

一种蛇形机器人蜿蜒运动的实现及环境适应性研究

高 琴¹, 王哲龙^{*1}, 胡卫建², 赵兰迎²

(1. 大连理工大学 控制科学与工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049)

摘要: 生物蛇数量众多的脊椎骨以及无足的身体结构,使其形成了特殊的蜿蜒式前进步态,能够广泛适应于草地、沙漠和湖泊等起伏地形,这种节律性的运动方式被证明是由中枢模式发生器(CPG)控制的.利用 Hopf 振荡器的稳态特性建立了能够实现蛇形机器人蜿蜒步态的 CPG 步态控制网络,依据蛇形机器人的模型仿真器得到了控制蜿蜒运动的 CPG 网络参数,并利用该网络的输出蛇形机器人成功实现了前进.根据 Hopf 振荡器对控制参数突然变化的良好适应性,通过在线调整得到了新的输出.讨论了面对复杂环境时蛇形机器人转弯运动的实现以及改变蛇形机器人身体 S 波构形来提高其环境适应性的方法.在蛇形机器人样机上的实验证明了基于 CPG 的运动控制方法在蛇形机器人蜿蜒运动上的有效性.

关键词: 蛇形机器人; Hopf 振荡器; 蜿蜒运动; 转弯运动; 相位

中图分类号: TP242

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201502013

0 引言

蜿蜒运动作为生物蛇最典型的一种步态,运动时由于重心低、稳定性好,具有很强的地形适应能力,是蛇形机器人步态控制的核心问题^[1-2].

常见的蜿蜒运动控制方法分为 3 种:基于蛇形曲线、基于模型和基于中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)^[3-5].基于蛇形曲线的控制方法利用 serpentine 曲线或 serpenoid 曲线生成机器人转动关节的角位移参考信号,具有实现简单、易于控制的优点,缺点是调整参数时容易引起关节角速度、力矩的跳变从而破坏电机^[2,6].基于模型的控制方法根据运动学或动力学建模完成机器人复杂精确的步态控制,但是建模过程困难,控制器计算量大,对未知环境适应性较差^[7-9].而近期被广泛应用在仿生机器人上的基于 CPG 的控制方法是一种新的仿生控制策略^[10-11],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

信号的生成以及在线调整,能够提高蛇形机器人的环境适应性.

本文利用 Hopf 振荡器建立 CPG 的神经元模型^[12],构建蛇形机器人的蜿蜒步态控制网络,讨论基于 CPG 方法实现的蜿蜒运动.通过在多体系统动力学仿真软件 ADAMS 中建立蛇形机器人物理模型并进行步态仿真,得到可用于蛇形机器人蜿蜒步态控制的 CPG 网络参数,并讨论不同障碍物情况时蛇形机器人对环境的适应性.最后,在蛇形机器人样机上进行蜿蜒运动的实验.

1 蜿蜒步态的模型

1.1 蛇形机器人样机

本文的蛇形机器人具有两自由度的关节结构,能够进行三维空间内的旋转,实现俯仰平面和偏航平面的复合运动.整个蛇形机器人样机如图 1 所示,由 11 个相同的连杆单元串联而成,连杆单元可以进行添加或者拆除的操作.

收稿日期: 2014-05-19; 修回日期: 2014-08-21.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAK03B01); 辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划资助项目(LJQ2012005).

作者简介: 高 琴(1985-),女,博士生, E-mail: onlygaoqin@gmail.com; 王哲龙*(1973-),男,教授,博士生导师, E-mail: wangzl@dlut.edu.cn.



图 1 蛇形机器人样机

Fig. 1 The prototype of snake robot

与原来的样机相比^[13], 本文的蛇形机器人在腹部安装了被动方式工作的小脚轮, 以模仿生物蛇的腹部鳞片. 运动时连杆单元与地面接触时纵横摩擦因数的不同有助于蛇形机器人蜿蜒运动的实现^[14].

蛇形机器人的控制采用集中式的方法, 操作者通过上位机电脑发送控制命令给下位机主控制单元, 通过 RS232 接口将接收到的命令发送给带有地址标识的分布式工作的电机控制器, 由电机控制器驱动对应关节实现偏航摆动或者俯仰摆动.

1.2 CPG 模型

根据蛇形机器人蜿蜒运动的特点, 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 层.

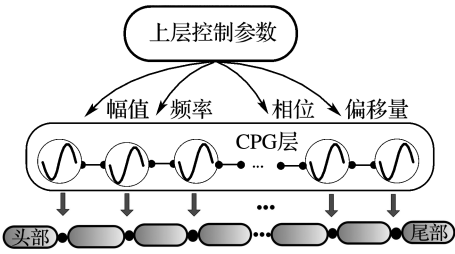


图 2 链式 CPG 网络的步态控制方法

Fig. 2 A gait control method based on chain CPG network

CPG 层中的 n 个 Hopf 振荡器呈链状排列, 每一个振荡器和相邻的振荡器连接, 第 i 个振荡器单元的动态特性如下:

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{f}(\mathbf{x}_i) - g \sum_j \omega_{i,j} \left(\mathbf{x}_i - \frac{r_i}{r_j} \mathbf{x}_j \mathbf{R}(\varphi_{i,j}) \right) \quad (1)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_i) = \begin{pmatrix} \omega_i u_i - \lambda(u_i^2 + v_i^2 - r_i^2)v_i \\ -\omega_i v_i + \lambda(u_i^2 + v_i^2 - r_i^2)u_i \end{pmatrix};$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式(1)中, $\mathbf{x}_i = (u_i \ v_i)^T$, n 为 CPG 网络中振荡器的个数, $\omega_{i,j}$ 为第 j 个振荡器到第 i 个振荡器的连接权值, r_i 和 r_j 分别为第 i 个振荡器和第 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 个振荡器之间的相位差. 式(2)中, ω_i 为振荡器的频率, λ 为振荡器的收敛系数.

CPG 层的节律输出可以为蛇形机器人提供关节运动信号. 振荡器的状态量 u 或 v 均可以被选择为蛇形机器人关节的输入信号, 本文选取第 1 个状态量, 即 $\theta_i = u_i$, 实现第 i 个 CPG 的输出控制蛇形机器人的第 i 个关节的偏航转角. 当上层操作者改变振荡器控制参数, 如幅值 r_i 、频率 ω_i 和相位差 $\varphi_{i,j}$ 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.

1.3 蜿蜒步态的生成

为验证提出的蛇形机器人 CPG 网络模型的有效性, 在多体系统动力学仿真软件 ADAMS 中建立蛇形机器人的虚拟样机并进行动力学仿真. 当 CPG 网络中的振荡器选择为 $n = 8$, $r_i = \pi/6$, $\omega_i = 1$, $\omega_{i,j} = 0.5$, $\lambda_i = 1$, 生成的 CPG 输出信号如图 3 所示. 经过初始阶段后, 产生一系列频率和幅值相同、相邻之间相位差相同的稳定节律信号.

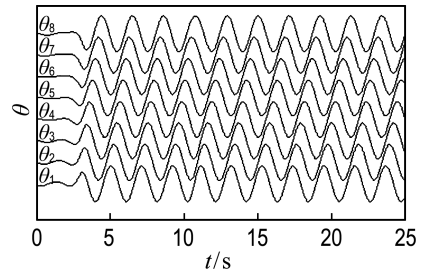


图 3 蜿蜒运动时 CPG 关节控制信号

Fig. 3 CPG joint control signal in serpentine locomotion

将 CPG 网络的生成信号通过接口输入到 ADAMS 动力学仿真模型中, 蛇形机器人模型成功实现了蜿蜒运动, 运动截图如图 4 所示. 蜿蜒步态运行时间设置为 20 s, 采样周期为 0.05 s. 整个蛇形机器人的身体构成一个 S 波的姿态实现前进. 当 $\omega = 1$ 时, 蛇形机器人蜿蜒运动的前进速度

约为 0.173 m/s; 当 $\omega=2$ 时, 蛇形机器人蜿蜒运动的前进速度约为 0.351 m/s. 通过多次仿真发现, 当改变振荡器的频率参数其他参数保持不变时, 蛇形机器人整体质心处的平均速度和振荡器的频率呈线性增长的关系, 即改变上位程序中振荡器的频率参数可以控制蛇形机器人整体的前进速度.

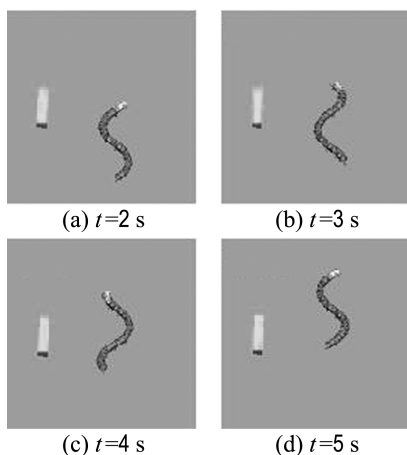


图4 模型样机蜿蜒步态的运动截图

Fig. 4 Screenshots of serpentine gait motion for the model prototype

2 蜿蜒步态的环境适应性仿真

2.1 转弯

蛇形机器人在运动中遇到障碍物时, 可以通过改变身体的构形以躲避障碍物. 假设蛇形机器人行进在如图 5 所示的路面上, 以蛇形机器人先右转弯后左转弯以恢复原来前进方向的路径选择为例, 讨论如何在线改变步态信号实现蛇形机器人的转弯运动.

首先, 对式(1)进行改写:

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{f}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0) - g \sum_j^n \omega_{i,j} \left(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0 - \frac{r_i}{r_j} \mathbf{x}_j \mathbf{R}(\varphi_{i,j}) \right) \quad (3)$$

其中 $\mathbf{x}_0$ 为 Hopf 网络的振荡输出的对称中心. 当 $\mathbf{x}_0 \neq \mathbf{0}$ 时, 振荡器的输出信号发生偏移. $\mathbf{x}_0$ 的符号决定了偏移的方向, $\mathbf{x}_0$ 的大小决定了 CPG 输出信号偏离原来对称零位置的程度. 如图 5 所示, 当 $\mathbf{x}_0(t)$ 动态变化时, CPG 网络输出的关节控制信

号发生连续光滑的偏移变化.

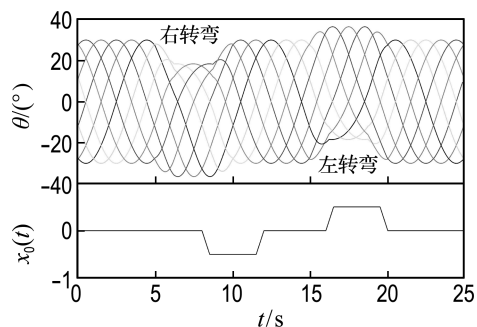


图5 转弯运动时的 CPG 关节控制信号

Fig. 5 CPG joint control signal in turning motion

将图 5 中的 CPG 步态信号输入到蛇形机器人的电机模型中, 蛇形机器人在蜿蜒运动过程中行走一定距离后身体对称轴线发生偏转, 先右转弯, 在新的方向下蜿蜒前进, 然后左转弯后再次恢复蜿蜒步态, 顺利完成避障任务. 蛇形机器人通过两次的方向调整恢复到最初的前进方向, 转弯时的运动截图如图 6 所示.

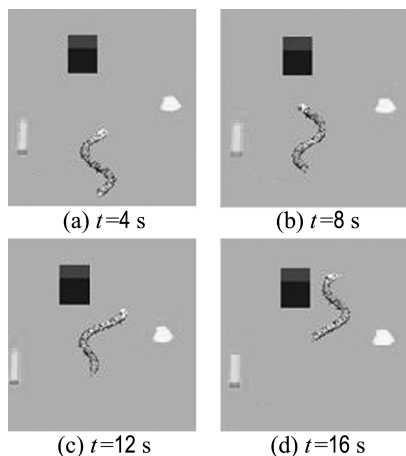


图6 躲避障碍物的转弯运动截图

Fig. 6 Screenshots of turning motion to avoid obstacles

当上层操作者改变振荡对称中心的参数时, CPG 网络的输出信号发生适应性改变, 连续变化的电机转角控制输入量使得蛇形机器人的身体曲线发生自然的切换实现整个身体的方位调整. 从多次仿真观察出, 蛇形机器人转弯的角度与 $\mathbf{x}_0$ 的大小以及偏离对称中心的时间有关, $\mathbf{x}_0$ 越大, 偏离零位置时间越长, 蛇形机器人实现的转弯越大.

另外, x_0 的非零值时间即是蛇形机器人进行转弯运动的时段. 除了对称中心参数, 频率的大小也会影响转弯角度的幅值. 其他参数不变, 高频下进行转弯运动比低频下转过的角度更大, 转弯的趋势(逆时针转动或顺时针转动)并不改变.

2.2 改变 S 波构形

当生成蜿蜒步态的 CPG 网络采用双向链式结构时, 式(1)中的相位差参数满足

$$\varphi_{i,j} = \begin{cases} \varphi; & j = i + 1 \text{ 或者 } j = i - 1 \\ 0; & \text{其他} \end{cases}$$

通过改变 $\varphi_{i,j}$ 可以得到不同相位关系的 CPG 输出信号, 如图 7 所示, 从下到上分别为第 1 个振荡器到第 8 个振荡器中心的 CPG 输出 O_{CPG} . 当控制 $\varphi_{i,j}$ 从 $\pi/4$ 改变为 $\pi/3$ 时, 相邻的振荡器输出信号在光滑变化中形成新的相位关系. CPG 网络中振荡器的其他参数设置为 $r_i = \pi/6, \omega_i = 1, \tau_{i,j} = 0.5, \lambda_i = 1$.

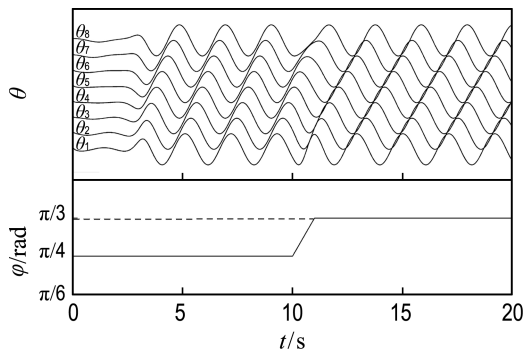


图 7 不同相位关系的 CPG 关节控制信号

Fig. 7 CPG joint control signal in different phase relations

当蛇形机器人前进在如图 8 所示的环境, 从开阔的空间陷入越来越狭小的区域时, 若保持原来的身体摆幅必然会碰撞到两侧的障碍物而不能通过. 对于单自由度关节的蛇形机器人, 此时可以考虑减小蛇形机器人身体侧向的摆动幅度. 若改变蛇形机器人关节间的相位差, 则可改变蛇形机器人形成 S 波的个数, 影响蛇形机器人身体的侧向摆动幅值. 按照这样的思路, 将图 7 中的 CPG 步态信号输入到蛇形机器人物理模型中进行仿真, 蛇形机器人的构形由一个 S 波构形改变为 1.5 个 S 波, 侧向身体的摆动幅值变小, 能够顺利通过

狭窄的空间, 运动截图如图 8 所示. 针对关节数不变的蛇形机器人来说, 相邻关节的相位差越大, 整个身体形成 S 波的个数越多, 最大侧向幅值越小. 另外, 通过改变振荡器生成信号的幅值同样可以控制蛇形机器人整个身体波形的幅值.

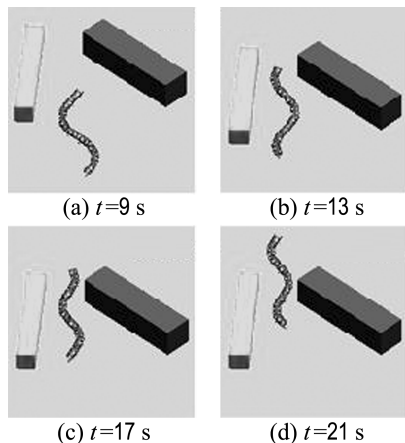


图 8 改变蛇形机器人 S 波的个数以通过狭缝的运动截图

Fig. 8 Screenshots of locomotion through the slit by changing the number of S-curve of snake robot

3 实 验

蛇形机器人的实验测试具有 3 种模式, 即测试模式、软启动模式和编程输出模式. 测试模式是指单独控制蛇形机器人的某一个关节; 软启动模式是指设定蛇形机器人运动之前的初始形状; 编程输出模式是指通过 RS232 串口通信将上位机的命令发送到下位机主控单位, 控制相对应的电机驱动板开始工作, 执行电机转动任务来实现对应偏航关节的摆动. 在实验室环境中采用编程输出模式实现蛇形机器人的蜿蜒运动, 实验截图如图 9 所示.

上位机负责规划和计算生成蜿蜒运动的步态信号, 将所有关节的角度控制信号通过 RS232 串口发送给下位机, 下位机根据接收到的电机命令控制对应的关节, 实现有规律的偏航摆动. 实验中, 上位机程序中振荡器模型的主要参数选择为 $r_i = \pi/9, \omega_i = 1, \tau_{i,j} = 0.5, \lambda_i = 0.75$. 当改变 CPG 模型中振荡器的幅值时, 可以影响蛇形机器

人身侧向的摆动幅值,通过改变 Hopf 振荡器的频率调整关节的摆动周期,控制蛇形机器人的前进速度.图9中蛇形机器人形成1.25个S波,相邻关节之间的相位差为 $\pi/4$.实验中发现,蛇形机器人的前进速度小于ADAMS仿真环境中实现的蜿蜒运动的前进速度,这是因为在仿真环境中建立的虚拟样机只建立了蛇形机器人圆柱形连杆单元的简化模型,和实物样机相比省略了电机、齿轮组以及线束的重要因素,质量参数远小于实物样机,但是振荡器网络中的参数对蛇形机器人的影响规律是一致的.

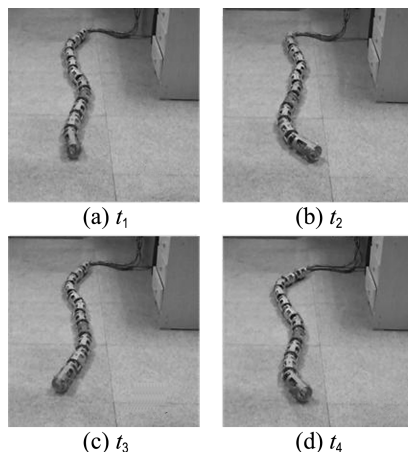


图9 蜿蜒运动的实验截图

Fig. 9 Experimental screenshots of serpentine locomotion

4 结 语

基于中枢模式发生器的仿生策略和步态调整方法是一种模拟生物低级神经中枢的自激行为生成节律性运动信号的控制方法,具有稳定、易调节、适应性强的特点,是高自由度关节机器人运动控制的新思路.蛇形机器人具有多关节高冗余度的特殊结构,如何设计一个能够适应非结构化环境的蛇形机器人一直是该领域的热点和难题.相比传统的基于模型的控制方法,基于CPG的控制方法不必建立蛇形机器人与环境的精确模型,通过在线调整控制参数,提高了蛇形机器人的灵活性以及对变化环境的适应性.

本文基于Hopf振荡器构建的CPG步态控制器可以实现蛇形机器人的蜿蜒运动,通过上位

机操作者改变CPG网络层的频率控制蛇形机器人的前进速度,改变振荡中心数值实现蛇形机器人的转弯以调整其方位,便于利用头部的视觉传感器观察周围的环境或者躲避障碍物.振荡器的特别相位锁定特点,可以产生不同的稳定、自然的相位关系的关节信号,改变了蛇形机器人相邻关节之间的摆动时间差,使蛇形机器人实现多种S波构形的姿态以适应变化的狭窄环境.接下来的工作将考虑在蛇形机器人的前端安装检测周围障碍物方位的传感器,并将传感器的反馈信息加入到CPG网络层中,实现蛇形机器人真正自主地适应变化的地形.

参考文献:

- [1] Dowling K J. Limbless locomotion: learning to crawl with a snake robot [D]. Pittsburgh: The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1997.
- [2] Saito M, Fukaya M, Iwasaki T. Modeling, analysis, and synthesis of serpentine locomotion with a multilink robotic snake [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 22(1):64-81.
- [3] 李 斌,马书根,王越超,等.一种具有三维运动能力的蛇形机器人的研究[J]. *机器人*, 2004, 26(6):506-509.
LI Bin, MA Shu-gen, WANG Yue-chao, *et al.* Development of a snake-like robot with 3D mobility [J]. *Robot*, 2004, 26(6):506-509. (in Chinese)
- [4] Transeth A A, Pettersen K Y, Liljebäck P. A survey on snake robot modeling and locomotion [J]. *Robotica*, 2009, 27(7):999-1015.
- [5] Ijspeert A J. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review [J]. *Preprint of Neural Networks*, 2008, 21(4):642-653.
- [6] MA Shu-gen, Araya H, LI Li. Development of a creeping snake-robot [C] // *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*. Piscataway:IEEE, 2001:77-82.
- [7] Kolmanovsky I, McClamroch N H. Developments in nonholonomic control problems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1995, 15(6):20-36.

- [8] Matsuno F, Mogi K. Redundancy controllable system and control of snake robots based on kinematic model [C] // **Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control**. Piscataway:IEEE, 2000:4791-4796.
- [9] MA Shu-gen, Ohmameuda Y, Inoue K. Dynamic analysis of 3-dimensional snake robots [C] // **2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. Piscataway:IEEE, 2004:767-772.
- [10] Ekeberg Ö. A combined neuronal and mechanical model of fish swimming [J]. **Biological Cybernetics**, 1993, **69**(5-6):363-374.
- [11] Grillner S. Biological pattern generation:the cellular and computational logic of networks in motion [J]. **Neuron**, 2006, **52**(5):751-766.
- [12] Chung S J, Dorothy M. Neurobiologically inspired control of engineered flapping flight [J]. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, 2010, **33**(2):440-453.
- [13] 张玲玲. 蛇形机器人的机构设计和运动研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009.
- ZHANG Ling-ling. Mechanism design and locomotion research of snake-like robot [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [14] GAO Qin, WANG Zhe-long, SHANG Hong, *et al.* Mechanism design and locomotion of a snake robot [C] // **Intelligent Autonomous Systems 12**. Berlin:Springer Berlin Heidelberg, 2013:731-738.

Research on realization and environmental adaptability of serpentine locomotion for a snake robot

GAO Qin¹, WANG Zhe-long^{*1}, HU Wei-jian², ZHAO Lan-ying²

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

Abstract: With a limbless body consisting of a large number of vertebrations, biological snakes form a specially rhythmic movement called serpentine locomotion, which makes themselves survive widely in rugged terrains, such as grasslands, deserts and lakes. It has been proved that the rhythmic movement pattern is controlled by a central pattern generator (CPG). Hopf oscillators featured by stable limit cycle are used to construct a CPG-based control network for achieving serpentine gait for a snake robot. By a simulator of a snake robot, preliminary parameters of the CPG network for its serpentine locomotion are obtained, and the snake robot achieves moving forward using these outputs. New output of the proposed CPG network is generated by on-line modifying parameters of the Hopf oscillators owing to its good adaptability to abrupt change of control parameters. The methods of a snake robot adapting to an unstructured environment by turning motion or changing its number of S-curve are discussed. Experiments on a snake robot prototype demonstrate the effectiveness of CPG-based control method in serpentine locomotion.

Key words: snake robot; Hopf oscillator; serpentine locomotion; turning motion; phase