仿生爬壁蠕虫运动步态控制算法

李大寨 王 巍 王莹莹 齐婧浩

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 设计了一种基于仿生原理的爬壁蠕虫机器人,分析了这种机器人的结构,并利用仿生学原理设计了基于三角波和梯形波特点的两种运动步态. 在分析现有神经中枢控制 CPG(Central Pattern Generator)算法基础上,应用循环抑制 CPG模型和相互抑制 CPG模型,构建了爬壁蠕虫机器人的三角波步态 CPG控制网络和梯形波步态 CPG控制网络,并结合吸盘状态,加入反馈信号,实现了带有反馈的 CPG控制算法. 利用爬壁蠕虫机器人模型,仿真验证了这种控制算法对蠕动运动步态控制的有效性,通过在爬壁蠕虫机器人原理样机上的步态实验,证明了该算法的可行性.

关 键 词: 爬壁蠕虫机器人; 神经中枢控制; 蠕动步态

中图分类号: TP 242

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)02-0256-05

Locomotion gait control algorithm for climbing worm robot

Li Dazhai Wang Wei Wang Yingying Qi Jinghao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A wall-climbing worm-like robot based on the bionics principle was designed and the structure feature of the climbing worm robot was analyzed. According to the structure and locomotion feature of the climbing worm robot and the bionics principle, the trapezoidal wave gait and triangular wave gait were proposed. Then the cyclic inhibitory central pattern generator (CPG) model and mutual inhibitory CPG model were adopted to control the climbing worm robot and a locomotion gait simulation based on CPG model was given. Furthermore, by combining the CPG output with the feedback signal from the sucker, the climbing worm robot realized the trapezoidal wave gait and triangular wave gait. Moreover, it was presented that real robot can successfully exhibit meandering movement by using controller output of the proposed architecture.

Key words: wall-climbing worm-like robot; central pattern generator (CPG); worm-like gait

关节式仿生爬壁蠕虫的运动步态具有节律性. 神经中枢控制 CPG(Central Pattern Generator)是动物节律运动控制器,由中间神经元组成局部振荡网络. 日本的 Matsuoka[1]首先提出了神经元的数学模型,成功地模拟了 CPG的生物学特性. 许多研究者应用这个 CPG模型作为动物类机器人的运动控制器. 例如,日本的 Kimura[2]提出了相互抑制的 CPG模型,建立机器人的 CPG控制网络,作为基本的节律运动发生器,将 CPG的输出作为机器人的力矩或相位控制信号,在控制系统中引入关节角、角速度、姿态角等多种反馈信息,实现 CPG与反馈网络的交互. 日本的 Taga[3]应用相互抑制 CPG模型来控制两足机器人行走,通过 CPG控制系统将机器人正平面的上体侧摆和侧平面的双腿踏步耦合起来,实现三维双足步行. 清华大学的郑浩俊[4]利用相互抑制 CPG模型建立了四足机器人的全对称 CPG网络,实现不同的步态及各步态之间的转换. 并且通过增加反馈项,实现了机器人的越障功能和坡面运动功能,解决了 CPG控制器与外界环境的交互问题. 文献[5]应用相互抑制 CPG模型建立了蛇形机器人链状 CPG网络控制器,该网络中 CPG的数量比蛇

收稿日期: 2008-07-20

基金项目: 国家 863计划资助项目(2006AA04Z250)

作者简介: 李大寨(1967 -),男,湖南岳阳人,高级工程师, lidazhai@buaa.edu.cn.

形机器人关节数多 1个,CPG网络振荡集中收敛后,产生有固定相位差的稳定振荡,控制蛇形机器人实现蜿蜒运动.文献[6-9]在对蛇形机器人链状 CPG网络控制器的研究中,提出 3种新的 CPG单元的建模方法:①单向循环抑制 CPG单元模型[6-7];②双向循环抑制 CPG单元模型[8];③去掉适应项的单项循环抑制 CPG单元模型[9].文献[10]提出了正弦 CPG单元模型,这种 CPG模型具有参数意义明确、调节简单的特点,但是不具备仿生意义.以上这些 CPG单元模型的提出,以及 CPG网络控制器的应用,丰富了 CPG控制理论,为 CPG控制器的设计提供了新的思路.

本文针对爬壁蠕虫机器人的结构特点和运动特性,提出了一种带有反馈项的 CPG链状网络控制器,并通过仿真和实验验证了这种控制器在控制爬壁蠕虫机器人蠕动步态时的可行性.

1　爬壁蠕虫机器人样机

爬壁蠕虫机器人样机采用模块化设计,设计了关节模块和吸附模块.这样设计,使机器人具有拆装方便、可重构、功能可扩展等优点.关节模块如图 1、图 2所示,是机器人的驱动模块,具有一个旋转自由度,采用舵机作为驱动器,关节的旋转范围在 0～180°.吸附模块如图 3、图 4所示,这个模块的作用是提供机器人与壁面的吸附力.吸附力由吸附模块上的吸盘提供,依据功能可扩展的设计原则,吸附模块可以在上下 2个面上安装吸盘,如图 3所示.在实验样机中,根据实际需要,只安装一个吸盘,如图 4所示.吸盘采用被动吸附方式,要使吸附模块与壁面脱离,需要控制放气信号.放气过程由电磁铁铁心动作完成.

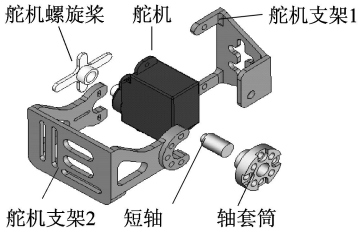


图 1　关节模块爆炸图

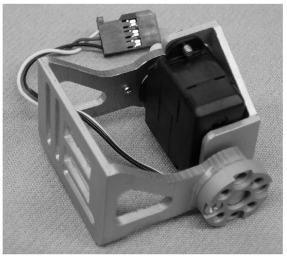


图 2　关节模块实物图

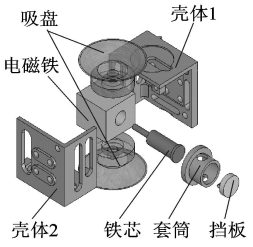


图 3　吸附模块爆炸图

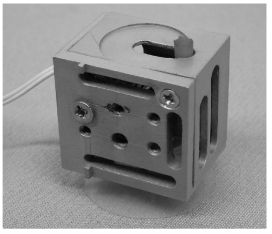


图 4　吸附模块实物图

本实验的样机如图 5所示.

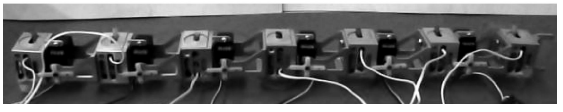


图 5　爬壁蠕虫机器人样机

2　爬壁蠕虫机器人步态分析

与蛇形机器人比较,爬壁蠕虫机器人的运动过程中与壁面之间的接触点为不可滑动的固定约束,否则就是吸附失效.为了完成爬壁蠕虫机器人运动波形的传递和吸盘相对壁面的运动,机器人采取蠕动步态.机器人在运动过程中的驱动力可认为是来源于固定铰链.根据机器人在运动过程中参与波形传递的构件的数量不同,本文提出了梯形波和三角波 2种步态形式,并对每种步态进行了时序分析和驱动力分析.

图 6中,A, B, C, D, E表示关节模块的转轴,可见,A左侧的吸盘和 E右侧的吸盘处在吸附状态,即它们与壁面之间是固定约束,该瞬时机器人机构可以看作是一个 5杆机构.其中关节 A和关节 E作为主动关节,定义这种波形为梯形波.

图 7表示梯形波步态的步态图,图中的 3个瞬时运行状态分别对应时刻 $i, i+1, i+2$

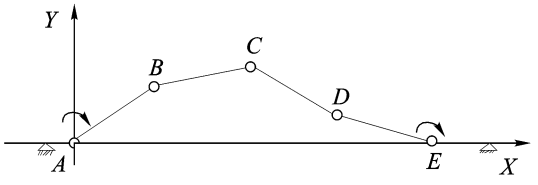
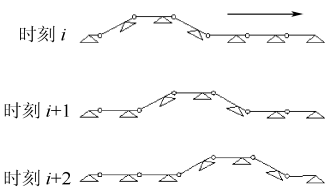


图 6　梯形波步态的一个瞬时状态



△—吸附模块的吸盘；○—关节模块的转轴；——关节模块和吸附模块；→—机器人的前进方向

图 7 梯形波步态图

图 8中，A, B, C, D 表示关节模块的转轴，由图中可以看出，A 左侧的吸盘和 D 右侧的吸盘处在吸附状态，即它们与壁面之间是固定约束，这时该瞬时机器人机构可以看作是一个 4杆机构. 其中 A 关节作为主动关节，定义这种波形为三角波.

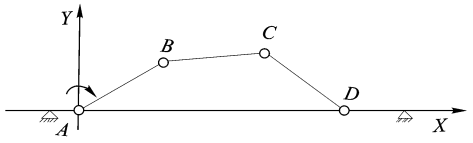


图 8 三角形波步态的一个瞬间状态

图 9表示三角波步态的步态图. 图中符号表示的意义与梯形波相同.

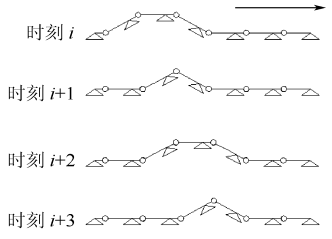


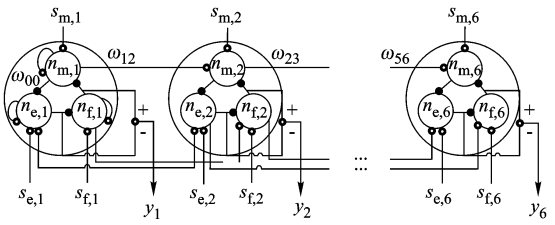
图 9 三角波步态图

3 构建爬壁蠕虫机器人 *CPG*控制器

本文中的爬壁蠕虫机器人在水平面上的蠕动前进，采用了单向循环抑制 CPG模型和相互抑制 CPG模型进行控制，为了适应机器人模型的爬壁特点，结合吸盘的状态，对 CPG模型进行了进一步的改进.

3.1 构建梯形波步态 CPG控制器

由单向循环抑制 CPG单元串联形成 CPG链状网络控制器，结构如图 10所示. 该 CPG模型的动力学表达式参考文献 [6 - 7]. 该 CPG控制器的机制是：CPG单元内部神经元循环抑制；第 1个神经元采用自身激励反馈，权重为 ω_{00}；CPG单元之间按照从头到尾的方向，相同的神经元对应单向激励连接，取常量权重 ω_0；非同层的不同神经元之间没有连接.



$n_{(e,f,m),i}$—第 i个 CPG的伸肌神经元、屈肌神经元和中间神经元的薄膜潜能；$y_{(e,f,m),i}$—第 i个 CPG的伸肌神经元、屈肌神经元和中间神经元的输出；$s_{(e,f,m),i}$—第 i个 CPG的伸肌神经元、屈肌神经元和中间神经元的激励；$\omega_{(e,f,m),i}$—第 i个 CPG的伸肌神经元、屈肌神经元和中间神经元的连接权重；b—自约束程度对内部状态影响的常数；T—薄膜潜能时间常数；η—调整时间常数；ω_{ij}—第 i个 CPG和第 j个 CPG之间的连接权重；y_i—第 i个 CPG的最终输出；$F_{(e,f,m),i}$—第 i个 CPG相应神经元的传感器反馈信号.

图 10 单向循环抑制链状 CPG网络控制器

$$\omega_{ij} = \begin{cases} \omega_{00} & i = j = 1 \\ \omega_0 & i = j - 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

通过 ω_{ij}，后面的 CPG将被其前面的神经元激活；CPG自身由于循环抑制的特性能够产生振荡；这样振荡将从头到尾以某个特定的相位差传播.

对 CPG网络进行了仿真，在不加入吸盘状态反馈信号时，即 $F_{(c,f,m),i}=0$时，通过调节 CPG参数，得到下面一组参数值：

激励输入 $s_{(e,f,m),i}=12.8$；薄膜潜能时间系数 $T=12$；调整时间系数 $\eta=18$；约束系数 $b=28$；神经元连接权重系数 $\omega_{(e,f,m),i}=3.1$；首单元自调节权重系数 $\omega_{00}=0$；CPG间连接权重系数 $\omega_0=-0.45$.

CPG网络的输出图形如图 11所示. 当 CPG网络的输出达到稳定以后，输出波的周期约为 14.6 s；相邻关节的相位差约为 98.1°. 根据仿真结果，在波形传递的一个周期中对 CPG网络的输出采样，得到各个关节的位置，如图 12所示. 该 CPG模型的动力学表达式参考文献 [6 - 7].

将吸盘状态作为反馈信号，调节各个关节的输出. 当吸盘从抬起状态变为吸附状态时，$F_{(e,f,m),i}=1$，这时第 i个关节的控制器按照下面的规律输出控制信号：

$$y_i = \begin{cases} -0.13t+0.5 & y_i>0 \quad F_i=1 \\ 0 & y_i=0 \quad F_i=1 \end{cases}$$

综合上述，爬壁蠕虫机器人在蠕动过程中的 CPG网络对各个关节的控制输出可以用公式 (1)

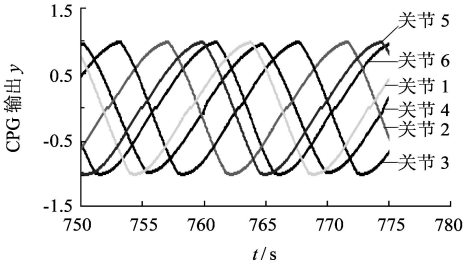


图 11　单向循环抑制 CPG网络仿真图

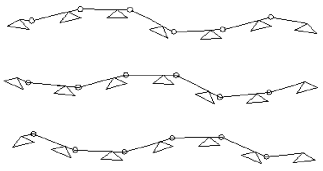


图 12　没有吸盘反馈信号 CPG输出步态图 (梯形波)

表示:

$$y_i = \delta \times y_{\mathrm{CPG}i} + \zeta \times y_{F_i} \qquad i = 1, \cdots, 6 \quad (1)$$

其中, $y_{\mathrm{GPG}i}$表示单项循环抑制 CPG链状网络控制器中的输出;

$$\delta = \begin{cases} 1 & F_i = 0 \\ 0 & F_i = 1 \end{cases}$$

y_{F_i}表示接到传感器信号后关节控制器的输出规律;

$$\zeta = \begin{cases} 0 & F_i = 0 \\ 1 & F_i = 1 \end{cases}$$

加入传感器反馈信号以后, CPG网络的输出控制机器人各个关节实现了梯形波步态.

3. 2　实现三角波步态的 CPG控制器

由相互抑制 CPG单元串联形成 CPG链状网络控制器,结构如图 13所示.

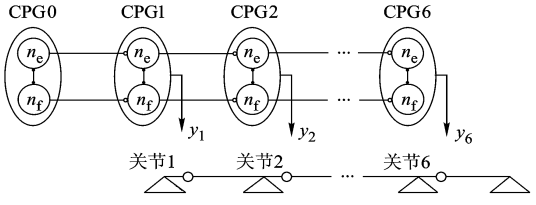


图 13　相互抑制链状 CPG网络控制器

该 CPG模型的动力学表达式和各个参数的含义参考文献 [5].

对 CPG网络进行了仿真,在不加入吸盘状态反馈时,即 $F_{(\mathrm{e,f}),i} = 0$时,通过调节 CPG参数,得到下面一组参数值:

激励输入 $S_{(\mathrm{e,f}),i} = 7.3$;薄膜潜能时间系数 $T = 2.1$;调整时间系数 $\eta = 12$;约束系数 $b = 15$;神经元连接权重系数 $\omega_{(\mathrm{e,f}),i} = 1.2$; CPG间连接权重系数 $\omega_0 = -0.2$.

CPG网络的输出图形如图 14所示. 当 CPG网络的输出达到稳定以后,输出波的周期约为 8.5 s;相邻关节的相位差约为 231.4°.

根据仿真结果,在波形传递的一个周期中对 CPG网络的输出采样,得到各个关节的位置,如图 15所示.

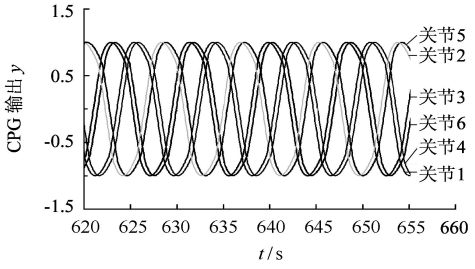


图 14　相互抑制 CPG网络仿真图

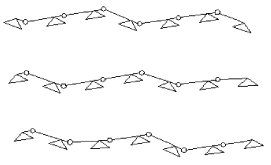


图 15　没有吸盘反馈信号 CPG输出步态图 (三角波)

将吸盘状态作为传感器反馈信号,当吸盘处于吸附状态时, $F_{(\mathrm{e,f,m}),i} = 1$,这时第 i个关节的控制器按照下面的规律输出控制信号:

$$y_i = \begin{cases} -0.11t + 0.6 & y_i > 0 \quad F_i = 1 \\ 0 & y_i = 0 \quad F_i = 1 \end{cases}$$

综合上述爬壁蠕虫机器人在蠕动过程中的 CPG网络对各个关节的控制输出可以用公式 (2)表示:

$$y_i = \delta \times y_{\mathrm{CPG}i} + \zeta \times y_{F_i} \qquad i = 1, \cdots, 6 \quad (2)$$

其中 $y_{\mathrm{CPG}i}$表示单项循环抑制 CPG链状网络控制器中的输出;

$$\delta = \begin{cases} 1 & F_i = 0 \\ 0 & F_i = 1 \end{cases}$$

y_{F_i}表示接收到传感器信号后关节控制器的输出规律.

$$\zeta = \begin{cases} 0 & F_i = 0 \\ 1 & F_i = 1 \end{cases}$$

加入传感器反馈信号以后, CPG网络的输出控制机器人各个关节实现了三角波步态.

由于爬壁蠕虫机器人机构采用被动吸附,吸盘与壁面吸附形成固定约束后,通过电磁铁控制气管放气实现吸盘与壁面的脱离,这个放气信号可以通过关节角度值的反馈信号来判断.

4 实 验

为了验证上述 CPG控制器的有效性,在爬壁蠕虫机器人样机上进行了实验.按照仿真得到的参数,得到实验结果如图 16和图 17所示,在爬壁蠕虫机器人样机上实现梯形波和三角波步态.



a 第 1步



b 第 2步



c 第 3步

图 16 梯形波步态实验



a 第 1步



b 第 2步



c 第 3步

图 17 三角波步态实验

5 结 束 语

本文将单向循环抑制 CPG模型和相互抑制 CPG模型应用到了爬壁蠕虫机器人上,具有创新性.针对爬壁蠕虫机器人的结构和运动控制特点,设计了符合该机器人运动的步态和 CPG控制器,引入吸盘状态反馈信号和舵机角度反馈信号,使机器人的运动具有一定的环境适应性.

参考文献 (References)

[1] Kiyotoshi M. Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generator[J]. Biological Cybernetics, 1987, 56: 345 - 353

[2] Fukuoka Y, Kimura H, Cohen A H. Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts[J]. International Journal of Robotics Research, 2003, 22 (3/4): 187 - 202

[3] Taga G. Nonlinear dynamics of the human motor control real-time and anticipatory adaptation of locomotion and development of movements[C]//Adaptive Motion of Animals and Machines Tokyo: Springer, 2006: 189 - 204

[4] 郑浩俊,张秀丽,关旭,等.基于生物中枢模式发生器原理的四足机器人[J].清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 166 - 169
Zheng Haojun, Zhang Xiuli, Guan Xu, et al. Quadruped robot based on biological central pattern generator[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2004, 44(2): 166 - 169 (in Chinese)

[5] Inoue Kousuke, Ma Shugen, Jin Chenghua. Neural oscillator network-based controller for meandering locomotion of snake-like robots [C]//Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2004(5): 5064 - 5069

[6] Lu Zhenli, Ma Shugen, Li Bin, et al. Serpentine locomotion of a snake-like robot controlled by cyclic inhibitory CPG model[J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(1): 133 - 139

[7] Lu Zhenli, Ma Shugen, Li Bin, et al. Design of a snake-like robot controller with cyclic inhibitory CPG model[C]//2005 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 35 - 40

[8] Lu Zhenli, Ma Shugen, Li Bin, et al. Locomotion of a snake-like robot controlled by the bidirectional cyclic inhibitory CPG model robotics and biomimetics [C]//2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 1209 - 1214

[9] Lu Zhenli, Ma Shugen, Li Bin, et al. 3D locomotion of a snake-like robot controlled by cyclic inhibitory CPG model intelligent robots and systems [C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 3897 - 3902

[10] Gonzalez-Gomez J, Zhang Houxiang, Boemo E, et al. Locomotion capabilities of a modular robot with eight pitch-yaw-connecting modules[C]//9th International Conference on Climbing and Walking Robots. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 150 - 156