

DOI:10.11784/tdxbz202312034

中空连续体机械臂的设计与主从任务转换避障控制

万淑敏, 孙长超, 袁培康, 常乐, 康荣杰

(天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要: 连续体机械臂具有优良的弯曲性能和柔顺灵活性, 表现出了独特的环境适应性和人机交互安全性, 在微创手术、灾后救援、狭窄空间检修等非结构化环境及家庭服务领域具有广阔的应用前景。然而, 连续体机械臂的中央脊椎骨占据其内部空间, 模块单元冗余且运动耦合导致避障运动困难等问题妨碍了其在实际场景中的应用。针对以上问题, 设计了内部中空丝驱动连续体机械臂, 为末端执行器的电液气管线留置出了充足的物理空间, 并通过鲍登管在结构上实现了模块单元间的运动解耦; 考虑丝驱动连续体机械臂的弯曲特性, 建立了解耦后的简化运动学模型和运动学闭环控制算法; 构造了评估空间障碍物与连续体机械臂最短距离的计算方法; 在传统变构型避障运动控制的基础上, 提出了基于主从任务转换的避障控制算法, 能够在末端轨迹跟踪约束下, 实现对障碍物的躲避, 同时也可暂时舍弃对给定末端轨迹的跟踪以躲避位于末端运动轨迹附近的障碍物。仿真和实验结果表明: 所设计的连续体机械臂具有良好的运动能力, 轨迹跟踪控制的末端位置平均误差为 2.510 mm, 仅为连续体机械臂长度的 0.32%; 提出的主从任务转换避障控制算法有效, 能够准确评估末端运动与避障运动的优先级, 相关研究工作为连续体机械臂的设计和运动控制提供了新的参考和思路。

关键词: 连续体机械臂; 解耦; 避障; 主从任务转换

中图分类号: TH128

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)01-0024-12

Design and Master-Slave Task Switching Obstacle Avoidance Control of a Hollow Continuum Manipulator

Wan Shumin, Sun Changchao, Yuan Peikang, Chang Le, Kang Rongjie

(Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Continuum manipulators (CMs) exhibit excellent bending performance and flexibility as well as unique environmental adaptability and human-machine interaction safety. Therefore, they have broad application prospects in unstructured environments such as minimally invasive surgery, post-disaster rescue, narrow space maintenance, and home services. However, the central backbone of CMs occupies their internal space, and motion coupling between their redundant modules hampers obstacle avoidance control and poses challenges to their practical application. To solve these problems, a wire-driven hollow CM was designed to leave sufficient physical space for the electric-liquid-gas pipelines of the end-effector and decoupling between its modules was realized using a Bowden tube in the structure. Considering the bending characteristics of the wire-driven CM, a simplified kinematic model and kinematic closed-loop control algorithm after decoupling were established. Furthermore, a method for calculating the shortest distance between obstacles and CMs was developed. Based on the traditional variable configuration obstacle avoidance control, an obstacle avoidance control algorithm based on master-slave task switching was proposed. This algorithm allowed the CM to avoid obstacles under the constraint of end trajectory tracking and could temporarily abandon tracking of the given end trajectory to avoid obstacles near this trajectory. Simulated and experimental results show

收稿日期: 2023-12-29; 修回日期: 2024-03-08.

作者简介: 万淑敏 (1964—), 女, 博士, 副教授, wanshumin@tju.edu.cn.

通信作者: 康荣杰, rjkang@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52375023).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52375023).

that the CM has good motion ability and that the average error of the end position of trajectory tracking control is 2.510 mm, which is only 0.32% of the length of the CM. The proposed algorithm is effective and can accurately evaluate the priority of end motion and obstacle avoidance motion. This research provides a new reference and idea for the design and motion control of CM.

Keywords: continuum manipulator (CM); decoupling; obstacle avoidance; master-slave task switching

连续体机械臂是一种不含离散关节和刚性连杆的新型仿生机械臂,其设计灵感来源于象鼻、章鱼触手等动物器官中的柔性结构^[1],具有良好的柔顺性和环境适应性.与传统的刚性机械臂相比,连续体机械臂在复杂、非结构化的环境中表现出了良好的探索和操作能力,例如,在倒塌的建筑物中执行搜索和救援任务^[2],在人体复杂狭小的腔道中进行医疗检查和救治^[3],在飞机发动机涡扇、核反应容器等受限和危险环境中执行检查和维修操作^[4],同时,其在家庭服务等任务中表现出的人机交互安全性也开始受到研究人员的关注.

连续体机械臂本体一般由柔性脊椎骨(通常为合金弹性杆,用于提供支撑和产生弯曲变形或弯曲运动)、驱动柔索(用于驱动)和约束盘(用于约束驱动柔索)组成^[5].根据柔性脊椎骨的分布位置,连续体机械臂可以分为中央脊椎骨式连续体机械臂和周围脊椎骨式连续体机械臂.中央脊椎骨式连续体机械臂^[6-7]由位于约束盘中央的弹性杆或柔性关节提供支撑和产生弯曲运动,这种结构变形柔顺、运动学模型相对简化,但是中央脊椎骨的存在,使得内部空间不连续、利用率不高,难以通过大直径的电液气管线(如充电管线、加油管线等),限制了末端的任务能力.因此,有研究人员将产生柔顺变形和支撑的弹性体或其他结构分布在连续体机械臂的圆周上以形成内部连续中空.潘琪琪等^[8]提出了一种切口式连续体手术机械臂,在镍钛合金管上激光切出4个相邻交错的半圆切口,形成两自由度中空连续体机械臂.Wang等^[9]提出了由上下表面为凹凸半球面的骨干单元组成的连续体手术机械臂,骨干单元的中心孔为手术钳提供通道.Ma等^[10]提出通过铆钉实现蛇形柔性结构相邻部件的可转动连接,然后进行正交排布,形成了中空的连续体机械臂.但上述结构多用在连续体手术机械臂上,结构尺寸较小(直径一般小于10 mm),如果增大结构尺寸,会增加连续体机械臂的自重,影响其负载能力和控制精度.Zhang等^[11]和Dong等^[12]的工作也为中空连续体机械臂的设计提供了思路.

连续体机械臂通常由多个模块单元组成,远端模块单元的驱动丝需要穿过近端模块单元的约束盘,因此会造成运动学模型的耦合,在逆运动学求解时需要

建立相应的数学模型实现解耦运动^[13],这增加了运动学模型的复杂程度,在实际应用中会造成运动学控制的误差积累、精度降低和效率下降.为了解决逆运动学求解复杂的问题,Garg等^[14]构建了一种基于可逆神经网络的逆运动学求解器,并在不同的模型参数下对其性能进行了评价.Yang等^[15]提出了一种基于机器学习的运动学参数辨识方法.周圆圆等^[16]通过设计中间联动段实现了多段驱动间的解耦,能够通过逆运动学实现连续体机械臂的运动控制.

利用连续体机械臂较多的冗余自由度可以进行避障控制,为其在非结构化环境中的应用奠定了基础.Liu等^[17]提出了一种基于梯度投影的加权附加偏差速度方法,解决了在末端轨迹已知条件下冗余机械臂的避障问题,但是冗余机械臂与障碍物的最短距离计算方法并不适用于连续体机械臂.康荣杰等^[18]提出通过构造障碍势函数评估连续体机械臂与障碍物之间的距离变化,合理地选择运动学求逆运算时雅可比矩阵的零空间变量,但是障碍物与连续体机械臂的距离仅依靠标记点进行简单评价,存在最短距离的计算偏差.申浩宇等^[19]虽然提出了一种能躲避位于末端轨迹上的障碍物的避障算法,但是没有对障碍物的位置具体区分,当障碍物远离末端轨迹时,避障算法会影响末端轨迹的跟踪精度.此外,研究人员也对连续体机械臂末端点对点运动规划过程中的避障控制开展了研究^[10].

针对以上问题,本文设计了一款内部中空的模块单元间运动解耦的连续体机械臂,其采用了正交排布周围脊椎骨、回路丝驱动、鲍登管等结构形式;将合金弹性杆和驱动丝弯曲变形特性应用到运动学建模过程,提高了运动学模型的准确性;构造了适用于连续体机械臂与障碍物的最短距离计算方法,提出了基于主从任务转换的末端运动轨迹约束下的避障控制算法.

1 丝驱动中空连续体机械臂结构设计

图1为连续体机械臂的结构设计方案,图1(a)所示的脊椎骨虽然变形柔顺,但是内部空间有限,难以内置电液气管线连接末端执行器.图1(b)所示的

双周围脊椎骨虽然内部中空,但是只能单向弯曲,工作能力有限.图 1(c)所示方案将中央脊椎骨分成两个周围脊椎骨布置于约束盘圆周上,然后依次相隔正交排布,该方案保留了内部通道,且实现了两自由度弯曲,具有较好的应用价值.

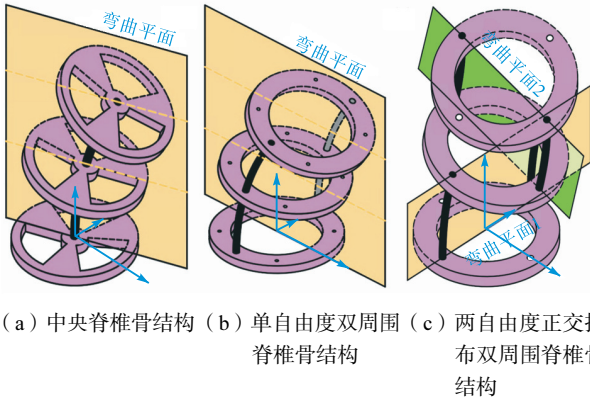


图 1 中空连续体机械臂的结构

Fig.1 Construction of a hollow continuum manipulator

图 2 为设计的连续体机械臂的三维模型,其由中空连续体机械臂本体、驱动系统和末端执行器 3 部分组成.连续体机械臂本体由 3 个模块单元组成,每个模块单元由 4 个正交节段及驱动丝构成,双合金弹性杆提高了抗弯及抗扭刚度;约束盘上布置有双侧凸台,既保证了合金弹性杆的固定稳定性,又降低了非弯曲段(仅为约束盘的厚度)的比例,保证了连续体机械臂弯曲变形的柔顺性.

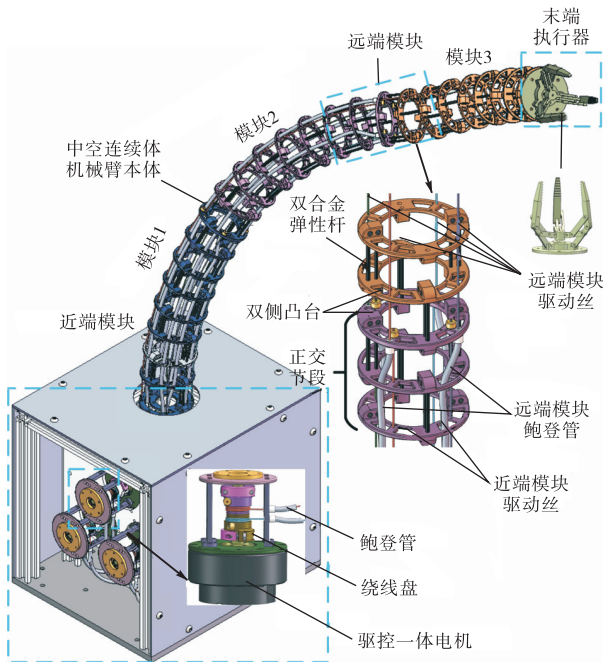


图 2 整体结构三维模型

Fig.2 Three-dimensional model of the entire structure

连续体机械臂本体的模块单元采用回路驱动,呈

180°分布的 2 根驱动丝连接到同一电机上构成回路,单模块单元仅需 2 个电机即可实现 2 个方向的弯曲运动.鲍登管能够在自身形状变化的同时,保证内部丝线的长度及运动不受影响,因此适用于丝线的远距离传动.将鲍登管的一端固定于近端模块的末端,另一端固定于驱动模块的支撑杆上,驱动远端模块的驱动丝在穿过近端模块时,使用鲍登管包覆,其长度变化时,仅会对远端模块产生驱动作用而不会驱动近端模块,这在机械结构上实现了运动学的解耦,同时也保证了驱动丝的驱动作用能够远距离传输.

驱动系统由 6 个模块化的驱动单元组成,每个驱动单元包括驱动控制一体化关节电机和驱动丝缠绕装置.驱动单元的模块化设计为连续体机械臂的扩展和维护提供了便利.为了实现不同的末端任务,可以加装不同形式的末端执行器,执行器的管线可以通过内部空间到达驱动系统,从而可以将末端执行器的驱动系统也集成到驱动箱内部,降低了末端重量对连续体机械臂运动的影响.

设计的连续体机械臂结构紧凑,总长度为 780 mm,外径为 66 mm,内部中空直径为 35 mm,连续体机械臂本体质量约为 0.6 kg,整体质量约为 8 kg.其余详细参数表示及设计尺寸如表 1 所示.与之前常见连续体机械臂的设计不同的是,所设计不同模块单元驱动丝的分布半径是不同的,而驱动丝的分布角度是相同的,具体的设计原因将在运动学建模中详细介绍.

表 1 参数符号表示及含义

Tab.1 Parameter symbol representation and meaning

参数	含义	设计数值
l/mm	弹性杆可弯曲部分的长度	30
r/mm	驱动丝分布半径	30, 25, 30
$\phi/(\text{°})$	驱动丝分布角度	45
H/mm	约束盘的厚度	2.5
n	正交节段数/模块单元	4
$R_{\text{disk}}/\text{mm}$	约束盘的半径	33

2 运动学分析与建模

对于丝驱动连续体机械臂而言,其运动是由驱动丝长度的变化驱动连续体机械臂柔顺弯曲从而形成不同的末端位姿,因此,运动学建模需要考虑 2 个映射关系,即表征驱动丝长度及其变化的驱动空间与表征连续体机械臂弯曲形态的构型空间之间的映射关系,构型空间与表征连续体机械臂末端位姿及运动速度的工作空间之间的映射关系.

驱动空间与构型空间之间的映射关系可以通过

几何分析获得,如图3所示,在正交节段的弯曲节段1中,以构成同一回路的驱动丝2和驱动丝4为例,合金弹性杆弯曲后所形成的弦长为驱动丝2、驱动丝4和相邻两约束盘构成的等腰梯形的中线,驱动丝2和驱动丝4的分布直径在弯曲节段1的弯曲平面(Oxz 平面)的投影为等腰梯形的腰长。

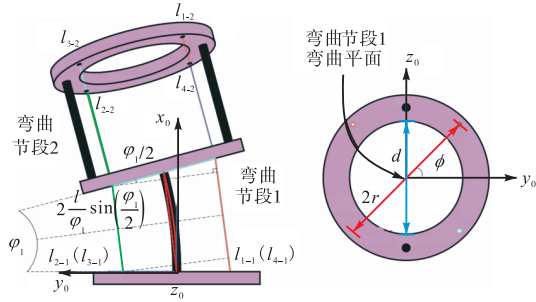


图3 正交节段的几何关系

Fig.3 Geometric relationship of orthogonal segments

弯曲节段1中,梯形的中线长度为

$$s_1 = \frac{2l}{\varphi_1} \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) \quad (1)$$

梯形的腰长为

$$d = 2r \sin \phi \quad (2)$$

式中 ϕ 为驱动丝4与 y_0 轴正方向的夹角,以此标记为驱动丝的分布角度.由几何关系可得,驱动丝2和驱动丝4在弯曲节段1中的长度为

$$\begin{cases} l_{2-1} = s_1 - d \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) \\ l_{4-1} = s_1 + d \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

驱动丝1、驱动丝3和相邻两约束盘在弯曲节段1中构成的等腰梯形的腰长为

$$d' = 2r \cos \phi \quad (4)$$

同理可得驱动丝1和驱动丝3在弯曲节段1中的长度为

$$\begin{cases} l_{1-1} = s_1 + d' \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) \\ l_{3-1} = s_1 - d' \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

弯曲节段2中所形成的梯形的中线长度为

$$s_2 = \frac{2l}{\varphi_2} \sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) \quad (6)$$

同理亦可得弯曲节段2中各驱动丝的长度,将2个弯曲节段中各驱动丝的长度分别相加,同时考虑约束盘的厚度,可以得到具有 n 个正交节段的模块单元中各驱动丝的长度,即构型空间到驱动空间的逆运动

学.观察式(7)可以看出,由于驱动丝分布角度的存在,无法通过方程联立求解的方式得到简化的由驱动丝长度或其变化量表征的构型角度的显性表达式.

$$\begin{cases} L_1 = n \left(s_1 + s_2 + d' \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) + d' \sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) + 2H \right) \\ L_2 = n \left(s_1 + s_2 - d' \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) + d' \sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) + 2H \right) \\ L_3 = n \left(s_1 + s_2 - d' \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) - d' \sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) + 2H \right) \\ L_4 = n \left(s_1 + s_2 + d' \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) - d' \sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) + 2H \right) \end{cases} \quad (7)$$

当驱动丝的分布角度 $\phi = 45^\circ$ 时,其正弦值和余弦值相等,式(7)可以简化为

$$\begin{cases} L_1 = n \left(s_1 + s_2 + \sqrt{2}r \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) + \sqrt{2}r \sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) + 2H \right) \\ L_2 = n \left(s_1 + s_2 - \sqrt{2}r \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) + \sqrt{2}r \sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) + 2H \right) \\ L_3 = n \left(s_1 + s_2 - \sqrt{2}r \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) - \sqrt{2}r \sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) + 2H \right) \\ L_4 = n \left(s_1 + s_2 + \sqrt{2}r \sin\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) - \sqrt{2}r \sin\left(\frac{\varphi_2}{2}\right) + 2H \right) \end{cases} \quad (8)$$

此时,由式(8)可以得到构型空间到驱动空间的显式表达式(9),这对运动学的分析与计算都是非常有利的,因此在设计样机时,将3个模块单元的驱动丝分布角度均设置为了 45° ,同时为了使相邻模块单元的驱动丝在相同分布角度下不发生干涉,相邻模块单元的驱动丝分布直径不同.

$$\begin{cases} \varphi_1 = 2\arcsin\left(\frac{l_1 - l_2}{2\sqrt{2}r}\right) \\ \varphi_2 = 2\arcsin\left(\frac{l_1 - l_4}{2\sqrt{2}r}\right) \end{cases} \quad (9)$$

一个弯曲节段只有一个弯曲自由度,将其弯曲等同为转动关节,则一个正交节段有2个转动关节,其D-H坐标系可以如图4建立,根据构型角度及几何关系,可以列出D-H参数,如表2所示.

此时,可以得到单正交节段的齐次变换矩阵,即

$$\mathbf{T}_{\text{seg}} = {}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot {}^2\mathbf{T}_3 \quad (10)$$

基于等曲率假设,即假设模块单元内的所有正交节段具有相同的结构和弯曲角,可以得到模块单元的齐次变换矩阵,即

$$\mathbf{T}_{\text{mod}} = (\mathbf{T}_{\text{seg}})^n = ({}^0\mathbf{T}_1 \cdot {}^1\mathbf{T}_2 \cdot {}^2\mathbf{T}_3)^n \quad (11)$$

考虑连续体机械臂及其基座的固定位姿,可以得

到构型空间到工作空间的正运动学,即

$$T_{arm} = Rot_z\left(-\frac{\pi}{2}\right) \cdot Rot_y\left(-\frac{\pi}{2}\right) \cdot T_{mod1} \cdot T_{mod2} \cdot T_{mod3} \cdot Rot_y\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot Rot_z\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (12)$$

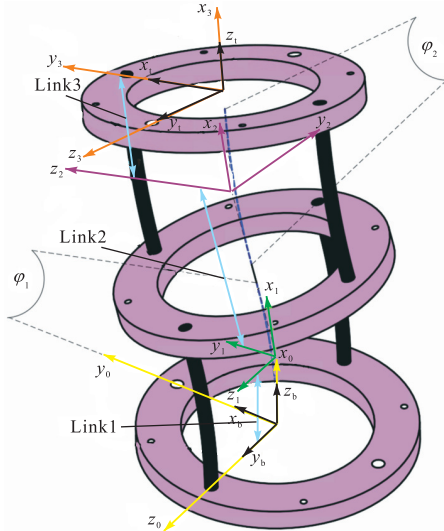


图 4 单正交节段 D-H 坐标系

Fig.4 Single orthogonal segment D-H coordinate system

表 2 D-H 参数

Tab.2 D-H parameters

关节	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	0	$\frac{l}{\phi_1} \tan\left(\frac{\phi_1}{2}\right)$	0
2	ϕ_1	0	$\frac{l}{\phi_1} \tan\left(\frac{\phi_1}{2}\right) + H + \frac{l}{\phi_2} \tan\left(\frac{\phi_2}{2}\right)$	$-\pi/2$
3	ϕ_2	0	$H + \frac{l}{\phi_2} \tan\left(\frac{\phi_2}{2}\right)$	$\pi/2$

速度雅可比矩阵能够反映驱动空间、构型空间和工作空间之间的速度映射关系,是连续体机械臂运动仿真和控制的基础. 构型空间到工作空间的速度雅可比矩阵 $J_{p\psi}$ 是一个 3×6 的矩阵,因此,设计的连续体机械臂对末端的位置控制而言是冗余驱动的,工作空间到构型空间的逆运动学可以采用其广义雅可比逆矩阵 $J_{p\psi}^+$ 进行求解,由工作空间速度求解构型空间速度时,理论上具有多解,但是采用广义雅可比逆矩阵可以得到构型空间的最小范数解,这也是进行运动控制的基础.

3 运动及避障控制算法

3.1 运动学闭环控制算法

由运动学分析可以得到连续体机械臂工作空间到驱动空间之间的速度映射关系为

$$\dot{Q} = J_{Q\psi} \dot{\Psi} = J_{Q\psi} J_{p\psi}^+ \dot{P} \quad (13)$$

式中: \dot{Q} 为驱动空间的速度; $J_{Q\psi}$ 为构型空间到驱动空间的速度雅可比矩阵; $\dot{\Psi}$ 为构型空间速度,这是运动学控制的基础. 基于运动学模型分析,提出运动学闭环控制策略如图 5 所示.

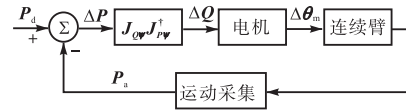


图 5 运动学闭环控制流程

Fig.5 Kinematic closed-loop control flow chart

图 5 中: P_d 表示连续体机械臂末端期望位置; P_a 表示连续体机械臂末端实际位置; ΔP 为位置误差,即期望运动量. 控制的基本步骤为: 首先获取末端期望位置与实际位置,得到期望运动量;其次将期望运动量输入逆运动学求解器,求出驱动空间期望变化量;再次将驱动空间期望变化量映射为驱动电机转角;最后驱动电机产生驱动量,使连续体机械臂运动并使用运动采集装置获取末端实际位置.

3.2 空间障碍与连续体机械臂的最短距离分析

对于刚性机械臂而言,通常将关节处记为标记点,由于关节间连杆的几何关系是固定的,因此障碍物到机械臂的距离可以比较容易地计算得到. 但对于连续体机械臂而言,其关节数量较多,变形柔顺,空间形态相对复杂,可以将约束盘中心作为标记点,计算各标记点与障碍物之间的距离,通过比较得到最短距离,但是连续体机械臂在空间中的弯曲变形使得这种方法存在较大误差,障碍物可能会与约束盘之间的合金弹性杆等结构发生碰撞.

因此,本文提出了计算空间障碍与连续体机械臂的最短距离计算方法,其基本思想为:将障碍物等效为完全包络的球体,将连续体机械臂的各约束盘中心处记为标记点,由相邻两约束盘的中心位置及合金弹性杆的弯曲角度可以确定弯曲中心的位置,由障碍物在弯曲平面的投影及其与弯曲扇形区域的关系,可以得到障碍物与连续体机械臂的最短距离.

如图 6 所示,障碍物球体在空间中的位置为 P_{obs} , 半径为 R_{obs} , 各约束盘的中心坐标为 O_0, O_1, \dots, O_m , 将它们记为标记点,相邻两约束盘的中心 O_i 和 O_{i+1} 以及弯曲角组成的弧线对应的圆心为 C_i , 障碍物到连续体机械臂的最短距离即为障碍物到弧 $O_i O_{i+1}$ ($i = 0, 1, \dots, m - 1$) 距离的最小值.

如图 7 所示,二维平面内,合金弹性杆弯曲后形成以 C_i 为圆心、 O_i 为起点、 O_{i+1} 为终点的圆弧. 定义扇形角为 $\angle 1$, $C_i O_i$ 和 $C_i P_{obs}$ 的夹角为 $\angle 2$, $C_i O_{i+1}$ 和 $C_i P_{obs}$ 的夹角为 $\angle 3$, 即

$$\begin{cases} \angle 1 = \frac{C_i O_i \cdot C_i O_{i+1}}{|C_i O_i| \cdot |C_i O_{i+1}|} \\ \angle 2 = \frac{C_i O_i \cdot C_i P_{\text{obs}}}{|C_i O_i| \cdot |C_i P_{\text{obs}}|} \\ \angle 3 = \frac{C_i O_{i+1} \cdot C_i P_{\text{obs}}}{|C_i O_{i+1}| \cdot |C_i P_{\text{obs}}|} \end{cases} \quad (14)$$

情况 1: 障碍物位于 $C_i O_i$ 和 $C_i O_{i+1}$ 之间, 即 $\angle 1 = \angle 2 + \angle 3$, 即

$$d_{\min} = \left\| C_i O_i \right\| - \left\| C_i P_{\text{obs}} \right\| \quad (15)$$

情况 2: 障碍物位于 $C_i O_i$ 和 $C_i O_{i+1}$ 之外, 即 $\angle 1 \neq \angle 2 + \angle 3$, 即

$$d_{\min} = \min \left\{ \left\| P_{\text{obs}} O_i \right\|, \left\| P_{\text{obs}} O_{i+1} \right\| \right\} \quad (16)$$

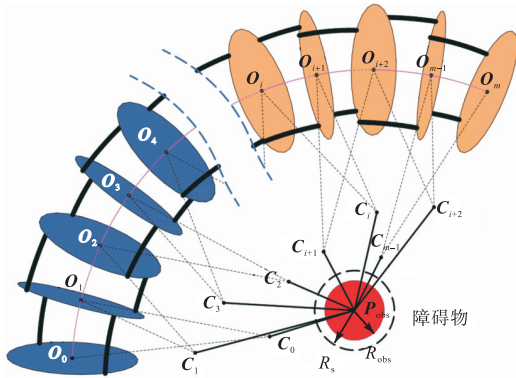


图 6 空间障碍物与连续体机械臂的距离关系

Fig.6 Distance relationship between a space obstacle and the CM

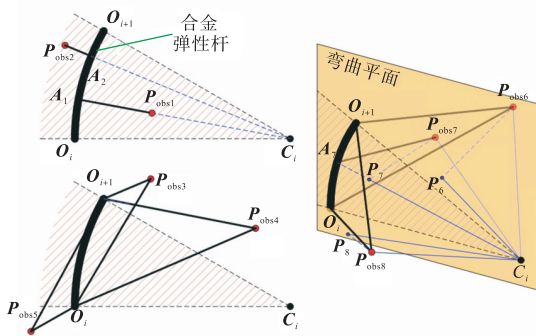


图 7 点到圆弧最短距离示意

Fig.7 Shortest distance from point to arc

当障碍物位于三维空间中时, 由于 2 个约束盘之间的合金弹性杆只能在一个方向上弯曲, 因此, 将弯曲弧线对应的圆心与障碍物的向量, 即 $C_i P_{\text{obs}}$ 投影到弯曲平面内, 形成 $C_i P$, 此时, 记

$$\begin{cases} \angle 1' = \frac{C_i O_i \cdot C_i O_{i+1}}{|C_i O_i| \cdot |C_i O_{i+1}|} \\ \angle 2' = \frac{C_i O_i \cdot C_i P}{|C_i O_i| \cdot |C_i P|} \\ \angle 3' = \frac{C_i O_{i+1} \cdot C_i P}{|C_i O_{i+1}| \cdot |C_i P|} \end{cases} \quad (17)$$

空间中障碍物到单弯曲节段的最短距离为

$$d_{i\min} = \begin{cases} \left\| P_{\text{obs}} A \right\| = \sqrt{\left\| P_{\text{obs}} P \right\|^2 + \left\| C_i O_i \right\|^2 - \left\| C_i P \right\|^2} & \text{情况 1} \\ \min \left\{ \left\| P_{\text{obs}} O_i \right\|, \left\| P_{\text{obs}} O_{i+1} \right\| \right\} & \text{情况 2} \end{cases} \quad (18)$$

则障碍物到连续体机械臂的最短距离为

$$d_{\min} = \min \{ d_{i\min} \} \quad i = 0, 1, \dots, m-1 \quad (19)$$

得到最短距离后, 将对应的约束盘的中心 O_{i+1} 记为避障控制点. 由于最短距离计算的是障碍物到连续体机械臂中心的距离, 因此为了保证运动安全, 还需要设置避障安全距离 R_s , 其满足

$$R_s > R_{\text{obs}} + R_{\text{disk}} \quad (20)$$

3.3 避障控制算法

3.3.1 传统变构型避障控制算法

传统变构型避障控制算法的思想为: 在不影响末端运动的情况下, 改变机械臂的构型, 从而实现对障碍物的躲避, 其数学模型可以表述为

$$\dot{\Psi} = J_{p\Psi}^{\dagger} \dot{P} + (I - J_{p\Psi}^{\dagger} J_{p\Psi}) \cdot w \quad (21)$$

等式右边第 1 项是特解, 为最小范数解, 表征机械臂末端的运动状态. 等式右边第 2 项为通解, 表征了机械臂构型空间的自运动, 变构型避障的关键就是构造自运动函数. $I - J_{p\Psi}^{\dagger} J_{p\Psi}$ 表示机械臂工作空间到构型空间的零空间项的投影算子, 当工作空间速度与其相乘时, 产生的新的构型空间速度仅会改变机械臂的构型, 不会影响末端的运动. w 表示机械臂避障时的构型空间速度, 将其构造为

$$w = J_i^{\dagger} J_{p\Psi} \cdot \dot{P}_0 \quad (22)$$

式中: $J_i^{\dagger} J_{p\Psi}$ 为以避障控制点为末端时, 机械臂的广义雅可比逆矩阵; \dot{P}_0 为避障控制点处的避障速度. 避障速度的大小 v_0 和机械臂在工作空间内的运动速度有关, 可以根据实际运动情况进行调节; 避障速度的方向可以选取为沿避障控制点与障碍物的连线并远离障碍物的方向.

3.3.2 基于主从任务转换的避障控制算法

传统变构型避障控制算法只能用来躲避远离末端的障碍物 (一般位置障碍), 对于位于或靠近末端运动轨迹的障碍物 (末端位置障碍) 则会失去效果, 这是因为末端或末端附近避障控制点的避障运动不会影响末端轨迹的跟踪, 所以无论如何改变构型, 可能都无法躲避末端位置障碍. 在避障时, 连续体机械臂有 2 种运动, 即对给定轨迹的跟踪运动和对障碍物的躲避运动, 运动时需要考虑如何处理 2 种运动的优先级, 因此, 提出了主从任务转换的避障控制算法, 合理分配 2 种运动任务的优先级, 协调轨迹跟踪及障碍

躲避. 其数学模型可以表述为

$$\begin{aligned} \dot{\Psi} = & k_1(I - \lambda J_{i, p\Psi}^\dagger \cdot J_{i, p\Psi}) J_{i, p\Psi}^\dagger \dot{P} + \\ & k_2(I - \mu J_{i, p\Psi}^\dagger \cdot J_{i, p\Psi}) J_{i, p\Psi}^\dagger \dot{P}_0 \end{aligned} \quad (23)$$

式中: I 为单位矩阵; k_1, k_2 为避障控制量; λ 和 μ 为主运动选择量, 该算法的具体运行方式如下.

当 $d_{\min} > R_s$ 时, 即无障碍, 连续体机械臂各标记点远离障碍物, 不需要躲避障碍, 逆运动学按照最小范数解进行求解, 即 $k_1 = 1, k_2 = 0, \lambda = 0, \mu \in \mathbf{R}$.

$$\dot{\Psi} = J_{i, p\Psi}^\dagger \dot{P} \quad (24)$$

当 $d_{\min} < R_s$ 且 $i < m - 3$ 时, 即一般位置障碍, 避障控制点不靠近连续体机械臂的末端, 此时连续体机械臂可以在跟踪末端给定轨迹约束下, 通过改变构型实现对障碍的躲避, 主运动为末端给定运动, 从运动为避障运动, 即 $k_1 = 1, k_2 \in \mathbf{R}, \lambda = 0, \mu = 1$. i 表示避障控制点位于第 i 个标记点处; m 表示标记点的最大数量. 本文用 $m - 3$ 表示连续体机械臂能够在末端跟踪给定轨迹的前提下, 变构型避障的最大标记点, 这不是固定唯一的, 其选取与连续体机械臂的结构参数、环境障碍信息等有关.

$$\dot{\Psi} = J_{i, p\Psi}^\dagger \dot{P} + k_2(I - J_{i, p\Psi}^\dagger \cdot J_{i, p\Psi}) J_{i, p\Psi}^\dagger \dot{P}_0 \quad (25)$$

当 $d_{\min} < R_s$ 且 $i \geq m - 3$ 时, 即末端位置障碍, 避障控制点的位置靠近连续体机械臂的末端, 此时, 要避开障碍, 就不能继续跟踪给定的末端轨迹, 而是应该以避障运动作为主任务, 将末端给定运动降为从任务, 此时, $k_1 \in \mathbf{R}, k_2 = 1, \lambda = 1, \mu = 0$.

$$\dot{\Psi} = k_1(I - J_{i, p\Psi}^\dagger \cdot J_{i, p\Psi}) J_{i, p\Psi}^\dagger \dot{P} + J_{i, p\Psi}^\dagger \dot{P}_0 \quad (26)$$

基于主从任务转换的避障控制算法的实施流程如图 8 所示.

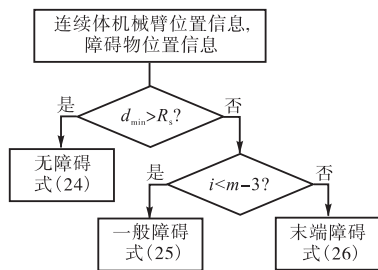


图 8 主从任务转换避障控制

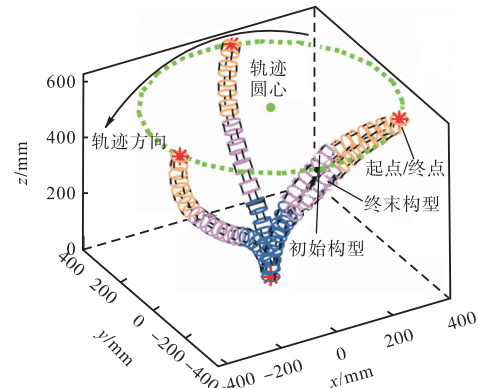
Fig.8 Master-slave task switching obstacle avoidance control

4 仿真与实验

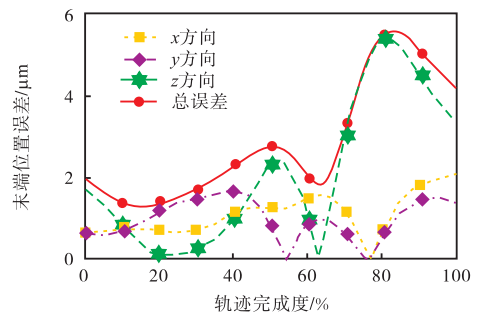
4.1 轨迹跟踪运动控制仿真

为了验证提出的运动学模型的准确性, 本节以逆运动学的最小范数解(式(24))作为控制方法, 跟踪给

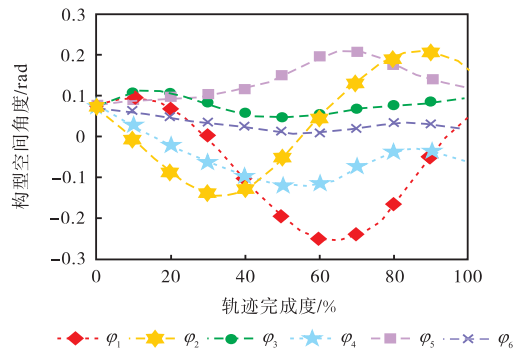
定的末端轨迹, 给定连续体机械臂初始状态下的构型空间为 $[\pi/45, \pi/45, \pi/45, \pi/45, \pi/45, \pi/45]$, 其末端位置 $P_0(301.64 \text{ mm}, -280.38 \text{ mm}, 608.90 \text{ mm})$, 圆形轨迹跟踪过程中需要不断改变末端运动的方向, 能够验证连续体机械臂的运动性能、运动学模型及控制算法的有效性和准确性, 给定以初始构型为起点、以 $c(0, 0, 608.90 \text{ mm})$ 为圆心的平面圆形轨迹, 得到轨迹跟踪仿真结果如图 9 所示.



(a) 连续体机械臂形态变化



(b) 末端位置误差



(c) 构型空间角度

图 9 最小范数解圆形轨迹跟踪过程仿真

Fig.9 Simulation of circular trajectory tracking using minimum norm solution

由仿真结果可以分析得出, 连续体机械臂能够跟踪给定的末端圆形轨迹, 运动过程平稳, 理论末端位置总误差(期望位置与实际位置的偏差)小于 $6 \mu\text{m}$; 构型角度始终处于合理的区间范围内且变化平缓, 意味着不需要较大的驱动电机转速, 对于运动控制来讲

是可行且有利的. 由仿真结果也可以看出, 虽然运动轨迹的起始位置与终末位置是相同的, 但是连续体机械臂的构型却是不同的, 这证明了连续体机械臂的冗余性.

4.2 避障控制算法仿真

本节对提出的主从任务转换避障控制算法进行了验证. 连续体机械臂的初始构型与前文一致, 给定末端偏移量 $\mathbf{P}_{dL} = [-300 \text{ mm}, 300 \text{ mm}, 100 \text{ mm}]$. 将给定的轨迹离散化成 n_p 个轨迹点, 末端的微小位移量 $\Delta \mathbf{P}_{dL} = \mathbf{P}_{dL}/n_p$ 看作末端运动速度, 即 $\dot{\mathbf{P}} = \Delta \mathbf{P}_{dL}$.

4.2.1 一般位置障碍避障仿真

设定障碍物的坐标为 $\mathbf{P}_{obs}(0, 0, 400 \text{ mm})$, 即一般位置障碍, 球形障碍物的半径 R_{obs} 为 35 mm , 避障安全距离 R_s 为 80 mm , 利用传统变构型避障控制算法(式(21))和主从任务转换避障控制算法(式(23))进行运动仿真, 输出结果如图10所示.

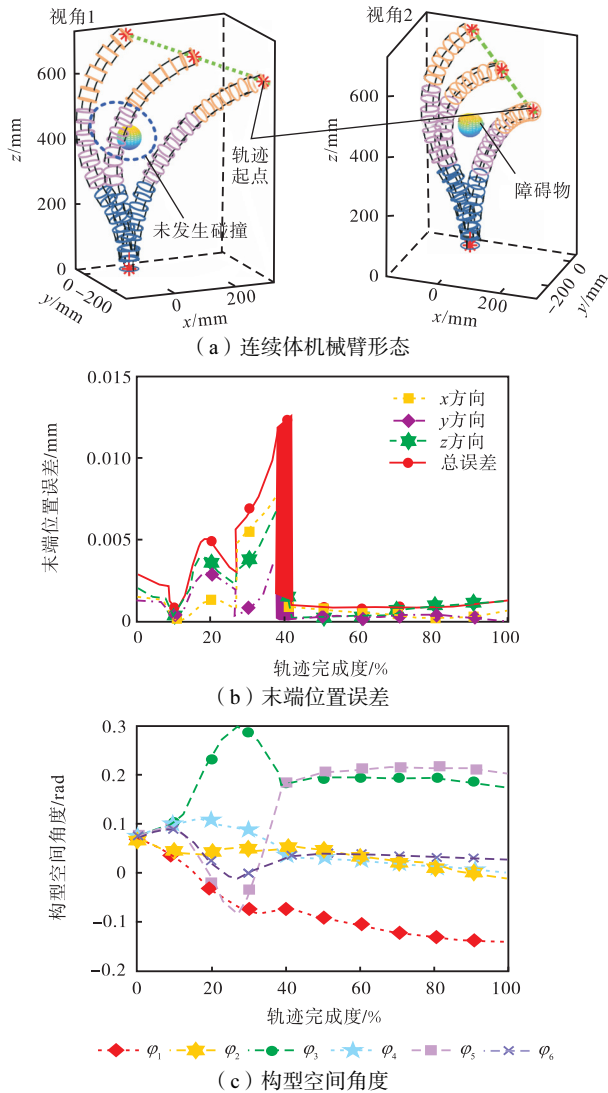


图10 一般位置障碍避障控制仿真

Fig.10 Simulation of obstacle avoidance control for general-position obstacles

两种避障控制方法的理论和仿真结果是相同的, 在整个轨迹跟踪过程的约 20% ~ 40% 处, 是连续体机械臂的避障过程, 末端位置误差出现了振荡, 但其绝对值及变化量均小于 0.015 mm , 能够满足控制精度的要求; 构型空间角度也出现了一定的波动, 但是构型角度变化最大仅约为 0.2 rad 且没有短时间内大的角度变化, 说明连续体机械臂在避障过程中不需要较大的电机速度; 连续体机械臂能够精确跟踪给定的末端轨迹, 并与一般位置障碍物保持了安全距离, 提出的避障控制算法是有效可行的.

4.2.2 末端位置障碍避障仿真

当障碍物位于末端运动轨迹附近时, 即假设障碍物的位置为 $\mathbf{P}'_{obs}(130 \text{ mm}, -110 \text{ mm}, 680 \text{ mm})$. 如果继续采用传统变构型避障控制算法, 连续体机械臂无论如何改变构型, 也无法躲避障碍, 图11所示仿真结

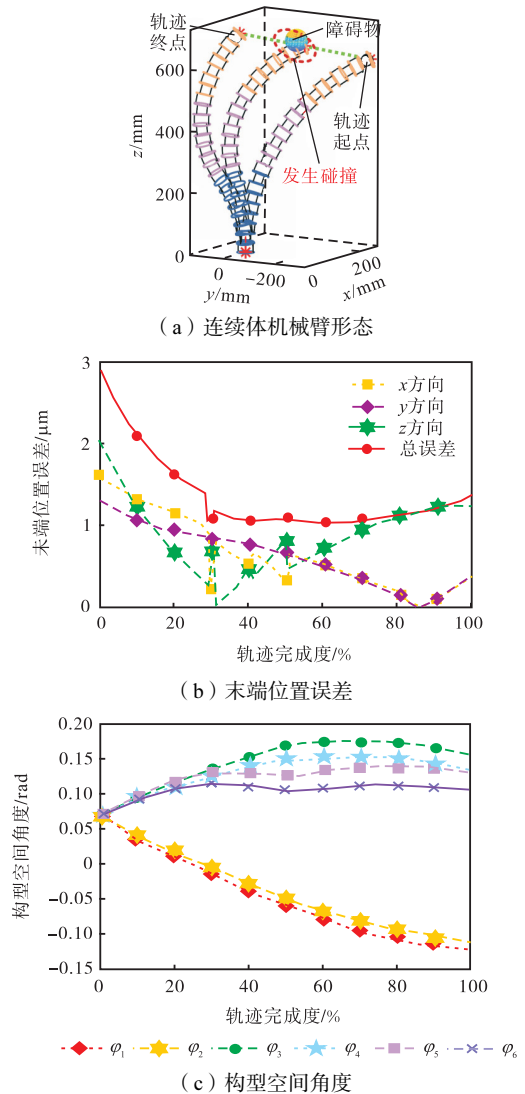


图11 末端位置障碍传统变构型避障控制仿真

Fig.11 Simulation of traditional variable configuration obstacle avoidance control for terminal-position obstacles

果显示,虽然运动过程中位置误差极小、构型角度变化平稳,但是连续体机械臂与障碍物发生了碰撞,传统变构型避障控制算法对末端位置障碍无效,开发一种新的避障控制算法是非常有必要的。

图 12 是采用主从任务转换避障控制算法对末端运动及避障过程进行仿真的结果,当连续体机械臂的末端靠近障碍时,该算法会将给定末端轨迹的跟踪运动降级为从任务,将避障运动升级为主任务,牺牲对给定轨迹的跟踪以避免与障碍物发生碰撞,同时在避障完成后又能及时恢复对给定轨迹的跟踪。虽然避障运动过程中(运动过程 30% ~ 80% 处)末端位置与给定轨迹偏离较大,由小于 0.010 mm 增长到 150.000 mm 又降为小于 0.010 mm,但是末端与障碍保持了安全距离,避免了碰撞的发生,对整体运动控制来说是可接受的,仿真结果证明了主从任务转换避障控制算法的优势和有效性。

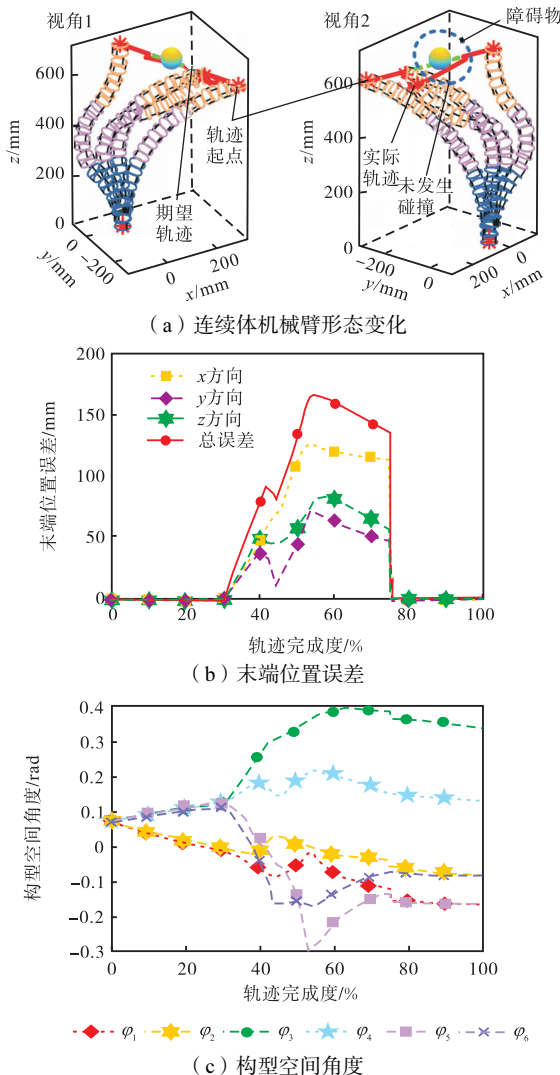


图 12 末端位置障碍主从任务转换避障控制仿真

Fig.12 Simulation of master-slave task switching obstacle avoidance control for terminal-position obstacles

4.3 轨迹跟踪运动控制实验

如图 13 所示,实验平台由连续体机械臂、控制系统、电源、光学三维动作捕捉系统(动作捕捉摄像头和标记点)等组成。控制系统会将输入的运动信息转换成运动指令传递给关节电机,关节电机由电源供电后驱动连续体机械臂运动。动作捕捉实验装置会实时获取连续体机械臂末端标记点的位姿信息,从而能够反馈实际位置和评估运动的准确性。



图 13 实验平台

Fig.13 Experimental platform

将仿真中给定的圆形轨迹输入到控制系统中,使连续体机械臂末端能够跟踪给定轨迹,同时利用动作捕捉系统实时获得末端标记点的位置,分析导出的数据可以得到实验过程中实际的末端位置。轨迹跟踪实验及数据分析如图 14 所示。

分析实验结果可以得出,连续体机械臂在跟踪给定轨迹时,会有一些的位置波动,但总体误差仍在可控范围内,其末端位置误差始终小于 8.000 mm,平均值仅为 2.510 mm,分别为连续体机械臂长度的 1.03% 和 0.32%,与之前研究的 2.89%^[14] 和 5.00%^[20] 相比,轨迹跟踪运动控制精度有了明显提升,证明了运动学模型及运动控制算法的有效性和准确性,但是实验误差还是略大于仿真结果,这可能是连续体机械臂零部件的加工误差、装配误差以及等曲率假设等因素引起的。

4.4 避障控制实验

为了验证提出的避障控制算法的可行性与准确性,设计了避障实验,对一般位置障碍和末端位置障碍的主从任务转换避障控制算法进行了验证。

4.4.1 一般位置障碍

当障碍物处在一般位置时,主从任务转换避障控制算法和传统变构型避障控制算法等效,其实验过程如图 15 所示。实验结果如图 16 所示。连续体机械臂能够在保证轨迹跟踪的同时通过改变自身构型实现

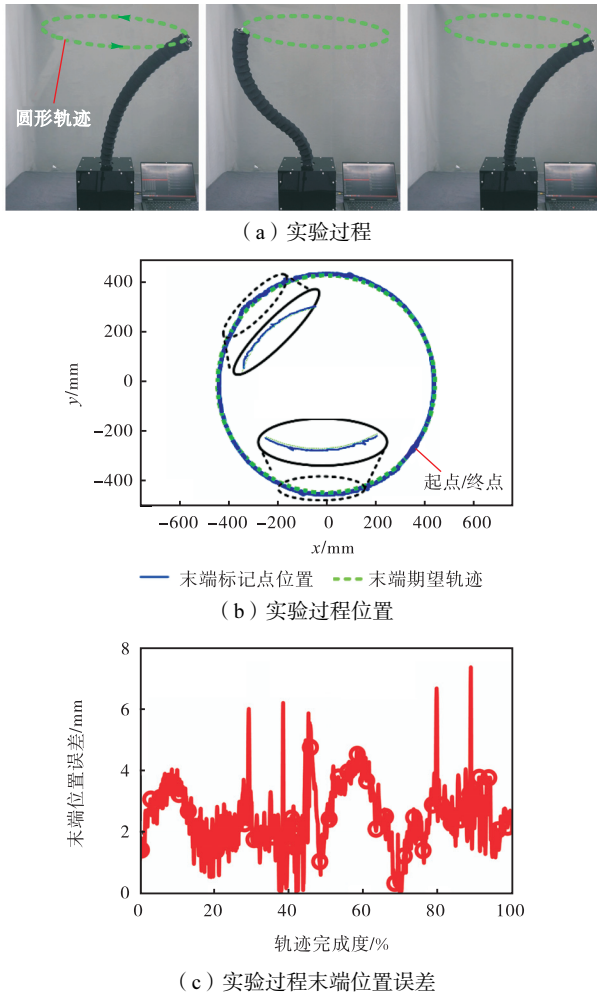


图 14 圆形轨迹跟踪实验

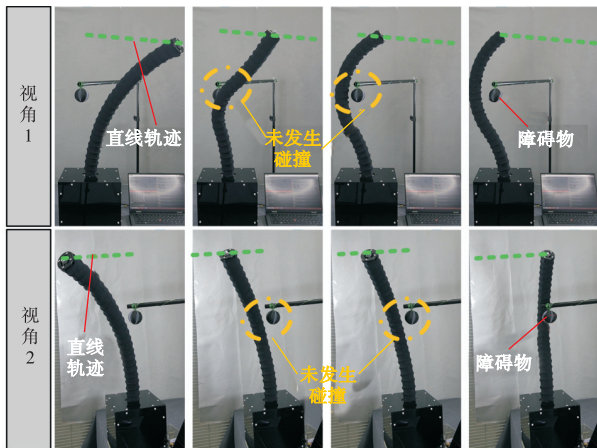


图 15 一般位置障碍实验过程

Fig.15 Experimental process of obstacle avoidance for general-position obstacles

对障碍物的躲避；跟踪过程中，末端位置误差始终小于 10.000 mm，整个运动过程误差平均值为 4.640 mm，轨迹跟踪中后期末端位置偏差较大并慢慢减小，这是因为由于弹性结构的存在，末端在避障时会产生一定的抖动，避障完成后，逐渐调整，误差出

现减小趋势，实验证明了避障算法的有效性，能够满足连续体机械臂的精度需求。

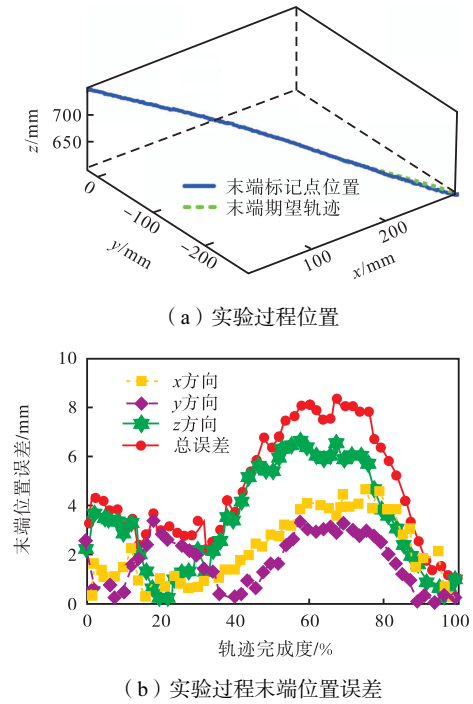


图 16 一般位置障碍避障实验分析

Fig.16 Experimental analysis of obstacle avoidance for general-position obstacles

4.4.2 末端位置障碍

对于末端位置障碍，传统变构型避障控制算法在仿真中已证明是无效的，因此，在实验中，仅对主从任务转换避障控制算法进行验证，该算法会在末端位置障碍附近放弃对给定轨迹的跟踪，将避障运动作为主运动，以避免与障碍物发生碰撞，避障实验过程如图 17 所示，实验结果如图 18 所示。

在避障运动过程中，连续体机械臂的末端位置误差在部分时段处在较大水平(大于 50.000 mm)，但是

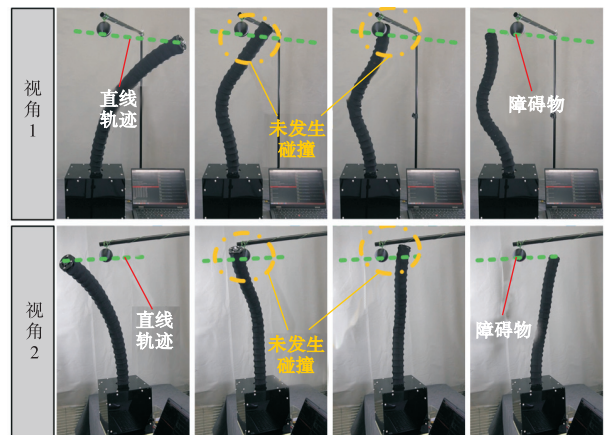
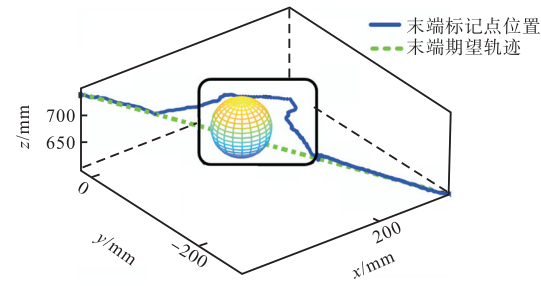
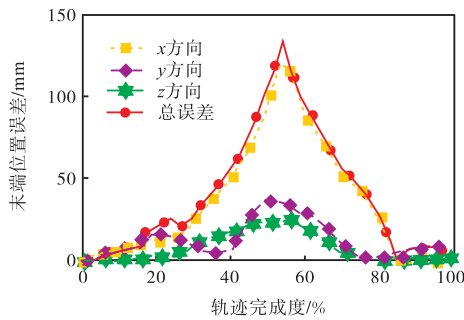


图 17 末端位置障碍避障实验过程

Fig.17 Experimental process of obstacle avoidance for terminal-position obstacles



(a) 实验过程位置



(b) 实验过程末端位置误差

图 18 末端位置障碍避障实验分析

Fig.18 Experimental analysis of obstacle avoidance for terminal-position obstacles

实现了对障碍物的躲避,从全局任务来看,这种误差的存在是允许的,但是,在无需避障时的轨迹跟踪阶段,末端位置误差比仿真结果要大,一部分原因是加工装配误差,另外避障过程中造成的末端抖动也会影响整体的跟踪精度.总体来说,实验结果验证了本文所提出的避障控制算法的有效性.

5 结语与展望

本文设计了一款丝驱动中空连续体机械臂,合金弹性杆分布在约束盘圆周上形成双周围脊椎骨并正交排布,实现了内部中空;使用鲍登管对驱动丝进行包覆,实现了模块单元之间的运动解耦和运动学模型的简化,结构上具有模块化程度高、结构紧凑、质量轻等优点.本文建立了连续体机械臂精确的运动学模型,对其运动控制进行了研究;构造了适用于连续体机械臂与空间障碍物的最短距离计算方法;提出了能够协调末端给定运动与避障运动的主从任务转换避障控制算法.仿真结果和实验结果表明,设计的连续体机械臂运动灵活、提出的运动学模型准确,能够准确跟踪末端给定轨迹,末端位置误差平均值为 2.510 mm,仅为连续体机械臂长度的 0.32%;避障控制算法有效,能够自主平衡轨迹跟踪与障碍规避任务,实现轨迹跟踪约束下的自主避障,为连续体机械臂的实际应用提供了参考.

结合仿真和实验可以发现,构型空间角度存在不光滑过渡(图 10(c)),虽然仿真结果显示并不会对末端位置精度造成明显影响,但在实验中,连续体机械臂弹性结构的存在会造成运动时产生一定的抖动,尤其在避障控制时,抖动对控制精度的影响尤为明显,建立力学控制模型、降低末端抖动、实现稳定控制是将来需要解决的问题.此外,现阶段避障控制中障碍物的位置信息还是先验已知的,今后的工作中,可以进一步研究障碍物的识别与定位,通过实时反馈障碍信息,实现对移动障碍、多障碍物的躲避.

参考文献:

- [1] Xie Z, Domel A G, An N, et al. Octopus arm-inspired tapered soft actuators with suckers for improved grasping [J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(5): 639-648.
- [2] Jones B A, Walker I D. Practical kinematics for real-time implementation of continuum robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(6): 1087-1099.
- [3] Chen Y, Zhang C, Wu Z, et al. The SHURUI system: A modular continuum surgical robotic platform for multiport, hybrid-port, and single-port procedures [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(5): 3186-3197.
- [4] Dong X, Wang M, Mohammad A, et al. Continuum robots collaborate for safe manipulation of high-temperature flame to enable repairs in challenging environments[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(5): 4217-4220.
- [5] Dong X, Raffles M, Guzman S C, et al. Design and analysis of a family of snake arm robots connected by compliant joints[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 77: 73-91.
- [6] Rao P, Pogue C, Peyron Q, et al. Modeling and analysis of tendon-driven continuum robots for rod-based locking[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(6): 3126-3133.
- [7] Yang C, Geng S, Walker I, et al. Geometric constraint based modeling and analysis of a novel continuum robot with SMA initiated variable stiffness[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2020, 39(14): 1620-1634.
- [8] 潘琪琪, 罗静静, 王富豪, 等. 切口式单孔腹腔镜连续体手术机器人构型设计和优化[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(23): 55-67.

Pan Qiqi, Luo Jingjing, Wang Fuhao, et al. Design and optimization of continuum robot configuration for

- single-port laparoscopic surgery[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(23): 55-67(in Chinese).
- [9] Wang F H, Wang H B, Luo J J, et al. FIORA: A flexible tendon-driven continuum manipulator for laparoscopic surgery[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 1166-1173.
- [10] Ma X, Wang X C, Zhang Z H, et al. Design and experimental validation of a novel hybrid continuum robot with enhanced dexterity and manipulability in confined space[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(4): 1826-1835.
- [11] Zhang J, Kan Z Y, Li Y, et al. Novel design of a cable-driven continuum robot with multiple motion patterns[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(3): 6163-6170.
- [12] Dong X, Raffles M, Cobos-Guzman S, et al. A novel continuum robot using twin-pivot compliant joints: Design, modeling, and validation[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2016, 8(2): 021010.
- [13] Chen Y Y, Wu B B, Jin J B, et al. A variable curvature model for multi-backbone continuum robots to account for inter-segment coupling and external disturbance[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 1590-1597.
- [14] Garg S, Dudeja S, Rastogi V. Inverse kinematics of tendon driven continuum robots using invertible neural network[C]//*IEEE International Conference on Computers and Automation (CompAuto)*. Paris, France, 2022: 82-86.
- [15] Yang Z H, Lan Y, Yang D, et al. Machine learning-based method for kinematics parameters identification of twin-pivot cable-driven continuum robots[C]//*IEEE International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the Era of Artificial Intelligence (ICSMD)*. Harbin, China, 2022: 1-4.
- [16] 周圆圆, 王振兴, 王重阳, 等. 可运动解耦的连续体单孔手术机器人设计与控制[J]. *机器人*, 2021, 43(4): 424-432.
Zhou Yuanyuan, Wang Zhenxing, Wang Chongyang, et al. Design and control of a motion decoupling continuum robot for single port surgery[J]. *Robot*, 2021, 43(4): 424-432(in Chinese).
- [17] Liu J G, Tong Y C, Ju Z J, et al. Novel method of obstacle avoidance planning for redundant sliding manipulators[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 78608-78621.
- [18] 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(Science and Technology)*, 2021, 54(6): 651-660(in Chinese).
- [19] 申浩宇, 吴洪涛, 陈柏, 等. 基于主从任务转化的冗余度机器人避障算法[J]. *机器人*, 2014, 36(4): 425-429.
Shen Haoyu, Wu Hongtao, Chen Bai, et al. Obstacle avoidance algorithm for redundant robots based on transition between the primary and secondary tasks[J]. *Robot*, 2014, 36(4): 425-429(in Chinese).
- [20] Shi J L, Abad S A, Dai J S, et al. Position and orientation control for hyperelastic multisegment continuum robots[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 29(2): 995-1006.

(责任编辑: 王晓燕)