

水下蛇形机器人的滑翔运动性能研究^①

唐敬阁^{②***} 李 斌^{*} 李志强^{*} 常 健^{*}

(^{*} 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

(^{**} 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 结合水下滑翔机在海洋中的较强续航能力,以及蛇形机器人在水中的良好机动性能,研制了一种具有两者特性的新型水下滑翔蛇形机器人,它具有水下滑翔机续航时间长、航行距离远,以及水下蛇形机器人机动性强、运动灵活的运动特性。对该水下滑翔蛇形机器人的滑翔运动性能进行了试验研究。首先对水下滑翔蛇形机器人的运动原理及关节结构进行了设计分析,其次对机器人的硬件及控制系统进行了结构分析,而且根据动量定理和动量矩定理,对机器人的滑翔运动方程进行了推导,并化简到垂直平面。最后对平衡状态进行了仿真分析,对机器人的运动能力进行了试验验证。试验结果验证了水下滑翔蛇形机器人机构的有效性。

关键词 水下蛇形机器人,水下滑翔蛇形机器人,动力学建模,水下机器人

0 引 言

水下机器人可应用于河流、海洋等资源的研究、利用和开发。传统的水下机器人 AUV、ROV 等已经广泛应用于海洋作业,仿生水下机器人因有较强的运动能力也备受关注。水下滑翔机作为一种以剩余浮力驱动的新型无人水下航行器,在水下产生类似于空气中的滑翔效果,可在垂直剖面内做三角型齿状的周期运动,具有续航能力强、可在大范围内长时间连续工作等优点^[1],如 Slocum^[2]、Seaglider^[3] 和 Spray^[4],已经实际应用于海洋环境的监测与研究。然而,浮力驱动的水下滑翔机不能在海洋环境中进行掉头、转弯等操作,机动性较差。基于仿生学的水下蛇形机器人模仿了生物蛇的形态和运动方式,环境适应能力强,具有较强的运动性能^[5-7]。但是目前的水下多关节蛇形机器人都不具备远程航行能力,这大大限制了其应用。受到水下滑翔机和水下

仿生机器人的启发,本文提出了一种新概念水下滑翔蛇形机器人,它是一种结合了水下滑翔机的强续航能力的水下蛇形机器人,通过进行滑翔运动实现能量的高效利用,提高水下蛇形机器人的续航能力。可以应用于河流、湖泊中水下建筑的裂纹检测、水质监控、污染监测等任务。

目前,国内外的研究机构已经对结合了水下滑翔机与水下仿生机器人性能的新型机器人展开了研究。美国密歇根州立大学的 Zhang 等^[8,9] 基于水下滑翔机和水下机器鱼,研制了水下滑翔鱼,结构上采用了泵水装置和可移动质量块实现净浮力调节和俯仰调节,同时利用鱼尾的摆动控制旋转和运动方向。滑翔鱼可以实现滑翔运动^[9]、螺旋运动^[10,11] 以及仿鱼游动^[12]。滑翔鱼具有传统的水下滑翔机的机构特点,结构上较为复杂。中国科学院北京自动化研究所^[13] 研制的滑翔海豚机器人,可以实现三种运动方式,即快速、灵活的海豚式游动,滑翔运动以及胸鳍推进运动。浮力驱动装置位于胸腔的头部,质量

① 国家自然科学基金(61333016)资助项目。

② 女,1991 年生,博士生;研究方向:水下蛇形机器人的建模,运动及控制等;联系人,E-mail: tangjingge@sia.cn (收稿日期:2016-10-10)

变化的同时改变俯仰力矩,没有传统水下滑翔机的可移动质量块,简化了机器人内部结构。但是,机器人的尾鳍、胸鳍对机器人俯仰调节的协同作用使控制较难实现。为了降低机械系统的复杂程度,同时实现水下环境中的滑翔运动,本研究对水下滑翔蛇形机器人进行了分析,基于水下滑翔机和水下蛇形机器人的原理及特点,对滑翔蛇形机器人进行了机构设计、控制系统的搭建、运动模型的建立以及仿真实验工作。

1 水下滑翔蛇形机器人样机设计

为了实现水下滑翔蛇形机器人的滑翔运动和多步态的游动,本节对水下滑翔蛇形机器人进行关节结构设计和样机平台搭建。

1.1 关节设计

水下滑翔机依靠浮力调节机构和姿态调节机构实现滑翔运动,其中,浮力调节改变机器人的净浮力,实现机器人的上浮下潜,姿态调节改变机器人的姿态角,实现机器人不同的滑翔轨迹。与水下滑翔机相同,水下滑翔蛇形机器人不仅需要改变自身的重力或者浮力,还需要改变俯仰角度。因此,要求水下滑翔蛇形机器人的关节具有调整机器人净浮力和俯仰力矩大小的能力。

水下滑翔机的浮力调节机构通常有两种实现方式:(1)保持重量不变,改变浮力;(2)保持浮力不变,改变重量。水下滑翔蛇形机器人具有水下蛇形机器人的外形,身体长、横截面小,内部空间有限,不适合通过泵水系统改变重量来调节净浮力。所以,本文采取保持机器人重量不变,通过改变体积大小的方法改变净浮力。水下滑翔机的姿态角调节则通过质量块的运动实现,其本质是重心和浮心在轴向和径向相对位置的调节。基于沈阳自动化研究所郁树梅等研制的水下蛇形机器人“探索者”^[14],设计了机器人的可变长度的单自由度关节,该结构在改变了机器人的净浮力大小的同时产生了俯仰力矩。

图 1 为可变长度的单自由度伸缩关节,主要包括舵机、内外套筒和丝杠机构等。其中,内套筒相对舵机位置固定,舵机的输出经过丝杠机构转化为外

套筒的直线运动,内、外套筒的相对运动改变了关节的体积大小,实现了机器人的净浮力调节。同时,伸缩关节的长度变化会引起浮心和重心位置的变化,从而受到浮力、重力产生的俯仰力矩,在俯仰力矩的作用下,机器人可进行姿态调节。

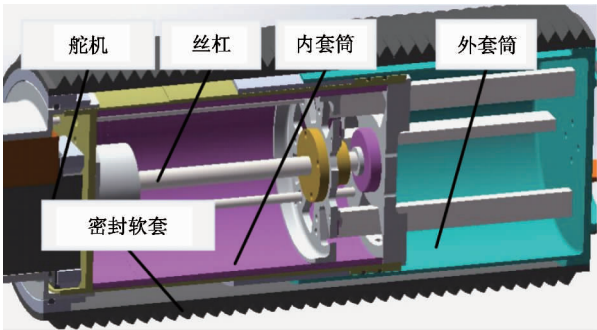


图 1 伸缩关节模块

同时,水下滑翔蛇形机器人采用了普通的二自由度关节模块(图 2),从而可进行偏航或俯仰,用于实现基本的仿蛇游动。如图 2 所示,锥齿轮 1、2 由两路舵机输出脉宽调制(PWM)波控制转动的角度,当锥齿轮 1、2 同向转动时,锥齿轮 3 可实现上下俯仰;当锥齿轮 1、2 反向转动时,锥齿轮 3 可实现左右偏航。

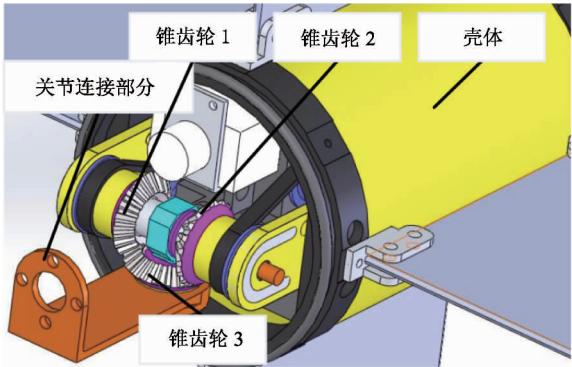


图 2 二自由度关节模块

1.2 样机设计

本文研制的水下滑翔蛇形机器人由头部、尾部、5 个普通关节和两个伸缩关节组成。为了实现机器人的滑翔运动,在机器人伸缩关节的相邻关节外壳上添加了一对梯形翼平面的机翼,用来提供升力。为了使机器人初始入水时保持中性状态,在机器人

外壳上添加了适量的配重。样机如图 3 所示,具体参数参看表 1。



图 3 水下滑翔蛇样机

表 1 水下滑翔蛇的技术参数

最小直径(mm)	73
最大直径(mm)	106
总质量(包括配重)(kg)	12.54
总长(m)	1.75
关节数量	7(5 个普通 + 2 个伸缩)

2 控制系统设计

水下滑翔蛇形机器人采用模块化设计,每个二自由度关节内部携带锂电池,为该关节的执行器提供能源,电池的输出电压为 14.8V。执行器选用舵机,每个二自由度关节内部,有两个 FutabaS3305 舵机,其输入电压为 6V,转角范围为 180°。伸缩关节模块中,有一个由 JRFROPO DS631HV 改装成的速度舵机,额定电压为 7.4V。为了保证伸缩关节的运动范围,在它的极限位置安装了限位开关。同时,伸缩关节内安装了 0kΩ ~ 10kΩ 的线电位计,以获得关节位移值。机器人头部安装了深度传感器以获得机器人的下潜深度。表 2 给出了机器人的部分硬件及控制系统参数信息。

表 2 控制系统参数

电源(输出)	锂电池(14.8V/2.9A)
控制芯片	富士通 MB90F387S
执行器	FutabaS3305 ,JRFROPO DS631HV
传感器	线电位计、深度传感器
通信协议	CAN 总线通信

控制系统的主控单元和执行单元采用了 MB90F387S 单片机,MB90F387S 内部的 PPG 定时器可以输出 PWM,其脉冲宽度直接控制 S3305 的角度、DS6311HV 的速度大小和方向。

水下滑翔蛇形机器人的运动控制系统主要包括 PC 操作端,主控板以及各个执行控制板。图 4 描述了机器人的控制系统结构,本文采用 CAN 总线串行通信,总线上共有 7 个节点,给每个节点定义不同的 ID 地址,以保证各下位机与主控板之间的点对点通信。PC 通过 ft232USB 转串口与主控板的串口连接,向主控板发送命令或者接收控制板的反馈信息并显示在 PC 端的串口调试助手的接收区;主控制板发送命令到 CAN 总线,各个执行单元识别与其节点地址相对应的指令,执行自身内部程序,计算得到关节长度或者关节角的数值,控制各个舵机的运动。传感器测量的数据由下位机控制板通过 CAN 总线反馈给主控单元。富士通单片机 MB90F387S 的 CAN 控制器可以发送接收标准格式报文或扩展格式报文,本文采用 29 位标识符的扩展格式报文结构。CAN 总线的数据传输速率采用 500kbps。控制板由 CAN 通信端口的引脚供电,电压为 5V。

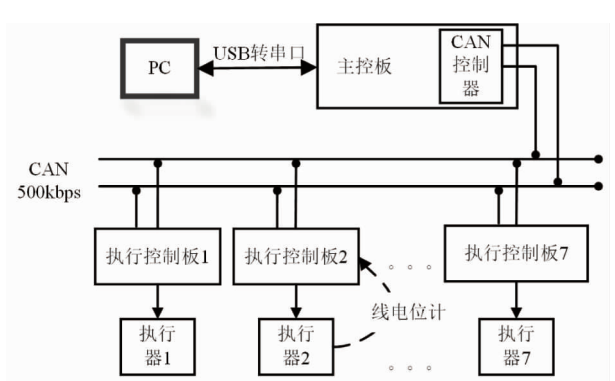


图 4 控制系统结构

3 滑翔运动建模

水下滑翔蛇形机器人可以实现水下蛇形机器人蜿蜒等运动模式,也可以进行水下滑翔机低能耗的滑翔运动,本文仅对水下滑翔蛇形机器人的滑翔运动进行运动分析。基于 Graver^[15]对水下滑翔机的建模方法,本文建立了水下滑翔蛇形机器人的滑翔

运动的动力学方程。

3.1 滑翔运动三维建模

根据文献[15]中的研究内容,本文采用动量定理和动量矩定理,对水下滑翔蛇形机器人进行了数学建模。如图5所示,假设机器人为长圆柱体,滑翔运动时不考虑二自由度关节的运动。 $O_0X_0Y_0Z_0$ 为世界坐标系, X_0 方向水平向右, Z_0 方向为重力方向,垂直向下,沿 Z_0 方向的单位向量 $\mathbf{k} = [0, 0, 1]^T$ 。体坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 位于初始状态时机器人的几何中心,坐标轴与机器人的惯性主轴重合。速度坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 的原点与体坐标系的原点重合, O_2X_2 指向速度正方向, O_2Z_2 垂直 O_2X_2 轴方向向下,如图5所示。另外,对向量 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ 和 $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ y_3]^T$,定义斜对称矩阵算子 $\hat{\cdot}$,满足等式 $\hat{\mathbf{x}}\mathbf{y} = \mathbf{x} \times \mathbf{y}$ 。

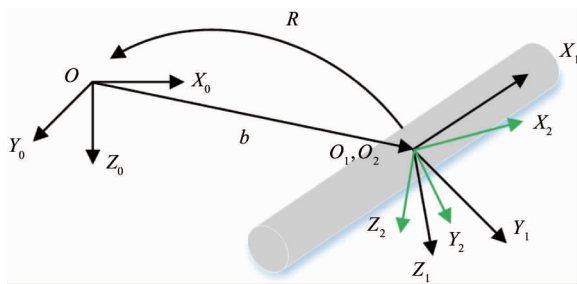


图5 机器人坐标系及位置描述

根据坐标系之间的变换规则,定义体坐标系到世界坐标系的旋转矩阵为 $\mathbf{R}$,体坐标系到速度坐标系的旋转矩阵为 $\mathbf{R}_{12}$ 。在二维垂直平面的滑翔运动中, $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{R}_{12}$ 分别是关于俯仰角 θ 和攻角 α 的 3×3 矩阵,其中, O_0X_0 轴到 O_1X_1 轴的夹角为俯仰角, O_1X_1 轴到 O_2X_2 轴的夹角为攻角。设体坐标系在世界坐标系中的位置为 $\mathbf{b}$,机器人相对于世界坐标系的运动速度和角速度在体坐标系中的表示分别为 $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{\Omega}$,则机器人的运动学模型为

$$\dot{\mathbf{b}} = \mathbf{R}\mathbf{V} \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}\hat{\mathbf{\Omega}} \quad (2)$$

机器人的总质量为 m_s ,保持不变,在水中取代的水的质量为 m ,质心和体积中心在体坐标系中分别表示为 $\mathbf{r}_B$ 和 $\mathbf{r}_C$ 。净浮力 $m_0 = m_s - m$,为质量与排水质量的差值,当 m_0 大于0时,机器人下潜;当 m_0 小于0时,机器人上浮。

考虑机器人在水中运动时的受力情况,静力学外力有重力和浮力,动力学外力有水动力(阻力、升力、水动力矩),如图6。在世界坐标系中,机器人受到的浮力和重力分别表示为 $mg\mathbf{k}$ 和 $m_s g\mathbf{k}$,分别作用在质心和浮心位置。在速度坐标系中,机器人受到的阻力、升力和水动力矩分别为 D, L 和 M_{DL} ,其中,升力和阻力作用在速度坐标系原点。

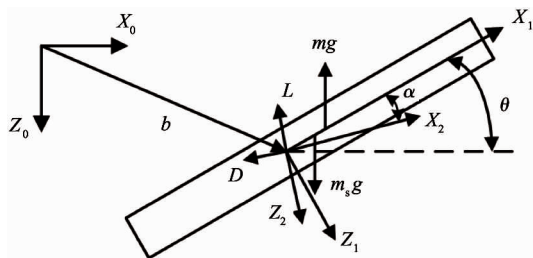


图6 机器人受力示意图

在世界坐标系中,机器人的动量和动量矩分别为 $\mathbf{p}$ 和 $\mathbf{h}$,根据动量定理和动量矩定理,容易得到等式

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \sum \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (3)$$

$$\frac{d\mathbf{h}}{dt} = \sum \mathbf{x} \times \mathbf{f}_{\text{ext}} + \sum \boldsymbol{\tau}_{\text{ext}} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{f}_{\text{ext}}$ 表示世界坐标系中作用在机器人上的外力, $\mathbf{x}$ 表示 $\mathbf{f}_{\text{ext}}$ 在世界坐标系中的作用位置, $\boldsymbol{\tau}_{\text{ext}}$ 表示世界坐标系中作用在机器人上的外力矩。世界坐标系中表示的动量和动量矩在体坐标中分别用 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{H}$ 表示,根据坐标变换关系,有 $\mathbf{p} = \mathbf{R}\mathbf{P}$, $\mathbf{h} = \mathbf{R}\mathbf{H} + \mathbf{b} \times (\mathbf{R}\mathbf{P})$,带入到式(3)(4)中,得到

$$\frac{d(\mathbf{R}\mathbf{P})}{dt} = \sum \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (5)$$

$$\frac{d(\mathbf{R}\mathbf{H} + \mathbf{b} \times (\mathbf{R}\mathbf{P}))}{dt} = \sum (\mathbf{x} \times \mathbf{f}_{\text{ext}}) + \sum \boldsymbol{\tau}_{\text{ext}} \quad (6)$$

根据定义的算子 $\hat{\cdot}$,对于 $\mathbf{\Omega}$ 、 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{H}$,满足 $\hat{\mathbf{\Omega}}\mathbf{P} = \mathbf{\Omega} \times \mathbf{P}$, $\hat{\mathbf{\Omega}}\mathbf{H} = \mathbf{\Omega} \times \mathbf{H}$,带入到式(5)(6)中并化简,得到

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{P} \times \mathbf{\Omega} + \mathbf{R}^T \sum \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{H}} = & \mathbf{H} \times \mathbf{\Omega} + \mathbf{P} \times \mathbf{V} + \mathbf{R}^T \left(\sum (\mathbf{x} - \mathbf{b}) \times \mathbf{f}_{\text{ext}} \right) \\ & + \mathbf{R}^T \sum \boldsymbol{\tau}_{\text{ext}} \end{aligned} \quad (8)$$

在体坐标系中,水下滑翔蛇形机器人的动量为 $\mathbf{P} = \mathbf{M}\mathbf{V}$, 角动量为 $\mathbf{H} = \mathbf{J}\boldsymbol{\Omega}$, 其中, $\mathbf{M}$ 为固定质量和附加质量共同产生的惯性矩阵, $\mathbf{J}$ 为固定质量和附加质量共同作用产生的转动惯量。由于机器人的惯性主轴为机器人的体坐标系, 所以 $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{J}$ 为 3×3 对角线矩阵, 定义对角线元素分别为 M_1, M_2, M_3 和 J_1, J_2, J_3 。

根据机器人受到的重力、浮力以及水动力, 式(7)(8)转化为

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{M}\mathbf{V} \times \boldsymbol{\Omega} + (m_s - m)\mathbf{g}\mathbf{R}^T\mathbf{k} + \mathbf{F}_{\text{hydro}}) \quad (9)$$

$$\dot{\boldsymbol{\Omega}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{J}\boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{M}\mathbf{V} \times \mathbf{V} + m\mathbf{g}\mathbf{R}^T\hat{\mathbf{r}}_B\mathbf{k} - m_s\mathbf{g}\mathbf{R}^T\hat{\mathbf{r}}_G\mathbf{k} + \mathbf{T}_{\text{hydro}}) \quad (10)$$

其中, $\mathbf{F}_{\text{hydro}}$ 为流体对机器人的水动力在体坐标系中的表示, $\mathbf{T}_{\text{hydro}}$ 为水动力产生的流体力矩在体坐标系中的表示。

3.2 水动力模型

机器人在水中运动时, 受到水的作用力和力矩。在垂直平面, 水下滑翔蛇形机器人的运动受到水环境的作用, 包括与速度方向相反的阻力 D 、垂直于速度方向的升力 L 以及水动力力矩 M_{DL} , 其中 D, L 为速度坐标系中的表示。在体坐标系中, 机器人受到的水动力和力矩为 $\mathbf{F}_{\text{hydro}} = \mathbf{R}_{12}^T[-D \ 0 \ -L]^T$, $\mathbf{T}_{\text{hydro}} = \mathbf{R}_{12}^T[0 \ M_{\text{DL}} \ 0]^T$ 。

根据已有的研究结果^[16,17], 水动力和水动力矩是与运动速度、攻角等有关的函数, 本文采用以下的表达式:

$$D = (K_{D0} + K_D^\alpha \alpha^2)(v_1^2 + v_3^2) \quad (11)$$

$$L = (K_{L0} + K_L^\alpha \alpha)(v_1^2 + v_3^2) \quad (12)$$

$$M_{\text{DL}} = (K_{\text{DL}} + K_{\text{DL}}^\alpha \alpha)(v_1^2 + v_3^2) \quad (13)$$

其中, $K_{D0}, K_D^\alpha, K_{L0}, K_L^\alpha, K_{\text{DL}}$ 和 K_{DL}^α 是与机器人外形等因素有关的水动力系数。一般地, K_{L0} 为 0 或较小的正实数, $K_{D0}, K_D^\alpha, K_L^\alpha$ 为正值, K_{DL}^α 为负值, K_{DL} 可正可负。 v_1, v_3 分别为机器人在水平方向和垂直方向的运动速度。

3.3 垂直平面模型

本文考虑水下滑翔蛇形机器人在垂直平面的滑翔运动, 该机器人结构关于 XOZ 平面对称, 假设其重心和几何中心在机器人主轴线上, 那么在 XOZ 平

面上, 有:

$$\mathbf{k} = [0 \ 0 \ 1]^T, \mathbf{b} = [x \ 0 \ z]^T, \mathbf{V} = [v_1 \ 0 \ v_3]^T,$$

$$\boldsymbol{\Omega} = [0 \ \Omega_2 \ 0]^T, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{12} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}。$$

根据伸缩关节的变化的分析结果, 由于初始时浮心、重心与体坐标系的原点重合, 所以运动过程中浮心、重心的位置随关节伸长量的变化量即为体坐标系中的坐标位置: $\mathbf{r}_B = [\Delta x_B \ 0 \ 0]^T$, $\mathbf{r}_G = [\Delta x_G \ 0 \ 0]^T$ 。

根据机器人的运动学和动力学方程, 把上述参数带入到机器人的三维运动方程中, 得到垂直平面的滑翔运动模型为

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \Omega_2 \\ \dot{v}_1 = \frac{1}{M_1}[-M_3 v_3 \Omega_2 - m_0 g \sin\theta + L \sin\alpha - D \cos\alpha] \\ \dot{v}_3 = \frac{1}{M_3}[M_1 v_1 \Omega_2 + m_0 g \cos\theta - L \cos\alpha - D \sin\alpha] \\ \Omega_2 = \frac{1}{J_2}[(M_3 - M_1)v_1 v_3 + (m \Delta x_B - m_s \Delta x_G)g \cos\theta + M_{\text{DL}}] \end{cases} \quad (14)$$

根据上述模型可知, 机器人在垂直平面的运动方程是非线性的, 我们首先求解水下滑翔蛇形机器人的平衡滑翔状态, 对平衡状态进行分析。当机器人系统处于平衡状态时, 速度和俯仰角为常数, 加速度、角速度以及角加速度均为零, 由 $\Omega_2 = \dot{\Omega}_2 = 0, \dot{v}_1 = \dot{v}_3 = 0$ 得到稳定运动方程:

$$\begin{cases} 0 = -m_0 g \sin\theta + L \sin\alpha - D \cos\alpha \\ 0 = m_0 g \cos\theta - L \cos\alpha - D \sin\alpha \\ 0 = (M_3 - M_1)v_1 v_3 + (m \Delta x_B - m_s \Delta x_G)g \cos\theta + M_{\text{DL}} \end{cases} \quad (15)$$

求解水下滑翔蛇形机器人的稳定运动方程, 得到攻角、俯仰角和滑翔速度方程为

$$\begin{aligned} 0 = & (m \Delta x_B - m_s \Delta x_G)[(K_{D0} + K_D^\alpha \alpha^2) \sin\alpha \\ & + (K_{L0} + K_L^\alpha \alpha) \cos\alpha] + m_0 (K_{\text{DL}} + K_{\text{DL}}^\alpha \alpha) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\tan(\theta) = \frac{L\sin(\alpha) - D\cos(\alpha)}{L\cos(\alpha) + D\sin(\alpha)} \tag{17}$$

$$v = \frac{|m_0|g}{\sqrt{(K_{l0} + K_L^\alpha)^2 + (K_{D0} + K_D^\alpha)^2}} \tag{18}$$

本文用 v 表示向量 $\mathbf{V}$ 的模,即机器人的滑翔速度。状态变量 α 是 l_1 、 l_2 的函数, θ 、 v 均与 α 、水动力系数有关,而 v 还受到 m_0 的影响。 l_1 、 l_2 分别为可变关节的长度,是系统的控制量。

3.4 关节机构模型

机器人关节的直线运动引起了重心、浮心位置的变化,从而产生俯仰力矩。机器人的两端分别有一个伸缩关节,如图 7 所示。质心在坐标系中的位置为 x_1 、 x_2 , 初始位置表示为 x_{10} 、 x_{20} , 伸长量分别表示为 $2\Delta l_1$ 、 $2\Delta l_2$, 质量分别为 m_1 、 m_2 , 初始状态机器人的体积为 Q , 则净浮力(即负的浮力增量)为

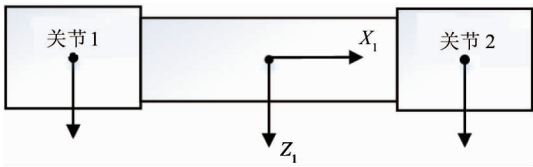


图 7 关节位置示意图

$$m_0 = -2\rho_{\text{水}}s(\Delta l_1 + \Delta l_2) \tag{19}$$

重心位置变化量为

$$\Delta x_G = \frac{-m_1\Delta l_1 + m_2\Delta l_2}{m_s} \tag{20}$$

浮心位置变化量为

$$\begin{aligned} \Delta x_B &= \frac{\sum(q_{i0} + \Delta q_i)x_i}{Q + \sum\Delta q_i} - \frac{\sum q_{i0}x_{i0}}{Q} \\ &= \frac{2s\Delta l_1(x_{10} - \Delta l_1) + 2s\Delta l_2(x_{20} + \Delta l_2)}{Q + 2s(\Delta l_1 + \Delta l_2)} \end{aligned} \tag{21}$$

其中 s 为关节的截面积。

4 仿真分析与实验分析

4.1 仿真分析

采用 Matlab 仿真软件中的 solve 函数对机器人平衡状态的攻角、滑翔角和滑翔速度进行求解分析, 设置仿真参数为: $g = 9.8$, $k_{D0} = 0.46511$, $k_D^\alpha =$

17.03, $k_{l0} = 0.062988$, $k_L^\alpha = 18.68^{[9]}$ 。

式(17)给出了水下滑翔蛇形机器人在垂直平面运动过程中俯仰角 θ 与攻角 α 的关系,且 θ 仅与攻角和升力、阻力系数有关,与系统控制变量、机器人运动速度等无关。水下滑翔蛇形机器人的滑翔角(定义机器人运动方向与水平方向的夹角为滑翔角)为 $\theta_g = \theta - \alpha$ 。图 8 中,实线表示俯仰角的变化,虚线为滑翔角的变化曲线,忽略攻角为 0° 附近时的突变, θ 和 θ_g 随 α 的增大而增大,当 α 大于 2° 或者小于 -2° 时, θ 变化缓慢。

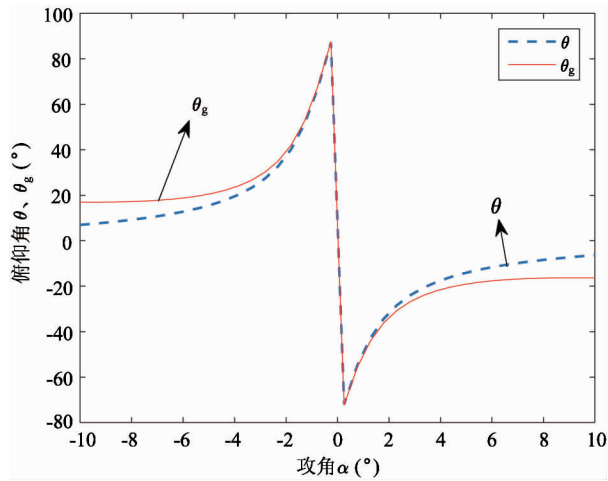


图 8 θ 随 α 的变化关系

由式(18)可以看出, α 和 m_0 决定了机器人的运动速度。图 9、图 10 给出了速度与 α 、 m_0 的变化关系。图 9 描述了平衡状态下 m_0 为 0.01kg、0.015kg 和

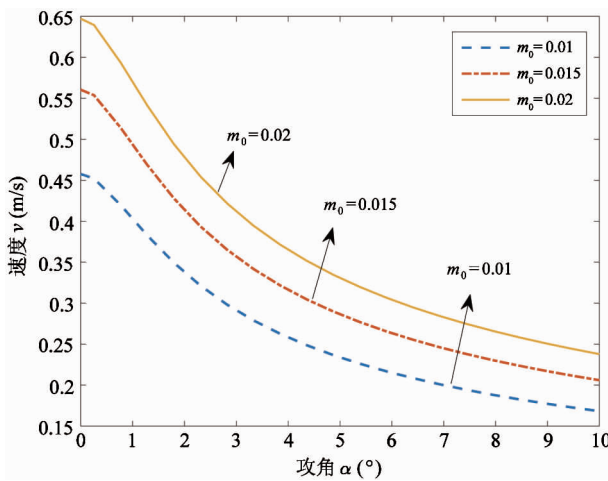


图 9 滑翔速度随 $\alpha(0^\circ \sim 10^\circ)$ 的变化

0.02kg时的滑翔速度, m_0 不变时,运动速度随 α 的减小逐渐增大; α 不变时,滑翔(下潜)速度随 m_0 的增大而增大。当攻角 α 约为 5° 、 m_0 为0.015kg时,机器人上浮滑翔速度约为0.28m/s,适当减小攻角或者增大 m_0 ,将会提高机器人的运动(下潜)速度。

图 10 描述了平衡状态下 m_0 为 -0.01kg 、 -0.015kg 和 -0.02kg 时的速度, m_0 为定值时,速度随 α 绝对值的减小逐渐增大; α 不变时,滑翔速度随 m_0 绝对值的增大而增大。适当增大攻角或者减小 m_0 ,也将一定程度上提高机器人的滑翔(上浮)速度。

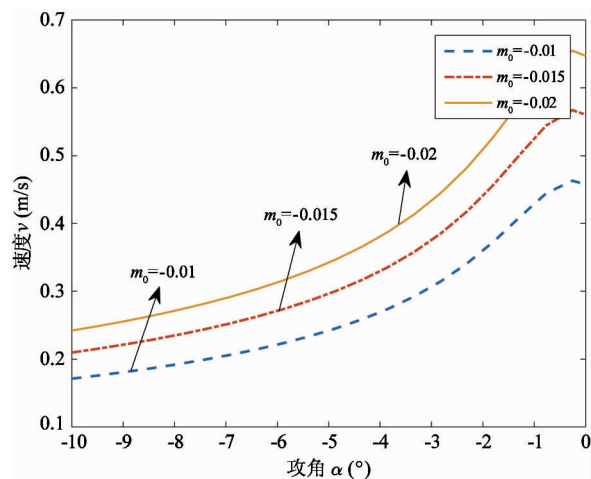


图 10 滑翔速度随 α ($-10^\circ \sim 0^\circ$) 的变化

4.2 试验验证

为了验证结构的合理性与正确性,以及机器人的运动能力,本节对研制的水下滑翔蛇形机器人样机进行水下试验,试验环境为 10m 深的水池。试验验证之前,在 0.5m 和 10m 水池中先后进行了机器人的防水测试和多次配重的调整,保证其入水后的安全性和中性状态。

首先验证关节结构的有效性。在电脑端通过串口调试助手向主控板发送指令,通过 CAN 总线通信控制伸缩关节以 2mm/s 的速度改变长度,如图 11 所示,方框中的部分为两个伸缩关节模块,左侧关节逐渐伸长至最大行程,右侧关节逐渐缩短至最小行程。该调节过程中,机器人初始时变化缓慢,右侧慢慢产生了负的俯仰角,并随着时间的增加而增大。再次试验,改变关节的伸缩方向,则机器人的左侧慢慢下潜。由此证明,该伸缩机构能够实现机器人的

俯仰姿态的调节和控制。

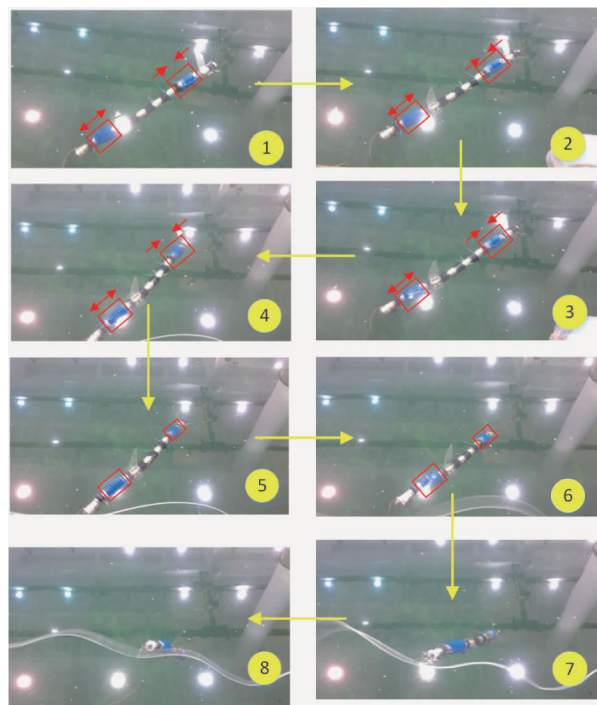


图 11 滑翔运动

其次验证机器人的滑翔运动。机器人以某种方式改变俯仰姿态的同时,本体在水流的作用下以缓慢的速度向前运动。根据试验观察,当俯仰角超过一定角度时(大约为 -45°)时,机器人就会以很快的速度改变俯仰姿态,出现失速的现象,如图 11 所示。因为该试验中,没有采取一定的控制策略,所以整个过程中出现的短时间的滑翔运动可以证明该机器人具有一定的滑翔运动能力。

5 结论

本研究利用水下滑翔机工作时长、运动范围大的特点,以及水下蛇形机器人运动灵活的性能,设计了一种具备二者优点的水下滑翔蛇形机器人,并对其滑翔运动能力进行了试验研究。分析了水下滑翔蛇形机器人的关节内部的硬件结构和控制系统;基于 Graver 对水下滑翔机的建模,对机器人的运动方程进行推导;对水下滑翔蛇形机器人稳定运动状态下的攻角和速度进行仿真分析,并通过试验对机器人的姿态调节能力和滑翔运动进行了验证。试验表明,该机器人具有一定的滑翔运动能力。

对水下滑翔蛇形机器人的研究还存在较多问题,比如机器人的姿态角的控制、关节运动量的控制等。在未来的工作中,将进一步完善现有工作中存在的不足和缺点,并开始更深入的研究工作。

参考文献

[1] 温浩然,魏纳新,刘飞. 水下滑翔机的研究现状与面临的挑战. 船舶工程, 2015, 37 (1): 1-6

[2] Webb D C, Simonetti P J, Jones C P. SLOCUM: An underwater glider propelled by environmental energy. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26 (4): 447-452

[3] Eriksen C C, Osse T J, Light R D, et al. Seaglider: along-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26 (4): 424-436

[4] Sherman J, Davis R E, Owens W B, et al. The autonomous underwater glider “spray”. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26 (4): 437-446

[5] 郁树梅,马书根,李斌等. 水陆两栖蛇形机器人的上浮和下潜步态研究. 仪器仪表学报, 2011, 32 (1): 276-279

[6] 郁树梅,王明辉,马书根等. 水陆两栖蛇形机器人的研制及其陆地和水下步态. 机械工程学报, 2012, 48 (9): 18-25

[7] 李立,王明辉,李斌等. 蛇形机器人水下3D运动建模与仿真. 机器人, 2015, 37 (3): 336-342

[8] Zhang F T, Thon J, Thon C, et al. Miniature underwater glider: design and experimental results. *IEEE-Asme Transactions on Mechatronics*, 2014, 19 (1): 394-399

[9] Zhang F T, Thon J, Thon C, et al. Miniature underwater glider: design, modeling, and experimental results, In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on

Robotics and Automation, Saint Paul, USA, 2012. 4904-4910

[10] Zhang F T, Zhang F, Tan X. Steady spiraling motion of gliding robotic fish. In: Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Algarve, Portugal, 2012. 1754-1759

[11] Zhang F, Zhang F, Tan X. Tail-enabled spiraling maneuver for gliding robotic fish. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2014, 136 (4): 041028

[12] Zhang F T, Tan X B. Gliding robotic fish and its tail-enabled yaw motion stabilization using sliding mode control. In: Proceedings of the ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference, Palo Alto, USA, 2013. V002T32A006

[13] Zhengxing W, Junzhi Y, Jun Y, et al. Mechatronic design and implementation of a novel gliding robotic dolphin. In: Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Zhuhai, China, 2015. 267-272

[14] Li B, Yu S, Ma S G, et al. An amphibious snake-like robot with novel gaits on ground and in water. In: Proceedings of the IASTED International Conference on Intelligent Systems and Control, Cambridge, UK, 2011. 100-105

[15] Graver J, Leonard N E. Underwater glider dynamics and control. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, Durham, USA, 2001. 1742-1710

[16] Leonard N E, Graver J G. Model-based feedback control of autonomous underwater gliders. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26 (4): 633-645

[17] Bhatta P, Leonard N E. Nonlinear gliding stability and control for vehicles with hydrodynamic forcing. *Automatica*, 2008, 44(5): 1240-1250

Research on the gliding performance of underwater snake-like robots

Tang Jingge^{***}, Li Bin^{*}, Li Zhiqiang^{*}, Chang Jian^{*}

(^{*} State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(^{**} University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

By adopting underwater gliders' strong endurance in ocean, and snake-like robots' good maneuverability in water, a novel underwater gliding snake-like robot was developed, which has the motion performances of strong endurance and long range, as well as the good mobility and flexibility. The gliding motion performance of the designed underwater gliding snake-like robot was studied. First of all, the motion mechanism and joint structure of the robot were analyzed in the perspective of design. Secondly, the hardware and control system of the robot were structurally analyzed. The gliding motion equations of the robot were derived based on the theorem of momentum and moment of momentum, and they were simplified to a vertical plane. Finally, the simulation analysis of the equilibrium state was carried out, and the experimental verification to the movement ability was conducted. The experimental results demonstrate the effectiveness of the mechanism of the underwater gliding snake-like robot.

Key words: underwater snake-like robot, underwater gliding snake-like robot, dynamic modeling, underwater robot