DOI：10.13245/j.hust.180416

基于 CPG 的仿海蟹机器人浮游步态生成方法

王海龙[1] 张奇峰[1] 王 刚[2] 李 彬[1]
(1 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室，辽宁 沈阳 110016；
2 哈尔滨工程大学 a 船舶工程学院，b 水下机器人技术国防科技重点实验室，
黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 结合仿生游动机理，针对游泳桨推进仿海蟹机器人提出一种基于中枢模式发生器浮游步态生成方法．采用可独立控制频率、幅值、相位延迟和时间非对称系数的一类非线性振荡器作为节律信号发生器，通过最近相邻耦合的方式构建了仿生游动的链式中枢模式发生器(CPG)运动控制模型，并分析了振荡单元平衡点的性态，证明了振荡器极限环存在的唯一性和稳定性；在此基础上，引入三个顶层控制信号作为 CPG 网络的激励，分别用来控制机器人的游动速度、转艏速率和浮潜速率，实现了仿海蟹机器人的三维游动控制．实验结果显示样机具有一定稳定性和机动性，机器人的直线游动速度和转艏速度随着游速控制系数和转艏速率控制系数的增加而增大，最大直线游动速度可达 0.41 BL/s，最大原地转艏速率可达 1.7 rad/s．仿真及实验结果验证了此中枢模式发生器模型的可行性与所提控制方法的有效性．

关键词 仿海蟹机器人；中枢模式发生器；游泳桨；浮游步态生成；游动控制
中图分类号 TP242 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2018)04-0086-06

Floating gait generation method of crablike robot based on CPG

Wang Hailong[1] *Zhang Qifeng*[1] *Wang Gang*[2] *Li Bin*[1]
(1 State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China；
2 a College of Shipbuilding Engineering, b State Key Laboratory of Autonomous Underwater Vehicle,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract A floating gait generation method based on central pattern generator (CPG) was proposed combined with bio-inspired swimming mechanism for paddle-driven crablike robot. A type of nonlinear oscillator was used as rhythm signal generator which could independently control the undulation frequency, amplitude, phase difference and time asymmetry coefficient, and the chain CPG motion controlling model for robot swimming was established by means of adjacent weak coupling method. Then, the state of balance point of oscillation unit was analyzed proving the uniqueness and stability of limit cycle of the oscillator model. On this basis, three top-level control signals were introduced as the stimulus for CPG network to control the swimming velocity, turning velocity and floating and submerging velocity, realizing the three-dimensional swimming of the robot. Experimental results show a certain stability and maneuverability of the prototype, and the straight-line swimming velocity and turning velocity both increase with straight-line swimming velocity control coefficient and turning velocity control coefficient, which can be up to 0.41 BL/s of straight-line swimming velocity and 1.7 rad/s of turning velocity at maximum, respectively. Simulation and experimental results verified the feasibility and validity of the proposed CPG control model.

Key words crablike robot；central pattern generator (CPG)；swimming paddle；floating gait generation；swimming control

中枢模式发生器(central pattern generator，CPG)是一类存在于脊髓(脊椎动物)和胸腹神经节(无脊椎动

收稿日期 2017-07-26.
作者简介 王海龙(1988-)，男，助理研究员，E-mail：wanghailong@sia.cn.
基金项目 国家自然科学基金青年基金资助项目(51409058).

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

物)内低级神经中枢中的神经元电路. 各神经元通过相互抑制构成神经元网络，神经网络的自激振荡产生具有稳定相位互锁关系的节律信号，从而控制生物肢体和躯干的节律性行为, 即便是缺少反馈信息, CPG 仍能产生节律信号[1-5]. 传统机器人的控制方法由于存在建模复杂、实时性差等缺点，难以应用到多肢体机器人的协调控制中. 将生物中枢模式发生器作为主控单元，具有实现简单、实时性和鲁棒性好等优点，因此在近年以来得到了广泛的应用，特别是在游动机器人运动控制领域[6-10].

文献[11]采用 Hopfield 模型构建非线性耦合振荡器，模拟两栖动物蝾螈脊髓系统，根据生物蝾螈躯干和肢体固有频率的不同，CPG 网络可产生不同频率的节律信号，实现水中浮游和陆地爬行状态的自主切换. 文献[12]参照两栖蛇形机器人、蝾螈机器人的 CPG 模型, 建立了适合仿牛鼻鲼控制的 CPG 网络，通过引入三个顶层激励信号实现了机器鱼的三维游动控制. 文献[13]构建了仿鲹科机器鱼 CPG 控制模型，通过修改鱼体波动方程，将鱼体各关节控制规律颠倒, 实现了机器鱼的稳定倒游. 文献[14]提出一种基于生物 CPG 激发产生多模态振荡波形控制机器海豚的运动方法，实现了机器海豚前游、转弯、浮潜等多模态运动. 文献[15]在尾鳍停振的条件下, 通过在 BoxBot 胸鳍的节律信号上叠加一个 π 相位，实现了机器鱼的倒游. 文献[16]构建了长鳍驱动机器鱼的 CPG 控制模型, 所产生的节律信号分别控制 8 个独立运动的鳍条，并进行了水池实验，结果表明：通过调节鳍条的波动幅度、波动频率和波的数目可实现机器鱼的游速控制. 文献[17]提出一种单层 CPG 网络模型, 利用该模型成功实现了机器龟的闭环游动控制.

本研究针对足桨耦合驱动仿海蟹机器人水中的运动特点，提出一种基于中枢模式发生器的仿海蟹机器人浮游步态生成方法. 以相邻弱耦合的方式构建仿海蟹机器人 CPG 网络模型, 对其功能单元的极限环的存在性、唯一性及稳定性进行了证明；在此基础上，建立了各步态的 CPG 网络参数库，获得了机器人前游、倒游、转艏、浮潜等多种游动模态的运动控制方法.

1　CPG 建模

1.1　振荡器模型

本研究采用改进的非线性振荡器作为节律信号发生器，该振荡器具有稳定的谐波极限环、极限环的形状不依赖于系统内部参数的选择、输出节律信号可调控等优点. 神经元拓扑结构如图 1 所示，图中 f 为神经元自抑制系数，数学模型为

$$\dot{\boldsymbol{X}}_i = F(\mathbf{X}_i) + \boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} \alpha(\mu - u^2 - v^2)u - \omega v \\ \alpha(\mu - u^2 - v^2)v - \omega u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_u \\ p_v \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中：$F(\boldsymbol{X})$ 为非线性 Hopf 振荡器；$\boldsymbol{X} = [u,\ v]^{\mathrm{T}}$ 为振荡器的内部状态变量，其中 u 和 v 分别为兴奋、抑制神经元状态变量；$\mu>0$，$\omega>0$ 分别为振荡幅值系数和自然振荡频率系数；$\alpha>0$ 为控制振荡器收敛速度的常数；p_u 和 p_v 为外界反馈信号输入.

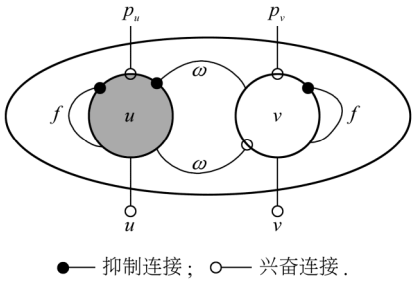


图 1　振荡器模型

当无外界扰动时，一个典型的非线性耦合振荡器微分方程为

$$\dot{\boldsymbol{X}}_i = F(\boldsymbol{X}_i) = \begin{bmatrix} \alpha(\mu - u^2 - v^2)u - \omega v \\ \alpha(\mu - u^2 - v^2)v + \omega u \end{bmatrix}. \quad (2)$$

1.2　振荡器平衡点和性态分析

对于式(2)所示的系统，可用微分方程组表示为

$$\begin{cases} \mathrm{d}u/\mathrm{d}t = P(u,\ v) = \alpha\mu u - \omega v - (u^2 + v^2)v\ ; \\ \mathrm{d}u/\mathrm{d}t = Q(u,\ v) = \alpha\mu v + \omega u - (u^2 + v^2)u. \end{cases} \quad (3)$$

该系统仅存在一个奇点 $O(0, 0)$, 且 $P(u, v)$ 和 $Q(u, v)$ 均二阶可微，在 O 点附近可将式(3)展开成泰勒形式，有

$$\begin{cases} \mathrm{d}u/\mathrm{d}t = \alpha\mu u - \omega v + R_1(x,\ y)\ ; \\ \mathrm{d}u/\mathrm{d}t = \alpha\mu v + \omega u + R_2(x,\ y). \end{cases} \quad (4)$$

对于式(4)总存在一个常数 $\delta>0$，对 $r=\sqrt{u^2+v^2}$ 一致有

$$\lim_{r\to 0} R_1(x,\ y)/r^{1+\delta} = 0\,. \quad (5)$$

式(2)所对应的近似线性方程的系数矩阵为

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \alpha\mu & -\omega \\ \omega & \alpha\mu \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式(6)的特征根为

$$\lambda_{12} = \alpha\mu \pm \mathrm{j}\omega\,. \quad (7)$$

由于 $\alpha>0$，$\mu>0$，$\omega>0$，特征根具有正实部，且系统的奇点是双曲的，$\boldsymbol{A}$ 中参数满足以下条件：

$$\begin{cases} p = -(\alpha\mu + \omega) < 0\ ; \\ q = \det \boldsymbol{A} = \alpha^2\mu^2 + \omega^2 > 0\ ; \\ \Delta = p^2 - 4q = -2(\alpha^2\mu^2 + \omega^2) - (\alpha\mu + \omega)^2 < 0. \end{cases} \quad (8)$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由式(8)可知：奇点O为线性系统的不稳定焦点，R_1和R_2在奇点的某邻域内具有一阶偏导数．由Perron定理可知：若某点是对应线性系统的焦点，则该点也是非线性系统的奇点，且两系统具有相同的稳定性，因此O点为式(2)的不稳定焦点．

1.3 极限环存在性和稳定性分析

为了证明所建立的神经振荡器模型平衡点和极限环的存在，用极坐标形式表示振荡器的数学模型，令：$u=r\cos\theta$；$v=r\sin\theta$，则振荡系统式(2)为

$$\begin{cases}\dot{r}=ar(\mu-r^2)\,;\\ \dot{\theta}=\omega.\end{cases}\tag{9}$$

式(9)存在$r=0$和$r^2=\mu$两个平衡状态．对于平衡状态$r^2=\mu$，仅当$\mu>0$时，r有解．当$\mu<u^2+v^2$时，$\mathrm{d}(u^2+v^2)/\mathrm{d}t<0$，此时奇点$O$为稳定焦点，且吸引域为全平面，故系统不存在闭轨迹；当$\mu>u^2+v^2$时，$\mathrm{d}(u^2+v^2)/\mathrm{d}t>0$，此时奇点$O$为不稳定焦点．令$u^2+v^2=h\geq 0$，$h$取充分大值，使$\mu-(u^2+v^2)<0$，即$\mathrm{d}(u^2+v^2)/\mathrm{d}t<0$，从而使式(2)与圆$u^2+v^2=h$构成了庞加莱-本迪克松定理(Poincare-Bendixson)环域的外境界．当$\mu>(u^2+v^2)$时，奇点O是不稳定焦点，O点领域中的轨线都以O为α极限点．由Poincare-Bendixson环域定理可知：以奇点O作为内境界和圆$u^2+v^2=\mu$作为外境界的环域，其内域必定存在一条内稳定极限环和一条外稳定极限环，两极限环也可能相互重合．

证明稳定极限环存在唯一性．当点$(u,\ v)$为原点时，取函数$M(u,\ v)=(u^2+v^2)^{-1}$，$N(u,\ v)=0$，则

$$\frac{\partial(XM)}{\partial u}+\frac{\partial(YM)}{\partial v}+\frac{\partial N}{\partial u}XM+\frac{\partial N}{\partial v}YM=-2\alpha<0\,.$$

因为$\alpha>0$，所以

$$\partial(XM)/\partial u+\partial(YM)/\partial v<0\,.$$

由Черкас(唯一性定理)的论证可得：式(2)最多存在一个极限环，若极限环存在，必定为稳定的极限环．

2 CPG 网络运动控制模型

2.1 时间非对称运动实现

生物海蟹无论采用升力模式还是阻力模式运动，一个拍动周期内游泳桨上下挥拍和前后拍动的时间都是不相同的，一般下拍用时小于上拍，前拍用时小于后拍．对于时间不对称运动，振荡角频率在一个拍动周期内不为定值，上挥和下拍阶段各自采用不同的角频率，以基于升力模式推进为例，根据所定义的非对称系数λ，可求得上挥和下拍阶段节律运动角频率为

$$\begin{cases}f_{\mathrm{up}}=(\lambda+1)/(2\lambda T)\,;\\ f_{\mathrm{down}}=(\lambda+1)/(2T).\end{cases}$$

为使振荡器自动切换振荡频率，实现时间不对称拍动，自适应角频率定义为

$$\omega_{ak}=\frac{\lambda+1}{2\lambda}\frac{\omega_k}{\mathrm{e}^{-\tau u_k}+1}+\frac{\lambda+1}{2}\frac{\omega_k}{\mathrm{e}^{\tau u_k}+1}\,,$$

式中：τ为一个极大的正整数；ω_k为神经元k的自然振荡角频率．

2.2 CPG 神经网络建模

根据对生物海蟹形态结构和足-桨复合推进机理的分析，兼具形态仿生和功能仿生特点，本研究设计了具有浅滩作业能力的足桨混合驱动仿海蟹机器人，如图2所示．机器人利用前三对步行足爬行，用游泳足指节拍水游动，可实现陆上行走、海底爬行和水中浮游三种运动功能．该机器人由结构本体、电子控制舱、六条串并联混合结构步行足、两条模块化游泳桨、浮力调节装置、减阻外壳等组成．

图 2 仿海蟹机器人三维模型

仿海蟹机器人水中浮游依靠机体左右两侧游泳桨相互协调，而这个协调由不同关节的CPG单元相互耦合实现．根据机器人的身体结构和游动特征，建立了如图3所示的链式弱耦合邻近关联的CPG网络拓扑结构．图3中：黄色箭头代表CPG单元内部耦合；红色箭头代表单元间耦合；J_{li}和J_{ri}分别代表左右游泳桨三个关节(i=1，2，3)；CPG_1～CPG_6为对应CPG单元；X_j和X_j(j=1，2，…，6)分别代表左右游泳桨三个关节对应CPG单元内兴奋、抑制神经元状态变量．在该结构中，各CPG单元仅与相邻两个CPG单元存在耦合关系，实现相位锁定，极大地简化了网络的复杂性．神经网络的动力学模型为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{X}}_j=F(\boldsymbol{X}_j-\boldsymbol{B}_j)+\varepsilon\boldsymbol{E} & (j=1),\\ \dot{\boldsymbol{X}}_j=F(\boldsymbol{X}_j-\boldsymbol{B}_j)+\varepsilon\boldsymbol{F} & (j=2,\ 3,\ 4,\ 5),\\ \dot{\boldsymbol{X}}_j=F(\boldsymbol{X}_j-\boldsymbol{B}_j)+\varepsilon\boldsymbol{G} & (j=6)\,;\end{cases}$$

$$\theta_j=c_jv_j\,,$$

$$\boldsymbol{E}=[0,\ \ v_2\sin\varphi_{12}-u_2\cos\varphi_{12}]^{\mathrm{T}}\,,$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

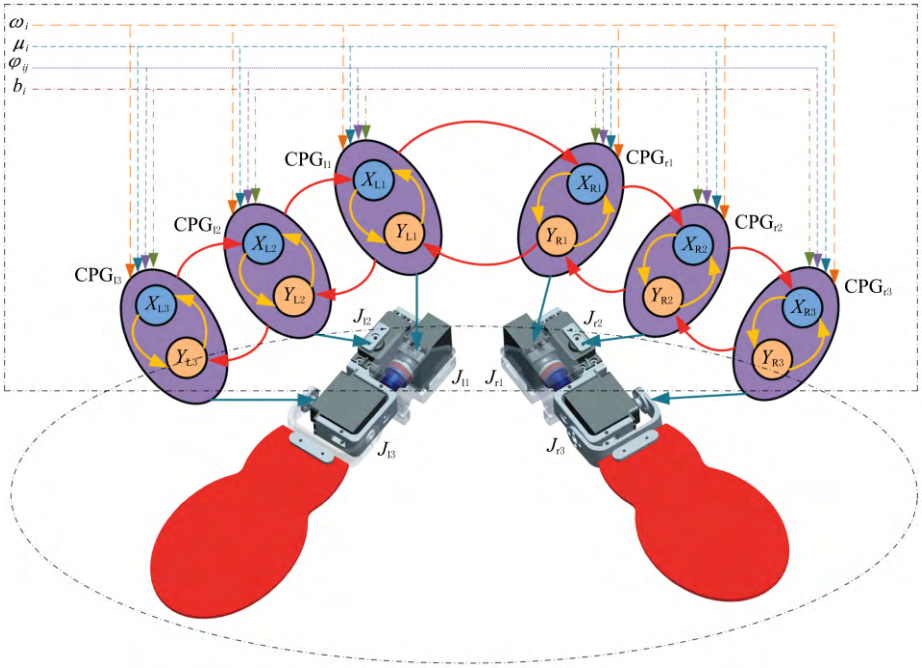


图 3　仿海蟹机器人 CPG 网络拓扑结构图

$$\boldsymbol{F}=[0,\ v_{j-1}\sin\varphi_{(j-1)j}+u_{j-1}\cos\varphi_{(j-1)j}+v_{j+1}\sin\varphi_{j(j+1)}-u_{j+1}\cos\varphi_{j(j+1)}]^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{G}=[0,\ v_5\sin\varphi_{56}+u_5\cos\varphi_{56}]^{\mathrm{T}};$$

$$\boldsymbol{B}_j=[0,\ b_j]^{\mathrm{T}},$$

式中：b_j 为节律信号振荡的平衡位置，通过引入该参数实现了空间非对称拍动，可用于机器人的浮潜控制；φ_{mn} 为神经元 m 和 n 之间的相对相位(m, n=1, 2, …, 6).

3　基于 CPG 仿海蟹机器人游动控制

通过观察仿海蟹机器人的 CPG 网络拓扑结构可知其包含了多个输入变量，若要实现不同游动步态的切换，则须逐一修改每个状态变量，不仅工作量大，而且没有体现出基于生物控制方法的优势，因此对 CPG 网络结构进行一定简化，通过引入三个顶层控制信号 δ_v，δ_y 和 δ_p 作为 CPG 网络的激励，分别用来控制机器人的游动速度，转艏速率和浮潜速率，从而实现仿海蟹机器人的三维运动控制，极大地简化了 CPG 网络结构.

3.1　游速控制

由水动力分析可知游泳桨拍动产生的推进力近似与上下拍动的幅度和拍动频率成正比例关系，因此选择神经元产生的节律信号的幅值系数和自然振荡角频率作为机器人游速控制变量，其与游速控制系数 δ_v 之间的映射关系为

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\mu}\\ \boldsymbol{\omega}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{k}_\mu & \boldsymbol{b}_\mu\\ \boldsymbol{k}_\omega & \boldsymbol{b}_\omega\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\delta}_v\\ \boldsymbol{I}\end{bmatrix},$$

式中：$\boldsymbol{\mu}=[\mu_1,\ \mu_2,\ \cdots,\ \mu_6]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{\omega}=[\omega_1,\ \omega_2,\ \cdots,\ \omega_6]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{k}_\mu=\mathrm{diag}[k_{\mu1},\ k_{\mu2},\ \cdots,\ k_{\mu6}]$；$\boldsymbol{b}_\mu=\mathrm{diag}[b_{\mu1},\ b_{\mu2},\ \cdots,\ b_{\mu6}]$；$\boldsymbol{k}_\omega=\mathrm{diag}[k_{\omega1},\ k_{\omega2},\ \cdots,\ k_{\omega6}]$；$\boldsymbol{b}_\omega=\mathrm{diag}[b_{\omega1},\ b_{\omega2},\ \cdots,\ b_{\omega6}]$；$\boldsymbol{\delta}_v=\mathrm{diag}[|\delta_v|,\ |\delta_v|,\ \cdots,\ |\delta_v|]_{6\times6}$；$\boldsymbol{I}$ 为 6×6 单位矩阵；$[k_{\mu i},\ b_{\mu i}]$ 和 $[k_{\omega i},\ b_{\omega i}]$ 分别为神经元 i 的幅值和频率系数. 通过调节上层控制参数 δ_v 可直接改变 CPG 网络输出信号的幅值和频率，从而调节机器人的游动速度.

3.2　转艏控制

由游动桨水动力分析可知仿海蟹机器人的转艏运动可通过相位差动来实现，基于此引入第二个转艏速率控制参数 δ_y，其与游泳桨摇翼和上下拍翼运动相位差之间的映射关系为

$$\begin{bmatrix}\varphi_{13}\\ \varphi_{64}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}k_\varphi & b_\varphi\\ -k_\varphi & b_\varphi\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_y\\ 1\end{bmatrix},$$

式中：k_φ 和 b_φ 为相位系数；δ_y 为方向控制系数，当 $\delta_y=0$ 时，机器人直游，当 $\delta_y>0$ 时，左侧游泳桨处于旋转超前模式，右侧游泳桨处于旋转滞后模式，机器人右转，当 $\delta_y<0$ 时，左侧游泳桨处于旋转滞后模式，右侧游泳桨处于旋转超前模式，机器人左转. 其余 CPG 网络参数设定为：$\varphi_{23}=-\varphi_{45}=-\pi/6$，$\varphi_{34}=0$.

3.3　浮潜控制

仿海蟹机器人的浮潜运动控制律为

$$\begin{bmatrix}b_1\\ b_6\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}k_b & 0\\ k_b & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_p\\ 1\end{bmatrix},$$

式中：k_b 为偏角系数；δ_p 为浮潜控制系数；机器人

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的浮潜速率与相对来流速度、上下拍翼初始偏角成正比，而上下初始偏角可通过 δ_p 进行控制. 当 $\delta_p>0$ 时，机器人开始下潜，随着 δ_p 增加，下潜速率加快；当 $\delta_p<0$ 时，机器人开始上浮，随着 δ_p 的减小，上浮速率也增加；当 $\delta_p=0$ 时，机器人在水平面内游动.

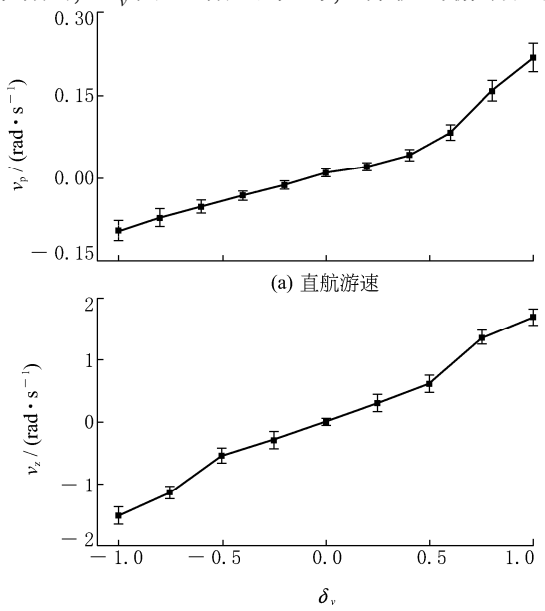
4 实验验证

4.1 实验平台搭建

为了更加直观和深入地展现仿海蟹机器人的水下运动能力，同时验证理论分析和数值计算的正确性，本实验搭建了室内实验水池。水池长为 3 m，宽为 2 m，高为 1 m，水体保持相对静止，且水面没有风浪，可满足样机直航和转艏运动性能的测量. 水池材质为玻璃，透明的外壁便于观察机器人游动过程中的位姿. 为了测量样机直航过程中的游速，采用 MTi100 三轴加速度计测量样机游动过程中的加速度，然后通过一次时域积分获得机器人样机的游速. 由于所测量的信号中包含有直流分量和高频噪声信号的干扰，直接对加速度信号进行积分会产生趋势项，因此在积分前对所测量的加速度信号进行滤波和消除直流分量操作.

4.2 浮游实验

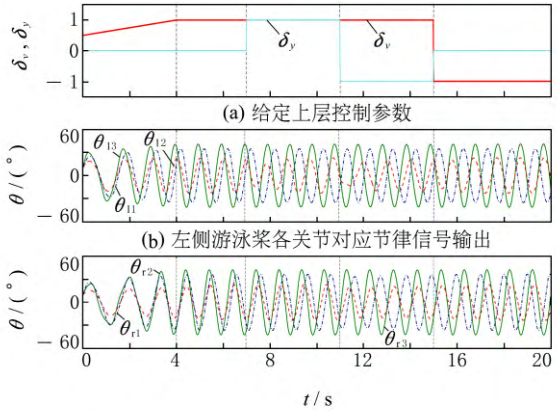
三个顶层控制信号 δ_v，δ_y 和 δ_p 的取值范围为 -1～1. 首先进行游速控制实验，实验结果如图4(a)所示，图中 v_p 为平均游速. 随着顶层游速控制系数的增加，游泳桨的拍动幅度、频率和相对相位均光滑增大，δ_v 由 -1 增加到1时，样机的游动速度由 -0.12 m/s 增加到0.23 m/s(-0.21 BL/s～0.41 BL/s)，游速近似与 δ_v 成正比，而样机的前游速度是倒游速度的两倍，一个原因是当摇翼和上下拍翼运动相位 $\Delta\phi_{BP}$ 取90°时，游泳桨的平均推力绝对值大于 $\Delta\phi_{BP}$ 取-90°时的值. 另一个原因是机器人在前游和倒游方向上的阻力系数不同. 然后进行转艏速率控制实验，实验中 δ_v 设定为0.8，实验结果如图4(b)所示，图中 v_z 为转艏速率. 由图可知：样机的转艏速率近似与 δ_y 成正比，当 $\delta_y=1$ 时，样机的转艏速率达到最大值，约为1.7 rad/s，该角速率也是采用游泳桨推进所能达到的最高转艏速率，此时转弯半径近似为0，仿海蟹机器人基本实现了原地回转. 对比样机左、右转艏速率可知样机右转的速度和效率均高于左转，其主要是由于游泳桨机械结构空程差异造成的.



(b) 转艏速率

图 4 平面游动控制测试结果

最后进行多模态步态生成和步态间切换实验，给定的顶层激励信号和在激励信号作用下 CPG 神经网络产生的节律信号如图 5 所示，图中 θ_{li} 和 θ_{ri} 分别代表左右游泳桨三个关节对应的节律信号输出.



(c) 右侧游泳桨各关节对应节律信号输出

图 5 平面游动控制实验

图 6 为样机的实际游动效果截图，由图可见：在 0 时刻机体左右两侧游泳桨均采用旋转超前模式拍动，产生了向前的推力，样机由静止开始向前加速游动，且超前的相位随着时间的推移逐渐增大，当 t=4 s 时 δ_v 达到 1，此时游泳桨产生的推力达到最大，样机维持前向游动状态；当 t=7 s 时，左侧游泳桨由旋转超前模式切换到旋转滞后模式，所产生的推进力变为负值，两游泳桨产生的推进力总和近似为 0，而产生的偏航力矩达到最大，样机实现原地

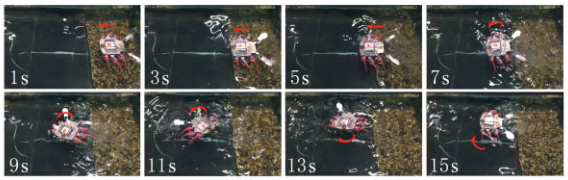


图 6 水平面游动效果图

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

右转，右转状态维持到 11 s，样机的偏航角度改变了 180°；在 t=11 s 处开始左转，该状态同样持续 4 s，当 t=15 s 时，机体左、右两侧游泳桨均切换到旋转滞后模式，产生了负推力，样机开始倒游.

由于实验水池深度较浅，针对机器人浮潜运动控制只进行了一些定量测试，实验结果显示机器人的下潜速度同样与 δ_p 近似成正比，当 δ_p=1时，机器人的下潜速率达到最大，约为 0.3 m/s.

为研究时间非对称拍动对样机游动性能的影响，接下来进行了变时间不对称系数λ的样机直航性能实验，实验中设定 δ_v 为0.8，取 δ_v 和 δ_p 为0，设λ的取值范围为0.4～1.8，每间隔0.2进行一次实验．图7所示为平均游速和游动效率随λ的变化曲线，图中游动效率为平均游速与平均功率的比值．由图7可见：当采用上挥急回或下拍急回时，随着不对称系数的增加，样机的平均游速先增大后减小，对于上挥急回方式，当λ=0.6时，样机的游动速度达到最大值0.109 m/s；对于下拍急回方式，游动速度在λ=1.4时达到最大值0.121 m/s，较上挥急回提高了11%. 推进效率随λ的变化规律与平均游速一致，上挥急回拍动方式和下拍急回拍动方式的最高效率同样也在λ=0.8和λ=1.4时达到，分别为 0.011 08 m/(s · W)和0.011 72 m/(s · W)．当λ=1.4时，样机同时达到最佳的游动速度和游动效率，该结果很好地解释了为什么扑翼生物在游动时常采用下拍急回方式.

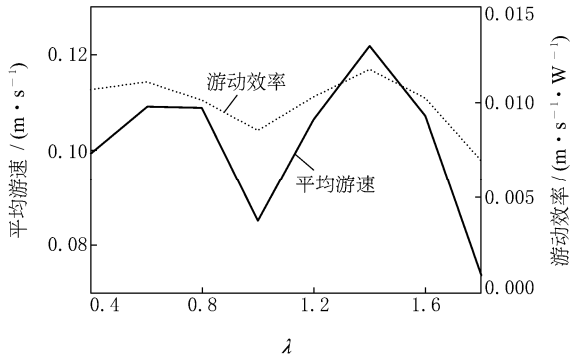


图 7　平均游速和游动效率随不对称系数的变化

5　结论

a. 利用本文 CPG 网络模型可实现仿海蟹机器人的直游、倒游、转艏、浮潜等多种游动模式，各步态间切换快速、平滑；

b. 机器人直线游动速度和转艏速度随着游速控制系数和转艏速率控制系数的增加而增大，最大直线游动速度可达 0.41 BL/s，最大原地转艏速率可达 1.7 rad/s；

c. 下拍急回方式可极大提高游泳桨的推进性能，当时间非对称系数 λ=1.4 时，样机的平均游速和推进效率同时达到最优值，与对称拍动相比，平均游速增加了 37.2%，推进效率提高了 4.9%.

参　考　文　献

[1] 王扬威，闫勇程，刘凯．基于 CPG 仿生长鳍波动推进器运动控制[J]．机器人，2016，38(6)：746-753.

[2] Wang T M，Hu Y H，Liang J H．Learning to swim：a dynamical systems approach to mimicking fish swimming with CPG[J]．Robotica，2013，31(3)：361-369.

[3] Rostro-Gonzalez H，Cerna-Garcia P A，Trejo-Caballero G．A CPG system based on spiking neurons for hexapod robot locomotion[J]. Neurocomputing, 2015, 170：47-54.

[4] Barron-Zambrano J H，Torres-Huitzil C，Girau B．Perception-driven adaptive CPG-based locomotion for hexapod robots[J]．Neurocomputing，2015，170：63-78.

[5] Cohen A，Holmes P，Rand R．The nature of the coupling between segmental oscillators of the lamprey spinal generator for locomotion-a mathematical- model [J]. Journal of Mathematical Biology，1982，13(3)：345-369.

[6] Bandyopadhyay P R．Trends in biorobotic autonomous undersea vehicles[J]．IEEE Journal of Oceanic Engineering，2005，30(1)：109-139.

[7] Ijspeert A J，Crespi A，Ryczko D，et al．From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model[J]．Science，2007，315(5817)：1416-1420.

[8] Zhang D B，Hu D W，Shen L C，et al．Design of an artificial bionic neural network to control fish-robot's locomotion[J]．Neurocomputing，2008，71(4/5/6)：648-654.

[9] Rosenberger L J. Pectoral fin locomotion in batoid fishes：Undulation versus oscillation[J]．Journal of Experimental Biology，2001，204(2)：379-394.

[10] Zhang D G，Zhu K Y．Computer simulation study on central pattern generator：from biology to engineering [J]. International Journal of Neural Systems, 2006, 16(6)：405-422.

[11] Ijspeert A J．Central pattern generators for locomotion control in animals and robots：a review[J]．Neural Networks，2008，21(4)：642-653.

(下转第 132 页)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1726-1733.

[9] Mao Shaolin，Cheng Changrui，Li Xianchang，et al. Thermal/structural analysis of radiator for heavy-duty trucks[J]. Applied Thermal Engineering，2010，30(11)：1438-1446.

[10] 刘佳鑫，蒋炎坤，秦四成，等. 基于 CFD 与 ε-NTU 法的工程车辆散热性能预估[J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2016，44(8)：6-10.

[11] 刘佳鑫，秦四成，蒋炎坤，等. 工程车辆翼型热管式散热器性能研究[J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2017，45(3)：99-104.

[12] 沈长乐，刘佳鑫，王宝中，等. 基于 CFD 仿真的工程车辆动力舱散热性能改进分析[J]. 武汉理工大学学报，2017，39(3)：38-44.

[13] 刘佳鑫. 工程机械散热模块传热性能研究[D]. 长春：吉林大学图书馆，2013.

[14] 毕小平，马志雄，韩树，等. 装甲车辆发动机冷却系统空气流动的仿真模型[J]. 内燃机学报，2002，46(2)：373-376.

[15] 傅佳宏，俞小莉，药凌宇，等. 工程机械独立式冷却模块流动传热仿真对比[J]. 吉林大学学报：工学版，2016，44(2)：451-456.

[16] 吴秉礼，李文洲. 轴流通风机的工程设计方法—— 设计手册[M]. 长春：吉林大学出版社，2007.

[17] 姚仲鹏. 车辆冷却传热[M]. 北京：北京理工大学出版社，2001.

(上接第 91 页)

[12] Cao Y，Bi S S，Cai Y R. Applying central pattern generators to control the robofish with oscillating pectoral fins[J]. Industrial Robot，2015，42(5)：392-405.

[13] 吴正兴，俞俊志，谭民. 两类仿鲹科机器鱼倒游运动控制方法的对比研究[J]. 自动化学报，2013，39(12)：2032-2042.

[14] 汪明，喻俊志，谭民. 胸鳍推进型机器鱼的 CPG 控制及实现[J]. 机器人，2010，32(2)：248-255.

[15] Crespi A，Lachat D，Pasquier A. Controlling swimming and crawling in a fish robot using a central pattern generator[J]. Autonomous Robots，2008，25(1)：3-13.

[16] Sfakiotakis M，Fasoulas J，Kavoussanos M M. Experimental investigation and propulsion control for a bio-inspired robotic undulatory fin[J]. Robotica, 2015, 33(5)：1-23.

[17] Seo K，Chung S J，Slotine J J E. CPG-based control of a turtle-like underwater vehicle[J]. Autonomous Robots，2010，28(3)：247-269.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net