

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2015.0336

## 蛇形机器人水下 3D 运动建模与仿真

李立<sup>1,2</sup>, 王明辉<sup>1</sup>, 李斌<sup>1</sup>, 吕艳辉<sup>3</sup>, 郭宪<sup>1,2</sup>

(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. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 沈阳理工大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要:** 由于蛇形机器人具有多关节、超冗余自由度的特点, 以及水环境高度复杂非线性化, 使得蛇形机器人的水下 3 维步态难以通过实验进行验证、分析及优化针对这些问题, 根据蛇形机器人样机“探查者 III”, 搭建了水下运动的仿真分析系统. 首先, 分析了蛇形机器人水下运动时不同姿态下的水静力, 计算了机器人受到的附加质量力和黏滞阻力的线性项和非线性项, 并研究了流体力矩对水下运动的影响. 然后, 基于 Morison 方程建立了机器人与水交互的力学模型. 最后, 在仿真分析系统中对逐节下潜步态进行仿真, 分析机器人的运动性能, 并进行相应的实验. 通过前进速度、下潜速度、运动趋势的对比表明: 该力学模型能比较准确地模拟机器人与水环境的交互作用, 仿真分析系统能用来验证和分析蛇形机器人的水下 3 维运动步态.

**关键词:** 水下蛇形机器人; 力学模型; 水动力; 仿真分析

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2015)-03-0336-07

## Modeling and Simulation of Snake Robot in 3D Underwater Locomotion

LI Li<sup>1,2</sup>, WANG Minghui<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, LÜ Yanhui<sup>3</sup>, GUO Xian<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. College of Information Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** A snake-robot has many joints and degrees of freedom, and the underwater environment is highly complex and nonlinear, so it is very difficult to verify, analyze and optimize three-dimensional underwater gaits of a snake robot through experiments. To solve these problems, a simulation system for underwater locomotion is established based on the snake-robot prototype “Perambulator III”. Firstly, the hydrostatics of snake robot in different positions and orientations is analyzed, the added-mass forces, linear and nonlinear terms of the viscous drag force are calculated, and effects of fluid torques on movement of underwater robot are studied. Then, the mechanical model about interaction between robot and water is established based on Morison equation. Finally, the module by module dive gait is simulated in the simulation system, the movement performance of the snake-robot is analyzed, and the corresponding experiments are made. The forward speed, the diving speed, and the movement trend are compared, results show that the mechanical model can accurately simulate the interaction between the water environment and the robot, and the simulation system can be used for verification and analysis of the snake robot’s underwater 3D gaits.

**Keywords:** underwater snake robot; mechanical model; hydrodynamics; simulation and analysis

### 1 引言 (Introduction)

沼泽、液态环境、松软地表等非结构化环境给机器人的运动和控制带来了很大挑战, 而生物界中的蛇却能轻松地在这些充满挑战的环境中灵巧高效地运动. 一些学者在生物蛇身上找到了灵感, 观察并研究蛇形机器人的运动机理<sup>[1]</sup>, 研制出了能工作在不同环境下的蛇形机器人<sup>[2-3]</sup>, 水下蛇形机器人是其中一个重要的研究方向. 蛇形机器人多关节超

冗余自由度的特性能使运动更加灵活多变, 同时也为机器人的控制设计带来了严峻的挑战.

由于水的特殊的物理特性, 光和无线信号在水中传输会有明显的衰减和失真, 通过在试验中观察机器人的运动, 获取运动的参数以及通过实验来优化机器人的控制策略有一定的难度. 其次, 蛇形机器人的系统复杂, 步态模型正确性和控制参数对运动影响的不确定性给样机系统运行时带来了严峻的考验. 相比于蛇形机器人在陆地上的运动, 水下运

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61333016).

通信作者: 李立, lili@sia.cn 收稿/录用/修回: 2014-12-12/2015-02-17/2015-05-08

动接触力的力学模型更加复杂。

为方便蛇形机器人水下运动控制器的设计, Kelasidi 等<sup>[4]</sup>建立了水下运动的力学模型, 并对水下蜿蜒运动和鳗式运动 (eel-like motion) 进行了仿真分析对比。Yang 等<sup>[5]</sup>分析了水下运动受到的水动力和惯性力, 并基于凯恩动力学方程建立了蛇形机器人水下运动的动力学模型, 并通过行波运动的仿真分析验证了动力学模型的可行性。Chen 和 Friesen<sup>[6]</sup>通过实验定量地确定了黏滞阻力系数, 建立了模拟水下运动时身体-流体之间交互作用的模型, 并利用模型对鳗鲡鱼 2 维平面内的泳动进行了仿真分析, 得到了水下 2 维运动的力学模型。Zuo<sup>[7]</sup>基于水陆两栖蛇形机器人样机在多体动力学软件中建立了蛇形机器人的水下运动仿真系统, 仿真分析了水下蜿蜒运动的步态参数对机器人运动性能的影响, 优化了控制模型的控制参数。

然而 Kelasidi 假设机器人受到的浮力恒等于自身重力, 没有考虑机器人不同姿态时浮力对运动的影响, 仿真分析只能用于身体完全浸没在水中的情形。Yang 的动力学分析中没有考虑流体力矩对机器人的影响, 并忽略了黏滞阻力非线性项的作用。Friesen 通过实验建立的力学模型中各个力解析式都依赖于具体样机, 难以将力学模型扩展到 3 维运动。Zuo 虽然在动力学仿真软件中建立了水下运动的仿真系统, 力学模型没有分析水静力和流体力矩的作用, 所建立的力学模型过于简单。

本文考虑机器人运动时部分或完全进入水中, 计算不同方向和位姿情况下的水静力; 并综合考虑黏滞阻力线性项和非线性项以及水力矩的影响建立水下 3 维运动的力学模型。

## 2 水下蛇形机器人运动力学模型的建立 (Dynamic modeling of underwater snake robot)

蛇形机器人在水中有规律地摆动身体和水产生相对运动, 每个关节模块会受到水产生的反作用力, 从而产生相应的运动。建立一个精确的水下运动受力的力学模型是准确模拟蛇形机器人水下运动的关键。

为了方便描述关节模块运动时的受力, 定义了机器人的坐标系, 如图 1 所示。x 方向为机器人关节模块的轴线方向。 $\theta$  为在全局坐标系下, 关节模块轴线与 OXY 平面的夹角 ( $\theta < 180^\circ$ )。 $\varphi$  为在局部坐标系下, oxy 平面 (偏航平面) 内相邻两个关节模块轴线的夹角 ( $\varphi < 180^\circ$ ), 且  $\varphi_i = \theta_i - \theta_{i-1}$ 。

同理  $\psi$  是定义在 oxz 平面内的夹角。

假设水环境是不可压缩、无旋的黏性流体<sup>[8-10]</sup>, 将蛇形机器人的关节模块近似看作是规则的圆柱体, 整个身体是由多个模块化的关节模块组成的链式结构。

机器人在水中受到的力包括 2 部分: 水静力和水动力。水静力是由机器人相对于水平面的位姿决定的, 而与机器人和水的运动状态无关, 它包括自身的固有的重力和与浸没在水中体积成正比的浮力以及位姿变化产生的浮力附加转矩。水动力由机器人和流体的运动状态及物理属性决定, 包括流体力及流体力矩, 其中流体力主要为附加质量力、黏滞阻力 (线性项和非线性项) 两部分。

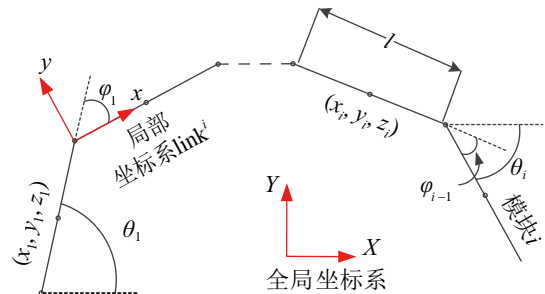


图 1 蛇形机器人结构模型

Fig.1 Structural model of the snake-like robot

### 2.1 水静力

蛇形机器人在水环境中运动时关节模块的可能的位姿有 9 种, 其中关节模块与水平面平行和垂直作为特殊位姿合并在其中。关节模块可能的位姿及其数学描述如图 2 所示, 图中  $d_1$  和  $d_2$  分别是圆柱体形状关节模块的左右两个底面中心到水平面的距

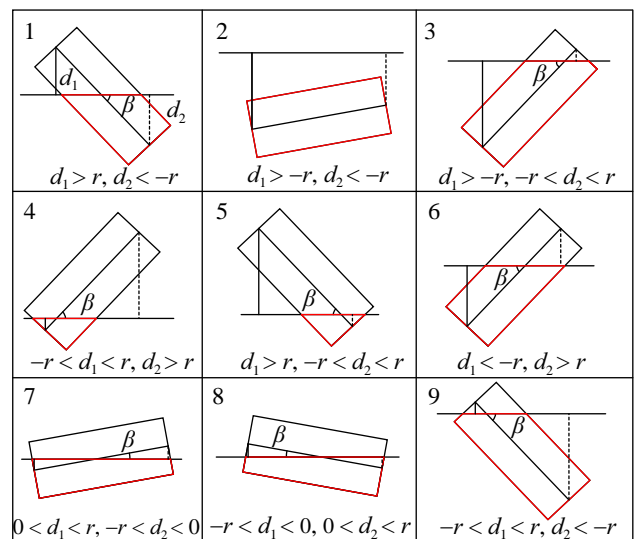


图 2 关节模块在水中不同的位姿

Fig.2 Different postures of joint module in the water

离（分别由实线和虚线表示），底面圆心在水平面上其值大于0，在水平面之下小于0，正好处于水平面时等于0， $r$ 为半径， $l$ 为长度。

对于质量均匀的圆柱体，当其完全浸没在水中时，浮力和重力的作用点重合在几何中心<sup>[11]</sup>。当关节模块不完全浸没在水中时，浮力的作用点 $p$ 在重力方向上偏离几何中心 $O$ ，此时重力和浮力的合力不等于0，在关节模块上会产生一个浮力的附加力矩，驱动关节模块旋转达到新的平衡。为方便将蛇的各个关节模块等效为质点分析运动时的受力，建立力学模型前先将浮力等效平移到关节模块的质心位置。 $F'_b$ 和 $\tau_b$ 分别是浮力从浮心 $p$ 点等效平移到质心 $O$ 点的浮力和等效平移产生的附加力矩。浮力由关节模块相对于水平面的位置和姿态决定，大小和浸没在水中的体积成正比。

等效至 $O$ 点处的浮力和附加力矩的表示为

$$V' = \iiint_{\Omega} dv \tag{1}$$

$$F_{b,i} = F'_{b,i} = \rho g V' \tag{2}$$

$$\tau_{b,i} = F_{b,i} \cdot d$$

式中 $\Omega$ 是浸没在流体中的封闭区域， $V'$ 是闭区域 $\Omega$ 的体积， $d$ 是全局坐标系下 $p$ 在全局坐标系 $X$ 轴上的投影， $\tau_b$ 的方向由浮心 $p$ 相对于形心 $O$ 在 $X$ 方向的位置来决定， $d > 0$ 为逆时针方向，反之为顺时针方向。

以第3种情况为例分析关节模块受到的水静力，如图3所示：关节模块大部分浸没在水中，位姿的数学描述为 $d_1 < -r$ ， $-r < d_2 < r$ 。浸没在水中的体积及这部分体积在局部坐标系的质心为

$$\begin{cases} v = \int_0^a \pi r^2 dx + \int_a^l \int_{-r}^{k(x-a)+r} 2\sqrt{r^2 - y^2} dy dx \\ \bar{x} = \int_0^a x \pi r^2 dx + \int_a^l x \int_{-r}^{k(x-a)+r} 2\sqrt{r^2 - y^2} dy dx \\ \bar{y} = \int_{-r}^b y l 2\sqrt{r^2 - y^2} dy + \int_b^r y 2\sqrt{r^2 - y^2} \left(\frac{y-r}{f} + a\right) dy \\ d = \cos\beta(\bar{x} - l/2) + \bar{y} \sin\beta \end{cases}$$

式中 $a$ 、 $b$ 、 $k$ 是为方便计算引入的中间变量，

$$a = -\frac{d_1}{\sin\beta} - \frac{r}{\tan\beta}, \quad b = -\frac{d_2}{\cos\beta}, \quad k = -\tan\beta$$

浮力和浮力附加转矩由式(2)可求得，其它位姿用同样方法可求得。

### 2.2 水动力

关节模块摆动时受到的水动力由3部分组成：黏滞阻力<sup>[8,10,12]</sup>、附加质量力<sup>[13-14]</sup>和流体力矩<sup>[4]</sup>。机器人关节的摆动使身体周围的水产生了加速度，同时水也会对关节模块产生反作用力，这个反作用力就是附加质量力，是机器人前进的动力。机器人和水产生相对运动时，水会对机器人产生阻碍运动的效应，产生的黏滞阻力与模块的形状、表面材料和相对运动速度有关。关节模块的摆动改变了周围流场，在模块的尾部会产生一系列的漩涡。流体力矩就是由于这些漩涡从产生到消逝过程中在模块上产生的效应。

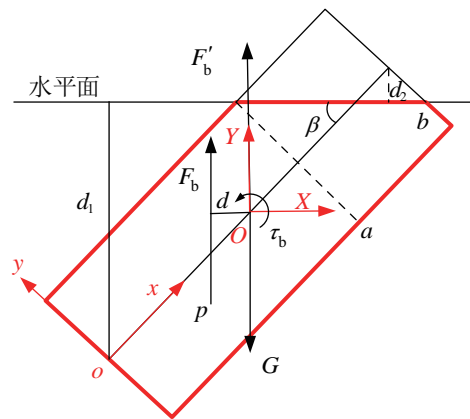


图3 水静力分析示意图  
Fig.3 Hydrostatics analysis

由于水下刚柔耦合的接触力模型比较复杂且Navier-Stokes方程无法得到精确的数值解<sup>[10]</sup>，本文基于Morison方程<sup>[12-14]</sup>研究水动力。为了定量地分析机器人的受力，将水下蛇形机器人的每个关节模块看作是独立的受力微元。作用在第 $i$ 个关节模块上的流体力为

$$f_{d,i} = f_{add,i} + f_{drag,i} \tag{3}$$

其中，

$$f_{add,i} = -\mu_A \hat{C}_A v_{r,i}^{link,i} \tag{4}$$

$$f_{drag,i} = -\mu_A \hat{C}_D \left( v_{r,i}^{link,i} + \left| v_{r,i}^{link,i} \right| v_{r,i}^{link,i} \right) \tag{5}$$

式中 $v_{r,i}^{link,i}$ 是关节 $i$ 局部坐标系下的相对速度<sup>[15]</sup>， $\mu_A$ 是与有效截面积相关的系数， $\hat{C}_A$ 和 $\hat{C}_D$ 是由关节模块形状和流体特性决定的3阶常数方阵：

$$\hat{C}_D = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho \pi C_f r l & & \\ & \rho C_D r l & \\ & & \rho C_D r l \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\hat{C}_A = \begin{bmatrix} 0 & & \\ & \rho\pi C_A r^2 l & \\ & & \rho\pi C_A r^2 l \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $l$ 、 $r$ 、 $\rho$  分别是关节模块的长度, 圆柱体半径和水的密度;  $C_f$  和  $C_D$  分别关节模块运动时切向和法向的黏滞阻力系数<sup>[16-17]</sup>, 它与关节模块表面附近边界层内流体的流态和柱体表面的粗糙度有关;  $C_A$  表示附加质量系数<sup>[12,18]</sup>; 蛇形机器人的身体细长, 轴线方向上的附加质量力可以忽略<sup>[12]</sup>.

关节模块在水中不仅受到流体力的作用还要受到流体力矩<sup>[19]</sup>的作用. 流体力矩是由于关节模块的旋转而产生的. 流体力矩直接关系到机器人的能量损耗, 因此考虑流体力矩的作用能使水下运动的力学模型更加精确. 作用在第  $i$  个关节模块上的流体力矩为

$$\tau_{d,i} = -\mu_A \lambda_1 \ddot{\theta}_i - \mu_A \lambda_2 \dot{\theta}_i - \mu_A \lambda_3 \theta_i |\dot{\theta}_i| \quad (8)$$

式中  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  是由关节模块形状和流体特性决定的 3 个参数.  $\lambda_1$  表示为

$$\lambda_1 = \frac{1}{6} \rho \pi C_M r^4 l^3 \quad (9)$$

式中,  $C_M$  是附加惯性系数, 它集中反映了由于流体的惯性及关节模块的摆动使柱体周围流场速度改变而引起的附加质量效应.

对于圆柱形的刚体, 其附加质量转矩可以归纳为一个简单的解析形式  $\tau_{add} = -\mu_A \lambda_1 \ddot{\theta}_i$ , 而总的阻力力矩<sup>[19]</sup>可以表示为

$$\tau_{drag} = -\mu_A \lambda_2 \dot{\theta}_i - \mu_A \lambda_3 \theta_i |\dot{\theta}_i| \quad (10)$$

式中

$$\lambda_2 = \frac{1}{3} \rho \pi C_f r l^3, \lambda_3 = \frac{1}{4} \rho \pi C_f r l^4 \quad (11)$$

综合来说, 矩阵  $\hat{C}_D$  和参数  $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  反映了关节模块受到的由水的黏滞特性引起的黏滞效应, 而  $\hat{C}_A$  和  $\lambda_1$  表征了关节模块受到的附加质量效应.

综上分析, 蛇形机器人水下运动的力学模型为

$$\begin{cases} \mathbf{f}_i = \mathbf{F}_{b,i} + \mathbf{G} + \mathbf{f}_{d,i} \\ \tau_i = \tau_{b,i} + \tau_{d,i} \end{cases} \quad (12)$$

式中  $\mathbf{f}_i$  为第  $i$  个模块所受到的所有作用力,  $\tau_i$  为受到流体的所有力矩作用.

$f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  为流体力  $\mathbf{f}_{d,i}$  在局部坐标系下 3 个方向的分量, 关节模块受到的水动力如图 4 所示.

### 3 仿真分析系统的设计 (Design of the simulation analysis system)

蛇形机器人水下运动的控制模型如果没有经过相应的验证, 直接在样机中进行试验, 可能会产生不可预料的结果, 甚至会损坏机器人. 此外蛇形机器人在水中运动会由于水的光学特性使观察和测量的数据产生一定的偏差, 得到的数据不利于准确分析机器人的运动状态和进行高效高机动性的优化. 使用动力学仿真软件建立数字化的虚拟样机, 在虚拟样机中进行仿真分析、验证控制模型以及高机动性高效性的优化是研究蛇形机器人水下运动的一种非常有效且可靠的途径<sup>[5]</sup>.

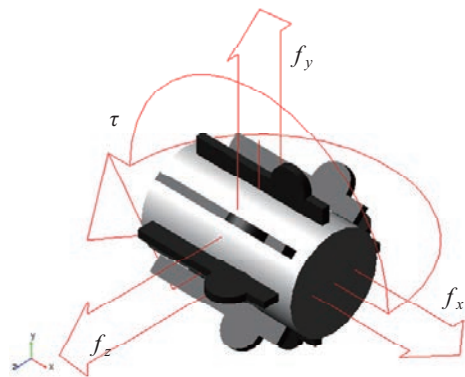


图 4 水动力分析示意图  
Fig.4 Hydrodynamics analysis

根据上述对仿真分析系统的描述设计蛇形机器人水下运动的仿真系统功能框图, 如图 5 所示.

仿真分析系统根据操作者输入的步态信息, 通过仿真计算向操作者返回机器人水下运动的速度、位置等状态信息. 仿真分析系统由 2 部分组成: 环境交互子系统和数据交互子系统. 环境交互子系统基于模拟机器人和水环境交互的力学模型进行水下运动的求解, 而数据交互子系统则作为环境交互子系统和操作者之间数据处理和传输的枢纽.

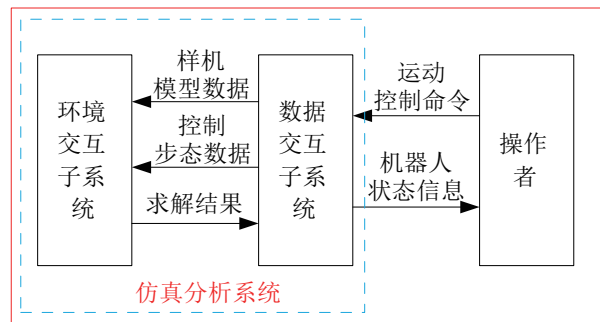


图 5 仿真分析系统框图  
Fig.5 The simulation system block diagram

本文基于模拟水下运动的力学模型并根据蛇形

机器人物理样机<sup>[20]</sup>的技术参数,在多体动力学仿真软件 ADAMS 中实现了蛇形机器人水下运动仿真分析系统.将力学模型编写成用户子程序生成仿真软件可以调用的动态链接库文件,基于物理样机的物理、结构参数建立了等效样机空间运动结构、质量、转动惯量等信息的几何模型.仿真软件的求解器模块与库文件以及几何模型组成了环境交互子系统,通过它进行机器人水下运动的动力学求解;仿真软件的数据接口及相应的交互界面构成了仿真分析系统的数据交互子系统.仿真分析系统的虚拟样机及人机交互界面如图 6 所示.

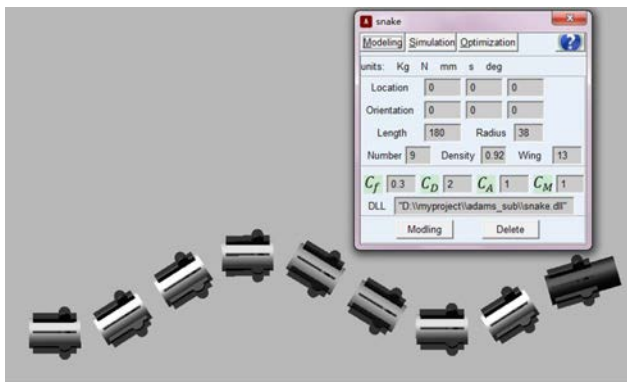


图 6 仿真分析系统的界面

Fig.6 The interface of simulation analysis system

#### 4 水下 3 维运动的仿真与实验 (Simulation and experiment of the underwater 3D locomotion)

本节分别通过对典型的水下 3D 运动控制模型的运动性能进行仿真分析和实验,验证力学模型能否比较精确地模拟蛇形机器人水下运动时与水的交互作用.

##### 4.1 水下 3 维运动步态

现在蛇形机器人已实现了多种步态:蜿蜒运动、直线运动、侧向运动、伸缩运动、翻滚运动、螺旋运动等.其中效率最高、最常用的是蜿蜒运动,生物蛇大部分的时间是用蜿蜒步态进行运动,在水中亦是如此<sup>[21-22]</sup>.逐节下潜是俯仰和偏航共同作用产生的运动:在局部坐标系下  $xy$  平面进行的蜿蜒运动和  $xz$  平面内进行前几个关节摆动固定偏角的叠加运动.逐节下潜的控制方程<sup>[22]</sup>为

$$\begin{cases} \varphi_i(t) = A \sin(\omega t + (i-1)\beta) & i = 1, \dots, 8 \\ \psi_i(t) = \begin{cases} 0, & t < T_i \\ D, & t \geq T_i \end{cases} & i = 1, \dots, 5 \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $A$ 、 $\omega$ 、 $\beta$  是蜿蜒运动的 3 个控制参数,分别

表示关节摆动的幅值、频率和初始相位角;  $t$  为仿真时间,  $T_i$  为第  $i$  个俯仰关节开始动作的时刻;  $\varphi$  和  $\psi$  分别是偏航角度和俯仰角度;  $D$  是下潜的角度.该控制步态的目标是蛇形机器人在投影平面内通过蜿蜒运动前进并在垂直平面内平缓地下潜到某一高度.

蛇形机器人下潜运动仿真和实验的基本参数如表 1 所示.

表 1 蛇形机器人基本参数

Tab.1 Initialization parameters of the snake robot

	符号	取值
关节数	$n$	9
关节长度	$l$	180 mm
半径	$r$	38 mm
桨高度	$w$	13 mm
密度比	$k_d$	0.92
黏滞阻力系数 (法向)	$C_D$	2
黏滞阻力系数 (轴向)	$C_f$	0.3
附加质量系数	$C_A$	1
附加惯性系数	$C_M$	1
振幅	$A$	0.64 rad
相位差	$\beta$	0.4 rad
频率	$\omega$	3 Hz
下潜角度	$D$	3°

##### 4.2 仿真分析

在蛇形机器人仿真分析系统中选择逐节下潜步态,并按表 1 的基本参数进行初始化,仿真时长设置为 30 s,步长为 0.01.不同视图下的头部关节模块运行轨迹和运行速度如图 7 和图 8 所示.

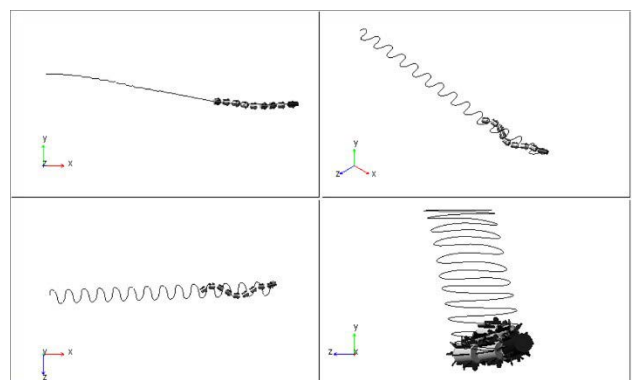


图 7 不同视图下的头部的运行轨迹

Fig.7 Trace of the head in different views

从图 7 可以看出蛇形机器人在全局坐标系下的  $oxz$  平面内进行蜿蜒运动,前进的速度约为 250 mm/s;在  $oxy$  平面内通过前 5 个关节的逐节

偏转引导整个身体平滑地下降, 在第 27 s 下潜了 900 mm.

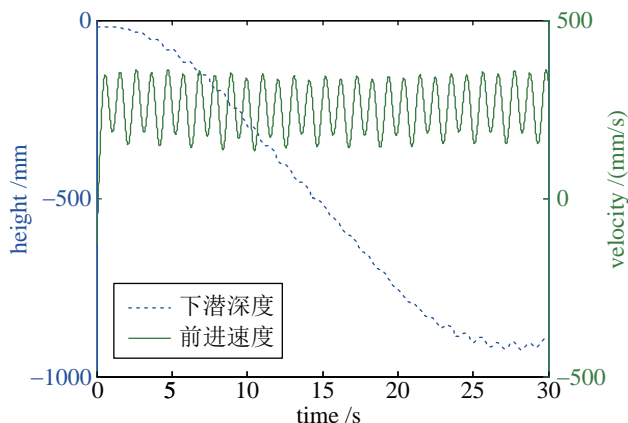


图 8 头部关节的速度和下潜深度

Fig.8 The velocity and submergence depth of the head

由于蛇形机器人的初始状态为直线构型, 且没有采用控制器进行闭环控制调节, 所以在  $z$  方向上出现了一定的偏移, 致使机器人的轨迹没有平行于  $x$  轴.

### 4.3 逐节下潜实验

蛇形机器人样机关节俯仰和偏航的最大转角为  $\pm 75^\circ$ , 直流伺服电机的最大转动角频率约为 3 Hz. 通过图 7 和图 8 可知仿真分析的结果与下潜运动步态预期的目的基本一致. 下潜运动的控制模型在仿真分析中得到了验证, 可以将控制步态移植到蛇形机器人物理样机的控制器中进行实验.

在蛇形机器人的控制台输入与上面仿真相同的下潜运动的控制信息, 通过串口线传输给蛇形机器人. 在长 10 m、宽 5 m、深 0.75 m 的水池中进行样机的下潜运动实验. 实验的视频截图如图 9 所示.

蛇形机器人从第 2 s 第 1 个关节偏转入水开始下潜, 第 5 s 前 5 个关节偏转相同角度, 引导整个身体大幅度滑入水中, 在第 16 s 完成下潜运动, 并恢复为蜿蜒运动前行. 从运动时的身体构型可以看出机器人在平面方向做蜿蜒运动、垂直平面依靠前几个关节的偏转引导身体后部分下潜滑入水中. 图 10 是下潜实验头部的运行轨迹和运行速度.

### 4.4 仿真与实验对比及误差分析

从图 7 和图 9 可以看出机器人运动仿真的运动趋势(蜿蜒和下潜)和实验比较吻合, 在水平面内进行蜿蜒前行在垂直平面通过前几个关节依序偏转引导整体下潜, 蜿蜒前进的同时进行下潜运动. 仿真结果与控制模型的目标一致, 力学模型比较准确地模拟了物理样机下潜运动的受力.

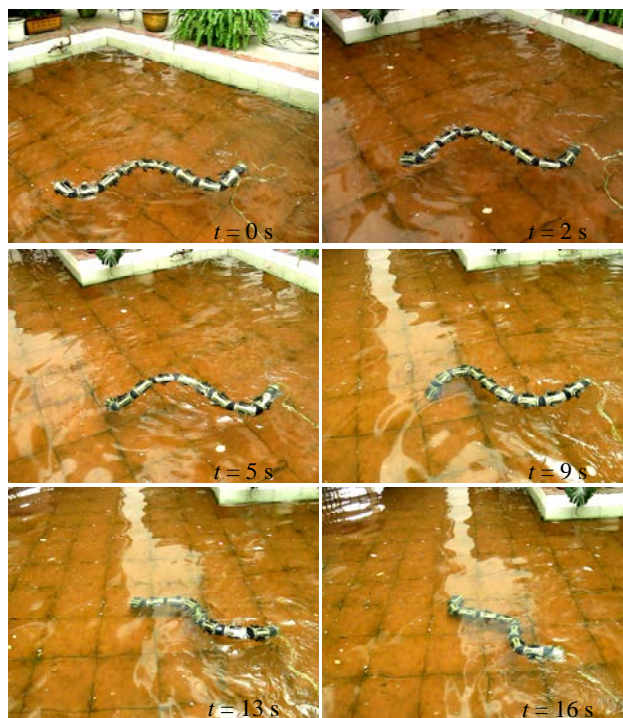


图 9 下潜实验视频截图

Fig.9 The video screenshots of the diving experiment

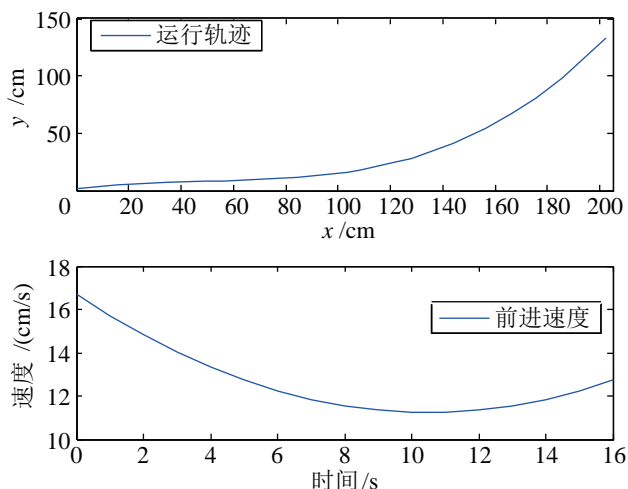


图 10 下潜实验头部的运行轨迹及速度

Fig.10 Trace and velocity of the head in the diving experiment

仿真和实验结果在运行的轨迹上不同程度地偏离了初始前进方向, 实验中前进的速度在下潜过程中有降低的趋势. 仿真结果和实验的误差主要来自以下 3 个方面:

- (1) 力学模型不精确. 本文没有考虑关节模块摆动时产生的涡街效应, 致使力学模型不够精确.
- (2) 仿真参数取值不准确. 仿真系统中参数应根据样机通过一系列的实验来确定, 但由于实验条件的限制, 参数取的是理论值.
- (3) 实验结果的计算中有不可避免的估算误差.

## 5 结论 (Conclusion)

本文对多关节自由度超冗余的蛇形机器人进行了水下运动的力学分析, 对不同姿态下的浮力进行了全面的分析, 研究了附加质量力、线性阻力、非线性阻力和流体力矩的作用, 建立了比较精确的水下 3D 运动的力学模型, 并基于力学模型搭建了蛇形机器人水下 3D 运动仿真系统. 通过逐节下潜运动的仿真和实验结果的对比验证了力学模型的正确性, 仿真分析系统为控制参数的优化提供了方便有效的途径.

## 参考文献 (References)

- [1] Jayne B C. Muscular mechanisms of snake locomotion – An electromyographic study of the sidewinding and concertina modes of *crotalus-cerastes*, *nerodia-fasciata* and *elaphe-obsoleta*[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1988, 140(1): 1-33.
- [2] Liljebäck P, Pettersen K Y, Stavadahl R, et al. Snake robots: Modelling, mechatronics, and control[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2012.
- [3] Liljebäck P, Pettersen K Y, Stavadahl R, et al. A review on modelling, implementation, and control of snake robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(1): 29-40.
- [4] Kelasidi E, Pettersen K Y, Gravidahl J T, et al. Modeling of underwater snake robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 4540-4547.
- [5] Yang K, Wang X Y, Ge T, et al. Dynamic model of underwater snake-like robot using Kane's method[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Science*, 2014, 19(2): 146-154.
- [6] Chen J, Friesen W O, Iwasaki T. Mechanisms underlying rhythmic locomotion: Body-fluid interaction in undulatory swimming[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2011, 214(4): 561-574.
- [7] Zuo Z, Wang Z, Li B, et al. Serpentine locomotion of a snake-like robot in water environment[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 25-30.
- [8] Khalil W, Gallot G, Ibrahim O, et al. Dynamic modeling of a 3D serial eel-like robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 1270-1275.
- [9] Boyer F, Porez M, Khalil W. Macro-continuous computed torque algorithm for a three-dimensional eel-like robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(4): 763-775.
- [10] Wiens A, Nahon M. Optimally efficient swimming in hyper-redundant mechanisms: Control, design, and energy recovery[J]. *Bioinspiration Biomimetics*, 2012, 7(4): 46-61.
- [11] White F M. *Fluid mechanics*[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 2003.
- [12] Newman J. *Marine hydrodynamics*[M]. Cambridge, USA: MIT Press, 1977.
- [13] Faltinsen O M. *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [14] Fossen T I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*[M]. New York, USA: John Wiley & Sons Ltd., 2010.
- [15] Fossen T I. *Motion control systems*[M]. New York, USA: John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [16] Hensley Z D, Papavassiliou D V. Drag coefficient correction for spherical and nonspherical particles suspended in square microducts[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(25): 10465-10474.
- [17] Lee J H, Lee C W, Karlsen L, et al. Which factors strongly influence the sinking speed of a demersal longline?[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2014, 24(1): 118-134.
- [18] Boyer F, Chablat D, Lemoine P. The eel-like robot[C]//International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. San Diego, USA: ASME, 2009: 655-662.
- [19] Kelasidi E, Pettersen K Y, Gravidahl J T, et al. Modelling of underwater snake robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 500-505.
- [20] 郁树梅. 水陆两栖蛇形机器人的环境适应运动控制方法研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.  
Yu S M. Locomotion control of an amphibious snake-like robot for its environmental adaptation[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [21] 郭宪, 王明辉, 李斌, 等. 基于最小无穷范数的蛇形机器人最优力矩控制 [J]. *机器人*, 2014, 36(1): 8-13.  
Guo X, Wang M H, Li B, et al. Optimal torque control of a snake-like robot based on the minimum infinity norm[J]. *Robot*, 2014, 36(1): 8-13.
- [22] 郁树梅, 王明辉, 马书根, 等. 蛇形机器人步态产生及步态分析 [J]. *机器人*, 2011, 33(3): 371-379.  
Yu S M, Wang M H, Ma S G, et al. Gaits generation and analysis for snake like robots[J]. *Robot*, 2011, 33(3): 371-379.

## 作者简介:

- 李 立 (1988-), 男, 硕士生. 研究领域: 仿生机器人建模与仿真.
- 王明辉 (1980-), 男, 博士, 研究员. 研究领域: 机器人系统.
- 李 斌 (1963-), 男, 硕士, 研究员. 研究领域: 仿生机器人, 移动机器人, 机器人控制.