

1-15-2021

## Gait Simulation of Snake Robot Based on CPG Method

Gao Qin

*1. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; ;*

Zhelong Wang

*1. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; ;*

Weijian Hu

*2. National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China;*

Lanying Zhao

*2. National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Gait Simulation of Snake Robot Based on CPG Method

### Abstract

**Abstract:** Biological snakes in nature have a variety of periodic motion patterns such as serpentine motion, linear motion and lateral motion. Gaits diversity has greatly improved the adaptability of natural snakes to complex environment. Biologists has proved that such rhythmic movements of vertebrate animals are generated by CPG (the central neural pattern generator). *Special mechanical structure of a snake robot with high degree of freedom and locomotion characteristics of different gaits was considered to build a suitable CPG network model. Hopf oscillators were chosen as neuron models of a central pattern generator owing to their stable features. A snake robot prototype consisting of nine links and eight joints was designed to achieve serpentine locomotion in horizontal plane and sidewinding locomotion in three-dimensional space using a simulation tool of ADAMS. A switching method between the two locomotion gaits was discussed.* Simulation results show that the proposed model is effective in locomotion control of snake robots.

### Keywords

snake robot, Hopf oscillator, serpentine locomotion, sidewinding locomotion

### Recommended Citation

Gao Qin, Wang Zhelong, Hu Weijian, Zhao Lanying. Gait Simulation of Snake Robot Based on CPG Method[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1374-1380.

## 基于振荡器模型的蛇形机器人的步态仿真

高琴<sup>1</sup>, 王哲龙<sup>1</sup>, 胡卫建<sup>2</sup>, 赵兰迎<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学控制科学与工程学院, 大连 116024; 2. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049)

**摘要:** 自然界中的生物蛇具有多种周期性运动方式如蜿蜒运动、直线运动和侧移运动等, 步态的多样性极大的提高了自然蛇对复杂环境的适应性。生物学家通过研究证明脊椎动物的这种节律性运动方式是由中枢神经模式发生器(CPG)控制的。针对蛇形机器人高自由度的机械结构和不同步态的运动特点, 利用 Hopf 振荡器模型的稳态特性建立了蛇形机器人的 CPG 步态模型。通过 ADAMS 仿真实现了 1 种九连杆八关节机器人样机的蜿蜒运动和三维空间内的侧向蜿蜒运动, 并讨论了 2 种步态之间的切换。仿真分析结果证明该 CPG 模型在实现蛇形机器人 2 种步态控制上的有效性。

**关键词:** 蛇形机器人; Hopf 振荡器; 蜿蜒运动; 侧向蜿蜒运动

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 06-1374-07  
DOI: 10. 16182/j. cnki. joss. 2015. 06. 031

### Gait Simulation of Snake Robot Based on CPG Method

Gao Qin<sup>1</sup>, Wang Zhelong<sup>1</sup>, Hu Weijian<sup>2</sup>, Zhao Lanying<sup>2</sup>

(1. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Biological snakes in nature have a variety of periodic motion patterns such as serpentine motion, linear motion and lateral motion. Gaits diversity has greatly improved the adaptability of natural snakes to complex environment. Biologists has proved that such rhythmic movements of vertebrate animals are generated by CPG (the central neural pattern generator). *Special mechanical structure of a snake robot with high degree of freedom and locomotion characteristics of different gaits was considered to bulid a suitale CPG network model. Hopf oscillators were chosen as neuron models of a central pattern generator owing to their stable features. A snake robot prototype consisting of nine links and eight joints was designed to achieve serpentine locomotion in horionzonal plane and sidewinding locomotion in three-dimensional space using a simulation tool of ADAMS. A switching method between the two locomotion gaits was discussed.* Simulation results show that the proposed model is effective in locomotion control of snake robots.

**Key words:** snake robot; Hopf oscillator; serpentine locomotion; sidewinding locomotion

## 引言

蛇是被发现广泛生存在各种环境下的古老生



收稿日期: 2014-06-17 修回日期: 2014-09-10;  
基金项目: 国家自然科学基金资助(61174027); 国家科技支撑计划课题资助(2013BAK03B01);  
作者简介: 高琴(1985-), 女, 河南南阳人, 博士生, 研究方向为机器人运动控制算法; 王哲龙(1973-), 男, 辽宁大连人, 教授, 博导, 研究方向为机器人技术和无线传感器网络。

物, 它依靠数量众多的微小脊椎骨、特殊的腹部鳞片以及肌肉之间的相互作用, 使得蛇体规律地收缩和舒张, 产生多种波浪式运动方式, 如在陆地和湖泊中常见的蜿蜒运动、狭窄洞穴中的行波运动以及适应炎热沙漠环境的侧向运动, 步态的多样性极大的提高了生物蛇面对恶劣环境的生存能力。

与传统的轮式和腿式机器人相比, 仿生的蛇形

机器人具有重心低、稳定性好的特点, 移动时身体部分与地面接触产生的压力均匀且比较小, 适合于在灾难后易塌陷的危险环境中执行搜索和救援工作, 有望代替或者部分代替操作人员完成危险的作业。但是蛇形机器人具有多关节、高自由度的特点, 其控制系统的设计一直是一个充满挑战的领域。

近期被广泛应用在仿生机器人上的基于中枢模式发生器(CPG)的控制方法是一种新的仿生控制策略<sup>[1-3]</sup>, 它模仿脊椎动物中枢神经系统能够自发生成节律信号的原理, 通过上层少数的控制参量实现高维自由度信号的生成, 为机器人的分布式关节提供运动控制信号。利用 CPG 原理建立机器人的步态模型避免了对动力学建模准确度的依赖, 具有减少了协调物理关节产生节律运动的计算量、在实体控制更为简单等优点<sup>[4-6]</sup>。

已有研究中很多基于振荡器的 CPG 方法被应用在多种类型机器人的运动控制中。利用 CPG 的方法可以成功实现对四足机器人的控制<sup>[7-8]</sup>, 达到在不平坦路面行走的效果。基于振荡器模型还可以建立适合机器蝙蝠实现扑翼飞行模式和滑翔飞行两种模式的 CPG 模型<sup>[9]</sup>。国内研究人员根据 CPG 控制模型成功地实现了对仿生机器鱼的游动控制<sup>[10-11]</sup>。卢振利等利用 Matasuoka 提出的 CPG 模型<sup>[12]</sup>, 实现了蛇形机器人的蜿蜒运动和转弯运动。近期, 唐权超等讨论了蛇形机器人蜿蜒运动、行波运动等步态的实现<sup>[13]</sup>。

本文基于 Hopf 振荡器作为 CPG 单个的神经元模型<sup>[14]</sup>, 构建了 1 种九连杆八关节蛇形机器人的运动模型, 讨论了基于中枢模式发生器方法实现的蜿蜒运动和侧向蜿蜒运动的步态控制。通过在多体系统动力学仿真软件 ADAMS 中建立蛇形机器人的模型并实现了 2 种步态的运动仿真。

## 1 仿生的蛇形机器人

本文根据生物蛇相邻骨节间构成两维转动关节的特点, 提出了 1 种单关节两自由度的蛇形机器人。机器人的实物样机如图 1(a)所示, 和实物样机

的连杆单元几何尺寸相同的简化的虚拟模型样机, 见图 1(b), 机器人圆柱形连杆模块的尺寸参数为直径 0.08 m, 长 0.18 m。

蛇形机器人的模型样机由串联的 9 个圆柱形状的连杆单元组成, 蛇形机器人的模块化关节类似于 1 个万向节机构, 具有俯仰和偏航 2 个方向的自由度, 与地面接触的底部的被动轮模仿蛇的腹部鳞片, 满足了蜿蜒运动中所需的横纵向摩擦系数不同的条件。



(a) 实物样机



(b) ADAMS 环境中的模型样机

图 1 蛇形机器人的两种结构设计

根据提出的蛇形机器人的关节结构, 下文仿真实现的步态有蜿蜒运动和侧向蜿蜒运动, 由于圆柱形的连杆模块在垂直面上进行波形传递时容易翻滚, 所以垂直面上的行波运动不予讨论。

## 2 CPG 模型

利用 Hopf 振荡器构建 CPG 模型主要考虑到两个原因, 一方面, Hopf 振荡器稳定时生成的正弦波周期信号正好满足蛇形机器蜿蜒运动所需要的运动信号的特点<sup>[15-17]</sup>, 另一方面, 每一个 Hopf 振荡器的状态量  $v$  总是滞后状态量  $u$  相位差  $\pi/2$ , 利用该特性可以直接对蛇形机器人万向关节中偏航

自由度和俯仰自由度进行关节角位移运动律的控制，完成蛇形机器人的侧向蜿蜒运动。

### 2.1 单个振荡器

单个 Hopf 振荡器模型的动态特性可以由下面的一阶微分方程来描述，

$$\begin{cases} \dot{u} = \omega u - \lambda \left( \frac{u^2 + v^2}{r^2} - 1 \right) v \\ \dot{v} = -\omega v + \lambda \left( \frac{u^2 + v^2}{r^2} - 1 \right) u \end{cases} \quad (1)$$

令  $x = [u, v]^T$ ,  $u, v$  分别为振荡器的 2 个状态变量，可以将上面的式子简写为  $\dot{x} = f_H(x)$ ,  $\omega$  和  $r$  分别决定振荡器的频率和幅值， $\lambda$  被定义为收敛到稳定状态的速率系数， $\lambda$  越大，振荡器到达稳态的时间越短。稳定状态时振荡器的输出如下表示，

$$\begin{aligned} u_{\infty}(t) &= r \cos(\omega t + \varphi_0) \\ v_{\infty}(t) &= r \sin(\omega t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\varphi_0$  由  $u, v$  的初始状态和  $\lambda$  决定。当某一时刻突然改变振荡器的频率或幅值时，Hopf 振荡器可以产生新的光滑的节律输出。

### 2.2 多个振荡器组成的 CPG 网络

本文根据蛇形机器人串联的关节模块结构和生物蛇运动的特点<sup>[18]</sup>，利用 Hopf 振荡器为基本单元构建了如图 2 所示的双向链式 CPG 网络层。

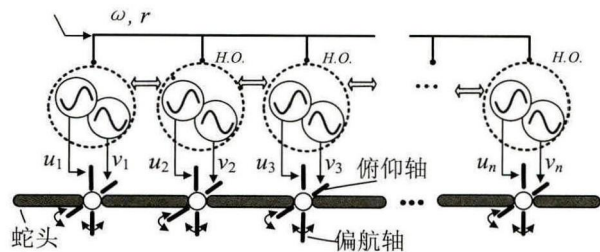


图 2 基于 Hopf 振荡器的 CPG 模型

图 2 所示 CPG 模型中的 Hopf 振荡器(H.O.)呈链状排列，每一个振荡器仅和相邻的振荡器连接，第  $i$  个 Hopf 振荡器单元的动态特性如下：

$$\dot{x}_i = f_H(x_i) - k \sum_j^n w_{i,j} \left( x_i - \frac{r_i}{r_j} x_j R(\varphi_{i,j}) \right) \quad (3)$$

$$\text{其中 } R(\varphi_{i,j}) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_{i,j}) & -\sin(\varphi_{i,j}) \\ \sin(\varphi_{i,j}) & \cos(\varphi_{i,j}) \end{pmatrix}, i, j = 1, 2, \dots, n$$

式(3)中， $n$  为 CPG 网络中振荡器的个数， $k$  是振荡器网络的耦合系数。 $w_{i,j}$  为振荡器  $j$  到振荡器  $i$  的连接权值， $r_i$  和  $r_j$  分别为第  $i$  个和第  $j$  个振荡器稳态时的极限环半径， $\varphi_{i,j}$  为第  $j$  个振荡器和第  $i$  个振荡器的相位差，改变  $\varphi_{i,j}$  可以得到不同相位关系的运动控制信号。

链式 CPG 网络中第  $i$  个振荡器的状态量  $u_i$  和  $v_i$  分别被选择作为机器人第  $i$  个关节的偏航关节相对转角信号和俯仰关节相对转角信号，即满足  $\theta_i = u_i$ ,  $\psi_i = v_i$ 。当上层操作者改变振荡器的参数，如幅值、频率和相位差等，可以控制 CPG 层中多维关节控制信号的生成和重新构形，实现在线调整蛇形机器人的速度或姿态以适应变化的复杂环境。

## 3 步态仿真与分析

### 3.1 水平面的蜿蜒运动

为验证提出的蛇形机器人 CPG 模型的有效性，在本小节利用多体系统动力学仿真软件 ADAMS 建立蛇形机器人虚拟样机，并实现水平面内蜿蜒运动的仿真。

首先将在三维绘图软件 Solidworks 中建立的蛇形机器人虚拟样机导入到 ADAMS 环境中，设置好所有零件的材料属性以及重力加速度的方向。然后添加构件之间的约束，定义每两个相邻连杆构件之间关节的运动副方式，分别为偏航自由度方向上的旋转副和俯仰自由度方向上的旋转副。如图 1(b)所示的机器人虚拟样机腹部的被动轮和地面的接触作用力采用库伦摩擦模型，设置静摩擦系数为 0.3，动摩擦系数为 0.1。

根据蛇形机器人实物样机关节模块的几何结构和选型电机的速度参数，关节摆动的最大角位移幅值为  $40^\circ$ ，最大角频率为 3 Hz。在仿真环境中选择的振荡器幅值  $r$  和频率  $\omega$  的参数范围参考以上



实际数值的范围, 而相位差  $\phi$  的选择和机器人样机的关节数量  $N$  有关。蛇形机器人实现蜿蜒运动时从头到尾的方向上相邻关节之间依次滞后固定的相位差, 在考虑关节能量消耗最小化的情况下, 相邻关节之间的相位差和关节数量存在关系  $\phi = 2\pi/N$ 。

针对本文中具有 9 个连杆 8 关节的蛇形机器人虚拟样机, 控制信号 CPG 生成层中和关节数量对应的振荡器组的幅值和频率统一取值, 依据表 1 中所示的 CPG 参数在 Matlab 2010(a) 环境中利用 Runge-Kutta 法求解出式(3)的振荡器输出, 输出的振荡器  $u_i$  状态量进行合适的幅值放大后如图 3 所示, 将 CPG 网络中多路振荡器的输出信号利用 ADAMS 的自定义函数作为蛇形机器人虚拟模型中关节偏航旋转副的角位移信号。

表 1 CPG 网络的主要参数

CPG 主要参数	取值
$n$	8
$\omega_i$	1
$r_i$	1
$\phi_{i,j}$	$\pi/4$
$\lambda_i$	0.5
$w_{i,j}$	0.5
$k$	0.8

图 3 中由 CPG 网络生成的 8 路振荡器输出经过约 4 s 的过渡阶段后, 产生相同相位差的稳定节律信号, 波形的周期为 6.24 s, 频率为 1 Hz, 相邻关节的相位差约为  $\pi/4$ 。

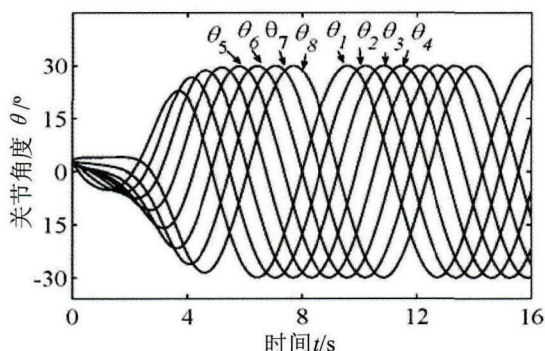


图 3 实现蜿蜒运动的 CPG 关节控制信号

将图 3 所示的振荡器信号输入到机器人模型

中, 作为水平面 8 个关节单元偏航转角控制律, 机器人成功实现了蜿蜒运动, 运动截图如图 4 所示,  $xz$  轴所在平面为仿真环境中地面所在的平面,  $z$  轴负方向为蜿蜒运动期望的前进方向, 运动时蛇形机器人每一个关节偏航自由度的最大摆动角为  $30^\circ$ , 移动时整个身体构成 1 个 S 波的姿态保持不变, 整个身体形成波形的幅值约为 0.36 m, 机器人沿着身体对称轴线的方向前进, 蛇体的每一个点从头到尾的方向依次经过相似的地面位移轨迹。

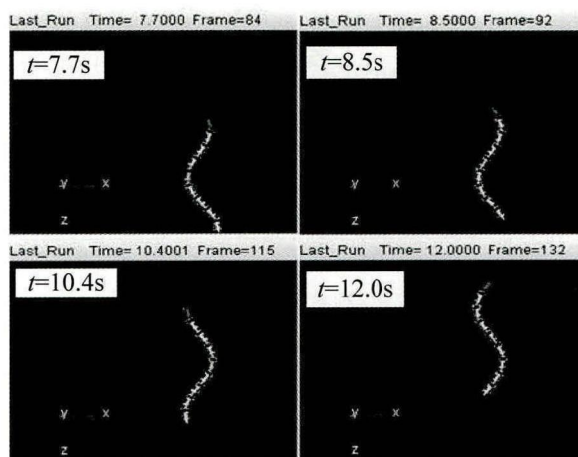


图 4 模型样机实现的蜿蜒步态的运动截图

以蛇形机器人第 1 关节的质心为观察点, 分析蛇形机器人在水平面上沿着期望前进方向的速度变化。蜿蜒运动时间设置为 60 s。当 CPG 模型中的振荡器的频率分别为  $\omega = 1, 2, 3$  时, 蛇形机器人蜿蜒运动的前进速度平均值分别约为 0.17 m/s、0.35 m/s 和 0.52 m/s, 振荡器的频率和前进速度呈现接近直线关系, 即通过改变振荡器模型中的频率参数可以直接控制蛇形机器人的前进速度。

当改变地面与机器人腹部的被动轮之间的摩擦系数  $\mu_t$  时, 振荡器的频率  $\omega$  依然和前进速度呈现接近直线的关系如图 5, 当摩擦系数  $\mu_t$  越大, 则蜿蜒运动的前进速度与频率的关系直线的斜率越小, 即当沿着蛇身切线方向的摩擦越大时, 相同的频率参数变化量引起的前进速度的变化量变小。

需要注意的是, 改变振荡器网络中的频率参数只影响前进速度, 不改变运动中蛇形机器人的身体

构形,即整个身体形成  $S$  波的个数和身体波形的幅值。调整振荡器的幅值参数  $r_i$  可以控制身体波形的幅值,振荡器的幅值越大,蜿蜒运动时蛇形机器人形成的运动波的摆动幅度越大。而相邻关节间的摆动转角变化的相位差  $\varphi_{i,i-1}$  控制形成  $S$  波的个数。

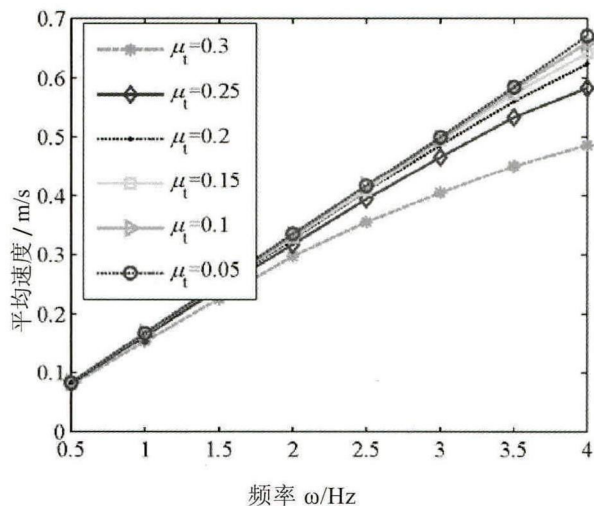


图 5 不同摩擦系数下频率与蜿蜒运动前进速度的关系

### 3.2 三维空间内的侧移运动

侧移运动,即侧向蜿蜒运动,是生物蛇最为奇特的 1 种运动方式,常见于柔软的沙地环境。运动时蛇体俯仰自由度的摆动产生向下压的反作用使蛇体“拾离”地面,配合偏航自由度的规律摆动,产生和身体主轴呈一定角度方向上的行进。与在单个水平面内规律摆动的蜿蜒运动不同,侧向蜿蜒运动可以看成是相互正交的 2 个平面内的运动波形的组合。

针对本文的振荡器模型,实现侧向蜿蜒运动时水平面上第  $i$  个关节的偏航转角为  $\theta_i = u_i$ ,垂直面上第  $i$  个关节的俯仰转角为  $\psi_i = v_i$ 。利用表 1 中的 CPG 网络参数生成的振荡器的输出为机器人提供关节参考信号。部分关节角位移信号如图 6 所示,从上到下分别为关节 1(头部关节)到关节 8(尾部关节)奇数关节处的偏航转角和俯仰转角。

将如图 6 所示的 CPG 网络的输出信号输入到机器人模型中作为关节俯仰自由度和偏航自由度的关节摆动角位移函数,机器人可以顺利实现侧向

蜿蜒步态,运动截图见图 7,  $xz$  轴所在平面为仿真环境中地面所在的平面,  $x$  轴正方向为期望的侧移运动的移动方向。

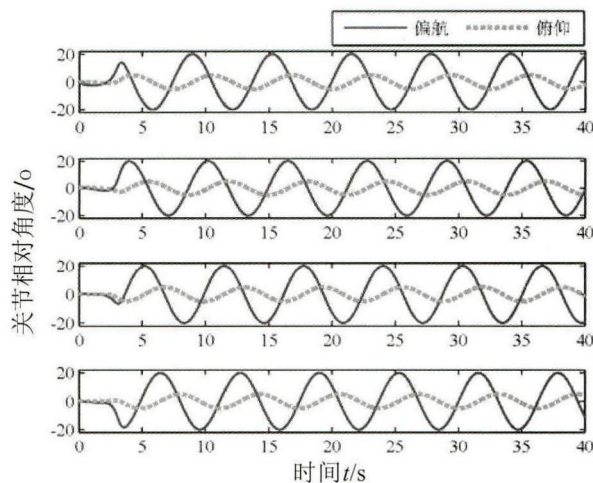


图 6 实现侧向蜿蜒运动时间的 CPG 关节控制信号

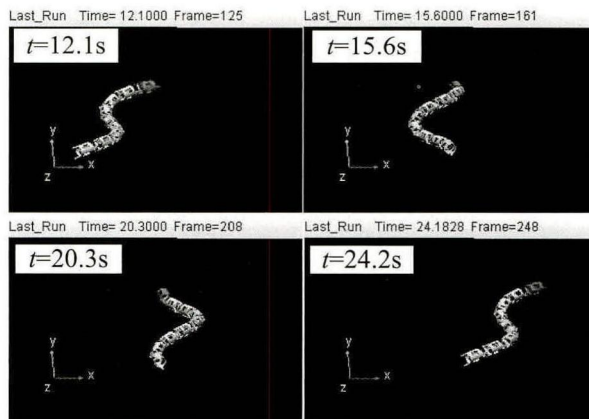


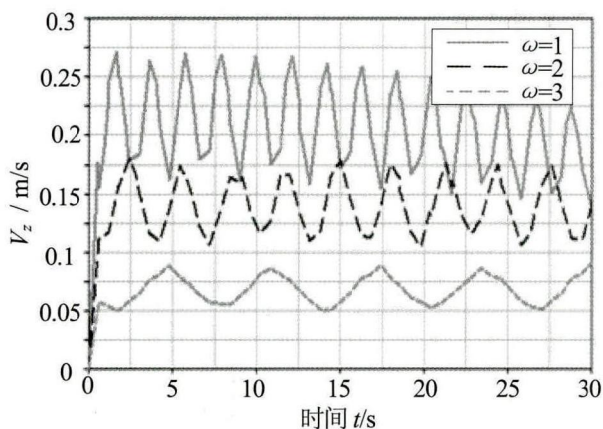
图 7 侧向蜿蜒运动水平面上的摆动波形

经过多组数据仿真发现,侧向蜿蜒运动的速度受到幅值和频率的共同影响。水平关节摆动转角的幅值越大,单位时间内侧向移动的位移越远。受到实际应用中电机力矩的限制,垂直关节的转角变化在较小的范围内,不考虑它的变化对前进速度的影响。

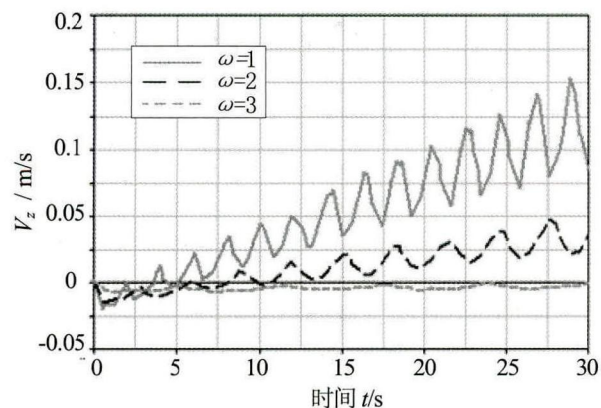
振荡器的频率分别与沿着身体轴线和垂直于身体轴线两个方向上的前进速度的关系曲线如图 8 所示。当振荡器频率分别取值  $\omega=1, 2, 3$  时,沿着身体轴线垂直的方向的侧移速度  $V_x$  越来越大,沿着身体轴线方向的速度  $V_z$  有同样的规律。当  $\omega=1$  时,  $V_z$  最小,基本保持为零速度,即蛇形机器人一

直沿着垂直于身体轴线的方向移动, 运动中机器人身体轴线和地面坐标系的  $z$  轴平行。

侧向蜿蜒运动的方向由水平面和垂直面上两种波形传播速度的比值来控制。当垂直面内波形的传播速度等于水平面内的波形传播速度时, 其侧向运动的方向基本沿着垂直于身体轴线的方向移动, 当垂直面内波形的传播速度大于水平面内的传播速度时, 其侧向运动的方向是倾斜的。当频率越大时, 蛇形机器人沿着身体轴线方向的速度越大, 移动方向与  $x$  轴夹角越大。



(a) 和身体轴线垂直的方向



(b) 沿着身体轴线所在的方向

图 8 不同频率值时蛇形机器人侧向蜿蜒步态的速度

### 3.3 步态的切换

针对本文提出的单关节两自由度的蛇形机器人, 当实现蜿蜒运动时所有关节的俯仰关节处于零位置, 仅需要控制偏航自由度的摆动; 侧移运动时

则必须同时协调俯仰自由度和偏航自由度的转动。为了实现以上两种步态的切换, 引入系数  $k_{\text{switch}}$  控制俯仰关节转角  $\psi_r = k_{\text{switch}} \psi_i$  的有效工作区间,

$$k_{\text{switch}} = \begin{cases} 1, & t_1(u_{\max}) < t < t_2(u_{\max}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

根据 Hopf 振荡器的极限环特性, 状态变量  $v$  总是滞后于状态变量  $u$  相位差  $\pi/2$ , 当  $u$  处于极值点时, 状态  $v$  正好处于零位置。当机器人关节的偏航转角处于最大角位移位置时, 此时控制  $k_{\text{switch}} = 1$  使得振荡器的输出  $v$  有效, 为俯仰自由度提供控制输入信号, 机器人的俯仰关节开始从零位置规律的摆动, 实现从蜿蜒运动到侧向蜿蜒运动的过渡。同样的, 当从侧向蜿蜒运动切换到蜿蜒运动时, 需要在机器人关节到达最大偏航转角的时刻调整  $k_{\text{switch}} = 0$  屏蔽掉振荡器的  $v$  状态输出信号(如图 9)。

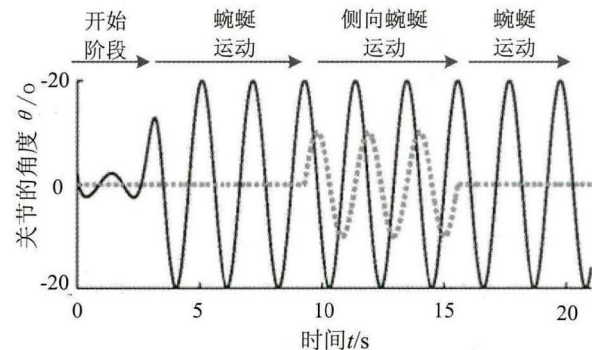


图 9 步态切换时关节转角的控制规律

如图 10 所示在 ADAMS 环境中地面上设置两个长方体障碍物。蛇形机器人为了通过狭窄的空间并且保持前进方向不变可以利用步态切换来实现。当  $t=10$  s 之前, 机器人采用蜿蜒前行, 朝向  $z$  轴负方向运动。当距离左侧的障碍物越来越近时, 机器人朝向右侧即  $x$  轴正方向侧移避开障碍。在  $t=10$  s 时刻进行了蜿蜒步态向侧向蜿蜒运动切换, 前进方向从原来的参考坐标系的  $z$  轴负方向, 改变为朝向垂直于身体轴线, 即  $x$  轴方向移动。在  $t=25$  s 时刻机器人恢复到蜿蜒运动, 朝着原来的前进方向  $z$  轴负方向前进。通过侧向蜿蜒步态蛇形机器人可以实现整个身姿的横向调整。



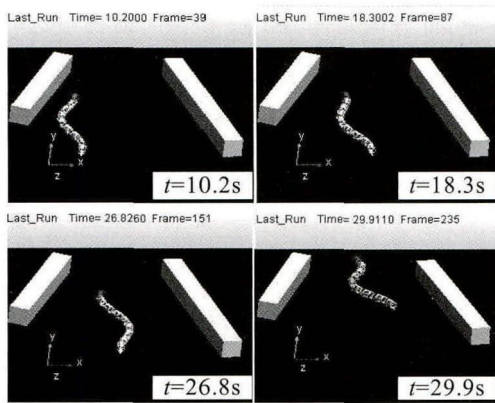


图 10 蜿蜒运动和侧向蜿蜒运动的步态切换

## 4 结论

本文基于 Hopf 振荡器的极限环特点构建了蛇形机器人的 CPG 步态模型, 利用稳态时 Hopf 振荡器的两个状态变量总是保持固定的  $\pi/2$  的相位差的特点, 第 1 次提出利用 Hopf 振荡器构建的 CPG 方法实现蛇形机器人的侧向蜿蜒运动, 进一步地利用 Hopf 振荡器的两个状态量的关系特点, 即状态  $u$  的输出处于极值点时, 另外 1 个状态变量  $v$  总是处于零点, 找到进行蜿蜒运动和侧向蜿蜒运动之间实现步态切换的关键时刻点, 该时刻也是执行单元电机进行方向切换的适宜时刻。利用动力学仿真软件 ADAMS 成功实现了蛇形机器人样机在水平面的蜿蜒运动、三维空间内的侧向蜿蜒运动, 并进行以上两种步态的切换仿真。仿真结果表明, 基于 Hopf 振荡器构建的 CPG 运动控制方法在蛇形机器人步态控制上的可行性和灵活性, 为其他类型的多自由度机器人提供 1 种步态控制方法的新思路。

## 参考文献:

- [1] Ijspeert A J. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review [J]. *Neural Networks* (S1045-9227), 2008, 21(4): 642-653.
- [2] Oliveira M, Matos V, Santos CP, *et al.* Multi-objective Parameter CPG Optimization for Gait Generation of a Biped Robot [C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, 2013. USA: IEEE, 2013: 3130-3135.
- [3] Huang Y, Vanderborght B, Van Ham R, *et al.* Torque-stiffness-controlled dynamic walking with central pattern generators [J]. *Biological cybernetics* (S0340-1200), 2014, 108(6): 803-823.
- [4] Hasanzadeh S, Akbarzadeh A. Development of a new spinning gait for a planar snake robot using central pattern generators [J]. *Intelligent Service Robotics* (S1861-2776), 2013, 6(2): 109-120.
- [5] Petric T, Gams A, Debevec T, *et al.* Control approaches for robotic knee exoskeleton and their effects on human motion [J]. *Advanced Robotics* (S0169-1864), 2013, 27(13): 993-1002.
- [6] Nor NM, Ma S. Smooth transition for CPG-based body shape control of a snake-like robot [J]. *Bioinspiration & Biomimetics* (S1748-3182), 2014, 9(1): 016003.
- [7] Kimura H, Akiyama S, Sakurama K. Realization of Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator [J]. *Autonomous Robots* (S0929-5593), 1999, 7(3): 247-258.
- [8] 曾翔宇, 鄂明成, 李冬冬, 等. 沟壑类非连续地形下的四足机器人运动控制 [J]. *机器人*, 2012, 33(6): 700-705.
- [9] Chung S J, Dorothy M. Neurobiologically inspired control of engineered flapping flight [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* (S0731-5090), 2010, 33(2): 440-453.
- [10] Wang L, Wang S, Cao Z, *et al.* Motion control of a robot fish based on CPG [C]// *IEEE International Conference on Industrial Technology*. Hong Kong, China, 2005. USA: IEEE, 2005: 1263-1268.
- [11] 吴正兴, 喻俊志, 苏宗帅, 等. 仿生机器人 S 形起动的控制与实现 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(11): 1914-1922.
- [12] 卢振利, 马书根, 李斌, 等. 蛇形机器人步态转换 CPG 控制器 [J]. *中国科学: E 辑*, 2007, 37(10): 1304-1315.
- [13] 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.
- [14] Seo K, Slotine J J E. Models for global synchronization in CPG-based locomotion [C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 2007. USA: IEEE, 2007: 281-286.
- [15] Matsuoka K. Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation [J]. *Biological cybernetics* (S0340-1200), 1985, 52(6): 367-376.
- [16] 陈斌, 裴忠才, 陈辰, 等. 液压四足机器人的仿生运动控制研究 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(8): 1746-1750.
- [17] Matsuoka K. Analysis of a neural oscillator [J]. *Biological Cybernetics* (S0340-1200), 2011, 104(4): 297-304.
- [18] Gao Q, Wang Z, Shang H, *et al.* Mechanism design and locomotion of a snake robot [C]// *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2013: 731-738.