

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.03.003

## 欠驱动蛇形机器人轨迹跟踪算法

吕翔<sup>1</sup>, 许彦阳<sup>1</sup>, 秦国栋<sup>2</sup>, 吉爱红<sup>1,3</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 3. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 蛇形机器人由于其狭长的机械臂和超冗余自由度, 在复杂极端环境中具有优越的灵活性。本文在欠驱动蛇形臂机器人的结构基础上, 提出了基于等效杆长和等效虚拟关节的两种轨迹跟踪算法, 实现蛇形臂机器人对目标曲线的跟踪, 满足蛇形臂机器人的运动控制需求。最后, 设计了臂长 1 075 mm 包含 7 关节单元的蛇形机器人样机, 并进行了轨迹跟踪实验, 结果表明蛇形机器人可轻松穿过直径 90 mm 以上的狭小管道。运动过程平稳、无振动, 验证了轨迹控制算法的正确性和结构设计的合理性。

**关键词:** 欠驱动; 蛇形机器人; 分层驱动; 轨迹跟踪; 虚拟关节

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)03-0407-08

## Trajectory Tracking Control Method of Underactuated Snake-Like Robot

LYU Xiang<sup>1</sup>, XU Yanyang<sup>1</sup>, QIN Guodong<sup>2</sup>, JI Aihong<sup>1,3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China; 3. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The snake-like robot has superior flexibility in complex and extreme environments due to its long and narrow robotic arm and redundant degrees of freedom. Based on the structure of the underactuated snake-arm robot, two trajectory tracking algorithms based on equivalent rod length and equivalent virtual joint are proposed to realize the tracking of the target curve by the snake-arm robot and meet the motion control requirements of the snake-arm robot. Finally, a snake-like robot prototype with an arm length of 1 075 mm and seven joint units is designed and the trajectory tracking experiment is carried out. The results show that the snake-like robot can easily pass through a narrow pipe with a diameter of more than 90 mm. The smooth and vibration-free motion process verifies the correctness of the trajectory control algorithm and the rationality of the structural design.

**Key words:** underactuated; snake-like robot; layered drive; trajectory tracking; virtual joint

蛇形机器人的设计灵感主要来源于自然界的蛇、象鼻和章鱼等<sup>[1]</sup>, 采用轻薄的连续或近似连续的机身设计<sup>[2]</sup>, 将驱动单元(电机等)置于机器人工作空间之外, 用线缆、仿生肌腱等进行驱动, 使得机器人整体结构得到极大简化。与传统的离散机器人相比, 超冗余蛇形机器人具有更多的自由度, 在

狭小空间的灵活运动性和避障能力更强, 广泛应用于各类复杂极端环境, 如核电厂<sup>[3]</sup>、航空航天<sup>[4]</sup>和医疗插管<sup>[5]</sup>等。

目前, 连续体机器人主要有两种类型分别是由柔性材料<sup>[6]</sup>或者欠驱动机构组成<sup>[7]</sup>。欠驱动蛇形机器人是连续体机器人的一个分支。对于柔性材

**基金项目:** 航空航天结构力学及控制全国重点实验室开放课题(1005-IZD23002-25)。

**收稿日期:** 2023-09-25; **修订日期:** 2023-12-11

**通信作者:** 吉爱红, 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: meeahji@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 吕翔, 许彦阳, 秦国栋, 等. 欠驱动蛇形机器人轨迹跟踪算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(3): 407-414. LYU Xiang, XU Yanyang, QIN Guodong, et al. Trajectory tracking control method of underactuated snake-like robot [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(3): 407-414.

料组成的连续体机器人,整个柔性臂可以离散地分为有限数量的刚性关节组成的超冗余串联机器人,这些刚性关节通过铰链、万向节和球关节等连接起来。因此,无论是刚性连续体机器人还是柔性连续机器人,都是属于串联超冗余机器人范畴<sup>[8]</sup>。

超冗余机器人可以实现对每个关节的控制,但是由于其自由度数目多,其运动学逆解和运动控制非常复杂。基于雅可比广义矩阵迭代求解<sup>[9-11]</sup>应用最为广泛,但是随着机器人自由度的增加,该方法计算复杂程度成几何倍数增长。为此,Chirikjian等<sup>[12]</sup>提出用于机器人控制的脊线模态法,通过模态函数对定长曲线进行分段拟合,将机器人拟合到脊线上实现运动学逆解计算。但是拟合曲线的长度和机器人的初始状态(伸直状态)长度相等,因此很难保证所有关节节点都在曲线上。William等<sup>[13]</sup>将机器人运动类比为蛇或绳子,提出一种“Follow-the-Leader”末端跟随头部的轨迹跟踪运动算法,该方法适用于带有直线导轨的或者移动平台的蛇形臂机器人。Xidias<sup>[14]</sup>提出了一种三维工作空间中超冗余机械臂时间最优轨迹规划算法,将轨迹规划问题转化成全局优化问题,利用多种群遗传算法进行逆运动学求解。文献[15-16]将不可扩展连续体机器人的每个关节段的运动假设为圆弧,已知各小段连续体的端点,然后依次补偿每个连续体关节段的方向变化,最终实现机器人运动学逆解。文献[17-18]基于曳物线求解逆运动学,通过给定的末端位置,机械臂末端移动到目标位置,从末端到基座依次更新关节位置,最后确定整个蛇形机器人的位置。文献[19]提出了一种改进的模式函数法求解超冗余机器人的逆运动学问题,通过分组拟合机器人关节到空间脊线上实现避障。王俊刚等<sup>[20]</sup>提出一种基于迭代步长顺序查找法来实现机械臂的关键点与离散路径曲线快速匹配。熊志林等<sup>[21]</sup>提出了改进末端跟随运动算法,引入关节角度约束,调整关节位置更新方式,使关节在蛇形臂轴线上运动实现末端跟随。马影等<sup>[22]</sup>提出基于几何方法的超冗余机械臂逆运动学快速求解算法,并分析了两种关节位置更新策略。在狭小空间中,蛇形机器人主要通过关节单元来适应狭窄、冗长的复杂工作场景,目前对欠驱动机器人在复杂环境中的轨迹控制方法的研究和应用仍然较少。

本文首先提出了一种欠驱动蛇形机器人设计方法,根据该结构设计了基于等效杆长和虚拟关节的轨迹跟踪控制算法,实现了末端移动和末端固定状态下的轨迹跟踪控制。

## 1 欠驱动蛇形机器人的设计

### 1.1 机械臂结构

欠驱动蛇形机器人的结构设计如图1所示,整个机器人由3部分组成:多关节机械臂、驱动箱和直线导轨。

如图1所示,蛇形机械臂由7个关节单元组成,每个关节单元之间通过万向节连接,第一个关节单元为导引关节固定在驱动箱上,其余6个驱动关节依据3:3比例将6个关节分成2个关节组,每组3个驱动关节。驱动箱内配置6台伺服电机,由3组驱动模块组成,驱动模块由两组驱动单元组成。各伺服电机输出端连接一个驱动单元,每个驱动单元包含3根丝杆,驱动3根钢丝拉动3个关节,实现关节组内各个关节等角度同步运动。直线导轨为进给平台,实现蛇形机器人的进给运动。相比以往超冗余机器人,欠驱动设计方法优点是可成倍地减少驱动电机的个数,同时保留较强的极端环境适应性、极高的避障能力、关节超限的能力以及足够大的灵巧操作空间,实现小型化轻量化设计目标。

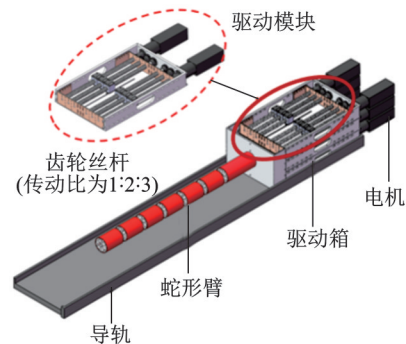


图1 欠驱动蛇形机器人

Fig.1 Underactuated snake-like robot

### 1.2 运动学建模

蛇形机器人由多个万向节串联而成,可直接采用齐次坐标变换来进行建模,直观表现出相连关节之间的运动关系。如图2所示, $A_1, A_2, \dots, A_6$ 分别

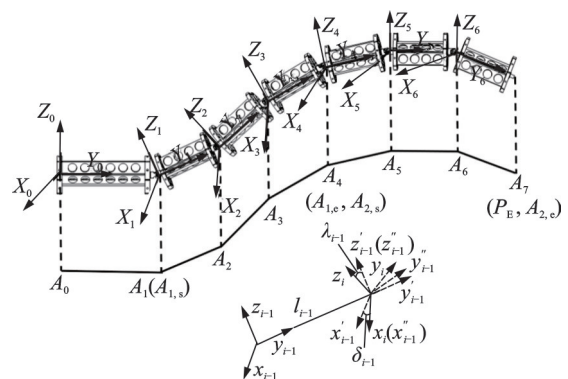


图2 欠驱动蛇形机器人运动学模型

Fig.2 Kinematics model of underactuated snake-like robot

表示坐标系原点,  $A_7(P_E)$  表示整个机械臂的末端点, 第  $i$  关节的坐标系原点在关节的连接处中心,  $y$  轴与关节连杆轴线重合指向  $i+1$  关节, 坐标系  $x_0 y_0 z_0$  表示世界坐标系。初始状态  $x_0 y_0 z_0$  坐标系的原点与  $A_0$  重合, 所有关节的转角为  $0^\circ$ , 此时所有的  $X$  轴和  $Y$  轴在同一个平面。

任意两个相连的坐标系的齐次变换矩阵可表示为

$${}^{i-1}T = \text{Trans}[0, l_{i-1}, 0] \text{Rot}[Z', \delta_{i-1}] \text{Rot}[X'', \lambda_{i-1}] \quad (1)$$

$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos\delta_{i-1} & -\cos\lambda_{i-1}\sin\delta_{i-1} & \sin\lambda_{i-1}\sin\delta_{i-1} & 0 \\ \sin\delta_{i-1} & \cos\delta_{i-1}\cos\lambda_{i-1} & -\cos\delta_{i-1}\sin\lambda_{i-1} & l_{i-1} \\ 0 & \sin\lambda_{i-1} & \cos\lambda_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $l_{i-1}$  为连杆  $i-1$  的长度;  $\delta_{i-1}$  和  $\lambda_{i-1}$  分别为绕  $Z$  轴和  $X$  轴旋转角度, 即关节的偏航和俯仰角度。第  $m$  根连杆的位姿可以表示为

$${}^0T = \prod_{i=1}^m {}^{i-1}T \quad (3)$$

对于欠驱动蛇形机器人, 在关节组  $n(1, 2, \dots)$  中末端点在基坐标系中的位置可以表示为

$${}_{j+3}^jT = {}_{j+1}^jT {}_{j+2}^{j+1}T {}_{j+3}^{j+2}T \quad j=3(n-1) \quad (4)$$

$$\delta_j = \delta_{j+1} = \delta_{j+2}, \lambda_j = \lambda_{j+1} = \lambda_{j+2} \quad (5)$$

$$P_{n,s} = {}_j^jTP_j' \quad (6)$$

$$P_{n,e} = {}_j^jT {}_{j+3}^jTP_{j+3}' \quad (7)$$

式中:  ${}^0T$  为关节  $j$  相对于世界坐标系的坐标变换矩阵,  ${}_{j+3}^jT$  表示关节组  $n$  的末端坐标系相对于该关节组的始端坐标系的位姿变换矩阵。关节组中各个关节俯仰和偏航角度相同,  $P_{n,s}$ 、 $P_{n,e}$  分别为关节组  $n$  的始端点和末端点,  $P_j' = [0 \ l_j \ 0 \ 1]^T$ ,  $P_{j+3}' = [0 \ l_{j+3} \ 0 \ 1]^T$ 。

## 2 欠驱动蛇形机器人的轨迹跟踪

轨迹跟踪是蛇形机器人重要的控制方法, 也是蛇形机器人进入狭小空间进行工作的主要方法之一。轨迹跟踪是指通过离线或在线生成路径曲线, 并利用轨迹跟踪算法求解机器人的关节变量(运动学逆解)来完成运动控制。本文设计的欠驱动蛇形机器人(图1)在3:3的分组中采用关节角度同步设计的原则来实现轨迹跟踪运动。

### 2.1 基座移动轨迹跟踪

基座移动轨迹跟踪是驱动箱以一定的速度进给, 从驱动箱(基座)开始沿着路径曲线, 依次将各个关节拟合到轨迹曲线上, 求解关节变量完成逆

解。本文设计的欠驱动蛇形机器人(图1)采用3:3关节分组的形式, 各关节组中采用关节角度同步设计原则, 类似于连续体结构, 无法对关节组中的每个刚性关节进行拟合, 此外各个关节组在运动的过程中, 杆长是变化的。为实现对蛇形机器人的轨迹跟踪运动, 本文提出了基于等效杆长法的基座移动轨迹跟踪算法。

基座移动跟踪算法原理如图3所示。图3中红色的三段连杆表示蛇形机器人的一个简化的关节组  $n$ , 假设在  $t$  时刻蛇形机器人关节组移动到位置  $[P_{n,s}', P_{n,e}']$ , 此时关节组的等效长度为  $d_n$ , 下一时刻  $t'(t' = t + \Delta t)$  蛇形机器人底座沿着轨迹作  $\Delta s$  的进给运动, 此时蛇形机器人的位置更新为  $[P_{n,s}', P_{n,e}']$ , 该时刻关节组的等效长度为  $d_n'$ 。在运动过程中  $d_n$  是实时变化的, 但是当  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 此时  $\Delta s \rightarrow 0$ , 则  $d_n \approx d_n'$ , 因此可以通过  $t$  时刻的杆长  $d_n$  来确定  $t + \Delta t$  时刻关节组末端点  $P_{n,e}'$  所在的位置间隔  $[C_{i-1}, C_i]$ 。

$$|C_{i-1} - P_{n,s}'| \leq d_n' \leq |C_i - P_{n,s}'| \quad (8)$$

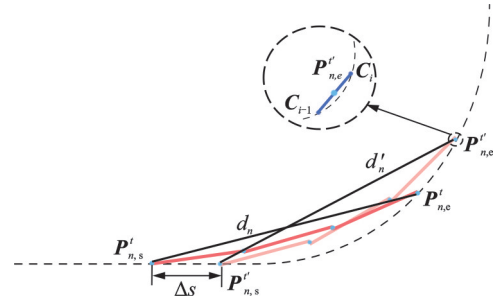


图3 第  $n$  段单关节组轨迹跟踪

Fig.3 Trajectory tracking of  $n$ -segment single joint group

此时末端点  $P_{n,e}'$  移动到曲线点  $[C_{i-1}, C_i]$  之间, 当对离散路径曲线密集化后,  $P_{n,e}'$  可以表示在线段  $[C_{i-1}, C_i]$  上, 即

$$P_{n,e}' = C_{i-1} + \mu(C_i - C_{i-1}) \quad 0 \leq \mu \leq 1 \quad (9)$$

$$P_{n,e}' = \begin{bmatrix} x_{n,e}' \\ y_{n,e}' \\ z_{n,e}' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\mu)x_{i-1} + \mu x_i \\ (1-\mu)y_{i-1} + \mu y_i \\ (1-\mu)z_{i-1} + \mu z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中将  $P_{n,e}'$  表示成向量的形式, 其中  $[x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}]$  和  $[x_i, y_i, z_i]$  已知, 分别表示  $C_{i-1}$  和  $C_i$  的坐标。

$P_{n,e}'$  在基坐标系下的坐标也可以通过正运动学获得。由式(3,10)联立可得

$$P_{n,e}' = \begin{bmatrix} (1-\mu)x_{i-1} + \mu x_i \\ (1-\mu)y_{i-1} + \mu y_i \\ (1-\mu)z_{i-1} + \mu z_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}_j^0T {}_{j+3}^jT \begin{bmatrix} 0 \\ l_{j+3} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$



在式(11)中间有一个变量 $\mu$ ,右边有两个变量 $\delta_j$ 和 $\lambda_j$ ,联立方程可以求出 $[\mu, \delta_j, \lambda_j]$ ,即运动学逆解。

改进的等效杆长轨迹跟踪算法流程如图4所示,已知初始位置 $[\delta_1, \lambda_1, \dots]$ 和目标轨迹曲线 $S_i$ ,接着以一定的位移 $\Delta s$ 从基座向末端按照改进等效杆长算法进行位置更新,以 $t$ 时刻的杆长 $d_n$ ,判断下一时刻 $t'(t'=t+\Delta t)$ 关节组所在区间位置 $[C_{i-1}, C_i]$ ,最后通过联立过该区间位置 $[C_{i-1}, C_i]$ 的直线方程和欠驱动蛇形臂的正运动学,可以计算得到 $[\delta_j, \lambda_j]$ 和等效杆长 $d'_n$ ,循环上述过程直到完成整个轨迹跟踪。

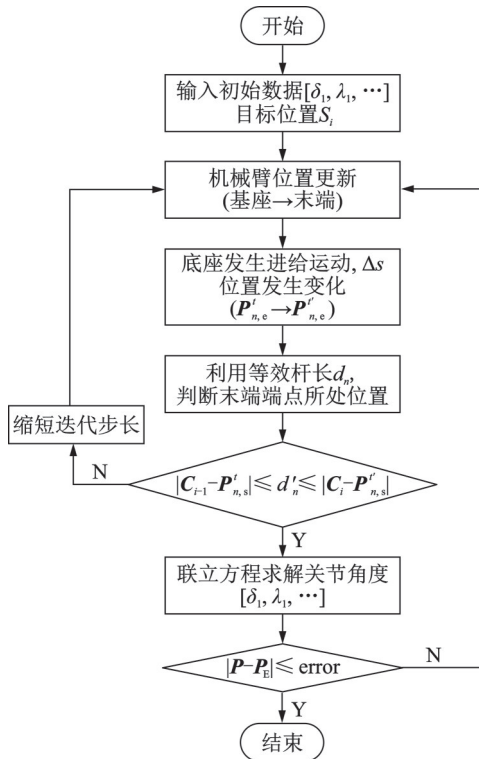


图4 等效杆长轨迹跟踪算法流程图

Fig.4 Flow chart of equivalent rod length trajectory tracking algorithm

## 2.2 基座固定轨迹跟踪

基座固定的末端轨迹跟踪运动和基座移动的末端轨迹跟踪运动不同,基座固定轨迹运动是指蛇形机器人的基座固定,机械臂的末端点拟合到轨迹曲线上,实现关节角度的求解。

欠驱动蛇形机器人采用3:3分组形式,实现组内关节等角度,使其关节角度求解(逆运动学)变得十分复杂。为了实现该机器人基座固定轨迹跟踪,本文提出了基于等效虚拟关节的基座固定轨迹跟踪算法,如图5所示。由于蛇形机器人组内关节角度相同,每一关节组可以等效成一段圆弧,圆弧两端切线相交于一点 $P_{nd}$ 。等效关节连杆长度取决于

关节组的弯曲角度 $\theta_n$ ,其位置与方向角度 $\beta_n$ 和弯曲角度 $\theta_n$ 相关,该关节组可以等效成一个虚拟关节 $P_{nd}$ 和两个虚拟连杆 $L_{P_{ns}P_{nd}}, L_{P_{nd}P_{ne}}$ 。

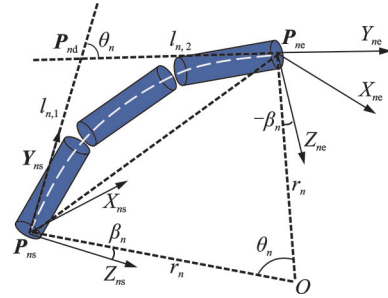


图5 第 $n$ 组等效虚拟关节

Fig.5 Group  $n$  equivalent virtual joints

从图5中的三角形 $OP_{ns}P_{ne}$ 中可知

$$r_n \sin(\theta_n/2) = \|P_{ne} - P_{ns}\|/2 \quad (12)$$

$$l_{n,1} = l_{n,2} = r_n \tan(\theta_n/2) \quad (13)$$

式中: $l_{n,1}$ 和 $l_{n,2}$ 为第 $n$ 组等效虚拟关节长度,当 $\theta_n = 0^\circ$ 时, $l_{n,1} = l_{n,2} = 3l/2$ ( $l$ 表示单个关节长度)。虚拟关节位置 $P_{nd}$ 可以表示为

$$P_{nd} = P_{ns} + l_{n,1} Y_{ns} \quad (14)$$

$$P_{nd} = P_{ne} - l_{n,2} Y_{ne} \quad (15)$$

弯曲角度 $\theta_n$ 可以表示为

$$\theta_n = \arccos(Y_{ns}, Y_{ne}) \quad (16)$$

由式(12~16)可知,关节组的每一个状态,都只有一个等效的虚拟关节连杆与之对应。相反,一旦确定了等效的简化虚拟关节连杆,则蛇形机器人也可以唯一确定。然后利用这些关系,通过向前、向后迭代搜索对简化的模型进行逆运动学求解,可得到关节变量 $\delta$ 和 $\lambda$ 。

等效虚拟关节的轨迹跟踪算法如图6所示,首先对分组的超冗余蛇形机械臂进行虚拟关节等效简化,再将等效关节进行前后迭代搜索,最后对蛇形机器人逆运动学进行求解,实现机械臂末端轨迹跟踪。

在向前到达迭代阶段,图6(a)给出了机械臂的初始状态和期望目标位置 $P_t$ ,首先通过将最后一段末端点移动到目标位置 $P_{3e} = P_t, Y_{3e} = Y_t$ ,则此时第3段的虚拟关节 $P'_{3d}$ 和始端位置 $P'_{3s}$ 可以表示为

$$P'_{3d} = P_t - l_{3,2} Y_{3e} \quad (17)$$

$$Y_{3s} = (P'_{3d} - P_{2d}) / \|P'_{3d} - P_{2d}\| \quad (18)$$

$$P'_{3s} = P'_{3d} - l_{3,1} Y_{3s} \quad (19)$$

此时完成第3段的等效虚拟关节连杆的位置更新如图6(b),接着移动第2段的末端位置 $P_{2e}$ 和 $Y_{2e}$ 与第3段的 $P'_{3s}$ 和 $Y_{3s}$ 重合,如此搜索迭代直到第1段。在进行第1段向前迭代过程中重新计算

$Y_{1s}$  时,由于蛇形机器人基座固定,故  $Y_{1s} = [0 \ 1 \ 0]^T$ 。图 6(b) 表示整个向前迭代搜索过程。在向后到达迭代阶段,与向前迭代相似,从第 1 段到最后一段进行位置更新,首先将第 1 段的起始点  $P'_{1s}$  与基座点  $P_{1s}$  重合,  $Y_{1s} = [0 \ 1 \ 0]^T$ , 则此时虚拟关节  $P''_{1d}$  和末端位置  $P''_{1e}$  可以表示为

$$P''_{1d} = P'_{1s} + l_{1,1} Y_{1s} \quad (20)$$

$$Y_{1e} = (P'_{2d} - P''_{1d}) / \|P'_{2d} - P''_{1d}\| \quad (21)$$

$$P''_{1e} = P''_{1d} + l_{1,2} Y_{1e} \quad (22)$$

此时完成第 1 段的等效虚拟关节连杆的位置更新如图 6(c),接着移动第 2 段的始端位置  $P'_{2s}$  和  $Y_{2s}$  与第 1 段的  $P''_{1e}$  和  $Y_{1e}$  重合,如此搜索迭代直到最后一段,在进行最后一段向后迭代过程重新计算  $Y_{3e}$  时,  $Y_{3e} = Y_{1e}$ 。图 6(c) 表示整个向后迭代搜索过程。

在进行上述的前后迭代搜索过程后,每个关节组的起始点  $P_{ns}$  和末端点  $P_{ne}$  已知,而通过正运动学也可以求出  $P_{ns}$  和  $P_{ne}$ ,由式(4,5,7)可得

$$P_{ne} = {}^0T_j T_{j+3} T_{j+3} \begin{bmatrix} 0 \\ l_{j+3} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad j = 3(n-1) \quad (23)$$

式中:等号左边具体化为已知量,在前后迭代过程中已经计算得到,等号右边具体化是通过正运动学得到,联立左右两个表达式,求解得到关节转角  $[\delta_j, \lambda_j]$ ,完成位置状态更新如图 6(d) 所示。

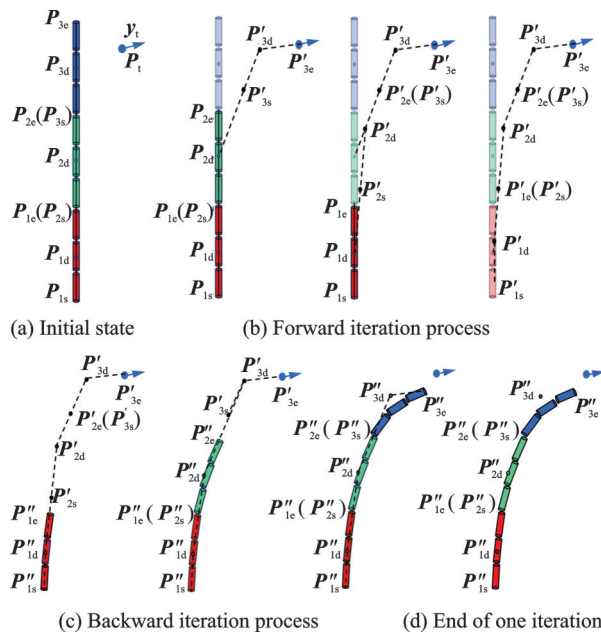


图 6 3 组等效虚拟关节的轨迹跟踪算法

Fig.6 Trajectory tracking algorithm of three groups of equivalent virtual joints

此时,完成一个周期内的迭代,随着重复上面的迭代过程,当前的末端位置向期望位置迅速收

敛,当满  $|P_E - P_t| < \text{error}$  时,迭代循环结束。等效虚拟关节的轨迹跟踪算法流程如图 7 所示。

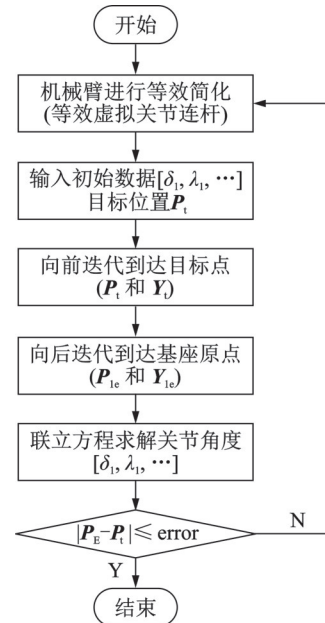


图 7 等效虚拟关节的轨迹跟踪算法流程图

Fig.7 Trajectory tracking algorithm flow chart of equivalent virtual joint

### 2.3 仿真实验

为了验证轨迹跟踪的有效性,以 9 关节蛇形臂机器人(3:3:3 分组)为仿真对象,先通过三维软件对机器人进行建模,然后通过统一机器人描述格式 (United robotics description format, URDF) 对机器人坐标系进行定义,在此基础上对关节参数进行定义,最后确定每个坐标系之间的相对运动,导出机器人的 URDF 模型。

将上述的机器人的 URDF 模型导入到 MATLAB 中进行联合仿真,给定初始位置、末端位置和中间一些关节位置,通过 B 样条曲线生成一条三维空间轨迹曲线,蛇形机器人采用基座移动的方式对该轨迹曲线进行跟随运动。图 8 为蛇形机器人的轨迹跟随运动仿真序列图。设置基座的移动速度为 0.01 m/s。图 8(a~d) 是选取的轨迹跟踪过程 4 个状态,可以看出各组在跟随轨迹曲线时具有很好的拟合度,蛇形机器人运动平稳,位置偏移量较小。

轨迹跟踪关节角度曲线如图 9 所示,可以看出在整个蛇形机器人跟随过程中,关节角度变化平滑无突变,关节运动学逆解无奇异。并且关节角度最大值为  $19.8^\circ$ ,在关节转角  $(-30^\circ, 30^\circ)$  内,整个跟随运动在关节转角允许的范围。同时从图 9 中可以看出偏航角度  $\delta_i$  跟随  $\delta_{i+1}$  变化,俯仰角度  $\lambda_i$  跟随  $\lambda_{i+1}$  变化,符合轨迹跟踪原理,后面关节组跟随前一个关节组沿着曲线运动。

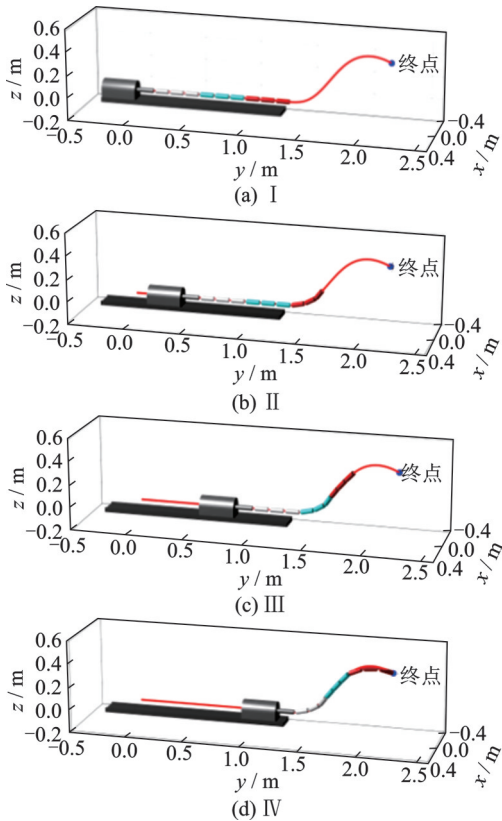


图8 基座移动轨迹跟随运动仿真

Fig.8 Simulation of base moving trajectory following motion

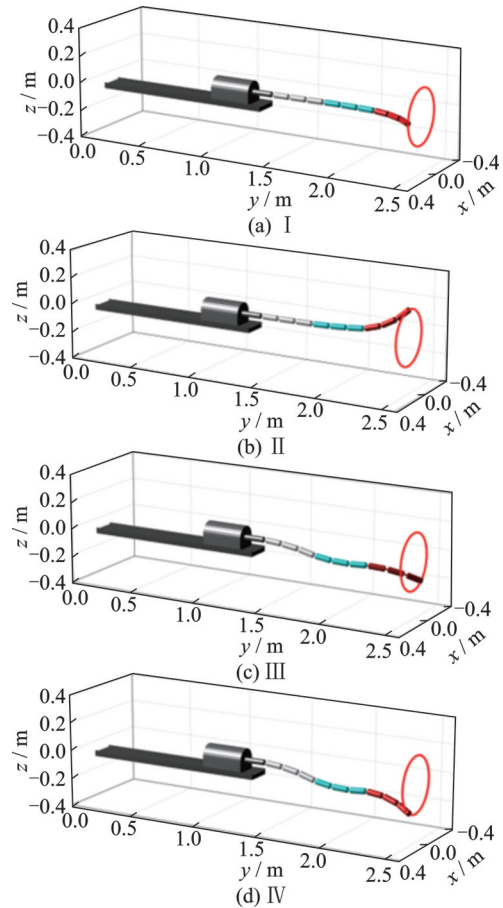


图10 基座固定轨迹跟踪运动仿真

Fig.10 Base fixed trajectory tracking motion simulation

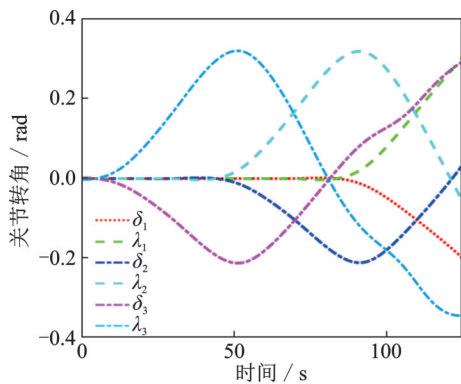


图9 基座移动轨迹跟踪关节角度

Fig.9 Base moving trajectory tracking joint angles

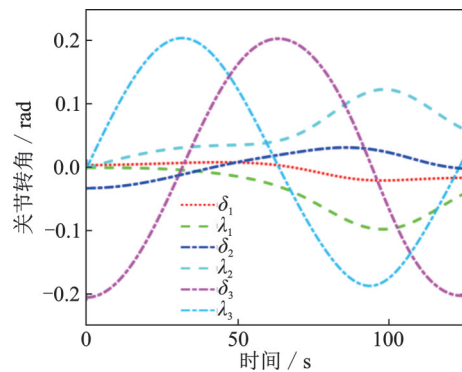


图11 基座固定轨迹跟踪关节角度

Fig.11 Base fixed trajectory tracking joint angles

蛇形机器人在工作过程中,通过先移动基座,让目标落在蛇形机械臂的工作范围内,然后采用基座固定的轨迹跟踪方法使蛇形机器人末端沿着轨迹曲线到达目标位置。图10是蛇形机器人完成目标曲线为空间圆形的末端跟随运动。图10(a~d)表示蛇形机器人运动的4个状态,从图10中可以看出,机器人末端可以准确跟随目标曲线完成运动,机械臂的状态比较协调。图11为末端固定轨迹跟踪的关节角度曲线,可以看出关节角度最大值为 $11.8^\circ$ ,在关节角度允许变化范围内。

### 3 蛇形臂机器人性能实验

根据欠驱动设计原理制作蛇形机器人样机如图12所示,整个机器人主要由驱动箱和多关节机械臂组成,驱动箱的尺寸为 $320\text{ mm}\times 586\text{ mm}\times 207\text{ mm}$ ,驱动关节(6个)的直径和长度为 $\varnothing 74\text{ mm}\times 145\text{ mm}$ ,导向关节的直径和长度为 $\varnothing 74\text{ mm}\times 205\text{ mm}$ ,机械臂关节总长为 $1\ 075\text{ mm}$ 。蛇形臂机器人的控制系统如图12(d)所示,控制系统使用PC上位机和运动控制卡作为主控制系统,上位机和运动控制卡之间通过PCI总线进行通讯。



上位机编写运动控制程序通过 PCI 总线向运动控制卡发送指令,运动控制卡接受指令后向电机伺服驱动器发送位置脉冲,驱动电机转动,进而带动蛇形臂机器人的关节进行运动,最终完成蛇形臂机器人控制。

为了验证所提出的欠驱动蛇形机器人结构的可行性和所提出方法的适应性,进行了两组穿越狭小空间的实验。

第 1 组实验为进入直径为 90 mm 的紫色管道,该管道和蛇形机器人在同一平面,实验过程如图 13(a)所示,蛇形机器人可以平滑进入该管道,并且在管道内保证位姿进行检测等任务。第 2 组实验为进入变截面的白色管道,该管道最大直径为 200 mm,最小直径为 100 mm,实验过程如图 13(b)所示,蛇形机器人可以完全通过直径 100~200 mm 的区域部分,最终可以到达 100 mm 的区域。

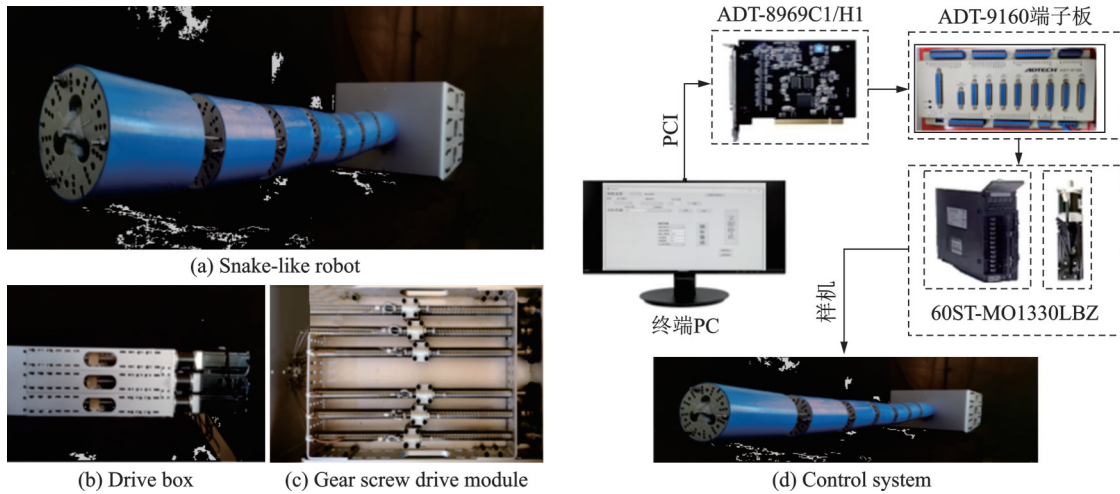


图 12 蛇形机器人

Fig.12 Snake-like robot

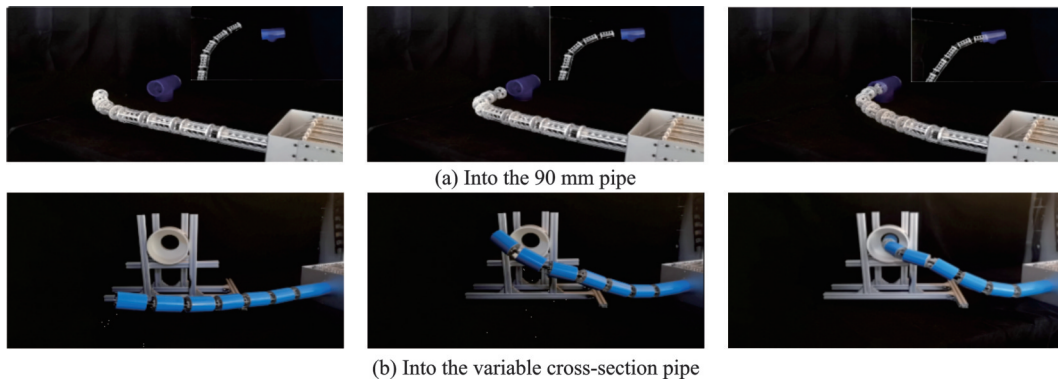


图 13 狭小管道实验

Fig.13 Narrow tube experiment

实验结果表明,欠驱动蛇形机器人在狭小管道内的穿越和检测过程中能够灵活、平稳地移动,轨迹规划过程平稳、无振动,表明了所提出的欠驱动蛇形机器人分层驱动结构的有效性和适应性。总的来说,分层驱动结构减少了终端驱动电机的数量和驱动箱的体积,同时也可以满足工作要求。

### 4 结 论

本文基于超冗余连续机器人的特点,设计了一种欠驱动的蛇形机器人。通过电机和齿轮丝杆驱动模块组成的单一驱动层同时驱动多个关节并同

步其旋转角度实现整个机器人驱动和控制系统简化,同时保持较高的空间曲率。为了满足蛇形机器人运动控制需求,设计了基于基座移动等效杆长轨迹跟踪算法,蛇形机器人关节从基座向机械臂末端进行位置更新,实现运动学逆解。为了满足基座固定状态下运动控制需求,设计了一种虚拟关节向前向后迭代算法,通过双向迭代获得各个关节的位置,实现运动学逆解。为了验证算法的有效性,搭建了仿真模型,仿真实验结果表明蛇形机器人运动平稳,位置偏移量较小,可以实现机器人轨迹跟踪的控制需求。最后制作了 7 关节欠驱动蛇形机器人样机并进行了狭小环境轨迹跟踪实验,结果表明

机器人可以平稳进入90 mm和100 mm的狭小管道。在未来的工作中,将着重解决在障碍物环境下的轨迹跟踪控制,实现在避障的同时完成轨迹跟踪。

#### 参考文献:

- [1] WALKER I D. Some issues in creating “invertebrate” robots[C]//Proceedings of the International Symposium on Adaptive Motion of Animals & Machines. Montreal, Canada:[s.n.], 2004.
- [2] III R J W, JONES B A. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review [J]. International Journal of Robotics Research, 2010, 29(13): 1661-1683.
- [3] BUCKINGHAM R, GRAHAM A. Nuclear snake-arm robots[J]. Industrial Robot, 2012, 39(1): 6-11.
- [4] 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.  
GAO Qingji, WANG Weijuan, NIU Guochen, et al. Research on bionic structure and kinematics of aircraft fuel tank inspection robot[J]. Aeronautical Journal, 2013,34(7): 1748-1756.
- [5] BURGNER-KAHRIS J, RUCKER D C, CHOSET H. Continuum robots for medical applications: A survey[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(6): 1261-1280.
- [6] 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.
- [7] LIU Y, GE Z, YANG S, et al. Elephant’s trunk robot: An extremely versatile under-actuated continuum robot driven by a single motor[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(5): 1.
- [8] HONGH W, DU J. The control strategy of tendon-driven continuum/soft robot[J]. Jiqiren/Robot, 2020, 42(5): 116-130.
- [9] HANNAN M W, WALKER I D. Kinematics and the implementation of an elephant’s trunk manipulator and other continuum style robots[J]. Journal of Robotic Systems, 2003, 20(2): 45-63.
- [10] 阳方平,李洪谊,王越超,等.一种求解冗余机械臂逆运动学的优化方法[J].机器人,2012,34(1): 17-21,31.  
YANG Fangping, LI Hongyi, WANG Yuechao, et al. An optimization method for solving the inverse kinematics of redundant manipulator[J]. Robot, 2012, 34(1): 17-21,31.
- [11] PARK S O, LEE M C, KIM J. Trajectory planning with collision avoidance for redundant robots using jacobian and artificial potential field-based real-time inverse kinematics[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2020, 18(8): 2095-2107.
- [12] CHIRIKJIAN G S, BURDICK J W. A modal approach to hyper-redundant manipulator kinematics[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(3): 343-354.
- [13] WILLIAM II R L, MAYHEW IV J B. Obstacle-free control of the hyper-redundant NASA inspection manipulator[C]//Proceedings of the Fifth National Conference on Applied Mechanics and Robotics. [S.l.]: IEEE,1997: 12-15.
- [14] XIDIAS E K. Time-optimal trajectory planning for hyper-redundant manipulators in 3D work-spaces[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 50: 286-298.
- [15] NEPPALLI S, CSENCISITS M A, JONES B A, et al. Closed-form inverse kinematics for continuum manipulators[J]. Advanced Robotics,2009, 23(15): 2077-2091.
- [16] JIAJIA L, FUXIN D, YIBIN L, et al. A novel inverse kinematics algorithm using the kepler oval for continuum robots[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 93(1): 206-225.
- [17] SREENIVASAN S, GOEL P, GHOSAL A. A real-time algorithm for simulation of flexible objects and hyper-redundant manipulators[J]. Mechanism & Machine Theory, 2010, 45(3): 454-466.
- [18] QIN G, WU H, CHENG Y, et al. Adaptive trajectory control of an under-actuated snake robot[J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 106: 756-769.
- [19] XU W, MU Z, LIU T, et al. A modified modal method for solving the mission-oriented inverse kinematics of hyper-redundant space manipulators for on-orbit servicing[J]. Acta Astronautica, 2017, 139: 54-66.
- [20] 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. Arithmetic and performance analysis of hyper-redundant manipulator following end trajectory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018,54(3): 18-25.
- [21] 熊志林,陶建峰,刘成良.改进末端跟随运动的超冗余蛇形臂机器人运动学逆解[J].机器人,2018,40(1): 37-45.  
XIONG Zhilin, TAO Jianfeng, LIU Chengliang. Inverse kinematics of hyper-redundant snake-arm robot with improved end-following motion[J]. Robots, 2018, 40(1): 37-45.
- [22] 马影,陈丽,高其远,等.超冗余移动机械臂逆运动学快速求解的两种方法比较[J].智能计算机与应用, 2019, 9(6): 138-142,146.  
MA Ying, CHEN Li, GAO Qiyuan, et al. Comparison of two methods for rapid solution of inverse kinematics of super-redundant mobile manipulator[J]. Intelligent Computer and Application, 2019, 9(6): 138-142,146.