

# 蛇形机器人的设计及摩擦力对其运动性能影响的分析<sup>①</sup>

卢振利<sup>②</sup> \* \* \* \* \* 刘超<sup>\*</sup> 谢亚飞<sup>\* \*\*\*</sup> 王晨希<sup>\*</sup> 毛丽民<sup>\*</sup> 李斌<sup>\*#</sup>

(<sup>\*</sup> 常熟理工学院电气与自动化工程学院 常熟 215500)

(<sup>\*\*</sup> 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110014)

(<sup>\*\*\*</sup> 中国矿业大学信息与电气工程学院 徐州 221116)

(<sup>\*\*\*\*</sup> 阿威罗大学,电子和信息通信工程研究所 阿威罗 3810-193 葡萄牙)

**摘要** 为使蛇形机器人的结构和运动形式能够适应各种复杂环境,研究了蛇形机器人运动性能与环境的关系及其运动控制,设计了一种单被动轮为接触面的正交串联蛇形机器人,分析了蛇形曲线参数对其运动的影响,通过实验研究了摩擦系数对其运动步态的影响,得出了蛇形机器人的前行速率随蛇形曲线参数  $\alpha$  的增大而增大,随摩擦系数  $\mu$  的增大而减小的结论,以及蛇形曲线步态参数的调节策略。

**关键词** 蛇形机器人, 被动轮设计, 摩擦系数, 蜿蜒运动

## 0 引言

生物蛇的典型步态有蜿蜒运动、伸缩运动、侧向运动、直线运动等<sup>[1]</sup>,其柔软的身体及表面鳞片,可以控制其自身实现多种姿态,从而轻松进入狭小空间<sup>[2,3]</sup>。蛇形机器人是一种新型的仿生物机器人,其机械本体具有高冗余度,可实现像蛇一样的无肢运动,这是机器人运动方式的一个重大突破<sup>[4-7]</sup>。蛇形机器人的这一特点使它可应用于各种复杂和高危险环境,在抢险救灾、军事侦察、星际探索等方面具有广阔的应用前景。蛇形仿生冗余度机器人的研制是当前工程应用和科学上的一个热点和难点<sup>[8-14]</sup>。本文研究了蛇形机器人的设计及其运动控制,分析了其运动性能与摩擦系数的关系,给出了蛇形曲线步态参数的调节策略。

## 1 相关研究

在国外,研究的主要机构如下:日本东京工业大

学 Hirose 教授带领下的机器人实验室(H. F Robot Lab)、美国密歇根大学的移动机器人实验室(Mobile Robotics Laboratory)、美国卡内基梅隆大学的生物机器人技术实验室(Biorobotics Lab)等<sup>[11-14]</sup>,对蛇形机器人进行了较为系统且深入的研究。Hirose 教授研制了世界上第一台蛇形机器人 ACM-III<sup>[15]</sup>(如图 1 所示)。该团队相继开发了 ACM-R3(如图 2 所示),以及水陆两栖蛇形机器人 ACM-R5 和 ACM-S1,如图 3 所示<sup>[16,17]</sup>。

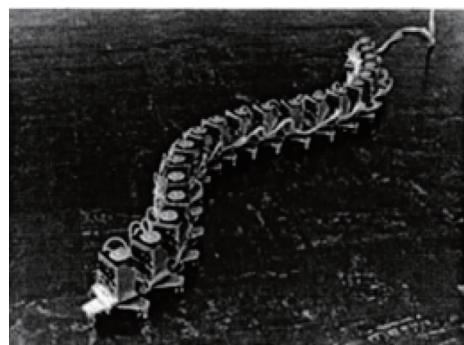


图 1 ACM- III

<sup>①</sup> 国家自然科学基金(61473283),机器人学国家重点实验室开放基金(2014-008),校新引进教师科研启动项目(XZ1306, QZ1101)和葡萄牙科技部基金(CIENCIA2007)资助项目。

<sup>②</sup> 男,1974 年生,博士,硕士生导师;研究方向:机器人智能控制;联系人,E-mail: zhenlilu@ cslg. cn  
(收稿日期:2015-01-12)

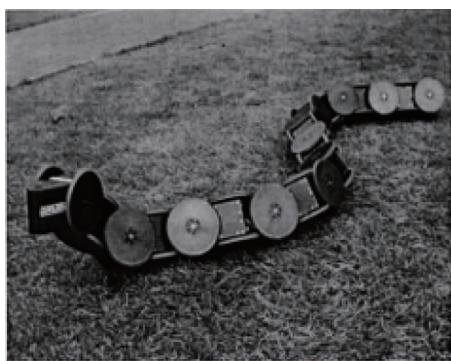


图 2 ACM-R3



(a) ACM-R5



(b) ACM-S1

图 3 广赖教授研究组的水陆两栖蛇形机器人

国内也开始了一系列针对蛇形仿生机器人的研究。1999 年 3 月, 上海交通大学研究人员崔显世等<sup>[18]</sup>研制出一条蛇形仿生机器人, 它是国内有记载的第一台蛇形机器人样机。2001 年 11 月, 国防科学技术大学设计出了蛇形机器人样机, 如图 4 所示<sup>[19]</sup>。

中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室在该方向开展了深入研究, 设计了多种蛇形机器人, 代表性的水陆两栖蛇形机器人如图 5 所示<sup>[12]</sup>。



图 4 国防科大蛇形机器人



图 5 沈阳自动化所蛇形机器人

中国科学院自动化研究所、北京航空航天大学、东南大学和西安电子科技大学等单位也开展了相关仿生蛇形和鱼形机器人研究工作。

蛇形机器人在不同环境中的运动性能实验和分析是支持该方向研究的基石。国内外鲜见具体研究环境摩擦系数和蛇形机器人运动性能关系的实验工作。本研究设计了一种单被动轮构成的正交串联蛇形机器人, 而且通过蛇形曲线实现了对该机器人的蜿蜒运动步态的控制, 同时研究了不同摩擦系数对步态的影响及步态参数调节策略。

## 2 蛇形机器人机构设计

本研究是以蜿蜒运动步态为例来设计蛇形机器人的机构。

### 2.1 模块化关节

本研究运用模块化的设计理念, 在结构上设计了能实现类似蛇运动的微小关节模块, 每个模块由舵机和被动轮等组成。这些模块通过正交串联组成蛇形机器人, 如图 6 所示。



图 6 蛇形机器人机构图

蛇形机器人的每个关节均是由两个舵机通过舵机架正交方式安装串联起来的,如图 7 所示。相邻关节舵机通过舵机架采用正交方式安装,蛇形机器人可实现三维空间运动。本研究侧重蛇形机器人按照蛇形曲线实现蜿蜒运动(垂直关节舵机置于零位;水平关节舵机运动范围是 -90 度至 +90 度)。单元模块的结构参数如表 1 所示。



图 7 蛇形机器人正交串联关节模块

表 1 关节模块参数表

关节模块长度 (mm)	65
关节模块宽度 (mm)	55
蛇形机器人长度 (mm)	1140
转角范围 (deg)	-90 ~ 90
关节类型	垂直, 水平

## 2.2 电机的选择

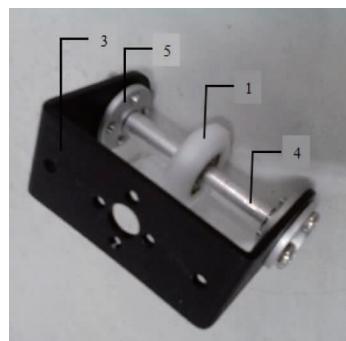
本设计中电机具体信息如表 2 所示。

表 2 舵机参数表

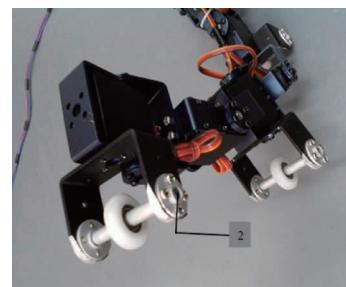
型号	HDKJ S3150D
外形尺寸 (mm)	40 × 20 × 40.5
引线长度 (mm)	320
重量 (g)	60
死区设定 (μs)	4
转角范围 (deg)	0 ~ 300
工作扭矩 (kg · cm)	14, 6V 供电 15, 7.2V 供电
角速度 (deg/s)	333, 6V 供电 375, 7.2V 供电
空载电流 (mA)	<500
工作电压 (V)	4.8 ~ 7.2

## 2.3 被动轮设计

本设计中的单轮式被动轮如图 8 所示。其中图 8(a)为被动轮,图 8(b)为装配后组合关节模型。在蜿蜒运动时,其稳定性比较好。从灵活性方面讲,单轮式的灵活性远远超过双轮式,这正是本研究设计的蛇形机器人单轮式被动轮的一大优点。



(a) 被动轮



(b) 组合后

图 8 单轮式被动轮

单被动轮材料选择如表 3 所示。

表 3 被动轮参数表

	接触面类型	包胶轴承
	外径 (mm)	26
	内径 (mm)	6
	厚度 (mm)	7.5
被动轮(1)	材质	聚甲醛 POM
	外轮廓	圆弧型
	轴承型号	696ZZ
	轴承材质	碳钢
	颜色	白色
圆柱销(2)	直径 (mm)	6
	类型	短 U 型
舵机支架(3)	材料	2.2mm 硬铝板
	表处	喷砂氧化
	重量 (g)	16.6
	类型	6061 铝管
防滑动管(4)	内径 (mm)	6
	外径 (mm)	7
固定盘件(5)	规格	HDKJ S3150D 配套盘

## 2.4 电源选择

蛇形机器人中 16 路舵机控制板的 9V 供电采用输入交流 220V, 输出直流 9V 的开关电源; 上位机控制板选择笔记本 USB 口供电。

## 3 蛇形机器人控制系统设计

蛇形机器人选用 ARDUINO UNO 加强版作为上位机, 16 路舵机控制板作为下位机。在上位机上编写程序通过蓝牙向下位机发送数据, 下位机通过蓝牙接收上位机发来的数据来控制对应的关节电机运动, 系统架构如图 9 所示。

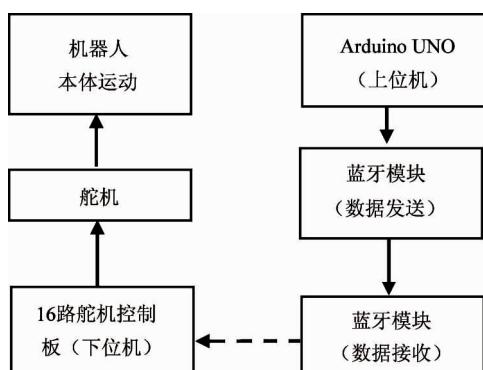


图 9 蛇形机器人架构图

## 4 蛇形机器人运动控制

### 4.1 蛇形曲线

本设计应用日本东京工业大学 Hirose 教授提出的蛇形曲线控制机器人实现蜿蜒运动, 控制公式如下:

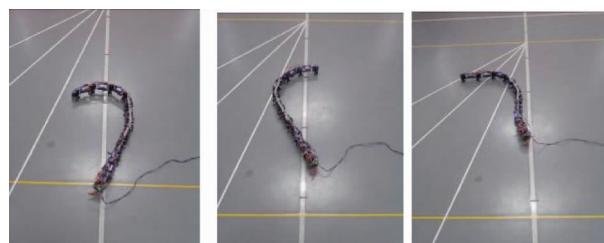
$$\beta_i(s) = -2\alpha(\sin(kn\pi/N))(\sin(2kn\pi s/L + 2kn\pi i/N)) \quad (1)$$

其中  $\beta_i(s)$  为关节电机转角;  $i = 1, \dots, 8$ , 为电机号;  $\pi = 3.1415936$ ,  $\alpha$  为起始弯角,  $kn$  为 S 形曲线个数,  $L$  为机器人总长度,  $N$  为机器人总节数。改变变量  $s$  的变化率  $\delta s$  可以改变蛇形机器人的前行速率。

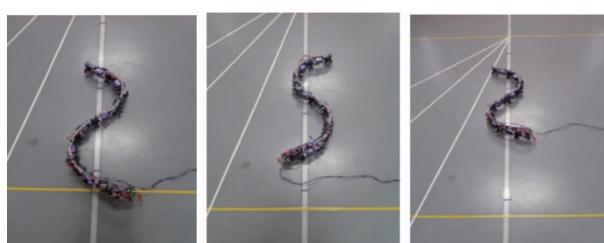
### 4.2 变量 $\alpha$ 和 $kn$ 对蛇形机器人步态的影响

改变上述公式中参数  $\alpha$  和  $kn$  的值, 研究该参数对波形和运动的影响。

(1) 当  $\alpha = 1.0, kn = 0.5$  时, 蛇形机器人以 0.5 个 S 波形进行蜿蜒运动, 前进速率约为 0.212m/s, 如图 10 所示。

图 10  $\alpha = 1.0, kn = 0.5$  运动实验

(2) 当  $\alpha = 1.0, kn = 1.0$  时, 蛇形机器人以 1 个 S 波形进行蜿蜒运动, 前进速率约为 0.308m/s, 如图 11 所示。

图 11  $\alpha = 1.0, kn = 1.0$  运动实验

(3) 当  $\alpha = 1.0, kn = 1.5$  时, 蛇形机器人以 1.5 个 S 波形进行蜿蜒运动, 前进速率约为 0.203m/s,

如图 12 所示。

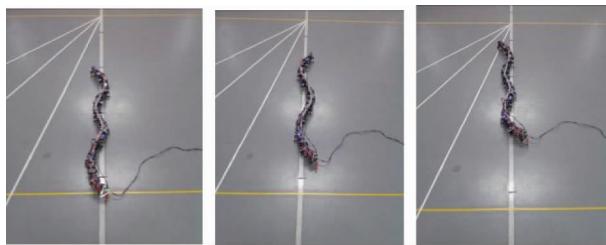


图 12  $\alpha = 1.0, kn = 1.5$  运动实验

(4)当  $\alpha = 0.4, kn = 1.0$  时,蛇形机器人以 1 个 S 波形进行蜿蜒运动,前进速率约为 0.213m/s,如图 13 所示。

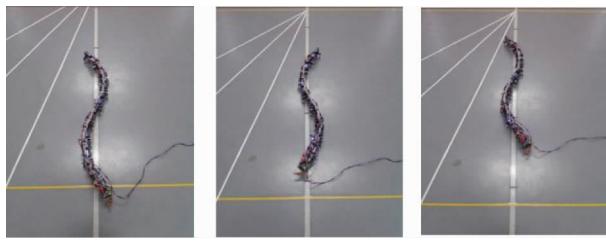


图 13  $\alpha = 0.4, kn = 1.0$  运动实验

(5)当  $\alpha = 0.8, kn = 1.0$  时,蛇形机器人波形幅值增大,以 1 个 S 波形进行蜿蜒运动,前进速率约为 0.3054m/s,如图 14 所示。

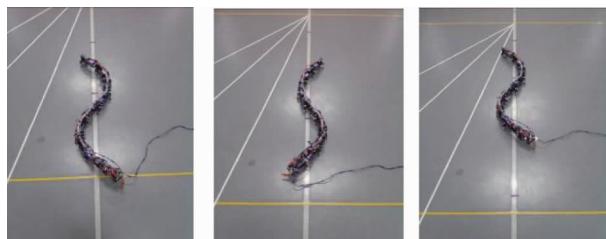


图 14  $\alpha = 0.8, kn = 1.0$  运动实验

(6)当  $\alpha = 0.9, kn = 1.0$  时,蛇形机器人波形幅值继续增大,以 1 个 S 波形进行蜿蜒运动,前进速率约为 0.3061m/s,如图 15 所示。

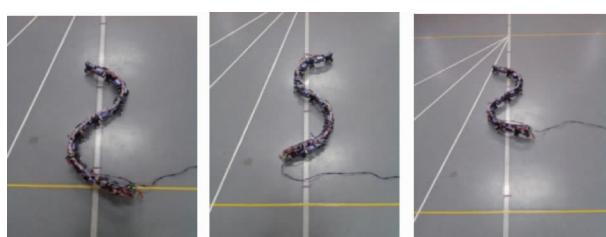


图 15  $\alpha = 0.9, kn = 1.0$  运动实验

### 4.3 参数分析

上述 6 组实验中,前 3 组为变量  $\alpha$  为定值 1.0 时,改变变量  $kn$  值,从而可以改变蛇形机器人的 S 形曲线个数,其中  $kn = 1.0$  时,蛇形机器人以一个 S 形曲线前行效率最高。后 3 组在变量  $kn$  为定值 1.0 时,改变变量  $\alpha$  值,从而可以改变蛇形机器人的 S 形曲线的弧度, $\alpha$  越小,S 波幅值越小,运动速率越小,其中  $\alpha = 1.0$  可以看作是适合该机器人运动取值的上限,此时蛇形机器人以 S 形曲线前行效率最高。

## 5 蛇形机器人运动与摩擦系数关系实验

### 5.1 摩擦系数对蛇形机器人蜿蜒运动步态的影响

为研究蛇形机器人运动与摩擦系数之间的关系,选取一组蛇形曲线参数,如表 4 所示。

表 4 蛇形曲线参数表

距离(m)	$kn$	$\delta s$	$N$	$L(m)$
1.9	1.0	3	8	1.14

应用具有不同摩擦系数材质做成的胶带粘附在被动轮表面,模拟不同摩擦系数环境来进行如下实验:

实验一 无胶带贴合:此时  $\mu(\text{滚}) = 0.048757$ ,  $\mu(\text{滑}) = 0.463189$ ,实验数据如表 5 所示。

表 5 无胶带贴合实验结果

$\alpha$	0.6	0.7	0.8	0.9
时间(s)	8.056	6.798	6.222	6.208
速率(m/s)	0.236	0.2795	0.3054	0.3061

实验二 透明胶带:此时  $\mu(\text{滚}) = 0.048780$ ,  $\mu(\text{滑}) = 0.439024$ ,实验数据如表 6 所示。

表 6 透明胶带实验数据

$\alpha$	0.6	0.7	0.8	0.9
时间(s)	6.909	6.438	6.208	6.201
速率(m/s)	0.2750	0.2951	0.3061	0.3064

实验三 布胶混合胶带: 此时  $\mu$ (滚) = 0.097513,  $\mu$ (滑) = 0.536324, 实验数据如表 7 所示。

表 7 布胶混合胶带实验数据

$\alpha$	0.6	0.7	0.8	0.9
时间(s)	10.469	8.078	6.988	6.974
速率(m/s)	0.1815	0.2352	0.2719	0.2724

实验四 布质胶带: 此时  $\mu$ (滚) = 0.320000,  $\mu$ (滑) = 0.560000。该设定环境下, 由于此被动轮对于地面的摩擦系数过大, 导致舵机过载, 不能正常工作。不论变量  $\alpha$  取何值, 蛇形机器人都不能正常运动。 $\alpha = 1.0, kn = 1.0$  时的实验结果如图 16 所示。

## 5.2 参数关系

上述实验表明: 在变量  $\alpha$  为一常数时, 随着摩擦系数  $\mu$  的增大, 蛇形机器人的前行速率  $V$  减小;

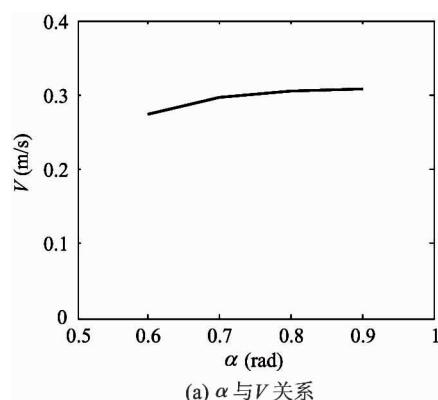
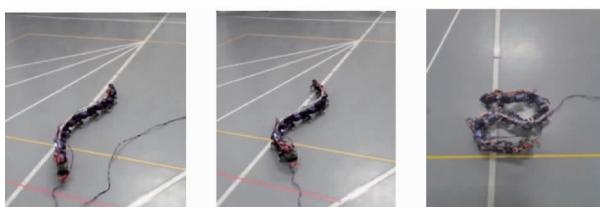
(a)  $\alpha$  与  $V$  关系

图 16 蛇形机器人异常运动

在摩擦系数  $\mu$  为一常数时, 随着变量  $\alpha$  的增大, 蛇形机器人前行的速率  $V$  增大。实验四表明, 由于摩擦系数  $\mu$  过大, 导致舵机过载, 使蛇形机器人不能正常运动。

蛇形曲线参数  $\alpha$  与蛇形机器人前行速率  $V$  之间的关系如图 17(a) 所示, 摩擦系数  $\mu$  与速率  $V$  之间的关系如图 17(b) 所示。

实验受到现场环境、测量设备和测量方法等因素的影响, 导致实验结果存在一定误差。

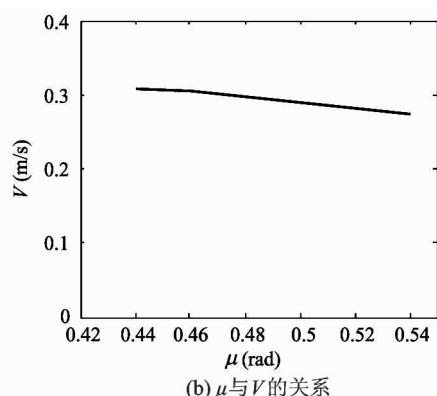


图 17 参数设定关系

## 6 结论

本研究设计了通过正交连接单接触面被动轮关节构成的蛇形机器人, 同时设计了基于蓝牙协议的控制系统, 用蛇形曲线控制其实现蜿蜒运动。通过实验研究了蛇形曲线起始弯角  $\alpha$ 、S 波个数  $kn$  和波形改变速率  $\delta s$  对蛇形机器人蜿蜒运动的影响; 进行了不同摩擦系数环境对蛇形机器人蜿蜒运动的影响的实验, 得出了蛇形曲线起始弯角  $\alpha$  及摩擦系数  $\mu$  与蜿蜒运动速率  $V$  与之间的关系:  $\alpha$  不变时,  $V$  随  $\mu$  的增大而减小;  $\mu$  不变时,  $V$  随  $\alpha$  的增大而增大。相

关结果可为蛇形机器人实用化提供技术支持。

该研究也存在诸多不足。例如: 由于每个舵机的扭矩有限, 导致摩擦系数  $\mu$  增大到一定程度, 蛇形机器人无法正常运行。同时实验中采用的测量和安装工艺是在实验样机中进行, 精度不够高。此外本研究尚处于前期阶段, 不管是结构方面还是控制方面尚有很大的改进空间。

## 参考文献

- [1] 刘金国, 王越超, 李斌等. 蛇形机器人伸缩运动仿生研究. 机械工程学报, 2005, 41(5): 108-113
- [2] 叶长龙, 马书根, 李斌等. 蛇形机器人的转弯和侧移运

- 动研究. 机械工程学报,2004,40(10):119-128
- [ 3 ] 张玲玲,曲泽超. 蛇形机器人的机构设计及运动分析. 机电工程,2012,29(5):512-515
- [ 4 ] 李斌,叶长龙. 蛇形机器人的扭转运动研究. 中国机械工程,2005,16(11):941-945
- [ 5 ] 黄恒,颜国正,熊翔. 蛇形机器人的运动策略. 电机与控制学报,2002,6(3):249-251
- [ 6 ] 张莹,李彬艳,姜宇等. 蛇形机器人的运动控制研究. 湘潭大学自然科学学报,2014,36(3):100-104
- [ 7 ] 张丹凤,吴成东,李斌. 蛇形机器人被动蜿蜒避障运动的研究. 仪器仪表学报,2011,32(6):336-340
- [ 8 ] 王雪,连晓峰,陈天华等. 蛇形机器人蜿蜒运动控制分析. 计算机测量与控制,2014,22(9):2801-2804
- [ 9 ] 吴艳花. 蛇形机器人越障研究. 机器人技术,2008,8(35):54-57
- [ 10 ] 杨文璟,巩宇鹏,王杨森等. 蛇形机器人运动机构设计. 企业技术开发,2011,30(3):1-3
- [ 11 ] 薛瑞彬,苏中,张夏丽等. 蛇形机器人直线运动的研究. 北京信息科技大学学报,2011,26(5):65-69
- [ 12 ] 郁树梅,王明辉,马书根等. 水陆两栖蛇形机器人的研制及其陆地和水下步态. 机械工程学报,2012,48(9):18-25
- [ 13 ] 叶长龙,马书根,李斌等. 蛇形机器人抬头运动分析. 高技术通讯,2005,15(3):25-31
- [ 14 ] 刘福朝,李擎,李彦文. 一种蛇形机器人的直线蜿蜒运动规划. 机械设计与研究,2014,30(1):35-38
- [ 15 ] Endo G, Togawa K, Hirose S. Study on self-contained and terrain adaptive active cord mechanism. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Piscataway, USA, 1999. 1399-1405
- [ 16 ] Prautsch P, Mita T. Control and analysis of the gait of snake robots. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications, Piscataway, USA, 1999. 502-507
- [ 17 ] strowski J, Burdick J. The Geometric Mechanics of Undulatory Robotic Locomotion. *The International Journal of Robotics Research*, 1998,17:638-701
- [ 18 ] 崔显世,颜国正,陈寅等. 一个微小型仿蛇机器人样机的研究. 机器人,1999,21(2):156-160
- [ 19 ] 刘华,颜国正,丁国清. 仿蛇变体机器人运动机理研究. 机器人,2002,24(2):154-158

## Design of a snake-like robot and analysis of friction influence on its motion performance

Lu Zhenli \* \*\*\* \*\*\*\* , Liu Chao \* , Xie Yafei \* \*\*\* , Wang Chenxi \* , Mao Limin \* , Li Bin \*\*

(\* School of Electrical Engineering and Automation, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500)

(\*\* State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, CAS, Shenyang 110014)

(\*\*\*) School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

(\*\*\*\* Institute of Electronics and Telematics Engineering of Aveiro, University of Aveiro, Aveiro 3810-193, Portugal)

### Abstract

Snake-like robots' motion control and the relationship between their motion ability and motion environment were studied for the design to make a snake-like robot's structure and movements adapt to a variety of complex environments. For the study, a snake-like robot with a passive wheel as the contacting surface on orthogonal connection joint was designed, and then, the influence of serpeniod curve parameters on the robot's motion was analyzed, and the influence of the friction coefficient on its motion was investigated by experiments, resulting in the conclusion that the moving speed of a snake-like robot increases with the increase of the serpeniod curve parameter  $\alpha$ , while it decreases with the increase of the friction coefficient, as well as the strategy for modulation of serpeniod curve parameters.

**Key words:** snake-like robot, passive wheel design, frictional coefficient, serpentine locomotion