

文章编号: 1002-0446(2003)03-0246-04

## 蛇形机器人侧向运动的研究\*

陈丽<sup>1,2</sup> 王越超<sup>1</sup> 马书根<sup>1,3</sup> 李斌<sup>1</sup>

(1. 沈阳自动化研究所机器人重点实验室 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院 北京 100039;  
3. 日本国立茨城大学工学部系统工程系)

**摘要:** 本文提出了一种新型蛇形机器人机构,建立了其空间运动学模型,实现了蛇形机器人的两种侧向运动:侧向蜿蜒运动和侧向滚动,前者通过调节两个异相波的频率比,实现了任意方向的侧向运动,后者通过控制运动波的幅值变化,实现了各种形式的纯侧向移动,当幅值足够大时,这种侧向滚动可以跨越障碍。

**关键词:** 蛇形机器人;侧向蜿蜒;侧向滚动

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## STUDY OF LATERAL LOCOMOTION OF SNAKE ROBOT

CHEN Li<sup>1,2</sup> WANG Yue-chao<sup>1</sup> MA Shu-gen<sup>1,3</sup> LI Bin<sup>1</sup>

(1. Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation;  
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences;  
3. Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering Ibaraki University)

**Abstract** A new kind of snake robot is presented and its three-dimensional kinematic model has been built up. Two types of lateral locomotion, sidewinding and lateral rolling are implemented. The former in any direction can be achieved by varying the frequency of two waves out of phase and the latter that can be divided into three types can be obtained by controlling the amplitude of waves, especially when the amplitude is high enough, the snake robot can avoid some obstacles.

**Keywords:** snake robot, sidewinding, lateral rolling

### 1 引言(Introduction)

超冗余度机器人系统具有大量的相对自由度,类似于蛇、蠕虫、象鼻等,因此它可以针对不同的环境选相应的运动模式,实现各种的操作。对于给定的系统,不同的运动模式具有不同的速度、鲁棒性和可操作性。一种运动模式适应一种环境或任务,但不一定适应另一种环境或任务。为了达到最大的适应性,一个超冗余度机器人必须能够在几种不同的运动模式之间进行切换。蛇形机器人是一种超冗余度机器人,可以仿生于自然界中蛇的多种运动步伐,包括蜿蜒运动、收缩运动、行波运动、直线运动等平面运动形式,以及侧向蜿蜒、推进、跳跃、攀爬、翻滚、挖掘等复杂的空间运动形式<sup>[1]</sup>。蛇形机器人的运动模式是有选择的,要完成不同任务需要在不同的模式之间进行切换。

蛇形机器人的研究已有三十多年的历史<sup>[2]</sup>,出现了多种结构形式<sup>[3-5]</sup>,实现了多种运动模式<sup>[6,7]</sup>,并对蛇形机器人运动机理进行了深入的研究<sup>[7-9]</sup>。但这些研究多局限于蛇形机器人的蜿蜒运动(自然界中蛇所采用的一种常见的平面运动方式)<sup>[2-4,9]</sup>。

对于蛇形机器人的其他运动形式的研究还不多<sup>[10,11]</sup>。本文在新研制的蛇形机器人样机的基础上,对蛇形机器人侧向运动的运动机理进行了研究,建立了蛇形机器人空间运动学模型,模拟沙漠中蛇的运动模式,实现了蛇形机器人的两种侧向运动,并分析了每一种运动模式的特点。

### 2 蛇的侧向运动机理研究(Mechanism of sidewinding of snake)

侧向蜿蜒运动是沙漠中蛇常采取的一种运动形式,其运动轨迹如图 2 所示,运动轨迹的法向为运动

\* 基金项目: 国家 863 基金资助项目(2001AA422360)。

收稿日期: 2002-12-01

方向. 通过研究发现, 蛇进行侧向运动时, 象螺旋线圈翻滚推进运动一样, 从头部开始, 身体部分顺次接地、抬起, 完成前进运动, 蛇体边推压地面边向前运动, 在这个运动过程中蛇体与地面之间并没有相对滑动, 而是借助腹部与地面之间的静摩擦力提供动力. 蛇体从上部与地面接触, 所受的摩擦阻力较小, 因此它适合沙漠等低剪切运动环境; 由于蛇体部分与地面交替接触, 因此该种运动适合沙漠炎热的环境.

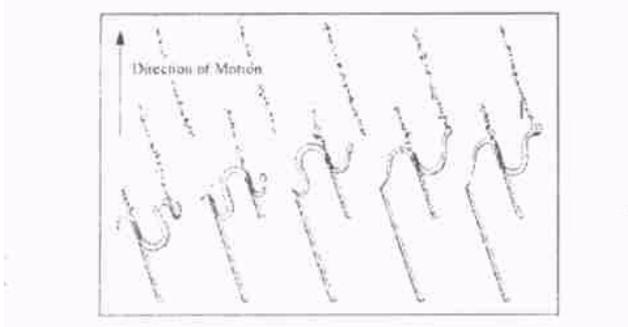


图 1 蛇的侧向蜿蜒运动  
Fig. 1 Sidewinding of snake robot

### 3 蛇形机器人机构与控制 (The structure and control of snake robot)

#### 3.1 机构设计

蛇形机器人的侧向运动是一种复杂的空间运动形式, 蛇形机器人要实现空间运动, 其关节至少应具有两个自由度, 通常采用特制的关节结构, 例如万向节式、连杆式、多脊骨相连式 (Snake board)、轴线斜交球铰等<sup>[1]</sup>, 但是它们制造复杂、控制困难. 本文基于可重构思想, 提出了一种新型两自由度蛇形机器人关节<sup>[12]</sup>, 该关节由两个单自由度模块轴线互相垂直方式对接而成 (见图 2).

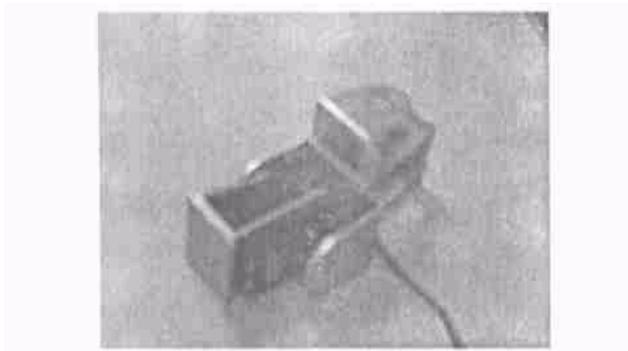


图 2 蛇形机器人组合关节  
Fig. 2 Combined joint of snake robot

这样的关节结构简单, 运动灵活, 易于控制. 单

自由度模块可以看作是一个最小单元结构, 每一模块均由一个直流伺服电机驱动, 并带有自己的驱动器. 整个关节长度为 140mm, 宽度为 33mm, 高度为 55mm, 重量大约 200g.

本样机共有 10 个模块连接而成, 头部和尾部两模块分别安装电机驱动器和电源, 不参与运动. 因此共有 4 个关节, 8 个自由度. 整个蛇形机器人长 0.7m, 重量为 1.1kg, 所选关节电机型号为 NES-4721, 额定功率为 1.2W, 输出扭矩 0.84N·M, 输出转速 0.22sec/60deg.

#### 3.2 空间运动学建模

由于蛇形机器人的结构特点, 可简化为空间连杆模型 (图 3).

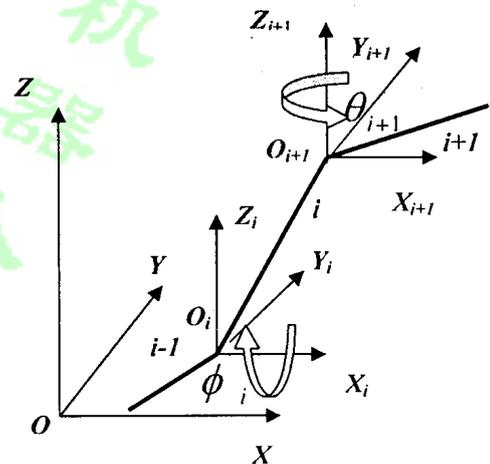


图 3 蛇形机器人空间运动学模型  
Fig. 3 Spatial dynamic model of snake robot

每一个模块有一个局部坐标, 机体轴线方向设为 Y 轴方向, 机体法线方向设为 X 轴方向, 将模块按轴线垂直方式依次连接, 每两个模块构成具有两个相对独立自由度的关节, 分别把它们定义为一个绕 X 轴的俯仰运动和另一个绕 Z 轴的侧摆运动. 绕 X 轴的俯仰运动由其中一个电机转动角  $\Delta\varphi$  控制, 而绕 Z 轴的侧摆运动由另一个电机转动角  $\Delta\theta_i$  控制. Hirose<sup>[2]</sup>从仿生的角度, 把蜿蜒曲线 (serpennoid) 作为蛇形机器人平面运动的基本曲线. 基于此思想, 可以把蛇形机器人的空间运动看作是两个互相垂直平面内运动波的合成, 因此可推导出其空间运动方程

$$\begin{cases} \theta_i(s) = -2\alpha_{\theta_0} s \sin\left(\frac{k_n \pi}{n_{\theta}}\right) s \sin\left(\frac{2K_n \pi}{L} s + \frac{2K_n \pi}{n_{\theta}} i\right) + K_{\theta} l \\ \varphi_i(s) = -2\alpha_{\varphi_0} s \sin\left(\frac{k_n \pi}{n_{\varphi}}\right) s \sin\left(\frac{2K_n \pi}{L} s + \frac{2K_n \pi}{n_{\varphi}} i\right) + \delta\varphi + K_{\varphi} l \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\alpha_{\theta_0}, \alpha_{\varphi_0}$  是两个波运动的初始弯角,  $n_{\theta}, n_{\varphi}$  是每一运动平面内模块个数,  $\delta\varphi$  为不同平面内两个波的相位差.  $L$  是机体长,  $l$  是每一模块的长度,  $K_n$  是体内传播波的个数,  $i$  代表任意一个关节是运动的初始弯角,  $s$  是蛇型机器人尾部沿蛇形曲线轴线方向的虚位移,  $K_1$  是曲率偏差. 如果改变  $K_1$  的大小, 就可以改变运动方向; 改变  $s, \dot{s}, \ddot{s}$  的大小和正负号, 则可以改变运动的速度和波的传播方向.

#### 4 蛇形机器人侧向运动的实现 (The implementation of lateral locomotion)

通过实验研究, 本样机可实现侧向蜿蜒运动和侧向滚动两种侧向运动形式:

(1) 侧向蜿蜒运动 (sidewinding) 图 4(a): 是蛇形机器人可实现侧向前的一种运动方式, 它是通过控制每一关节的  $Z$  轴和  $X$  轴的转角变化 (正弦), 以及两个平面内的波之间的相位差  $\delta\varphi$  而实现的. 其运动表达式为

$$\begin{cases} \theta_i(s) = -2\alpha_{\theta_0}s \sin\left(\frac{k_n\pi}{n_{\theta}}\right) \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L_{\theta}}s + \frac{2K_n\pi}{n_{\theta}}i\right) + K_1l \\ \varphi_i(s) = -2\alpha_{\varphi_0}s \sin\left(\frac{k_n\pi}{n_{\varphi}}\right) \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L_{\varphi}}s + \frac{2K_n\pi}{n_{\varphi}}i + \delta\varphi\right) + K_1l \end{cases} \quad (2)$$

两个波形曲线的相差和波的传播方向决定侧向运动的姿态, 两个波的传播频率决定机器人侧向运动的方向. 实验表明, 要达到较好的运动效果, 两个波之间的相差应为  $\pm\pi/2$ . 通过调节两个异相波的频率比, 可以实现任意方向的侧向运动. 对于本样机, 当垂直平面内波传播频率是水平面内波传播频率的二倍时, 法向运动的速度和切向运动速度相等, 合成运动方向与机体轴线成  $45^\circ$ . 最大速度可达  $0.04\text{m/s}$ ;

当垂直平面内波传播频率和水平面内波传播频率相等时, 蛇形机器人实现纯侧向运动. 其侧向移动距离的大小与运动的幅值 (初始弯角) 有关. 蛇形机器人的侧向蜿蜒的特点为适于松软地面、不适于狭小空间. 它在沙地环境中运行时, 滑动摩擦阻力小, 因而运动效率高, 是一种很好的适应沙漠环境的运动形式.

(2) 侧向滚动 (lateral rolling): 是蛇形机器人可实现纯侧向位移的一种运动方式, 它也是通过控制它的  $Z$  轴和  $X$  轴的转角变化 (正弦) 而实现的, 与侧向蜿蜒运动不同之处是每个运动波内的各个关节之间相差为零. 两个异相波有一个相位差为  $\delta\varphi$ . 其运动表达式为

$$\begin{cases} \theta_i(s) = -2\alpha_{\theta_0}s \sin\left(\frac{k_n\pi}{n_{\theta}}\right) \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L_{\theta}}s\right) + K_1l \\ \varphi_i(s) = -2\alpha_{\varphi_0}s \sin\left(\frac{k_n\pi}{n_{\varphi}}\right) \cos\left(\frac{2K_n\pi}{L_{\varphi}}s\right) + K_1l \end{cases} \quad (3)$$

两个波形曲线的相差和波的传播方向决定侧向运动的姿态和方向, 实验表明, 要达到较好的运动效果, 两个波之间的相差也应为  $\pm\pi/2$ . 通过控制运动波的幅值不同可以实现各种形式的侧向移动. 当所选的幅值较小时, 蛇形机器人头部和尾部与腹部交替与地面接触, 产生侧向位移图 4(b); 当所选幅值适当 (由运动环境所决定) 且蛇形机器人人体长内形成的波的个数增加时, 蛇形机器人将产生侧向翻滚图 4(c), 每一时刻各个关节都与地面接触; 当所选幅值较大时, 机体的首尾和中间部分与地面交替接触, 因此这种侧向滚动可以跨越障碍图 4(d). 研究还表明, 侧向翻滚运动是一种利用机械结构的实现自然界中蛇没有的特殊运动方式. 它不需依靠机体与地面之间的摩擦力的方向差来实现驱动, 而是通过不同平面内两相邻关节的相互作用产生驱动力.

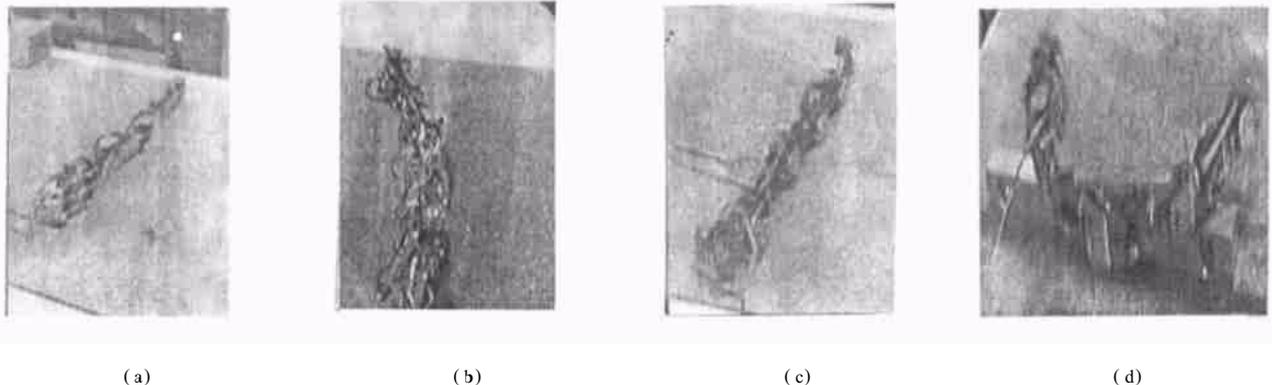


图 4 蛇形机器人侧向运动的几种形式

Fig. 4 Types of lateral locomotion of snake robot

由于本样机共 8 个自由度, 进行三维空间运动时, 每个关节中的一个模块, 共计 4 个决定了一个平面内的运动波形, 满足形成一个周期波长所需的最少模块数, 所以实验中选取  $k_n = 1$ , 即  $n_{\theta} = n\varphi = 4$ . 本试验用 C 语言编制运动控制程序, 初始弯角  $\alpha_0$  (决定运动波的幅值) 由运动环境所决定, 各关节之间的相位差由蛇形机器人的节数决定. 通过控制运动波的频率的变化, 以及异相波的相位差  $\delta\varphi$  的变化, 实现了上述的侧向运动.

## 5 结论(Conclusion)

本文提出了一种新型蛇形机器人机构, 建立了其空间运动学模型, 实现了蛇形机器人的两种侧向运动: 侧向蜿蜒运动和侧向滚动, 前者通过调节两个异相波的频率比, 实现了任意方向的侧向运动. 后者通过控制运动波的幅值变化, 实现了各种形式的纯侧向移动, 当幅值足够大时, 这种侧向滚动可以跨越障碍.

### 参考文献 (References)

- [1] Nigg B M, Herzog W. Biomechanics of the musculo-skeletal system [M]. University of Calgary, Calgary, Alberta, CANADA, 1999
- [2] Hirose S. Biologically inspired robots (Snake-like Locomotor and Manipulator)[M]. Oxford University Press, 1993
- [3] Togawa K, Mori M, Hirose S. Study on tree-dimensional active cord mechanism: development of ACM-R2 [A]. In: IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems[C],

2000.

- [4] Shugen MA. Development of a creeping Snake-Robot. www.roboken.dse.ibaraki.ac.jp
- [5] http://borne.gmd.de/snake-collection.html
- [6] Paap K L, Dehlwisch M, Klaassen B. GMD-Snake: A semi autonomous snake-like [M]. Robot Distributed Autonomous Robotic Systems 2, Tokyo: Springer-Verlag, 1996
- [7] Dowling K. Limbless Locomotion: Learning to crawl with a snake robot[D]. Tech. report CMU-RI-TR-97-48, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1997
- [8] Fukuda T, Kawachi Y. Cellular robotic system (CEBOT) as one of the realization of self-organizing intelligent universal manipulator [A]. In: IEEE Conference on Robotics and Automation[C]. 1990
- [9] Yim M. New locomotion gains [A]. IEEE Conference on Robotics and Automation[C]. 1994
- [10] Poi G, Scarabeo C, Allotta B. Travelling wave locomotion hyper-redundant mobile robot[A]. Conference on Robotics and Automation[C]. 1998
- [11] Burdick J, Radford J, Chirikjian G S. A sidewinding locomotion gait for hyper-redundant robots[J]. Advanced Robotics, 9(3): 195-216
- [12] 陈丽, 王越超等. 蛇形机器人机构设计及运动机理的研究[J]. 机器人. 2002, 24(7): 688-691

### 作者简介:

陈 丽 (1975-), 女, 博士, 研究领域: 超冗余度机器人机构与运动控制.

王越超 (1960-), 男, 博士, 研究员, 研究领域: 机器人智能控制.

(上接第 212 页)

## 6 结论(Conclusion)

本文研究的是 AUV 的深度控制问题, 详细给出了滑模深度控制器和模糊神经网络滑模深度控制器的设计和仿真曲线. 通过对比可看到, 模糊神经网络在线调整方法的使用给深度控制带来更好的控制性能, 并使滑模控制对参数变动、海浪的外干扰具有更好的鲁棒性.

### 参考文献 (References)

- [1] 陈厚泰. 潜艇操纵性[M]. 国防工业出版社
- [2] 张乃尧, 阎平凡. 神经网络与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996
- [3] 田宏奇. 滑模控制理论及其应用[M]. 武汉出版社, 1995

### 作者简介:

汪 伟 (1974-), 男, 博士生. 研究领域: 控制理论与控制工程, 研究方向: 自治式水下机器人控制技术.

边信黔 (1941-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 控制理论与控制工程, 研究主要方向: 船舶动力定位和 underwater 机器人控制技术.