

文章编号 1004-924X(2001)04-0330-04

# 基于蛇类生物的仿生变体机器人运动学研究

熊翔, 颜国正, 丁国清, 林良明, 蔡弘  
(上海交通大学, 上海 430074)

**摘要:** 基于仿生机理学的原理, 本文提出了仿生变体机器人的物理结构, 讨论了仿生变体机器人的运动机理, 分析了仿生变体机器人线形运动的基本步态。并对该机器人系统进行了运动学分析, 实验结果证明了这种运动步态的可行性。最后指出了这种基本运动步态的局限性和改进的方向。

**关键词:** 仿生机理学; 仿生变体机器人; 移动方式  
**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A

## 1 引言

90年代以来, 机器人技术的应用开始从制造领域向非制造领域(比如, 宇宙探测、海底探查、管道敷设和检修、医疗、军用、服务、娱乐等方面)扩展, 从而基于非结构环境、极限环境下的先进机器人技术及其应用研究已成为机器人技术研究和发展的主要方面。地球上生物历经长年进化, 不仅具备超乎寻常的对自然环境的适应能力, 而且更有功能和特性极其完备的动作机理和功能器官。因此, 基于仿生机理微特机器人的研究将是非结构环境下机器人的研究重点。

生物蛇无需驱动足, 仅仅依靠自身体态的变化就能在障碍物众多、凹凸不平的环境下行走自如。蛇的这个特性引起了科技工作者的关注, 不断有仿蛇机器人研究的报道<sup>[1-2]</sup>。然而当前仿蛇机器人的变体运动研究大多集中于运动平面内, 机器人通过体态变化及界面的摩擦力来实现系统的运动。而本文则着重考虑与运动平面相垂直的平面内仿生机器人的变体动作、系统有效控制、运动学研究等方面的问题, 以适应恶劣环境或人力所限、人所不及的环境下作业的需要, 比如地震后对受灾地区的勘察, 寻找幸存者, 核电站中反应炉的清理, 煤气管道内部的在线检测等。

## 2 仿生变体机器人的运动原理

研制的仿生变体机器人可简化为一杆系结

构, 杆与杆之间用转动副连接。通过设置于转动副处的微直流电动机及圆锥齿轮传动机构来实现相邻两杆的相对转动, 其转动位移由设置于各转动副上的微传感器进行检测。

仿生变体机器人的运动原理如图1所示, (1) 仿生变体机器人处于初始状态, 图1(a)。(2) 控制关节10和关节8上的直流电机, 使其旋转设定的角度, 即尾部两节拱起, 形成图1(b)所示的体态。(3) 控制关节10、关节8和关节6上的电机, 使系统构成图1(c)所示的体态。(4) 通过类似的控制可实现图1(d)所示的体态。(5) 控制关节2和关节4上的电机使系统恢复到初始状态。显然, 通过上述(1)~(5)的控制过程, 仿生变体机器人实现了一个动作循环, 并前进了一个步距 $p$ 。重复上述控制过程, 蛇形机器人就能在要求的运动方向上运动要求的行程。如果改变控制时序, 机器人可实现向后退的运动。

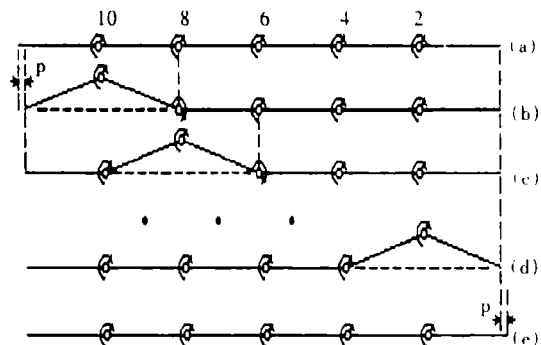


Fig. 1 Movement theory of the bionic robot

图2所示是仿生变体机器人相邻体态变换的过渡过程。由于机器人的运动实质上是通过各运动副按一定时序和确定的函数关系来控制实现的。为了使其运动持续可靠,必须得到相邻体态变换过程中如相关转动副转角的相对关系。

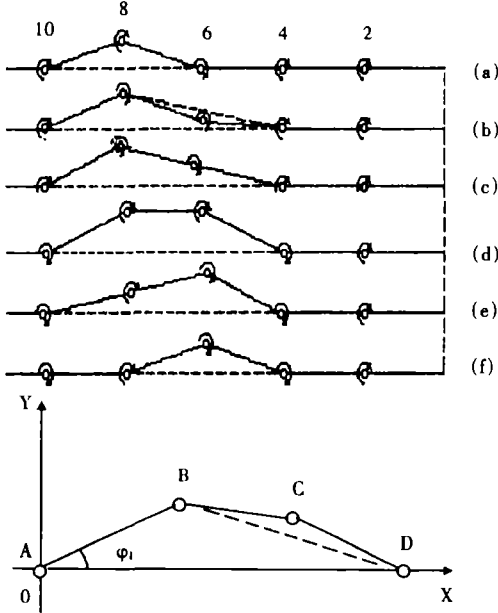


Fig.2 Intergradations of movement process of the bionic robot

建立如图2所示的坐标系。并以A、B、C、D分别代表关节10、关节8、关节6、关节4,根据前述仿生变体机器人的动作原理,机体在相邻体态变换过程中,关节10和关节4是不离支撑界面的,因此可视A点与D点固定,设构成仿生变体机器人的各杆等长,且均为 $l_1$ ,则 $AB = BC = CD = l_1$ ,并设 $AD = l_2$ ,AB与x轴的夹角为 $\varphi_1$ 。则D点坐标为 $x_D = l_2, y_D = 0$ 。那么,B点的坐标为:

$$\left. \begin{aligned} x_B &= l_1 \cos \varphi_1 \\ y_B &= l_1 \sin \varphi_1 \end{aligned} \right\} (1)$$

将(1)式对时间求导可得B点的速度方程:

$$\left. \begin{aligned} v_{Bx} &= \dot{x}_B = -l_1 \omega \sin \varphi_1 = -\omega (y_B - y_A) \\ v_{By} &= \dot{y}_B = l_1 \omega \cos \varphi_1 = \omega (x_B - x_A) \end{aligned} \right\} (2)$$

再求导一次即为B点的加速度方程:

$$\left. \begin{aligned} a_{Bx} &= \ddot{x}_B = -l_1 \omega^2 \cos \varphi_1 - l_1 \dot{\omega} \sin \varphi_1 = \\ &\quad -\omega^2 (x_B - x_A) - \epsilon (y_B - y_A) \\ a_{By} &= \ddot{y}_B = -l_1 \omega^2 \sin \varphi_1 + l_1 \dot{\omega} \cos \varphi_1 = \\ &\quad -\omega^2 (y_B - y_A) - \epsilon (x_B - x_A) \end{aligned} \right\} (3)$$

设BC与x轴的夹角为 $\varphi_2 = \delta \pm \gamma$ ,其中,

$\delta = \arctan \frac{y_B}{x_B - l_2}$ 是矢量BD与x轴的夹角, $\gamma = \arccos \frac{d}{2 \cdot l_2}$ 是矢量BD与矢量BC的夹角,d是矢量BD的长度。

所以,C点的位置为:

$$\left. \begin{aligned} x_C &= x_B + l_1 \cdot \cos \varphi_2 \\ y_C &= y_B + l_1 \cdot \sin \varphi_2 \end{aligned} \right\} (4)$$

B点和D点的位置坐标 $x_B, y_B, x_D, y_D$ ,速度 $v_B, v_D$ 和加速度 $a_B, a_D$ 可由(2)和(3)式求出。设杆BC、CD的角速度和角加速度分别为 $\omega_2, \omega_3$ 和 $\epsilon_2, \epsilon_3$ ,C点的速度和分别为 $v_C, a_C$ 。由图2可知 $l_{AC} = l_{AB} + l_{BC} = l_{AD} + l_{DC}$ ,所以有投影式:

$$\left. \begin{aligned} x_B + l_1 \cos \varphi_2 &= l_2 + l_1 \cos \varphi_3 \\ y_B + l_1 \sin \varphi_2 &= l_1 \sin \varphi_3 \end{aligned} \right\} (5)$$

其中 $\varphi_3$ 为杆CD与x轴的夹角。

将上式对时间求导得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_B - l_1 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 &= -l_1 \dot{\varphi}_3 \sin \varphi_3 \\ \dot{y}_B + l_1 \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_2 &= l_1 \dot{\varphi}_3 \cos \varphi_3 \end{aligned} \right\} (6)$$

即:

$$\left. \begin{aligned} v_{Bx} - l_1 \omega_2 \sin \varphi_2 &= -l_1 \omega_3 \sin \varphi_3 \\ v_{By} + l_1 \omega_2 \cos \varphi_2 &= l_1 \omega_3 \cos \varphi_3 \end{aligned} \right\} (7)$$

$$\left. \begin{aligned} l_1 \sin \varphi_2 &= y_C - y_B \\ l_1 \cos \varphi_2 &= x_C - x_B \\ l_2 \sin \varphi_3 &= y_C \\ l_2 \cos \varphi_3 &= x_C - l_2 \end{aligned} \right\} (8)$$

将(8)式代入(7)式,得:

$$\left. \begin{aligned} -\omega_2 (y_C - y_B) + \omega_3 y_C &= -v_{Bx} \\ \omega_2 (x_C - x_B) - \omega_3 (x_C - l_2) &= -v_{By} \end{aligned} \right\} (9)$$

解上述方程组可得:

$$\left. \begin{aligned} \omega_2 &= \frac{-v_{Bx}(x_C - l_2) - v_{By} y_C}{y_C(x_C - x_B) - (x_C - l_2)(y_C - y_B)} \\ \omega_3 &= \frac{-v_{Bx}(x_C - x_B) - v_{By}(y_C - y_B)}{y_C(x_C - x_B) - (x_C - l_2)(y_C - y_B)} \end{aligned} \right\} (10)$$

由于B、C同为杆BC上的两点,故在求得 $\omega_2$ 的情况下,C点的速度可由式(11)求得,即:

$$\left. \begin{aligned} v_{Cx} &= v_{Bx} - \omega_2 (y_C - y_B) \\ v_{Cy} &= v_{By} + \omega_2 (x_C - x_B) \end{aligned} \right\} (11)$$

将(7)式对时间求导,可得加速度方程:

$$\left. \begin{aligned} a_{Bx} - l_1 \dot{\omega}_2 \sin \varphi_2 - l_1 \omega_2^2 \cos \varphi_2 \\ = -l_1 \dot{\omega}_3 \sin \varphi_3 - l_2 \omega_3^2 \cos \varphi_3 \\ a_{By} + l_1 \dot{\omega}_2 \cos \varphi_2 - l_1 \omega_2^2 \sin \varphi_2 \\ = l_1 \dot{\omega}_3 \cos \varphi_3 - l_1 \omega_3^2 \sin \varphi_3 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

即:

$$\left. \begin{aligned} -\varepsilon_2(y_C - y_B) + \varepsilon_3 y_C = E \\ \varepsilon_2(x_C - x_B) - \varepsilon_3(x_C - l_2) = F \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中:

$$E = -a_{Bx} + \omega_2^2(x_C - x_B) - \omega_3^2(x_C - l_2)$$

$$F = -a_{By} + \omega_2^2(y_C - y_B) - \omega_3^2 y_C$$

解之可得:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_2 = \frac{E \cdot (x_C - l_2) + F \cdot y_C}{(x_C - x_B) \cdot y_C - (x_C - l_2)(y_C - y_B)} \\ \varepsilon_3 = \frac{E \cdot (x_C - x_B) + F \cdot (y_C - y_B)}{(x_C - x_B) \cdot y_C - (x_C - l_2)(y_C - y_B)} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由于  $B$ 、 $C$  同为杆  $BC$  上的两点,故在求得  $\varepsilon_2$  的情况下, $C$  点的加速度可由式(15)求得,即:

$$\left. \begin{aligned} a_{Cx} = a_{Bx} - \omega_2^2(x_C - x_B) - \varepsilon_2(y_C - y_B) \\ a_{Cy} = a_{By} - \omega_2^2(y_C - y_B) + \varepsilon_2(x_C - x_B) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

这样,只要知道  $AB$  杆转过的角度  $\varphi_1$ ,那么  $B$  点和  $C$  点的位置, $BC$  杆和  $CD$  杆的运动速度和加速度都确定下来了。各相邻两杆之间的夹角也确定下来了。就可以通过传感器反馈回来的角度信息来控制直流电机,并依照杆  $AB$ 、 $BC$  及  $CD$  之间的速度和加速度关系来协调控制仿生变体机器人各关节的转动,使其各个关节转到要求转到的位置。从而实现了仿生变体机器人的姿态控制,并实现上述的运动。

由此可见,仿生变体机器人运动的关键在于三角波的推进。如前所述,它的每一个动作循环可看作几个四连杆机构按一定的时序连续运动组成的,这些基本运动元素是我们控制机器人的关键。

### 3 仿生变体机器人的结构

根据前述仿生变体机器人的动作原理,研制的仿生变体机器人结构如图3所示。考虑到机器人不仅要实现直线爬行运动,还要能转弯,故在图

1所示的每个单元节之间增加了一辅助节。辅助节的旋转量同样由微传感器检测。而且两节的转动轴是相互垂直的。

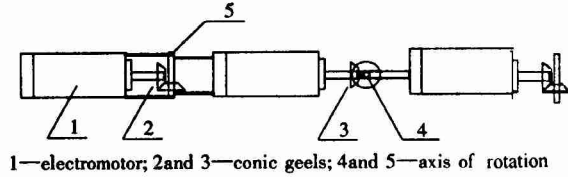


Fig.3 Mechanical structure sketch of the bionic robot

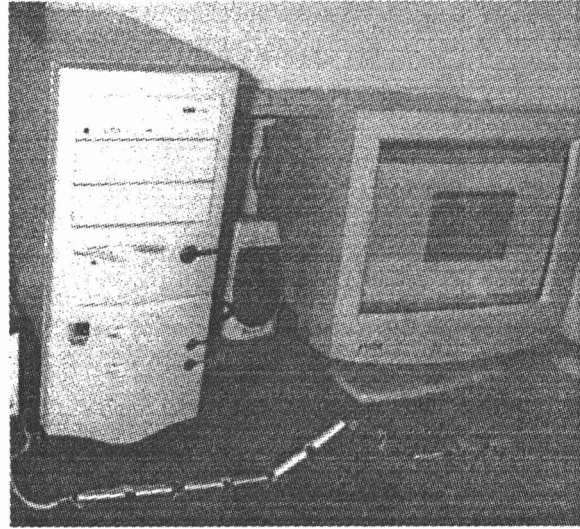


Fig.4 Sample of the bionic robot

图4为研制的原理样机外形图。样机的主要技术参数为:

- 每节直径:30mm
- 机体总长:660mm
- 单元节长:55mm

### 4 仿生变体机器人的实验

机器人的控制由计算机发出数字信号,经过数模转换为电压信号,再经过功率放大后驱动直流电机。同时,传感器将角度信号在经过模数转换后反馈给计算机,计算机根据位移反馈的信号对各电机进行相应控制。

按这样的程序来控制蛇形机器人的运动,并进行了实验。实验结果如表1所示:

**Table 1 Experiment results of the bionic robot**

Experimental interface	Theoretical step length	Experimental step length	Driving voltage	Forward speed
Wood interface	29.5mm	28mm ~ 31mm	6V	200mm/min

## 5 结 论

垂直平面内的波动前进是一种对环境适应性较强的运动方式,受地表粗糙度和摩擦力影响较

### 参考文献:

- [1] Mochiyama Hiromi, Shimemura Etsujiro, Kobayashi Histo. Shape control of manipulators with hyper degrees of freedom[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1999,18(6):584 - 600.
- [2] Klaasser Bernhard, Paap Karl L. GMD - SNAKE2. A snake - like robot driven by wheel and a method for motion control[A]. *Proceedings of the 1999. IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]*, 1999,3014 - 3019.
- [3] 林良明. 仿生机械学[M]. 上海:上海交通大学出版社,1989.

### Research on kinematics of the snake-like robot

XIONG Xiang, YAN Guo-zheng, DING Guo-qing, LIN Liang-ming, CAI Hong

(*Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030, China*)

**Abstract:** This paper discusses the gaits of snake-like robot according to the snake's biomechanics, and also analyzes the kinematics to progress quantitatively by undulation in a vertical plane. The feasibility of this kind of gait has been proved by kinematic analysis.

**Key words:** biomechanics; bionic robots; gait mode

**作者简介:**熊 翔(1979 - ),男,上海交通大学电子信息学院在读硕士,方向:仿生机器人、智能机器人。

颜国正(1961 - ),男,湖南人,上海交通大学电子信息学院副院长,博士生导师,国家 863 计划自动化领域智能机器人主题专业专家,上海交通大学精密机械及智能微系统研究所所长。

小。而且由于这种方式只有垂直方向的运动,没有水平方向的运动,所以可以通过宽度较小的通道。

本文仅讨论了直线运动的机理,因此需要用水平向上的运动作为辅助,才能够完成转弯等动作,才能实现机器人的可操作性。另外,垂直平面上的波动前进方式所带来的稳定性问题是比较突出的。这在实验中集中地表现了出来,因此,将进一步开展动力学分析,优化控制等方面的研究工作。