

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.039

蛇形管道机器人设计与轨迹跟踪算法实现

于阳光, 吉爱红, 邱稼辉, 刘亚红, 秦国栋

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:蛇形机器人模仿蛇的身体结构与运动机理, 具有体积小、自由度多等特点, 在复杂环境中表现出优秀的运动性能。设计一种适用于狭小管道环境的蛇形机器人, 采用模块化的构型, 机器人共拥有 5 个自由度。利用 Denavit-Hartenberg 方法对机器人进行运动学分析, 基于从机器人尾部到头部的正向轨迹跟踪控制算法, 建立机器人的轨迹跟踪运动控制方法; 设计实验样机并开展运动控制实验和实际管道转弯实验, 验证了机器人结构设计的合理性、逆运动学的正确性和运动控制方法的有效性。

关键词:蛇形机器人; 轨迹跟踪; 运动学; 管道环境应用

中图分类号:TP242 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)04-0201-07

Design of Snake Robot in Pipeline and Implementation of Trajectory Tracking Algorithm

YU Yangguang, JI Aihong, QIU Jiahui, LIU Yahong, QIN Guodong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:Snake robot, imitating the body structure and motion mechanism of snake, small in size and multiple with degrees of freedom, displays excellent motion performance in complex environment. A snake robot suitable for narrow pipe environment was proposed. With modular configuration, the proposed robot had 5 degrees of freedom, and kinematics analysis was conducted by Denavit-Hartenberg method. Based on the forward trajectory tracking control algorithm from the tail to the head of the robot, the trajectory tracking motion control method of the robot was established. The experimental prototype was designed and the experiments on motion control and actual pipe turning were carried out, which verified the rationality of the robot structure design, the correctness of the inverse kinematics and the effectiveness of the motion control method.

Keywords:snake robot; trajectory tracking; kinematics; pipeline application

0 引言

自然界中, 蛇具有优异的运动能力, 这取决于其独特的身体结构与运动方式。蛇有 130~500 个脊椎骨, 每两节脊椎骨通过一个球窝结构连接在一起, 虽然两个脊椎骨之间绕垂直轴的相对旋转运动为 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$, 绕水平轴的相对旋转运动仅有几度, 但蛇的灵活性正是由这些脊椎骨的微小运动总和而产生^[1]。这种机械式的互联为仿生蛇形机器人带来了设计灵感。

蛇形机器人^[2]以蛇类脊柱为模仿对象, 相邻关节间可以弯曲一定角度, 通常由若干相同的模块通过多自由度的关节串联而成^[3]。因其具有体积小、运动灵活、环境适应性强等特点, 被广泛应用于设备维护、灾害救援等领域。蛇形机器人在结构上可分为三类: 带有从动轮的蛇形机器人、不

带从动轮的蛇形机器人和配备有主动推进装置的蛇形机器人。前两类无主动推进装置的蛇形机器人, 需要像真正的蛇一样在横向波动中移动, 依靠自身扭动产生的驱动力进行运动, 限制多, 速度慢。相比之下, 具有主动推进装置的蛇形机器人可以在每个节段中产生推进力, 即使在没有横向波动的情况下也能移动。

由于自由度较多, 蛇形机器人的控制方法比较复杂。常用的运动控制方法主要有基于蛇形曲线的控制方法、基于数学模型的控制方法和基于 CPG (central pattern generators) 的控制方法等^[4-5]。基于蛇形曲线的控制方法运算简便, 但不利于传感信息的引入; 基于数学模型的控制方法可以实现对蛇形机器人的精确控制, 但建模过程比较复杂; 基于 CPG 的控制方法, 可以在缺乏高层调节和外部反馈的情况下自动产生稳定的振

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB1309604); 国家自然科学基金资助项目(51861135306, 51875281)

第一作者简介:于阳光(1998—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为仿生机器人, 18451582166@139.com。

荡行为,但仅适用于机器人的节律性运动控制。

针对蛇形机器人的运动控制,OWEN^[6]基于大量的生物蛇实验推导出了蜿蜒运动轨迹曲线(Serpennoid 曲线)用于蛇形机器人的运动控制。ARIIZUMI 等^[7]基于蛇形机器人运动有侧滑约束条件建立了蛇形机器人的运动学模型,基于该运动学模型在机器人头部额外添加一个刚性连杆,用于控制蛇形机器人的运动方向。LILJEBÄCK 等^[8]提出应用虚设的机构 VSOP (virtual structure for orientation and position) 将蛇形机器人等效为机械臂进行建模研究。CHO 等^[9]提出顶尖随动算法,直接控制机器人的头部单元,后续的单元跟踪头部单元的运动。这种后级单元的运动跟随前级变化的移位控制方法在其他机器人上也有应用^[10],但此方法根据机器人头部的运动来确定后级各单元的运动,很难直接改变机器人头部以外部分的运动。唐超权等^[11]利用 Cohen 神经元模型,为蛇形机器人的运动控制设计了多模态中枢模式发生器模型,用来产生机器人运动的多种步态信号。

蛇形机器人优秀的运动灵活性与环境适应性,赋予了其应用于狭小管道环境的可能。在电力、化工等行业存在大量管径狭小、环境复杂的管道,此类管道在极端环境下易于损坏,需要机器人在管道内部执行检测、维修等操作^[12]。为了满足狭小管道环境对蛇形机器人尺寸和运动能力的实际需求,本文提出了一种适用于管道内部的蛇形机器人,采用机器人关节与行进机构配合的构型,保证了复杂环境下机器人的运动能力;采用从机器人尾部到头部的向前轨迹跟踪算法,实现了机器人的轨迹跟踪运动控制,并搭建机器人样机完成实验,验证了机器人结构设计的合理性和运动控制方法的有效性。

1 蛇形机器人

1.1 结构设计

狭小管道环境需要特种机器人具备小型化、轻量化、多自由度的特点以及灵活的运动能力。针对直径在 80 mm~100 mm 的厘米级管道,本文提出了一种蛇形机器人构型以适用于狭小管道环境下的运动和相关任务执行。设计需求归纳如下:

- 1) 具备主动运动能力,运动灵活性强,便于控制;
- 2) 结构尺寸小,管径适应性强,对管径尺寸要求小;

3) 对弯管、T 型管等复杂管道环境适应性强;

4) 可搭载图像采集传输模块等执行器,满足管道内检测需求。

机器人整体方案设计对机器人的运动性能起决定作用,主要包括运动方式、驱动方式和关节连接方式等。综合分析设计需求与不同运动方式的机器人,本文选取的机器人形式为配备有主动驱动装置的蛇形机器人,机器人为多关节结构,相邻关节间可以弯曲一定角度,拥有更多的自由度,更有利于机器人在狭小管道内的灵活运动。电机直接驱动执行机构的方式占用空间小,有利于降低机器人整体尺寸,故机器人主动推进装置选择为直流电机直接驱动的主动轮结构,轮式结构运动速度快,结构简单,同时保证了较大的驱动力。机器人关节连接方式选择为正交连接,该连接方式具有可靠性高、结构工艺性好、控制简单等优点,机器人各关节采用舵机直接驱动的形式,实现俯仰或偏转自由度。

根据上述整体设计方案,蛇形机器人采用三模块的结构(图 1(a)),单个模块如图 1(b)所示,包含机器人关节和行进机构两部分。机器人关节与行进机构配合的构型可以使机器人兼具较多的自由度和较高的运动速度。机器人关节由两个呈正交布置的伺服电机组成,类似于“十字结构”,具备偏转、俯仰两个自由度,能在水平或垂直平面内转动,转动角度范围为 $(-90^{\circ}, 90^{\circ})$ 。行进机构包括直流电机、支架与主动轮。支架两端伸出悬臂用于连接关节部分。

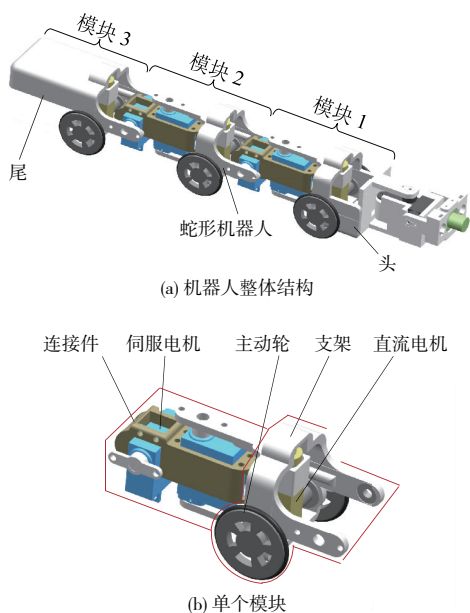


图1 蛇形机器人模型

1.2 弯管通过性设计

机器人的尺寸是决定其在管道内通过性的关键因素,在设计中应根据管道形状及尺寸判断机器人的尺寸设计区间以保证机器人的通过性。

直管对机器人的尺寸要求较低,机器人宽和高不超过管道内径即可。

弯管对机器人的尺寸要求较高,机器人能否顺利通过弯管主要由管道曲率及机器人尺寸决定。弯管主要参数如下:曲率半径 R 、管道内径 D 、直角弯管弯曲角度 $\gamma = 90^\circ$ 。机器人不具备弯管通过性一般是由于机器人过于细长或过于短粗两种情况造成的,极端位置处于弯管中机器人倾斜 45° 处。

将弯管建模为如图 2 所示的圆柱形管段,机器人单个模块简化为圆柱形结构,长度为 L ,直径为 d 。根据图 2 可以求出管道内径、曲率半径和机器人尺寸之间的关系。

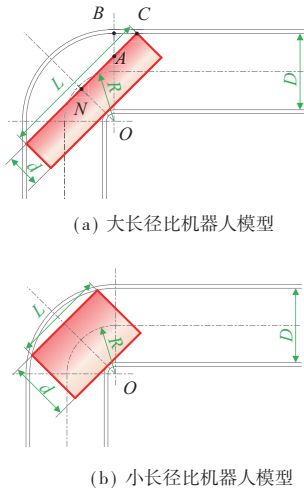


图 2 机器人模块在弯管中的几何位置

当机器人过于细长,即机器人简化模型的长径比 L/d 较大时,机器人前后端面位于管道的直边部分。机器人与弯管的尺寸满足 $0 < d \leq [(R+D/2) \sin 45^\circ - (R-D/2)]$,此时通过几何关系计算机器人长度和直径的关系如下:

$$L = 2(NA + AC) = 2(\sqrt{2}-1)R + (\sqrt{2}+1)D - 2d \quad (1)$$

当机器人过于短粗,即机器人简化模型的长径比 L/d 较小时,机器人前后端面位于管道弯曲部分。机器人与弯管的尺寸满足 $[(R+D/2) \sin 45^\circ - (R-D/2)] < d \leq D$,此时机器人长度和直径的关系如下:

$$L = 2\sqrt{\left(R + \frac{D}{2}\right)^2 - \left(R - \frac{D}{2} + d\right)^2} \quad (2)$$

本文所设计机器人针对的管道尺寸参数为: $R = 65 \text{ mm}$, $D = 100 \text{ mm}$ 。在此弯管环境下,机器人为保证通过性应满足以下条件。

当机器人简化模型的直径满足 $0 < d \leq 66.3 \text{ mm}$ 时,长度计算公式如下:

$$L = -2d + 295.2 \quad (3)$$

当满足 $66.3 \text{ mm} < d \leq 100 \text{ mm}$ 时,长度计算公式如下:

$$L = 2\sqrt{13225 - (15+d)^2} \quad (4)$$

前文将机器人模型简化为圆柱形结构,实际中机器人结构多样,不局限于圆柱形结构。如果机器人为矩形体结构,那么机器人中心所处平面不位于管道轴心平面,即机器人未必与管道同轴。另外机器人运动卡死时还可能发生跳动,造成机器人所处平面的改变以扩大运动空间通过管道。本文在机器人设计中对其尺寸进行了更强的约束,若机器人为矩形体结构,其宽高构成的斜边尺寸应小于圆柱形结构的直径 d ,如图 3 所示。

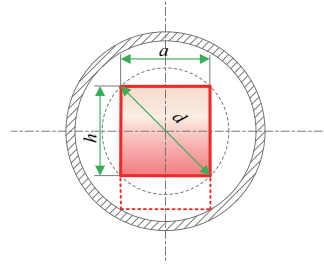


图 3 机器人模块在弯管中的几何位置修正

本文设计机器人单个模块的长宽高分别为 $L = 115 \text{ mm}$, $a = 50 \text{ mm}$, $h = 50 \text{ mm}$,代入公式计算如下:

$$d = \sqrt{a^2 + h^2} = 71 \quad (5)$$

$$L_{\max} = 2\sqrt{\left(R + \frac{D}{2}\right)^2 - \left(R - \frac{D}{2} + 71\right)^2} = 152.7 \quad (6)$$

机器人在宽高已定的情况下,模块的长度可取范围为 $(0, 152.7)$ 。设计中 $L = 115 \text{ mm}$,故机器人的尺寸设计在弯管通过性方面是合理的。

2 运动控制方法

2.1 轨迹跟踪算法

轨迹跟踪是蛇形机器人进入狭窄工作空间的常用方法之一,其目的是控制机器人各个关节的转动角度、角速度等变量使机器人能对一条给定的轨迹进行跟踪。机器人轨迹跟踪算法的关键是

以一定的方式不断更新多关节机器人的空间位置,不能将移动机器人整体视作一个点,也不能只关注机器人头部位置的拟合,而是要对机器人整体进行每个关节的轨迹跟踪。具有主动推进装置的蛇形机器人通常采用移位控制,根据机器人头部的移动或运动学来确定后级各单元的运动,很难直接改变机器人头部以外部分的运动。而传统的蛇形臂等超冗余度机器人采用的轨迹跟踪过程主要有两种:一种为已知机器人末端关节的位置或姿态,然后根据给定轨迹反向求解其余关节的关节变量,完成逆运动学求解;另一种为驱动箱进给运动,正向依次拟合各个关节到给定轨迹上求解关节变量,完成逆运动学求解。受此启发,本文针对所设计的蛇形机器人,将机器人各关节以一定速度沿连杆切向方向进给,从机器人尾部开始,依次将每个关节拟合到跟踪曲线,使机器人的轨迹跟踪简化为各机器人连杆末端对任务曲线离散点的连续跟踪拟合的过程,最终求解关节变量以完成逆运动学求解。

本文采用跟踪算法的原理如图4所示。图中粗线部分表示机器人的一个简化连杆,初始时刻连杆首尾两端位置为 $[W_0^{j-1}, W_0^j]$,机器人以一定速度运动。假设连杆的首尾两端在 t 时刻移动到 $[W_{i-1}^{j-1}, W_{i-1}^j]$ 处,在下一时刻 $t+\Delta t$ 时,连杆尾端更新至 W_i^{j-1} 位置。通过杆长 l 可以确定连杆首端 W_i^j 的位置区间,连杆的位置更新为 $[W_i^{j-1}, W_i^j]$ 。

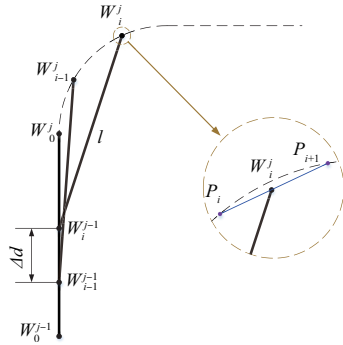


图4 轨迹跟踪算法原理

如图4中的局部放大图所示,连杆首端 W_i^{j-1} 移动至离散曲线上 P_i 和 P_{i+1} 的工作区域中,在极限小距离内曲线可以近似由直线代替,通过两点确定一条直线,可以获得在 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 和 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 处的线性方程:

$$\frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i} = \frac{y-y_i}{y_{i+1}-y_i} = \frac{z-z_i}{z_{i+1}-z_i} = k \quad (7)$$

W_i^j 在基坐标系中的位置坐标可以通过机器人的正运动学方程获得。本文设计的蛇形机器人每个相邻关节的运动方向均保持正交,且机器人为多模块结构,相邻模块间的坐标变换规律相同。本文利用D-H分析法(denavit-hartenberg method)^[13],完成机器人的运动学建模,建立如图5所示的坐标系,D-H参数如表1所示。

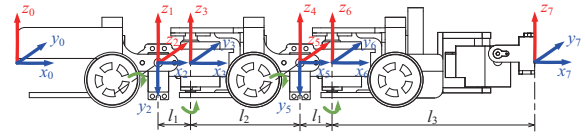


图5 蛇形机器人坐标系

表1 D-H参数表

连杆	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}
1	θ_1	d_1	a_0	α_0
2	$\theta_2 = \alpha_1$	$d_2 = 0$	$a_1 = 0$	$\alpha_1 = -90^\circ$
3	$\theta_3 = \beta_1$	$d_3 = 0$	$a_2 = l_1$	$\alpha_2 = +90^\circ$
4	$\theta_4 = 0$	$d_4 = 0$	$a_3 = l_2$	$\alpha_3 = 0^\circ$
5	$\theta_5 = \alpha_2$	$d_5 = 0$	$a_4 = 0$	$\alpha_4 = -90^\circ$
6	$\theta_6 = \beta_2$	$d_6 = 0$	$a_5 = l_1$	$\alpha_5 = +90^\circ$
7	$\theta_7 = 0$	$d_7 = 0$	$a_6 = l_3$	$\alpha_6 = 0^\circ$

蛇形机器人相邻模块之间的齐次变换矩阵相同,以其中一个模块为例,从坐标系{4}到坐标系{1}的齐次变换矩阵为:

$${}^1_4T = \text{Rot}(z, \theta_2) \text{Trans}(0, 0, 0) \text{Rot}(x, -90^\circ) = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$${}^2_3T = \text{Rot}(z, \theta_3) \text{Trans}(l_1, 0, 0) \text{Rot}(x, 90^\circ) = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^3_4T = \text{Rot}(z, 0^\circ) \text{Trans}(l_2, 0, 0) \text{Rot}(x, 0^\circ) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^1_4T = {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos\theta_2\cos\theta_3 & -\cos\theta_2\sin\theta_3 & \sin\theta_2 & l_2\cos\theta_2\cos\theta_3+l_1\cos\theta_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & l_2\sin\theta_3 \\ -\sin\theta_2\cos\theta_3 & \sin\theta_2\sin\theta_3 & \cos\theta_2 & -l_2\sin\theta_2\cos\theta_3-l_1\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $l_i(i=1,2,3)$ 是连杆长度; θ_2, θ_3 是关节转动角度。

可以得到相邻模块之间的齐次变换矩阵,基于此机器人各模块的位姿通过逐次变换也可以准确地描述出来。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = T_1 \cdot T_2 \cdots T_{i-1} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过线性方程和机器人的运动学方程,联立式(7)、式(12)可以得到:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = T_1 \cdot T_2 \cdots T_{i-1} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k(x_{i+1}-x_i)+x_i \\ k(y_{i+1}-y_i)+y_i \\ k(z_{i+1}-z_i)+z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

该方程包含3个未知量 $[\alpha_i, \beta_i, k]$,存在唯一的解,即蛇形机器人的逆运动学解。蛇形机器人的轨迹跟踪就是通过联立过 $[P_i, P_{i+1}]$ 的直线方程和机器人的正运动学方程,得到逆运动学解 $[\alpha_i, \beta_i]$ 和相应的坐标位置 $[x_i, y_i, z_i]$ 来完成。轨迹跟踪算法求解流程如图6所示。

2.2 仿真实验

本文首先通过仿真验证了轨迹跟踪算法的有效性,针对机器人实际应用的管道环境存在弯管,在 $x-y$ 平面设计了转弯曲线作为目标轨迹,曲线参数的设定取决于实际弯管的尺寸参数。

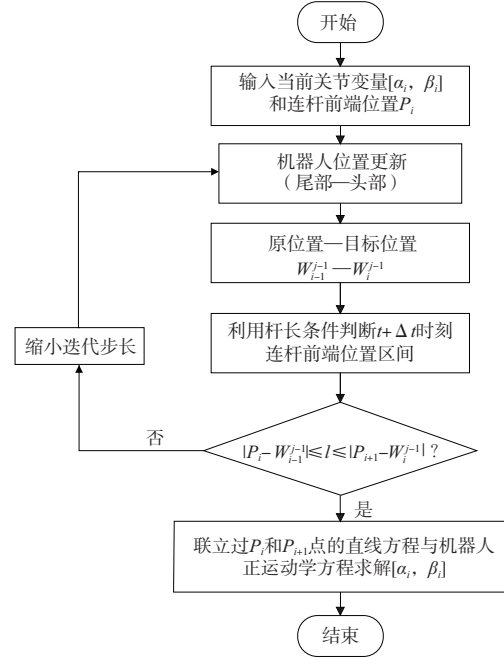


图6 轨迹跟踪算法求解流程

仿真中的蛇形机器人结构如图1所示,拥有3个模块,5个自由度。机器人设置为以恒定速度50 mm/s移动。采用轨迹跟踪算法对机器人的每个关节求解运动学逆解,得到仿真结果。机器人转弯轨迹跟踪仿真的序列图如图7所示。从图中可以看出机器人各关节在跟踪目标曲线时具有很好的拟合度,逆运动学求解正确,在整个跟踪过程中,机器人运动平稳、位置偏移较小。

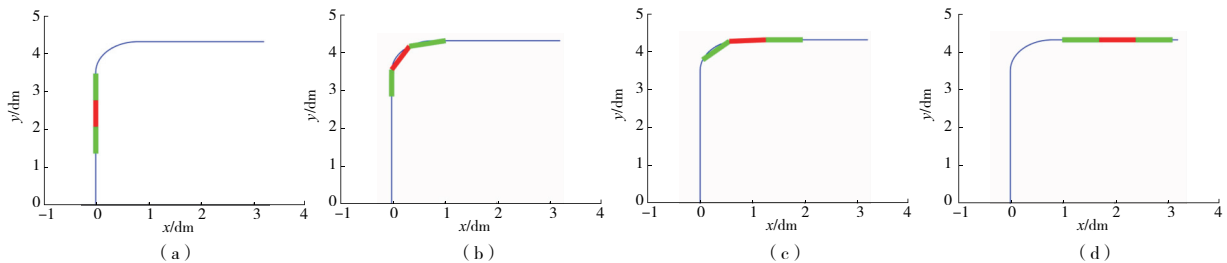


图7 转弯轨迹跟踪序列图

转弯曲线仅需机器人在二维平面进行轨迹跟踪,不涉及三维空间运动,所以机器人俯仰关节的旋转角度 α_i 总是0,只有偏转关节的旋转角度 β_i

需要进行计算,结果如图8所示。从图中可以看出,关节转角在整个跟踪过程中,由初始时刻的0 rad转变为 $-5\pi/18$ rad,再以相反的趋势转变为

0 rad。整个过程中转角变化十分平稳,关节逆运动学解无奇异,并且每个时刻的关节旋转角度均处于关节转角的变化范围($-\pi/2, \pi/2$)之内,跟踪任务可以在设计的极限旋转角度内完成。

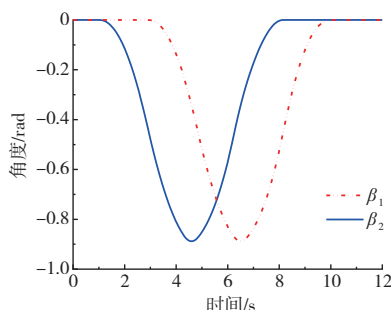


图8 转弯轨迹跟踪逆运动学

3 样机实验

3.1 实验设计

蛇形机器人样机的长宽高尺寸为 310 mm×50 mm×50 mm,机器人连接件、支架和主动轮由高性能树脂材料通过 3D 打印技术制作而成。该机器人配备 4 个伺服电机(KST DS215MG),3 个直流电机(CHW-GW12T-N20VA),主动轮外缘覆盖有橡胶圈用于增加摩擦力。实际测得机器人的直线运动速度为 50 mm/s,机器人总质量为 300 g,各零部件之间通过螺栓螺母连接。机器人上安装有 5 个荧光标记点,以便于后期机器人关键点的捕捉与运动分析,标记点分别位于机器人每一模块的关节部分和行进机构部分,具体位置如图 9 中放大图所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。蛇形机器人置于如图 9 所示长 1 800 mm,宽 860 mm 的水平实验平台上。实验平台周围安装有 4 台高速摄像机,从 4 个不同的视角拍摄机器人的运动实验,用来确定标记点在整个空间区域的三维坐标信息。实验中选择与轨迹跟踪仿真中相同的目标曲线,利用算法求解出的关节转角对机器人进行控制。针对目标曲线的轨迹跟踪运动,共进行了 10 次实验。在高速摄像机获取运动序列后,运行程序跟踪所设置的 5 个荧光标记点,然后利用直接线性变换 DLT 方法(direct linear transformation)获得任意时刻下这些标记点的坐标数据^[14]。

3.2 实验结果

完成运动控制实验后,将 10 次实验中各标记

点的坐标数据求取平均值并进行线下拟合,得到机器人各标记点的运动轨迹。图 10 显示了蛇形机器人进行转弯运动的实验结果。

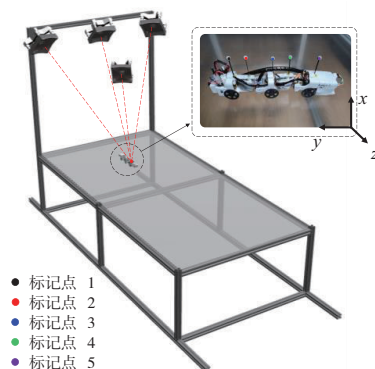


图9 运动控制实验装置

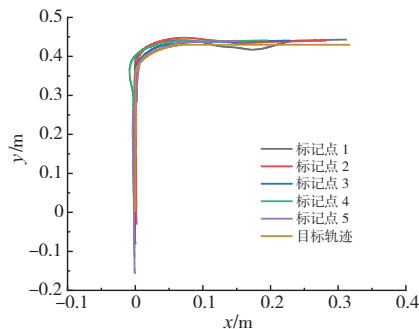


图10 转弯运动轨迹

在整个运动过程中,蛇形机器人按照目标轨迹进行轨迹跟踪,与目标轨迹保持了较好的拟合度,这与理论模型非常吻合。在运动过程的某些阶段,机器人标记点轨迹与目标曲线存在一定误差。5 个标记点最大距离误差的平均值为 12 mm,误差百分比为 2.8%。这些实验结果较好地验证了机器人运动学分析与轨迹跟踪算法的正确性。

为了进一步验证机器人在管道环境下的运动性能,本文开展了实际管道内的转弯实验。管道参数如下:入口直径 80 mm,90°直角转弯至直径 100 mm 的管道。实验结果如图 11 所示,可以观察出机器人能适应此类狭小管道环境,完成管道内的转弯运动。

通过对机器人的运动控制实验和实际管道内的转弯实验,得出结论:蛇形机器人的结构设计具备合理性,针对机器人设计的轨迹跟踪算法具备有效性,并且机器人在管道环境下进行了实际测试,运动性能满足使用要求。

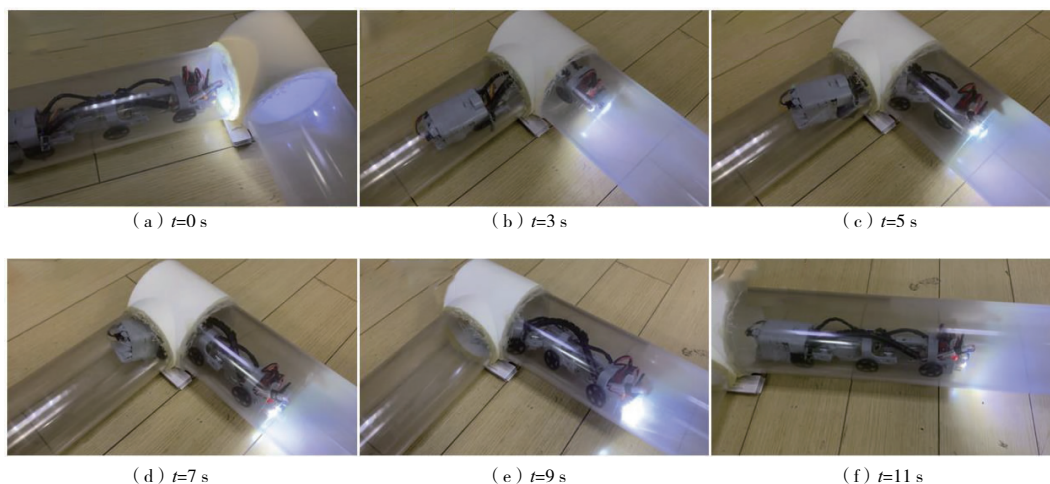


图 11 管道内转弯实验

4 结语

1) 基于蛇的身体结构所带来的仿生设计灵感,结合狭小管道应用场景,设计了三模块五自由度蛇形机器人。机器人多关节与行进机构配合的构型,保证了蛇形机器人的多自由度,提高了机器人对管道环境的适应性。

2) 对蛇形机器人进行了运动学分析,基于从机器人尾部到头部的正向轨迹跟踪控制算法,实现了蛇形机器人的轨迹跟踪运动控制。仿真结果表明:机器人轨迹跟踪偏移量较小,逆运动学求解的关节角度变化满足连续性与平稳性,可以实现机器人各关节精确跟踪目标轨迹的控制需求。

3) 搭建了蛇形机器人样机,设计并开展了运动控制实验和实际管道环境下的转弯实验。实验结果表明:机器人轨迹跟踪精度较高,运动平稳,在实际管道环境下可以实现直角转弯,进一步验证了机器人设计的合理性、逆运动学的正确性和运动控制方法的有效性。未来将着重于解决机器人运动中存在的滑动问题,通过结构优化和误差补偿等方式弥补由滑动带来的误差。今后,准备探索将该机器人应用于竖直管道的可能性。

参考文献:

- [1] (挪)帕尔·李列巴克(Pal Liljeback),等. 蛇形机器人,建模、机电设计及控制[M]. 谭天乐,译. 北京:国防工业出版社,2015:5-14.
- [2] MANZOOR S, CHOI Y. A unified neural oscillator model for various rhythmic locomotions of snake-like robot[J]. Neurocomputing, 2016, 173: 1112-1123.
- [3] 张月, 董雷, 宦荣华, 等. 风电叶片管道内窥履带机器人的设计与运动分析[J]. 中国机械工程, 2021, 32(15): 1884-1889.

- [4] 龙艳琴. 变刚度二维蛇形机器人机构设计与运动控制研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
- [5] 唐超权, 马书根, 李斌, 等. 具有环境适应能力的蛇形机器人仿生控制方法[J]. 中国科学(信息科学), 2014, 44(5): 647-663.
- [6] OWEN T. Biologically inspired robots: snake-like locomotors and manipulators [J]. Robotica, 1994, 12(3): 282.
- [7] ARIIZUMI R, TANAKA M, MATSUNO F. Analysis and heading control of continuum planar snake robot based on kinematics and a general solution thereof[J]. Advanced Robotics, 2016, 30(5): 301-314.
- [8] LILJEBÄCK P, STAVDAHL Ø, PETTERSEN K Y. Modular pneumatic snake robot 3d modelling, implementation and control [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2005, 38(1): 19-24.
- [9] CHO C N, JUNG H, SON J, et al. An intuitive control algorithm for a snake-like natural orifice transluminal endoscopic surgery platform: a preliminary simulation study[J]. Biomedical Engineering Letters, 2016, 6(1): 39-46.
- [10] TANAKA M, NAKAJIMA M, TANAKA K. Smooth control of an articulated mobile robot with switching constraints[J]. Advanced Robotics, 2016, 30(1): 29-40.
- [11] 唐超权, 马书根, 李斌, 等. 基于神经步进激励机制的蛇形机器人环境自适应仿生控制策略[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 53-62.
- [12] 邢利辉, 王亚慧, 邓蕊. 管道探测蛇形机器人控制系统设计及仿真[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(6): 1340-1344.
- [13] DENAVIT J, HARTENBERG R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices [J]. Journal of Applied Mechanics, 1955, 22(2): 215-221.
- [14] DIANE H, THERIAULT, NATHAN W, et al. A protocol and calibration method for accurate multi-camera field videography [J]. Journal of Experimental Biology, 2014, 217: 1843-1848.

收稿日期: 2023-01-06