

文章编号: 1001-4888(2016)04-0440-11

多自由度仿生推进系统的 CPG 控制^{*}

王彤, 高东奇, 张世武, 秦丰华

(中国科学技术大学工程科学学院, 合肥 230026)

摘要: 为了提高航行稳定性和机动性而设计的四尾鳍组合推进水下航行器, 尾鳍运动自由度众多且相互耦合, 稳定且快速的控制方案对提高航行器的整体性能至关重要。本文根据尾鳍运动特点, 建立了中枢模式发生器(CPG)模型, 协调控制 8 个驱动舵机, 实现巡游、倒退、偏航、俯仰等各种航行状态下尾鳍的组合运动; 通过陀螺仪监测航行器的偏航角与俯仰角, 形成反馈信号引入 CPG 模型, 对尾鳍运动进行反馈控制, 进一步提高了航行稳定性。

关键词: 中枢模式发生器; 仿生推进; 水下航行器; 反馈控制

中图分类号: TP24

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-031

0 引言

自然界中的鱼类通常生活在复杂的环境中, 为了生存, 它们进化出了高超的运动技能以寻找食物, 躲避捕食者。类似地, 人造水下航行器也需要能够实现高效稳定、机动灵活的运动, 以便在复杂多样的环境中有效地完成任务。然而现有的人造水下航行器远远未能达到鱼类运动的快速性、稳定性以及对复杂环境的适应性。鱼类之所以能够拥有如此卓越的运动技能, 一方面是由于肌肉、肌腱等高效的执行机构, 另一方面是由于中枢神经系统可以进行大量的并行控制^[1]。研究鱼类自推进机理, 开发仿生推进技术, 是发展高性能水下航行器的重要内容之一。

根据鱼类推进所采用的身体部位的不同, 可将鱼类的运动模式分为两类: 身体/尾鳍推进模式(BCF)和中间鳍/对鳍推进模式(MPF)^[2]。BCF 推进模式相比于 MPF 推进模式具有更高的推进速度, 已有的机器鱼仿生样机多采用 BCF 模式^[3-6], 研究也日趋成熟。而对 MPF 推进模式的研究相对较少, MPF 推进模式虽然在速度上较 BCF 没有优势, 但是在机动性和稳定性上明显优于 BCF 模式, 对这类仿生航行器的研究已逐渐得到科研工作者的重视, 也有一些样机被研制出来。2000 年, Kato 等研制了仿生机器黑鲈 BASS-II, 通过两个伺服电机驱动两个胸鳍来调节鱼体的航向和俯仰^[7]。2004 年, Georgiades 等研制了六鳍驱动的水下仿生机器人 AQUA, 其外形是依据陆地六足机器人 RHex 设计的, 每个鳍相对于躯体只有一个转动自由度^[8]。2008 年, Licht 等开发了名为 RoboTurtle 的四鳍驱动仿生 AUV, 鳍被设计成独立模块, 各模块由两个直流无刷电机分别驱动鳍的滚转、俯仰运动, 通过改变其相位和幅值来控制 AUV 航行姿态^[9]。这些样机在机动性上表现较好, 但是稳定性上有待提高。本文同样采用多鳍拍动方式以获得良好的机动性, 同时将各鳍结构与运动结合起来, 并引入反馈控制, 以提高推进器的稳定性。

采用多鳍推进模式需要多个自由度协调运动, 传统的基于模型的机器人控制方法存在建模复杂, 解不唯一, 单周期规划等问题, 对于多自由度运动的协调缺乏足够的实时性^[10]。中枢模式发生器(Central

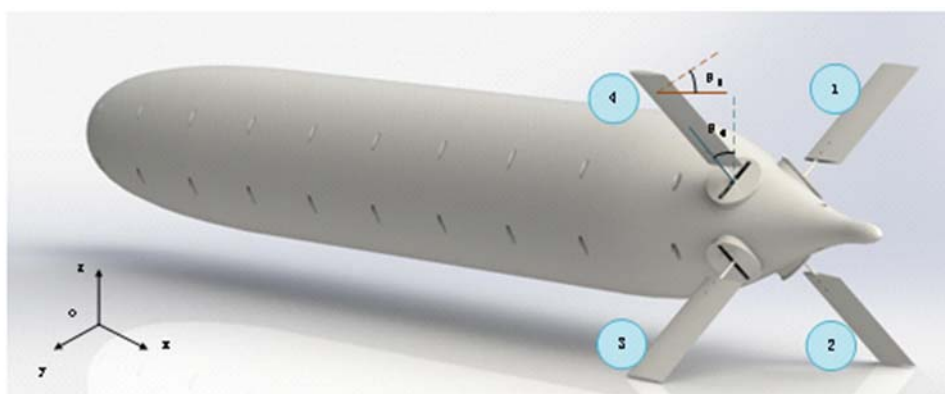
^{*} 收稿日期: 2016-03-02; 修回日期: 2016-04-28

基金项目: 自然科学基金项目(11272310)和中央高校基本科研业务费专项资金(WK2030020023)资助

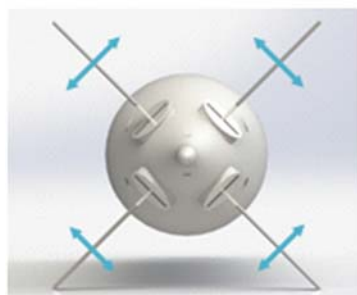
通讯作者: 秦丰华(1975—), 男, 博士, 副教授。主要从事仿生学、微流体力学等领域的研究工作。

Pattern Generator, CPG)是存在于脊椎动物和无脊椎动物中的,能够在缺乏高层控制和反馈输入的情况下,不需要节律性输入即可产生协调的节律性输出的神经回路。近年来,CPG 已被越来越多地用在仿生机器人的控制上。Wilbur 等人采用 CPG 模型实现了对仿七鳃鳗型机器鱼的运动控制,该机器鱼由刚性头部、依靠形状记忆合金(SMA)驱动的柔性体和被动变形的细长尾部三部分组成,并加入了传感器模块,根据外界环境来调节机器鱼的运动^[11];Ijspeert 等人利用 CPG 模型实现了仿生机器蝶螈在水陆两栖环境下运动状态的转换,验证了基于 CPG 的控制可以在减少运动控制问题维数的同时,依据环境实现灵活且连续的速度、方向和姿态的调节^[12];Crespi 等人利用 CPG 模型实现了对由两个胸鳍和一个尾鳍驱动的仿生鱼 BoxyBot 的运动控制,该机器鱼可以实现巡游、倒游、偏航、俯仰、滚转以及在陆地上爬行等多种不同的机动作^[1];喻俊志等人采用 CPG 模型实现了机器海豚的运动控制,该机器鱼在刚性头部中加入滑块机构实现浮潜,身体及尾部采用多个关节驱动,以实现背腹式上下摆动推进^[6]。采用 CPG 控制有下面几个优点:(1)CPG 具有极限环的行为,可以产生稳定的节律性运动,系统遇到扰动时可以很快地恢复到原来的运动状态;(2)CPGs 非常适合于分布式系统的实现;(3)CPG 模型调节运动时通常需要的控制参数比较少;(4)CPGs 非常适合整合传感器的反馈信号;(5)CPG 模型更加适合学习和优化算法^[13]。

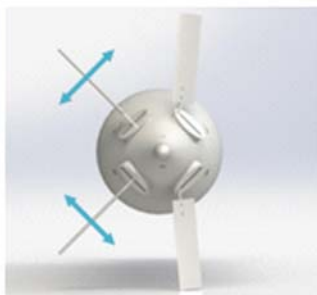
本文针对多鳍组合推进水下航行器样机,建立了 CPG 模型,根据航行需求及航向反馈信号控制多鳍多自由度拍动,并通过仿真验证控制策略的有效性。



(a) 水下航行器示意图



(b) 巡游时尾鳍的运动形式



(c) 左转机动时鳍的运动组合形式

图1 多鳍组合推进示意图

Fig. 1 Structure of the underwater propeller

1 多鳍组合推进水下航行器

众所周知,单尾鳍摆动推进会导致本体晃动,为此,本文设计了多鳍推进水下航行器,如图1所示。推进部分由尾部周向均匀布置的四尾鳍组成,每个尾鳍的运动参考昆虫拍翼动作设定,如图1(a)所示,有两个运动自由度。首先,尾鳍绕航行器体轴往复摆动,可用挥拍角 θ_i (鳍面轴线与初始平衡位置的夹角)描述,其中下标 $i=1, \dots, 4$ 表示四个尾鳍的编号。这种类似鱼鳍摆动的运动,可在径向产生指向航行器体轴的作用力以及周向更强但方向往复变化的作用力。若尾鳍仅此运动,则不会形成沿体轴方向

的推进力,为此,设计了第二自由度运动,即尾鳍面绕鳍面轴线的摆动,可用攻角 θ_{i+4} (鳍面与体轴线的夹角)描述。如此,可利用周向作用力产生体轴线方向的作用力分量;同时,恰当设置攻角与挥拍角之间的相位关系,能保证该分量的方向基本上不变,从而实现稳定的推进。每个自由度的运动均为周期性往复运动,通过一个舵机来实现,其运动曲线具有统一的形式:

$$\theta_i = X_i + R_i \cos(2\pi f_i t + \Delta\tilde{\phi}_i) \quad (1)$$

式中, X_i 是对初始位置的偏离; R_i 、 f_i 为往复运动的振幅、频率;各自由度运动之间的相互协调、耦合关系在本文中均简化为相位差别,以 $\Delta\tilde{\phi}_i(t)$ 表示。

在稳定推进的同时,通过各尾鳍的运动组合可有效控制侧向力,从而使得航行器具有良好的稳定性和机动性。在巡游时,如图 1(b)所示,利用四尾鳍的对称性,可抵消侧向力和力矩,抑制本体晃动而增强稳定性;挥拍角与攻角的相位差直接影响推进力大小、方向,使得航行器前进、后退速度没有差别;一侧两鳍不动,另一侧两鳍拍动,如图 1(c),则周向作用力不能抵消,从而产生较大的偏航力矩,可实现转弯机动。同时,相同的推进需求,也可以通过鳍运动的不同组合来实现。以转弯机动为例,图 1(c)中右侧两鳍不同设置均能实现左转机动,两鳍水平状态时对机动能力几乎没有影响,而竖直状态时则可形成较大的有效攻角以增强机动能力,更适用于高速巡游时的机动需求。除此之外,还可以通过设置两侧鳍挥拍角与攻角的相位差不同使得推力方向相反,从而仅产生净力矩实现原地转向。总而言之,准确、及时地确保各鳍按照所设计的曲线运动,是航行器稳定航行、灵活机动的前提基础,这对多自由度运动的联合控制提出了更高的要求。同时,在航行过程中,航行器不可避免地会受到外部环境各种难于意料的干扰,有必要根据外部干扰引入反馈控制,以保证航行稳定性。为此,设计由陀螺仪检测航行器的偏航和俯仰角度的变化,将陀螺仪的反馈信号引入控制模型,通过调整尾鳍的运动进行姿态修正。为了防止通过尾鳍运动进行调节的过于频繁,从而影响正常的运动,对于可能出现的滚转,通过一个可以转动的滑块进行调节。此外,推进器内部还加入了可以调节沉浮以及初始重心的模块。转动的滑块以及沉浮模块均由舵机控制实现,初始重心调节模块由步进电机控制实现。

2 控制系统和 CPG 模型

为了实现推进器的巡游、偏航、俯仰等机动动作,四个尾鳍需要相互协调运动。尾鳍运动如图 1(a)所示,共有八个自由度,且同一尾鳍挥拍角与攻角之间、相邻尾鳍挥拍角之间以及相邻尾鳍攻角之间互有耦合,这些耦合关系可由图 2 所示的拓扑结构直观表示。

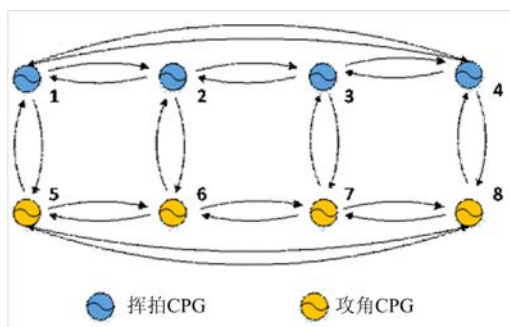


图 2 CPG 拓扑结构图

Fig. 2 CPG topology

每一自由度运动均表现为角度随时间的变化,因此可以很方便地由舵机加以驱动。如图 3 所示,舵机组通过机械结构与鳍面直接连接,给定舵机驱动信号后,鳍面的运动也就确定了。而运动自由度较多,且相互间还存在耦合关系,使得要恰当且及时地给出各舵机的控制信号 θ_i 并不容易。由方程(1)可见,每个自由度运动均可由三个参数(f_i , R_i , X_i)及相位关系生成。很显然,给定参数通过相应系统生成信号比直接给定 $\theta_i = \theta_i(t)$ 要方便得多。故而,航行器采用如图 3 所示的控制系统:采用 PIC32MX220F032B 单片机作为控制核心,通过无线信号将参数(f_i , R_i , X_i)输入单片机;陀螺仪监测航行器的航向信息,将偏航角、俯仰角等反馈信号输入单片机;单片机实时求解控制模型,输出控制舵机运

动的信号 θ_i , 从而实现尾鳍相应的运动。对于滚转的反馈调节、沉浮模块以及初始重心的调节均由 PIC16F877A 单片机单独控制。

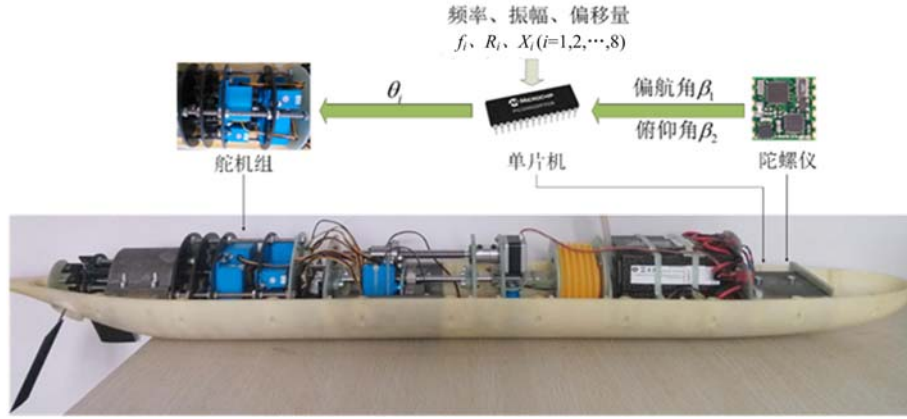


图3 样机内部实物图及控制系统

Fig. 3 Internal photo of the prototype and its control system

如前所述,尾鳍运动模仿鸟类扑翼动作设计,都是有节律的运动,且相互耦合关系可由相位差描述,所以本文采用 CPG 模型控制。目前,用于机器人控制的比较典型的 CPG 模型大致可划分为以下三类:递归神经网络、七鳃鳗型相位振荡器和 Van der Pol 型神经元振荡器^[14]。由于相位振荡器模型中的参数具有明显的振幅、频率、相位等关系,本文采用相位振荡器模型,建立如下振荡器模型:

$$\dot{\phi}_i = 2\pi f_i + \sum_j [a_{ij} r_j \tanh(\phi_j - \phi_i - \varphi_{ij})] \quad (2)$$

$$\ddot{r}_i = a_r \left[\frac{a_r}{4} (R_i + \text{feed}_{r,i} - r_i) - \dot{r}_i \right] \quad (3)$$

$$\ddot{x}_i = a_x \left[\frac{a_x}{4} (X_i + \text{feed}_{x,i} - x_i) - \dot{x}_i \right] \quad (4)$$

$$\theta_i = x_i + r_i \cos(\phi_i) \quad (5)$$

式中,下标 $i=1,2,\dots,8$ 为振荡器编号; a_r, a_x, a_{ij} 均为常数,分别是振幅、偏移量的常数增益及 i, j 自由度运动的耦合强度,其值直接影响控制模型的收敛速度。 $\text{Feed}_{r,i}$ 和 $\text{feed}_{x,i}$ 分别为振幅和偏移量的反馈输入,具体形式在后文 3.4 节阐述。 ϕ_i, r_i, x_i 分别为第 i 个振荡器的实时相位、振幅和偏移量,据此生成尾鳍第 i 个自由度的运动控制信号 θ_i 。 φ_{ij} 是预先设定的 i, j 自由度运动的相位差:

$$\varphi_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & -\varphi_{21} & 0 & -\varphi_{41} & -\varphi_{51} & 0 & 0 & 0 \\ \varphi_{21} & 0 & -\varphi_{32} & 0 & 0 & -\varphi_{62} & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_{32} & 0 & -\varphi_{43} & 0 & 0 & -\varphi_{73} & 0 \\ \varphi_{41} & 0 & \varphi_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varphi_{84} \\ \varphi_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varphi_{65} & 0 & -\varphi_{85} \\ 0 & \varphi_{62} & 0 & 0 & \varphi_{65} & 0 & -\varphi_{76} & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_{73} & 0 & 0 & \varphi_{76} & 0 & -\varphi_{87} \\ 0 & 0 & 0 & \varphi_{84} & \varphi_{85} & 0 & \varphi_{87} & 0 \end{bmatrix}$$

式中每一个非零元素均表示相应自由度运动之间存在直接耦合关系,其具体取值根据推进要求确定。

方程(2)来源于 Acebrón 等的工作^[15],他们对该模型进行了系统的讨论,这里不再赘述。各 CPG 之间相位关系的耦合主要由耦合项决定,已有的相位振荡器模型耦合项大多采用正弦函数^[1, 12, 13, 15]。当耦合项采用正弦函数时,如果两个 CPG 频率相同且初始耦合项为 0,则两个 CPG 之间的相位差会一直保持为 0,将不能收敛到设定值,从而无法实现 CPG 之间相位差的调节。为了消除上述影响,本文用双曲正切函数代替正弦函数。图 4 列出了相位差 φ_{ij} 由 π 变为 $\pi/2$ 的过程中,两个 CPG 在耦合项分别为正弦函数和双曲正切函数时的收敛性。从图中可以看出,相位差 $\Delta\phi_{ij} = \phi_j - \phi_i$ 初始均为 0。当相位差

$\varphi_{ij} = \pi$ 时,耦合项为正弦函数则耦合项为零,相位差保持初始值一直不变,不能收敛于 $\varphi_{ij} = \pi$; 当 φ_{ij} 变为 $\pi/2$ 后,耦合项非零,故而相位差逐渐收敛于设定值。反之,耦合项为双曲正切函数时,在所有情况下均能保证 $\Delta\phi_{ij}$ 收敛于 φ_{ij} 。另外,从收敛速度上来看,耦合项的两种取法并没有明显差别。需要说明的是,为了更清楚地看到收敛过程,图中特意选取了较小的耦合强度 $\alpha_{ij} = 2$, 大约在 1s 左右完成相位变化。

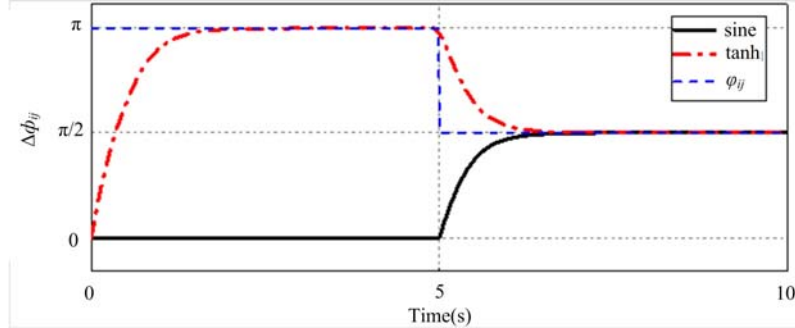


图 4 正弦函数和双曲正切函数对不同相位差的收敛性

Fig. 4 The convergence of phase difference of sine and hyperbolic tangent functions

振幅模型方程(3)和偏移量模型方程(4)具有相同的形式,因此具有相同的性质,这里仅考察振幅模型的性质。图 5(a)给出了 $r-\dot{r}$ 相图,其中振幅设定值 $R = \pi/6$ 、增益系数 $a_r = 20$ 。可以看到,振幅稳定收敛于设定值 R 。从图中还可以看到,在演化过程中 r 可能为负值,但考虑到最终信号 θ 的波动性质,这种过程中的“负振幅”并不会对最终的稳定信号带来实质影响。方程(5)为控制舵机的输出信号,由方程(2)~(4)中的变量组合而来,图 5(b)在 $\theta-\dot{\theta}$ 相平面内给出了不同初始条件下,也即各模型初始变量 r_0, x_0, ϕ_0 取不同值时,舵机控制信号的演化过程。可以看到,信号稳定收敛于椭圆形极限环,该极限环的中心位置为 $(X, 0)$, 由设定偏移量决定;长短半轴分别为 $R, 2\pi Rf$, 由设定振幅、频率决定。该信号正是由方程(1)描述的舵机所需要的控制信号。

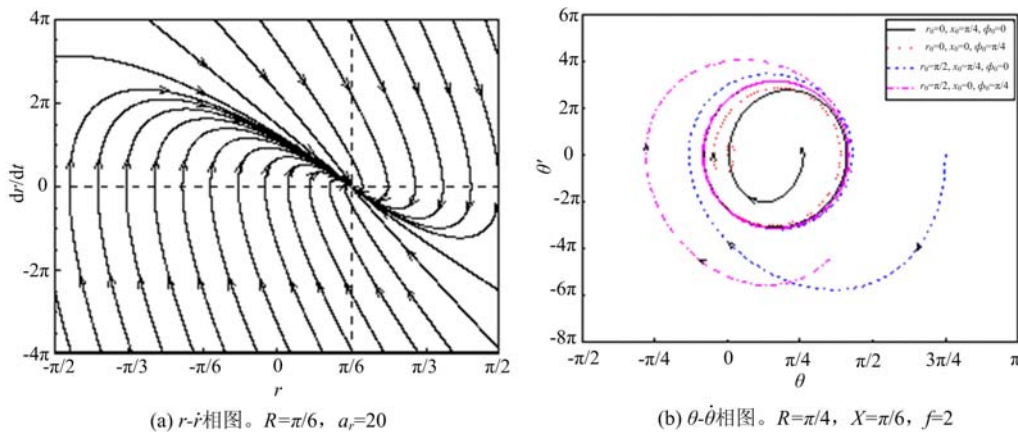
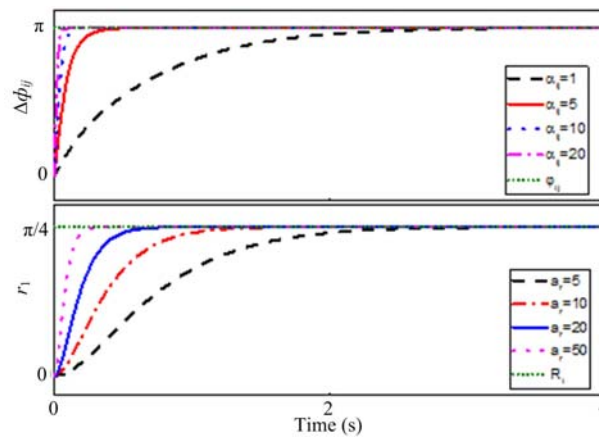


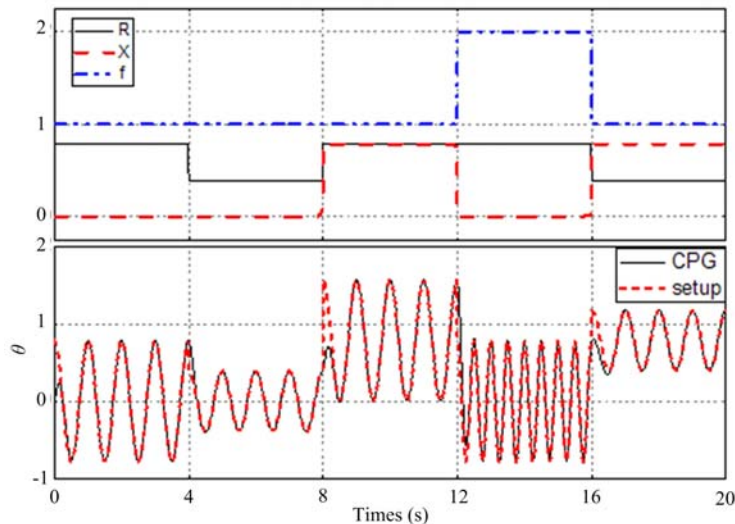
图 5 $r-\dot{r}$ 和 $\theta-\dot{\theta}$ 相图

Fig. 5 Phase diagram of $r-\dot{r}$ and $\theta-\dot{\theta}$

CPG 模型中 f_i, R_i, X_i 和 φ_{ij} 是调节尾鳍运动、实现推进器各种姿态的主要参数,是控制模型的目标参数; a_r, a_x, α_{ij} 是自由参数,分别决定了振幅、偏移量及各 CPG 之间相位差的收敛速度。为了使 CPG 具有合适的收敛速度,需探究这些参数取值的影响。由于振幅与偏移量的演化方程(3)、(4)具有完全相同的形式,下面仅讨论振幅增益系数 a_r 和耦合强度 α_{ij} 的影响。初始振幅、相位均设为零, $R_i = \pi/4, \varphi_{ij} = \pi, f_i = 1\text{Hz}$ 。如图 6 所示, α_{ij}, a_r 越大,则收敛速度越快。当 $\alpha_{ij} = 5, a_r = 20$ 时,相位差和振幅均能在 0.5s 之内到达设定值。考虑到在实际航行中,尾鳍摆动频率在 1Hz 左右,换言之,在一个摆动周期之内摆动参数可以调整到新的设定值,这是可以接受的。另外,在调整参数时,也必须为舵机预留一定的响应时间,因此,选取更大的参数以获取更快的收敛速度,并无实际意义。故而,实际使用中自由参数设定为 $\alpha_{ij} = 5, a_r = a_x = 20$ 。

图6 耦合系数 α_{ij} 和增益系数 a_r 对收敛性的影响Fig. 6 The influence on convergence of couple coefficient α_{ij} and gain coefficient a_r

为了进一步考察CPG模型,图7给出了振幅 R 、偏移量 X 、频率 f 相继变化时CPG模型的响应。如图所示,初始时 $R = \pi/4$, $X = 0$, $f = 1\text{Hz}$;在 $t = 4\text{s}$ 时,振幅突然变为 $\pi/8$;在 $t = 8\text{s}$ 时,偏移量突然变为 $\pi/4$ 、同时振幅恢复为 $\pi/4$;在 $t = 12\text{s}$ 时,频率突然变为 2Hz 、同时偏移量恢复为零;在 $t = 16\text{s}$ 时,振幅、偏移量和频率同时变化,分别变为 $R = \pi/8$, $X = \pi/4$, $f = 1\text{Hz}$ 。为方便比较,图中同时给出了按照方程(1)由参数直接确定的信号,可以看出,当参数发生突变时,CPG模型大约在半周期内即可将输出信号恢复到稳定的新参数状态。同时,也可以看到,CPG信号在参数突变时仍然平滑地过渡,保证了驱动机构的运行稳定。

图7 CPG模型对参数 R 、 X 、 f 变化的响应Fig. 7 The effect on CPG of parameter R , X , f change

3 运动姿态的控制及反馈调节

3.1 巡游及推进方向转换

巡游是航行器最基本的运动状态。为了提高巡游的稳定性,尾鳍运动设计应尽可能地消除侧向力和滚转力矩。为此,四尾鳍频率、振幅均相同,各角度均无偏移量;同一鳍挥拍角与攻角相位相差 $\pi/2$,相对两鳍挥拍角、攻角相位相同,相邻两鳍则相差 π 。巡游时的参数取为 $R = \pi/4$, $X = 0$, $f = 1\text{Hz}$ 。图8(a)给出了从静止启动到稳定前向推进时各鳍运动CPG曲线,并同时显示了尾鳍在稳定巡游推进时一个周期内四个典型时刻的拍动姿态。毫无意外地,CPG曲线在一个周期之内即到稳定推进状态,尽管此时航行器仍处于加速阶段,还远未达到巡游状态。

航行器巡游到倒游的转换是较常用的一种机动动作。本文推进器的设计使得实现倒游非常方便, 仅需将巡游时攻角的相位增加 π , 推力即可反向。图 8(b) 给出了从巡游到倒游转换时的 CPG 信号以及倒游时尾鳍的典型时刻摆动姿态。在 4s 之前尾鳍保持巡游推进, 4s 时开始调整攻角相位, 在 4.7s 完成调节, 进入稳定的向后推进状态。

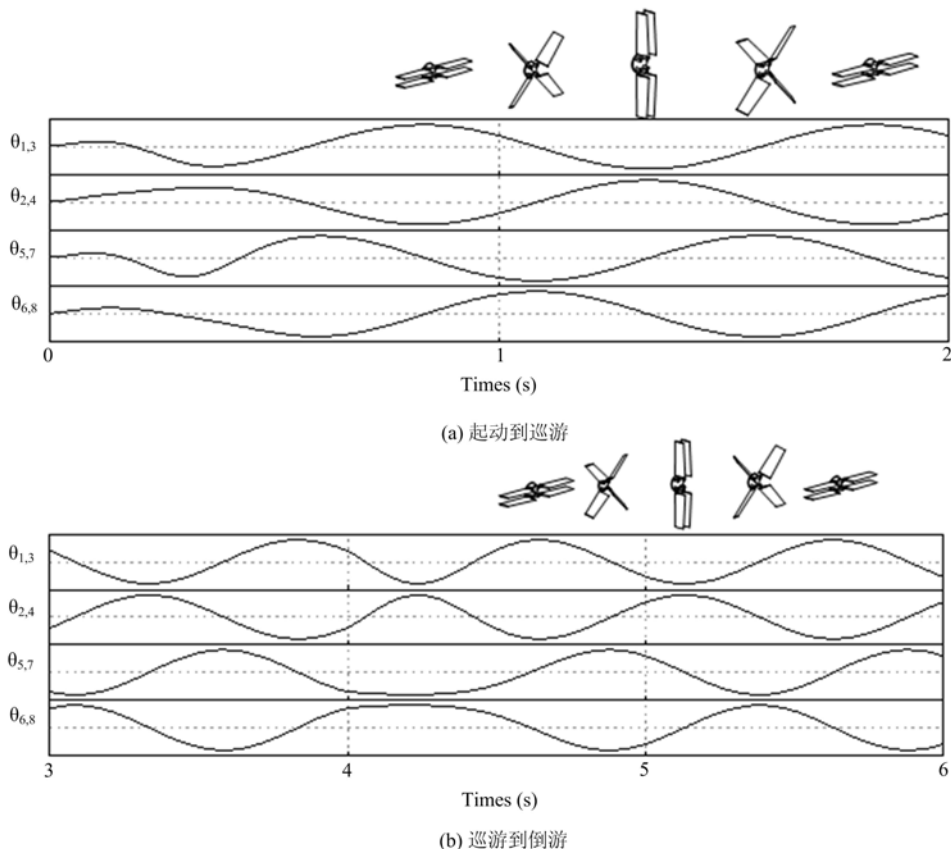


图 8 航行器巡游以及从巡游到倒游转换时 CPG 的输出角度及相应的姿态

Fig. 8 CPG output angle and gesture when cruising and converting from cruising to back sailing

3.2 偏航和俯仰机动

实现从直游到偏航和俯仰的转换, 对于航行器本身的机动性和巡游时通过反馈调节实现其航行稳定性都是不可缺少的。通过挥拍角和攻角振幅、偏移量、相位的不同组合, 可以得到多种偏航和俯仰的方式。以巡游到左转的转换为例, 由于航行器采用两对对称尾鳍推进, 所以只需使左右两对尾鳍拍动的振幅不同, 即可产生偏航力矩; 振幅相差越大, 偏航力矩越大。其中, 一种特例如图 9(a) 所示, 右侧两尾鳍的挥拍角和攻角振幅、频率均为 0, 挥拍角偏移量为 $\pm \pi/4$, 即该两鳍不拍动, 仅起舵面作用。另外, 通过控制挥拍角与攻角的相位差, 如图 9(b) 所示, 使左右两对尾鳍产生的推力方向相反, 同样可以产生偏航力矩, 而且由于没有净推力, 航行器巡游速度近乎为零, 相比于前一种偏航方式拥有更小的转弯半径。

图 9 中分别给出了两种左转机动方式的 CPG 输出曲线, 4s 之前正常巡游, 4s 时开始左转, 第一种方式第 1、2、5、6 自由度(右侧鳍挥拍角、攻角)均变为常数, 其他不变; 第二种方式则仅需要调整第 7、8 自由度, 其相位增加 π , 其他不变。不论是哪种方式, 都可以在 1 个周期内完成转换。

由于结构的对称性, 右偏航和俯仰机动类似可以实现。机动动作完成之后, 将尾鳍拍动再转换为巡游状态, 控制过程仍然类似, 不再赘述。至于判断机动动作的完成与否, 利用后述航向反馈即可。

3.3 反馈控制

推进器在巡游的过程中由于外界的环境扰动可能会出现滚转、俯仰、偏航, 从而影响其航行稳定性, 可能使推进器偏离原来的航向。为了消除滚转, 在推进器内部布置可在横截面内转动的滑块, 通过倾角传感器检测滚转角度的变化来实时反馈调节。对于偏航和俯仰, 设置陀螺仪检测偏航角 β_1 和俯仰角 β_2

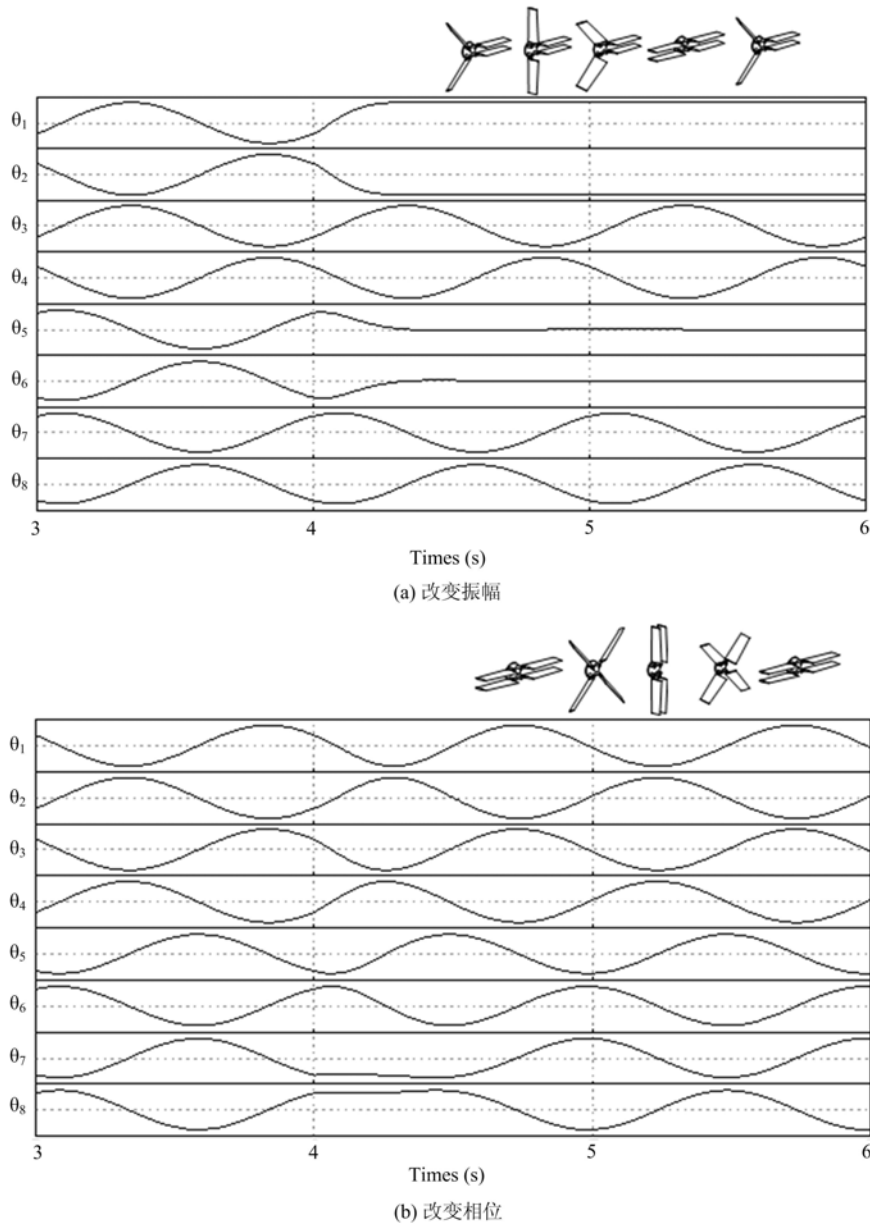


图9 两种从巡游到向左偏航转换方式的 CPG 的输出及尾翼的姿态

Fig.9 CPGs output and tails posture when converting from cruising to yaw left of two different types

(逆时针方向为正),而设定航向以 $\beta_{1,0}$ 、 $\beta_{2,0}$ 表示。当实际航向偏离设定航向时,则以角度信息为基础,生成反馈信号,对航向进行校正。能改变航向的方式多种多样,本文如方程(3)、(4)所示,选择调整相应自由度运动的振幅、偏移量,以利用各鳍拍动的不对称而生成对应的力矩,控制航行器姿态,回复到设定航向。该方法可以方便地将反馈信息引入到 CPG 的反馈项中,同时,振幅、偏移量可连续调节,因而在一定范围内可获得任意大小的力矩,使得反馈控制更为精准。在偏离较大时,调节力矩应较大以实现快速校正;偏离较小时调节力矩应较小以精准微调,避免出现可能因调节过度而来回晃动的情况。为此,引入调节系数

$$k_j = \begin{cases} 36 |\beta_j - \beta_{j,0}| / \pi, & |\beta_j - \beta_{j,0}| \leq \pi/36 \\ 1, & |\beta_j - \beta_{j,0}| > \pi/36 \end{cases} \quad (6)$$

使得调节幅度与偏离程度直接联系起来。当航向右偏时, $\beta_1 < \beta_{1,0}$, 故而需要适当左转机动,可通过减小右侧两鳍(1,2)挥拍角及攻角幅度来实现;同时,对两鳍挥拍角分别施加偏移量,使得两鳍靠近,鳍面更接近水平面,减小左转时的阻力。从而反馈信号如下:

$$\begin{aligned} feed_{r,i} &= \begin{cases} -k_1 R_i, & i = 1, 2, 5, 6, \\ 0, & i = 3, 4, 7, 8 \end{cases} \\ feed_{x,i} &= \begin{cases} k_1 R_1, & i = 1 \\ -k_1 R_2, & i = 2 \\ 0, & i = \text{others} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

对应地,当航向左偏时, $\beta_1 > \beta_{1,0}$,调节针对左侧两鳍(3,4)进行,反馈信号为:

$$\begin{aligned} feed_{r,i} &= \begin{cases} 0, & i = 1, 2, 5, 6 \\ -k_1 R_i, & i = 3, 4, 7, 8 \end{cases} \\ feed_{x,i} &= \begin{cases} k_1 R_3, & i = 3 \\ -k_1 R_4, & i = 4 \\ 0, & i = \text{others} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

俯仰反馈调节也可类似实现。当航向下俯时, $\beta_2 < \beta_{2,0}$,调节针对下方两鳍(2,3)进行,反馈信号为:

$$\begin{aligned} feed_{r,i} &= \begin{cases} 0, & i = 1, 4, 5, 8 \\ -k_2 R_i, & i = 2, 3, 6, 7 \end{cases} \\ feed_{x,i} &= \begin{cases} k_2 R_2, & i = 2 \\ -k_2 R_3, & i = 3 \\ 0, & i = \text{others} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

当航向上仰时, $\beta_2 < \beta_{2,0}$,调节针对上方两鳍(1,4)进行,反馈信号为:

$$\begin{aligned} feed_{r,i} &= \begin{cases} -k_2 R_i, & i = 1, 4, 5, 8 \\ 0, & i = 2, 3, 6, 7 \end{cases} \\ feed_{x,i} &= \begin{cases} -k_2 R_1, & i = 1 \\ k_2 R_4, & i = 4 \\ 0, & i = \text{others} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

当航行器同时出现偏航和俯仰时,采用交替方式调节航向,以避免同一尾鳍运动出现多个反馈信号。

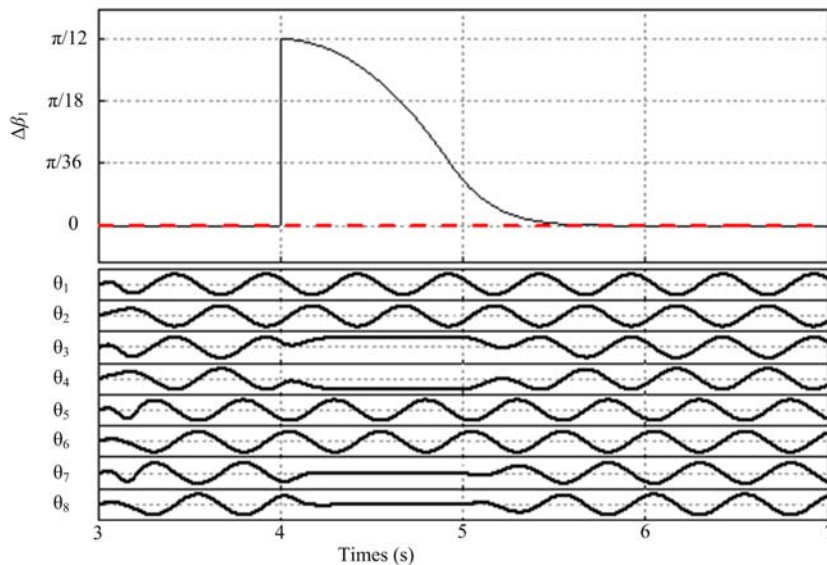


图 10 角度向左偏离时的反馈调节

Fig. 10 Feedback adjustment of angle deviation to the left

为了验证反馈控制方法的可行性,对模型样机突然偏离航向后反馈调节进行了模拟仿真,结果如图 10 所示。巡游时挥拍幅度 $R_i = \pi/4$ ($i = 1, 2, 3, 4$)、攻角幅度 $R_i = \pi/6$ ($i = 5, 6, 7, 8$)、频率 $f_i = 1\text{Hz}$ 。

2s时突然出现扰动,使航行器向左偏离航向 $\Delta\beta_1 = \beta_1 - \beta_{1,0} = \pi/12$,反馈控制随即介入,左侧两鳍(3,4)不再挥拍,并静止于最大偏移位置;右侧两鳍继续拍动,获得最大的偏航力矩,使得 $\Delta\beta_1$ 逐渐变小,表明航行器逐渐向设定航向靠近。3.9s时 $\Delta\beta_1$ 降到 $\pi/36$,左侧两鳍开始拍动且振幅逐渐增加,偏航力矩随之变小, $\Delta\beta_1$ 继续减小,5.1s时航行器完全回到设定航向,所有鳍的运动均恢复到正常巡游状态。

4 结论

针对四尾鳍推进系统,分析尾鳍运动的规律及相互之间的耦合状态,建立了中枢模式发生器(CPG)控制模型,用于实时生成多个自由度运动的控制信号。将鳍间耦合关系以相邻鳍间的相位差描述,并引入反馈控制,增强航行器巡游的稳定性。

通过控制仿真,考察了CPG模型参数对输出信号收敛性的影响,考虑驱动机构的响应时间,确定了参数取值,使得CPG模型输出信号在0.5s之内即可收敛于设定信号。随后,对正常巡游、巡游转倒游以及改变航向进行了仿真,结果表明,输出的控制信号变化连续,且在1s内均可完成状态转换。最后,对航行器偏离设定航向时提出了一种反馈控制方法,确定了左右偏航、上下俯仰时的反馈输入信号,仿真表明反馈控制是迅速且稳定的。

参考文献:

- [1] Crespi A, Lachat D, Pasquier A, et al. Controlling swimming and crawling in a fish robot using a central pattern generator[J]. *Autonomous Robots*, 2008, 25:3—13.
- [2] Sfakiotakis M, Lane D M, Davies J B C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999, 24:237—252.
- [3] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S. An efficient swimming machine[J]. *Scientific American*, 1995, 272:64—71.
- [4] Li W, Jianhong L, Tianmiao W, et al. Design and experiment of a underwater vehicle based on capacity of voyage [J]. *Journal-Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34:340.
- [5] Hu H, Liu J, Dukes I, et al. Design of 3D swim patterns for autonomous robotic fish[C]. *Intelligent Robots and Systems*, 2006 IEEE/RSJ International Conference on; IEEE, 2006:2406—2411.
- [6] Yu J, Wang M, Tan M, et al. Three-dimensional swimming[J]. *Robotics & Automation Magazine*, IEEE, 2011, 18:47—58.
- [7] Kato N. Control performance in the horizontal plane of a fish robot with mechanical pectoral fins[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, 25:121—129.
- [8] Georgiades C, German A, Hogue A, et al. AQUA: an aquatic walking robot. *Intelligent Robots and Systems [C]. 2004(IROS 2004) Proceedings 2004 IEEE/RSJ International Conference on; IEEE*, 2004:3525—3531.
- [9] Licht S C. Biomimetic oscillating foil propulsion to enhance underwater vehicle agility and maneuverability[D]. *Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution*, 2008.
- [10] 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, 32:248—255 (WANG Ming, YU Junzhi, TAN Min. Central pattern generator based control and implementation for a pectoral-fin propelled robotic fish[J]. *Robot*, 2010, 32:248—255(in Chinese))
- [11] Wilbur C, Vorus W, Cao Y, et al. A lamprey-based undulatory vehicle[J]. *Neurotechnology for Biomimetic Robots*, 2002:285—296.
- [12] 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, 315:1416—1420.
- [13] Ijspeert A J. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review[J]. *Neural Networks*, 2008, 21:642—653.
- [14] Zhang D, Zhu K. Computer simulation study on central pattern generator: From biology to engineering[J]. *International Journal of Neural Systems*, 2006, 16:405—422.
- [15] Acebrón J A, Bonilla L L, Vicente C J P, et al. The Kuramoto model: A simple paradigm for synchronization phenomena[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77:137.

On the CPG Control Strategy for Biomimetic Propeller System with Multi Motion Freedom Degrees

WANG Tong, GAO Dong-qi, ZHANG Shi-wu, QIN Feng-hua

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to improve navigation stability and maneuverability of a biomimetic autonomous underwater vehicle (AUV) designed to be propelled by combination of four caudal fins, which have many coupled motion freedom degrees, a stable and fast controlling scheme is vitally important to improve vehicle whole performance. According to the characteristics of caudal motion, a central pattern generator (CPG) model was established, which can control and coordinate caudal motion combination through 8 drive actuators to realize parade, backwards, yaw, pitch and other navigation states. To improve the navigation stability further, the yaw and pitch angles were monitored and fed back to the CPG model by gyroscope.

Keywords: central pattern generator(CPG); biomimetic propulsion; underwater propeller; feedback control