考 文 献

- [1] 李言民, 郝思文, 杨臻达, 等. 主从式胃镜介入机器人系统[J]. 机器人, 2016, 38(1): 107-114.
LI Yanmin, HAO Siwen, YANG Zhenda, et al. Robot-assisted master-slave system for gastroscopy intervention[J]. Robot, 2016, 38(1): 107-114.(in Chinese)
- [2] 孙立宁, 胡海燕, 李满天. 连续型机器人研究综述[J]. 机器人, 2010, 32(5): 688-694.
SUN Lining, HU Haiyan, LI Mantian. A review on continuum robot[J]. Robot, 2010, 32(5): 688-694.(in Chinese)
- [3] BURGNER-KAHR J, RUCKER D C, CHOSET H. Continuum robots for medical applications: a survey [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(6): 1261-1280.
- [4] 向立清, 鞠锋, 齐飞, 等. 用于航空发动机原位检测的连续体机器人运动研究[J]. 机电工程, 2019, 36(5): 464-469, 528.
XIANG Liqing, JU Feng, QI fei, et al. Kinematics research of continuum robot for in-situ detection of aero-engine[J]. Mechanical & Electrical Engineering Maga-

- zine, 2019, 36(5): 464-469, 528.(in Chinese)
- [5] 殷杰. 面向微创介入手术的连续体机器人研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [6] 牛国臣, 张云霄. 连续型机器人运动学仿真和操控系统设计[J]. 智能系统学报, 2020, 15(6): 1058-1067. NIU Guochen, ZHANG Yunxiao. Kinematics simulation and control system design of continuous robot[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15(6): 1058-1067.(in Chinese)
- [7] JUNG J, PENNING R S, FERRIER N J, et al. A modeling approach for continuum robotic manipulators: Effects of nonlinear internal device friction[C]//2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco: IEEE, 2011: 5139-5146.
- [8] ZHENG T, BRANSON D T, KANG R, et al. Dynamic continuum arm model for use with underwater robotic manipulators inspired by octopus vulgaris[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul: IEEE, 2012: 5289-5294.
- [9] 康荣杰, 刘跃, 耿仕能, 等. 丝驱动连续型机器人的建模与避障控制[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(6): 651-660. KANG Rongjie, LIU Yue, GENG Shineng, et al. Modeling and obstacle avoidance control of wire-driven continuum robot[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Edition), 2021, 54(6): 651-660.(in Chinese)
- [10] 李欣. 单段连续机器人的阻抗控制研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2021.
- [11] GRAVAGNE I A, RAHN C D, WALKER I D. Large deflection dynamics and control for planar continuum robots [J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(2): 299-307.
- [12] RUCKER D C, WEBSTER R J. Statics and dynamics of continuum robots with general tendon routing and external loading [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 27(6): 1033-1044.
- [13] 康荣杰, 孙慈晶. 混合驱动连续型机器人设计[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(4): 362-368. KANG Rongjie, SUN Cijing. Design of a hybrid-driven continuum robot[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Edition), 2019, 52(4): 362-368.(in Chinese)
- [14] 郭立瑶. 非恒曲率丝驱动连续体建模方法与精度测定研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [15] 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 Fei, SHE Shigang, GAO Shuyuan, 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.(in Chinese)



第一作者简介:潘旭东,男,1977年1月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为信号检测与处理、教育信息化及医疗机器人。
E-mail:pxd@hit.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学和全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为EI Compendex数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价30元,全年180元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街29号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332
邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdc.nuaa.edu.cn