

DOI: 10.3901/JME.2021.23.021

# 基于 3-RSR 并联机构的蛇形机器人本体构型设计与运动性能研究\*

魏巍<sup>1</sup> 庄哲明<sup>1</sup> 唐昭<sup>1</sup> 戴建生<sup>1,2</sup>

- (1. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室 天津 300350;  
2. 伦敦大学国王学院自然与机械工程系 伦敦 WC2R 2LS 英国)

**摘要:** 蛇形机器人作为仿生机器人的重要分支, 身形柔软轻小, 运动灵活多变, 具备很强的环境适应能力, 在军事侦察、地质勘探、灾难救援等领域拥有非常广阔的发展前景。创新性地将并联机构、折纸机构和柔性铰链相结合, 设计出一种灵活度高、结构紧凑的模块化蛇形机器人单元, 并从数学模型、旋量分析等角度进行合理论证。自主完成硬件电路搭建、控制算法编写, 设计蛇形机器人控制系统实现多路直流减速电机协同, 并进行仿蛇运动的步态规划。加工制作蛇形机器人样机并完成了特定环境下机器人性能测试。

**关键词:** 蛇形机器人; 并联机构; 旋量系分解; 步态规划

**中图分类号:** TP24

## Body Configuration Design and Kinematic Performance Research of Snake-like Robot Based on 3-RSR Parallel Mechanism

WEI Wei<sup>1</sup> ZHUANG Zheming<sup>1</sup> TANG Zhao<sup>1</sup> DAI Jiansheng<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350;  
2. School of Natural and Mathematical Sciences, King's College London, University of London, London WC2R 2LS, UK)

**Abstract:** As an important branch of bionic robot, snake-like robot has a soft and light body, flexible movement and strong environmental adaptability. It has a very broad development prospect in military reconnaissance, geological exploration, disaster rescue and other fields. A modular snake-like robot unit with high flexibility and compact structure is designed by innovatively combining parallel mechanism, origami mechanism and flexure hinge. The hardware circuit construction and control algorithm writing are completed independently. The control system of snake-like robot is designed to realize the cooperation of multiple DC deceleration motors, and the gait planning of snake-like motion is carried out. The prototype of snake-like robot is manufactured and the robot performance test in specific environment is completed.

**Key words:** snake-like robot; parallel mechanism; spinor system decomposition; gait planning

## 0 前言

当今时代, 科学技术日新月异, 机器人作为一种机械、控制、计算机等多学科交叉融合的科技产品, 其相关研究取得了长足的进步。特别地, 仿生机器人由于具备某些生物学特性, 更能适应复杂多

变的外界环境, 成为了国内外学者的研究热点之一。在种类各异的仿生机器人中, 蛇形机器人具备生物蛇的体态轻小、运动灵活、身形柔软和易于伪装等特点。此外, 较传统移动式机器人, 蛇形机器人的控制集成化与结构紧凑性特征更为突出。因而, 常常在军事侦察、抢险救灾、地质勘探和海底作业等诸多军用和民用的高危环境中大显身手。综合蛇形机器人的显著优势与应用前景, 近年来对于蛇形机器人的研究, 受到了众多国内外专家学者的关注。

\*国家自然科学基金重点资助项目(51535008)。20210322 收到初稿, 20210812 收到修改稿

在国外研究方面,日本东京工业大学 HIROSE 教授研发团队推出的 ACM 系列蛇形机器人,在版本升级的过程中,机器人关节构型逐步优化,运动形式日趋多样,成为了世界蛇形机器人发展历史的缩影<sup>[1]</sup>。美国 MILLER 团队研制的蛇形机器人在外形接近生物蛇的同时,具备极高的蜿蜒效率,但是这两种蛇形机器人只具备对平坦地面的适应能力<sup>[2]</sup>。NASA 的 JPL 采用 ENC 蛇形机器人结构设计,具有 12 个可运动自由度,可实现在具有障碍物的环境中,进行复杂操作任务的功能<sup>[3]</sup>。美国卡耐基梅隆大学研制出的采用正交关节的 Uncle-SAM<sup>[4]</sup>,以及挪威科技大学研制的采用齿轮系统传动的 Kullo<sup>[5]</sup>在具备一定越障能力的同时,能实现三维空间运动。

在国内研究方面,我国第一台蛇形机器人样机诞生于上海交通大学,虽然仅仅实现了平面运动,但却为我国蛇形机器人发展提供了很好的研究思路<sup>[6]</sup>。随后,又有国防科技大学研发团队将信号传输系统附加于蛇形机器人设计中<sup>[7]</sup>,以及沈阳自动化所研发团队在完成蛇形机器人基本动作的同时,将运动范围拓宽到了水下<sup>[8]</sup>。此外,燕山大学与北京化工大学所开发的基于空间连杆机构的蛇形机器人也具有一定的代表性<sup>[9]</sup>。

纵观现阶段国内外蛇形机器人研究成果,大多存在单元灵活度有限、运动精度较低、维修难度较大和研发成本较高等不足。针对以上研究现状,本文创新性地提出了一种新型基于 3-RSR 并联机构蛇形机器人设计,利用折纸原理优化支链结构,完成了该机器人本体结构设计与控制系统规划,制作了对应的样机模型,并对样机进行了部分运动性能实验测试。

## 1 构型设计研发基础

### 1.1 构型设计灵感来源

#### 1.1.1 生物蛇的骨骼结构特点

蛇类属于脊椎动物中的一种,其骨骼系统主要由颅骨和脊骨组成<sup>[10]</sup>。脊骨与颅骨紧密相连,周而复始、连续相接的脊椎及两肋又形成了完整的脊骨。相邻的脊椎可以进行前后及侧向的适当转动,但总体保持在  $2^{\circ}\sim 10^{\circ}$  之间<sup>[11]</sup>。虽然相邻脊椎转动范围较小,但若干块连续的脊柱同时产生转动,就可形成大幅度的运动空间,完成蛇类的基本运动。此外,单独分析一块脊椎可以发现,蛇的脊椎又由前椎和尾椎构成,前椎和尾椎形成前后关节,两椎之间的椎弓凹作为关节连接,肋骨作为侧向关节,由此保

证了前后关节的密切联系及运动灵活性<sup>[12]</sup>。骨骼之间填充以肌肉,从而形成了蛇类的运动器官。类比于生物蛇的重复性关节构型,在蛇形机器人设计中应体现关节的可重构特征,即模块化关节结构设计;单独分析某一关节,在关节构型选择上应充分模仿生物蛇前后关节的空间连接,寻求较为合理的空间机构。

#### 1.1.2 生物蛇的运动特点

生物蛇可以根据所处环境的差异,自主调整运动形式,以增强环境适应能力。其基本运动形式分为:蜿蜒运动、伸缩运动、侧向运动和直线运动<sup>[13]</sup>。

(1) 蜿蜒运动:蛇身同地面接触,依靠行进方向及其垂向的外界摩擦力实现运动,充分借助外部环境供力,效率优势很强,是蛇类应用频率最高的运动方式。

(2) 伸缩运动:蛇身运行状态为“S”形,身体前半部分略高于地面,后半部分紧贴地面。属于蜿蜒运动的简化形式,但运动时需要自身提供较多能量,效率偏低,多应用于表面较为光滑的场合。

(3) 侧向运动:蛇身仅依靠腹部同沙粒接触。蛇头向行进方向一侧跃动,带动蛇身产生跨越。特别适用于由粗糙细小颗粒组成的地表环境。

(4) 直线运动:蛇身基本呈现直线状态,通过肌肉小幅度收缩,带动关节产生微小转幅,从而推动行进。该运动形式行进速度缓慢,使用频率较低,多见于蟒蛇等大型蛇类。

### 1.2 构型设计模型基础

本文介绍的蛇形机器人关节结构构型,以 3-RSR 并联机构为基础,运用折纸机构对其中的支链构型加以改良。在构型设计方面,动、静平台通过运动支链连接,很好的模拟了生物蛇骨骼结构的前、后及侧向关节;在功能实现方面,运用折纸结构优化支链构型,在满足了实现基本运动自由度的同时,扩展了机构的运动空间。

#### 1.2.1 3-RSR 并联机构

3-RSR 并联机构的定义是,机构动平台和静平台由完全相等的三角形构成,动平台和静平台之间依靠三条支链相连,每条支链又由两根动杆和一个转动副组成<sup>[14]</sup>。3-RSR 并联机构在具备并联机构速度快、精度高、动态响应迅速等共性优势的基础上<sup>[17]</sup>,结构形式又相对简单,可实现生物蛇运动时三方面(轴向伸缩、轴向旋转和同轴向垂直方向旋转)的自由度需求。

#### 1.2.2 折纸机构

折纸机构是现代机构学的一个分支,它的形成

原理来自于古老的折纸艺术, 属于机构学分支中的可展机构范畴<sup>[15]</sup>。目前, 在工程研究领域, 折纸机构的应用非常广泛。在航空工程领域, 2012 年英国的 ROBERT 研发了一款可折叠式太空望远镜<sup>[16]</sup>。在医疗技术领域, 目前已有将折纸机构运用在血管扩充支架设计中的实例。

## 2 构型设计理论综合

### 2.1 3-RSR 并联机构运动模型建立

如图 1 所示为 3-RSR 并联机构的简化模型。该模型由静平台、动平台、连接支链三部分组成。其中, 连接支链分为三组, 呈 360°圆周对称分布。每组支链又包括主动连杆和被动连杆两部分, 主动连杆与动平台相连, 被动连杆与静平台相连。同组支链的两连杆依靠球铰链连接, 连杆同动、静平台依靠转动副连接。

现对 3-RSR 并联机构简化模型的坐标系及相关符号表示做出说明: 分别于静平台建立基础坐标系(静坐标系)  $O-x_0y_0z_0$ , 于动平台建立动坐标系  $P-x_py_pz_p$ 。两坐标系坐标原点  $O$  点和  $P$  点, 是静平台和动平台的几何中心。图中  $S_i (i=1,2,3)$  表示球铰链,  $R_i (i=1,2,3)$  表示静平台转动副,  $R'_i (i=1,2,3)$  表示动平台转动副。两坐标系中,  $x_0$  轴沿矢量  $OR_1$  方向, 并指向  $R_1$ ;  $z_0$  轴垂直于静平台, 竖直向上;  $x_p$  轴沿矢量  $PR'_1$  方向, 并指向点  $R'_1$ ,  $z_p$  轴垂直于动平台, 竖直向上。设三根驱动杆长度均相同, 其大小为  $l_1$ ; 三根被动杆长度均相同, 其大小为  $l_2$ 。设静平台中心  $O$  点到其任意转动副的距离为  $r$ , 则动平台中心  $P$  点到其任意转动副的距离为  $r'$ 。将驱动杆的输入角(即  $OR_i$  和  $R_iS_i$  间夹角)表示为  $\beta_i (i=1\sim3)$ ; 被动杆的输出角(即  $PR'_i$  和  $R'_iS_i$  间夹角)表示为  $\alpha_i (i=1\sim3)$ 。  $L$  为两平台所在平面交线, 两平台所在平面间夹角用  $\varphi$  表示。

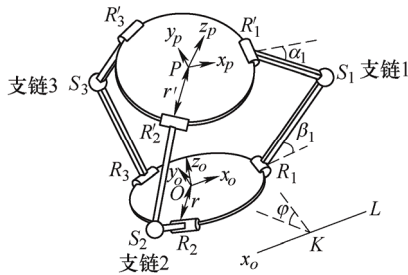


图 1 3-RSR 并联机构简化模型

### 2.2 动平台位置参数求解

动平台位置参数求解的思路在于, 已知静平台、

动平台形状参数及输出角大小, 反向求解静平台位置参数, 即输入角大小。

为简化分析, 下文将针对一种特殊的对称型 3-RSR 并联机构进行动平台位置参数的求解计算。该对称型 3-RSR 并联机构满足下述条件: ①  $l_1 = l_2$ ; ②  $r = r'$ , 即驱动杆和被动杆长度相等, 动、静平台大小形状完全相同。

针对该特殊形式的 3-RSR 并联机构, 确定动、静平台具体位置需要三方面约束条件: ① 二者所在平面间的夹角大小; ② 相对距离的大小; ③ 相对于水平坐标轴的方向呈现。综合以上三方面的约束条件, 对已知条件重新做出如下给定:  $\varphi$  为动平台和静平台所在平面的夹角大小,  $\rho$  为静平台中心至两平台交线垂线段长度,  $\theta$  为上述垂线段与  $x_0$  轴正半轴夹角大小。

为便于求解, 在计算过程中还需对动平台和静平台坐标系增加部分新的符号说明。如图 2 所示为各位置参数的几何关系反映(该部分内容, 坐标系均参考基础坐标系)。

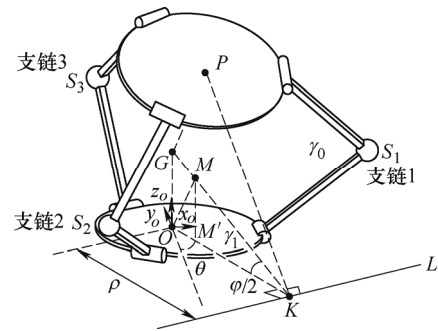


图 2 基础坐标系中各位置参数关系

设由  $S_1, S_2, S_3$  所组成平面(该平面为动、静平台所在两平面的对称等分平面)为  $\gamma_0$ 。  $G$  点为动、静平台过中点的法矢量交点。在静坐标系中, 根据输入角度数、驱动杆长度和中心点到转动副的距离, 可将  $S_1, S_2, S_3$  三个球形铰链的位置坐标用含有输入角  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  的式子表示出来, 即

$$S_1 = \begin{bmatrix} r + l \cos \beta_1 \\ 0 \\ l \sin \beta_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} \frac{r + l \cos \beta_2}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}(r + l \cos \beta_2)}{2} \\ l \sin \beta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{S}_3 = \begin{bmatrix} -\frac{r+l\cos\beta_3}{2} \\ \frac{\sqrt{3}(r+l\cos\beta_3)}{2} \\ l\sin\beta_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据上式, 只需运用平面“点法式方程法”求解中心平面的方程表达, 进而将  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  的位置坐标代入方程, 即可求得  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  的大小。对于中心平面的方程表达可按照如下过程求解。

(1) 求解中心平面法矢量: 在图 2 中, 设静平台所在平面为  $\gamma_1$ , 动平台所在平面为  $\gamma_2$ 。过点  $O$  做  $L$  的垂线段, 垂足点为  $K$ ; 做  $GK$  的垂线段, 垂足点为  $M$ 。

由于  $OG \perp$  平面  $\gamma_1$ ,  $L \subset$  平面  $\gamma_1$ , 故  $OG \perp L$ ; 由于  $OG \perp L$ ,  $OK \perp L$ ,  $OG \cap OK = O$ , 故  $L \perp$  平面  $GPKO$ ; 由于  $OM \subset$  平面  $GPKO$ , 故  $OM \perp L$ ; 又  $OM \perp GK$ ,  $GK \cap L = K$ , 故直线  $OM \perp$  平面  $\gamma_0$ 。

矢量  $\mathbf{OM}$  即为中心平面法矢量。在利用  $\varphi$ 、 $\rho$ 、 $\theta$  三个已知参数求解  $M$  点坐标时, 需要运用三角形相似性质, 同时引入  $M$  点在静坐标系中的投影点  $M'$  进行求解。最终得到  $M$  点坐标为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \rho \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\theta & -\rho \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\theta & \rho \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

约去公有参量, 得到中心平面的法矢量

$$\mathbf{OM} = \begin{bmatrix} \sin\frac{\varphi}{2} \cos\theta & -\sin\frac{\varphi}{2} \sin\theta & \cos\frac{\varphi}{2} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

(2) 求解中心平面内定点坐标: 此处选取  $K$  点为待求定点, 其坐标为

$$\mathbf{K} = [\rho \cos\theta \quad -\rho \sin\theta \quad 0]^T \quad (6)$$

(3) 代入求解: 设待求平面方程为  $A(x-x_0) + B(y-y_0) + C(z-z_0) = 0$ , 其中  $(A, B, C)$  表示该平面一条法矢量,  $(x_0, y_0, z_0)$  为平面内一定点坐标, 将矢量  $\mathbf{OM}$  和  $K$  点坐标分别代入, 得到中心平面的点法式平面方程

$$\begin{aligned} & \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\theta (x - \rho \cos\theta) + \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\theta (y + \rho \cos\theta) + \\ & \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) z = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

将  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  三点的坐标分别代入该方程中, 即可求出  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  具体数值。

## 2.3 基于旋量理论的关节模块活动度分析与计算

在确定了蛇形机器人关节模块基本构型之后, 有必要对其活动度进行理论分析, 从而进一步为机器人运动功能的实现提供保障。基于前文对于关节模块动平台位姿的求解, 本小节将主要利用旋量理论对关节模块进行活动度(也称机构自由度)的分析与计算。

(1) 旋量坐标系的建立: 对于任意空间位移变换, 著名的沙勒定理<sup>[17]</sup>给出了螺旋运动解释, 即: 空间位移可以分解为旋转并绕着一条线的滑动得以实现。而旋量理论正是解释螺旋运动实现空间位移的良好手段。旋量指的是一个包含旋距的线矢量, 机构任意关节的可以用由两个三维矢量构成的六维矢量表示, 如式(8)所示

$$\mathbf{S} = \begin{Bmatrix} \mathbf{l} \\ \mathbf{r} \times \mathbf{l} + h\mathbf{l} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中,  $\mathbf{l}$  表示旋转轴线的姿态矢量;  $\mathbf{r}$  表示旋转轴线的位置矢量, 可以用该轴线上任意一点  $P$  的位置矢量表示;  $h$  表示旋量的旋距(当关节为转动副时,  $h=0$ , 当关节为移动副时,  $h$  趋于无穷大)。上述矢量坐标均建立在静平台坐标系之上。对于本文所讨论的蛇形机器人关节模块构型而言, 除三个球铰链外, 其余均为转动副。每一个转动副的回转轴即为该转动副旋量坐标的旋转轴线, 而每一个球铰链旋量坐标的旋转轴线又可由沿坐标轴三个基本方向的三条回转轴线叠加而成, 故共得到如图 3 所示的 6 个旋量坐标与 3 个旋量坐标系, 至此旋量坐标系建立完成(对于同一支链的 5 个旋量, 按照从动平台到静平台的方向顺序, 可分别表示为  $\mathbf{S}_{ij}$ , 其中  $i=1\sim 3$ ;  $j=1\sim 5$ )。

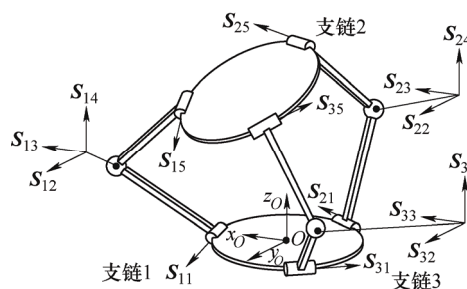


图3 各运动副旋量位置关系

(2) 各运动副旋量及旋量系的计算求解: 在上文建立的旋量坐标系中, 就对称轴位于静坐标系  $x$  轴上的一个旋转副而言, 其位置矢量和姿态矢量可以分别表示为

$$\mathbf{m}_1 = [r \ 0 \ 0]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{n}_1 = [0 \ 1 \ 0]^T \quad (10)$$

故其旋量为

$$\mathbf{S}_{11} = \{0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ r\}^T \quad (11)$$

利用有限位移旋量法, 通过旋量间的角度变换, 可以求得静平台其他两个转动副的旋量表示, 即

$$\mathbf{S}_{21} = \left\{ -\frac{\sqrt{3}}{2} \quad -\frac{1}{2} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad r \right\}^T \quad (12)$$

$$\mathbf{S}_{31} = \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} \quad -\frac{1}{2} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad r \right\}^T \quad (13)$$

相比于旋转副, 球副的旋量计算仅需要将其拆分为三个方向的旋转副即可, 计算方法仍然相同, 得到式(14)~(22)所示的旋量表示

$$\mathbf{S}_{12} = \{0 \ 1 \ 0 \ l \sin \beta_1 \ 0 \ l \cos \beta_1\}^T \quad (14)$$

$$\mathbf{S}_{13} = \{0 \ 1 \ 0 \ -l \sin \beta_1 \ 0 \ r + l \cos \beta_1\}^T \quad (15)$$

$$\mathbf{S}_{14} = \{0 \ 0 \ 1 \ 0 \ -r - l \cos \beta_1 \ 0\}^T \quad (16)$$

$$\mathbf{S}_{22} = \left\{ 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad l \sin \beta_2 \quad -\frac{\sqrt{3}(r + l \cos \beta_2)}{2} \right\}^T \quad (17)$$

$$\mathbf{S}_{23} = \left\{ 0 \quad 1 \quad 0 \quad -l \sin \beta_2 \quad 0 \quad -\frac{(r + l \cos \beta_2)}{2} \right\}^T \quad (18)$$

$$\mathbf{S}_{24} = \left\{ 0 \quad 0 \quad 1 \quad -\frac{\sqrt{3}(r + l \cos \beta_2)}{2} \quad -\frac{r + l \cos \beta_2}{2} \quad 0 \right\}^T \quad (19)$$

$$\mathbf{S}_{32} = \left\{ 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad l \sin \beta_3 \quad \frac{\sqrt{3}(r + l \cos \beta_3)}{2} \right\}^T \quad (20)$$

$$\mathbf{S}_{33} = \left\{ 0 \quad 1 \quad 0 \quad l \sin \beta_3 \quad 0 \quad -\frac{r + l \cos \beta_3}{2} \right\}^T \quad (21)$$

$$\mathbf{S}_{34} = \left\{ 0 \quad 0 \quad 1 \quad -\frac{\sqrt{3}(r + l \cos \beta_3)}{2} \quad \frac{r + l \cos \beta_3}{2} \quad 0 \right\}^T \quad (22)$$

对于动平台三个旋转副而言, 其旋量表达式的求解, 同样需要通过静平台对应旋转副进行有限位移旋量变换得到。值得注意的是, 变换的基本原则是, 动平台可以看作是静平台围绕平台交线  $L$  旋转平台夹角  $\varphi$  得到。最终得到动平台三个旋转副的旋量表达式为式(23)~(25)。

$$\mathbf{S}_{15} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\sin 2\theta(\cos \psi - 1)}{2} \\ (\cos \psi - 1)\cos^2 \theta + 1 \\ \cos \theta \sin \psi \\ \sin \psi(\rho \sin 2\theta - r \sin \theta) \\ -r \cos \theta \sin \psi \\ r \cos \psi - 2\rho \cos^3 \theta + 2\rho \cos \theta - 2\rho \cos \psi \cos \theta + 2\rho \cos \psi \cos^3 \theta \end{array} \right\} \quad (23)$$

$$\mathbf{S}_{25} = \left\{ \begin{array}{c} -\frac{\sqrt{3}(\cos \varphi - 1)(\sin^2 \theta + 1)}{2} - \frac{\cos \theta \sin \theta(\cos \varphi - 1)}{2} \\ \frac{\cos^2 \theta(\cos \varphi - 1)}{2} - \frac{\sqrt{3} \sin 2\theta(\cos \varphi - 1)}{4} - \frac{1}{2} \\ -\sin \varphi \sin(\theta + 30^\circ) \\ -\frac{\sin \varphi(\rho \sin 2\theta + 2r \sin \theta)}{2} \\ -\frac{\sin \varphi(2r \cos \theta - \sqrt{3}\rho \sin 2\theta)}{2} \\ \rho \cos^3 \theta + r \cos \varphi - \rho \cos \theta + \rho \cos \varphi \cos \theta - \rho \cos \varphi \cos^3 \theta + \sqrt{3}\rho \cos^2 \theta \sin \theta - \sqrt{3}\rho \cos \varphi \cos^2 \theta \sin \theta \end{array} \right\} \quad (24)$$

$$S_{35} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\sqrt{3}(\cos \varphi - 1)(\sin^2 \theta + 1)}{2} - \frac{\cos \theta \sin \theta (\cos \varphi - 1)}{2} \\ \frac{\sqrt{3} \sin 2\theta (\cos \varphi - 1)}{4} - \frac{\cos^2 \theta (\cos \varphi - 1)}{2} - \frac{1}{2} \\ - \sin \varphi \sin(\theta + 30^\circ) \\ \frac{\sin \varphi (\rho \sin 2\theta + 2r \sin \theta)}{2} \\ - \frac{\sin \varphi (2r \cos \theta + \sqrt{3} \rho \sin 2\theta)}{2} \\ \rho \cos^3 \theta + r \cos \varphi - \rho \cos \theta + \rho \cos \varphi \cos \theta - \rho \cos \varphi \cos^3 \theta - \sqrt{3} \rho \cos^2 \theta \sin \theta + \sqrt{3} \rho \cos \varphi \cos^2 \theta \sin \theta \end{array} \right\} \quad (25)$$

(3) 机构活动度的求解: 在得到上述旋量系后, 对上述旋量进行运动旋量系求解。就该单元体而言, 共有三个支链, 每个支链对应的运动旋量系可以表示为

$$S_{li} = \{S_{i1} \ S_{i2} \ S_{i3} \ S_{i4} \ S_{i5}\} (i=1,2,3) \quad (26)$$

求取运动旋量系的互易旋量系可得支链的约束旋量系, 为

$$S_{li}^r = \{S_i^r\} (i=1,2,3) \quad (27)$$

以上约束旋量系构成了运动平台的约束旋量多重集  $\langle S^r \rangle$ , 根据约束旋量系分解定理<sup>[18]</sup>, 可以分解为

$$\langle S^r \rangle = S_{i1}^r \cup S_{i2}^r \cup S_{i3}^r = \langle S_c^r \rangle \cup S_c^r \cup \langle S_v^r \rangle \quad (28)$$

(式(28)中,  $\langle S_c^r \rangle$  称为公共约束旋量多重集,  $S_c^r$  称为互补约束旋量系,  $\langle S_v^r \rangle$  称为冗余约束旋量多重集。)根据基于机构环路的活动度扩展准则<sup>[19]</sup>

$$m = b(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + \text{card} \langle S_c^r \rangle - \dim S_c^r \quad (29)$$

式(29)中,  $m$  表示机构的活动度数;  $b$  表示活动度系数, 对于空间机构而言,  $b = 6 - \lambda$ ,  $\lambda$  是公共约束旋量系的阶数;  $n$  表示构件数;  $g$  表示单自由度运动副数量;  $f_i$  表示第  $i$  个运动副的自由度, 容易求得的条件有

$$n = 8; \ g = 9; \ \sum_{i=1}^g f_i = 6 \times 1 + 3 \times 3 = 9$$

其余条件则需要通过判断  $S_i^r (i=1,2,3)$  的线性相关性进行求解。由于 3 个约束旋量系各不相同, 故其公共约束旋量系  $S^c = \emptyset$ , 则  $\lambda = \dim(S^c) = 0$ , 得到  $b = 6$ 。构造约束旋量系的转置矩阵, 求得其秩的大小为 3, 小于矩阵所含矢量个数 6, 因此上述 3 个约束旋量系线性无关, 故冗余约束旋量多重集  $\langle S_v^r \rangle = \emptyset$ , 互补约束旋量系  $S_c^r = \{S_i^r\} (i=1,2,3)$ , 故

$$\text{card} \langle S_c^r \rangle - \dim S_c^r = 3 - 3 = 0 \quad (30)$$

最终得到机构活动度的计算结果为

$$m = 6 \times (8 - 9 - 1) + 15 + 0 = 3 \quad (31)$$

为检验该计算结果的正确性, 运用式(32)所示的机械原理求解空间机构活动度基本公式<sup>[20]</sup>重新计算。

$$F = 6n - 5P_5 - 3P_3 \quad (32)$$

式中,  $F$  表示机构活动度数;  $n$  表示活动构件数目;  $P_5$  为只有一个自由度, 有 5 个约束的构件;  $P_3$  为有 3 个自由度, 有 3 个约束的构件。得到该机构的活动度个数为

$$F = 6 \times 7 - 5 \times 6 - 3 \times 3 = 42 - 30 - 9 = 3 \quad (33)$$

两种方法计算得到相同的结果, 这与前文运动学分析过程的求解思路保持一致, 从而进一步在理论层面为蛇形机器人单元模块的设计提供了保证。

### 3 样机模型制作与控制系统规划

#### 3.1 样机模型制作

在组成部件方面, 本课题所研究的蛇形机器人关节模块, 如图 4 所示, 以 3-RSR 并联机构为基础, 折纸原理优化改进支链设计, 可满足生物蛇运动时的三方面自由度需求, 产生有限范围内的相对运动。该模块主要由减速电动机、底(顶)盘、支链、联轴器、电机(顶板)座五部分组成。

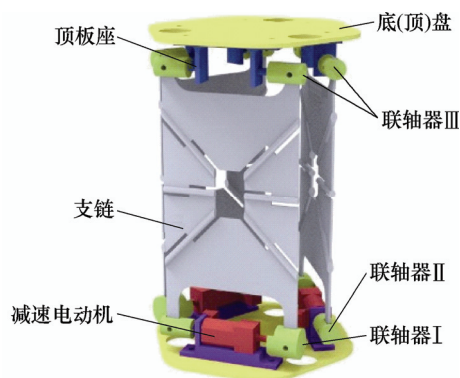
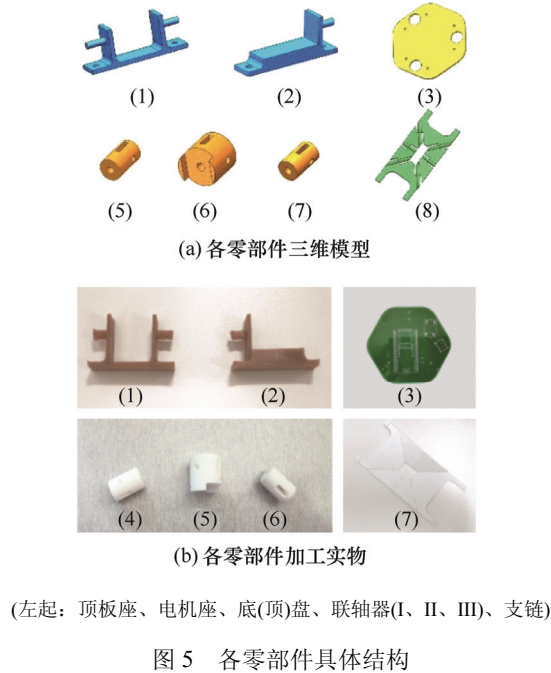


图 4 关节模块装配示意图



在功能实现方面，每个模块装配有 3 个 GA12-N20 减速直流电动机，分别控制 3 个不同的支链，电动机各自拥有相应的控制程序。每个支链又分布有 6 条相交的对称式折痕。电动机输出轴通过联轴器与支链实现连接，以电动机输出轴往复旋转带动支链折痕循环弯折，实现底板到顶板的运动传递，完成关节三维运动。

在选材用料方面，支链作为主要运动部件，对材料的应力强度、回弹韧性要求较高，选取 PVC 软板。底(顶)盘除完成相邻模块间的装配外，还承担搭载减速电机、电机驱动器及传感器等元件的作用，采用集成电路 PCB 板加工，既降低了元件间的布线困难，提升了集成化性能，同时满足了机器人结构设计中的轻量化原则。联轴器、电机(顶盘)座等部件对材料的强度高度要求相对较低，但考虑到上述部件的轴体段需经受频繁的回转摩擦，因此在韧度上应有所保障，选取高韧性树脂材料对其进行加工。如图 5 所示为各零部件具体结构。



在设计依据方面，为了尽可能保证机器人行进的平稳性，降低横向运行摩擦，同时使机器人在体现尺寸小型化的原则上，具有较大的感知元件搭载空间，参考我国建筑落水圆管国标规格，将底(顶)盘设计成了规则的正六边形<sup>[21]</sup>。综上，由 4 个相同的关节模块首尾相接，形成了一个高冗余度的一体化结构体。如图 6 所示为蛇形机器人整体结构及实物模型，如表 1 所示为蛇形机器人样机构型参数。



图 6 蛇形机器人三维模型及样机实物

表 1 样机构型参数

参数名称	参数指标
关节模块数量/个	4
关节模块长度/mm	150
蛇身总长/mm	630
蛇身直径/mm	90
总质量/g	350

在样机制作过程中，对于顶板、电机座、底盘、联轴器等关键部件的尺寸设计，需要结合样机的控制部件进行选型设计。以联轴器设计为例：由于联轴器是和驱动电机直接相连的零部件，其设计依据同驱动电机特性密不可分，尤其是电机输出功率、输出轴转速和驱动力矩等重要参数更是直接影响联轴器的设计构型。在本文所涉及的三类联轴器中，联轴器 II 与电机联系最为密切，设计内容相对复杂；联轴器 I 承载位置传感器，构型上需要与位置传感器的形状尺寸契合；联轴器 III 相对简单，只要保证与顶板座的合理配合即可。由此可见，合理的结构设计尺度分析，是对样机实验性能的必要保证。如表 2 所示，为样机部分关键构建尺度参数。

表 2 样机部分关键构建尺度参数(mm)

部件名称	尺度参数
支链	100×44×2
底顶/盘	外接圆半径 $r = 45$
电机/顶板座	20×32×15
联轴器 I	$\Phi 14 \times 14$
联轴器 II	$\Phi 9 \times 18$
联轴器 III	$\Phi 9 \times 18$

3.2 控制系统

3.2.1 控制系统结构设计

现阶段常见的机器人控制系统，从控制逻辑上

可分为集中式和分布式两种<sup>[19]</sup>。若采用分布式控制,则系统中同时存在主控和从控单元,结构较为复杂,且维护困难。本文研究的蛇形机器人关节模块数量较少,感知元件与同一控制器即可实现信息交互,控制框架相对简单,采用集中式控制系统即可。

本文所研究的蛇形机器人控制系统由:电源(外接电源供电)、控制、动力和感知等模块组成。以 ESP32 主控板为核心,串口通信驱动 12 路减速直流电机系统运转。各感知元件(姿态角度传感器、视觉、超声波测距、红外测温模块)以串口和 IIC 通讯传递实时状态信息至主控板,后由主控板将其传递至上位机供使用者实时掌握机器人的运动状态及周围环境情况,便于躲避突发状况,和完成对机器人后续运行规划的调整,该控制系统框架如图 7 所示。

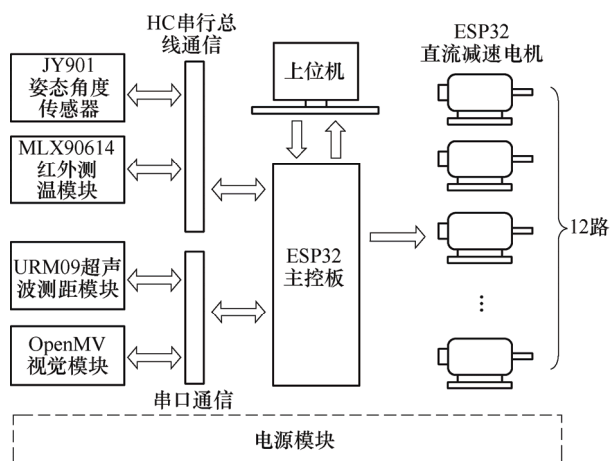


图 7 控制系统框图

### 3.2.2 印刷电路板设计

蛇形机器人外形设计上应尽可能体现微小性,特别是径向尺寸,因此有必要在元件承载部位——底(顶)盘的设计中考虑 PCB 电路板的应用,把元器件通过焊接的方式集成到电路板上,一方面可以缩短元件连接线路的长度,减少因外接线路繁杂带来的短路问题,另一方面也提升了线路出现故障后的可维护性。

### 3.2.3 控制程序设计

本文所设计的蛇形机器人采用并联机构关节,对每个关节不同电机进行准确高效的独立控制是机器人合理运行的重要保障。由于涉及电机数量较多,封装程序语言显得尤为重要。在目前众多的编程言中,Python 语言由于其通俗易懂、语句简洁、入门快的特性,渐渐为开发者所推崇。MicroPython 属于 Python 语言的精简版本,经过处理后可在微处理器中运行<sup>[21-22]</sup>,ESP32 可作为

良好的运行平台。

## 4 运动步态规划与三维仿真分析

### 4.1 运动步态规划

步态规划指的是根据机器人的运动学特征进行关节的运动轨迹规划,使机器人符合一定的行走习惯并能够保持平稳前行<sup>[23-24]</sup>。仿蛇步态主要有蜿蜒、伸缩、攀爬等。本文所设计的蛇形机器人样机,初步运用四关节模型,因而仅分析蛇形运动中的线性伸缩与转弯运动。其中线性伸缩运动形式表现为蠕动。在后续的研发中,利用蛇形机器人的可重构性能,逐渐增加关节数量,可进一步贴合蜿蜒、攀爬等空间复杂运动。

#### 4.1.1 直线运动步态规划

在直线运动中,“直”是相对于生物蛇的蜿蜒行进而言的,特别是蠕动前进这一“类直线运动”是生物蛇行进过程中所必不可少的的运动形式。本文所设计的蛇形机器人由四个关节及五个连接板组成 4 个具有轴向伸缩自由度的单元运动模块,在实际运动中依靠单元运动模块动平台有规律的周期性伸缩来实现前进步态。图 8 所示为蛇形机器人伸缩运动原理图。在该图形中,每一个独立的 3-RSR 并联机构运动单元被简化为两个关节平台和一个长度可变的关节体(仅包括两个固定长度)。通过关节平台的位置变化,表现伸缩运动的前进情况;通过关节体长度的变化,表征不同关节的回缩与伸直状态。

运动详细过程如下:初始状态下 4 个单元模块均处于伸展状态;单元模块 1、2 同时收缩,机器人处于阶段 I;单元模块 2 伸展,单元模块 3 收缩,处于阶段 II;单元模块 1 伸展,单元模块 2 收缩,处于阶段 III;单元模块 3 伸展,单元模块 4 收缩,处于阶段 IV;单元模块 2 伸展,单元模块 3 收缩,处于状态 V;单元模块 3、4 伸展,回到初始状态,至此机器人整体前进一个步距。而  $n$  个关节的蛇形机器人经过  $N$  个步态周期实现的位移量  $L$  为

$$L = N \times \left( 2 \sum_{i=1}^n \Delta L_i - \Delta L_1 - \Delta L_N \right) \quad (34)$$

$$\Delta L_i = L_{ei} - L_{si} \quad (35)$$

在式(34)、(35)中,  $L$  表示直线运动位移量;  $N$  表示伸缩运动周期数;  $n$  表示伸缩运动运动关节数;  $\Delta L_i$  表示第  $i$  个关节单次伸缩前进量;  $L_{ei}$  表示伸缩运动时的初始长度;  $L_{si}$  表示伸缩运动时的最终长度。



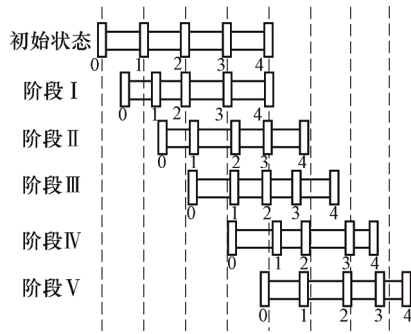


图 8 蛇形机器人伸缩运动原理

#### 4.1.2 转弯运动步态规划

在研究蛇形机器人曲线运动时,最常用的规划方法就是蛇形曲线分析法。日本的 Hirose 通过对生物蛇的大量研究,建立了一种如图 9 所示的 Serpenoid 曲线,能够较好地复现蛇在蜿蜒运动时的姿态<sup>[25]</sup>。 $\phi$  表示初始时刻,首节单元体轴线同水平基准间所成角度的大小,相邻单元体间同一时刻的轴线夹角,用  $\theta_i$  ( $i=1 \sim n-1$ ) 表示。

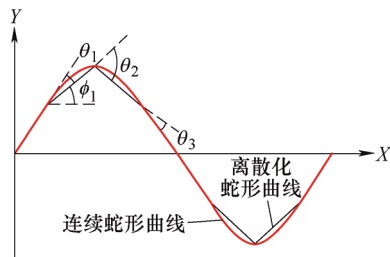


图 9 Serpenoid 曲线法分析蛇形机器人曲线运动

该方法的原理是将蛇形机器人看作诸多连杆相连的多单元结构体,建立离散化运动参数函数关系,进而对蛇形机器人进行蜿蜒步态规划<sup>[26-27]</sup>。式 (36) 为曲线运动参数函数关系表达

$$\rho(s) = -\frac{2k_n\pi\alpha_0}{L_0} \sin\left(\frac{2k_n\pi}{L_0}s\right) \quad (36)$$

式中,  $\alpha_0$  表示蛇形机器人初始弯角;  $k_n$  表示蛇形机器人长度方向上传递波个数;  $L_0$  表示机器人总长;  $\rho$  表示蛇形机器人尾部沿轴线方向的虚位移。在实际的运动分析中,分别研究不同参数对蛇形机器人运动性能的影响作用,从而整体把握蛇形曲线的规律性走向。

借鉴曲线运动研究方式,在本设计中蛇形机器人的各单元模块可以简化为一个独立分支,如图 10 所示即为蛇形机器人转弯运动原理图。在该图中,每一个运动单元体均被简化成一个长度可变的连杆与两个与之相连的旋转副。忽略运动过程中各独立单元体具体的结构形式,仅用变长度连杆刻画整体走向,旋转副表征各单元体间的连接关系。如此一

来,整个蛇形机器人可以看作空间多自由度连杆机构。进而将每个关节视为简化连杆以模拟实现转弯步态设计。为使蛇形机器人行走过程中顺利避开前方障碍物,为其规划了转弯运动,包括左转弯和右转弯,但二者的步态组成对称性极高,因此下文仅针对左转弯运动展开介绍。

左转弯运动共分为四个步骤:初始状态下四个运动单元呈单条直线,运动单元 3、4 通过电机控制同时进行旋转,使得单元 4 达到指定旋转角度  $\alpha$ ,处于阶段 I;运动单元 2、3 旋转,使得单元 3 也达到指定旋转角度  $\alpha$ ,处于阶段 II;运动单元 1、2 旋转,使得单元 2 也达到指定旋转角度  $\alpha$ ,处于阶段 III;运动单元 1 旋转,最终使得四个运动单元再次呈直线排列并与初始位置夹角为  $\alpha$ ,处于阶段 IV,至此,完成了蛇形机器人的一次左转弯运动。

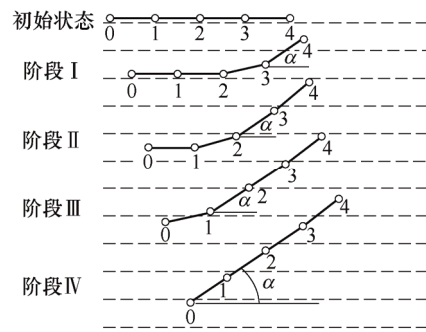


图 10 蛇形机器人转弯运动原理

## 4.2 三维仿真分析

### 4.2.1 线形伸缩仿真模拟

如图 11a 所示的线形伸缩运动主要指蛇形机器人围绕自身轴线进行伸长和缩短两方面的拉伸运动。在对该运动形式进行仿真的过程中,设置的约束条件和构型参数分别为:首关节底盘部件为锁死结构,蛇形机器人重心也与该关节几何中心重合。需要注意的是,由于仿真过程分析的是线形伸缩运动,因此在转动副运行速度给定方面需要三个转动副保持一致。如图 12、13 所示分别为顶部关节质心速度、位移随时间变化。

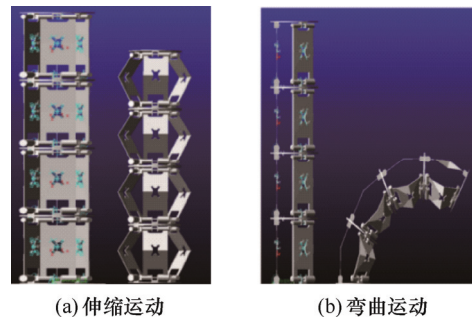


图 11 蛇形机器人运动三维仿真

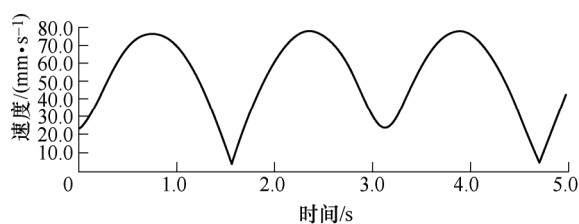


图 12 伸缩运动顶部关节质心速度随时间变化图像

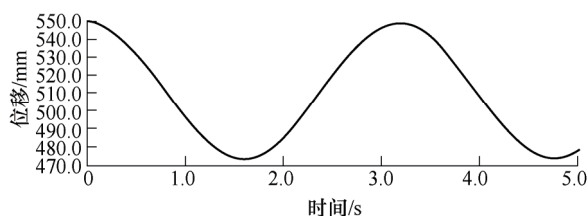


图 13 伸缩运动顶部关节质心位移随时间变化图像

#### 4.2.2 空间弯曲仿真模拟

如图 11b 所示的空间弯曲运动, 较线形伸缩运动的复杂性主要在于除纵向坐标发生改变外, 平面坐标也发生变化, 而且由于不同关节所处位置不同, 关节结构的弯曲程度也有所差异, 反映在仿真过程中即为末端关节中心位置坐标发生曲线偏移变化。如图 14、15 所示分别为顶部关节质心速度、位移随时间变化图像。

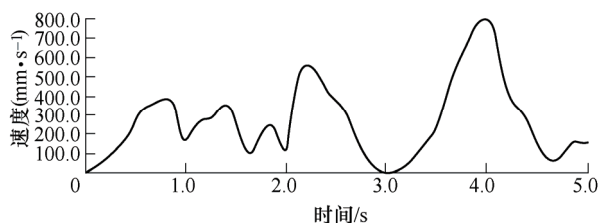


图 14 弯曲运动顶部关节质心速度随时间变化图像

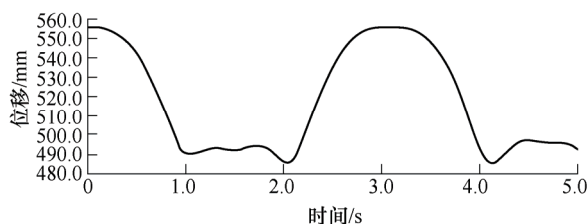


图 15 弯曲运动顶部关节质心位移随时间变化图像

综合仿真结果发现: 在数学模型方面, 对于动平台中心点的位置坐标和运行速度, 仿真结果与前期推导基本一致; 在运动性能方面, 线形伸缩运动仿真结果较满足预期设想, 空间弯曲运动中反映出的结构失稳性缺陷较为明显。在后续研究中, 对于一体化模型的稳定性分析, 还应在机构改进优化方

面加以体现。

## 5 样机运动性能测试

运动性能的优劣与否是检验蛇形机器人功能可否实现的最直接依据。对于蛇形机器人样机运动性能进行测试, 应根据测试环境的不同, 基本分为理想环境与复杂环境两方面测试内容。所谓理想环境指的是实验室内, 排除外界复杂地形条件干扰, 尽可能选取较为平坦的实验平台进行测试。在下文的实验测试过程介绍中, 针对理想环境实验条件, 进行了伸缩与转弯两种运动测试, 而在复杂实验环境中, 仅针对伸缩运动展开介绍。

### 5.1 理想环境运动性能测试

#### 5.1.1 伸缩运动实验测试

伸缩运动是生物蛇基本运动中形式相对简单作为最能体现并联蛇形机器人与其他蛇形机器人区别的运动, 通过电机旋转带动折纸板弯折、伸展, 从而改变了动平台和静平台之间的距离, 实现伸缩。如图 16 所示为实验室理想环境下, 对直线伸缩运动的实验测试过程。

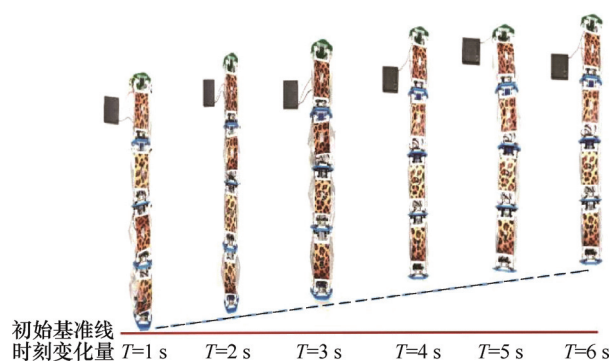


图 16 伸缩运动实验测试

通过实验结果可以看出蛇形机器人通过多节伸缩运动向前移动, 运动过程中关节前后递推, 能够有效地克服地面摩擦阻力。但同一周期内运动距离较小。在后续的版本优化中, 可考虑减小折纸板的面积, 从而减小与地面的接触; 或者在蛇形机器人关节四周增加被动轮, 把滑动摩擦变为滚动摩擦, 以此提高蛇形机器人的运动性能。

#### 5.1.2 转弯运动实验测试

由于蛇形机器人具有转动自由度, 故可以进行转弯运动来改变运动轨迹或者避开前进道路上的障碍物, 如图 17 所示即为蛇形机器人左转弯实验测试。在测试过程中由于各个部件之间的配合精度不足, 结构上还存在一定干涉, 导致转弯运动不是特

别灵活。此外,虽然超声波测距模块和视频传感器都能监测到外部信息,但是无法实时控制蛇形机器人做出相应的动作,在智能控制层面还存在较大提升空间。

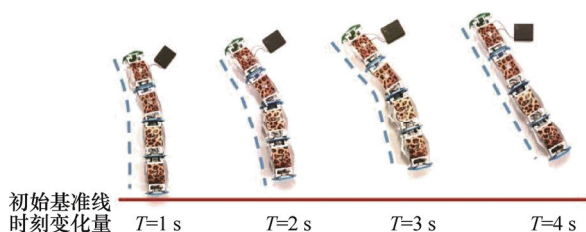


图 17 转弯运动实验测试

## 5.2 复杂环境运动性能测试

### 5.2.1 草地路面实验测试

草地路面相比于平坦路面最大的特点就是地面柔软,对机器人的支撑作用明显变小。蛇形机器人在运动中很可能由于支撑力不足而无法前进,这就对机器人结构上提出了更高要求。如图 18 所示为草地实验测试场景。运动过程中由于草地摩擦力较大,且出现杂草卷入机器人内部与导线缠绕的现象,导致蛇形机器人有时候无法运动或者是运动迟滞。后续还将考虑在蛇形机器人外表进行密封处理,从而增强其环境适应力。

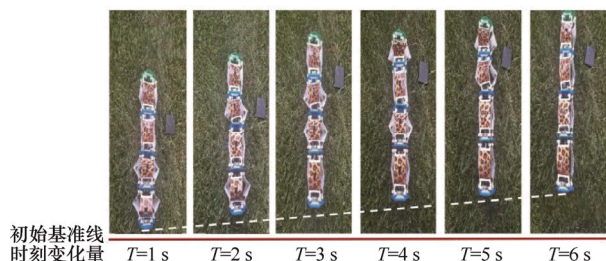


图 18 草地路面实验测试

### 5.2.2 砂石路面实验测试

同草地路面相类似,砂石路面也属于复杂外环境工况,同草地路面不同的是,砂石路面表面硬度较大,在一定程度上对蛇形机器人的行走支撑性起到了辅助作用,但大小形状各异,坚硬程度不同的砂石随机组成的地表形状更为复杂。在行进过程中,时常出现砂石沟槽将蛇形机器人支链板卡住的情形。此外,长时间同坚硬的砂石进行摩擦,加速了蛇形机器人的外壳磨损,同时使其刚度可靠性降低。同时,较大的行进摩擦阻力对电机功率和力矩也形成了新的挑战。如图 19 所示为砂石地面实验测试过程。

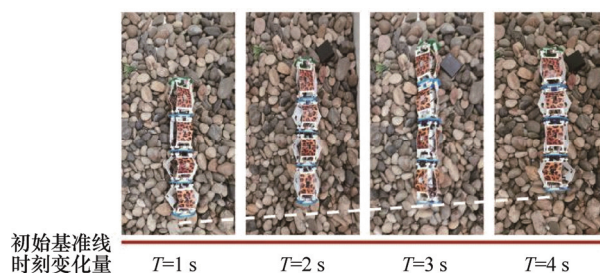


图 19 砂石地面实验测试

## 6 结论

蛇形机器人作为一种常见的多步态机器人,凭借多样化的运动形式和极强的环境适应能力,成为了现阶段仿生学、机器人学领域的研究热点。

(1) 本文设计了一种基于 3-RSR 并联机构的模块化蛇形机器人。该机器人包括四个串联的模块单元,每个单元结构完全相同,可根据实际应用情景,实现多关节蛇形机器人的长度拓展。

(2) 在具体结构的设计过程中,首先从独立关节的运动学分析入手,并基于旋量理论,进行了 3-RSR 并联机构单元模块的活动度分析计算。随后,运用三维建模软件,完成了蛇形机器人本体结构设计,并自主设计控制系统电路,进而制作四关节、一体化样机模型。

(3) 此外,为进一步保证样机运动性能的可实现性,对线性伸缩和平面弯曲两个基本的运动形式进行 ADAMS 仿真分析与步态路径规划。最后,进行了实验室理想环境、砂石环境和草地环境下的样机运动性能测试实验,进一步验证了设计的合理性。

(4) 在后续的研究过程中,为进一步提升蛇形机器人的运动性能和可重构能力,还将在微小化、轻量化设计,增加机器人密封性能,提高机器人运动灵活度等方面进行进一步改进优化。同时增加更多信号传感器,配合以高效的反馈控制算法,不断拓展该蛇形机器人的实际应用价值,假以时日,使该蛇形机器人在灾难救援、太空探索、军事侦察等与国民生活息息相关的领域,发挥应有的价值。

## 参 考 文 献

- [1] 徐兵. 基于四边形机构的蛇形机器人设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- XU Bing. Design of snake-like robot based on quadrilateral mechanism[D]. Shenyang: Northeastern



- University, 2014.
- [2] LIU Jinguo, LIU Yuwang, HAO Guangbo, et al. Special issue on reconfigurable robots[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(5): 11-13.
- [3] 王圣捷, 戴建生. 变胞四足机器人倾覆后的变胞恢复机理及其特性研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(11): 1274-1282.
- WANG Shengjie, DAI Jiansheng. Research on the mechanism and characteristics of metamorphic recovery of a quadruped robot after overturning[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(11): 1274-1282.
- [4] IVAN V, MICHAL K, PAVOL B, et al. Investigation of snake robot locomotion possibilities in a pipe[J]. Symmetry, 2020, 12(6): 939-947.
- [5] HE Jun, GAO Feng. Mechanism, actuation, perception, and control of highly dynamic multilegged robots: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(5): 130-159.
- [6] WU Jinde, WANG Zhihui, DAI Xin, et al. Constant output-voltage design for bi-directional wireless power transfer system with multiple stages[J]. Energies, 2020, 13(14): 3739-3743.
- [7] LIU Shanzeng, DAI Jiansheng, LI Aimin, et al. Analysis of frequency characteristics and sensitivity of compliant mechanisms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(4): 680-693.
- [8] LI Guoyuan, HAO K, GRINDVIK O, et al. Development of a vision-based target exploration system for snake-like robots in structured environments[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(4): 1-11.
- [9] WANG Yihang, ZHANG Xiaoshi, LI Xin, et al. Motion simulation of a tensegrity snake-like robot based on the serpenoid curve[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1965(1): 88-93.
- [10] 杨廷力, 刘安心, 戴建生, 等. 机构自由度公式的基本形式、自由度分析及其物理内涵[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 69-80.
- YANG Tingli, LIU Anxin, DAI Jiansheng, et al. Basic form, degree of freedom analysis and its physical connotation of mechanism freedom formula [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 69-80.
- [11] ZHANG Dong, YUAN Hao, CAO Zhengcai, et al. Environmental adaptive control of a snake-like robot with variable stiffness actuators[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(3): 745-751.
- [12] 李海龙. 用于水下钢结构腐蚀检测的蛇形机器人研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- LI Hailong. Research on snake like robot for corrosion detection of underwater steel structure[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [13] ZHANG Jun, ZHAO Yanqin, DAI Jiansheng, et al. Compliance modeling and analysis of a 3-RPS parallel kinematic machine module[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4): 703-713.
- [14] 何子瀚, 方虹斌, 徐鉴, 等. 仿蚯蚓移动机器人离散步态控制与相位差控制特性比较[J]. 机器人, 2020, 42(6): 697-708.
- HE Zihan, FANG Hongbin, XU Jian, et al. Comparison of discrete gait control and phase difference control characteristics of earthworm like mobile robot[J]. Robot, 2020, 42(6): 697-708.
- [15] 胡楠, 陈花玲. 折纸结构驱动技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2020, 56(15): 118-128.
- HU Nan, CHEN Hualing. Research progress of origami structure driving technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(15): 118-128.
- [16] MANZOOR S, CHO G Y, CHOI Y, et al. Neural oscillator based CPG for various rhythmic motions of modular snake robot with active joints[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 94(3): 574-582.
- [17] LIU Jinguo, ZHANG Xin, DAI Jiansheng, et al. Configuration analysis of a reconfigurable Rubik's snake robot[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(9): 1-18.
- [18] ZHAO Xu, LIU Chang, DOU Lihua, et al. 3D visual sensing technique based on focal stack for snake robotic applications[J]. Results in Physics, 2019, 12(6): 1520-1528.
- [19] RYO A, KENTARO K, MOTOYASU T, et al. Passive joint control of a snake robot by rolling motion[J]. Artificial Life and Robotics, 2020, 25(4): 503-512.
- [20] 李立君, 刘涛, 高自成, 等. 基于旋量理论的六自由度林果采摘混联机械臂运动学逆解[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 75-82.
- LI Lijun, LIU Tao, GAO Zicheng, et al. Inverse kinematics solution of 6-DOF fruit picking hybrid manipulator based on spinor theory[J]. Acta AGRICULTURAE Sinica, 2019, 35(8): 75-82.
- [21] XIAO Xuesu, MURPHY R. A review on snake robot testbeds in granular and restricted maneuverability spaces[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 10(3): 424-428.
- [22] 张云娇, 魏国武, 戴建生, 等. 基于旋量理论的 3-US 并联机构运动学分析[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(2): 8-11.
- ZHANG Yunjiao, WEI Guowu, DAI Jiansheng, et al. Kinematics analysis of 3-us parallel mechanism based on screw theory [J]. Mechanical design and research, 2014,



- 30(2): 8-11.
- [23] 戴建生. 机构学与旋量理论的历史渊源以及有限位移旋量的发展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 13-26.
- DAI Jiansheng. The historical origin of mechanism and screw theory and the development of finite displacement screw [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 13-26.
- [24] CHANG A H, VELA P A. Shape-centric modeling for control of traveling wave rectilinear locomotion on snake-like robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 124(9): 28-37.
- [25] SHETHWALA D Y, PATEL P R, SHAH R D, et al. A novel concept of biomorphic hyper-redundant snake robot: An approach for rescue operation during earthquake and landslide[J]. International Journal of Disaster Response and Emergency Management (IJDREM), 2019, 2(1): 33-49.
- [26] 孙兰兰. 基于两转一移并联模块的蛇形机器人步态规划[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- SUN Lanlan. Gait planning of snake like robot based on two turn one move parallel module[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [27] 徐鹏, 丁亮, 高海波, 等. 考虑足地作用的足式机器人环境表征与路径规划[J]. 机械工程学报, 2020, 56(23): 21-33.
- XU Peng, DING Liang, GAO Haibo, et al. Environmental characterization and path planning of legged robot considering foot ground action[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (23): 21-33.
- 
- 作者简介: 魏巍, 男, 1998 年出生。主要研究方向为并联机构蛇形机器人设计。  
E-mail: weiwei\_4129460@tju.edu.cn
- 庄哲明, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为并联机构蛇形机器人设计。  
E-mail: zhuangzheming@tju.edu.cn
- 唐昭, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为可重构机构及分岔控制、腿式机器人。  
E-mail: zhaotang@tju.edu.cn
- 戴建生(通信作者), 男, 1954 年出生, 教授, ASME 与 IMechE Fellow, ASME 2015 年机构学与机器人学终身奖获得者。主要研究方向为旋量理论、抓举理论、Origami 折纸机构、机构分析和研究、自动重组重构机构、串并联机器人机构理论、多指灵巧手在包装业、康复工程和服务机器人中的研究和应用。共主持和完成英国和欧盟科研项目 50 余项。发表论文 400 余篇。获得数项国际学术期刊与国际会议最佳论文奖、多项 ASME 与 IEEE 服务奖与卓越服务奖。  
E-mail: jiandai@kcl.ac.uk