文章编号: 1000-8152(2007)05-0749-07

基于CPG模型的仿生机器鱼运动控制

王 龙,谭 民,曹志强,王 硕,沈志忠

(中科院自动化所复杂系统与智能科学实验室,北京100080)

摘要: 仿生机器鱼的研究已经成为一个富有挑战性的热点问题. 为了控制机器鱼自身的运动和姿态, 本文研究了 胸鳍对机器鱼运动的影响, 并且基于CPG模型, 提出了一种运动控制方法. 采用的控制模型由4个振荡器构成, 可根 据反馈的信息产生节律信号以控制机器鱼胸鳍和尾鳍的运动. 根据CPG模型参数与反馈输入之间的关系, 设计了机 器鱼俯仰和转弯反馈控制方法, 利用反馈的信息自主调节CPG参数, 达到控制胸鳍运动模式的目的. 仿真实验验证 了控制模型和反馈策略的有效性.

关键词: CPG; 仿生机器鱼; 姿态控制; 动力学模型 中图分类号: TP273 文献标识码: A

CPG based motion control of biomimetic robotic fish

WANG Long, TAN Min, CAO Zhi-qiang, WANG Shuo, SHEN Zhi-zhong (Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, CAS, Beijing 10080, China)

Abstract: The biomimetic robotic fish has emerged as a challenging research area in recent years. In order to make the biomimetic robotic fish control its motion and posture with sensory information autonomously, an artificial central pattern generator (CPG) controller consisting of four neural oscillators with sensory information feedback is designed in this paper. This controller can generate rhythm instructions to drive two pectoral fins and a tail fin flapping repeatedly. According to the relation between motion patterns and CPG parameters, two feedback strategies are then designed to control pitching and turning locomotion of the pectoral fins respectively. Finally, simulations show the validity of CPG model and the proposed feedback strategies.

Key words: CPG; biomimetic robotic fish; posture control; dynamic model

1 引言 (Introduction)

自然界的生物经过千百万年的进化形成了其对 环境的极大适应能力. 鱼类以其游动效率高、机动 性能好、对环境扰动小等特点而显示出的非凡的水 中生存能力,令人类羡慕不已. 而对鱼类这种非凡 的水中运动方式的研究与模拟,对于研制新颖的高 效、高机动性和低噪声的水下运载器提供了独特的 设计思路^[1,2].

1994年MIT的M. Triantafyllou研究组成功研制了 世界上第1条真正意义上的仿生机器鱼RoboTuna^[3]. 此后, 仿生机器鱼的研究得到快速发展, 产生了一 批有代表性的系统^[4,5]. 其中, 胸鳍是一个非常重要 的部分, 可以通过其摆动/波动来提高仿生机器鱼游 动的机动性或作辅助推进, 而且可以赋予机器鱼上 浮下潜运动的能力,其研究对于机器鱼性能的提高 有着重要的意义.在对胸鳍运动模式和胸鳍动力学 的研究中,很多是集中在对真实鱼类的实验^[9~13]和 理论分析上^[14~17].文[9]对4种不同身长的海鲫实验, 来研究游速和身长对胸鳍动力的影响.文[10]利用计 算机仿真在不同速度下来比较机器鱼胸鳍转动和拍 动两种方式的机械效率.文[11]利用DPIV技术计算 转动胸鳍的机械效率.文[12]研究了鱼鳍的生物力 学、肌肉生理学和神经控制.这些都对设计机器鱼 机构和机器鱼运动控制有很大帮助.文[13,14]分别 给出阻力模式下,推力行程和恢复行程胸鳍产生的 推力和阻力,并计算了推进效率.文[15]研究了不同 形状的胸鳍对推力和阻力的影响.文[16]的工作表明 在任何速度下,胸鳍的转动运动模式都比拍动模式

收稿日期: 2006-01-07; 收修改稿日期: 2006-07-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475179,60635010,60605026).

效率高,特别是在推进行程,转动模式比拍动模式产 生的力量大的多. 文[17]提出了基于升力的胸鳍推 进动力学原理.

以上均是针对真实鱼类胸鳍的研究,在机器鱼 胸鳍上研究却不多. 文献[8]利用单自由度胸鳍实 现了仿生机器鱼的浮潜运动,Kato针对多自由度 胸鳍的机器鱼开展研究^[18],主要集中于胸鳍的机 动性和推进性能方面,未结合相关信息(传感信息 等)对胸鳍进行控制.本文考虑二自由度胸鳍仿生 机器鱼的运动,基于CPG(central pattern generator)生 物神经网络^[19~25],结合相关信息实现了胸鳍的反 馈控制.CPG模型已经被应用于机器人的运动控 制.水下多关节机器人的CPG控制,并且利用遗传优 化CPG模型,使得产生的推力更加稳定^[19].文[20]制 作了块能够模仿三神经元CPG模型的电路板,并理 论分析了状态切换时的稳定性;文[21,22]中给出了 采用CPG模型的四足机器人不规则地面行走控制. 文[23]采用CPG模型控制人形机器人行走的稳定性.

2 CPG模型及其特性 (CPG model and its characteristics)

多数脊椎动物,包括一些无脊椎动物都会采用一种叫做CPG的神经网络来产生节律运动(包括呼吸、心脏跳动、游泳、走路等).考虑到鱼类胸鳍、尾鳍的运动是典型的节律运动,鱼类通过控制鱼鳍的摆动频率、攻角来实现推进和各种机动动作,因此,可将CPG模型应用到机器鱼的姿态控制上,即利用CPG实现胸鳍、尾鳍的节律运动.本文采用Kimura振荡器模型^[22](见图1),该模型在Matsuoka振荡器模型^[24]的基础上进行了一定的改进.该振荡器模型采用两个神经元相互抑制成振荡器,两个神经元分别对应动物的屈肌和伸肌控制神经元,两个神经元的输出相减,作为振荡器的输出,这样的输出既可以是正值也可以是负值.

上述Matsuoka 和Kimura 微分振荡器模型具有如下优点:简单的数学表达和明确的生物学意义,能够较好的表达CPG的生物学特性;耦合了反馈项,可以利用反馈信息提高机器人的运动稳定性、协调性、适应性;模型具有通用性,可产生周期变化的控制信号.

考虑到仿生机器鱼的实际需求,采用4个Kimura 振荡神经元组成机器鱼的CPG控制模型,如图2所 示,其中P表示胸鳍,C表示尾鳍,Pi,Pr,Pm分别表 示左、右胸鳍拍动控制神经元和胸鳍转动控制神经 元,每个神经元都接收反馈输入信号,并且每两个神 经元都相互连接在一起.



图 1 Kimura的CPG振荡器模型





图 2 CPG控制模型简图

Fig. 2 Diagram of control model based on CPG CPG控制器的数学模型如下:

$$\begin{cases} T_{r}\dot{u}_{i}^{f} + u_{i}^{f} = bv_{i}^{f} + ay_{i}^{e} + \sum_{j=1}^{n} \omega_{ij}y_{j}^{f} + feed_{i} + c, \\ T_{a}\dot{u}_{i}^{f} + v_{i}^{f} = y_{i}^{f}, \\ T_{r}\dot{u}_{i}^{e} + u_{i}^{e} = bv_{i}^{e} + ay_{i}^{f} + \sum_{j=1}^{n} \omega_{ij}y_{j}^{e} + feed_{i} + c, \\ T_{a}\dot{u}_{i}^{e} + v_{i}^{e} = y_{i}^{e}, \\ y^{f,e} = \max(u_{i}^{f,e}, 0), \\ y_{i} = u_{i}^{f} - u_{i}^{e}. \end{cases}$$
(1)

其中i = 1, 2, 3, 4分别代表尾鳍、胸鳍转动和两个胸 鳍拍动神经元. f, e分别代表第i个振荡器的屈肌、伸 肌神经元, u_i 为神经元的内部状态, v为神经元的自 抑制, c为外部常输入, $feed_i$ 为外部反馈输入, b代表 自抑制对细胞内部状态的影响程度, T_r 和 T_a 为时间 常数, $\omega_{ij} = (1(i \neq j), 0(i = j))$ 为第i和j个振荡器 之间的连接权重. 为了使CPG模型能够控制机器鱼姿态,必须要研究CPG模型中的系数与CPG模型输出之间的关系. 文献[25]给出以下3个特性,可为控制方法的制定提供参考:

1) 输出参数的周期主要取决于参数*T_r*, *T_a*. 但是在调节*T_r*和*T_a*来调节输出信号周期时,必须 使*T_r*和*T_a*保持一定的比例,这样才能使输出信号的 幅值保持恒定.利用这个特性可以控制机器鱼胸鳍 的拍动频率.

2) CPG模型输出信号幅值主要取决于参数.利 用这个特性可以控制机器鱼胸鳍的拍动幅度.

3) 参数*feed_i*会影响CPG模型输出的平衡位置, 可以利用这个特性来控制机器鱼胸鳍拍动轴与来流 的夹角.并且当*feed_i*取一个相当大的值时,第*i*个神 经元会停止振荡,输出一个常值.这个特性可以用来 控制机器鱼的转弯运动.

3 动力学模型 (Dynamic model)

鱼类能够通过向水中传递能量再将能量收回而 产生推进力^[26],这种能量的传递与回收机制非常复 杂,因此有必要设计一个简化的动力学模型,从而也 使得设计控制器方便.Walker和Westneat利用计算机 仿真在各种游速下,比较胸鳍摆动和波动两种模式 的机械效率^[16],取得了较理想的效果.在低速时摆 动模式的胸鳍比波动模式的胸鳍效率高,而在高速 时正好相反.下面利用Walker的摆动胸鳍模型^[11,16], 简化计算出环量和附加质量产生的升力和推力.在 此基础上,得到机器鱼的俯仰角和偏航角,作为反馈 控制的输入.模型中的一些主要参数见图3.







其中: α 表示拍动轴与来流的夹角; β 是胸鳍绕 拍动轴转过的角度; $(\vec{n}, \vec{l}, \vec{n})$ 代表当地坐标系, \vec{m} 平 行于弦长方向, \vec{l} 指向展长的方向, \vec{n} 垂直于弦长; (*X*,*Y*,*Z*)坐标系的原点固定在胸鳍根部, *X*轴平行 于头尾轴, *Y*轴平行于为背腹轴; 坐标系(*m*,*l*,*n*)相 对于坐标系(*X*,*Y*,*Z*)的旋转矩阵为

$$R = \operatorname{Rot}(Z, \alpha) \operatorname{Rot}(X, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}, (2)$$

于是

$$\begin{cases} \vec{m} = (\cos \alpha, -\sin \alpha, 0), \\ \vec{l} = (-\sin \alpha \cos \beta, \cos \alpha \cos \beta, \sin \beta), \\ \vec{n} = (\sin \alpha \sin \beta, -\cos \alpha \sin \beta, \cos \beta). \end{cases}$$
(3)

来流的速度为 $\vec{V} = -u \cdot \vec{x}$.因此垂直于弦长的来流速 度 $v_{n(r,t)}$ 和平行于弦长的来流速度 $v_{x(r,t)}$ 可表示为

$$\begin{cases} v_{n(r,t)} = -(\omega \cdot \vec{m}) \times (r \cdot \vec{l}) + \vec{V}_t \cdot \vec{n} = \\ \omega_t r - u_t \sin \alpha_t \cos \beta_t, \\ v_{x(r,t)} = \vec{V}_t \cdot \vec{m}_t = u_t \cos \alpha_t. \end{cases}$$
(4)

环量在垂直于和平行于来流方向产生的分力分 别为dL_(r,t)和dL_(r,t),其表达式:

$$\begin{cases} dL_{(r,t)} = \frac{1}{2} \rho v_{(r,t)}^2 c_r \phi_{(r,t)} C_L dr, \\ dD_{(r,t)} = \frac{1}{2} \rho v_{(r,t)}^2 c_r \phi_{(r,t)} C_D dr, \end{cases}$$
(5)

其中:
$$v_{(r,t)}^2 = v_{n(r,t)}^2 + v_{x(r,t)}^2, \phi_{(r,t)} = 1 - \frac{2}{4-t}$$

为Wagner方程^[27], 表示半弦长, 如果要忽略Wagner 作用, 可令 $\phi_{(r,t)}$ 等于1. $C_L 和 C_D$ 分别代表升力和阻 力的经验系数并且可以表示为 α' 的方程^[28]

$$\begin{cases} C_L = 0.225 + 1.58 \sin(2.13\alpha' - 7.20), \\ C_D = 1.92 - 1.55 \cos(2.04\alpha' + 9.76). \end{cases}$$
(6)

其中α′表达式如下:

$$\alpha'_{(r,t)} = \tan^{-1}\left(\frac{v_{n(r,t)}}{v_{x(r,t)}}\right),\tag{7}$$

从而,环量在垂直和平行于弦长方向的分力分别为

$$\begin{cases} dF_{n(r,t)} = dL_{(r,t)} \cos \alpha'_{(r,t)} + dD_{(r,t)} \sin \alpha'_{(r,t)}, \\ dF_{x(r,t)} = dL_{(r,t)} \sin \alpha'_{(r,t)} + dD_{(r,t)} \cos \alpha'_{(r,t)}. \end{cases}$$
(8)

由环量产生的升力和推力可表示为

$$\begin{cases}
dL_{c(r,t)} = d\vec{F}_{n(r,t)} \cdot \vec{y} + d\vec{F}_{x(r,t)} \cdot \vec{y} = \\
dF_{n(r,t)} \cos \alpha \cos \beta - dF_{x(r,t)} \sin \alpha, \\
dT_{c(r,t)} = d\vec{F}_{n(r,t)} \cdot (-\vec{x}) + d\vec{F}_{x(r,t)} \cdot (-\vec{x}) = \\
dF_{n(r,t)} \sin \alpha \cos \beta - dF_{x(r,t)} \cos \alpha,
\end{cases}$$
(9)

垂

直于胸鳍的附加质量力可表示为
$$\mathrm{d}F_{a(r,t)} = rac{\pi}{4}
ho c_r^2 \dot{v}_{n(r,t)}\mathrm{d}r.$$
 (10)

进而,得到附加质量产生的升力与推力

$$\begin{bmatrix}
dL_{a(r,t)} = d\vec{F}_{a(r,t)} \cdot \vec{y} = dF_{a(r,t)} \cos \alpha \cos \beta, \\
dT_{a(r,t)} = d\vec{F}_{a(r,t)} \cdot (-\vec{x}) = dF_{a(r,t)} \sin \alpha \cos \beta.
\end{cases}$$
(11)

环量与附加质量产生的升力合力与推力合力为

$$\begin{cases} dL_{(r,t)} = dL_{a(r,t)} + dL_{c(r,t)}, \\ dT_{(r,t)} = dT_{a(r,t)} + dT_{c(r,t)}. \end{cases}$$
(12)

机器鱼的质量为*M*,作用在机器鱼身上的力 见图4,坐标系(*X_b*,*Y_b*,*Z_b*)固定在机器鱼身上,原 点*O_b*位于机器鱼的质心上,*X_b*轴水平,*Y_b*轴垂直于 水平面.



图 4 作用在机器鱼身上的力 Fig. 4 Forces acting of body of robot fish

机器鱼在水中俯仰和偏航的运动方程为

$$\begin{cases} J_z \ddot{\theta}_z = (L_R + L_L) l_x - M_z, \\ J_y \ddot{\theta}_y = (T_R - T_L) l_z - M_y. \end{cases}$$
(13)

其中: $J_z 和 J_y$ 分别代表绕 $Z_b n Y_b$ 的惯性矩; θ_z 为头尾 轴与 Z_b 的夹角并且当机器鱼抬头时 θ_z 为正值; θ_y 表 示头尾轴在水平面上的投影于 $X_b - Y_b$ 平面的夹角, 并且当机器鱼左转弯时为正值; $L_R n T_R$ 表示右侧胸 鳍产生的升力和推力, $L_L n L_R$ 为左侧胸鳍产生的 升力合推力; l_x 为升力到质心的力臂, l_z 为推力到质 心的力臂; $M_z n M_y$ 分别表示作用在机器鱼身上的 绕 $Z_b n Y_b$ 阻尼力矩, 其表达式见式(14), 其中 C_d 是阻 尼系数; R是圆柱形机器鱼身体的半径; l_1 , l_2 分别为 机器鱼头部和尾部到质心的距离.

$$M_{z} = \frac{1}{2}\rho\dot{\theta}_{z}^{2}C_{d}\int_{-l_{1}}^{l^{2}}l^{2}\cdot 2Rdl,$$

$$M_{y} = \frac{1}{2}\rho\dot{\theta}_{y}^{2}C_{d}\int_{-l_{1}}^{l^{2}}l^{2}\cdot 2Rdl.$$
(14)

鱼的游动,例如俯仰运动和转弯运动.这里的反馈方 式即控制方法是根据第2部分中CPG模型的特点来 制定的.控制原理图如图5:







4.1 俯仰策略(Pitching strategy)

根据第2部分介绍的CPG模型的特性, CPG模型 反馈输入*feed*_i决定胸鳍拍动轴与来流方向的夹角, CPG模型参数*c*决定胸鳍拍动的幅度.利用这两个特 性,设计如下的机器鱼俯仰角度控制方法:

$$\begin{cases} feed_{i} = \begin{cases} 1, & (\theta_{z} - \theta_{z0}) > s, \\ -1, & (\theta_{z} - \theta_{z0}) < -s, \end{cases} \\ c = \begin{cases} 1.5|\theta_{z} - \theta_{z0}|, & |\theta_{z} - \theta_{z0}| > s, \\ 0, & |\theta_{z} - \theta_{z0}| < -s, \end{cases} \end{cases}$$
(15)

其中: $i = 3,4; \theta_z$ 是头尾轴与水平面的夹角; $\theta_{z0} \in \theta_z$ 的目标值; s为任意小正数并表示允许偏差. $\exists (\theta_z - \theta_{z0}) > s$ 时 $feed_i = 1$, 胸鳍拍动的中间位 置在水平面上, 这时机器鱼会向低头直到达到目 标姿态. $\exists (\theta_z - \theta_{z0}) < -s$ 时 $feed_i = -1$, 胸鳍的 拍动位置在水平面以上, 这时机器鱼会抬头直到达 到目标姿态. 机器鱼胸鳍的拍动幅度由参数c决定, 同时调节参数c可以避免胸鳍与机器鱼身体相撞. $\exists \theta_{z0} = \theta_z$ 之间的差值越大胸鳍的拍动幅度也越大, $\exists \theta_{z0} = \theta_z$ 之间的差值小于s时, 胸鳍停止拍动.

4.2 转弯策略(Turning strategy)

根据第2部分CPG模型的特性, CPG模型反 馈输入可以决定CPG模型是否处于振荡状态. 这里利用这个特性来控制机器鱼的转弯 运动.具体的控制方法如式(16),其中feed = [feed₁,feed₂,feed₃,feed₄]; θ_y 代表机器鱼转过的 角度即偏航角,并且 θ_y 为正值时表示左转; θ_{y0} 代 表 θ_y 的期望值.s为一个任意的小正数,表示允许偏 差.当feed = [0000.1]时,右侧胸鳍停止拍动,而 左侧胸鳍继续保持拍动状态,这样机器鱼就会向右 转弯;当feed = [000.10]时,左侧的胸鳍停止拍动, 而右侧胸鳍继续保持拍动状态,这样机器鱼就会向 左转弯;参数c同上. 第5期

$$\begin{cases} feed = \begin{cases} [0 \ 0 \ 0 \ 0.1], & (\theta_y - \theta_{y0}) > s, \\ [0 \ 0 \ 0 \ 0.1], & (\theta_y - \theta_{y0}) < -s, \\ c = \begin{cases} c1.5|\theta_y - \theta_{y0}|, & |\theta_y - \theta_{y0}| > s, \\ 0, & |\theta_y - \theta_{y0}| < -s. \end{cases}$$
(16)

5 仿真试验 (Simulations)

本文的机器鱼样机以尾部摆动产生的推力为主, 通过胸鳍的摆动来提高游动的机动性.整个机器鱼 有4个自由度.样机如图6所示,样机由鱼体、胸鳍和 尾部组成.鱼体呈圆柱形,电机、电池、传感器、胸鳍 和尾部固定在其上;在鱼体的两端各一个胸鳍,每个 胸鳍的拍动是独立的,但是转动时耦合在一起的;虽 然这样会减少机器鱼的机动性,但是对实现机器鱼 的转弯俯仰等运动已经足够了.机器鱼尾鳍有两个 关节,两个关节的转角是相互关联的,它们之间的关 系会影响到为尾部的摆动形状,并且这个关系由推 动它们的凸轮来确定,这两个凸轮由一同个电机带 动.



图 6 机器鱼样机

Fig. 6 Prototype of robot fish

CPG模型的参数以及仿生机器鱼动力学模型所需的样机相关尺寸如表1所示.

l'able 1	Parameters	of CF	'G and	robot	fish

T_a	T_r	a	b	ω_{ij}	$l_x/{ m m}$
3.5	14	-1	-2	*	0.2
l_z/m	J_z/kgm	J_y/kgm	l_1/m	l_2/m	l_p/m
0.1	0.47	0.39	0.32	0.3	0.08
R_b/m	C_d	M/kg	$c_r/{\rm m}$		
0.28	1.2	3.9	0.12		

表中

$$* = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

5.1 俯仰仿真(Pitching simulation)

在仿真开始机器鱼水平游动,然后机器鱼抬头 使得头尾轴与水平面成1弧度角度,即取 $\theta_{z0} = 1$ rad, 取允许偏差s = 1 rad, CPG模型参数和机器鱼的尺 寸列在表1中.两个胸鳍产生的升力合力见图6(a). 由图可见升力的峰值产生在胸鳍的推动的阶段, 负升力产生在胸鳍的恢复行程.经过2.5 s以后两 个胸鳍都停止振动.此时的升力基本为零,并且条 件 $|\theta_z - \theta_{z0}| < s$ 得到满足,虽然在运动的初期,俯仰角 是波动的,但很快这种波动就消失了.如图7(b)所示.





5.2 转弯仿真(Turning simulation)

机器鱼水平游动, 当撞到障碍物时, 便使机器 鱼转90度, 即取 $\theta_{y0} = \frac{\pi}{2}$ rad, 允许误差s = 0.1 rad, CPG模型参数和机器鱼的尺寸列在表1中. 仿真开 始时机器鱼向前游动, 当机器鱼探测到右侧有障碍 物时, 利用提出的控制方法使机器鱼向左转弯, 避 开障碍物. 升力 T_R 随时间变化的曲线见图8, 由图 可知升力不断衰减. 大部分的正推力产生在胸鳍 的推力行程, 而大部分的负推力产生在胸鳍的恢 复行程. 经过6 s后, 胸鳍产生的转矩基本为零, 并 且 $|\theta_y - \theta_{y0}| < s$,如图8所示.但是由于惯性的存在,即使胸鳍停止了运动 θ_y 也会增加直到13 s.



(b) 偏航角随时间变化的曲线

图 8 俯机器鱼转弯仿真试验

Fig. 8 Simulations of robot fish's turning motion

6 结论 (Conclusion)

CPG是一种生物神经网络,可以产生节律信号用 来控制机器鱼的运动或姿态.本文考虑将相关信息 反馈到CPG模型中,根据设计的机器鱼姿态和运动 控制方法,结合仿生机器鱼动力学模型,实现运动控 制.从仿真结果来看,提出的基于CPG模型的控制方 法能够控制机器鱼的胸鳍姿态,实现自主避障.下一 步工作会开展仿生机器鱼实验验证,同时对CPG模 型进行扩展,使之应用于仿生机器鱼尾鳍控制.

参考文献(References):

- MICHAEL S, DAVID M L, BRUCE J, et al. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. *IEEE J of Oceanic Engineering*, 1999, 24(2): 237 252.
- [2] 喻俊志. 多仿生机器鱼控制与协调研究[D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2003.
 (YU Junzhi. *Control and research on multi-robot fish*[D]. Beijing: Institute of Automation, Chinese Academy of Science, 2003.)
- [3] TRIANTAFYLLOU M, TRIANTAFYLLOU G S. An efficient swimming machine[J]. Scientific American, 1995, 272(3): 64 – 70.

- [4] AYERS J, CRISMAN J. The lobster as a model for an omnidirectional robotic ambulation control architecture[C] // Biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robots. New York: Academic Press, 1992: 287 – 316.
- [5] MCISAAC K, OSTROWSKI J. A geometric approach to anguilliform locomotion: modelling of an underwater eel robot[C] // Proc of the 1999 IEEE Conference of Robotics and Automation. New York: IEEE Press, 1999: 2843 – 2848.
- [6] KATO N, FURUSHIMA M. Pectoral fin model for maneuver of underwater vehicles[C]// Proc of the 1996 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. New York: IEEE Press, 1996: 49 – 56.
- [7] 梁建宏,王田苗,魏洪兴,等.水下仿生机器鱼的研究进展II-小型 实验机器鱼的研制[J].机器人,2002,24(3):234-238.
 (LIANG Jianhong, WANG Tianmiao, WEI Hongxing, et al. The development of underwater robot fish II -research on small experimental robot fish[J]. *Robots*, 2002, 24(3): 234-238.)
- [8] ZHANG Z G, WANG S, TAN M. 3-D Locomotion control for a biomimetic robot fish[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2004, 2(2): 169 – 174.
- [9] DRUCKER E G, JENSEN J. Pectoral fin locomotion in the striped surfperch I. Kinematic effects of swimming speed and body size[J]. J of Exp Bio, 1996, 199(10): 2235 – 2242.
- [10] WEATNEAT M W, WALKER J A. Pectoral fin design and swimming performance: testing thrust and efficiency models with structure and behavior of living fishes[C] // Proc of the 14th Int Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. Durham, New Hampshire: DurhamUniversity Press. 2001.
- [11] WALKER J A. Dynamics of pectoral fin rowing in a fish with an extreme rowing stroke: the threespine stickleback (gasterosteus aculeatus)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2004, 207(11): 1925 – 1939.
- [12] WALKER J A, THORSEN D H, HALE M E. Structure, function, and neural control of pectoral fins in fishes[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(3): 674 – 683.
- [13] BLAKER R W. The mechanics of labriform locomotion I. Labriform locomotion in the angelfish (pterophyllum eimekei): an analysis of the power stroke[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1979, 82: 255 – 271.
- [14] BLAKER R W. The mechanics of labriform locomotion II. an analysis of the recovery stroke and the overall fin-beat cycle propulsive efficiency in the angelfish[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1980, 85(11): 337 – 342.
- [15] BLAKER R W. Influence of pectoral fin shape on thrust and drag in labriform locomotion[J]. *Journal of Zool Lond*, 1981, 194(1): 53–66.
- [16] WALKER J A, WESTNEAT M W. Mechanical performance of aquatic rowing and flying[J]. Proc of the Royal Society B: Biological Sciences, 2000, 267(1455): 1875 – 1881.
- [17] WEBB P W. Kinematics of pectoral fin propulsion in Cymalogaster aggregate[J]. Journal of Experimental Biology, 1973, 59: 697 – 710.
- [18] KATO N, INABA T. Guidance and control of fish robot with apparatus of pectoral fin motion[C]// Proc of the 2002 IEEE Int Conf on Robotics & Automation Washington, New York: IEEE Press, 1998: 446 – 451.
- [19] KOBAYASHI S, KAMEYAMA T, MORIKAWA H. Generation of movement for multi-link propulsion mechanism in fluid[C]// Proc of the Fourteenth (2004) Int Offshore and Polar Engineering Conference. Toulon, France: ISOPE Press, 2004, 1: 23 – 28.

- [20] VOLKOVSKII A, BRUGIONI S, LEVI R, et al. Analog electronic model of the lobster pyloric central pattern generator[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2005, 23(1): 47 – 57.
- [21] KIMURA H, FUKUKA Y, KONAGA K. Towards adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain by using neural system model[C] // Int Conf on Int Robots and System. New York: IEEE Press, 2001, 4: 2312 – 2317.
- [22] FUKUOKA Y, KIMURA H, COHEN A H. Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts[J]. Int J of Robotics Research, 2003, 22(3/4): 187 – 202.
- [23] OGINO M, KATOH Y, MASAHIRO A, et al. Vision-based reinforcement learning for humanoid behavior generation with rhythmic walking parameters[C] // Proc of the 2003 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE Press, 2003: 1665 – 1671.
- [24] MATSUOKA K. Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation[J]. *Biological Cybernetics*, 1987, 52(6): 367 – 376.
- [25] 张秀丽. 生物的节律运动和四足机器人的环境适应力[D]. 北京: 清华大学, 2003.
 (ZHANG Xiuli. Biological-inspired rhythmic motion & environmental adaptability for quadruped robot[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.)
- [26] COLGATE J E, LYNCH K M. Mechanics and control of swimming: a review[J]. *IEEE Journal of Oceanographic Engineering*, 2004, 29(3): 660 – 673.

(上接第748页)

- [10] WANG Y Y, XIE L H, de SOUZA C E. Robust control of a class of uncertain nonlinear systems[J]. Systems & Control Letters, 1992, 19(2): 139 – 149.
- [11] BOYD S P, GHAOUI L E, FERON E, et al. Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory[M]. Philadelphia, PA: SIAM, 1994.
- [12] WANG Y, BERNSTEIN D S, WATSON LT. Probability-one homotopy algorithms for solving the coupled Lyapunov equations arising in reduced-order H₂ /H_{∞} modeling, estimation and control[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2001, 123(2): 155 – 185.
- [13] WATSON L T. Globally convergent homotopy methods: a tutorial[J]. Applied Mathematics and Computation, 1989, 31: 369 – 396.

[27] FUNG Y C. An Introduction to the Theory of Aeroelasticity[M]. New York: Dover Publications, 1993.

[28] DICKINSON M H, LEHMANN F O, SANJAY P S. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight[J]. Science, 1999, 284(5422): 1954 – 1960.

作者简介:

王 龙 (1979—), 男, 博士研究生, 主要研究方向仿生机器 人、机器人运动控制, E-mail: okwlong@163.com;

谭 民 (1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为先 进机器人控制、仿生机器人、多机器人协调与控制、重构制造系统分 析:

曹志强 (1974—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向机 为仿生机器人、多机器人协调协作、智能机器人、网络控制等;

王 硕 (1973—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向机 为仿生机器人、多机器人协调协作、智能机器人、网络控制等;

沈志忠 (1978—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为仿生机器 人、图像识别.

作者简介:

蒋朝辉 (1978—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大系统分 散控制、鲁棒控制, E-mail: jiang_zhaohui@126.com;

桂卫华 (1950—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为工业 大系统递阶和分散控制理论及应用、鲁棒控制、复杂生产过程建模 与控制;

谢永芳 (1972—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为分散控制 和鲁棒控制、生产过程控制;

裘智峰 (1980—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为复杂生产 过程建模与控制.